

SECONDA UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI
FACOLTA' DI INGEGNERIA

TESI DI LAUREA IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Titolo

*Algoritmi per la compensazione del ritardo
ionosferico sul segnale inviato dal radar Marsis*

Relatore:

Prof. M. D'Errico

Candidato

Rusciano Espedito

Matr. 071/269

Correlatore:

Prof. G. Alberti

A.A. 2005-2006

Indice

| | |
|--|----|
| Premessa | 1 |
| Capitolo primo:Il pianeta marte, la missione Mars Express ed Il radar Marsis | |
| Introduzione | 3 |
| 1.1 caratteristiche morfologiche | 4 |
| 1.2 Marte e l'acqua | 6 |
| 1.3 Dati astronomici e fisici | 9 |
| 1.4 Cenni preliminari sulla missione Mars Express | 11 |
| 1.5 La strumentazione di bordo di mars express | 13 |
| 1.6 Descrizione generale del radar MARSIS | 16 |
| 1.7 Gli Obiettivi scientifici del radar Marsis | 19 |
| 1.8 Il Radar Sounder | 21 |
| 1.9 Descrizione degli strumenti di bordo di Marsis | 23 |
| 1.10 Il sistema di antenne | 24 |
| 1.11 Sintesi delle modalità di funzionamento | 26 |
| 1.12 Modalità di indagine sottosuperficiale | 28 |
| 1.13 Il processing di bordo di Marsis | 32 |
| 1.14 Il processing a terra dei dati provenienti da Marsis | 33 |
| 1.15 cenni sul radarSharad | 34 |
| 1.16 Parametri di progetto di Marsis e comparazione quelli del il radar Sharad | 37 |
| Capitolo secondo: La ionosfera marziana | |
| 2.1 considerazioni generali sul concetto di ionosfera | 39 |
| 2.2 I modelli ionosferici marziani | 40 |

| | |
|--|----|
| 2.2.a introduzione | 40 |
| 2.3 Effetti della propagazione nella ionosfera | 42 |
| 2.3.a Valutazione rigorosa della distorsione di fase | 42 |
| 2.3.b trattazione semplificata sulla distorsione ionosferica | 46 |
| 2.3.b.1 Il teorema della media integrale | 49 |
| 2.3.c Valutazione semplificata dell' attenuazione ionosferica | 50 |
| 2.3.d La rotazione di faraday | 52 |
| 2.3.e Modellazione del profilo della frequenza di plasma | 53 |
| 2.4 Algoritmi per la valutazione della distorsione e della attenuazione ionosferica: la sub-routine iono_model | 55 |
| 2.4.a La sub_routine iono_model | 55 |
| 2.4.b i dati ed i modelli utilizzati | 55 |
| 2.4.c descrizione della function iono_model in matlab | 57 |
| 2.4.d diagramma logico(o a blocchi) della function iono phase | 60 |
| 2.5 descrizione dell'andamento dell' andamento della frequenza di plasma, dell'attenuazione e della distorsione al variare del SZA | 63 |

Capitolo terzo: Algoritmi per la valutazione dello shift temporale

| | |
|--|----|
| Introduzione | 76 |
| 3.1 Considerazioni scientifiche | 78 |
| 3.1.b Il metodo dei minimi quadrati | 79 |
| 3.1.c Il metodo del PGA | 82 |
| 3.2 Valutazione del ritardo ionosferico: la routine Main_sim | 83 |
| 3.2.b diagramma logico(o a blocchi) della routine main_sim | 88 |
| 3.3 descrizione della sub_routine equivalent_mod_1 | 91 |
| 3.3.b diagramma logico(o a blocchi) sub_routine equivalent_mod_1 | 92 |
| 3.3.c Valutazione grafica del modello equivalente 1 | 93 |

| | |
|---|-----|
| 3.4 descrizione della sub_routine equivalent_mod_2 | 99 |
| 3.4.b diagramma di flusso del function equiv_model2 | 101 |
| 3.4.c simulazioni: valutazione grafica della Sub-routine equiv_model2 | 102 |
| 3.5 comparazione dei dati | 122 |

Capitolo quarto: I dati di Marsis ed il calcolo del ritardo ionosferico

| | |
|--|-----|
| Introduzione | 125 |
| 4.1 Considerazioni scientifiche | 125 |
| 4.2 Simulazioni ottenute per singoli frame | 126 |
| 4.2 .a cenni introduttivi | 126 |
| 4.2 .b simulazioni | 128 |
| Conclusioni | 157 |
| Appendice | 158 |
| Bibliografia | 162 |

Premessa

Il seguente lavoro di tesi, realizzato in collaborazione con il consorzio di ricerca Co.Ri.S.T.A., consiste nello sviluppo di un software, implementato nel linguaggio di calcolo MatLab®, che si inserisce ed integra nel ben più ampio sviluppo della missione, dell'Agenzia Spaziale Europea, denominata MARS EXPRESS. Tale missione ha come target principale il pianeta Marte ed in particolare è indirizzata alla ricerca dell'acqua su di esso

Lo scopo primario che mi prefiggo è quello di risolvere una serie di problemi legati alla lettura delle immagini, e più in generale dei dati, acquisiti da uno specifico strumento di bordo della sonda Mars Express, ovvero il radar M.A.R.S.I.S. (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding). Tale strumento è stato sviluppato principalmente dall'Università La Sapienza di Roma, sotto la responsabilità del professore Giovanni Picardi, mentre il consorzio di ricerca Co.Ri.S.T.A. è il responsabile del segmento di terra del radar.

Come mostreremo nel seguito i dati ricevuti da Marsis, ricchi di preziose informazioni sulle caratteristiche del pianeta, sono fortemente disturbati dal passaggio attraverso la ionosfera del pianeta marziana. Tale disturbo si traduce nell'impossibilità di trarre informazioni utili e quindi di poter realizzare l'obiettivo primario della missione: la ricerca dell'acqua.

In particolare nel presente lavoro realizzerò un ulteriore sviluppo del software usato per il trattamento a terra dei dati provenienti da Marsis, elaborando procedure atte a migliorare la qualità delle informazioni che giungono a terra, in modo da ottenere informazioni preziose sulle zone sotto-superficiali del pianeta Marte e allo stesso tempo sulla conformazione della sua ionosfera.

Allo stato attuale, seppur esistono numerosi software che hanno migliorato notevolmente la qualità delle informazioni provenienti da MARSIS, non esiste ancora nessuna procedura che sia in grado di calcolare, o meglio stimare, lo shift temporale che subisce il segnale per effetto della

ionosfera marziana ed è per questo che nel seguente elaborato verrà prima analizzato e poi risolto tale problema in modo da migliorare ulteriormente la qualità delle informazioni raccolte.

Il presente lavoro è stato sviluppato interamente nel linguaggio di calcolo MatLab®, ed è suddiviso in due parti fondamentali: nella prima comprendente il primo ed il secondo capitolo verranno fornite le informazioni fondamentali che riguardano il pianeta marte, la missione considerata (MARS EXPRESS), i suoi obiettivi e gli eventuali problemi legati all'utilizzo del radar MARSIS. Nella seconda parte focalizzeremo l'attenzione sul problema che si intende risolvere. Nello specifico verranno descritti i software usati per il trattamento a terra dei dati e verrà fornita una procedura che permetterà di calcolare il ritardo che subisce il segnale quando attraversa la ionosfera marziana. Infine verranno mostrati i risultati di una serie di simulazioni, atte a dimostrare l'efficacia del software realizzato nel trattamento dei dati.

Capitolo I

Il pianeta Marte, la missione Mars Express ed Il radar Marsis

Introduzione

Il seguente lavoro di tesi si integra nell'ambito della missione dell'Agencia Spaziale Europea e dell'Agencia Spaziale Italiana denominata Mars Express, focalizzando l'attenzione su un particolare strumento di bordo: il radar MARSIS. Ci occuperemo dei problemi connessi alla trasmissione dei segnali inviati da tale radar ed in particolare focalizzeremo l'attenzione sui problemi legati all'interazione con la ionosfera marziana, elaborando procedure atte a migliorare la qualità del segnale proveniente da tale radar.

Tenendo conto che in esso sono contenute informazioni sulla superficie marziana e ,più in generale,sul pianeta Marte si è ritenuto dedicare questo capitolo ad una sommaria, seppur efficace, descrizione dell'ambiente marziano.

A tal proposito verranno fornite nozioni sulle caratteristiche morfologiche ed astronomiche del pianeta ,mentre ci soffermeremo sullo studio della ionosfera marziana, essendo quest'ultima il vero punto di partenza dell'elaborato presentato. Verranno fornite e descritte le equazioni che si utilizzeranno per modellarla, non solo ai fini di una sua comprensione



Immagine 1.1: Marte, ripresa a colori del telescopio spaziale Hubble.. nell'immagine si vedono i poli e le ampie formazioni di nebbia alle alte

approfondita, ma soprattutto allo scopo di utilizzarli direttamente nella risoluzione dei problemi che affliggono i nostri segnali radar.

1.1 caratteristiche morfologiche

In ordine di distanza dal sole Marte rappresenta il quarto pianeta del Sistema Solare, il successivo rispetto alla Terra. È visibile ad occhio nudo, può essere osservato in qualsiasi posizione del cielo ed ha l'aspetto di una stella di colore rosa-rossastro. Per le proprietà topografiche simili al nostro pianeta è definito un pianeta terrestre, inoltre anche le caratteristiche orbitali sono molto simili alla Terra (ad esempio il periodo di rotazione intorno al proprio asse è poco più di 24 ore).

Queste similitudini con la Terra e altro ancora lo hanno reso quello più ricco di fascino per le future esplorazioni e anche per la creazione di insediamenti umani in un futuro non troppo remoto.

L'escursioni termiche superficiali variano tra 140°K di una notte

invernale ai 300°K di un mezzogiorno estivo. 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: si passa

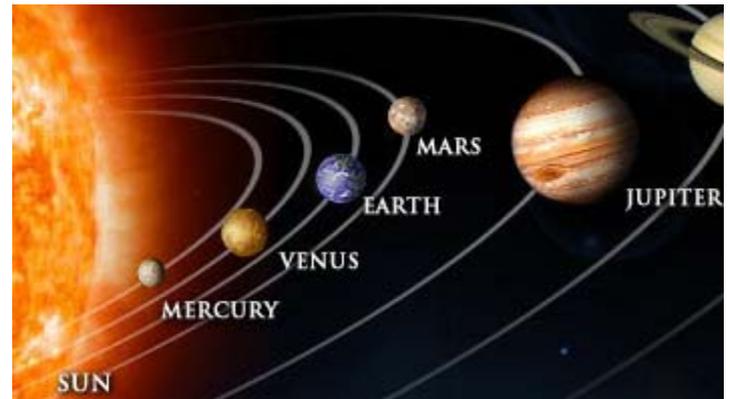


Immagine1.2: orbita di marte. Questa figura evidenzia la posizione di marte all'interno del sistema solare(fonte JPL/NASA)

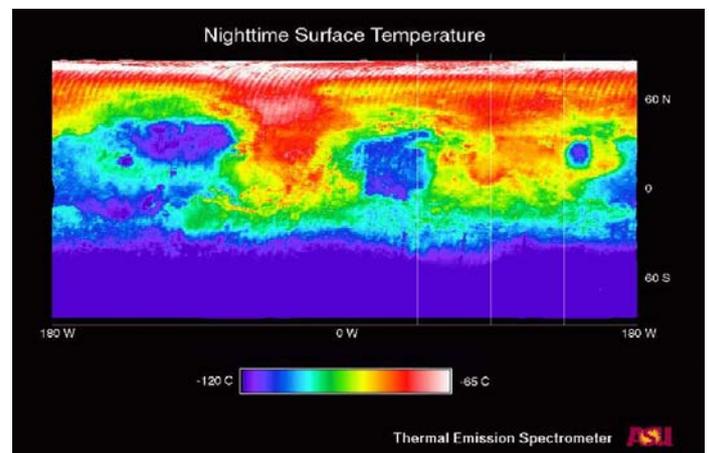


Immagine 1.3: rilevazioni termiche durante la notte marziana: si evidenzia una differenza di circa cinquanta gradi tra l'emisfero meridionale e quello settentrionale.(fonte NASA)

da regioni desertiche, a pianure vulcaniche fino a raggiungere zone ricche di crateri. Su larga scala, la superficie è caratterizzata dalla cosiddetta Dicotomia Marziana: l'emisfero nord è coperto da pianure e depositi sedimentari, dove si può notare una scarsa densità di crateri mentre quello 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 nella Fig. 1.5). 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 ,foto1.4), formano una zona che probabilmente, in un recente passato geologico, aveva un'intensa attività vulcanica.

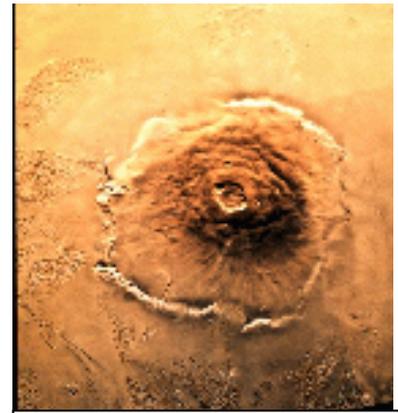


Immagine 1.4: monte olimpo: foto scattata dalla sonda viking nel 1976(fonte Nasa)

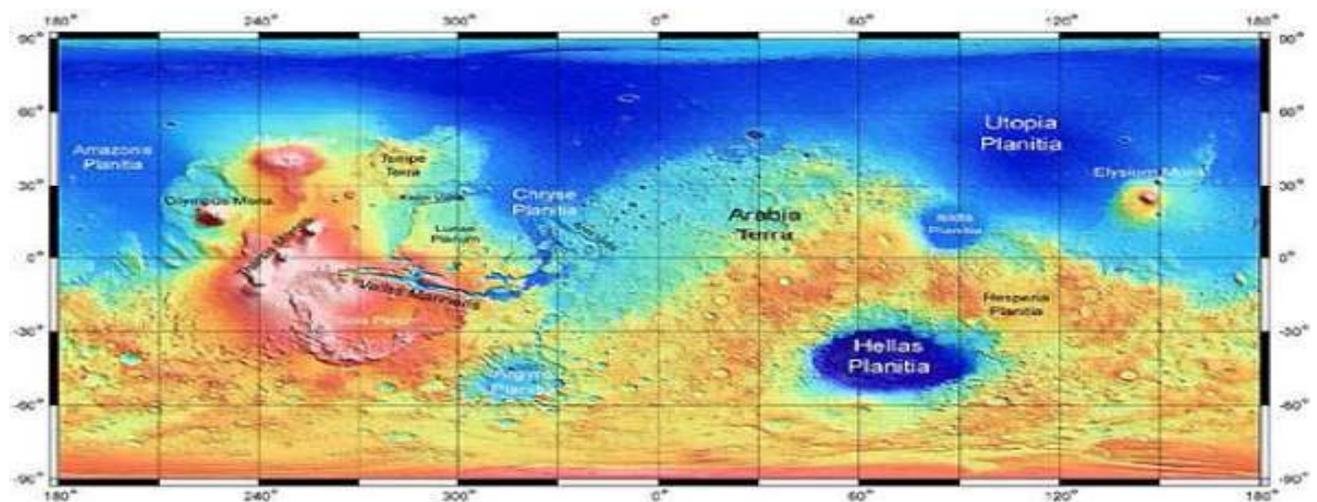


Immagine 1.5:planisfero marziano. Realizzato sfruttando i dati provenienti dal radar altimetro Mars Global Survejo. I falsi colori rappresentano le diverse quote; si va dal blu intenso per le regioni più depresse al bianco per le montagna più elevate. In particolare si nota la depressione di hellas ,che rappresenta il più grande bacino da impatto del pianeta, situato ad una quota di circa 5 chilometri sotto il livello medio del suolo. Viceversa il monte Olimpo rappresenta il punto più alto del pianeta raggiungendo una quota di circa 27 Km. In generale si nota che l'emisfero nord risulta più depresso di quello sud

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. La sua pressione media in superficie è 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 ($3.727 \text{ [m][s}^{-2}\text{]}$).

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 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.

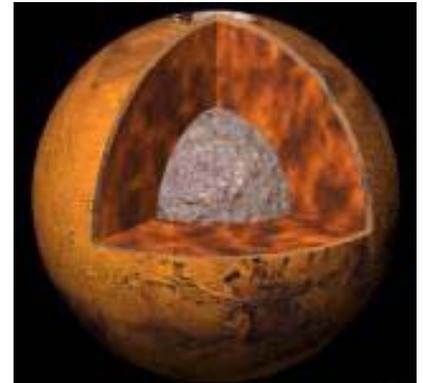


Immagine 1.6: struttura interna di marte (fonte luka80.altervista.org)

1.2 Marte e l'acqua

Oltre alla "ruggine rossa", 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



Immagine 1.7: pietra di ematite (fonte NASA)

sotterranee generano acque in pressione. I cristalli di ematite hanno un diametro medio simile a quello dei comuni granelli di sabbia (è chiamata ruggine grigia poiché sminuzzando dell'ematite fino a ridurla in polvere i suoi grani cominceranno a riflettere la tipica colorazione rossastra della ruggine).

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 potrebbe

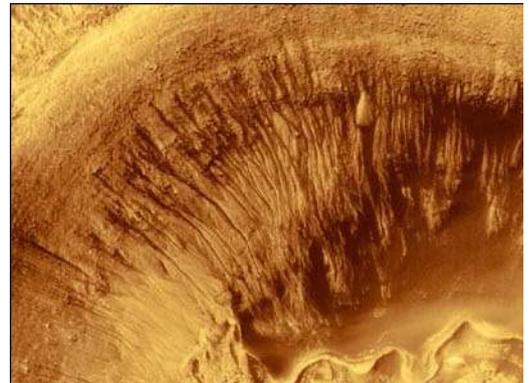


Immagine 1.8:canele di deflusso

sembrare. Il pianeta presenta molti segni di una antica presenza d'acqua che, forse, ancora oggi esiste ed è proprio la ricerca dell'acqua su Marte l'obiettivo principale che si pone la missione Mars Express.

Tra le strutture che pongono maggiori interrogativi vi sono i letti di fiumi e i grandi canali scavati dall'acqua, che indicano chiaramente imponenti cambiamenti climatici nel passato del pianeta. I sistemi più piccoli, con tanto di affluenti laterali, sono tipicamente larghi 1 o 2 km e si estendono al più per poche centinaia di chilometri. Essi si trovano più frequentemente negli altopiani dell'emisfero sud. I più lunghi sono Ma'adim Vallis, Al Quahira e Nirgal Vallis, tutti compresi tra 400 e 800 km di lunghezza.

Inizialmente si pensò che le acque superficiali dovessero essere,così come avviene sulla Terra, parte di un ciclo di piogge ed evaporazione. In realtà, ci si rese poi conto che, alle basse temperature del pianeta, l'acqua doveva essere ghiacciata e probabilmente intrappolata nel terreno, formando una crosta superficiale dura nota come "permafrost". Il fiume era perciò un corso d'acqua temporaneo, dovuto allo scioglimento



Immagine 1.9: Ma'adim Vallis(fonte Arnaud et Florent Creux)

locale dei ghiacci, provocato da impatti o da attività vulcanica.

I canali si formarono probabilmente in seguito a eventi catastrofici che fecero scorrere sulla superficie del pianeta, a più riprese, immani masse d'acqua. Infatti, anche se la pressione atmosferica su Marte è molto bassa, e l'acqua tende a bollire ed evaporare istantaneamente, essa sarebbe stata comunque in grado di percorrere grandi distanze prima di evaporare. Inoltre, nell'antica storia del pianeta, probabilmente l'atmosfera era costituita da una massa di gas molto maggiore e anche ricca di ossigeno. Poco alla volta quest'ultimo si legò alle rocce, ossidandole e conferendo loro il color ruggine che oggi conosciamo, e l'acqua si infiltrò nel terreno irregolare. In superficie le temperature erano basse, perciò si formò il permafrost ghiacciato; in profondità, forse vari chilometri al di sotto della superficie, il calore fu sufficiente a mantenere l'acqua allo stato liquido.

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. 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

HEMATITE DISTRIBUTION MAP FROM TES DATA

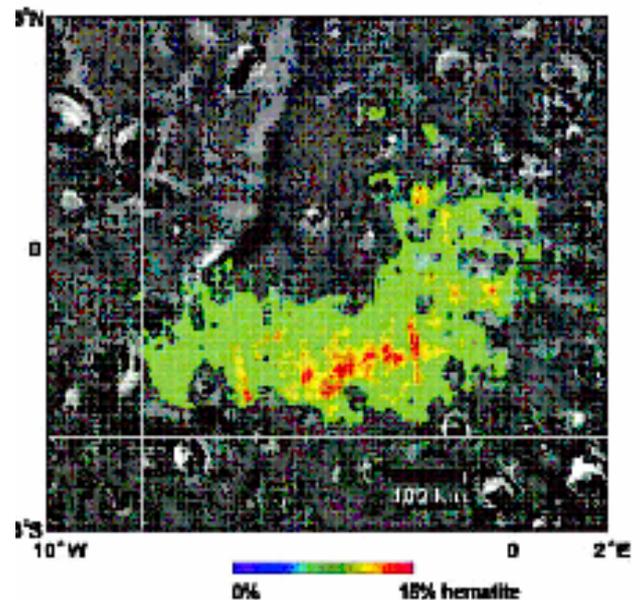


Immagine 1.10 concentrazione di ematite nella zona del sinus meridiani

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.

1.3 Dati astronomici e fisici

Marte è il quarto pianeta del sistema solare in ordine di distanza dal Sole.

Il periodo orbitale di Marte è di circa 687 giorni (1,88 anni), con un periodo di rotazione di 24h e 37min. Presenta un'orbita leggermente ellittica con eccentricità pari a 0.0934 ed è inclinata rispetto al piano dell'eclittica di circa $1,85^\circ$.

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. 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. °. La velocità media orbitale è di 24.13 [Km][s-1]. Il suo diametro è di 6787 km all'equatore, con uno schiacciamento di 0,009; la massa è 0,107 volte quella



Immagine 1.11. dimensioni della terra e di marte a confronto (fonte © IAC)

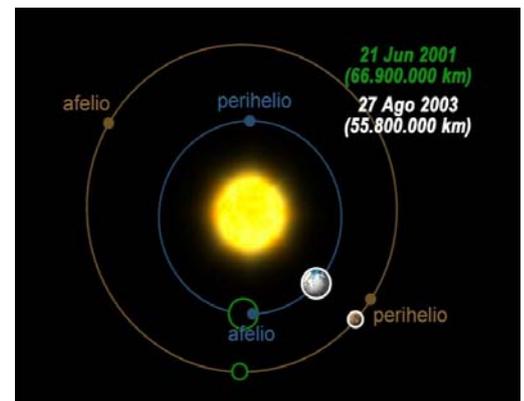


Immagine 1.12. orbita marziana. (fonte © IAC)

della Terra, l'accelerazione di gravità superficiale è solo il 38% di quella terrestre e la velocità di fuga $5,0 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

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: $19 \times 21 \times 27 \text{ km}$ e $11 \times 12 \times 15 \text{ km}$) e furono scoperti nel 1877 dall'americano A. Hall. Hanno



Immagine 1.13; satellite phobos (fonte NASA)

periodo di rotazione attorno al pianeta di $7\text{h}39'$ e $30\text{h}17'$ 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 $13,5 \times 10,8 \times 9,4 \text{ km}$, mentre la sua massa è di 10.800 miliardi di tonnellate ($1,08 \cdot 10^{19} \text{ g}$) 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 $7,5 \times 6,1 \times 5,5 \text{ km}$. 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.



Immagine 1.14 satellite deimos
(fonte www.celestiamotherlode.net)

1.4 Cenni preliminari sulla missione Mars Express

Il seguente lavoro di tesi si integra nell'ambito della missione dell'Agenzia Spaziale Europea e dell'Agenzia Spaziale Italiana denominata Mars Express, focalizzando l'attenzione su un particolare strumento di bordo: il radar MARSIS. Nello specifico forniremo procedure atte a migliorare la qualità del segnale proveniente da tale radar.

Mars Express è la prima missione dell'Agenzia Spaziale Europea verso un altro pianeta del Sistema Solare. Molti degli strumenti di bordo sono la copia di degli strumenti persi durante la fallita missione Russa Mars96 del 1996. Durante quella missione i paesi europei avevano fornito la maggior parte delle



Immagine 1.15: lancio della sonda Mars Express(Fonte ESA)

apparecchiature scientifiche e avevano parzialmente finanziato la missione. Il progetto di Mars Express è basato sul progetto della sonda Rosetta, e alcune soluzioni tecnologiche sono derivate dalla missione Venus Express. Questo riuso delle precedenti conoscenze ha consentito la progettazione e lo sviluppo della sonda in tempi molto ridotti, da cui il nome MarsExpress, e con un ridotto utilizzo di risorse. Inoltre l'utilizzo di tecnologie già collaudate ha innalzato l'affidabilità della sonda. La sonda è stata lanciata il 2 giugno 2003 da un lanciatore Soyuz – Fregat nella base di lancio di Baikonur in Kazakistan e, dopo aver compiuto un viaggio lungo sette mesi, dal 25 dicembre 2003 si trova nell'orbita di Marte.

È composta dal modulo Mars Express Orbiter e dal lander Beagle 2 ma purtroppo quest'ultimo una volta sganciato sulla superficie marziana, dopo ripetuti tentativi di comunicazione, è stato dichiarato perso il 6 febbraio 2004 dal centro di controllo del rover.

L'obiettivo scientifico della missione è studiare l'atmosfera, la geologia e la struttura del pianeta, con particolare attenzione alla ricerca di acqua nascosta sotto la superficie. Inoltre la sonda potrà 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. La comunità scientifica internazionale è

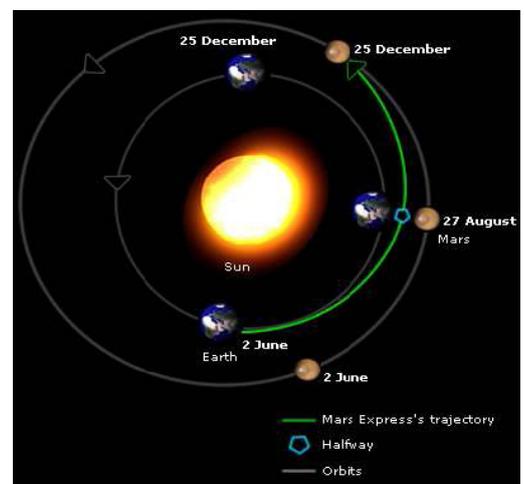


Immagine 1.16:orbita scelta per raggiungere l'atmosfera marziana(fonte www.astro.cz)

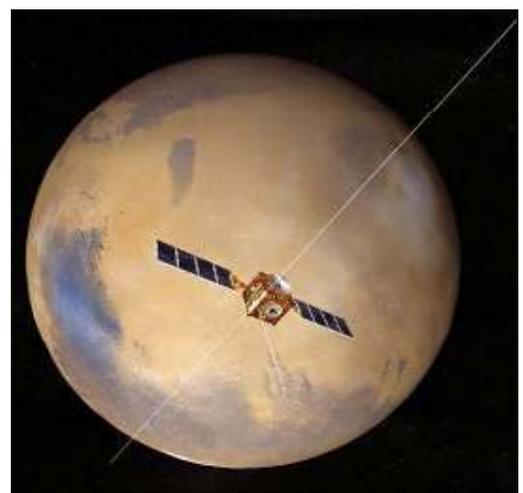


Immagine 1.17 rappresentazione dell'orbita descritta da Marsis attorno a Marte(fonte ESA)

impegnata in un enorme sforzo collettivo per la conoscenza del pianeta rosso essendo quest'ultimo l'unico pianeta del sistema solare sul quale vi è la probabilità di trovare una qualche forma di vita, passata o addirittura presente, e di conseguenza per cui valga la pena di ipotizzare una futura esplorazione o colonizzazione umana.

In questa ottica gioca un ruolo cruciale l'Italia grazie al suo radar MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding), che eseguirà una mappa della distribuzione dell'acqua, sia solida sia liquida, nella parte superiore della crosta marziana. È stato progettato e realizzato da ASI in collaborazione con la NASA e senza ombra di dubbio si può affermare che Marsis rappresenta il fiore all'occhiello della intera missione essendo il più innovativo e importante. Sfruttando le sue potenzialità si cercherà di localizzare strati dalle differenti caratteristiche e tipologie, inclusi come detto quelli di acqua e ghiaccio, per diversi km al di sotto della crosta marziana. In questo modo si riuscirà a determinare con estrema precisione la composizione e le quantità d'elementi presenti nell'atmosfera, sulla superficie e nel sottosuolo marziano. Tutto ciò in particolare permetterà di sapere se e quanta acqua sia presente sul pianeta rosso ed è proprio in questa ottica che gli strumenti di bordo di Mars Express, escluse poche eccezioni, sono complementari gli uni agli altri in questa ricerca indispensabile per le future esplorazioni con equipaggi umani.

1.5 La strumentazione di bordo di Mars Express

Prima di passare ad una analisi dettagliata del radar Marsis, lo strumento più importante anche ai fini del lavoro presentato, descriveremo brevemente gli sei strumenti di osservazione a bordo della missione Mars Express.

HRSC (High Resolution Stereo Camera):

permetterà di ottenere immagini ad altissima risoluzione della superficie e dell'atmosfera, in pratica è l'occhio del modulo Orbiter in quanto è costituito da una telecamera stereo ad alta risoluzione HRSC. Sarà in grado di riprendere a colori ed in 3D l'intero pianeta con una risoluzione di 10m. Lo strumento inoltre ha la possibilità di essere direzionato (sui tre assi del satellite) per riprendere zone selezionate ad una risoluzione inferiore ai 2 metri: consentendogli, fra l'altro, di individuare Beagle 2 sulla superficie.

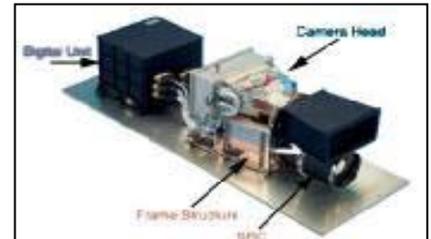


immagine 1.18:HRSC
(Fonte ESA)

OMEGA (Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer):

servirà per studiare la composizione della superficie marziana esaminando il pianeta dal punto di vista della sua ricchezza mineraria. Utilizzando una lunghezza d'onda che va dal visibile all'infrarosso (0.5- 5.2 μm), lo strumento sfrutterà il potere riflettente degli oggetti, che è diverso da minerale a minerale. In questo modo potrà individuare l'ubicazione dei giacimenti, misurando la quantità di minerali ferrosi, di carbonati e nitrati, ma anche la presenza di acqua/ghiaccio. Indicazioni secondarie sulla composizione atmosferica ci verranno fornite al ritorno delle radiazioni quando attraverseranno l'atmosfera del pianeta prima di essere ricevuta dallo strumento.

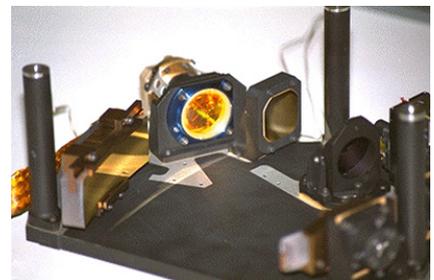


immagine 1.19: OMEGA
(fonte ESA)

SPICAM (Ultraviolet and Infrared Atmospheric Spectrometer):

utilizzando radiazioni nell'Infrarosso e nell'Ultravioletto, SPICAM sarà in grado di analizzare tutti i gas che sono presenti nell'atmosfera di Marte e in che quantità. Le analisi terranno conto dei cambiamenti stagionali determinando le variazioni nei volumi d'ozono e di vapore d'acqua presenti in atmosfera. Un sensore UV misurerà (l'eventuale) l'ozono presente (gas che assorbe luce a 250 nm), mentre un'altro agli infrarossi misurerà la quantità globale di vapore d'acqua (che assorbe la luce ad una lunghezza d'onda di 1.38 μm).

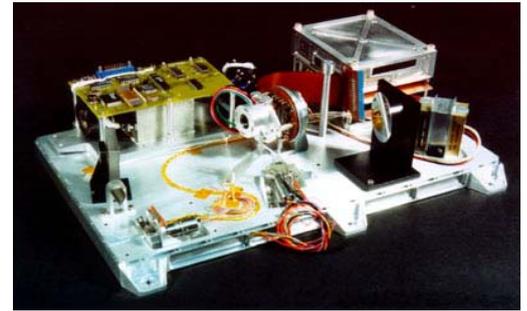


Immagine 1.20: SPICAM
(Fonte ESA)

PFS (Planetary Fourier Spectrometer):

servirà studiare la composizione dell'atmosfera misurando per la prima volta la quantità d'assorbimento della luce solare (in una fascia che va dai 1.2 - 45 μm) da parte delle molecole di gas presenti nell'atmosfera, in particolar modo gli effetti termici (emissione nell'infrarosso) legati a questi assorbimenti. Oltre a determinare con precisione il profilo verticale di temperatura e pressione del biossido di carbonio (che costituisce il 95% dell'atmosfera marziana), PFS potrà indicarci la presenza di vapore d'acqua, monossido di carbonio, metano, formaldeide ed altri componenti minori.

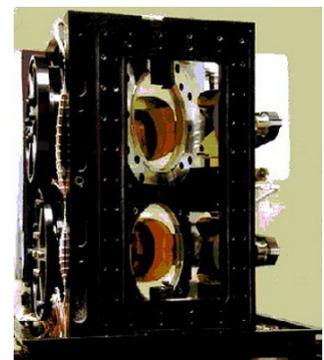


Immagine 1.21: PFS
(fonte ESA)

ASPERA (Energetic Neutral Atoms Analyser):

misurerà ioni, elettroni ed ogni altro tipo di atomi rilevabili presenti nell'atmosfera esterna di Marte. Questo strumento quindi permetterà agli scienziati di misurare l'interazione degli stessi con il vento solare ed i raggi cosmici, alla ricerca di indizi che indichino le causa del dissolvimento dell'atmosfera di Marte nello

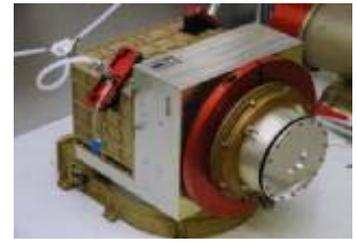


Immagine 1.22 aspera
(fonte ESA)

spazio nel corso dei milioni di anni. Infatti si pensa che la mancanza di un forte campo magnetico permetta al vento solare di disperdere nel cosmo l'atmosfera del pianeta e che sia quindi responsabile del continuo stillicidio di vapore d'acqua dal pianeta.

MaRS (Mars Radio Science Experiment):

Utilizzerà I segnali radio che Mars Express riceverà ed invierà a terra per sondare la ionosfera e atmosfera (quando la navicella si troverà nell'opportuna posizione) e forse anche superficie ed il suo interno. Le

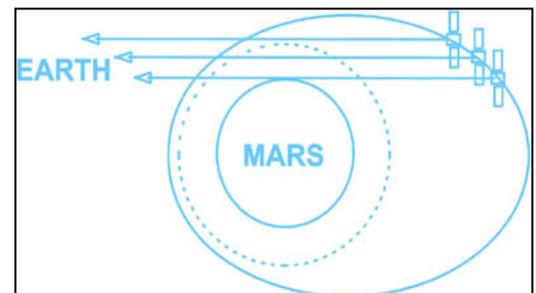


Immagine 1.23: rappresentazione
funzionamento di MaRS (fonte ESA)

informazioni dell'interno di Marte si otterranno grazie ai cambiamenti di velocità nell'orbita che il campo gravitazionale eserciterà sulla navicella, asperità superficiali potranno essere misurate analizzando i segnali di radiotrasmissione.

1.6 Descrizione generale del radar MARSIS

MARSIS(Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding) è lo strumento più innovativo fra tutti quelli presenti a bordo della sonda Mars



Immagine 1.24: vista scenografica degli
strati sottosuperficiali di marte

Express, infatti la tecnologia alla base dello strumento è stata utilizzata solo una volta prima della attuale missione ESA. Un radar simile (ma molto meno evoluto) fu infatti utilizzato da una missione Apollo per sondare la superficie lunare. Marsis è stato sviluppato principalmente dall'Università La Sapienza di Roma sotto la responsabilità del professore Giovanni Picardi (Dipartimento di Info-Com dell'Università di Roma La Sapienza), mentre il consorzio Corista, nel quale è stata realizzata tale tesi, si occupa del segmento di terra del radar. MARSIS è un radar penetrante a bassa frequenza ed è utilizzato per la prima volta in una missione planetaria. Questo strumento è in grado di cartografare, da un punto di vista geologico, l'intera struttura sub-superficiale di Marte, fino ad una profondità di alcuni chilometri, per identificare serbatoi acquiferi ed effettuare la mappa della distribuzione delle acque sotterranee marziane sotto forma liquida, solida o inglobata nel sottosuolo di Marte come *permafrost*, 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 le onde elettromagnetiche sarà possibile distinguere gli strati incontrati determinando anche il tipo di terreno o di rocce incontrate, permettendo in questo modo agli scienziati di 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 distorte.

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.

Le prestazioni saranno limitate da 2 fattori principali, e cioè gli echi dovuti al “**clutter**” superficiale, dove con il termine 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)

con una forma d'onda trasmessa modulata linearmente in frequenza (impulso chirp);

L'uso di frequenze più basse equivale a trasmettere un impulso con una lunghezza d'onda maggiore($f=c/\lambda$), a cui corrisponde una migliore capacità di

penetrazione. Ciò dovrebbe indurre a preferire l'uso delle bande centrate a 1,8 MHz e 3 MHz , ma come vedremo tale uso sarà limitato dall'interazione con la ionosfera marziana.

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 e 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 ed inviati a terra per essere ulteriormente trattati e raffinati.

1.7 Gli Obiettivi scientifici del radar Marsis

Gli obiettivi scientifici perseguiti dal radar MARSIS sono in pratica gli stessi della missione Mars Express di cui esso è parte integrante ed è in considerazione di questi obiettivi 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 e che già sono stati introdotti nel paragrafo precedente: 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.

1.8 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 daremo 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 ed è questo il motivo per cui non sempre sono utilizzabili tutte le bande a disposizione di marsis. Ciò implica che di giorno solo le 2 bande di frequenze più alte (4 MHz e 5 MHz) saranno

utilizzate per indagare superficie e sottosuolo; la conseguenza di ciò è che la migliore penetrazione si otterrà durante la notte, quando potranno essere utilizzate tutte le bande a disposizione

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 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°, permettendo così una copertura sostanziale a tutte le latitudini

1.9 Descrizione degli strumenti di bordo di Marsis

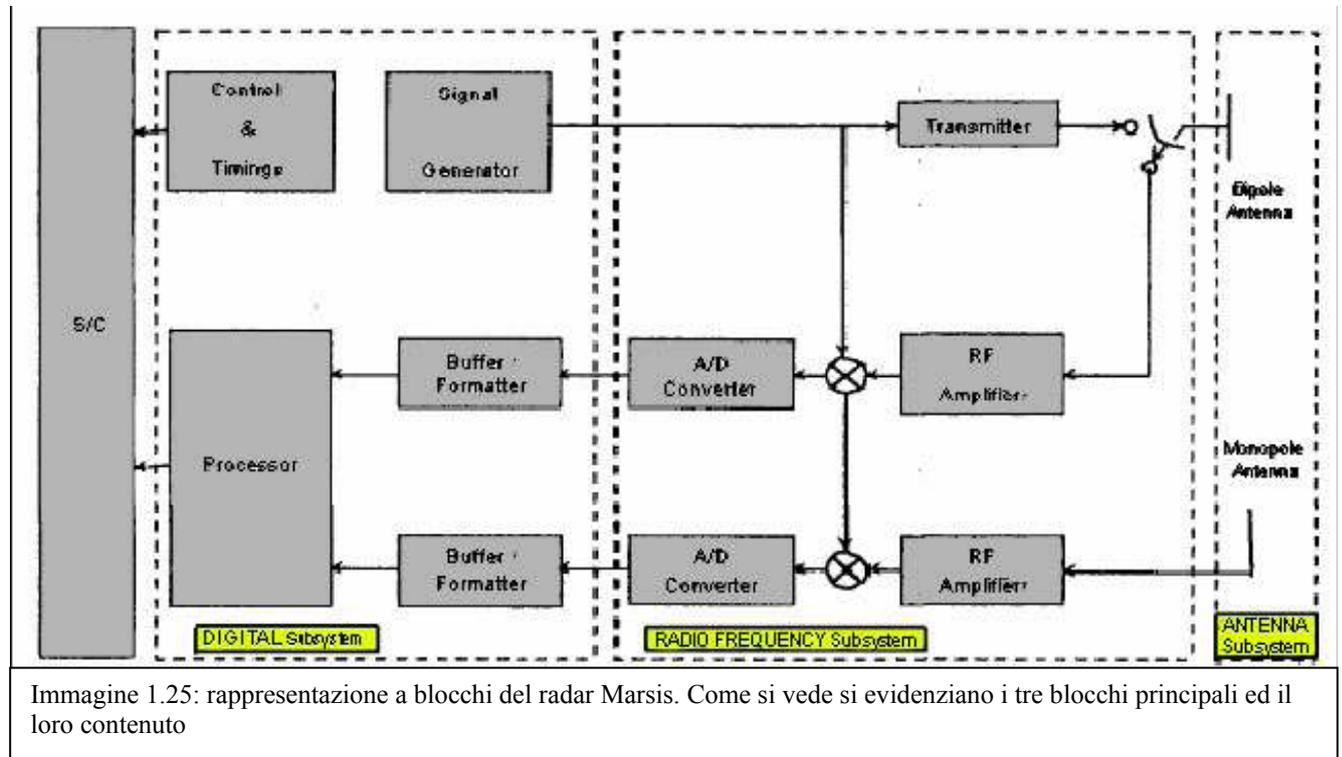
MARSIS è costituito da due apparati elettronici separati e da due antenne montate su Mars Express Orbiter.

Da un punto di vista funzionale la strumentazione può essere suddivisa in tre sottosistemi separati:

- 1) 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;
- 2) 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;
- 3) il sottosistema elettronico digitale (DES), che include il generatore di segnale, e unità di timing e di controllo e l'unità di processing.

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.

1.10 Il sistema di antenne

La soluzione scelta per le due **antenne** (dipolo e monopolo) che equipaggiano il radar è davvero particolare. Le antenne principali di MARSIS sono alloggiate 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

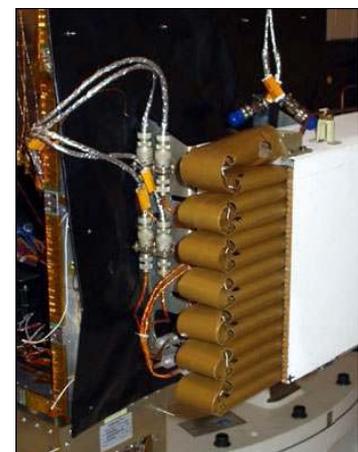


Immagine 1.26 antenna principale marsis(fonte www02.wdr.de)

pericoloso per la stabilità del satellite. Le simulazioni computerizzate effettuate 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 che avrebbero potuto compromettere il successo della missione e che hanno portato ad un ritardo nell’avanzamento della missione di circa un anno. Infatti inizialmente il dispiegamento era previsto ad aprile del 2004 ,mentre in realtà lo si è completato a giugno 2005.

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.

In fase di progetto del satellite si è optati per un sistema composto da due antenne in modo tale che le informazioni raccolte dalle due antenne possano essere confrontate e si possa ottenere una informazione il meno corrotta possibile.

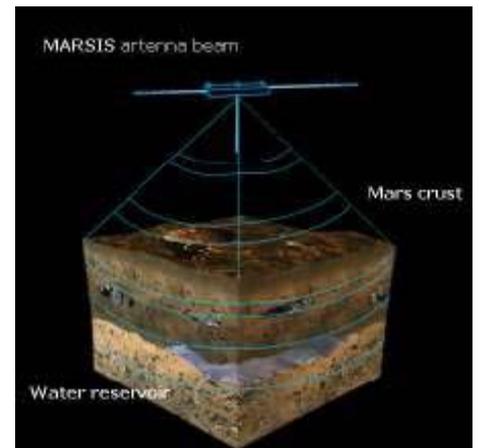


Immagine1.27 rappresentazione scenografica del segnale inviato da Marsis(fonte ESA)

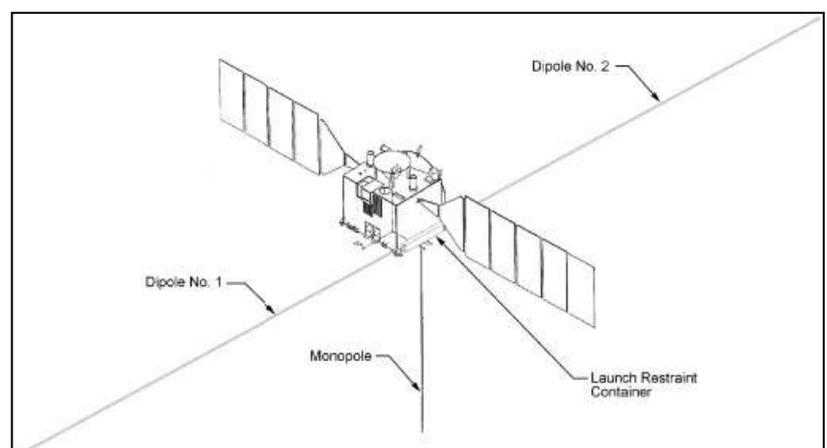


Immagine 1.28 rappresentazione delle antenne di dipolo e monopolo

1.11 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'Electronica 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

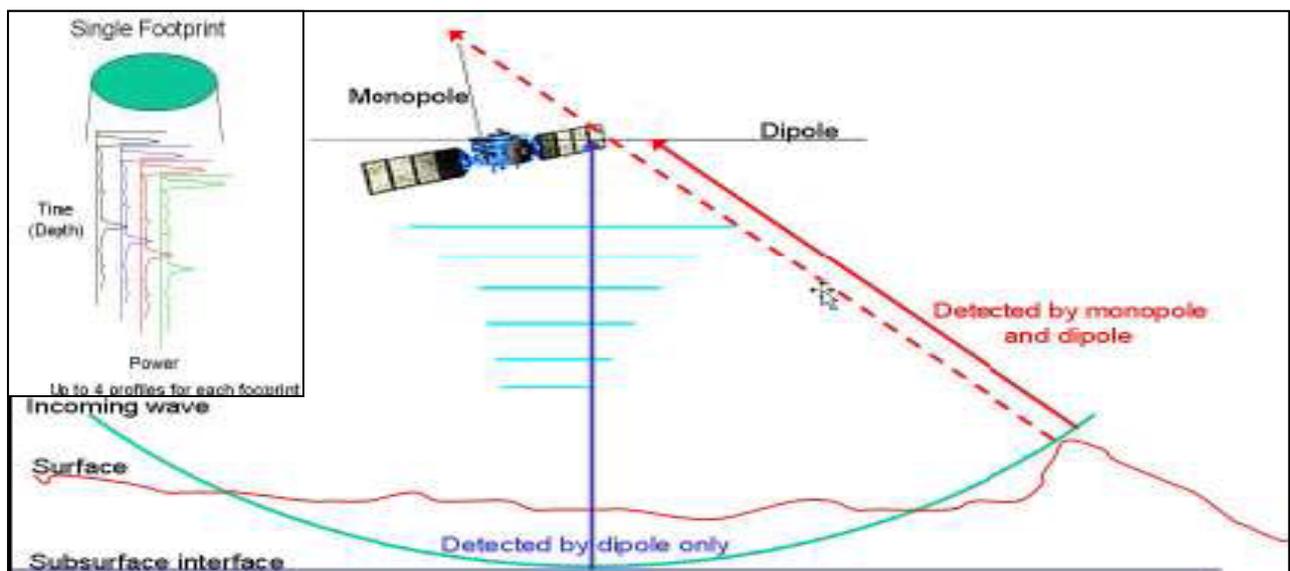


Immagine 1.28 rappresentazione della modalità di indagine delle due antenne di marsis

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.

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

- 1) Calibrazione
- 2) Indagine sottosuperficiale
- 3) Indagine Ionosferica attiva
- 4) 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.

1.12 Modalità di indagine sottosuperficiale

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

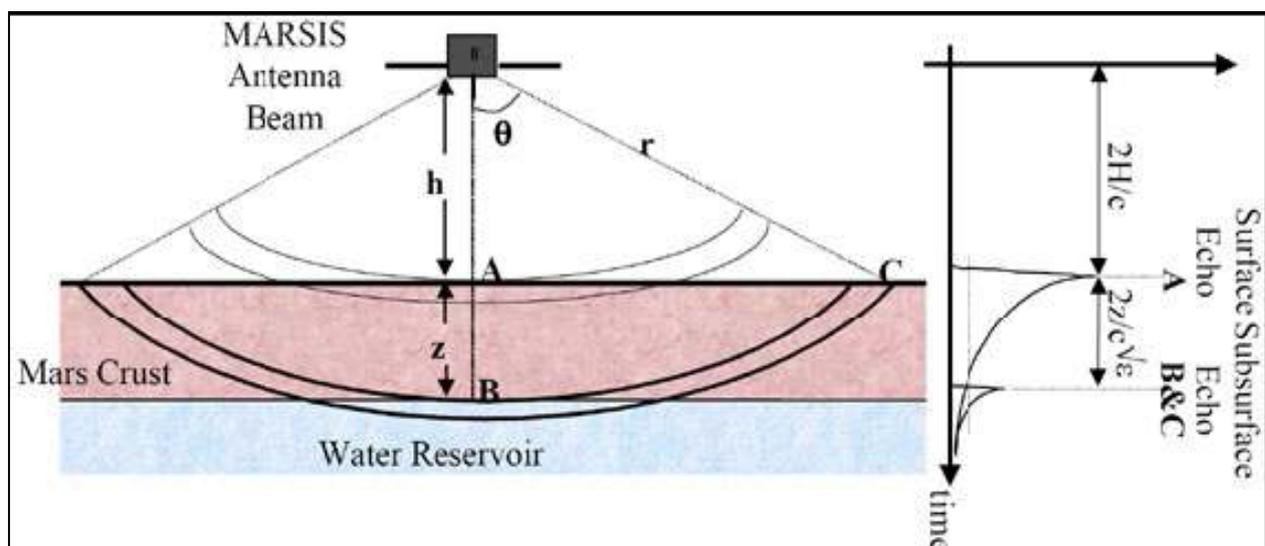


Immagine 1.29. geometria di osservazione sottosuperficiale

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 piatte, in quanto la legge di backscattering angolare imporrà a tali riflessioni laterali un'attenuazione molto alta, tuttavia la maggior parte delle superfici naturali non sono affatto piatte e quindi gli echi legati al clutter superficiale possono essere molto 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 vadano 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.

Come detto prima, 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.

1.13 Il processing di bordo di Marsis

Come tutti i radar ,Marsis, tramite le sue antenne di dipolo e monopolo, invia un segnale ossia un onda elettromagnetica modulata linearmente in frequenza e riceve delle eco del segnale inviato. Quest'ultime(dati grezzi o di livello 1A) dopo essere state convertite in formato digitale vengono inviate al computer di bordo che li trasforma in profili sottosuperficiali(dati di livello 1B) adatti ad essere trasmessi a terra.

I campioni digitalizzati hanno un data rate dell'ordine dei Mbit/s e quindi sarebbe impossibile inviarli direttamente a terra senza un opportuno trattamento a bordo della sonda . Per tale ragione il computer di bordo esegue una forte riduzione dei dati di bordo operando, a seconda delle modalità operative,attraverso i seguenti passi.

- 1) Doppler (Azimuth) Processing /Integrazione Coerente
- 2)Range Processing
- 3)Integrazione MultiLook Incoerente
- 4)Compressione dei Dati

in questo modo si passa ad un data rate che va dai 16 a 80 Kbit/s.

Oltre alla riduzione dei dati, l'algoritmo di processing a bordo ha lo scopo di conseguire le desiderate prestazioni, in termini di profondità e risoluzione spaziale, e massimizzare i rapporti segnale rumore (SNR) e segnale clutter (SCR) sotto le varie condizioni operative. Un compito supplementare è la stima dei parametri necessari per la calibrazione della distorsione e dispersione;

Infine, il processore ha un modulo capace di predire alcuni parametri orbitali, quali altezza orbitale, velocità tangenziale e radiale che sono richiesti in tempo reale per l'esecuzione del processing e del timing.

1.14 Il processing a terra dei dati provenienti da Marsis

Il processing a terra dei dati di MARSIS è organizzato in diversi “livelli”, vale a dire diversi passi nell’elaborazione del segnale ricevuto al fine di estrarre da esso le informazioni scientifiche ricercate. A riguardo, diciamo che si distinguono tre tipologie di dati:

- a) Livello 1B o EDRs (Experiment Data Records)
- b) Livello 2 o RDRs (Reduced Data Records)
- c) Livello 3 o DDRs (Derivated Data Records)

Nel livello 1B sono contenuti, nello standard PDS, tutti i dati prodotti dallo strumento Marsis (dati sottosuperficiali, dati di indagine ionosferica attiva e passiva,...) ricostruiti a partire dalla telemetria scientifica (Livello 1A o dati grezzi), e correlati da informazioni aggiuntive (chiamati dati ausiliari o ancillari) necessarie a referenziare correttamente le osservazioni nello spazio e tempo nonché a ottimizzare le successive elaborazioni.

Inoltre, il livello 1B contiene altre telemetrie, stavolta del satellite, che possono essere sempre significative per la calibrazione e il processing a terra, come la posizione del satellite, la velocità radiale e tangenziale, la quota, assetto,....., ma che non possono essere derivate dai soli dati Marsis. Tali dati vanno sotto il nome di dati geometrici.

Nel processing di livello 1B i dati della telemetria, ancora nella forma di pacchetti frame di trasferimento organizzati per contatti, vengono puliti, unificati e ordinati nel tempo. Questo significa che ad esempio essi vengono editati per rimuovere le duplicazioni o allungati con zeri per i pacchetti mancanti e organizzati per orbite; all’interno di ciascuna orbita poi i dati sono classificati per modalità e stato operativo e tipologia di dati: nessun altro tipo di processing è applicato ai dati. Infatti una delle finalità del processing di

livello 1B è quello di alterare e manipolare i dati il meno possibili per evitare rischi di introdurre errori ma nello stesso tempo includendo tutte le necessarie informazioni da tutte le fonti significative. Infine i dati sono già in una forma scientificamente utile, vale a dire si presentano in genere come spettri individuali; questi dati però sono ancora non calibrati.

Il Tool in grado di convertire i dati dal livello 1A a livello 1B è detto Deformatting & Level 1B Tool.

Il processing di livello 2 può essere schematizzato nei seguenti passi:

Decompressione dei dati)

- a) decompressione dei dati
- b) Compensazione della distorsione di fase ionosferica
- c) Compressione in range
- d) Calibrazione
- e) Correzione AGC
- f) MultiLooking

In particolare il seguente elaborato prevedrà una serie di procedure atte a completare la fase (b) del livello 2 introducendo gli algoritmi necessari alla compensazione del ritardo ionosferico

1.15 cenni sul radar Sharad

Il Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) è una sonda spaziale polifunzionale della NASA lanciata il 12 agosto 2005 che si trova in orbita bassa marziana il cui scopo è quello di realizzare una mappa globale del pianeta nel visibile e vicino IR e l'osservazione ad altissima risoluzione (0,3 m) di aree limitate nell'ottico, al fine di selezionare le zone di atterraggio più idonee, per l'eventuale presenza di acqua e di vita, per le future missioni.

Su MRO volerà uno strumento italiano, SHARAD, SHAllow (poco profondo) RADar e che può essere considerato il successore del radar MARSIS. Diversamente da quest'ultimo che può evidenziare la presenza di grandi giacimenti di acqua o ghiacci fino alla profondità di 4 o 5 chilometri, SHARAD può vedere "solo" fino ad un chilometro sotto la superficie ma è in grado di scoprirne anche piccole quantità. Infatti le più recenti osservazioni effettuate dai satelliti al momento operanti intorno a Marte evidenziano la possibilità che ci sia presenza di ghiacci, eventualmente sotto forma di Permafrost (il terreno permanentemente ghiacciato che caratterizza anche alcune zone della Terra. Infatti obiettivo di SHARAD è anche misurare lo spessore delle calotte polari così da consentire la valutazione della riserva di acqua in esse presenti.

Questo radar lavorerà con una larghezza di banda di 10MHz (da 15 a 25 MHz) e fornirà una mappatura dei primi strati superficiali di Marte con una risoluzione verticale compresa tra i 10 ed i 20 metri, una risoluzione orizzontale along-track compresa tra i 300 ed i 1000 metri e, grazie all'orbita favorevole di MRO, una risoluzione orizzontale cross-track inferiore ai 7000 metri. L'antenna sarà un dipolo della lunghezza di dieci metri ed un peso limitatissimo (meno di un chilo).

In questo modo saranno garantite le prestazioni in termini di risoluzione e profondità di penetrazione adeguate agli obiettivi scientifici della missione.

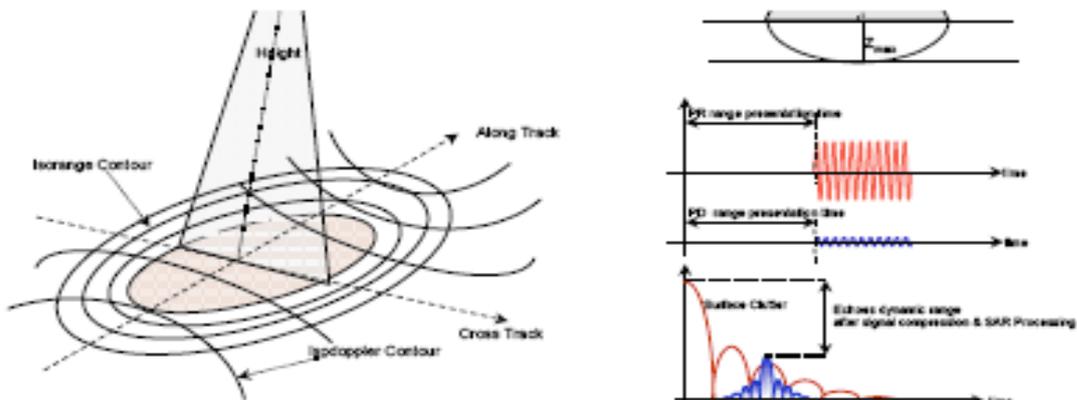
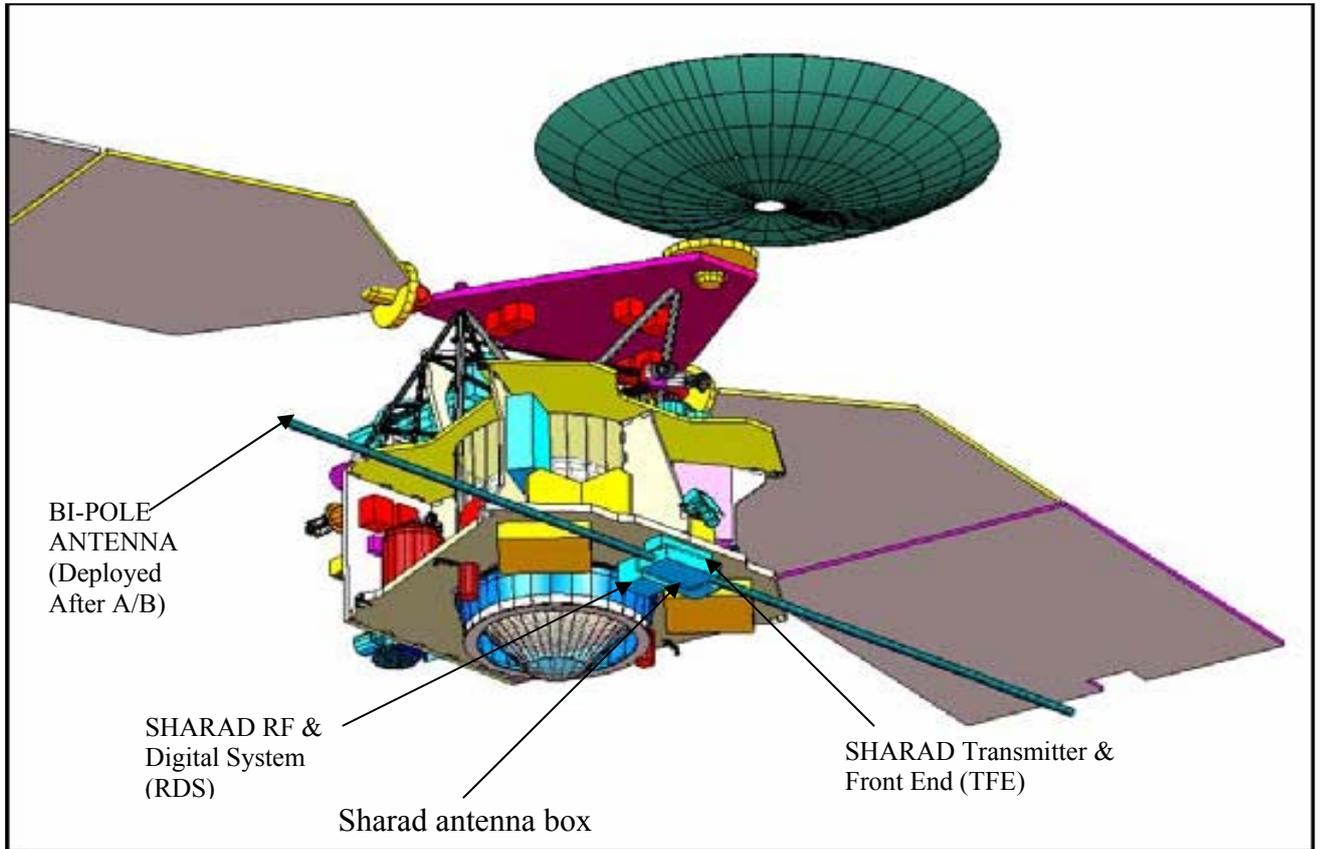


Figura 1.30: radar sharad, ed il segnale inviato

1.16 Parametri di progetto di Marsis e comparazione con quelli del radar Sharad

La seguente tabella elenca i principali parametri operativi di MARSIS per la modalità di indagine sottosuperficiale:

| Modalità di indagine sottosuperficiale | | |
|---|--|------------------------|
| Parametro | Valore | Unità di misura |
| Frequenze Portanti | 1.8 | MHz |
| | 3.0 | MHz |
| | 4.0 | MHz |
| | 5.0 | MHz |
| Ampiezza di Banda | 1.0 | MHz |
| Potenza irradiata | 1.5 Band 1 5.0 Band 2 5.0 Band 3 5.0 Band 4 | Watt |
| Durata dell'Impulso Trasmesso | 250 | microsec. |
| PRF ₆ | 130 | impulsi/sec. |
| Prodotto Tempo-Banda (BT) | 250 | |
| Chirp rate | 4 | KHz/□s |
| Quota minima | 250 | Km |
| Quota Massima per Indagine Sottosuperficiale | 800 | Km |
| Durata della Finestra di ricezione per Canale | 350 | microsec. |
| Frequenza di Campionamento del DAC | 2.8 | MHz |
| Tipologia di DAC | 8 | Bit |
| Numero di Canali Processati | 4 (max) | |
| Numero Massimo di frequenze Simultanee | 2 | |
| Guadagno di Irradiazione | 2.1 | dB |
| Lunghezza di ciascun Elemento Dipolo | 20 | metri |
| Lunghezza dell'Antenna Monopolo | 7 | metri |
| Data-Rate in Uscita | 18 (min) 75 (max) | kbps |
| Volume dati giornaliero | 285 (max) | Mbit/day |
| Massa | 17 | kg |
| Power (max inclusi i margini) | 64.5 | Watt |
| Risoluzione in Azimuth | 5-9 | Km |
| Risoluzione in Range | 10-30 | Km |
| Profondità di Penetrazione | 5 | Km |

La seguente tabella elenca i principali parametri operativi per la modalità di indagine ionosferica :

| Modalità di Indagine Ionosferica | | |
|---|---------------|------------------------|
| Parametro | Valore | Unità di misura |
| Frequenza di Partenza | 100 | KHz |
| Frequenza Finale | 5.4 | MHz |
| Numero di Frequenze | 160 | |
| Durata dell'Impulso Trasmesso | 91.43 | microsec. |
| Step in Frequenza | 10.937 | KHz |
| PRF | 125 | impulsi/sec. |
| Durata di uno sweep di frequenza | 7.38 | secondi |
| Quota Massima per Indagine Ionosferica | 1200 | Km |
| Risoluzione Verticale | 15 | Km |
| Passo di Campionamento Spaziale | 30 | Km |

La seguente tabella elenca i principali parametri orbitali di MARS EXPRESS:

| Parametri Orbitali di Progetto | | |
|---------------------------------------|---------------|------------------------|
| Parametro | Valore | Unità di misura |
| Quota di Perigeo | 250 | Km |
| Quota di Apogeo | 10'142 | Km |
| Inclinazione Orbitale | 86,35 | Gradi |
| Periodo Orbitale | 6.75 | Ore |
| Eccentricità | 0.6 | |
| Velocità Tangenziale di Perigeo | 4.0 | Km/s |

Le principali caratteristiche dei due radar sounding sono riassunte nella tabella seguente.

| Caratteristica | MARSIS | SHARAD |
|--|------------------------------|------------------------------|
| Intervallo di frequenze | 1.3-5.5 MHz | 15-25 MHz |
| Risoluzione verticale | ~70 m (ampiezza banda 1 MHz) | ~7 m (ampiezza banda 10 MHz) |
| Profondità di penetrazione | ~0.5 km fino a ~5 km | ~0.1 fino a 1 km |
| Risoluzione orizzontale (along track x across track) | 5-9 km x 10-30 km | 0.3-1 km x 3-7 km |

Capitolo II

La ionosfera marziana

2.1 considerazioni generali sul concetto di ionosfera

Come premesso il nostro studio focalizzerà l'attenzione sulla ionosfera marziana e sugli effetti che esso produce sul segnale inviato dal radar MARSIS. Per tale motivo si è ritenuto opportuno fornire delle informazioni di carattere generale sul concetto di ionosfera .

