

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

TESI DI LAUREA IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

**ANALISI DEI RADARGRAMMI SHARAD PER
STUDI SOTTOSUPERFICIALI DEL POLO NORD
DI MARTE**

RELATORE

Prof. A.Moccia

CANDIDATO

Gaetano Abbate

Matr. 347/902

CORRELATORE

Dott.ssa S.Mattei

Ing. C.Papa

ANNO ACCADEMICO 2008/2009

INDICE

INTRODUZIONE	4
1. LA MISSIONE MARS RECONNAISSANCE ORBITER ED IL RADAR ITALIANO SHARAD.	9
1.1 INTRODUZIONE ALLA MISSIONE.....	9
1.2 DESCRIZIONE DELLA MISSIONE	13
1.2.1 FASI DI LANCIO: CARATTERISTICHE DEL LANCIATORE E DELL'ORBITER.....	14
1.2.2 FASE DI CROCIERA E L'IMMISSIONE IN ORBITA MARZIANA..	18
1.2.3 MANOVRA DI AEROBRAKING	23
1.3 GLI STRUMENTI DI M.R.O.....	26
1.5 SHALLOW RADAR (SHARAD): ANALISI DEL SISTEMA E OBIETTIVI DI MISSIONE.	31
1.6 HARDWARE DEL RADAR.....	34
1.7 FUNZIONI DI COMANDO E CONTROLLO DELLO SHARAD: ORGANIZZAZIONE E GESTIONE DELLA FASE OPERATIVA.....	37
1.8 FASE DI RICEZIONE DI SHARAD: SCELTA DELLA PRF E DEL TRACKING.....	39
2. DESCRIZIONE DEI DATI SHARAD DI LIVELLO L1.B	42
2.1 INTRODUZIONE	42
2.2 MISSIONE MARS GLOBAL SURVEYOR ED IL LASER ALTIMETRO M.O.L.A.....	43
2.3 GESTIONE DEI DATI SHARAD: DAL FORMATO EDR AL FORMATO RDR	46
2.3.1 IL FORMATO MARS RECONNAISSANCE ORBITER SHARAD EXPERIMENT DATA RECORD (EDR).....	47

2.3.2 IL FORMATO REDUCED DATA RECORD (RDR) ED IL TOOL LEVEL 1B DEL CO.Ri.S.T.A	50
2.4 RANGE PROCESSING	52
2.5 DOPPLER COMPRESSION.....	56
2.6 COMPENSAZIONE DEGLI EFFETTI DELLA IONOSFERA MARZIANA.....	62
2.7 OUTPUT DEL FORMATO RDR: FILE DI TIPO .DAT E .LBL	63
3. METODI DI RILEVAZIONE DELLE SOTTOSUPERFICI.....	71
3.1 INTRODUZIONE	71
3.2 NORTH POLAR LAYERED DEPOSITS	73
3.3 PROBLEMATICHE RISCONTRATE IN FASE DI ANALISI	77
3.4 INDIVIDUAZIONE DEL RANGE DI PERMITTIVITA' UTILIZZATI	83
3.5 ALGORITMO PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE SOTTOSUPERFICI. ..	91
4. SOFTWARE REALIZZATO E RISULTATI OTTENUTI.....	99
4.1 INTRODUZIONE	99
4.2 PROGRAMMA PER LA VISUALIZZAZIONE DELLA SOTTOSUPERFICIE MARZIANA.....	100
4.2 CRITERI DI SCELTA DELLE ORBITE SHARAD.	106
4.3 RISULTATI NELLA ZONA GEMINA LINGULA.....	108
4.4 RISULTATI NELLA ZONA BOREALIS SCAPULI.	120
5. CONCLUSIONI.....	123
6. LISTA DEGLI ACRONIMI	125
7. BIBLIOGRAFIA.....	127

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1	Rappresentazione digitale del Mars Reconnaissance Orbiter in configurazione nominale.	9
Figura 1.2	Immagine del lanciatore Atlas V-401 diviso nei suoi vari componenti.....	15
Figura 1.3	schematizzazione delle varie fasi del lancio con le relative durate in secondi fino al rilascio del satellite.....	17
Figura 1.4	L'immagine a fianco riassume le manovre correttive eseguite dal satellite (T.C.Ms) durante il suo viaggio verso Marte.....	19
Figura 1.5	Immagine simulata delle orbite dello SHARAD durante la fase di Aerobraking.....	23
Figura 1.6	Immagine del M.R.O con le indicazioni di posizionamento dei suoi strumenti scientifici.....	26
Figura 1.7	Immagine dell'antenna di SHARAD durante la fase di spiegamento....	31
Figura 1.8	Immagine del posizionamento della finestra di ascolto del radar.....	40
Figura 1.9	Schema delle operazioni necessarie per il calcolo della finestra di ascolto dello strumento in modalità open-loop tracking.....	41
Figura 2.1	Immagine del M.O.L.A in fase di assemblamento nei laboratori di Goddard.....	44
Figura 2.2	Immagine completa del profilo altimetrico di Marte ricavata dal M.O.L.A	44
Figura 2.3	Schema del funzionamento dei comandi controllato tramite l'OST.....	48
Figura 2.4	Queste figure mostrano (a sinistra) un generico segnale modulato in frequenza (nello specifico con un andamento crescente) ed a destra il suo andamento ottenuto a valle della compressione.....	54
Figura 2.5	Immagine del lobo principale di ampiezza $1/B$ della funzione sinc.....	55
Figura 2.6	Geometria di osservazione per il caso esaminato.....	57
Figura 3.1	Radargramma di SHARAD dall'orbita 5192.....	75
Figura 3.2	Radargramma di SHARAD dell'orbita 5220.....	76
Figura 3.3	Possibili andamenti di costante dielettrica complessiva del suolo al variare della profondità ottenuto in base ai valori di percentuale di intrusione e costanti dielettriche scelte.....	87
Figura 3.4	Diagramma di due diversi radargrammi ottenuti con l'ausilio di un simulatore di segnali SHARAD.....	89
Figura 3.5	Grafico dell'andamento del valore di costante dielettrica complessiva del suolo marziano come funzione della percentuale di intrusione di polveri di vari materiali all'interno della matrice formata prevalentemente da ghiaccio.....	90
Figura 3.6	Operazioni eseguite dall'algoritmo di ricerca delle sottosuperfici implementato.	92
Figura 3.7	Radargramma estratto dall'orbita 0622002. Il ritorno della sottosuperficie appare in questo caso chiaro e facilmente individuabile.....	93

Figura 3.8	Radargramma estratto dall'orbita 0677402. In questo caso appare subito la difficoltà nell'individuazione del ritorno della sottosuperficie a causa del basso segnale di ritorno della Basal Unit.....	94
Figura 3.9	Immagine di una porzione dell'orbita 066202 di SHARAD con evidenziati in rosso la linea costruita tramite l'inserimento dei punti da mouse ed in ciano quella corretta rispetto ai massimi locali.....	96
Figura 4.1	Immagine del Selection_Panel con uno dei gruppi di orbite studiate visibile.	101
Figura 4.2	Il pannello per la creazione delle sottosuperfici permette di visualizzare le ground track del satellite e di scegliere le aree di indagine.....	103
Figura 4.3	Nelle due figure si può notare: un ingrandimento delle mappe polari realizzate con ben visibile la zona preselezionata per l'analisi (a sinistra). A destra il menù creato per l'inserimento dei dati.....	104
Figura 4.4	Mappa della calotta polare marziana con la sovrapposizione di tutte le ground track di SHARAD disponibili per il lavoro svolto.....	106
Figura 4.5	Immagine delle ground track di SHARAD proiettate sulla mappa del Polo Nord di Marte con le relative zone esaminate. L'area indicata con la lettera F è stata analizzata con orbite memorizzate in una diversa cartella visibili nella successiva figura.....	109
Figura 4.6	Immagini delle ground track di SHARAD relativa al secondo gruppo di orbite analizzate per la regione Gemina Lingula. Le orbite attraversanti diverse aree sono state utilizzate in entrambe i gruppi di studio.....	110
Figura 4.7	L'area indicata con la lettera A ricopre un'area di 8500 Km ² racchiusa tra l'ottantaduesimo ed ottantaquattresimo parallelo.	111
Figura 4.8	Sottosuperficie della zona indicata dalla lettera B ricoprente un'area di 2300 Km ² . La mancanza di orbite di SHARAD a latitudini superiori alla latitudini 87.3 limita la zona di analisi. Il profilo della superficie è stato ottenuto per tutte le prove dalla lettura dei dati M.O.L.A.....	111
Figura 4.9	Le due immagini mostrano la sovrapposizione dei punti individuati come appartenenti alla Basal Unit sovrapposti ai radargrammi di SHARAD delle orbite 07266 ed 06633.....	113
Figura 4.10	Il grafico riassume la procedura di controllo utilizzata all'interno del software per l'eliminazione di eventuali errori nella ricerca dei ritorni sottosuperficiali.....	114
Figura 4.11	Immagini delle zone C e D confinanti parzialmente all'altezza del parallelo 85.5°.....	115
Figura 4.12	Superficie e sottosuperficie della regione E. In questa immagine è particolarmente facile notare lo spessore costante della Basal Unit agevolato da un andamento piatto della superficie.....	116
Figura 4.13	Immagine della sottosuperficie individuata per l'area F del gruppo di zone scelte per la verifica del software.	116
Figura 4.14	Le due immagini mostrano nel dettaglio zone di confine tra le aree esaminate.....	117

Figura 4.15 L'immagine mostra le zone indicate con le lettere D ed F sovrapposte lungo il range di longitudini che si estende dal 35° al 45° meridiano.....	118
Figura 4.16 Rappresentazione tridimensionale dei radargrammi di SHARAD con la sovrapposizione dei dati individuati.....	119
Figura 4.17 Mappa del Polo Nord di Marte con evidenziate le ground track di SHARAD attraversanti la regione Boreales Scopuli analizzate.	120
Figura 4.18 Mappe tridimensionali delle zone analizzate A e B confinanti lungo il parallelo 87° e per il range di longitudini [270-300]... ..	121
Figura 4.19 Immagine della sottosuperficie individuata relativa alla zona C del gruppo di aree esaminate.....	122
Figura 4.20 Particolare del radargramma di SHARAD relativo all'orbita 08562 con la sovrapposizione dei punti individuati dal programma come identificativi del ritorno della Basal Unit.....	122

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1 La tabella riassume le varie fasi della missione M.R.O con la loro durata e le principali operazioni svolte.....	13
Tabella 1.2 La tabella riassume i principali step della fase di lancio con le relative operazioni svolte.....	16
Tabella 1.3 La tabella elenca le principali caratteristiche di funzionamento e le prestazioni raggiunte dai radar M.A.R.S.I.S e SHARAD.....	33
Tabella 2.1 Ecco riepilogate le varie voci che contribuiscono alla formazione dei nomi dei file .DAT ed .LBL.....	65
Tabella 3.1 Elenco dei principali modelli presenti in letteratura per l'individuazione del possibile range di valori della costante dielettrica per il basalto marziano.....	85
Tabella 3.1 Andamento del valore di percentuale di intrusione volumetrica v in base al valore di albedo e grandezza dei grani considerata.....	87

INTRODUZIONE

Il lavoro di tesi di seguito esposto è stato eseguito presso il centro *CO.Ri.S.T.A.* (*Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati*) di Napoli nell'ambito della missione *Mars Reconnaissance Orbiter della N.A.S.A* ed è stato focalizzato sulle attività di processamento dei dati del radar di costruzione italiano SHARAD (*Shallow Subsurface Radar*).

Il presente paragrafo è di semplice introduzione al lavoro svolto mentre ai capitoli successivi è riservato il compito di spiegare nei dettagli le varie operazioni eseguite.

Il lavoro svolto è concentrato sullo studio delle interfacce dielettriche osservate dal radar nella zona della calotta Polare Nord di Marte al fine di costruire un software in grado di ottenere i profili tridimensionali della sottosuperficie marziana in tale zona; a tale scopo verranno introdotti e trattati tutti quegli aspetti fondamentali del telerilevamento necessari alla comprensione dell'attività svolta e più nel dettaglio le problematiche relative allo studio dei radargrammi realizzati da SHARAD atti all'individuazione e geolocalizzazione dei ritorni sottosuperficiali.

La tesi è stata organizzata in quattro capitoli.

Il primo capitolo è di introduzione alla missione M.R.O (attualmente ancora in corso): dalle sue varie fasi operative, alla descrizioni dei vari apparecchi scientifici montati sull'orbiter sino all'introduzione del radar italiano SHARAD, sui cui risultati si basa il lavoro svolto.

Il secondo capitolo descrive i dati utilizzati durante il lavoro svolto; i dati raccolti da SHARAD infatti vengono analizzati e processati una volta inviati al suolo al fine di ottenere le risoluzioni attese di missione attraverso le tecniche proprie dei radar ad apertura sintetica. Il capitolo affronta le tematiche di questo processamento di dati eseguiti proprio negli ultimi anni al centro CO.Ri.S.T.A ed introduce quelli ottenuti da un altro strumento scientifico, il laser altimetro M.O.L.A che ha fornito agli scienziati della N.A.S.A il profilo altimetrico dettagliato del pianeta Marte. Questi

dati sono infatti stati utilizzati per la localizzazione della profondità delle interfacce sottosuperficiali individuate.

Il terzo capitolo affronta la parte del lavoro di tesi che si è invece concentrata sullo studio delle interfacce dielettriche registrate da SHARAD stesso: un'ampia trattazione infatti è stata svolta sulle problematiche riguardanti il ritorno di un generico segnale radar che si trova ad attraversare varie interfacce dielettriche corrispondenti a vari strati di materiali. La costruzione dei modelli di previsione del ritorno di un segnale, dipendente in massima parte dalle proprietà dielettriche del suolo che si stima potervi essere e dal livello di backscattering ipotizzato sono state affrontate basandosi sull'ampia letteratura disponibile. Lo scopo è stato quello di verificare, grazie ai modelli matematici utilizzati per lo studio dei segnali, le ipotesi su cui ormai da anni si concentrano le speranze stesse della comunità scientifica internazionale, ovvero la presenza nei primi strati sottosuperficiali marziani di enormi giacimenti di acqua in forma ghiacciata o liquida. Inoltre, sempre all'interno del terzo capitolo, verranno descritte nel dettaglio le procedure realizzate per l'individuazione e l'estrazione dei ritorni sottosuperficiali cercati e la creazione delle relative mappe. Infine all'ultimo capitolo è affidata la descrizione del software realizzato e dei risultati ottenuti con la presentazione dei grafici e della loro interpretazione.

CAPITOLO I

LA MISSIONE MARS RECONNAISSANCE ORBITER ED IL RADAR ITALIANO SHARAD.

1.1 INTRODUZIONE ALLA MISSIONE.

Mars Reconnaissance Orbiter (M.R.O) è una missione **N.A.S.A** (*National Aeronautics and Space Administration*), il cui obiettivo è l'approfondimento delle conoscenze riguardanti il pianeta Marte.

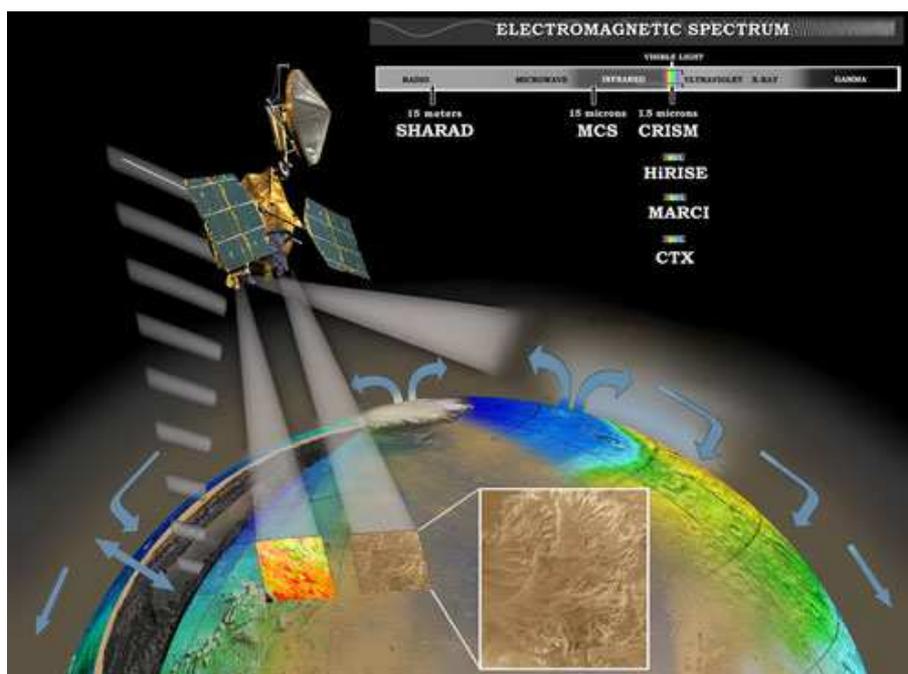


Figura 2.1 Rappresentazione digitale del Mars Reconnaissance Orbiter in configurazione nominale. [a]

Ormai da anni infatti l'interesse della comunità scientifica internazionale si è concentrato sulle esplorazioni dei pianeti del sistema solare ed in particolare modo

sul pianeta rosso, ove si spera addirittura in un futuro non più troppo lontano di poter inviare una missione umana.

Basti pensare ai risultati ed al clamore suscitato in passato dalle altre missioni internazionali con obiettivo appunto Marte: la missione *Mars Express* per quanto riguarda l'Europa ed in particolare i rover atterrati negli ultimi anni sul pianeta: *Spirit* ed *Opportunity* i cui successi sono stati ampiamente pubblicizzati.

A queste missioni, che hanno permesso un primo importante approfondimento delle conoscenze scientifiche riguardanti Marte fornendo ai specialisti dati ed informazioni di grande qualità, è seguita la missione M.R.O, che ha avuto il suo inizio nel **Agosto del 2005** con la messa in orbita del satellite.

Dopo un viaggio di circa sette mesi, e dopo sei mesi di manovre di aerobraking, atte a permettere al satellite di entrare nella sua traiettoria finale di orbita intorno al pianeta sfruttando la resistenza aerodinamica di quest'ultimo, il Mars Reconnaissance Orbiter ha iniziato la sua vera fase operativa.

La missione M.R.O è stata progettata ed eseguita a supporto della strategia di "*Inseguimento dell'acqua*" (*Following the Water*) nell'ambito del *Programma di Esplorazione Marziana (Mars Exploration Program)* della N.A.S.A.

Allo scopo di rispondere proprio agli obiettivi del programma marziano l'M.R.O è stato equipaggiato con alcuni dei più sofisticati strumenti oggi disponibili (ciò che costituisce il cosiddetto *orbiter payload*); sei sono gli apparecchi scientifici e tre sono ingegneristici che condurranno osservazioni in molte zone dello spettro elettromagnetico, includendo immagini nel visibile e nell'ultravioletto, immagini spettrali e dati radar attraverso lo strumento italiano **SHARAD** per la caratterizzazione sottosuperficiale del pianeta.

I quattro obiettivi scientifici a sostegno della strategia internazionale di ricerca sul Pianeta Rosso sono:

- **Determinare se mai è esistita vita su Marte.**



La disponibilità di acqua su Marte, presente o passata, è un indizio chiave per capire se vi è mai stata vita sul pianeta.

Dal più piccolo micro organismo a quelli più complessi, la vita come la conosciamo non potrebbe esistere senza acqua in forma liquida.

Attraverso le sue telecamere e gli spettrometri, il Mars Reconnaissance Orbiter sta cercando sulla superficie tutti quei segni tipici della presenza in passato di acqua: dai canali di deflusso ai letti di antichi fiumi, mentre attraverso SHARAD tale ricerca è concentrata nel sottosuolo del pianeta.

- **Caratterizzare il clima marziano.**



Sebbene oggi l'atmosfera di Marte sia estremamente rarefatta, in passato il pianeta più caldo avrebbe potuto permettere l'esistenza di un'atmosfera compatta ed umida.

La maggior parte dell'acqua potrebbe forse essere intrappolata nel sottosuolo marziano in forma di ghiaccio oppure liquida se in presenza

di fonti di calore (come ad esempio una sorgente vulcanica).

Il Mars Reconnaissance Orbiter sta quindi non solo cercando la presenza di acqua sotto la superficie, ma studierà anche come polveri ed eventuali tracce di acqua vengono trasportate nell'atmosfera marziana. Questa indagine, unita a quelle delle precedenti missioni, permetterà di comprendere i cambiamenti giornalieri e stagionali di Marte.

- **Caratterizzazione della Geologia di Marte.**



Uno degli scopi della missione N.A.S.A sarà la caratterizzazione dei vari strati della superficie marziana. Gli scienziati infatti vogliono comprendere come nel corso dei secoli l'azione del vento, dell'acqua e dei vulcani abbia modificato il paesaggio marziano creando una superficie, in ampie zone del pianeta a strati, la cui identificazione può fornire informazioni sui processi geologici che hanno interessato il pianeta.

- **Preparazione per future missioni umane di esplorazione.**



Grazie alle sue camere ad altissima risoluzione, il satellite è in grado di localizzare rocce della grandezza di poche decine di centimetri. Ciò permetterà la scelta dei siti di atterraggio più adatti per le prossime missioni previste con rover ed in futuro per quelle umane.

1.2 DESCRIZIONE DELLA MISSIONE

La missione Mars Reconnaissance Orbiter è stata divisa temporalmente in sei fasi: Lancio, Viaggio, Approccio ed Inserimento Orbitale, Aerobraking, Fase Scientifica, Collegamento. La sottostante tabella elenca brevemente le principali operazioni eseguite in ogni fase ed la loro durata.

Fase di missione	Durata	Descrizione
Lancio (Launch)	Diverse ore	Si estende dall'inizio del countdown fino all'acquisizione, da parte del D.S.N , dell'orbiter in una configurazione stabile.
Crociera (Cruise)	Sette mesi	Questa fase è durata dal momento dell'acquisizione iniziale da parte del D.S.N fino a due mesi prima la manovra di Inserzione in Orbita marziana (M.O.I). Durante tale fase vi è stato sia un ckeckup generale dell'orbiter e del payloads e sia una serie di piccole correzioni di orbita (TCMs).
Approccio ed Inserimento Orbitale (Approach and Orbit Insertion)	Circa due mesi	Tale fase è partita circa due mesi prima della M.O.I (Mars Orbit Insertion), è durata per tutto questo periodo fino a quando l'orbiter è stato pronto per la fase di Aerobraking.
Aerobraking		Questa fase è iniziata con la fine del M.O.I ed è terminata con l'inizio della quinta fase, quella operativa. Oltre alla manovra di Aerobraking in questo periodo sono stati eseguiti tutti i controlli e calibrazioni sugli strumenti a bordo.
Primary Phase	In corso (durata prevista circa due anni)	Attualmente in corso è la vera fase operativa del satellite con il funzionamento dei suoi vari strumenti trasportati.
Fase di ponte radio (Relay)	Circa due anni	Inizierà con la fine della precedente fase. Il satellite verrà utilizzato come ponte radio per le future missioni previste in questi anni fino alla fine del 2010.

Tabella 1.1 La tabella riassume le varie fasi della missione M.R.O con la loro durata e le principali operazioni svolte.

1.2.1 FASI DI LANCIO: CARATTERISTICHE DEL LANCIATORE E DELL'ORBITER.

Mars Reconnaissance Orbiter è stato lanciato con successo il **12 Agosto 2005 alle 7:43 AM EDT (Eastern Daylight Time) dal Launch Complex 41 al Cape Canaveral Air Force, Florida.**

Il lancio è avvenuto durante il periodo estivo dell'emisfero boreale terrestre al quale invece corrispondeva il periodo invernale su Marte sempre riferito all'emisfero settentrionale.

Il lanciatore utilizzato per portare il satellite nello spazio è stato un Atlas V-401 (sviluppato dalla Lockheed Martin Commercial Launch Services come parte del programma del U.S Air Force (EELV) Evolved Expendable Launch Vehicle), il più piccolo della famiglia di lanciatori Atlas V.

L'altezza del vettore al momento del lancio era di 57 metri mentre la sua massa era di circa 333.000 chilogrammi (corrispondente ad 733.000 pounds), di cui ben 305.000 solo di carburante. Per permettere al satellite, una volta nello spazio, di entrare nella sua orbita di viaggio verso Marte in condizioni ottimali, il lanciatore ha accelerato lo spacecraft fino alla velocità di 11 Km al secondo prima del suo distacco. La scelta su questo tipo di razzo è stata dettata dalla possibilità di ottimizzazione dei criteri di lancio in base ai requisiti richiesti dal M.R.O. Infatti sebbene i parametri geometrici dei due pianeti, Terra e Marte, permettono lanci di missioni ogni due anni, questa partita nel 2005 richiedeva maggiori prestazioni di quelle del 2003 e quelle previste per il 2007, a causa delle posizioni dei pianeti lungo le loro orbite ed inoltre lo spacecraft utilizzato era di dimensioni e pesi maggiori delle precedenti missioni di esplorazione marziana.

Il periodo di lancio del razzo era inoltre di sole tre settimane nel 2005, precisamente dal 10 al 30 Agosto, con una finestra giornaliera di soli 30 minuti.

Il lanciatore usato per M.R.O era un razzo a due stadi che non utilizzava rocket boosters solidi; tale configurazione è più semplice di un razzo a tre stadi inizialmente previsto e garantiva appunto migliori prestazioni.

I principali componenti che formavano il lanciatore sono i seguenti, riassunti graficamente nella figura 1.2:

- *Payload Adapter*: la struttura fisica utilizzata per connettere l'orbiter al veicolo di lancio.
- *Stage I Atlas Booster*: primo motore dell'Atlas con il relativo carico di carburante il cui compito è stato di accelerare il veicolo nei primi minuti fino a velocità supersoniche.
- *Payload Fairing*: la copertura protettiva per lo spacecraft durante la sua fase di ascesa.
- *Stage II Centaur Upper Stage Booster*: il secondo motore del veicolo che con due diverse fasi di accensione ha permesso al satellite di entrare nell'orbita di viaggio verso Marte.

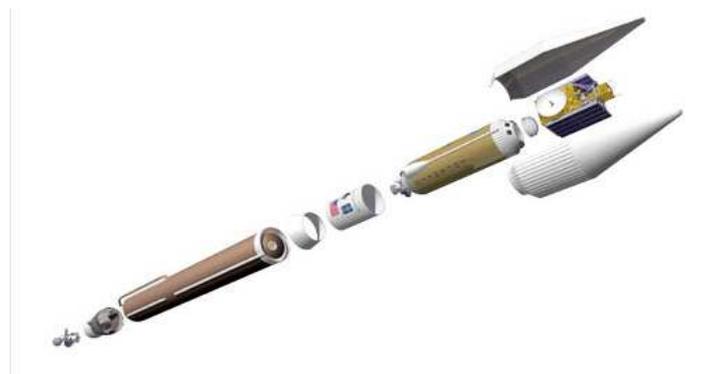


Figura 2.2 Immagine del lanciatore Atlas V-401 diviso nei suoi vari componenti. [b]

Per quello che invece riguarda il satellite vero e proprio, il Mars Reconnaissance Orbiter utilizza uno spacecraft anch'esso disegnato dalla Lockheed Martin Space System che rappresenta il più elegante, agile e produttivo orbiter marziano fin qui

realizzato; progettato avendo come primo criterio quello di agevolare la fase di Aerobraking, una delle principali fasi di missione del satellite che sfruttando la resistenza aerodinamica del pianeta marziano ha permesso al M.R.O di entrare nella sua orbita finale di lavoro.

Completamente assemblato e rifornito di propellente, il satellite non pesava più di 2.180 kilogrammi. Tutti i sottosistemi e gli strumenti a bordo (la cosiddetta “dry-mass”) pesano meno di 1.031 kilogrammi, così da permettere ai suoi serbatoi a bordo di contenere il propellente necessario, circa 1.149 Kg (2.533 pounds) per le manovre di correzione durante la fase di viaggio verso Marte e per aiutare l’entrata in orbita finale. Inoltre sia l’enorme antenna per le comunicazioni a terra ed il trasferimento dei dati e sia i pannelli solari sono stati progettati tenendo in conto la necessità di essere pieghevoli per l’alloggiamento nel veicolo lanciatore. La fase di lancio infine, come in tutte le missioni di questo genere, prevedeva alcuni step fondamentali, riassunti nella seguente tabella.

Step 1	Conto alla rovescia e controllo dei sistemi
Step 2	Partenza con il primo stadio del lanciatore che accelera fino alla velocità supersonica di 4.5 Km/s.
Step3	Spegnimento dei motori del primo stadio
Step 4	Separazione del primo stadio che ricade nell’ oceano Atlantico
Step 5	Accensione dei motori del secondo stadio
Step 6	Prima fase di accensione del motore del secondo stadio della durata di circa nove minuti e mezzo, che porta il satellite in orbita di parcheggio, ove resta (collegato al secondo stadio) per circa 33 minuti.
Step 7	Rilascio della copertura del payload, che ricade nell’ oceano Atlantico
Step 8	Spegnimento del motore principale dopo la prima fase di spinta
Step 9	Seconda fase di spinta, della durata di circa 10 minuti, che accelera il satellite fino a fuori l’orbita terrestre e lo posiziona su quella che lo condurrà verso Marte
Step 10	Separazione del motore principale del secondo stadio
Step 11	Manovra per evitare la collisione, che assicura che il secondo stadio non segua la traiettoria dell’orbiter.

Tabella 1.2 La tabella riassume i principali step della fase di lancio con le relative operazioni svolte.

Tutti i passi sopra elencati vengono considerati nel seguente grafico, ove inoltre viene riportata a partire dal momento della partenza la sequenza temporale delle varie operazioni. A questo punto la prima fase di missione (il Launch) è conclusa ed il M.R.O è entrato nella fase di crociera.

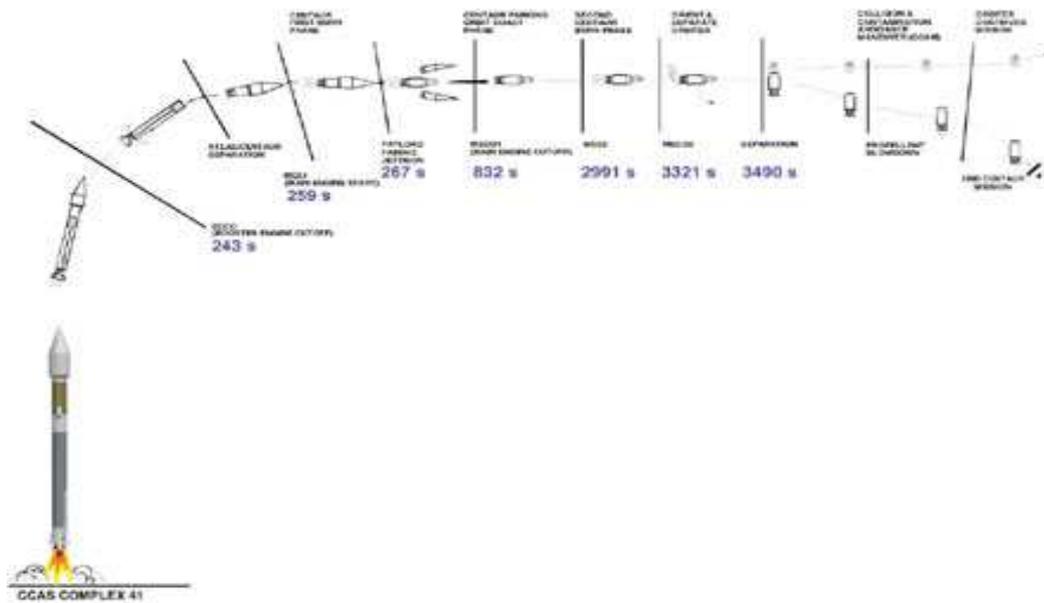


Figura 1.3 schematizzazione delle varie fasi del lancio con le relative durate in secondi fino al rilascio del satellite.[b]

1.2.2 FASE DI CROCIERA E L'IMMISSIONE IN ORBITA MARZIANA.

La fase di crociera della missione è iniziata non appena l'orbiter è entrato in una configurazione stabile e sicura dopo il lancio ed è terminata nel Marzo del 2006 con la fase di approccio, circa due mesi prima dell'inserzione nell'orbita marziana.

