

IONOSONDA A COMPRESSIONE DI IMPULSI

NOTA TECNICA PRELIMINARE

E. Zuccheretti, C. Bianchi, J. B. Arokyasami, U. Sciacca, G. Tutone

Riassunto

Nel laboratorio di geofisica ambientale dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia è stato progettato e realizzato il prototipo di una ionosonda a bassa potenza a compressione di impulsi secondo i dettami della moderna tecnica radaristica.

Si è puntato sulla realizzazione di una macchina a bassa potenza e dal costo contenuto con possibilità di costituire una rete di ionosonde per scopi di sorveglianza ionosferica.

Il sistema con una potenza di 200W consente di investigare la ionosfera da 90 a 700km con una risoluzione verticale di 5km in un range di frequenza da 1 a 20MHz.

Introduzione

La ionosfera è la parte dell'atmosfera, estesa approssimativamente tra i 50 e i 2000 km di quota in cui esiste una rilevante concentrazione di elettroni e ioni liberi prodotti principalmente dalla radiazione UV e X proveniente dal Sole. Precisamente viene definita ionosfera la regione dell'atmosfera dove la densità elettronica è sufficientemente alta da influenzare la propagazione di onde radio.

Si consideri il plasma ionosferico come un insieme di elettroni liberi la cui distribuzione della densità elettronica (N) al variare dell'altezza è osservabile nella figura seguente

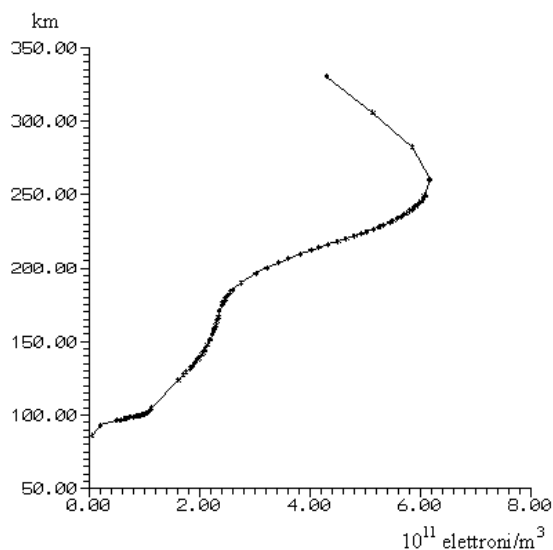


Fig. 1 Andamento tipo della densità elettronica in funzione dell'altezza

I massimi relativi di densità corrispondono alle frequenze critiche nello ionogramma e dividono la ionosfera nei noti strati D, E, F1, F2

La ionosfera riveste particolare importanza nell'ambito delle radiocomunicazioni HF quale via per la propagazione delle onde radio.

Infatti gli strati ionizzati della ionosfera consentono riflessioni delle onde radio usate nei collegamenti permettendo il raggiungimento di distanze anche molto lunghe.

La necessità di previsioni per l'esercizio dei radiocollegamenti a grande distanza con radioonde che utilizzano la propagazione ad onda corta deriva dal fatto che i parametri operativi di tali

radiocollegamenti, principalmente la frequenza e la potenza usata, sono fortemente legati alla densità elettronica delle varie quote ionosferiche che a sua volta è soggetta ad ampie variazioni nel tempo e nello spazio.

Le previsioni sulle possibilità di tali collegamenti si basano su misure dei parametri della ionosfera, quali le frequenze critiche, e le altezze degli strati ionizzati.

Gli strati ionizzati della ionosfera sono parzialmente riflettenti ed un grafico dell'altezza della riflessione in funzione della frequenza, lo ionogramma, risulta particolarmente utile per lo studio dei parametri ionosferici.

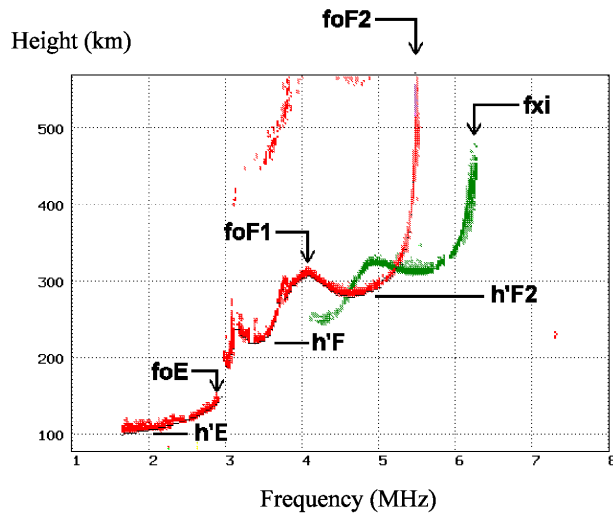


Fig. 2 Esempio di ionogramma

Lo ionogramma deve essere interpretato, devono essere cioè evidenziate frequenze critiche ed altezze dalle quali risalire al profilo di densità elettronica come mostrato nella precedente figura.

Una maniera semplice di studiare la ionosfera è quella di usare un apparato ricetrasmittente in grado di trasmettere energia a frequenze variabili e ricevere gli echi ionosferici ricavando l'altezza a cui tale energia viene riflessa; praticamente si tratterebbe di usare un radar che nel particolare utilizzo di investigare la ionosfera prende il nome di ionosonda.

Il principio su cui si basa una ionosonda è il seguente: onde radio di frequenza crescente da 1MHz a 20MHz e di adeguata potenza sono trasmesse verso l'alto e si propagano fino a quando avviene la riflessione sugli strati ionosferici. Tale riflessione avviene quando la frequenza dell'onda, f_0 è uguale alla frequenza di plasma f_p il cui valore è:

$$f_p = 9\sqrt{N}$$

dove N è la densità elettronica; al variare della frequenza di sondaggio, quindi, si varia l'altezza dello strato su cui avviene la riflessione.