La ionosfera è quella parte dell'alta atmosfera 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. Essa è parte integrante dell'atmosfera neutra, e la sua formazione è legata al continuo scambio di energia , oltre che di materia con lo spazio circostante. 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.. 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. Essa dipende, inoltre, dalla latitudine geografica, ed, infine, dal campo magnetico.

Accanto alle variazioni suddette, meglio conosciute come variazioni regolari, vi sono le cosiddette variazioni irregolari, o disturbi ionosferici. Le cause a monte di questi disturbi sono molteplici, senza dubbio però tutte fanno capo all'interazione tra la ionosfera e le particelle di origine esterna al pianeta considerato, prevalentemente solare, che penetrano nell'atmosfera. L'indagine e lo studio della ionosfera è nato dal grande interesse suscitato dalle applicazioni scientifiche e tecnologiche basate sulla riflessione delle onde radio. Il progresso scientifico ha, poi, permesso che tale studio potesse essere approfondito tramite misure effettuate da satelliti e da missili, oltre che mediante le misure già disponibili da stazioni poste a terra.

Da ciò si deduce che la ionosfera di Marte (come pure quella terrestre) costituisce un forte ostacolo nella trasmissione di segnali elettromagnetici in quanto il plasma, di cui è composta, interagisce con essi alterandoli fortemente. Il risultato di tale alterazione è una distorsione della fase del segnale, una attenuazione dello stesso e un ritardo temporale e ciò 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 il calcolo dello shift temporale presentati nel capitolo terzo.

2.2 I modelli ionosferici marziani

2.2.a introduzione

Come appena detto la ionosfera è una regione in cui sono presenti ioni ed elettroni liberi in quantità tale da modificare la propagazione delle onde radio

ad alta frequenza che la attraversano. Il flusso di elettroni e di conseguenza il plasma (o la frequenza di plasma) costituente la ionosfera variano con la quota considerata. In particolare recenti studi hanno dimostrato che l'andamento della densità di elettroni cresce rapidamente al crescere della quota fino a raggiungere un massimo, localizzato tra 100-150 Km, e poi decrescere continuando ad

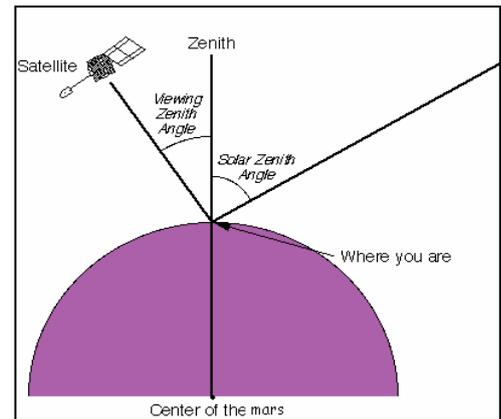


Immagine 2.1 significato geometrico del SZA

umentare la quota. Inoltre il valore della frequenza di plasma massima e l'effetto che questa ha su un'onda elettromagnetica sarà funzione del flusso solare e quindi sarà dipendente dal valore dello Zenith Sun Angle (l'angolo di elevazione del Sole che mi definisce le condizioni di illuminazione(giorno/notte)), in quanto la densità di elettroni liberi è fortemente influenzata dalla radiazione solare ed è questa la ragione per cui i disturbi ionosferici sono particolarmente gravosi di giorno rendendo impossibile l'uso delle bande inferiori ai 3 MHz.

In accordo con la figura è possibile affermare che:

- 1) di giorno la $f_{p,max}$ non sarà superiore a 3-4 MHz
- 2) di notte la $f_{p,max}$ non sarà superiore a 0.8-1 MHz

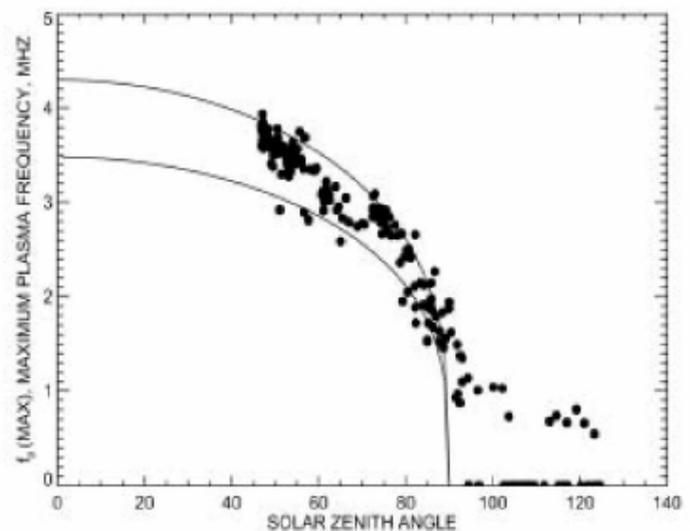


Fig:2.2 andamento della frequenza di plasma al variare del SZA. Confronto tra i valori reali e quelli stimati dal metodo gamma.

2.3 Effetti della propagazione nella ionosfera

Gli effetti che la ionosfera produce sul segnale proveniente da Marte sono:

- 1) Dispersione dell'onda radio
- 2) Attenuazione dell'onda radio
- 3) Rotazione di Faraday

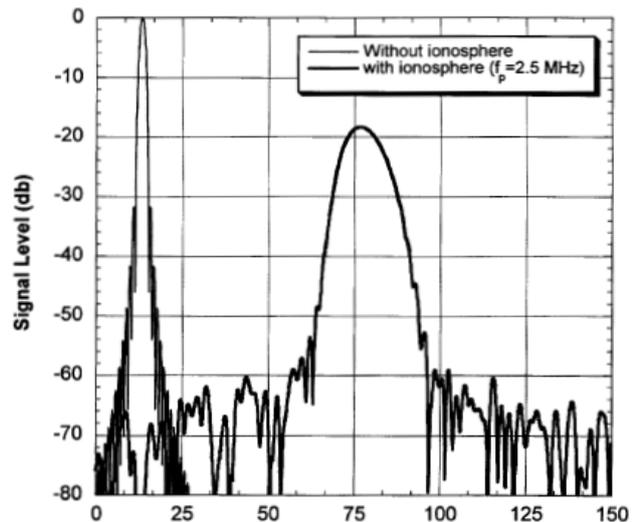


Fig. 2.3 confronto tra il segnale immerso nella ionosfera e quello nello spazio libero

2.3.a Valutazione rigorosa della distorsione di fase

La distorsione subita dal segnale a causa della ionosfera, così come l'attenuazione, sono legati al fatto che essa ha un indice di rifrazione complesso. In particolare la seconda è legata alla collisione tra elettroni dell'onde elettromagnetiche e ioni della superficie attraversata (ionosfera), mentre la distorsione del segnale è legata alla dipendenza della parte reale dell'indice di rifrazione complesso n_c , della ionosfera dalla frequenza di trasmissione.

La dispersione, se non compensata, incide sulla risoluzione verticale del radar per colpa dell'allargamento dell'impulso radar compresso e il sollevamento dei lobi laterali e induce un ritardo temporale al segnale.

In questo paragrafo cercheremo di ricavare una espressione matematica che descriva la sua variazione in funzione della frequenza di trasmissione.

Un'onda elettromagnetica che attraversa un mezzo dispersivo di indice di rifrazione n_c si propaga con una velocità di fase o gruppo espressa secondo la relazione:

$$v_\phi = \frac{c}{\text{real}(n_c)} \quad (4)$$

dove c (velocità della luce) rappresenta la velocità dell'onda in spazio libero ed n_c è l'indice di rifrazione complesso che dipende dalla frequenza. L'effetto della propagazione attraverso questo mezzo è che il segnale di ritorno subirà una distorsione che ora andremo a valutare.

La differenza di fase tra due punti di un percorso,immersi nella ionosfera, separati da una distanza Δl è data da:

$$\Delta\phi = \frac{-2\pi}{\lambda} \cdot \Delta l = -2\pi \cdot f \cdot \frac{\Delta l}{v_\phi} \quad (5)$$

dove $\lambda = (v_\phi / f)$ è la lunghezza d'onda nel mezzo ed f la frequenza radio.

Integrando lungo il percorso di propagazione tra il satellite e la superficie marziana di andata e ritorno, L , si ricava il seguente incremento di fase per il segnale :

$$\phi = -2\pi \cdot f \cdot \int_L \frac{dl}{v_\phi} \quad (6)$$

A causa dell'elevata velocità di propagazione il segnale subisce un'insignificante curvatura lungo il percorso di integrazione per cui quest'ultimo è assimilabile ad un percorso rettilineo e è uguale a due volte la distanza satellite-superficie marziana, H .

Per tali considerazione la relazione precedente diviene:

$$\phi = -4\pi \cdot f \cdot \int_0^H \frac{dh}{v_\phi} \quad (7)$$

sostituendo la velocità di campo con la sua espressione (4) in funzione dell'indice di rifrazione e tenendo conto che quest'ultimo dipende dalla frequenza radio possiamo ottenere , per un particolare percorso radar , l'espressione della fase del segnale al variare della frequenza:

$$\phi(f) = -4\pi \cdot f \cdot \int_0^H \frac{dh}{v_\phi(f)} = -4\pi \cdot \frac{f}{c} \int_0^H \text{real}[n_c(f)] dh \quad (9)$$

inoltre poiché nel caso di spazio libero $n_c=1$ la fase del segnale è:

$$\phi_0(f) = -4\pi \cdot \frac{f}{c} \cdot \int_0^H dh \quad (10)$$

l'incremento addizionale rispetto allo spazio libero è dato da:

$$\Delta\Phi(f) = \phi(f) - \phi_0 = -4\pi \cdot \frac{f}{c} \cdot \int_0^H (\text{real}[n_c(f)] - 1) dh \quad (11)$$

Valutando questa formula si nota che la distorsione di fase può essere calcolata solo se si conosce l'espressione dell'indice di rifrazione al variare della frequenza di trasmissione: abbiamo quindi bisogno di una relazione che espliciti tale dipendenza.

In base alla teoria della propagazione delle onde radio nei mezzi dispersivi l'indice di rifrazione , n_c , di un gas ionizzato in funzione della frequenza può essere espresso come:

$$n_c = n - ip = \sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0}} \quad (12)$$

dove p , parte immaginaria di n_c è detto coefficiente di assorbimento, ε è la parte reale della permittività relativa, σ la conduttività specifica ed infine ε_0 la permittività nello spazio libero ($8.854 \cdot 10^{-12}$ (F/m)) ed ω è la pulsazione radio dell'onda trasmessa.

Ricordando che sussistono le seguenti relazioni per σ ed ε di un gas ionizzato:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \quad (13) \qquad \sigma = \varepsilon_0 \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \cdot \nu \quad (14)$$

nella quale con ω_p e ν rappresentano la frequenza di plasma e la frequenza media di collisione tra elettroni e particelle neutre, si ottiene da semplici passaggi la seguente:

$$n^2 = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right) - i \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega(\omega^2 + \nu^2)} \quad (15)$$

Risolvendo la equazione complessa (12) si giunge alla seguente espressione per n:

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon}\right)^2} + 1 \right]} \quad (16)$$

Per ciò che riguarda il calcolo della frequenza di plasma si può adottare una equazione del tipo:

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q^2}{\varepsilon_0 \cdot m_e} \cdot n_e} \quad (17)$$

dove n_e rappresenta la densità del numero di elettroni in cm^3 , q è la carica dell'elettrone ($1.6022 \cdot 10^{-19} [\text{C}]$) ed m_e è la massa dell'elettrone ($9.110 \cdot 10^{-31} [\text{Kg}]$). Da cui, dopo semplici sostituzioni si ricava che:

$$f_p (\text{Hz}) = \frac{\omega_p}{2\pi} = 8.98 \cdot 10^3 \sqrt{n_e} \quad (18)$$

Per ciò che attiene al calcolo della frequenza di collisione potrebbero essere usate le formule ideate dal melnik e parrot(1982):

$$\nu (\text{Hz}) = 2.12 \cdot 10^{-16} N_n T_e^{1/2} \quad (19)$$

o da Schunk e Nagy(1980):

$$\nu(Hz) = 3.68 \cdot 10^{-14} N_{CO_2} \cdot [1 + 4.1 \cdot 10^{-11} \cdot |4500 - T_e|^{2.93}] \quad (20)$$

in cui la prima espressione si basa sulla conoscenza del valore della densità delle particelle neutre N_n (m^{-3}), mentre la seconda sulla conoscenza della densità del diossido di carbonio N_{CO_2} (m^{-3}), ed inoltre entrambe le formule dipendono dalla temperatura elettronica T_e . L'andamento della frequenza di collisione al variare della quota che si ottiene applicando queste formula è mostrato nella figura lato:

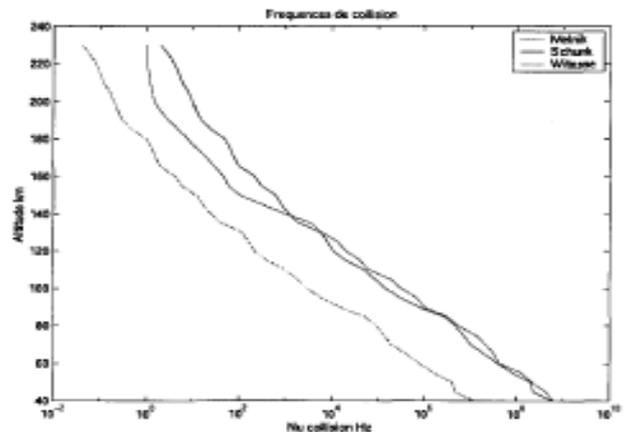


Fig. 2.4 andamento della frequenza media di collisione al variare della quota secondo le teorie di Shunk e Nagy

2.3.b trattazione semplificata sulla distorsione ionosferica

Non avendo a disposizione di tutti i dati necessari per l'applicazione di tali formule è possibile utilizzare delle formule che presentano un maggior grado di approssimazione e che mi permettono di ottenere delle formule notevolmente più semplici, ma allo stesso tempo che non si discostano molto dalla realtà.

Ad esempio con riferimento all'articolo "MARSIS: Operational Planning and Commanding Requirements", si può sfruttare, per il calcolo della frequenza di collisione, una formula approssimata del tipo:

$$\nu(h) \cong 10^{\frac{195-h(Km)}{17}} \quad [Hz] \quad (21)$$

la quale mi fornisce dei dati compatibili con quelli reali, per le quote di interesse, così come mostrato in figura:

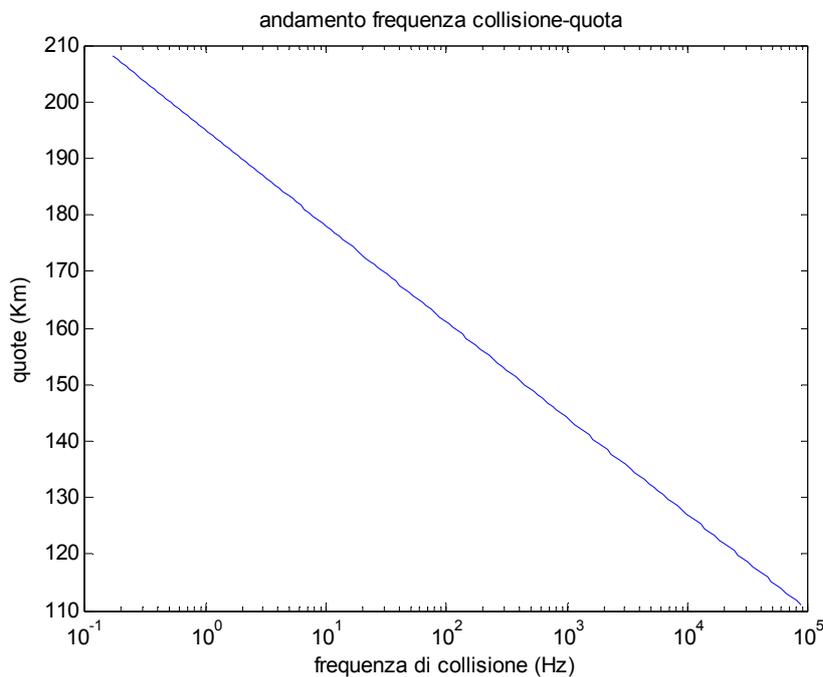


figura 2.5: andamento della frequenza media di collisione secondo l'equazione 21

Inoltre è possibile, sotto determinate ipotesi, giungere ad una espressione notevolmente semplificata dell'indice di rifrazione:

Nell'ipotesi in cui la quantità $\left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}\right)^2 \ll 1$ dalla (14) si ricava che

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}} \quad (22)$$

e quest'ultima nell'ipotesi che $\nu \ll \omega_p$ (confronta fig 2.4 con le distribuzioni della frequenza di plasma al variare della quota mostrate nel paragrafo finale dedicato alle simulazioni) diventa

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2} \quad (23)$$

Per cui sostituendo la (23) nella (11) si ricava 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 dipendente dal profilo della frequenza di plasma f_p incontrato può essere espresso in funzione della frequenza f come:

$$\Delta\phi(f, f_p(h)) = -\frac{4\pi}{c} f \int_0^H \left[\sqrt{1 - \left(\frac{f_p(h)}{f} \right)^2} - 1 \right] dh \quad (24)$$

tale procedura di compensazione ionosferica richiederebbe la conoscenza del profilo ionosferico attraversato per la sua integrazione.

Tuttavia, per semplificare la complessità della formula e tenendo presente che non risulta possibile, attraverso una procedura ai minimi quadrati¹, stimare una relazione integrale, avvalendoci della il teorema della media integrale si giunge ad una formula analitica del tipo

$$\Delta\phi_{EQ}(f, f_{p,eq}(h)) = -\frac{4\pi L_{eq}}{c} \cdot f \left(\sqrt{1 - \left(\frac{f_{p,eq}}{f} \right)^2} - 1 \right) = -2\pi\tau_0 \left(\sqrt{f^2 - f_{p,eq}^2} - f \right) \quad (25)$$

dove L_{eq} è lo spessore dello strato ionosferico ovvero lo spessore della sola zona lungo il percorso attraversato in cui risulta non nulla f_p e quindi l'integrale (25), ed τ_0 , pari a $2L_{eq}/c$, rappresenta il tempo che impiega l'onda radio ad attraversare la ionosfera se fosse spazio libero. La (25) esprime il cosiddetto "modello equivalente bidimensionale" o "modello uniforme" che si basa sulla introduzione di una frequenza di plasma equivalente ed uno spessore dello strato ionosferico equivalente.

¹ I minimi quadrati saranno trattati e discussi nel capitolo successivo.

Si può introdurre anche una versione mono-dimensionale semplificata 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:

$$\Delta\varphi_{EQ}(f) = -2\pi\tau_{0,m} \left(\sqrt{f^2 - f_{p,eq}^2} - f \right) \quad (26)$$

2.3.b.1 Il teorema della media integrale

Il teorema della media integrale utilizzato per introdurre il modello equivalente bidimensionale mette in relazione le nozioni di integrale e di funzione continua per le funzioni di una variabile reale.

Il concetto di media integrale è una generalizzazione dell'idea di media aritmetica. L'idea è quella di calcolare il *valore medio* assunto da una funzione su un intervallo $[a,b]$ calcolando la media aritmetica dei valori che la funzione assume su un insieme finito (molto grande) di punti distribuiti *uniformemente* nell'intervallo, cioè si suddivide l'intervallo in N intervalli

$[x_k, x_{k+1}]$ tutti di lunghezza $\frac{b-a}{N}$ e si calcola la media:

$$\frac{f(x_0) + f(x_1) + \dots + f(x_N)}{N}, \quad (27)$$

questa può essere scritta anche come

$$\frac{1}{b-a} \sum_{i=0}^N \frac{b-a}{N} f(x_i), \quad (28)$$

ora dalla definizione di integrale di Riemann abbiamo che considerando quantità N sempre maggiori di punti questa media convergerà al valore

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx, \quad (29)$$

che viene chiamato media integrale di f .

Sappiamo che una funzione continua f definita su un intervallo ha come

immagine ancora un intervallo, ed è ragionevole aspettarsi che la media integrale di f sia un valore incluso nell'intervallo immagine. Questo è esattamente ciò che stabilisce il teorema della media integrale:

Teorema: Teorema della media integrale

Se $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ è continua allora esiste $c \in [a, b]$ tale che

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx = f(c) \quad (30)$$

.

2.3.c Valutazione semplificata dell' attenuazione ionosferica

In aggiunta alla dispersione, la ionosfera come detto attenuerà anche l'onda radio. Per il calcolo dell'attenuazione si possono scegliere due strade:

nella prima che fa riferimento all'articolo di "Distortions of the Low Frequency Signal by Martian Ionosphere at Vertical Propagation" si tiene conto che l'attenuazione del segnale è legata al coefficiente di assorbimento, p , che può essere calcolato come:

$$p = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon} \right)^2} - 1 \right] \quad (31)$$

da cui si ricava l'attenuazione come segue:

$$\alpha(f, f_p, \nu) = 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \int_0^H p dh \quad (32)$$

Una seconda tecnica per il calcolo del livello d'attenuazione tiene conto che esso dipende dalla densità elettronica n_e della ionosfera, dalla forma del suo profilo e dalla frequenza ν di collisione elettronica-neutrale che fa riferimento

all'articolo " Impact of Mars Ionosphere on Orbital Radar Sounder Operation and Data Processing " e sfrutta le seguente formula:

$$\alpha(\text{db/km}) = \frac{10000 \log_{10}(e)}{c} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \cdot \frac{2\omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right)^{0,25} \cdot \frac{\nu \omega_p}{\omega^2 + \nu^2 - \omega_p^2} \quad (33)$$

che rappresenta l'attenuazione al variare della quota e che poi verrà integrata tra gli estremi della ionosfera per ottenere l'attenuazione globale.

Il livello d'attenuazione in dB per unità di frequenza e altezza dello strato, ossia l'espressione di sopra, può essere semplificata nel caso in cui $f_p \ll f_0$ giungendo ad una formula del tipo:

$$\alpha(h, f) = 4,61 \cdot 10^4 \frac{\nu(h)}{(2\pi f)^2 + (\nu(h))^2} n_e(h) \left[\text{dB/km/el/cm}^{-3} \right] \quad (34)$$

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

$$\alpha(h, f) = 4,61 \cdot 10^4 \frac{\nu(h)}{(2\pi f)^2} n_e(h) \left[\text{dB/km/el/cm}^{-3} \right] \quad (35)$$

Per cui :

$$\alpha(f) = 4,61 \cdot 10^4 \frac{1}{(2\pi f)^2} \int_0^H n_e(h) \nu(h) dh \left[\text{dB/km/el/cm}^{-3} \right] \quad (36)$$

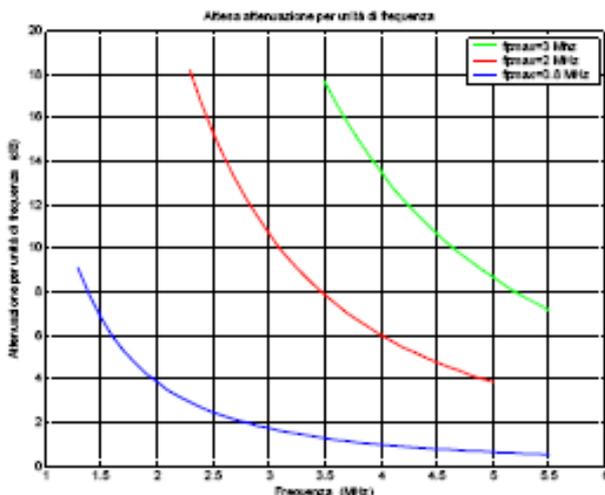


Fig 2. 6 attenuazione subita dal segnale, per effetto della ionosfera , al variare della $f_{p,max}$

2.3.d La rotazione di faraday

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:

$$\Psi = 2.36 \cdot 10^4 \frac{1}{f^2} \int_0^H (n_e(z) B_n \cos \theta \sec \varphi) dz \quad (37)$$

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:

$$\Psi = 2.36 \cdot 10^4 \frac{\langle B_n \rangle}{f^2} \int_{h_0}^h n_e(z) dz \cong 2.36 \cdot 10^4 \frac{\langle B_n \rangle}{f^2} TEC \quad (38)$$

dove l'integrale di n_e lungo lo strato è stato sostituito col TEC (contenuto elettronico totale)

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%

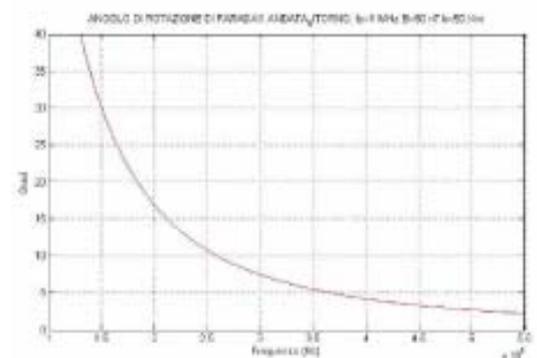


Immagine 2.7: rotazione di faraday

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 può assumere 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:

$$A_{FAR,dB} = 20 \log_{10}(\cos 2\Psi) \quad (39)$$

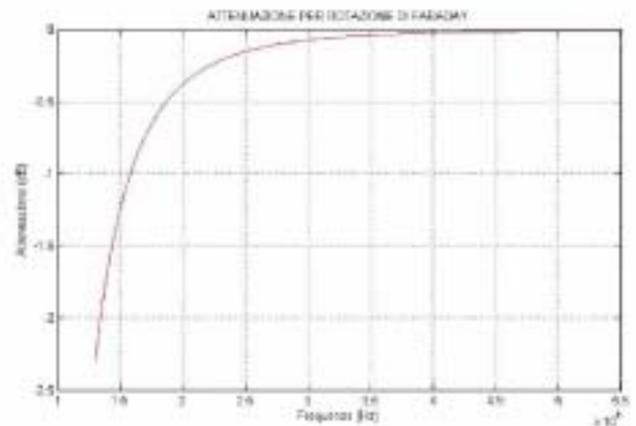


Immagine 2.17: attenuazione di Faraday

Nelle nostre simulazione non si è considerato il contributo alla attenuazione dovuto alla rotazione di Faraday.

2.3.e Modellazione del profilo della frequenza di plasma

In mancanza di dati reali, 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 si suppone:

$$f_p(z) = f_{p,max} \frac{z - h_0}{b} e^{1 - \frac{z - h_0}{b}} \delta_{-1}(z - h_0) \quad (40)$$

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 :

$$n_{e,max} = 1,55 \cdot 10^5 \cdot \exp(0.36 \cdot \ln(\frac{F}{100})) \cdot (\cos(SZA))^{0.57} \quad [el / cm^3]$$

(41)

$$f_{p,max} = 8.98 \cdot 10^3 \sqrt{n_{e,max}} \quad [Hz] \quad (42)$$

dove F è la densità del flusso solare il cui valore medio può essere assunto pari a 100ev/m³ 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:

$$f_0 \geq f_{p,max} + \frac{f_{p,max}}{3} \quad (43)$$

Con questi dati, si derivano le figure

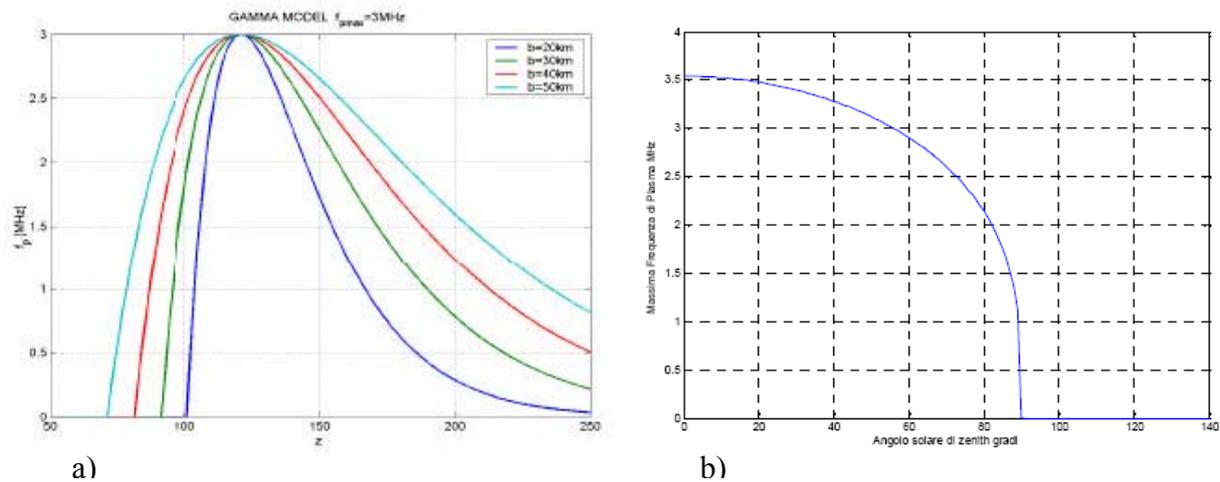


Immagine 2.15. nelle due immagini si mostra l'andamento della frequenza di plasma in funzione della quota(a) e l'andamento della frequenza massima di plasma in funzione del SZA(b)

2.4 Algoritmi per la valutazione della distorsione e della attenuazione ionosferica: la sub-routine iono_model

2.4.a La sub_routine iono_model

La procedura denominata `iono_model` è in grado di calcolare la distorsione di fase e l'attenuazione che subisce il segnale inviato dal radar MARSIS passando attraverso la ionosfera marziana, a partire dalla quale ricaveremo nel capitolo successivo lo shift temporale e quindi il termine lineare c_1 , dell'errore di fase.

Prima di presentare il testo in matlab metteremo in risalto gli aspetti scientifici alla base della stessa.

2.4.b I dati ed i modelli utilizzati

La procedura sfrutterà i modelli descritti nei paragrafi, i quali seppur validi scientificamente, non hanno trovato una applicazione pratica e quindi mai usati e implementati attraverso procedure nel linguaggio di calcolo MatLab®.

La sub-routine si articolerà in due blocchi principali:
il primo riguarderà l'acquisizione dei dati (quote e frequenza del plasma) necessari per calcolare gli errori mentre nel secondo blocco si passerà al calcolo vero e proprio dell'errore.

Nella sezione della sub-routine dedicata all'acquisizione dei dati verrà richiesto all'utente, attraverso una finestra di dialogo, il valore dello SZA . A seconda della scelta effettuata si procederà in due modi differenti:

per $SZA < 89.10$ verranno utilizzati dei dati ottenuti dalla missione MGS, in particolare dal radio science subsystem di tale missione. Tali dati erano contenuti in file .pds, formato tipico di una qualsiasi missione NASA, ed ogni file riguardava un'osservazione fatta ad un particolare SZA e conteneva informazioni riguardanti il numero di osservazioni fatte per uno specifico SZA, le quote di osservazione e le corrispondenti densità di elettroni ed altro.

Si è preferito , però, per una più semplice acquisizione dei dati , inglobare tutte le informazioni in un unico file .dat², e sarà proprio quest'ultimo la fonte dalla quale estrapoleremo i dati nel caso in cui $SZA < 89.10$.

Nel caso in cui l'utente scegliesse un $SZA > 89.10$, data la mancanza di dati reali, abbiamo utilizzato le equazioni fornite dal modello gamma per la ionosfera marziana e quindi per il calcolo della frequenza di plasma al variare della quota si è fatto riferimento all'equazione 1 e poiché in tale equazione è richiesta la conoscenza della frequenza di plasma massima che è funzione dell'SZA abbiamo fatto una distinzione:

nel caso in cui $89.10 < SZA < 90$, trovandoci ancora di giorno e quindi essendo ancora intensa l'attività solare, che come detto è il fattore che influenza maggiormente la densità di elettroni, non si può prescindere , nel calcolare f_{pmax} , si è tenuto conto delle formule 2 e 3

² Il nome esteso del file è From_70.96_to_89.22_step_0.1_Iono_database.dat

Da tali formule prescindiamo nel caso in cui $SZA > 90$; in questo caso trovandoci di notte ed essendo l'attività solare praticamente nulla si può utilizzare, per f_{pmax} , un valore costante e pari a $0.8e6$ senza che in alcun modo il nostro lavoro perda di significato

Conclusa la fase di acquisizione dati si passa al calcolo degli errori: l'attenuazione e la distorsione.

Per quanto riguarda il calcolo della distorsione di fase si è deciso di utilizzare la strada più rigorosa possibile e per tale ragione si è scelto di implementare l'equazione 11 .

Per il calcolo dell'attenuazione subita dal segnale attraverso un'opportuna si potranno scegliere due procedure differenti. La prima, denominata SAF, che fa riferimento all'equazione 33, che rappresenta l'attenuazione al variare della quota e che poi verrà integrata tra gli estremi della ionosfera per ottenere l'attenuazione globale, mentre la seconda sfrutta l'equazione 32 .

2.4.c descrizione della function `iono_model` in matlab

In questo sotto-paragrafo verranno descritte le stringhe di comandi usati per realizzare la sub_routine `iono_model`. Essa riceve dalla main-routine, denominata `main_sim` i valori f_{min} e f_{max} della frequenza minima e massima della banda utilizzata e della NFFT mentre restituirà i valori dell'errore di fase e dell'attenuazione in funzione della frequenza che subisce il segnale e l'andamento della frequenza di plasma in funzione della quota.

Inizialmente la procedura richiede all'utente di selezionare il file `From_70.96_to_89.22_step_0.1_iono_database.dat`, contenete i dati relativi alla densità di elettroni e alle quote fino ad $SZA=89,10$:

Con il comando `uigetfile` si aprirà una finestra di dialogo permettendomi di selezionare un file la cui estensione è `.dat`, dopodiché si immetterà in `filename` il nome del file selezionato ed in `pathname` il suo percorso.

Successivamente tramite il comando `strcat` si concatena il contenuto di `pathname` con quello di `filename`: in tal modo si crea un percorso e sfruttando il comando `fopen` si riuscirà ad aprire il file contenuto nel percorso selezionato. Tale file sarà aperto in sola lettura('r') ed il contenuto del file sarà immesso nella variabile `fid`.

Fatto ciò si inizializzano a zero le variabili `SZA,N,H,fp`; si tenga presente che tali variabili sono delle matrici di cui le prime due sono del tipo `1x300` e le altre due `500x500`.

Dopo ciò attraverso un ciclo `for` si inseriranno i valori dello zenith sun angle, numero di osservazioni, quote delle osservazioni e frequenze di plasma contenute in `fid` rispettivamente in `SZA,N,H,fp`. Questo viene fatto attraverso l'utilizzo del comando `fread` che legge il contenuto della variabile `fid`.

Attraverso una opportuna finestra di dialogo verrà richiesto all'utente di fornire lo Zenith Sun Angle.

La finestra è create con il comando `inputdlg` e successivamente il valore inserito viene convertito da stringa a doppia precisione con il comando `str2double` e conservato nella variabile `SZA_inp`. Dopodiché si introdurrà un ciclo `if` con lo scopo di scegliere la procedura più adatta al calcolo dei valori della frequenza di plasma e delle altitudini che serviranno successivamente per ricavare la distorsione di fase e l'attenuazione. Nel caso in cui `SZA_inp` sia minore di `89.10` la procedura immetterà nella variabile `i_SZA` il primo valore contenuto in `SZA` tale da soddisfare la condizione $SZA \geq SZA_inp$ (ciò verrà fatto sfruttando il comando `find`). In pratica nel primo caso verranno sfruttati i dati reali, ottenuti dalla missione MGS e che sono contenuti nel file `.dat` da noi precedentemente aperto.

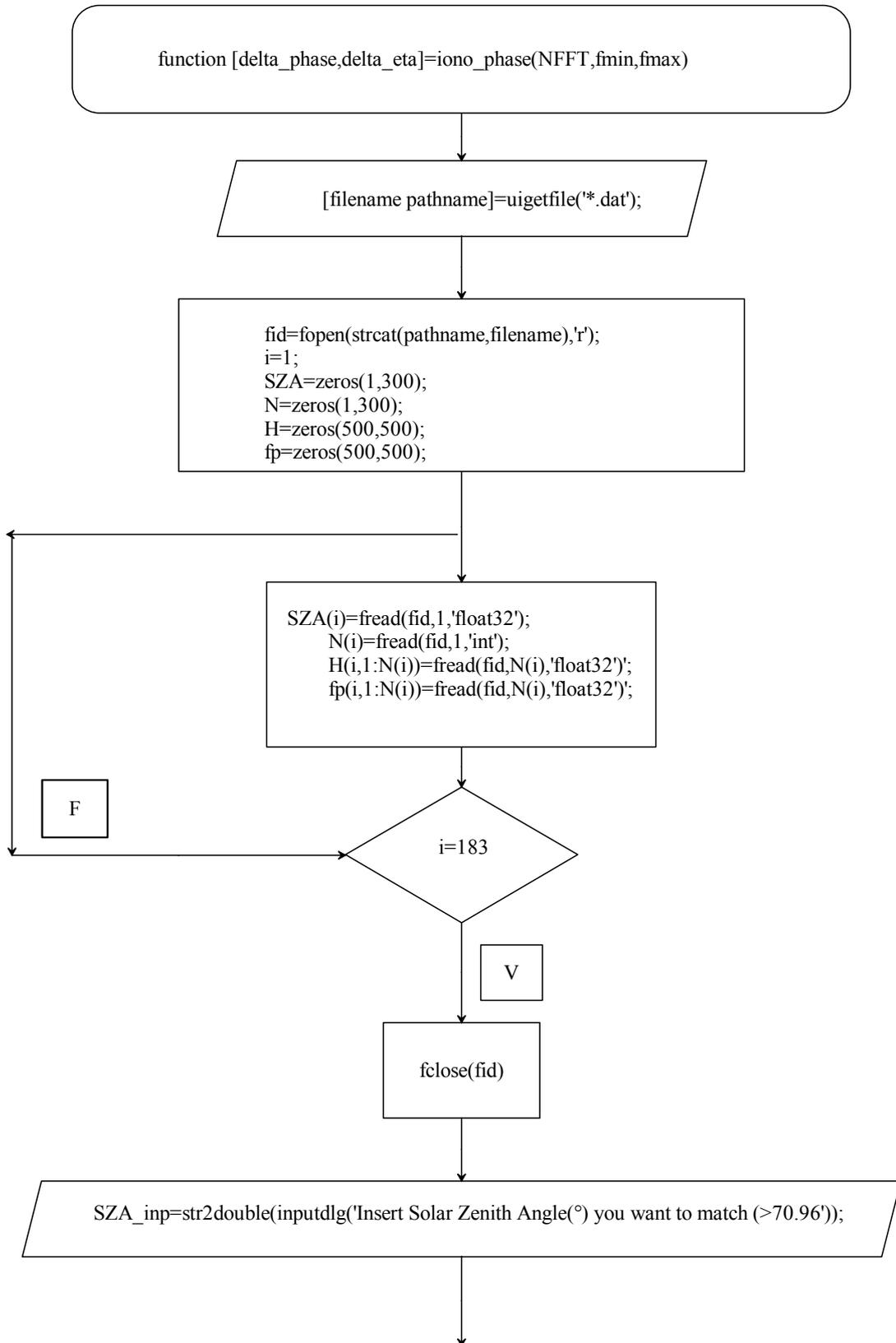
Nel caso in cui $89.10 \leq \text{SZA_inp} \leq 90$ la procedura prevede il calcolo di n_{max} e f_{pmax} , la densità di elettroni massima e la frequenza di plasma massima, attraverso l'utilizzo di formule che si basano sul cosiddetto metodo gamma, mentre nel caso $\text{SZA_inp} \geq 90$ si utilizza per la frequenza massima un valore costante e pari a $0.8 \cdot 10^6$. In pratica per $\text{SZA_inp} > 89.10$ il sistema implementerà il metodo Gamma così come descritto nei paragrafi precedenti. Tale procedura è resa necessaria dall'impossibilità di reperire dati reali. In quest'ultimo caso l'utente dovrà fornire attraverso una finestra di dialogo il valore dell'apertura $b(20:50)$ e l'altitudine in cui si presume che si possa avere tale max. Successivamente tale procedura calcolerà l'altitudine di partenza (h_0) e i vettori altitudine e f_{plasma} che contengono rispettivamente le quote da h_0 a 240 con passo 1 e le frequenze di plasma corrispondenti

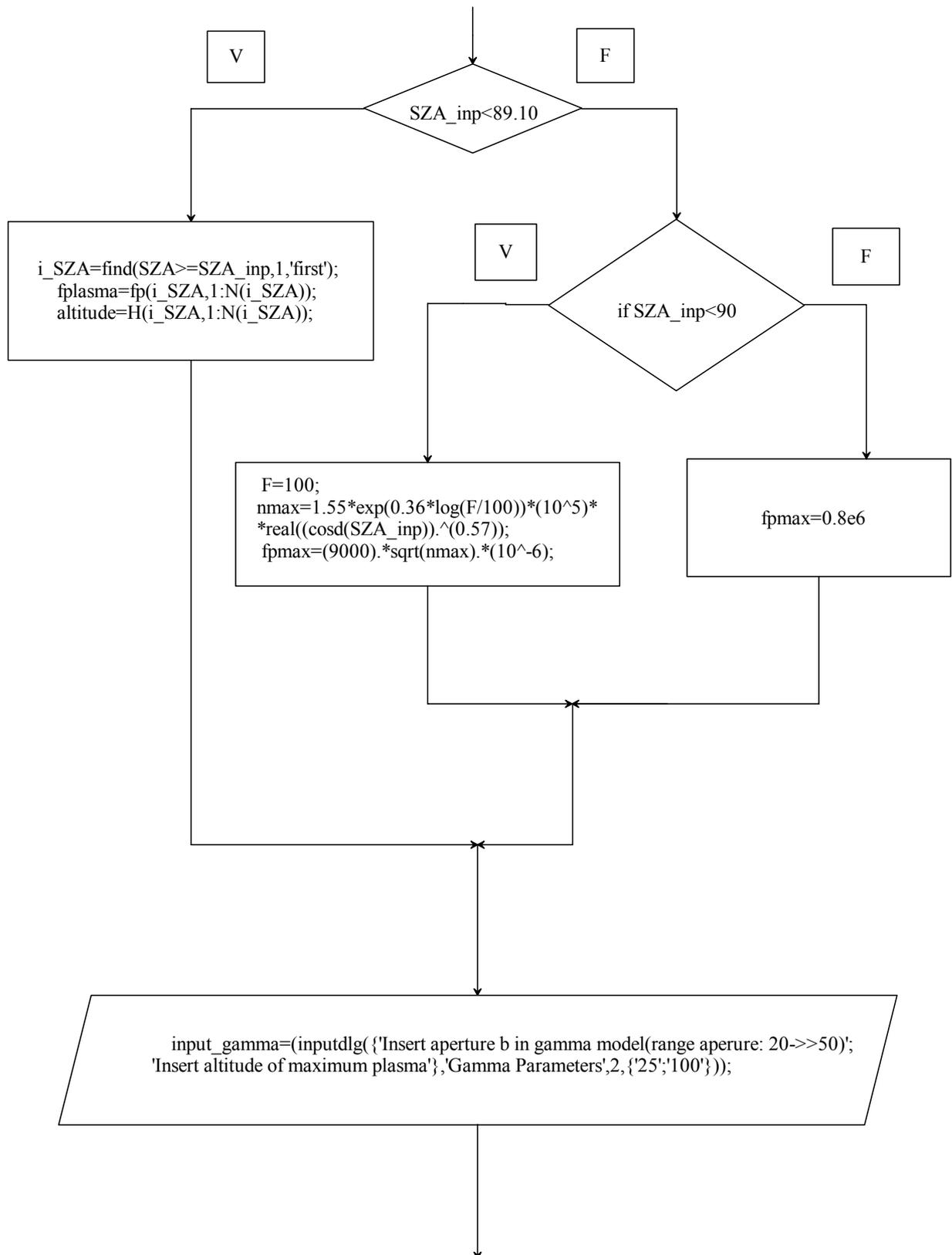
Fatto ciò attraverso una serie di operazioni matematiche verranno calcolate tutte le grandezze necessarie al calcolo degli errori: la frequenza centrale della banda, l'intervallo $f_{\text{min}}-f_{\text{max}}$ in un numero di intervalli pari ad NFFT equispaziati, le velocità angolari relative al plasma e al segnale, la frequenza di collisione del plasma, la densità di elettroni del plasma, velocità luce.

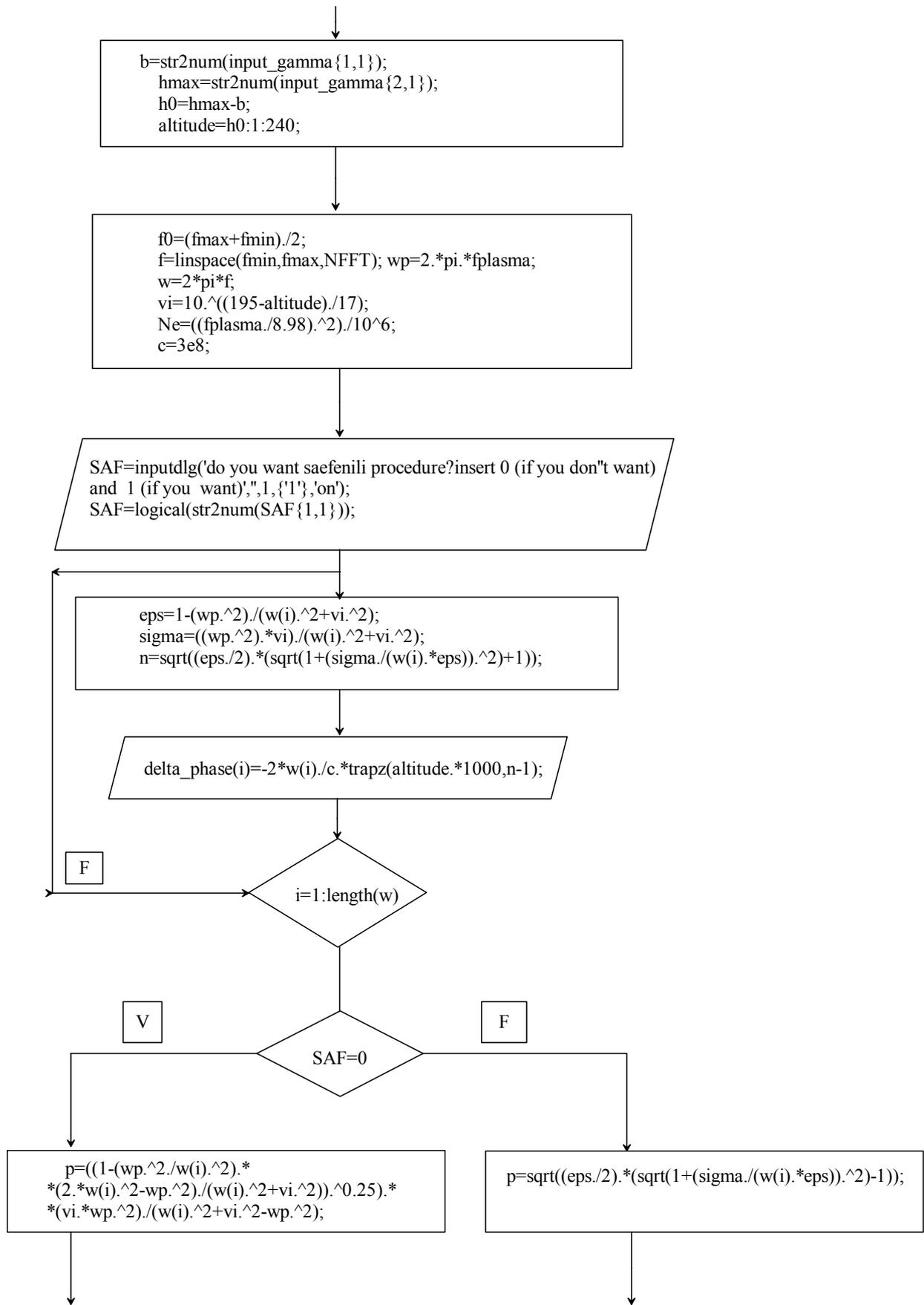
In questo modo si conclude la prima fase e si passa al calcolo degli errori. Si inizierà con l'introduzione di una finestra di dialogo che permetterà di scegliere fra le due differenti procedure descritte precedentemente

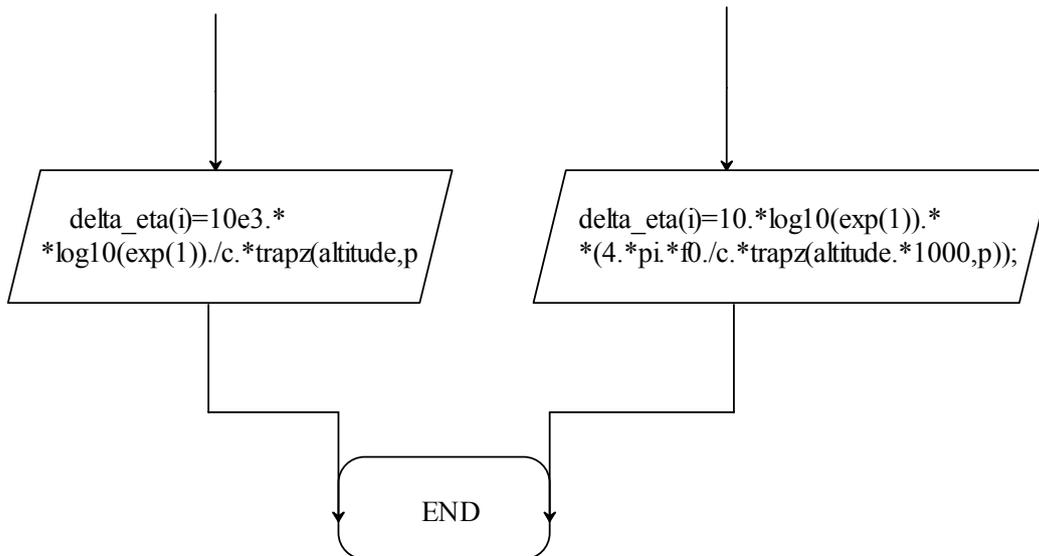
Dopodiché si calcolerà la distorsione subita dal segnale e l'attenuazione secondo la procedura scelta

2.4.d diagramma logico(o a blocchi) della function iono phase





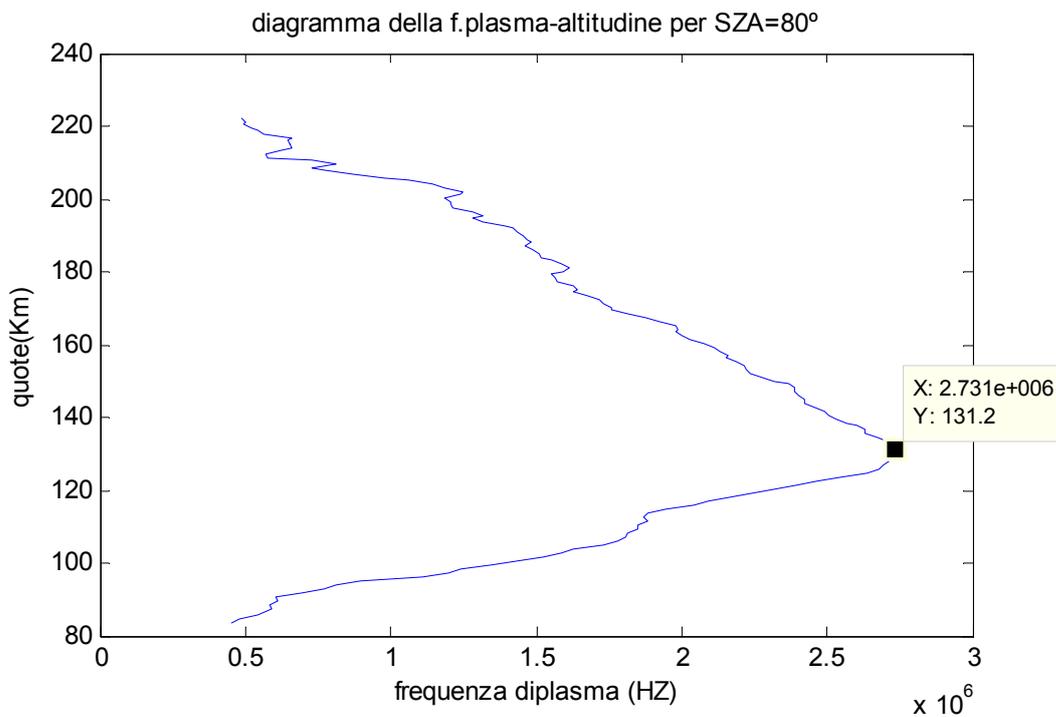


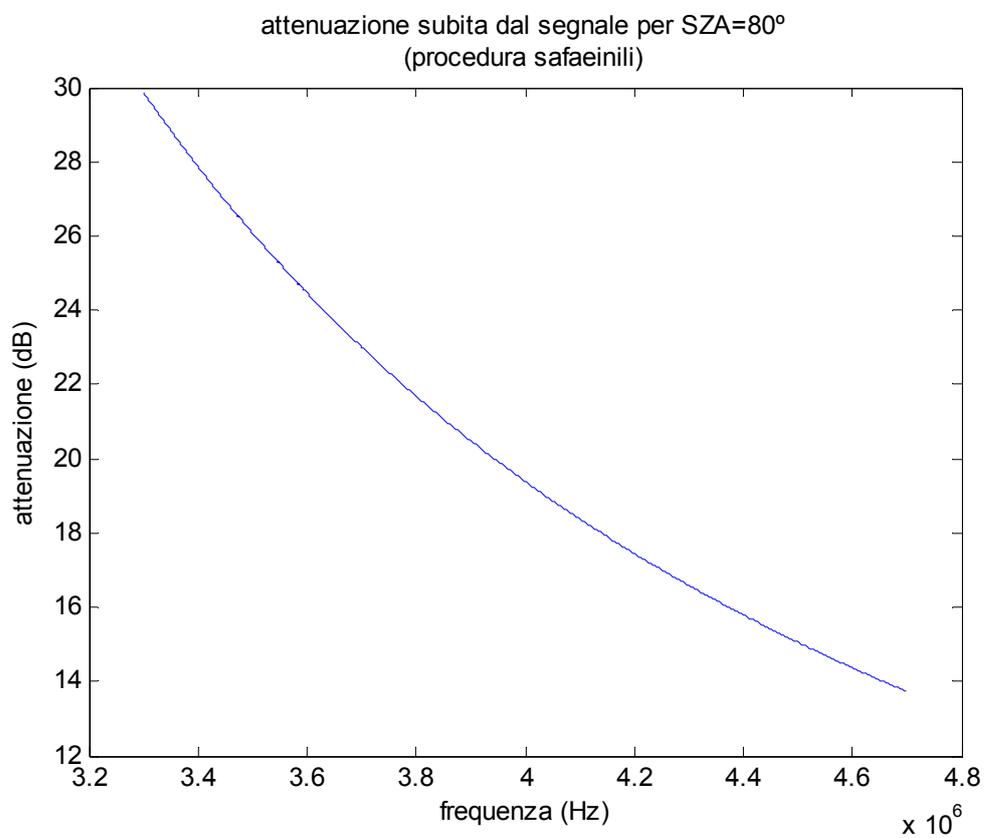
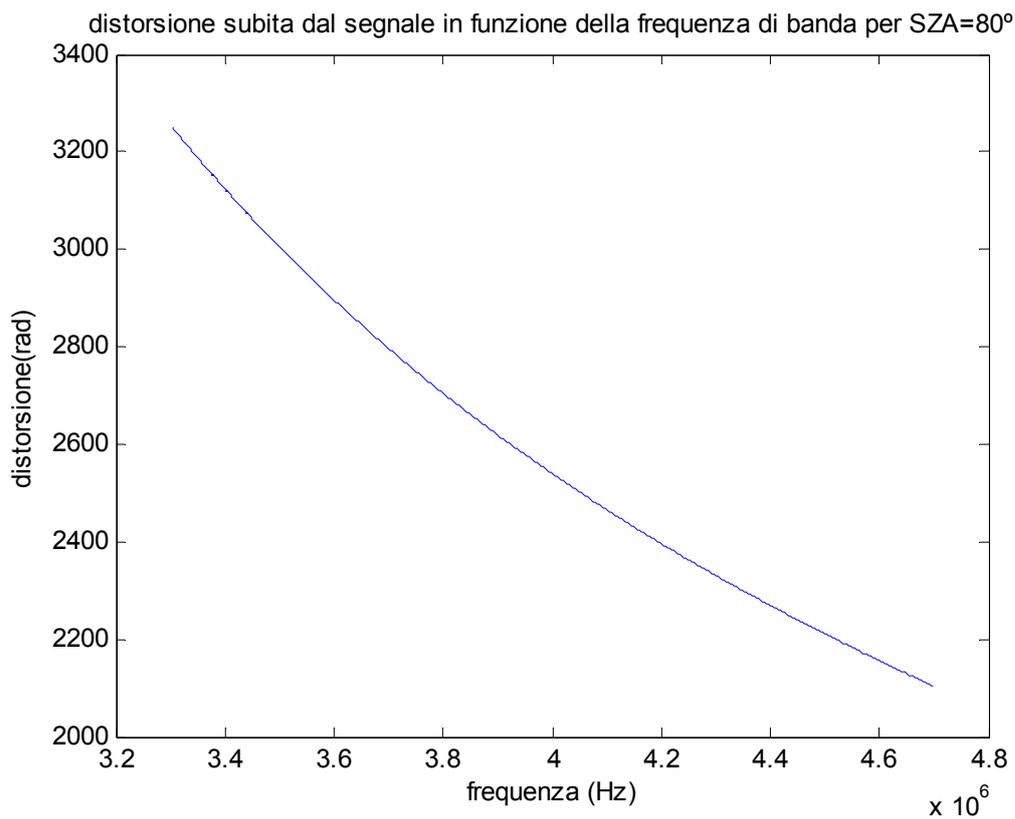


2.5 descrizione dell'andamento della frequenza di plasma, dell'attenuazione e della distorsione al variare del SZA

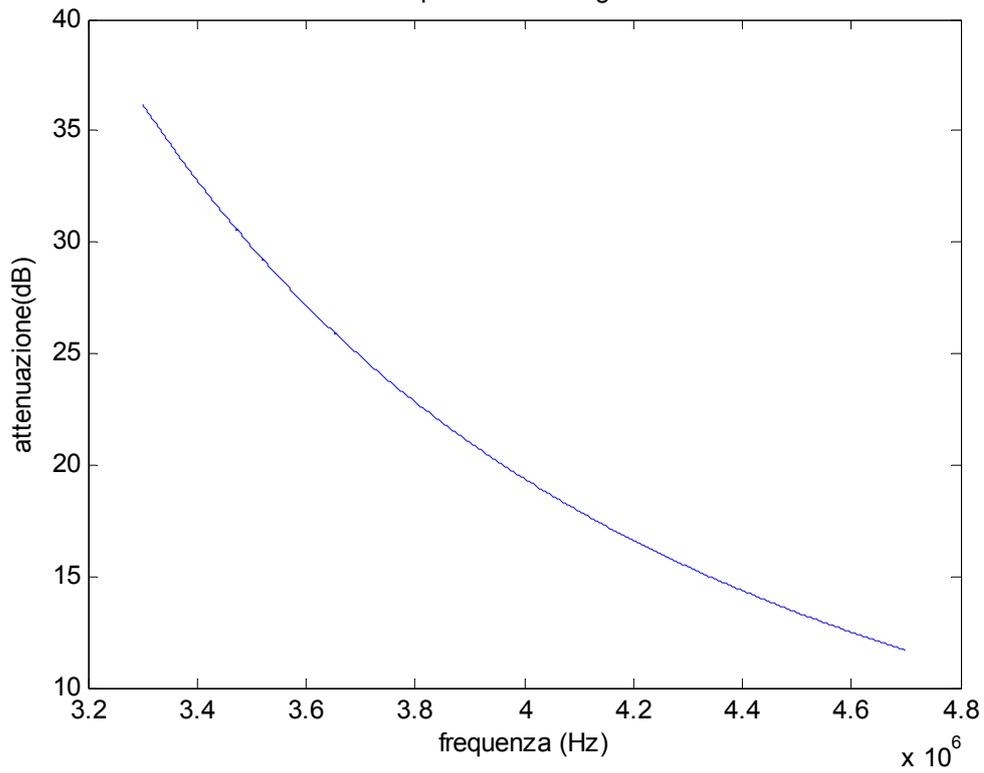
a) osservazioni di giorno realizzate con l'utilizzo di dati reali SZA<89.10

