

SECONDA UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI
FACOLTA' DI INGEGNERIA

TESI DI LAUREA
IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

**Algoritmi di compensazione degli effetti
ionosferici su segnali radar in atmosfera marziana**

Relatore:
Ch.mo Prof. G. Alberti

Correlatore:
Prof. M. D'Errico

Candidato:
Damiano Laurenza
Matr. 071/242

A.A. 2004-2005

INDICE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUZIONE..... | 1 |
| CAPITOLO 1 MARTE E LA SUA IONOSFERA..... | 4 |
| 1.1 <i>IL PIANETA ROSSO (GENERALITA')</i> | 5 |
| 1.2 <i>CENNI SULLE CARATTERISTICHE ASTRONOMICHE</i> | 9 |
| 1.3 <i>OBBIETTIVI DI STUDIO</i> | 11 |
| 1.4 <i>LA IONOSFERA MARZIANA</i> | 12 |
| 1.4.1 <i>GENERALITA'</i> | 12 |
| 1.4.2 <i>MODELLI IONOSFERICI</i> | 13 |
| 1.4.3 <i>EFFETTI DELLA PROPAGAZIONE NELLA IONOSFERA</i> | 15 |
| 1.4.4 <i>VALUTAZIONE DELLA DISTORSIONE DI FASE</i> | 18 |
| CAPITOLO 2 LA MISSIONE MARS EXPRESS ED IL SUO RADAR..... | 21 |
| 2.1 <i>LA MISSIONE MARS EXPRESS</i> | 22 |
| 2.2 <i>MARSIS:IL RADAR</i> | 25 |
| 2.3 <i>PRINCIPI DI FUZIONAMENTO DI MARSIS</i> | 28 |
| 2.3.1 <i>IL SISTEMA DI ANTENNE</i> | 31 |
| 2.3.2 <i>IL RADAR SOUNDER</i> | 33 |
| 2.3.3 <i>OBBIETTIVI SCIENTIFICI</i> | 35 |
| 2.3.4 <i>DESCRIZIONE SOMMARIA DEGLI STRUMENTI DI BORDO</i> | 37 |
| 2.3.5 <i>SINTESI DELLE MODALITA' DI FUNZIONAMENTO</i> | 39 |
| 2.3.6 <i>MODALITA' DI INDAGINE SOTTOSUPERFICIALE</i> | 42 |
| CAPITOLO 3 ALGORITMI PER IL PROCESSING DEI DATI..... | 47 |
| 3.1 <i>IL METODO PGA</i> | 49 |
| 3.1.1 <i>L'ALGORITMO PGA</i> | 52 |
| 3.1.2 <i>IMPLEMENTAZIONE DELL'ALGORITMO PGA</i> | 54 |
| 3.1.3 <i>CONSIDERAZIONI</i> | 58 |
| 3.2 <i>ELABORATO IN MATLAB</i> | 59 |

| | | |
|-------------------------------------|---|------------|
| 3.2.1 | <i>LA SUB-ROUTINE PGA</i> | 60 |
| 3.2.2 | <i>LA SUB-ROUTINE DATI_SIMULATI</i> | 65 |
| 3.2.3 | <i>LA SUB-ROUTINE DATI_REALI</i> | 68 |
| CAPITOLO 4 SIMULAZIONI | | 70 |
| 4.1 | <i>UTILIZZO DELLA SUB-ROUTINE DATI_SIMULATI</i> | 71 |
| 4.2 | <i>UTILIZZO DELLA SUB-ROUTI DATI_REALI</i> | 81 |
| 4.2.1 | <i>L'ORBITA 1885: IL CANYON</i> | 83 |
| 4.2.2 | <i>L'ORBITA 1904: IL VULCANO</i> | 100 |
| 4.3 | <i>CONSIDERAZIONI</i> | 109 |
| CONCLUSIONI | | 110 |
| LISTATO MATLAB DEL PGA | | 112 |
| BIBLIOGRAFIA | | 113 |

Introduzione

Il presente lavoro di tesi verte fundamentalmente sullo sviluppo di un software, nel linguaggio di calcolo MatLab®, integrabile nel ben più ampio sviluppo della missione dell'Agenzia Spaziale Europea denominata MARSIS, interessata da un cospicuo utilizzo di apparecchiature progettate in Italia.

Lo scopo primario che ci si prefigge è quello di risolvere una serie di problemi legati alla lettura delle immagini e dei dati in generale acquisiti da questo radar.

Infatti, come mostreremo nel seguito, i segnali ricevuti da Marsis e contenenti preziose informazioni sull'ambiente del pianeta, sono fortemente disturbati dal passaggio attraverso la sua ionosfera.

Tale alterazione determina l'impossibilità di studiare al meglio la superficie di Marte, rendendo difficile quello che è in questi giorni uno degli obbiettivi primari relativi al pianeta: la ricerca d'acqua.

Gli scopi fondamentali che ci si propone di raggiungere sono l'utilizzo del software, sviluppato per il trattamento a terra dei dati provenienti dal radar, con lo scopo di ottenere informazione preziose sulle zone sotto-superficiali del pianeta e allo stesso tempo sulla conformazione della sua ionosfera.

Allo stato attuale esistono già dei metodi di compensazione della distorsione ionosferica, usati sui dati di Marsis peraltro con successo, ad esempio il metodo del contrasto. Eppure alcune imperfezioni riscontrate nel suo funzionamento ci spingono a tentare altre vie per la risoluzione di tale problema.

Il presente lavoro, realizzato nel centro di ricerca Co.Ri.STA, responsabile del segmento di terra del radar, è stato sviluppato interamente nel linguaggio di calcolo MatLab®, ed è articolato in 4 capitoli.

Nel primo capitolo è riportata una descrizione dell'ambiente operativo di Marsis, ovvero del pianeta Marte, il quale rappresenta anche e soprattutto l'obiettivo ultimo del nostro lavoro, in quanto ne è l'oggetto di studio.

In tale capitolo si è ritenuto opportuno trattare le caratteristiche generali del pianeta e le sue caratteristiche astronomiche.

Di rilevante importanza per il presente studio è il paragrafo relativo alla ionosfera marziana, nel quale si descrivono le equazioni che si utilizzeranno in seguito per modellare la ionosfera.

Nel secondo capitolo viene descritta generalmente la missione Mars Express, all'interno della quale è compreso il radar Marsis, con qualche cenno preliminare alle missioni precedenti che ne hanno reso possibile lo sviluppo. Si insiste particolarmente nella descrizione del radar, e delle sue modalità di funzionamento, al fine di rendere fruibile il lavoro che ad esse si applica.

Nel terzo capitolo si presentano gli algoritmi ed i software utilizzati per processare i dati raccolti da Marsis.

Dopo un accenno al cosiddetto metodo del contrasto si descrive dettagliatamente il metodo del gradiente di fase PGA, su cui si basa il software sviluppato per la compensazione ionosferica.

Nell'ultimo capitolo, il quarto, verranno mostrati i risultati di una serie di simulazioni e di test, atti a dimostrare l'efficacia del software nel trattamento dei dati.

Si riporterà inoltre un confronto tra i due metodi utilizzati al fine di rendere palesi i miglioramenti introdotti.

L'applicazione del metodo PGA al processing delle immagini di Marsis, porterà senza dubbio a migliorare la qualità delle informazioni ottenute e, seppure in piccola parte, aiuterà nella conoscenza del pianeta rosso.

Quello che ci aspettiamo dell'immediato futuro è la possibilità di perfezionare il suo utilizzo e sfruttarne le funzionalità anche per la risoluzione di altre problematiche (diverse da quelle legate alla ionosfera), e magari per dati provenienti da radar di future missioni.

Capitolo 1

Marte e la sua ionosfera

Lo scopo fondamentale di questo primo capitolo è di descrivere a tratti generali quello che è, scientificamente parlando, l'oggetto principale del nostro studio, ovvero il pianeta Marte. Infatti, sebbene il lavoro di tesi verta sullo sviluppo e l'utilizzo di un software che stimi le distorsioni di fase, non dobbiamo dimenticare che tale software ha il compito di compensare gli effetti ionosferici su segnali che provengono proprio da questo pianeta.



Immagine 1.1: Veduta di Marte; ripresa a colori del Telescopio Spaziale Hubble; si vedono i poli e ampie formazioni di nebbia superficiale alle alte latitudini. (fonte STScI)

Pertanto si ritiene opportuno dare una descrizione generale delle sue caratteristiche astronomiche e morfologiche, osservando quali aspetti del pianeta interessano di più gli scienziati.

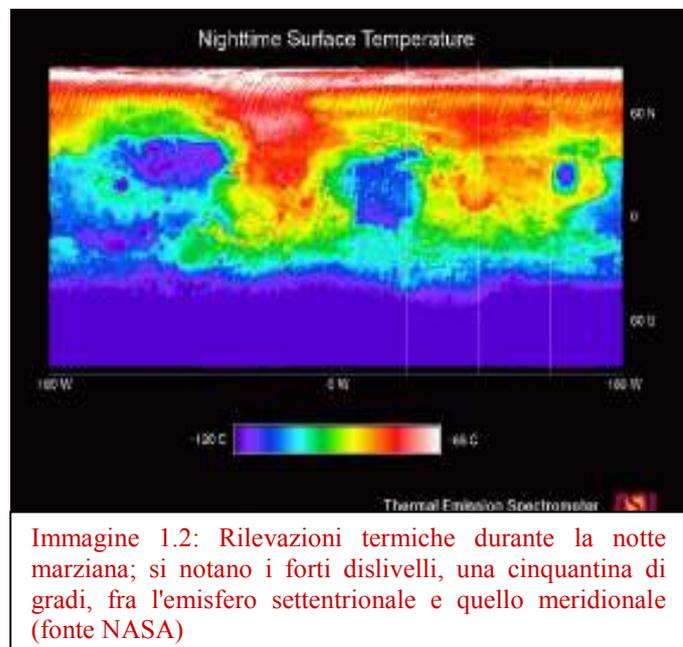
Si insisterà invece in maniera più dettagliata sulla ionosfera marziana e sui modelli che attualmente sono disponibili per la sua rappresentazione, in quanto il presente lavoro di tesi focalizza la sua attenzione proprio sulla ionosfera.

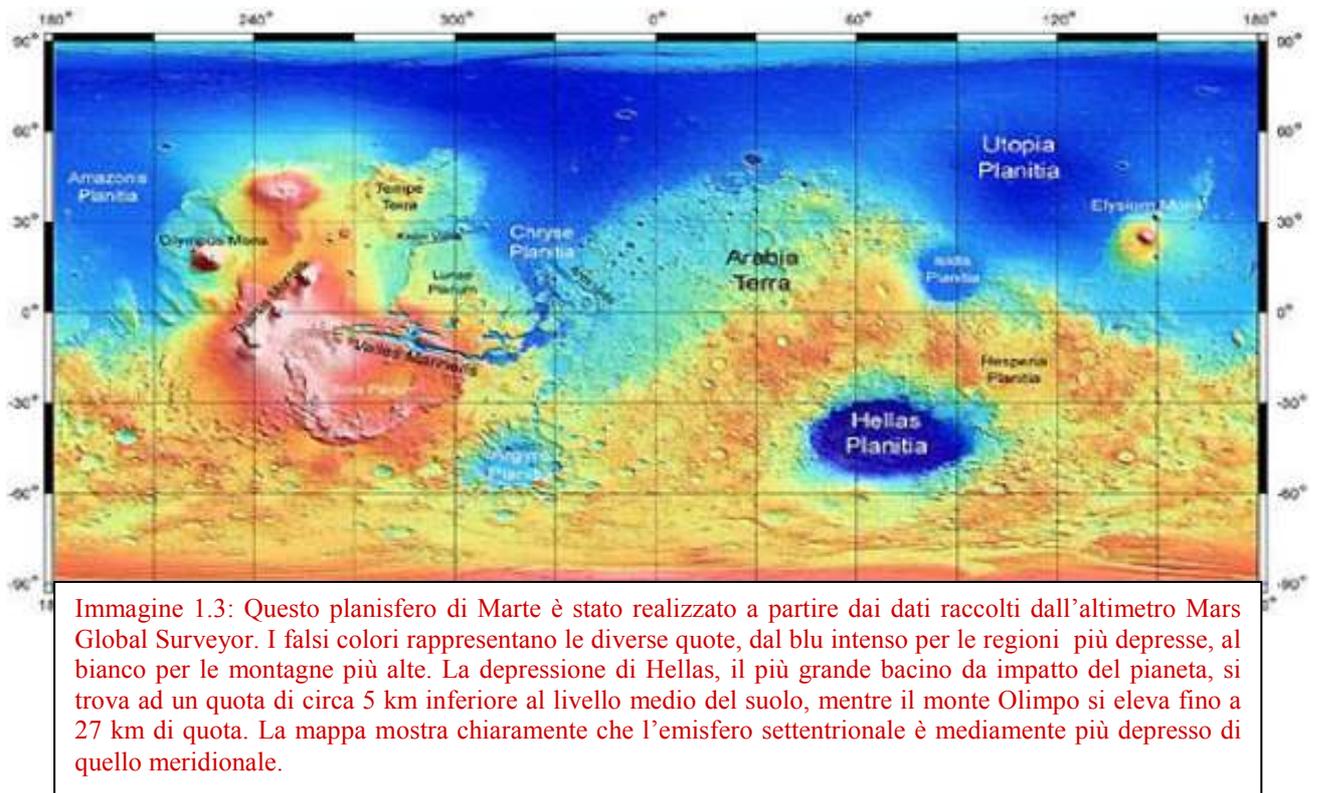
Verranno riportate, dunque, quelle espressioni matematiche utilizzate per modellare la ionosfera marziana, non solo ai fini di una sua comprensione approfondita, ma soprattutto allo scopo di utilizzarli direttamente nella risoluzione dei problemi che affliggono i nostri segnali radar.

Paragrafo 1.1

Il pianeta rosso

Marte è il quarto pianeta del *Sistema Solare* in ordine di distanza dal Sole. La sua orbita si trova tra quella di Giove e quella della Terra. E' uno dei cinque pianeti visibili ad occhio nudo ed il suo aspetto è quello di una brillante stella di colore rosa-rossastro. Può essere osservato in qualsiasi posizione del cielo. Esso è definito un pianeta "terrestre" proprio per le sue proprietà topografiche simili al nostra Terra. Anche le sue caratteristiche orbitali sono molto simili a quelle terrestri (ad esempio il periodo di rotazione intorno al proprio asse è poco più di 24 ore) cosa che rende questo pianeta forse quello più ricco di fascino per le future esplorazioni e anche per la creazione di insediamenti umani in un futuro non troppo remoto.





La sua temperatura superficiale varia tra i 140°K di una notte invernale e i 300°K di un mezzogiorno estivo (vedi Immagine 1.2). Il suo raggio equatoriale è di 3.398 chilometri, ed ha una massa di circa un decimo di quello del nostro pianeta. La forma superficiale della crosta varia significativamente dalle regioni desertiche, alle pianure vulcaniche fino a raggiungere zone ricche di crateri. Su larga scala, la superficie è caratterizzata dalla cosiddetta *Dicotomia Marziana* (vedi Immagine 1.3); l'emisfero nord è coperto da pianure, depositi sedimentari, dove si può notare una scarsa densità di crateri.

L'emisfero sud è invece caratterizzato da una alta densità di crateri a testimonianza del fatto che, in giovane età, Marte ha subito un "bombardamento" vero e proprio concentrato soprattutto in queste zone. Sempre nel sud del pianeta ci sono alcuni bacini dovuti a grandi impatti, il più imponente dei quali è il bacino di *Hellas* (la macchia blu nell'immagine 1.3).

Un'altra zona molto interessante del pianeta rosso, detta *Tharsis*, si trova invece nell'emisfero Nord. Essa è caratterizzata da tre enormi vulcani che insieme al

monte più grande del sistema solare, il *Monte Olimpo* (diametro medio alla base di 500 km e altezza di circa 24 km), formano una zona che probabilmente, in un recente passato geologico, aveva un'intensa attività vulcanica.

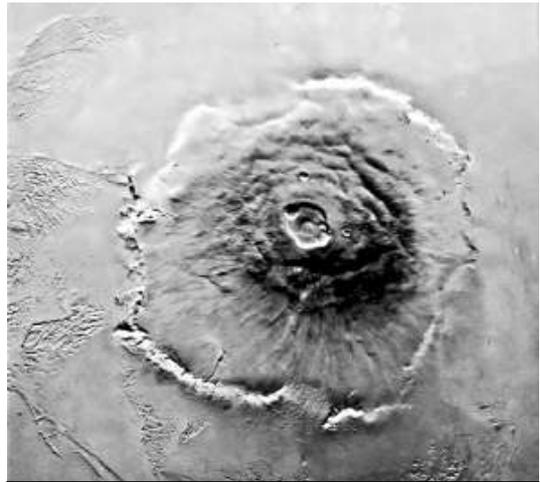


Immagine 1.4: ripresa di Olympus Mons fatta dalla sonda Viking nel 1976 (fonte NASA).

Infatti la struttura interna di Marte è simile a quella terrestre. C'è un nucleo di ferro che probabilmente è pari alla metà del raggio marziano, un mantello di silicati e una crosta di andesite e basalto. Altre caratteristiche generali di Marte sono la sua pressione media in superficie pari a 560 Pascal molto più bassa rispetto a quella terrestre pari a $1.0132 \cdot 10^5$ Pascal, mentre l'accelerazione gravitazionale, sempre in superficie, è poco più di un terzo di quella terrestre ($3.727 \text{ [m]}/[\text{s}^2]$).

Il caratteristico colore rosso che contraddistingue Marte è fondamentalmente dovuto al fatto che il suolo del pianeta è ricco di componenti ferrosi che, esposti per milioni d'anni all'ossigeno ed al vapore acqueo della sua atmosfera hanno reagito ossidandosi.

La massiccia presenza di ferro su Marte è dovuta al fatto che, essendo più piccolo della Terra, durante le prime fasi della nascita del sistema solare ha avuto, in termini planetari, un raffreddamento molto veloce al punto che i minerali ferrosi sono in parte rimasti mescolati alla superficie e al mantello, il contrario di quanto

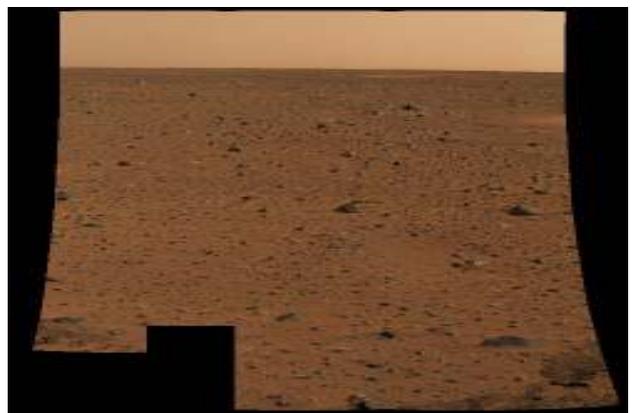


Immagine 1.5: una delle prime riprese a colori del pianeta fatta dal rover Spirit all'inizio del gennaio 2004 (fonte JPL/NASA)

accaduto al nostro pianeta dove i composti metallici sono precipitati verso il nucleo attraverso le fratture del mantello spinti dalla gravità, dalle dimensioni e dalla massa.

Oltre alla "ruggine rossa", sulla Terra e su Marte troviamo anche la "ruggine grigia" aggregata in un minerale chiamato ematite. L'ematite si forma in pozze stagnanti d'acqua oppure dove attività vulcaniche sotterranee generano acque in pressione.

L'ematite grigia è sicuramente un componente che nessuno penserebbe di trovare in un arido deserto marziano ma Marte non è poi così arido come vuole far sembrare. Il pianeta presenta molti segni di una antica presenza d'acqua che, forse, ancora oggi esiste.

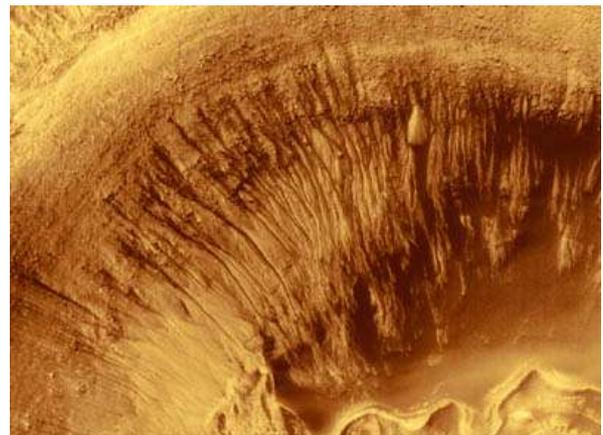


Immagine 1.6: Esempio di canale di deflusso

La prima scoperta di ematite su Marte risale al 1998, quando lo spettrometro agli infrarossi del Mars Global Surveyor ([TES](#) - Thermal Emission Spectrometer) individuò una forte ed estesa concentrazione di ematite grigia all'altezza dell'equatore marziano, in una zona di 500 chilometri chiamata "Sinus Meridiani". La scoperta, in aggiunta ad altre, costituisce una nuova prova che su Marte una volta ci fosse acqua in quantità tale da far precipitare gli ossidi di ferro in grani consistenti.

L'ematite grigia ha la stessa formula chimica (Fe_2O_3) della "ruggine rossa". L'unica differenza che ne determina la diversa colorazione è la sua struttura cristallina, mentre quella rossa è composta da grani di ossido di ferro che hanno un diametro che va da alcune centinaia di nanometri ad alcuni micron, i cristalli di ematite hanno un diametro medio simile a quello dei comuni granelli di

sabbia (sminuzzando dell'ematite fino a ridurla in polvere i suoi grani cominceranno a riflettere la tipica colorazione rossastra della ruggine).

Planetologi e geologi che studiano il sito di "Sinus Meridiani" ritengono che i depositi si siano formati in profondità miliardi di anni fa e che solo recentemente (in termini di millenni) siano venuti alla luce per l'erosione dovuta ai venti.

Possiamo dunque comprendere come tale pianeta riservi ancora molti segreti, non ultimo la presenza d'acqua sottoforma di ghiaccio, che solo un'indagine sottosuperficiale (come quella condotta da Marsis) può aiutarci a comprendere.

Paragrafo 1.2

Cenni sulle caratteristiche astronomiche

Il periodo orbitale di Marte è di 687 giorni, con un periodo di rotazione di 24h e 37min, ha un'orbita leggermente ellittica con eccentricità pari a 0.0934. L'inclinazione dell'asse marziano è pari a $25.1894 \pm 0.0001^\circ$ rispetto al piano orbitale del pianeta, e il polo nord punta ad una regione intermedia tra la costellazione di Cefeo e quella del Cigno. Marte impiega 687 giorni per compiere una rivoluzione completa intorno al Sole, ma l'intervallo medio di opposizione, cioè il tempo che trascorre tra due incontri ravvicinati consecutivi con la Terra, è di 780 giorni. La sua distanza dal sole al perielio è pari a 206.700.000 Km mentre quella all'afelio è di 249.100.000 Km. L'inclinazione del piano dell'eclittica è invece di 1.8504° . La velocità media orbitale è di $24.13 \text{ [Km][s}^{-1} \text{]}$.

Il suo diametro è di 6787 km all'equatore, con uno schiacciamento di 0,009; la massa è 0,107 volte quella della Terra, l'accelerazione di gravità superficiale è solo il 38% di quella terrestre e la velocità di fuga 5,0 kmxs-1.

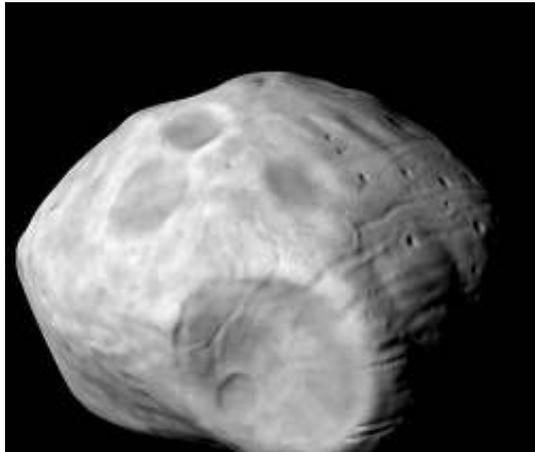


Immagine 1.7: il satellite Phobos ripreso da distanza ravvicinata; sulla sua superficie si nota un profondo cratere (fonte NASA)

Attorno a Marte orbitano due satelliti Phobos e Deimos, così chiamati dal nome greco dei due figli del dio Marte (Paura e

Terrore) che sempre lo accompagnavano in battaglia. Essi presentano una forma molto irregolare ed una superficie visibilmente coperta di crateri (dimensioni: 19x21x27 km e 11x12x15 km) e furono scoperti nel 1877 dall'americano A. Hall.

Hanno periodo di rotazione attorno al pianeta di 7h39' e 30h17' e distano in media da esso 9000 e 24.000 km. Sulla base di valutazioni di differenze strutturali rilevate fra Marte e le sue lune, vi sarebbe possibilità che queste ultime rappresentino i corpi maggiori di uno sciame di relitti prodotti e sollevati in passato, intorno al pianeta madre, dall'impatto di un asteroide di almeno 1800 km di diametro.

Phobos è un corpo allungato, dai contorni irregolari, e misura appena 13,5 x 10,8 x 9,4 km, mentre la sua massa è di 10.800 miliardi di tonnellate ($1,08 \cdot 10^{19}$ g) e la densità di 2,0. Phobos orbita intorno a Marte ad una distanza di 9.380 km, con un periodo di 0,319 giorni, cioè 7 ore e 39 minuti. Questo è anche il periodo di rotazione attorno al proprio asse: come nel caso della Luna e di tutti gli altri satelliti, infatti, rotazione e rivoluzione si sono sincronizzate nel tempo in modo che il satellite rivolga sempre la stessa faccia al

pianeta. Ciò è dovuto ad un effetto gravitazionale. La superficie di Phobos è oscura (esso ha un albedo di appena 0,06) ed è costellata di crateri.

Deimos ha la forma di un uovo, delle dimensioni di 7,5 x 6,1 x 5,5 Km. La sua massa è di 1.800 miliardi di tonnellate ($1,8 \cdot 10^{18}$ g) e la densità di 1,7. Il suo periodo di rotazione, pari a quello di rivoluzione, è di 1,262 giorni, cioè 30 ore e 18 minuti.

La distanza media da Marte è pari a 23.460 km e, come quella di Phobos, anche la superficie di Deimos presenta dei crateri. I due satelliti sono simili, per composizione chimica, agli asteroidi di tipo C, infatti, alcuni scienziati sostengono che si tratta di due asteroidi catturati dal campo gravitazionale di Marte.

Paragrafo 1.3

Obiettivi di studio

Si è visto dunque come vi sia una forte interesse da parte degli scienziati verso il pianeta rosso, supportato proprio di questi tempi dalla consapevolezza che l'acqua su Marte è una realtà ancora presente.

La conoscenza dunque degli strati sottosuperficiali del pianeta, rappresenta il nucleo centrale del nostro studio che, attraverso l'utilizzo di un algoritmo, apre le porte verso nuove frontiere nella conoscenza di Marte.

Paragrafo 1.4

La ionosfera marziana

Come premesso quanto sarà detto nel seguente paragrafo risulterà di grande interesse nella comprensione dei fenomeni che si vogliono andare a studiare.

La ionosfera di Marte, infatti (come pure quella terrestre) costituisce un forte ostacolo nella trasmissione di segnali elettromagnetici in quanto il plasma di cui è composta interagisce fortemente con essi alterandoli fortemente.

Il risultato di tale alterazione è una distorsione della fase del segnale che, nel nostro caso in cui il segnale è di tipo radar, si traduce in una defocalizzazione delle immagini che esso supporta.

Oltre a descrivere le caratteristiche fisiche della ionosfera, riportiamo i modelli matematici che sono stati elaborati per rappresentarne l'andamento.

È fondamentale premettere che i modelli ionosferici presentati in questo paragrafo saranno utilissimi per lo studio che segue e verranno utilizzati nella realizzazione degli algoritmi per la compensazione dell'errore di fase presentati nel capitolo 3.

1.4.1 Generalità

La ionosfera è quella zona dell'alta atmosfera marziana dove ioni ed elettroni sono presenti in quantità sufficiente da modificare la propagazione delle onde radio ad alta frequenza che la attraversano. In questa zona la conducibilità elettrica è talmente elevata da permettere la formazione di un sistema di correnti.

Il comportamento dell'atmosfera viene soprattutto influenzato dalla radiazione solare ultravioletta che viene assorbita dalle varie specie chimiche presenti e conseguentemente diffusa o riemessa sotto forma di radiazione infrarossa. Lo scambio continuo di energia, oltre che di materia, con lo spazio circostante dà subito modo di definire l'atmosfera come un sistema aperto. La ionosfera viene prodotta da un ampio spettro di radiazione solare, nel visibile e nel non visibile, che dissocia e ionizza la miscela di gas presente nell'alta atmosfera. A causa della stretta dipendenza tra l'intensità di radiazione solare e l'angolo di elevazione del Sole, le proprietà della ionosfera, specialmente per ciò che riguarda la densità degli elettroni liberi, mostrano sia *variazioni temporali*, che *locali*. La ionosfera, infatti, evidenzia *variazioni giornaliere e stagionali* ed è dominata dall'*influenza dell'attività solare*

1.4.2 Modelli ionosferici

Per caratterizzare l'andamento della frequenza di plasma in funzione dell'altezza e quantificare la quantità di distorsione indotta dalla propagazione ionosferica, può essere usato il cosiddetto modello "gamma", per cui:

$$(1.4.1) \quad f_p(z) = f_{p,\max} \frac{z - h_0}{b} e^{1 - \frac{z - h_0}{b}} \delta_{-1}(z - h_0)$$

dove b è un fattore di forma, h_0 è la quota di inizio dello strato di Ionosfera a partire dalla superficie di Marte (in genere pari a circa 120 Km) e δ_{-1} è la funzione gradino. Secondo tale modello la frequenza di plasma è nulla per $z < h_0$, cresce rapidamente fino al suo massimo valore $f_{p,\max}$, che è ottenuto per $z_{\max} = h_0 + b$ e poi tende a zero dolcemente al crescere di z .

Un adeguato range di variabilità del parametro b è dato da: $20 \text{ Km} < b < 50 \text{ Km}$.

Infine la $f_{p,\max}$, che è una funzione di SZA e del flusso solare, può essere ottenuta di giorno mediante la seguente equazione:

$$(1.4.2) \quad \begin{cases} f_{p,\max} = 8.980 \cdot 10^{-3} \sqrt{n_{e,\max}} & [\text{MHz}] \\ n_{e,\max} = (1.55 \cdot 10^5) \cdot \exp(0.36 \cdot \ln(\frac{F}{100})) \cdot (\cos(\text{SZA}))^{0.57} & [el / cm^3] \end{cases}$$

dove F è la densità del flusso solare il cui valore medio può essere assunto pari a 100 ev/m^3 mentre di notte $f_{p,\max}$ è assunta costante e pari a 0.8 MHz.

Quindi il limite inferiore, nella scelta della frequenza portante, per limitare l'errore di fase residuo, è dato da:

$$(1.4.3) \quad f_0 \geq f_{p,\max} + \frac{f_{p,\max}}{3}$$

Con questi dati, si derivano le figure 1.18:

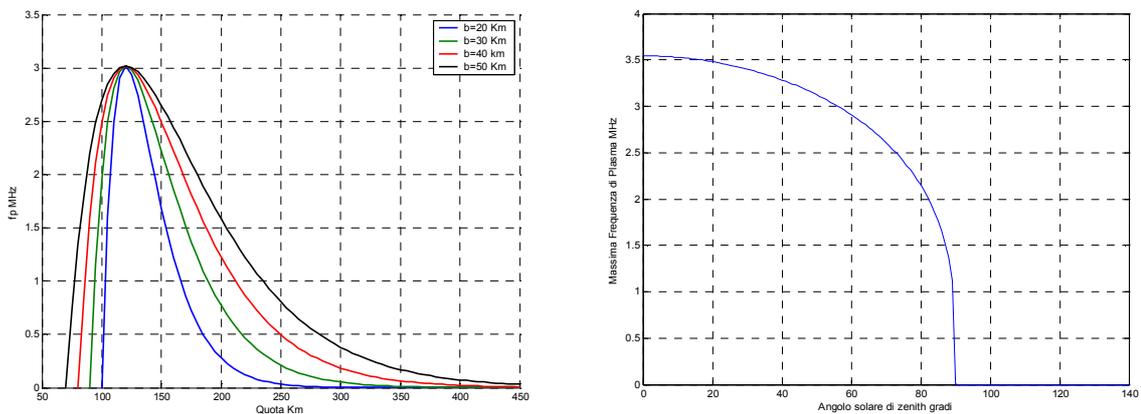


Immagine 1.8 Andamento frequenza di plasma con la quota e andamento massima frequenza di plasma con SZA

1.4.3 Effetti della propagazione nella ionosfera

La Ionosfera influenza le operazioni di MARSIS in tre differenti modi:

- Dispersione dell'onda radio
- Attenuazione dell'onda radio
- Rotazione di Faraday

La dispersione, se non compensata, incide sulla risoluzione verticale del radar per colpa dell'allargamento dell'impulso radar compresso e sollevamento dei lobi laterali. Tali effetti sono funzione della densità elettronica ionosferica e della forma del suo profilo. In aggiunta alla dispersione, la ionosfera attenuerà anche l'onda radio: il livello d'attenuazione dipende dalla densità elettronica n_e della Ionosfera, dalla forma del suo profilo e dalla frequenza ν di collisione elettronica-neutrale. Il livello d'attenuazione in dB per unità di frequenza e altezza dello strato può essere espresso come:

$$(1.4.4) \quad A(h, f) = 4.61 \cdot 10^4 \frac{\nu(h)}{(2\pi f)^2 + (\nu(h))^2} n_e(h) \quad \left[\text{dB} / \text{Km} / \text{el} / \text{cm}^{-3} \right]$$

Ma, assumendo un modello analitico per la frequenza di collisione del tipo:

$$\nu(h) \cong 10^{\frac{195-h(Km)}{17}} \quad [S^{-1}] \quad \xrightarrow{h=100 \text{ Km}}$$

$$\nu(h) = 10^{5.6}$$

per cui essendo anche $(2\pi f)^2 \gg (\nu(h))^2$ e

ricordando che $f_p = 8980 \sqrt{n_e}$ [Hz]:

$$(1.4.5) \quad A(h, f) \cong 4.8 \frac{f_p^2(h)}{f^2}$$

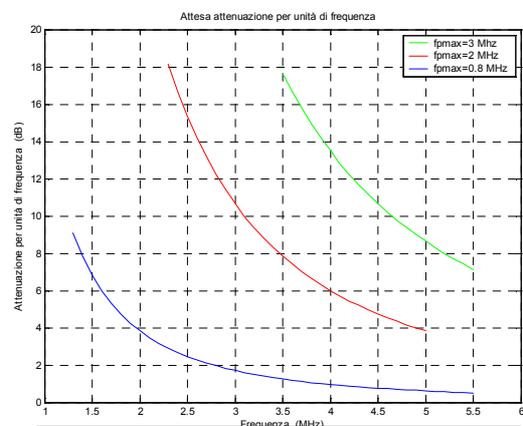


Immagine 1.9 Attenuazione α (dB)

Assumendo un $\Delta h=20$ Km, allora:

$$\alpha|_{dB} = A(h, f) \cdot \Delta h \cong \frac{4.8}{f^2} \left(\frac{f_{p \max}}{2} \right)^2 20 = 24 \frac{f_{p \max}^2}{f^2}$$

In conclusione:

$$(1.4.6) \quad A_{ion} = \frac{1}{B} \int_{f_0 - \frac{B}{2}}^{f_0 + \frac{B}{2}} 10^{2.4 \left(\frac{f_{p \max}^2}{f^3} \right)} df$$

Il terzo meccanismo che interviene nella distorsione ionosferica è la rotazione di Faraday.