L'intervallo di tempo che intercorre tra l'istante in cui l'impulso radio lascia l'antenna trasmittente e quello in cui è ricevuto l'impulso riflesso costituisce una misura del cammino percorso e determina l'altezza virtuale dello strato. Si può quindi ricavare la distribuzione della densità di elettroni in funzione della quota.

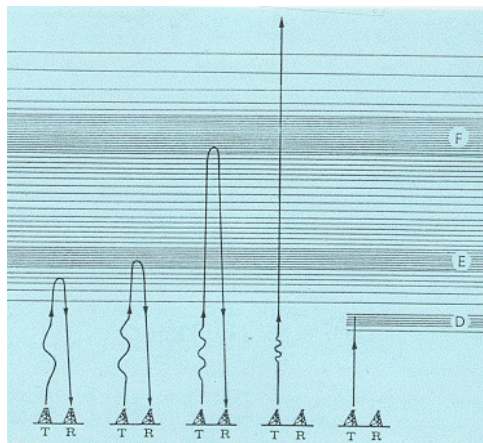


Fig. 3 Variando frequenza varia l'altezza della riflessione

Le ionosonde tradizionali si basano sostanzialmente sul principio del radar ad impulsi con ricevitore ad involuppo. In pratica un impulso di RF di frequenza variabile e della durata di circa $150\mu\text{s}$ viene emesso nella ionosfera da una antenna di dimensioni decametriche. L'energia riflessa dagli strati ionosferici viene captata da un'antenna ricevente; l'altezza dello strato viene misurata dal ritardo con cui viene ricevuto l'impulso mentre si effettua una scansione in frequenza con il ricevitore che si sintonizza continuamente con la frequenza trasmessa.

La lunghezza dell'impulso di RF è strettamente legato alla risoluzione ottenibile in altezza; in particolare grande risoluzione è possibile con impulsi brevi a scapito della energia inviata in ionosfera. Si capisce allora che per avere la giusta risoluzione ed un 'eco visibile, tenendo conto della grossa attenuazione ionosferica, occorrono potenze di picco dell'ordine del kW concentrate nel breve tempo dell'impulso stesso.

In tempi più recenti la ionosfera sta acquistando maggiore importanza come mezzo interposto tra la superficie terrestre ed i satelliti poiché la densità elettronica di tale mezzo influenza le trasmissioni satellitari.

In particolare i disturbi ionosferici anche molto rapidi e localizzati possono modificare il contenuto elettronico ionosferico influenzando la precisione e l'affidabilità di informazioni quali, ad esempio, la posizione nel sistema satellitare GPS.

In questo caso sarebbe importante disporre di una ionosonda che, quasi in tempo reale, potesse individuare una situazione di disturbo ionosferico o comunque di contenuto elettronico tale da rendere non del tutto affidabile una misura GPS. In questo senso un sistema in grado di interpretare lo ionogramma automaticamente e di segnalare variazioni anomale del contenuto colonnare di elettroni potrebbe essere costituito da una rete di ionosonde collegate tra di loro da internet con la possibilità di gestione remota.

Come i radar per altri impieghi anche le ionosonde hanno subito delle evoluzioni grazie alla tecnologia che ha messo a disposizione dei progettisti degli strumenti in passato non utilizzabili.

Così dopo le ionosonde di vecchio stampo si stanno ormai diffondendo sistemi basati sulle più moderne tecniche radar che ottengono delle ottime prestazioni con potenze molto più basse con la possibilità di essere gestite da mezzi di calcolo estremamente flessibili.

La tecnica del radar a compressione di impulsi si basa sul principio secondo cui modificando opportunamente alcune caratteristiche dell'impulso di radiofrequenza trasmesso si possono impiegare impulsi più lunghi di un radar tradizionale che una volta ricevuti consentano una risoluzione tipica di un impulso più stretto; da qui il termine 'compressione di impulsi'. Il vantaggio

di poter disporre di un impulso di maggior lunghezza risiede nella capacità di emettere la stessa energia impiegando però minor potenza.

Lo svantaggio è quello di avere un sistema di sintesi e soprattutto un sistema di ricezione e di analisi dell'eco più complesso per supplire ad un rapporto segnale rumore più basso.

La ionosonda INGV nasce proprio per rispondere all'esigenza di un sistema moderno, semplice e poco costoso e con tutte quelle caratteristiche che lo rendono adatto per una rete di strumenti di monitoraggio della ionosfera.

Si sono applicate le moderne tecniche di analisi del segnale radar come la compressione di impulsi, l'integrazione coerente di fase con possibilità di espandere le funzioni del sistema fino a giungere all'analisi Doppler.

Il sistema, come si nota nella seguente figura, è gestito da un personal computer che interviene sia in fase di programmazione sia in fase di ricezione. Nella prima fase imposta i parametri di sondaggio, nella seconda riceve dal DSP il risultato dell'analisi dell'eco. Altre funzioni come la registrazione dello ionogramma, l'interpretazione dello stesso, la connessione con la rete sono pure affidate al personal computer.