SZA=80



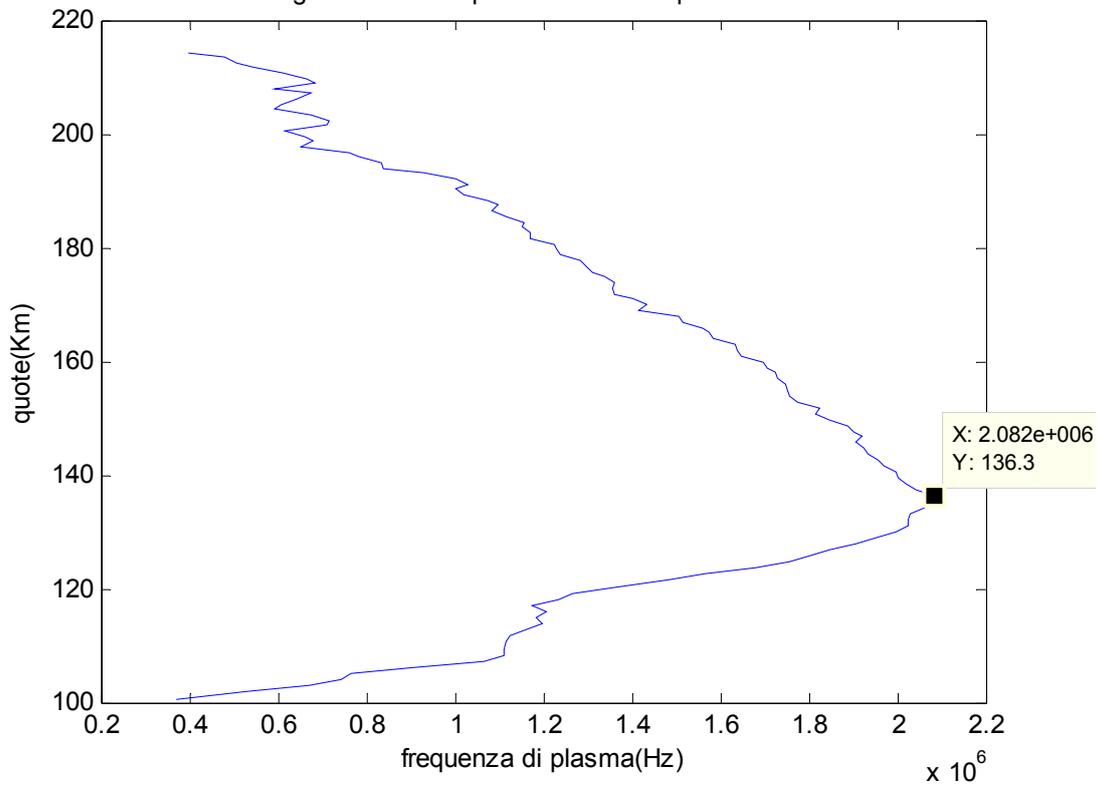


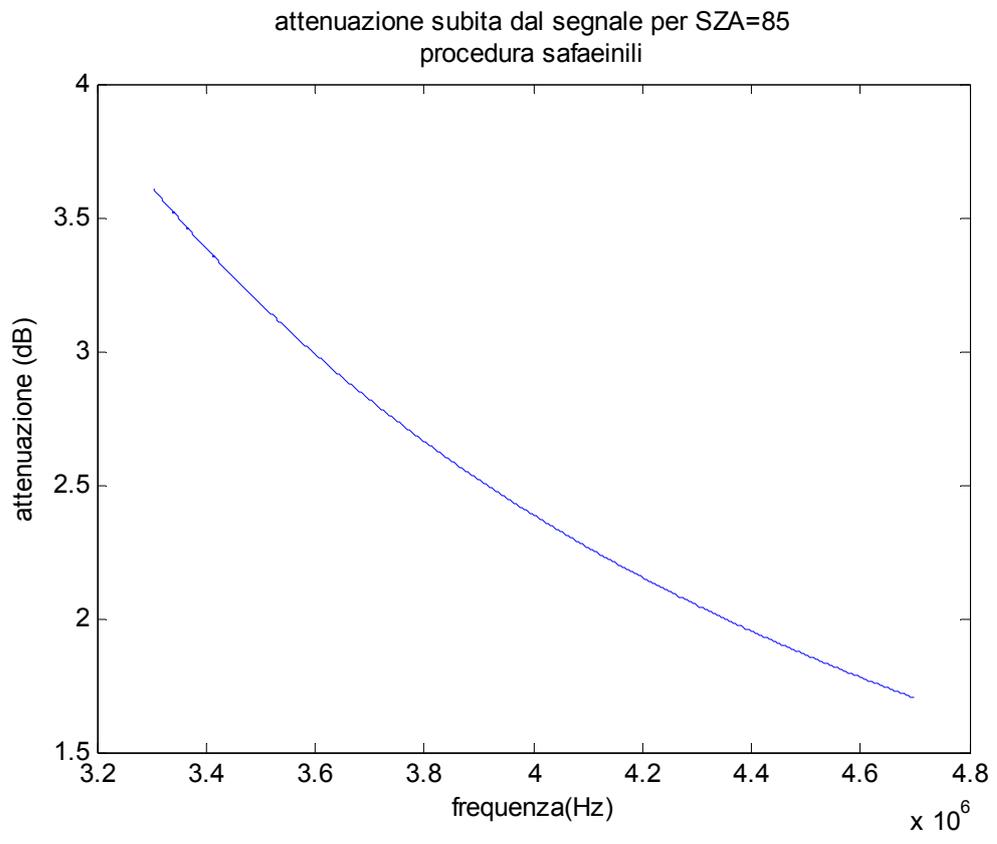
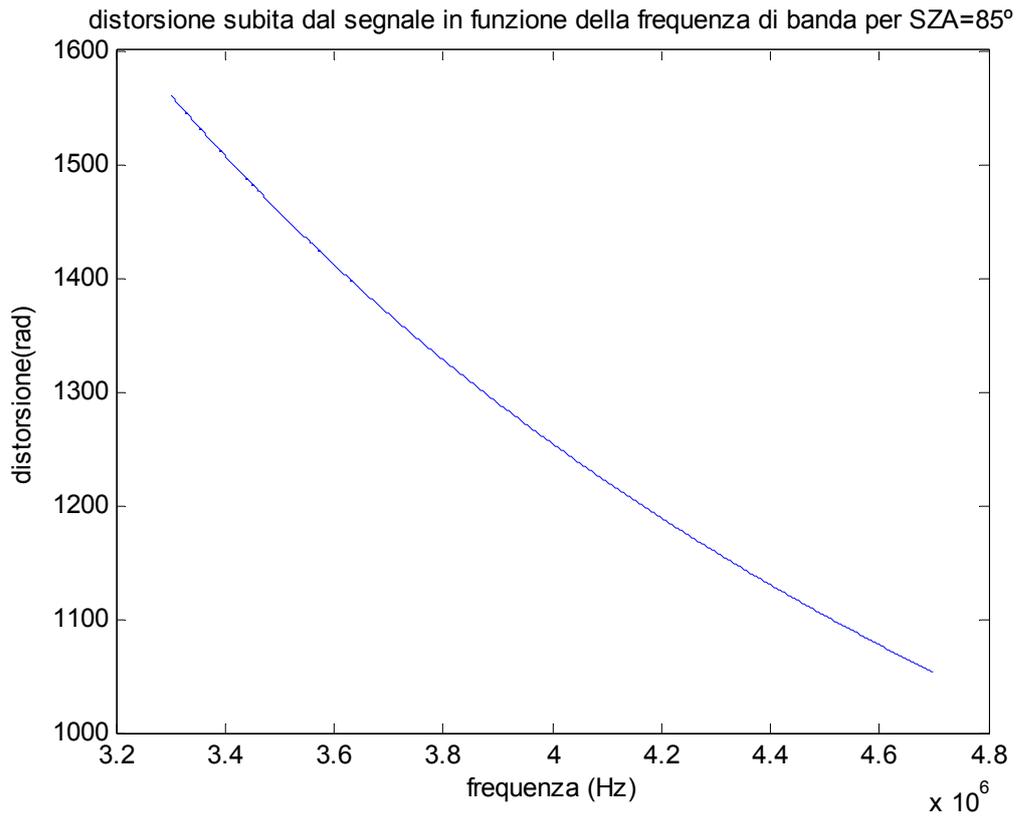
attenuazione subita dal segnale per SZA=80°
procedura Rzhiga



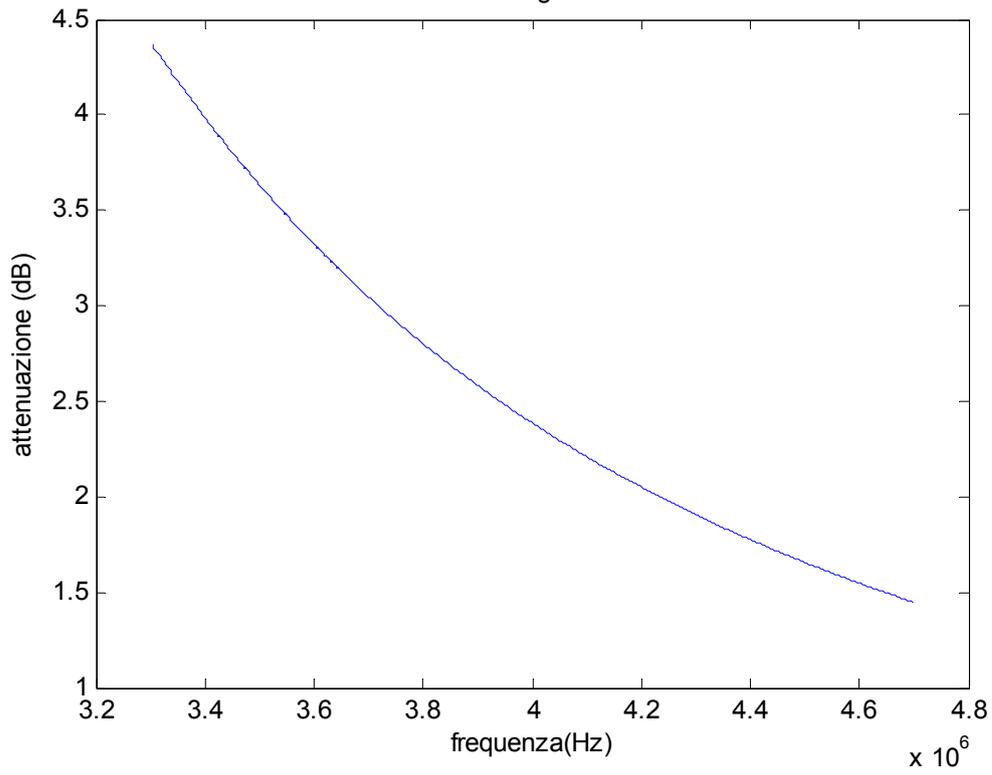
SZA=85

diagramma della f.plasma-altitudine per SZA=85°



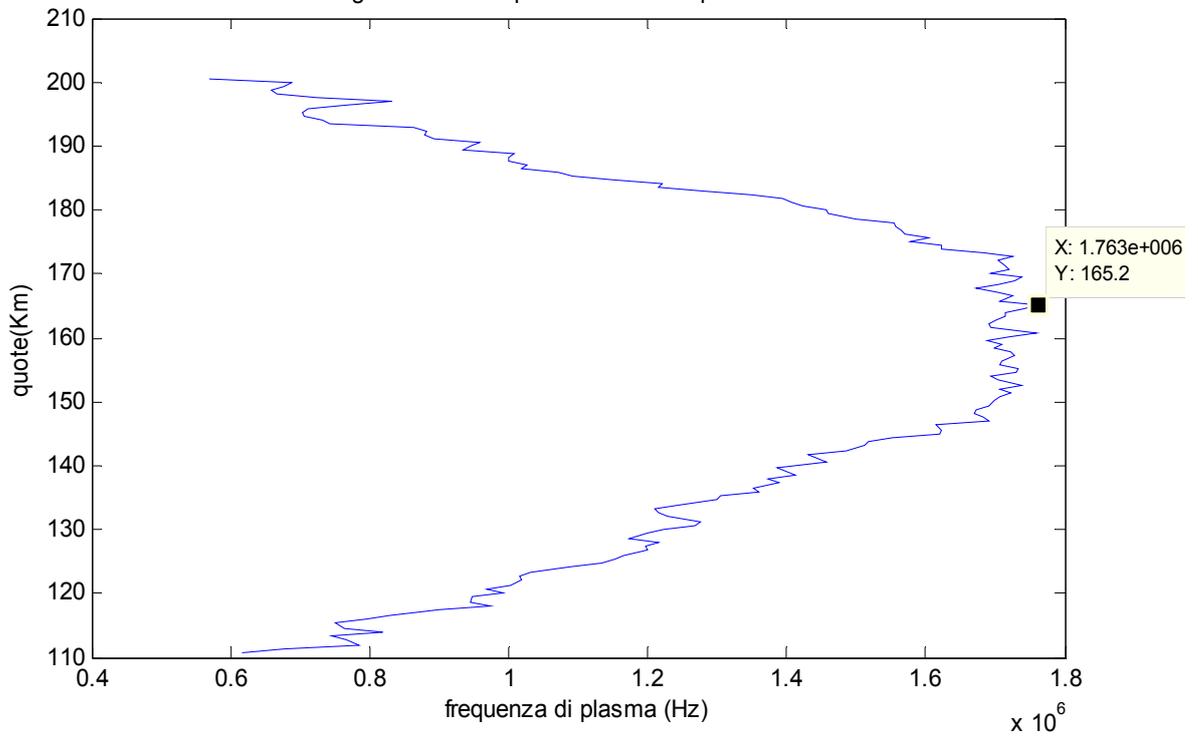


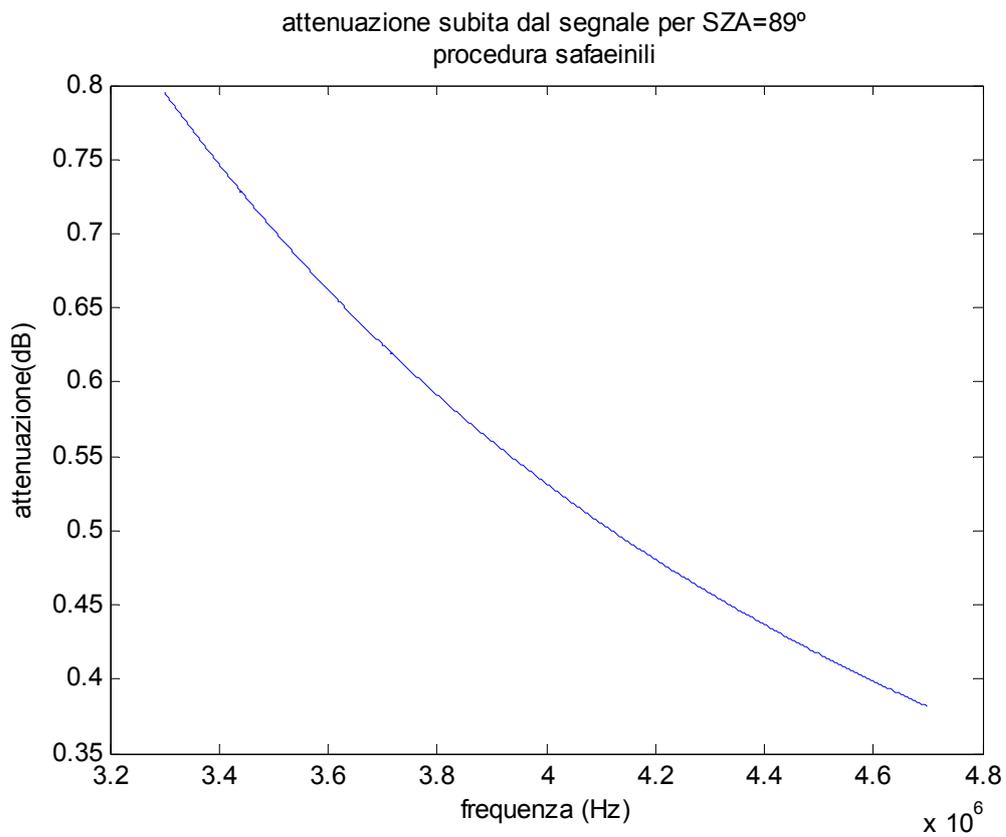
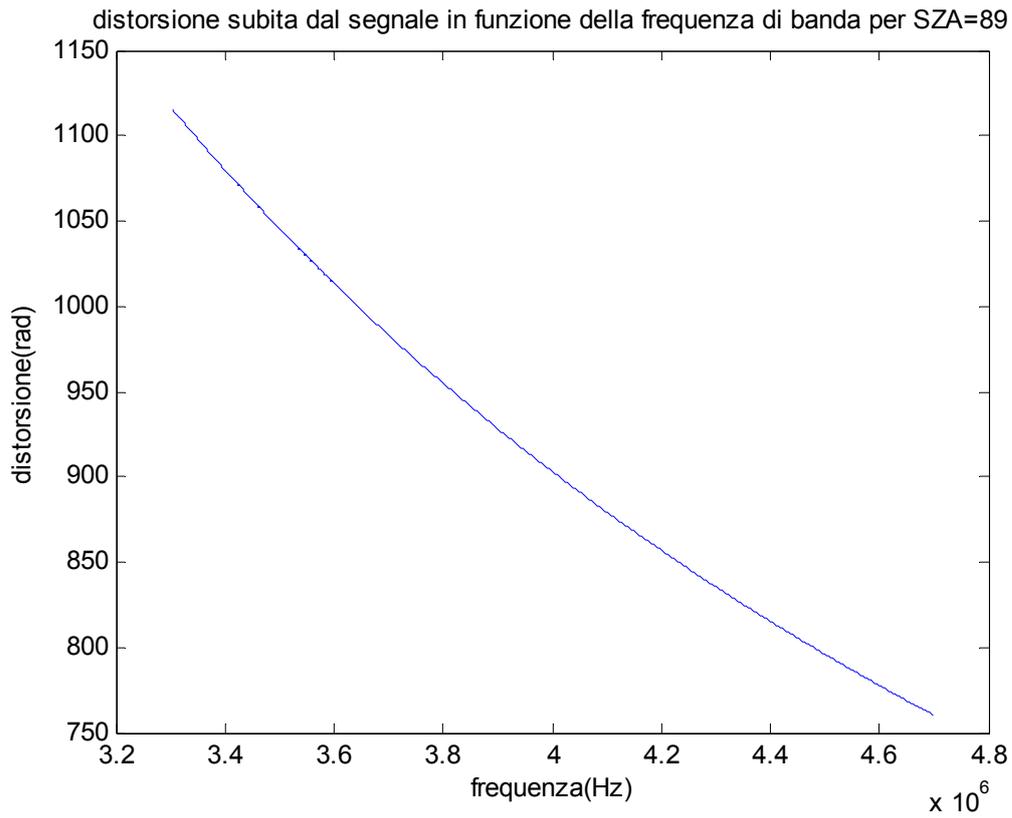
attenuazione subita dal segnale per SZA=85°
rhizga

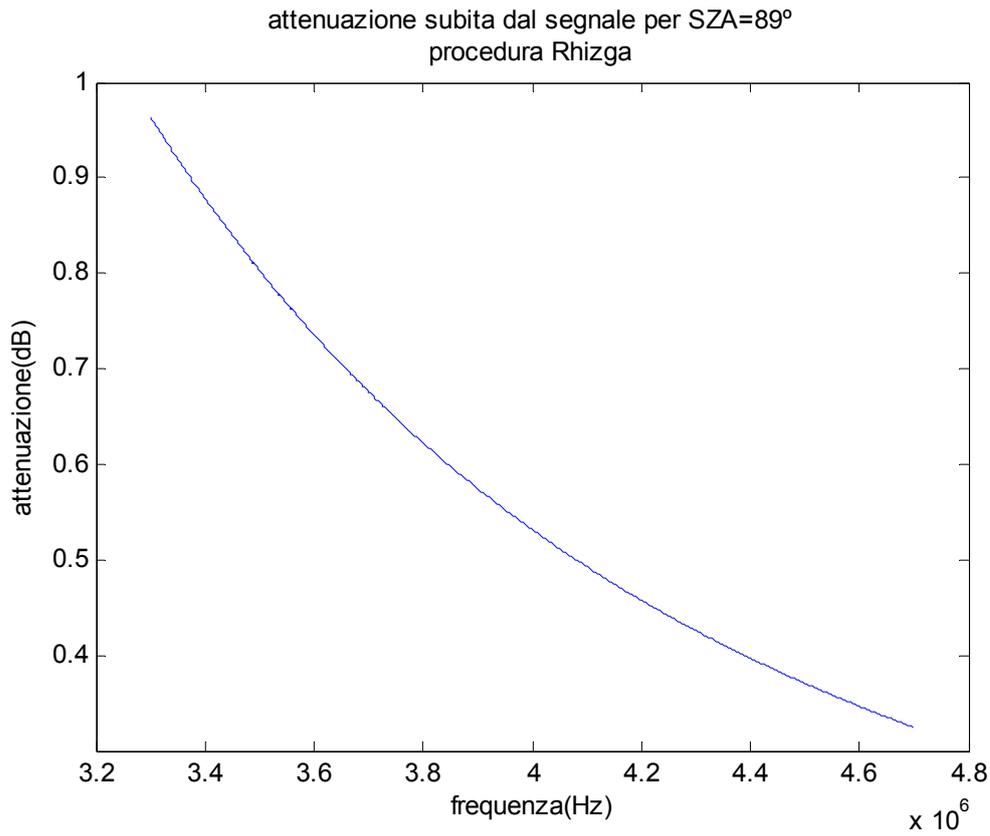


SZA=89

diagramma della f.plasma-altitudine per SZA=89°

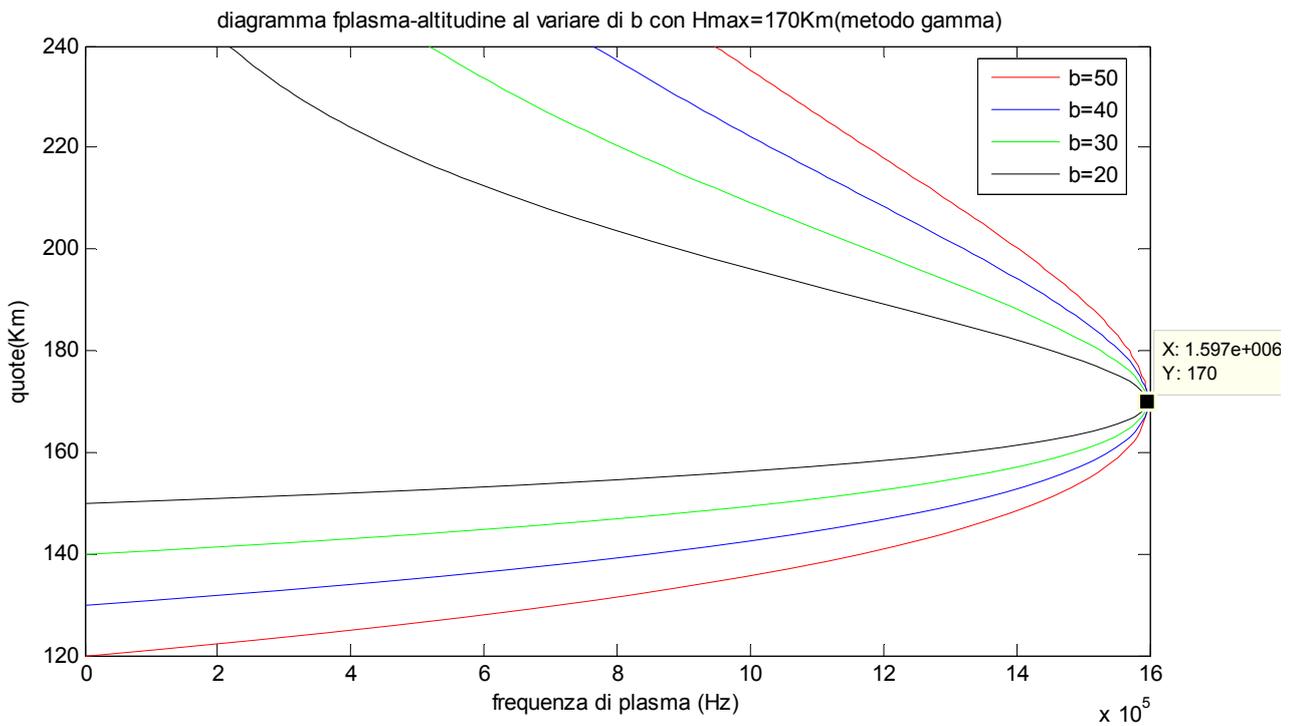


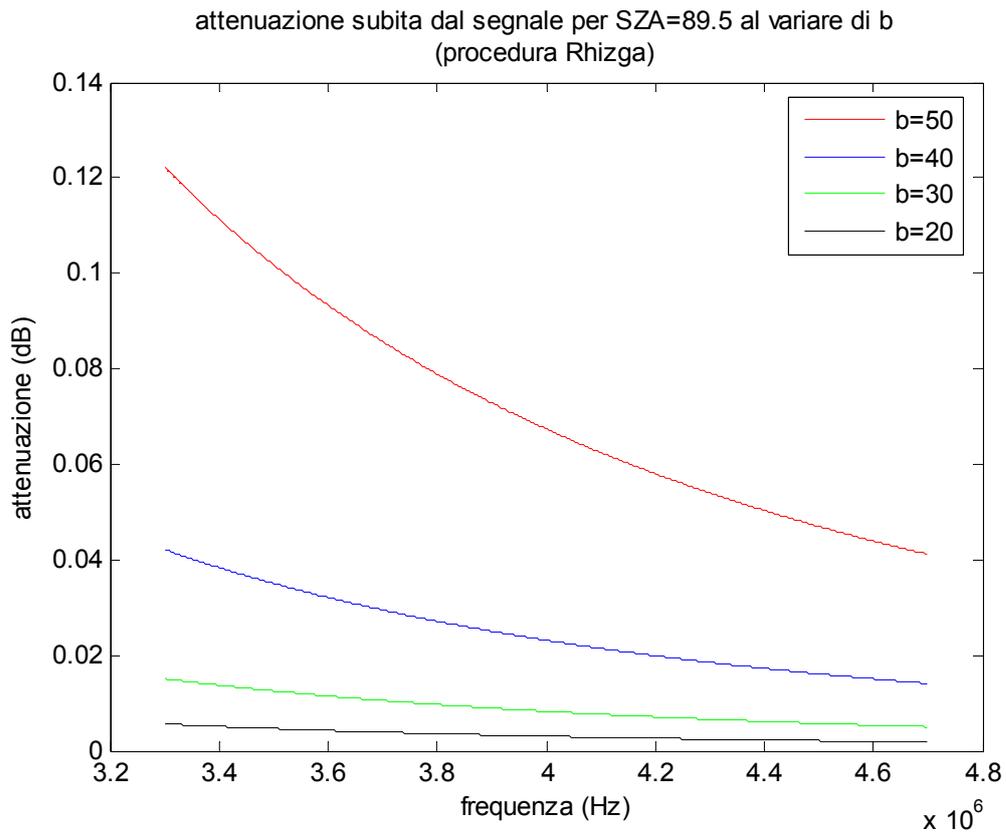
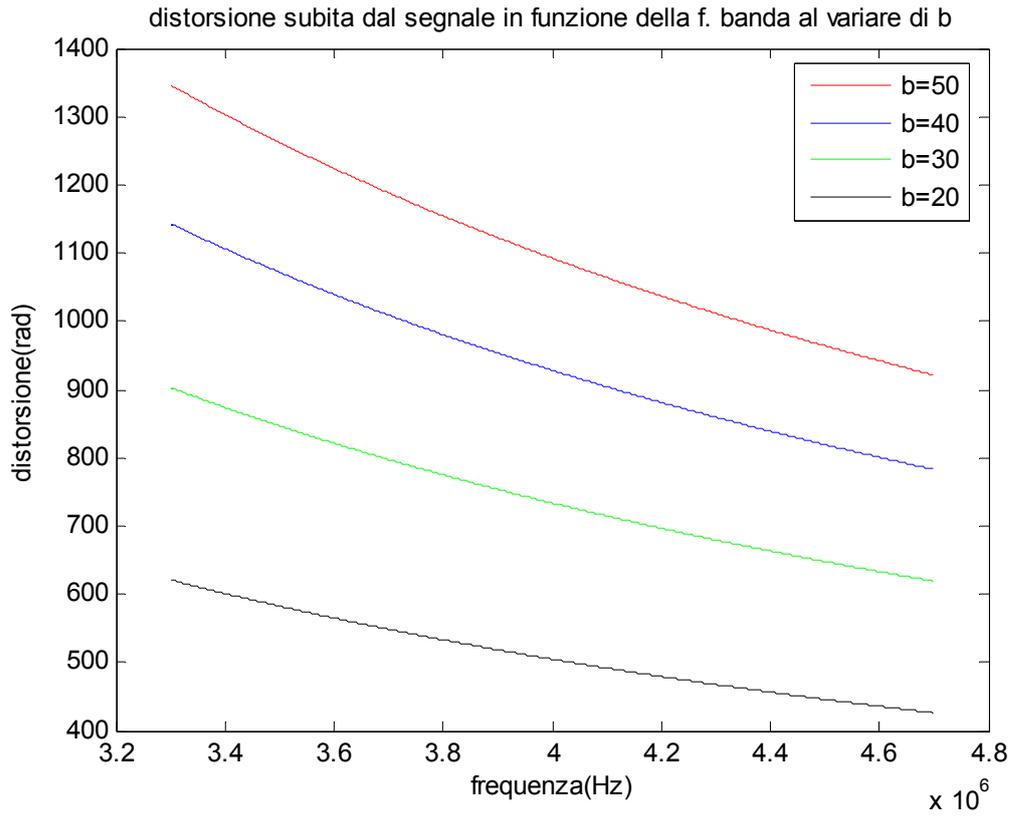




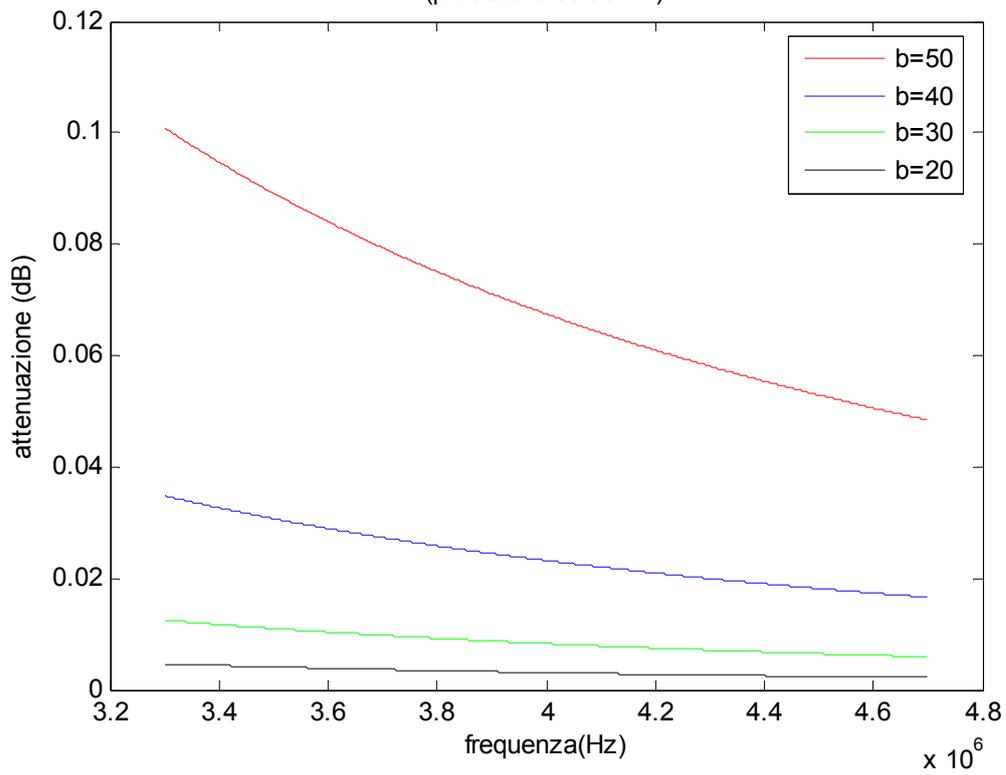
**2)osservazioni compiute di giorno mediante dati simulati(metodo Gamma)
89.10<SZA<90**

SZA=89,5



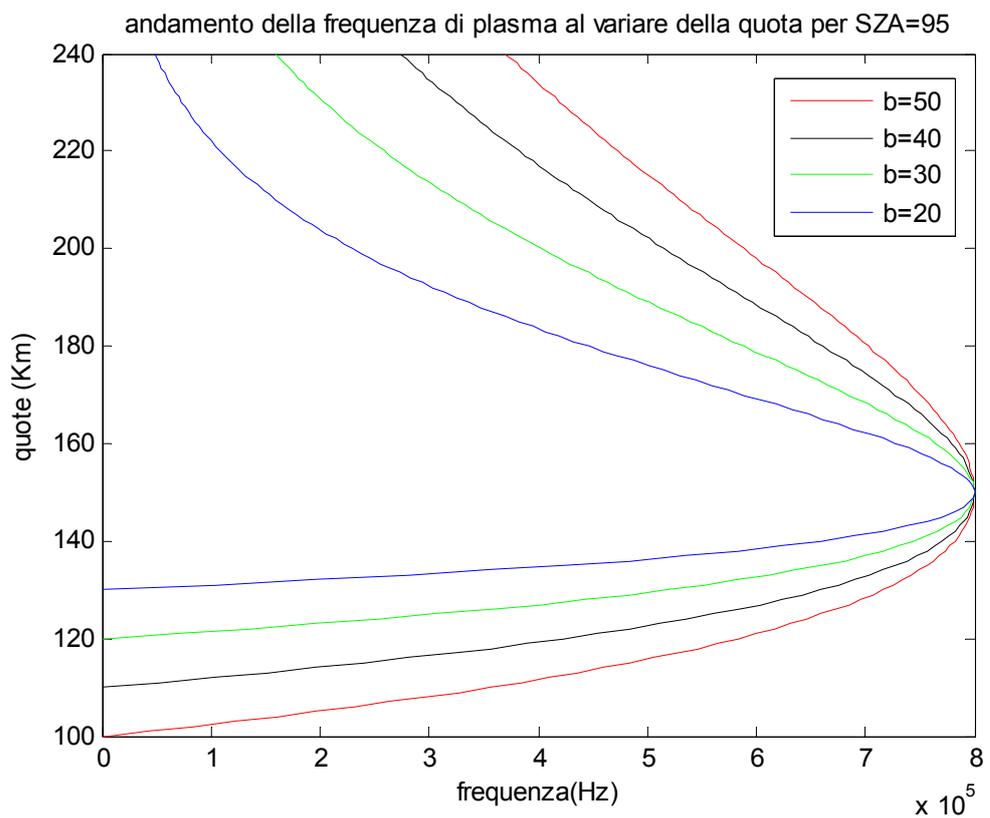


attenuazione subita dal segnale per SZA=89.5°
(procedura safaeinili)

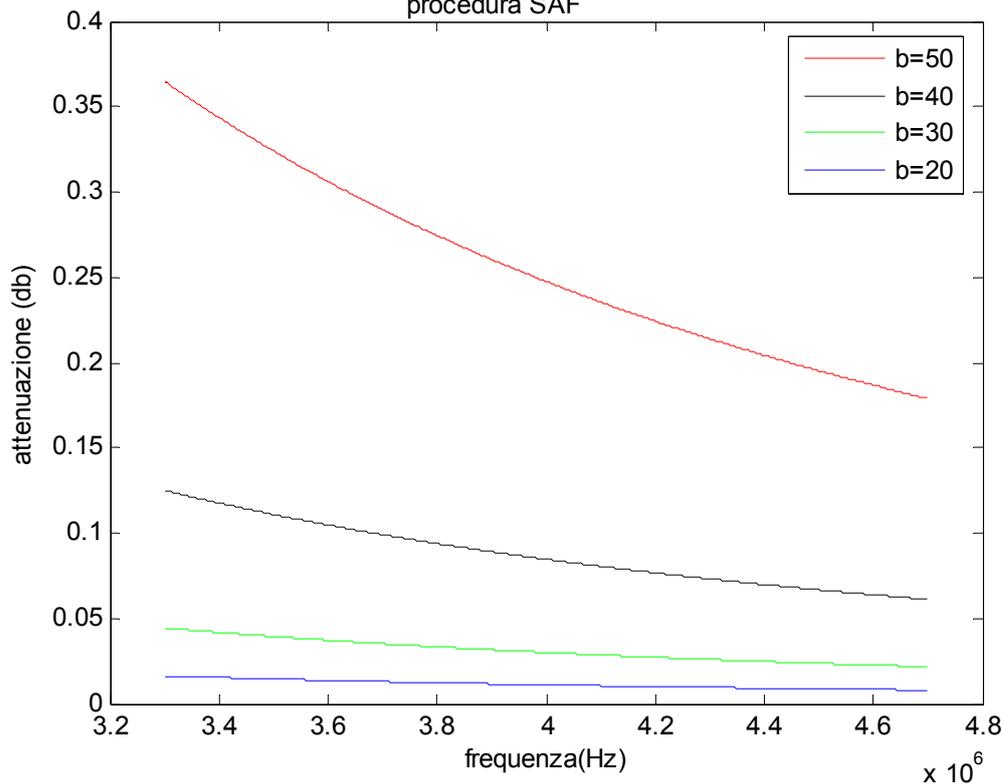


3) osservazioni compiute di notte mediante dati simulati(metodo Gamma) SZA>90

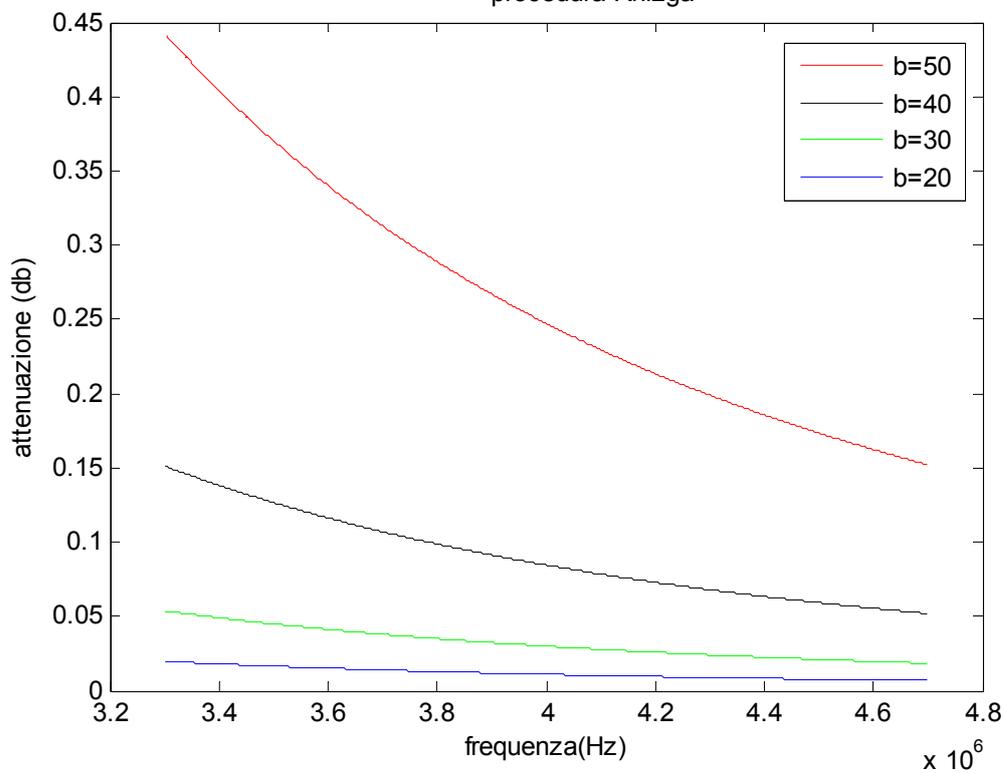
SZA=95



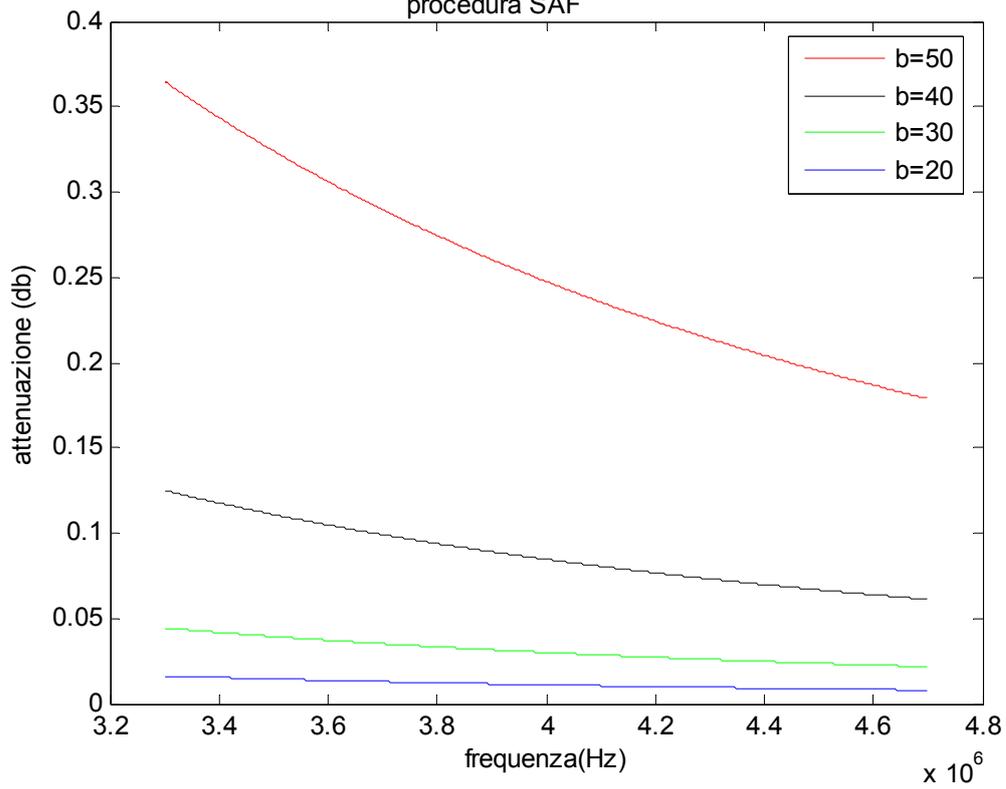
andamento della attenuazione ionosferica al variare della frequeza di banda per SZA=95
procedura SAF



andamento della attenuazione ionosferica al variare della frequeza di banda per SZA=95
procedura Rhizga

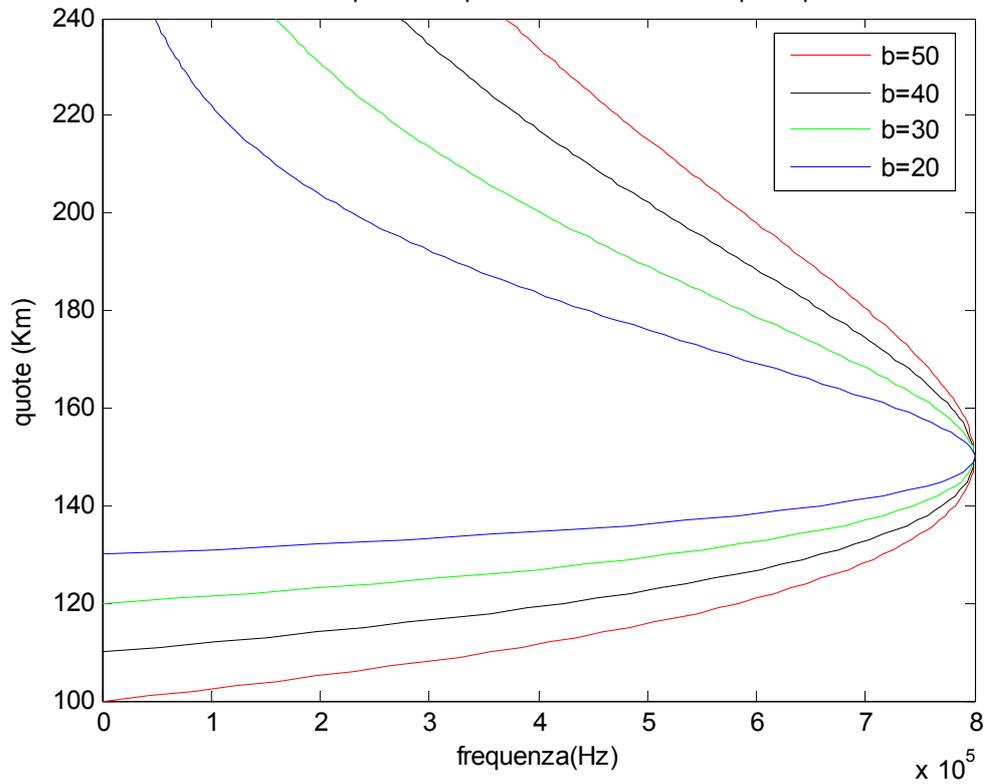


andamento della attenuazione ionosferica al variare della frequeza di banda per SZA=95
procedura SAF

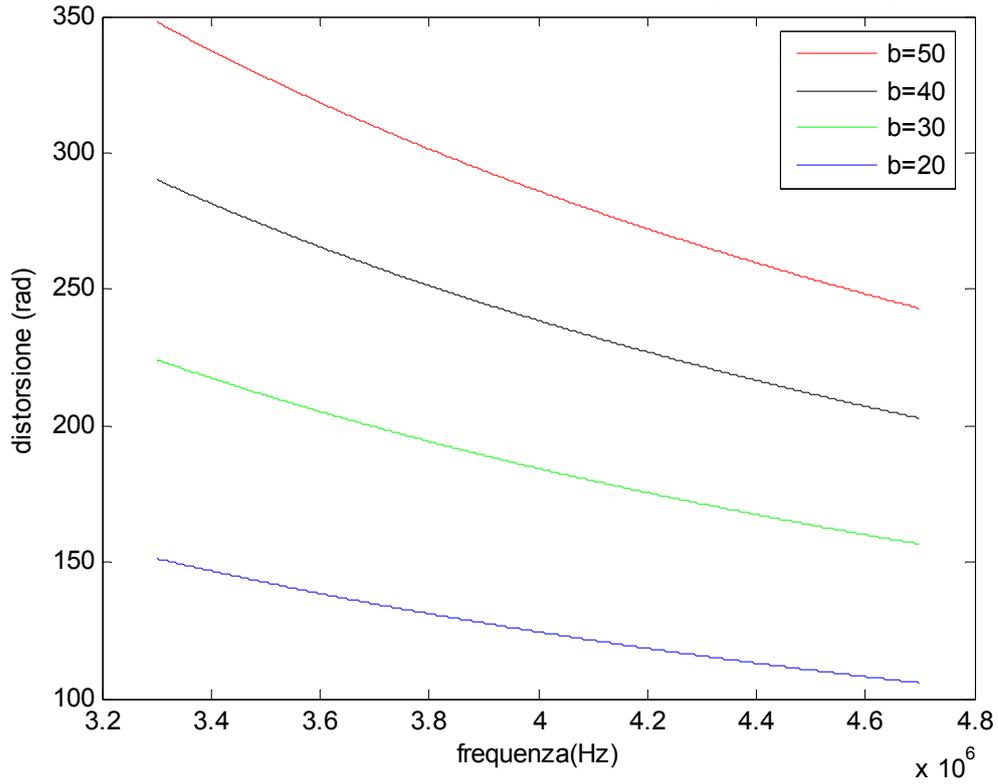


SZA=105

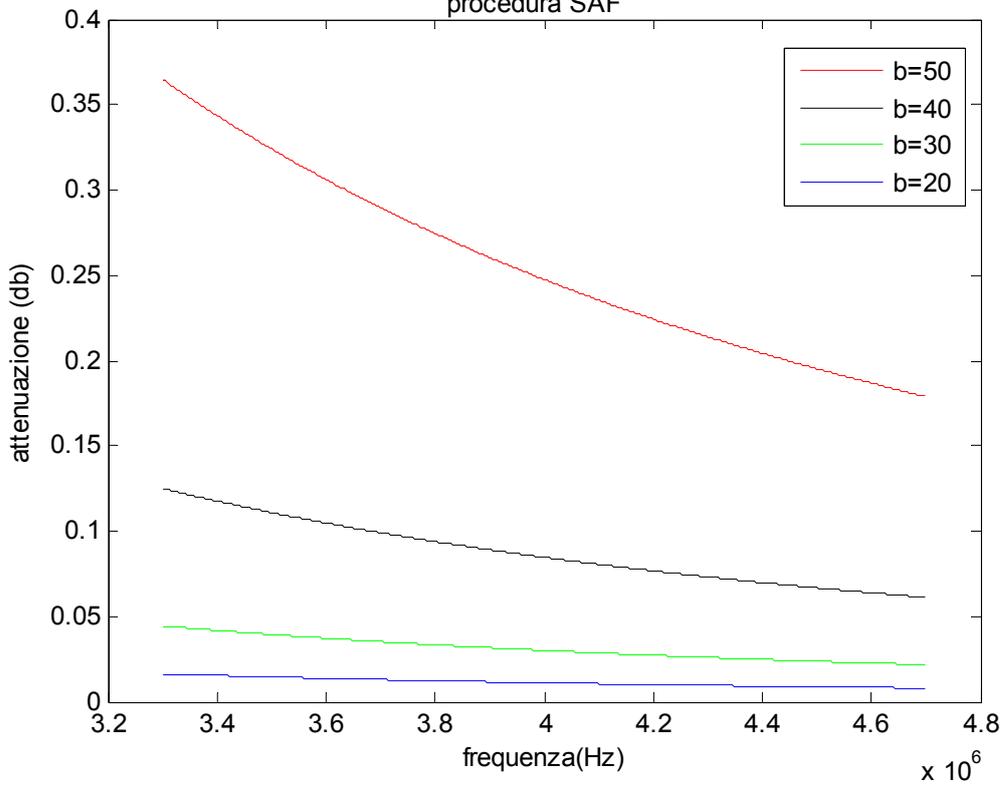
andamento della frequenza di plasma al variare della quota per SZA=105



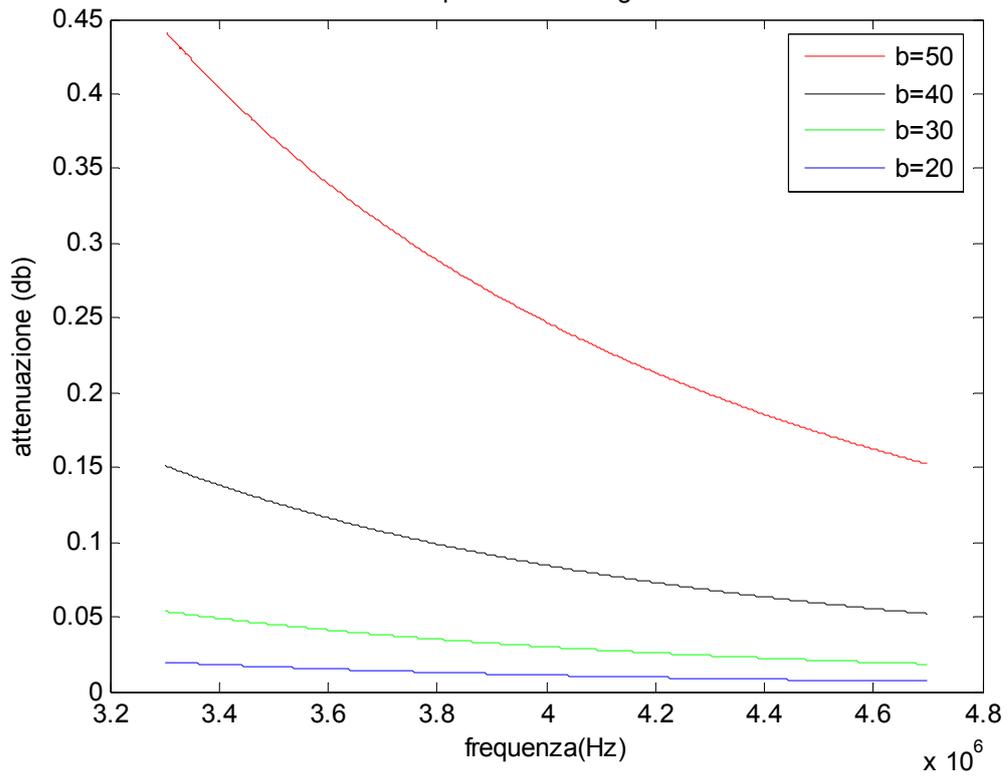
andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA=105



andamento della attenuazione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA=105
procedura SAF



andamento della attenuazione ionosferica al variare della frequeza di banda per SZA=105
procedura Rhizga



Capitolo III

Algoritmi per la valutazione dello shift temporale

Introduzione

L'errore di fase che introduce la ionosfera è del tipo:

$$\Delta\varphi (f) \equiv \text{P.L}(f) + \text{P.N.L}(f) \quad (1)$$

dove con P.L. si è indicata la parte lineare dell'errore e con P.N.L. la parte non lineare.

I software fino ad ora utilizzati hanno permesso di compensare l'errore ionosferico non lineare e quindi hanno permesso di ottenere una stima dell'errore del tipo:

$$\Delta\varphi (f) \cong \text{P.N.L} \quad (2)$$

di conseguenza fino ad ora non si è tenuto conto della sua componente lineare che ,come tra poco mostreremo, induce uno shift temporale al segnale, che avrà una espressione del tipo :

$$\text{P.L}(f) = c_1 f + c_0 \quad (3)$$

Per il teorema sulla modulazione di frequenza, infatti, è possibile affermare che uno sfasamento lineare con pendenza negativa(o positiva) nel segnale considerato nel dominio della frequenza equivale ad un ritardo (o anticipo) nel dominio del tempo. In pratica ciò implica la validità della seguente equivalenza:

$$x(t - T) \leftrightarrow X(f)e^{-j2\pi fT} \quad (4)$$

Per cui il tempo complessivo che impiega realmente il segnale ad attraversare la ionosfera è:

$$\tau_{tot} = \tau_{free} + T \quad (5)$$

Infatti se considero un strato ionosferico di spessore, L , ci sarà un tempo di propagazione in spazio libero, τ_{free} , che il segnale di ritorno impiega per attraversare lo strato e che può essere semplicemente calcolata attraverso la legge fisica:

$$\tau_{free} = \frac{2L}{c} \quad (6) \text{ dove con } c \text{ si è indicata la velocità della luce } 3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$$

a cui bisogna aggiungere il contributo supplementare, T , legato alla ionosfera.

Da tutte queste considerazioni risulta chiaro l'interesse per la conoscenza della parte lineare del disturbo ionosferico e quindi del coefficiente lineare:

$$c_1 = 2\pi \cdot T \quad (7)$$

mentre il coefficiente c_0 non induce alcun effetto sul segnale

In questo capitolo descriveremo gli algoritmi elaborati per risolvere tale problema. In particolare dimostreremo prima la validità scientifica dei modelli utilizzati e successivamente verificheremo la validità degli algoritmi presentati. A tal fine si è deciso di procedere in due modi: inizialmente dimostreremo la validità delle nostre considerazioni utilizzando dati simulati, ossia dati creati in laboratorio. Successivamente applicheremo i nostri algoritmi ai dati realmente provenienti da Marsis dimostrando anche in tal caso la validità del lavoro svolto.

In questo capitolo ci occuperemo principalmente di descrivere gli algoritmi creati e di attuare la prima procedura di validazione degli stessi, mentre nel successivo ci confronteremo con i dati reali.

3.1 Considerazioni scientifiche

Negli elaborati presentati dimostreremo innanzitutto la validità del modello equivalente, descritto nel capitolo precedente, per la valutazione del disturbo ionosferico:

$$\Delta\phi_{EQ}(f, \tau_0) = 2\pi\tau_0 \left(\sqrt{f^2 - f_{p,eq}^2} - f \right) \quad (8)$$

La relazione di sopra è sicuramente valida da un punto di vista matematico ed il nostro obiettivo è quello di dimostrare anche la coerenza scientifica e quindi validare il modello dal punto di vista fisico.

Per questo motivo nell'elaborato presentato creeremo una procedura in matlab che sfruttando l'equazione (8), attraverso un fit ai minimi quadrati, mi permetta di descrivere la distorsione di fase totale introdotta dal function `iono_model` descritta nel capitolo precedente.

In questo modo se i valori della frequenza di plasma equivalente e della tau equivalente sono accettabili fisicamente e se la stima ottenuta dal modello è sufficientemente accurata avremo avuto conferma che le nostre considerazioni sono esatte e quindi potremo usare il modello (8) per descrivere la distorsione totale di fase.

Successivamente tenendo conto che le procedure fino ad ora realizzate, nello specifico le procedure che implementano il metodo del PGA³, permettono di compensare la sola parte non lineare dell'errore ionosferico dimostreremo, anche per quanto detto sopra, che l'errore stimato dal PGA può essere modellato con una formula del tipo :

$$\Delta\phi_{pga}(f, \tau_0) = 2\pi\tau_0 \left(\sqrt{f^2 - f_{p,eq}^2} - f \right) - c_0 - c_1 \cdot f \quad (9)$$

L'idea alla base di questa formula è tanto semplice quanto efficace: una volta dimostrato che il disturbo totale introdotto dalla ionosfera può essere

³ Vedi paragrafo sul metodo PGA o su altri testi tesi Laurenza D.

descritto, in modo efficace, dalla formula (8) e tenendo presente che attraverso la tecnica del PGA siamo in grado di stimare la sola parte non lineare di tale errore, ossia l'errore stimato è del tipo:

$$\Delta\varphi_{pga}(f) \cong \text{P.N.L. (10)}$$

se all'errore totale,(8), sottraiamo la sua parte lineare, rappresentabile con una retta, $c_0 + c_1 * f$, otteniamo la (9).

Da questa considerazione risulta chiaro che la,(10), rappresenta l'errore totale ionosferico decurtato della sua parte lineare, ossia rappresenta la parte non lineare di tale errore.

In questo modo abbiamo dimostrato che anche l'equazione da noi ricavata,(9), può descrivere l'errore stimato dal PGA e quindi abbiamo dimostrato l'equivalenza tra le equazioni (10) ed (9).

Affinché questo sia vero è necessario stimare, attraverso un fit ai minimi quadrati, la curva ricavata dal PGA attraverso l'equazione (9). In questo modo otterremo una stima dei parametri f_p , t_0 , c_0 , c_1 e quindi a partire da quest'ultimo valore, così come mostrato all'inizio del capitolo, è possibile risalire al ritardo introdotto dalla ionosfera e quindi compensare il segnale. Poiché nei modelli usati si fa un ampio uso del metodo dei minimi quadrati e sul metodo del PGA verrà fornito un breve cenno su entrambi.

3.1.b Il metodo dei minimi quadrati

Il metodo dei minimi quadrati è utile per la stima dei parametri di una relazione del tipo $y = f(x; \bar{a})$ (11),

dove x è una variabile continua, che può essere misurata senza errore, ed y rappresenta il valore corrispondente della grandezza misurata, distribuita gaussianamente con un varianza σ^2 e \bar{a} rappresenta l'insieme degli m parametri che determinano la funzione che lega x ad y .

Consideriamo di avere a disposizione un insieme di N misure combinate di x_i ed y_i , di voler quindi ricavare da queste i parametri. Data la distribuzione

gaussiana di y possiamo determinare i parametri a_i secondo il principio della massima verosimiglianza in modo che massimizzino la probabilità:

$$L(\vec{a}) = \prod_{i=1}^N \exp\left\{-\frac{(y_i - f(x_i; \vec{a}))^2}{2\sigma_i^2}\right\} \quad (12)$$

In generale è più conveniente scegliere di minimizzare la variabile

$$\chi^2 = -\log L = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - f(x_i; \vec{a}))^2}{2\sigma_i^2}. \quad (13)$$

Caso lineare:

Uno dei casi tipici è quello derivato dalla regressione lineare, in cui la relazione che lega le due variabili è di tipo lineare: $y = a \cdot x + b$. La determinazione del minimo in questo caso è possibile in maniera analitica determinando i punti in cui le derivate parziali rispetto ad $a_{1,2}$ si annullano:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a} = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - a \cdot x_i - b)}{\sigma_i^2} \cdot x_i = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial b} = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - a \cdot x_i - b)}{\sigma_i^2} = 0 \quad (15)$$

Definendo

$$S_x = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2} \quad (16.a), S_{xx} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \quad (16.b), S_{xy} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i \cdot y_i}{\sigma_i^2} \quad (16.c) \text{ e } S = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (16.d)$$

si ha che:

$$a = \frac{S \cdot S_{xy} - S_x \cdot S_y}{S \cdot S_{xx} - S_x \cdot S_x}, \quad (17) \quad B = \frac{S_{xx} \cdot S_y - S_x \cdot S_{xy}}{S \cdot S_{xx} - S_x \cdot S_x} \quad (18)$$

Può essere utile formalizzare il metodo con l'introduzione di una matrice 2x2, che rappresenta l'inverso della matrice di covarianza dei coefficienti e due

vettori, scrivendo esplicitamente il problema come un sistema lineare nella forma:

$$\hat{A} \cdot \vec{a} = \vec{v} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} S_{XX} & S_X \\ S_X & S \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{YX} \\ S_Y \end{pmatrix} \quad (19)$$

si vede quindi facilmente come il vettore dei coefficienti ignoti \vec{a} si ricava risolvendo l'equazione $\vec{a} = A^{-1} \vec{v}$.

In questo modo si può facilmente estendere il procedimento precedente al caso in cui la grandezza y sia una combinazione lineare di n misure indipendenti x_k , in maniera più compatta come $y = \vec{a} \cdot \vec{x} + b$. La matrice da invertire ora è una matrice quadrata di dimensione $(n+1) \cdot (n+1)$, così composta:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} M & \vec{S}_X \\ (\vec{S}_X)^t & S \end{pmatrix}, \quad (20)$$

M è la matrice ($n \times n$) con la correlazione dei coefficienti x , in cui

$$M_{ij} = \frac{\sum x_i \cdot x_j}{\sigma^2} = S_{x_i x_j}, \quad (21)$$

\vec{S}_x per similitudine il vettore che contiene le somme S_{x_i} ed S ha il significato solito. Quindi per ricavare gli $n+1$ coefficienti basta calcolare la matrice \hat{A} ed il vettore $\vec{v} = (\vec{S}_{yx_k}, S_y)$ (22),

in cui i primi n elementi valgono $S_{yx_k} = \sum \frac{(x_k)_i \cdot y_i}{\sigma_i^2}$ (23) e l'ultimo S_y , dati questi

$$\text{ingredienti: } (\vec{a}, b) = \hat{A}^{-1} \cdot \vec{v} \quad (24)$$

Caso non lineare

In molti casi la funzione $y = f(x; \vec{a})$ non è lineare, in questi casi non si può indicare un modo certo per ottenere i parametri. Nel caso in cui la dimensione dello spazio dei parametri sia maggiore di 1, caso tipico, il problema diventa fortemente non lineare ed è conveniente ricorrere all'uso di

piccoli programmi di analisi numerica specifici che minimizzino la variabile χ^2 come il matlab da noi utilizzato

3.1.c Il metodo del PGA

L'algoritmo PGA (acronimo di Phase Gradient Autofocus) 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.

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.

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.

Nel nostro caso tale potente algoritmo è applicato a segnali la cui fase è stata corrotta attraversando la ionosfera marziana .

Si tratta di una tecnica di post-processing 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 dal segnale.

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.

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. Tale stima viene integrata e poi privata della sua parte lineare. La quantità così ottenuta rappresenta la stima dell'errore di fase e servirà per compensare il segnale. Questo procedimento è di tipo iterativo e continua finché l'errore di fase estratto non risulta sufficientemente piccolo e ciò garantisce la convergenza del metodo.

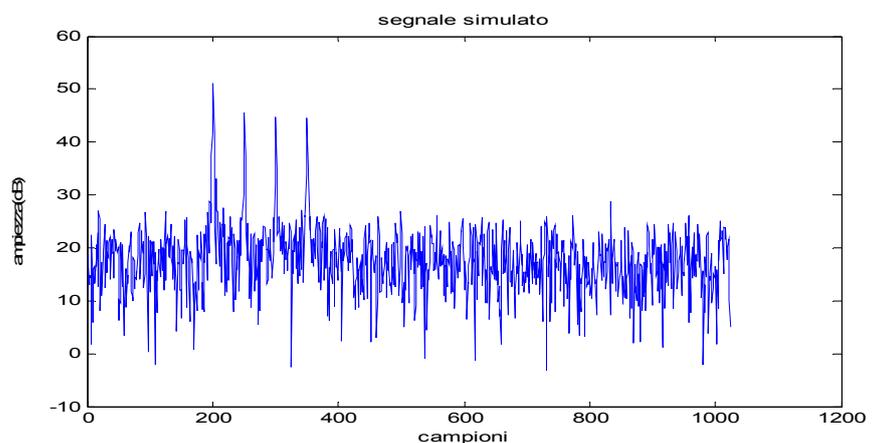
3.2 Valutazione del ritardo ionosferico:la routine Main_sim

Come detto inizialmente proveremo la validità del lavoro svolto utilizzando dati simulati: a tal fine è stato ideato un algoritmo ,denominato main _sim, che ha lo scopo ben preciso di simulare la generazione di un segnale radar (nel nostro caso un chirp), sovrapporre alla sua fase un rumore in modo da

simulare l'eco che ha attraversato la ionosfera, richiamare la sub-routine PGA⁴, e successivamente si compensa il ritardo temporale.

Nel listato in Matlab iniziamo col definire le specifiche del segnale da generare conformemente con quelle adottate sul radar di Marsis(o per Sharad) . Dopodiché richiamiamo la sub_routine ,scenariogen⁵,che ha lo scopo di generare un segnale di tipo chirp corrotto dal rumore termico. All'interno di questa sub routine 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 e successivamente effettuando un ciclo for realizziamo, 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).

Dopodiché deriviamo la risposta impulsiva di questo segnale simulato il cui risultato grafico è il seguente(fig 3.1):



Fig((3.1):rappresentazione del segnale simulato non affetto da disturbo ionosferico

⁴ Tale sub_routine serve per la stima della parte quadratica dell'errore, è già stata implementata e validata ed è per tale motivo che si rimanda ad altri testi per ulteriori approfondimenti

⁵ Lo script in matlab della function scenariogen è presentato in appendice, tale sub_routine ha lo scopo di generare il segnale radar

A questo punto introduciamo il disturbo legato alla ionosfera marziana nella fase del singolo chirp e tramite un ciclo for per il segnale completo, ricavando anche in questo caso la risposta impulsiva. Abbiamo quindi un segnale che simula perfettamente una eco proveniente da una superficie rugosa e distorta dal passaggio attraverso la ionosfera marziana.