Questa fase della missione, con il transito del M.R.O dalla Terra verso Marte, è dunque durata circa sette mesi ed ha rappresentato per gli ingegneri della N.A.S.A un periodo comunque di intenso lavoro: non solo infatti sono stati verificati tutti i vari sottosistemi dell'orbiter (motori, antenna e girobussole) per assicurarsi del loro perfetto funzionamento ma anche tutti i vari strumenti trasportati a bordo sono stati posti sotto verifica per garantire che essi non fossero stati danneggiati in fase di lancio. Gli apparecchi sono stati sottoposti a varie calibrature, per le quali il satellite ha dovuto indicare loro bersagli conosciuti: per le macchine fotografiche così si sono utilizzate giacimenti di stelle note mentre per il radar SHARAD si sono utilizzate le onde radio provenienti da stelle pulsar.

Altre operazioni eseguite durante questa fase sono state le prime manovre di correzioni (TCM "Trajectory Correction Maneuvers") ampiamente pianificate e previste (la seconda delle quali avvenuta il 18 Novembre 2005) che hanno permesso al satellite di avere una rotta ideale per le successive manovre di entrata in orbita marziana permettendo ai tecnici della N.A.S.A addirittura di annullare la terza manovra di correzione (TMC-3) che era prevista per questo periodo della missione.

Inoltre l'orbiter ha fatto registrare un primo importante record: quello di dati trasmessi a terra in un solo giorno (l'equivalente di ben 13 CD-Rom), che hanno fornito un'idea dell'immenso potenziale del sottosistema di trasmissione, progettato per trasmettere dallo spazio lontano circa 34 Terabits di dati complessivi previsti per la missione.

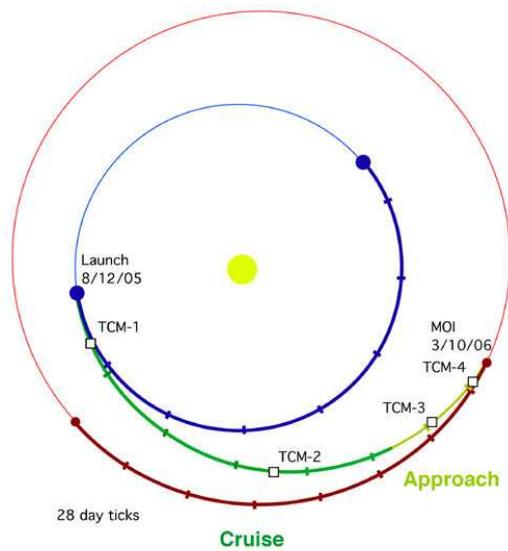


Figura 1.4 L'immagine a fianco riassume le manovre correttive eseguite dal satellite (T.C.M.s) durante il suo viaggio verso Marte. [c]

La fase di Approccio invece è iniziata l'anno successivo, precisamente il 3 Febbraio 2006 e si è conclusa con l'inizio della fase di Inserimento Orbitale avvenuta a Marzo. Durante questi giorni, tre sono state le attività svolte dal M.R.O.:

- *Misurazioni di navigazione* per determinare posizione e traiettoria del satellite.
- *Manovre finali* di correzione della traiettoria.
- Realizzazioni di test scientifici di cui il più importante è stato quello chiamato *Esperimento di navigazione ottica*.

Circa il primo punto, l'M.R.O ha utilizzato tre misurazioni diverse (corrispondenti a tre tecniche distinte) per determinare con esattezza la sua velocità, posizione e traiettoria.

Le prime due tecniche hanno consentito di stabilire con grande precisione quanto il satellite fosse lontano dalla Terra e la sua velocità: la prima in particolare, si basava sull'effetto Doppler prodotto dal segnale radio inviato dal M.R.O.

Lo scostamento Doppler è rappresentato da una variazione della frequenza di un segnale che avviene quando sorgente ed osservatore sono in moto relativo tra loro: dal calcolo di questa variazione di frequenza è possibile così risalire alla velocità della sorgente.

Il secondo metodo invece è elementare ed ha permesso di calcolare a quale distanza si trova il satellite dalla Terra: misurando semplicemente il tempo che impiega un segnale radio terrestre (di velocità pari a quella della luce) per arrivare all'orbiter.

Infine il terzo metodo è usato per determinare dove è il satellite nel cielo; nota con il nome di Delta-Differential One-Way Ranging, usa due antenne a grande distanza tra loro per raccogliere i dati provenienti da due sorgenti:

l'orbiter ed una stella di riferimento. Le due antenne raccolgono prima i dati radio inviati dal satellite per pochi minuti, poi passano a raccogliere quelli provenienti da una stella nota ed infine ritornano a monitorare il satellite. Attraverso questa tecnica è così possibile calcolare la posizione angolare e la distanza del M.R.O.



Le due antenne utilizzate appartenengono al programma **N.A.S.A Deep Space Network (DSN)**: una rete di enormi antenne posizionate sulla Terra ed utilizzate sia a supporto delle missioni spaziali interplanetarie e sia per le osservazioni astronomiche radar per l'esplorazione del Sistema Solare e dell'Universo.

Attualmente il DSN consiste di tre gruppi di antenne posizionate sul nostro pianeta alla distanza angolare di 180 gradi (precisamente a Goldstone nel deserto della California, a Madrid in Spagna nei pressi di Canberra in Australia); questa disposizione strategica permette sempre l'osservazione e le comunicazioni con l'orbiter annullando i problemi relativi alla rotazione terrestre ed aiuta il DSN ad essere il più efficiente e sensibile sistema di telecomunicazione scientifico esistente.

Proprio utilizzando i dati provenienti dalle misurazioni di posizione ed orbita si è potuto anche affrontare il secondo punto sopra elencato: un'altra manovra di correzione della traiettoria (TCM), anche questa prevista, è stata effettuata il 26 Febbraio 2006 per posizionare il satellite perfettamente sull'orbita che giorni dopo,

esattamente il 10 Marzo gli avrebbe consentito l'inserimento nell'orbita marziana, nota come Mars Orbit Insertion (M.O.I).

Infine, durante la fase di approccio sono stati eseguiti alcuni test, il più importante dei quali riguardava l'*esperimento di navigazione ottica*.

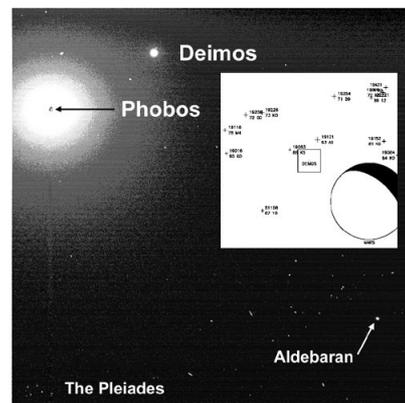
Uno dei tre strumenti ingegneristici montato sul M.R.O è infatti una piccola ma potente camera fotografica, la quale a partire da trenta e fino a due giorni prima dell'entrata del satellite nel Mars Orbit Insertion ha fornito agli ingegneri della N.A.S.A circa 500 foto delle lune di Marte: Deimos e Phobos (la maggior parte delle quali però concentrate negli ultimi otto giorni prima del M.O.I per una maggiore qualità dell'immagine).

Lo scopo dell'esperimento è stato quello di risalire alla posizione esatta del satellite nello spazio proprio utilizzando queste foto: infatti oltre alle lune marziane ogni singola immagine contiene anche come sfondo una certa quantità di stelle di posizione nota; comparando così le immagini con i dati in possesso negli archivi si è potuto stabilire l'esatta posizione del satellite e calcolare se fossero state necessarie eventuali manovre di correzione.

Visto il successo dell'esperimento si pensa di poter utilizzare nelle future missioni proprio questa tecnica come sistema di navigazione, sia per una maggiore precisione e sia perché una volta arrivati sul pianeta la camera può essere riutilizzata come una sorta di guida per eventuali rover o lander osservando ostacoli come rocce o crateri.

L'inserimento in orbita marziana (M.O.I) è avvenuto il 10 Marzo 2006 con l'arrivo del Mars Reconnaissance Orbiter vicino a Marte; i sei motori (ognuno dei quali forniva una spinta di 170 Newton) del M.R.O sono stati accesi per 27 minuti permettendo così al satellite di rallentare la sua corsa di circa 1000 metri al secondo consentendogli di essere catturato dal campo gravitazionale marziano.

Per l'esattezza erano le 2:16 p.m. (PST) quando i tecnici hanno potuto festeggiare la riuscita della manovra e cioè quando al Controllo Principale di Missione sono stati informati dal Deep Space Network che il segnale del M.R.O era stato riagganciato



non appena il satellite era riapparso sopra Marte (infatti l'orbiter era entrato nel MOI attraverso una traiettoria che transitava per l'emisfero meridionale del pianeta costringendo ad interrompere le comunicazioni per circa trenta minuti, mentre il satellite si trovava dietro il pianeta stesso).

L'orbita di "cattura" era fortemente ellittica. Il punto più vicino alla superficie del pianeta, detto *periasse*, era di circa 300 Km mentre, il punto più lontano sempre riferito alla superficie, detto *apoasse*, era a quota 45.000 Km. Su tale orbita il satellite aveva un periodo orbitale di ben 35 ore.

1.2.3 MANOVRA DI AEROBRAKING

La manovra di aerobraking è iniziata non appena completata l'inserzione nell'orbita marziana e controllato lo stato di salute del satellite.

Questo tipo di manovra sfrutta la resistenza aerodinamica dell'atmosfera marziana, agente principalmente sui pannelli solari dell'orbiter e sulla sua enorme antenna per comunicazioni, per frenare il satellite facendogli progressivamente ridurre la sua orbita fino a quella prevista per la fase scientifica.

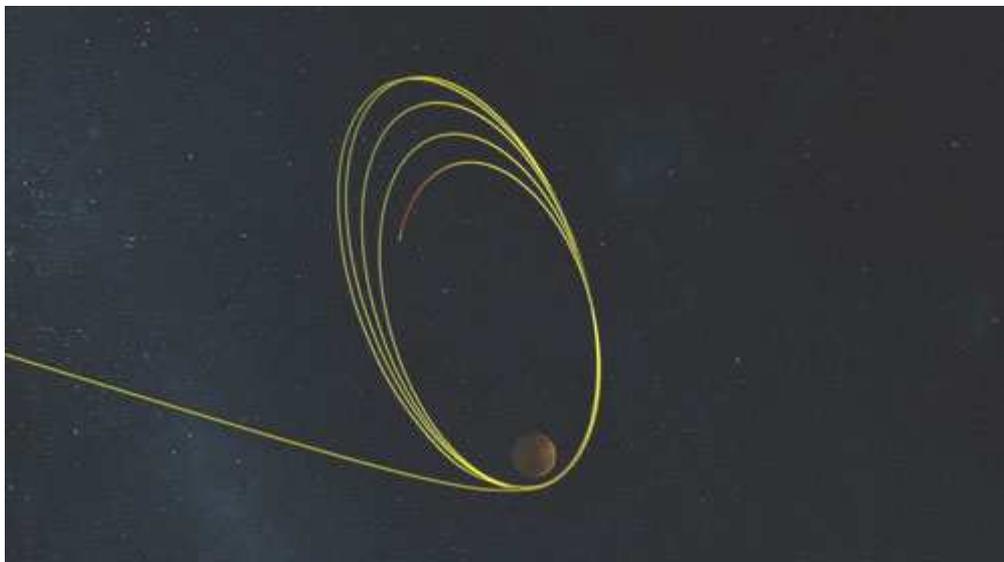


Figura 1.5 Immagine simulata delle orbite dello SHARAD durante la fase di Aerobraking. [d]

La manovra di Aerobraking del M.R.O si è suddivisa in tre fasi principali:

- *Walk-in* che è durata una settimana (equivalente a 5 orbite). In questa fase è stato comandato al satellite di abbassare la sua quota di periasse una volta ad orbita. Tale fase è stata utilizzata proprio per acquisire informazioni sull'atmosfera marziana e capire il comportamento dell'orbiter in entrata e uscita dall'aerobraking.

- *Main Phase* durata più di cinque mesi. Continua la fase di abbassamento orbitale del satellite sfruttando l'attrito aerodinamico dell'atmosfera marziana. In questa fase gli ingegneri controllano quotidianamente l'M.R.O per assicurarsi che la sua discesa rimanga all'interno di un corridoio ben definito apportando piccole modifiche con i motori ove necessario (se la quota è troppo bassa infatti vi è pericolo per l'incolumità del satellite a causa del riscaldamento aerodinamico mentre se è troppo alta la quota la discesa sarebbe troppo lenta).
- *Walk-out* che è durata circa 5 giorni. Esattamente alle 10:36 a.m. (PST) del 30 Agosto 2006 (dopo ben 445 orbite) un' accensione dei motori intermedi della durata di sei minuti ha permesso al satellite di incrementare la quota di periasse a 216 Km.

A questo punto, concluso l'Aerobraking, vi è stata un'ulteriore fase di piccole registrazioni di orbita per consentire al Mars Reconnaissance Orbiter di entrare nella sua prima orbita ottimale. La prima è stata il 6 Settembre: con un' accensione di 120 secondi la quota al periasse è stata ulteriormente innalzata portandola da 216 a 320 Km, mentre un'ulteriore piccola accensione eseguita la settimana successiva ha permesso di abbassare la quota all'apogee rendendo l'orbita più circolare.

Il satellite così, dopo un viaggio di oltre un anno, si è posizionato nella sua orbita nominale di lavoro i cui parametri principali sono:

- a) La durata dell' orbita è di circa due ore (ciò significa che il satellite percorrerà circa 12 orbite al giorno) con un perigeo di 255 Km ed un apogeo di 320.
- b) L'orientazione dell'asse dei nodi coincide con le 3 PM (± 15 minuti) del tempo locale solare medio (LMST). Ciò implica che la linea dei nodi (i nodi sono i punti in cui l'orbita del satellite interseca il piano immaginario

equatoriale marziano) sarà tale che il satellite transiterà sempre per il nodo ascendente allo stesso orario locale, in questo caso alle 3:00 P.M.

- c) Orbita eliosincrona, che quindi manterrà costante l'angolo formato dalla congiungente Sole – centro di Marte con il piano orbitale del satellite.
- d) Un raggio di periasse minimo di 3575 Km.
- e) Un raggio massimo, sempre di periasse di 3745 Km.
- f) Un raggio medio di apoasse di 3794 Km o meno (a causa delle perturbazioni gravitazionali).

L'inizio delle operazioni scientifiche è però stato posticipato agli inizi di Novembre del 2006 a causa di una congiunzione solare. In quel periodo infatti il Sole, situato tra Terra e Marte, ha ostacolato le comunicazioni con il M.R.O che è così rimasto per qualche settimana in una fase di calma operativa.

1.3 GLI STRUMENTI DI M.R.O

La missione Mars Reconnaissance Orbiter trasporta ben undici strumenti così ripartiti:

- Sei dispositivi a scopo scientifico
- Tre strumenti a scopo ingegneristico
- Due ulteriori esperimenti scientifici dedicati alla misura di alcune caratteristiche del pianeta.

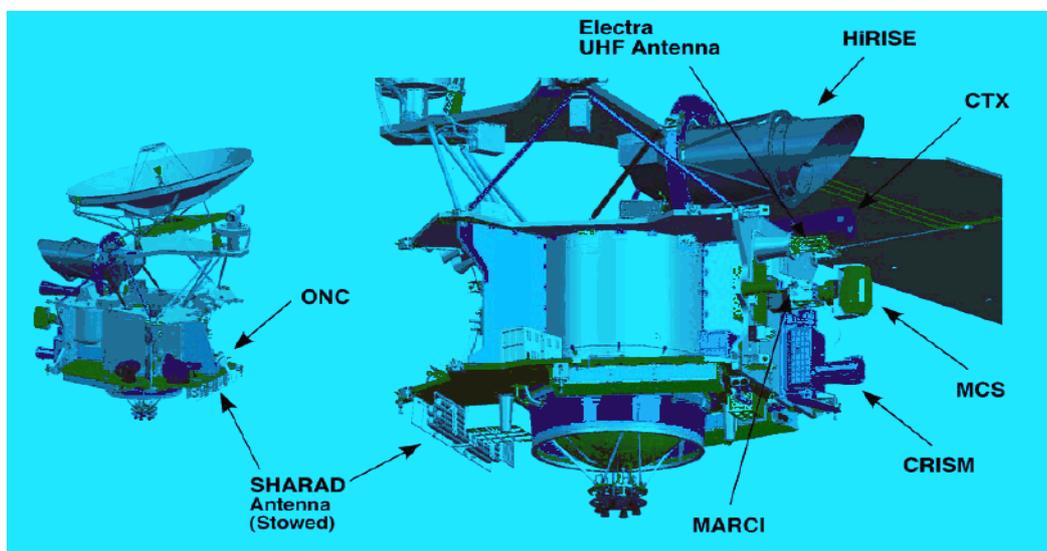


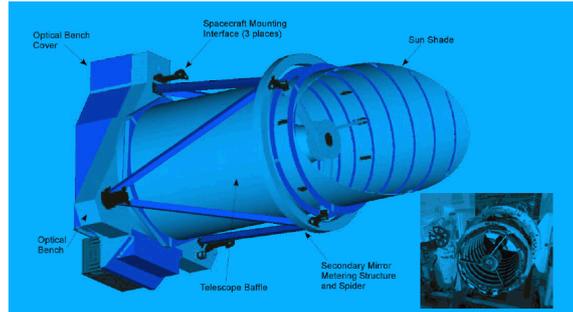
Figura 1.6 Immagine del M.R.O con le indicazioni di posizionamento dei suoi strumenti scientifici. [b]

Durante i primi anni di missione, e quindi a partire dal Novembre 2006 fino alla fine prevista nel 2008, il M.R.O condurrà otto specifici esperimenti scientifici allo scopo di raggiungere tre principali obiettivi:

- Una mappatura globale della superficie.
- Un osservazione regionale del pianeta
- Osservazioni ad alte risoluzioni del pianeta

Gli strumenti che si stanno utilizzando per questo scopo sono:

- 1) L'HIR.I.S.E (*High Resolution Imaging Science Experiment*) funziona nel campo del visibile, ma con una risoluzione senza precedenti nelle missioni interplanetarie. Grazie infatti al suo obiettivo, la camera permette agli scienziati di osservare oggetti ad un metro di risoluzione consentendo lo studio della morfologia del pianeta in un modo mai visto prima.



Inoltre questa camera effettua riprese anche nel campo delle lunghezze d'onda vicino all'infrarosso, per ottenere informazioni sui gruppi minerali presenti. Da un'altezza variabile tra i 200-400 Km dalla superficie, le immagini ad alta risoluzione dell'HIRISE permettono di caratterizzare la superficie di Marte alla ricerca dei migliori siti per future missioni umane.

- 2) La camera CTX è utilizzata per osservare anch'essa la superficie marziana, fornendo immagini ad ampio raggio ma ad una risoluzione minore rispetto ad HIRISE. In pratica, questa camera fornisce agli scienziati una vista più ampia delle varie zone osservate, così da permettere loro di avere informazioni sulle aree ove si trovano rocce e strati di minerali d'interesse scientifico su cui HIRISE deve focalizzare le osservazioni. Da un'altezza di circa 400 Km dal suolo, la CTX fornisce immagini di circa 30 Km di ampiezza con una risoluzione di 6 metri per pixel.
- 3) La terza camera a bordo dell'orbitatore, la MARCI, si occupa dello studio dell'atmosfera marziana, fornendo ai tecnici un rapporto quotidiano sul clima al fine di meglio comprendere le variazioni atmosferiche del

pianeta. Lo strumento infatti effettua sia misurazioni su 5 diverse bande del visibile al fine di osservare le tempeste e le variazioni delle concentrazioni di polvere nell'atmosfera e sia osservazioni nel campo degli ultravioletti (a due lunghezze d'onda diverse) allo scopo di osservare le variazioni di anidride carbonica ed azoto.

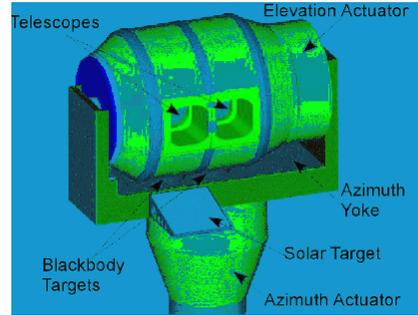
- 4) Il C.R.I.S.M (*Compact Reconnaissance Imaging Spectrometers for Mars*) è uno spettrometro ad immagine che opera dal visibile al vicino infrarosso ed ha l'obiettivo di identificare diversi minerali, in particolari quelli che si otterrebbero dalla presenza di acqua.

Lo scopo dello strumento è cioè quello di confermare le ipotesi della presenza in passato d'acqua sul pianeta; infatti anche se la conformità del terreno in alcune zone suggerisce che l'acqua scorreva in grandi quantità su Marte, la presenza di determinati strati di minerali, che si avrebbero sul suolo proprio per una tale lunga interazione, costituirebbe un'ulteriore e definitiva prova.

- 5) Il radiometro MCS (*Mars Climate Sounder*) invece, è un sounder ed osserva, in funzione della quota, la temperatura, l'umidità ed il contenuto di polveri nell'atmosfera marziana, effettuando così tutte le misure che sono necessarie per conoscere il tempo ed il clima del pianeta e prevedere le sue possibili future variazioni.

Quello montato sull'orbiter funziona su nove bande diverse dello spettro elettromagnetico comprese tra il campo del visibile e quello dell'infrarosso.

Il canale a 0.3-3.0 microns è utilizzato per capire come l'energia solare interagisce con l'atmosfera e la superficie del pianeta, aiutando gli scienziati a capire così il clima di Marte mentre, gli altri otto canali con il quale lo strumento lavora, nel range dell'infrarosso termico (12-50 microns)



viene utilizzato per misurare vapore acqueo, temperatura, pressione e polveri. L'apparecchio osserverà l'orizzonte del pianeta, al fine di osservare l'atmosfera in fasce verticali ognuna ampia circa 5 Km.

I dati raccolti saranno così elaborati quotidianamente da programmi tridimensionali, fornendo le mappe atmosferiche sia di giorno che di notte.

- 6) L'ultimo dei sei strumenti scientifici montati a bordo è proprio SHARAD (Shallow Radar), il quale è adoperato per la ricerca di strati sottosuperficiali di ghiaccio. Dello strumento si parlerà nel dettaglio nei prossimi paragrafi.

Come detto il M.R.O. trasporta anche tre strumenti a scopo ingegneristico che hanno aiutato l'orbiter in fase di navigazione e comunicazione.

1. *L'ELECTRA UHF Communications and Navigation Package* consentirà al satellite una volta terminata l'attuale fase operativa di indagine scientifica (prevista per il prossimo mese di Novembre) di operare come ponte radio per le future missioni previste sul pianeta che non abbiano la potenza sufficiente necessaria per comunicare direttamente con la Terra.
2. *L'Optical Navigation Camera* è stata utilizzata in fase di approccio al pianeta come strumento per l'esperimento di navigazione precedentemente citato, ossia come parte principale di un progetto dimostrativo sulla possibilità di

calcolare con grande precisione la posizione del satellite nella sua orbita di avvicinamento a Marte, comparando le foto scattate da questa camera alle lune marziane e alle stelle con le posizioni che queste teoricamente avrebbero dovuto avere. Grazie inoltre alla sua eccellente risoluzione verrà utilizzato anche per foto ad alta precisione della superficie marziana.

3. *Il Ka-Band Telecommunications Experiments Package.* Mars Reconnaissance Orbiter sta sperimentando l'impiego di frequenze radio nella banda Ka per dimostrarne l'efficacia in termini di comunicazioni e trasmissioni dati per le successive missioni interplanetarie. Infatti, attualmente lo standard per tali missioni è quello di utilizzare onde radio nella cosiddetta Banda-X; una Ka-Band invece è circa quattro volte più potente (32 Gigahertz contro otto) e ciò permetterebbe un *data rate* maggiore.

Infine sono presenti due ulteriori strumenti scientifici che hanno permesso nelle varie fasi di missione di effettuare misurazioni del campo gravitazionale marziano e dell'atmosfera del pianeta.

1. *Il Gravity Field Investigation Package*, che durante l'attuale fase operativa del satellite, viene utilizzato per mappare il campo gravitazionale del pianeta allo scopo di capire la geologia della superficie e i processi geofisici che producono le caratteristiche superficiali di Marte.
2. *L'Atmospheric Structure Investigation Accelerometers* utilizzati durante la fase di Aerobraking, sono stati impiegati per migliorare le conoscenze sulle caratteristiche della atmosfera marziana.

1.5 SHALLOW RADAR (SHARAD): ANALISI DEL SISTEMA E OBIETTIVI DI MISSIONE.

Shallow Radar (SHARAD) è un radar sounder realizzato dall'**Agenzia Spaziale Italiana (A.S.I)** nel quadro della missione Mars Reconnaissance Orbiter il cui scopo è l'esplorazione e la caratterizzazione degli strati sottosuperficiali della crosta marziana.

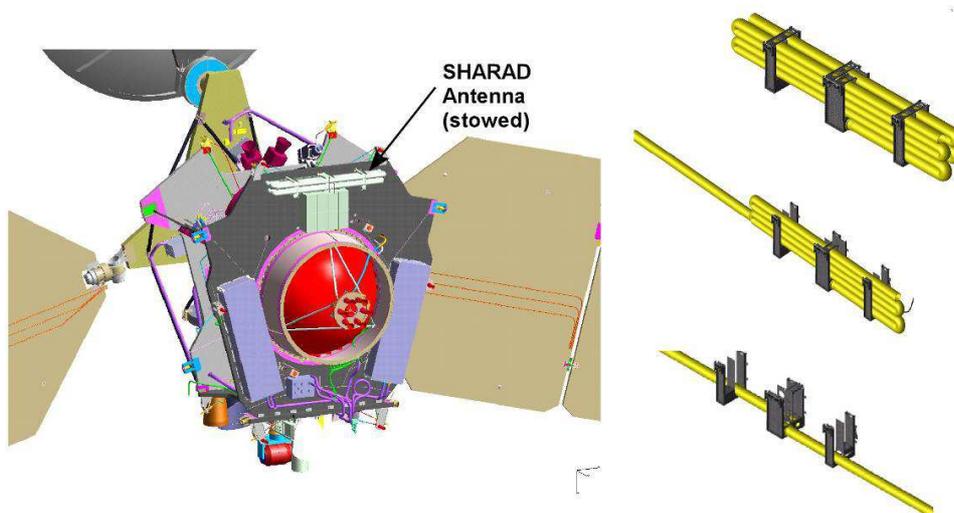


Figura 1.7 Immagine dell'antenna di SHARAD durante la fase di spiegamento. [b]

Lo scopo primario per il quale è stato realizzato SHARAD è quello di analizzare, in zone locali selezionate, le interfacce dielettriche con profondità di molte centinaia di metri e classificare questi risultati in termini di distribuzione degli strati di materiali presenti, siano essi componenti rocciosi, regolite, acqua o ghiaccio, con una risoluzione verticale di ~ 10 metri ed una orizzontale di alcune centinaia (300 m \sim 1000 m)^[1]. Entrando più nel dettaglio, gli obiettivi scientifici di SHARAD, a supporto dei quattro principali del Mars Exploration Program di cui si è già parlato sono:

- Mappatura della distribuzione di acqua e ghiaccio entro il primo chilometro di sottosuolo in determinate regioni del pianeta.
- Mappare lo spessore, l'estensione e la continuità degli strati dei depositi polari.
- Mappare lo spessore e la distribuzione degli strati sedimentari.
- Individuare eventuali canali sepolti sottosuperficiali.
- Determinare le proprietà elettromagnetiche della sottosuperficie.
- Individuare le più adatte zone del pianeta per l'atterraggio di future missioni di esplorazione in base proprio alla possibile presenza di acqua.

La ricerca di acqua sotto la superficie marziana è infatti diventata, come già accennato, uno degli obiettivi prioritari delle missioni interplanetarie. La sua presenza e distribuzione (sia come ghiaccio che in forma liquida) è di fondamentale importanza per la comprensione dei processi geologici, idrologici e climatici del pianeta; l'accessibilità a queste sorgenti inoltre è fondamentale per la pianificazione di future eventuali missioni umane.

E' per questi motivi quindi che è indispensabile conoscere la distribuzione e composizione degli strati di acqua nelle sue varie forme nel sottosuolo del pianeta con grande precisione.

La possibilità di trovare questi depositi sul pianeta nasce da diversi studi e misurazioni fatte in passato su Marte e dai dati raccolte dalle precedenti missioni.

In base osservazioni condotte sulla temperatura media superficiale annuale, sulla conduttività termica superficiale, sul flusso di calore geotermico, ed in base al valore di congelamento dell'acqua subsuperficiale, il valore medio dello spessore dello strato subsuperficiale congelato su Marte potrebbe variare dai 2.5 Km fino ai 5 Km all'equatore e dai 6.5 ai 16 Km ai poli (Clifford e Parker, 2001).

I rapporti eseguiti da Boynton, Feldman ed Mitrofanov (2002), basati sulle misurazioni eseguite dalla precedente missione N.A.S.A sul pianeta, la Mars Odyssey, sembrano confermare l'esistenza, già predetta tra gli altri da Mellon e Jakosky (1995), di grande quantità di ghiaccio subsuperficiale (come conseguenza

dell'accumulo di idrogeno) in certe zone del pianeta. La scelta di radar di tipo sounding, con intervallo di frequenza dai 15 ai 25 MHz, si è rivelata la più adatta, comparata a tutti gli altri metodi possibili, per lo studio globale ad alta precisione del sottosuolo marziano; inoltre la scelta di un'orbita eliosincrona ed un'alta capacità nella gestione dei dati raccolti, permettono a SHARAD condizioni ottimali di lavoro.^[2]

Il dati acquisiti dal radar stanno consentendo agli scienziati di approfondire e migliorare lo studio del pianeta, in termini di scala e risoluzione, già iniziato dall'altro radar sounding italiano in orbita intorno a Marte, il **M.A.R.S.I.S** (*Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding*) lanciato sulla missione europea Mars Express, ed attualmente ancora operativo.

I suoi diversi parametri operativi infatti, frequenza centrale di 20 MHz ed ampiezza di banda di 10 MHz, rispetto a quelli di MARSIS, frequenze tra 1 e 5 MHz e banda 1 MHz, permetteranno un miglioramento della risoluzione, ma una minore capacità di penetrazione^[3].

Nella tabella sottostante si riportano a confronto le caratteristiche principali dei due radar.

	MARSIS	SHARAD
Intervallo di frequenza	1.3-2.3 MHz 2.5-3.5 MHz 3.5-4.5 MHz 4.5-5.5 MHz	15-25 MHz
Risoluzione verticale	~70 metri	~ 7 metri(ampiezza banda 10 MHz)
Risoluzione Orizzontale (along track x across track)	5-9 km x 10-30 km	0.3-1 km x 3-7 km
Profondità di <u>Penetrazione</u>	~ 0.5 km fino a km	~ 0.1 km fino a ~1 km

Tabella 1.3 La tabella elenca le principali caratteristiche di funzionamento e le prestazioni raggiunte dai radar M.A.R.S.I.S e SHARAD.

1.6 HARDWARE DEL RADAR

Le capacità del radar di raggiungere i suoi obiettivi di missione dipendono principalmente dalle proprietà elettriche del mezzo che l'impulso radar deve attraversare, come permittività e permeabilità del suolo, grado di scattering della superficie e stratificazione della sottosuperficie marziana.

La progettazione del radar, quindi, si è basata sull'elaborazione di complessi modelli matematici per il calcolo dei livelli di back-scattering, di rumore, di rugosità dell'ambiente marziano che hanno permesso il dimensionamento del sistema (range di frequenze, potenza necessaria, banda passante).^{[4][5]}

Le principali caratteristiche di SHARAD a livello hardware sono la sua frequenza centrale di funzionamento di 20 MHz, con capacità di inviare impulsi modulati in frequenza della durata di 85 μ s con un ampiezza di banda di 10 MHz. Per raggiungere la risoluzione spaziale richiesta tra i 300 e i 1000 m, SHARAD opera come un SAR (Synthetic Aperture Radar) ad apertura sintetica puntato al nadir (ossia verso il centro del pianeta).

Analogamente a MARSIS, la struttura di SHARAD può essere schematizzata in tre sottosistemi principali:

- *Il sottosistema a radio frequenza*, che comprende il trasmettitore, il sistema di switching tra ricezione e trasmissione e il ricevitore posto dopo il convertitore analogico\digitale.
- *Il sottosistema digitale*, che include i sistemi di generazione del chirp, di processamento a bordo, formattazione dei dati e di interfaccia verso lo spacecraft.
- *L'antenna* essenzialmente un dipolo, costituito da due rami di 5 m ciascuno, ripiegati e stivati nel satellite durante la fase di lancio, cruise e aerobraking. Una volta giunti nella fase nominale di missione (Primary Scienze Phase), l'antenna è stata dispiegata un lato alla volta .