PULSE COMPRESSION IONOSONDE

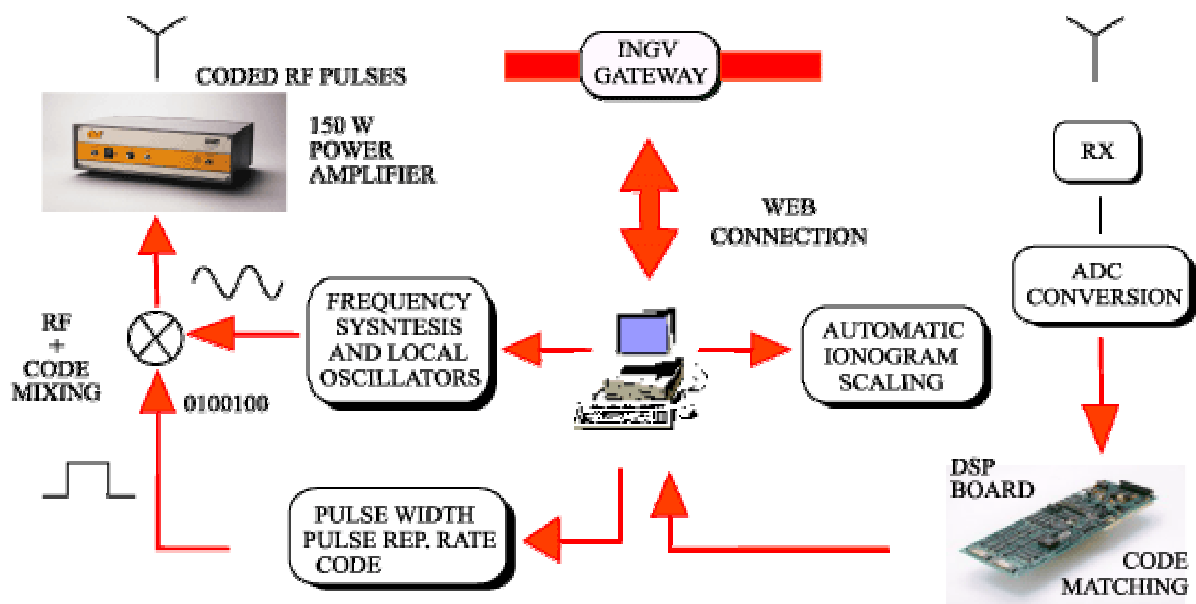


Fig. 4 La ionosonda INGV

Tecnica della compressione di impulsi

Dato un amplificatore di potenza P , l'energia emessa in ionosfera tramite un impulso di radiofrequenza t è data da $E_t = P \cdot t$. Maggiore è t maggiore è l'energia emessa e quindi anche l'energia retrodiffusa dal bersaglio, a scapito della risoluzione del radar stesso.

La compressione di impulsi è una tecnica che consente di ottenere la risoluzione di un breve impulso τ pur utilizzando un lungo impulso T con $T \gg \tau$.

Ciò si ottiene applicando una modulazione di fase della radio frequenza all'interno del pacchetto di energia emesso. In particolare il segnale di radiofrequenza trasmessa subisce dei salti di fase di

180° secondo una sequenza ben precisa che rappresenta il codice digitale sovrapposto al segnale analogico.

Si dimostra che la risoluzione di un impulso così codificato è quella corrispondente alla lunghezza temporale di un bit del codice. Nel caso della ionosonda INGV si è scelto di utilizzare un codice a 16 bit con una lunghezza di 30 μ s per ciascun bit.

In conclusione avremo un impulso di 480 μ s con una risoluzione equivalente ad un impulso di 30 μ s, corrispondente a 4.5km.

La demodulazione consiste nel ricercare il codice trasmesso all'interno dell'eco ricevuto dalla ionosfera. Per fare ciò si campiona opportunamente il segnale proveniente dal ricevitore per ricostruire il codice.

Per misurare la posizione temporale che il codice occupa nell'eco riflesso dalla ionosfera, si adoperava la tecnica della correlazione; si tratta in sostanza di analizzare la serie temporale ricevuta e digitalizzata alla ricerca del codice stesso.

Possiamo vedere questa tecnica alla stregua di un filtro in grado di evidenziare la presenza del codice nel segnale ricevuto generando un segnale di uscita con un massimo nel momento in cui il codice è presente al suo ingresso. La posizione del massimo corrisponde all'altezza della riflessione stessa.

Per aumentare ulteriormente il rapporto segnale rumore, per ogni frequenza vengono utilizzati due codici opportuni, in successione in modo da diminuire le bande laterali.

Descrizione del sistema

Il sistema ionosonda INGV si compone di una unità principale, di un PC per il controllo della ionosonda e la gestione dello ionogramma, di un amplificatore lineare e di una coppia di antenne.

L'unità principale è costituita da un rack 19", in cui sono alloggiati 6 schede inserite su un bus multifunzione comune che consente di mettere in condivisione segnali ed istruzioni tra i moduli che compongono il sistema.

Le schede, visibili in figura, sono, da sinistra a destra: ADC board, SWITCHING FILTERS board, RECEIVER board, FREQUENCY and SYNTHESIS board, TIMING CODE board e TEST board. Completa l'unità principale un modulo di alimentazione pluritensione.