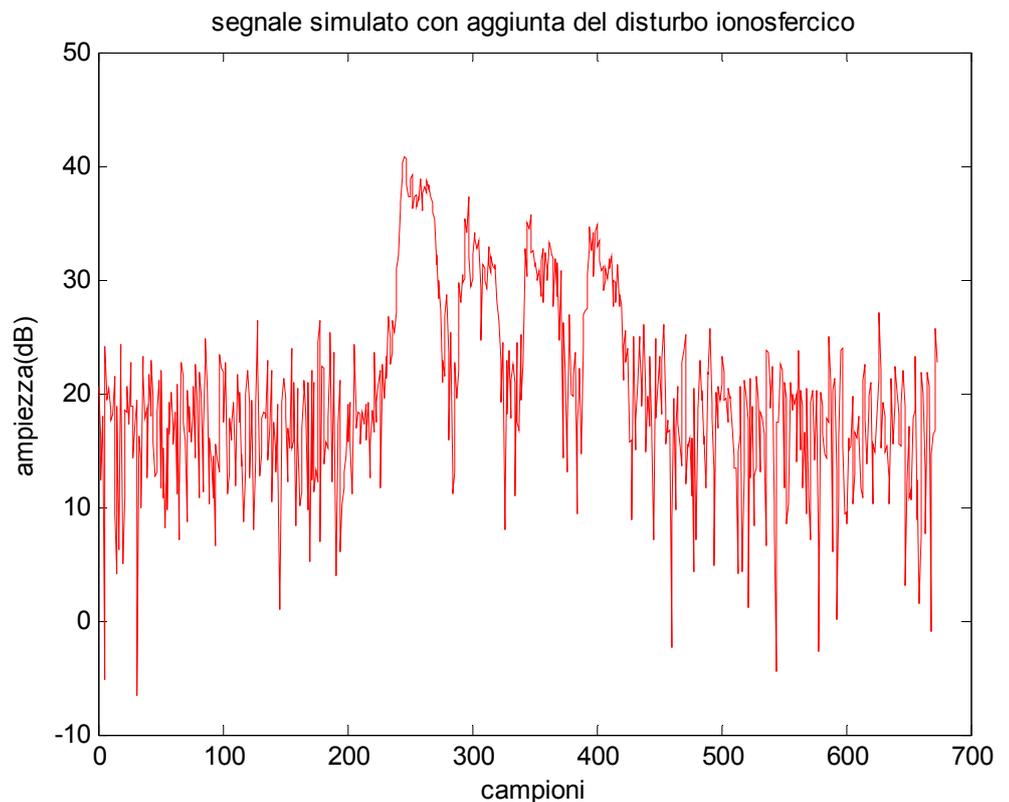
Il rumore è introdotto richiamando la function `iono_model`⁶ che permette di ricavare il disturbo che induce la ionosfera marziana al variare dell'angolo solare di zenith e successivamente è aggiunto alla fase del segnale generato ed alla sua ampiezza così come segue:

Alla fine di ciò la risposta impulsiva che si ricava è del tipo(fig3.2):

Da tale grafico si evidenzia chiaramente che il disturbo ionosferico induce una attenuazione del segnale, una distorsione ed uno shift temporale.

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 nel quale è stata compensata la parte quadratica del disturbo ionosferico restituendo un segnale del tipo(fig. 3.3):



Fig(3.2):rappresentazione del segnale simulato con l'aggiunta del disturbo ionosferico

⁶ tale sub_routine è trattata nel paragrafo successivo

A questo punto il segnale presenta solo un ritardo temporale che sarà corretto richiamando i modelli equivalenti che sono stati ideati. Abbiamo implementato due modelli: il primo che calcola il ritardo temporale a partire dal disturbo introdotto ed il

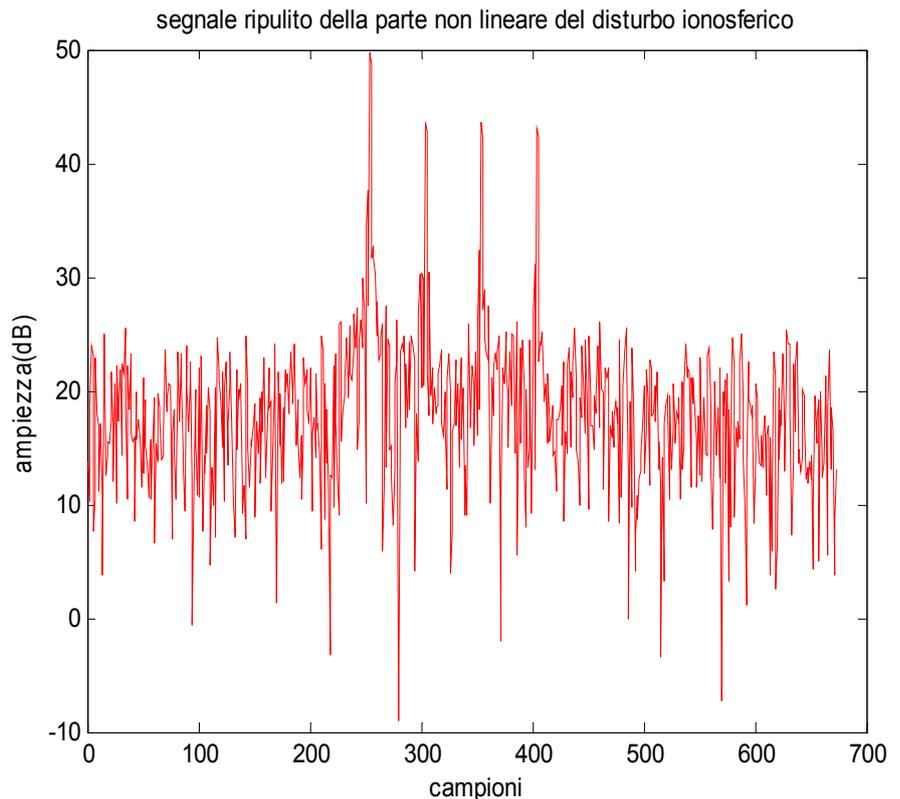


Fig 3.3 segnale simulato con aggiunta del disturbo ionosferico e successivamente corretto mediante PGA

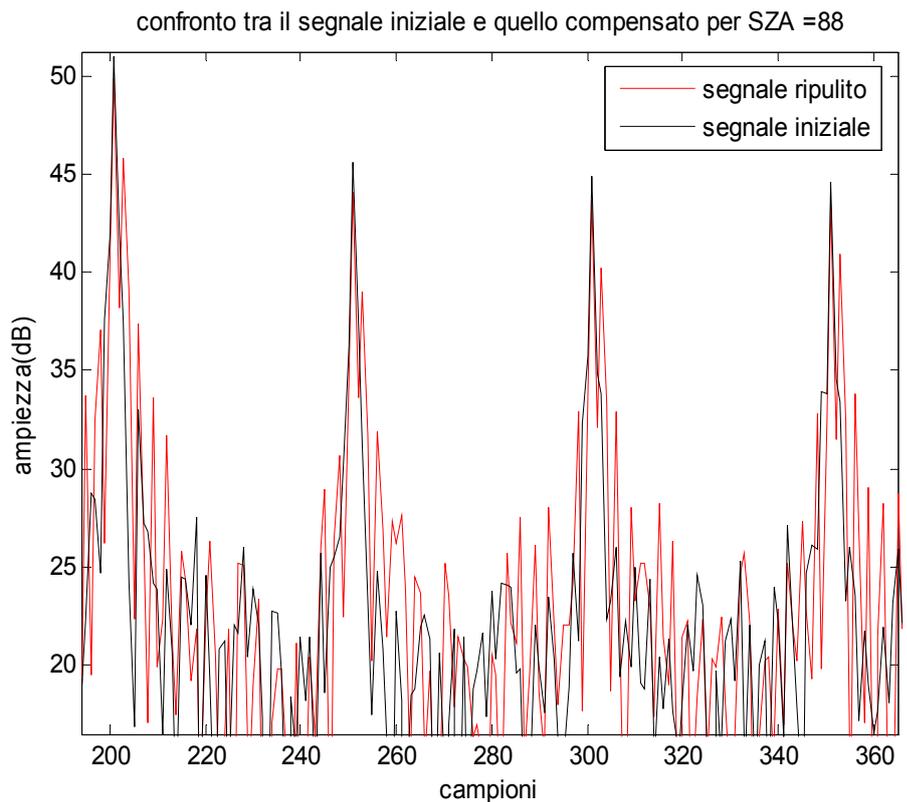
secondo che calcola il ritardo sfruttando l'errore quadratico stimato dal PGA.

In verità i modelli permettono di calcolare sia il termine lineare (ciò equivale a dire il ritardo temporale) che la frequenza di plasma equivalente e la τ_0 equivalenti⁷. Quest'ultimi serviranno, così come visto nel secondo capitolo, per verificare l'attendibilità fisica della soluzione ottenuta.

In questo modo abbiamo la possibilità di più stime dello shift ed è per tale motivo che tali valori saranno confrontati fra di loro e con il valore corretto del ritardo. Quest'ultimo è stato ottenuto attraverso la (7) a partire dalla conoscenza del valore corretto del termine lineare di fase, che è stato ricavato dal disturbo totale introdotto applicando un Polyfit (in funzione della frequenza di banda) al primo ordine.

⁷ la f. equivalente e la τ equivalente fanno riferimento al modello ionosferico equivalente trattato nel capitolo II e che è stato implementato nell sub_routine equiv_model_1 di cui tratteremo nei par. successivi

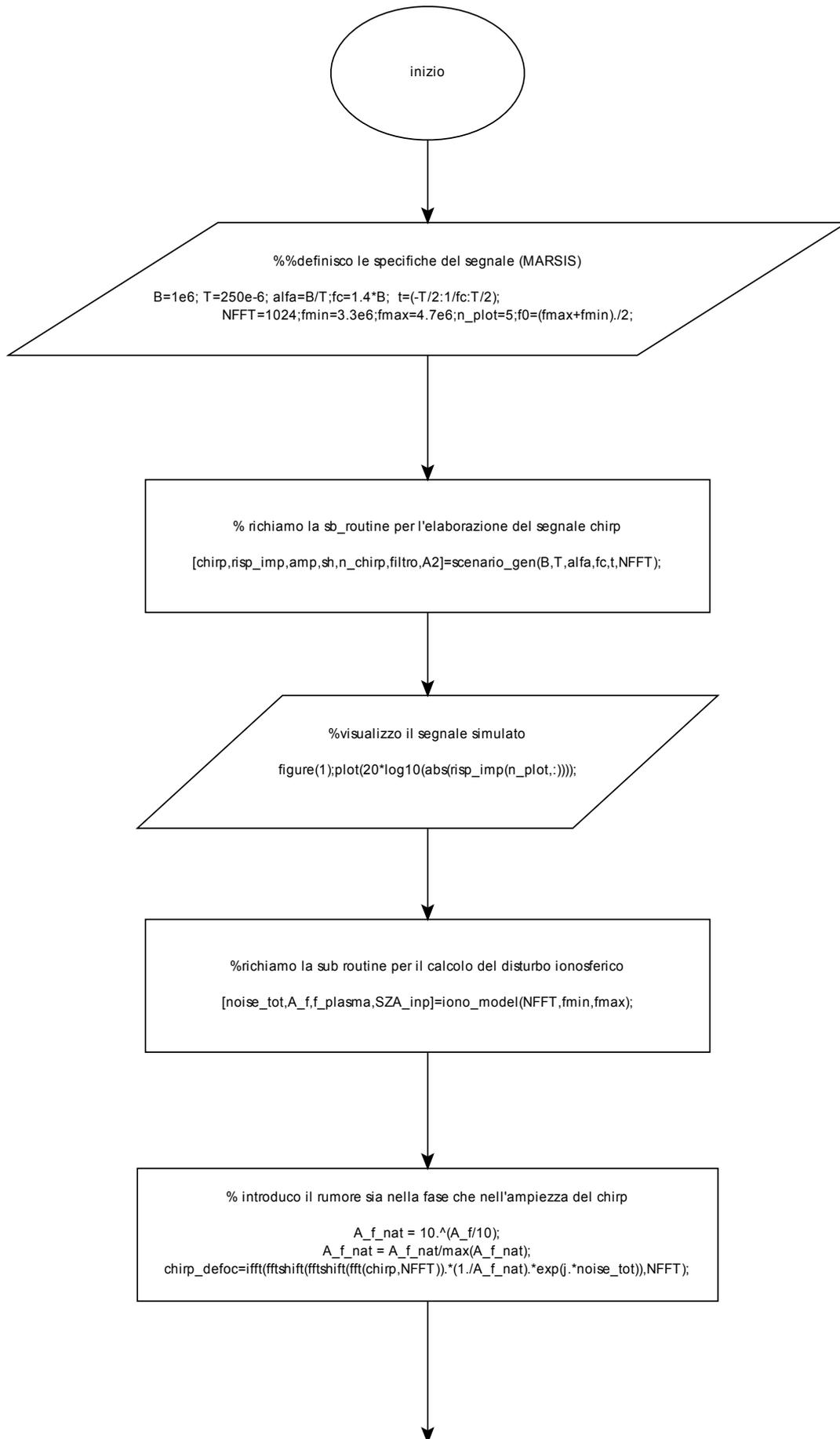
Dopo ciò, valutata l'attendibilità dei risultati ottenuti è possibile compensare lo shift temporale ed in tal modo otteniamo un segnale praticamente identico a quello iniziale e quindi abbiamo totalmente compensato l'errore introdotto così come mostrato in figura 3.4:

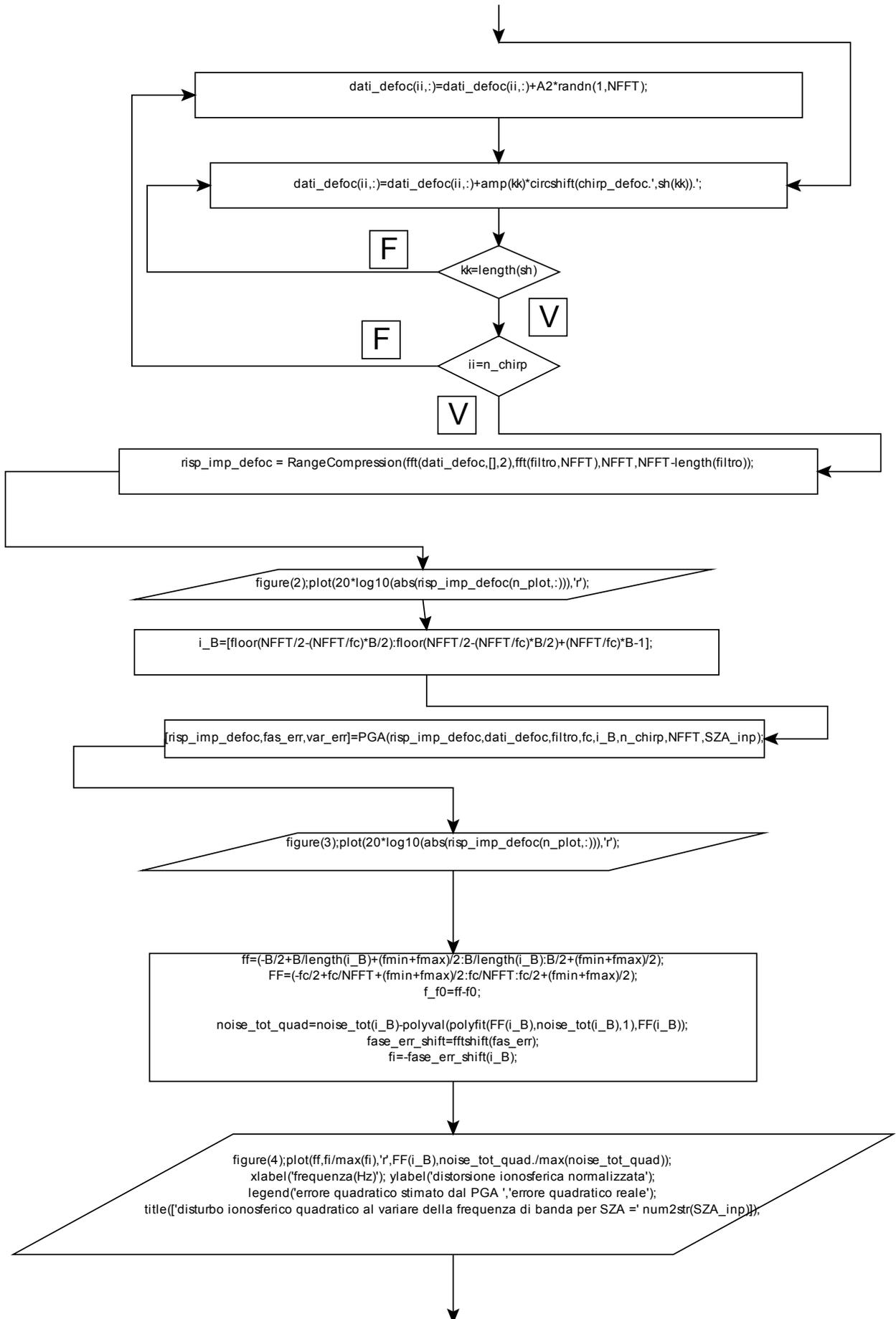


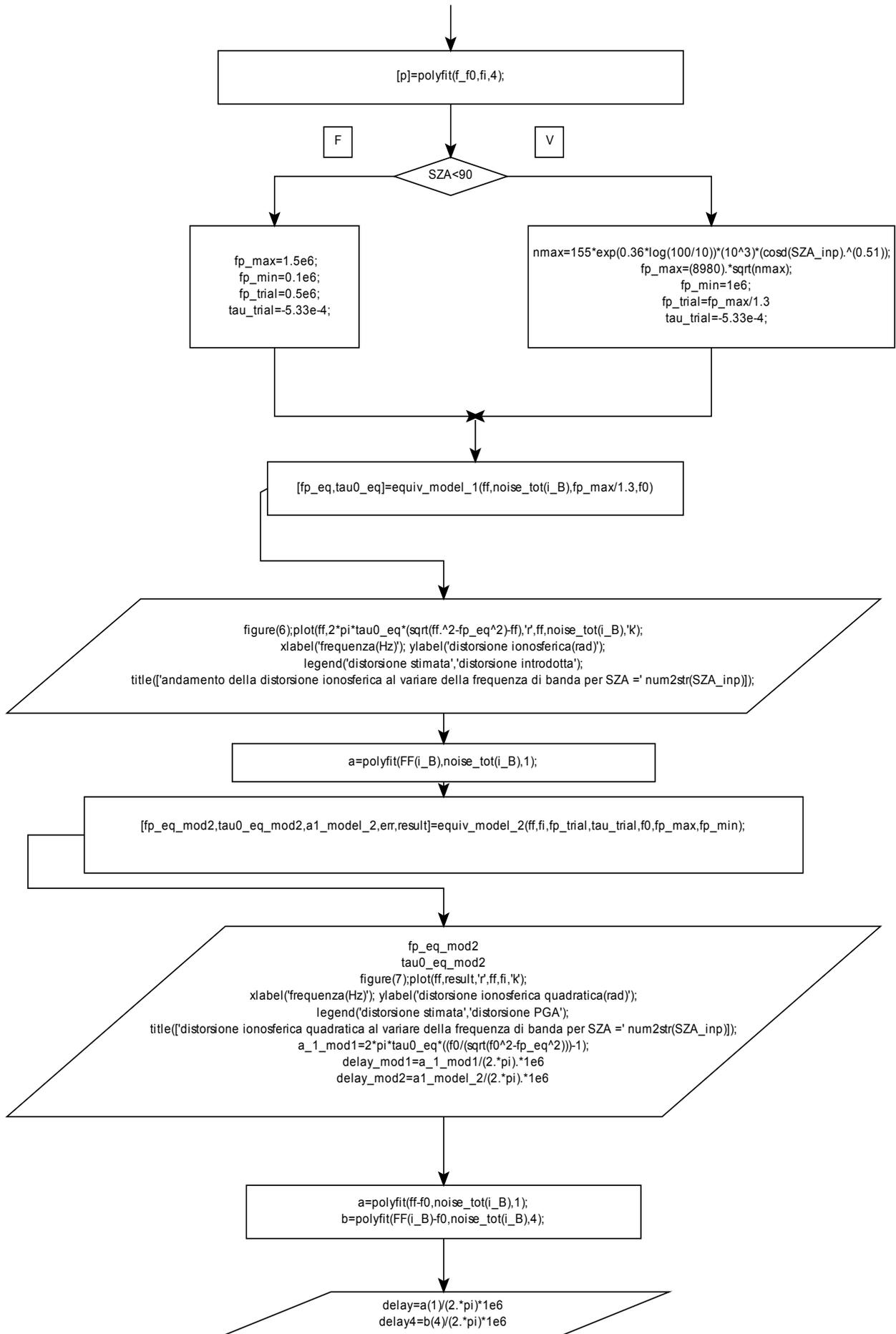
Fig(3.4) segnale simulato con aggiunta del disturbo ionosferico e successivamente corretto mediante PGA e compensato del ritardo ionosferico mediante equiv_mod2

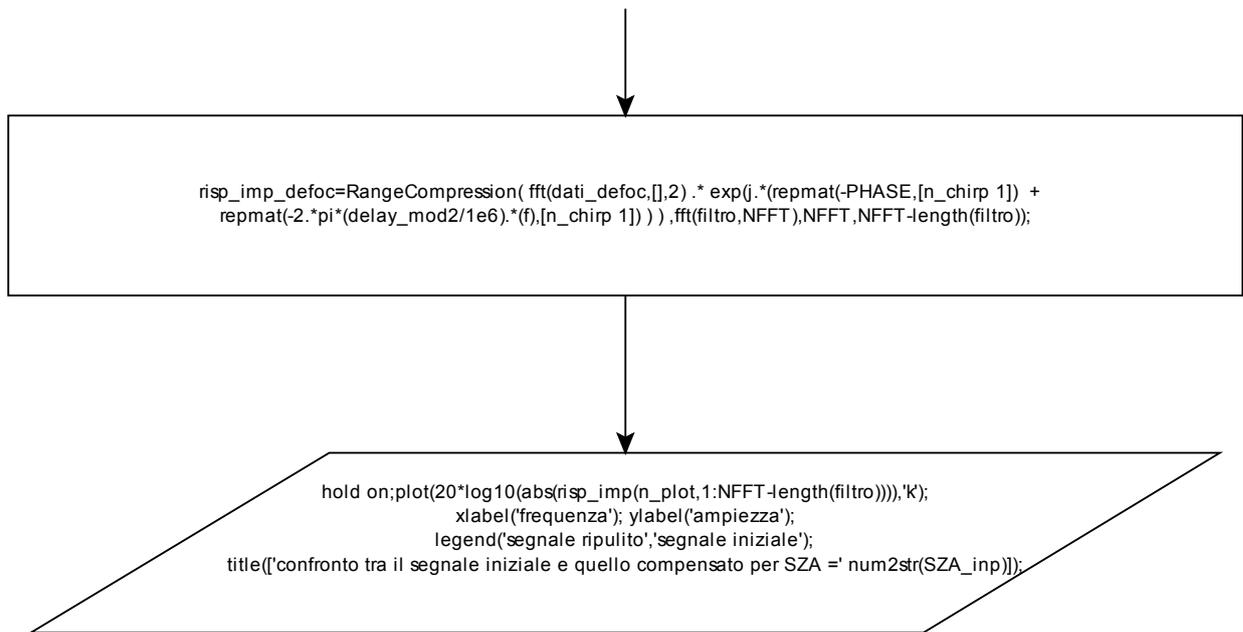
Dopo aver chiarito le operazioni compiute dalla routine main_sim è opportuno fornire un diagramma logico dello stesso. Successivamente descriveremo quelle sub_routine utilizzate dal programma principale e che mai fino ad ora erano state implementate.

3.2.b diagramma logico(o a blocchi) della routine main_sim









3.3 descrizione della sub_routine equivalent_mod_1

La sub-routine `equivalent_mod_1` ha lo scopo di dimostrare la validità del modello utilizzato per descrivere l'andamento della distorsione ionosferica in funzione della frequenza attraverso l'implementazione di una procedura ai minimi quadrati che mi permetta di stimare la distorsione di fase attraverso l'uso del modello equivalente bidimensionale (8).

Tale function accetta come input il vettore delle frequenze di banda, il disturbo ionosferico, la portante usata mentre restituisce in output la frequenza di plasma equivalente e la τ_0 equivalente:

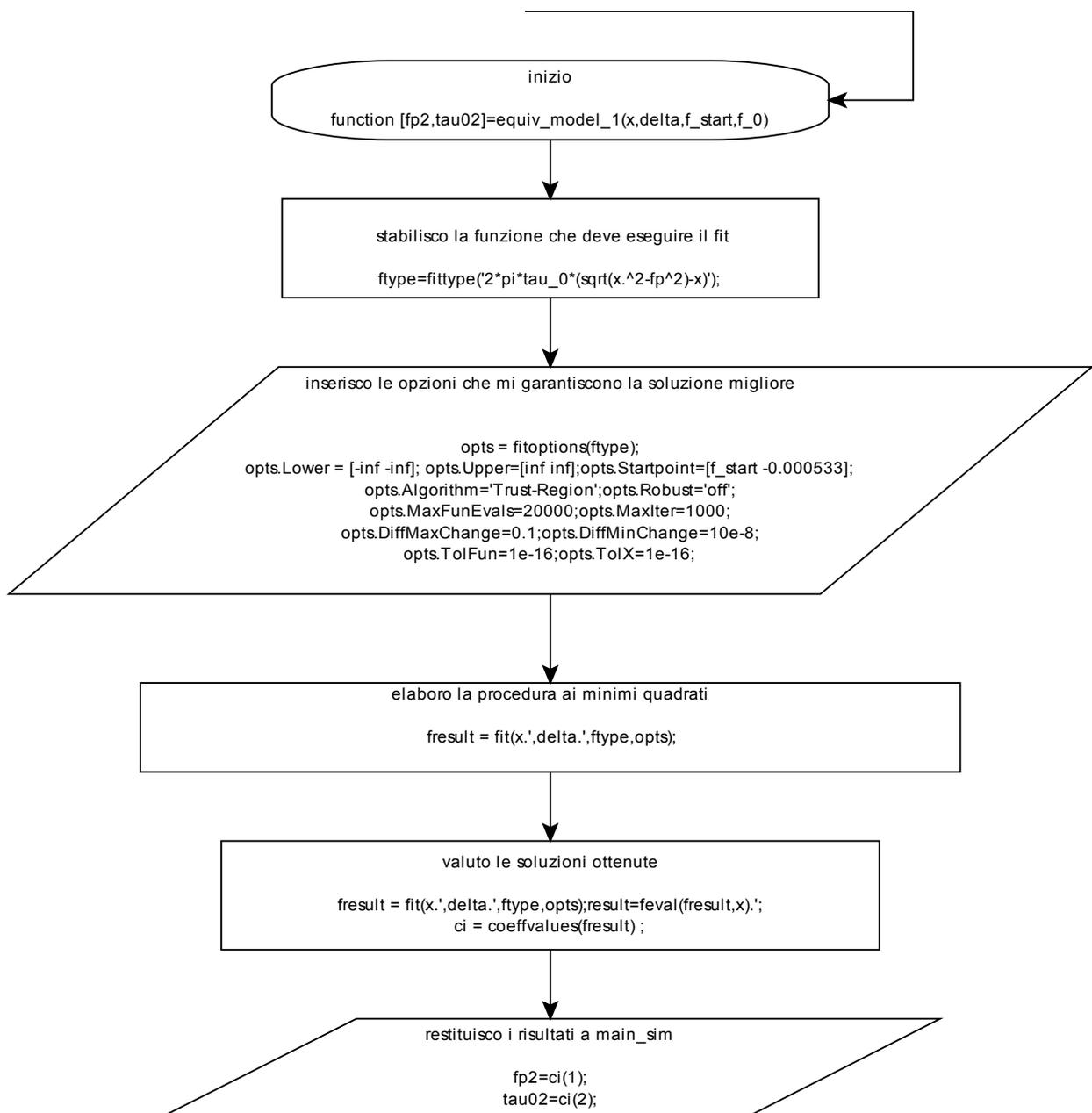
Attraverso il comando `fitype` seleziono il modello utilizzato per il fit ai minimi quadrati e con i sottocomandi `opts` stabilisco le modalità di ricerca che mi garantiscano una corretta e rapida convergenza :

- 1) limiti inferiori e superiori delle variabili, fissati in base alle conoscenze fisiche del problema
- 2) i punti iniziali di ricerca, scelti in modo da indirizzare la soluzione e raggiungere la convergenza il prima possibile
- 3) il numero massimo di funzioni ed iterazioni da valutare
- 4) le tolleranze

5)alcuni parametri secondari

Fatto ciò attraverso l'uso del comando "fit" elaboro la procedura ai minimi quadrati che stimi la curva rappresentante il disturbo ionosferico con il modello da me introdotto. Alla fine di questa fase la soluzione che mi garantisce una accuratezza maggiore viene restituita alla routine main_sim.

3.3.b diagramma logico(o a blocchi) sub_routine equivalent_mod_1



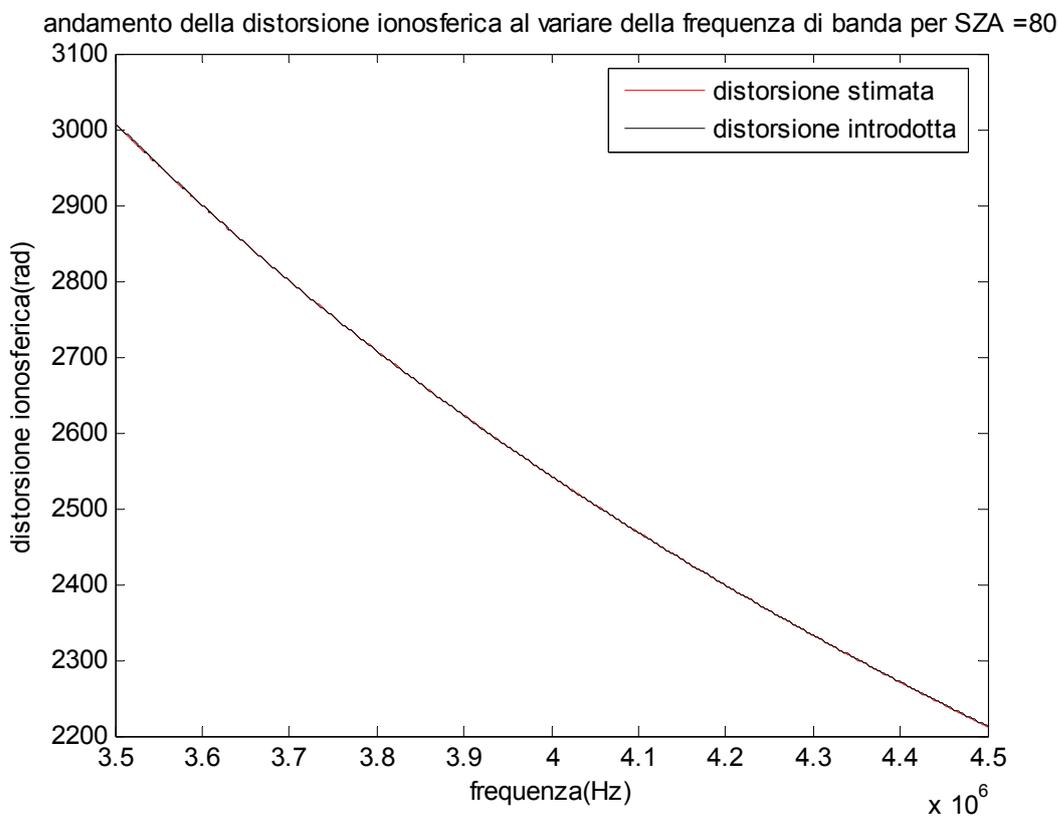
3.3.c Valutazione grafica del modello equivalente 1

In questo paragrafo confronteremo graficamente le curve stimate dal modello equivalente con quelle realmente introdotte attraverso la sub-routine `iono_model` al fine di mostrare che il modello usato è in grado di descrivere l'andamento del disturbo ionosferico al variare della frequenza di plasma. Le simulazioni, ricavate al variare del SZA, mostreranno la perfetta coincidenza tra disturbo stimato e quello introdotto. Per rendere chiaro che le soluzioni ottenute siano fisicamente accettabili si è riportato anche il valore della frequenza di plasma equivalente in modo da poterlo confrontare con le distribuzioni delle frequenze di plasma al variare delle altitudini introdotte con la sub-routine `iono-model`.

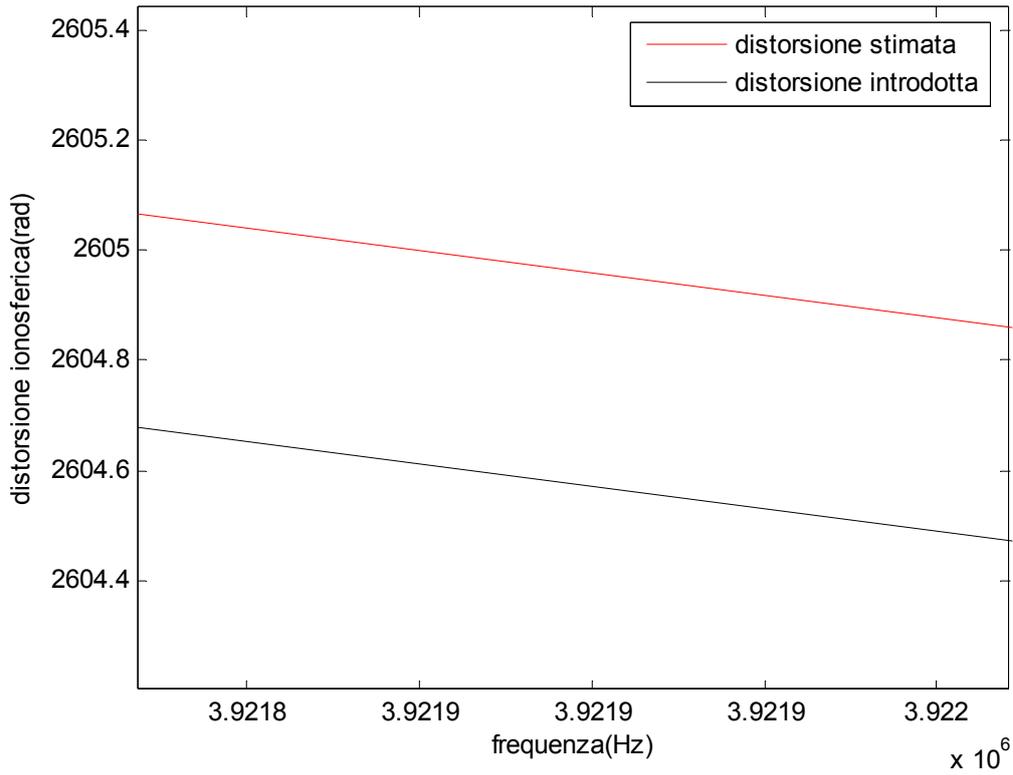
Verranno quindi, presentate varie simulazioni ottenute al variare dello SZA:

| |
|------------------------|
| $fp_eq = 2.2625e+006$ |
|------------------------|

| |
|---------------------------|
| $tau0_eq = -5.7711e-004$ |
|---------------------------|



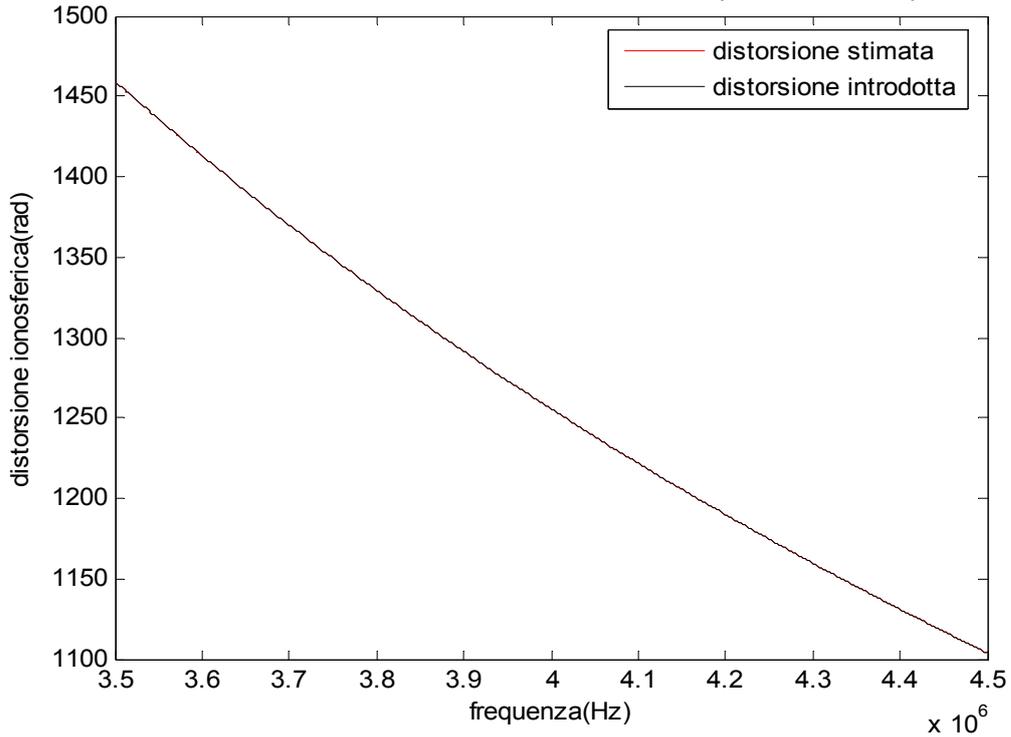
andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =80



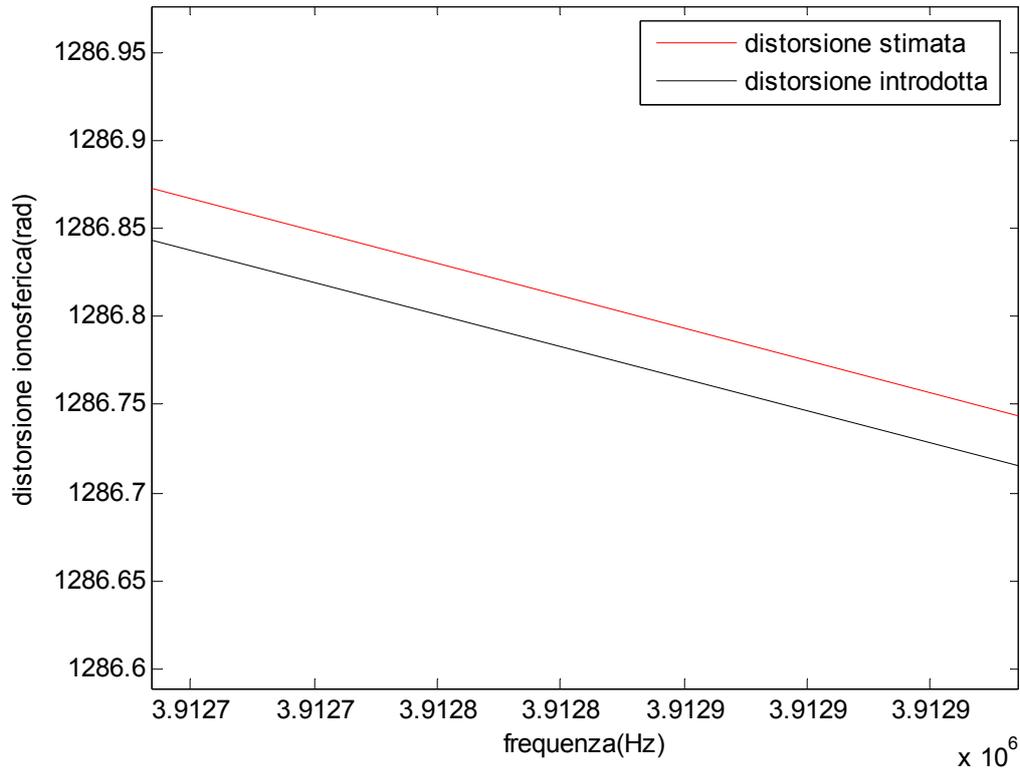
$f_p \text{ eq} = 1718531.83597253$

$\tau_{0 \text{ eq}} = -0.000515100746415617$

andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =85



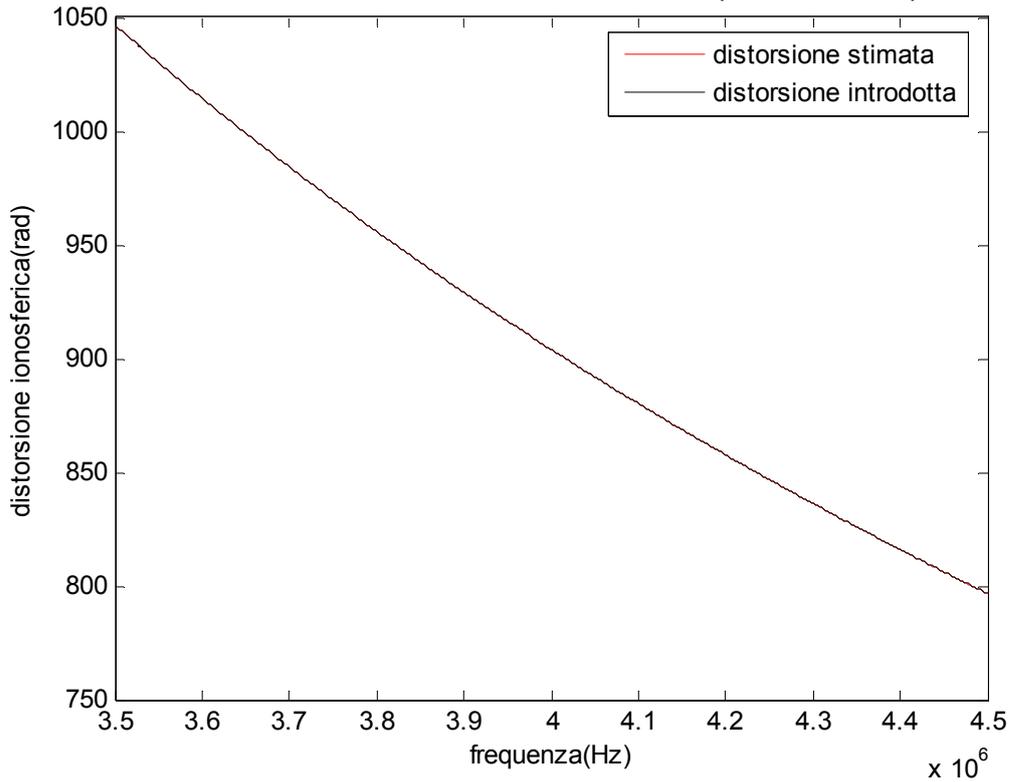
andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =85



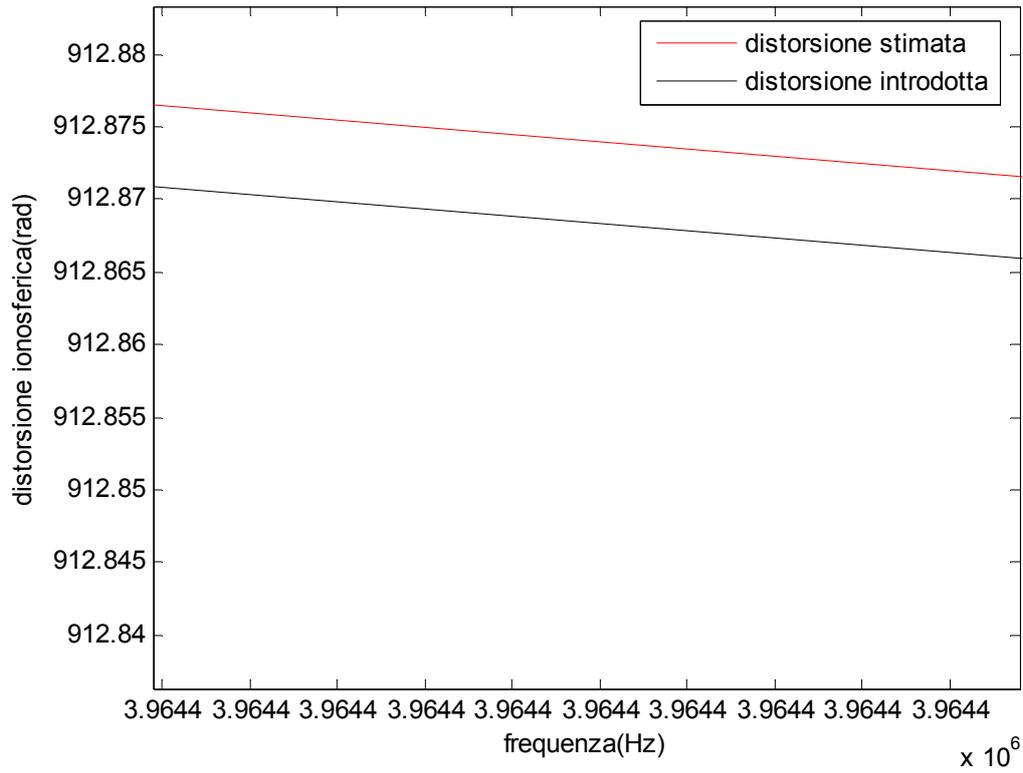
$f_p \text{ eq} = 1.5370e+006$

$\tau_{0 \text{ eq}} = -4.6859e-004$

andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =89



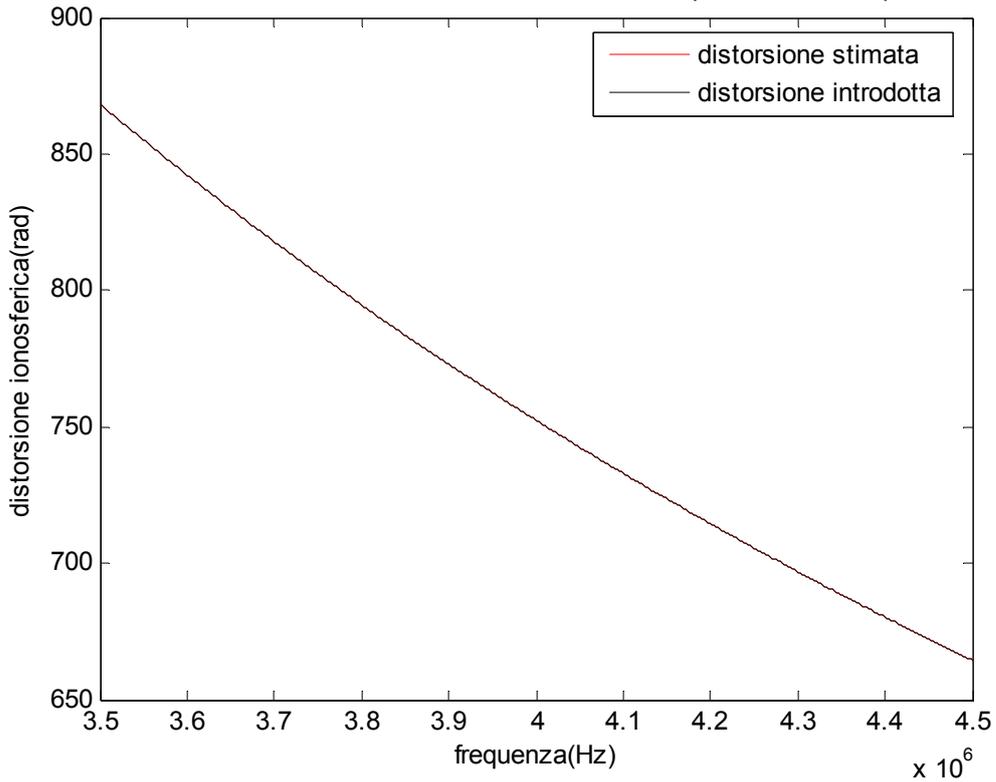
andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =89



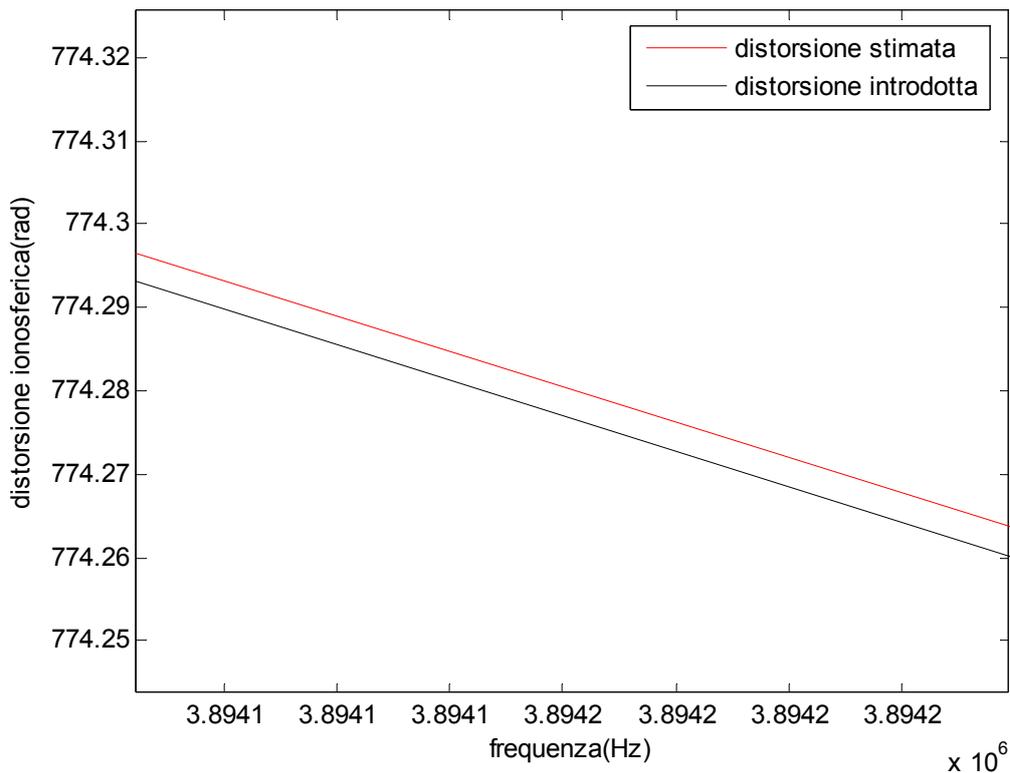
$f_{p_eq} = 1363430.12593667$

$\tau_{0_eq} = -0.000499953623079771$

andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =89.5

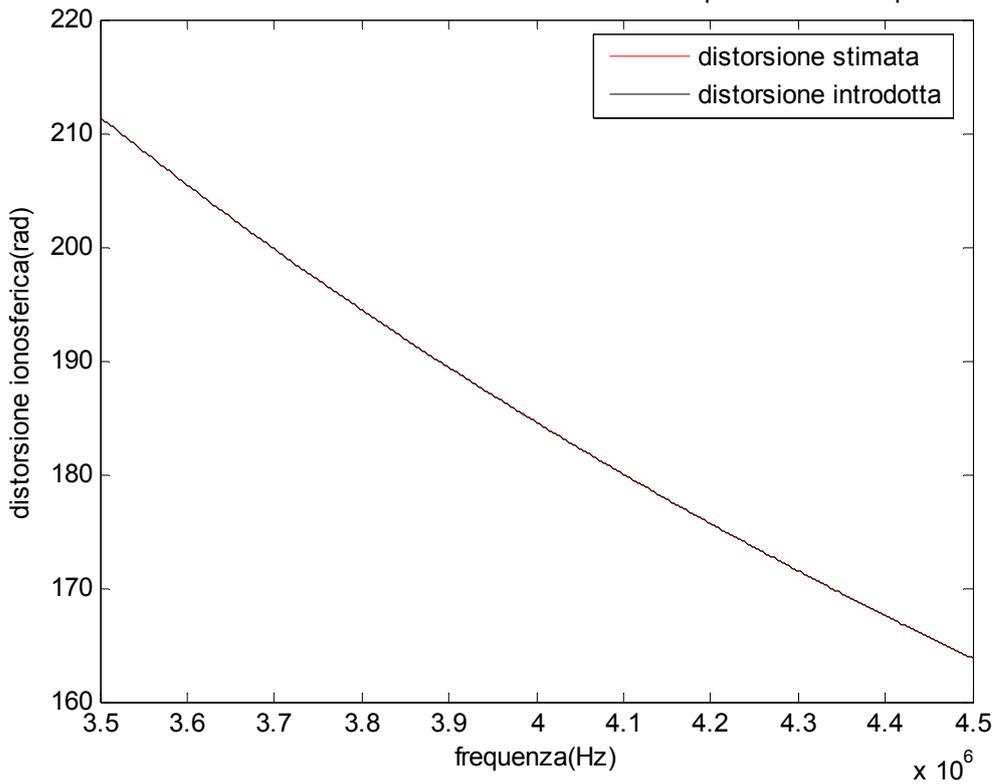


andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =89.5

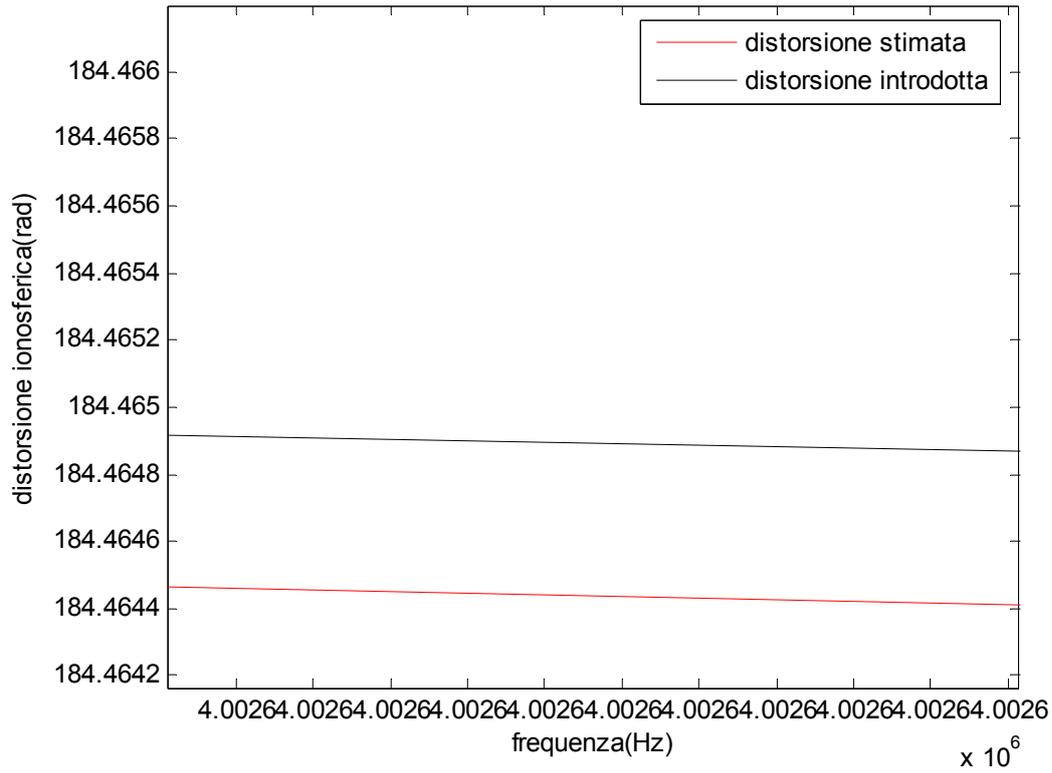


| |
|--------------------------------------|
| $f_p \text{ eq} = 6.9633e+005$ |
| $\tau_{0 \text{ eq}} = -4.8100e-004$ |

andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =95



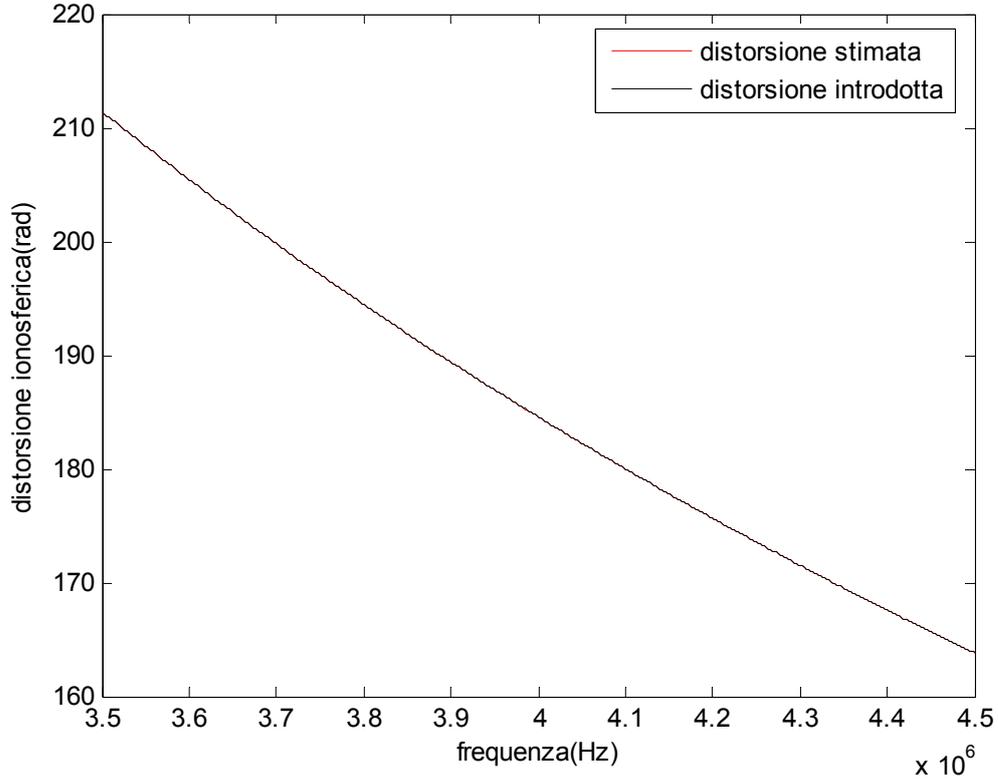
andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =95



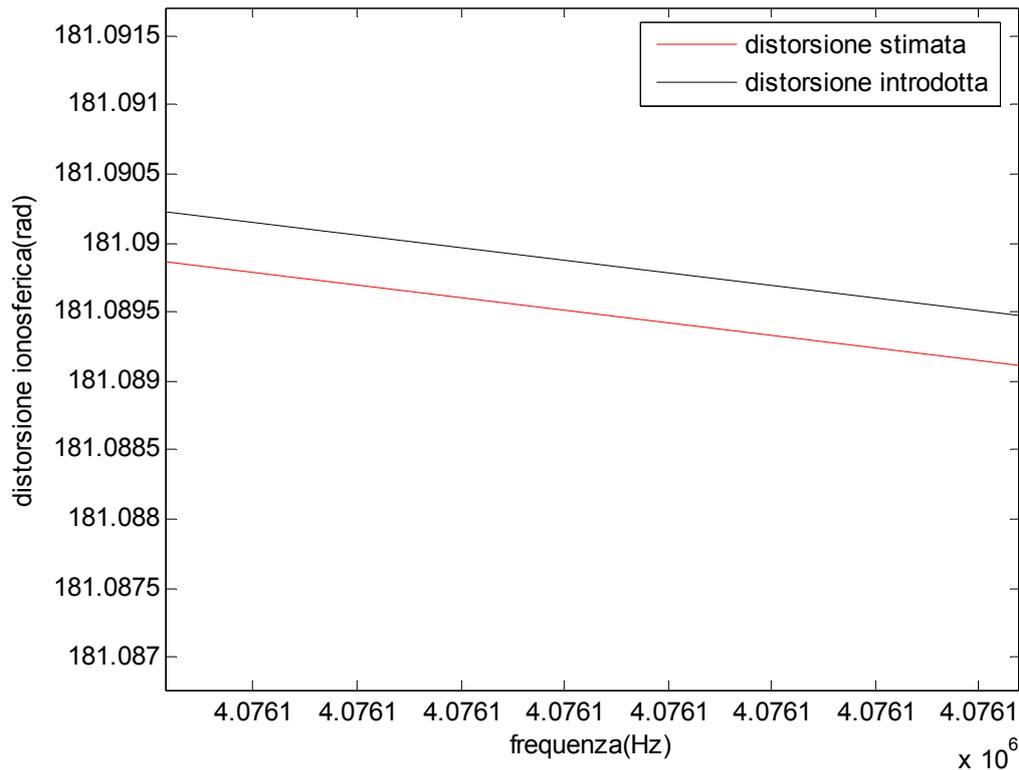
$f_p \text{ eq} = 6.9633e+005$

$\tau_{0 \text{ eq}} = -4.8100e-004$

andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA =105



andamento della distorsione ionosferica al variare della frequenza di banda per SZA = 105



3.4 descrizione della sub_routine equivalent_mod_2

La sub-routine equivalent_mod_2 ha lo scopo di dimostrare la validità del modello utilizzato per descrivere l'andamento della parte non lineare del disturbo ionosferico in funzione della frequenza. Ciò è realizzato implementando una procedura ai minimi quadrati che mi permette di stimare di tra l'altro anche il coefficiente lineare dell'errore ionosferico e quindi di estrapolare una stima del ritardo ionosferico.

La function equiv_model_2 accetta come input rispettivamente la frequenza, l'errore stimato dal PGA, la frequenza equivalente di tentativo, la τ_o di tentativo, la frequenza equivalente massima e minima, mentre restituisce in output la frequenza equivalente, la τ_o equivalente, il coefficiente lineare e la curva stimata ed inoltre l'errore quadratico medio della soluzione ottenuta.

La sub-routine equivalent_mod_2 ha lo scopo di dimostrare la validità del modello utilizzato per descrivere l'andamento della parte non lineare della distorsione ionosferica in funzione della frequenza attraverso l'implementazione di una procedura ai minimi quadrati che mi permetta di

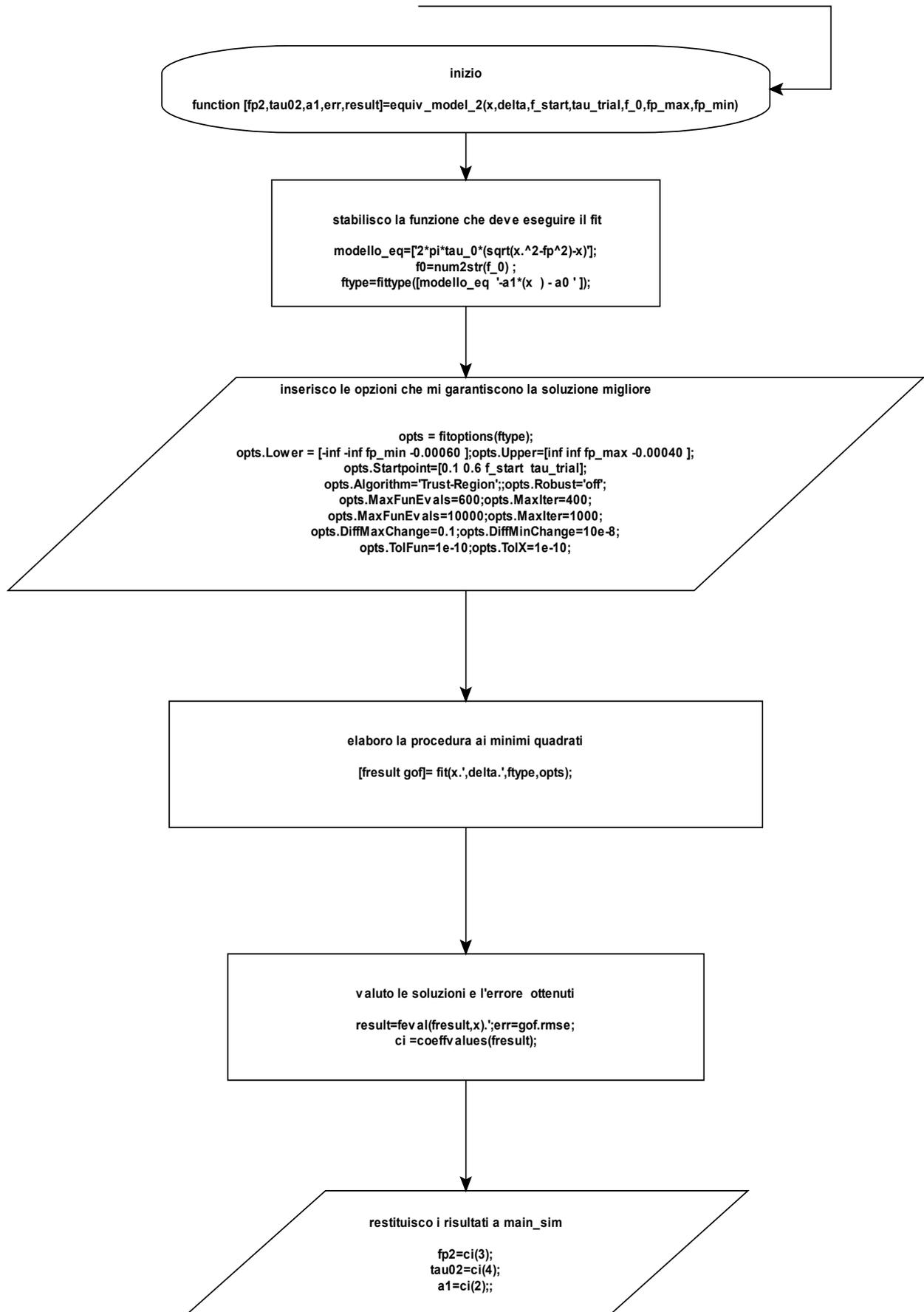
stimare la distorsione di fase ricavata dal PGA attraverso l'uso del modello equivalente bidimensionale (9).