Per quanto riguarda l'elettronica dello SHARAD (S.E.B "SHARAD Electronic Box"), essa include i sottosistemi di ricezione e trasmissione e di controllo e processamento del segnale, montati su una struttura di supporto dotata di sensori di temperatura e di riscaldatori per il controllo termico. Le due unità elettroniche sono:

1) *Il R.D.S (Receiver and Digital Section)* che include la Sezione di Elettronica Digitale (D.E.S), la quale a sua volta include: Digital Signal Processor (D.S.P), il Service Module ed il Digital Chirp Generator (D.C.G). Il DES è responsabile della maggior parte delle funzioni di SHARAD:

- Comando e Controllo di capacità.
- Formattazione dei dati di telerilevamento e trasferimento all'unità solida di registrazione dello spacecraft (S.S.R).
- Generazione della telemetria di posizionamento di SHARAD e trasferimento dei dati al S.S.R.
- Generazione del segnale chirp.
- Processamento dei dati "grezzi" del radar (Raw Data).
- Controllo e distribuzione della potenza verso le altre unità di SHARAD.

Il D.C.G sintetizza i segnali chirp nel D.E.S usando una tecnica di Sintesi Digitale Diretta (Direct Digital Synthesis Technique): essa genera campioni discreti di un onda sinusoidale a differenti frequenze e ricostruisce la forma d'onda desiderata a livello analogico, usando un Oscillatore a Controllo Numerico (N.C.O).

2) *Il T.F.E (Transmitter and Front End)* amplifica il segnale chirp a bassa potenza generato dal D.E.S e lo incanala verso il dipolo dell'antenna.

Il T.F.E gestisce anche il continuo passaggio dell'antenna dalla fase di trasmissione a quella di ricezione ed inoltre, include un convertitore DC/DC per supportare tutti i circuiti interni.

SHARAD può funzionare in uno qualsiasi dei quattro modi operativi per il quale è stato progettato:

- 1) *Subsurface Sounding Mode (SS)* è il modo principale di misurazione dello SHARAD. In questa modalità lo strumento trasmette impulsi radar e colleziona, processa e formatta gli echo di ritorno.
- 2) *Receive Only (RO) Mode* è usato per ottenere misurazioni passive durante la fase operativa del satellite (Primary Phase) ma anche per provare e controllare le prestazioni dello strumento durante la fase di volo.
- 3) *Calibration Mode* è usato per valutare le prestazioni dello strumento .
- 4) *Test Mode* è una modalità di debug (ricerca di errori nel software che gestisce lo strumento) usata per controllare tutte le funzioni interne dello strumento per per mezzo di dati scientifici simulati. I dati prodotti in questo modo operativo non hanno ovviamente valore scientifico e non vengono utilizzati per produrre dati da analizzare una volta inviati a terra.

1.7 FUNZIONI DI COMANDO E CONTROLLO DELLO SHARAD: ORGANIZZAZIONE E GESTIONE DELLA FASE OPERATIVA.

SHARAD è progettato per rimanere in uno stato di minimo di potenza (STAND-BY) con solo l'elettronica funzionante quando non è operativo in una delle sue possibili quattro modalità di funzionamento ed è proprio in tale stato che egli può ricevere comandi dallo S/C (Spacecraft). Durante la modalità operativa SHARAD non risponde più ai comandi diretti dello S/C, ma opera in accordo ad una sequenza di comandi precedentemente caricati.

Tutti i comandi necessari al funzionamento di SHARAD sono inviate al satellite e quindi passate al radar, dal centro operativo di terra che, durante la fase di upload, fornisce le istruzioni allo strumento; per mezzo della O.S.T (Operational Sequence Table), della P.T (Parameter Table) e della O.D.T (Orbital Data Table).

La *Operational Sequence Table (O.S.T)* contiene le istruzioni sulle modalità di funzionamento che il radar deve eseguire durante la parte operativa dell'orbita.

Una volta caricata la O.S.T e fatto partire, lo strumento inizia a lavorare in automatico leggendo le varie voci del file che gli è stato fornito.

Ogni linea di O.S.T definisce un singolo modo operativo per lo strumento, la sua durata ed i requisiti necessari al corretto funzionamento.

La *Parameters Table (P.T)* contiene tutti i parametri operativi ed ingegneristici di SHARAD. Ogni parametro è individuato da un numero identificatore ed ha associato un valore. I parametri contenuti nella P.T possono essere associati a tre categorie principali:

- Instrument Configuration Parameters, che sono dati che non hanno bisogno di nessun aggiornamento (per esempio grandezze fisiche costanti come la velocità della luce).
- Instrument Calibration Parameters, i quali dopo un primo test effettuato e controllato dal centro operativo di strumento non hanno più bisogno di nessun aggiornamento (per esempio i parametri per il calcolo del closed-loop tracking).
- Instrument Operating Parameters, i quali invece devono essere settati prima di ogni esecuzione di una sequenza di misurazione.

La ***Orbital Data Table (O.D.T)*** contiene i parametri di volo del satellite (riferiti alla sua orbita) necessari per il corretto calcolo del posizionamento della finestra di ricezione dei segnali ricevuti.

Questi dati quindi, che riguardano in realtà posizione e velocità del satellite non sono generati a bordo ma inviati comunque dal comando di terra; ogni O.D.T include due valori per lo Step (ovvero l'intervallo di tempo tra due linee del O.D.T stesso) e per la definizione del punto di partenza di ogni riga (ODT Start).

1.8 FASE DI RICEZIONE DI SHARAD: SCELTA DELLA PRF E DEL TRACKING

Una delle operazioni fondamentali da svolgere per il corretto funzionamento dello strumento è il calcolo della posizione della finestra di ascolto del radar stesso.

SHARAD è un radar di tipo monostatico, ovvero usa un'unica antenna ed essa deve quindi svolgere il doppio ruolo di inviare prima il segnale chirp e di ricevere successivamente il segnale di ritorno riflesso dal suolo.

Il posizionamento della finestra di ricezione è così di fondamentale importanza. Da un lato occorre ovviamente fare in modo di posizionare il ritorno tra due segnali inviati mentre dall'altro occorre posizionare bene all'interno di tale spazio l'apertura del ricevitore in modo che si sia sicuri di ricevere le informazioni volute (ritorno del terreno e del sottosuolo) e di minimizzare il tempo stesso di ascolto per non allocare in memoria eccessivi dati in parte inutili. Per questo tutte le operazioni temporali riguardanti il radar SHARAD sono state guidate, fin dalla fase di progettazione, dal valore di PRF (Pulse Repetition Frequency) che doveva essere assegnato in modo tale da poter allocare gli echi di ritorno da Marte tra due impulsi trasmessi. Prendendo in considerazione le variazioni di quota orbitale di M.R.O (255 – 320 Km) e le variazioni topografiche della superficie (+20 km /-10 Km), è stata scelta una PRF di 700.28 Hz. Tuttavia, per fare fronte a modifiche della quota operativa, previste per alcune parti della missione e stimate tra i 230 ed i 407 Km, sono stati previsti due diversi valori di P.R.F: 670.22 Hz e 775.19 Hz. La scelta del valore di P.R.F da adoperare è fornita allo strumento dalla O.S.T.

I segnali ricevuti sono acquisiti in una finestra di ricezione di 135 μ sec posizionata ogni PRF. Tale durata tiene conto di:

- Lunghezza dell'impulso trasmesso: +85 μ sec
- Finestra temporale per l'eco di sottosuperficie: +20 μ sec
- Margine per errori di posizionamento della finestra di ricezione: +/- 10 μ sec
- Margine per il ritardo dovuto alla Ionosfera marziana: +5 μ sec.

Lo schema seguente mostra la zona utile per il posizionamento della finestra di ricezione quando per la PRF = 700.28 Hz.

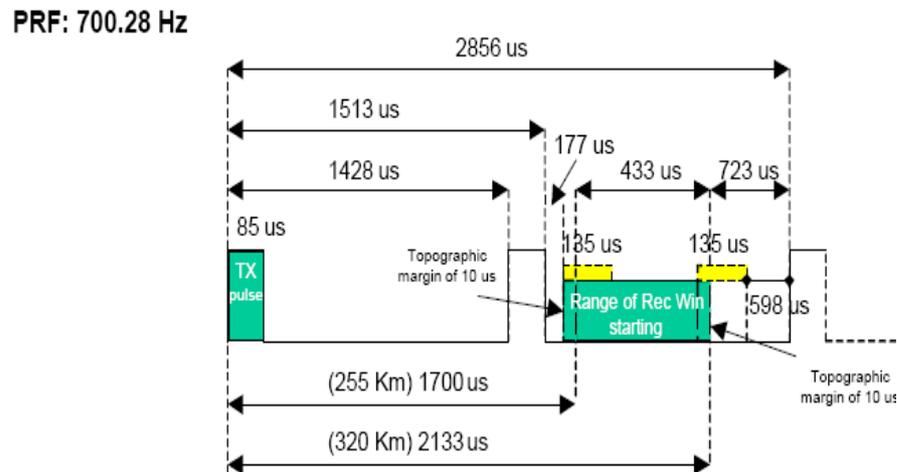


Figura 1.8 L'immagine riassume l'esatto posizionamento della finestra di ascolto del radar. [e]

Per il corretto posizionamento della finestra di ricezione occorre conoscere con relativa precisione la distanza spacecraft/superficie; questa operazione prende il nome di Tracking e per SHARAD sono possibile due diverse tecniche:

1. **The Closed-loop tracking** durante il quale le informazioni per il posizionamento della finestra di ascolto sono generate autonomamente dallo strumento attraverso un algoritmo per il calcolo del tracking. I dati iniziali per tale algoritmo sono forniti sempre dal O.D.T e dal P.T; attraverso di essi si calcola il tempo di andata e ritorno di un impulso e tale misura viene assunta come riferimento mentre un filtro controlla il posizionamento della finestra di ascolto rispetto a tale valore.
2. **The Open-loop tracking** utilizza invece una conoscenza a priori della distanza del satellite dal suolo.

Quando il radar utilizza tale tipo di funzione, si utilizzano due set diversi di dati: uno riguardante il profilo di elevazione marziana lungo la predetta ground-track del satellite (profilo ottenuto grazie ai dati MOLA di cui si parlerà nel successivo capitolo) e l'altro con la previsione della quota dello S/C, dati contenuti nella Parametric Table (P.T) e nell'Orbital Data Table (O.D.T).

Una schermata sul processo di ricostruzione dei parametri appena discussi è mostrato nella seguente figura:

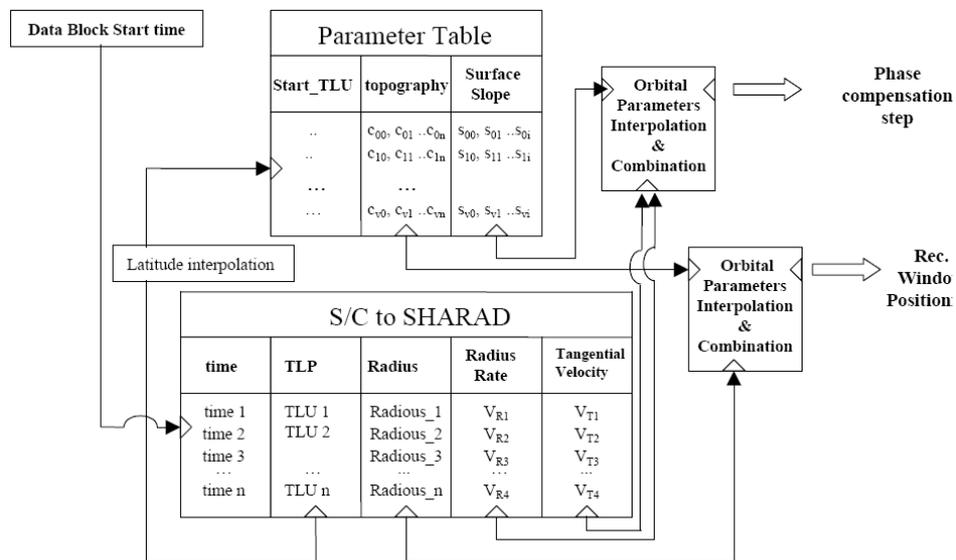


Figura 1.9 Schema delle operazioni necessarie per il calcolo della finestra di ascolto dello strumento in modalità open-loop tracking. [e]

Capitolo II

DESCRIZIONE DEI DATI SHARAD DI LIVELLO L1.B

2.1 INTRODUZIONE

Questo capitolo è dedicato alla descrizione dei dati di SHARAD e di quelli provenienti dal M.O.L.A, il laser altimetrico montato sulla missione Mars Global Surveyor (M.G.S) della N.A.S.A.

I primi paragrafi introducono le caratteristiche principali del laser altimetrico i cui dati sono utilizzati nel software creato; grazie alla conoscenza della quota superficiale di ogni punto del pianeta (rispetto ad un sistema di riferimento denominato IAU2000), ottenuto proprio dallo strumento, i ritorni sottosuperficiali ottenuti dal software realizzato e geolocalizzati sul pianeta sono stati riportati in scala metrica consentendo inoltre un immediato confronto topografico con la sovrastante superficie ottenuta sempre dai dati M.O.L.A.

I paragrafi successivi descrivono invece nel dettaglio il formato dei dati di SHARAD utilizzati e le operazioni di processamento eseguiti su di essi; vengono descritti i concetti fondamentali delle operazioni di compressione di range ed azimuth che permettono di raggiungere gli altissimi livelli di risoluzione del radar italiano e le operazioni necessarie alla ricostruzione temporale e spaziale delle intere registrazioni effettuate. I formati finali ottenuti, che seguono regole ben precise per le missioni internazionali di esplorazione, permettono di ottenere tutte le informazioni necessarie per l'analisi degli echi di ritorno effettuati dal radar e per la loro localizzazione sul pianeta.

2.2 MISSIONE MARS GLOBAL SURVEYOR ED IL LASER ALTIMETRO M.O.L.A

Il **M.O.L.A** è un laser altimetro (*Mars Orbiter Laser Altimeter*), strumento in orbita marziana a bordo della missione **Mars Global Surveyor (M.G.S)** della N.A.S.A. La missione M.G.S, arrivata su Marte l'11 Settembre del 1997 e che ha definitivamente cessato le sue attività nel Novembre del 2006, rappresentò per la N.A.S.A la prima missione come obiettivo Marte dai tempi del Viking del 1976.

Dopo oltre 20 anni di assenza dal pianeta rosso, fu affidato al Mars Global Surveyor il compito di riportare l'attenzione della comunità scientifica mondiale su Marte aprendo così il Programma di Esplorazione Marziana e preparando la strada alle successive missioni di rover e lander.

Proprio come per il M.R.O, sullo spacecraft del M.G.S erano montati diverse apparecchiature scientifiche:

- *The Mars Orbiter Camera* – che ha fornito immagini ad alta risoluzione del pianeta.
- *The Thermal Emission Spectrometer* – che ha misurato l'emissione nell'infrarosso.
- *The Radio Science Investigations* – il cui compito è stato la misurazione del campo gravitazionale di Marte.
- *The Magnetic Fields Investigation* – strumento usato per la misurazione del campo magnetico marziano.
- *The Mars Relay* – come pianificato per MRO Mars Global Surveyor è stato utilizzato come ponte radio per le successive missioni internazionali nella fase finale della sua vita operativa.

Per quanto riguarda invece il M.O.L.A, lo strumento (progettato e costruito *dal Laser Remote Sensing Branch del Laboratorio di Fisica Terrestre di Goddard*)

trasmetteva impulsi laser nell'infrarosso ad una frequenza di 10 Hz; dalla misurazione del tempo di andata e ritorno del segnale si determinava la distanza dalla superficie marziana.



Figura 2.1 Immagine del M.O.L.A in fase di assemblamento nei laboratori di Goddard. [f]

Le attività del laser, iniziate nel Marzo del 1999 e protrattesi fino al 30 Giugno del 2001 sono state incessanti arrivando a circa 900.000 misurazioni di elevazione quotidiane. L'orbita eliosincrona inoltre, scelta per la missione, permetteva a tutti gli strumenti a bordo di lavorare con il sole sempre nella stessa posizione rispetto al suolo marziano. L'enorme mole di dati del laser, unita alle immagini ad altissima risoluzione della camera del MGS hanno permesso agli scienziati la creazione di una mappa altimetrica dell'intero pianeta rosso.

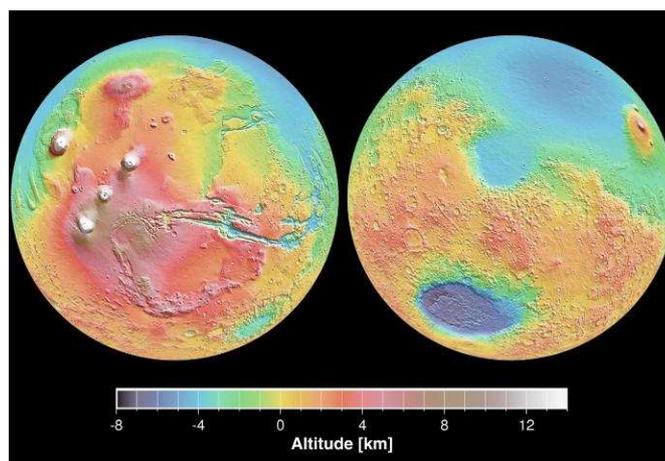


Figura 2.2 Immagine completa del profilo altimetrico di Marte ricavata dal M.O.L.A [g]

La mappa topografica ad alta risoluzione è il risultato di 640 milioni di misure; assemblati in una griglia di 1/128 grado di passo (che corrisponde a circa 500 m all'equatore) in cui ogni punto di elevazione è conosciuto con un'accuratezza di 13 metri in generale, raggiungendo in zone del emisfero nord precisioni del ordine dei due metri.

Il lavoro svolto dal M.O.L.A è stato di enorme utilità agli scienziati per la comprensione delle caratteristiche topografiche marziane, permettendo inoltre la localizzazione dei migliori siti disponibili per l'atterraggio sul pianeta, informazioni poi usate per i rover Spirit ed Opportunity del 2004.

2.3 GESTIONE DEI DATI SHARAD: DAL FORMATO EDR AL FORMATO RDR .

A bordo del satellite, le procedure di trattamento dei dati acquisiti dallo strumento sono limitate al minimo indispensabile per non appesantire il software di bordo. I dati raccolti vengono compressi per ridurre la quantità di memoria necessaria, impacchettati e poi inviati a terra.

Tutte le operazioni di deformatazione e controllo dei dati, e tutta la catena di processamento (compressione in Range ed Azimuth) necessaria per ottenere le immagini radar sono eseguiti a terra attraverso diversi strumenti software installati presso il centro operativo di strumento.

In pratica, una volta ricevute tutte le telemetrie, viene controllata l'integrità dell'informazione riportata nei dati, verificata la corretta esecuzione dei comandi e la presenza di eventuali anomalie di funzionamento del radar. I dati scientifici, così come acquisiti, vengono letti e strutturati in specifici file, formattati seguendo gli standard dettati dal PDS (Planetary Data System), che costituiscono il prodotto di Livello 1A, noto anche come EDR (Experiment Data Record). Tali prodotti subiscono poi un ulteriore processamento di tipo SAR che consente la generazione dei dati RDR (Reduced Data Format), ossia di livello 1B.

2.3.1 IL FORMATO MARS RECONNAISSANCE ORBITER SHARAD EXPERIMENT DATA RECORD (EDR).

Il formato Mars Reconnaissance Orbiter SHARAD Experiment Data Record (Livello 1A data) contiene i dati acquisiti da SHARAD uniti a tutte le informazioni ausiliare necessarie per collocare i dati stessi nello spazio e nel tempo.

Al fine di produrre gli EDR, i dati scientifici raccolti dal radar sono ordinati nel tempo e catalogati in base alle diverse modalità operative dello SHARAD; eventuali pacchetti di dati duplicati vengono rimossi mentre quelli corrotti sono sostituiti da un valore nullo che indica l'assenza dei dati previsti.

In particolare, il processamento a livello 1A consiste nelle seguenti operazioni:

1. Deformattazione dei pacchetti di dati.
2. Ordinamento nel tempo dei dati.
3. Catalogazione dei dati in base alla modalità operativa dello strumento al momento della ripresa.
4. Test sulla qualità dei dati.
5. Creazione dei dati ausiliari per la localizzazione di quelli scientifici nello spazio e nel tempo.
6. Generazione dei formati finali di uscita in accordo con le regole dettate dal PDS.

Come già accennato, nessun processamento sui dati viene eseguito e le informazioni sulla calibrazione dello strumento sono riportate in un file contenete le funzioni di trasferimento dello strumento.

Gli input per la creazione degli Experiment Data Record sono naturalmente i dati inviati a terra, dalla antenna dell'MRO, riguardanti SHARAD e l'orbiter stesso.

Nello specifico tali dati sono:

1. La telemetria scientifica di SHARAD nella forma di Instrument Raw Science Products, ovvero i dati così detti “grezzi” (Row) inviati dal radar a Terra dopo la compressione degli stessi per un minore data rate.
2. I file contenenti le informazioni ingegneristiche sullo strumento.
3. La telemetria dello spacecraft e tutte le informazioni ancillari sul satellite circa traiettoria, orbita e orientamento
4. Il valore dei coefficienti dell’orologio di bordo dell’MRO da convertire nella forma di *Coordinated Universal Time (UTC)* attraverso il lavoro del NAIF (*Navigation and Ancillary Information Facility*), uno dei nodi del PDS.

Per capire come è organizzato il formato di uscita degli EDR introduciamo due termini tecnici:

- **Il Data Blocks** è un set di dati scientifici generati da SHARAD e, formato dagli echi di ritorno di uno o più segnali inviati (P.R.I).
- **Il Data Take** invece è l’unione di più Data Block generati all’interno della stessa modalità operativa dello strumento, la cui applicazione è guidata dall’esecuzione di una singola linea di comando dell’OST.

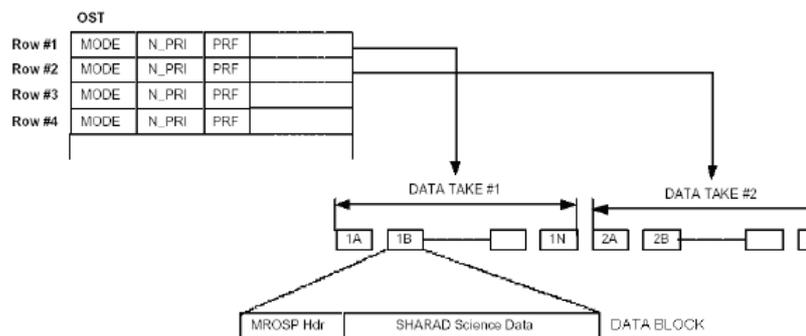


Figura 2.3 Schema del funzionamento dei comandi controllato tramite l'OST. [e]

I dati immagazzinati all’interno di un singolo EDR sono quindi un aggregazione di Data Blocks, collegati continuamente nello spazio e nel tempo e, caratterizzati dallo stesso modo operativo, ovvero da un’ unica linea di comando dell’OST.

Il contenuto di questi file è quindi altamente variabile in termini di Data Blocks trattati e dipende da come le operazioni per lo strumento vengono pianificate durante un dato periodo di osservazione.

Poiché ogni Data Blocks è una sequenza di segnali ricevuti campionati nel tempo ed accompagnati da informazioni ausiliari, la naturale organizzazione dei dati all'interno di questo tipo di formato (la stessa cosa si vedrà per gli RDR) è quella di una tabella in cui ogni linea contiene i dati di un singolo Data Blocks e ogni colonna il valore dello stesso parametro o dello stesso sample di dati appartenenti ai diversi Data Blocks.

Ogni EDR è formato dai seguenti tre file:

1. Un file di tipo binario contenente la telemetria scientifica dello strumento chiamato *Science Telemetry file*. Ogni riga, detta anche record, è formata da una parte iniziale contenente alcune informazioni, come il valore del comando OST corrispondente ai dati trattati, il tempo e i parametri usati per il processamento del Data Blocks; i dati scientifici veri e propri, formati da 3600 campioni la cui singola lunghezza in bits può variare da due ad otto. Come conseguenza di ciò, a variare del numero di bits usati cambierà la lunghezza del record, fermo restando che tutti i record avranno stessa lunghezza essendo definiti dallo stesso valore di OST.
2. Un file di tipo binario chiamato *Auxiliary Data file*. Ogni record di questo file contiene le informazioni generate a terra dei dati di navigazione del satellite in perfetta corrispondenza con il relativo record del Data Block scritto nel Telemetry file.
La maggior parte di questi valori sono espressi come numeri reali nel formato di otto o quattro byte.
3. Un file in formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), chiamato label, che descrive il contenuto dei dati riportati nei

due file binari; questo documento, leggibile come un normale documento di testo è scritto in accordo con gli standard dettati dal PDS e descrive sia le osservazioni in cui i dati sono stati acquisiti sia il formato dei file dove tali dati sono stati registrati.

2.3.2 IL FORMATO REDUCED DATA RECORD (RDR) ED IL TOOL LEVEL 1B DEL CO.Ri.S.T.A

Il formato RDR ha costituito l'input dei dati SHARAD per tutte le attività svolte durante la tesi; nelle successive pagine verranno così documentate tutte le operazioni che portano alla creazione di tale formato.

Il Mars Reconnaissance Orbiter SHARAD Reduced Data Record (Level 1B Data) è costituito dai dati di Livello 1A, ossia dagli echi ricevuti dal radar, ai quali è stato applicato il filtraggio Doppler e la compressione di Range, accompagnati da tutte le informazioni necessarie alla localizzazione delle osservazioni nello spazio e nel tempo. I dati ottenuti vengono poi opportunamente formattati, come da specifiche PDS, in file di uscita che costituiscono i prodotti di Livello 1B.

Al fine di realizzare il processamento dei dati SHARAD, uno specifico strumento software, *Level 1B (LIB) Tool*, è stato progettato ed implementato dal centro ricerche CO.Ri.S.T.A all'interno del programma *SHARAD Ground Data System gestito dall'Agenzia Spaziale Italiana (A.S.I.)*.^[6]

In particolare, il tool creato prevede la lettura dei dati dello SHARAD dal livello EDR insieme all'assegnazione di tutti i valori necessari per l'applicazione degli algoritmi di calcolo; fatto ciò il software procede in automatico fornendo i dati nel formato finale.

Entrando nello specifico, le operazioni di processamento eseguite dal software sono di seguito riportate.

- 1. Compressione di Range*
- 2. Compressione di Azimuth (anche chiamata processamento Doppler o processamento di Apertura Sintetica).*
- 3. Correzione degli effetti ionosferici.*

Ai successivi paragrafi è affidata la descrizione delle operazioni appena elencate con una maggiore attenzione riservata alle compressione in Range ed Azimuth che ci consentiranno di capire meglio come un radar ad apertura sintetica permetta una risoluzione più spinta rispetto agli altri fino ai valori eccezionali dello stesso SHARAD.

2.4 RANGE PROCESSING

Allo scopo di ottenere la desiderata risoluzione spaziale, sia in profondità e sia lungo la traccia a terra (ground track), gli echi dello SHARAD necessitano di essere opportunamente processati una volta inviati sulla Terra.

Il metodo attraverso il quale la risoluzione verticale dello strumento è raggiunta prende il nome di Compressione in Range.

Per capire quali sono i principi alla base della compressione in range esaminiamo un caso semplice, che ci permetterà proprio di capire il vantaggio di tale tecnica. Supponiamo di essere in presenza di un radar con un puntamento non nadirale, come invece nel caso di SHARAD, e di voler determinare la risoluzione in range dello strumento prima e dopo la compressione.

Sotto queste ipotesi è naturale ritenere che il nostro radar è capace di distinguere due oggetti come diversi (supponiamo due corner reflector su sfondo completamente assorbente in modo che gli unici ritorni siano proprio dettati da questi due oggetti) solo se gli echi di ritorno di quest'ultimi non appaiono sovrapposti.

Si verifica facilmente che in questo caso la risoluzione in range, nel prosieguo indicata con ρ_R , per la precisione la risoluzione nello Slant Range è data da:

$$\rho_R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (2.1)$$

Come si vede dalla formula (2.1), il miglioramento della risoluzione di range è possibile solo a spesa della durata del segnale trasmesso; dall'altro canto però bisogna tenere in considerazione le potenze in gioco trasmesse e successivamente ricevute dall'antenna.

La seguente formula spiega il motivo per il quale non si può abbassare troppo la durata del impulso:

$$P_m = P_t \cdot PRF \cdot \tau \quad (2.2)$$

Dove P_m rappresenta la potenza media trasmessa, P_t la potenza di picco trasmessa e il termine **PRF** la “Pulse Repetition Frequency” del radar.

Tale formula mette in luce il fatto che per mantenere un livello di potenza medio trasmesso accettabile (cioè alto) occorre che il valore di τ non scenda troppo; in tal caso infatti bisognerebbe compensarlo con un aumento del valore di picco della potenza non potendo nemmeno aumentare troppo il valore del PRF a causa della necessità di dover con la stessa antenna anche registrare il ritorno dei segnali inviati. Aumentare il *Pulse Repetition Frequency (PRF)* vorrebbe infatti voler dire diminuire il *Pulse Repetition Interval (PRI)* che costituisce il suo inverso :

$$PRF = 1/PRI \quad (2.3)$$

Questo però significherebbe avvicinare troppo gli impulsi inviati, perdendo l’eco di ritorno degli stessi segnali in quanto in quel momento l’antenna sarebbe in modalità d’invio dei dati.

Ecco allora spiegato il vantaggio di avere un segnale modulato in frequenza rispetto ad uno a frequenza costante: la possibilità proprio attraverso la compressione in Range che tra breve spiegheremo di avere una forte spinta in termini di risoluzione senza la necessità di avere picchi di potenza troppo elevati che potrebbero uscire dai requisiti di missione stessi decisi per il satellite.

Da un punto di vista matematico, la compressione in Range si realizza moltiplicando il segnale di ritorno del radar (che nel nostro esempio contiene il corner reflector) con una copia del segnale stesso inviato (chiamato filtro); questa moltiplicazione, eseguita nel dominio delle frequenze grazie alle trasformate di Fourier (ad un tipo particolare di trasformata nello specifico chiamata FFT) equivale ad un’operazione di convoluzione nel dominio del tempo; il risultato sarà che il nostro segnale in uscita, alla fine di tale processo, assumerà una forma chiamata: *funzione sinc*, il cui andamento, se l’ampiezza del segnale trasmesso era costante, è $\sin(x)/x$.

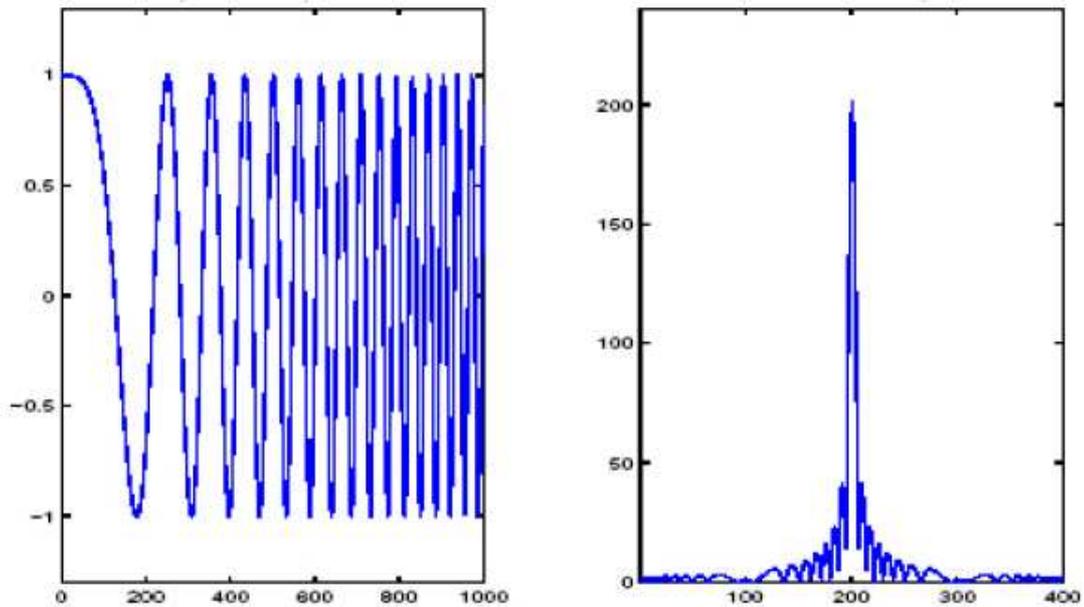


Figura 2.4 Queste figure mostrano (a sinistra) un generico segnale modulato in frequenza (nello specifico con un andamento crescente) ed a destra il suo andamento ottenuto a valle della compressione.