Infatti durante propagazione di un'onda EM polarizzata linearmente attraverso la Ionosfera avente un certo campo magnetico B , può verificarsi a causa della interazione col campo B la rotazione della direzione di polarizzazione dell'onda stessa (effetto Faraday) di un angolo fortemente dipendente dal campo magnetico normale e dalla densità locale elettronica. Esso può essere espresso in radianti da:

$$(1.4.7) \quad \Psi = 2.36 \cdot 10^4 \frac{1}{f^2} \int_{h_0}^h n_e(z) B_n \cos \theta \sec \varphi dz$$

dove l'integrale è calcolato lungo la direzione di propagazione, B_n è la componente normale del campo magnetico, θ è l'angolo tra B_n e il versore k dell'onda e φ quello tra la verticale e il vettore k .

Notando che per MARSIS $\theta=\varphi=0$ (radar a puntamento nadirale) e assumendo che B_n possa essere sostituito dal suo valor medio $\langle B_n \rangle$ (avremo così una stima conservativa della rotazione), la rotazione di Faraday è data da:

$$(1.4.8) \quad \Psi = 2.36 \cdot 10^4 \frac{\langle B_n \rangle}{f^2} \int_{h_0}^h n_e(z) dz \cong 2.36 \cdot 10^4 \frac{\langle B_n \rangle}{f^2} n_{e,max} \Delta h$$

dove l'integrale di n_e lungo lo strato (contenuto elettronico totale) è stato sostituito col valore massimo del contenuto elettronico (ipotesi accettabile per $b=20$ Km).

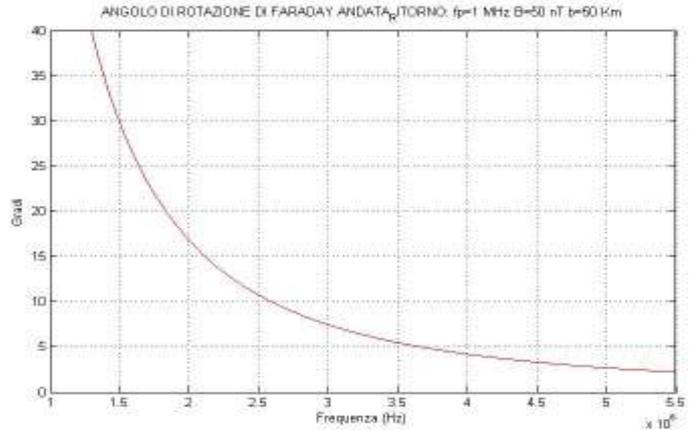


Immagine 1.10 Rotazione di Faraday

In base alle misure fornite dal MGS (Mars Global Surveyor) si nota come l'intensità del campo magnetico normale di Marte sia minore di 5 nT per l'80% della superficie del pianeta ma in alcune zone può essere maggiore di 200 nT. Inoltre i valori di MGS sono validi fino a 400 Km dalla superficie mentre ci si aspetta che tra 50 e 300 Km esso possa assumere i suoi valori massimi, anche superiori a 200 nT. Comunque, si è assunto il valore di 200 nT come valore massimo conservativo del campo magnetico.

A questo punto ricordando che l'attenuazione in dB dovuta alla rotazione di Faraday di andata e ritorno del segnale è:

$$(1.4.9) \quad A_{FAR,dB} = 20 \log_{10} (\cos \Psi)$$

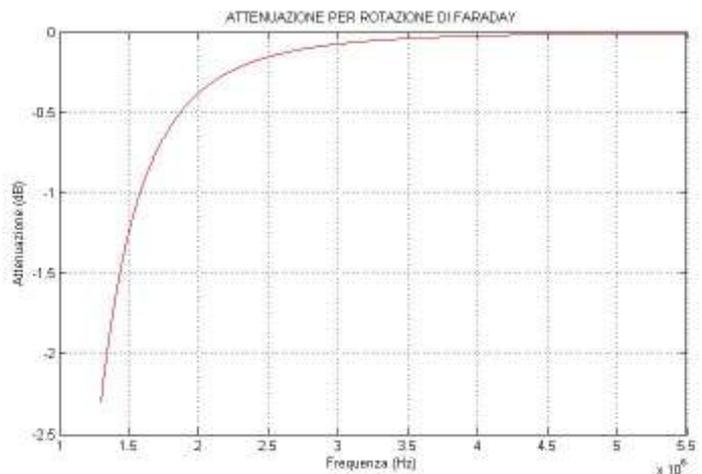


Immagine 1.11 Attenuazione di Faraday

l'attenuazione totale (Ionosfera e campo magnetico) è data da:

$$(1.4.10) \quad A_{ion,TOT} = \frac{1}{B} \int_{f_0 - \frac{B}{2}}^{f_0 + \frac{B}{2}} 10^{\frac{1}{10} \left[24 \left(\frac{f_{p,max}^2}{f^2} \right) + A_{FAR,DB} \right]} df$$

1.4.4 Valutazione della distorsione di fase

E' noto che lo scostamento extra di fase rispetto alla propagazione in spazio libero che un impulso subisce a causa di uno strato di plasma spesso $L=h-h_0$ dipende dal profilo della frequenza di plasma f_p incontrato e può essere espresso in funzione della frequenza f come:

$$(1.4.11) \quad \Delta\phi_{gamma}(f) = \frac{4\pi}{c} f \int_{h_0}^h \left[\sqrt{1 - \left(\frac{f_p(z)}{f} \right)^2} - 1 \right] dz$$

cosicché la procedura di compensazione ionosferica richiederebbe la stima di b e $f_{p,max}$ e l'integrazione del profilo ionosferico.

Tuttavia, per semplificare la complessità della stima e tenendo conto che i termini di distorsione di fase possono cambiare significativamente nello spazio e tempo, per cui la distorsione non può essere stimata sulla base di una osservazione a lungo periodo ma in un intervallo che varia da 1 a 2 secondi, vale a dire una volta per ogni apertura sintetica, allora la (1.3.11), assumendo f_p costante nell'intervallo di apertura sintetica, può essere riscritta come:

$$(1.4.12) \quad \Delta\phi_{EQ}(f, \tau_0) = 2\pi\tau_0 \left(\sqrt{f^2 - f_{p,eq}^2} - f \right)$$

dove τ_0 è $2L_{eq}/c$ dove L_{eq} è lo spessore dello strato ionosferico equivalente. La (1.4.12) esprime il cosiddetto “modello equivalente a singolo parametro” o “modello uniforme” in quanto ora la procedura di compensazione richiede di stimare solo $f_{p,eq}$.

Infatti, si può introdurre una versione monodimensionale del modello equivalente se si ritiene che lo spessore equivalente ionosferico sia fissato ad un valore medio $L_{eq}=L_m=80$ Km ($\tau_0=533$ μ s);

Detto questo, si può scrivere:

$$(1.4.13) \quad \Delta\phi_{EQ}(f) = 2\pi\tau_0 \left(\sqrt{f^2 - f_{p,eq}^2} - f \right) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (f - f_0)^n$$

dove f_0 è la frequenza portante. Ai fini del soddisfacimento dei requisiti imposti sui lobi laterali, è sufficiente un'analisi troncata al quarto ordine (modello ridotto), ovvero:

$$\Delta\phi_{EQ_RID}(f) \cong a_0 + a_1(f - f_0) + a_2(f - f_0)^2 + a_3(f - f_0)^3 + a_4(f - f_0)^4$$

dove si vede che:

$$a_0 = 2\pi\tau_0 \left(\sqrt{f_0^2 - f_{p,eq}^2} - f_0 \right) \text{ [rad]}$$

$$a_1 = 2\pi\tau_0 \left(\frac{f_0}{\sqrt{f_0^2 - f_{p,eq}^2}} - 1 \right) \text{ [rad / Hz]}$$

$$a_2 = -2\pi\tau_0 \left(\frac{f_{p,eq}^2}{2(f_0^2 - f_{p,eq}^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \text{ [rad / Hz}^2\text{]}$$

$$a_3 = 2\pi\tau_0 \left(\frac{f_0 f_{p,eq}^2}{2(f_0^2 - f_{p,eq}^2)^{\frac{5}{2}}} \right) \text{ [rad / Hz}^3\text{]}$$

$$a_4 = -2\pi\tau_0 \left(\frac{4f_0^2 f_{p,eq}^2 + f_{p,eq}^4}{8(f_0^2 - f_{p,eq}^2)^{\frac{7}{2}}} \right) \left[rad / Hz^4 \right] \quad (1.4.14)$$

Si nota come a_0 non introduca alcuna distorsione mentre a_1 introduce solo uno spostamento temporale. Inoltre una stima grezza di a_1 può essere ottenuta misurando il tempo extra di ritardo rispetto al ritardo in spazio libero.

Per stimare a_2 (che è il termine più importante della dispersione di fase dopo quello lineare) si utilizza una tecnica, nota come metodo della massimizzazione del contrasto di ampiezza, che consente anche la stima di f_{peq} .

Poi, i termini di fase di terzo e quarto ordine, ad esempio, potranno essere ottenuti da a_2 in base alle equazioni di sopra.

Concludiamo dicendo che il modello ionosferico presentato è stato utilizzato nelle simulazioni del capitolo 4, per alterare il segnale e verificare la validità della stima della distorsione di fase.

Inoltre risulta importante anche la conoscenza dei coefficienti appena presentati (nel particolare quello del secondo ordine a_2), in quanto si presenterà un confronto, nelle elaborazioni effettuate sempre nel capitolo 4, tra la stima di tale coefficiente effettuata dal metodo PGA e dal metodo dal contrasto.

Capitolo 2

La missione Mars Express ed il suo radar

L'argomento su cui si incentra il presente capitolo è il radar Marsis della missione Mars Express. Come già esposto, infatti, la maggiorparte delle elaborazioni presentate nell'ultimo capitolo utilizza dei dati reali che tale sonda ha raccolto dalla superficie marziana, effettuandone il processing a terra.



Inoltre, come accennato, il software sviluppato risulterà parte integrante di questa missione, con lo scopo principale di compensare le distorsioni introdotte dalla ionosfera di Marte e di recuperare le informazioni corrette, contenute nei dati che da Marsis giungono a terra.

Si descriverà dunque la missione Mars Express nei suoi aspetti generali e si insisterà specificatamente sulle caratteristiche di progetto e di funzionamento del radar e degli strumenti che lo compongono.

Paragrafo 2.1

La missione Mars Express

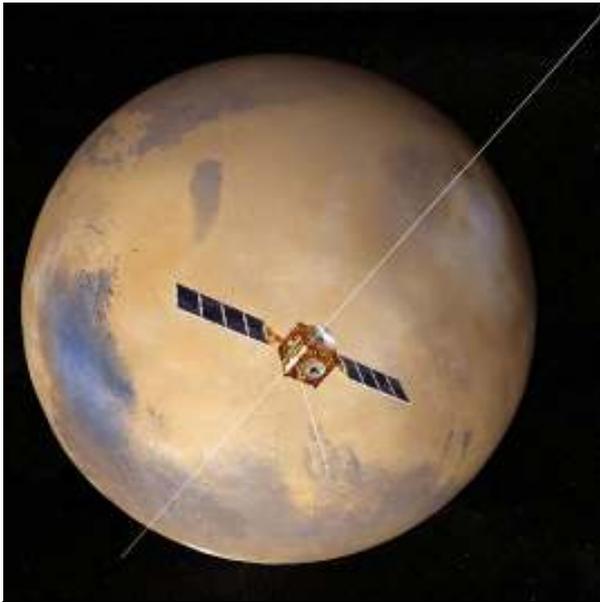


Immagine 2.2: Rappresentazione del radar Marsis

Mars Express é la prima missione dell'Agencia Spaziale Europea verso un altro pianeta del Sistema Solare. É stata chiamata così per la velocità con cui é stata progettata e realizzata, in tempi record e con costi inferiori a qualsiasi precedente missione di questo tipo.

Per la sua realizzazione ci si é basati sulle acquisizioni tecnologiche raggiunte nel corso di Mars 96, la missione russa verso il pianeta rosso poi fallita, e la missione Rosetta, lanciata dall'ESA a marzo del 2004. La missione Rosetta é finalizzata allo studio dell'origine delle comete e, di qui, alla possibilità di aggiungere informazioni sulla nascita del Sistema Solare.

Lo scopo primario della missione Mars Express é la ricerca dell'acqua nell'atmosfera e nel sottosuolo di Marte, allo stato liquido e/o solido, sotto forma di fiumi sotterranei, pozze d'acqua, nascosta in cavità o rocce. Secondariamente servirà anche a fungere da raccordo per le comunicazioni tra la Terra ed i veicoli spaziali della NASA presenti sulla superficie di Marte, costituendo così un nesso centrale nello sforzo internazionale per l'esplorazione del pianeta.

Mars Express é una delle cinque missioni in corso per l'esplorazione di Marte: di esse, come già abbiamo detto tre sono americane, organizzate e realizzate dalla NASA, Mars Exploration Rovers, 2001 Mars Odissey e Mars Global Surveyor, ed una giapponese, NOZOMI (Speranza), dell'Agenzia Spaziale Giapponese.

Al momento il mondo scientifico internazionale é impegnato in uno sforzo collettivo per la conoscenza del pianeta rosso, che, al di là di affascinanti congetture, é l'unico pianeta del sistema solare sul quale vi é la probabilità di trovare una qualche forma di vita, passata o addirittura presente, e per cui valga la pena di ipotizzare una futura esplorazione o colonizzazione umana.

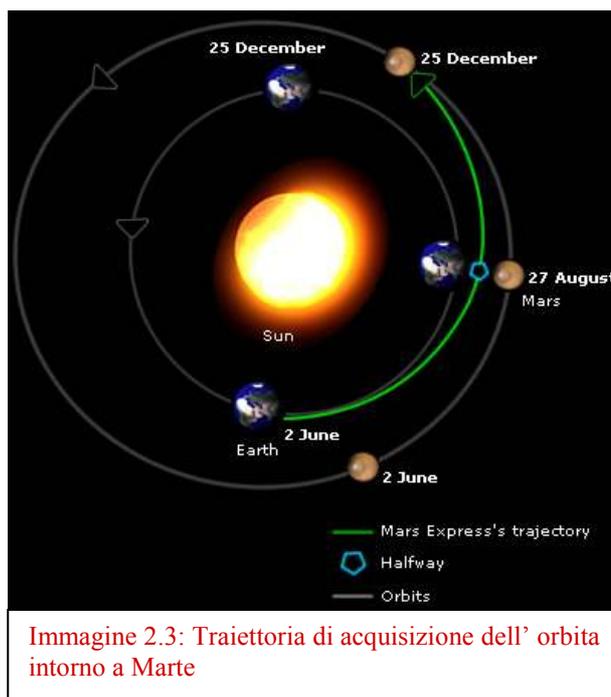


Immagine 2.3: Traiettoria di acquisizione dell'orbita intorno a Marte

Dal 25 dicembre 2003 Mars Express si trova nell'orbita di Marte, dopo aver compiuto un viaggio lungo sette mesi (Immagine 2.4). É stato lanciato il 2 giugno 2003 da un lanciatore Soyuz-Fregat nella base di lancio di Baikonur in Kazakhstan. Rimarrà in orbita intorno a Marte per almeno un anno marziano, 687 giorni Terrestri, che rappresenta la durata nominale della missione. Durante questo periodo é stato previsto che il punto dell'orbita più vicino a Marte girerà in maniera tale da dare agli strumenti presenti a bordo la possibilità di coprire l'intera superficie marziana riprendendola da ogni angolatura.

La sonda orbitante dovrà compiere la mappatura del pianeta e della composizione del terreno, dovrà studiare l'atmosfera e attraverso un spettrometro prodotto in Italia scruterà il sottosuolo alla ricerca di acqua. Il veicolo lascerà cadere sulla superficie anche una piccola stazione meteorologica, Beagle 2 realizzata in Gran Bretagna. La sonda Mars Express Orbiter porterà inoltre con sé un radar, chiamato MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding), in grado di investigare gli strati al di sotto della superficie.

MARSIS tenterà di localizzare differenti strati, inclusi quelli di acqua e ghiaccio, per diversi km al di sotto della crosta marziana. Degli strumenti installati si può affermare che MARSIS è il più innovativo e importante.

Gli altri apparecchi invece (seppur aggiornati), sono strumenti "sopravissuti" alla missione russa Mars 96 (caduta a terra subito dopo il lancio per problemi al missile impulsore). L'intera missione è focalizzata a determinare con estrema precisione la composizione e le quantità d'elementi presenti nell'atmosfera, sulla superficie e nel sottosuolo. Una analisi che permetterà di misurare con esattezza quanta acqua (sottoforma di ghiaccio) sia presente sul pianeta. Gli strumenti infatti, escluse poche eccezioni, sono complementari gli uni agli altri in questa ricerca indispensabile alle future esplorazioni con equipaggi umani.

Paragrafo 2.2

Marsis: il radar

MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding) é uno dei sette strumenti montati a bordo del veicolo spaziale della missione europea Mars Express.

Il progetto del radar, di cui ha la responsabilità l' Agenzia Spaziale Italiana, é affidato ad Alenia Spazio in collaborazione con il Jet Propulsion Laboratory della NASA ed ha un Principal Investigator italiano dell' Università "La Sapienza" di Roma .

MARSIS é un tipo unico di radar a penetrazione a bassa frequenza (1.3-5.5 MHz), che può operare come Subsurface Sounder al di sotto degli 800 km di altitudine (dalla superficie di Marte) e come Ionosphere Sounder al di sotto dei 1200 km di altitudine (dalla superficie di Marte).

"Un radar sounding a penetrazione da piattaforma spaziale é stato sperimentato una sola volta in precedenza, nel corso di una delle missioni lunari Apollo. MARSIS sarà il primo radar di questo tipo a cercare acqua nel sottosuolo. É unico." dice il Prof. Giovanni Picardi dell'Università "La Sapienza" di Roma, Principal Investigator del progetto. MARSIS, con i suoi 40m di antenna, sonderà la superficie di Marte fino a qualche km di profondità.

É stato progettato con l' obiettivo primario di produrre una mappa della distribuzione dell' acqua allo stato solido e/o liquido negli strati superiori della crosta di Marte. Come obiettivo secondario lo strumento dovrà svolgere una

accurata indagine geologica del sottosuolo, una caratterizzazione puntuale della superficie del pianeta ed un sondaggio della ionosfera marziana, con misurazione globale della densità degli elettroni ed investigazione dell'impatto del sole e del vento solare su di essa.

Sulla terra uno strumento di questo tipo viene solitamente azionato da terra o da una piattaforma aerea, per la ricerca di acqua o di oggetti sepolti, ed è in grado di operare fino a poche decine di metri nel sottosuolo.

Su Marte opererà dalla sua posizione a bordo di Mars Express fino ad una profondità massima di circa 5km sotto la crosta marziana, fornendo informazioni, non solo per quanto riguarda la presenza di acqua, ma sulla composizione totale dell'area investigata, scandagliando l'intera superficie del pianeta.

Le informazioni migliori derivanti dall'attività di penetrazione al suolo del radar, verranno rilevate durante la notte quando la ionosfera di Marte è meno attiva e Mars Express si trova a meno di 800 km dalla superficie, una condizione che si verifica per 26 minuti durante ogni orbita.

Durante il giorno saranno invece migliori le informazioni sulla ionosfera, infatti la luce del sole ionizza gli strati superiori dell'atmosfera, cioè li carica elettricamente, e le onde radio del radar interagiscono con la ionosfera fornendo informazioni sulla sua struttura.

È stato accertato che sicuramente un tempo l'acqua scorreva sulla superficie di Marte, mentre sappiamo per certo che oggi esiste solo nella sua rarefatta atmosfera sotto forma di vapore, che di tanto in tanto si condensa e diventa ghiaccio in alcuni punti più freddi del pianeta.

Le informazioni fornite dal Mars Global Surveyor (la missione NASA iniziata il 07 November 1996 e terminata a Gennaio 2003), sono che una certa quantità di acqua allo stato liquido probabilmente fuoriesce sulla superficie, ma, se ciò avviene, non vi rimane a lungo.

Ci si può chiedere allora che fine abbia fatto l'acqua che pure esisteva sul pianeta rosso. Molti esperimenti a bordo del Mars Express sono finalizzati alla spiegazione dei meccanismi che hanno portato a questo dissolvimento. Di sicuro gran parte dell'acqua esistente si è persa nello spazio con l'atmosfera marziana. Per il resto, molti planetologi sono convinti che una grande quantità d'acqua sia presente nel sottosuolo di Marte ed i recenti risultati del Mars Global Surveyor lo confermano.

MARSIS si propone di fare la mappa dell'acqua e del ghiaccio nel sottosuolo del pianeta rosso.

Paragrafo 2.3

Principi di funzionamento di Marsis

M.A.R.S.I.S. (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding) è uno strumento in grado di cartografare da un punto di vista geologico l'intera struttura sub-superficiale di Marte, fino ad una profondità di alcuni chilometri. Un'antenna lineare lunga 40 metri trasmetterà verso il pianeta una serie di onde radio a bassa frequenza. Una parte di queste sarà riflessa dal suolo, mentre un'altra oltrepasserà la crosta per diversi chilometri. Sulla base del diverso modo in cui saranno riflesse sarà possibile distinguere gli strati incontrati determinando anche il tipo di terreno/rocce incontrate, permettendo in questo modo agli scienziati d'identificare la composizione del suolo, e lo spessore del ghiaccio e/o del permafrost presente. Come effetto secondario MARSIS sarà inoltre in grado di studiare la ionosfera del pianeta, una regione nella quale le onde elettromagnetiche vengono riflesse. Principale responsabile dell'esperimento, interamente ideato in Italia, è il prof. Giovanni Picardi, dell'Università 'La Sapienza' di Roma.

MARSIS sfrutta il principio di funzionamento tipico di qualsiasi dispositivo radar. L'onda elettromagnetica trasmessa dall'antenna colpisce la superficie di Marte producendo una prima eco di riflessione che torna indietro verso il radar, generando un segnale di ritorno di forte intensità.

Impiegando le basse frequenze, dell'ordine dei MHz, una frazione significativa dell'energia che investe la superficie marziana si propaga all'interno della crosta, via via sempre più in basso, con una velocità che decresce nel tempo e

un'attenuazione dell'intensità proporzionale alla profondità di penetrazione, alla lunghezza d'onda impiegata e ad altro fattore legato alla natura del materiale attraversato dal raggio elettromagnetico.

Qualora sotto la superficie vi fossero delle discontinuità dielettriche, dovute cioè alla presenza di strati con caratteristiche fisiche diverse, si originerebbero ulteriori echi di ritorno molto più deboli di quello prodotto dall'illuminazione della superficie, e in ritardo rispetto ad esso.

A questo punto un'analisi del segnale di ritorno dalla superficie permetterà la stima della rugosità e della riflettività della stessa, oltre alla distanza media radar-superficie; invece l'analisi degli echi più deboli e la conoscenza del loro ritardo rispetto al segnale principale renderanno possibile rispettivamente la rivelazione di interfacce sotto-superficiali e la misura della loro profondità.



Immagine 2:4: Strato sotto-superficiale di Marte

Le prestazioni saranno limitate da 2 fattori principali, e cioè gli echi dovuti al “**clutter**” superficiale, dove con clutter si intendono tutti i disturbi e le interferenze dovute all'ambiente che entrano nel ricevitore, e il “rumore di fondo”.

Le bande utilizzate da MARSIS sia in trasmissione che in ricezione sono: 1,3-2,3 MHz (centrata su 1.8 MHz), 2,5-3,5 MHz (centrata su 3 MHz), 3,5-4,5 MHz (centrata su 4 MHz), 4,5-5,5 MHz (centrata su 5 MHz). Ricordiamo che usare una frequenza più bassa significa trasmettere un impulso con una lunghezza d'onda maggiore a cui corrisponde una migliore capacità di penetrare più in profondità.

Poiché durante il giorno marziano la ionosfera riflette le onde elettromagnetiche caratterizzate da una lunghezza d'onda dell'ordine delle decine di metri, non permettendo quindi l'uso delle bande inferiori ai 3 MHz, solo le 2 bande di frequenze più alte (4 MHz e 5 MHz) saranno utilizzate per indagare superficie e sottosuolo; di conseguenza la penetrazione migliore si otterrà durante la notte, quando potranno essere utilizzate tutte le bande a disposizione.

Gli echi riflessi saranno ricevuti da un'antenna primaria e da una seconda antenna che ha lo scopo di ridurre il clutter ambientale. Vengono quindi convertiti in forma digitale ed elaborati a bordo della sonda, dall'unità DES (Digital Electronics Subsystem) di MARSIS.

Il processore presente a bordo effettua operazioni sui dati che permettono di ottenere una risoluzione di 150 metri nel vuoto, di ridurre gli effetti del clutter superficiale e del rumore. I dati saranno quindi inseriti in un database in grado di costruire una mappa globale del pianeta.

2.3.1 Il sistema di antenne

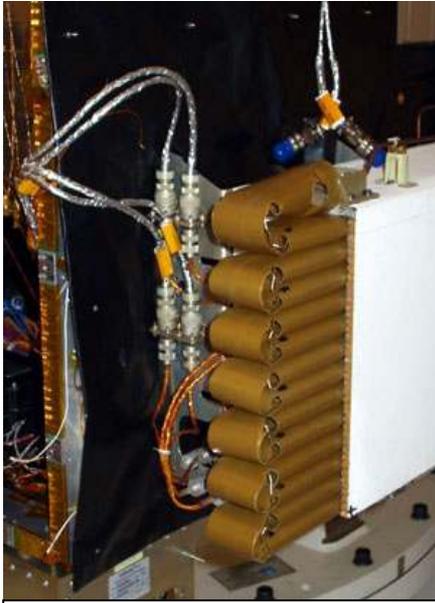


Immagine 2.5: Configurazione dopo il dispiegamento

Molto particolare la soluzione scelta per le due **antenne** (dipolo e monopolo) che equipaggiano il radar. Le antenne principali di MARSIS sono alloggiare come un “organetto” all’interno di due scatole poste ai lati di Express.

Il team responsabile ha invitato più volte l’ESA a posporre il dispiegamento delle antenne perché poteva essere pericoloso per la stabilità del satellite.

Recenti simulazioni computerizzate indicavano che il dispiegamento avrebbe potuto dare un “colpo di frusta” al satellite molto più ampio di quello previsto in fase di progetto, con conseguenze pericolose per la stabilità di Express. Così vi sono state numerose prove per determinare se e come dispiegare le antenne dello strumento, che hanno portato ad un ritardo nell’avanzamento della missione di circa un anno.

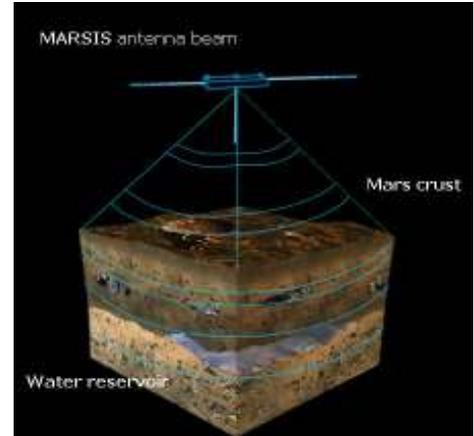


Immagine 2.6: Il sistema di antenne dispiegabili

Le antenne, lunghe 20 metri ciascuna, sono composte da segmenti cilindrici (di 2,5 cm) cavi inseriti in una scatola e la cui apertura è generata dalla spinta di una molla. Il sistema non si discosta molto dai segmenti che costituiscono le comuni tende da campeggio a igloo.

Quando il box viene aperto, l'energia elastica immagazzinata nelle fibre compresse le fa proiettare all'esterno, provocandone il dispiegamento completo. Il corretto dispiegamento e funzionamento delle due antenne è fondamentale per la missione. Come vedremo nei prossimi capitoli, infatti, in fase di progetto del satellite si è optati per un sistema composto da due antenne non a caso: le informazioni raccolte dalle due antenne distinte consentiranno di mettere a punto delle nuove tecniche di cancellazione del clutter (cioè il rumore legato all'ambiente circostante).

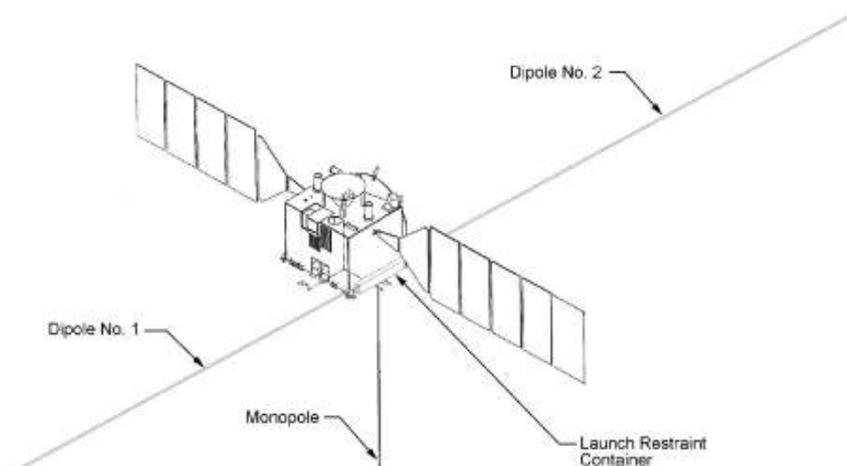


Immagine 2.7: Rappresentazione grafica di Marsis a dispiegamento avvenuto

2.3.2 Il Radar Sounder

MARSIS è un radar-altimetro di tipo sounder a bassa frequenza e a puntamento nadirale, multifrequenziale di tipo **pulse-limited**, che usa tecniche di apertura sintetica e una seconda antenna ricevente per isolare le riflessioni sottosuperficiali dagli echi di disturbo indesiderati (clutter). In questo paragrafo si danno dei brevi cenni riguardo ai radar di profondità.

I radar sounder sono sistemi di rilevamento utilizzati per lo studio dello strato sub-superficiale dei pianeti. Per i radar sounder è desiderabile operare a *basse frequenze* per incrementare la profondità di penetrazione. Per un sounder che orbita intorno a Marte, pianeta provvisto di ionosfera, il valore più basso di frequenza utilizzabile è limitato proprio dalla capacità di assorbimento di quest'ultima, rappresentata dalla *frequenza del plasma della ionosfera* marziana, che si aspetta essere intorno ai 3 MHz durante il giorno e meno di 800 KHz durante la notte. Infatti la ionosfera degrada il segnale radar attraverso la dispersione che cambia la forma del segnale ed introduce un tempo di ritardo di propagazione.

Le performance dei radar sounding sono generalmente legate a tre parametri superficiali o sottosuperficiali:

1. la pendenza superficiale e dell'interfaccia (in generale la geometria della superficie);
2. la rugosità superficiale o dello strato di interfaccia;
3. le proprietà dielettriche dei materiali geologici costituenti la zona osservata.

L'individuazione di acqua usando un radar sounding è condizionata da due principali fattori quali la capacità delle onde radar di penetrare abbastanza in profondità da superare l'interfaccia ghiaccio-acqua allo stato liquido e l'intensità dell'opposizione dielettrica tra il ghiaccio e lo strato umido di regolite contenente le riserve d'acqua.

Quindi nel progetto di un radar sounder bisogna considerare la lunghezza di penetrazione, quindi la capacità di raggiungere l'obiettivo. Maggiore è la profondità di penetrazione, minore è la frequenza, ma il limite inferiore per la frequenza utilizzabile dal radar, è limitato dalla frequenza di plasma della ionosfera.

Le quote di funzionamento di Marsis sono fino a 800 km per l'indagine sottosuperficiale: l'orbita fortemente ellittica di progetto consente al satellite di restare all'interno del range di 800 Km dalla superficie per un periodo di circa 26 minuti: questo permetterebbe la mappatura di circa 100 gradi di arco sulla superficie di Marte per ogni orbita e quindi una estesa copertura a tutte le latitudini all'interno della durata nominale della missione.

A tale scopo, la sonda spaziale Esa Mars Express, lanciata nel giugno 2003, è stata inserita in un'orbita fortemente **ellittica** intorno a Marte con una distanza al perigeo di circa 250 Km, una distanza all'apogeo di circa 10'142 Km, un periodo di 6.75 h e una inclinazione di $86,35^\circ$, permettendo così una copertura sostanziale a tutte le latitudini.

2.3.3 Obiettivi scientifici

Gli obiettivi scientifici perseguiti dal radar MARSIS sono stati definiti nell'ambito della missione Mars Express, e, in una cornice più ampia, in considerazione di quelle che sono le questioni attuali aperte sullo studio di Marte. E' in considerazione di questi obiettivi, soprattutto, che i progettisti hanno stabilito i requisiti delle varie apparecchiature di bordo e, come sempre avviene in ambito ingegneristico, hanno fatto le scelte di compromesso che meglio si addicevano al tipo di missione.