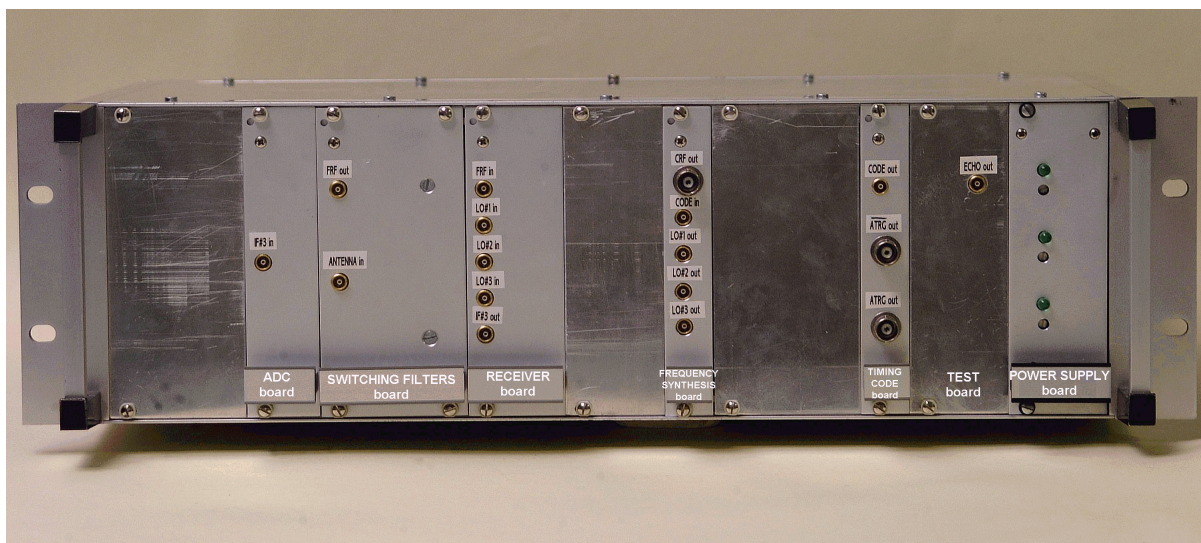


Figura 5: Unità principale (fronte)

Il personal computer ospita al suo interno una scheda di controllo per la programmazione delle funzioni della ionosonda, (CONTROL BOARD) ed una scheda DSP per l'analisi dell'eco ricevuta, (DSP BOARD).

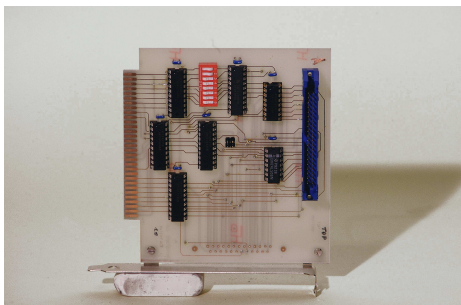


Figura 6: Control board



Figura 7: DSP board

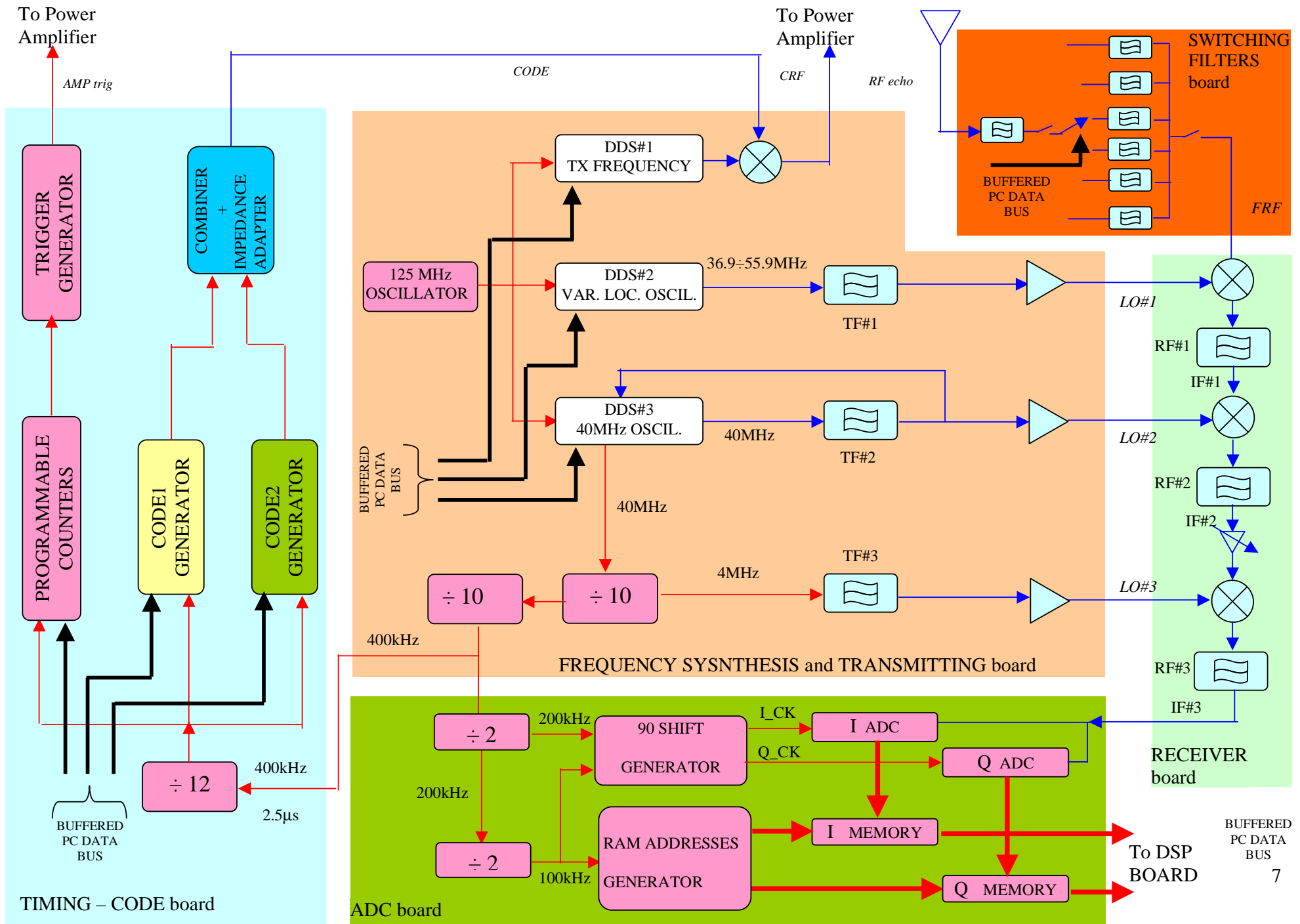
Il linguaggio scelto per i programmi di gestione della ionosonda è il linguaggio C viste le sue possibilità di interazione a basso livello con il PC. In questo primo esemplare il sistema operativo impiegato è il DOS, ma prossimi sviluppi prevedono l'impiego di Windows e delle funzioni di gestione della rete.