Quello che cioè si è ottenuto è una restrizione del nostro segnale ricevuto: se prima l'informazione sulla presenza del corner reflector era spalmata in un tempo τ ora sarà concentrata in un tempo minore.

Passando al caso di due bersagli puntiformi infine si ci chiede fino a quando i due ritorni possono essere avvicinati continuando a distinguere i due oggetti come diversi: questa quantità sarà ora solo frutto di una convenzione e nello specifico si ritiene di prendere in considerazione la caduta a 3 dB del lobo principale dei due segnali; fino a quando tali quantità non entreranno in contatto sarà possibile distinguere i due bersagli come entità separate.

L'ampiezza a 3dB del lobo principale del segnale sinc sarà di $1/B$ ove B è l'ampiezza di banda del nostro impulso chirp; questa quantità prende quindi il posto di τ nella formula per la determinazione della risoluzione di Range che diventa:

$$\rho_R = c/(2 \cdot B) \quad (2.4)$$

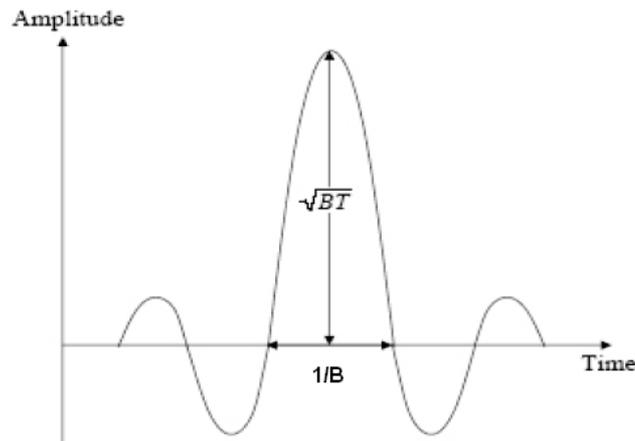


Figura 2.5 Immagine del lobo principale di ampiezza $1/B$ della funzione sinc.

Ecco quindi spiegato il vantaggio di tale operazione.

Il principio di funzionamento, spiegato attraverso questo semplice modello, continua a valere anche nei casi reali con presenza quindi di interfacce sottosuperficiali, rumore nel ricevitore e clutter.

Nel caso specifico di SHARAD, essendo questo un radar a penetrazione con puntamento al nadir, tale tecnica permette di aumentare la risoluzione in profondità dello strumento fino ai valori di progetto che richiedevano allo strumento una Risoluzione di circa 7 metri.

Nel tool Level 1B del CO.Ri.S.T.A, il processamento in Range di ogni eco è ottenuto computando la FFT (Fast Fourier Trasform) del segnale inviato (che costituisce appunto il filtro), moltiplicandolo per la FFT dell'eco ricevuto e infine effettuando la IFFT (Inverse Fast Fourier Trasform) del prodotto ottenuto che riporta i campioni esaminati nel dominio del tempo.

2.5 DOPPLER COMPRESSION

Come per la compressione di Range anche per quella di Azimuth si riporterà un esempio esemplificativo per spiegare la teoria dietro a tale operazione, lasciando alla fine del paragrafo la descrizione delle diversità rispetto al radar SHARAD che opera in una maniera leggermente diversa da un tipico SAR.

Il concetto teorico che porta all'operazione di compressione in Azimuth non è sostanzialmente diverso da quello per la compressione in Range: anche in questo caso infatti il segnale che ritorna al satellite sarà un segnale modulato in frequenza, ma in questo caso la modulazione non nasce dal segnale stesso inviato (il chirp appunto) ma dal moto relativo tra il satellite ed il bersaglio durante il tempo di invio e ricezione dell'impulso trasmesso. Questa modulazione in frequenza permette anche per la risoluzione in Azimuth quindi, di operare un filtraggio del segnale ricevuto con uno di riferimento che ora però non potrà essere più la copia stessa del segnale inviato come lo era per il Range ma sarà di tipo diverso caratterizzato dalla banda doppler che il ritorno porta con se e che in SHARAD varierà di volta in volta.

La tecnica per la compressione di Azimuth fu messa a punto per la prima volta da Carl Wiley nel 1951 con il nome di *Doppler Bear Sharpner* proprio perché la frequenza Doppler in questo caso gioca lo stesso ruolo del chirp, ossia della copia del segnale inviato, per la compressione in Range, consentendo quindi una focalizzazione del segnale lungo la dimensione di azimuth

Supponiamo allora di avere una piattaforma che si muova lungo una direzione lineare (Along Track Direction, ADT) e irradiante a terra un treno di impulsi ad intervalli regolari (con una PRI quindi costante). In questo caso, due bersagli al suolo possono essere individuati solo se essi non sono contemporaneamente all'interno dello stesso fascio radar.

La risoluzione in Azimuth, chiamata anche swath, è quindi limitata dall'apertura del fascio ϑ_{3dB} ed è data da:

$$\rho_{ALT} = H \cdot \vartheta_{3dB} \quad (2.5)$$

Ove H rappresenta la quota del nostro satellite e ϑ_{3dB} è dato da:

$$\vartheta_{3dB} = \frac{\lambda}{D} \quad (2.6)$$

dove D è la dimensione dell'antenna nella direzione di Azimuth mentre λ è la lunghezza d'onda della frequenza portante.

Si ha allora che la risoluzione assume l'espressione di:

$$\rho_{ALT} = \frac{H\lambda}{D} \quad (2.7)$$

Per migliorare tale valore, a parità di quota di volo, occorrerebbe quindi o ridurre la lunghezza d'onda della frequenza portante oppure aumentare di molto le dimensioni dell'antenna. Le forti limitazioni alla risoluzione sono superate ricorrendo al processing in Azimuth. Consideriamo $N_{AZ} = N + 1$ posizioni equamente spaziate di un radar trasmittente un impulso chirp, come in figura:

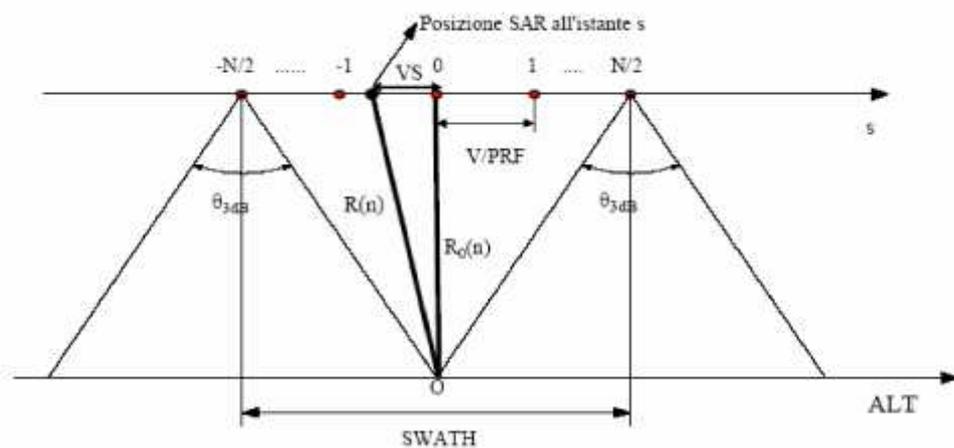


Figura 2.6 Geometria di osservazione per il caso esaminato

Supponiamo ora un bersaglio al centro della figura (indicato con O nell'immagine), illuminato alle posizioni $\mathbf{x}_n = \mathbf{n} \cdot \mathbf{d}$ con $\mathbf{n} = -N/2, \dots, 0, \dots, N/2$ e \mathbf{d} pari a \mathbf{V}/PRF ove \mathbf{V} è la velocità della piattaforma.

Considerando l'ennesimo impulso trasmesso, il segnale backscatterato dal bersaglio e ricevuto dall'antenna all'ennesima posizione ad una distanza R_n è dato da:

$$x\left(t - \frac{2R_n}{c}\right) = \exp\left[j\omega\left(t - \frac{2R_n}{c}\right) + j\frac{2\pi\alpha}{2}\left(t - \frac{2R_n}{c}\right)^2\right] \Pi\left(\frac{t - 2R_n/c}{T}\right) \quad (2.8)$$

A valle della compressione in range, si vede che a meno di un fattore di scala, diventa:

$$x(t, R_n) = \exp\left(-j\frac{4\pi R_n}{\lambda}\right) \text{sinc}\left[\left(t - \frac{2R_n}{c}\right)\right] \quad (2.9)$$

dove il termine:

$$\exp\left(-j\frac{4\pi R_n}{\lambda}\right) \quad (2.10)$$

è il fattore di fase. Detto R_0 la minima distanza tra target e radar e, posto $s = \mathbf{X}_n/\mathbf{V}$ (s è detto tempo di Azimuth o tempo lento), si ha.

$$R_n = \sqrt{R_0^2 + (V_s)^2} = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{V_s}{R_0}\right)^2} \quad (2.11)$$

Osservando il termine sotto parentesi (V_s / R_0) si vede come esso sia molto inferiore all'unità; di conseguenza il termine

$$\sqrt{1 + \left(\frac{V_s}{R_0}\right)^2} \quad (2.12)$$

può essere visto come la serie $(\mathbf{1} + \mathbf{X})^n$ con $|\mathbf{X}| < 1$ il cui sviluppo in serie di Taylor può fermarsi al primo ordine: $\mathbf{1} + n\mathbf{X}$

Otteniamo in definitiva

$$R_n = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{V_s}{R_0}\right)^2} = R_0 + \frac{(V_s)^2}{2R_0} \quad (2.13)$$

Per cui a valle della compressione si ha:

$$x(t, R_n) = \exp\left[-j \frac{4\pi R_0}{\lambda} + j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{(V_s)^2}{2R_0}\right] \sin c\left[B\left(t - \frac{2R_n}{c}\right)\right] \quad (2.14)$$

E tenendo in conto il pattern d'irradiazione della stessa antenna:

$$x(t, s) = A(s) \exp\left[-j \frac{4\pi R_0}{\lambda} + j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{(V_s)^2}{2R_0}\right] \sin c\left[B\left(t - \frac{2R_n}{c}\right)\right] \quad (2.15)$$

Dove s varia tra $-\mathbf{T}_i/2$ ed $\mathbf{T}_i/2$ dove \mathbf{T}_i è detto tempo d'integrazione e misura il tempo in cui il bersaglio resta nell'apertura a **3dB** del radar, dato da:

$$T_i = \frac{SWATH}{V} = \frac{\vartheta_3 R_0}{V} \quad (2.16)$$

Il segnale che si ottiene valutando l'espressione di sopra per $\mathbf{t} = 2\mathbf{R}_n/c$ (tempo di massimo), funzione solo del tempo di Azimuth s , è detto segnale di azimuth:

$$x_{az}(s) = A(s) \exp\left(-j \frac{4\pi R_0}{\lambda} + \frac{4\pi (V_s)^2}{\lambda 2R_0} s\right) \quad (2.17)$$

e come si vede è ancora un chirp, cioè un impulso la cui frequenza istantanea è lineare in s e data da:

$$f(s) = \left(\frac{2V^2}{\lambda R_0}\right)s \quad (2.18)$$

ove

$$f_r = \left(\frac{2V^2}{\lambda R_0}\right) \quad (2.19)$$

è il chirp rate in Azimuth o Doppler rate che nasce dal moto relativo tra satellite e target.

La banda \mathbf{B}_d di tale chirp in azimuth, chiamata banda in Azimuth o banda Doppler è data da:

$$B_D = f_r T_i = \frac{2}{\lambda} V \vartheta_{3dB} \quad (2.20)$$

Il segnale di Azimuth quindi si costruisce registrando, ad ogni posizione n , la fase e l'ampiezza dei segnali di ritorno dal bersaglio illuminato lungo la traccia di volo.

Se si comprime dopo \mathbf{N}_{az} PRI tale segnale chirp in azimuth, cioè questa volta rispetto ad \mathbf{s} , con un filtro adattato (compressione in azimuth) si otterrebbe ancora una volta una sinc d'apertura $\mathbf{1/B}_D$, ovvero una risoluzione:

$$\rho_{ALT} = \frac{V}{B_D} = \frac{\lambda}{2\vartheta_{3dB}} = \frac{D}{2} \quad (2.21)$$

Nel caso di SHARAD invece bisogna dire che il suo comportamento è leggermente diverso da quello di un classico SAR, poiché sia il centroide Doppler sia l'ampiezza della banda Doppler sono strettamente dipendenti dallo scattering della superficie.

Nel caso di un SAR "classico" infatti i valori del centroide Doppler e dell'ampiezza di banda Doppler dipendono dall'assetto del satellite mentre per SHARAD la banda Doppler dipende fortemente dalla rugosità superficiale mentre la pendenza superficiale (surface slope) ha una forte influenza sul centroide Doppler. Per questo motivo, il processore di Livello 1B esegue prima un'accurata stima dei parametri Doppler sopra citati prima di iniziare la catena di processamento in azimuth dei segnali attraverso l'utilizzo di tecniche statistiche basate su mappe del pianeta e sui dati rilevati dallo stesso M.O.L.A

L'algoritmo predisposto a tale funzione è chiamato *Chirp Scaling Algorithm*, il quale può fornire una risoluzione massima, a seconda appunto dei parametri Doppler stimati, fino a 300 metri. Sotto viene riportato lo schema logico per il processamento a livello L1B eseguito proprio al centro C.O.Ri.S.T.A.

2.6 COMPENSAZIONE DEGLI EFFETTI DELLA IONOSFERA MARZIANA.

La propagazione dei segnali elettromagnetici inviati dallo SHARAD verso il suolo marziano devono tenere in conto il ruolo giocato dall'atmosfera marziana che il segnale stesso deve inevitabilmente attraversare.

La diramazione dei segnali attraverso la ionosfera di Marte comporta una distorsione della forma d'onda trasmessa, causata dal fatto che il plasma ionosferico possiede una costante dielettrica dipendente dalla frequenza, la quale introduce una variazione della velocità di gruppo all'interno del chirp trasmesso dalle frequenze più basse alle più alte, causando una degradazione del rapporto segnale/rumore (SNR) desiderato.

Gli studi sulla ionosfera marziana sono stati numerosi con la creazione di modelli matematici che ne prevedessero sia la composizione e sia appunto gli effetti sui segnali radar. Ancora oggi molte delle teorie sviluppate si basano su quella sviluppata nel 1931 da S.Chapman che appunto dettava le formule per la previsione di uno strato di ionosfera, ipotizzato di semplice composizione ed il suo andamento durante il giorno.

La variazione della ionosfera durante la giornata è dovuta al fatto che quest'ultima è eccitata dalle radiazioni solari e i suoi effetti sono quindi maggiori di giorno rispetto alla notte; di conseguenza si è dovuto prevedere un processo per la correzione dei dati raccolti dallo SHARAD durante il giorno marziano.

La scelta di una correzione deterministica del segnale distorto a causa della ionosfera avrebbe però richiesto una conoscenza della struttura fisica di quest'ultima ad un livello molto elevato, fatto non possibile per la suite di strumenti scientifici trasportati a bordo del satellite e né ricavabile dalle precedenti missioni a causa della variabilità della ionosfera stessa.

Le correzioni così implementate dal software LIB durante il processamento a terra dei dati si è basato su un algoritmo che non prevedesse nessuna conoscenza a priori

della ionosfera, chiamato metodo Phase Gradient Autofocus (PGA) originariamente sviluppato per le immagini dei SAR (Syntetic Aperture Radar).

Il concetto fondamentale per il quale il PGA è stato sviluppato era ottenere una stima affidabile della derivata (del gradiente) dell'errore di fase utilizzando solo l'immagine complessa SAR. Il processo stimativo sfrutta la ridondanza dell'informazione sull'errore di fase contenuta nell'immagine degradata indipendentemente dalla scena sottostante contenuta nell'immagine stessa.

2.7 OUTPUT DEL FORMATO RDR: FILE DI TIPO .DAT E .LBL

Il formato finale del tool LIB creato dal CO.Ri.S.T.A risponde alle specifiche del PDS sul formato RDR. Tali standard prevedono la creazione di due file separati: il primo in formato binario contenente i dati scientifici processati, i dati scientifici ausiliari, i parametri ingegneristici e le informazioni geometriche usate per localizzare le osservazioni nello spazio e nel tempo, mentre il secondo è, come nel caso degli EDR, un file ASCII di label a cui è rimandata la descrizione dei contenuti del precedente.

Anche la creazione dei nomi dei file segue delle regole specifiche, in particolare si usa la convenzione sui nomi dei file nota come ISO Level II 27.3 sempre allo scopo di essere accondiscendente con gli standard PDS.

I nomi dei file sono costruiti dalla concatenazione di sei identificatori separati da un carattere di underscore (“_”), seguiti da un punto e dalle tre lettere che identificano l’estensione del file stesso.

Gli identificatori sono concatenati nel seguente ordine:

<Data product>_<Transaction ID>_<OST Line #>_<Operative Mode>_<PRF>_<Version>.<Extention>

Il valore *di Data Product* è costituito dalla lettera R, ad identificare proprio il formato RDR.

The Transaction ID è un numero di sette cifre. Le prime cinque identificano il numero di orbita durante la quale è stata effettuata la ripresa analizzata mentre gli ultimi due denotano il numero di OST che è stato usato durante l’acquisizione dei dati.

The OST line è un numero di tre cifre che identifica la linea di OST usata durante la ripresa.

The Operative Mode è già stato discusso nei paragrafi precedenti. L’identificatore, in questo caso, è formato da due lettere “SS” che significano sub-surface sounding e da due numeri, che variano da 01 ad 21 che identificano le diverse configurazioni operative di strumento in funzione del numero di echi pre-sommati a bordo e la risoluzione in bit di ciascun campione.,

The Pulse Repetition Interval (PRF) è costituito da tre numeri che identificano la parte intera del valore di PRF usato durante la ripresa.

The Version identifica la versione del file prodotto, il valore di questa singolo valore di etichettatura può variare da A ad Z.

Infine il *File Identifier* è costituito da tre lettere e etichetta il contenuto del file: l’estensione “DAT” per i file binari denota che tali file contengono una tabella di oggetti in formato binario mentre, l’estensione “.LBL” identifica i file di accompagnamento che rispondono appunto all’etichetta (label) del PDS.

<i>Data Product</i>	<i>Transaction ID</i>	<i>OST Line</i>	<i>Operative Mode</i>	<i>PRF</i>	<i>Version</i>	<i>Extension</i>
R	0000000	000	RO01	335	A	.DAT
	.....	...	....	350	.	.LBL
	.....	...	SS01	670	.	
	9999999	999	....	700	Z	
			SS21	775		

Tabella 2.1 Ecco riepilogate le varie voci che contribuiscono alla formazione dei nomi dei file .DAT ed .LBL

Il file .LBL contiene una serie di informazioni riguardanti sia lo strumento sia soprattutto i dati riportati nell'altro file di tipo binario. In particolare il suo contenuto può essere visto come diviso in varie parti, ognuna delle quali naturalmente riporta informazioni di carattere diverso.

Il formato dell'intero file, pur rispettando sempre gli standard PDS, segue però l'*Object Description Language (ODL)*, ovvero ogni riga è scritta nel formato "keyword=value" ove keyword è il nome di uno specifico campo o parametro riferito ai dati (ad esempio il "record byte" ossia il numero di bytes per ogni riga del file .DAT) mentre il "value" è il valore assunto da tale parametro riferito a quello specifico file.

Le informazioni riportate nei file .LBL sono di notevole importanza per la comprensione e la lettura di quelli riportati nel file scientifico .DAT. Durante le varie fasi della tesi infatti, si è sempre riscontrata la necessità di utilizzare tali file come sorgenti di input al fine di avere a disposizione tutta una serie di informazioni sui parametri dimensionali ed operativi dei dati ripresi.

Il file di tipo label contiene informazioni che possono essere logicamente divise nei seguenti gruppi:

- Il primo ed anche il più breve che indica la versione dello standard PDS applicato ai dati.

- Un secondo gruppo che contiene informazioni sul set di dati trattati: nome della missione e dello strumento, numero dell'orbita di ripresa, tempo di inizio e fine ripresa.
- Successivamente abbiamo un gruppo di parametri riguardanti il file binario .DAT: sono riportati numero di record, ovvero di righe della tabella contenuta nel file e numero di byte per ogni riga.
- Si passa poi a specificare il Modo Operativo che lo strumento aveva caricato durante la ripresa (cioè quello già introdotto con le lettere SS) e descrivendo immediatamente dopo proprio i parametri di pre-summing e di risoluzione per ogni byte.
- Infine si forniscono informazioni sui dati scientifici contenuti nel file binario come l'algoritmo per la correzione degli effetti ionosferici usato, il PRF ed una descrizione delle operazioni eseguite sui dati come la compressione in Range ed il filtraggio Doppler.

Sotto è riportato proprio, a titolo di esempio, uno dei file .LBL di accompagnamento avuto a disposizione dal CO.Ri.S.T.A e relativo all'orbita numero 4786.

```

/* Label standards identifier */

PDS_VERSION_ID                = PDS3

/* Identification data elements that apply to all referenced data
files */

DATA_SET_ID                   = "MRO-M-SHARAD-4-RDR-V1.0"
PRODUCT_ID                    = "R_0478602_001_ss11_700_A"
RELEASE_ID                     = "0004"
PRODUCT_TYPE                  = RDR
INSTRUMENT_HOST_ID            = MRO
INSTRUMENT_HOST_NAME          = "MARS RECONNAISSANCE ORBITER"
INSTRUMENT_ID                 = SHARAD
INSTRUMENT_NAME               = "SHALLOW RADAR"
INSTRUMENT_TYPE               = RADAR
TARGET_NAME                   = MARS
MISSION_PHASE_NAME            = "MAPPING"
ORBIT_NUMBER                   = 4786
MRO:START_SUB_SPACECRAFT_LONGITUDE = 95.191155 <DEGREES>
MRO:START_SUB_SPACECRAFT_LATITUDE  = 61.348025 <DEGREES>
MRO:STOP_SUB_SPACECRAFT_LONGITUDE  = 279.999130 <DEGREES>
MRO:STOP_SUB_SPACECRAFT_LATITUDE   = 58.602907 <DEGREES>
START_TIME                    = 2007-216T09:25:59.443
STOP_TIME                     = 2007-216T09:44:55.465

```

```

SPACECRAFT_CLOCK_START_COUNT      = "2/870686759.29062"
SPACECRAFT_CLOCK_STOP_COUNT       = "2/870687895.30534"
PRODUCT_CREATION_TIME              = 2008-095T16:47:56.109
PRODUCT_VERSION_ID                 = A
PRODUCT_VERSION_TYPE               = RECONSTRUCTED

OBJECT                              = FILE

/* File characteristic data elements */

RECORD_TYPE                         = FIXED_LENGTH
RECORD_BYTES                       = 5822
FILE_RECORDS                       = 12405

/* Data object pointers */

^PROCESSED_ECHO_TABLE              = "R_0478602_001_ss11_700_A.DAT"

/* Identification data elements */

SOURCE_PRODUCT_ID                  = "e_0478602_001_ss11_700_a.lbl"

/* Descriptive data elements */

INSTRUMENT_MODE_ID                 = SS11

INSTRUMENT_MODE_DESC                = "In this mode the instrument
performs scientific measurements by transmitting radar pulse and
collecting, processing and formatting received echoes. Data
processing performed on-board consists in summing 08 sequential
echoes, and converting the result from 32-bit precision to 06-bit
precision."

MRO:PULSE_REPETITION_INTERVAL      = 1428 <MICROSECONDS>
MRO:PHASE_COMPENSATION_TYPE        = "NO COMPENSATION"
MRO:MANUAL_GAIN_CONTROL             = 10
MRO:COMPRESSION_SELECTION_FLAG     = "STATIC"
MRO:CLOSED_LOOP_TRACKING_FLAG      = "DISABLED"
DATA_QUALITY_ID                    = "0"

DATA_QUALITY_DESC                   = "0: no corrupted data
1: less than 2% corrupted
data
2: less than 5% corrupted
data
3: less than 10% corrupted
data
4: more than 10% corrupted
data"

MRO:WEIGHTING_FUNCTION_ID          = "hanning"
MRO:NUMERICAL_FILTER_TYPE          = "INVERSE"
MRO:PHASE_CORRECTION_TYPE         = "PHASE GRADIENT AUTOFOCUS"
MRO:REFERENCE_FUNCTION              = "AUTO"

```

```

MRO:NOMINAL_ALONG_TRACK_RESOLUTION = 300 <METERS>
MRO:RADARGRAM_RETURN_INTERVAL      = 690

```

```

/* Data object definitions */

```

```

OBJECT = PROCESSED_ECHO_TABLE
INTERCHANGE_FORMAT = BINARY
COLUMNS = 98
ROW_BYTES = 5822
ROWS = 12405
DESCRIPTION = "Binary table containing SHARAD
Processed scientific data, that is the Doppler filtering and range
compression of a variable number of raw echoes, and is expressed as
a time series of complex voltages. Each record contains also a
number of parameters describing the operation of the instrument
during data acquisition, together with engineering and spacecraft
information.
Specifically, each record is subdivided in five parts, each of which
contains a different type of information: ancillary data, scientific
data, processing parameters, engineering parameters and instrument
parameters."

^STRUCTURE = "RDR.FMT"
PRIMARY_KEY = ( "SCET_BLOCK_WHOLE",
"SCET_BLOCK_FRAC" )
START_PRIMARY_KEY = (870686759,29062)
STOP_PRIMARY_KEY = (870687895,30534)
END_OBJECT = PROCESSED_ECHO_TABLE

```

Come nel caso dei file in formato EDR, anche i file in formato binari o RDR si presentano come una tabella di dati; ogni record (riga) si riferisce ad un singolo eco processato, il quale è il risultato del filtraggio Doppler e della compressione in range ed è espresso come una serie nel tempo di numeri complessi.

Ogni record contiene anche un numero di parametri che descrivono le operazioni dello strumento durante la fase operativa, accompagnate da informazioni ingegneristiche sullo spacecraft; in particolare un record può essere visto come diviso in cinque parti:

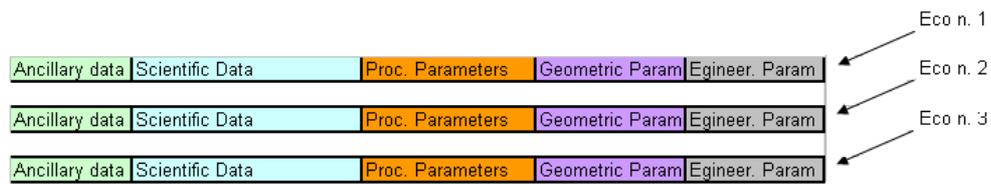
1. **Ancillary Data.** In questa parte sono riportate le informazioni sui valori dei parametri di funzionamento dello strumento durante l'acquisizione dei dati e quelli usati durante il processamento a bordo.

2. **Scientific Data.** Il dato scientifico costituisce un'eco processato in formato complesso, ovvero è espresso come un vettore contenente la parte reale dell'eco seguita da un altro vettore, di uguale lunghezza, con la parte immaginaria.
1. **Processing Parameters.** Questi dati sono stati ricavati dal software di processamento a terra, ossia nel nostro caso proprio dal tool del CO.Ri.S.T.A e contiene informazioni come il Doppler Centroid e l'ampiezza di banda Doppler dell'eco originale.
2. **The Geometric Parameters** sono computati al suolo e contengono velocità, traiettoria ed assetto dello spacecraft; tutti quei dati cioè che permettono di localizzare i dati raccolti nello spazio e nel tempo.
3. **The Engineering Parameters** infine contengono alcuni parametri dello SHARAD come le temperature dell'antenna al momento del funzionamento.

La posizione dei valori di ogni singolo parametro sono fisse all'interno dei record, ossia lo stesso parametro (per esempio la velocità dello Spacecraft) si troverà sempre allo stesso numero di byte dall'inizio del record ed sarà archiviato, indipendentemente dal valore, sempre con lo stesso numero di byte e lo stesso formato.

Nelle guide consultabili dal sito del PDS (all'indirizzo: <http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mro/sharad.htm>) sono indicati con precisione il numero di byte, il formato ed il posizionamento all'interno di ogni record spettante ad ogni parametro.

Tale guida ha costituito un punto di riferimento importante per la comprensione sul posizionamento delle singole voci del file.



```

OBJECT          = COLUMN
NAME           = RECEIVE_WINDOW_OPENING_TIME
COLUMN_NUMBER  = 57
DATA_TYPE      = PC_REAL
START_BYTE     = 187
BYTES         = 4
DESCRIPTION    = "Opening time of the receiver, measured from
                  the start of the transmission of the pulse and
                  expressed in units of the sampling interval of
                  the analog-to-digital converter, which is
                  0.0375 microseconds long."
END_OBJECT     = COLUMN

```

Sopra viene riportato un esempio^[7], con la descrizione del posizionamento del parametro *di Apertura della Finestra di Ascolto*.

CAPITOLO III

METODI DI RILEVAZIONE DELLE SOTTOSUPERFICI

3.1 INTRODUZIONE

Le varie missioni marziane lanciate nel corso degli ultimi due decenni hanno fornito a scienziati e studiosi una quantità enorme di dati di diversa natura: dalle immagini ottiche ad altissima risoluzione, alle mappe termiche del pianeta, al profilo altimetrico marziano fino ai dati sottosuperficiali ottenuti da MARSIS e SHARAD. Con il succedersi di tali missioni si sono aggiornate conoscenze e nuove scoperte sul pianeta che hanno comportato come conseguenza il poter rivedere i primi modelli di composizione e stratificazione del suolo marziano formulati nei decenni passati, basati principalmente su schemi teorici piuttosto che su dati.

Nella prima parte del capitolo verranno illustrate le tesi più recenti sulla composizione del suolo marziano formulate da scienziati e geologi in seguito alle analisi provenienti dai radar italiani presenti a bordo delle missioni M.R.O ed Mars Express e verranno ampiamente discusse le scoperte fatte e le prove alla base di tali affermazioni.

Gli studi si sono concentrati su una specifica zona del pianeta rosso di grande interesse scientifico, il NPLD – Nord Polar Layered Deposits. Questa zona che si estende per migliaia di chilometri nella regione del Polo Nord marziano rappresenta uno dei siti di maggiore interesse scientifico per la comunità internazionale; la scoperta di un andamento stratificato nel sottosuolo di tale regione, grazie proprio al lavoro dei due radar italiani, ha infatti consentito ai scienziati di iniziare a comprendere la storia geologica del pianeta e le cause dei maggiori cambiamenti climatici avvenuti nel corso del tempo^{[8] [9]}. Proprio per permettere tali studi mappe tridimensionali della sottosuperficie marziana sono state da subito considerate un obiettivo fondamentale della missione M.R.O; il lavoro di tesi si è quindi

concentrato su tale aspetto portando allo sviluppo di uno specifico software in grado di individuare e stimare l'andamento delle sottosuperfici di Marte a partire proprio dai dati di SHARAD.

Nella seconda parte del capitolo verrà così descritto l'algoritmo di individuazione dei segnali sottosuperficiali presenti nei radargrammi del radar che rappresenta il cuore stesso del software creato e verranno elencate le tecniche di interpolazione dei dati ottenuti; all'ultimo capitolo è invece riservato il compito di descrivere le varie caratteristiche del software ed i risultati ottenuti nelle zone più rappresentative e di maggior interesse della calotta polare marziana.

3.2 NORTH POLAR LAYERED DEPOSITS

Con l'arrivo su Marte della missione M.R.O e l'entrata in funzione di SHARAD è stato possibile fornire a scienziati e geologi immagini del sottosuolo marziano con una risoluzione mai raggiunta prima. Questo ha permesso di portare alla luce la complessa stratificazione dei primi chilometri di suolo marziano della zona polare il cui andamento è ben più articolato di quanto fino ad allora si ritenesse. Le informazioni su tali scoperte e sui nuovi schemi da essi ricavati sono stati ottenuti dall'ampia documentazione di articoli scientifici e di ricerca che nel corso degli ultimi anni si sono succeduti sulle principali riviste scientifiche internazionali.