Tale function accetta come input il vettore delle frequenze di banda, il disturbo ionosferico ricavato dal PGA, la portante usata mentre restituisce in output la frequenza di plasma equivalente e la τ_0 equivalente:

Attraverso il comando `fitype` seleziono il modello utilizzato per il fit ai minimi quadrati e con i sottocomandi `opts.` stabilisco le modalità di ricerca che mi garantiscano una corretta e rapida convergenza così come fatto per il modello precedente. In particolare è importante fare un cenno ad i limiti massimi e minimi scelti per la τ_0 equivalente, poiché si è notato che da tali valori dipende principalmente la bontà della procedura realizzata. Coerentemente con le informazioni scientifiche di cui disponiamo si è deciso di scegliere per la τ_0 equivalente un range del tipo $[0,0004;0,0006]$ (secondi), il che equivale ad uno spessore dello strato di plasma compreso in un intervallo $[60;90]$ (Km).

Fatto ciò attraverso l'uso del comando "fit" elaboro la procedura ai minimi quadrati che stimi la curva rappresentante il disturbo ionosferico con il modello da me introdotto. Alla fine di questa fase la soluzione che mi garantisce una accuratezza maggiore viene restituita alla routine `main_sim`.

3.4.b diagramma di flusso del function equiv_model2



3.4.c simulazioni: valutazione grafica della Sub-routine equiv_model2

In questo paragrafo dimostreremo graficamente l'efficacia del modello usato per la stima del τ_o equivalente, della frequenza equivalente e del termine lineare a_1 : il modello verrà provato procedendo secondo due modalità differenti:

- 1) inserendo come dato di ingresso la distorsione quadratica reale calcolata decurtando alla distorsione totale la sua parte lineare.
- 2) Inserendo come dato di ingresso la distorsione quadratica stimata attraverso il PGA. L'importanza di questa seconda modalità è legata al fatto che la stima del PGA è l'unico dato realmente disponibile quando ci confronteremo con i dati inviati dal radar MARSIS.

La scelta di procedere in due modi per testare l'efficacia del modello è dettata dal voler mettere in evidenza che l'errore che commettiamo nel valutare il ritardo è somma di due aliquote:

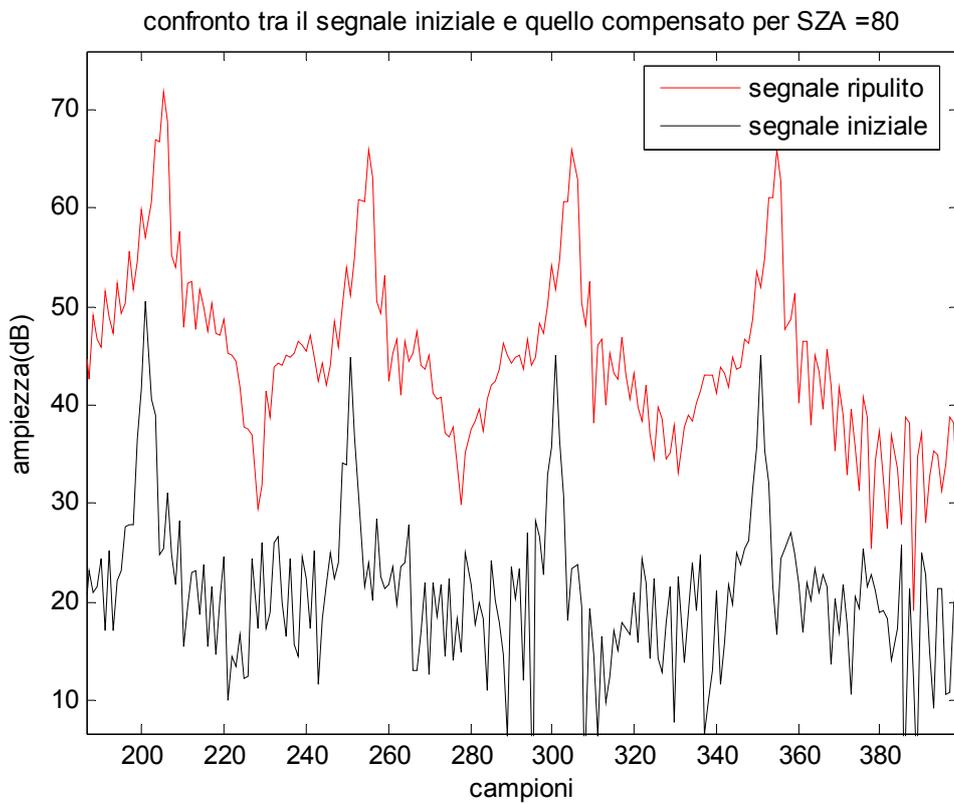
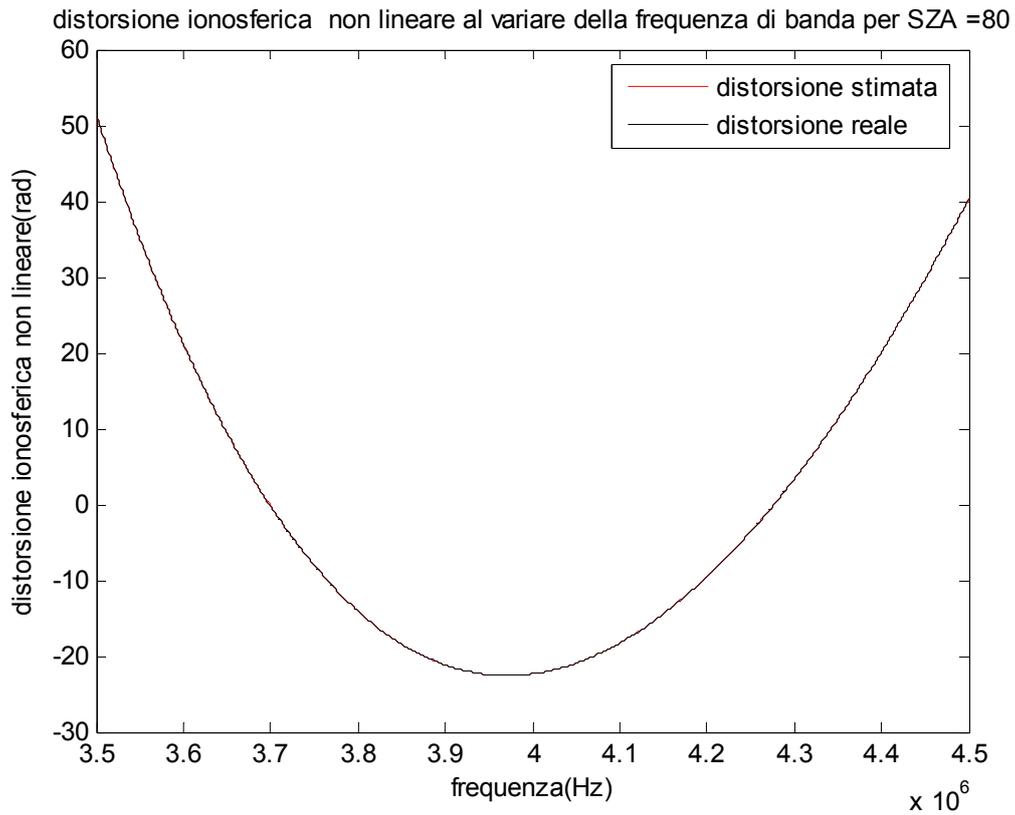
$$ERR_{equiv_mod_2} = ERR_{pga} + ERR_{m.q} \quad (25)$$

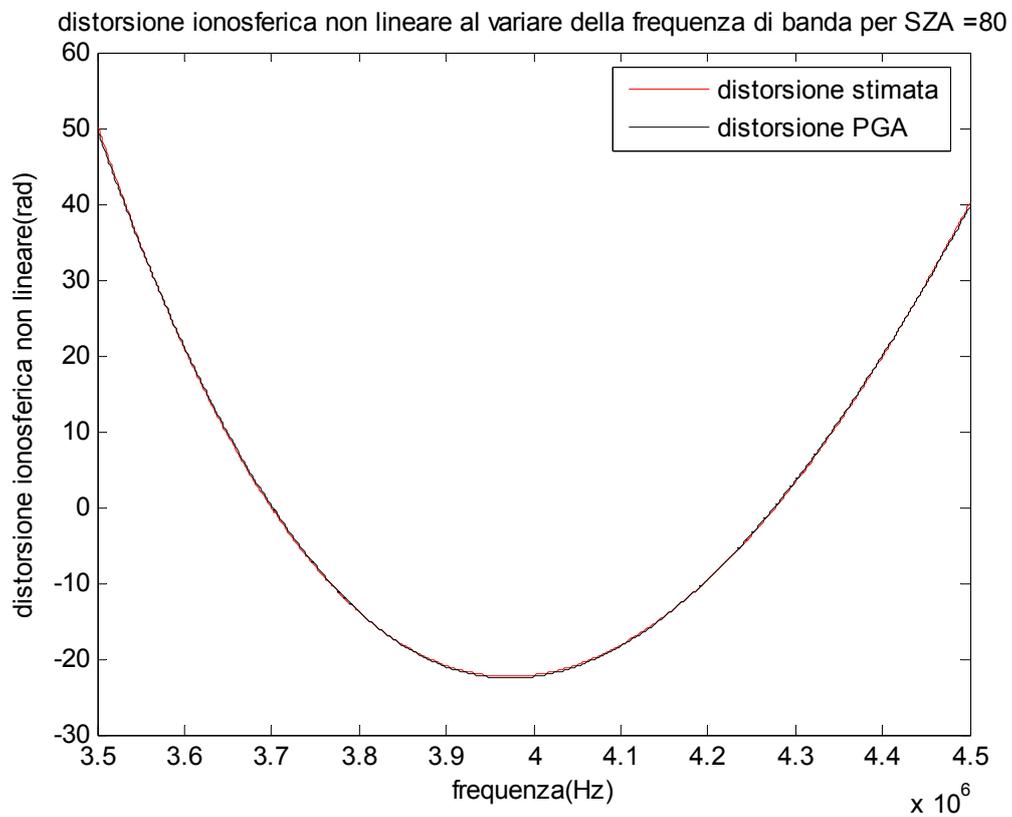
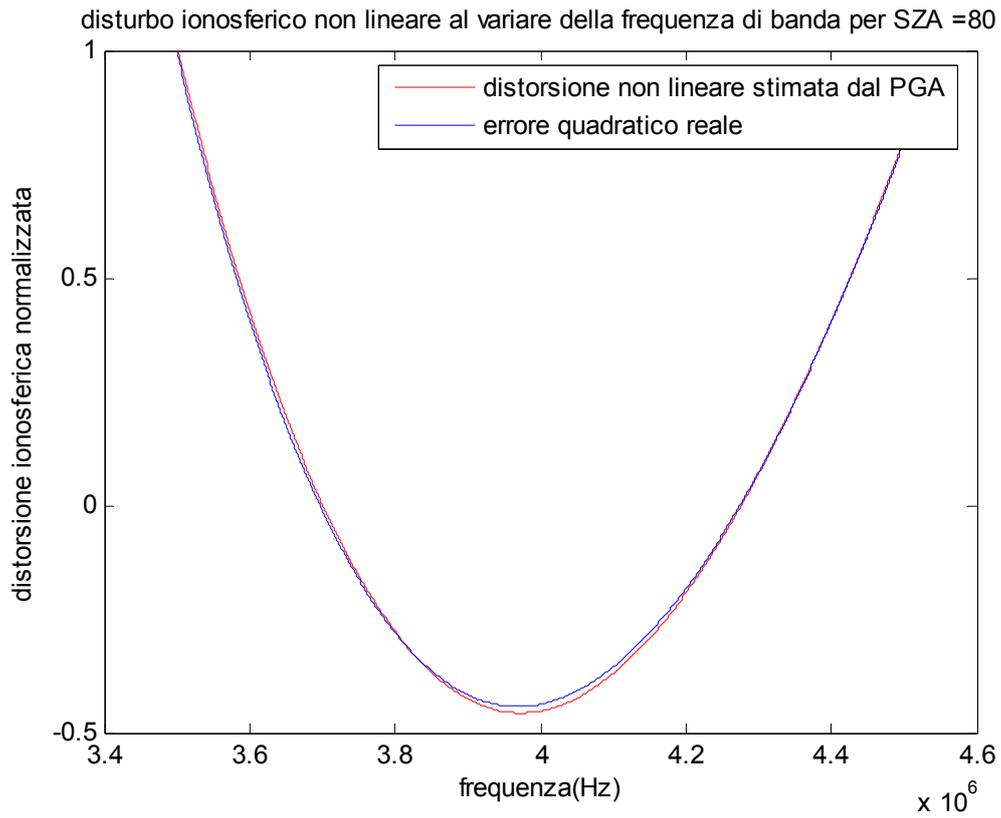
Dove il primo contributo rappresenta l'errore legato alla stima erronea commessa dal pga ed il secondo contributo è l'errore commesso applicando il metodo dei minimi quadrati. Inoltre mostreremo che la quasi totalità dell'errore che commettiamo usando il modello equivalente due è da attribuirsi all'errore che commette il PGA per cui varrà:

$$ERR_{equiv_mod_2} \cong ERR_{pga} \quad (26)$$

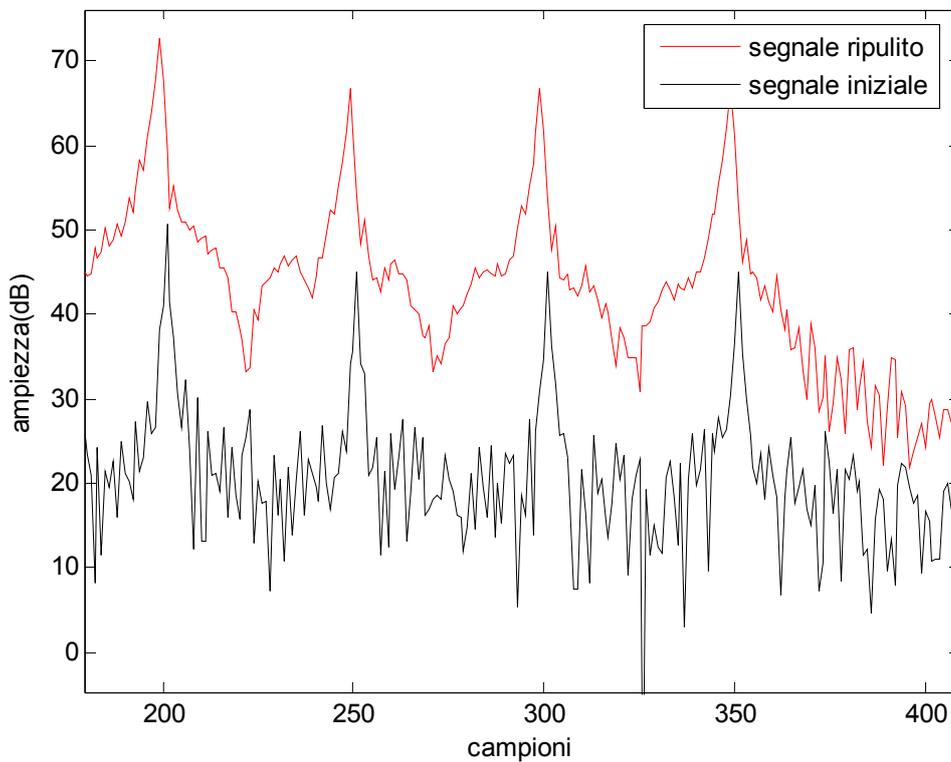
per cui ne consegue che ottimizzando quest'ultimo miglioreranno di conseguenza anche le prestazioni del mod_eq_2

SZA=80



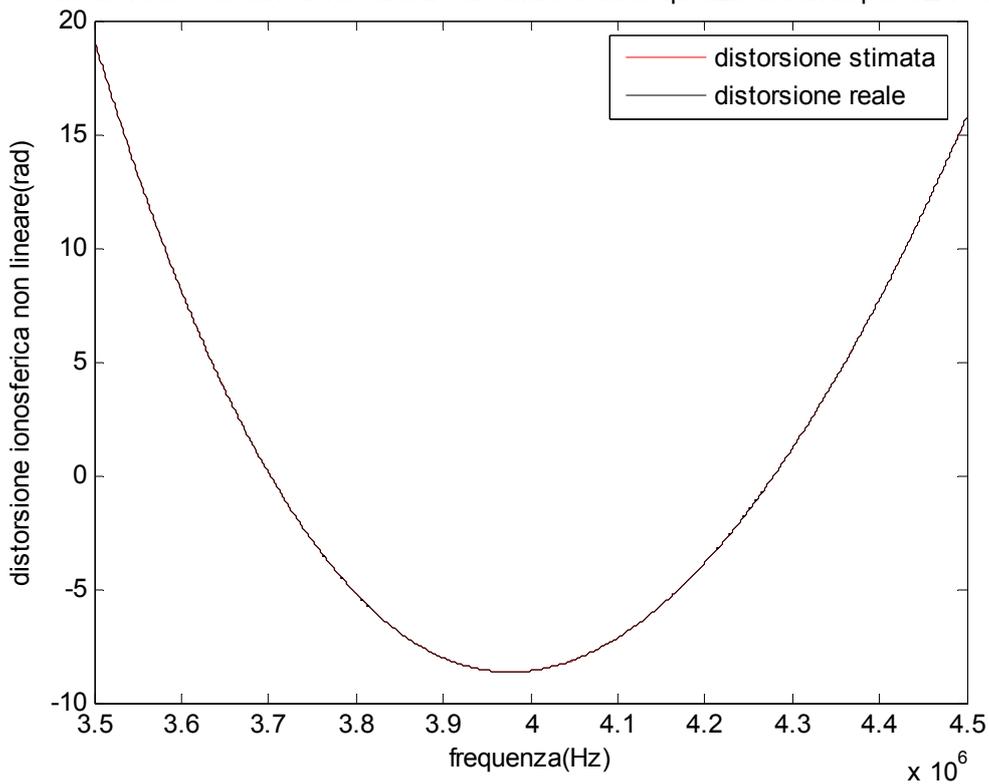


confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =80

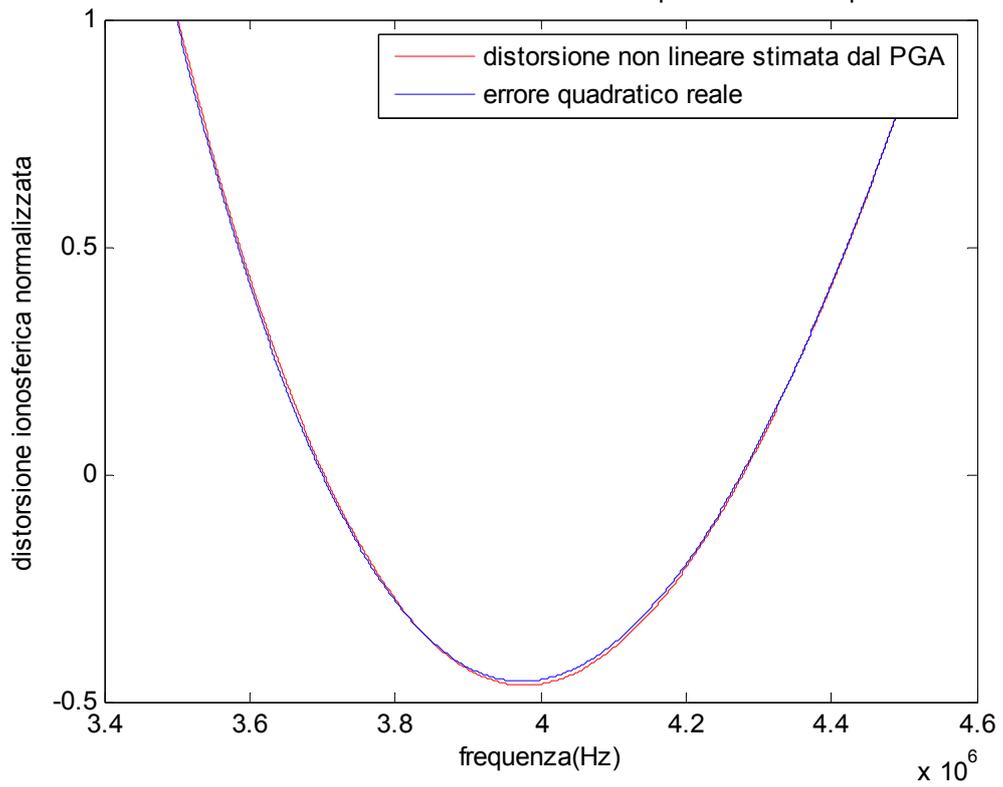


SZA=85

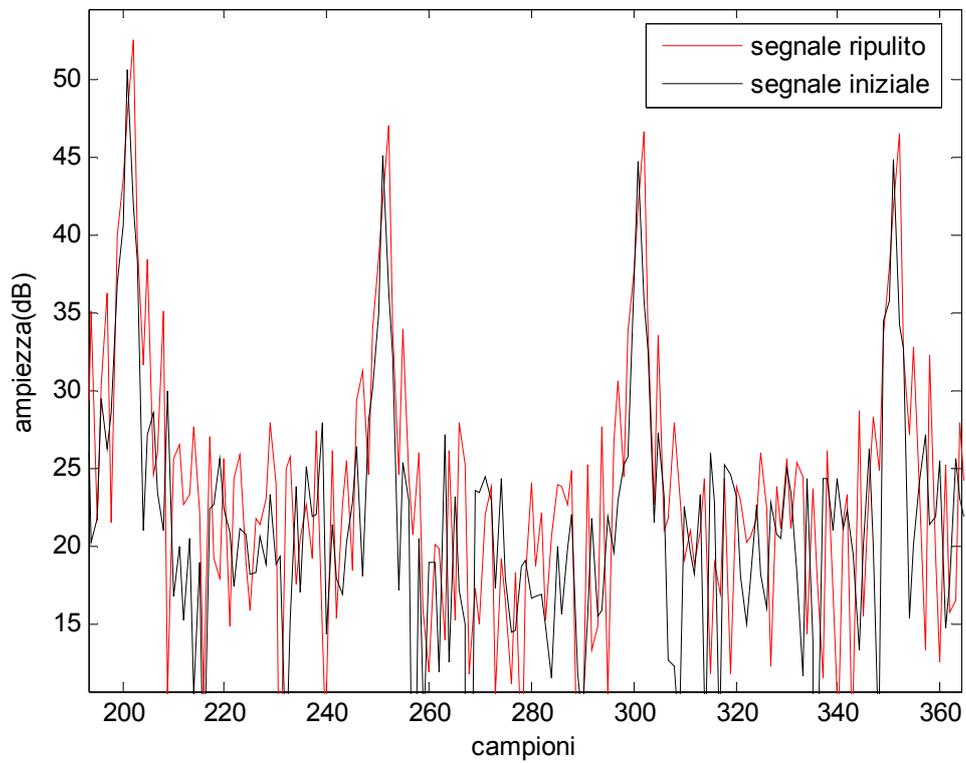
distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =85



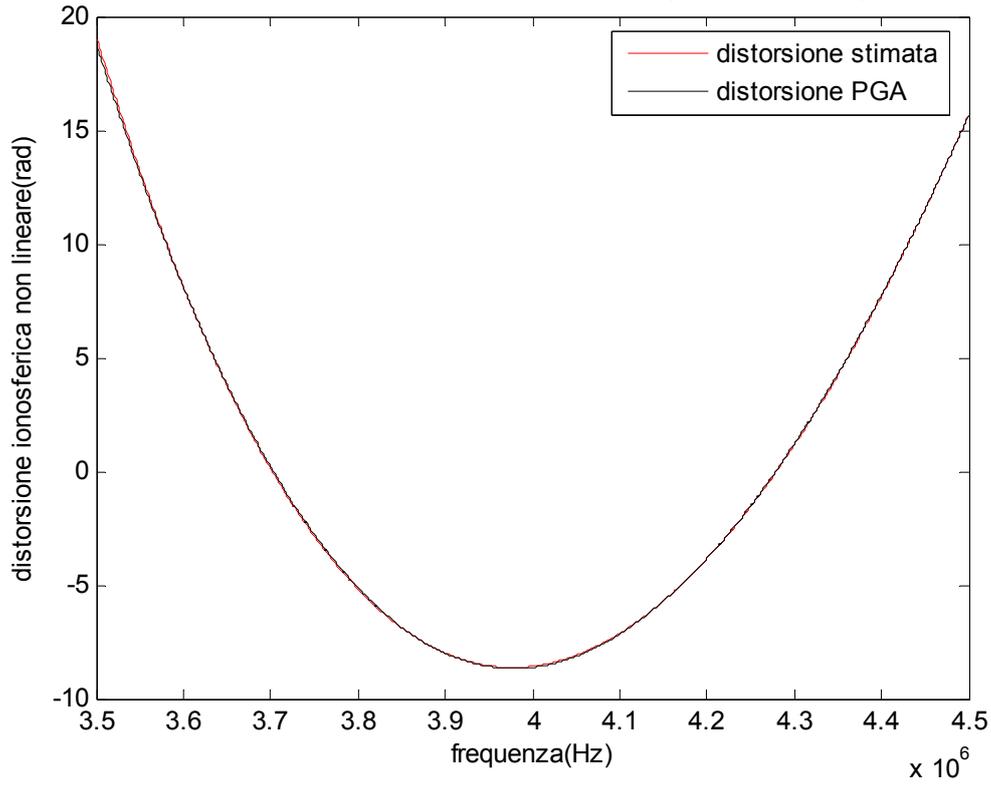
disturbo ionosferico non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =85



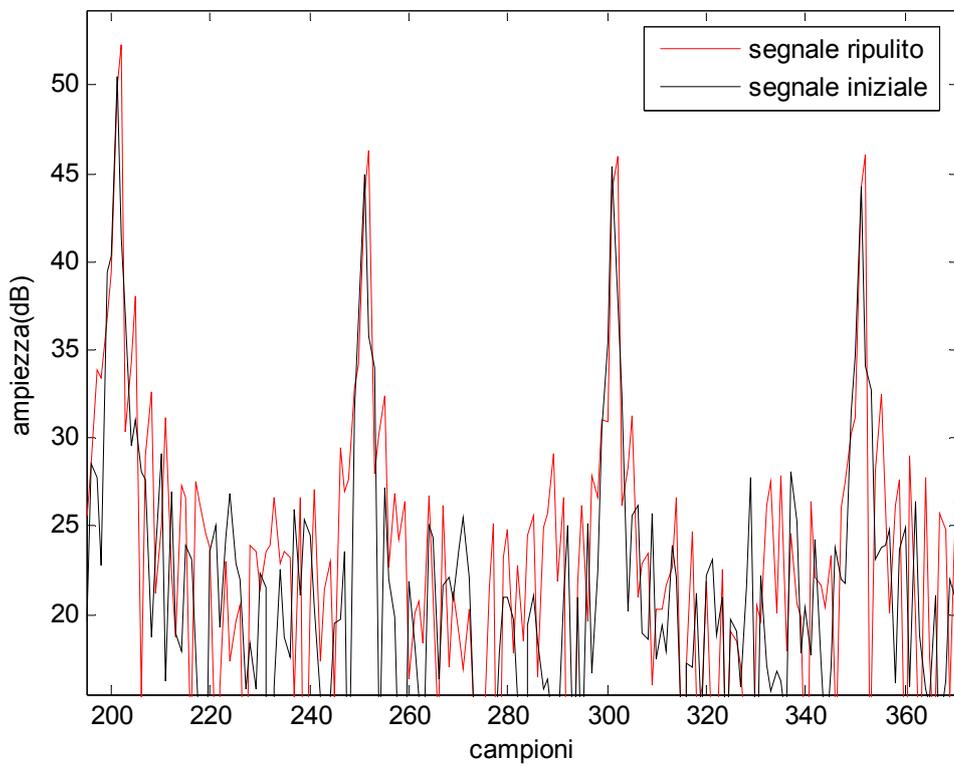
confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =85



distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =85

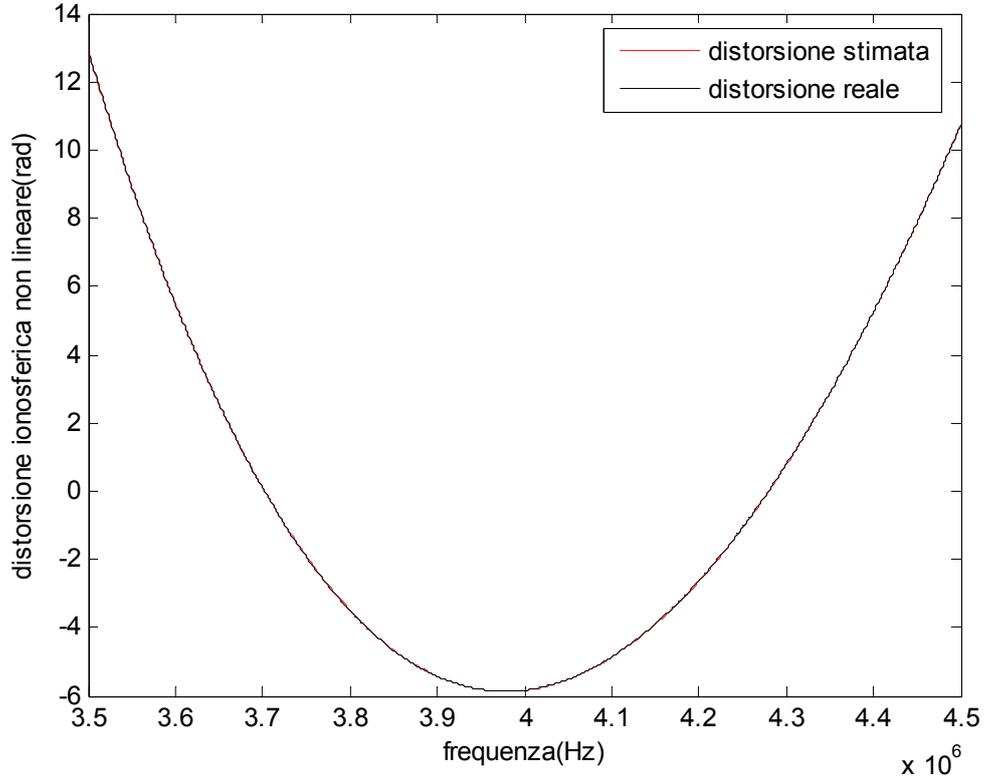


confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =85

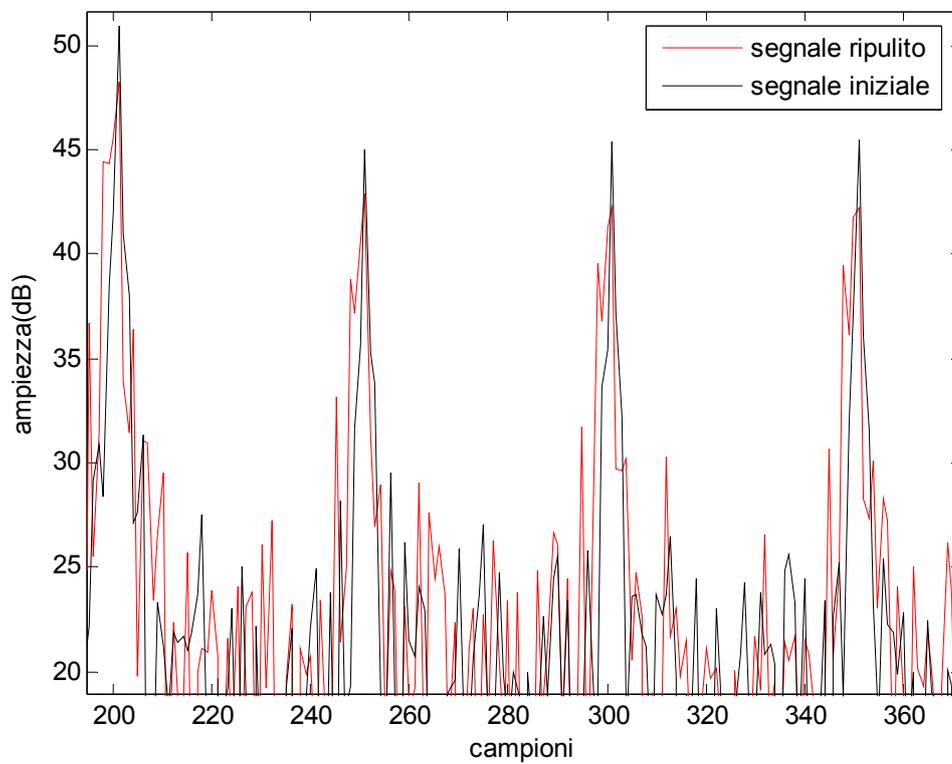


SZA=89

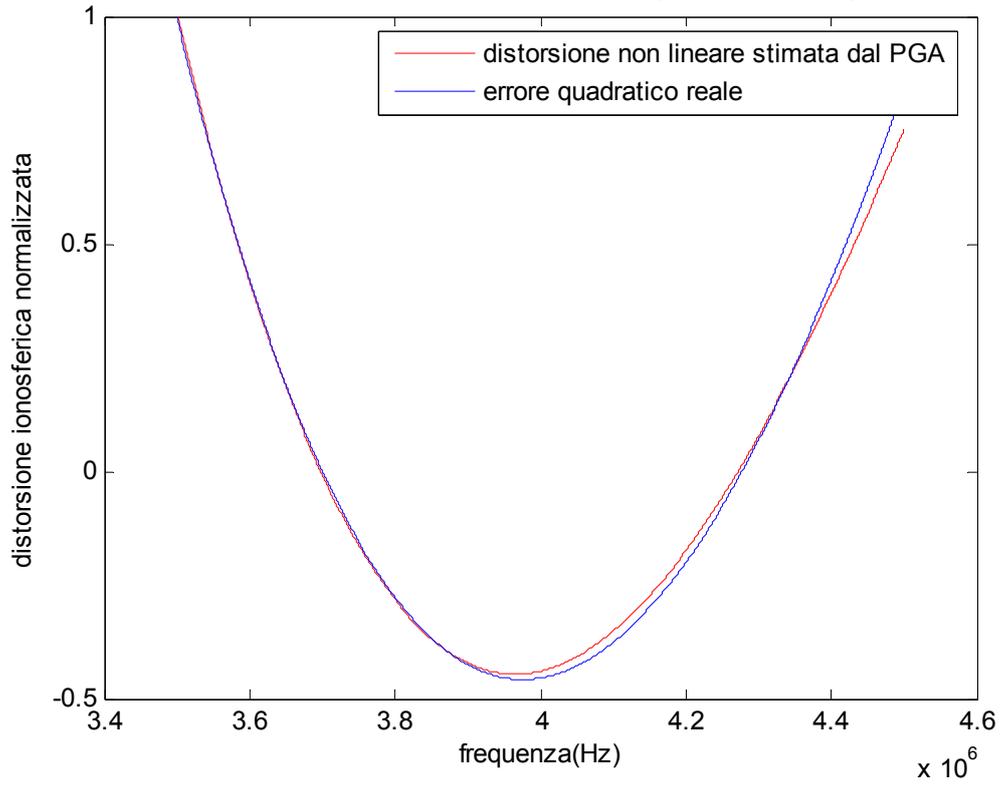
distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =89



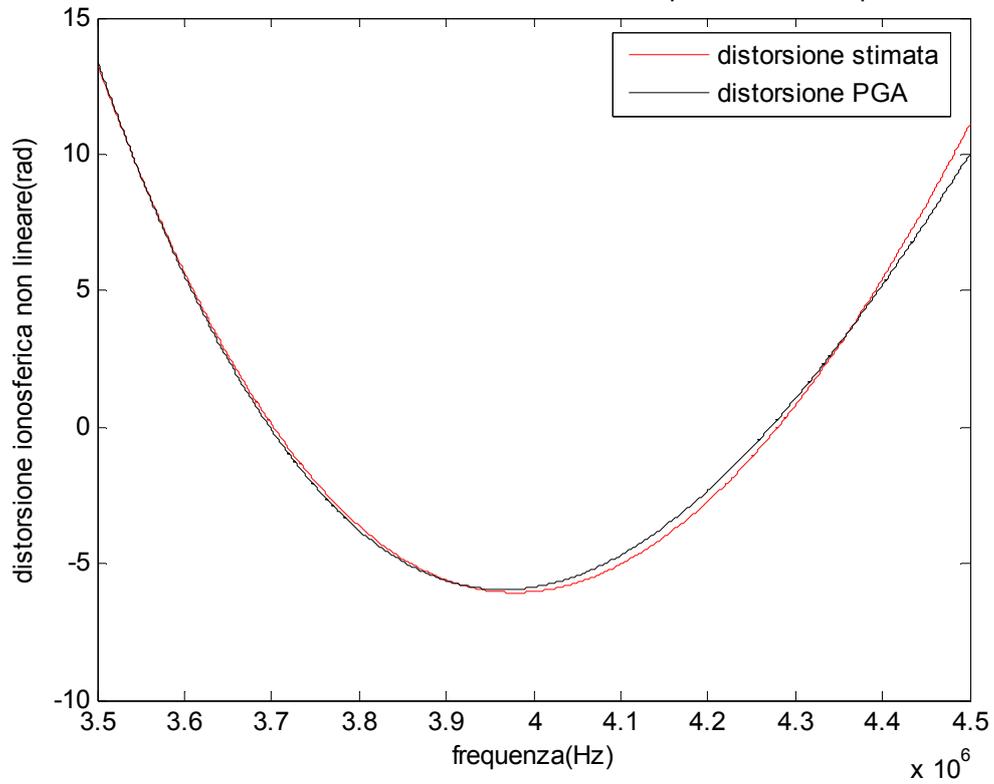
confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =89

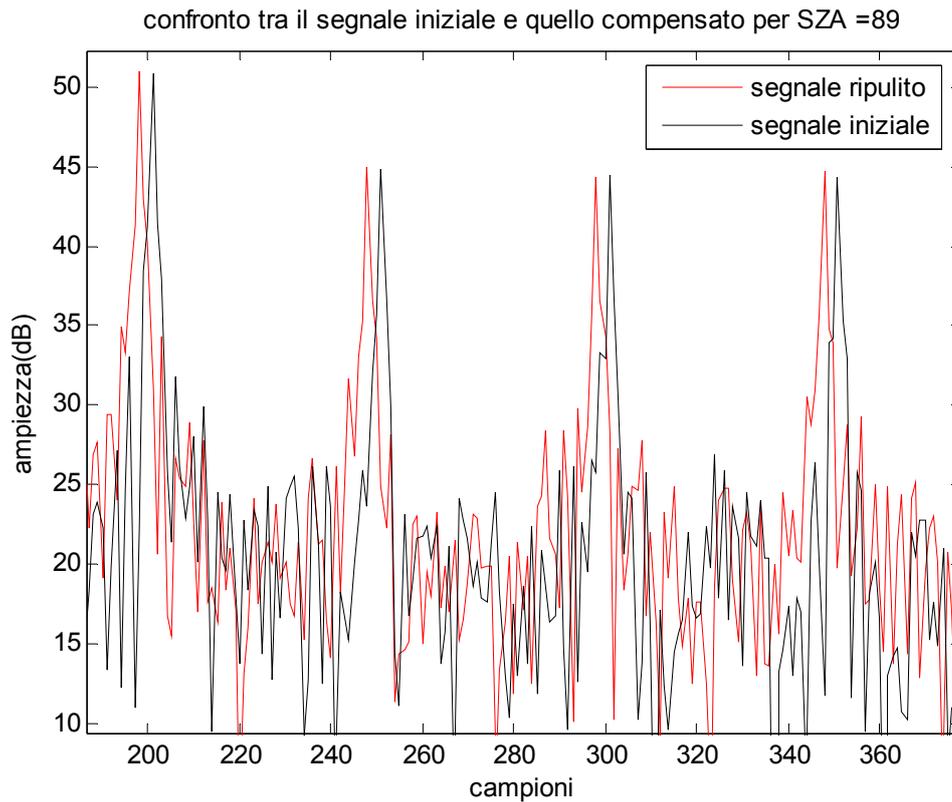


disturbo ionosferico non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =89



distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =89

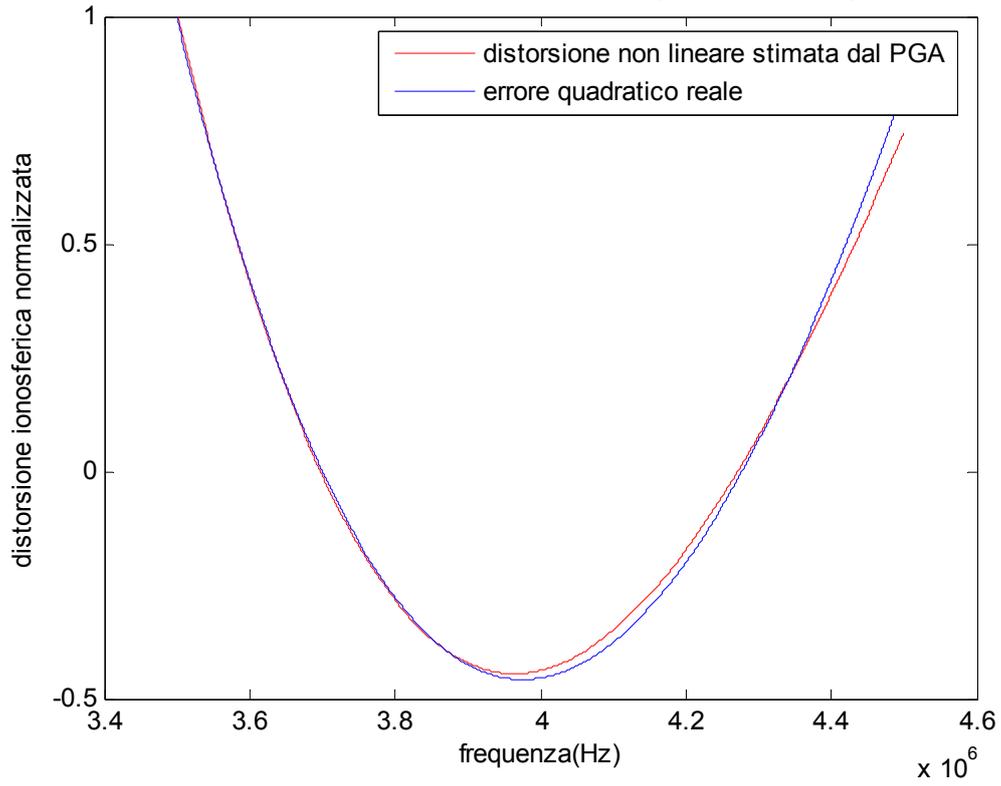




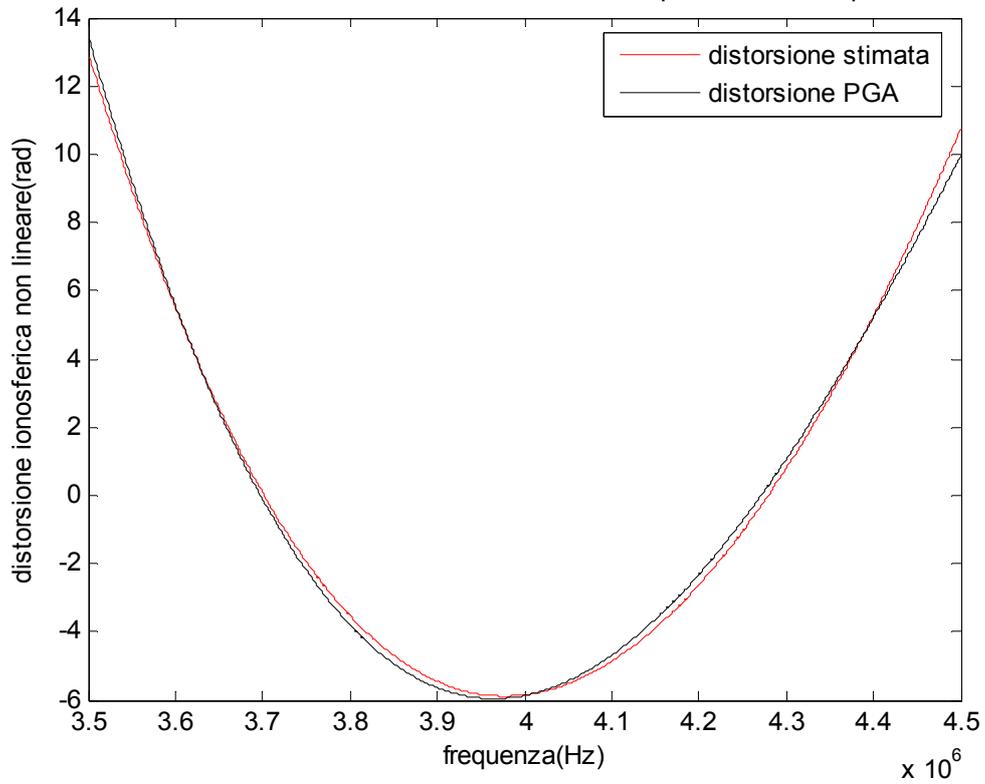
Questo caso è l'emblema di come l'errore commesso dal PGA alteri pesantemente i risultati del modello equivalente2.

Per mostrare ciò abbiamo migliorato l'accuratezza del PGA portando la varianza minima da $1e-2$ a $1e-8$, in tal modo si nota come l'accuratezza della stima del modello equivalente 2 sia migliore.

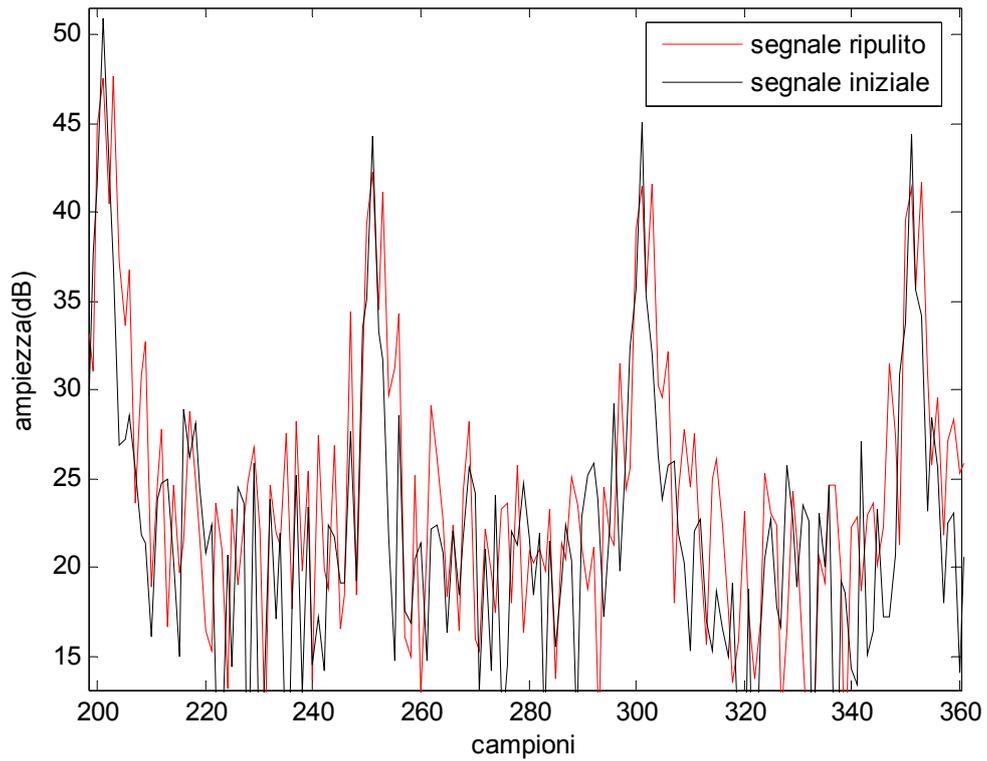
disturbo ionosferico non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =89



distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =89

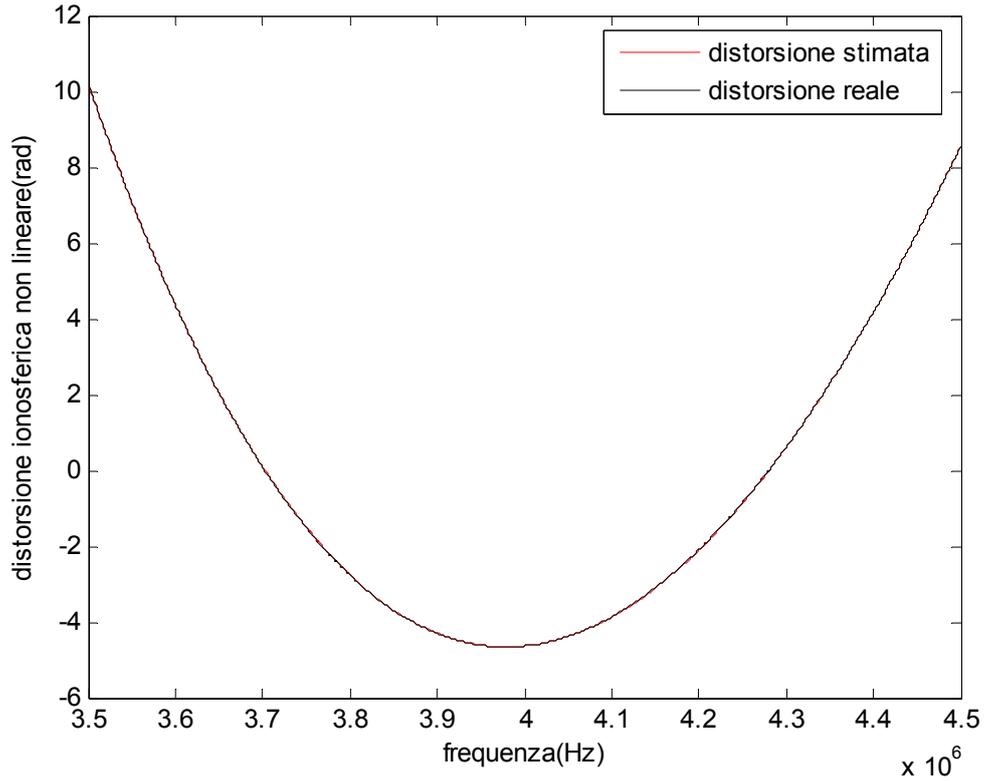


confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =89

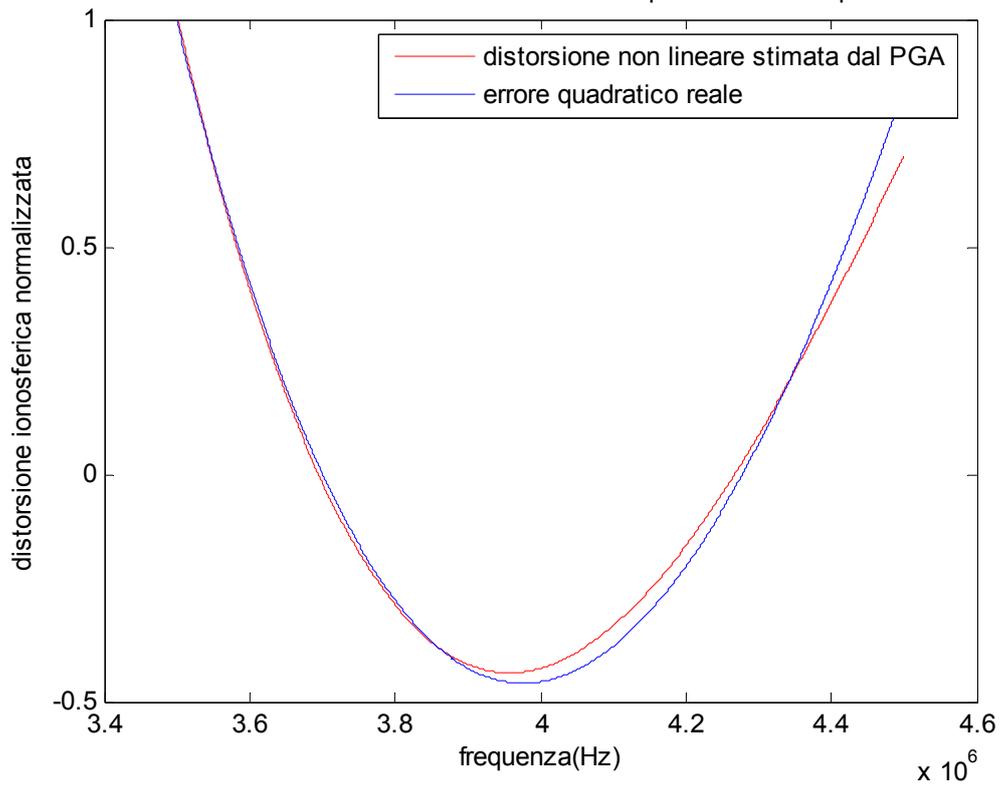


SZA=89.5

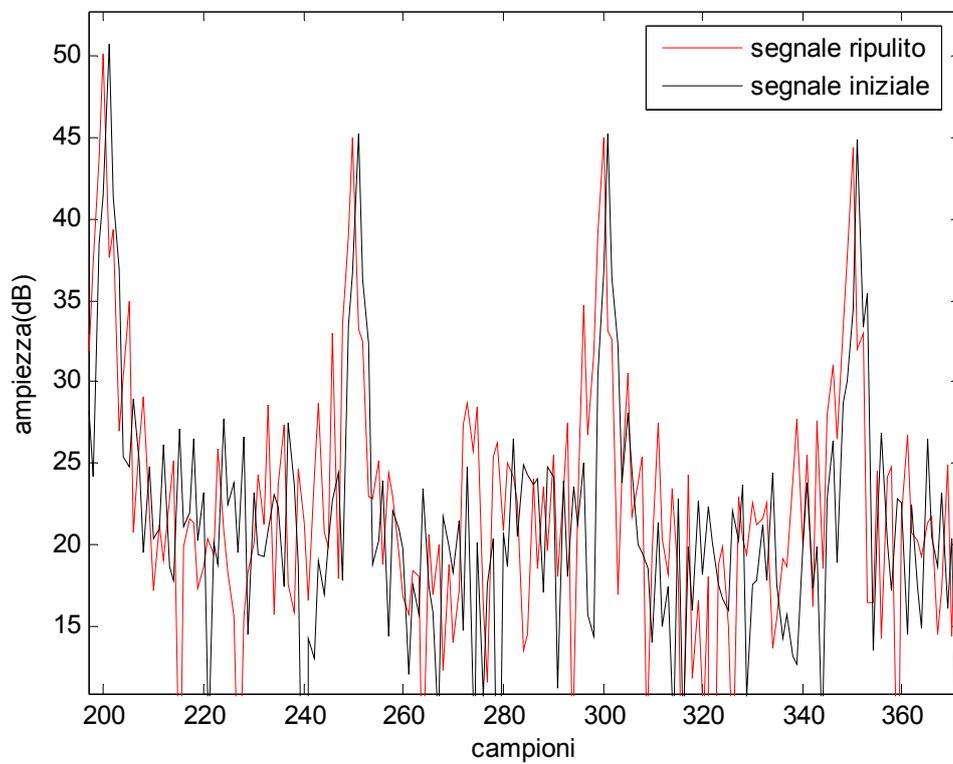
distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =89.5



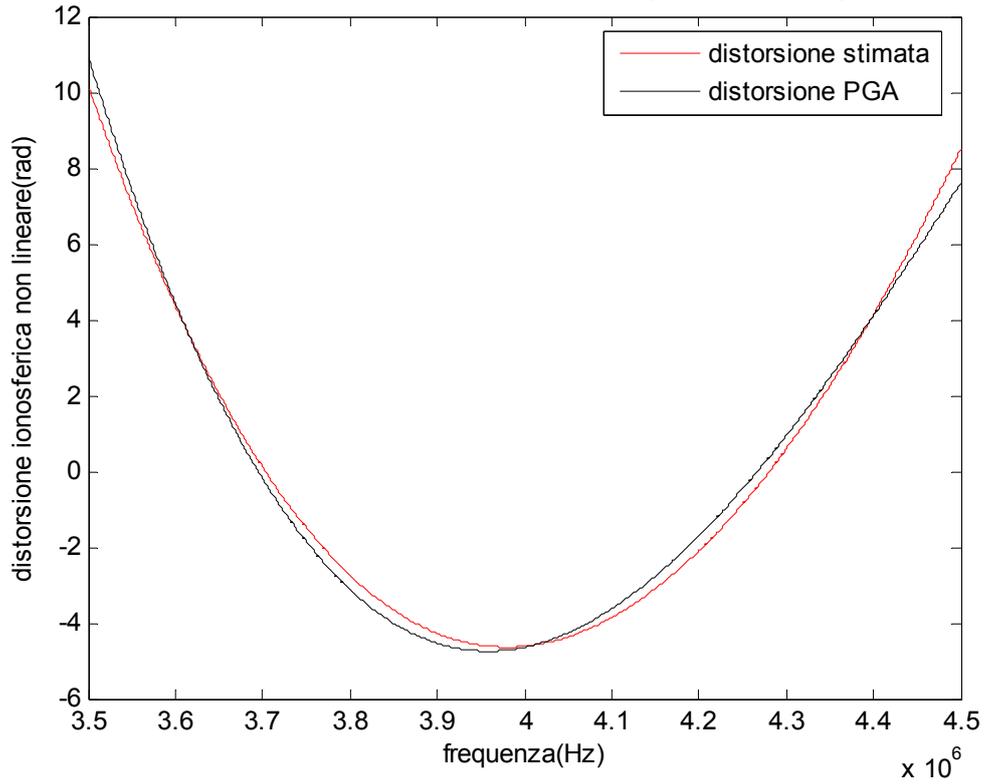
disturbo ionosferico non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =89.5



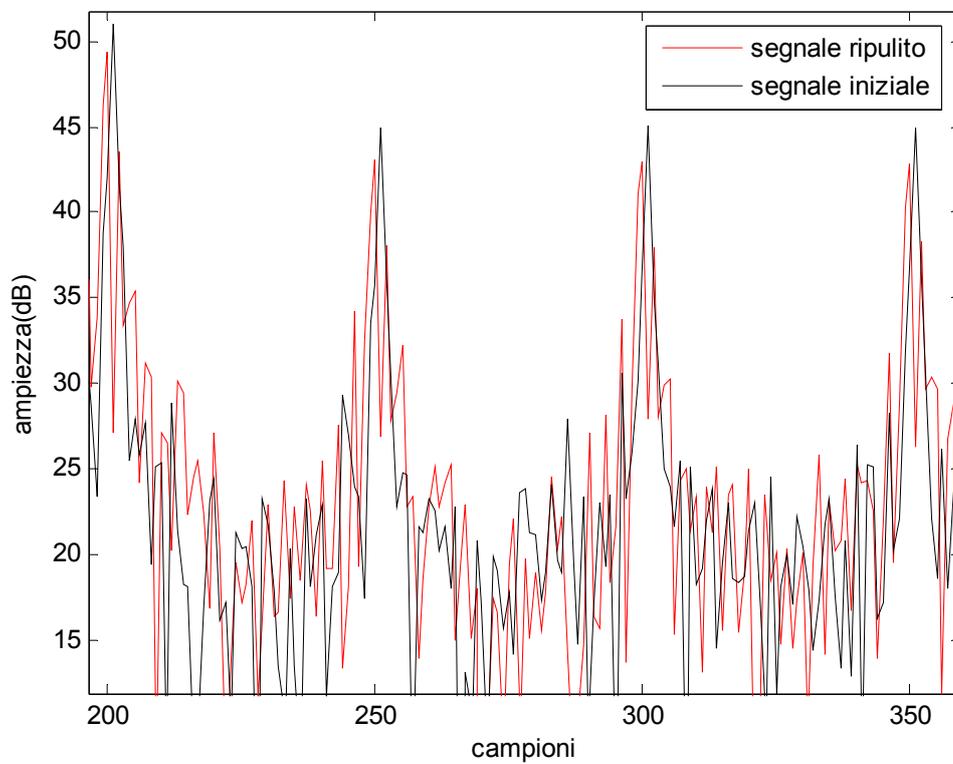
confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =89.5



distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =89.5

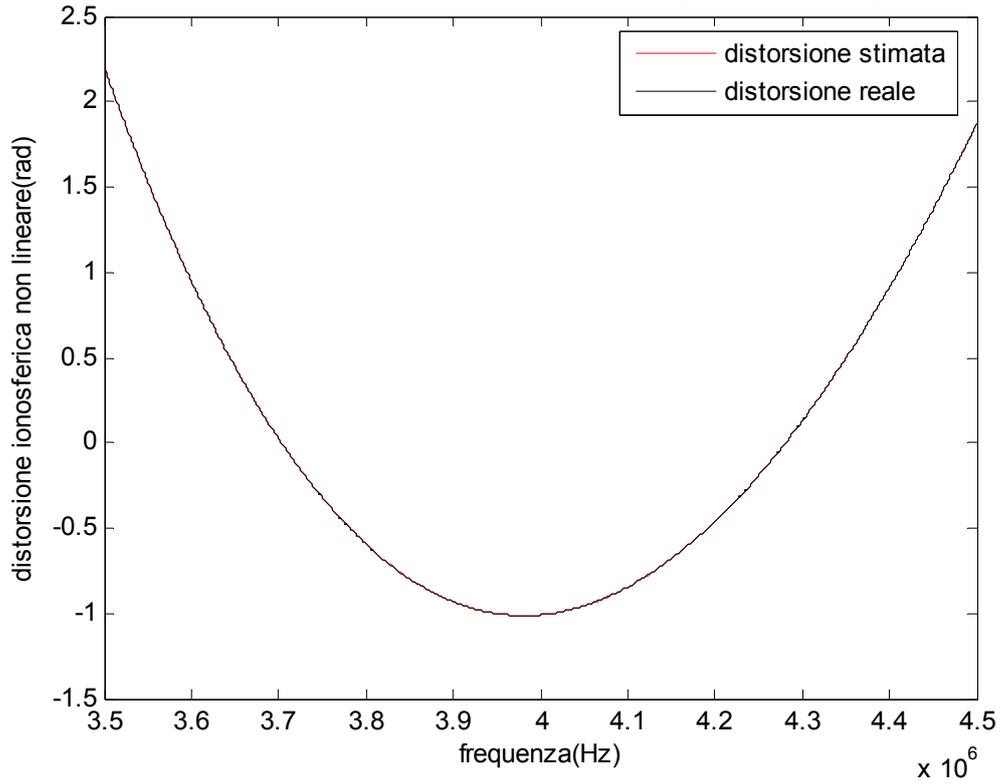


confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =89.5

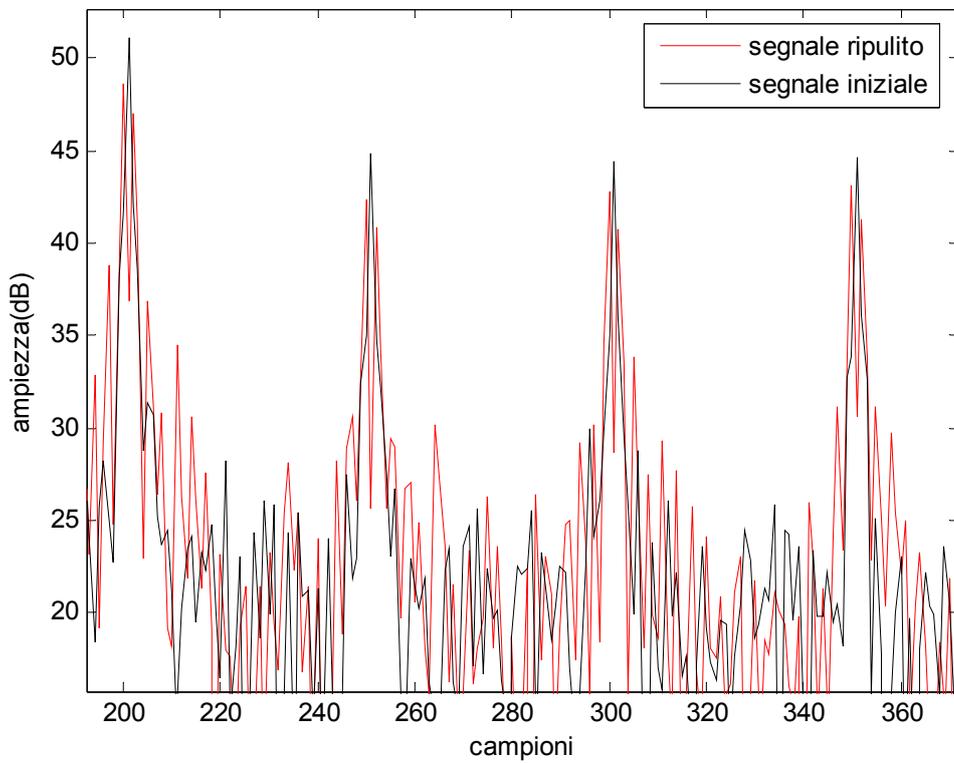


SZA=95

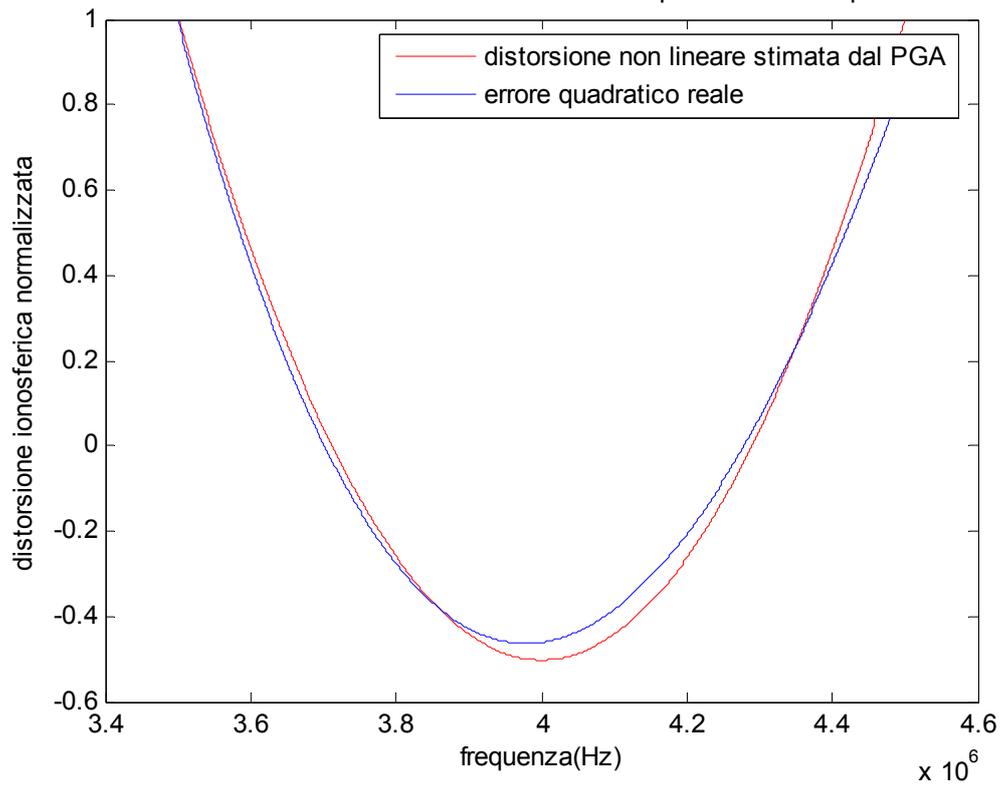
distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =95