L'**obiettivo principale**, come già chiarito in precedenza, è quello di mappare la distribuzione di acqua, sia allo stato liquido che solido, nello strato superiore della crosta di Marte. L'individuazione di tali riserve di acqua darà una risposta alle questioni aperte sulla geologia, idrologia, sul clima e sulla possibile evoluzione biologica di Marte, e permetterà di fare un inventariato globale dell'acqua nel presente e nel passato del pianeta, chiarirà i meccanismi di trasporto e deposito dell'acqua, il ruolo dell'acqua liquida e ghiaccio nella modellazione del paesaggio marziano, la stabilità della acqua liquida e ghiaccio in superficie come indicazione delle condizioni climatiche, le implicazioni della storia idrologica per l'evoluzione di possibili ecosistemi marziani.

Tuttavia esistono anche tre **obiettivi secondari** che MARSIS dovrà perseguire: indagine geologica sottosuperficiale, caratterizzazione della superficie e indagine ionosferica.

Il primo consiste nel sondare la sottosuperficie marziana, per caratterizzare e mappare le strutture e gli elementi geologici presenti in 3D. La rilevazione dei contorni geologici sottosuperficiali consentirà anche di determinare lo spessore e le proprietà degli elementi sedimentari, come depositi di canali di efflusso e

possibili materiali lacustri, la mappatura dello spessore dei depositi stratificati polari e la misura delle loro proprietà fisiche (che potrebbero rivelare eventuali variazioni climatiche), un inventariato dei materiali volatili quali polvere e depositi sabbiosi, nonché di fare uno studio della stratigrafia vulcanica per capire i processi evolutivi e l'evoluzione della crosta marziana, e la mappatura delle strutture geologiche sottosuperficiali quali avvallamenti e faglie per capire la tettonica della crosta.

Il secondo obiettivo aggiuntivo è quello di acquisire informazioni sulla superficie di Marte. Gli scopi specifici di questa fase dell'indagine sono di caratterizzare la rugosità della superficie su scale di altezza che vanno da decine di metri fino a diversi chilometri, di misurare i coefficienti di riflessione radar della superficie e generare una mappa topografica della superficie ad una risoluzione laterale di circa 15-30 Km. Questi dati possono essere usati per dare una risposta ad una vasta gamma di domande scientifiche tra cui la caratterizzazione della rugosità superficiale di larga scala dei vari elementi geologici del pianeta, la determinazione della densità di volume dei materiali della crosta superiore, l'acquisizione di un data set topografico globale per completare quelli provenienti da altre tecniche.

Infine l'ultimo obiettivo aggiuntivo è quello di usare Marsis per sondare la Ionosfera per caratterizzare le interazioni del vento solare con la Ionosfera stessa e con gli strati superiori della atmosfera di Marte. Gli studi radar della Ionosfera consentiranno di realizzare misure globali della densità elettronica della Ionosfera e investigazione della influenza del sole e del vento solare sulla densità elettronica.

2.3.4 Descrizione sommaria degli strumenti di bordo

MARSIS è costituito da due apparati elettronici separati e da due antenne montate su Mars Express Orbiter. Un diagramma a blocchi semplificato è mostrato in Fig. 2.8.

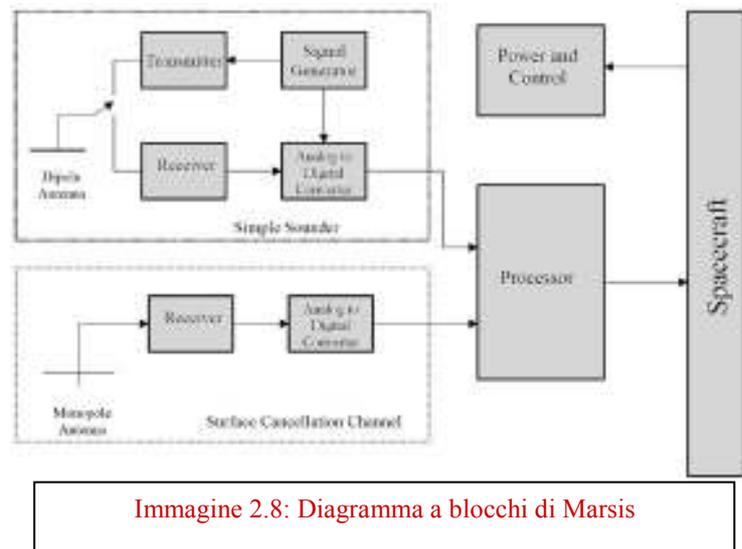


Immagine 2.8: Diagramma a blocchi di Marsis

Da un punto di vista funzionale la strumentazione può essere suddivisa in tre sottosistemi separati (Fig. 2.9):

- il sistema di antenne (**ANT**), che include sia l'antenna dipolo principale per la trasmissione e la ricezione degli impulsi di ispezione sottosuperficiale, sia l'antenna monopolo, per la ricezione dei soli echi di ritorno superficiale legati al clutter;
- il sottosistema a Radio Frequenza (**RFS**) che include sia il canale di trasmissione (TX, unico) sia i due canali riceventi (RX) rispettivamente per il dipolo e per il monopolo;
- il sottosistema elettronico digitale (**DES**), che include il generatore di segnale, le unità di timing e di controllo e l'unità di processing.

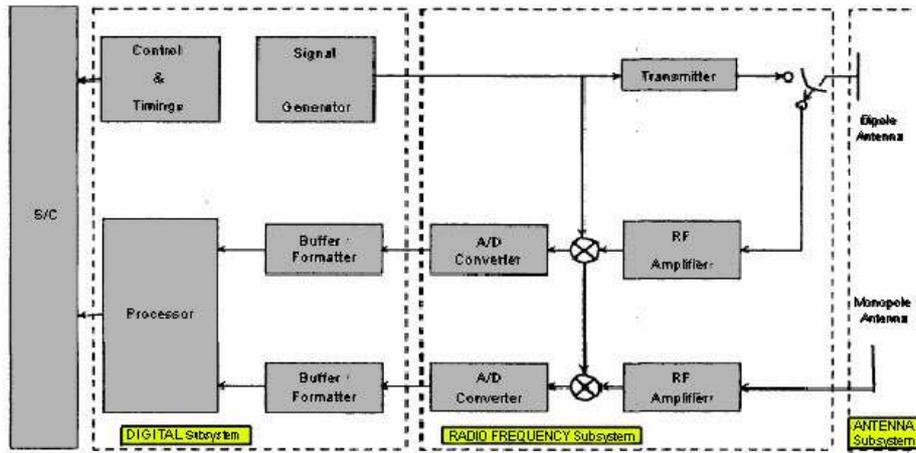


Immagine 2.9: I sottosistemi di Marsis

E' bene tener presente che da un punto di vista strutturale il DES e la sezione RX del sottosistema RFS sono collocati nel medesimo box all'interno dello spacecraft (S/C) detto **SISD**. Sempre all' interno della S/C sono collocate anche le scatole contenenti gli alloggi per l'elettronica del canale TX (**SIST**), mentre le due antenne sono montate all'esterno, ovviamente.

E' bene osservare che MARSIS non è progettato come sistema ridondante, e infatti solo l'interfaccia di comunicazione del radar con la S/C è ridondante.

Per quanto riguarda il software di bordo, esso è memorizzato e gestito nel DES.

2.3.5 Sintesi delle modalità di funzionamento

Dopo aver ricevuto il comando di accensione dalla S/C e gli strumenti di bordo hanno eseguito tutti i loro processi di avviamento, l'Elettronica di Controllo (CE), che è una parte del DES, genera un **chirp** modulato linearmente in frequenza, che è poi amplificato dal trasmettitore e quindi l'energia viene irradiata dall'antenna dipolo puntata al nadir. In questa fase entrambi i canali riceventi sono isolati per evitare che il segnale trasmesso (a potenza elevata) possa danneggiarli. Dopo che la trasmissione dell'impulso è completata, il segnale di ritorno dalla superficie marziana è ricevuto da entrambe le antenne e le protezioni in ricezione vengono disabilitate.

L'antenna dipolo principale viene poi connessa al ricevitore, il quale amplifica il segnale di ritorno, che viene downconvertito per allineare la compensazione video prima della conversione in digitale da parte del convertitore Analogico/Digitale (A/D). L'antenna monopolo secondaria, orientata nella direzione del nadir, può ricevere prevalentemente gli echi provenienti da off-nadir, e ciò permette successivamente nel post-processing a terra di sottrarre il segnale dell'antenna monopolo a quello dell'antenna dipolo per ridurre il fenomeno del clutter. Questo canale riceve solo gli echi di superficie provenienti non dal nadir in quanto l'antenna monopolo presenta un nullo nella direttività proprio al nadir.

Anche i segnali prelevati dal monopolo e legati al clutter superficiale subiscono gli stessi trattamenti dei segnali catturati dall'antenna dipolo: quindi vengono amplificati, downconvertiti e poi convertiti in digitale. A questo punto entrambi i segnali digitali dei due canali vengono trasferiti al processore digitale di bordo, per essere processati. In particolare alcuni di essi verranno compressi sia in

range che in azimuth stesso a bordo, altri invece solo in azimuth. I segnali così trattati vengono poi inviati alla S/C che fa il downlink a terra.

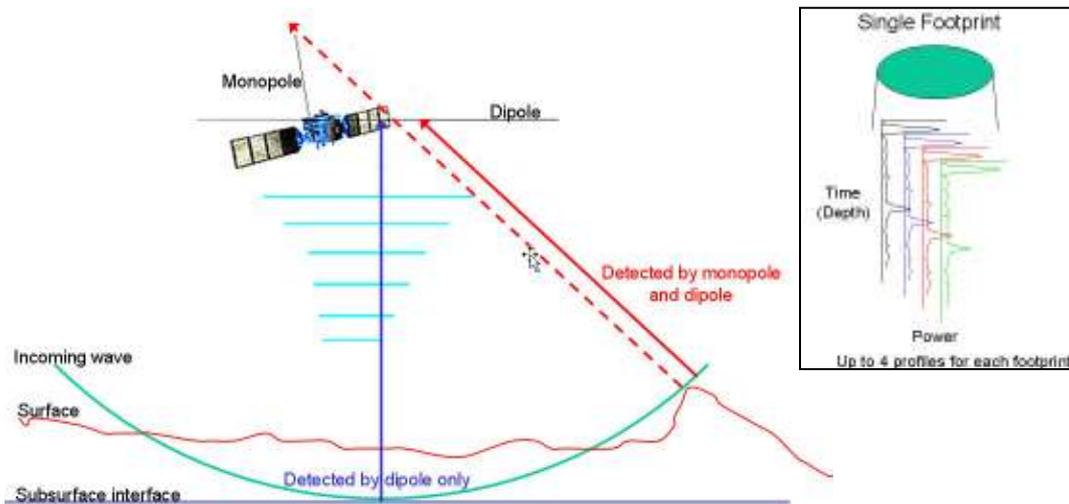


Immagine 2.10: Modalità di funzionamento delle due antenne

Durante le normali operazioni (cioè in assenza di guasti), MARSIS può operare in una delle seguenti quattro modalità operative:

- Calibrazione
- Indagine sottosuperficiale
- Indagine Ionosferica attiva
- Ricezione passiva

La modalità di indagine sottosuperficiale è a sua volta suddivisa in 5 sottomodalità (SS1-SS5). La modalità di calibrazione serve per ottenere le importanti informazioni per la calibrazione dello strumento.

In particolare, come si vedrà in seguito, tale modalità di indagine viene per lo più attuata su determinate orbite per le quali la superficie sottostante prevista sia il più possibile assimilabile ad una superficie piatta. Così l'eco di ritorno,

abbastanza simile ad un impulso, verrà usato per “pesare” i segnali di ritorno delle altre orbite.

La modalità di ricezione passiva è invece intesa per caratterizzare e fare misure sull’ambiente in cui MARSIS si troverà ad operare.

MARSIS è progettato per eseguire un’indagine sottosuperficiale su ogni orbita ogni qual volta l’altitudine sia inferiore a 800 km. Per consentire una copertura globale della superficie MARSIS è progettato per funzionare sia di giorno che di notte, anche se le prestazioni sono massimizzate nelle fasi notturne (angolo di zenith del sole $>80^\circ$), dato che la frequenza elettronica del plasma ionosferico decade significativamente e ciò consente di usare le bande di frequenza più basse, che hanno come sappiamo una capacità penetrativa maggiore.

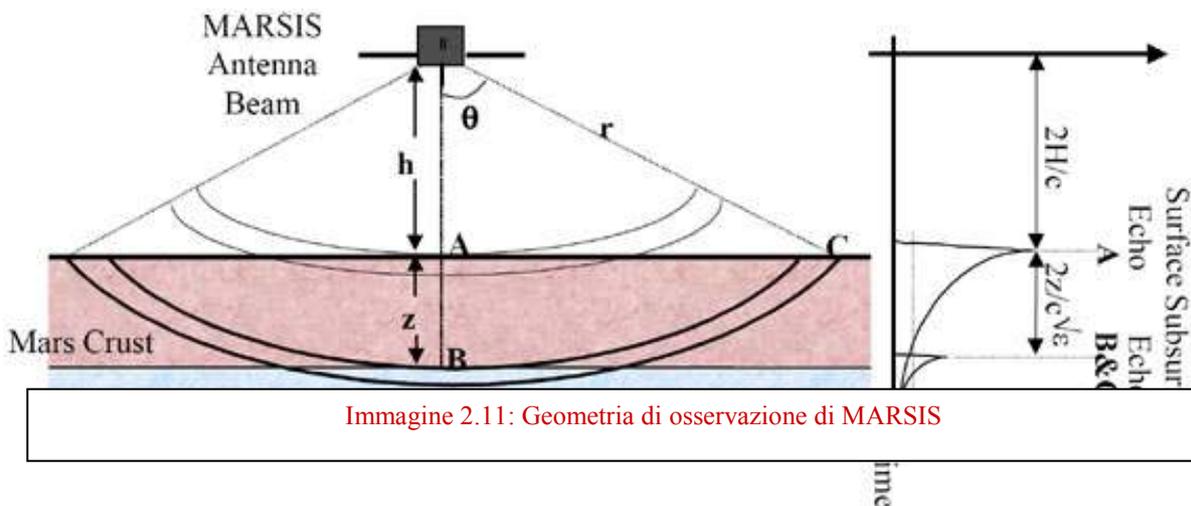
Anche la modalità di indagine Ionosferica può essere attuata sia di giorno che di notte, su qualsiasi orbita, e per altitudini inferiori a 1200 km.

MARSIS si deve portare nella modalità di calibrazione periodicamente durante le fasi operative della missione, in modo da acquisire una certa quantità di dati non processati. Ciò consente in fase di post-processing a terra, tra l’altro, di costruirsi un **filtro adattato** che permette di processare e comprimere gli echi provenienti dalla superficie e dalla sottosuperficie di Marte.

2.3.6 Modalità di indagine sottosuperficiale

La geometria di osservazione base e il principio operativo durante la fase di indagine sottosuperficiale sono illustrati nella figura seguente.

Secondo il principio di funzionamento di un radar sottosuperficiale, un breve impulso di energia elettromagnetica (EM) trasmesso dall'antenna che colpisce la parte superiore della superficie Marziana produce una prima eco di riflessione che si propaga indietro verso il radar, generando un forte segnale di ritorno ricevuto all'istante $t_0=2H/c$, dove H è l'altezza della sonda e c la velocità della luce nel vuoto. Grazie alle basse frequenze utilizzate, una significativa frazione di Energia EM che colpisce il suolo si trasmette attraverso la crosta e si propaga



verso il basso con una velocità ridotta rispetto a prima pari a $v=c/n$, dove n è l'indice di rifrazione della crosta collegato alla costante dielettrica reale ϵ_r dalla relazione $n=\sqrt{\epsilon_r}$, e con un'attenuazione proporzionale alla profondità di penetrazione (z), alla lunghezza d'onda (λ) e alla tangente trigonometrica del coefficiente di perdita del materiale ($\tan\delta$), definita come il rapporto tra la parte immaginaria e quella reale della costante dielettrica complessa ($\tan\delta=\epsilon_i/\epsilon_r$).

Se delle discontinuità dielettriche sottosuperficiali fossero presenti ad una certa profondità z_0 sotto la superficie, si produrrebbero delle riflessioni aggiuntive e le eco di riflessione più rilevanti si propagherebbero indietro attraverso il primo strato e poi

al radar generando ulteriori segnali d'eco, molto più deboli del segnale dovuto alla superficie superiore, con un ritardo temporale dato da $t_0 + 2 \cdot z_0 / v$. Di conseguenza, l'analisi nel dominio del tempo del forte ritorno superficiale, eventualmente dopo una integrazione **multilook** incoerente, consentirà una stima della rugosità superficiale, riflettività e distanza media, proprio come in un classico radar altimetro superficiale pulse-limited. Inoltre, la presenza di deboli segnali dopo il primo forte ritorno superficiale permetterà la individuazione delle interfacce superficiali, mentre la stima del loro tempo di ritardo dal primo segnale di superficie consentirà la misura della profondità delle interfacce rilevate, assumendo che sia nota la velocità di propagazione nel mezzo, nonché delle proprietà di attenuazione degli strati intermedi.

Le prestazioni del radar nella rilevazione delle interfacce sottosuperficiali saranno limitate da due fattori principali, ovvero gli echi superficiali di clutter e il livello di **rumore** all'interno del ricevitore. Gli echi superficiali di clutter sono originati dalle riflessioni da quelle zone superficiali, che hanno un ritardo di propagazione di andata e ritorno identico a quello degli eventuali e più interessanti segnali sottosuperficiali.

Ora, mentre questo non è un problema per superfici perfettamente piate, in quanto la legge di backscattering angolare imporrà a tali riflessioni laterali un'attenuazione molta alta, tuttavia la maggior parte delle superfici naturali non sono affatto piate e quindi gli echi legati al clutter superficiale possono essere molti forti nelle situazioni pratiche; come diretta conseguenza, quando gli echi

dovuti alla sottosuperficie sono fortemente attenuati dalla propagazione all'interno della crosta, potrebbe accadere che gli echi di clutter superficiali vadino a mascherare i segnali per noi più interessanti e a limitare le prestazioni del radar.

Tuttavia, anche quando la potenza del clutter di superficie è più bassa di quella che compete agli echi di sottosuperficie, le prestazioni del radar possono essere limitate dal livello di rumore del ricevitore; tale rumore può essere molto alto alle basse frequenze comunemente usate per i radar sounder, a causa del contributo dovuto alla temperatura di rumore cosmico che entra nel ricevitore e che è di molti ordini di grandezza più alta del rumore interno del ricevitore, per tipiche cifre di rumore di 3-4 dB e frequenze nel range 1-10 MHz .

Inoltre, in presenza di errori di fase e di ampiezza, potrebbe anche accadere che gli echi sottosuperficiali siano mascherati dai lobi laterali dovuti alla compressione del forte segnale superficiale.

Nelle modalità operativa di indagine sottosuperficiale, il radar sarà in grado di operare ad una qualsiasi delle seguenti *frequenze*:

- 1.3-2.3 MHz (centrata a 1.8 MHz)
- 2.5-3.5 MHz (centrata a 3 MHz)
- 3.5-4.5 MHz (centrata a 4 MHz)
- 4.5-5.5 MHz (centrata a 5 MHz)

con una banda trasmessa in ciascun caso di 1 MHz, e una forma d'onda trasmessa modulata linearmente in frequenza (impulso chirp); le frequenze più alte 4.0-5.0 MHz saranno usate per le indagini superficie/sottosuperficie diurne,

mentre quelle più basse per le indagini notturne quando le frequenze del Plasma decadono significativamente.

A sua volta, a causa delle varie possibili opzioni nella programmazione dello strumento, l'indagine sottosuperficiale è stata specializzata in cinque differenti sottomodalità (SS1-SS5), ognuna delle quali caratterizzata da un definito set di trasmissione di impulsi, ricezione degli echi e scelte di elaborazione a bordo.

Bisogna notare che le varie sottomodalità attuate lungo le varie orbite hanno diversi valori di data-rate, e ciò quindi porta a diverse strategie nella manipolazione dei dati grezzi a seconda della sottomodalità in atto. Ma in generale il data-rate è in ogni caso molto basso (pochi Mbit/s) e ciò si traduce nella necessità di comprimere stesso a bordo le informazioni acquisite in modo da ridurre la mole di dati da inviare a terra per il post-processing.

Così il processore di bordo, a seconda della sottomodalità operativa, sa già quali saranno le manipolazioni da attuare, quindi o compressione in range, o compressione in azimuth, o filtraggio multilook non coerente (il numero di filtri anche dipende dalla sottomodalità), in modo da rispettare il data-rate (tra 18 e 75 kbps) fissato per quella sottomodalità di ispezione.

La compressione in azimuth viene realizzata sfruttando un **processo Doppler** coerente non focalizzato, in modo da ridurre la potenza del rumore e del clutter proveniente dalla direzione di moto (**along track**); la risoluzione in azimuth dopo questa compressione può essere migliorata fino a 5-9 km, a seconda dell'altitudine.

In genere, invece, la compressione in range (tranne che per la sottomodalità SS2) viene applicata a terra, insieme alla riduzione del clutter nella direzione ortogonale a quella di moto (**across track**), grazie anche alla combinazioni dei dati acquisiti da entrambe le antenne.

L'eventuale presenza di più filtri (solo in alcune sottomodalità) consente inoltre di applicare le tecniche di multilook, che consistono nel mediare pixel per pixel le viste che i vari filtri hanno attuato sullo stesso tratto di superficie, in modo da ridurre l'oscillazione statistica dei profili finali. Infine, gli echi acquisiti a diverse frequenze potranno essere confrontati per incrementare la sensibilità nella discriminazione di riflessioni dovute a interfacce sottosuperficiali, che dipendono fortemente dalla frequenza operativa.

Capitolo 3

Algoritmi per il processing dei dati

Con questo capitolo ci proponiamo di descrivere nel dettaglio quelli che sono i metodi di trattamento dei segnali radar provenienti nello specifico da Marsis, e che hanno lo scopo primario di ripulire gli stessi da tutte quelle alterazioni esterne che ne compromettono la lettura.

Abbiamo visto, infatti, come la ionosfera di Marte (così come pure quella terrestre), possa alterare la fase dei segnali elettromagnetici che la attraversano anche in maniera significativa, e questo può alterare in modo accettabile le informazioni che il segnale contiene.

Anche il passaggio attraverso l'atmosfera (intesa nel suo insieme) può provocare alterazioni del segnale, così come l'interferenza che il ricevitore del radar introduce sottoforma di un rumore termico di tipo gaussiano.

Il nostro problema è quindi quello di compensare gli effetti di distorsione dei segnali, utilizzando delle tecniche di elaborazione in post-processing, ovvero acquisendo a terra il segnale che proviene da Marsis ed è affetto da rumore, e trattarlo con dei software che siano in grado di ripulirli accuratamente.

Come detto il consorzio di ricerca Co.r.i.s.t.a. , presso il quale è stato sviluppato il presente lavoro di tesi, è responsabile del segmento di terra del radar Marsis, ovvero si occupa dell'elaborazione a terra dei dati che esso ci invia.

Attualmente presso il consorzio vengono utilizzati una serie di algoritmi che riescono a compensare in maniera piuttosto soddisfacente i nostri segnali, ma la nostra esigenza è quella di trovare dei metodi che risolvano meglio tutta una serie di problemi legati al processing a terra.

I dati trattati presso il consorzio arrivano direttamente da Marsis e di solito sono già stati compressi in azimut; essi verranno di seguito indicati come di primo livello o con la sigla L1.

L'elaborazione di essi tramite algoritmi di vario genere li trasforma in dati che chiameremo di secondo livello o L2; nelle elaborazioni del prossimo capitolo faremo sempre un confronto tra i dati prima del processing (L1) e quelli compensati dopo (L2).

Nello specifico il software fino ad ora utilizzato per compensare la distorsione ionosferica (e sviluppato presso il consorzio da un altro tesista) si basa sul *Metodo del Contrasto* (CM).

Tale metodo è di tipo iterativo ed effettua una stima della distorsione ionosferica basandosi sull'alterazione dei parametri del segnale; estrapola dunque dei coefficienti che permettono di integrare una parabola rappresentante il termine di fase distorta, utilizzando il modello "gamma" (di cui abbiamo parlato nel primo capitolo).

Anche se tale metodo riesce bene a compensare gli effetti distorcenti della ionosfera marziana, presenta una serie di problemi che ci spingono a ricercare soluzioni alternative.

Ad esempio esso utilizza al suo ingresso un gran numero di parametri, legati alle caratteristiche del segnale, al filtro e alle frequenze di funzionamento nonché, come detto al modello ionosferico.

Quest'ultima dipendenza limita inoltre fortemente il campo operativo, prima di tutto perchè ci permette di stimare distorsioni solo legate agli effetti ionosferici,

ed in secondo luogo perchè non tiene in conto di eventuali (anche se improbabili) cambiamenti radicali nella struttura della ionosfera.

È questo ciò che ci ha spinto a sperimentare, nel presente lavoro di tesi, un metodo alternativo che stimi in maniera differente gli errori di fase.

Paragrafo 3.1

IL metodo PGA

Come già anticipato nei capitoli introduttivi mostreremo, in tale sezione dell'elaborato, l'algoritmo PGA, ovvero quello che abbiamo utilizzato per stimare la distorsione di fase dovuta alla ionosfera e compensare i segnali radar provenienti da Marsis.

Si tratta di un algoritmo già noto e utilizzato nell'ambito dell'elaborazione di segnali radar che in questo contesto abbiamo adattato al nostro problema con delle significative modifiche.

Tale algoritmo è noto agli esperti del settore come algoritmo PGA (acronimo di Phase Gradient Autofocus algorithm) e viene normalmente utilizzato per compensare la fase di segnali radar corrotti da molte e disparate tipologie di rumore, dove per rumore intendiamo un disturbo che altera in qualche modo l'integrità del segnale.

Esso è stato principalmente sviluppato per risolvere un problema di ricezione molto sentito per i segnali S.A.R. (radar ad apertura sintetica) ovvero quello della motion compensation. Tale effetto è dovuto a turbolenze non prevedibili che agiscono sulla piattaforma di appoggio per il S.A.R.

In pratica l'effetto di piccole perturbazioni di varia natura (disturbi atmosferici, raffiche di vento, errori di manovra, momenti giroscopici) possono causare delle oscillazioni della piattaforma (aeromobile o satellite) su cui è montato il S.A.R. Ciò provoca uno scostamento della traiettoria nominale di volo (che nominalmente dovrebbe muoversi di moto rettilineo uniforme parallelamente alla terra) e di conseguenza si produce un errore di fase sui dati acquisiti con conseguente defocalizzazione dell'immagine.

Il problema della motion compensation diviene quindi quello di individuare gli errori di moto prodotto dalle inevitabili turbolenze e compensarne gli effetti al fine di ottenere una corretta focalizzazione dell'immagine. Ovviamente questo problema è molto sentito per quei S.A.R. che sono installati a bordo di velivoli e quindi soggetti a perturbazioni dovute ad una serie di fenomeni che sono del tutto assenti per i satelliti, sia per la loro orbita alta e al di fuori degli strati più densi dell'atmosfera, sia per il particolare tipo di moto molto meno affetto da turbolenze rispetto a quello di un velivolo.

In ogni caso l'utilizzo di questo algoritmo si è rivelato efficace per risolvere egregiamente non solo i problemi legati alla motion compensation ma anche la defocalizzazione causata da altri fenomeni, quali uno scorretto funzionamento del filtro in ricezione o la presenza di rumori (sia di fase che di tipo termico) che alteravano l'informazione di tipo immagine contenuta nel segnale in ricezione.

Nel nostro caso tale potente algoritmo deve essere applicato a segnali la cui fase è stata corrotta attraversando la spessa ionosfera del pianeta rosso e recuperare dunque le preziose immagini che tale segnale contiene.

Sono pertanto state effettuate un gran numero di simulazioni nelle quali si è introdotto, su possibili segnali di ritorno, un rumore in fase del tutto simile a quello introdotto dalla ionosfera marziana, in quanto modellato con le stesse tecniche mostrate nel capitolo 1.

L'elaborato (realizzato rigorosamente con il Matlab) è costituito da tre listati diversi, ma ovviamente interconnessi tra di loro atti a testare la validità del procedimento di compensazione.

Il principale è la sub-routine denominata appunto PGA. che ha la funzionalità di acquisire un'immagine già parzialmente trattata ed effettuare la pulitura della fase dal rumore, restituendo il segnale integro.

Un'altra parte del software è preposta alla simulazione vera e propria in quanto genera dei segnali fittizi, vi introduce del rumore, richiama la sub-routine PGA e restituisce il segnale pulito.

La terza parte prevede un test dell'algoritmo su dati reali provenienti da Marte e quindi già parzialmente elaborati, ed applicarvi in post-processing l'algoritmo con le stesse modalità dell'altro programma.

Nel seguito dunque descriveremo nel dettaglio le caratteristiche dell'algoritmo PGA e successivamente procederemo col descrivere il software sviluppato, che utilizza il PGA per compensare la fase dei segnali affetti da distorsioni.

3.1.1 L' algoritmo PGA

In tale paragrafo verrà descritto in maniera dettagliata l' algoritmo PGA, analizzando accuratamente tutti i passi che lo caratterizzano, in maniera tale da poter comprendere quali sono le operazioni che esso svolge per restituire al segnale la sua integrità.

Si riporta qui di seguito uno schema a blocchi che potrà essere seguito facilmente per comprendere i vari step dell' algoritmo (immagine 3.1 e 3.2).

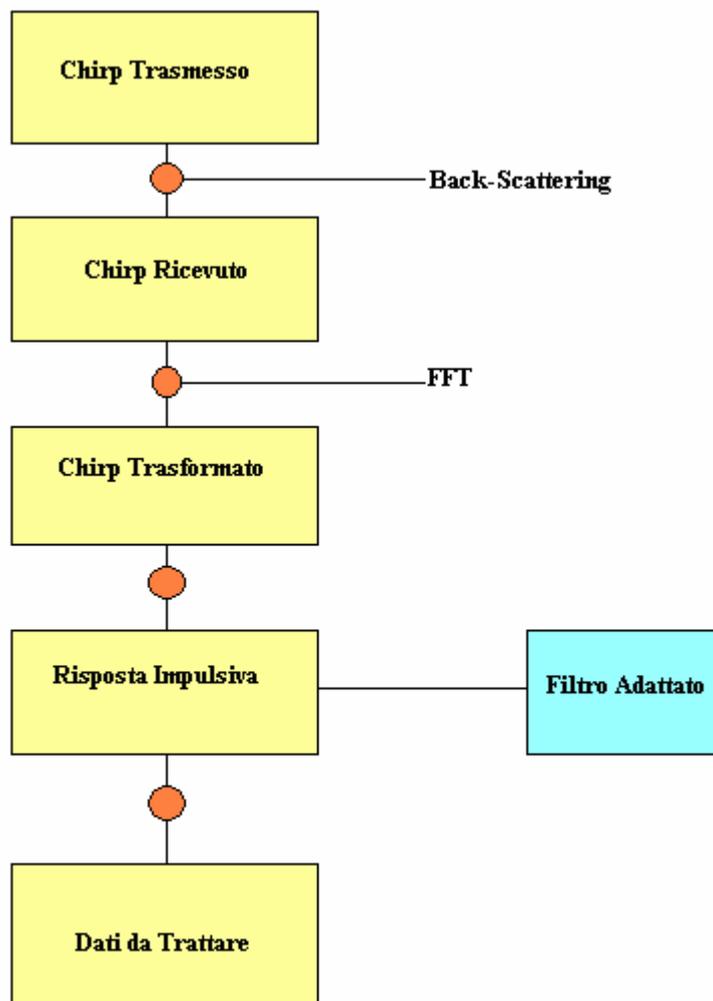


Immagine 3.1: Schema a blocchi di ciò che accade al segnale prima di essere processato mediante PGA

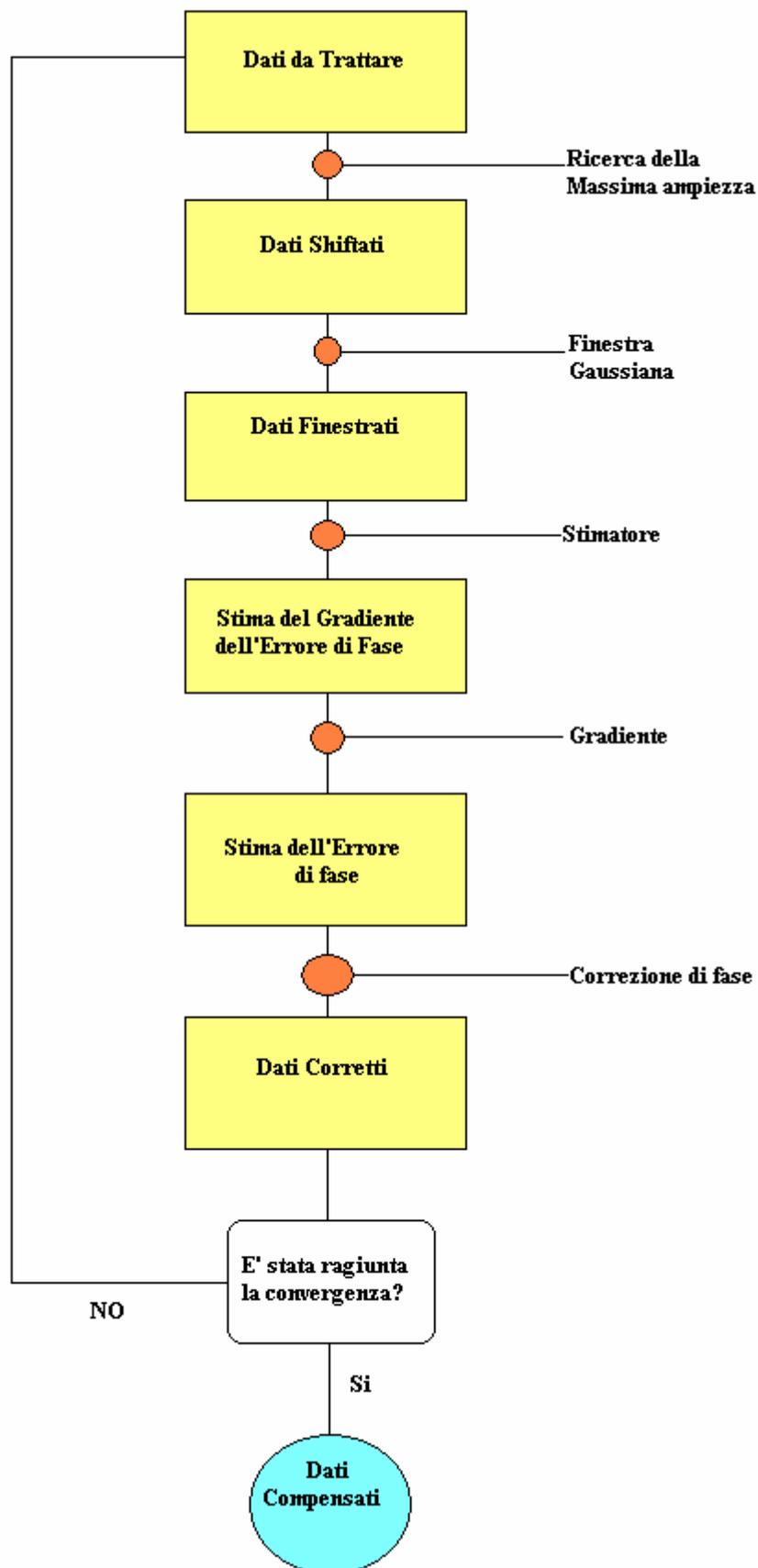


Immagine 3.2: Schema a blocchi dell'algoritmo PGA

3.1.2 Implementazione dell'algoritmo PGA

Si tratta di una tecnica di post-processing (ovvero, come già detto di trattamento dei dati a terra) in cui i dati di partenza, su cui si lavora, sono affetti da una distorsione di fase la quale, una volta stimata dall'algoritmo, verrà poi eliminata.