La regione del Polo Nord di Marte è parte di un'immensa base di sedimenti creatasi nel corso di due miliardi di anni dal deposito ed erosione di ghiaccio, lava, polveri ed altri materiali di varia composizione^[10].

Attualmente gli scienziati ritengono che pur esistendo alcune significative differenze tra i depositi polari dei due emisferi, esistano caratteristiche comuni che permettono di creare uno schema generale di comportamento per la stratificazione del suolo. Procedendo dalla superficie verso il basso infatti si possono distinguere in ampie parti delle calotte polari quattro diverse zone^[11]:

1. **Gelo Stagionale (Seasonal frost).**
2. **Ghiaccio residuo (Residual ice).**
3. **Depositi stratificati (layered deposits).**
4. **Superficie marziana preesistente (preexisting Martian surface).**

I depositi stagionali di ghiaccio sono formati in entrambi gli emisferi da CO₂ (ghiaccio secco) e si creano durante il locale periodo invernale quando la diminuzione di temperatura provoca il condensamento del gas. Questo strato di ghiaccio può direttamente coprire il ghiaccio residuo, i depositi stratificati polari o la stessa superficie preesistente marziana a seconda della latitudine. Gli spessore

massimi calcolati per tale strato sono circa di 1-2 metri a latitudine superiori ai 80° per decrescere con il diminuire della latitudine stessa.

La cappa di ghiaccio residuo, invece, differisce da un emisfero all'altro. Nell'emisfero nord il ghiaccio residuo è formato da H₂O, il quale ricopre gran parte dei depositi stratificati sottostanti.

I dati acquisiti da SHARAD permettono di ritenere che tale strato sia formato praticamente da ghiaccio con solo una piccola frazione di polveri presenti in esso, la cui esatta percentuale di presenza è però estremamente difficile da calcolare.

Nell'emisfero meridionale, invece, lo strato di ghiaccio residuo è stimato spesso circa 8 metri e formato da CO₂ il quale ricopre solo una frazione del SPLD (South Polar Layered Deposits) e rappresenta una unità geologica separata dal sottostante strato di ghiaccio.

Le scoperte più interessanti ottenute dai geologi riguardano però il più ampio strato presente immediatamente sotto la superficie. La risoluzione verticale di SHARAD, migliorata di un fattore dieci rispetto a quella di MARSIS, ha portato alla luce la presenza di una serie di veri e propri strati di sottosuolo che si succedono verso il basso portando all'ipotesi che questo livello si potesse ulteriormente ritenere diviso in due parti; nella regione del Polo Nord di Marte questa unità, nota con il nome di North Polar Layered Deposits (NPLD) è formata da un livello superiore chiamato UPLD (Upper Polar Layered Deposits di spessore massimo ~2 Km) ed uno inferiore denominato LPLD (Lower Polar Layered Deposits di spessore massimo 1 Km) riscontrato in letteratura anche con il nome di **BU** (Basal Unit).

Rimandando alle pagine seguenti una dettagliata descrizione della natura e delle proprietà dei materiali formanti tali strati, si possono comunque mettere in risalto le principali caratteristiche e differenze delle due parti: l'unità superiore del NPLD, ben visibile nel radargramma di SHARAD riportato nella come esempio nella figura sottostante relativo all'orbita 5192, è formata da una serie (nella maggior parte dei grafici ne sono distinguibili chiaramente quattro) di blocchi di colore più scuro intervallati da strati nettamente più chiari (indice di un cambio nella composizione del suolo) di spessore calcolato compreso tra i 15 ed i 45 metri.

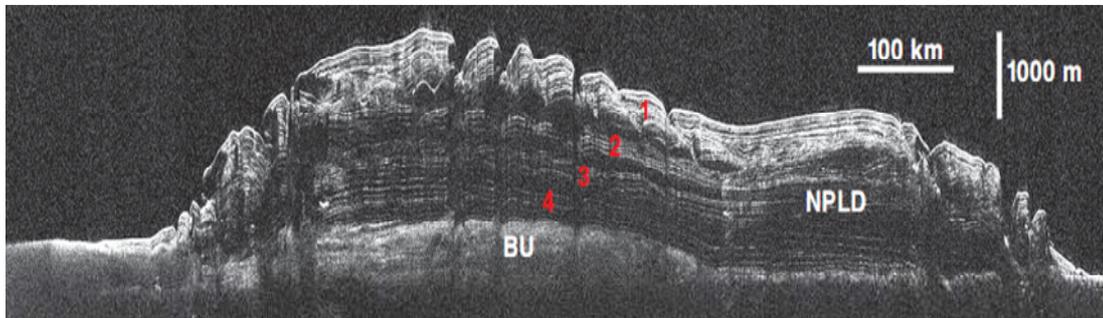


Figura 3.1 Radargramma di SHARAD dall'orbita 5192. L'immagine mostra chiaramente i layers presenti nell'UPLD e la Basal Unit situata ad una profondità di circa 2 Km. ^[10]

La variazione nell'intensità del ritorno in questi strati è da attribuirsi ad una diversa frazione volumetrica di silicati di varia natura all'interno di una matrice formata da ghiaccio puro, mentre le zone più scure presenti tra uno strato ed un altro sono considerate blocchi di ghiaccio con una piccolissima frazione di intrusione. Queste inclusioni sono pensate essere polveri, tesi basata sul valore della loro intensità di ritorno nel segnale del radar.

Meno chiara per il momento è la composizione dell'unità inferiore del NPLD; sebbene la sua presenza sia rilevabile all'interno dei radargrammi, la sua distribuzione è irregolare in molti tratti, lontana dall'andamento degli strati (layers) dell'unità superiore che si estendono uniformemente anche per migliaia di chilometri; spesso infatti questa parte inferiore del NPLD, come è ben visibile nella figura sottostante, termina improvvisamente in molte zone della calotta polare dove si evidenzia a quel punto come il NPLD giaccia direttamente sulla superficie marziana mentre in altre risulta emergere dalla superficie e formare una sorta di banco di prolungamento.

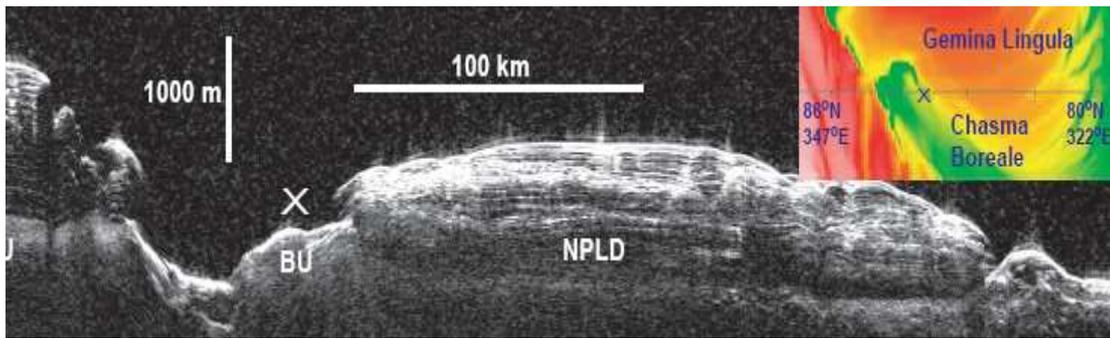


Figura 3.2 Radargramma di SHARAD dell'orbita 5220. Nell'immagine è ben visibile come la Basal Unit possa risalire fino in superficie in alcune zone. ^[10]

Lo spessore dell'UPLD varia dalle poche decine di metri fino al chilometro di spessore in alcune zone (come ad esempio lungo la parte di Marte denominata *Planum Boreum*) in corrispondenza delle quali si registra un aumento del profilo altimetrico della superficie a formare una sorta di catena montuosa; da queste osservazioni è parso chiaro quindi come lo spessore dell'unità superiore del NPLD sia in generale costante in tutto il Polo Nord marziano, segno di una distribuzione uniforme dei processi che hanno portato alla sua formazione nel corso dei millenni mentre le variazioni di spessore sono ritenute di conseguenza dovute proprio principalmente all'ispessimento della Basal Unit.

La difficoltà nel penetrare in maniera chiara proprio lo strato LPLD con lo SHARAD per portare alla luce anche in questo caso una possibile stratificazione che sembra intuirsi in alcune riprese ha portato negli ultimi mesi la NASA a decidere di modificare l'assetto del satellite ed in particolare la posizione dei pannelli solari per consentire al radar di operare in una configurazione diversa da quella nominale; lo scopo di questa nuova configurazione d'assetto è quella di ottenere un guadagno di antenna superiore all'attuale al fine di investigare proprio la conformazione di tale struttura. Come per l'unità superiore del NPLD anche quella inferiore è ritenuta formata da una matrice di ghiaccio con la presenza di elementi di varia natura in percentuali che dovrebbero però essere superiori a quelle dei blocchi sovrastanti. Al di sotto della BU troviamo infine la superficie preesistente marziana modellata nel corso di miliardi di anni da eruzioni vulcaniche ed impatti di meteoriti.

3.3 PROBLEMATICHE RISCONTRATE IN FASE DI ANALISI.

Allo scopo di conoscere la profondità dei ritorni sottosuperficiali nelle zone analizzate durante il lavoro di tesi è necessario conoscere i valori di permittività degli strati di suolo che gli stessi segnali radar inviati da SHARAD si sono trovati ad attraversare; la complessa struttura geologica marziana, descritta nel paragrafo precedente, rende però tale conoscenza non univocamente possibile a causa proprio del succedersi nel sottosuolo di stratificazioni formati da vari materiali in percentuali difficilmente calcolabili.

La permittività di un materiale (indicata anche con il nome di costante dielettrica “ ϵ ”) è una grandezza fisica che descrive come un campo elettrico (e quindi un’onda elettromagnetica) influenza ed è influenzato dal mezzo dielettrico medesimo; in termini sintetici il valore di permittività rappresenta la predisposizione di un materiale a trasmettere o permettere ad un’onda di attraversarlo. La sua conoscenza determina la distanza percorsa (Δz) da una qualsiasi onda in un intervallo generico di tempo ΔT in base alla formula^[12]:

$$\Delta z = [c / (\sqrt{\epsilon})] * \Delta T \quad (3.1)$$

dove ($c \approx 300000$ Km/s) rappresenta la velocità di propagazione della stessa generica onda nel vuoto.

Per poter conoscere quindi quali valori di permittività sono oggi considerati i più probabili per la sottosuperficie marziana nella zona del Polo Nord si è reso necessario una fase di ricerca di tali valori basandosi sull’ampia mole di studi ed articoli sviluppatasi nell’ultimo decennio e pubblicate sulle più prestigiose riviste scientifiche internazionali; gli studi sulle proprietà dielettriche dei materiali marziani si sono infatti continuamente aggiornate nel corso degli anni parallelamente alla raccolta di nuovi dati provenienti dalle missioni marziane. La necessità di affidarsi esclusivamente a dati disponibili in letteratura per i valori delle costanti dielettriche è dovuta all’impossibilità di effettuare sui radargrammi di SHARAD tecniche di

inversione dei dati il cui scopo è proprio la determinazione dei valori di permittività della sottosuperficie osservata. Al fine di introdurre i concetti teorici fondamentali alla base di questo tipo di tecnica, utilizzata per i dati provenienti dal MARSIS e di comprendere i motivi che ne impediscono l'utilizzo per SHARAD richiamiamo alcuni concetti fondamentali sulla propagazione delle onde.

Il rapporto tra le potenze dei segnali provenienti da una superficie (\mathbf{P}_s) e dalla corrispondente sottosuperficie (\mathbf{P}_{ss}), registrato da un qualsiasi radar a penetrazione, assume la forma^[13]:

$$\frac{P_s}{P_{ss}} \Big|_{dB} = \Gamma_s \Big|_{dB} + \int_0^z \alpha(z) dz - R_{12}^2 \Big|_{dB} + \frac{f_s}{f_{ss}} \Big|_{dB} = K_{SS0} + K_{SST} * f_o * \Delta\tau + \frac{f_s}{f_{ss}} \Big|_{dB} \quad (3.2)$$

$$K_{SS0} \approx \Gamma_s \Big|_{dB} - R_{12}^2 \Big|_{dB} \quad (3.3)$$

i termini presenti in questa espressione sono del tutto generali nello studio delle onde elettromagnetiche e dipendendo dai valori della permittività assunta dai vari strati di suolo forniscono la chiave di lettura per comprendere la possibilità di ricavarli dall'applicazione delle tecniche di inversione. In particolare il valore Γ_s rappresenta la riflettività di Fresnel superficiale; quando un'onda elettromagnetica colpisce una superficie di discontinuità tra due mezzi con diverso valore di indice di rifrazione e quindi di costante dielettrica, direttamente collegato a tale parametro tramite la legge:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (3.4)$$

una parte dell'onda viene riflessa mentre la restante parte attraversa la superficie stessa (*rifrazione*) propagandosi nel secondo mezzo. La riflessività di Fresnel fornisce proprio il rapporto tra l'intensità della radiazione riflessa e quella incidente. Nel caso di onda che incide nadiralmente (come per lo SHARAD) il coefficiente superficiale assume la forma semplificata di:

$$\Gamma_S = R_{01}^2 = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{r1}(0)}}{1 + \sqrt{\epsilon_{r1}(0)}} \right|^2 \quad (3.5)$$

dove il termine ϵ_{r1} rappresenta il valore della costante dielettrica del primo strato di suolo.

Il valore $R_{12,z}$ è invece il coefficiente di riflessione di un'interfaccia localizzata a profondità z .

$$R_{12,z}^2 = \left| \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}(z')} - \sqrt{\epsilon_{r2}(z')}}{\sqrt{\epsilon_{r1}(z')} + \sqrt{\epsilon_{r2}(z')}} \right|^2 \quad (3.6)$$

con ϵ_{r2} a rappresentare la permittività del secondo strato di suolo.

Gli altri termini presenti a destra dell'espressione 3.2 rappresentano rispettivamente: l'attenuazione della sottosuperficie riferita al ritardo in tempo misurato dalla superficie (\mathbf{K}_{SSR}), il rapporto tra i coefficienti di riflessione tra superficie e sottosuperficie (\mathbf{K}_{SS0}) ed il ritardo temporale tra i due ritorni ($\Delta\tau$).

Richiamati tali concetti si possono spiegare le cause che impediscono una tecnica di inversione dei dati sullo SHARAD ed accennare a come ciò invece è possibile con i dati raccolti dal MARSIS; la ragione di tale differenza consiste nelle diverse possibili modalità di funzionamento dei due radar. Lo SHARAD funziona con un'unica frequenza centrale di 20 MHz mentre il MARSIS poteva funzionare con tre diverse frequenze centrali permettendo di ottenere su un sito prescelto dati molteplici ottenuti attraverso successive riprese.

La tecnica per l'inversione dei dati infatti, il cui scopo finale è quella di conoscere il valore dei parametri a destra dell'espressione 3.2 che dipendono direttamente da quelli delle costanti dielettriche degli elementi del suolo marziano, trae il suo fondamento proprio dalla possibilità di avere più dati a diversa frequenza a disposizione su una stessa zona; a tale scopo si consideri la differenza dei rapporti delle potenze ottenuti con due diverse frequenze di funzionamento dello strumento:

$$\Delta \frac{P_S}{P_{SS}} = \frac{P_S}{P_{SS}} \Big|_{f_1} - \frac{P_S}{P_{SS}} \Big|_{f_2} \quad (3.7)$$

dove f_1 rappresenta il dato registrato con una frequenza centrale di 3 MHz ed f_2 quello registrato a 4 MHz. Dalla conoscenza di tale valore per un determinato frame rilevato da MARSIS si può immediatamente conoscere il valore di $K_B = K_{SS\tau} \cdot f_0 \cdot \Delta\tau$ come si comprende dalla tabella sottostante che riporta anche un esempio di valori riscontrati negli articoli ^[5]:

$\overline{\Delta \frac{P_S}{P_{SS}}} \Big|_{dB}$	$\overline{\Delta\tau}_{\mu sec}$	$\overline{k_{SS\tau}} = \frac{\overline{\Delta \frac{P_S}{P_{SS}}}}{(f_{01} - f_{02}) \Delta\tau}$	$\overline{k_{SS\tau} \cdot f_0 \cdot \Delta\tau}$ ($f_0 = 4MHz$)
2.4±0.3	$\overline{\Delta\tau_B} = 18$	0.133±0.02	$K_B = 9.6 \pm 1.0$ dB

Ottenuto questo valore, rappresentante l'integrale del coefficiente di attenuazione α rispetto alla profondità della sottosuperficie, si può ricavare il valore della *tangent loss* $\tan\delta_m(z)$ una volta ipotizzato un andamento per α al variare della profondità; quello ritenuto plausibile per questo tipo di studi è stato un andamento lineare dell'attenuazione con la profondità ($\alpha(\tau) = k_1 \cdot \tau$). La *tangent loss* rappresenta un parametro dei materiali dielettrici che quantifica la dissipazione dell'energia elettromagnetica di un'onda che attraversa il materiale stesso ed equivale al rapporto parte immaginaria e parte reale della permittività del materiale secondo la relazione:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3.8)$$

Dal valore di *tangent loss* trovato, che in questo caso è relativo al primo strato, si possono ricavare le curve di andamento della percentuale di intrusione di massa $v(z)$ dei materiali presenti nel ghiaccio. Ricordiamo che la percentuale di intrusione rappresenta il rapporto tra le masse dei materiali basaltici e del ghiaccio per unità di volume fornendo quindi proprio la stima di quando lo strato di ghiaccio sia

“contaminato” da altri materiali. Da queste attraverso il modello di Maxwell-Garnett (uno dei principali modelli utilizzati in questo tipo di problematiche) è possibile successivamente risalire ai valori della costante dielettrica ϵ_m complessiva del primo strato di suolo. In questo modo l'unica ipotesi necessaria al fine di calcolare i valori di costanti dielettrica attraverso il modello di Maxwell-Garnett è supporre che il ghiaccio costituisca l'elemento presente in maggior percentuale nel primo strato di suolo (*host*). Per questo tipo di studio infatti si ipotizzava un andamento del suolo formato da due strati ove ogni strato era a sua volta formato da un materiale di riempimento (detto appunto *host*) ipotizzato in questo caso ghiaccio ed uno di inclusione (*inclusion*) costituito da polveri di diversi materiali di origine. Il valore della permittività dei materiali di inclusione (ϵ_i) del primo strato si ricavava così immediatamente dalle formule create proprio in base a tale ipotesi di stratificazione:

$$\epsilon_m(z) = \epsilon_h \frac{1 + 2\Phi(z)y}{1 - 2\Phi(z)y} \quad (3.9) \quad y = \frac{\epsilon_i - \epsilon_h}{\epsilon_i + 2\epsilon_h} \quad (3.10)$$

dove ϵ_h è la permittività dell'elemento host ed ϵ_m quella totale dello strato di suolo; $\Phi(z)$ rappresenta la legge di decadimento della porosità del suolo attraverso la relazione:

$$\Phi(z) = \Phi(0)e^{-\frac{z}{K}} \quad (3.11)$$

dove z è la profondità in chilometri mentre k è la costante di decadimento, risultante per Marte pari ad $K=2.8$ Km. Il materiale host era infatti ritenuto poroso con una legge di decadimento data dalla formula appena riportata e proprio all'interno di tali pori si concentrava la presenza del materiale di inclusione. La diminuzione della porosità con la profondità è causata dal compattamento sempre maggiore della stessa litosfera sui strati sottostanti; tale ipotesi era avvalorata da un andamento simile riscontrato sulla Luna, che permise inoltre il calcolo proprio della costante stessa (K) di decadimento attraverso il ricalcolo di quello trovato sulla Luna tenendo conto delle diverse accelerazioni di gravità dei due pianeti.

Ottenuto il valore di permittività del materiale di inclusione del primo strato era possibile conoscere anche quello relativo al secondo sempre sotto l'ipotesi che fosse il ghiaccio il materiale presente in maggior percentuale. Il rapporto delle potenze dei segnali di superficie (\mathbf{P}_S) e sottosuperficie (\mathbf{P}_{SS}) con una qualsiasi frequenza centrale di funzionamento espresso nella relazione 3.2 può essere sempre riscritto come:

$$\frac{P_S}{P_{SS}} \Big|_{dB} = \Gamma_S \Big|_{dB} + K_B - R_{12}^2 \Big|_{dB} \longrightarrow R_{12}^2 \Big|_{dB} = \Gamma_S \Big|_{dB} + K_B - \frac{P_S}{P_{SS}} \Big|_{dB} \quad (3.12)$$

In questo caso il valore \mathbf{R}_{12}^2 non è più un'incognita in quanto ora sono noti i valori a destra dell'espressione (2) ed è così possibile conoscere il valore di permittività cercato tramite la relazione:

$$R_{12}^2 \Big|_{dB} = 10 \log \left| \frac{\sqrt{\epsilon'_m(z)} - \sqrt{\epsilon'_2}}{\sqrt{\epsilon'_m(z)} + \sqrt{\epsilon'_2}} \right|^2 \longrightarrow \epsilon'_2 = \epsilon'_m(z) \left[\frac{1 + 10^{\frac{R_{12}^2}{20}}}{1 - 10^{\frac{R_{12}^2}{20}}} \right]^2 \quad (3.13)$$

Questo tipo di indagine è stata eseguita dal team di ricercatori italiani guidati Giovanni Picardi sui dati di MARSIS provenienti dal Polo Sud marziano dopo un attenta selezione dei frame più adatti al fine di escludere nei radargrammi eventuali ritorni dovuti a clutter; per effettuare tale selezione è stato necessario l'utilizzo di un simulatore basato sui dati MOLA che permettesse di individuare le aree più adatte. L'impossibilità di eseguire lo stesso tipo di lavoro con i dati SHARAD proprio per i motivi visti ha portato quindi alla decisione di affidarsi ai valori riscontrati in letteratura e riportati nelle prossime pagine.

3.4 INDIVIDUAZIONE DEL RANGE DI PERMITTIVITA' UTILIZZATI.

Le ricerche presenti in letteratura aventi come oggetto d'indagine Marte ed in particolare la composizione della zona polare sono estremamente numerose, essendo la possibile presenza di acqua nelle sue varie forme da sempre considerata dagli scienziati una scoperta di fondamentale importanza per le implicazioni che da essa derivano, non solo a livello geologico ma anche per la possibile presenza di forme di vita elementari.

Alcune delle stesse relazioni viste nelle pagine precedenti, in particolare quella sulla composizione del suolo marziano, derivano dai primi modelli ipotizzati di stratificazione della zona polare marziana, formulati all'inizio del decennio scorso ed utilizzati anche per il dimensionamento e la progettazione proprio dei radar MARSIS prima e SHARAD dopo.

Come riferimento per i possibili valori di permittività del suolo marziano si sono scelti i risultati ottenuti dai ricercatori Roger J. Phillips (*Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA*) e Daniel Cahn Nunes (*Department of Earth and Planetary Sciences, Washington University, St. Louis, Missouri, USA*); questa preferenza è dettata dal fatto che il loro lavoro oltre ad essere uno dei più recenti riscontrato e preso come riferimento per altri articoli è basato sui stessi dati raccolti da SHARAD. Non essendo infatti possibile un'inversione dei dati, il modello creato dai due ricercatori americani porta ad una verifica empirica dei dati raccolti dal radar confrontando gli stessi con quelli ottenuti tramite l'utilizzo di un simulatore di segnali. Il modello estremamente elaborato e del quale verranno introdotti solo i concetti fondamentali, ha come obiettivo la formulazione di possibili profili di permittività del suolo marziano in funzione della profondità; questi profili vengono così utilizzati per il funzionamento di un simulatore di segnali SHARAD al fine di ottenere il ritorno della sottosuperficie stessa; la fase finale consiste nel paragonare

tali ritorni simulati con quelli reali registrati dal radar in orbita sotto le ipotesi di permittività scelte al fine di verificare la validità di tali valori.

La scelta dei materiali da considerare costituisce il passo iniziale per il modello e si è concentrata principalmente sui tre riscontrati più presenti nella calotta polare marziana: CO₂ (anidride carbonica) e H₂O in forma di ghiaccio e materiali silicati i quali così raggruppano tutti quelli presenti singolarmente solo in piccole percentuali. La costante dielettrica complessa del CO₂ dipende in maggior parte dalla sua densità ed è ben descritta attraverso il modello di *Rayleigh*; l'anidride carbonica ghiacciata presenta densità e valore della costante dielettrica inferiore rispetto ad un blocco di ghiaccio puro a causa della minore densità. Per il CO₂ congelato si ha ^[3]:

$$\epsilon_{frost} = \epsilon'_{frost} + i\epsilon''_{frost} = 1.59 + i9.78 * 10^{-7} \quad (3.14)$$

Questo valore si riferisce alla costante complessa relativa dell'anidride carbonica che in forma più generale è uguale al rapporto della permittività assoluta ϵ_{ass} per la costante dielettrica assoluta nel vuoto ϵ_0 :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.15) \quad \epsilon_0 = 8.84 * 10^{-12} F/m \quad (3.16)$$

Diverso approccio è stato invece utilizzato nello studio delle proprietà dielettriche dell'H₂O in forma di ghiaccio; in passato valori costanti delle parti reali ed immaginari della permittività, pari rispettivamente ad.

$$\epsilon'_{ice} = 3.15 \quad (3.17) \quad \epsilon''_{ice} = 6.30 * 10^{-4} \quad (3.18)$$

erano ritenuti sufficienti a caratterizzare il comportamento dell'acqua; viceversa in tale modello si è preferito effettuare un attento studio dei valori di permittività dell'H₂O in quanto parametri come la frequenza e soprattutto la temperatura a cui si trova il materiale stesso hanno importanti conseguenze nella variazione di tale valore ed in particolare sulla sua parte immaginaria ϵ'' . L'influenza di questi parametri sulle proprietà dielettriche del ghiaccio è stata ottenuta analizzando attraverso modelli

matematici che prendono in considerazione tutte le possibili variazioni sulla permittività dovute a vibrazioni d'antenna, attenuazione da dipolo e flussi termici. La parte reale della permittività dei materiali eruttivi invece varia in un range compreso tra 4.9 e 9.6 in accordo con la composizione e senza essere influenzato dalla frequenza. Il valore della *tangent loss* ($\tan\delta=\varepsilon''/\varepsilon'$) è stato calcolato variante di un ordine ~ 3 in accordo al contenuto di alcuni materiali ($\text{FeO}+\text{TiO}_2$) che si ritengono presenti sul suolo marziano; diversi studi precedenti fornivano valori diversi per la costante dielettrica di tali materiali con differenze anche ampie tra loro. In base a tale considerazioni e ricordando che non esistono campioni provenienti dalle zone polari marziani gli scienziati hanno preferito considerare un range di possibili valori di ε piuttosto ampio; nella tabella sottostante vengono riportati i modelli più utilizzati in letteratura insieme ai valori riscontrati in questi studi. Tutti i valori presenti sono stati oggetti di prove al simulatore.

Modello di Basalto	Riferimento in Letteratura	ε'	ε''
Generico -- a basso valore	Ulaby e al. [1986]	5.4	0.001
Shergottite	Considerato in questo modello	8.8	0.017
Modello con Alterazioni	Heggy e al. [2001]	15	1.5

Tabella 3.1 Elenco dei principali modelli presenti in letteratura per l'individuazione del possibile range di valori della costante dielettrica per il basalto marziano.

Il passo successivo, selezionati i materiali di indagine, è stato quello di ottenere i possibili profili della frazione di inclusione $\nu(\mathbf{z})$ di questi materiali all'interno della matrice formata dal ghiaccio; per raggiungere tale obiettivo si sono utilizzati i dati raccolti da due strumenti ottici: il MOC-NA (Mars Orbiting Camera Narrow-Angle System) ed il THEMIS-VIS (Thermal Emission Imaging System's Visible Subsystem).

Questi due strumenti presenti a bordo delle missioni *Mars Global Surveyor* ed *Mars Odyssey* hanno fornito fotografie ad altissima risoluzione del pianeta in diverse bande di funzionamento; in particolare sono stati selezionati alcuni frame provenienti da zone molto particolari della calotta polare ove la superficie presentava depressioni di piccola pendenza che intersecavano in alcuni tratti la struttura del NPLD sottostante rendendoli perfetti per lo studio.

Ottenuta la radianza dei punti delle immagini si è così potuto ricavare, attraverso il rapporto di tale grandezza con l'irradianza del Sole al momento degli scatti, la conoscenza del valore di Albedo di Lambert (**A**) in funzione della profondità. Il valore di albedo fornisce infatti la frazione di radiazione incidente che viene riflessa e in questo caso catturata dagli strumenti scientifici.

Per ottenere tale andamento alcune operazioni di ricalibrazione e correzione geometrica sono state necessarie per compensare l'angolazione del Sole all'interno delle immagini. La successiva conversione dei valori di albedo ottenuti nella curva di andamento della frazione volumetrica di intrusione dei silicati $\nu(\mathbf{z})$ è stata invece non semplice a causa della forte dipendenza di questo valore dalla dimensione dei grani sia del ghiaccio e sia dei silicati in esso presenti.

Attraverso l'utilizzo del modello radiativo di *Kieffer*, impiegato in tali tipi di studi, si è compreso come un medesimo valore di albedo potesse essere ottenuto con grani di dimensioni molto diverse ed in particolare è emerso che il parametro fondamentale da esaminare era il rapporto dei grani stessi. Sebbene alcuni studi recenti abbiano ipotizzato valori per la polvere compresa in un range da 1 ad 100 μm , l'assenza di tali tipi di dati per la calotta polare marziana ha spinto gli scienziati ad usare un più ampio range di valori possibili, descritto nella tabella seguente, il quale soddisfa il modello di *Kieffer* per valori di albedo compresi tra 0.2-0.5.

Caso	Albedo	ν	ν	ν	ν
	0.45 0.20	0.0001 0.001	0.001 0.01	0.01 0.1	0.1 0.5
I	Ice Grain Dust Grain	~1mm 0.1mm	0.4mm 0.1mm	0.2mm 0.1mm	0.1mm 0.1mm
II	Ice Grain Dust Grain	0.1mm 10 μ m	40 μ m 10 μ m	25 μ m 10 μ m	12 μ m 10 μ m

Tabella 3.2 Andamento del valore di percentuale di intrusione volumetrica ν in base al valore di albedo e grandezza dei grani considerata.

La relazione tra i valori di albedo (nel range 0.2-0.45) e la frazione di intrusione è stata considerata lineare per valori dei grani maggiori di 2.5 μ m ed ha consentito così di ottenere la desiderata curva $\nu(z)$ di intrusione dei materiali silicati all'interno del ghiaccio. Dalla conoscenza dei profili sintetici di andamento di $\nu(z)$ è stato infine possibile ricavare, attraverso altri modelli, i profili della costante dielettrica effettiva del suolo ϵ_{eff} (come quella riportata nel grafico seguente) al variare dei valori dei materiali caratterizzanti come ghiaccio e materiali di intrusione.

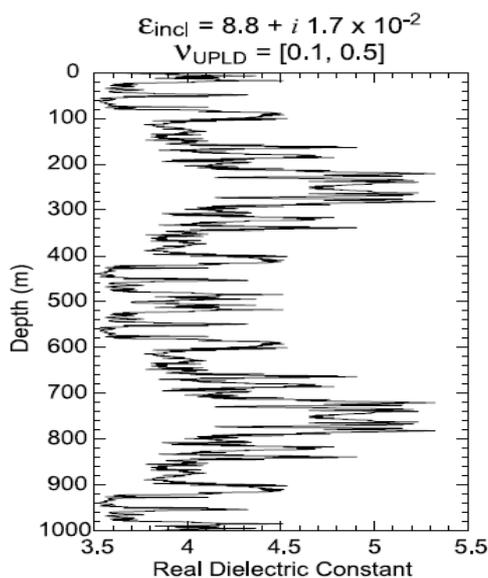


Figura 3.3 Il grafico mostra uno dei possibili andamenti di costante dielettrica complessiva del suolo al variare della profondità ottenuto in base ai valori di percentuale di intrusione e costanti dielettriche scelte. ^[11]

Terminata questa fase di ricerca si è potuto avviare la fase di studio dei radargrammi di SHARAD attraverso l'uso di un simulatore che riproducesse proprio il segnale chirp inviato dal radar. I possibili profili della costante dielettrica ottenuti sono stati infatti inseriti nel simulatore stesso proprio per simulare il possibile ritorno dei vari strati sottosuperficiali. Le prove si sono così svolte confrontando i valori ottenuti dai simulatori con quelli provenienti dal radar; facendo variare i vari parametri in gioco (frazione di intrusione, permittività dei materiali e temperatura degli stessi strati di suolo) si è potuto così capire quale combinazione degli stessi permettesse di ottenere i risultati più vicini a quelli reali in possesso degli scienziati.