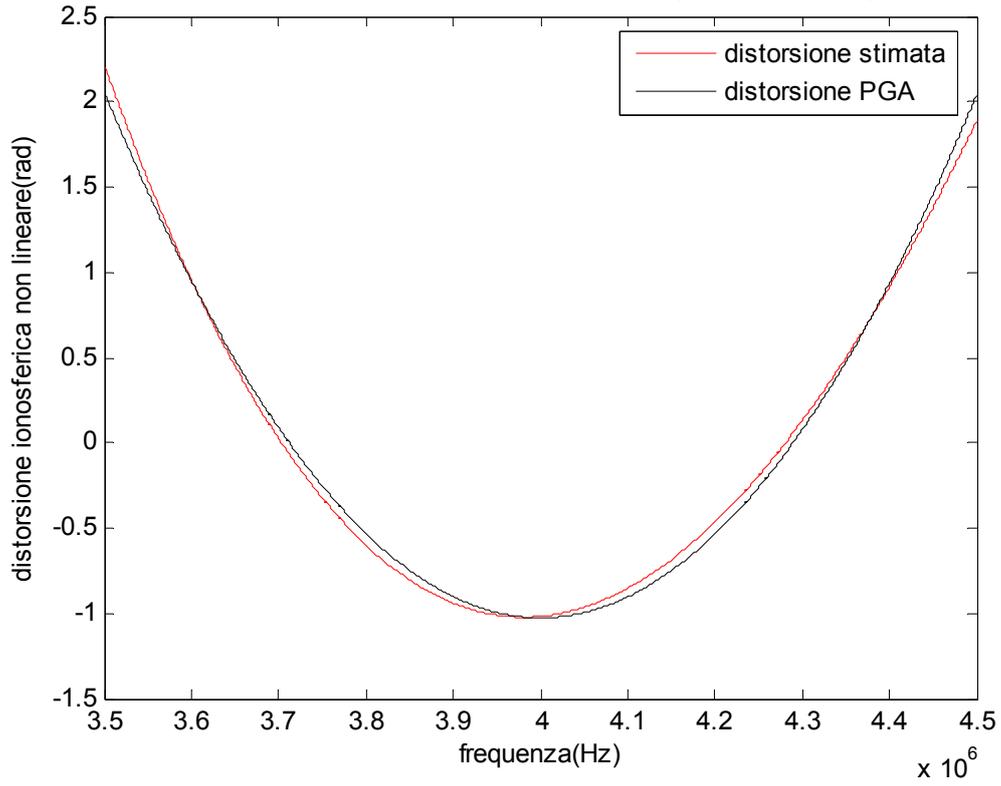
confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =95



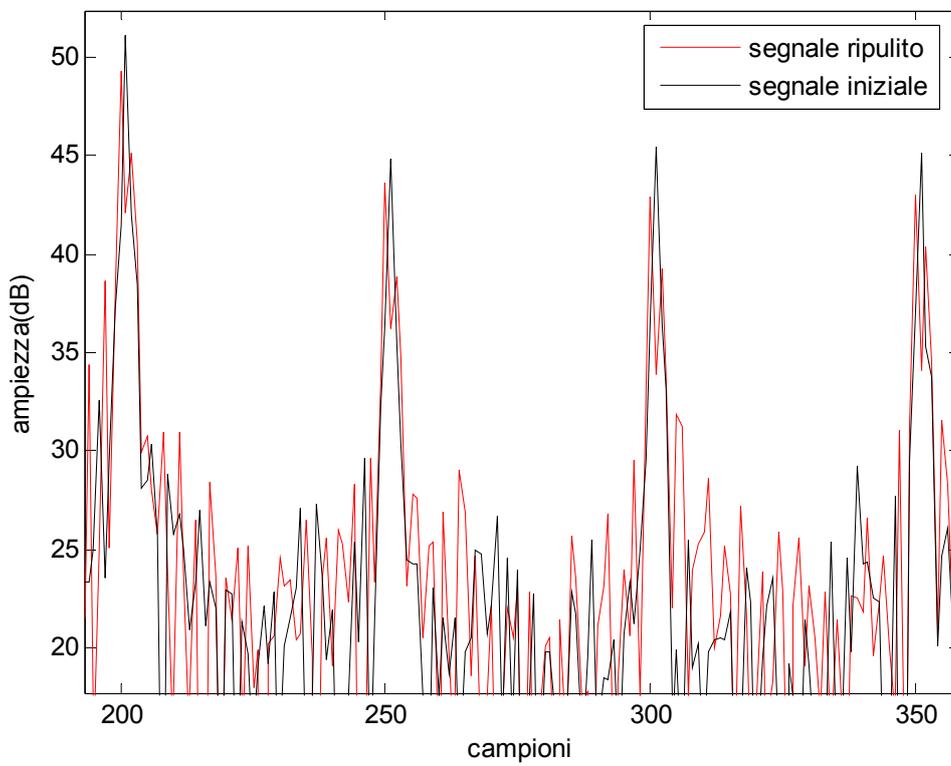
disturbo ionosferico non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =95



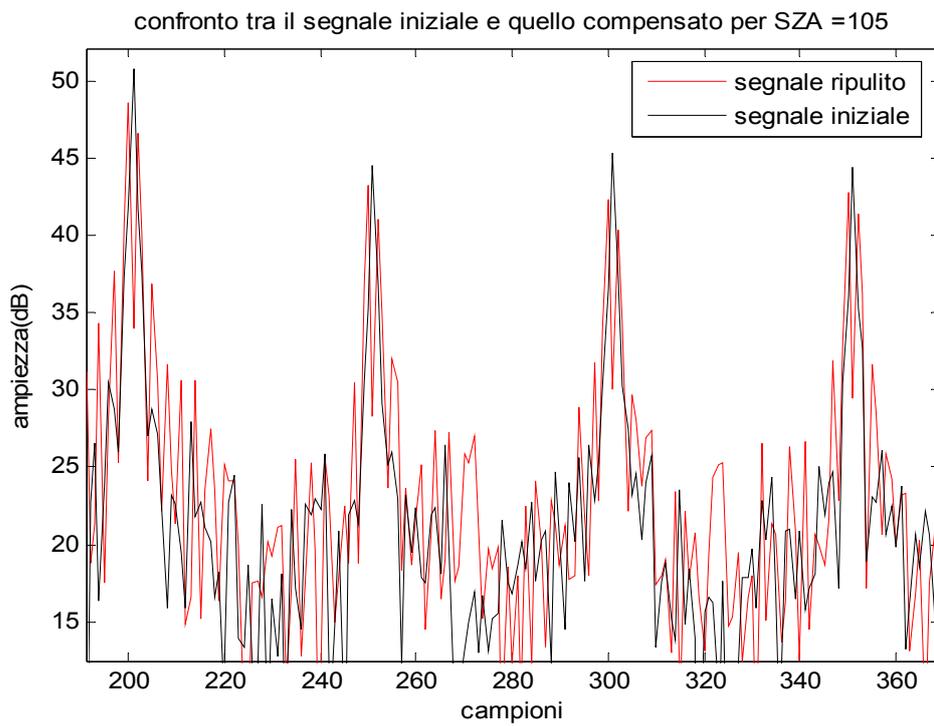
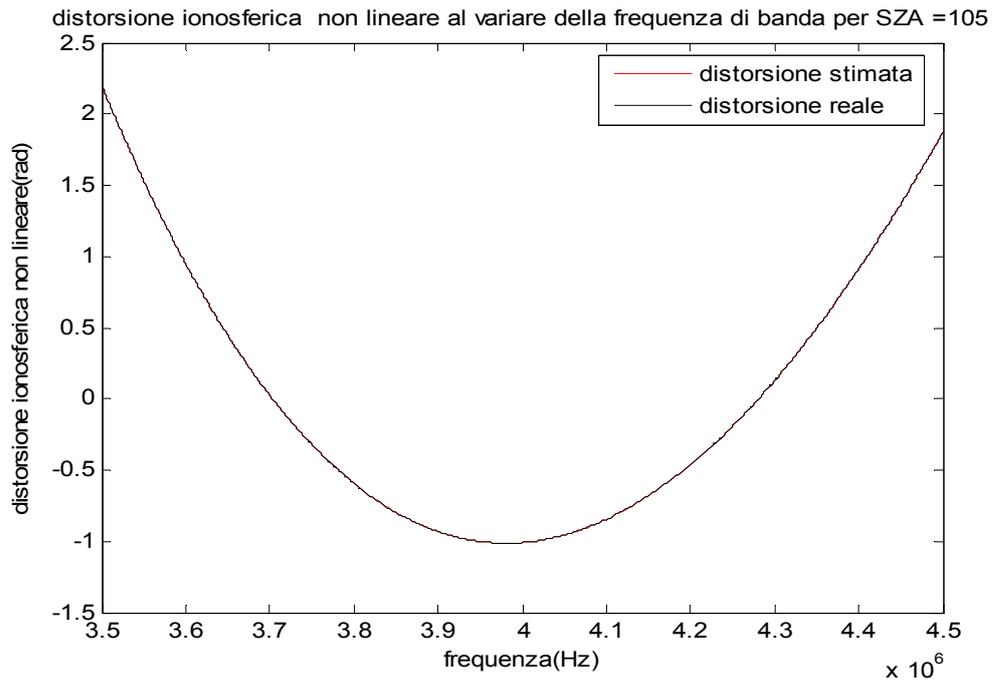
distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =95

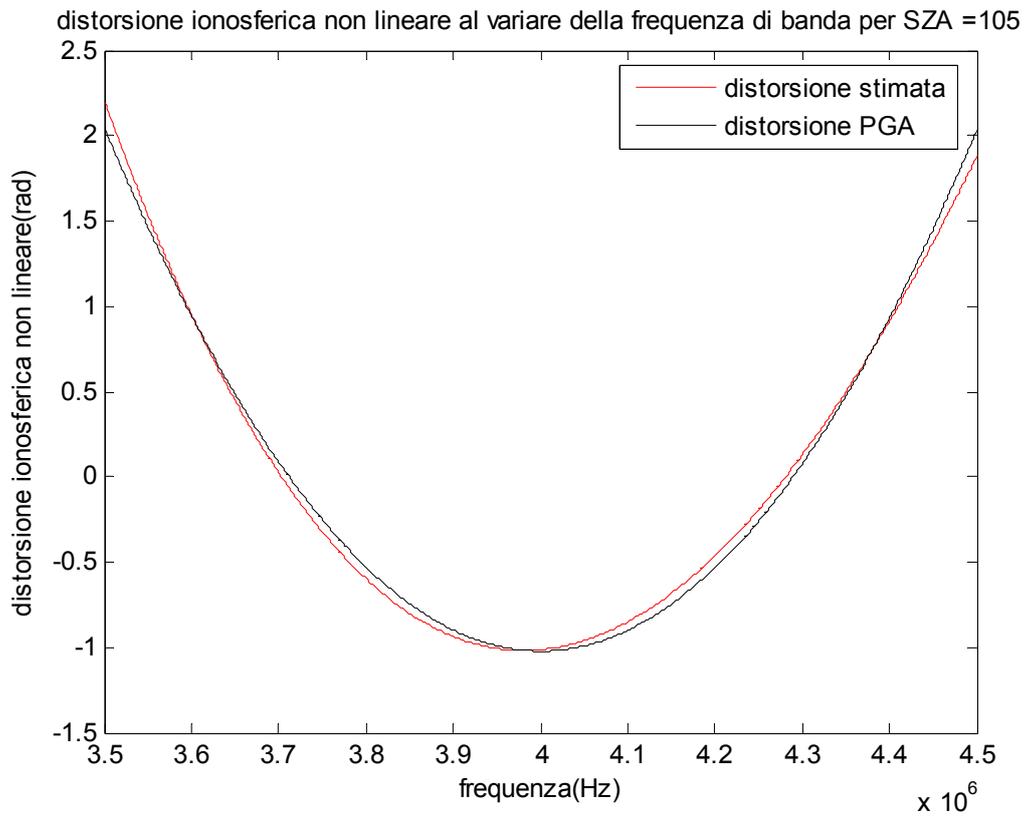
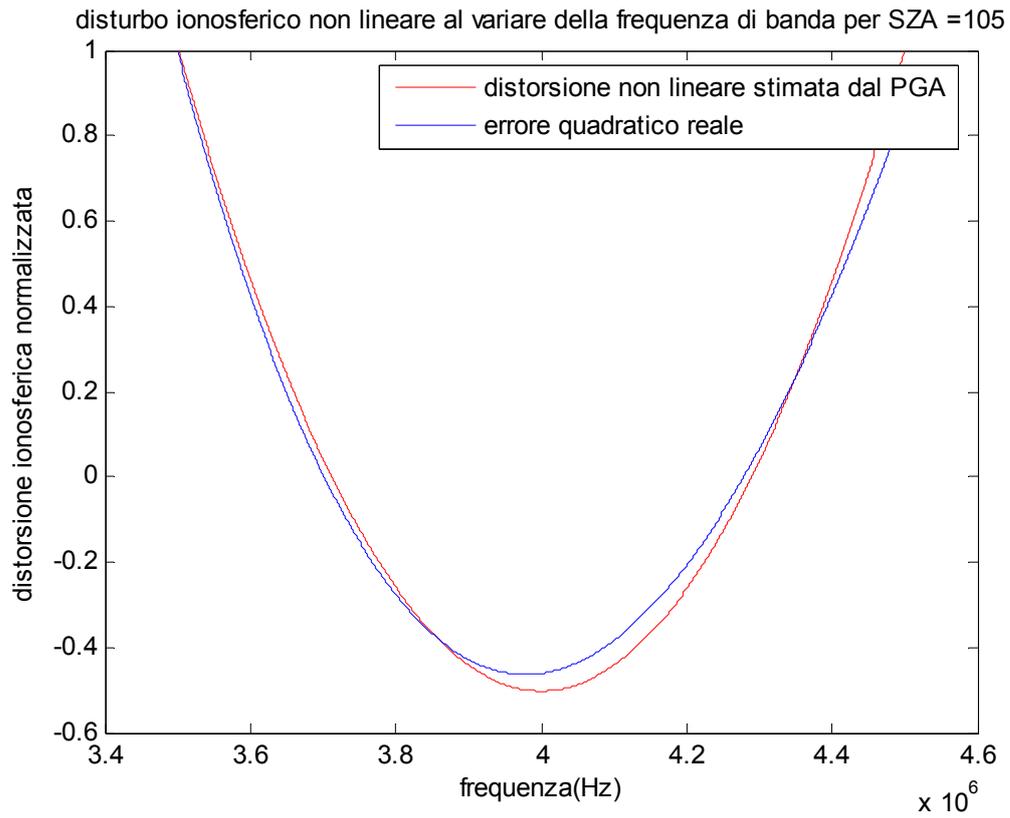


confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =95

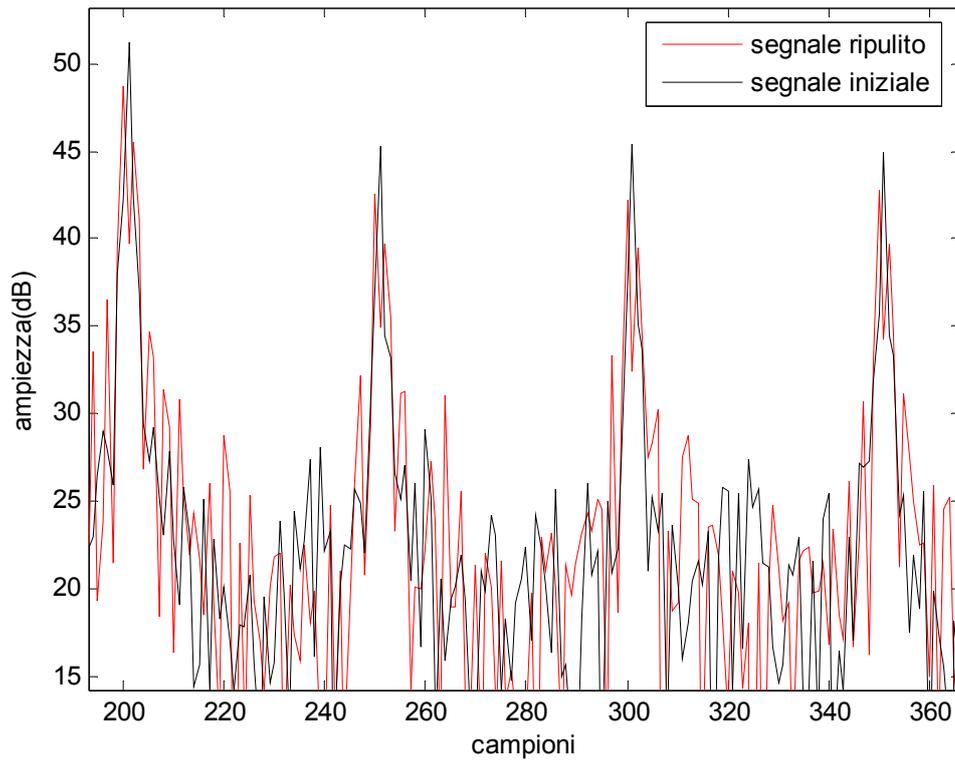


SZA=105





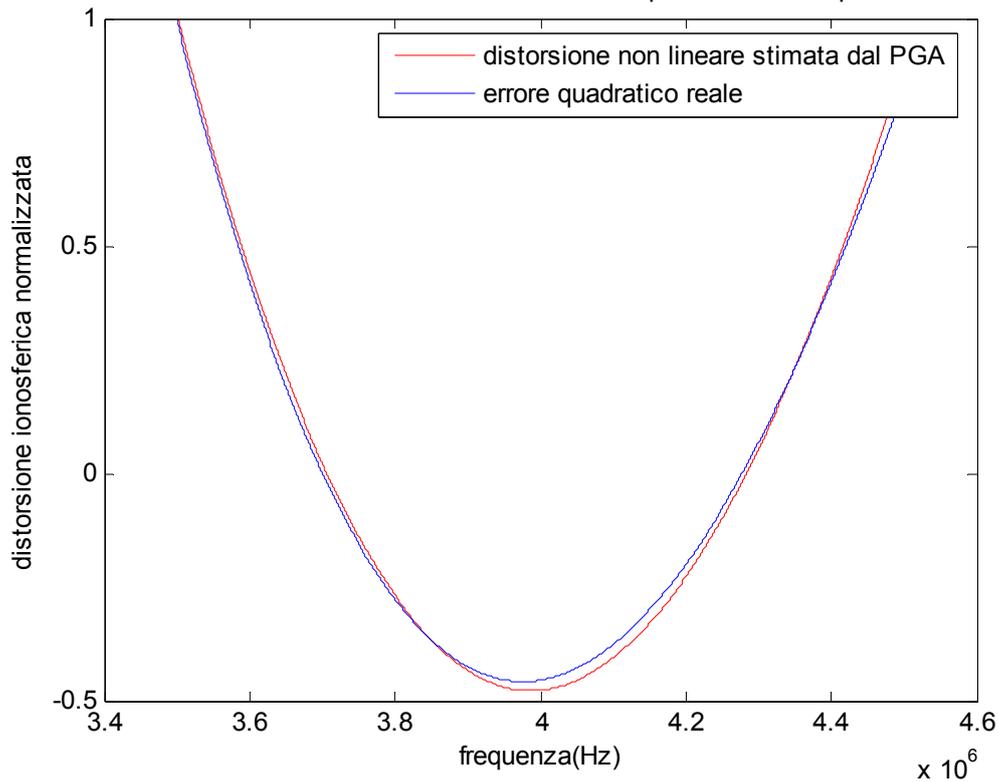
confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =105



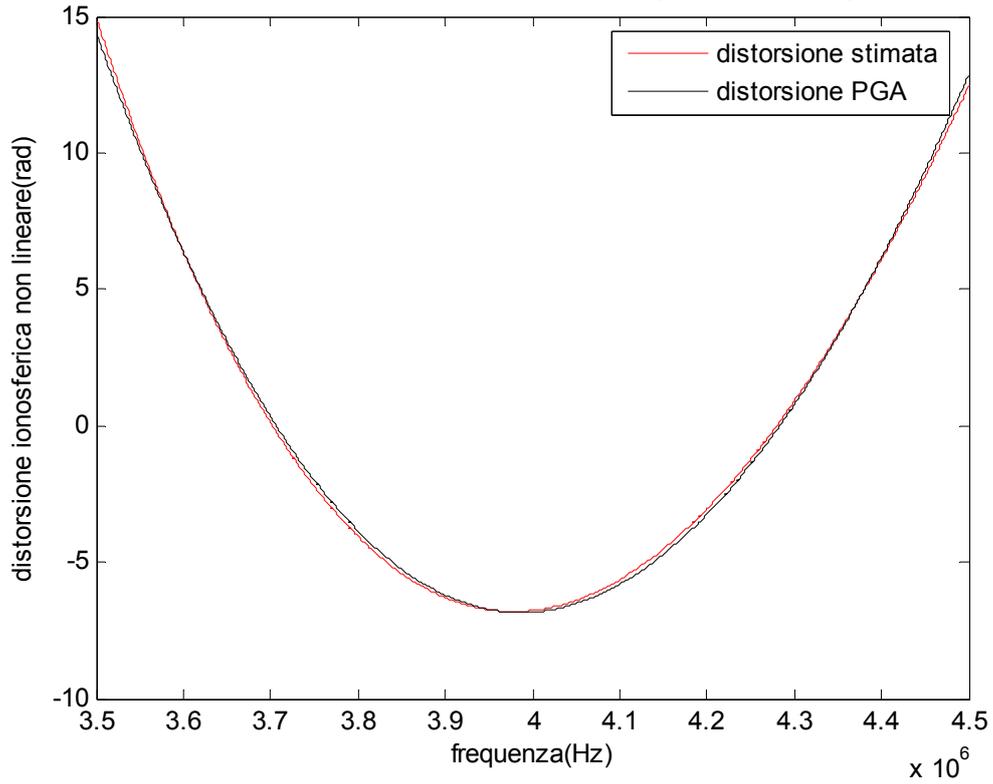
SZA=87,5

In questa ultima osservazione presenteremo solo i risultati relativi all'applicazione del PGA:

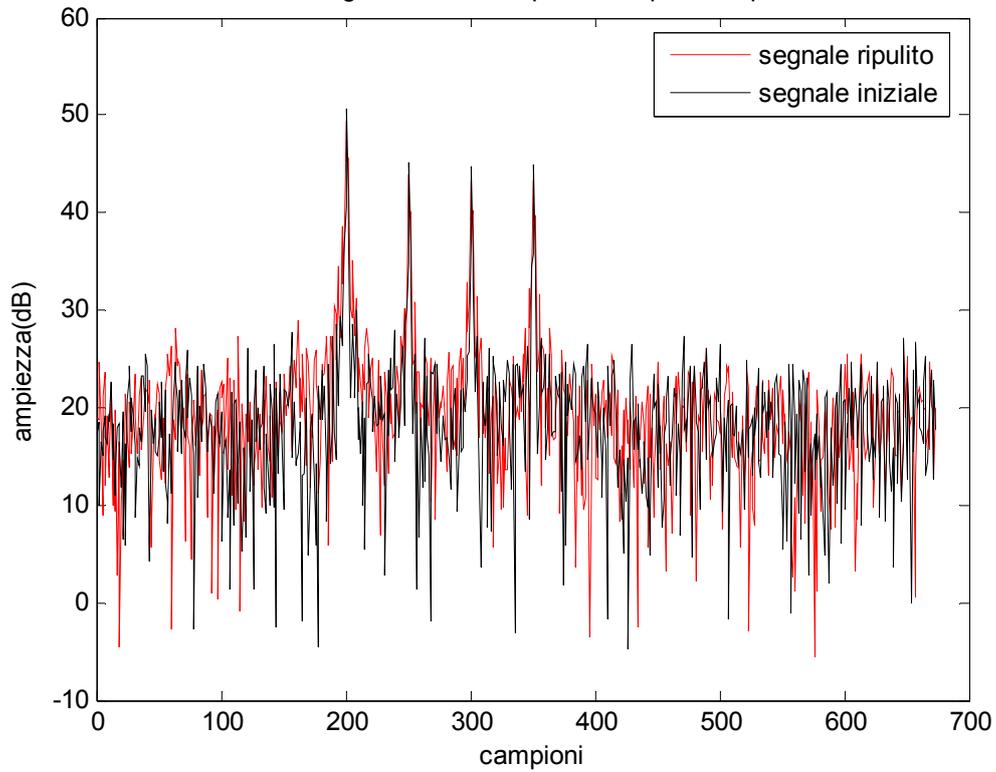
disturbo ionosferico non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =87.5



distorsione ionosferica non lineare al variare della frequenza di banda per SZA =87.5



confronto tra il segnale iniziale e quello compensato per SZA =87.5



3.5 Comparazione dei dati

In questo paragrafo vengono raggruppati tutti i dati che la routine main_sim restituisce in output per le differenti condizioni considerate, il che nel nostro caso equivale a dire per differenti valori del SZA. In pratica forniremo i dati in forma tabulare per una più rapida consultazione e comparazione:

| SZA=80 | dati ottenuti con errore non lineare reale | dati con errore non lineare PGA |
|-------------------------|--|---------------------------------|
| f.plasma equivalente1 | fp_eq = 2.2625e+006 | fp_eq =2.2625e+006 |
| tau0 equivalente1 | tau0_eq = -5.7711e-004 | tau0_eq =-5.7711e-004 |
| f.plasma equivalente2 | fp_eq_mod2 = 2.3678e+006 | fp_eq_mod2 = 2.2408e+006 |
| tau0 equivalente2 | tau0_eq_mod2 = -4.9807e-004 | tau0_eq_mod2 = -6.0000e-004 |
| scarto quadratico medio | err =0.0076 | err = 0.1907 |
| ritardo con equiv_mod1 | delay_mod1 = -122.7014 | delay_mod1 = -122.7014 |
| ritardo con equiv_mod2 | delay_mod2 =-122.3280 | delay_mod2 = -126.5939 |
| ritardo reale | delay =-124.9406 | delay = -124.9406 |
| delay-delay_mod1 | errore_mod_1 = 2.2392 | errore_mod_1 =2.2392 |
| delay-delay_mod2 | errore_mod_2 = 2.6126 | errore_mod_2 = 1.6533 |
| SZA=85 | dati ottenuti con errore non lineare reale | dati con errore non lineare PGA |
| f.plasma equivalente1 | fp_eq =1.7185e+006 | fp_eq = 1.7185e+006 |
| tau0 equivalente1 | tau0_eq =-5.1510e-004 | tau0_eq = -5.1510e-004 |
| f.plasma equivalente2 | fp_eq_mod2 = 1.7501e+006 | fp_eq_mod2 =1.7450e+006 |
| tau0 equivalente2 | tau0_eq_mod2 =-4.9176e-004 | tau0_eq_mod2 =-4.9450e-004 |
| scarto quadratico medio | err = 8.3371e-004 | err = 0.0690 |
| ritardo con equiv_mod1 | delay_mod1 = -55.3297 | delay_mod1 = -55.3297 |
| ritardo con equiv_mod2 | delay_mod2 =-55.8658 | delay_mod2 = -55.7818 |
| ritardo reale | delay = -56.0611 | delay = -56.0611 |
| delay-delay_mod1 | errore_mod_1 = 0.7314 | errore_mod_1 = 0.7314 |
| delay-delay_mod2 | errore_mod_2 =0.1954 | errore_mod_2 = 0.2793 |
| SZA=89 | dati ottenuti con errore non lineare reale | dati con errore non lineare PGA |
| f.plasma equivalente1 | fp_eq = 1.5370e+006 | fp_eq =1.5370e+006 |
| tau0 equivalente1 | tau0_eq = -4.6859e-004 | tau0_eq =-4.6859e-004 |
| f.plasma equivalente2 | err =0.0108 | err =0.2975 |
| tau0 equivalente2 | fp_eq_mod2 =1.4290e+006 | fp_eq_mod2 = 1.4648e+006 |
| scarto quadratico medio | tau0_eq_mod2 = -5.6243e-004 | tau0_eq_mod2 = -5.4652e-004 |
| ritardo con equiv_mod1 | delay_mod1 = -38.9627 | delay_mod1 = -38.9627 |
| ritardo con equiv_mod2 | delay_mod2 = -40.2021 | delay_mod2 = -41.2813 |
| ritardo reale | delay =-39.4387 | delay = -39.4387 |
| delay-delay_mod1 | errore_mod_1 =0.4759 | errore_mod_1 = 0.4759 |
| delay-delay_mod2 | errore_mod_2 = 0.7634 | errore_mod_2 = 1.8427 |

| | | |
|-------------------------|--|---------------------------------|
| SZA=89.5 | dati ottenuti con errore non lineare reale | dati con errore non lineare PGA |
| f.plasma equivalente1 | fp_eq =1.3634e+006 | fp_eq =1.3634e+006 |
| tau0 equivalente1 | tau0_eq = -4.9995e-004 | tau0_eq =-4.9995e-004 |
| f.plasma equivalente2 | fp_eq_mod2 =1.2648e+006 | fp_eq_mod2 = 1.2607e+006 |
| tau0 equivalente2 | tau0_eq_mod2 = -5.9791e-004 | tau0_eq_mod2 =-6.0000e-004 |
| scarto quadratico medio | err = 0.0064 | err =0.3275 |
| ritardo con equiv_mod1 | delay_mod1 = -31.8469 | delay_mod1 = -31.8469 |
| ritardo con equiv_mod2 | delay_mod2 = -32.6937 | delay_mod2 = -32.5684 |
| ritardo reale | delay = -32.2110 | delay = -32.2110 |
| delay-dalay_mod1 | errore_mod_1 = 0.3641 | errore_mod_1 = 0.3641 |
| delay-dalay_mod2 | errore_mod_2 =0.4827 | errore_mod_2 =0.3574 |
| SZA=95 | dati ottenuti con errore non lineare reale | dati con errore non lineare PGA |
| f.plasma equivalente1 | fp_eq = 6.9633e+005 | fp_eq = 6.9633e+005 |
| tau0 equivalente1 | tau0_eq = -4.8100e-004 | tau0_eq =-4.8100e-004 |
| f.plasma equivalente2 | fp_eq_mod2 =6.3941e+005 | fp_eq_mod2 = 6.3872e+005 |
| tau0 equivalente2 | tau0_eq_mod2 = -5.7450e-004 | tau0_eq_mod2 = -5.8080e-004 |
| scarto quadratico medio | err = 2.4649e-004 | err =0.0601 |
| ritardo con equiv_mod1 | delay_mod1 = -7.4584 | delay_mod1 = -7.4584 |
| ritardo con equiv_mod2 | delay_mod2 = -7.5553 | delay_mod2 = -7.6215 |
| ritardo reale | delay = -7.5305 | delay = -7.5305 |
| delay-dalay_mod1 | errore_mod_1 = 0.0721 | errore_mod_1 = 0.0721 |
| delay-dalay_mod2 | errore_mod_2 =0.0249 | errore_mod_2 = 0.0910 |
| SZA=105 | dati ottenuti con errore non lineare reale | dati con errore non lineare PGA |
| f.plasma equivalente1 | fp_eq = 6.9633e+005 | fp_eq = 6.9633e+005 |
| tau0 equivalente1 | tau0_eq =-4.8100e-004 | tau0_eq =-4.8100e-004 |
| f.plasma equivalente2 | fp_eq_mod2 = 6.3941e+005 | fp_eq_mod2 = 6.3702e+005 |
| tau0 equivalente2 | tau0_eq_mod2 = -5.7450e-004 | tau0_eq_mod2 = -5.8170e-004 |
| scarto quadratico medio | err = 2.4649e-004 | err = 0.0599 |
| ritardo con equiv_mod1 | delay_mod1 = -7.4584 | delay_mod1 = -7.4584 |
| ritardo con equiv_mod2 | delay_mod2 =-7.5553 | delay_mod2 = -7.5919 |
| ritardo reale | delay = -7.5305 | delay =-7.5305 |
| delay-dalay_mod1 | errore_mod_1 =0.0721 | errore_mod_1 = 0.0721 |
| delay-dalay_mod2 | errore_mod_2 = 0.0249 | errore_mod_2 = 0.0614 |

Si riportano infine valori relativi all'applicazione del software implementato per SZA=89 e con la varianza minima del PGA migliore(da 1e-2 a 1e-8)

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| fp_eq = 1.5370e+006 | delay_mod1 = -38.9627 |
| tau0_eq = -4.6859e-004 | delay_mod2 = -38.8730 |
| err = 0.2504 | delay = -39.4387 |
| fp_eq_mod2 = 1.6368e+006 | errore_mod_1 = 0.4759 |
| tau0_eq_mod2 = -4.0000e-004 | errore_mod_2 = 0.5657 |

E quelle relative all'osservazione compiuta ad SZA=87,5

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| fp_eq = 1.5203e+006 | delay_mod1 = -45.6108 |
| tau0_eq = -5.6214e-004 | delay_mod2 = -46.2052 |
| err = 0.1806 | delay = -46.1640 |
| fp_eq_mod2 = 1.4838e+006 | errore_mod_1 = 0.5531 |
| tau0_eq_mod2 = -5.9426e-004 | errore_mod_2 = 0.0412 |

Infine si fa notare che in tutte le osservazioni fatte le frequenze sono espresse in Hz e i tempi in secondi.

CAPITOLO QUARTO

I DATI DI MARSIS ED IL CALCOLO DEL RITARDO IONOSFERICO

INTRODUZIONE

In questo quarto ed ultimo capitolo ci confronteremo con i dati reali, ossia, con i dati realmente inviati a terra dal radar Marsis. In questo modo mostreremo attraverso un cospicuo numero di simulazione l'effettivo valore scientifico degli elaborati presentati ed elaborati nei capitoli precedenti.

Nello specifico mostreremo l'affidabilità del modello equivalente 2 per la stima dello shift temporale dovuto alla ionosfera.

4.1 Considerazioni scientifiche

Le tecniche di elaborazione del segnale proveniente dal radar Marsis permettono di ottenere una risoluzione verticale massima nel vuoto:

$$\rho_{act} = \frac{c}{2B} \approx 150m$$

Tale valore è chiaramente vincolato alla compensazione del ritardo ionosferico, poiché uno shift temporale sul segnale di ritorno inviato da Marsis sulla superficie marziana si traduce in uno shift spaziale secondo la relazione:

$$D = c * \frac{T}{2} \quad \text{ordine - di - grandezza} \approx Km$$

dove c è la velocità della luce e T rappresenta il ritardo ionosferico

Tenendo conto che abbiamo a disposizione dei dati relativi all'altimetro laser MOLA, uno strumento in orbita intorno a Marte sulla nave spaziale Mars global surveyor (MGS) e che tale strumento garantisce una risoluzione verticale dell'ordine dei cinquanta metri, nei prossimi paragrafi confronteremo i dati provenienti da Marsis e trattati da noi con quelli provenienti da Mola e quindi notevolmente più accurati.

Nelle simulazioni che seguiranno abbiamo pensato di verificare l'attendibilità e la veridicità delle informazioni ottenute valutando:

- 1) Esattezza dei risultati ottenuti per osservazioni singole
- 2) Esattezza della compensazione ionosferica applicata lungo un'intera orbita (al variare del SZA)
- 3) Esattezza del profilo altimetrico ottenuto dopo la compensazione del ritardo ionosferico
- 4) Esattezza dei risultati ottenuti al variare della banda usata

4.2 Simulazioni ottenute per singoli frame

4.2 .a cenni introduttivi

Nelle simulazioni che seguono faremo riferimento a:

- 1) orbita di riferimento
- 2) modalità di indagine sottosuperficiale
- 3) modalità operativa(OST)
- 4) frames considerati
- 5) radargramma

Per orbita di riferimento si intende la particolare orbita che si sta prendendo in considerazione. Queste sono numerate in ordine crescente ed inoltre forniscono anche un riferimento temporale.

Le modalità di indagine sottosuperficiale sono 5 e si rimanda al capitolo primo per ulteriori informazioni.

Le **OST** sono le tabelle usate per specificare la sequenza delle modalità operative che si susseguiranno mentre vengono effettuate le misure sulla porzione di orbita percorsa. In relazione alle caratteristiche della porzione di suolo in vista e a quelle ipotizzate per la struttura geologica (superficiale e sottosuperficiale), viene stilata la sequenza delle modalità, per ogni orbita attiva, in relazione agli obiettivi scientifici. Per ogni modalità operativa, poi, è possibile definire una durata (in termini di numero di PRIs⁸ o impulsi radar), le caratteristiche della modalità selezionata e altri parametri scientifici o ingegneristici usati durante quella modalità.

Inoltre ogni modalità operativa può essere vista come composta da diversi set di PRIs detti Frames. Per la modalità di calibrazione, ricezione passiva, e indagine ionosferica attiva, la dimensione di ogni Frame è fissata; al contrario per le modalità sottosuperficiali, la dimensione dei corrispondenti Frames è variabile rispetto alle caratteristiche orbitali, posizione del satellite sull'orbita e frequenza di trasmissione utilizzata.

Il time slot⁹ d'ogni orbita dedicato alle modalità operative di MARSIS (circa 26 minuti) sarà diviso in un numero intero di Frames i quali possono appartenere ad una sola modalità operativa o a differenti modalità intermezzate in un qualche modo.

Infine Un radargramma è un diagramma bidimensionale che riporta sull'asse delle ascisse il tempo di azimuth o, che è lo stesso, il numero del frame trasmesso e sull'asse delle ordinate il tempo in range mentre sull'asse delle quote è riportato l'intensità di ciascun impulso. Fatte queste opportune osservazioni passiamo alle simulazioni.

⁸ PRI Pulse Repetition Interval, pari all'inverso della PRF

⁹ Gli istanti di tempo nei quali la banda radio viene occupata per trasferire i diversi canali logici vengono denominati **time slot**;

4.2 .b simulazioni

1° simulazione

orbita riferimento n° 2503

modalità di indagine sottosuperficiale SS-3

modalità operativa: OST_3

frames da 0 a 340

Inizialmente valutiamo le immagini provenienti da Mola in modo tale da poter avere una indicazione sulla superficie osservata lungo l'orbita di riferimento 2503.

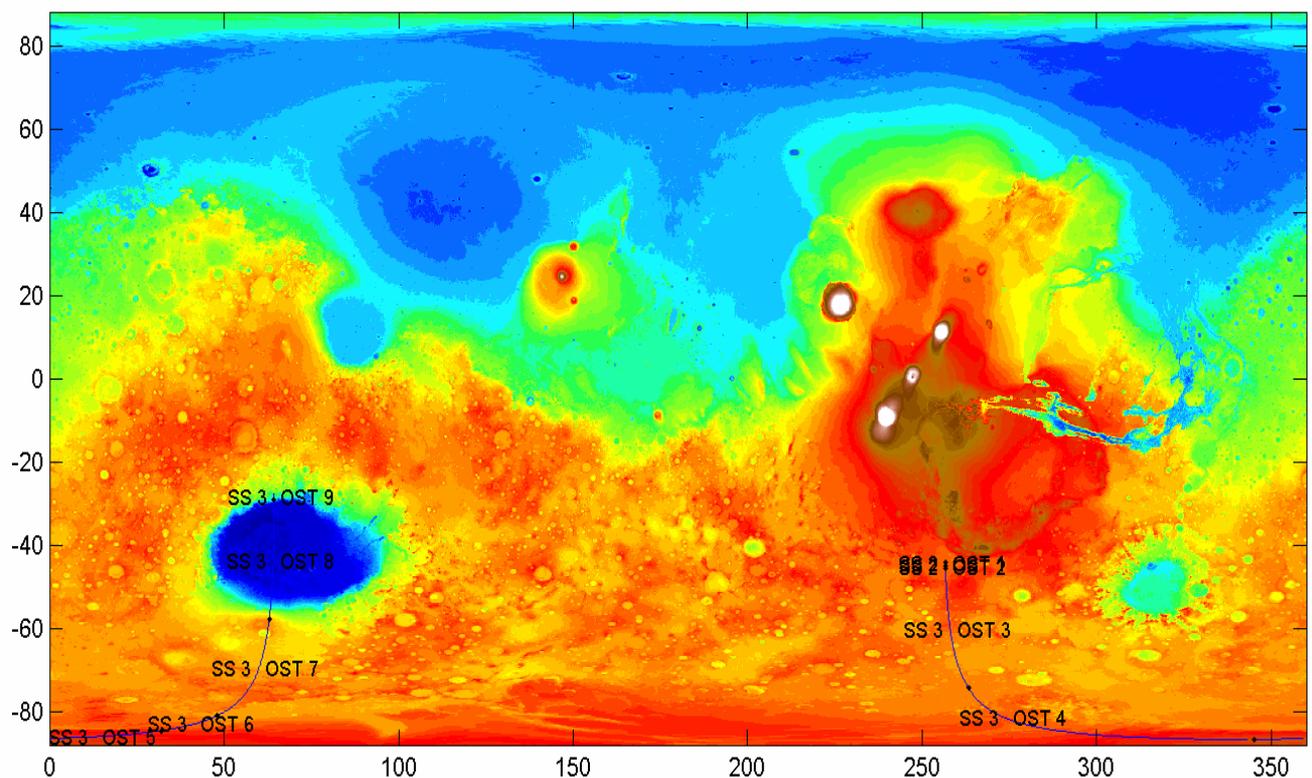


Fig 4.1 mappa mola di marte con traccia orbitale n°2503, sull'asse dell'ascisse è indicata la longitudine e sulle ordinate la latitudine. In tale mappa oltre alla traccia orbitale sono indicati anche le varie sottomodalità usate e le OST applicate

in particolare l'area che stiamo considerando è la seguente:

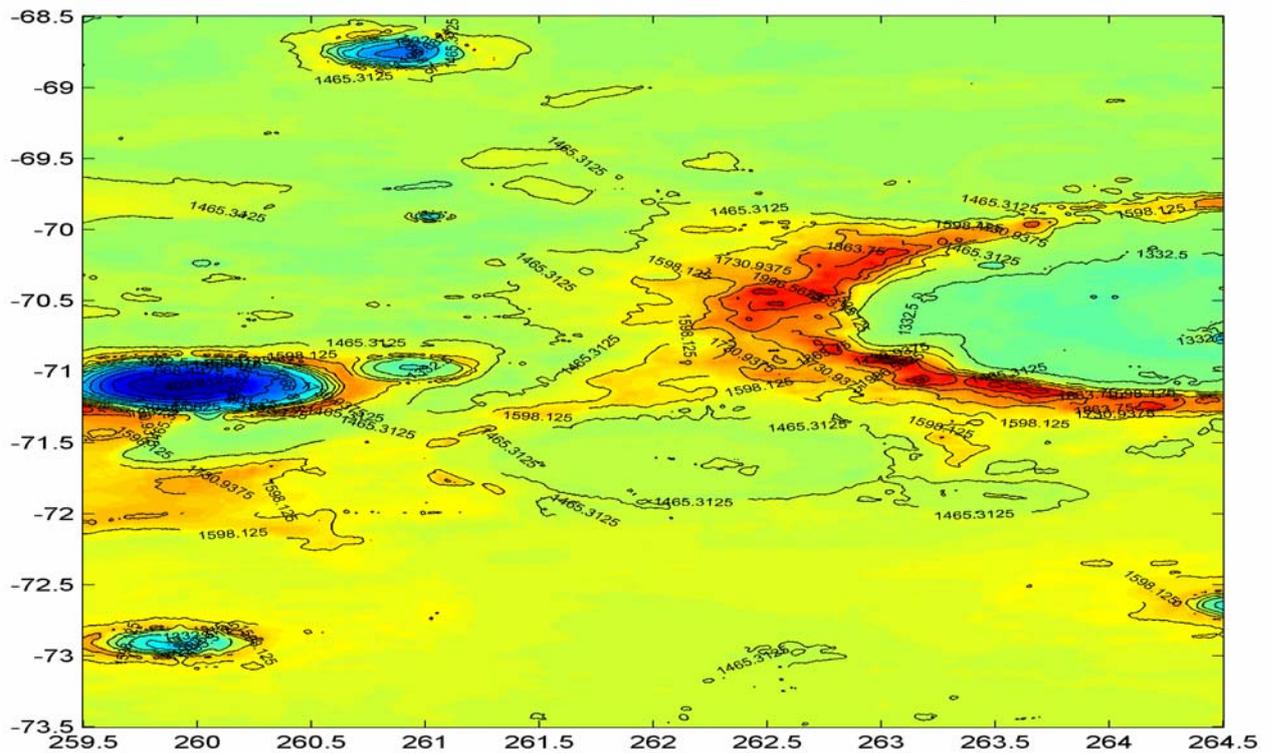


Fig 4.2 ingradimento della fig 4.1 .
In questa figura si mette in evidenza la zona che noi stiamo valutando SS3 -OST3

Mentre la rappresentazione 3D che mostra la traccia orbitale:

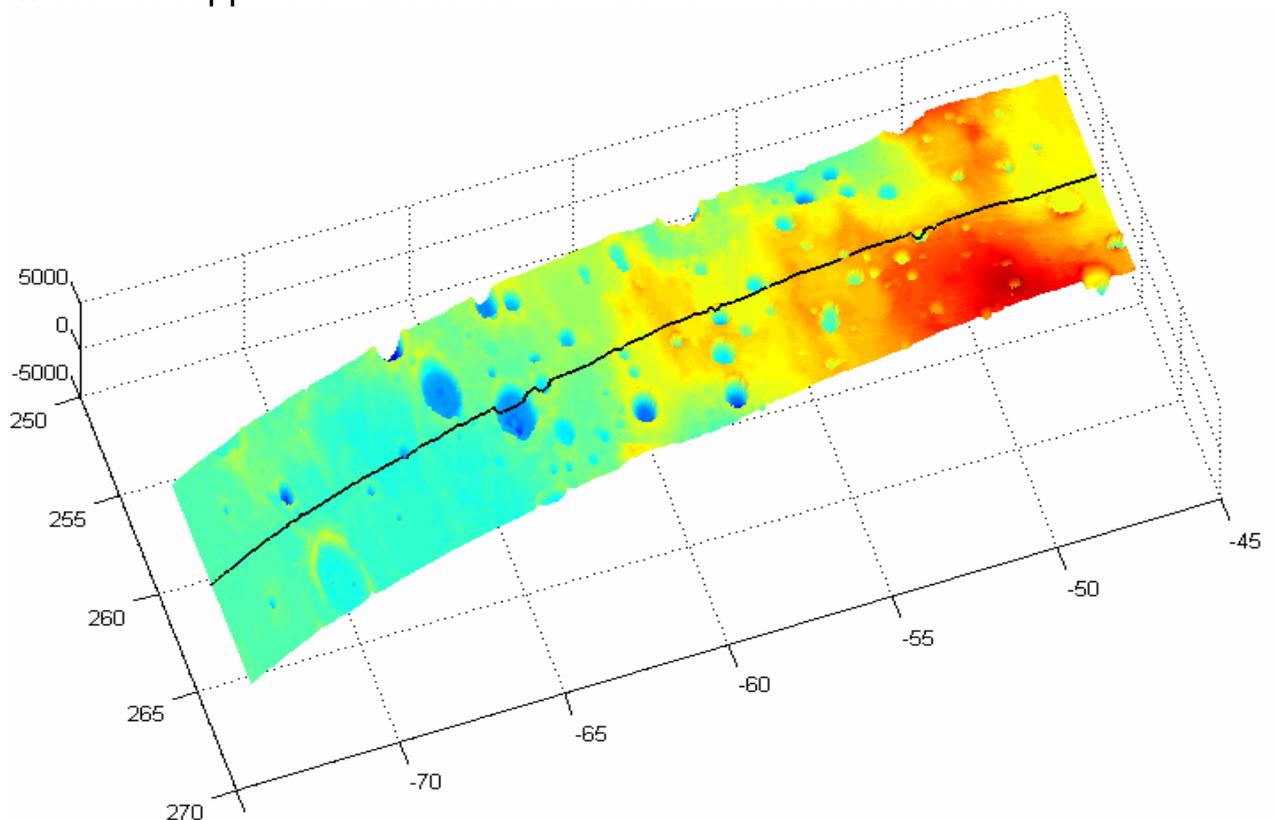


Fig. 4.3 rappresentazione 3D del tratto di orbita considerato
Orbita 2503 -SS_3-OST_3
Sull'asse delle ascisse abbiamo la latitudine ,sulle ordinate la longitudine e sull'asse verticale le quote

ed il profilo altimetrico, sempre ottenuto da mola, è

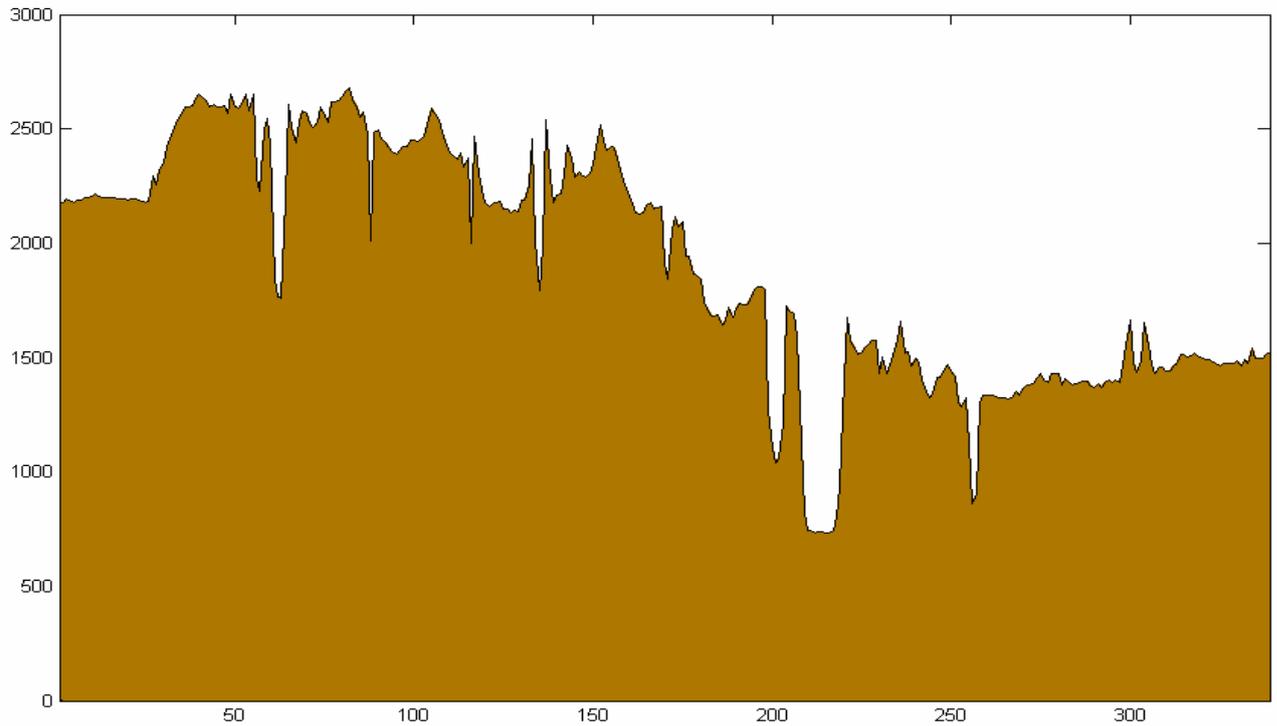


Fig 4.4 profilo altimetrico orbita 2503 SS3 OST3;
dove sull'asse delle ascisse sono rappresentati i frame e sulle ordinate le quote in metri

Dopo aver analizzato ,in tutti i suoi aspetti, l'orbita 2503 passiamo alla valutazione dei dati provenienti da Marsis. Innanzitutto valutiamo il radargramma relativo all'OST 3

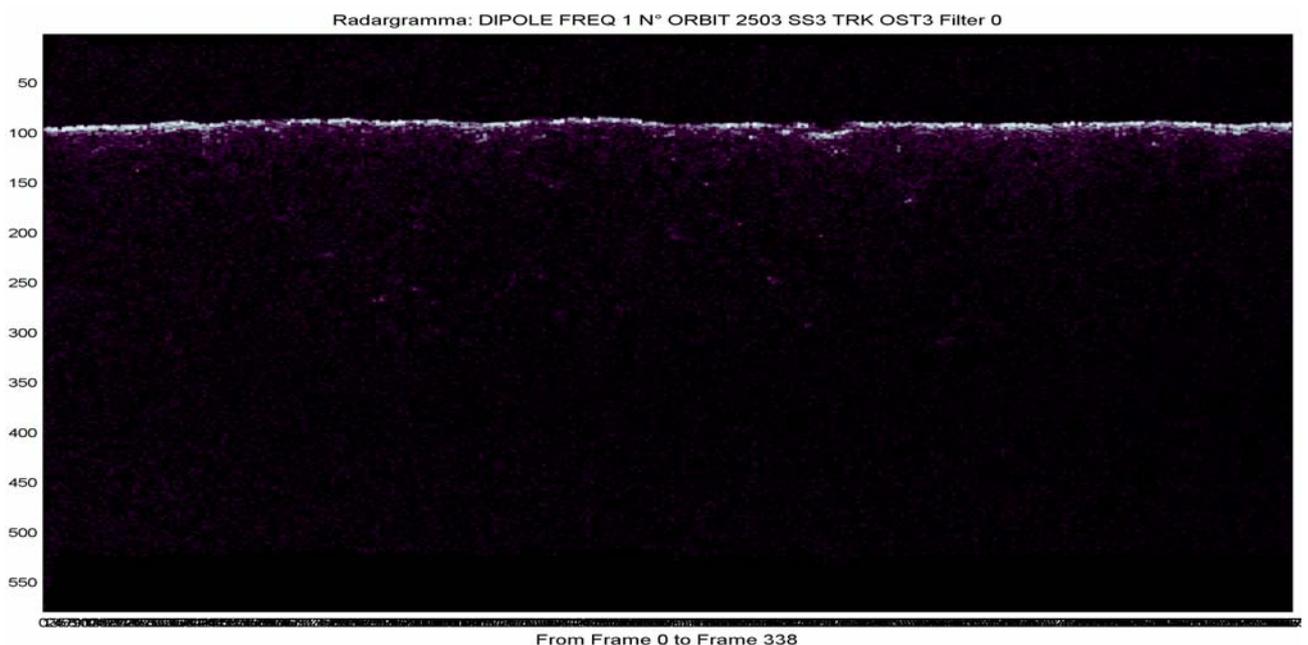


Fig 4.5 Radargramma OST 3

poi valutiamo il valore dello Zenith Sun Angle al variare del frame considerato da cui si evince come la OST è stata acquisita di notte (SZA>90°).