L'unico requisito da rispettare per l'applicazione dell'algoritmo è che l'immagine da trattare sia ottenuta a partire da dati compressi in range, mediante una trasformazione di Fourier; infatti è possibile applicare in maniera corretta tale metodo solo su dati che sono stati trasformati nel dominio della frequenza e che siano stati compressi mediante filtro adattato ottenendone la risposta impulsiva.

La tecnica nota con il nome di PGA si sviluppa fondamentalmente in quattro passi, ed è possibile recuperare diversi tipi di errore di fase indipendentemente dalla sorgente e dalla forma di questi errori. Il nucleo del PGA è costituito dalla stima molto robusta del gradiente dell'errore di fase partendo esclusivamente dall'immagine SAR complessa, già processata, che presenta una degradazione sui suoi termini di fase.

Indichiamo con $F_k(\nu)$ il segnale contenente la storia di fase della k-esima riga dell'immagine compressa in range e con $\phi_\varepsilon(\nu)$ l'errore di fase, che non è stato ancora recuperato e che si assume comune a tutte le righe dell'immagine che si sta considerando.

In tal caso si ha:

$$F_K(\nu) = |F_K(\nu)| \exp\{j[\phi_K(\nu) + \phi_\varepsilon(\nu)]\} \quad (3.1)$$

essendo $\phi_K(\nu)$ il corretto termine di fase.

L'espressione (3.1) è la rappresentazione matematica di una delle n righe costituenti l'immagine processata, ovvero rappresenta l'eco di risposta al singolo chirp inviato dal radar; in essa è evidente come l'informazione ivi contenuta, oltre a dipendere dal modulo del segnale stesso (ovvero dalle sue caratteristiche di ampiezza), dipende dai termini dell'esponenziale, che rappresentano la sua fase. Osserviamo come tale fase sia caratterizzata dalla sovrapposizione del termine corretto (che a noi interessa) e di un termine incognito, che rappresenta l'errore introdotto dall'esterno (nel nostro caso dalla ionosfera).

Analiticamente tale segnale ricevuto viene dunque compresso in range, mediante una trasformazione di Fourier; al termine di tale operazione ogni linea dell'immagine si può rappresentare nel seguente modo:

$$F\{F_K(\nu)\} = \sum_m h(x) * a_{m,k} s(x - x_{m,k}) \quad (3.2)$$

Laddove l'operatore F rappresenta la trasformazione secondo Fourier, ed il termine seguente:

$$h(x) = F\{\exp[j\phi_\varepsilon(\nu)]\} \quad (3.3)$$

rappresenta trasformata di Fourier della funzione di errore di fase, mentre

$$a_{m,k} s(x - x_{m,k}) \quad (3.4)$$

è il prodotto tra il fattore di ampiezza $a_{m,k}$ del generico punto scatteratore per la risposta impulsiva del sistema, e con il simbolo di * si è indicato il prodotto di convoluzione (ovvero l'operatore prodotto nel dominio della frequenza). Ci si propone adesso di descrivere a grandi linee l'algoritmo PGA mediante tutte le operazioni che esso compie sul segnale da processare.

Si distinguono in pratica quattro fasi:

1. Su ogni riga k-esima (che come visto è già stata compressa) viene individuato il punto più forte $a_{\max,k}$ (ovvero l'elemento con ampiezza maggiore) e viene operato uno shift lineare in modo da portarlo al centro della riga. In questo modo viene rimossa su di esso la componente di fase lineare in frequenza prodotta dallo shift spaziale dovuto alla generica posizione in range in cui si trova il punto scatteratore (dovuto al ritardo nella risposta). Tale operazione ci permette di allineare tutte le righe dell'immagine intorno ad una stessa posizione, in modo da poterle processare coerentemente insieme, inoltre la centratura dell'immagine ci permette di effettuare, come vedremo, lo step successivo;
2. La seconda fase prevede di effettuare una finestrazione (windowing) dei dati di ciascuna riga intorno al punto di massimo, ossia al centro della riga. Questa operazione è necessaria per scartare i dati che non possono contribuire alla stima del gradiente dell'errore di fase lasciando solo i dati che garantiscono il rapporto segnale rumore più alto e sui quali poi viene operata la stima. In pratica l'idea è quella di sovrapporre al segnale un operatore (la finestra) che metta in risalto la

parte di segnale con ampiezza maggiore (che si suppone contenente l'informazione di interesse), e attenui le zone di scarso interesse. Il problema è quello di scegliere la forma e la larghezza della finestra; ad esempio si vedrà, nello sviluppo del software, che la scelta migliore è ricaduta su una finestra di tipo gaussiano (a campana) che, centrata attorno ai pixel ad ampiezza maggiore, preserva solo l'informazione in essi contenuta, attenuando il contributo dei lobi laterali del segnale, immaginando che vi sia più rumore che altro. Poiché il metodo è iterativo, ossia i passi che si sta descrivendo devono essere ripetuti più volte, alla fine di ciascuna iterazione l'immagine subisce una correzione di fase divenendo sempre più focalizzata; occorre, dunque, stringere opportunamente la finestra al crescere del numero di iterazioni;

3. il terzo passo è quello più delicato in quanto in esso avviene la stima del gradiente dell'errore di fase. Se si indica con $G_K(\nu)$ la trasformata inversa del segnale (prima visto) secondo Fourier della k-esima riga shiftata e pesata, la sua espressione analitica sarà:

$$G_K(\nu) = |G_K(\nu)| \exp\{j[\theta_K(\nu) + \phi_K(\nu)]\} \quad (3.5)$$

si dimostra che lo stimatore del gradiente dell'errore di fase espresso da :

$$\hat{\phi}_\varepsilon(\nu) = \frac{\sum_K \operatorname{Im} \left\{ G_K^*(\nu) \dot{G}_K(\nu) \right\}}{\sum_K |G_K(\nu)|^2} \quad (3.6)$$

è lineare, non polarizzato e a varianza unitaria. Per la stima del gradiente occorre allora valutare la derivata di ciascuna riga ed applicare la precedente relazione.

4. L'ultimo passo è quello di integrare la $\hat{\phi}_\varepsilon(\nu)$, eliminarne la componente lineare che equivale ad uno shift dei dati, ed utilizzare il risultato così ottenuto per correggere la fase di ciascuna riga $G_K(\nu)$ dell'immagine shiftata e pesata.
5. Il procedimento appena descritto viene iterato ripartendo dal primo passo finché l'errore di fase estratto non risulta sufficientemente piccolo e ciò garantisce la convergenza del metodo.

3.1.3 Considerazioni

Possiamo ora osservare che il metodo PGA introduce tre fondamentali vantaggi rispetto al metodo del contrasto:

- Utilizza un numero di parametri in ingresso molto ristretto;
- Utilizza equazioni molto semplici, e questo velocizza la loro risoluzione;
- Non si basa su un modello, e quindi ci permette di stimare qualsiasi tipo di distorsione di fase, anche che non sia dovuta alla ionosfera;

Paragrafo 3.2

Elaborato in Matlab

Come già anticipato, il presente lavoro di tesi si incentra fundamentalmente sulla realizzazione di un software in Matlab che sia in grado, utilizzando l'algoritmo PGA, di stimare l'errore di fase introdotto dalla ionosfera marziana ed utilizzare tale stima per rifocalizzare i dati e recuperare le informazioni in essi contenute. La descrizione che segue fa riferimento ai listati in Matlab riportati in appendice, e può pertanto essere utili seguirne i vari step per comprenderne il significato.

L'intero elaborato è costituito da tre parti:

- la parte principale è una sub-routine che abbiamo chiamato, per l'appunto, **PGA**; essa riceve in ingresso dei dati (che possono essere sia reali che simulati), e li processa mediante l'algoritmo descritto, stimando la distorsione di fase e ripulendo il segnale; restituirà in uscita il segnale compensato;
- il secondo listato riportato, che abbiamo chiamato **dati_simulati**, ci permette di effettuare la simulazione di un segnale defocalizzato (che possiamo modellare a nostro piacimento), e di trattarlo con la sub-routine PGA in modo da verificarne l'efficacia nelle varie congiunture, e scegliere i parametri migliori da utilizzare anche per Marsis;
- il terzo listato, denominato **dati_reali**, permette di effettuare il trattamento in post-processing, con la sub-routine PGA, dei dati provenienti da Marte, con le stesse modalità del listato precedente;

3.2.1 La sub-routine PGA

La function elaborata (come risulta evidente dalla prima riga di comandi) utilizza come dati d'ingresso il segnale già affetto da rumore di fase ed eventualmente da rumore termico (**dati_defoc**), la risposta impulsiva del segnale defocalizzato, ovvero (**risp_imp_defoc**), il filtro da noi utilizzato per comprimere il segnale, la frequenza di campionamento (**fc**), la larghezza di banda (**i_B**), il numero di chirp consecutivi da elaborare per la stima della fase e il numero di campioni da usare per effettuare la FFT (fast fourier transform).

A questo punto a 100 la variabile **var_err**, che rappresenta la varianza dell'errore di fase; perchè si vada a convergenza, ad ogni iterazione il valore dell'errore stimato deve essere sempre più simile a quello stimato nell'iterazione precedente e pertanto tale variabile dovrà decrescere con il numero di iterazioni. Si inizializza a zero il vettore **fas_err**, nel quale andrà accumulato l'errore di fase stimato ad ogni iterazione.

La variabile **it** rappresenta un contatore (che inizia ovviamente da 1) del numero dell'iterazione corrente.

A questo punto si da inizio ad un ciclo di tipo **while** che continuerà fin quando non si raggiunge il valore minimo tra le due condizioni:

- il termine **var_err** risulti minore di un valore prefissato (nel caso specifico $1 \cdot 10^{-2}$);
- si raggiunga un numero prefissato di iterazioni (nello specifico 15);

Si inizializzano a zero i vettori **sti**, **Gnum** e **Gden**, che rappresentano rispettivamente il valore numerico dell'espressione (8), il numeratore di tale espressione e il suo denominatore. In tutti e tre si andranno ad accumulare le stime effettuate ad ogni iterazione.

All'interno del ciclo while si imposta un secondo ciclo, di tipo **for**, che ci permette di effettuare le stesse operazioni su tutti i chirp che si sceglie di processare (infatti il ciclo va da 1 ad **n_chirp**).

Come esposto nei paragrafi precedenti, per ogni chirp, individuiamo il massimo valore che caratterizza il modulo della sua risposta impulsiva, e l'indice matriciale relativo a tale valore che lo individua nel vettore riga. Si effettua dunque una traslazione del segnale, in maniera da portare il massimo valore al centro della stessa. Dunque si individua un vettore G dato dalla trasformata secondo Fourier del segnale precedentemente trattato, opportunamente finestrato.

La finestratura viene operata semplicemente moltiplicando il segnale, già traslato, per la funzione che chiamiamo **window**; in realtà le informazioni ad essa relative sono contenute in un'altra sub-routine (che porta appunto tale nome), che descriveremo brevemente; in essa si definisce un vettore delle stesse dimensioni del segnale da finestrare, che assuma il valore di una particolare finestra (scelta tra le tante disponibili nei database di Matlab) di ampiezza selezionabile, e assuma valore nullo nelle zone esterne, cioè quelle la cui informazione non vogliamo considerare.

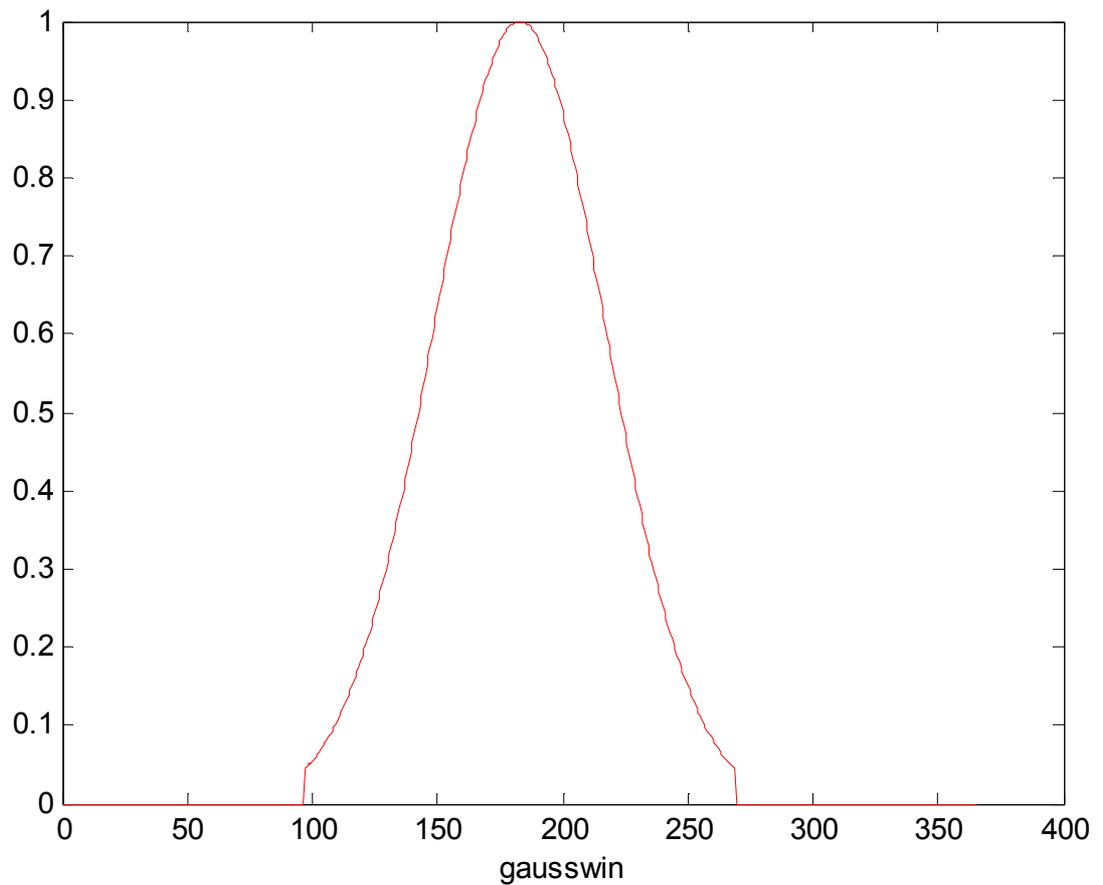


Immagine 3.3 : andamento di una finestra di tipo gaussiano

Numerose ed attente osservazioni e simulazioni ci hanno portato a scegliere una finestra di tipo gaussiano, perchè ci permette di ottimizzare le prestazioni del processo di stima e riduce al minimo il numero delle iterazioni.

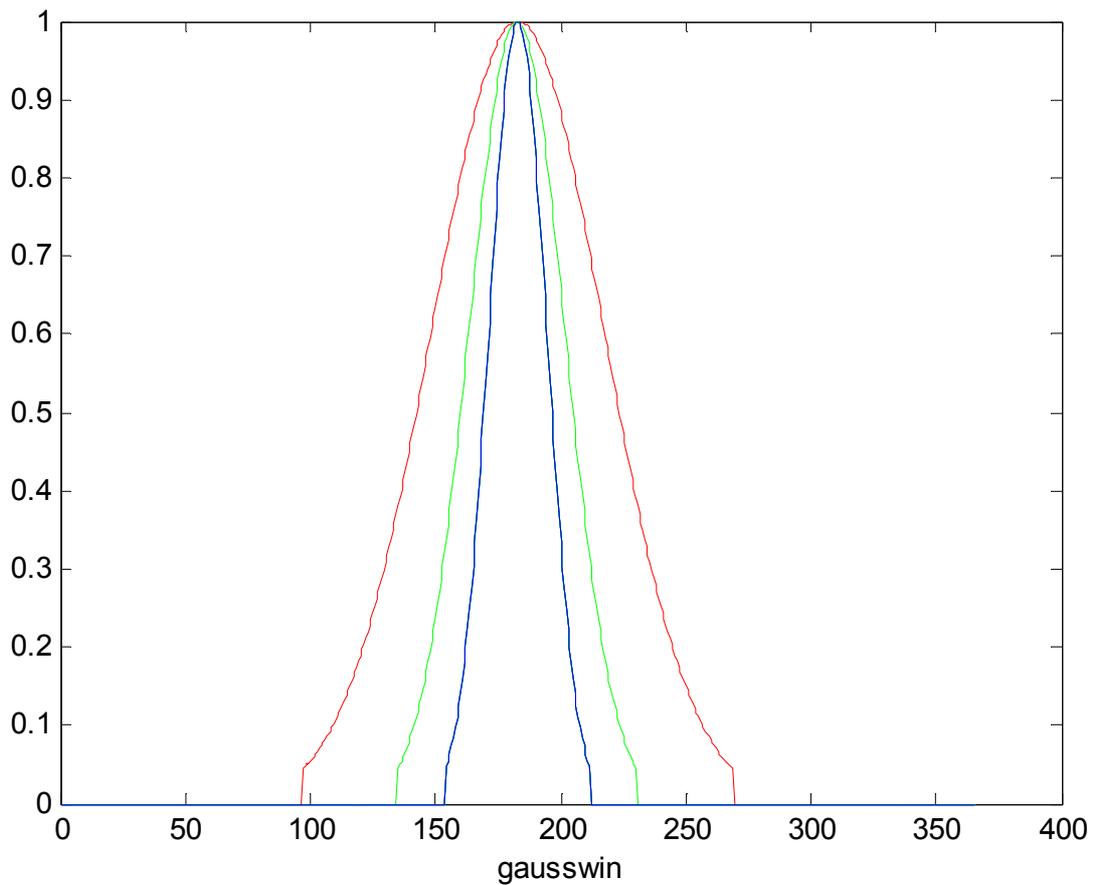


Immagine 3.4: variazione di una finestra gaussiana col numero di iterazione

Nell'immagine qui di sopra (immagine 3.13) osserviamo la forma grafica di tale finestra, con la sua caratteristica curva a campane; nella figura successiva, invece, osserviamo la nostra finestra come si modifica al crescere del numero di iterazioni (la curva in rosso si ha alla prima iterazione, quella in verde alla seconda e quella in blu alla terza), ovvero come essa si restringa sempre di più attorno al segnale che sarà via via sempre più focalizzato.

Ritornando alla descrizione dei vari step della sub-routine, a questo punto effettuiamo la derivata del segnale già traslato e finestrato, mediante l'operatore **gradient**, campionandola sulla base della frequenza di campionamento e del numero di NFFT.

A questo punto (sempre per ogni chirp), si effettua il prodotto di convoluzione di tale derivata per il vettore G, e se ne ricava la parte immaginaria (così come osservato nel numeratore dell'equazione 8); tale valore lo si accumula nel vettore Gnum, precedentemente definito.

Dunque si ricava (sempre per ogni chirp), il modulo quadro del vettore G e lo si accumula nel vettore Gden (che sarà il denominatore della 8), il quale rappresenta la somma, su tutti gli n chirp, dei moduli quadri dei relativi vettori G.

Concluso ora il ciclo for su tutti gli n chirp, si ricava, come indicato, il vettore **sti** come rapporto tra i due vettori (numeratore e denominatore); esso rappresenta, come visto, la stima del gradiente dell'errore di fase, mediata su tutti gli n chirp. Integriamo quindi tale vettore mediante l'operatore **cumtrapz**, curandoci di eliminare dall'integrale il termine di fase lineare (mediante la sequenza **polyfit**, **polyval**), avevamo introdotto shiftando il segnale precedentemente; inoltre poniamo pari a zero tutto ciò che è fuori banda, per evitare di incappare in una stima erronea dell'errore di fase.

Ora procediamo, accumulando il vettore **INT**, così ottenuto nel vettore **fas_err**, che rappresenterà la stima globale dell'errore di fase. Tale vettore viene quindi sottratto dalla fase del segnale, mediante un altro ciclo for, nel quale tale operazione la si effettua moltiplicando ogni chirp per l'esponenziale dell'errore stimato, e ottenendone la risposta impulsiva.

Si ricava inoltre, ad ogni iterazione la variabile `var_err` come radice quadrata della varianza del valore assoluto dell'errore stimato.

Tutte queste operazioni vanno dunque reiterate, ovvero la risposta impulsiva così ottenuta la si rimanda all'inizio del ciclo `while`, per stimarne di nuovo l'errore di fase; ci aspettiamo che tale stima sia sempre minore con il crescere del numero di iterazioni.

Le iterazioni si fermano allorquando saranno verificate le condizioni di cui sopra.

3.2.2 La sub-routine dati_simulati

La sub-routine di simulazione, invece, ha lo scopo ben preciso di simulare la generazione di un segnale chirp, sovrapporre alla sua fase un rumore di tipo parabolico (modellato come visto) in modo da simulare l'eco che ha attraversato la ionosfera, eventualmente sovrapporvi altri tipi di rumore (come quello gaussiano) e richiamare la sub-routine PGA.

Nel listato in Matlab iniziamo col definire le specifiche del segnale da generare conformemente con quelle adottate sul radar di Marsis e Sharad e generiamo un chirp con relativo filtro.

A questo punto definiamo una serie di parametri atti a quantizzare l'ampiezza del segnale principale e del numero di sue repliche che intendiamo realizzare, così come il valore dello shift lineare e il numero di repliche da effettuare.

A questo punto effettuiamo un ciclo `for` per realizzare, con questi parametri, un unico segnale contenente più repliche di ampiezza differente del medesimo chirp, curandoci inoltre di aggiungervi un rumore bianco.

Tale segnale simula perfettamente una eco proveniente da una superficie rugosa (ovvero con più punti scatteratori di differenti energie) sporcata da un rumore

termico (del tipo di quello introdotto da apparecchiature elettroniche quali il ricevitore). Ci curiamo dunque di derivare la risposta impulsiva di questo segnale simulato.

A questo punto utilizzando uno dei modelli disponibili della ionosfera marziana (nello specifico il modello gamma, già largamente trattato nel primo capitolo) introduciamo un disturbo di tipo parabolico nella fase del singolo chirp e per il segnale completo, ottenuto dalle sue repliche, ricavando anche in questo caso la risposta impulsiva. Abbiamo quindi un segnale che simula perfettamente una eco proveniente da una superficie rugosa ed distorto dal passaggio attraverso la ionosfera.

Dunque richiamiamo la sub-routine PGA, nella quale inviamo i nostri dati; essa estrapolerà, come sappiamo l'errore di fase mediante la sua stima e ci darà un segnale di nuovo pulito.

Dunque confrontando il segnale originario (ovvero non affetto da rumore) con quello ripulito (ovviamente mediante opportuni plottaggi) osserviamo che corrispondono quasi perfettamente.

Sub-routine Dati_simulati

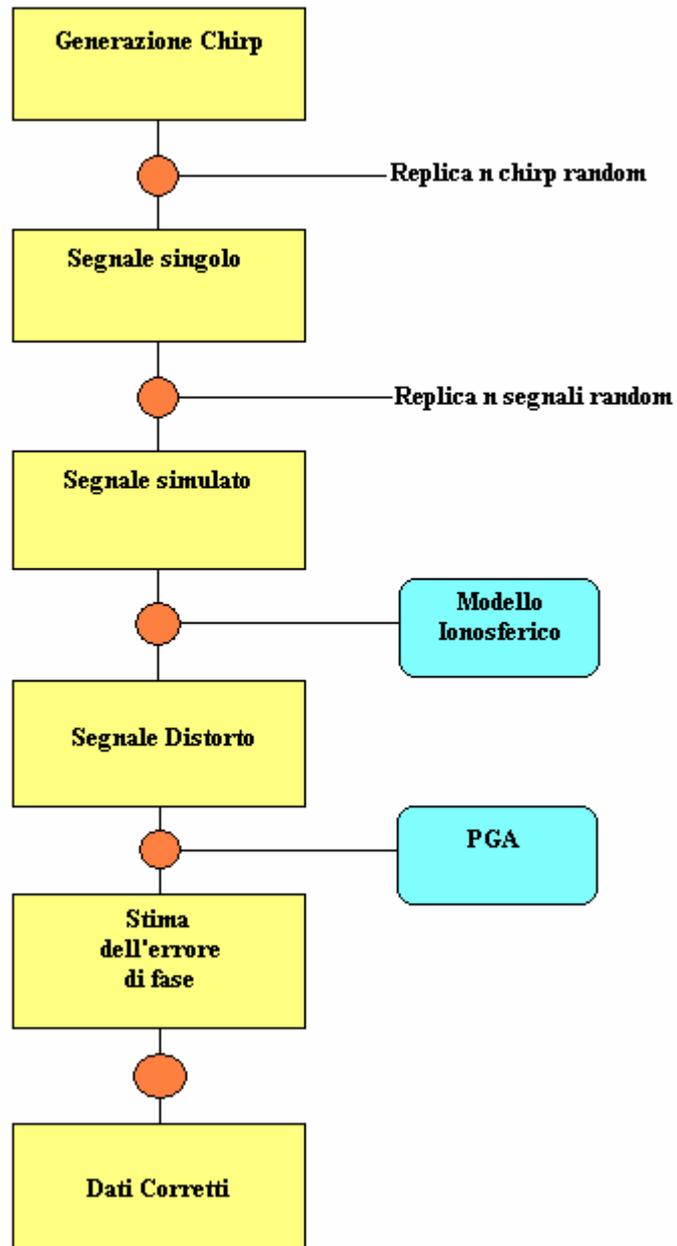


Immagine 3.5: Schema a blocchi della sub_routine dati_simulati

3.2.3 La sub-routine dati_reali

Questa sub-routine è di fondamentale importanza perchè mediante il suo utilizzo è possibile testare l'algoritmo PGA direttamente sui dati reali provenienti da Marsis, e allo stesso tempo ciò ci permette di recuperare da essi le informazioni contenute sottoforma di immagini.

Nel listato Matlab definiamo inizialmente le specifiche ei segnali di Marsis:

- la banda B, che vale $1 \cdot 10^6$ Herz
- la durata di un singolo impulso T, che vale $250 \cdot 10^{-6}$ secondi
- il chirp rate alfa, (per approfondimenti si veda l'appendice)
- la frequenza di campionamento f_c , espressa in Herz

con tali valori definiamo il filtro adattato con cui va compresso ogni chirp e la banda passante i_B , che ci servirà per processare l'immagine.

A questo punto richiamiamo nel programma tra matrici contenenti i dati numerici relativi rispettivamente ai dati provenienti da Marsis di tipo L1 (quindi parzialmente processati; vedi l'inizio del capitolo), a quelli di tipo L2 ma già compensati mediante il CM (contrast method), e agli errori parabolici già stimati dal CM.

Segue un segmento con il quale si da la possibilità all'utente di selezionare:

- il frame, relativo ad una specifica orbita, che si desidera rifocalizzare;
- il numero di chirp che si desidera processare per stimare la distorsione;
- un fattore che ci permette di scegliere l'ampiezza iniziale della finestra;

Dunque si procede selezionando un eguale numero di chirp prima e dopo (in sequenza orbitale) del frame selezionato; si opera dunque un ciclo di tipo for sugli n frame così definiti, ricavando per ciascuno la risposta impulsiva; si invia poi la matrice così ottenuta nella sub-routine PGA che, come ormai ampiamente conosciamo, stima l'errore di fase e corregge l'immagine.

La sub-routine PGA, dopo tutte le simulazioni che saranno esposte nel prossimo capitolo, è stata integrata nel software Calibration Tool in modo da consentire un suo pratico utilizzo. L'utilizzo della nostra sub-routine è possibile andando a settare nella casella, relativa ai dati L2, con dicitura `iono_comp` il metodo da utilizzare.

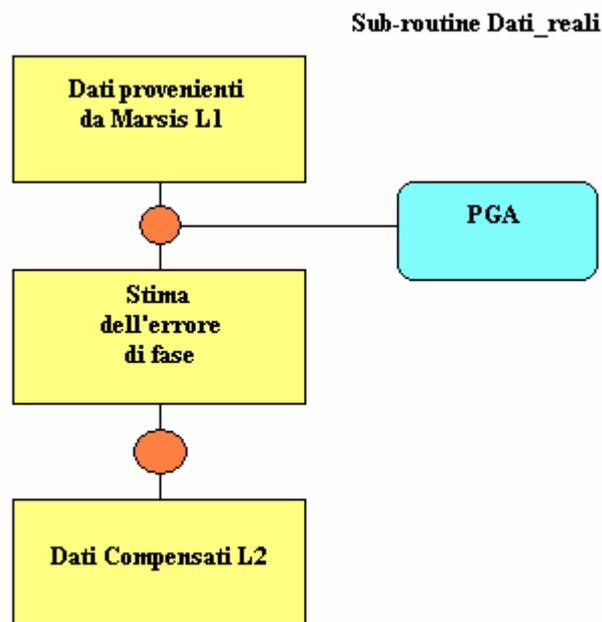


Immagine 3.6: Schema a blocchi della sub-routine `dati_reali`

Per concludere possiamo osservare che il metodo PGA ha, rispetto al CM, il vantaggio di non necessitare di molti parametri per effettuare la sua stima e, poichè non si basa su un modello, è in grado di stimare distorsioni di fase di qualsiasi tipo, anche non previsto, e può dunque funzionare bene in tutte le circostanze.

Capitolo 4

Simulazioni

In questo capitolo finale si dimostra l'efficacia della sub-routine PGA, che abbiamo ottenuto come visto sfruttando il relativo algoritmo, effettuando una serie di simulazioni atte a verificare come essa, in condizioni operative differenti, riesca a svolgere la sua funzione di stima della distorsione di fase.

Il presente capitolo si articola in due sottoparagrafi che si distinguono tra di loro in quanto nel primo si testa il PGA richiamandolo dalla sub-routine `dati_simulati` e nel secondo dalla sub-routine `dati_reali`.

Nel primo caso dunque noi testeremo l'algoritmo su dei segnali fittizi, ma che riproducono le reali condizioni operative che il PGA dovrà affrontare, in modo da verificarne le prerogative e fissarne i parametri fondamentali; nel secondo caso, invece, testeremo il nostro software su dei segnali provenienti direttamente da Marsis, verificando la sua efficacia su veri frame di varie orbite e riportando i casi di maggiore interesse. Effettueremo inoltre un confronto con i risultati ottenuti, sugli stessi frame, con il metodo del contrasto, evidenziando i vantaggi raggiunti nei risultati; in particolare fisseremo la nostra attenzione sulle parabole (relative all'errore ionosferico) stimate con i due metodi e sui coefficienti che le caratterizzano, evidenziando la corrispondenza tra i due metodi.

Paragrafo 4.1

Utilizzo della sub-routine **dati_simulati**

Nel presente paragrafo mostreremo come abbiamo proceduto nelle verifiche relative alla funzionalità dell'algoritmo PGA, utilizzando la sub-routine **dati_simulati**, già mostrata nel precedente capitolo e riportata in appendice, che simula, appunto delle eco di segnali chirp corrotte da distorsioni di fase e rumori di tipo termico.

I dati che osserveremo sono stati ottenuti facendo girare la suddetta sub-routine (unitamente alle function PGA e window) in ambiente Matlab, simulando veri tipi di condizioni ed osservando i risultati grafici che se ne ottengono.

Ogni simulazione, che corrisponde all'utilizzo di differenti segnali, sarà presentata mediante una figura; ciascuna figura presenta quattro riquadri con diverse indicazioni:

- Nel primo riquadro (in alto a sinistra) è diagrammata una eco ideale, ovvero un segnale di ritorno non corrotto da alcun tipo di interferenza, né errori di fase né rumore termico.

- Nel secondo riquadro (in alto a destra) è diagrammato lo stesso segnale, sporcato da una distorsione di fase parabolica (di tipo ionosferico) ed eventualmente da un rumore termico di tipo gaussiano.
- Nel terzo riquadro (in basso a sinistra) è diagrammato il segnale processato mediante algoritmo PGA, ovvero ripulito dall'errore stimato.
- Nel quarto riquadro (in basso a destra) è diagrammata la stima dell'errore di fase fatta dall'algoritmo ed utilizzata per correggere il segnale. Si può osservare come il suo andamento sia evidentemente parabolico, ad evidenziare il fatto che la stima risponde al modello di ionosfera marziana utilizzato nella simulazione.