La scheda DSP è programmata in linguaggio assembler attraverso un compilatore fornito con la scheda stessa.

L'amplificatore lineare consente di inviare nella ionosfera la quantità di energia necessaria per avere un'eco rilevabile da cui ricavare l'altezza dello strato riflettente.

Il sistema di antenne è costituito da due radiatori triangolari ampiamente collaudati per sondaggi ionosferici.

Il seguente schema a blocchi mostra proprio le singole funzioni all'interno delle schede stesse alla cui descrizione ci apprestiamo.



Receiver board

Il ricevitore vero e proprio può essere definito come un ricevitore supereterodina a tripla conversione. Il segnale ricevuto con frequenza uguale a quella trasmessa viene miscelato con un segnale sinusoidale proveniente da un oscillatore locale variabile in accordo con la frequenza trasmessa producendo la prima frequenza intermedia $IF\#1=35.9\text{MHz}$.

La scelta di una frequenza intermedia maggiore delle frequenza ricevuta è stata dettata dalla necessità di eliminare frequenze immagine.

Dopo essere stata filtrato per ridurre la banda, tale segnale viene miscelato con un secondo oscillatore locale producendo la seconda frequenza intermedia o $IF\#2=4.1\text{MHz}$. A questo punto il segnale di radio frequenza può essere amplificato od attenuato mediante un amplificatore a guadagno variabile pilotato dal PC.

La terza ed ultima miscelazione produce $IF\#3=100\text{kHz}$, che viene digitalizzata. Vale la pena ricordare che il principio delle conversioni successive ha come effetto quello di ottenere un segnale a bassa frequenza con le stesse informazioni della radio frequenza ricevuta. In particolare il codice contenuto nel segnale riflesso dalla ionosfera sarà presente nella ultima frequenza intermedia.

Switching Filters Board

Questa scheda fornisce alla ionosonda la possibilità di diminuire il rumore totale che entra nel ricevitore, limitandone la banda in accordo con la frequenza trasmessa. Tale parte del sistema consente anche di attivare il ricevitore solo per il tempo necessario, quando ormai la trasmissione si è conclusa, evitando così la ricezione di energia durante la trasmissione.

La scheda è costituita da un bus che ospita un filtro larga banda $1\div 22\text{MHz}$ e 6 filtri passa banda selezionabili in accordo con la frequenza di trasmissione.

La gamma di frequenze totale coperta da tali filtri è $1\div 20\text{MHz}$ distribuita come in figura seguente.

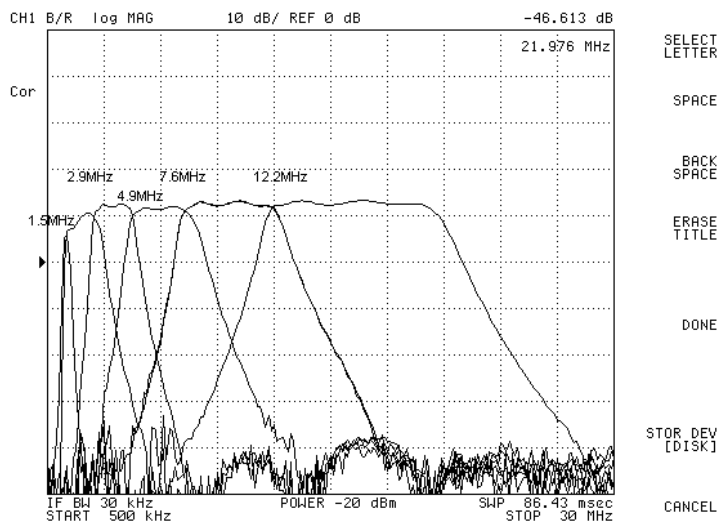


Fig.8 Filtri selezionabili nel ricevitore.

Timing and code Board

La scheda produce i segnali di trigger per l'amplificatore di potenza ed il codice da miscelare con la radiofrequenza da trasmettere.

Grazie all'uso di periferiche programmabili collegate con il bus dati del PC il sistema è molto flessibile nella possibilità di scegliere i parametri del sondaggio. In particolare è possibile decidere

la larghezza dell'impulso trasmesso che è funzione del numero di bit di codice, la frequenza di ripetizione degli impulsi, (PRR), ed il tempo che intercorre fra i due codici. È possibile inoltre scegliere diverse coppie di codici anche con lunghezze diversa da 16.

Frequency synthesis Board

La scheda è responsabile della generazione della frequenza trasmessa a cui sovrapporre il codice (1÷20MHz), degli oscillatori locali (LO#1 = 35.9÷55.9MHz, LO#2 = 40.0MHz, LO#3 = 4.0MHz).

Per garantire flessibilità al sistema la generazione degli oscillatori locali e della frequenza è stata affidata a circuiti programmabili del genere Direct Digital Synthesis, o brevemente DDS.

Con essi è possibile generare frequenze fino a 60MHz con la risoluzione di frazioni di hertz.

In questa scheda avviene anche la codifica della radio frequenza; variare la fase di 180° significa praticamente cambiare segno all'onda che si ottiene con un mixer usato come moltiplicatore.

Un oscillatore comune a 125 MHz garantisce la coerenza di fase tra i segnali generati dai 3 DDS.

ADC Board

Qui avviene il campionamento del segnale IF#3 a 100kHz con una cadenza di campionamento in fase con il segnale stesso. Questa tecnica consente di estrarre il codice eliminando completamente la radiofrequenza.