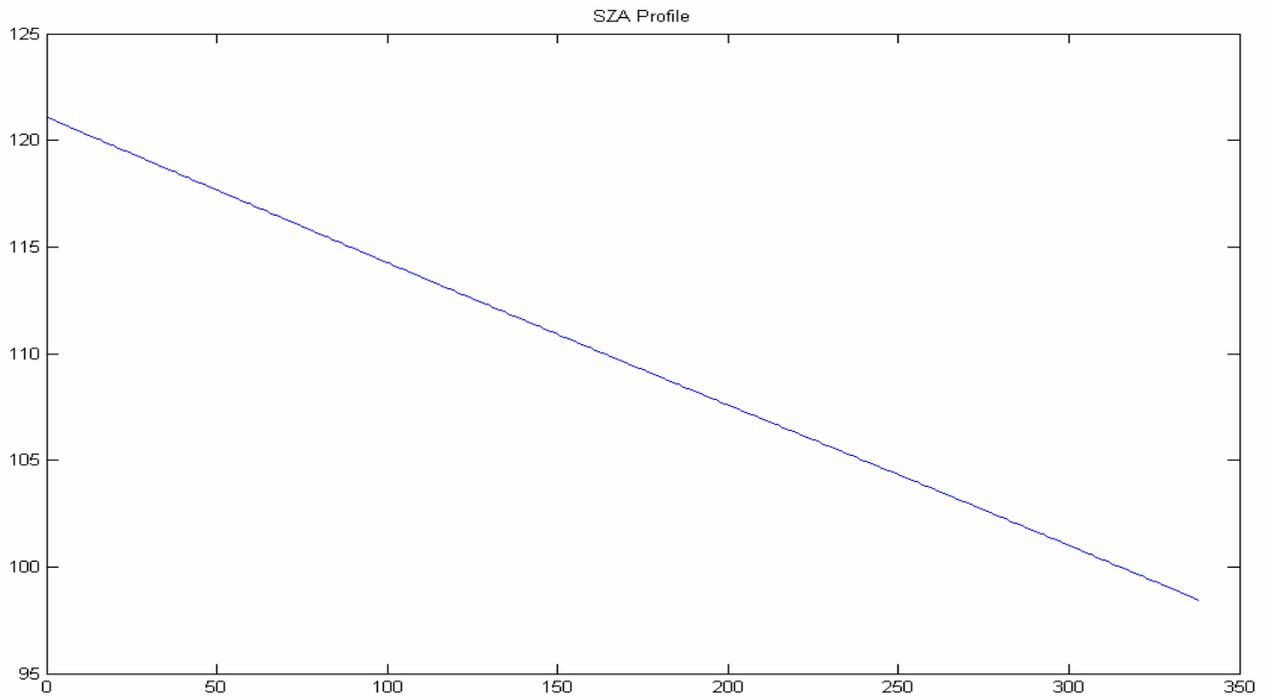


Fig 4.6 valutazione dello SZA a cui è stato acquisito ogni frame

e la valutazione del termine quadratico dell'errore ionosferico

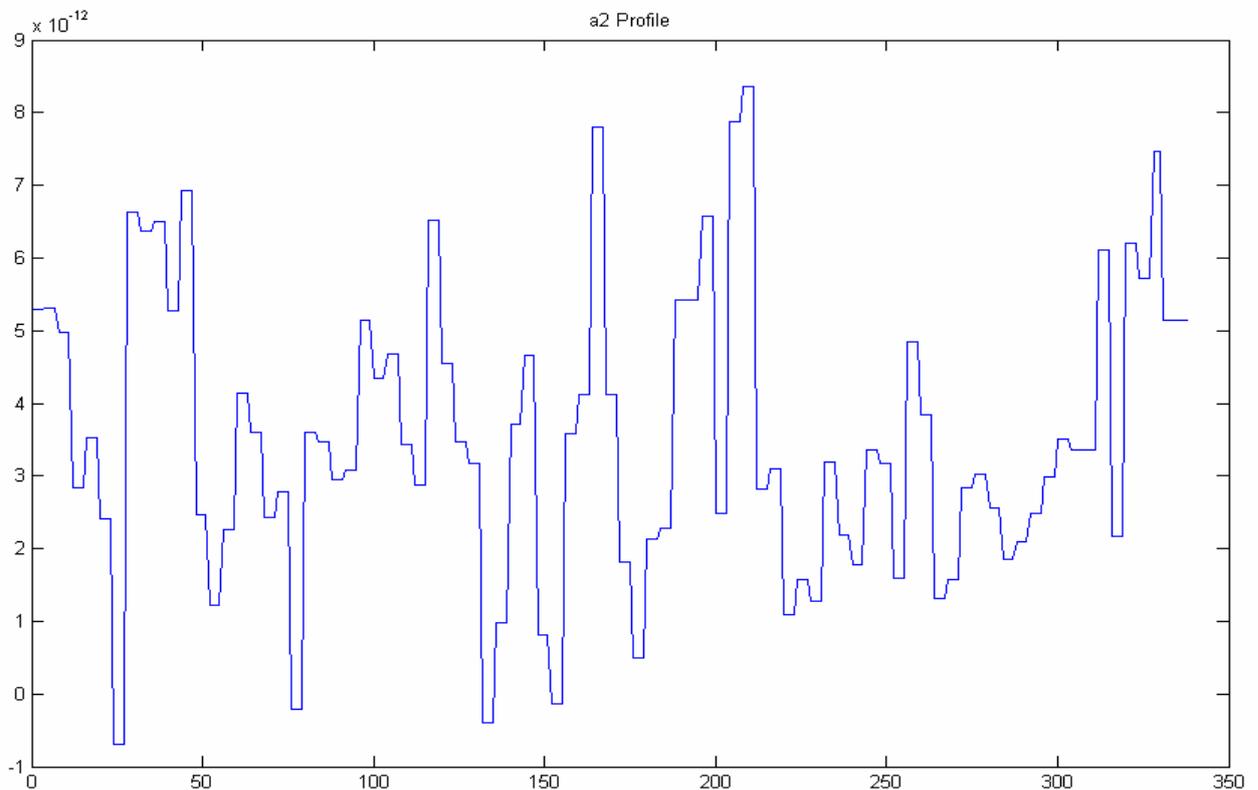


Fig 4.7 valutazione del valore del termine quadratico per singolo frame
Sulle ascisse vi sono i frame e sulle ordinate i termini quadratici espressi in (rad/Hz²)

infine il profilo altimetrico ricavato da Marsis senza tener conto del ritardo ionosferico è il seguente

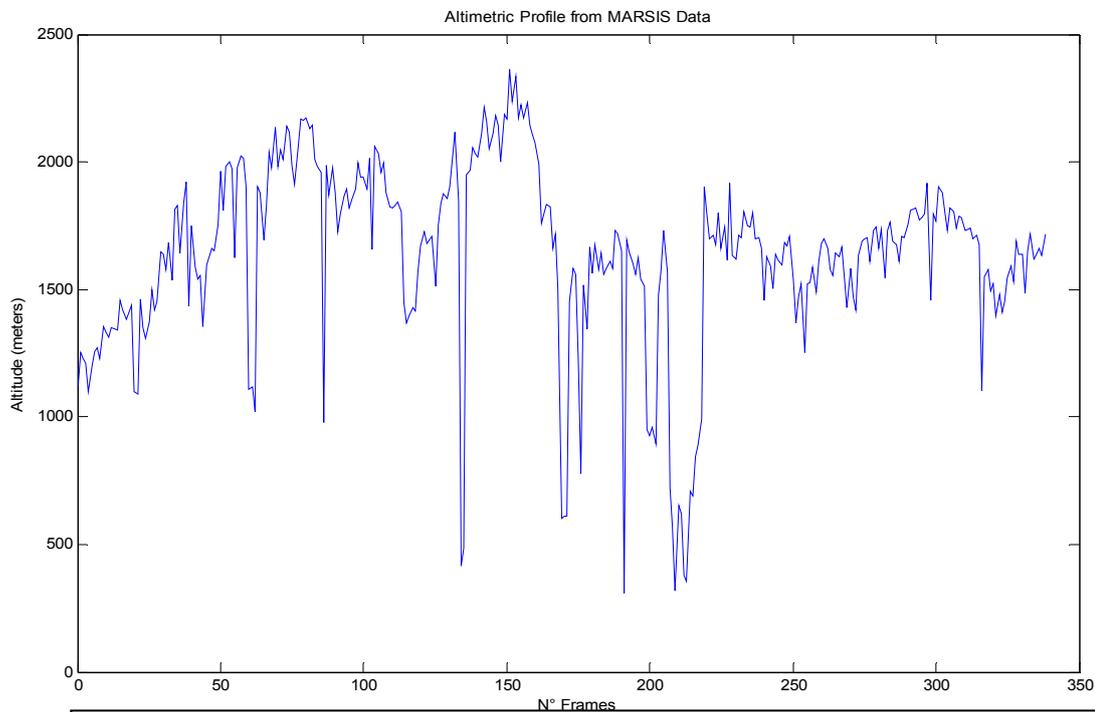


Fig . 4.7 profilo altimetrico relativo all'OST 3 banda 4

Passiamo adesso alla prima osservazione che riguarderà il:

frame n° 301 → SZA=101,001°; Banda4(f0=5MHz)

Valutiamo l'impulso ricevuto senza l'applicazione del PGA

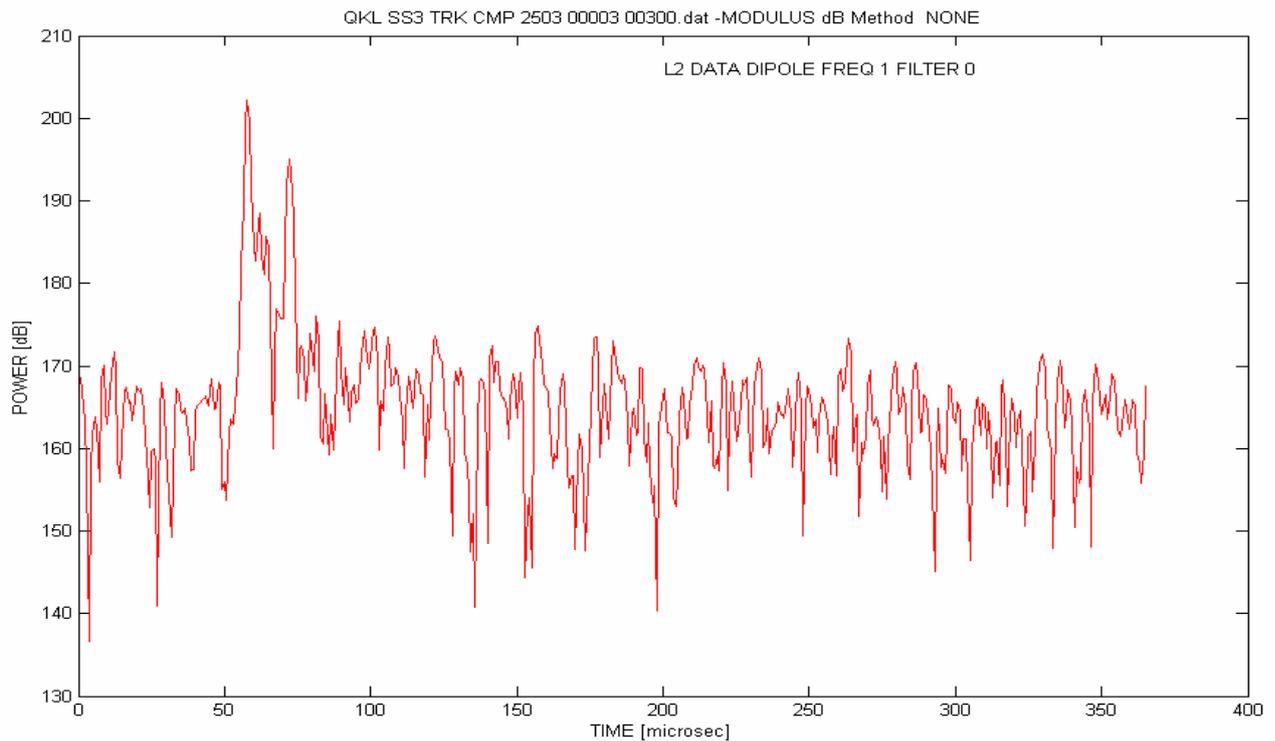


Fig 4.8 impulso relativo al frame 300 senza applicazione metodo PGA

e con l'applicazione del PGA

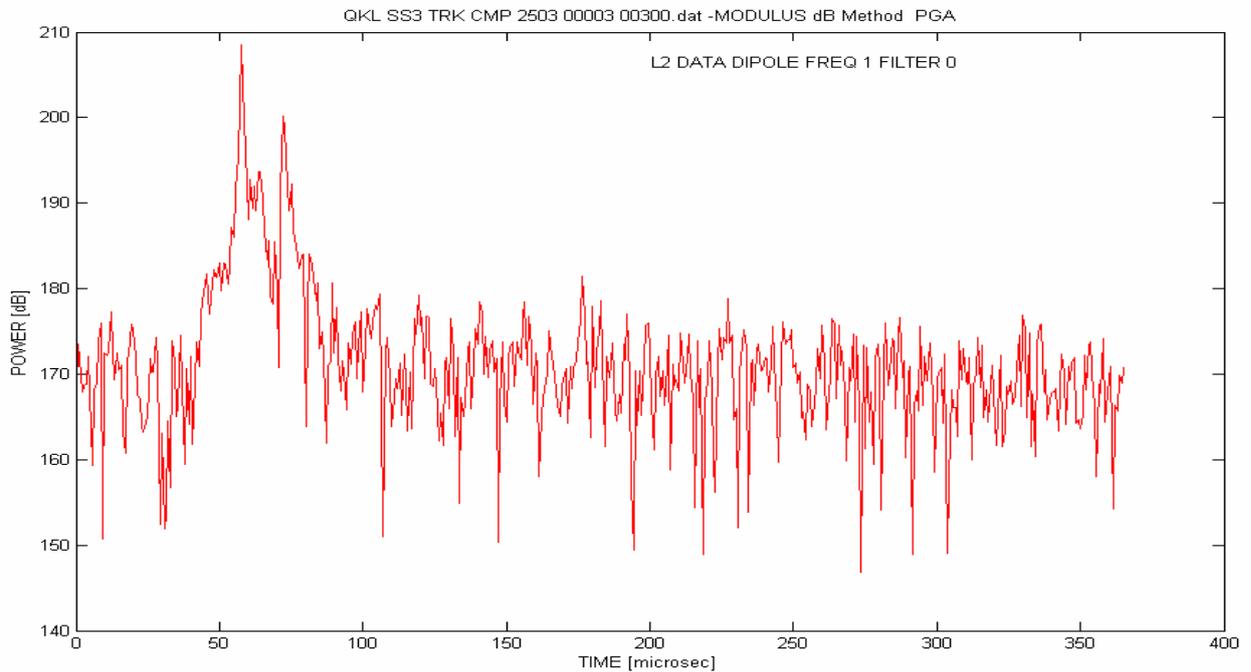


Fig 4.9 impulso relativo al frame 300 con applicazione metodo PGA

Successivamente a partire dalla stima ricavata dal PGA applichiamo il modello equivalente 2

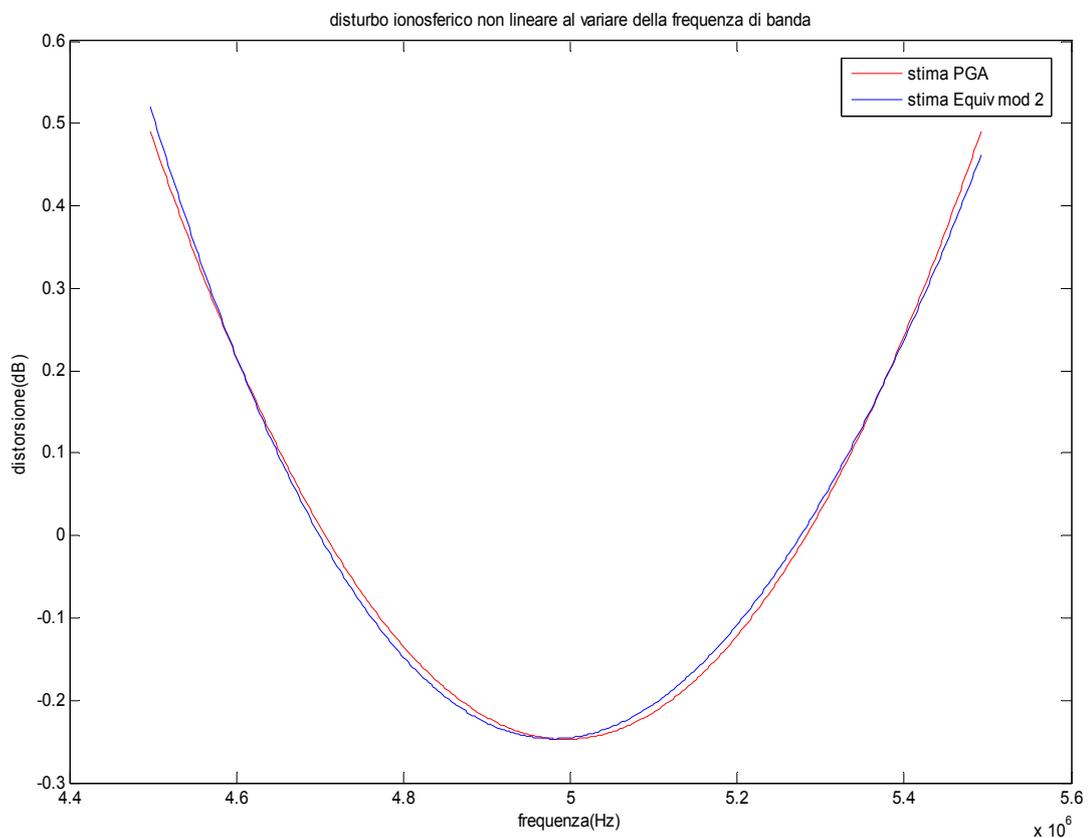


Fig 4.10 confronto tra PGA e la stima dello stesso effettuata con equiv mod 2

A partire dalla figura 4.7 valutiamo il valore della quota relativa al frame considerato

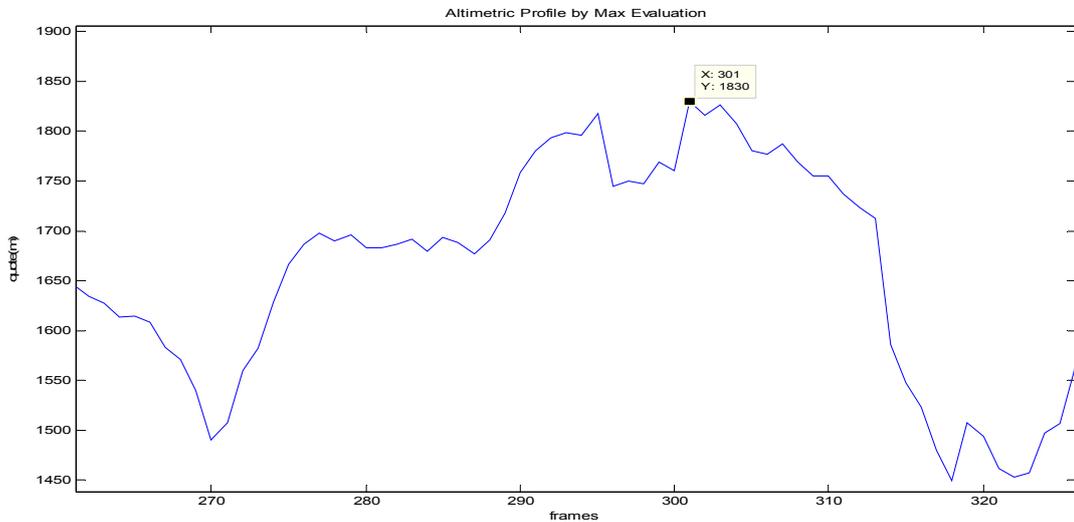
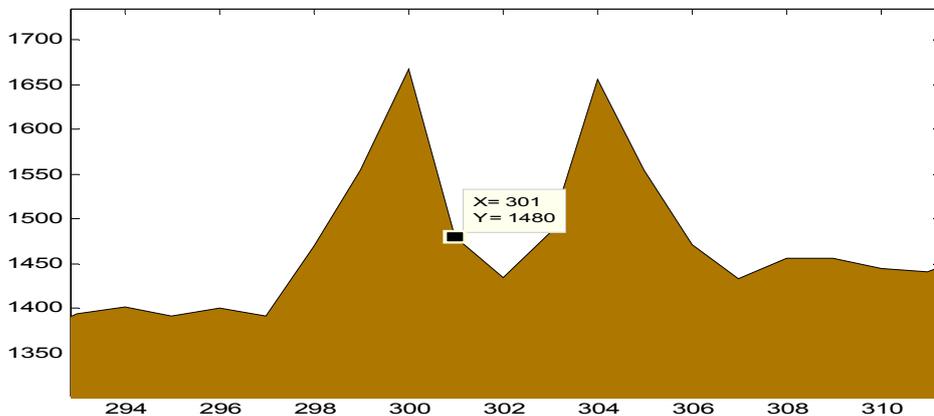


Fig. 4.12 ingrandimento figura 4.4

da cui si evince che la quota stimata dal software di marsis senza tener conto del ritardo ione sferico è:

$$Q_{M(s.i)} = 1830 \text{ m}$$

mentre la quota rilevata da mola per lo stesso frame è $Q_{MOLA} = 1480m$



4.11 Ingrandimento della fig 4.7

infine tenendo conto del ritardo stimato dal modello equivalente 2 e riportato nella tabella sottostante si ricava che lo shift spaziale legato alla ionosfera è dato da:

$$\xi_{iono} = T \cdot \frac{c}{2} = 349,5$$

per cui compensando il ritardo ionosferico si ha

$$Q_{M(c.i.)} = Q_{M(s.i.)} + \xi_{iono} = 1902 - 300 \cong 1602 \text{ m}$$

Risultati

| |
|--|
| Apertura 3dB senza PGA=1.4732 μ s |
| Apertura 3dB senza PGA=0.42 μ s |
| Frequenza plasma equivalente=4.473*10 ⁵ Hz |
| τ_0 equivalente = 4,9893 · 10 ⁻⁴ [s] |
| Ritardo ionosferico = 2,002*10 ⁻⁶ [s] |
| Scarto quadratico medio = 0.0099 |
| Quota letta da Marsis corrotta da ionosfera $Q_{M(s.i.)} = 1830 \text{ m}$ |
| Quota letta da Mola $Q_{MOLA} = 1480\text{m}$ |
| Ritardo ionosferico stimato da equiv_mod2 $\xi_{iono} = T \cdot \frac{c}{2} \cong 300$ |
| Quota corretta Marsis $Q_{M(c.i.)} = Q_{M(s.i.)} + \xi_{iono} = 1830 - 300 \cong 1530 \text{ m}$ |
| Errore relativo(MOLA-Marsis)=50m |

Considerazioni

Attraverso questa simulazione abbiamo messo in evidenza l'efficacia del PGA che aumenta il valore di picco del segnale e riduce il fascio a 3 dB ed inoltre si è messo in evidenza anche l'efficacia del nostro modello per la stima del ritardo ionosferico. Infatti attraverso questo modello abbiamo siamo passati da un a errore relativo tra MOLA e Marsis di 350m ad uno di 50m e quindi compatibile con la risoluzione teorica dello strumento(Marsis)

frame n° 301 → SZA=101,001°; Banda3(f0=4MHz)

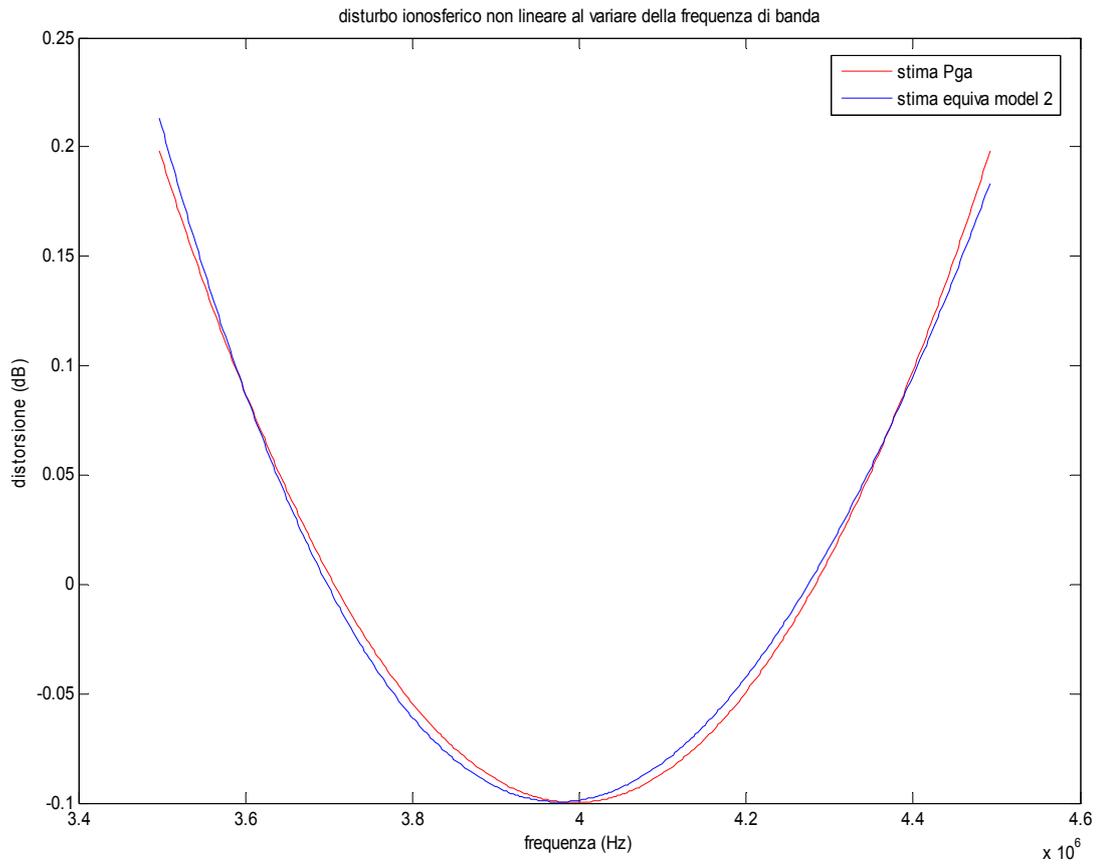


Fig 4.13 confronto tra PGA e la stima dello stesso effettuata con equiv mod 2

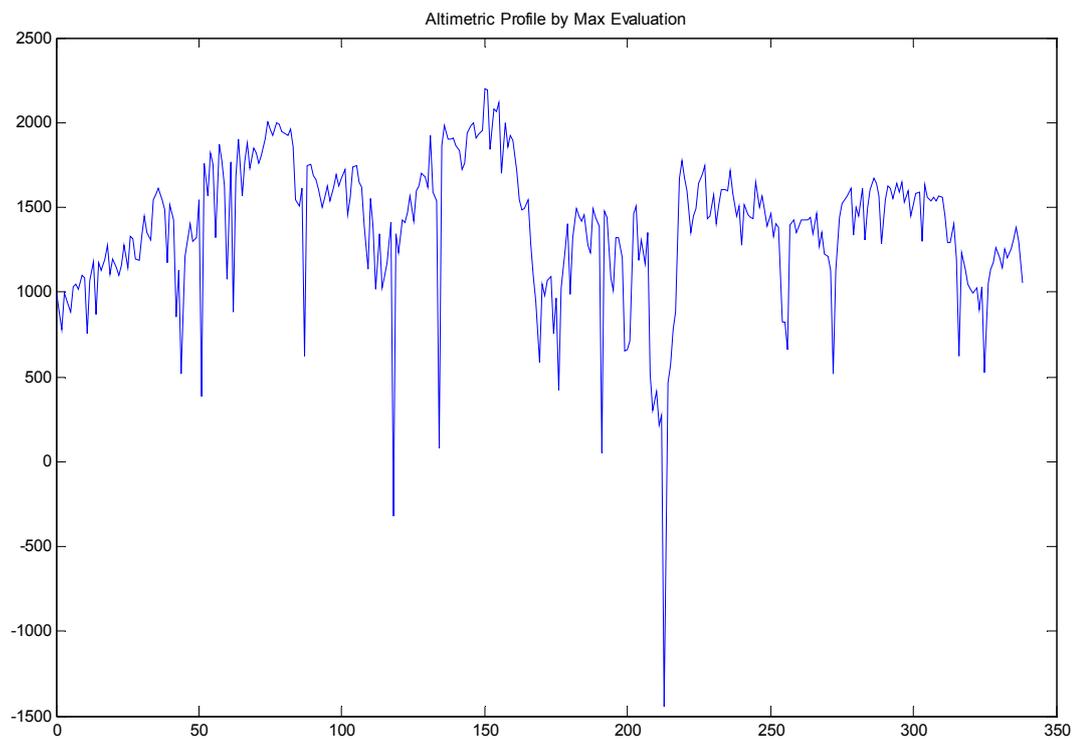


Fig . 4.14 profilo altimetrico relativo all'OST 3 banda3

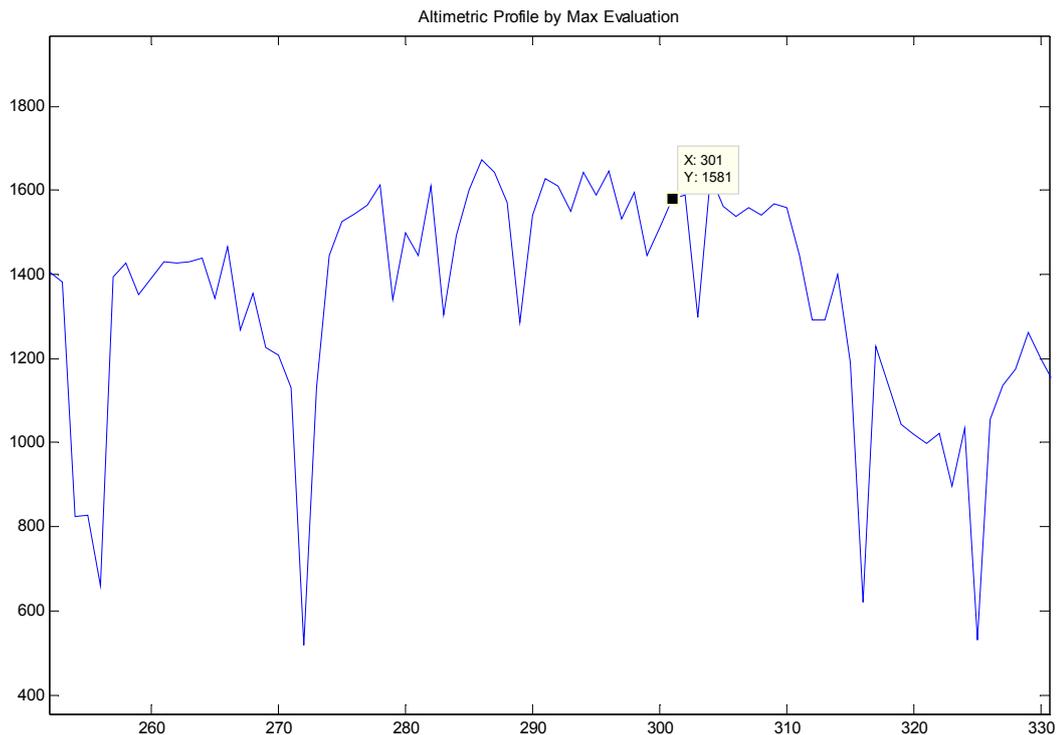


Fig 4.15 ingrandimento fig 4.14

| |
|---|
| Frequenza plasma equivalente = $4 \cdot 10^5$ Hz |
| τ_0 equivalente = $1,4767 \cdot 10^{-4}$ [s] |
| Ritardo ionosferico = $7,53 \cdot 10^{-7}$ [s] |
| Scarto quadratico medio = 0.0012 |
| $Q_{M(s.i)} = 1581$ m |
| $Q_{MOLA} = 1480$ m |
| $\xi_{iono} = T \cdot \frac{c}{2} = 112,95$ m |
| $Q_{M(c.i)} = Q_{M(s.i)} + \xi_{iono} = 1581 - 112,95 \cong 1468$ m |
| Errore relativo $\cong 12$ m |

Da cui si nota che la differenza tra i nostri valori e quelli di mola è minore di cinquanta metri

frame n° 290 → SZA=101,536 °; Banda4 (f0=5MHz)

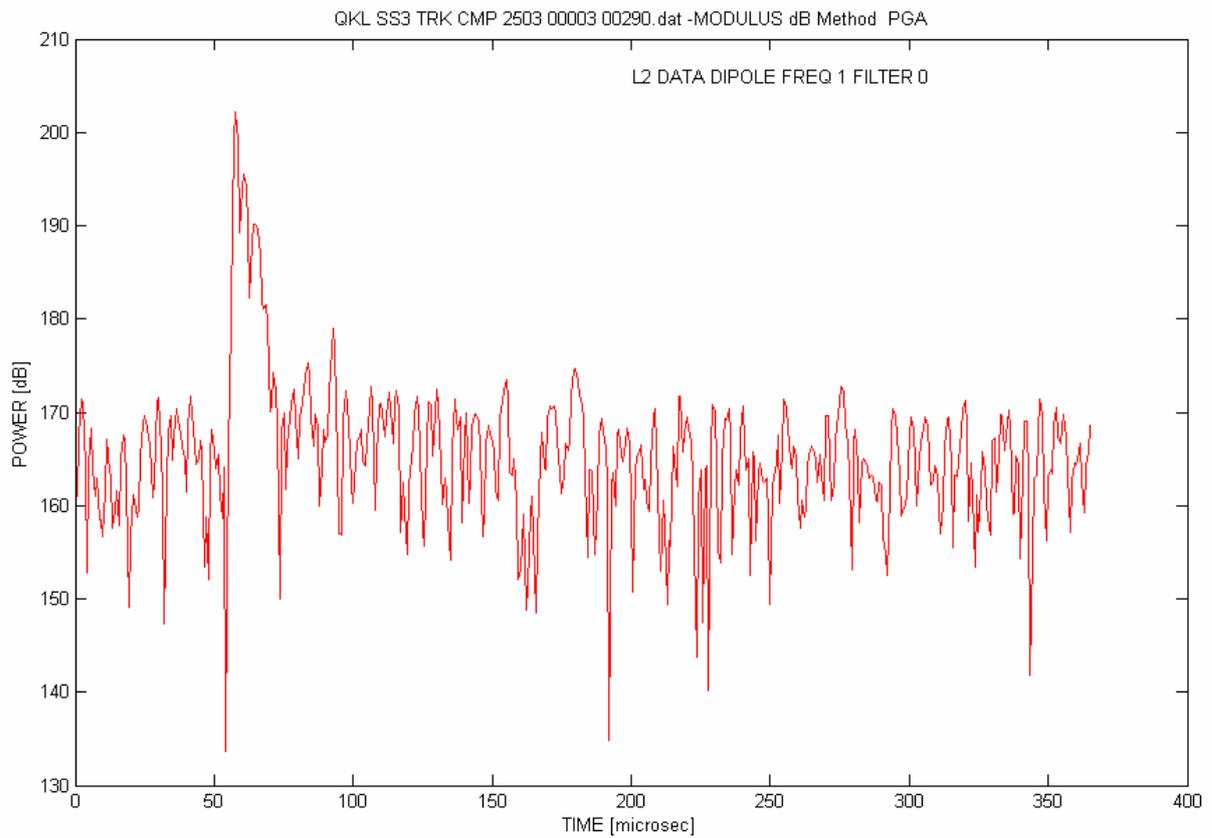


Fig 4.16 impulso ricevuto e compensato mediante PGA

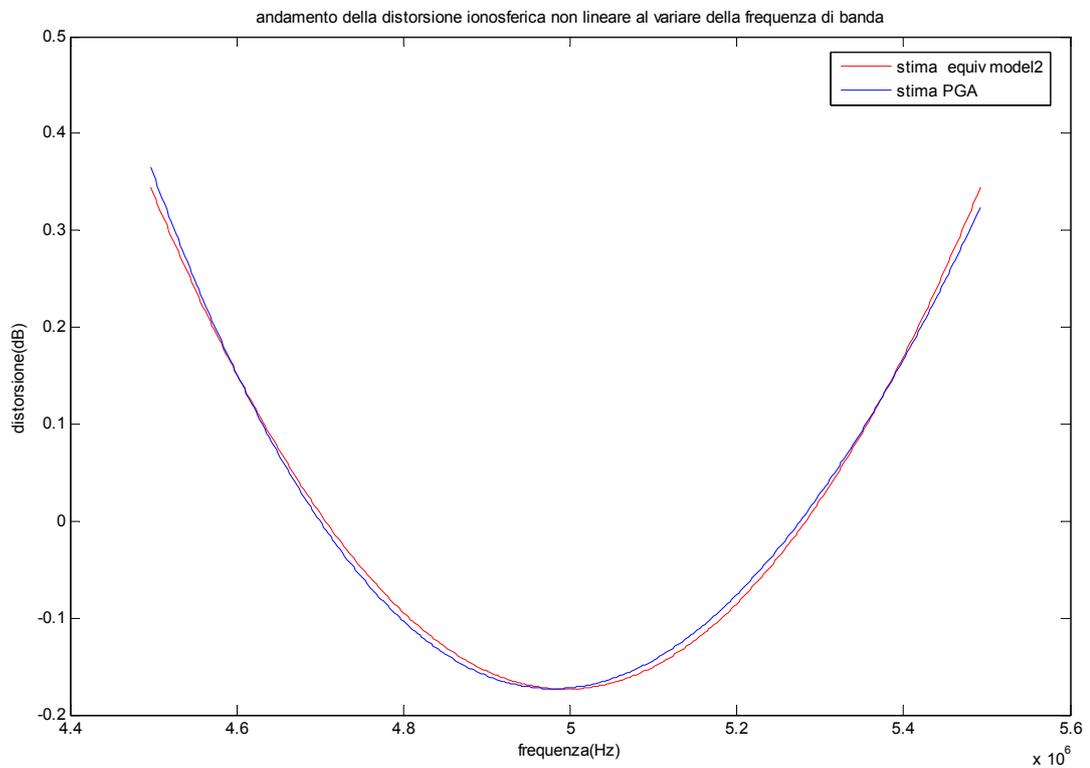


Fig. 4.17 confronto tra PGA e la stima dello stesso effettuata con equiv_mod_2

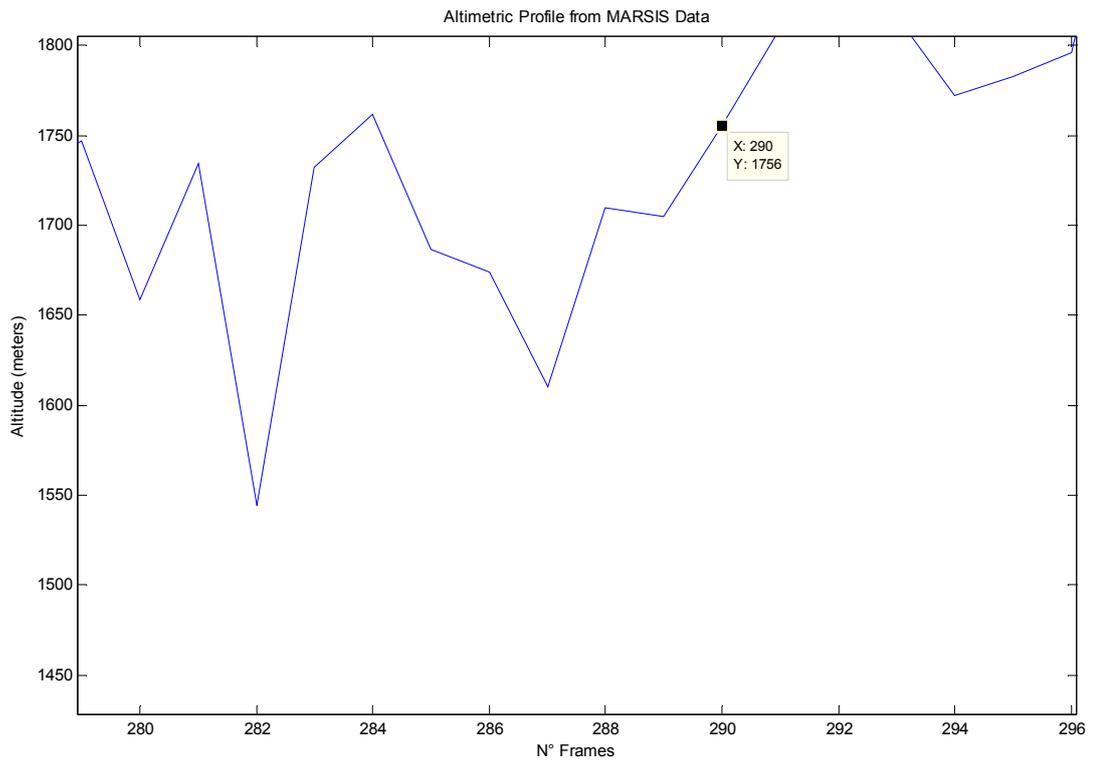


Fig. 4.18 ingrandimento fig.4.7

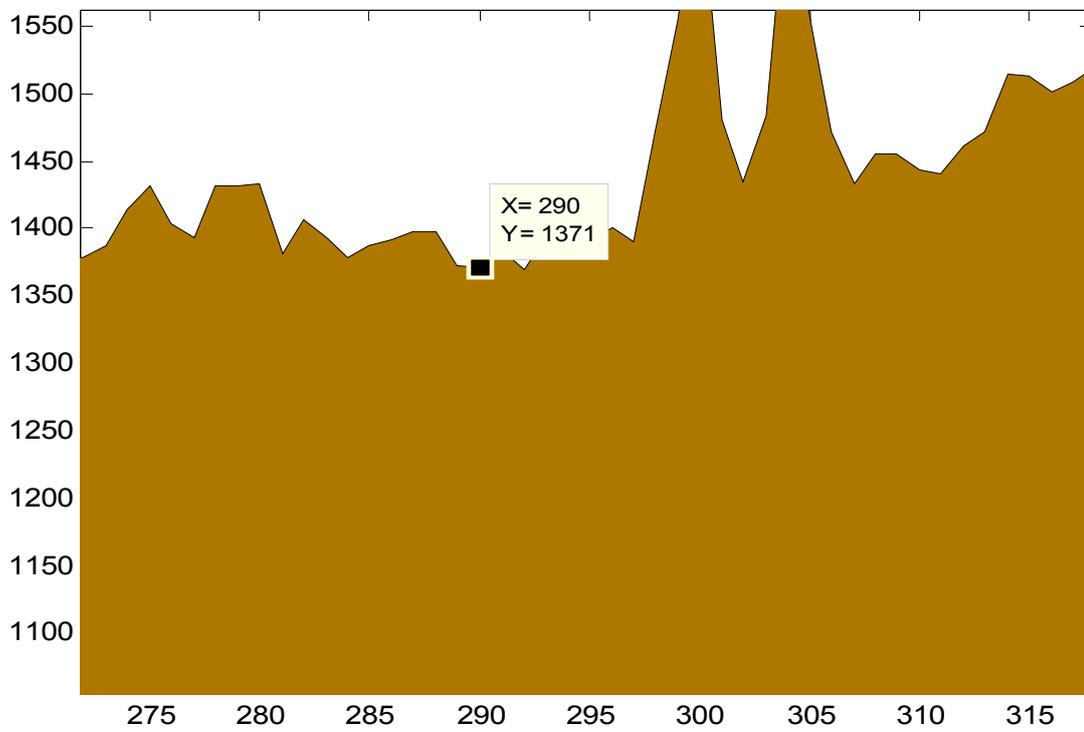


Fig. 4.19 ingrandimento fig.4.4

Risultati

| |
|---|
| Frequenza plasma equivalente= $4,7 \cdot 10^5$ Hz |
| τ_0 equivalente = $3,5722 \cdot 10^{-4}$ [s] |
| Ritardo ionosferico = $1,6411 \cdot 10^{-6}$ [s] |
| Scarto quadratico medio = 0.08 |
| $Q_{M(s.i)} = 1756m$ |
| $Q_{MOLA} = 1371$ |
| $\xi_{iono} = T \cdot \frac{c}{2} = 246,17m$ |
| $Q_{M(c.i.)} = Q_{M(s.i.)} + \xi_{iono} = 1756 - 246,17 \cong 1510 m$ |
| Errore relativo=139m |

Considerazioni

In questo caso anche se l'errore risulta maggiore rispetto ai casi precedenti è comunque all'interno del range di accettabilità(150m)

2° simulazione

orbita riferimento n° 2503

modalità di indagine sottosuperficiale SS-3

modalità operativa: OST_6

frames da 0 a 46

L'area che stiamo considerando è la seguente:

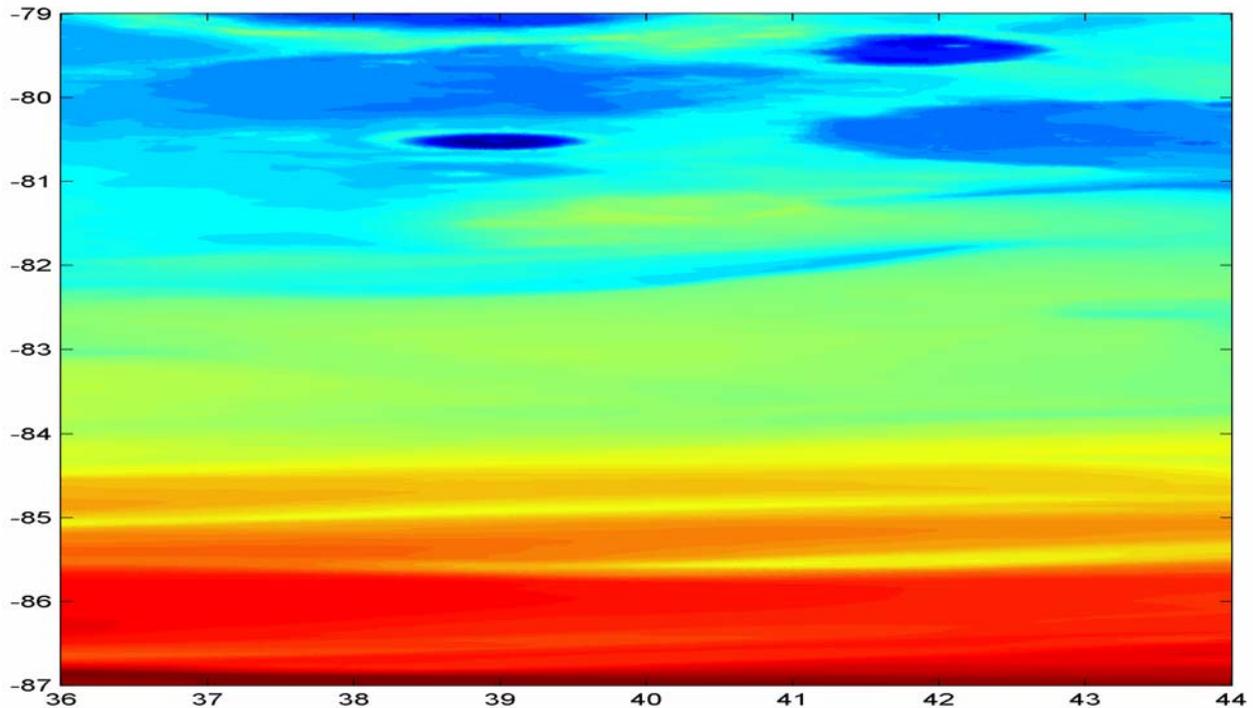


Fig 4.20 ingrandimento della fig 4.1 .

In questa figura si mette in evidenza la zona che noi stiamo valutando SS3 -OST6

mentre la traccia orbitale vista attraverso una rappresentazione 3D è

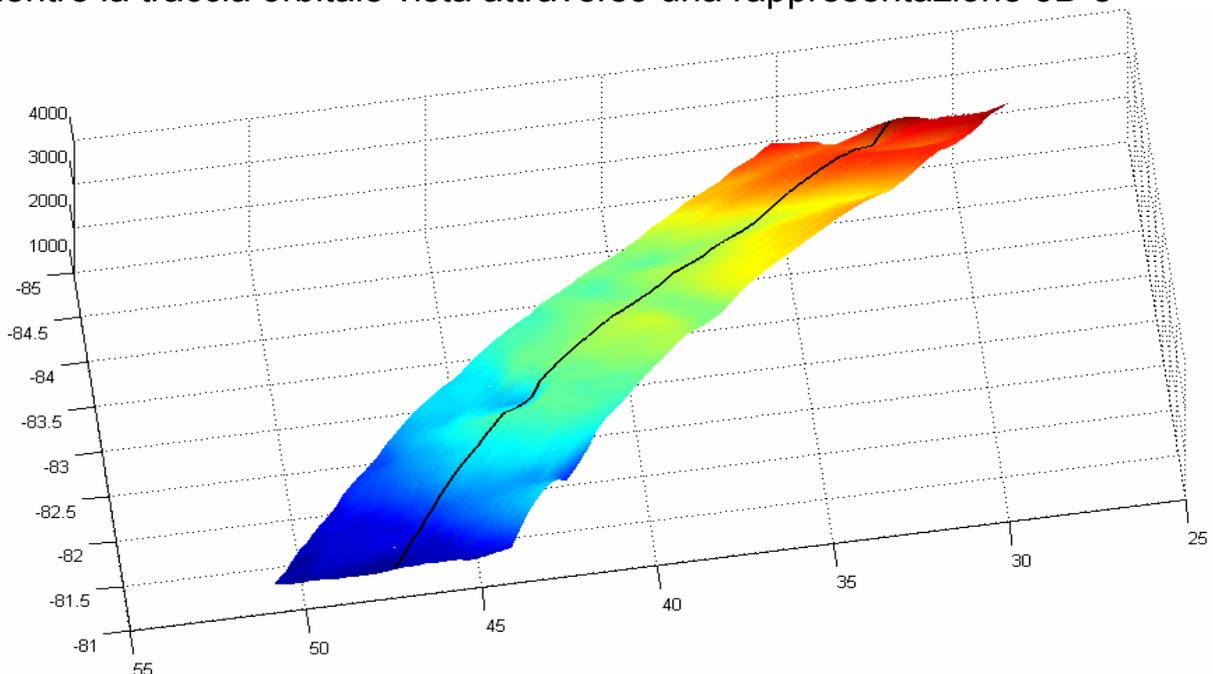


Fig. 4.21 rappresentazione 3D del tratto di orbita considerato

Orbita 2503 -SS_3-OST_6

Sull'asse delle ascisse abbiamo la latitudine ,sulle ordinate la longitudine e sull'asse verticale le quote

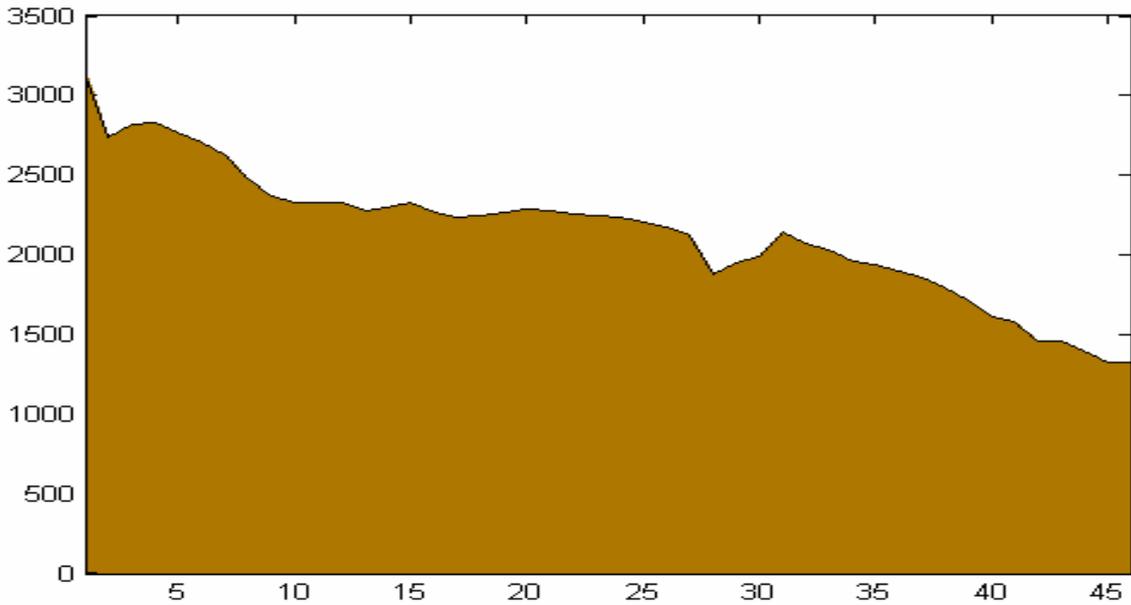


Fig 4.22 profilo altimetrico orbita 2503 SS3 OST6;
dove sull'asse delle ascisse sono rappresentati i frame e sulle ordinate le quote in metri

Dopo aver analizzato ,in tutti i suoi aspetti, l'OST 6 relativo all'orbita 2503 passiamo alla valutazione dei dati provenienti da Marsis. Innanzitutto valutiamo il radargramma relativo all'OST 6

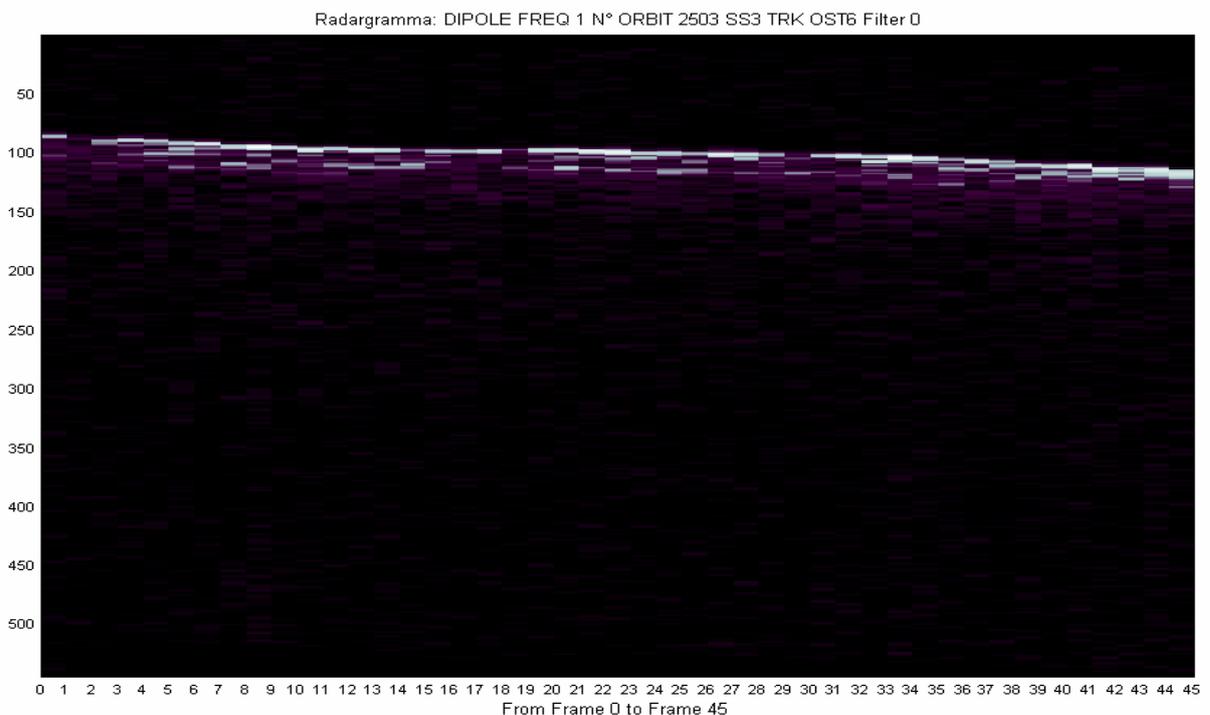


Fig 4.23 Radargramma OST 6

poi valutiamo il valore dello Zenith Sun Angle al variare del frame considerato da cui si evince come la OST è stata acquisita di giorno (SZA < 90°).

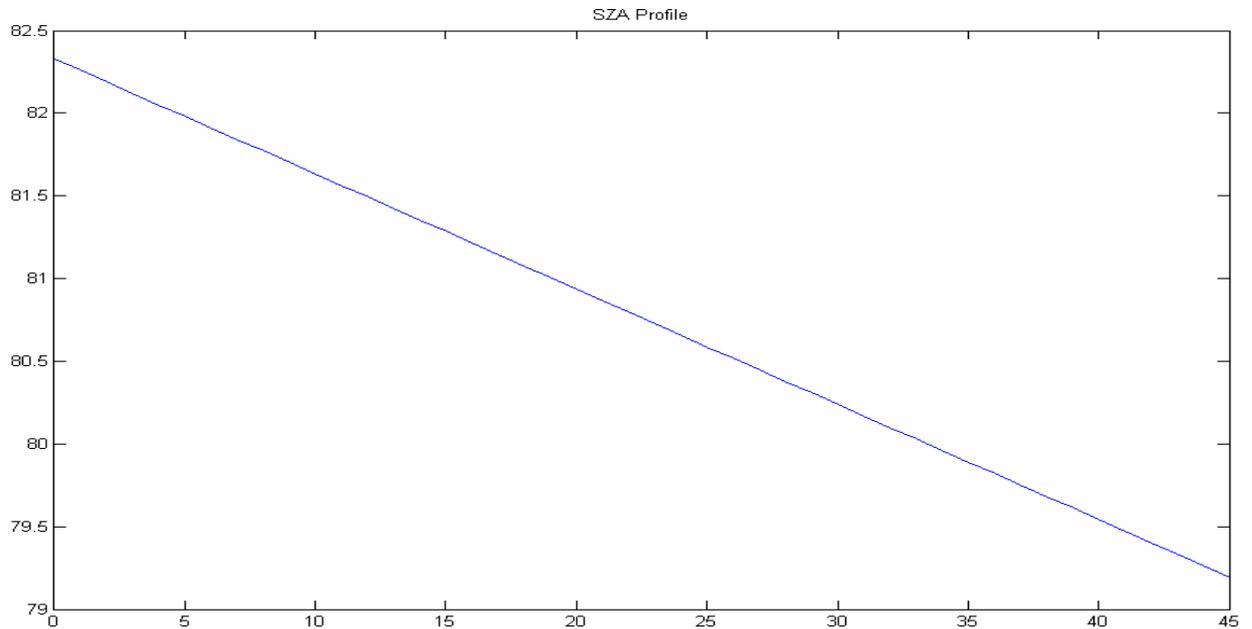


Fig 4.24 valutazione dello SZA a cui è stato acquisito ogni frame

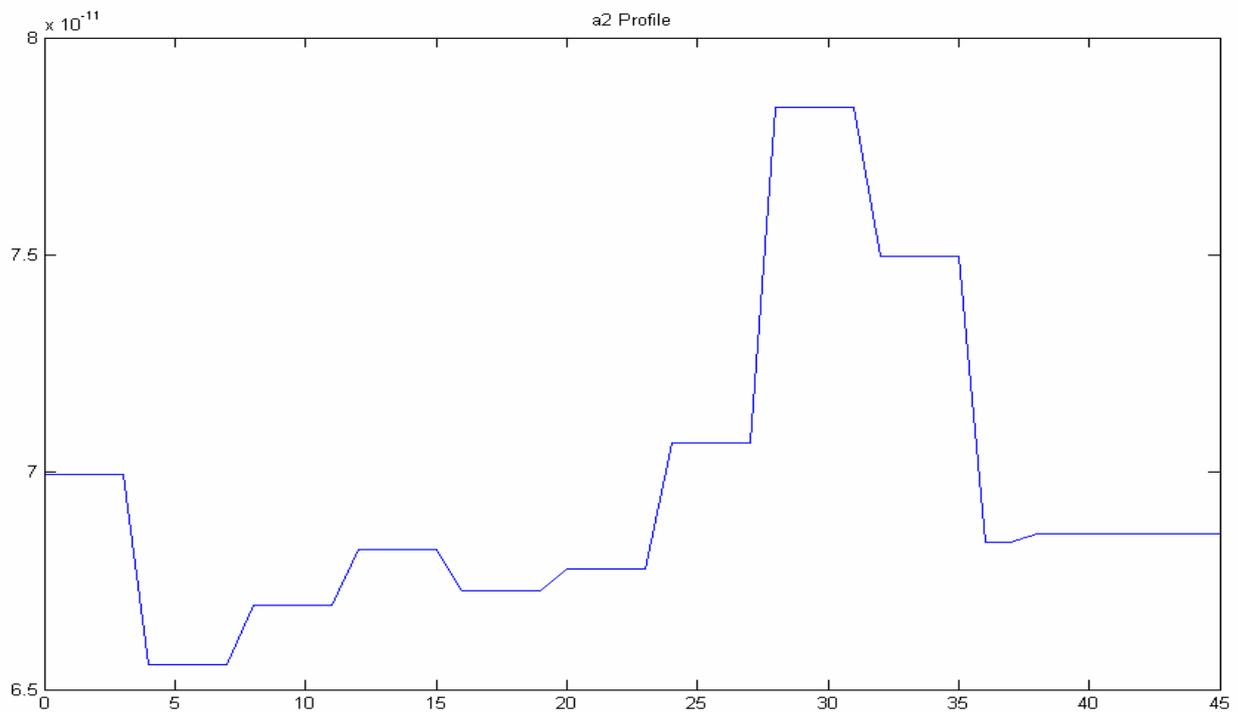


Fig 4.25 valutazione del valore del termine quadratico per singolo frame
Sulle ascisse vi sono i frame e sulle ordinate i termini quadratici espressi in (rad/Hz²)

Infine il profilo altimetrico ricavato da Marsis senza tener conto del ritardo ionosferico è il seguente

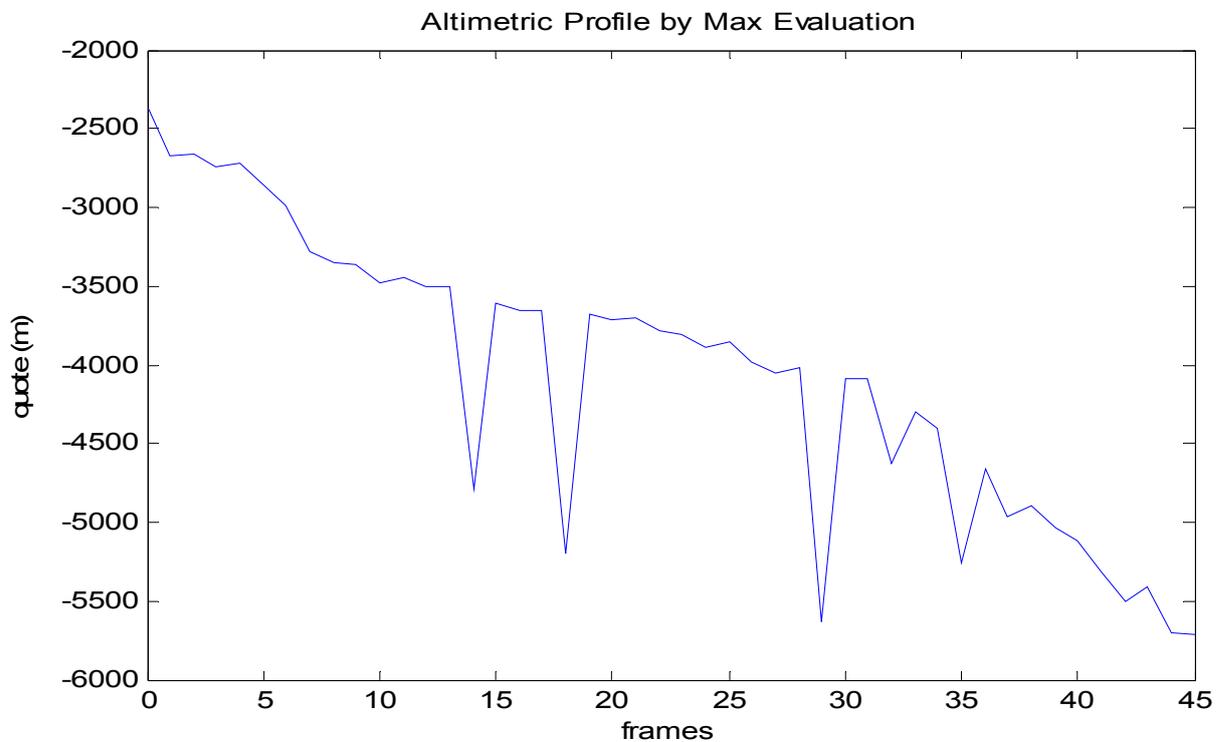


Fig . 4.26 profilo altimetrico relativo all'OST6 banda 4

frame n° 21 → SZA=80,935°; Banda4(f0=5MHz)

Valutiamo innanzitutto l'impulso senza PGA

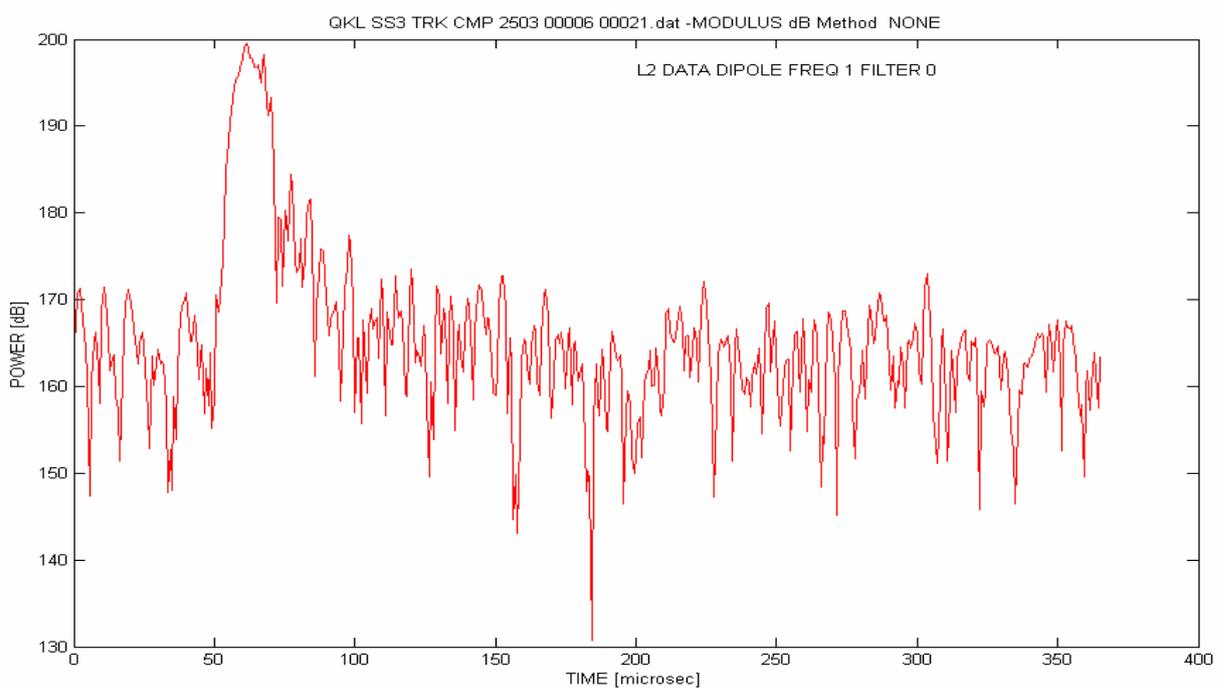


Fig 4.27 impulso relativo al frame 21 senza applicazione metodo PGA

e successivamente quello compensato con il PGA

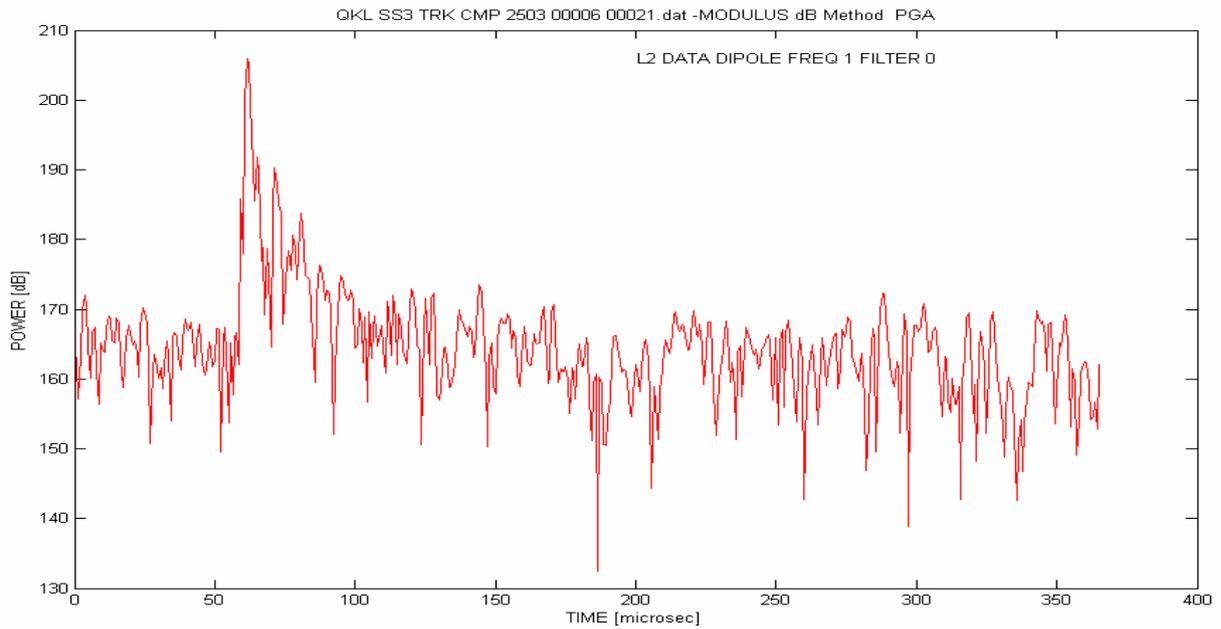


Fig 4.28 impulso relativo al frame 21 con applicazione metodo PGA

Successivamente a partire dalla stima ricavata dal PGA applichiamo il modello equivalente 2