Osserviamo che l'errore ionosferico introdotto nella sub-routine dati_simulati si basa sul modello gamma già trattato del primo capitolo, ma qui non consideriamo per semplicità i termini di ordine zero ed uno (senza per altro inficiare la sua caratteristica parabolica; esso vale pertanto:

$$\Delta\phi_{EQ_RID}(f) \cong a_2(f - f_0)^2 + a_3(f - f_0)^3 + a_4(f - f_0)^4 \quad (4.1)$$

dove i coefficienti di ordine da due a quattro valgono:

$$a_2 = -2\pi\tau_0 \left(\frac{f_{p,eq}^2}{2(f_0^2 - f_{p,eq}^2)^{\frac{3}{2}}} \right) [rad / Hz^2]$$

$$a_3 = 2\pi\tau_0 \left(\frac{f_0 f_{p,eq}^2}{2(f_0^2 - f_{p,eq}^2)^{\frac{5}{2}}} \right) [rad / Hz^3]$$

$$a_4 = -2\pi\tau_0 \left(\frac{4f_0^2 f_{p,eq}^2 + f_{p,eq}^4}{8(f_0^2 - f_{p,eq}^2)^{\frac{7}{2}}} \right) \left[rad / Hz^4 \right]$$

ed $f_{p,eq}$ rappresenta la massima frequenza del plasma nella ionosfera (fissato pari a 0.65 MHz), f_0 è la frequenza portante del chirp (pari a 1.8 MHz) e τ_0 spessore è il tempo di attraversamento della ionosfera (che per un suo spessore medio di 80 Km vale 533 μ s).

E' importante osservare l'andamento parabolico della distorsione introdotta nelle simulazioni (immagine 4.1), per renderci conto come la stima che effettuerà il PGA risponde al reale errore presente.

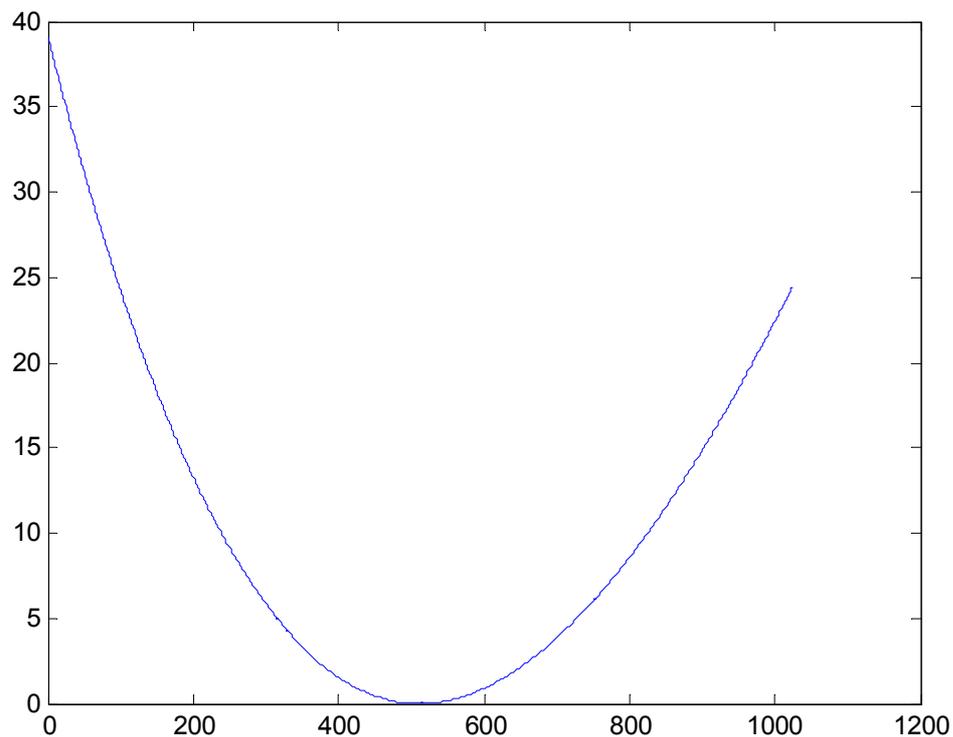


Immagine 4.1: Andamento parabolico dell'errore di fase simulato

Simulazione I

Procediamo adesso con le simulazioni, esaminando in prima analisi un segnale caratterizzato da un unico punto scatteratore ed affetto dal solo errore di fase ionosferico; i risultati sono osservabili nella seguente immagine 4.2:

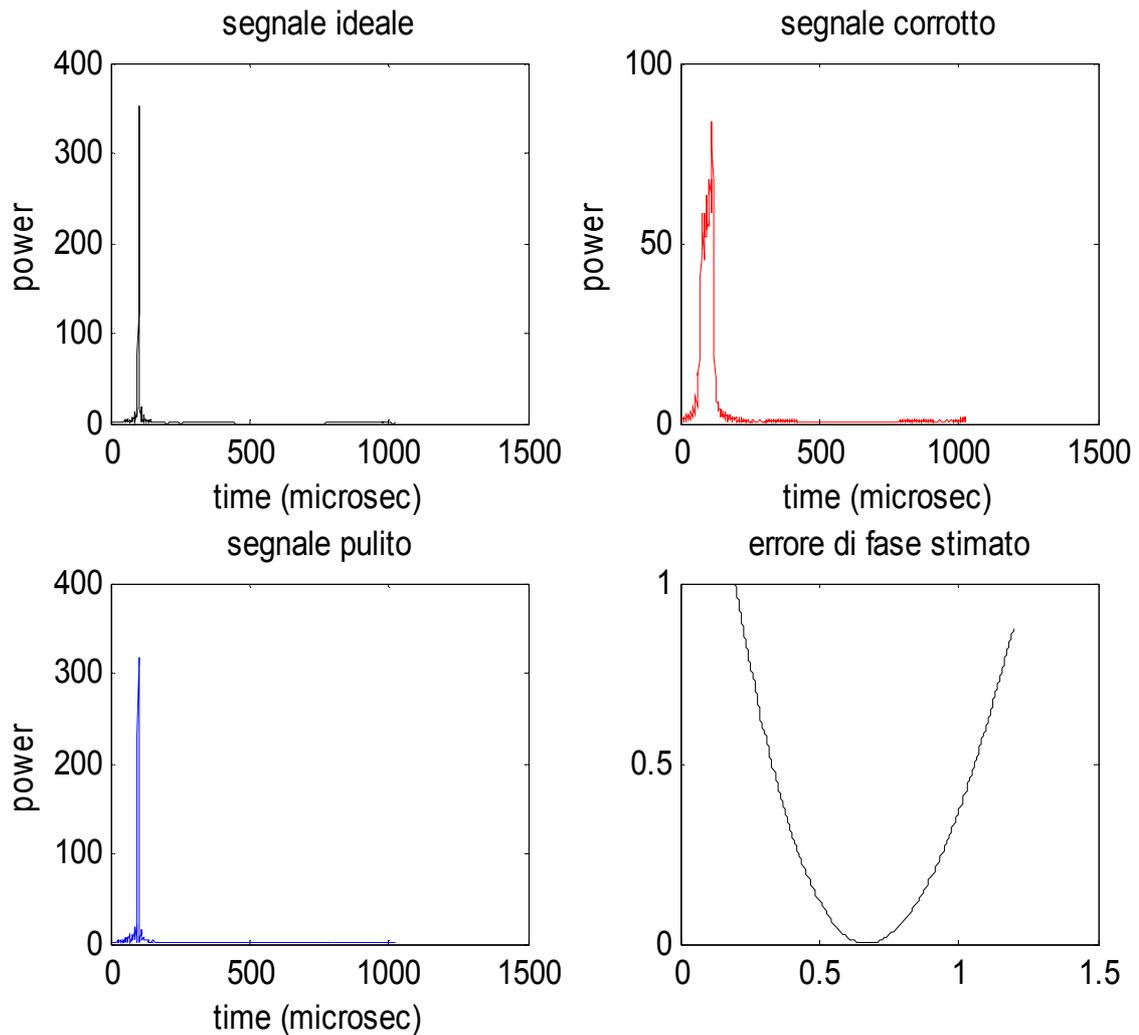


Immagine 4.2

È possibile osservare come il segnale pulito corrisponda perfettamente a quello ideale, sia nell'ampiezza che nella posizione del suo picco; ciò evidenzia che la funzione primaria dal PGA, come stimatore della distorsione ionosferica, viene rispettata; è inoltre evidente come la stima dell'errore di fase abbia un andamento perfettamente parabolico, rispondente al tipo di rumore introdotto.

È opportuno effettuare anche un confronto grafico tra la fase che noi abbiamo introdotto sul segnale e quella che il PGA ha stimato.

Dalla figura seguente si nota una perfetta coincidenza tra le due parabole supportata anche dal confronto tra il valore (ottenuto mediante fitting delle due curve) dei coefficienti del secondo ordine delle due fasi:

- a_2 stimato=64,002;
- a_2 introdotto=63,947;

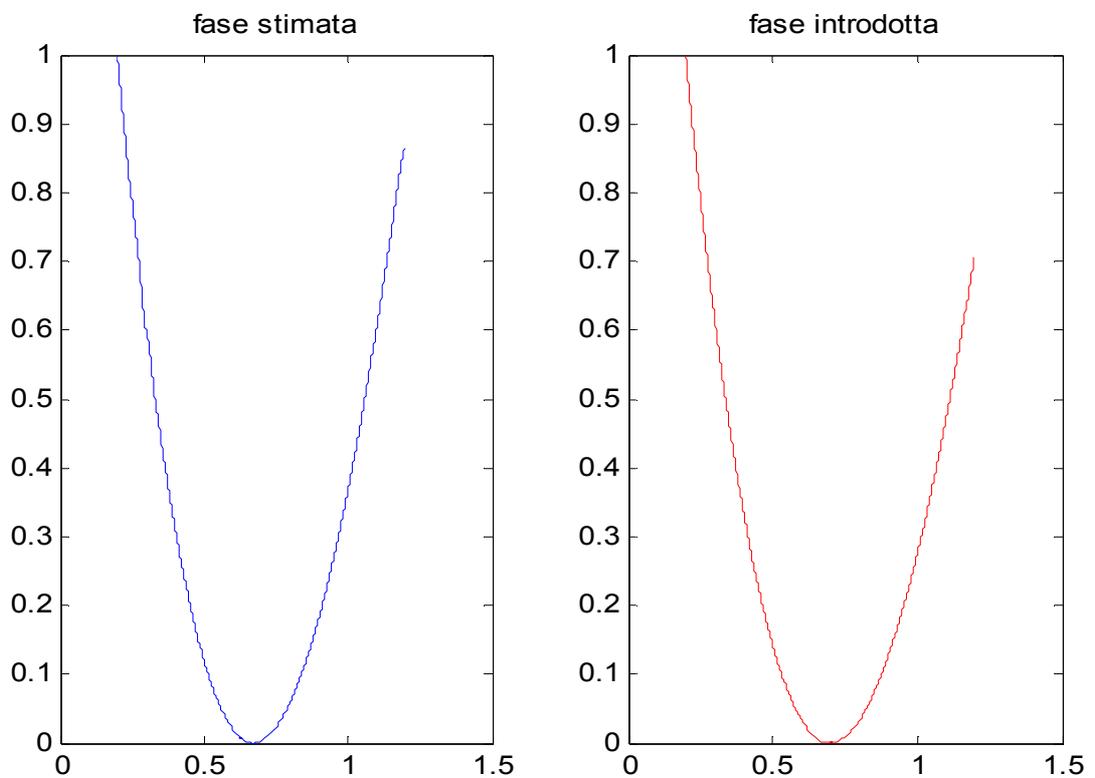


Immagine 4.3: Confronto tra la fase stimata e quella introdotta

È importantissimo notare come la stima non si basi affatto su un modello parabolico (o su qualsiasi altro modello), e pertanto la sua rispondenza con l'errore introdotto avvalora ancor di più la sua funzionalità.

Simulazione II

Nella seconda simulazione aggiungiamo al segnale un rumore termico gaussiano con ampiezza dimezzata rispetto a quella del segnale; ed osserviamo l'immagine 4.4 che segue:

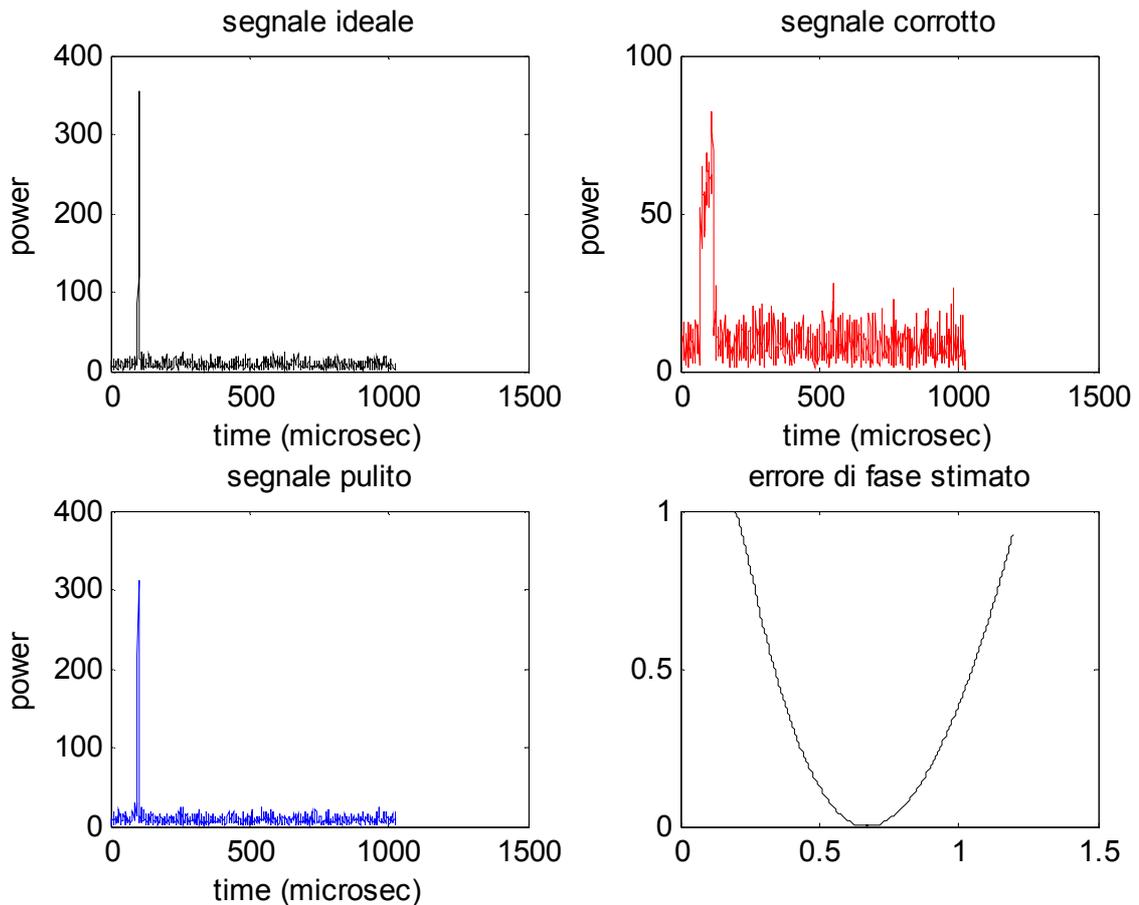


Immagine 4.4

In questo caso, possiamo osservare come il segnale corrotto presenti un andamento molto più irregolare; nonostante ciò lo stimatore estrapola la fase parabolica e corregge il segnale in maniera analoga al caso precedente.

Simulazione III

Nella terza simulazione utilizziamo un segnale che presenta più chirp replicati, uno principale e gli altri di ampiezza minore (nel nostro caso il 50% di quello principale); esso riproduce una risposta che presenta più punti scatteratori (in questo caso cinque); in tal caso non aggiungeremo rumore termico:

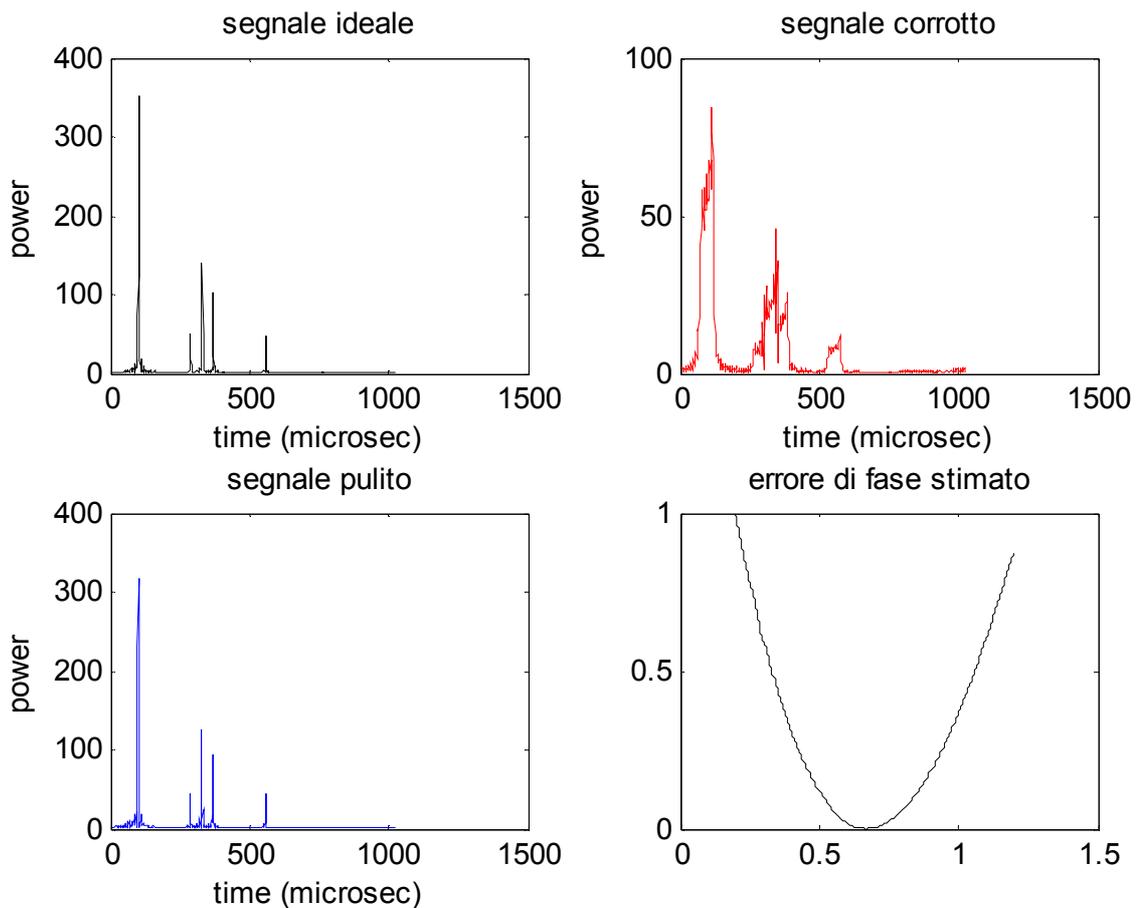


Immagine 4.5

Si nota come la presenza di più punti non causi alcun problema allo stimatore, che sembra funzionare perfettamente, come evidenzia il confronto tra il segnale ideale e quello pulito e l'andamento dell'errore di fase.

Simulazione IV

Nella quarta simulazione aumentiamo il numero di punti scatteratori fino a venti e sovrapponiamo al segnale un rumore termico gaussiano di ampiezza pari a quella del punto principale, ed osserviamo la relativa figure 4.6:

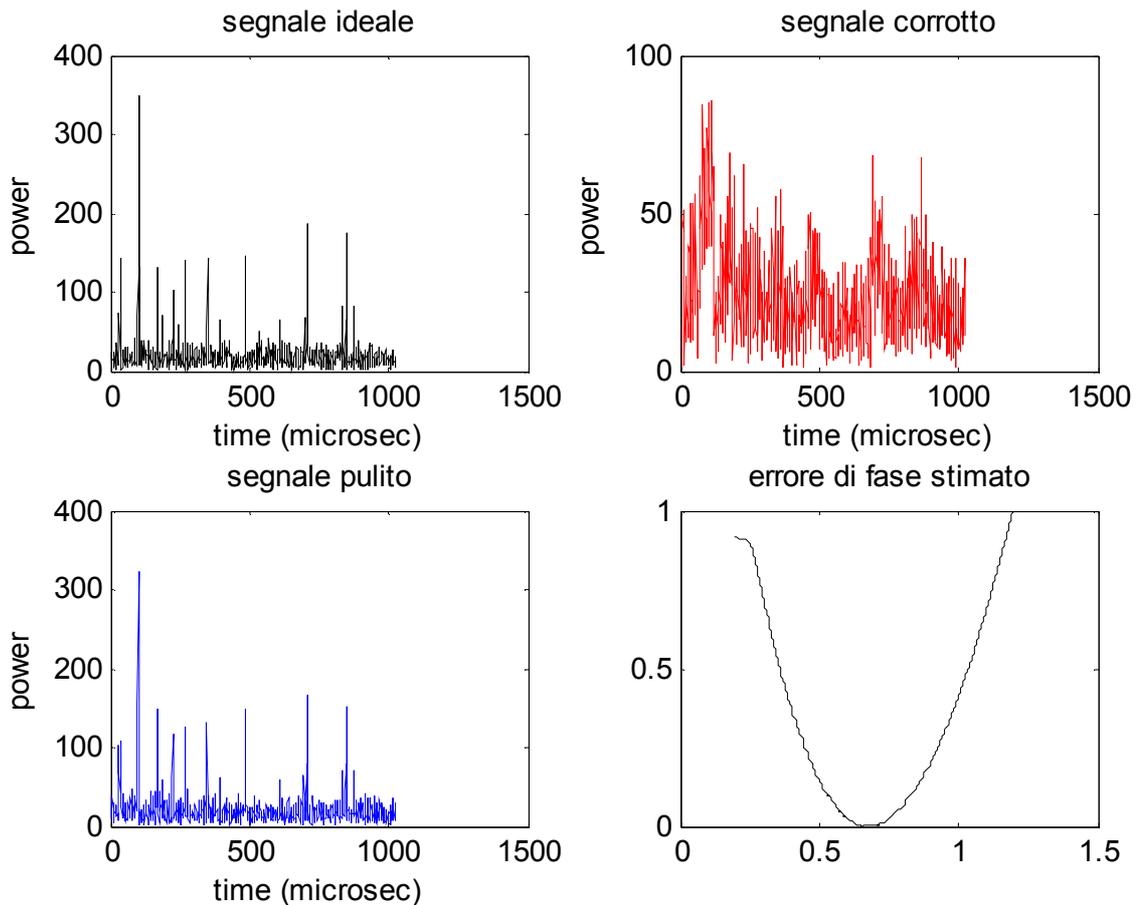


Immagine 4.6

Possiamo osservare come in tal caso il segnale corrotto abbia un aspetto del tutto distorto, se confrontato con quello del segnale ideale; eppure l'algoritmo riesce a stimare correttamente l'errore di fase e a ripulire egregiamente il segnale.

Simulazione V

Concludiamo con un caso limite che presenta la replica di ben duecento punti scatteratori con un rumore termico di ampiezza pari al 50% dell'ampiezza del segnale; possiamo di ciò osservare la seguente figura 4.7:

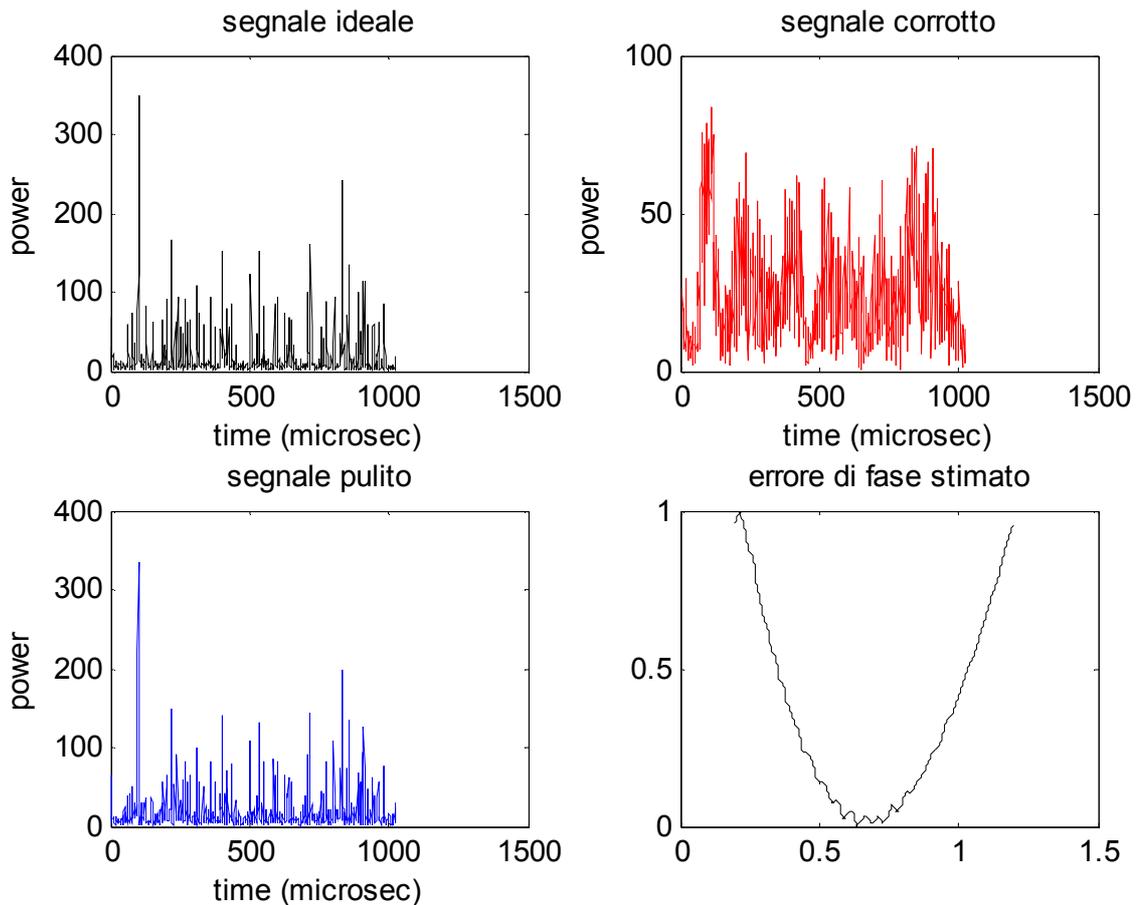


Immagine 4.7

Anche in questo caso si può osservare una risposta corretta dello stimatore anche se esso comincia a mostrare segni di instabilità, riscontrabili nell'irregolarità dell'errore stimato.

Osserviamo inoltre nella seguente figura il confronto tra la fase introdotta e quella stimata; sebbene l'andamento generico sia molto simile (e questo

significa che l'algoritmo funziona ancora bene), si notano dei segni di instabilità nella stima.

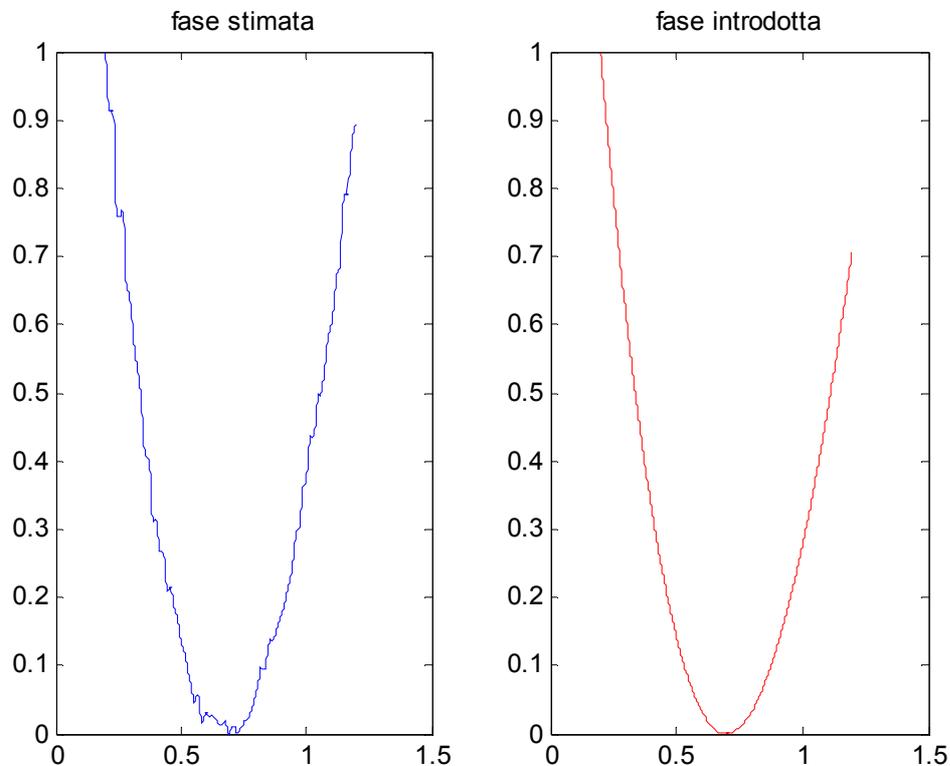


Immagine 4.8

Ciò ci porta a concludere che l'algoritmo ha sicuramente dei limiti; esso infatti fallisce il suo obiettivo se i punti hanno una distanza reciproca inferiore alla risoluzione, se il rumore termico è troppo alto e se il numero dei punti supera una certa soglia.

Va precisato che tutte queste simulazioni ci hanno portato a selezionare dei parametri fondamentali per la sub-routine PGA; ad esempio, come già accennato nel capitolo precedente, abbiamo scelto di utilizzare una finestra di tipo gaussiano poichè a differenza delle altre ci offre una stima maggiormente corretta ed un numero di iterazioni più basso; inoltre l'ampiezza della stessa

finestra ad ogni iterazione è stata altresì scelta in base ai risultati ottimali che offriva.

Un altro parametro da tenere in considerazione è il numero di chirp consecutivi da processare; in tutte le precedenti simulazioni si sono utilizzati venti chirp diversi, ma vedremo che su i dati reali la scelta deve tener conto di determinati fattori.

Ci teniamo ancora una volta a far notare come questo algoritmo non si basi su alcun modello ed utilizzi un numero di parametri in ingresso molto limitato; tutto ciò ci dà una misura di quanto esso sia potente e robusto nello svolgimento delle sue funzioni e ci fa immaginare come può meglio funzionare per stimare altri tipi di distorsione (diversi da quello ionosferico).

Paragrafo 4.2

Utilizzo della sub-routine `dati_reali`

La fase più importante della nostra simulazione consiste nell'applicazione dell'algoritmo PGA ai dati reali, ovvero procedendo a ripulire in fase di post-processing le eco ricevute dal radar Marsis.

Come già descritto, la sub-routine in Matlab preposta ad elaborare tali segnali si limita a prelevare un array di dati già processati al livello 1, che vengono inviati alla sub-routine PGA.

Effettueremo dunque una serie di simulazioni che si differenzieranno tra di loro semplicemente per la scelta dell'orbita e del frame che desideriamo processare.

Anche in questo caso possiamo osservare i risultati ottenuti, mediante delle figure a quattro riquadri:

- Nel primo riquadro (in alto a sinistra) è possibile osservare la risposta impulsiva del segnale affetto da rumore, ovvero ciò che arriva in uscita al livello 1;
- Nel secondo riquadro (in alto a destra) è riportato il diagramma dalla risposta impulsiva del segnale processato mediante PGA e dunque ripulito dall'errore di fase;
- Nel terzo riquadro (in basso a sinistra) è diagrammata la stima dell'errore di fase effettuata dall'algoritmo. Si nota ovviamente come il suo andamento sia di tipo parabolico, del tutto compatibile, quindi, con il modello ionosferico già esposto.
- Nel quarto riquadro (in basso a destra) è possibile visualizzare l'andamento della varianza con il numero di iterazione;

A tali risultati aggiungeremo sovente un confronto con il metodo del contrasto, esaminando congiuntamente le risposte impulsive ripulite con i due metodi e le parabole stimate con i rispettivi coefficienti a_2 ; riporteremo a riguardo altre due figure (la prima contenete le risposte impulsive ripulite e la seconda con le parabole stimate) ciascuna con due riquadri (quello superiore relativo al metodo PGA e quella inferiore relativa al metodo CM).

4.2.1 L'Orbita 1885: Il Canyon

Iniziamo le nostre elaborazioni sul PGA, andando a studiare i segnali di risposta che Marsis ci invia sorvolando una zona del pianeta di grande interesse scientifico: la valle Marinensis.

Nello specifico analizzeremo la frazione di orbita classificata con il numero 1885, la cui traccia al suolo è evidenziata nella seguente mappatura tridimensionale ad alta risoluzione della zona.

Nell'immagine si può osservare, nella parte centrale a destra (il canale azzurro nella zona rossa e gialla), il canyon noto con il nome di Valle Marinensis:

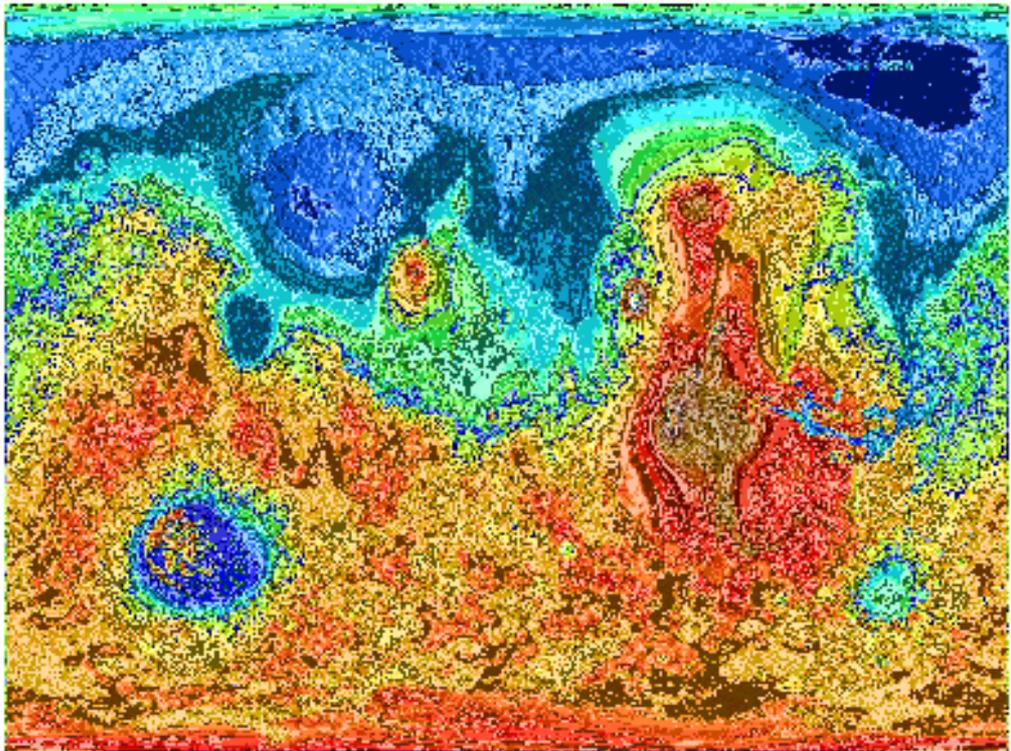


Immagine 4.9

L'immagine che segue mostra ancor meglio la zona sorvolata da Marsis nell'orbita 1885; si tratta essenzialmente di una superficie pianeggiante punteggiata qua e là da alcuni crateri (taluni anche scansionati dal radar), ed interessata dalla presenza di un profondo canyon (la suddetta Valle).