Le simulazioni effettuate mimano il processamento dei dati dell'impulso di SHARAD di durata $85 \mu\text{s}$ nella direzione di range pesato da una funzione di *Hanning* allo scopo di controllare la riflessione dei lobi laterali; questo tipo di funzione è estremamente adatta nel portare alla luce segnali sottosuperficiali molto deboli in presenza di lobi laterali dovuti a un forte ritorno superficiale. Trasformato il segnale nel dominio delle frequenze attraverso una **FFT** (*Fast Fourier Transform*) e moltiplicato per una funzione **R(f)** che imita la risposta dei vari strati di suolo (calcolata proprio grazie ai valori di $\epsilon(z)$), il segnale viene individuato attraverso un filtro e riportato nel dominio del tempo attraverso una **IFFT** (*Inverse Fast Fourier Transform*) ottenendo così la storia del segnale riflesso, appunto chiamato comunemente radargramma.

I risultati ottenuti mostrano come alti valori di ν portino ad un ritorno più intenso dello strato di separazione tra le due unità della calotta polare (UPLD ed LPLD); i valori massimi registrati, a parità di ν , si sono ottenuti nel caso del minimo dei valori possibili per il range di costanti dielettriche considerate per i materiali di intrusioni ($\epsilon=5.4+i10^{-3}$). In questo caso i ritorni dello strato più basso del UPLD si sono verificati molto superiori al livello di SNR (*Signal to Noise Ratio*) previsto per il radar aumentando con la percentuale di intrusione. All'aumentare del valore ϵ fino al massimo previsto ($15+i1.5$) invece si è registrato una diminuzione della massima profondità di penetrazione del segnale a causa dell'aumento delle perdite di

conduttività; dal chilometro massimo per valori minimi di ν si è arrivato a 250 metri per quelli maggiori.

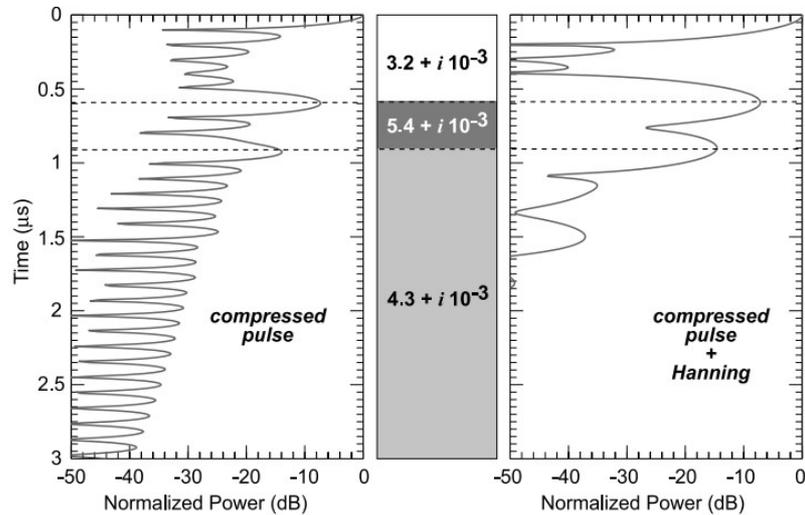


Figura 3.4 Diagramma di due diversi radargrammi ottenuti con l'ausilio di un simulatore di segnali SHARAD. ^[11]

Le simulazioni hanno permesso inoltre di comprendere altre importanti fenomeni: la frazione di polveri presenti nella matrice di ghiaccio in tutti i radargrammi di SHARAD dove si può notare chiaramente la presenza di vari layers sottosuperficiali è sicuramente superiore al valore di 10^{-3} in quanto un valore inferiore non permetterebbe la loro individuazione mentre la presenza di ulteriori strati nel primo centinaio di metri di profondità, anche questi ben visibili in molte riprese effettuate dal radar non influenza la capacità di SHARAD nel rilevare le sottostanti stratificazioni dell'UPLD.

Il possibile range di valori della costante dielettrica complessiva del suolo al variare della percentuale di inclusione dei materiali stessi è riportata nella figura seguente^[14]:

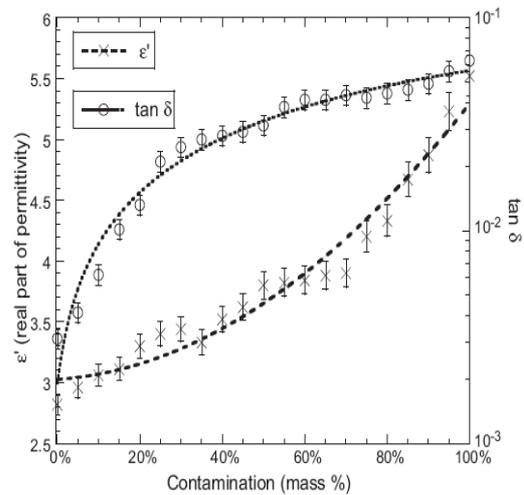


Figura 3.5 Grafico dell'andamento del valore di costante dielettrica complessiva del suolo marziano come funzione della percentuale di intrusione di polveri di vari materiali all'interno della matrice formata prevalentemente da ghiaccio. ^[14]

Questi sono quindi i valori utilizzati per lo svolgimento del lavoro di tesi volto all'individuazione delle sottosuperfici marziane. Altre ricerche riscontrate in letteratura precedenti a questa ottengono range di valori o addirittura costanti molto simili a quelli ottenuti confermando quindi come la calotta polare sia fondamentalmente costituita dal ghiaccio puro con una frazione relativamente piccola di intrusione costituita dalle polvere di diversi materiali.

3.5 ALGORITMO PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE SOTTOSUPERFICI.

L'obiettivo del lavoro di tesi è stato l'individuazione degli echi di sottosuperficie dai radargrammi di SHARAD e la stima della loro profondità. A tal fine, è stato sviluppato un software dedicato capace di analizzare i dati complessi individuando in maniera automatica la presenza di echi di sottosuperficie e la loro distanza dall'eco di superficie.

Questo paragrafo è dedicato alla descrizione dell'algoritmo impiegato per l'individuazione nello spazio e nel tempo dei ritorni sottosuperficiali all'interno dei radargrammi di SHARAD. Il codice creato affronta tutte le problematiche riscontrate nel lavoro di tesi per il corretto funzionamento delle operazioni di plotting delle sottosuperfici. Selezionata l'area da voler analizzare, con le modalità che verranno descritte all'inizio del quarto capitolo quando verrà illustrata l'interfaccia software del programma, il codice inizia la fase di individuazione all'interno di ogni file RDR dei ritorni presenti in quella zona tramite le informazioni ancillari collegate ai ritorni stessi e presenti sempre nel file.

Individuato un eco si passa quindi alla sua analisi estraendolo dal file con i valori riportati in decibel e normalizzati rispetto al massimo ossia rispetto al ritorno di superficie che assume così valore pari a zero. La ricerca del picco di ritorno sottosuperficiale all'interno di un eco, corrispondente alla Basal Unit, è ostacolato sia dalla presenza del rumore esterno sia, soprattutto nel caso dei dati di SHARAD, da ritorni molteplici successivi a quello di superficie che equivalgono proprio ai vari layers spiegati ed analizzati nei precedenti paragrafi e le cui intensità sono state riscontrate in molti casi superiori a quello di separazione tra la UPLD e la LPLD. Al fine di individuare il ritorno corrispondente all'interfaccia della Basal Unit quindi l'algoritmo esegue una serie di operazioni su ogni eco sotto analisi:

- Suddivisione dell'eco, a partire dal ritorno localizzato come quello corrispondente alla superficie, in gruppi di trenta campioni di ampiezza.

- Individuazione per ognuno di questi gruppi del massimo relativo e del valore medio del gruppo.
- Ricerca del valore medio di tutti i campioni a partire dal primo registrato dal radar fino a quello precedente il ritorno della superficie.

La scelta da parte dell'algorithm su quale sia il massimo indicante la sottosuperficie cercata, tra quelli individuati come massimi relativi, cade sull'ultimo (quello a profondità maggiore) avente un valore in potenza tale da risultare sicuramente non confondibile con il normale rumore del ricevitore; il valore del rumore è calcolato proprio basandosi sul valore medio dei campioni registrati da SHARAD dall'apertura della finestra di ascolto fino al ritorno corrispondente al suolo marziano.

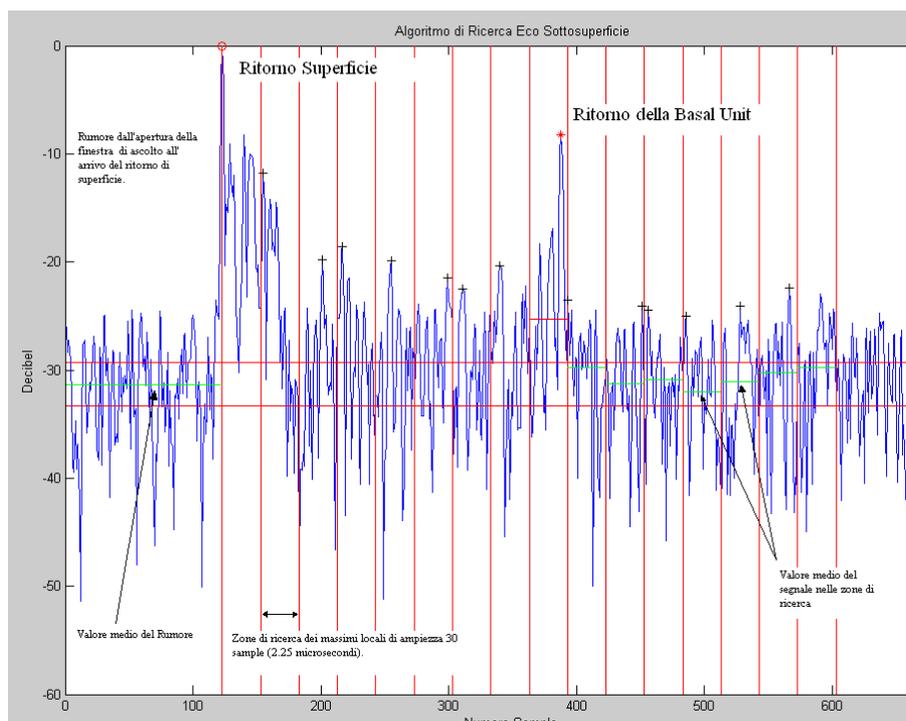


Figura 3.6 Il grafico riassume le operazioni eseguite dall'algorithm di ricerca delle sottosuperfici implementato. Calcolato il valore del rumore ed il picco massimo di ritorno dell'eco che corrisponde al ritorno della superficie si passa alla suddivisione dell'eco in zone di ricerca di ampiezza 2.25 microsecondi.

Questo tipo di operazione permette da un lato di non confondere il ritorno cercato con uno dei layer sovrastanti (da qui la decisione di prendere l'ultimo utile) e dall'altra di non confondere un ritorno con un semplice valore di rumore registrato (da qui il controllo sui valori medi degli intervalli scelti). Individuato il ritorno scelto come corrispondente alla Basal Unit marziana, si calcola la distanza in numero di campioni Δs dal ritorno superficiale e successivamente la profondità dalla superficie stessa attraverso la conversione in tempo di Δs ed il calcolo della distanza percorsa dal segnale in tale intervallo con l'espressione:

$$\Delta\text{profondità} = [c / (2 * \sqrt{\epsilon_{tot}})] * \Delta t$$

dove c rappresenta il valore della velocità della luce ($c \approx 300.000$ Km/s) alla quale viaggia un'onda elettromagnetica. Il valore di ϵ presente in tale espressione è proprio quello relativo alla costante dielettrica complessiva del suolo; questo valore è in realtà una variabile all'interno del programma essendo regolabile con una barra interattiva presente nella figura che si apre al momento del plottaggio della superficie.

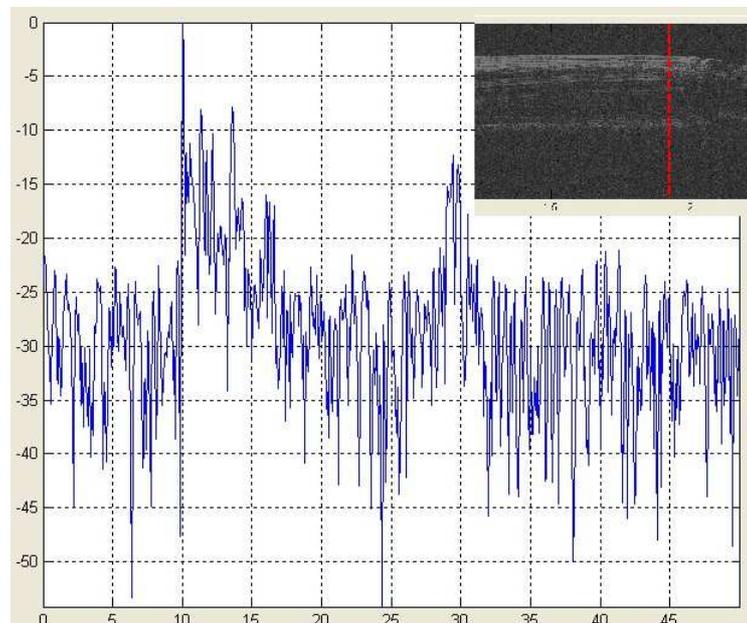


Figura 3.7 Radargramma estratto dall'orbita 0622002. Il ritorno della sottosuperficie appare in questo caso chiaro e facilmente individuabile.

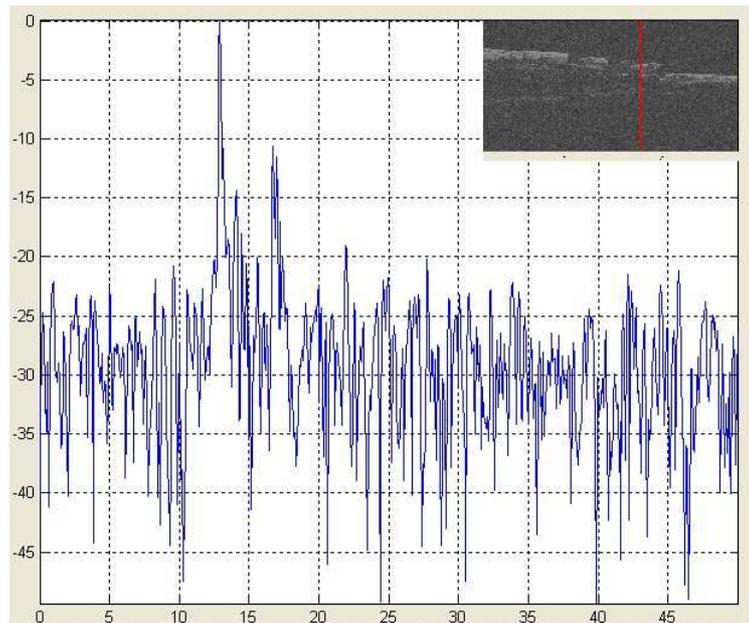


Figura 3.8 Radargramma estratto dall'orbita 0677402. In questo caso appare subito la difficoltà nell'individuazione del ritorno della sottosuperficie a causa del basso segnale di ritorno della Basal Unit.

Immagazzinati i valori di profondità dei punti individuati e le informazioni necessarie alla loro geolocalizzazione tramite i valori di latitudine e longitudine si passa ad una successiva fase di interpolazione dei valori in una griglia regolarmente spaziata ricoprente la zona stessa di studio. La fase di interpolazione è naturalmente necessaria per poter conoscere la completa distribuzione della sottosuperficie nelle zone scelte e per la realizzazione delle mappe tridimensionali.

L'algoritmo selezionato che in automatico prevede quindi a localizzare ed estrarre tutte le informazioni necessarie sui ritorni sottosuperficiali registrati dal radar ha ottenuto ottime risultati in tutte le zone della calotta polare marziana che si presentano con una sottosuperficie bene evidente e uniformemente distribuita; in questi casi infatti l'algoritmo riesce in maniera piuttosto agevole ad individuare tutti i ritorni corrispondenti all'interfaccia di separazione tra la UPLD e la sottostante LPLD. Eventuali punti isolati erroneamente localizzati vengono eliminati con una procedura di controllo su tutti i valori individuati in un file che basandosi sul valore

medio assunto su tutto il radargramma ne elimina eventuali picchi isolati segno di un errore nell'individuazione. Questa situazione è ben mostrata nella figura 3.7 dove viene mostrato uno degli echi di ritorno registrato da SHARAD durante l'orbita 06220; in questo caso infatti il picco di ritorno superficiale è ben distinguibile all'interno del grafico consentendone un immediata individuazione.

Problemi si sono invece riscontrati in alcune prove effettuate sempre nella zona polare marziana dove la Basal Unit cercata, come discusso anche nel paragrafo precedente, si presenta in maniera discontinua con un ritorno in potenza così basso da essere non ben distinguibile dal rumore esterno stesso. In questo caso l'algoritmo individua come quello cercato un ritorno in realtà appartenente ad un layer superiore alla Basal Unit di centinaia di metri oppure in assenza dei layer stessi lo localizza nei primi strati sottostanti alla superficie portando ad un amplificazione dell'errore nella successiva fase di interpolazione.

Difficoltà si sono registrate anche ai margini della calotta polare marziana ossia nelle zone dove l'unità sottosuperficiale riemerge fino alla superficie; in tal caso all'avvicinarsi della BU alla superficie risulta difficile distinguere il ritorno cercato da quelli dei primissimi strati sottosuperficiali i cui valori sono spesso estremamente vicini in intensità a quelli superficiali. Questa tipologia di ritorni è mostrata nella figura 3.8 dove viene riportato uno degli echi registrati dal RADAR nella zona di terminazione della Basal Unit; si nota in questo caso la mancanza di un segnale di ritorno distinguibile della sottosuperficie.

Al fine di superare tali difficoltà, nelle zone maggiormente a ridosso della superficie è stato adottato un diverso algoritmo di ricerca; l'individuazione dei punti della sottosuperficie passa dall'essere automatica al manuale. I radargrammi individuati passanti per la zona di ricerca inserita vengono visualizzati sullo schermo a turno e l'operatore attraverso l'uso del mouse può selezionare un numero di punti in corrispondenza della sottosuperficie ottenendo così una linea di andamento lungo tutto il radargramma. Tra due punti successivi selezionati ne vengono individuati altri in maniera automatica dal programma in modo da aumentare il numero di campioni a disposizione. Questi ulteriori punti vengono ottenuti attraverso un

interpolazione lineare del tratto analizzato formato dalla linea di congiunzione dei punti inseriti tramite mouse sullo schermo in numero regolabile all'interno del software. Sui tutti i punti scelti viene applicata una funzione di verifica; il valore ottenuto in corrispondenza del sample selezionato viene confrontato con quelli vicini appartenenti allo stesso eco al fine di verificare quale sia il massimo relativo che viene registrato come quello effettivamente cercato. La scelta del valore massimo relativo da usare per l'interfaccia di separazione tra NPLD ed LPLD è adottata proprio per far fronte alla struttura di tale unità a tratti spesso con accenni di stratificazione non però chiaramente distinguibili (come inoltre riscontrato in alcuni articoli scientifici). Questo tipo di applicazione ha permesso di superare i problemi riscontrati nelle zone di confine della calotta polare dove la Basal Unit termina sulla preesistente superficie marziana come mostrato nella figura seguente dove si riporta uno dei radargrammi analizzati.

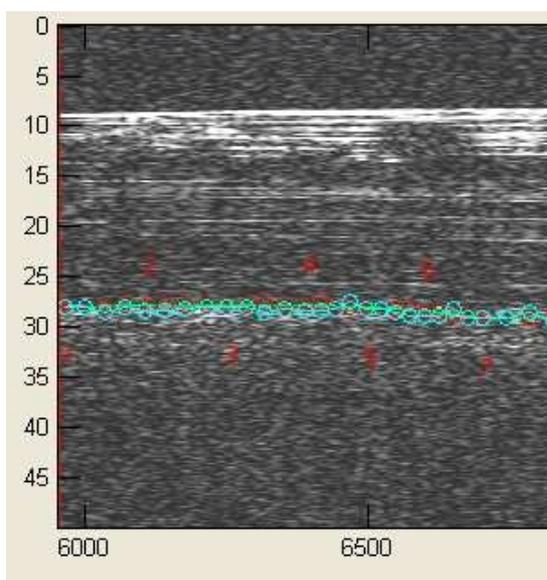


Figura 3.9 Immagine di una porzione dell'orbita 066202 di SHARAD con evidenziati in rosso la linea costruita tramite l'inserimento dei punti da mouse ed in ciano quella corretta rispetto ai massimi locali.

La fase di interpolazione dei dati è invece comune per entrambe le modalità di funzionamento; i metodi impiegati per l'interpolazione di dati non regolarmente distribuiti nello spazio sono quattro:

1. ***Nearest neighbor interpolation (metodo =”nearest”)***. Questo metodo restituisce a tratti delle superfici costanti che attraversano i dati forniti. Il valore del punto interpolato è il valore del punto più vicino ad esso.
2. ***Bilinear interpolation (metodo =”linear”)***. In questo caso si adattano delle superfici bilineari attraverso i punti dati. Il valore dei punti interpolati è una combinazione dei quattro punti più vicini; questo metodo è a tratti bilineare (un estensione del metodo lineare per casi bidimensionali) e rappresenta anche il procedimento più veloce e quello a minore occupazione di memoria.
3. ***Bicubic interpolation (metodo =”cubic”)***. Questo metodo adatta curve bidimensionali ai punti trovando il valore dei punti interpolati come combinazione dei sedici punti più vicini a quello cercato. Anche questo metodo rappresenta un estensione del metodo cubico per i casi bidimensionali.
4. ***Biharmonic Spline Interpolation (metodo =”V4”)***. Questo metodo è basato sull'interpolazione “spline” tra i più conosciuti ed è stato usato in precedenti lavori scientifici proprio per l'interpolazione di dati provenienti dal telerilevamento^[15].

Queste funzioni, selezionabile attraverso l'interfaccia del programma, hanno riportato in alcuni casi risultati simili tra loro, in modo particolare nelle zone ad altra concentrazione di riprese avendo una maggiore densità di dati a disposizione.

Le posizioni geografiche dei punti in uscita dall'interpolazione sono state scelte essere corrispondenti ai dati registrati dal MOLA; questo permette successivamente

sia di quotare la sottosuperficie non più rispetto alla superficie ma rispetto all'ellissoide di riferimento IAU2000 ("International Astronomical Union 2000"), usato proprio come riferimento geografico dai dati MOLA, e sia di diagrammare contemporaneamente la superficie e la relativa sottosuperficie individuata al fine di un immediato confronto.

CAPITOLO IV

SOFTWARE REALIZZATO E RISULTATI OTTENUTI.

4.1 INTRODUZIONE

Il capitolo conclusivo del lavoro di tesi è dedicato alla descrizione del programma sviluppato e all'illustrazione dei risultati ottenuti analizzando diverse aree della calotta polare marziana.

Il primo paragrafo descrive le funzionalità del software realizzato; le interfacce grafiche, sviluppate attraverso l'apposito ambiente grafico G.U.I.D.E (*Graphical User Interface Development*) presente nel software Matlab, permettono la completa gestione del software: scelta delle orbite, selezione dell'area da analizzare e impostazione dei parametri di visualizzazione delle superfici tridimensionali e dei radargrammi sono immediatamente selezionabili dall'utente attraverso appositi menù presenti sullo schermo.

I paragrafi successivi descrivono invece i risultati ottenuti in diverse aree del Polo Nord di Marte; per ognuna di queste zone vengono visualizzati i vari grafici ottenuti insieme alla descrizione delle verifiche effettuate e degli eventuali problemi riscontrati.

Il paragrafo finale di conclusione riassume infine i principali passi effettuati durante il lavoro stesso di tesi.

4.2 PROGRAMMA PER LA VISUALIZZAZIONE DELLA SOTTOSUPERFICIE MARZIANA.

Il software realizzato è stato creato utilizzando il linguaggio di calcolo *MatLab*[®] e presenta una serie di interfacce interattive che permettono il completo funzionamento del programma, dalla visualizzazione al salvataggio dei risultati ottenuti. Attraverso il software è possibile selezionare i file RDR da analizzare ed impostare una serie di parametri per la scelta delle zone di indagine e per l'elaborazione dei dati stessi.

La prima interfaccia, chiamata "*Selection_Panel*" e visualizzata nella figura 4.1 permette attraverso una barra di ricerca (**A**), la selezione della cartella contenente i file .RDR ritenuti utili da esaminare; in fase di studio, data l'ampia mole di registrazioni effettuate da SHARAD in tutta la zona della calotta polare marziana si è preferito creare delle cartelle con file preselezionati in base alla loro localizzazione sul suolo marziano per non aggravare eccessivamente memoria e velocità del programma. I criteri che hanno portato alla selezione di queste orbite verranno descritte nelle prossime pagine insieme ai risultati ottenuti. Scelta la cartella da analizzare è possibile visualizzare nelle colonne sottostanti (**B**) i file contenuti al suo interno con il relativo numero di orbita e valori di SS (modo operativo del radar) e OST; nella parte inferiore della finestra quattro pulsanti permettono di accedere a varie funzioni. Il primo pulsante "*Semi-Automatic Analysis*" permette di avviare una seconda interfaccia per la gestione delle operazioni necessarie al plottaggio delle sottosuperfici desiderate; gli altri pulsanti, in particolare "*View-RDR Selected*" e "*View Label*" consentono rispettivamente di visualizzare il radargramma di ogni possibile file contenuto nella cartella scelta e il relativo file LBL.

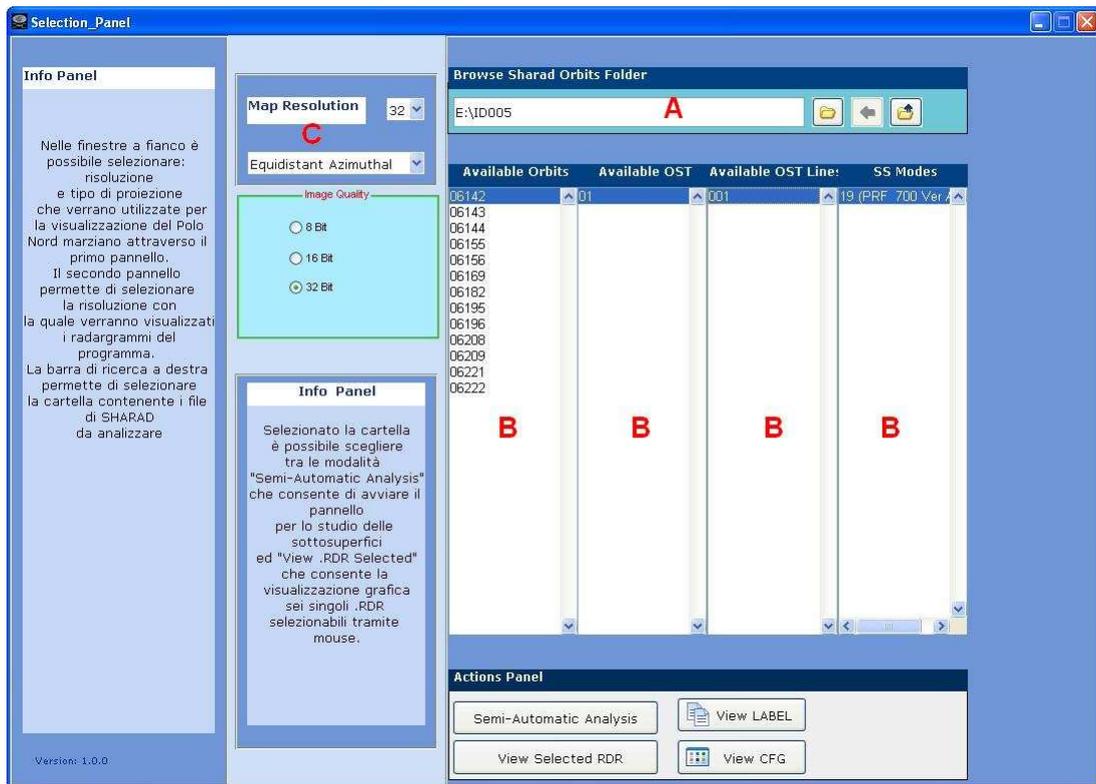


Figura 4.1 Immagine del Selection_Panel con uno dei gruppi di orbite studiate visibile. In alto (A) la barra per la ricerca delle cartelle il cui elenco è visualizzabile nelle colonne sottostanti (B). Il pannello (C) permette di impostare i parametri per il successivo pannello.

L'ultimo pulsante "View CFG" permette di aprire una finestra contenente informazioni sui parametri di configurazione di SHARAD come frequenza di funzionamento, ampiezza di banda e numero di bytes iniziale e finale da dove iniziare a leggere i dati scientifici dai file DAT.

Nella figura descritta è presente infine un pannello per la scelta della qualità dell'immagine con la quale saranno plottati tutti i radargrammi del programma; ricordando che i dati scientifici di SHARAD sono registrati utilizzando 4 bytes per dato è possibile scegliere tre possibili valori: otto, sedici o trentadue bit per la rappresentazione delle immagini che viene poi trasformata in scala di grigi prima della visualizzazione sullo schermo.

L'interfaccia per la selezione della zona da analizzare ed il plottaggio della relativa superficie, che viene visualizzata tramite il pulsante "*Semi-Automatic Analysis*", presenta anch'essa una serie di pulsanti per la successiva scelta e gestione di diverse tipologie di esecuzione del software. Un'ampia mappa viene visualizzata nella parte centrale della figura insieme alla traccia al suolo di tutti i file caricati precedentemente; la mappa è creata avente come origine delle proiezioni proprio il Polo Nord marziano attraverso i valori dei parametri selezionati nel riquadro presente nel primo pannello. Attraverso due menù a "*tendina*" si scelgono infatti i valori di risoluzione dell'immagine e del tipo di proiezione da adottare(C). I dati necessari all'algoritmo per la proiezione e il plottaggio della mappa sono ricavati dal MOLA (un cerchio di colore grigio ricopre le latitudini dal 88° parallelo al Polo essendo la zona non contemplata dallo strumento); pur essendo possibile impostare valori di risoluzione estremamente alti, fino ai 128 pixel per grado proprio dello strumento, le prove effettuate hanno consigliato una risoluzione massima di 32 pixel per non appesantire troppo le prestazioni del programma. La parte di codice necessaria all'operazione prevede anche l'impostazione di parametri come quelli caratterizzanti l'ellissoide di riferimento marziano (IAU2000) usato dal MOLA per l'archiviazione dei dati, necessaria per le operazioni di proiezione storicamente create per la diversa forma della Terra (sfera). Stessa operazione di proiezione è effettuata sulle orbite del satellite essendo i dati di latitudine e longitudine anche in tal caso geolocalizzati rispetto al IAU2000; la mappa è infine colorata attraverso una scala ben visibile sul lato della figura con le relativi indicazioni di quota.

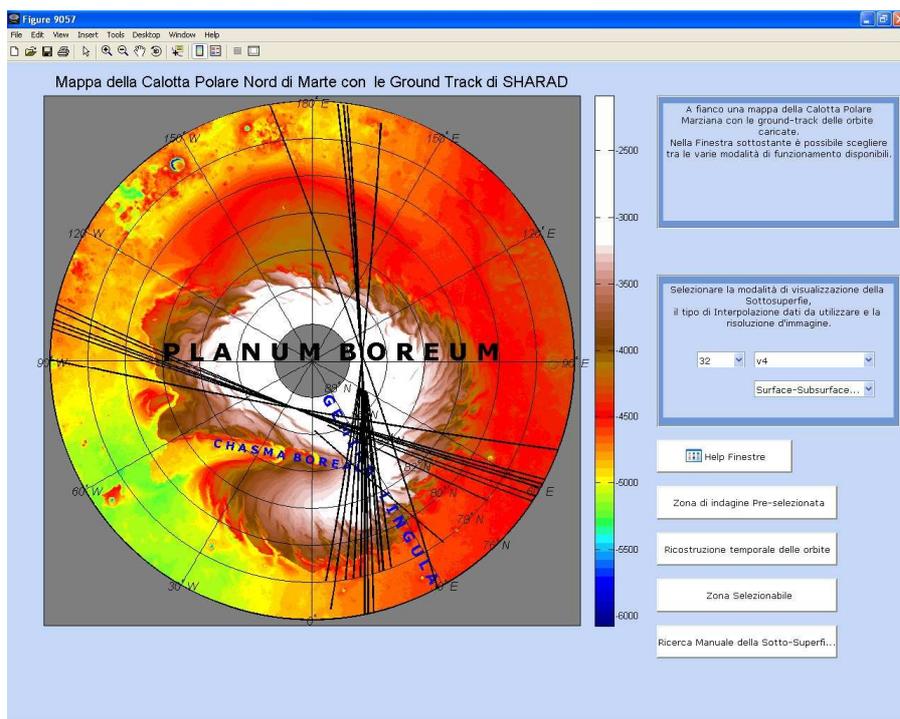


Figura 4.2 Il pannello per la creazione delle sottosuperfici permette di visualizzare le ground track del satellite e di scegliere le aree di indagine.