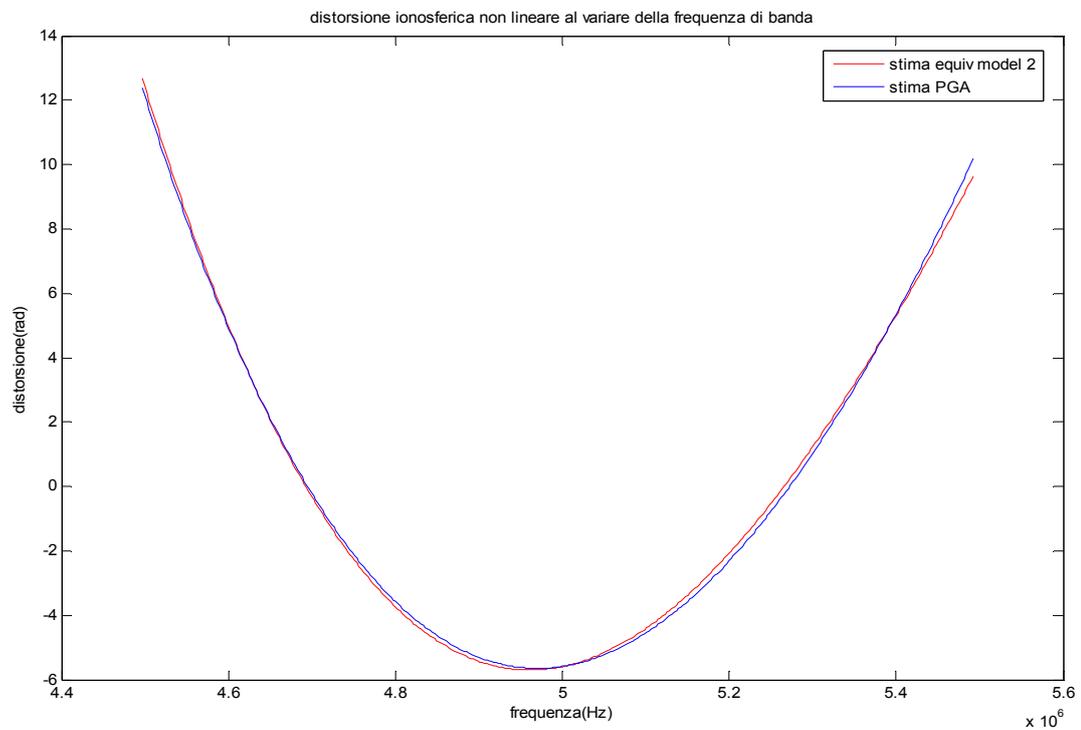


Fig 4.29 confronto tra PGA e la stima dello stesso effettuata con equiv mod 2

Valuto la quota stimata dal software di marsis senza il modello equivalente2

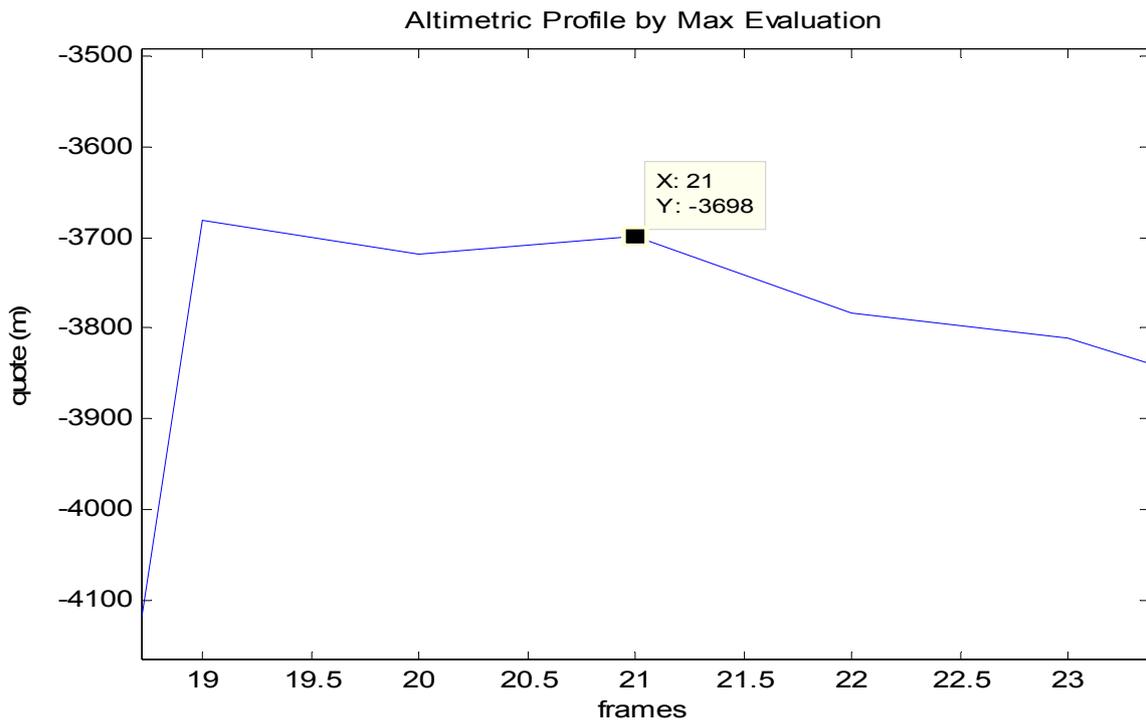


Fig. 4.30 ingrandimento fig.4.24

e quella stimata da MOLA

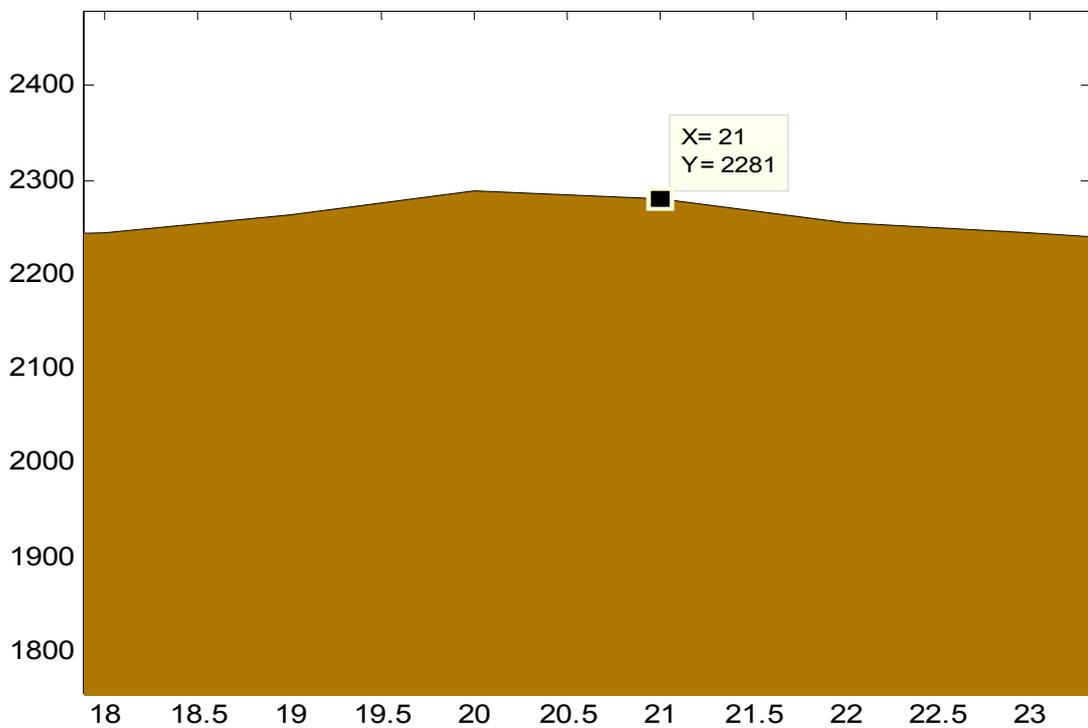


Fig. 4.31 ingrandimento fig.4.22

Dalle figure mostrate si ricavano i seguenti risultati

Risultati

| |
|--|
| Frequenza plasma equivalente= $2,763 \cdot 10^6$ Hz |
| τ_0 equivalente = $2,003^{-4}$ [s] |
| Ritardo ionosferico = $4,056 \cdot 10^{-5}$ [s] |
| Scarto quadratico medio = 0.2207 |
| $Q_{M(s.i)} = -3698$ m |
| $Q_{MOLA} = 2281$ m |
| $\xi_{iono} = T \cdot \frac{c}{2} = 6084$ m |
| $Q_{M(c.i)} = Q_{M(s.i)} + \xi_{iono} = -3698 + 6084 \cong 2386$ m |
| Errore relativo=105m |

Considerazioni

In questo caso abbiamo applicato il modello per una osservazione fatta di giorno e abbiamo notato che l'errore relativo tra MOLA e Marsis è notevolmente ridotto: passa infatti da circa sei km ad un errore di soli 105m

frame n° 41 → SZA=79,542°; Banda4(f0=5MHz)

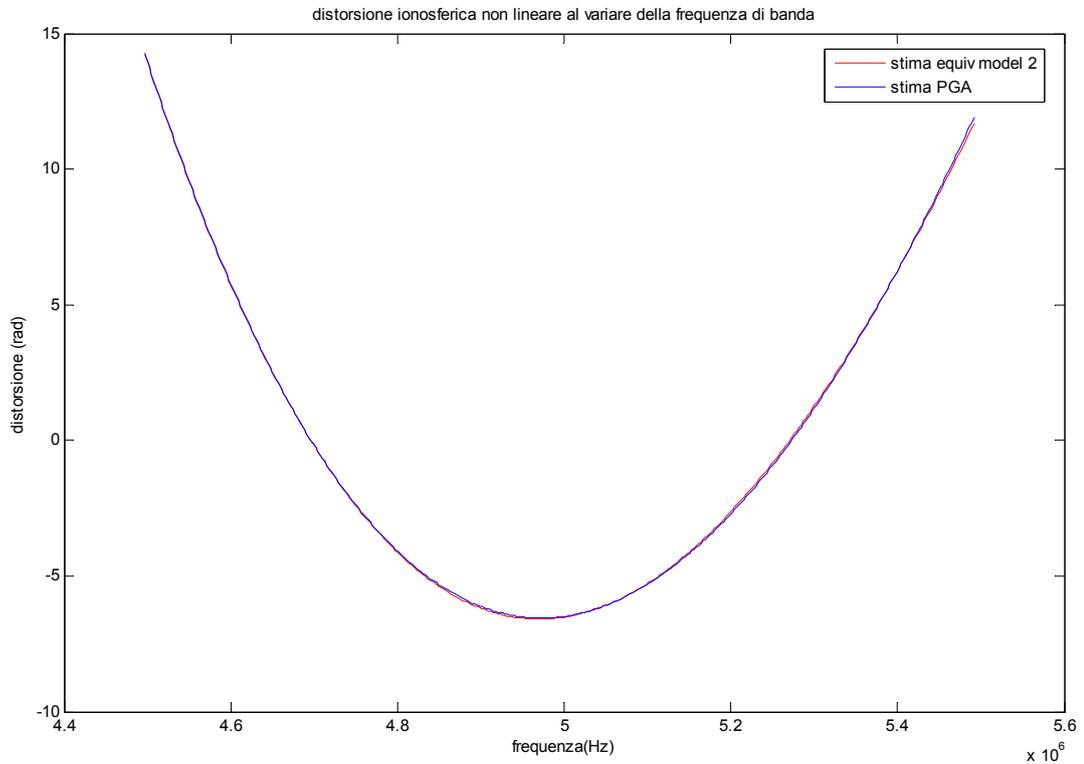


Fig 4.32 confronto tra PGA e la stima dello stesso effettuata con equiv mod 2

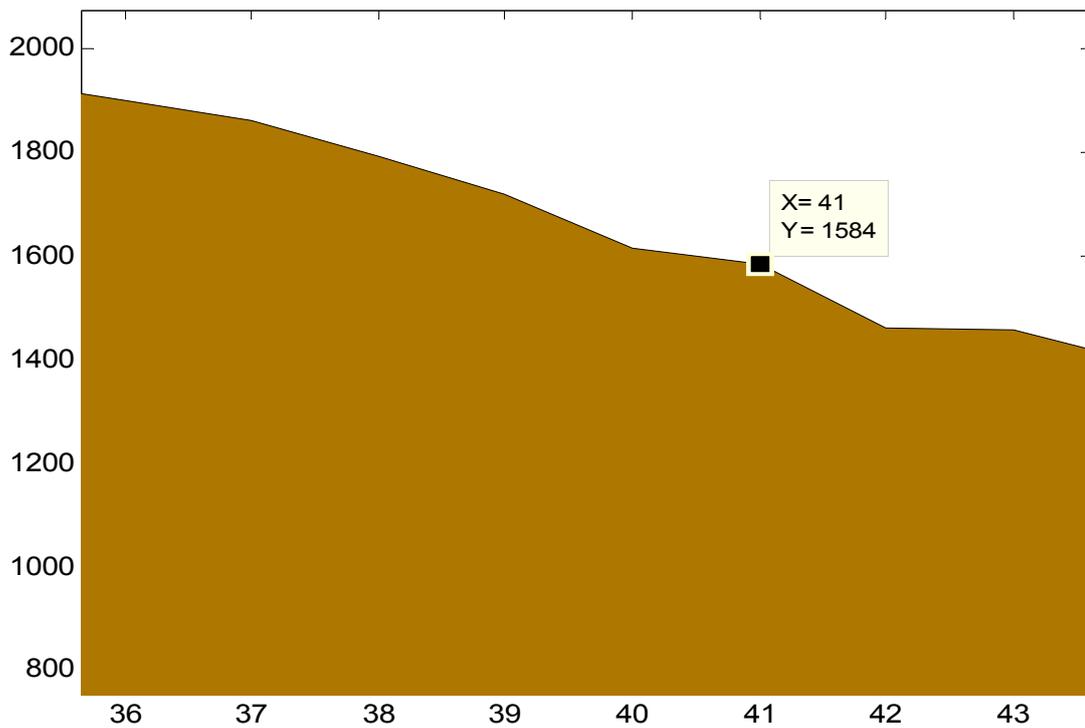


Fig. 4.33 ingrandimento fig.4.22

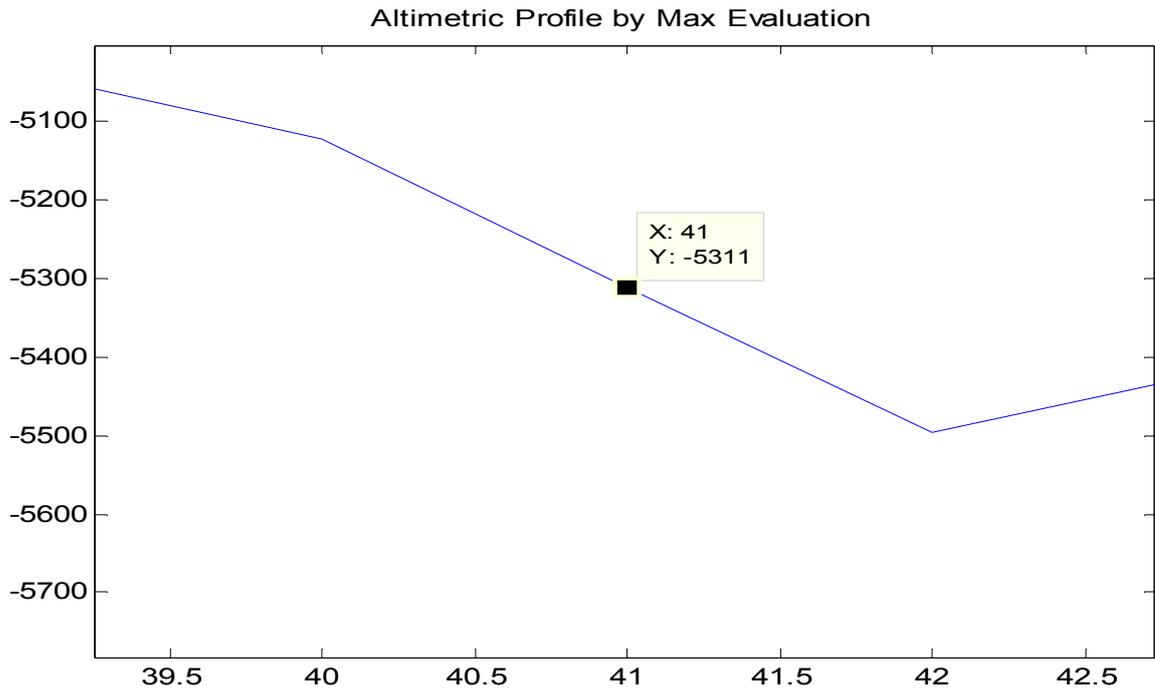


Fig. 4.30 ingrandimento fig.4.24

Risultati

| |
|--|
| Apertura 3dB senza PGA=6,11 μ s |
| Apertura 3dB senza PGA=1,5 μ s |
| Frequenza plasma equivalente=2,844 *10 ⁶ Hz |
| τ_0 equivalente = 2,1 ⁻⁴ [s] |
| Ritardo ionosferico =4,6 *10 ⁻⁵ [s] |
| Scarto quadratico medio =0.08 |
| $Q_{M(s.i)} = -5311 \text{ m}$ |
| $Q_{MOLA} = 1584 \text{ m}$ |
| $\xi_{iono} = T \cdot \frac{c}{2} = 6900m$ |
| $Q_{M(c.i)} = Q_{M(s.i)} + \xi_{iono} = -5311 + 6900 \cong 1589 \text{ m}$ |
| Errore relativo=5m |

Considerazioni

In questo caso si mostra la quasi perfetta coincidenza tra i dati di MOLA e quelli di Marsis

3° simulazione

orbita riferimento n° 2503

modalità di indagine sottosuperficiale SS-3

modalità operativa: OST_6

frames da 0 a 46

banda4(5MHz)

In questa terza simulazione compenseremo il ritardo ionosferico non più per un singolo frame; bensì lungo tutto l'OST. Ritenedo validi tutti i concetti introduttivi presentati nella simulazione precedente ci limiteremo a mostrare i risultati positivi relativi all'applicazione del modello equivalente 2.

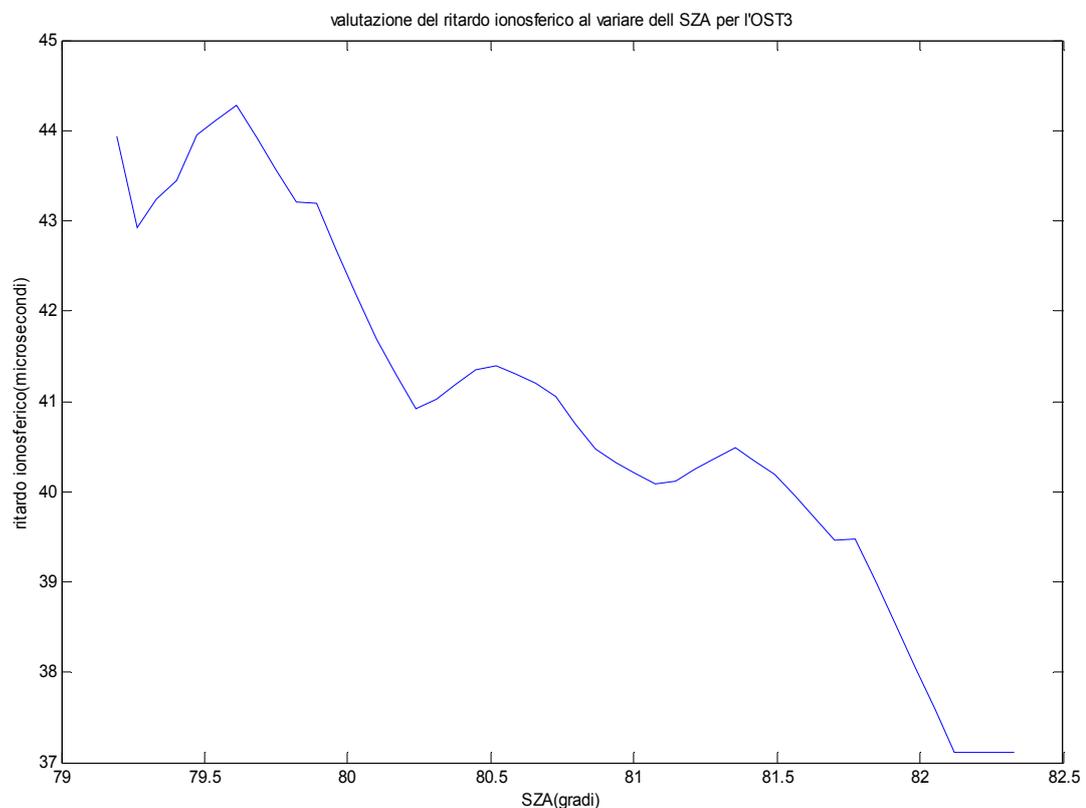


Fig. 4.31 in questa figura è mostrato l'andamento del ritardo ionosferico al variare dello Zenith Sun Angle per tutto l'OST6.

Bisogna tener conto che al primo punto sull'asse dell'ascisse (SZA=79) corrisponde l'ultimo frame valutato nell'OST6(46), mentre all'ultimo angolo corrisponde il primo frame.

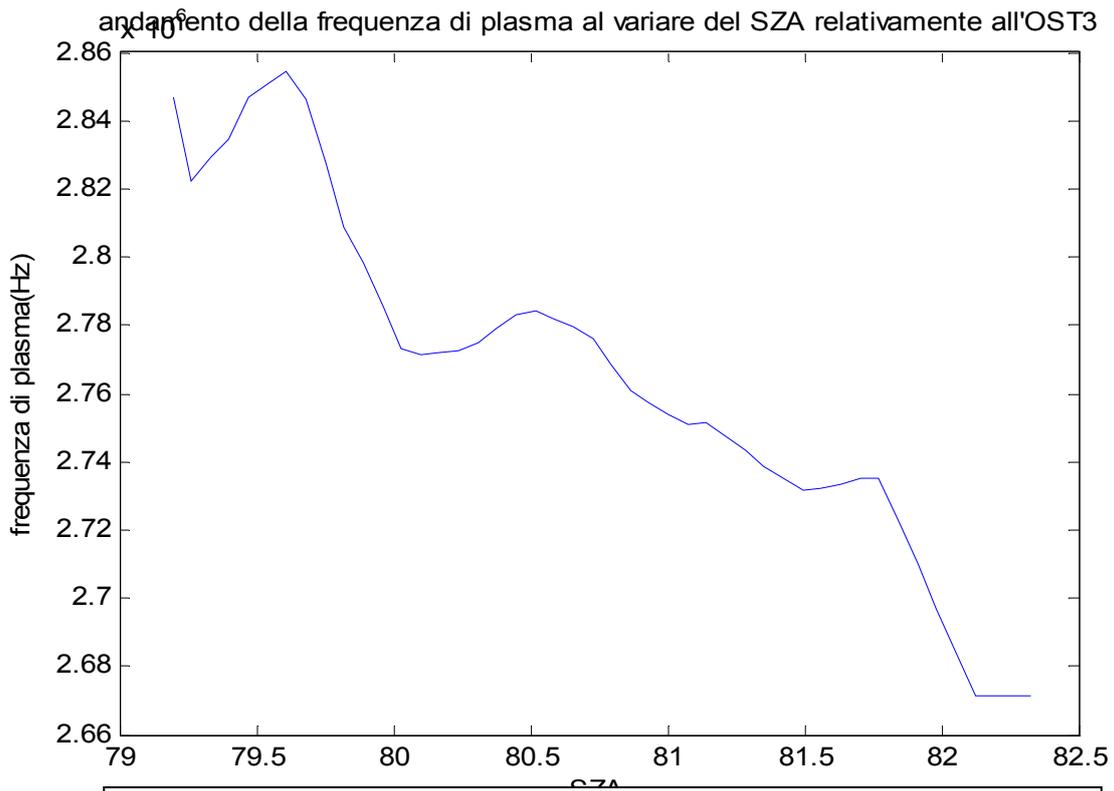


Fig. 4.32 in questa figura è mostrato l'andamento della frequenza di plasma al variare dello Zenith Sun Angle per tutto l'OST6

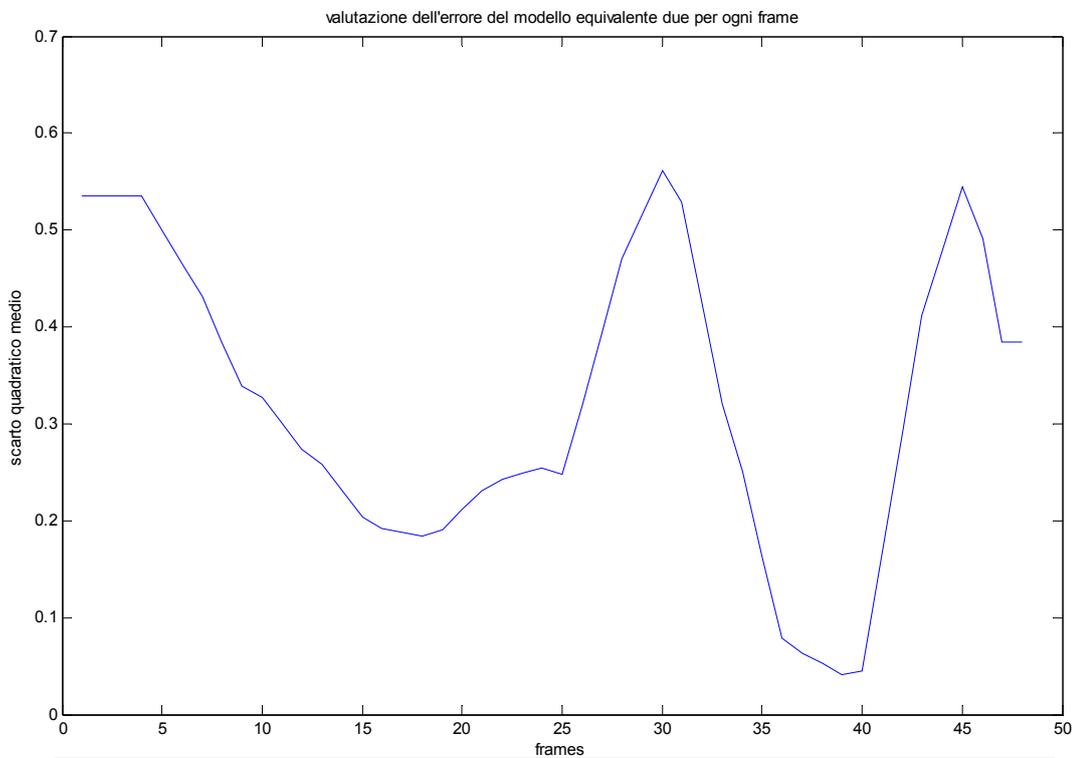


Fig. 4.33 in questa figura è mostrato l'andamento dello scarto quadratico medio valutato dal modello equivalente 2 per tutto l'OST6

Valutiamo il profilo altimetrico ricavato da Marsis nel caso in cui abbiamo compensato l'errore ionosferico attraverso il modello equivalente 2. Inoltre se lo confrontiamo con il corrispettivo ottenuto da MOLA(fig 4.22, che riportiamo sotto) si nota come i due profili siano assolutamente simili.

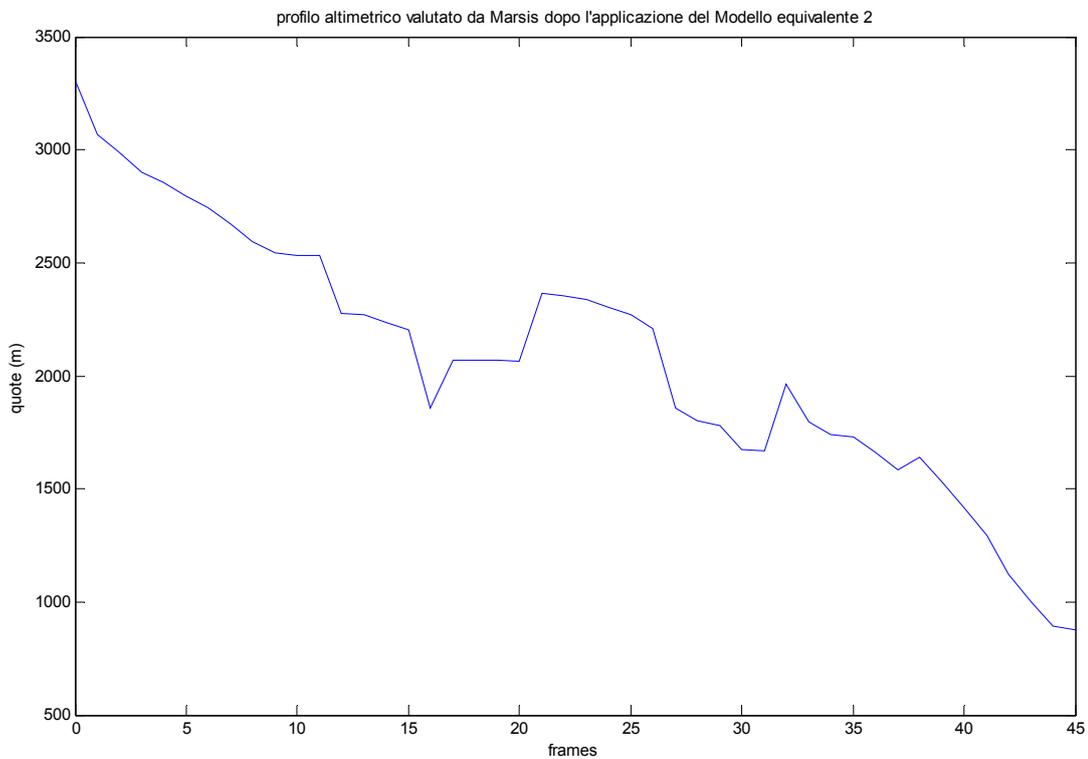
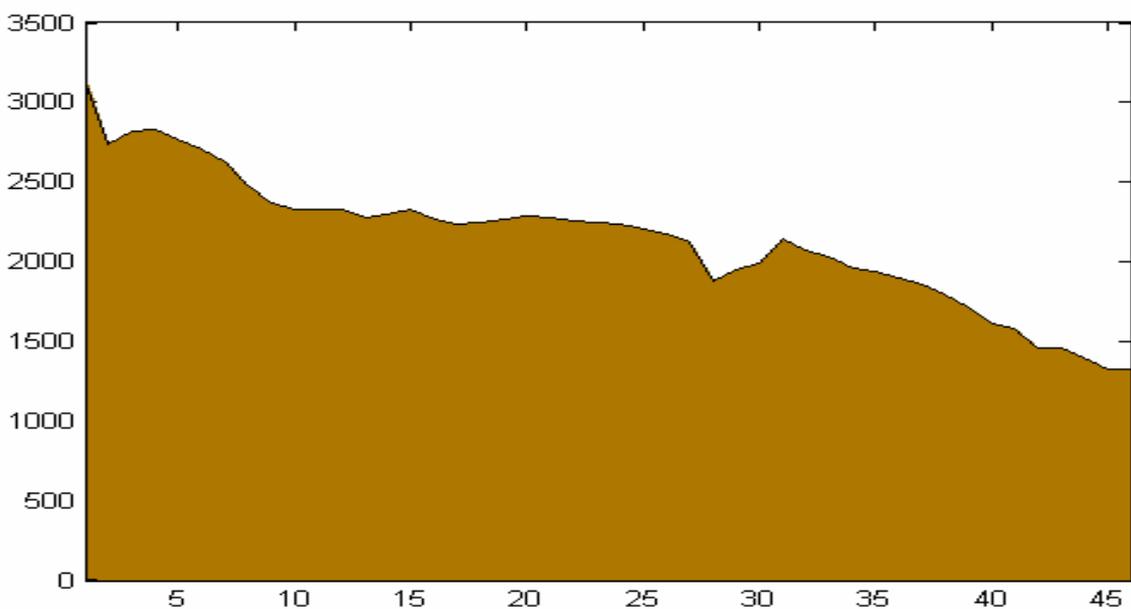
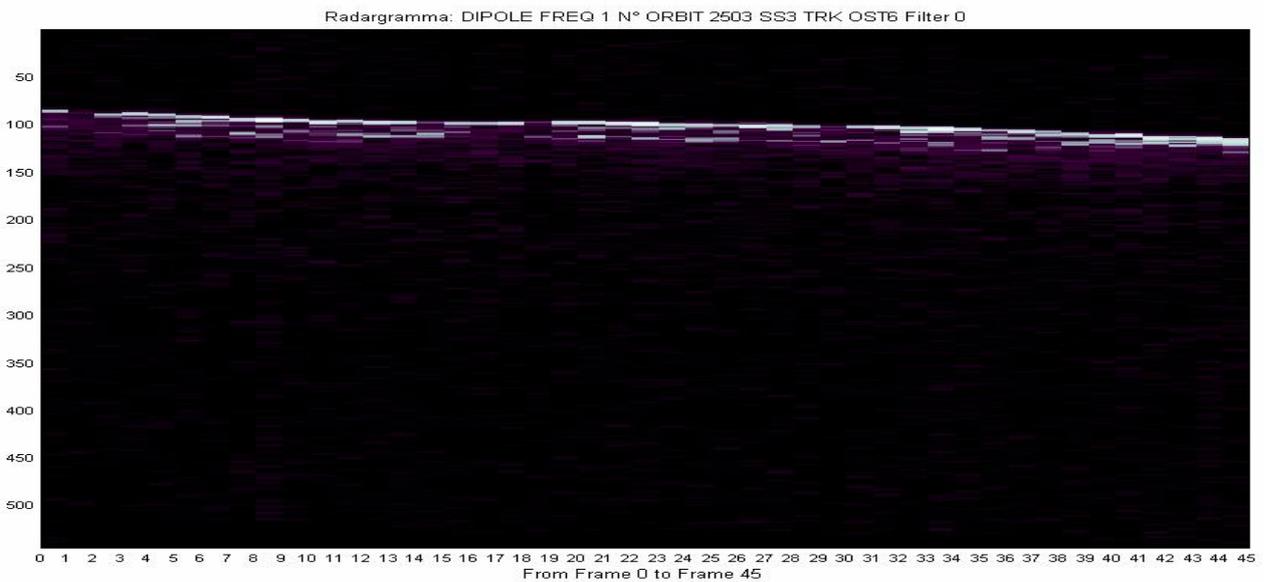


Fig. 4.34 profilo altimetrico valutato da Marsis per l'OST6 nel caso in cui è compensato il ritardo ionosferico



4.22 profilo MOLA OST6

Infine valutiamo anche il radargramma relativo all'OST 3 corretto.



4.35 radargramma corretto OST6

4° simulazione

orbita riferimento n° 2503

modalità di indagine sottosuperficiale SS-3

modalità operativa: OST_6

frames da 0 a 46

banda3(4MHz)

valutiamo innanzitutto i ritardi stimati

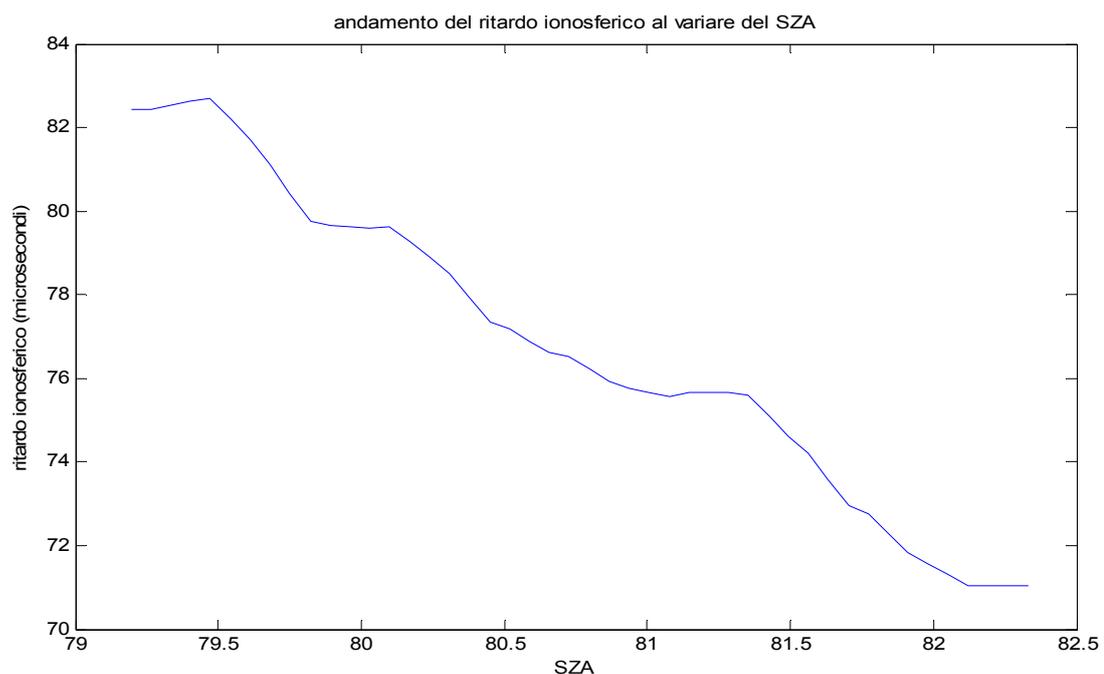


Fig. 4.36 in questa figura è mostrato l'andamento del ritardo ionosferico al variare dello Zenith Sun Angle per tutto l'OST6 banda3.

gli andamenti della frequenza di plasma e degli errori

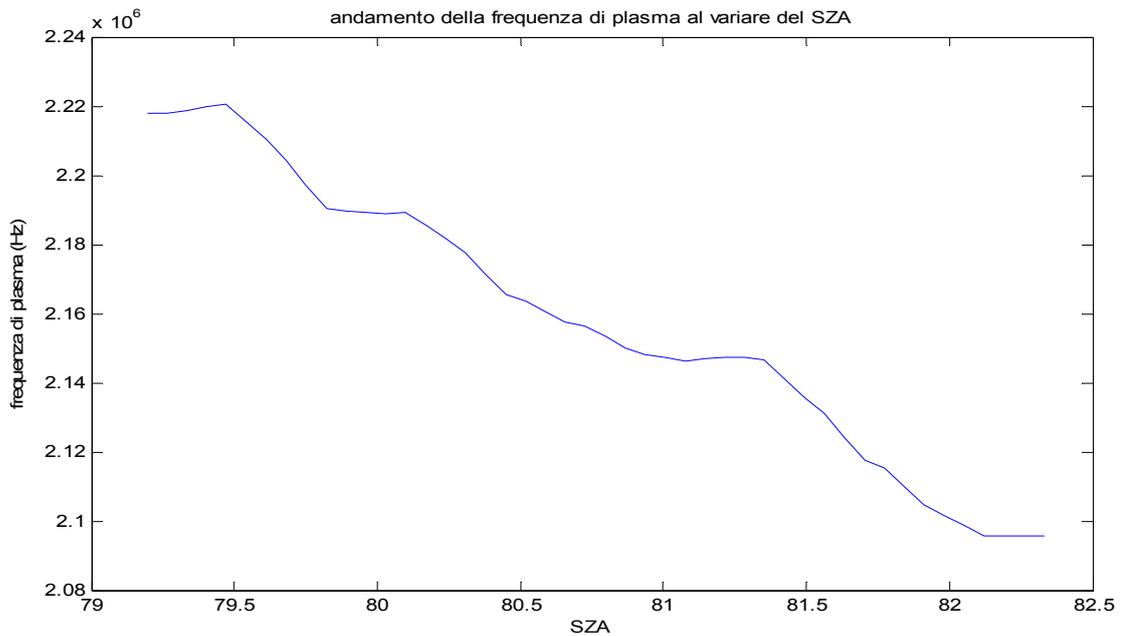


Fig. 4.37 in questa figura è mostrato l'andamento della frequenza di plasma al variare dello Zenith Sun Angle per tutto l'OST6 banda 3

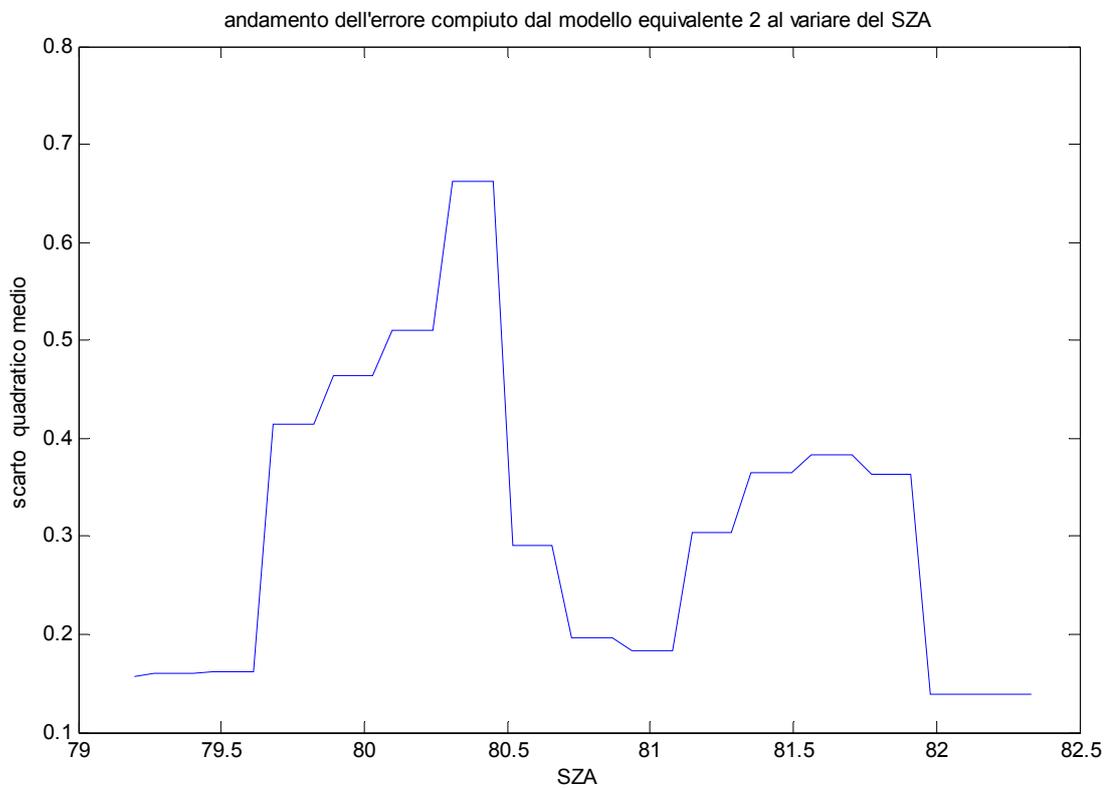


Fig. 4.38 in questa figura è mostrato l'andamento dello scarto quadratico medio valutato dal modello equivalente 2 per tutto l'OST6 banda 3

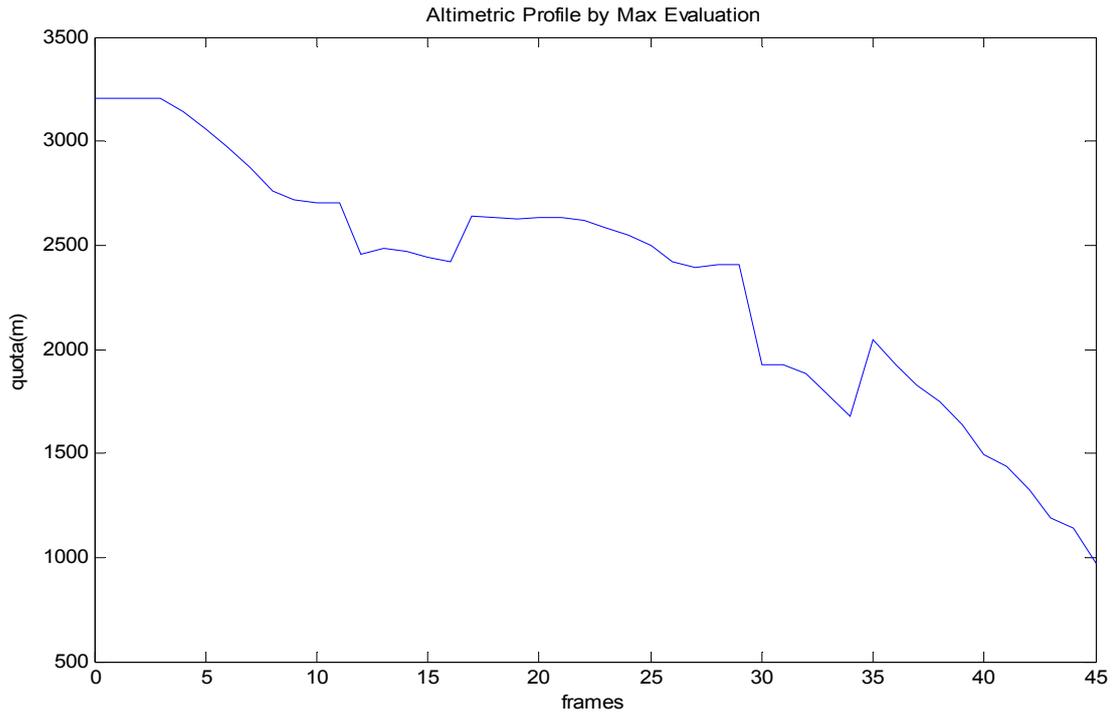
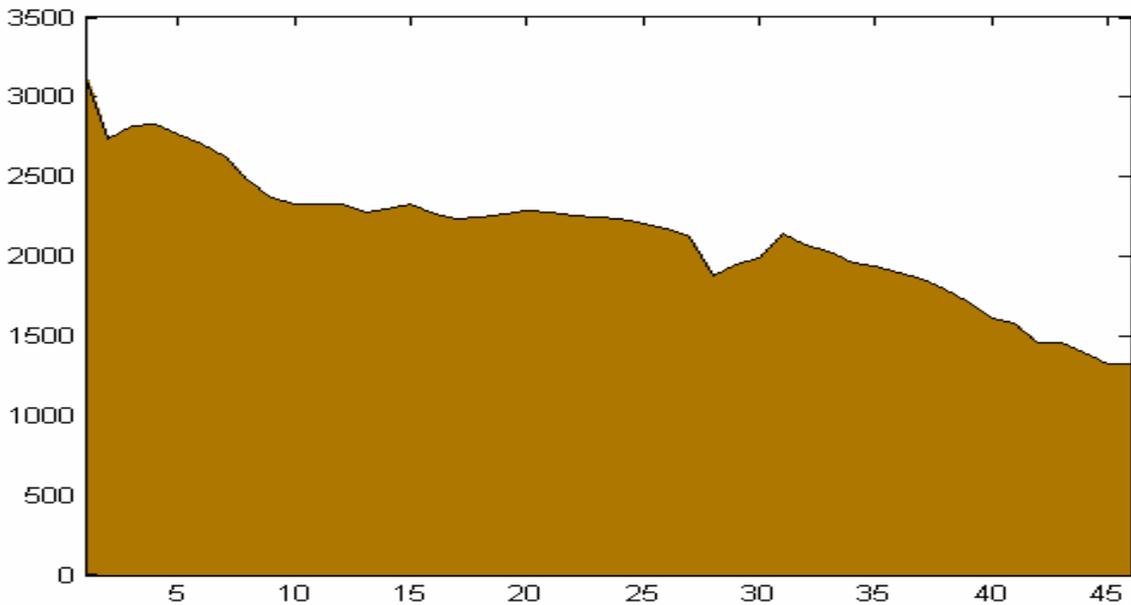
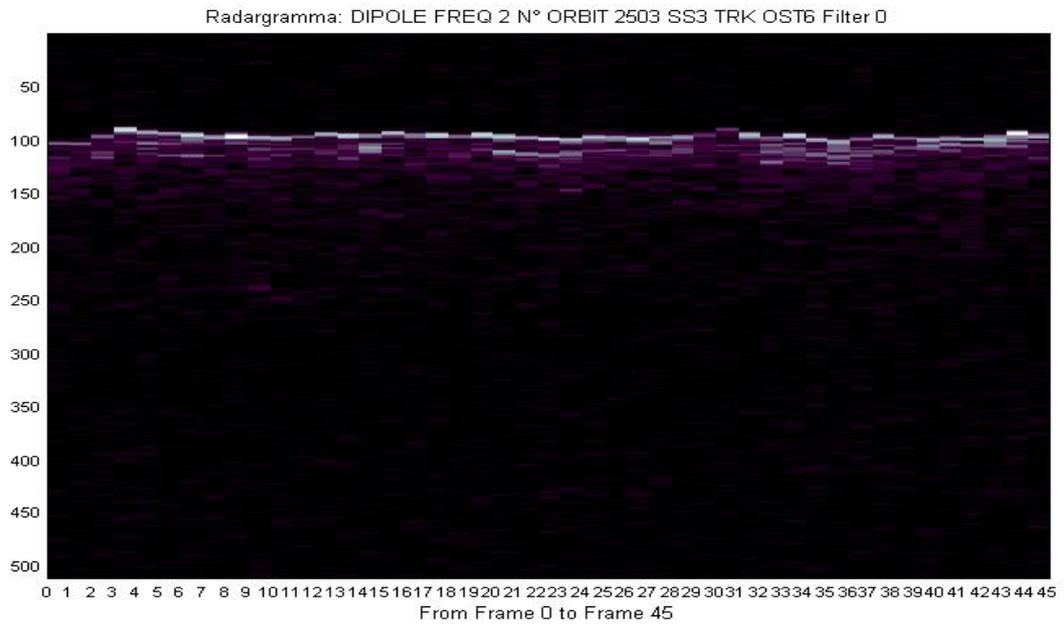


Fig. 4.39 profilo altimetrico valutato da Marsis per l'OST6 banda3 nel caso in cui è compensato il ritardo ionosferico

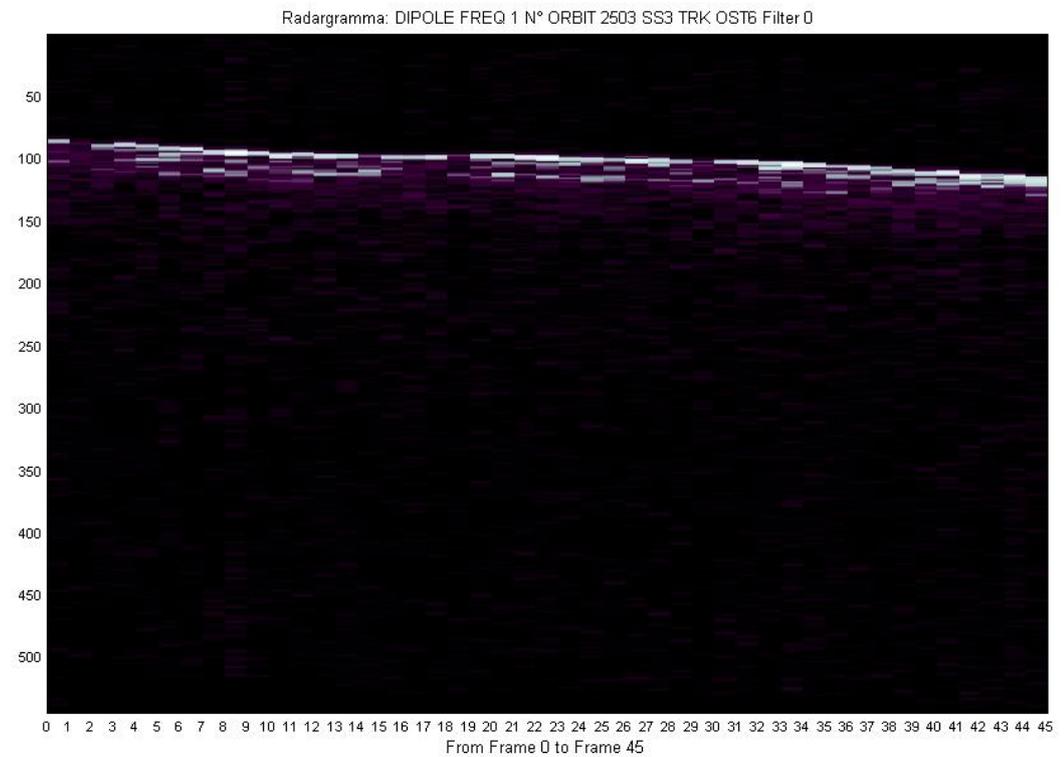


4.22 profilo MOLA OST6

Dove lo scostamento che si registra nei frames finali è legato al fatto che in tali condizioni la frequenza di plasma è confrontabile con quella della banda considerata.



4.40 radargramma OST6 banda3



4.41 radargramma corretto OST6 banda3

Conclusioni

I software sviluppati nel corso del presente lavoro di tesi rappresentano un importante ,seppur piccolo, contributo nell'elaborazione a terra dei dati provenienti da Marsis, che è al momento una delle missioni più importanti nello studio del pianeta rosso.

In tale studio sono stati riassunti ed implementati i modelli attualmente disponibili per descrivere la ionosfera marziana ed attraverso l'implementazione di modelli equivalenti abbiamo reso più semplice la descrizione della stessa ed inoltre la conoscenza approfondita di tale superficie ci ha permesso di creare un modello che permettesse anche di stimare il ritardo che induce la ionosfera sul segnale.

In questo modo abbiamo potuto compensare ulteriormente il segnale proveniente da Marte e di avvicinarci alla risoluzione verticale teorica di Marsis

È altresì stato possibile verificare l'affidabilità del modello utilizzato attraverso simulazioni che hanno sfruttato dati reali e dati simulati in laboratorio.

Infine la dipendenza del modello dall'algoritmo PGA ha messo in luce anche alcune pecche di quest'ultimo che sono state opportunamente corrette.

Concludendo mi preme aggiungere che 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 del pianeta Marte

Per tutti questi motivi il software implementato rappresenta un valido ausilio per tutti coloro che si cimenteranno nella conoscenza del pianeta Marte e della sua ionosfera.

Appendice

Script matlab main_sim

```
clc
close all
clear all
addpath(genpath(cd));

%%definisco le specifiche del segnale (MARSIS)

B=1e6;
T=250e-6;
alfa=B/T;
fc=1.4*B;
t=(-T/2:1/fc:T/2);
NFFT=1024;
fmin=3.3e6;
fmax=4.7e6;
n_plot=5;
f0=(fmax+fmin)./2;

% B=10;
% T=85;
% alfa=B/T;
% fc=80/6;
% t=(-T/2:1/fc:T/2);
% NFFT=2048;

[chirp,risp_imp,amp,sh,n_chirp,filtro,A2]=scenario_gen(B,T,alfa,fc,t,NFFT);

[noise_tot,A_f,f_plasma,SZA_inp]=iono_model(NFFT,fmin,fmax);

A_f_nat = 10.^(A_f/10);
A_f_nat = A_f_nat/max(A_f_nat);

chirp_defoc=ifft(fftshift(fftshift(fft(chirp,NFFT)).*(1./A_f_nat).*exp(j.*noise_tot)),NFFT);
%chirp_defoc=ifft(fftshift(fftshift(fft(chirp,NFFT)).*exp(j.*noise_tot)),NFFT);

dati_defoc=zeros(n_chirp,NFFT);

for ii=1:n_chirp
    for kk=1:length(sh)

dati_defoc(ii,:)=dati_defoc(ii,:)+amp(kk)*circshift(chirp_defoc.',sh(kk)).';
        end

        dati_defoc(ii,:)=dati_defoc(ii,:)+A2*randn(1,NFFT);

    end
end
```

```

risp_imp_defoc =
RangeCompression(fft(dati_defoc,[],2),fft(filtro,NFFT),NFFT,NFFT-
length(filtro));

con aggiunta del disturbo ionosferico');

i_B=[floor(NFFT/2-(NFFT/fc)*B/2):floor(NFFT/2-(NFFT/fc)*B/2)+(NFFT/fc)*B-1];

[risp_imp_defoc,fas_err,var_err]=PGA(risp_imp_defoc,dati_defoc,filtro,fc,i_B,n_c
hirp,NFFT,SZA_inp);

ff=(-B/2+B/length(i_B)+(fmin+fmax)/2:B/length(i_B):B/2+(fmin+fmax)/2);
FF=(-fc/2+fc/NFFT+(fmin+fmax)/2:fc/NFFT:fc/2+(fmin+fmax)/2);
f_f0=ff-f0;

noise_tot_quad=noise_tot(i_B)-
polyval(polyfit(FF(i_B),noise_tot(i_B),1),FF(i_B)));
fase_err_shift=fftshift(fas_err);
fi=-fase_err_shift(i_B);

%%%%%%%%%%modelli equivalenti per calcolo frequenza di plasma%%%%%%%%%%

% [p]=polyfit(ff-f0,noise_tot(i_B),4);

[p]=polyfit(f_f0,fi,4);

if SZA_inp<90
    nmax=155*exp(0.36*log(100/10))*(10^3)*(cosd(SZA_inp).^(0.51));
    fp_max=(8980).*sqrt(nmax);
    fp_min=1e6;
    fp_trial=fp_max/1.4
    tau_trial=-5.33e-4;
else
    fp_max=1.5e6;
    fp_min=0.1e6;
    fp_trial=0.5e6;
    tau_trial=-5.33e-4;
end

[fp_eq,tau0_eq]=equiv_model_1(ff,noise_tot(i_B),fp_max/1.3,f0)

[fp_eq_mod2,tau0_eq_mod2,a1_model_2,err,result]=equiv_model_2(ff,fi,fp_trial,tau
_trial,f0,fp_max,fp_min);

err
fp_eq_mod2
tau0_eq_mod2
a_1_mod1=2*pi*tau0_eq*((f0/(sqrt(f0^2-fp_eq^2)))-1);
delay_mod1=a_1_mod1/(2.*pi).*1e6
delay_mod2=a1_model_2/(2.*pi).*1e6
a=polyfit(ff-f0,noise_tot(i_B),1);
delay=a(1)/(2.*pi)*1e6
errore_mod_1=abs(delay-delay_mod1)
errore_mod_2=abs(delay-delay_mod2)
f=0:fc/NFFT:fc-1/NFFT;
[nr nc]=size(risp_imp_defoc);
PHASE=zeros(1,NFFT);
PHASE(i_B)=fi;
PHASE=fftshift(PHASE);
risp_imp_defoc=RangeCompression(fft(dati_defoc,[],2).*exp(j.*(repmat(-
PHASE,[n_chirp 1]) + repmat(-2.*pi*(delay_mod2/1e6).*(f),[n_chirp 1]))),
fft(filtro,NFFT),NFFT,NFFT-length(filtro));

```

Script matlab iono_model

```
function [delta_phase,delta_eta,fplasma,SZA_inp]=iono_model(NFFT,fmin,fmax)
[filename pathname]=uigetfile('*.dat');
fid=fopen(strcat(pathname,filename),'r');
SZA=zeros(1,300);      %inizializzazione delle variabile
N=zeros(1,300);       %inizializzazione delle variabile
H=zeros(500,500);     %inizializzazione delle variabile
fp=zeros(500,500);    %inizializzazione delle variabile

for i=1:183            %ciclo for
    SZA(i)=fread(fid,1,'float32');
    N(i)=fread(fid,1,'int');
    H(i,1:N(i))=fread(fid,N(i),'float32');
    fp(i,1:N(i))=fread(fid,N(i),'float32');
end
fclose(fid);
SZA_inp=str2double(inputdlg('Insert Solar Zenith Angle(°) you want to match
(70.96-89.22)'));
if SZA_inp<89.10
    i_SZA=find(SZA>=SZA_inp,1,'first');
    fplasma=fp(i_SZA,1:N(i_SZA));
    altitude=H(i_SZA,1:N(i_SZA));
else
    if SZA_inp<90
        F=100;
        nmax=155*exp(0.36*log(F/10))*(10^3)*(cosd(SZA_inp).^(0.51));
        fpmax=(8980).*sqrt(nmax);
    else
        fpmax=0.8e6;
    end
    input_gamma=(inputdlg({'Insert aperture b in gamma model(range aperure: 20-
>50)';'Insert altitude of maximum plasma'},'Gamma Parameters',2,{'30';'150'}));
    b=str2num(input_gamma{1,1});

    hmax=str2num(input_gamma{2,1});
    h0=hmax-b;
    altitude=h0:1:240;
    fplasma=fpmax.*((altitude-h0)/b).*exp(1-((altitude-h0)/b));
end
f0=(fmax+fmin)./2;
f=linspace(fmin,fmax,NFFT);
wp=2.*pi.*fplasma;
w=2*pi*f;
vi=10.^((195-altitude)./17);
Ne=((fplasma./8.98).^2)./10^6;
c=3e8;

SAF=inputdlg('do you want saefenili procedure?insert 0 (if you don''t want) and
1 (if you want)',',',1,{'1'},'on');
SAF=logical(str2double(SAF{1,1}));

for i=1:length(w)

    eps=1-(wp.^2)./(w(i).^2+vi.^2);
    sigma=((wp.^2).*vi)./(w(i).^2+vi.^2);
    n=sqrt((eps./2).*(sqrt(1+(sigma./(w(i).*eps)).^2)+1));
    delta_phase(i)=-2*w(i)./c.*trapz(altitude.*1000,n-1);

    if SAF
```

```

        p=((1-(wp.^2./w(i).^2).*(2.*w(i).^2-
wp.^2)./(w(i).^2+vi.^2)).^0.25).*(vi.*wp.^2)./(w(i).^2+vi.^2-wp.^2);
        delta_eta(i)=10e3.*log10(exp(1))./c.*trapz(altitude,p);
    else
        p=sqrt((eps./2).*(sqrt(1+(sigma./(w(i).*eps)).^2)-1));
        delta_eta(i)=10.*log10(exp(1)).*(4.*pi.*f0./c.*trapz(altitude.*1000,p));
    end
end

```

Script matlab equiv_model1

```

function [fp2,tau02]=equiv_model_1(x,delta,f_start,f_0)
ftype=fittype('2*pi*tau_0*(sqrt(x.^2-fp^2)-x)');
opts = fitoptions(ftype);
opts.Lower = [-inf -inf];
opts.Upper=[inf inf];
opts.Startpoint=[f_start -0.000533];
opts.Algorithm='Trust-Region';
opts.MaxFunEvals=20000;
opts.MaxIter=1000;
opts.Robust='off';
opts.DiffMaxChange=0.1;
opts.DiffMinChange=10e-8;
opts.TolFun=1e-16;
opts.TolX=1e-16;
fresult = fit(x.',delta.',ftype,opts);
result=feval(fresult,x).';
ci = coeffvalues(fresult) ;
fp2=ci(1);
tau02=ci(2);

```

Script matlab equiv_mod2

```

function[fp2,tau02,a1,err,result]=equiv_model_2(x,delta,f_start,tau_trial,f_0,fp
_max,fp_min)
modello_eq=['2*pi*tau_0*(sqrt(x.^2-fp^2)-x)'];
f0=num2str(f_0) ;
ftype=fittype([modello_eq '-a1*(x ) - a0 ']);
opts = fitoptions(ftype);
opts.Lower = [-inf -inf fp_min -0.00060 ];
opts.Upper=[inf inf fp_max -0.00040 ];
opts.Startpoint=[0.1 0.6 f_start tau_trial];
opts.Algorithm='Trust-Region';
opts.MaxFunEvals=10000;
opts.MaxIter=1000;
opts.Robust='off';
opts.TolFun=1e-10;
opts.TolX=1e-10;
[fresult gof]= fit(x.',delta.',ftype,opts);
result=feval(fresult,x).';
err=gof.rmse;
ci =coeffvalues(fresult);
fp2=ci(3);
tau02=ci(4);
a1=ci(2);

```

Appendice

Biccari, D., Ciabattini, 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

Oleg N. Rhizga "Distorsions of the low frequency signal by martian ionosphere at vertical propagation"

A. Safaeinili, W. Kofman, J.F. Nouvel, A. Herique, R.L. Jordan "impact of the Mars ionosphere on orbital radar sounder operation and data processing

G. Picardi, A. Masdea, M. Cartacci, M. Ioroi, R. Seu, J.J. Plaut, W.T.K. Johnson, R.L. Jordan, A. Safaeinili, D. Colonnese, O. Bombaci, E. Zampoloni "Mars ionosphere sounding by Marsis subsurface signal analysis"