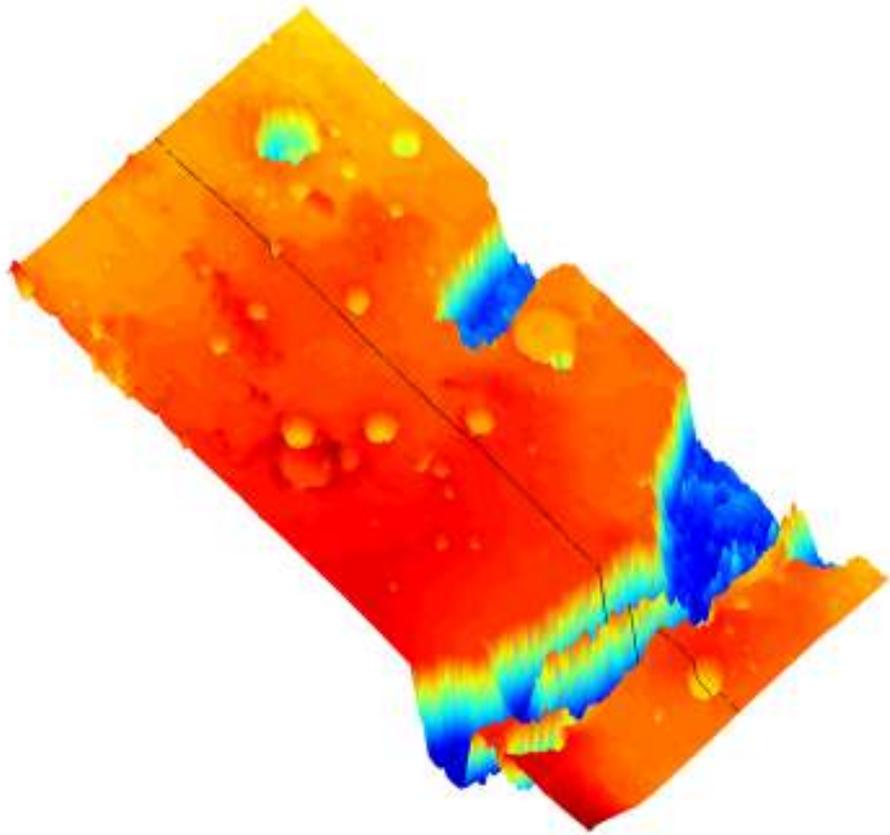


Immagine 4.10

Di enorme impatto visivo è inoltre la seguente figura 4.11, nel quale è riportata un'immagine ad alta risoluzione ottenuta dalla precedente, che mette in evidenza le caratteristiche morfologiche della valle

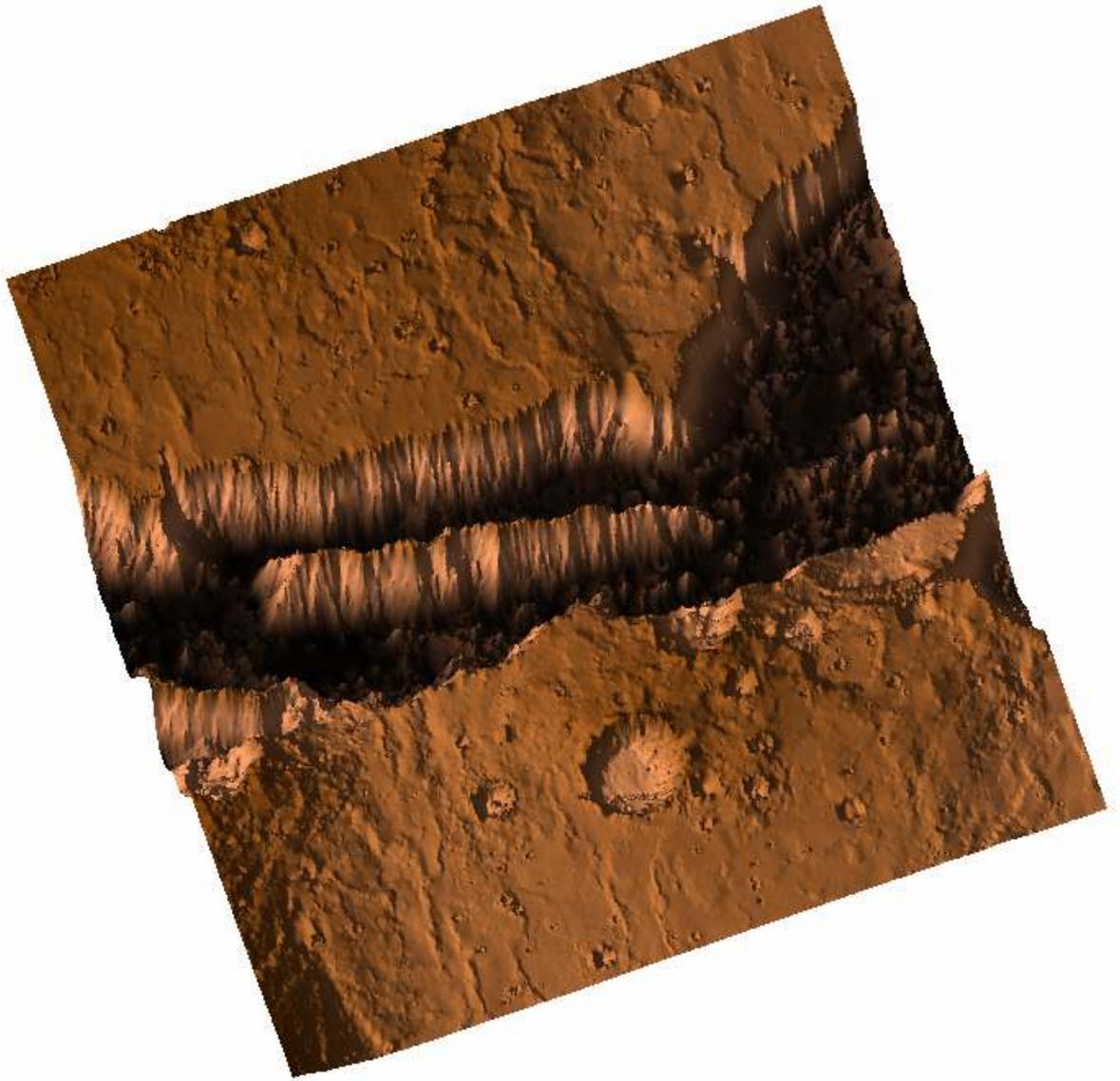


Immagine 4.11

Come sappiamo tali immagine sono ottenute affiancando tutte le risposte acquisite in ricezione da Marsis lungo la sua orbita;
analizzeremo di seguito alcune di queste singole risposte, o frame, per evidenziare il disturbo ionosferico ed il comportamento dell'algoritmo.

Elaborazione I

Procediamo adesso con l'analizzare alcuni frame relativi all'orbita 1885, cominciando dal numero 84; la nostra scelta iniziale ricade su tale frame poichè esso manifesta una risposta impulsiva con un unico punto scatteratore e presenta dunque meno ostacoli al processing mediante PGA;

possiamo osservare i risultati relativi a tale simulazione nella seguente figura 9:

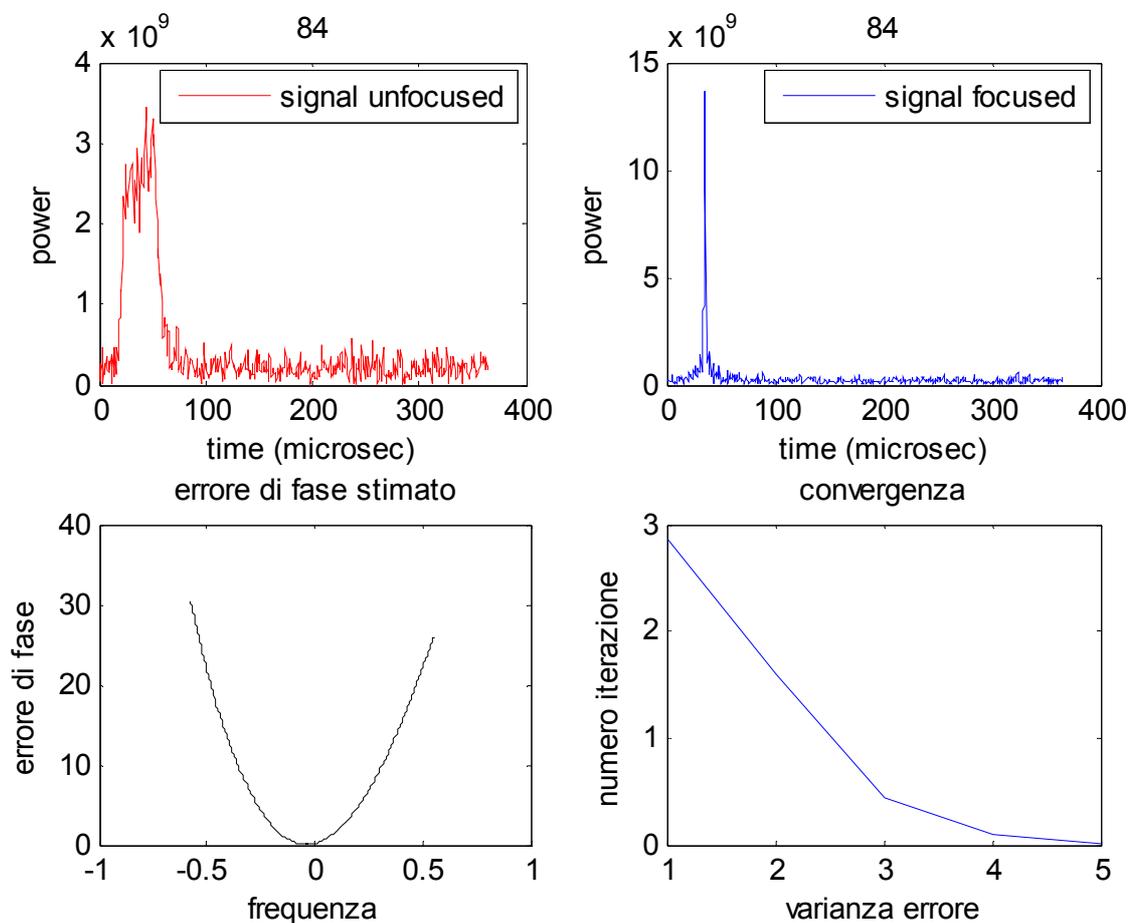


Immagine 4.12

Possiamo osservare come il recupero del segnale sia molto buono, e ciò è testimoniato anche dall'andamento perfettamente parabolico della stima della fase stimata. in questo caso si sono scelti 11 frame da processare (dal 79 al 89) ma questo parametro risulta essere ininfluente sul risultato.

Notiamo piuttosto come l'algoritmo vada a convergenza in sole cinque iterazioni, a testimonianza dell'efficacia del metodo. È altresì importante osservare come la parabola stimata manchi delle zone laterali; ciò è compatibile con quanto detto del precedente capitolo riguardo i problemi relativi alla stima fuori banda.

È interessante in tale sede confrontare i risultati ottenuti mediante PGA con quelli ricavati con il CM; si riportano di seguito le due figure relative sempre al frame 84:

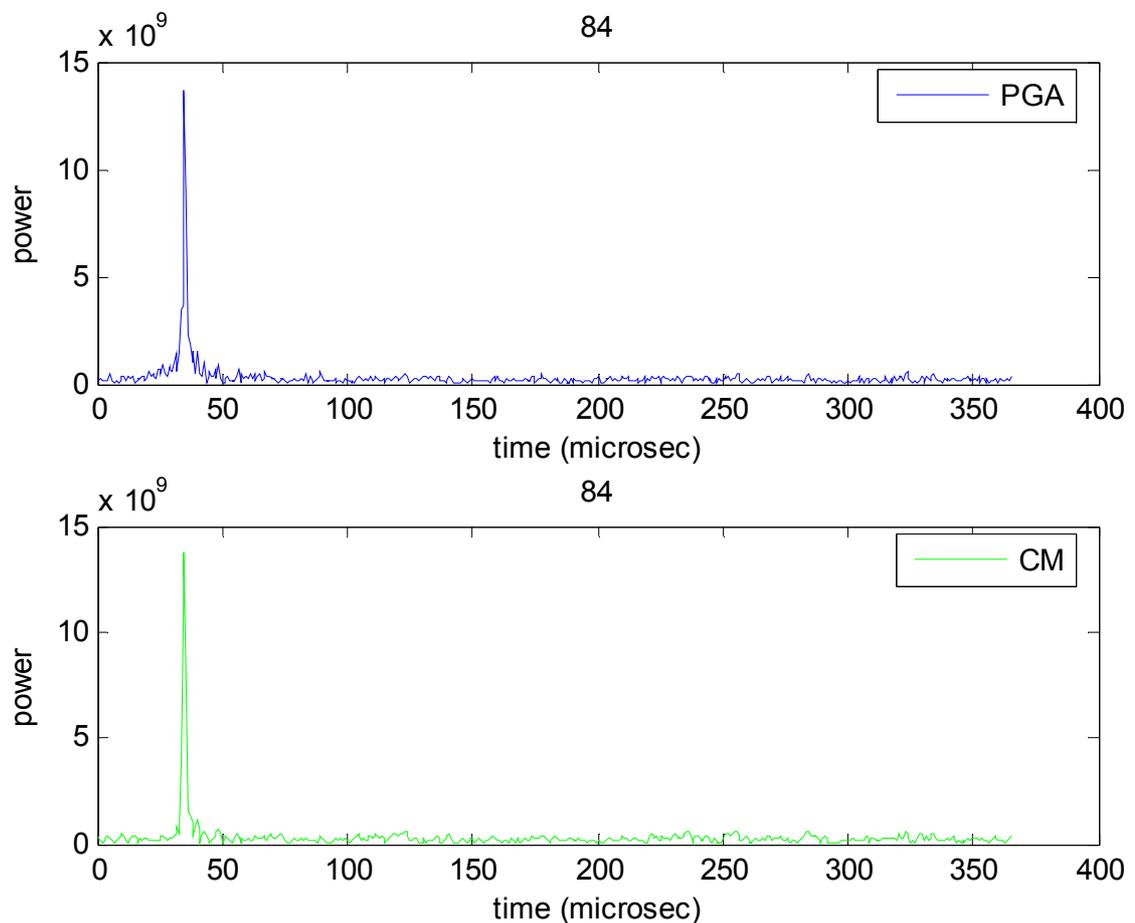


Immagine 4.13

In questi plottaggi risulta evidente come le due correzioni risultino molto simili, sia per l'andamento della risposta che per l'ampiezza del picco e la sua posizione (le differenze riscontrabili sono dovute al fatto che il CM utilizza la funzione peso).

Questo evidenzia che il PGA ben risponde alle modellazioni ionosferiche di cui si è parlato; anche se in casi come questi non introduce significative modifiche.

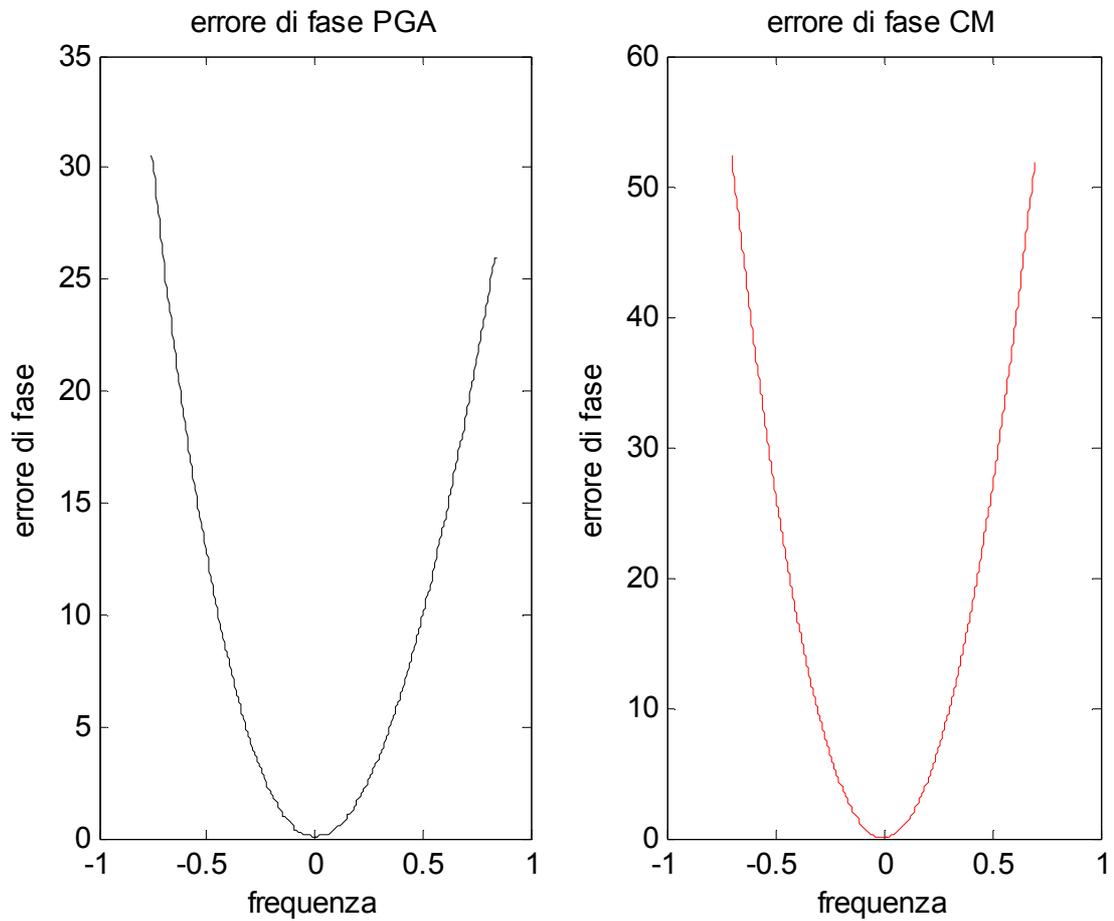


Immagine 4.14

Quanto appena detto risulta evidente anche dall'analisi della figura 8 che mostra l'andamento delle fasi stimate con i due metodi.

La rispondenza tra i due metodi risulta ancor più evidente se andiamo a confrontare i coefficienti a_2 estrapolabili dalle due parabole:

- $a_2=113,67$ per il PGA
- $a_2=106,76$ per il CM

Elaborazione II

Si procede con il frame 119 sempre dell'orbita 1885:

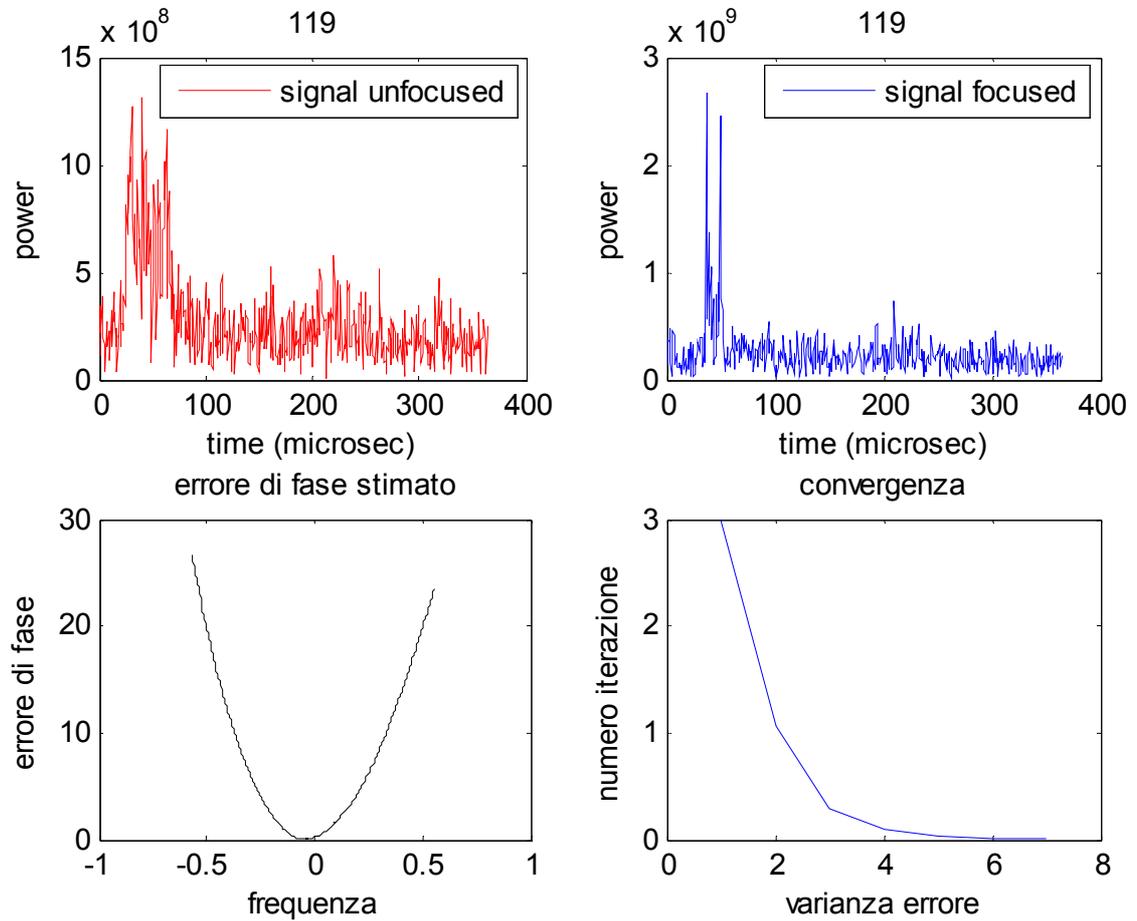


Immagine 4.15

Si può notare come in tal caso la risposta di livello 1 presenti un andamento molto più irregolare (evidentemente per la presenza di rugosità superficiale); ciò nonostante l'algoritmo riesce bene a stimare la distorsione e a compensare la fase in sole 7 iterazioni, restituendoci una risposta che presente due picchi distinti.

Procediamo adesso al confronto con il metodo CM:

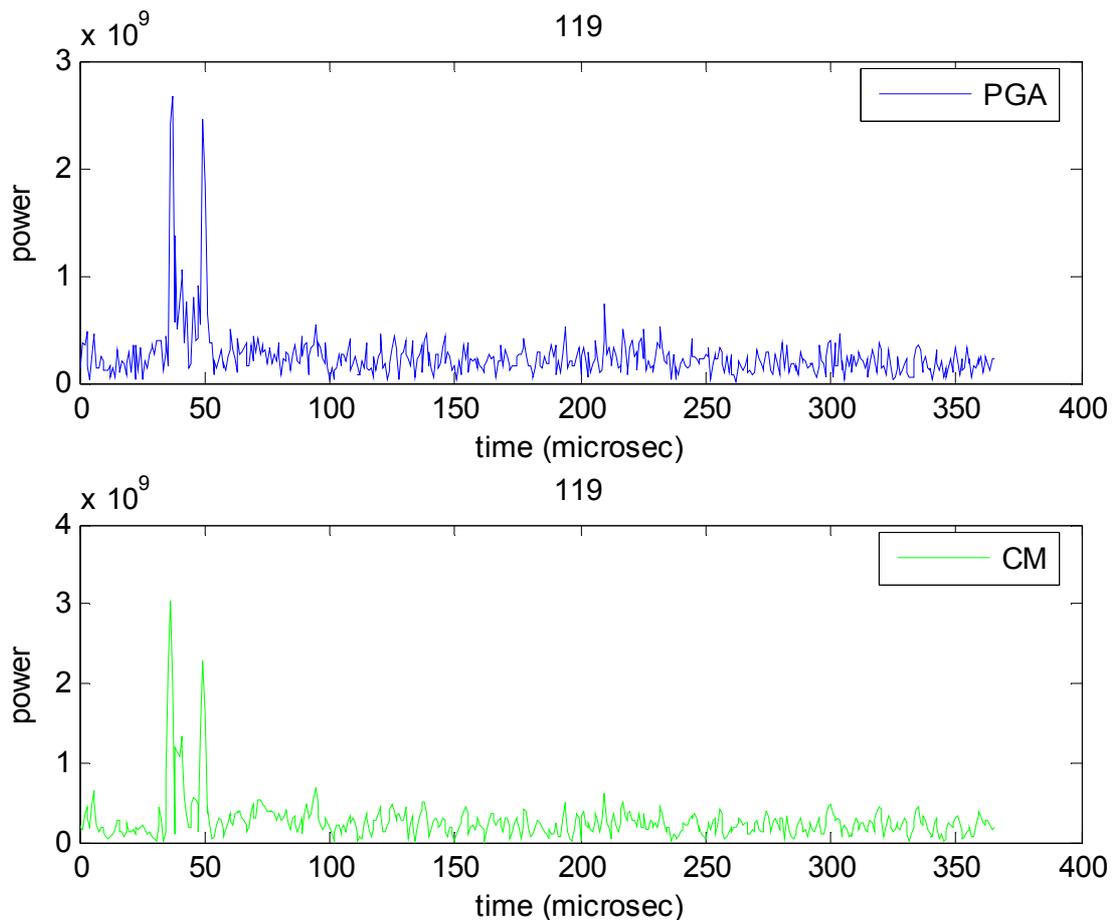


Immagine 4.16

È riscontrabile anche in questo caso una forte rispondenza nei profili dei due segnali puliti.

Ciò è evidenziabile anche dal riscontro tra le due parabole, anche se per questa e per le successive simulazioni ometteremo di riportarne il grafico data la forte similitudine con il precedente.

Riportiamo pertanto solo i coefficienti del secondo ordine per mostrare la rispondenza:

- $a_2=101,79$ per il PGA
- $a_2=94,2$ per il CM

Elaborazione III

Esaminiamo ora il frame 49 sempre dell'orbita 1885:

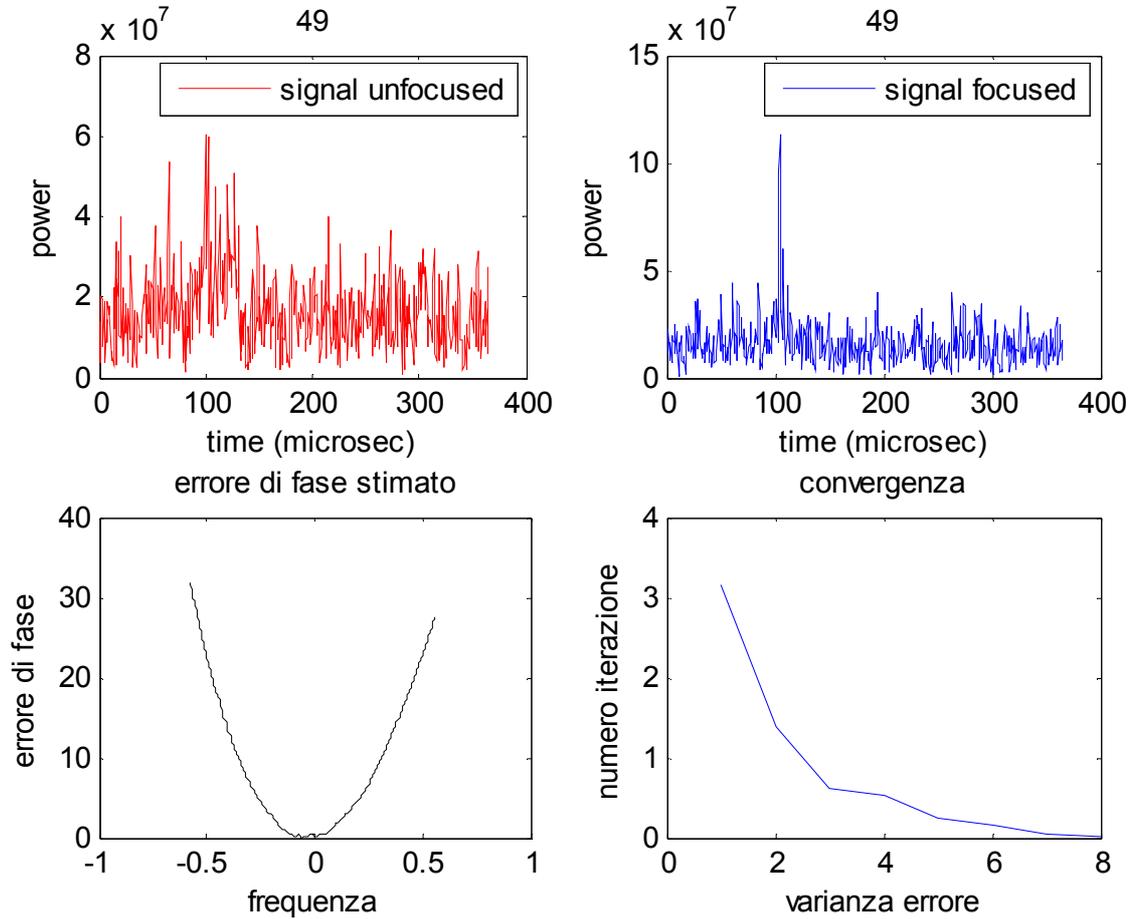


Immagine 4.17

In tal caso osserviamo come la risposta impulsiva di livello 1 sia ancor più irregolare, ma lo stimatore riesce bene a compensarla in 8 iterazioni, restituendoci in solo picco di risposta.

Se ora confrontiamo tale risultato con quello ottenuto mediante CM, osserviamo una cosa interessante:

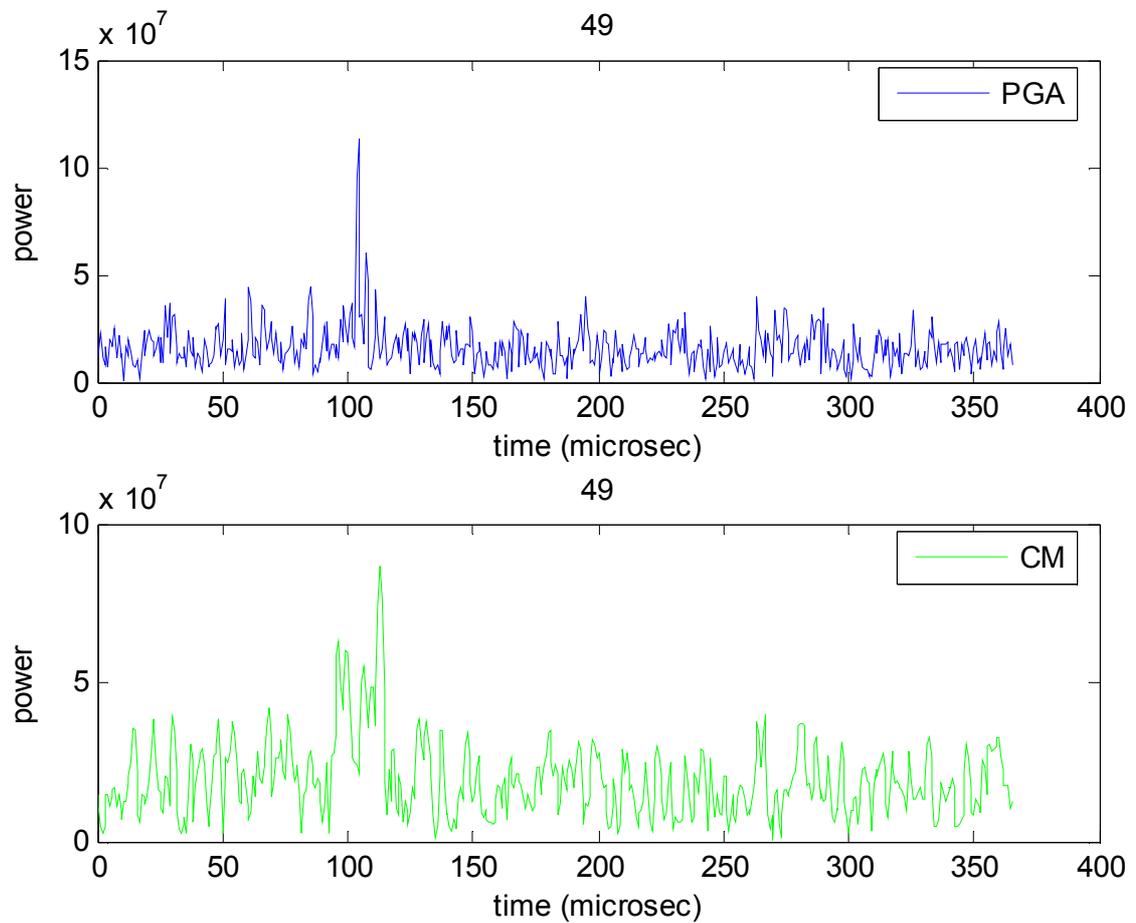


Immagine 4.18

Infatti si nota come il recupero effettuato mediante CM presenti delle irregolarità in più; ciò ci induce a pensare che in tal caso lo stimatore del CM abbia trovato alcune che il PGA è riuscito meglio a superare.