Tuttavia campionando in maniera sincrona alla stessa frequenza del segnale analogico potrebbe portare ad una cattiva ricostruzione del codice. Campionare in fase e quadratura permette di ricostruire il codice in ogni condizione; per digitalizzare la componente in fase (I) ed in quadratura (Q) del segnale in questione, sono presenti due canali composti ciascuno da un convertitore A/D ed una RAM temporizzati in maniera opportuna.

Il segnale a 100kHz è memorizzato nella memoria RAM durante il listening time di circa 5ms dopo la trasmissione della energia in ionosfera, al termine del quale la memoria è riletta da un DSP in grado di elaborare quanto acquisito.

Control Card

Insieme alla scheda DSP è alloggiata nel PC e provvede alla programmazione delle funzioni da utilizzare durante il sondaggio. Attraverso essa è possibile programmare completamente le varie funzioni del sistema.

In sostanza questa scheda decodifica gli indirizzi composti nel programma corrispondenti ai vari registri e dispositivi della ionosonda stessa fornendo a ciascuno i dati di cui ha bisogno.

DSP Card

Essa si interfaccia direttamente con l'ADC da cui prende i dati campionati al termine del listening time. È basata su un DSP Texas operante a 40 MHz in grado di operare la correlazione dei dati ricevuti con il codice trasmesso. È l'unica scheda non realizzata all'INGV

Sequenza delle operazioni

Per ogni frequenza emessa nella ionosfera la fine dell'impulso di trasmissione scandisce l'operazione di campionamento del segnale analogico proveniente dal ricevitore. Durante il listening time l'eco viene digitalizzato in 512 coppie di valori rappresentanti I e Q che vengono acquisiti dal DSP per l'analisi.

Al termine dell'elaborazione il DSP lancia un segnale di interrupt al PC che prende i dati dal DSP e li grafica oltre che memorizzarli.

Al termine di questa fase la ionosonda viene programmata per utilizzare una nuova frequenza ed il processo ha inizio di nuovo

Analisi dell'eco ricevuta

Nella scheda DSP l'eco viene analizzato alla ricerca del codice e dell'altezza da cui proviene il pacchetto di energia a cui risulta associato.

Dal momento che i dati di partenza costituiscono una serie temporale sarebbe naturale applicare l'algoritmo della correlazione nel dominio del tempo, tanto più che il risultato finale è una funzione del tempo contenente l'informazione della posizione degli strati riflettenti.

Tuttavia la ricostruzione del codice nel dominio del tempo a partire dai dati campionati risulta troppo critica in presenza di rumore ionosferico; si è scelto quindi di applicare l'algoritmo della correlazione nel dominio della frequenza e di tornare nel dominio del tempo solo a fine processo.

Di seguito è riportato un diagramma di flusso indicante la sequenza delle operazioni:

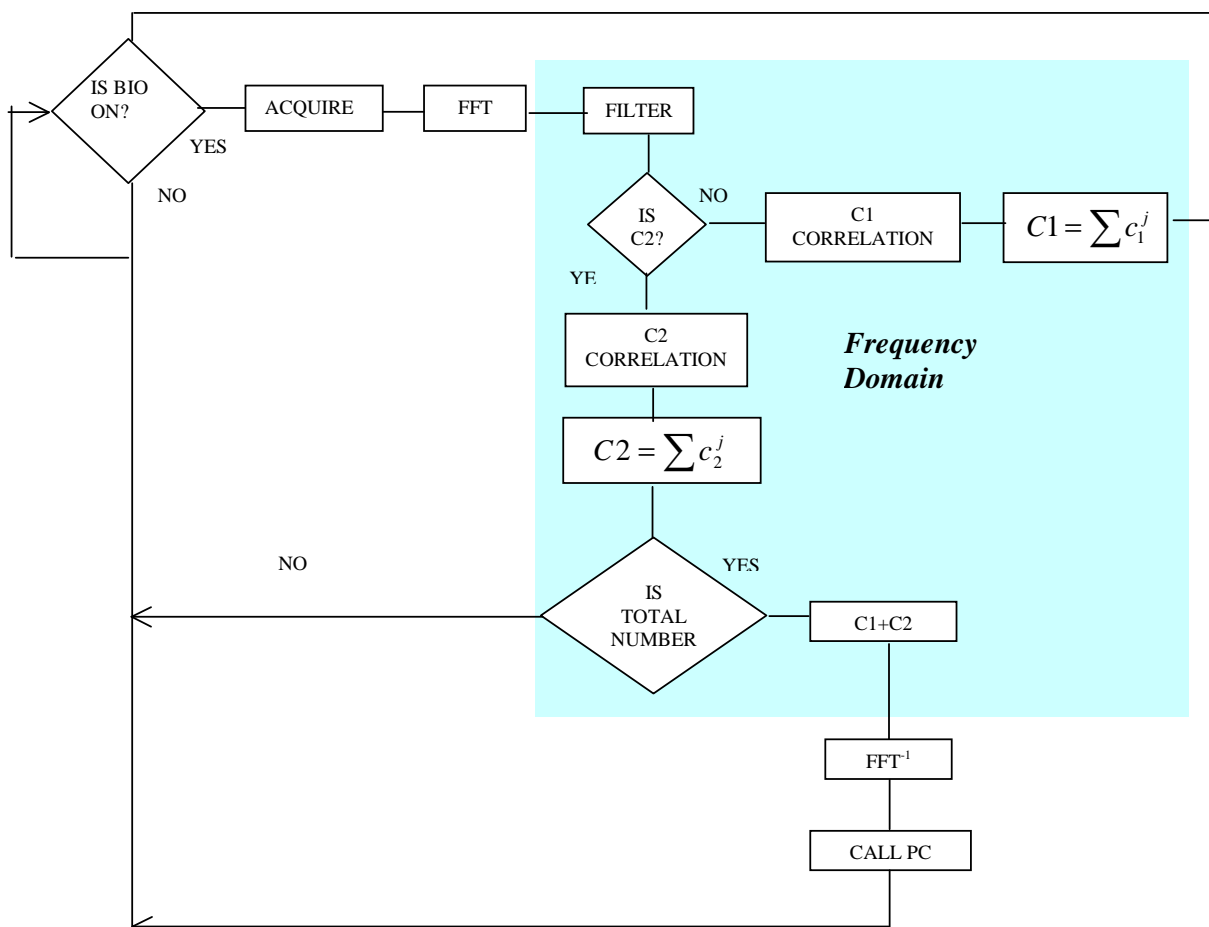


Fig.9 Diagramma di flusso delle operazioni all'interno della scheda DSP

In particolare le sequenze temporali I e Q sono trasferite dalla scheda ADC al DSP nella fase indicata in figura con "ACQUIRE" e sono trattate come parti reale ed immaginaria di un ipotetico segnale di ingresso complesso di cui viene calcolata la trasformata di Fourier complessa.

Si filtra lo spettro per migliorare i rapporto segnale rumore e si effettuano le correlazioni usando i codici corrispondenti.

Quando si è raggiunto il numero totale di integrazioni previste si sommano i contributi dovuti ai due codici ottenendo un unico segnale nel dominio della frequenza.

La trasformata inversa di Fourier di tale segnale rappresenta il picco di correlazione con relativa indicazione dell'altezza virtuale che è passato al PC.

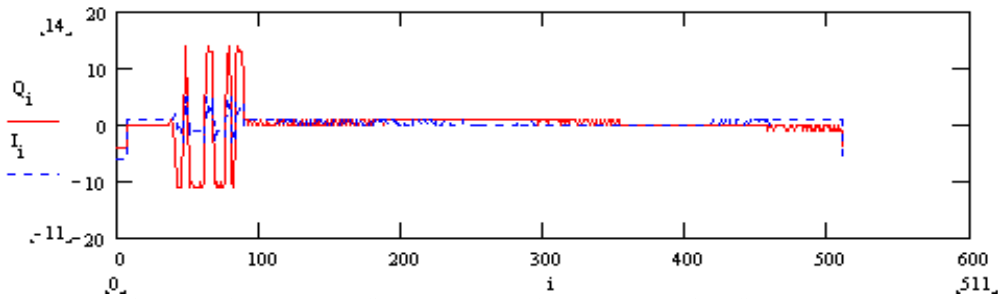


Fig.10 Serie temporale di I e Q ottenute da un segnale privo di rumore

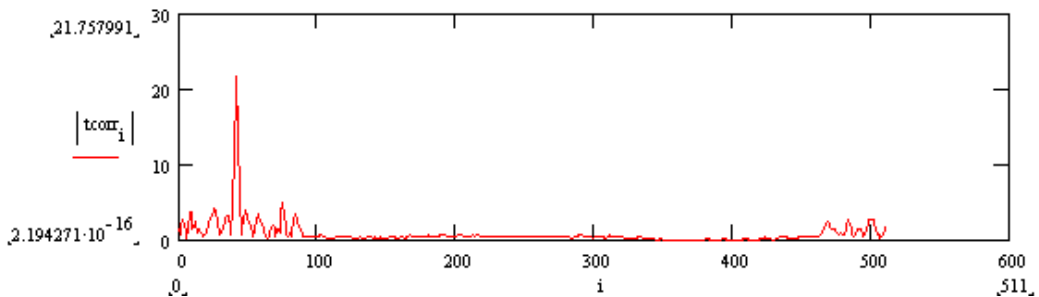


Fig.11 Picco di correlazione nel dominio del tempo

Test del sistema

Dopo una lunga fase di test di ciascuna scheda e dell'insieme la migliore prova di funzionamento è data dalla misura stessa quando quest'ultima si può confrontare con quella di uno strumento funzionante ed affidabile.

Nell'osservatorio ionosferico di Roma è in funzione dal 1997 una ionosonda digitale anch'essa a bassa potenza, oltre a macchine tradizionali ad inviluppo con i quali è stato possibile confrontarci.

Nelle seguenti figure sono visibili uno ionogramma ottenuto dal nostro sistema, figura 12, e quello ottenuto dalla ionosonda DPS-4, figura 13.

Gli ionogrammi differiscono di circa 6 minuti, tempo che non comporta grosse variazioni della ionosfera.

Il confronto fa risaltare subito una maggiore sensibilità del sistema INGV alle basse frequenze evidenziata dalla presenza dello strato E nello ionogramma di figura 12.

L'energia dell'eco è in relazione al colore del punto che la rappresenta; i punti neri indicano una maggiore energia, mentre quelli grigi denotano riflessione con energia minore.