I pulsanti presenti sulla parte inferiore della figura permettono di entrare nella parte principale del programma e scegliere tra le due diverse modalità di funzionamento precedentemente spiegate; in particolare troviamo i seguenti pulsanti:

- 5. Zona di Indagine Pre-selezionata.**
- 6. Zona Selezionabile**
- 7. Individuazione manuale della Sotto-superficie**

Il primo di questi permette il plottaggio di una zona preselezionata nel caso che la cartella caricata, contenente i file RDR da esaminare, appartenga al gruppo di quelle scelte come le più significative, identificabili con il nome ID. Questa zona, se presente, è immediatamente visibile sulla mappa proiettata del Polo Nord marziano in colore ciano al momento stesso dell'apertura della finestra. Il secondo pulsante "Zona Selezionabile" avvia l'apertura di un menù di inserimento dati, dove si

possono scegliere i limiti di latitudine e longitudine da esaminare; questo consente di selezionare la zona da analizzare dando così la possibilità di focalizzare l'attenzione su zone molto dettagliate della calotta polare rilevate dai radargrammi del radar.

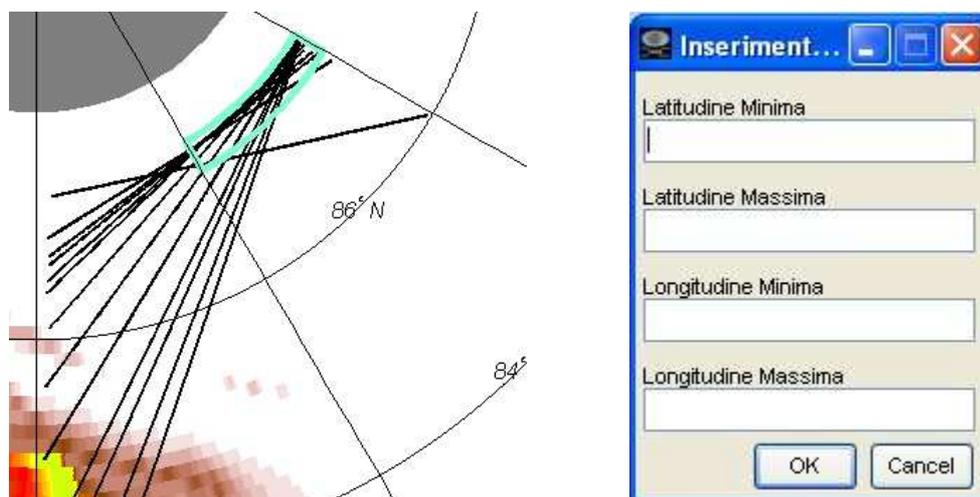


Figura 4.3 Nelle due figure si può notare: un ingrandimento delle mappe polari realizzate con ben visibile la zona preselezionata per l'analisi (a sinistra). A destra il menù creato per l'inserimento dei dati.

Entrambe queste applicazioni funzionano con l'algoritmo di ricerca automatico descritto nel capitolo precedente portando alla visualizzazione della sottosuperficie cercata senza ulteriori operazioni da seguire; questa operazione è affidata alle funzioni di plotting predefinite presenti in ambiente MatLab che consentono inoltre, una volta visualizzata la superficie, di ruotarne la visuale permettendone lo studio attraverso varie angolazioni. Nella finestra creata oltre alla superficie plottata è presente una barra di selezione per permettere di scegliere diversi valori di permittività del suolo appartenenti al range di valori individuati in letteratura ed analizzati nel capitolo precedente. Il software, in modo automatico, ricalcola profondità e profilo della sottosuperficie al variare della permittività rivisualizzando l'immagine in figura e restituendo il corrispondente valore di percentuale di intrusione e tangent loss associato a quello di costante dielettrica scelto.

L'ultimo pulsante presente (*“Attivazione manuale della Sotto-Superficie”*) permette invece di avviare la modalità di ricerca manuale dei punti della sottosuperficie; in questo caso infatti, selezionata la zona di indagine tramite sempre un menù sul monitor, si passa alla visualizzazione dei radargrammi trovati presenti nell'area selezionata selezionando per ognuno di essi manualmente i punti appartenenti alla sottosuperficie. La fase di interpolazione e la successiva visualizzazione segue invece le regole e le tecniche scelte per la modalità automatica.

4.2 CRITERI DI SCELTA DELLE ORBITE SHARAD.

L'enorme mole di riprese effettuate da SHARAD negli ultimi due anni di attività ha costretto ad una fase di pre-analisi delle orbite al fine di suddividerle in gruppi di poche decine di unità per non appesantire eccessivamente la velocità del software creato; la velocità dell'algoritmo di lettura e ricerca degli echi sottosuperficiali all'interno del programma è proporzionale alla quantità stessa dei file da analizzare in fase di lettura al fine di individuarne possibili zone comprese nell'area di ricerca selezionata. Piccoli problemi di memoria presentatesi in alcune zone analizzate sono invece state superate imponendo parametri meno spinti nella visualizzazione grafica oppure, ricorrendo ad una sottocampionatura dei dati individuati.

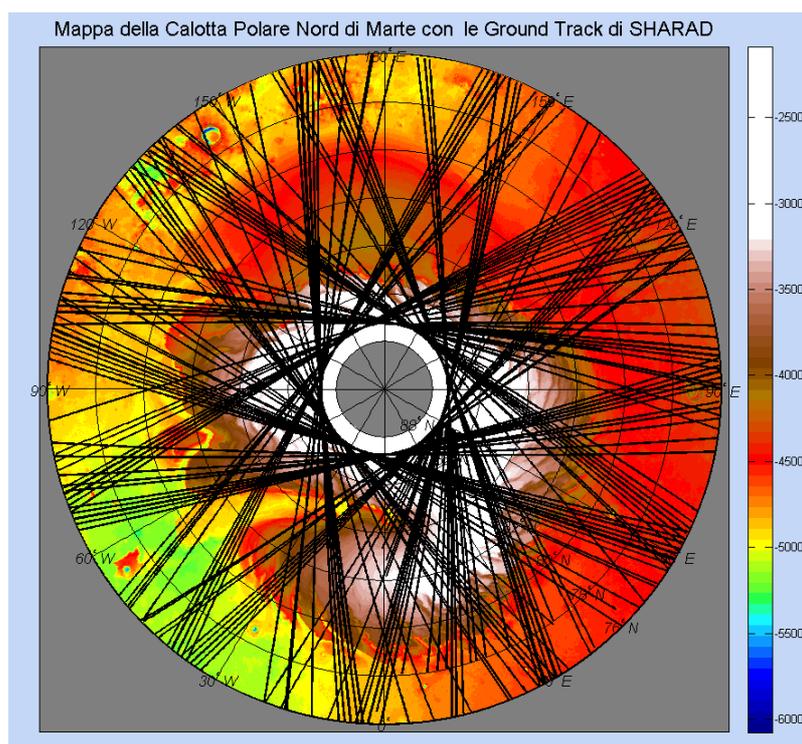


Figura 4.4 Mappa della calotta polare marziana con la sovrapposizione di tutte le ground track di SHARAD disponibili per il lavoro svolto.

Il criterio principale utilizzato per la catalogazione delle orbite da analizzare è stata la posizione delle *ground track* sulla calotta polare marziana; la necessità di possedere dati spazialmente vicini è data dalle operazioni di interpolazione da effettuare al fine di ottenere l'andamento della sottosuperficie in una griglia regolare di punti che ricopre la zona selezionata.

Al fine di accelerare tale operazione di catalogazione un piccolo programma, indipendente da quello principale è stato creato al fine di estrarre, da un'unica cartella contenente tutti i file, quelli attraversanti le zone selezionate.

Le cartelle individuate sono ordinate in maniera progressiva (es: "ID001"); nel crearle si è cercato inoltre di creare una corrispondenza tra esse e le zone più rappresentative della calotta stessa caratterizzate da un diverso comportamento dei profili altimetrici e delle caratteristiche delle strutture sottostanti.

4.3 RISULTATI NELLA ZONA GEMINA LINGULA.

Le prime serie di orbite analizzate ricoprono una vasta area della calotta polare marziana denominata “*Gemina Lingula*”; questa regione del pianeta ricopre una zona di circa 750 Km di diametro ed è stata da subito considerata dagli esperti una delle maggiori zone di interesse scientifico. La “*Gemina Lingula*” si presenta infatti in ampi tratti con un profilo altimetrico estremamente pianeggiante e la presenza di una sottosuperficie regolarmente distribuita per centinaia di chilometri; queste caratteristiche favoriscono un facile rilevamento del ritorno dell’ interfaccia di separazione della Basal Unit consentendo di ottenere ottimi risultati con le funzioni automatiche di creazione della sottosuperficie.

Le cartelle create per questa zona presentano delle ground track molto ravvicinate tra loro con orbite che si estendono sulla superficie marziana quasi parallelamente con distanze spesso inferiori al centinaio di chilometri; a queste se ne aggiungono altre che incrociano più orbite andando così a formare una sorta di rete. Questo tipo di disposizione è un grosso vantaggio per la fase di interpolazione; la possibilità di disporre di dati già distribuiti su una griglia, a prescindere dalla tecnica scelta, consente una maggiore precisione nell’interpolazione degli stessi rispetto ad una distribuzione meno regolare formata da addensamenti di dati in zone limitate.

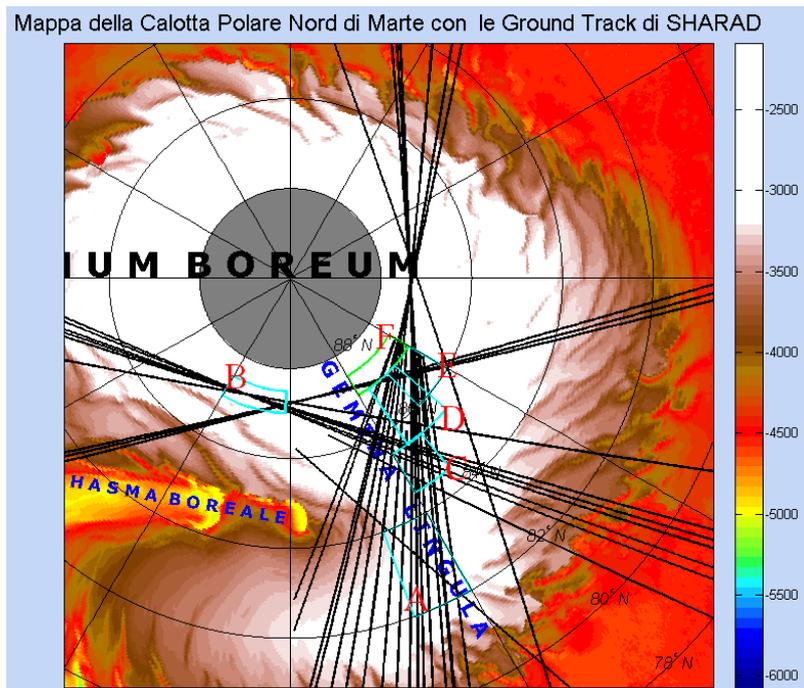


Figura 4.5 Immagine delle ground track di SHARAD proiettate sulla mappa del Polo Nord di Marte con le relative zone esaminate. L'area indicata con la lettera F è stata analizzata con orbite memorizzate in una diversa cartella visibili nella successiva figura.

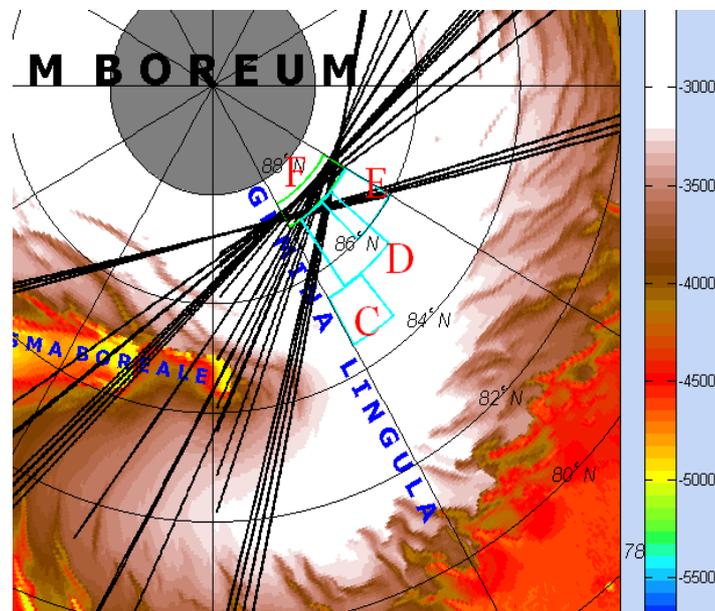


Figura 4.6 Immagini delle ground track di SHARAD relativa al secondo gruppo di orbite analizzate per la regione Gemina Lingula. Le orbite attraversanti diverse aree sono state utilizzate in entrambe i gruppi di studio.

Le zone analizzate in questa regione sono visibili nelle due figure precedenti; sebbene molte zone siano esaminabili quelle scelte presentano una maggior densità di orbite estremamente vicine tra loro. Alcune zone sono state analizzate in maniera isolata (indicate con le lettere A e B) mentre quelle indicate con le lettere C, D, E ed F sono state selezionate in modo tale da costituire un test di verifica del software. Dalla loro disposizione si può notare infatti una zona analizzata (indicata nelle figure con la lettera D) sovrapposta parzialmente ad una seconda (C) e confinante con le ultime del gruppo; questo permette di verificare la continuità della sottosuperficie diagrammata attraverso zone limitrofe e il confronto delle quote ottenute nella zona di sovrapposizione. Vista l'alta concentrazione di orbite si è preferito archiviare i radargrammi ripresi da SHARAD e attraversanti la zona indicata in figura con la lettera F in una cartella separata dalla prima; queste orbite costituiscono quelle più vicine al Polo disponibili per SHARAD che con la sua orbita e l'apertura nadirale permette lo studio degli strati di suolo fino ad una latitudine massima di circa 87.3 gradi. Dall'analisi delle interfacce ottenute in queste regioni e riportate nelle figure sottostanti si nota un andamento sottosuperficiale il cui profilo topografico si presenta quasi parallelo alla superficie, tesi ritenuta valida in ambiente scientifico dove si ipotizza proprio che l'interfaccia di separazione della Basal Unit sia la base del successivo svilupparsi della NPLD in maniera uniforme lungo tutta la regione.

Le due regioni analizzate separatamente (indicate nelle figure con le lettere A e B) ricoprono rispettivamente un'area di circa 8500 Km² ed 2300Km²; quest'ultima costituisce un ulteriore esempio delle regioni più vicine al Polo Nord esaminate dallo strumento.

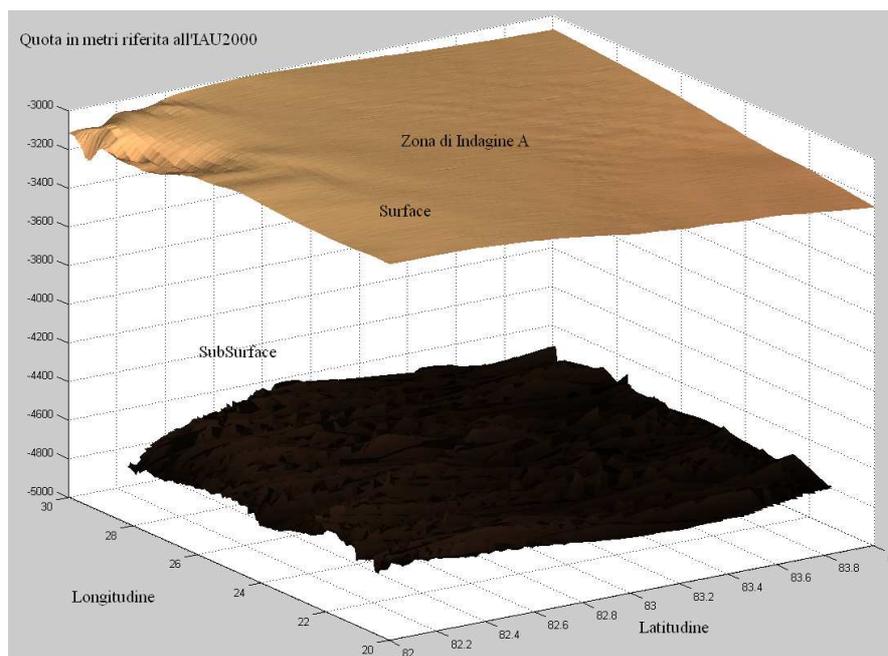


Figura 4.7 L'area indicata con la lettera A ricopre un'area di 8500 Km² racchiusa tra l'ottantaduesimo ed ottantaquattresimo parallelo. Il profilo altimetrico della sottosuperficie è estremamente pianeggiante e praticamente parallelo alla superficie sovrastante.

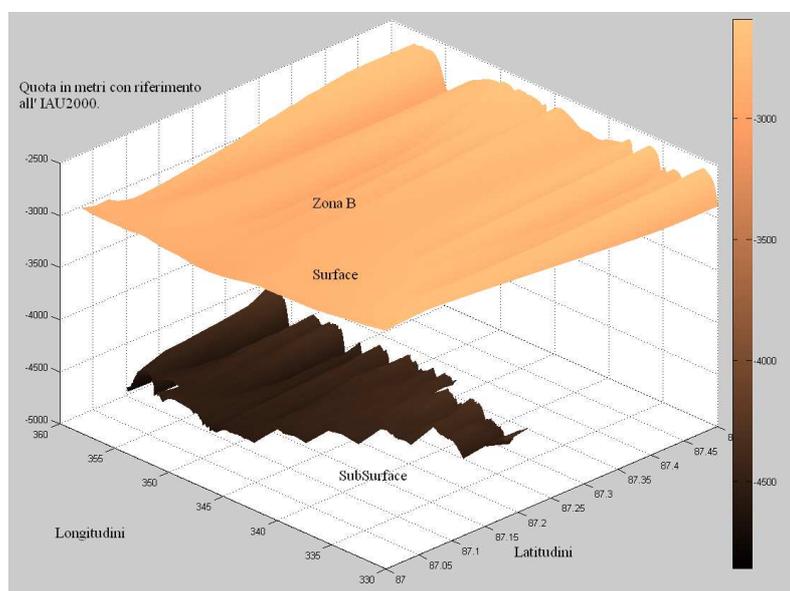


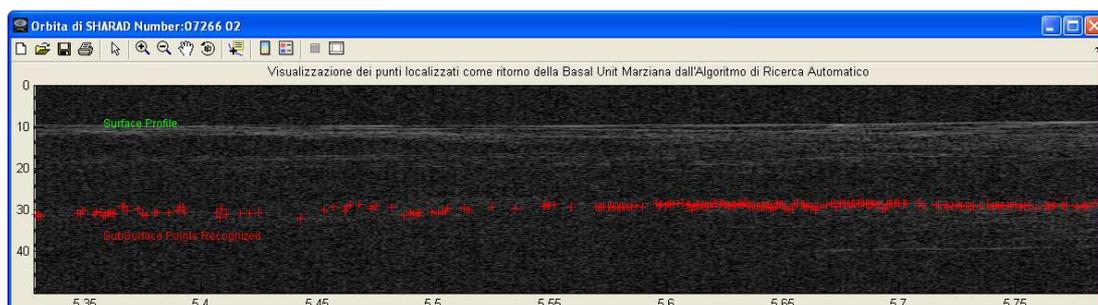
Figura 4.8 Sottosuperficie della zona indicata dalla lettera B ricoprente un'area di 2300 Km². La mancanza di orbite di SHARAD a latitudini superiori alla latitudini 87.3 limita la zona di analisi. Il profilo della superficie è stato ottenuto per tutte le prove dalla lettura dei dati M.O.L.A.

Le figure riportate sono state ottenute interpolando i dati raccolti nei radargrammi con la tecnica lineare ma il profilo estremamente pianeggiante della superficie e la precisione nell'individuazione dei punti sottosuperficiali dagli echi di ritorno, consente di ottenere risultati molto simili con tutte le tecniche di interpolazione precedentemente elencate con una differenza massima di quote tra due medesimi punti inferiori a 50 metri.

La verifica dei dati, come anticipato nelle pagine precedenti, si è svolto visualizzando proprio le zone delle orbite di SHARAD che attraversano la zona di indagine e sovrapponendo ad essi i punti localizzati dal software come provenienti dal ritorno sottosuperficiale cercato.

Questa verifica è attivabile tramite un pulsante posto sulla finestra visualizzanti le superfici create; immediatamente il software localizza le quattro orbite che forniscono il maggior numero di punti nella zona di ricerca selezionata e le visualizza sullo schermo. Questo tipo di verifica è estremamente rapido permettendo di non dover esaminare singolarmente tutti gli echi individuati anche se verifiche di questo tipo sono state eseguite su numerosi campioni di varie zone.

Le figure seguenti mostrano proprio un esempio di quanto detto per queste due zone:



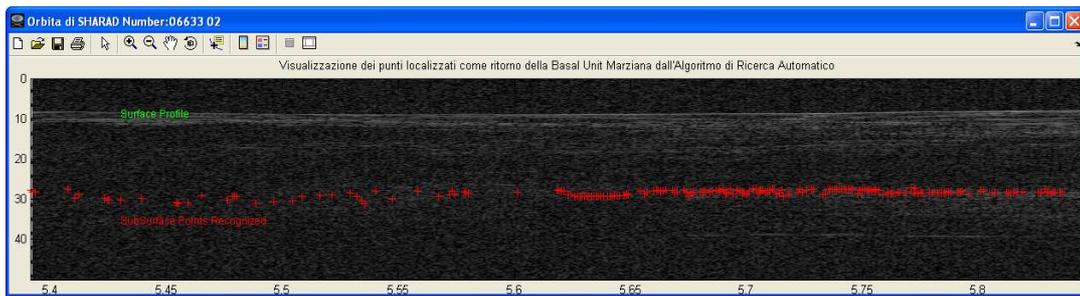


Figura 4.9 Le due immagini mostrano la sovrapposizione dei punti individuati come appartenenti alla Basal Unit sovrapposti ai radargrammi di SHARAD delle orbite 07266 ed 06633. L'asse x riporta il numero degli echi all'interno del radargramma mentre l'asse y rappresenta il tempo di ascolto in microsecondi a partire dall'apertura della finestra di ascolto.

La concentrazione di punti individuati sul lato destro di entrambe le figure a scapito di una minore densità di punti su quello sinistro si spiega dalla verifica effettuata su tutti i campioni individuati in automatico dal programma stesso; sebbene infatti, come anticipato, la *Gemina Lingula* si presenta come una regione estremamente regolare nella distribuzione della sottosuperficie, piccole zone presentano un ritorno da parte della Basal Unit molto debole e quindi difficilmente individuabile. L'algoritmo di ricerca potrebbe quindi essere ingannato individuando un ritorno non appartenente all'interfaccia sottosuperficiale cercata ma proveniente da uno strato di suolo superiore (uno dei layer che formano comunemente il UPLD marziano); una procedura di controllo in questo caso prevede di calcolare il valore medio dei punti individuati in un radargramma (con riferimento alla loro posizione all'interno del vettore rappresentante l'eco) eliminando quelli non rientranti in un range di valori centrati proprio su tale valore. Un esempio di quando descritto è mostrato nella seguente figura dove si vedono evidenziati i limiti superiori ed inferiori del range di valori utili individuato.

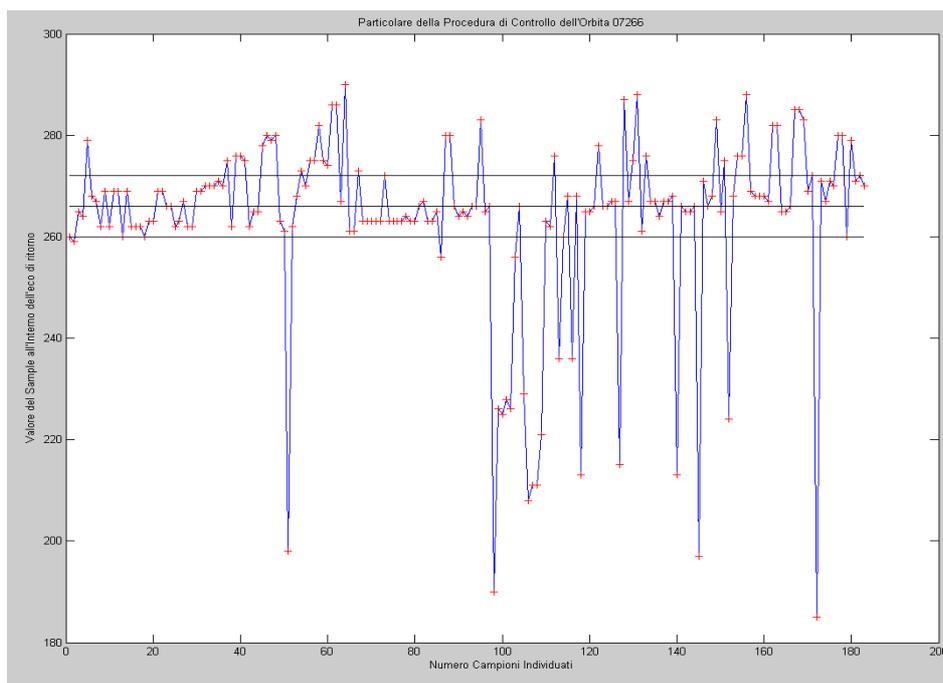


Figura 4.10 Il grafico riassume la procedura di controllo utilizzata all'interno del software per l'eliminazione di eventuali errori nella ricerca dei ritorni sottosuperficiali.

Il secondo gruppo di aree analizzate (indicate in figura con le lettere C,D,E ed F), scelto anch'esso per l'elevata concentrazione di orbite di SHARAD presenti, è disposto come anticipato in maniera da ottenere un immediata verifica del funzionamento del programma realizzato; i risultati mostrano un ottima corrispondenza nel valore delle quote individuato in presenza di zone confinanti ed una quasi totale uguaglianza del profilo topografico della sottosuperficie per le due zone in parte sovrapposte.

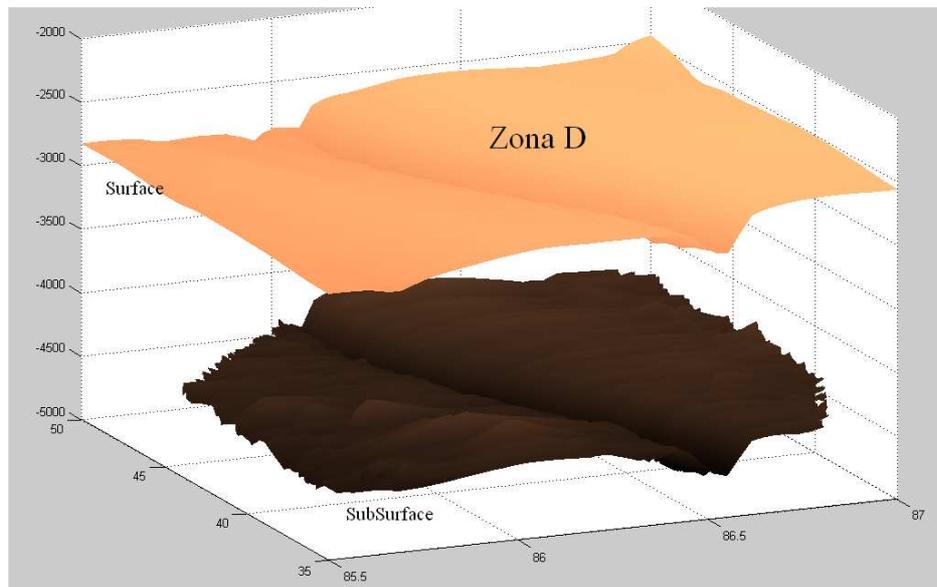
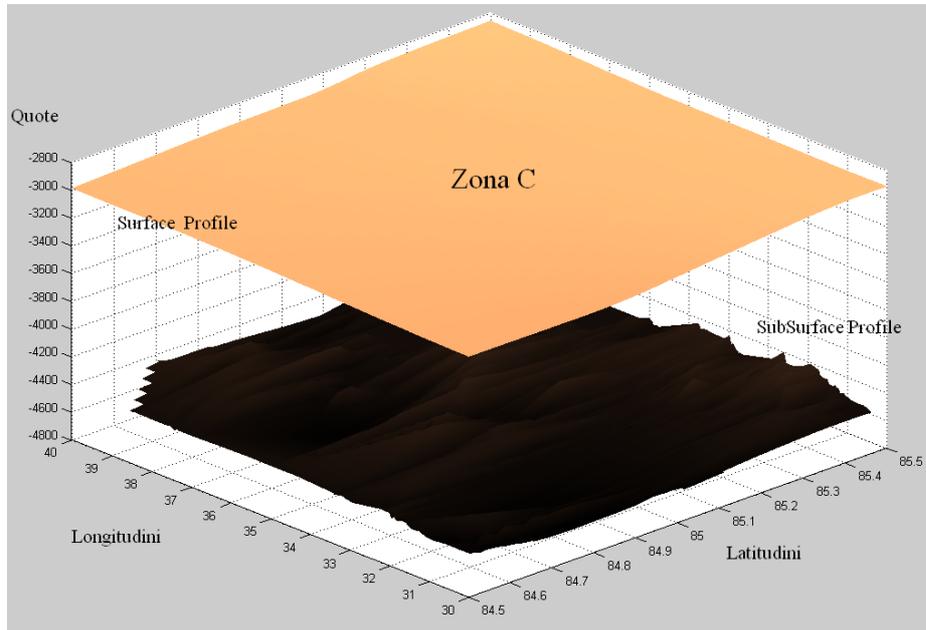


Figura 4.11 Immagini delle zone C e D confinanti parzialmente all'altezza del parallelo 85.5°. La tecnica di interpolazione utilizzata per le immagini visualizzate è la tecnica "nearest" mentre la costante dielettrica è $\epsilon=3.15$.

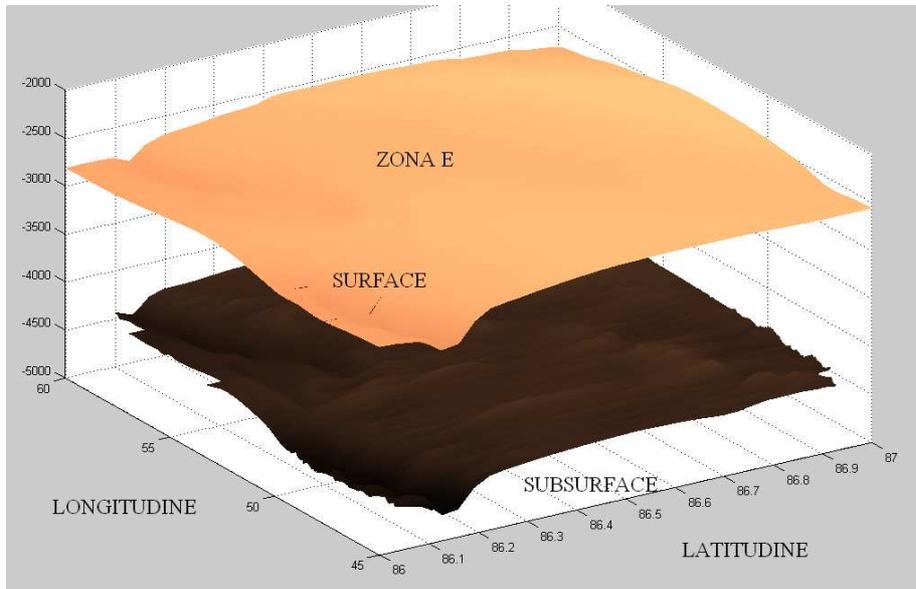


Figura 4.12 Superficie e sottosuperficie della regione E. In questa immagine è particolarmente facile notare lo spessore costante della Basal Unit agevolato da un andamento piatto della superficie.