Inoltre l'analisi dei coefficienti del secondo ordine ci suggerisce una significativa differenza tra le due stime:

- $a_2=118,04$ per il PGA
- $a_2=282,6$ per il CM

Elaborazione IV

Sempre rimanendo nell'orbita 1885 esaminiamo ora il frame 39 che ci offre degli spunti interessanti:

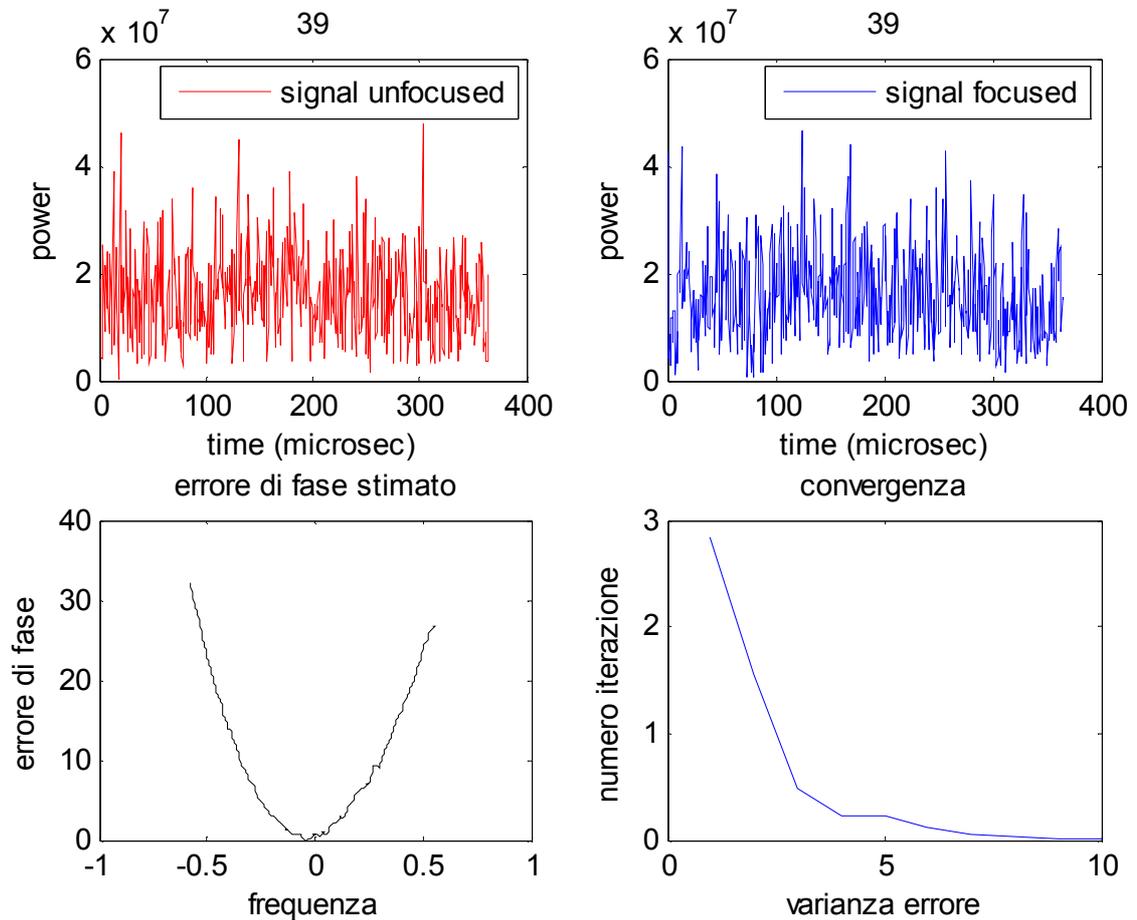


Immagine 4.19

Infatti in tal caso si nota come la risposta di livello 1 abbia un andamento del tutto irregolare; inoltre l'ampiezza media del segnale è di due ordini di grandezza inferiore rispetto ai frame prima esaminati; ciò è spiegabile se osserviamo che si tratta di una risposta proveniente da una superficie fortemente rugosa che quindi non ci restituisce un segnale apprezzabile.

In tal caso il trattamento con il PGA ci restituisce una risposta L2 non molto diversa dalla L1.

Inoltre dal confronto con il CM,

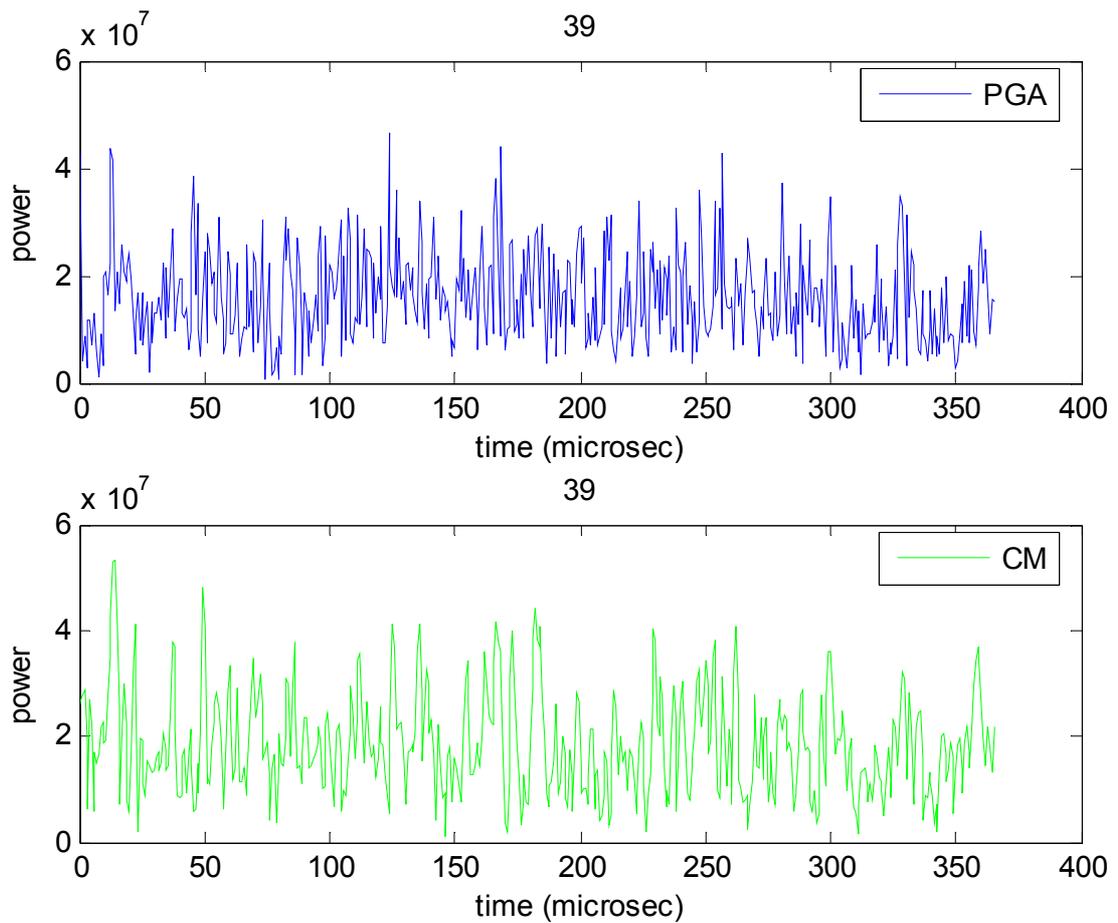


Immagine 4.20

osserviamo una forte similitudine tra le due risposte, anche se il confronto tra i coefficienti del secondo ordine ci fornisce dati molto differenti:

- $a_2=117,51$ per il PGA
- $a_2=69,08$ per il CM

Di notevole interesse a questo punto è analizzare i radargrammi relativi alla nostra orbita (la 1885), e confrontare l'andamento che hanno a seconda del metodo utilizzato; presenteremo prima i radargrammi in 2D ottenuti con il PGA (figura 15) e con il CM (figura 16), e successivamente quelli in 3D con la stessa differenziazione (figure 17 e 18).

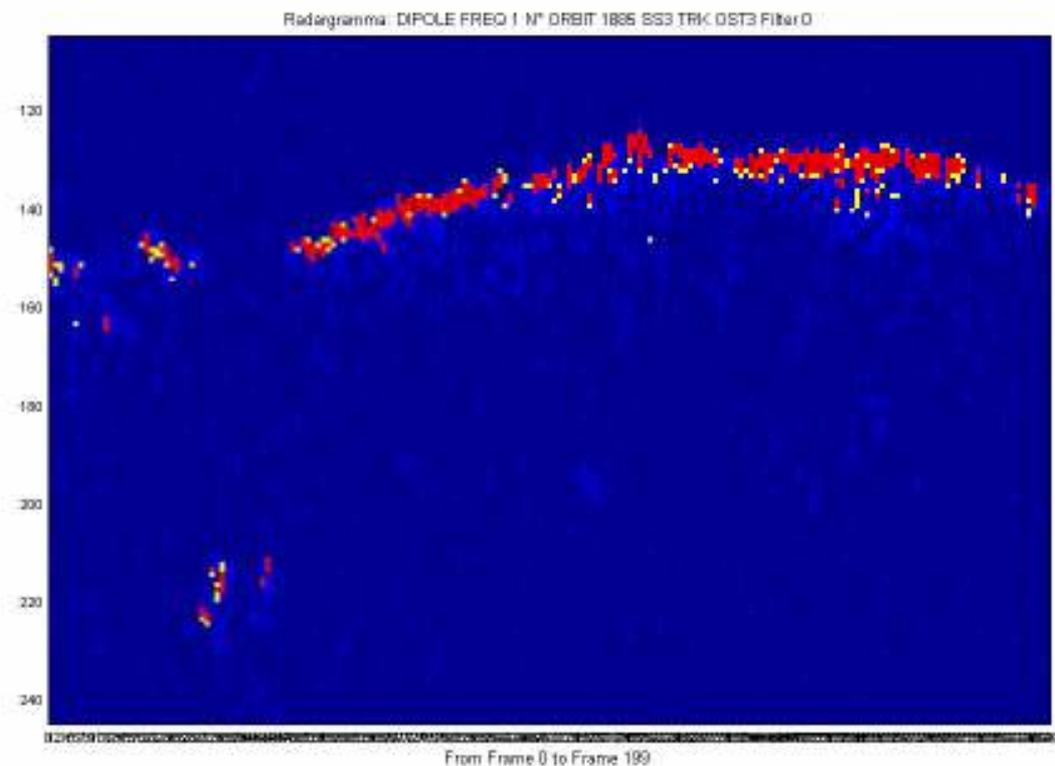


Immagine 4.21

Dal radargramma si evince che in tale orbita il satellite sorvola un canyon, lungo il quale è distinguibile un grosso ed importante cratere. Tenendo conto che le zone di colore rosso e giallo sono quelle che ci offrono una risposta più intensa, è facile comprendere perchè i frame 84 e 119 (che si trovano in queste zone) ci danno una risposta molto limpida, e perchè di loro sia facile effettuare la pulitura; il frame 39 invece si trova sul picco immediatamente a destra del cratere (al limitare del pendio) e pertanto, come si evince dal suo colore blu, ci offre una risposta di bassa intensità e quindi poco visibile.

La figure che segue mostra il medesimo radargramma ottenuto mediante CM; anche se possono sembrare simili, i risultati del PGA sono generalmente migliori

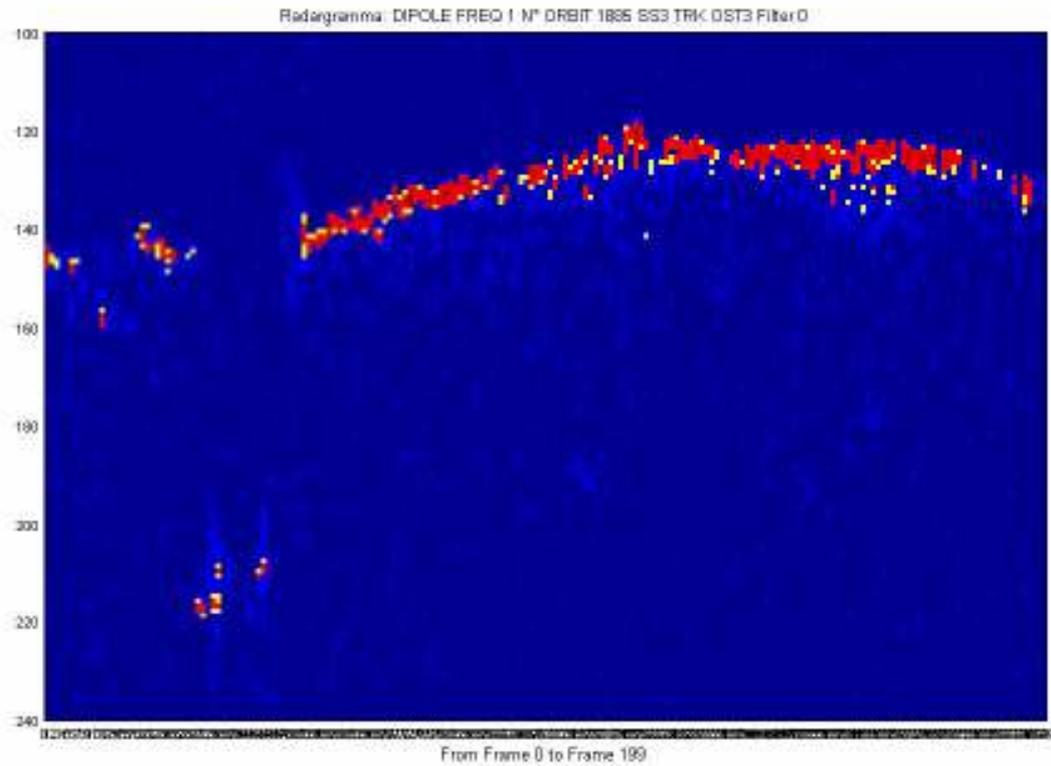


Immagine 4.22

tutto ciò è più evidente se si osservando le due figure seguenti che mettono a confronto i radargrammi in 3D ottenuti con i due metodi.

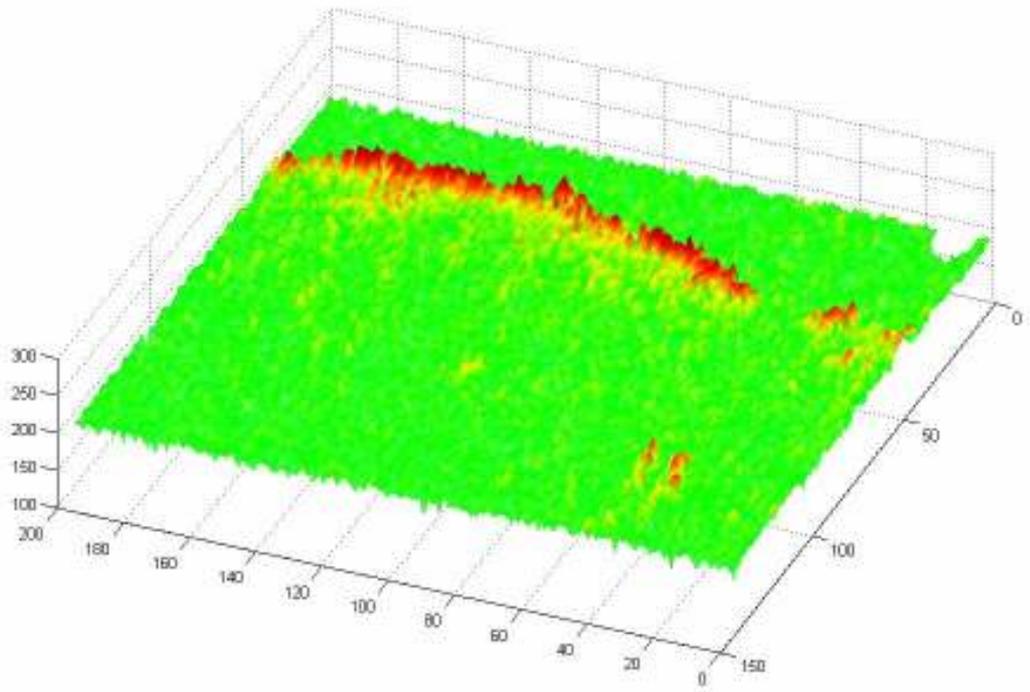


Immagine 4.23

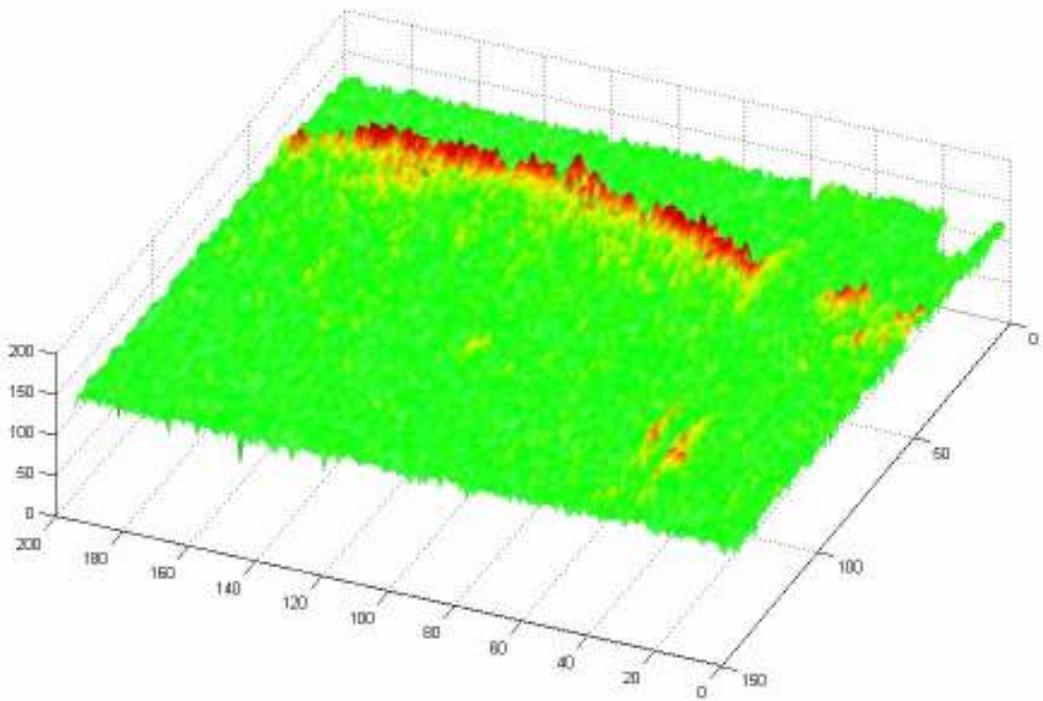


Immagine 4.24

Elaborazione V

Sarebbe dunque interessante studiare i frame che si trovano sul fondo del cratere, osservando la loro risposta; nello specifico prenderemo (sempre per l'orbita 1885), il frame 32 che si trova appunto sul fondo del cratere;

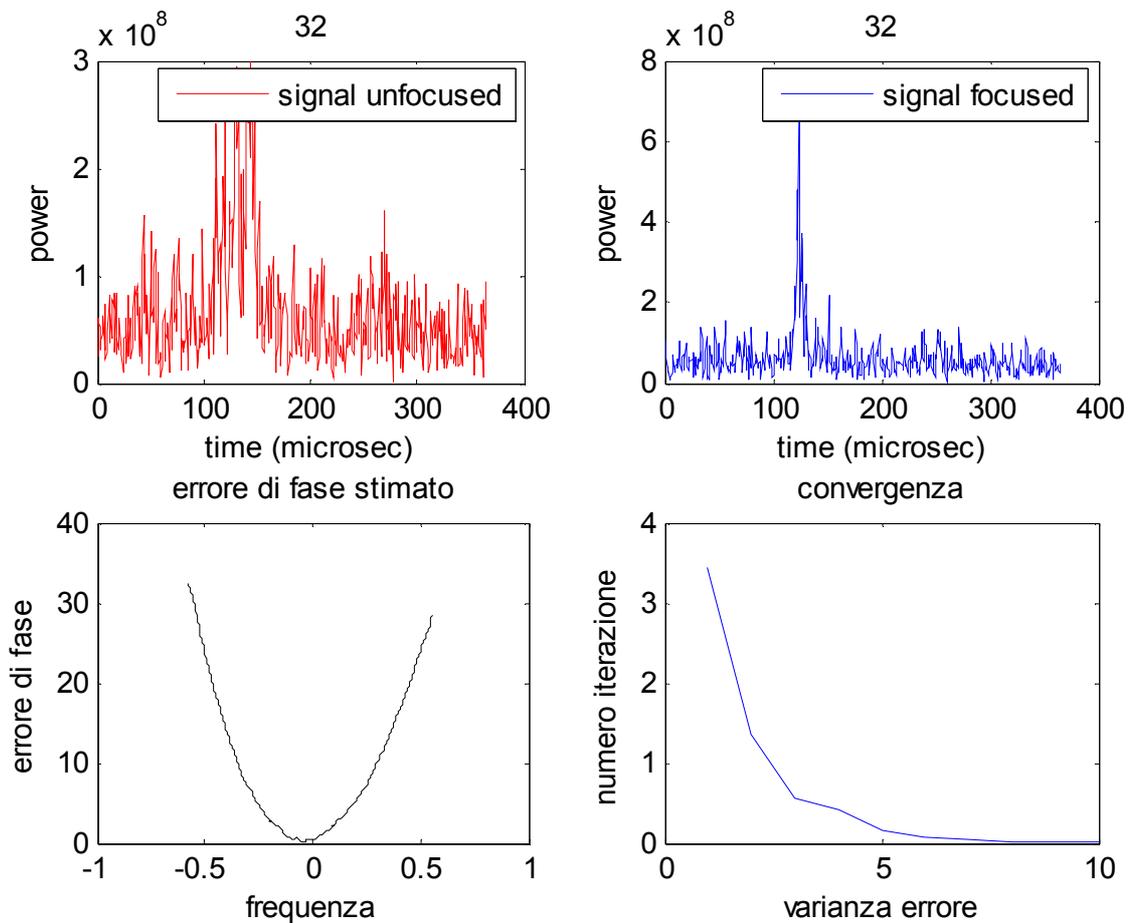


Immagine 4.25

In tale caso è evidente come il fondo del cratere ci offra una risposta di livello L1 sicuramente disturbata, ma come la sua ampiezza ci permetta agevolmente di ripulirlo molto bene mediante PGA.

Il confronto con il CM evidenzia bene in tal caso la migliore risposta del PGA:

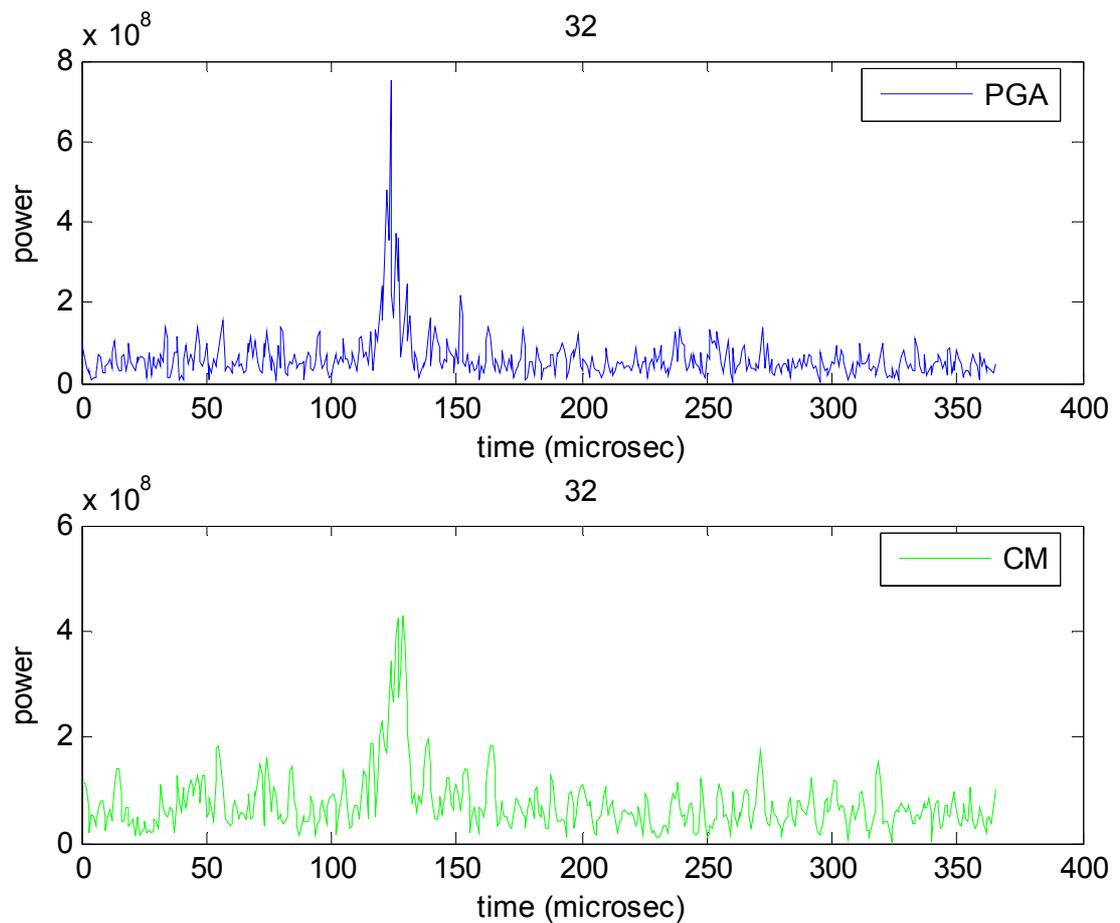


Immagine 4.26

tanto più che i valori dei coefficienti di secondo grado sono sensibilmente differenti:

- $a_2=121,55$ per il PGA
- $a_2=62,8$ per il CM

4.2.2 L'Orbita 1904: Il Vulcano

Spostiamo ora il nostro interesse su un'altra orbita, la 1904, nella quale Marsis sorvola una zona del pianeta molto diversa, interessata dalla presenza del Vulcano noto come Arsia, di qui è possibile vedere un'immagine ad alta risoluzione nella figura seguente;

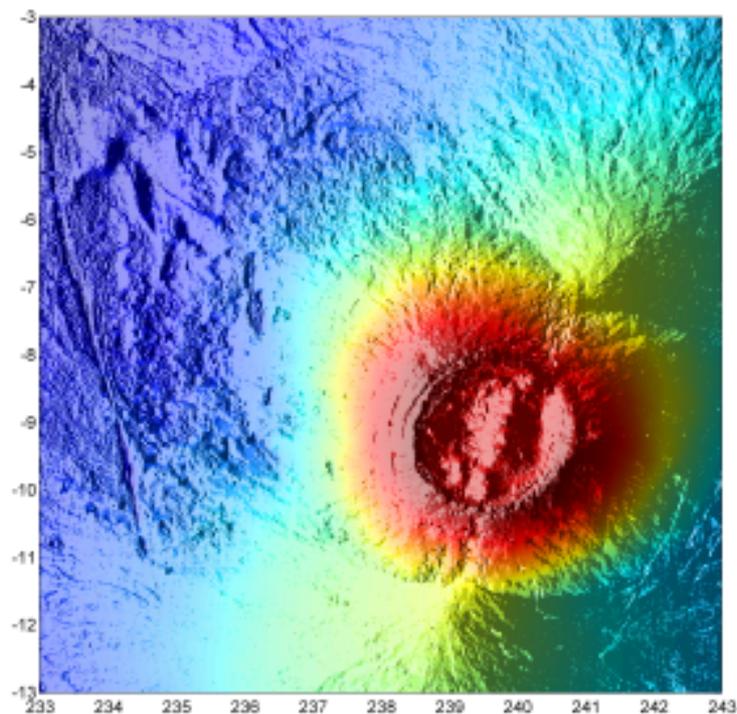


Immagine 4.27

E' inoltre possibile visionare la seguente immagine realistica del vulcano per comprendere la sua morfologia;

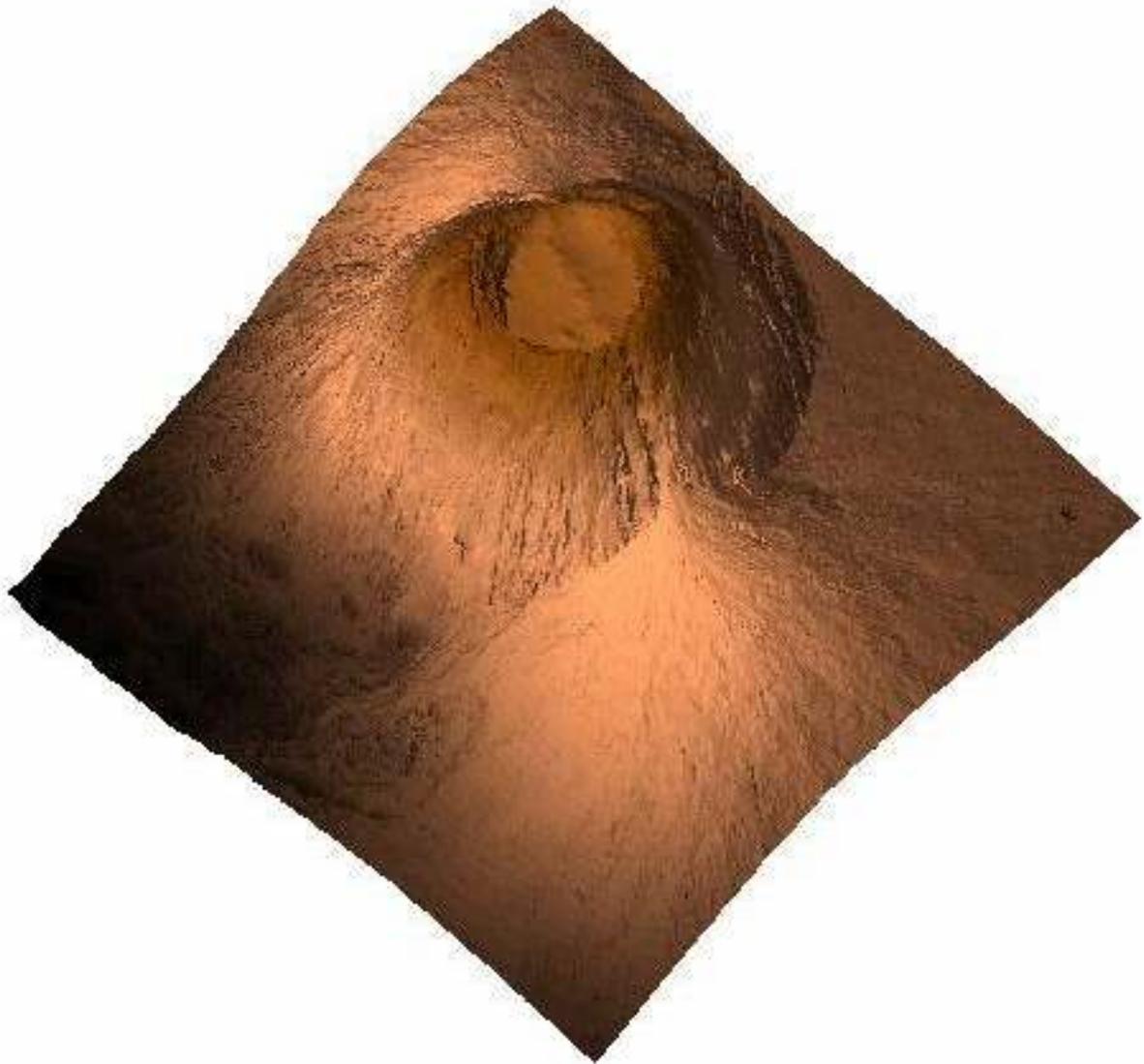


Immagine 4.28

Riportiamo di seguito anche i due radargrammi (in 2D e in 3D) che evidenziano il livello energetico della risposta nei vari frame (rosso per energia alta e blu per energia bassa), e ci permettono poi di selezionare i casi di interesse nelle elaborazioni.