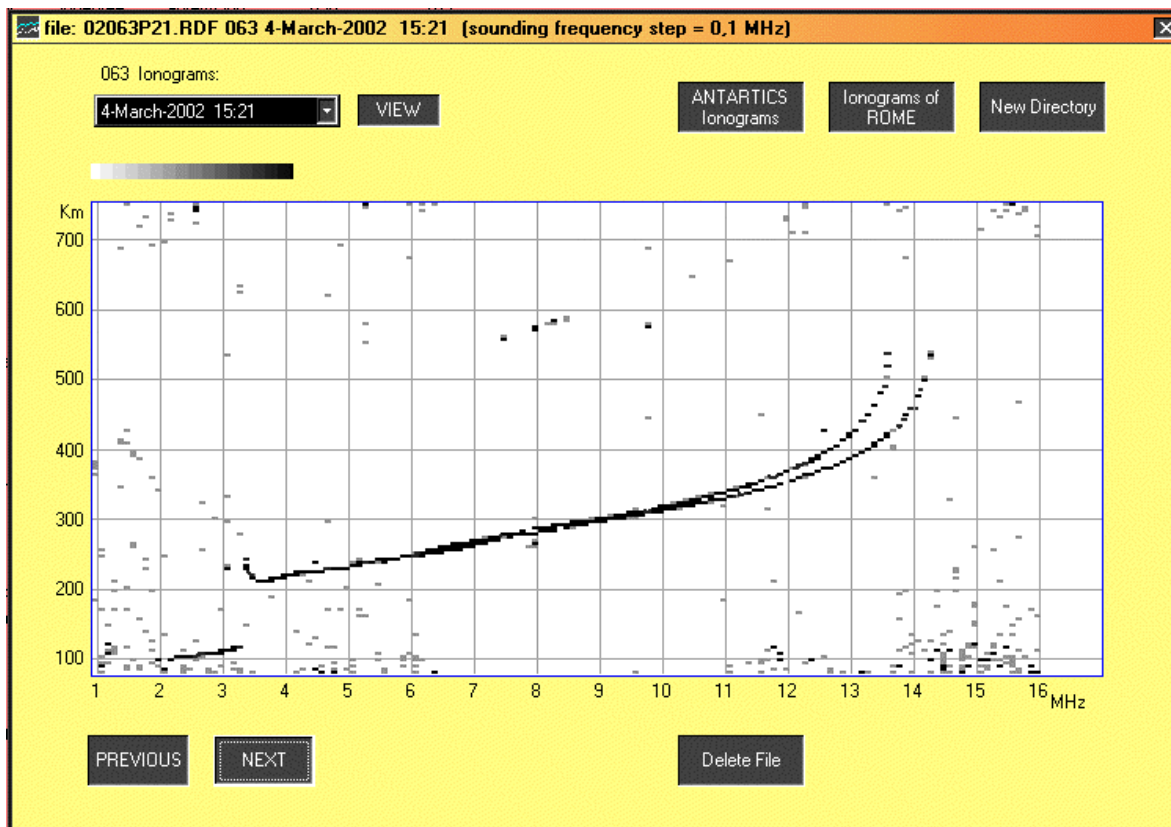
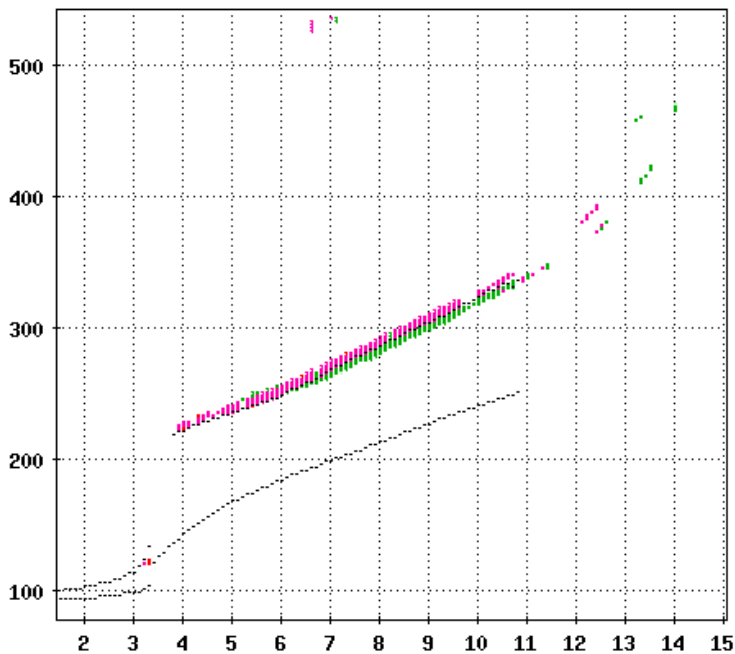


Fig.12 Ionogramma registrato nell'osservatorio ionosferico di Roma il 4 marzo 2002 ore 15.21 ora locale.

Lowell Digisonde

STATION YYYY DAY DDD HMM P1 FFS S AXN PPS IGA PS
 Rome 2002 Mar04 063 1415 SBF 001-1 096 200 +0+ B1

foF2	10.85
foF1	N/A
foF1p	N/A
foE	3.32
foEp	3.02
fxI	11.40
foEs	3.30
fmin	1.60
<hr/>	
MUF	36.98
M	3.424
D	3000
<hr/>	
h'F	217
h'F2	N/A
h'E	100
h'Es	100
<hr/>	
zmF2	250
zmF1	N/A
zmE	103
yF2	53
yF1	N/A
yE	13
B0	78.9
B1	1.00
C-level	1



2063015A.SBF / 135fx256h 100 kHz 2.5 km 3x2 / DPS-4 (142-142) 41.9 N 12.5 E

Fig.13 Ionogramma registrato nell'osservatorio ionosferico di Roma il 4 marzo 2002 ore 15.15 ora locale.

BIBLIOGRAFIA

K. Bible, *Evolution of the ionosonde*, Annali di Geofisica Vol. 41 N.5-6 (1998).

M. I. Skolnik, *Radar handbook*, Mc Graw Hill N.Y. (1997).

K. Davies, *Ionospheric Radio*, P. Peregrinus London (1990).

R D. Hunsaker, *Radio technique for probing the terrestrial ionosphere*, Springer –Verlag N.Y. (1991)

J.D.Krauss – *Antennas*- Mc Graw Hill N.Y. (1988).

A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, *Discrete time signal processing*, Prentice Hall Inc. New Jersey (1999).

B. W. Reinisch, *New Techniques in ground- based ionospheric sounding and studies*. Radio Sciences Vol. 21 (1986).