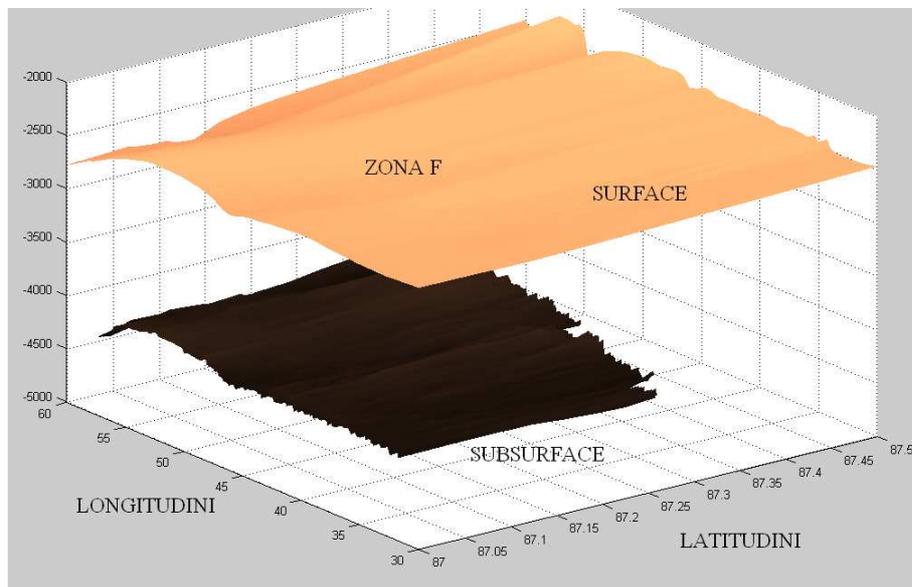


Figura 4.13 Immagine della sottosuperficie individuata per l'area F del gruppo di zone scelte per la verifica del software. Tecnica di interpolazione utilizzata: "Linear".

Effettuate le varie prove e salvati di volta in volta i risultati ottenuti si è passati alla visualizzazione contemporanea delle varie aree: la figura 4.15 mostra le due zone in parte sovrapposte (quelle indicate con le lettere D ed E) visualizzate contemporaneamente; la zona di sovrapposizione appare con un profilo topografico rialzato segno di un ispessimento della Basal Unit a quelle latitudini che spinge la sovrastante struttura della NPLD ad un analogo rialzamento.

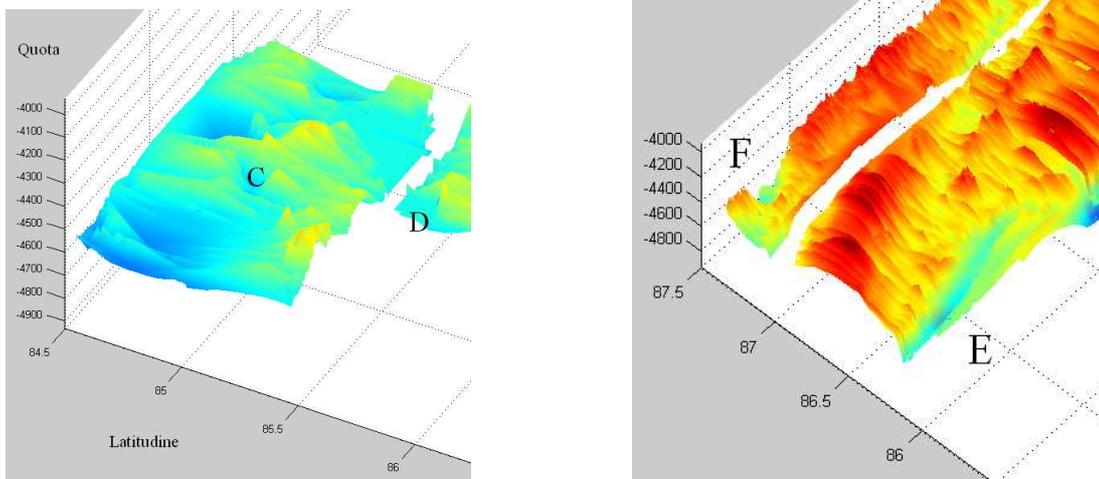


Figura 4.14 Le due immagini mostrano nel dettaglio zone di confine tra le aree esaminate. La diversa scala di colorazione utilizzata aiuta a riconoscere la corrispondenza dei valori di quote tra diverse zone.

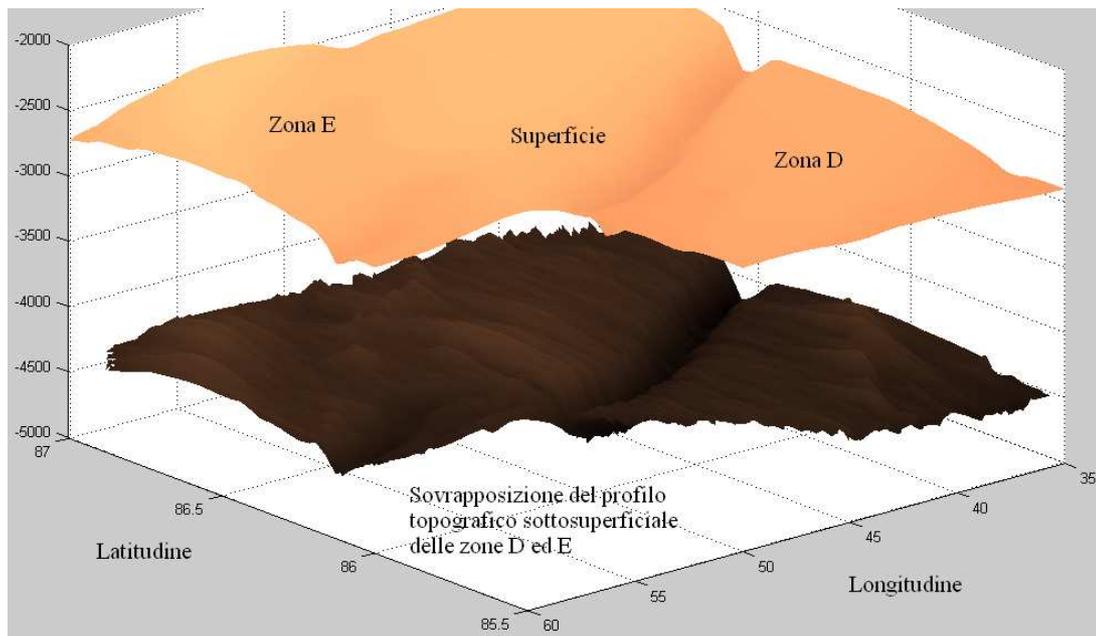


Figura 4.15 L'immagine mostra le zone indicate con le lettere D ed F sovrapposte lungo il range di longitudini che si estende dal 35° al 45° meridiano.

Come ulteriore metodo grafico di verifica dei dati ottenuti si è implementata una funzione per la visualizzazione tridimensionale di più radargrammi contemporaneamente sovrapponendovi ad essi i punti individuati dal software a seguito della fase di interpolazione; il grafico seguente è stato creato calcolando la quota di ogni singolo sample di ogni eco presente utilizzando una costante dielettrica di 3.15, valore del ghiaccio puro. Individuato il ritorno appartenente alla superficie e la sua quota grazie alla lettura dei dati M.O.L.A, ogni punto è stato localizzato alla relativa profondità dal calcolo del ritardo temporale occorso. La continuità dei vari strati sottosuperficiali visibili nelle zone di cross è indice di un valore della permittività verosimilmente esatto (proprio come supposto dai studiosi) indice di una percentuale bassissima di materiali di intrusione. La verifica inoltre dei punti individuati in diverse orbite in prossimità delle zone di cross (eseguite manualmente una volta salvati i dati necessari) ha confermato l'individuazione dello stesso valore di quota.

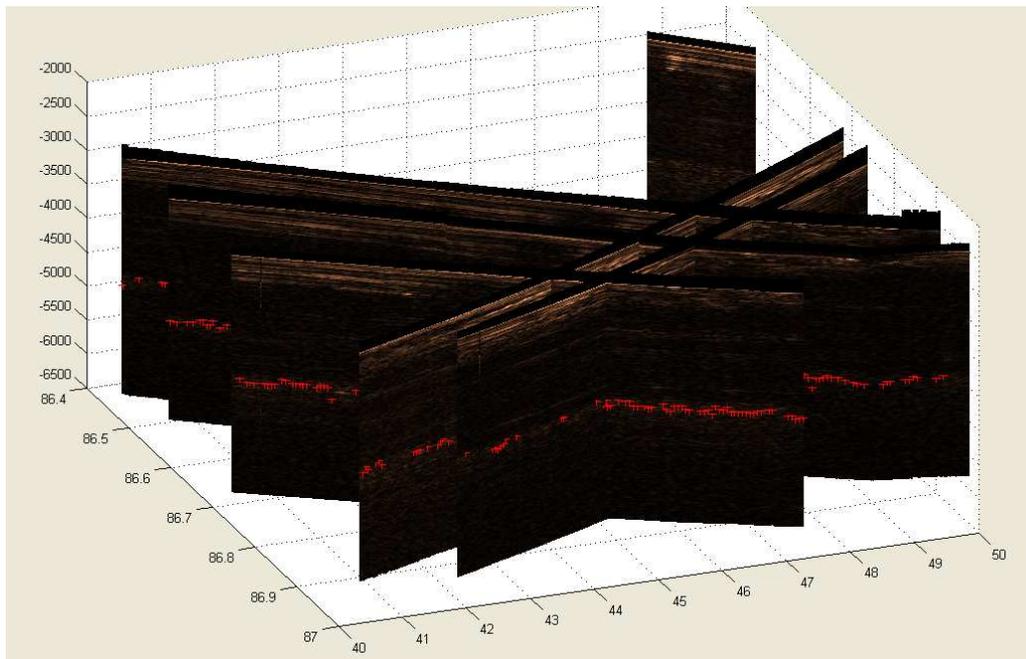


Figura 4.16 Rappresentazione tridimensionale dei radargrammi di SHARAD con la sovrapposizione dei dati individuati.

4.4 RISULTATI NELLA ZONA BOREALIS SCAPULI.

La seconda zona esaminata è denominata Borealis Scapuli che occupa la parte occidentale del Planum Boreum; i nominativi delle varie zone di Marte sono state ricavate durante dalle mappe pubblicate dal sito di geologia americano (U.S.G.S “United States Geological Survey”) che costituiscono l’ultimo risultato di un processo di nomenclatura del pianeta iniziato già alla fine del diciannovesimo secolo con le prime pubblicazioni basate su osservazioni al telescopio.

Come per la Gemina Lingula, al fine di aumentare la velocità di esecuzione del software, le ground track del radar SHARAD attraversanti questa regione sono state preselezionate in un'unica cartella; inoltre anche in questo caso sono state analizzate zone diverse indicate nella seguente figura.

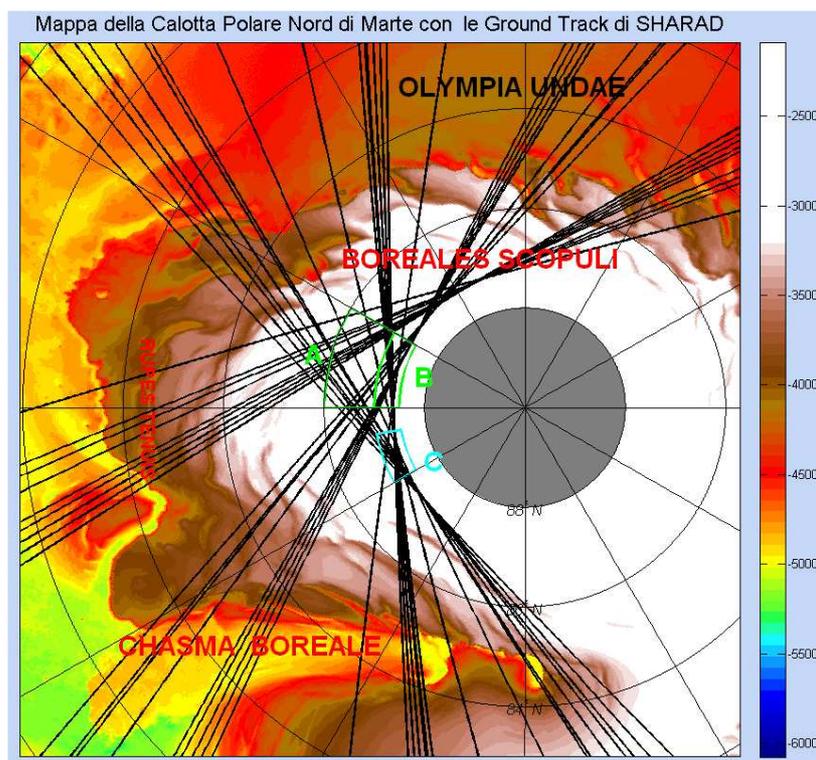


Figura 4.17 Mappa del Polo Nord di Marte con evidenziate le ground track di SHARAD attraversanti la regione Boreales Scopuli analizzate. Le aree A, B ed C sono mostrate in figura.

Le tre zone analizzate coprono un'area complessiva di circa 10.500 Km² e quelle indicate dalle lettere A e B sono state scelte confinanti tra loro. I risultati ottenuti sono mostrati nelle seguenti figure:

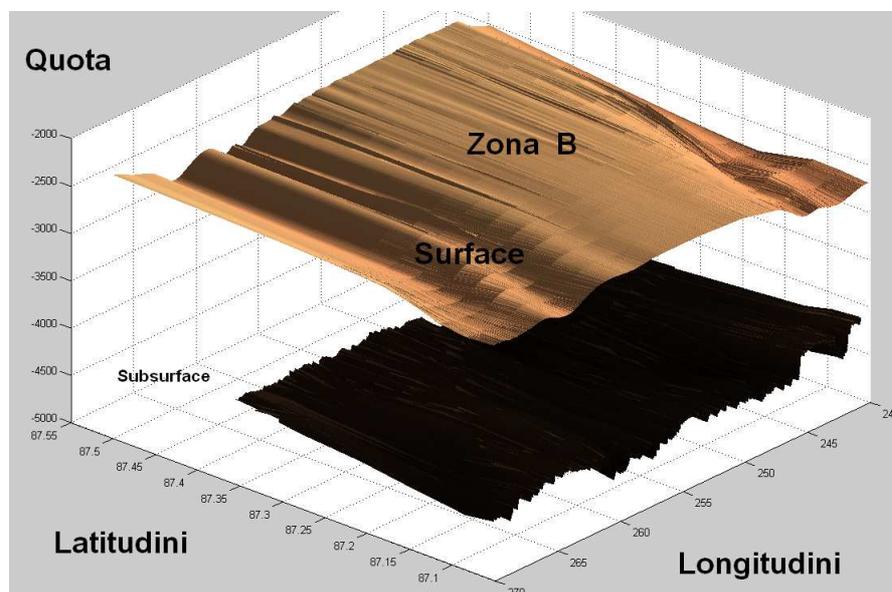
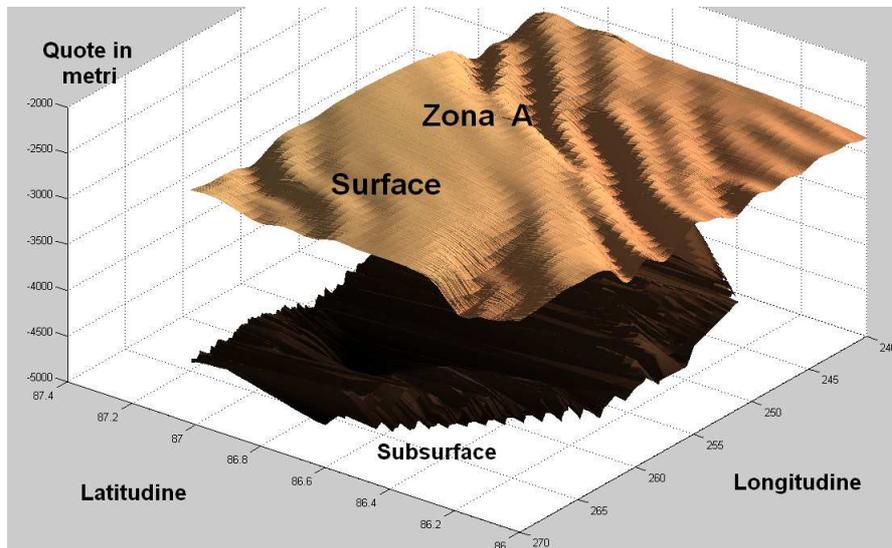


Figura 4.18 Mappe tridimensionali delle zone analizzate A e B confinanti lungo il parallelo 87° e per il range di longitudini [270-300]. Per la creazione di queste figure si è utilizzata la tecnica di interpolazione "spline" con una costante dielettrica di 3.15, considerata quella tipica del ghiaccio puro.

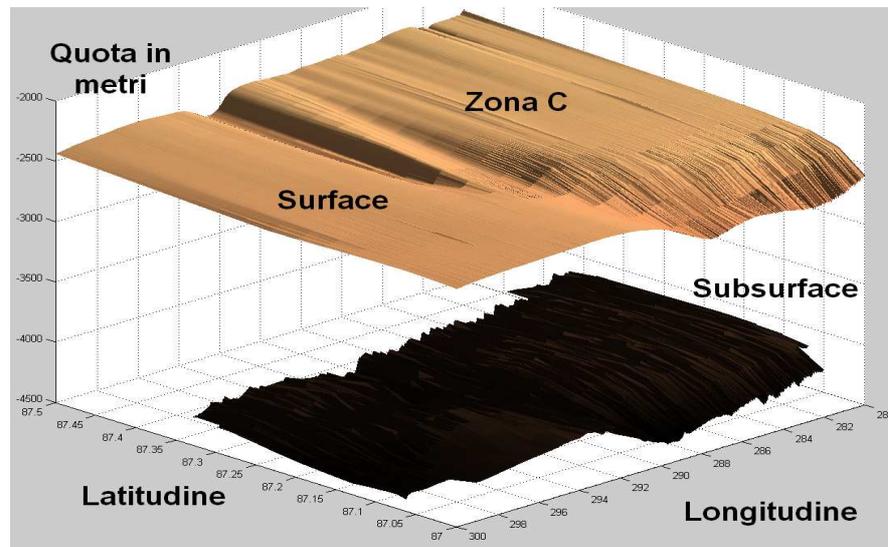


Figura 4.19 Immagine della sottosuperficie individuata relativa alla zona C del gruppo di aree esaminate. La zona ricopre un'area di circa 1500 Km² delimitata dal range di longitudini [280-300] e latitudini [87-87.5].

Anche in questo caso la verifica dei dati effettuata con la sovrapposizione ai vari radar grammi di SHARAD dei punti individuati come appartenenti al ritorno della Basal Unit mostrano un'alta percentuale di riconoscimento da parte del programma realizzato, ipotesi ulteriormente confermata dalla verifica della zone di confine tra le aree A e B diagrammate contemporaneamente.

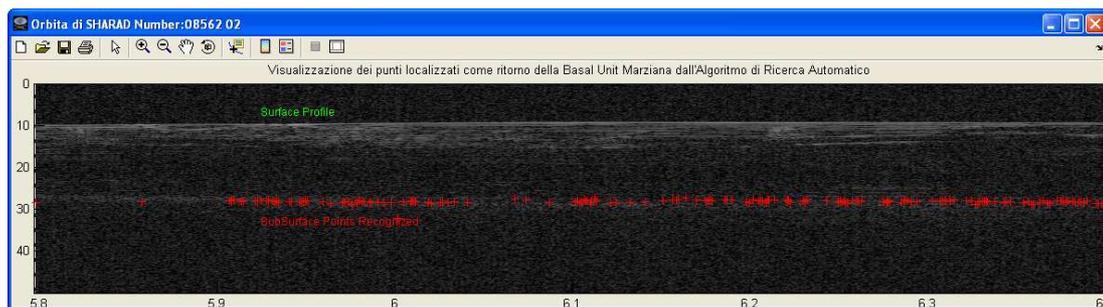


Figura 4.20 Particolare del radargramma di SHARAD relativo all'orbita 08562 con la sovrapposizione dei punti individuati dal programma come identificativi del ritorno della Basal Unit. La zona visualizzata è quella attraversante la zona C costituita da circa 6000 echi registrati dallo strumento su un totale di 70000 della ripresa.

CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi svolto presso il centro di ricerca CO.Ri.S.T.A affronta uno dei principali obiettivi a cui è stato destinato il radar di produzione italiano SHARAD: la creazione di mappe tridimensionali dei depositi di ghiaccio presenti sul suolo marziano con particolare attenzione per quelli del Polo Nord. Questo obiettivo è ritenuto da parte della comunità scientifica internazionale di fondamentale importanza sia per la ricostruzione della storia geologica del pianeta stessa e delle sue varie epoche e sia per la programmazione prima di future missioni umane sul pianeta e sia per una successiva se pur ancora lontana colonizzazione. Proprio per tale scopo è stata progettata ed eseguita la missione Mars Reconnaissance Orbiter con la presenza a bordo del radar a penetrazione SHARAD, elemento d'eccellenza della tecnologia italiana; le elevate capacità di questo strumento hanno infatti consentito lo studio dei primi strati della superficie marziana con una risoluzione mai raggiunta in precedenza per le missioni di esplorazione, fornendo ai studiosi dati di enorme importanza scientifica. L'enorme mole di dati prodotti dallo strumento negli ultimi due anni di attività hanno portato alla luce la complessa struttura stratificata del suolo marziano nelle regioni polari del pianeta consentendo di completare il lavoro iniziato dall'altro radar italiano MARSIS negli anni precedenti.

Il lavoro svolto si è basato sui dati ottenuti dallo strumento e processati proprio al centro CO.Ri.S.T.A nel formato denominato livello L1.B; attraverso appositi tool infatti i dati inviati dal radar sono stati processati attraverso le tecniche tipiche di un radar ad apertura sintetica permettendo così sia di raggiungere le risoluzioni previste di missione sia il corretto posizionamento spaziale e temporale degli echi di ritorno analizzati.

Per la creazione e visualizzazione di queste mappe si è proceduto alla progettazione e realizzazione di un programma che in maniera automatica fosse in grado di analizzare i dati di SHARAD in zone selezionabili della calotta polare al fine di

individuare all'interno dei radargrammi stessi l'eco di ritorno della sottosuperficie marziana e il relativo ritardo temporale dal segnale superficiale in modo da valutarne la profondità rispetto a quest'ultima. Questo risultato è ottenuto da un algoritmo che analizza l'intero eco alla ricerca del ritorno cercato. Tale informazione è successivamente trasformata in profondità una volta fissato un valore di permittività del suolo portando così, dopo una fase di interpolazione dei dati ottenuti, alla creazione delle sottosuperfici stessi.

Questo *modus operandi* è stato riscontrato in diversi lavori scientifici pubblicati sulle più prestigiose riviste internazionali e condurrà in tempi brevi alla realizzazione di una vera e propria mappatura globale dei depositi di ghiaccio sul pianeta^[16]. La complessa stratificazione del suolo marziano suggerisce infatti un andamento della costante dielettrica del suolo variabile con la profondità; la tendenza è così quella di utilizzare un valore costante della permittività ritenuta dagli esperti molto prossima a quella del ghiaccio puro.

I risultati ottenuti sono infine stati verificati sovrapponendo ai radargrammi analizzati e visualizzati proprio i punti individuati come provenienti dal ritorno sottosuperficiale cercato; i risultati mostrano un'elevata percentuale di riconoscimento di tali punti in molteplici zone analizzate del polo nord marziano nonostante la presenza in varie aree di ritorni sottosuperficiali provenienti da stratificazioni di suolo sovrastanti quella cercata o di zone dove tale ritorno diviene debole all'interno dei radargrammi stessi a testimonianza di una non uniforme distribuzione e composizione nella regione interessata. La verifica ha fornito esiti certamente confortanti.

LISTA DEGLI ACRONIMI

ADC	Analogue To Digital Converter
ADT	Along Track Direction
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
BU	Basal Unit
BW	Bandwidth
CO.Ri.S.T.A	Concorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati
CRISM	Compact Reconnaissance Imaging Spectrometers for Mars
CTX	Context Camera
DCG	Digital Chirp Generator
DSN	Deep Space Network
D/I	Dry/Ice
EELV	Evolved Expendable Launch Vehicle
EDT	Eastern Daylight Time
EDR	Experiment Data Record
ESA	European Space Agency
FFT	Fast Fourier Trasform
GUIDE	Graphical User Interface Development
HLR.I.S.E	High Resolution Imaging Science Experiment
I/W	Ice/Water
L1B	Level 1B
LPLD	Lower Polar Layered Deposits
MARCI	Mars Color Imager
MARSIS	Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding
MCS	Mars Climate Sounder
MGS	Mars Global Surveyor
MOC-NA	Mars Orbiting Camera Narrow-Angle System
MOI	Mars Orbiter Insertion
MOLA	Mars Orbiter Laser Altimeter

NAIF	Navigation and Ancillary Information Facility
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCO	Oscillatore a Controllo Numerico
NPLD	Nord Polar Layered Deposits
ODT	Orbital Data Table
OST	Operations Sequence Table
PDS	Planetary Data System
PGA	Phase Gradient Autofocus
PRF	Pulse Repetition Frequency
PRI	Pulse Repetition Interval
PT	Parameters Table
RADAR	Radio Detection and Ranging
RDR	Reduced Data Record
RDS	Receiver and Digital Section
SAR	Syntetic Aperture Radar
SEB	Sharad Electronic Box
S/C	Spacecraft
SHARAD	Shallow Radar
SNR	Signal to Noise Ratio
TCM	Trajectory Correction Maneuvers
TFE	Trasmitter and Front End
UPLD	Upper Polar Layered Deposits
UTC	Coordinated Universale Time

BIBLIOGRAFIA

[1] *Analysis and Trade-Off*. Manuale della Alenia Spazio fornito dal centro C.O.Ri.S.T.A.

[2] Picardi Giovanni, Roberto Seu. *Radar sounding of Planetary bodies: an instrument design approach*. Articolo apparso durante "l'European Microwave Conference", 1990. DOI: 10.1109/EUMA.1990.336266

[3] Phillips Roger J. et al. *North Polar Deposits on Mars: New Insights from Marsis, Sharad and other MRO Instruments*. Articolo apparso durante il "Lunar and Planetary Science XXXVIII" (2007).

Ottenibile all'indirizzo: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2007/pdf/1925.pdf>

[4] Pettinelli Elena et al. *Electromagnetic Propagation Modelling for GPS Exploration of Martian Subsurface*. Articolo apparso durante il "2° International Workshop on Advanced GPR", 14-16 May. 2003.

[5] Pettinelli Elena et al. *Propagation of GPR Signals in Martian Subsurface Scenarios Including Material Losses and Scattering*. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 45, No.5, May 2007.

[6] Alberti G., S. Dinardo, S. Mattei, C. Papa, M.R. Santovito. *SHARAD radar signal processing technique*. Articolo apparso durante il "4th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar", 27-29 Giugno. 2007, Napoli. DOI: 10.1109/AGPR.2007.386564. Ottenibile dal sito CO.Ri.S.T.A.: http://www.corista.unina.it/Docs/sharad_radar_signal.pdf

[7] *Shallow Radar Reduced Data Record Software Interface Specification. Mars Reconnaissance Orbiter*. Version 1.0. 30 July 2007. (Manuale fornito dal Planetary Data System). Scaricabile all'indirizzo web:

http://pds-geosciences.wustl.edu/sharad-rdr01/mro-m-sharad-4-rdr-v1/mrosh_1xxx/document/rdrsis.pdf

[8] Smith David E et al. *The Global Topography of Mars and Implications for Surface Evolution*. Pubblicato sulla rivista "Science", Vol 284, pag:1495-1503. DOI: 10.1126/science.284.5419.1495.

[9] Herkenhoff K.E et al. *Meter-Scale Morphology of the North Polar Region of Mars*. *Rivista "Science"* 21 Settembre 2007: Vol 317 no:5845. Pag:1711-1715.
DOI: 10.1126/science.1143544

[10] Roger J. Phillips et al. *Mars North Polar Deposits: Stratigraphy, Age, and Geodynamical Response*. *Rivista "Science"* Volume: 320, pag:1182-1185 (2008);
DOI:10.1126/science.1157546.

[11] Daniel Cahn Nunes, Roger J. Phillips. *Radar subsurface mapping of the polar layered deposits on Mars*. Pubblicato sulla rivista: "Journal of Geophysical Research", vol. 111, E06S21, DOI:10.1029/2005 JE002609, 2006.

[12] David J. Daniels. *Surface Penetrating Radar (Book)* . The Institution of Electrical & Electronics Engineers. Edizione:1996.

[13] G. Picardi et al. *M.A.R.S.I.S Data Inversion Approach*. Articolo apparso durante il: "Advanced Ground Penetrating Radar, 2007 4th International Workshop on". 27-29 Giugno 2007, Napoli. DOI: 10.1109/AGPR.2007.386563

[14] Phillips Roger J. et al. *Supporting Online Material for Mars North Polar Deposits: Stratigraphy, Age, and Geodynamical Response*. *Science Express* DOI: 10.1126/science.1157546.

[15] Sandwell, David T, "*Biharmonic Spline Interpolation of GEOS-3 and SEASAT Altimeter Data*". *Geophysical Research Letters*, Volume 14, Issue 2, p. 139-142. DOI:10.1029/GL014i002p00139.

[16] Plaut Jeffrey J. et al. *Subsurface Radar Sounding of the South Polar Layered Deposits of Mars*. Articolo pubblicato sulla rivista:"Science", vol:316, pag:92-96 (2007). DOI: 10.1126/science.1139672.

Holt John W. et al. *Initial SHARAD Observations of Internal Layers in the Uppermost North Pole Layered Deposits of Mars*. Seventh International Conference on Mars. 9-13 Luglio 2007.Pasadena, California. Ottenibile all'indirizzo web:
<http://www.lpi.usra.edu/meetings/7thmars2007/pdf/3372.pdf>

Putzig N.E et al. *Internal Structure of the Polar Layered Deposits from Radar Sounding*. Articolo apparso durante il "Seventh International Conference on Mars". 9-13 Luglio. Pasadena, California. Ottenibile all'indirizzo web:
<http://www.lpi.usra.edu/meetings/7thmars2007/pdf/3295.pdf>

BIBLIOGRAFIA IMMAGINI

- [a] Immagine proveniente dal sito CO.Ri.S.T.A ed ottenibile dalla homepage.
Indirizzo web: www.corista.unina.it/
- [b] Immagine proveniente dal manuale: “Mars Reconnaissance Orbiter”. Mission Plan. Revision C. Scaricabile all’indirizzo web:
http://www.sharad.org/index.php?page=documentation.php&cmd=show_doc_list&id_index=38 Number Document: JPL D-22239
- [c] Immagine proveniente dal sito del “Jet Propulsion Laboratory”. Indirizzo web:
http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mro/gallery/cruise/cruise_approach_200602.html
- [d] Immagine disponibile sul sito del Jet Propulsion Laboratory. Indirizzo web:
<http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mro/gallery/artwork/aerobraking.html>
- [e] Immagine ottenuta dal manuale: “SHARAD Flight User Manual”. *Alenia*.
Scaricabile all’indirizzo web:
http://www.sharad.org/index.php?page=documentation.php&cmd=show_doc_list&id_index=38 Number Document: MAN-SHR-0007-ALS
- [f] Immagine dal Sito del “Jet Propulsion Laboratory”. Indirizzo web:
http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mgs/mission/sc_instruments.html
- [g] Immagine dal Sito del Jet Propulsion Laboratory. Indirizzo web:
http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mgs/mission/images/PIA02820_mola.jpg

WEB SITES

- C.O.Ri.S.T.A.** – SHARAD page <http://www.corista.unina.it/sharad.html>
- M.O.L.A.** homepage http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mgs/mission/sc_instruments
- M.R.O.** homepage <http://mars.jpl.nasa.gov/mro/>
- SHARAD** homepage <http://www.sharad.org/>
- PLANETARY DATA SYSTEM** homepage <http://pds.jpl.nasa.gov/>
- U.S.G.S (U.S Geological Survey)** homepage <http://www.usgs.gov>