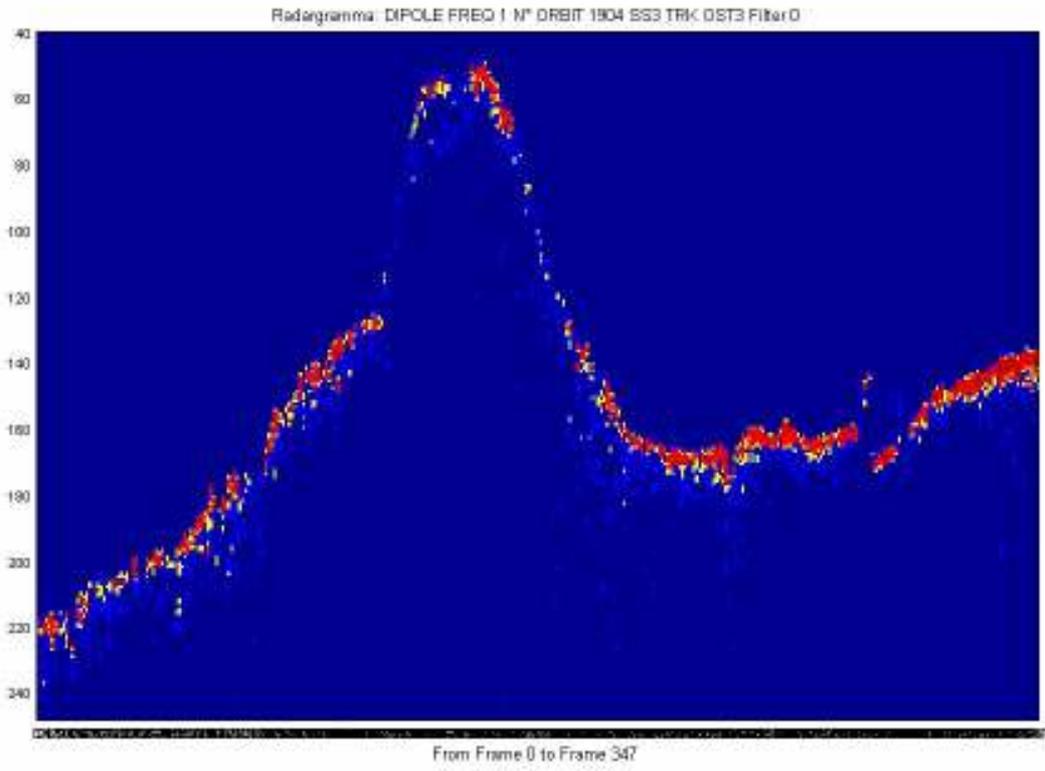


Immagine 4.29

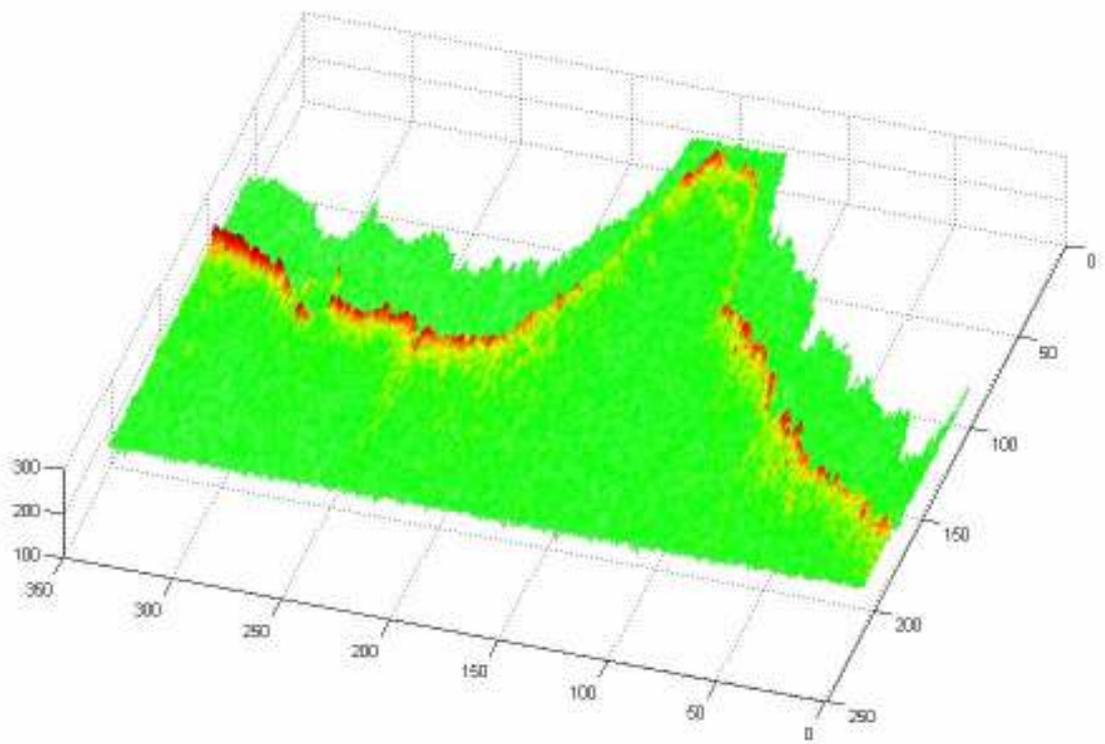


Immagine 4.30

Elaborazione VI

Nelle seguente simulazione analizzeremo il frame 159 che si trova sul picco della montagna, e ne osserviamo i risultati grafici:

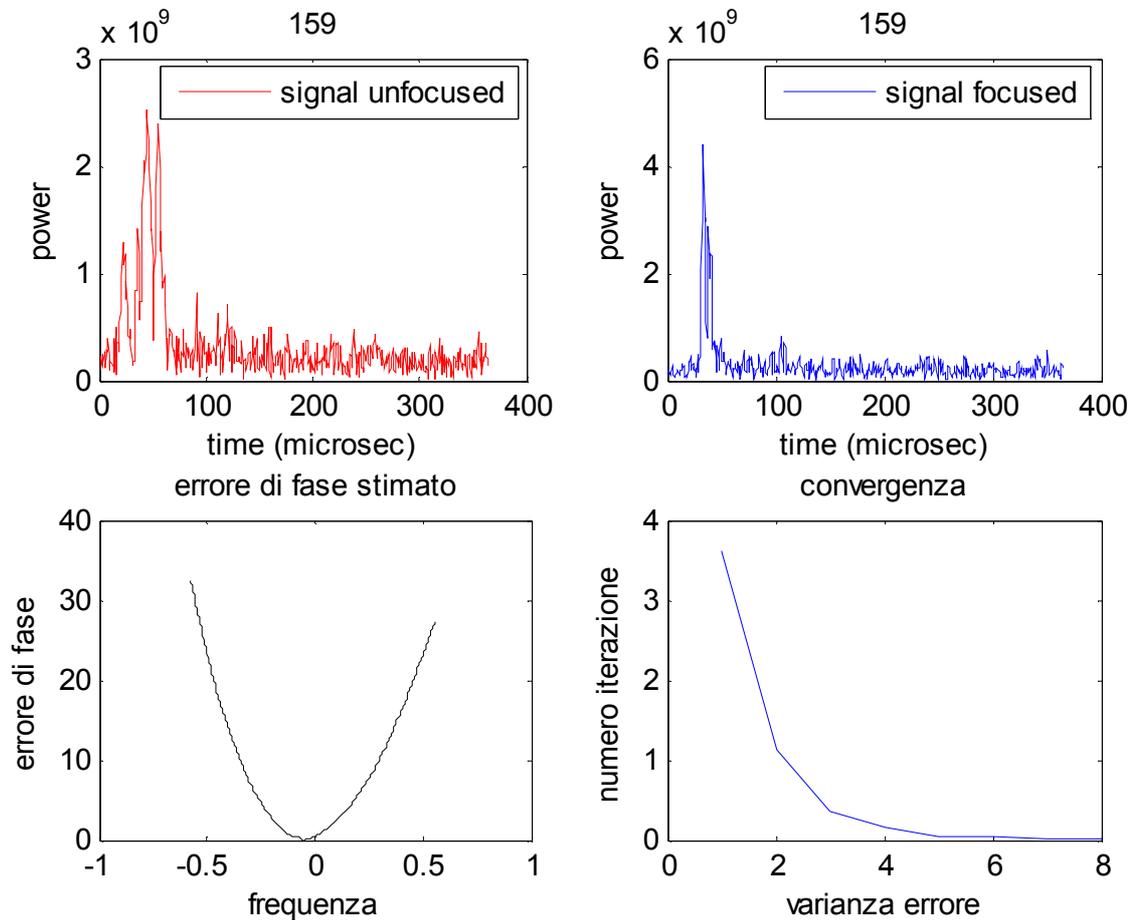


Immagine 4.27

Osserviamo come la risposta di livello L1 sia abbastanza ampia e come la stima del dell'errore (in sole 8 iterazioni) e la compensazione ci offrano dei buoni risultati.

Inoltre nella successiva figura osserviamo come il PGA effettui un miglior recupero del segnale in termini di ampiezza:

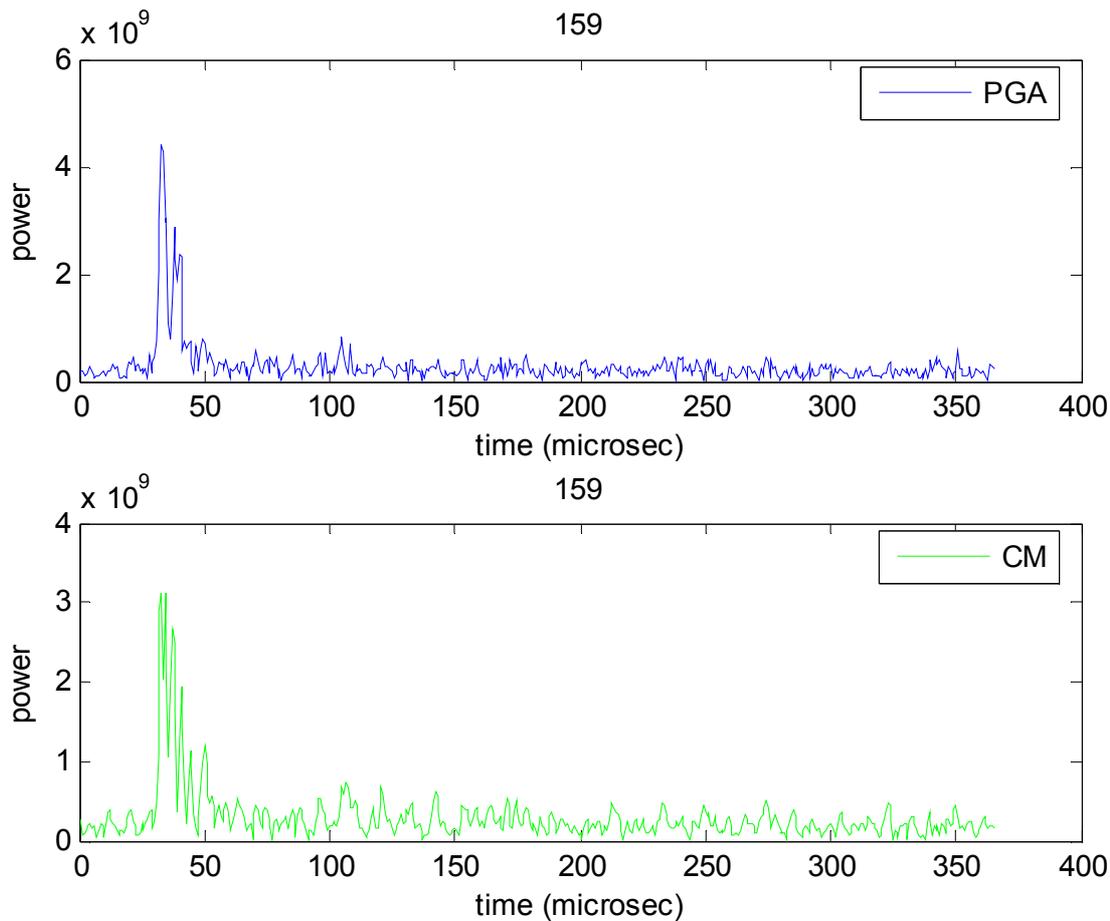


Immagine 4.28

Anche in questo caso osserviamo la differenza sensibile tra i due coefficienti di secondo grado:

- $a_2=2,7391e-10$ per il PGA
- $a_2=1,3188e-10$ per il CM

Elaborazione VII

Sempre relativamente all'orbita 1904, analizziamo il frame 122, che si trova sul pendio a destra dell'altura:

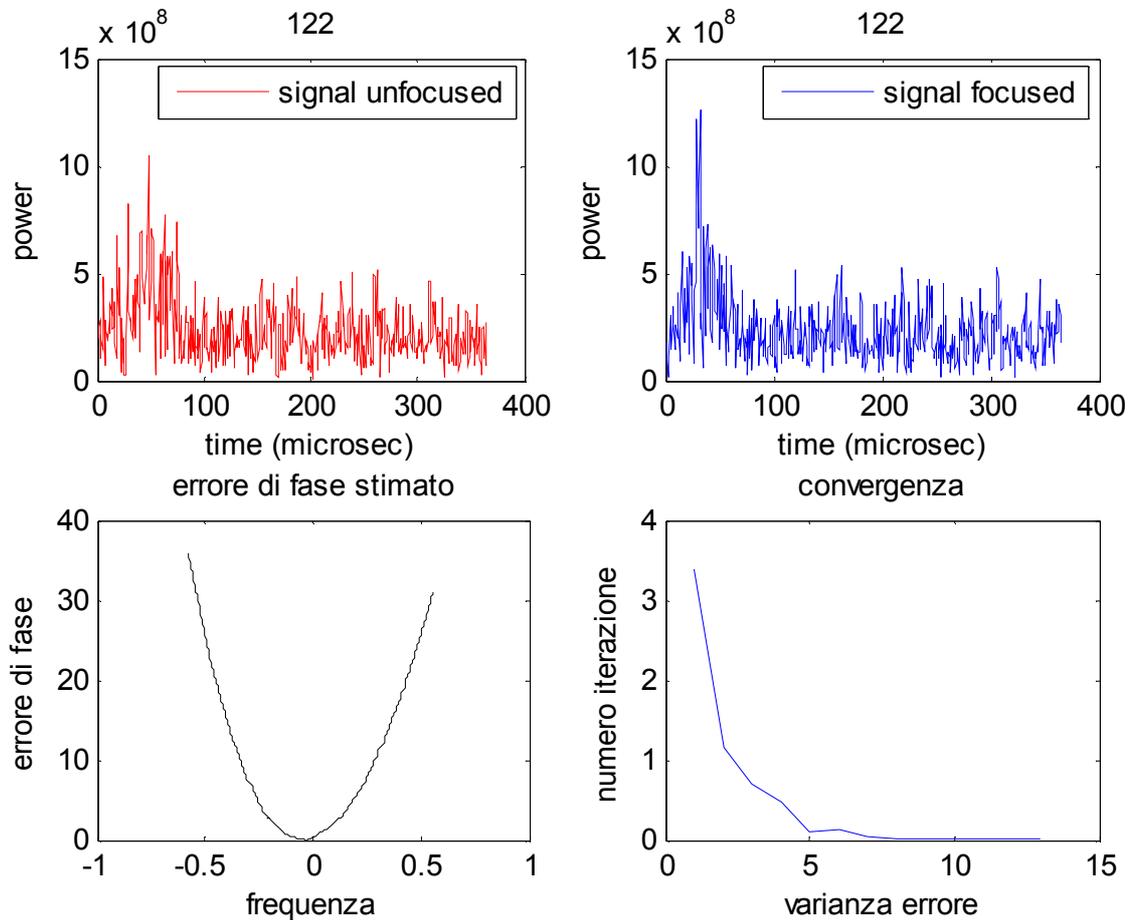


Immagine 4.29

Osserviamo come l'ampiezza della risposta sia di un ordine di grandezza inferiore rispetto al livello atteso, e ciò a testimonianza della poca energia contenuta nella risposta.

Osserviamo inoltre che il recupero con il PGA è abbastanza buono, ma impiega 13 iterazioni

Dalla figura seguente notiamo con interesse come il PGA apporti sicuramente delle migliori rispetto al CM:

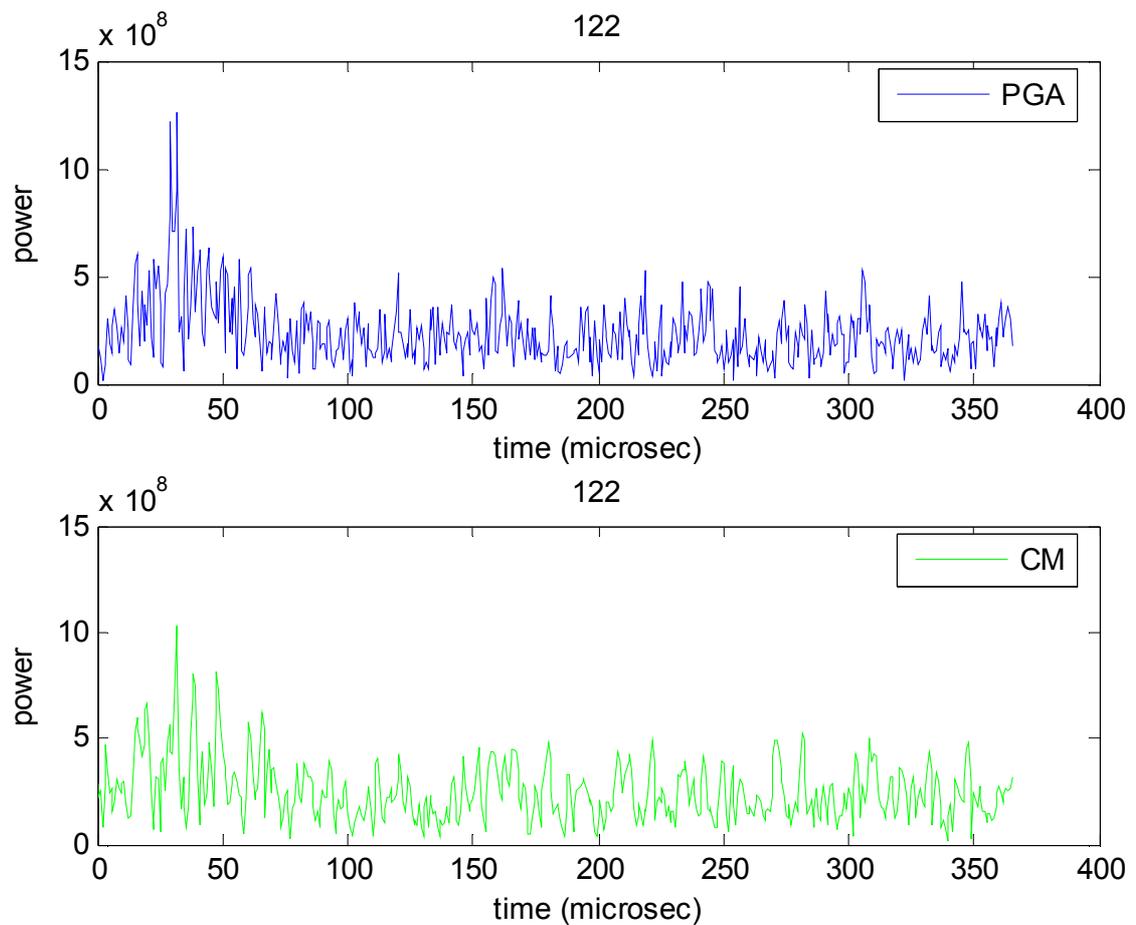


Immagine 4.30

Si nota come, nonostante entrambe mostrino una risposta a bassa energia, il PGA manifesti un picco più accentuato.

Si riportano inoltre i coefficienti del secondo ordine, che risultano appunto molto diversi:

- $a_2 = 2,3782 \times 10^{-10}$ per il PGA
- $a_2 = 6,28 \times 10^{-11}$ per il CM

Elaborazione VIII

Analizziamo adesso il frame 344, che si trova nella zona a sinistra dei radargrammi dove c'è la maggior concentrazione di risposte ad elevata ampiezza (è una zona molto rossa):

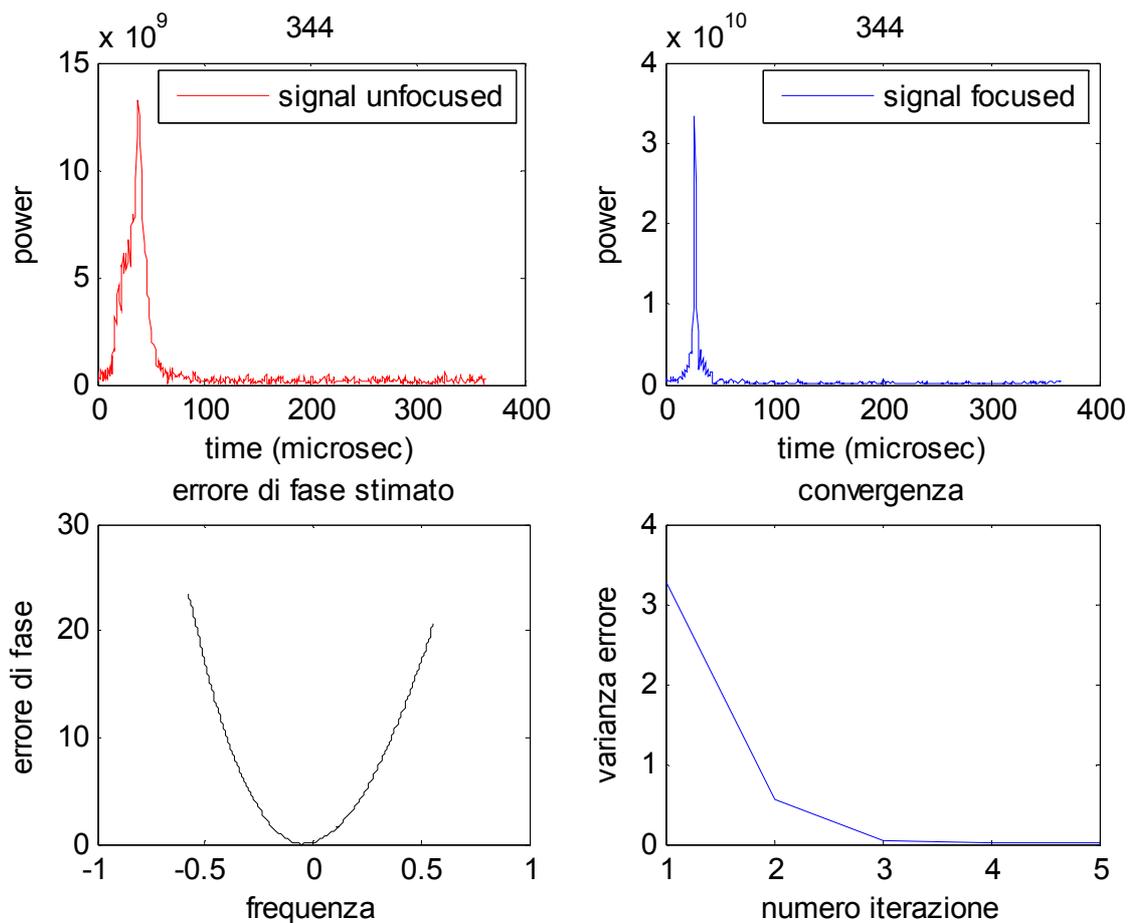


Immagine 4.31

in questo caso, in particolare l'algoritmo va a convergenza dopo sole quattro iterazioni, la stima dell'errore ha un andamento perfettamente parabolico ed il segnale compensato è caratterizzato da una forte energia.

È inoltre possibile osservare dal confronto con il metodo del contrasto che anche in questo caso il PGA presenta delle prestazioni migliori:

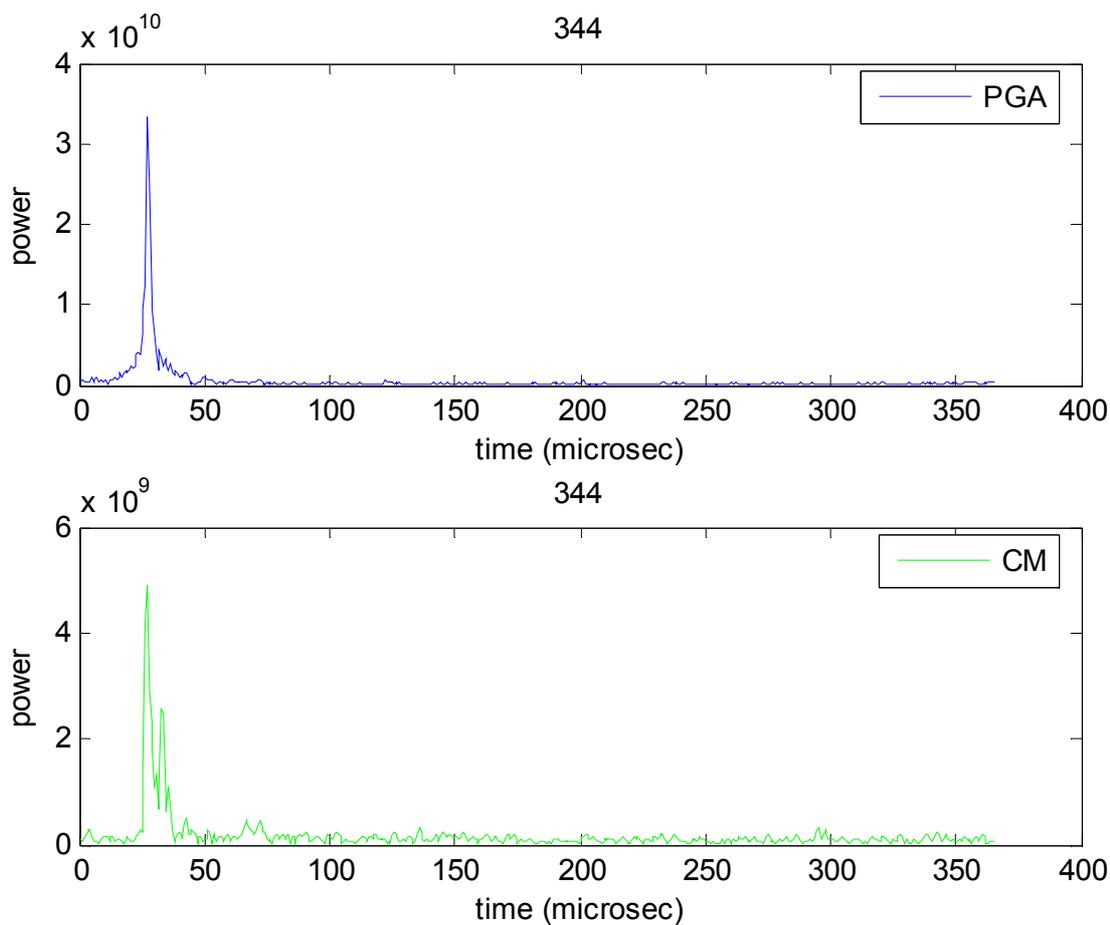


Immagine 4.32

Adirittura il PGA presenta un picco di un ordine di grandezza superiore rispetto al CM.

Per quanto riguarda i coefficienti

- $a_2 = 1,5196 \times 10^{-10}$ per il PGA
- $a_2 = 8,164 \times 10^{-11}$ per il CM

Paragrafo 4.3

Considerazioni

Tutte le elaborazioni svolte in questo capitolo ci hanno permesso di verificare le funzionalità dell'algorithm PGA su dati realmente provenienti da Marte ed acquisite mediante il radar Marsis.

L'analisi di più orbite con caratteristiche della superficie marziane differenti, ci ha permesso di testare l'algorithm in condizioni operative differenti.

Nonostante ciò in ogni caso esso ha risposto adeguatamente, stimando una fase parabolica (non basandosi esso su di un modello parabolico) e compensando egregiamente i segnali.

Il confronto con i risultati del CM ci ha non solo consentito di avere un riscontro pratico con un metodo alternativo, ma anche e soprattutto di verificarne le prestazioni migliori.

Il PGA si è dunque rivelato più che adatto a risolvere il problema della compensazione dei segnali radar provenienti da Marte, con un numero di iterazioni ridotto, semplici equazioni da risolvere e la grande potenzialità di poter stimare qualsiasi distorsioni si presenti, in quanto non si basa su un modello parabolico.

Conclusioni

Il software sviluppato nel corso del presente lavoro di tesi, e basato sull'algoritmo PGA, rappresenta, per quanto visto, un tassello piccolo ma prezioso nell'elaborazione a terra dei dati provenienti da Marsis, che è al momento una delle missioni più importanti nello studio del pianeta rosso.

L'integrazione della nostra sub-routine all'interno di un più completo software, che analizza i dati relativi alle immagini di Marte, ci ha permesso di verificare le ottime prestazioni del metodo PGA, ed allo stesso tempo abbiamo avuto la possibilità di scansionare alcune orbite del pianeta rosso estrapolandone informazioni preziose.

È altresì stato possibile verificare come tale metodo apporti significative migliorie nell'elaborazione dei dati e nella compensazione della fase, rispetto a quelli fino ad ora utilizzati, seppure con le dovute imperfezioni.

Il fatto di non basarsi su un modello e di contenere un numero minimo di parametri ed equazioni da risolvere, ne fa uno strumento potente per la risoluzione di ogni genere di problema legato alla distorsione di fase.

Una corretta stima della distorsione ionosferica su tutto il pianeta ci permetterà di analizzare in maniera sempre più accurata le zone superficiali e sottosuperficiali di Marte e di estrapolare dei modelli più corretti per la conoscenza della stessa ionosfera.

In un immediato futuro ci si propone di giungere ad un perfezionamento degli algoritmi presentati, che permetta uno studio più approfondito delle immagini catturate da Marsis o anche dai radar della prossima generazione, con lo scopo

fondamentale di aumentare la nostra conoscenza di quell'affascinante pianeta che è Marte

Per tutti questi motivi il software sviluppato costituisce sicuramente uno strumento di valido ausilio per quanti saranno chiamati ad occuparsi della missione Marsis, nell'intento di provare l'effettiva presenza di acqua nel sottosuolo marziano.

Listato Matlab del PGA

```
function
[risp_imp_defoc, fas_err, var_err]=PGA_real(risp_imp_defoc,d
ati_defoc,filtro,fc,i_B,n_chirp,NFFT,amp_win);

var_err=100;
fas_err=zeros(1,NFFT);
it=1;
while min(var_err)>1e-2&it<15

    sti=zeros(1,NFFT);
    Gnum=zeros(1,NFFT);
    Gden=zeros(1,NFFT);

    for ii=1:n_chirp
        [max_def i_max]=max(abs(risp_imp_defoc(ii,:)));

        risp_imp_defoc_shift=circshift(risp_imp_defoc(ii,:),[0
(floor(NFFT/2)-i_max)]);

        G=fft(risp_imp_defoc_shift.*window(NFFT,floor(NFFT/16/(it*
amp_win))));
        DER=gradient(G,fc/NFFT);
        Gnum=Gnum+imag((conj(G)).*DER);
        Gden=Gden+abs(G).^2;
    end
    sti=Gnum./Gden;
    INT=cumtrapz(sti).*fc/NFFT;
    INT(i_B)=INT(i_B)-
polyval(polyfit(i_B,INT(i_B),1),i_B,1);
    INT(1:i_B(1)-1)=0;
    INT(i_B(length(i_B))+1:NFFT)=0;
    fas_err=fas_err+INT;
    for ii=1:n_chirp

        risp_imp_defoc(ii,:)=(ifft(((dati_defoc(ii,:)).*exp(j.*fa
s_err)).*(conj(fftshift(fft(filtro,NFFT))))),NFFT));
    end
    var_err(it)=sqrt(var(abs(INT)));
    it=it+1;
end
```

BIBLIOGRAFIA

Biccari, D., Ciabattoni, F., Picardi, G., Seu, R., Johnson, W.K.T. Jordan, R., Plaut, J., Safaeinili, A., Gurnett, D.A., Orosei, R., Bombaci, O., Provvedi, F., Zampolini, E. & Zelli, C. (2001b). Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS). In Proc. 2001 International Conference on Radar, October 2001, Beijing, China.

Biccari D., Picardi G., Seu R., ADAPTIVE COMPENSATION OF MARS IONOSPHERE DISPERSION IN THE MARSIS EXPERIMENT IGARSS 2001

Biccari D., Picardi G., Seu R., Melacci P.T., 2001a. Mars surface models and subsurface detection performance in MARSIS. Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, IGARSS 2001, Sydney, Australia, 9-13 July 2001.

Biccari D., Picardi G., Seu R., Orosei R., Melacci P.T., Mars Orbital Laser Altimeter and Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS)- SPIE's Photonics Asia conference 2002

Biccari D., Picardi G., Seu R., Spada M. – RADIO WAVE ATTENUATION BY MARS IONOSPHERE Infocom Tech. Rep.004/005/2000 - 25/11/2000

Bombaci O., D. Calabrese, C. Zelli – MARSIS ON BOARD PROCESSING ALGORITHMS TNO-MAR-0037-ALS, 19/09/2001

Carr, M.H. (1996). Water on Mars, Oxford University Press, Oxford, UK.

Cook C.E., M. Bernfeld, Radar Signals, Academic Press, New York, 1967

Fung A.K. Eom H.J. Coherent scattering of a spherical wave from a irregular surface, IEEE Trans. On AP, January 1983

Gurnett D.A., The Electron Plasma Frequency in the Martian Ionosphere, Tech. Note, Jan. 1998

Hanson, W.B., Sanatani, S. & Zuccaro, D.R. (1977). The Martian Ionosphere as Observed by the Viking Retarding Potential Analyzers. J. Geophys. Res. 82, 4351-4363.

Montefredini E., Picardi G., Seu R., Evaluation of approximation errors of coherent and non-cohereht scattering models under Kirchoff formulation ISNCR '94

Nouvel J.F., Kofman W., Witasse O. - RADIO WAVES ABSORPTION AND MARTIAN IONOSPHERE LPG-Nov.2000

Orosei R. – MARSIS EAICD

Picardi G., ELABORAZIONE DEL SEGNALE RADAR – Ed. Franco Angeli '88

Picardi, G., Plaut, J., Johnson, W., Borgarelli, L., Jordan, R., Gurnett, D., Sorge, S., Seu, R. & Orosei, R. (1998a). The Subsurface Sounding Radar Altimeter in the Mars Express Mission, Proposal to ESA, Infocom document N188-23/2/1998, February 1998.

Picardi G., Sorge S., Adaptive Compensation of Mars Ionosphere Dispersion - A Low Computational Cost Solution for MARSIS Infocom Tech. Rep. 009/005/99

Picardi G., Sorge S., Seu R., Fedele G., Federico C., Orosei R., 1999a. Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS): models and system analysis. Infocom Technical Report N.007/005/99

Picardi, G., Sorge, S., Seu, R., Fedele, G. & Jordan, R.L. (1999b). Coherent Cancellation of Surface Clutter Returns for Radar Sounding. In Proc. IEEE International Symp. on Geoscience and Remote Sensing, IGARSS'99, Hamburg, Germany, 28 June - 2 July 1999, pp2678-2681.

Picardi G., Sorge S., Seu R., Orosei R., Zelli C. and Zampolini E., "The subsurface investigation by Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS)", IEEE 2000.

Safaenili A., Jordan R. – MARSIS CALIBRATION OF IONOSPHERIC ATTENUATION AND DISPERSION – JPL 3349-01-039 April 12, 2001

Safaenili A., Jordan R., Radio wave attenuation in the Martian ionosphere JPL 3349-00-027 Nov.13, 2000

Safaenili, A. & Jordan, R.L. (2000). Low Frequency Radar Sounding through Martian Ionosphere. In Proc. IGARSS 2000, 24-28 July 2000, Honolulu, Hawaii, IEEE, pp987-990.

Shepard M., Campbell B. - Radar Scattering from a Self-affine Fractal Surface...Icarus 141 – 1999

Smith D.E. et al., "The Global Topography of Mars and Implications for Surface Evolution", Science 284, p. 1495-503, May 28, 1999.

Stix, T.H. (1964). The Theory of Plasma Waves, McGraw-Hill, New York.

Ulaby P.T., Moore R.K., Fung A.K., "Microwave Remote Sensing-Active and Passive" vol.II Addison Wesley Publ. Comp. 1982

Wang J.S., Nielsen E., Faraday rotation and absorption in the Martian crustal strong magnetic field region

Wahl D.E., Eichel P.H., Ghiglia D.C., Jakowatz C.V. Jr, "Phase Gradient Autofocus Algorithm---A Robust.Tool for High Resolution SAR phase correction"

CO.RI.S.T.A – website <http://www.corista.unina.it>

MARSIS – website <http://www.marsis.com>