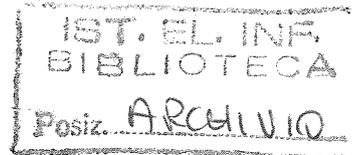


 Consiglio Nazionale delle Ricerche



ISTITUTO DI
ELABORAZIONE DELLA
INFORMAZIONE

Pisa

Un programma di simulazione numerica, basato su AVS, per lo studio della propagazione di impulsi ultrasonici in mezzi stratificati.

N.Mancuso, S.Minutoli*, A.Marchetti*, M. Bramanti**

*IEI-CNR, Via S. Maria 46, Pisa

Nota Interna B4-02
Gennaio 1996

Indice

1. Introduzione.....	1
1.1 La propagazione in un mezzo stratificato.....	1
1.2 Principio di funzionamento del programma.....	3
1.3 Prestazioni e limiti.....	3
2. Ambiente di sviluppo. Il sistema AVS.....	4
3. Realizzazione del programma di simulazione.....	5
3.1 Formato dei dati scambiati tra i vari moduli.....	5
3.2 Moduli realizzati.....	6
3.2.1 Generatore d'impulso.....	6
3.2.2 Interfaccia.....	7
3.2.3 Moduli di supporto.....	9
3.2.3.1 Compatta e scompatta.....	9
3.2.3.2 View-Time.....	9
3.2.3.3 View-Freq.....	10
3.2.3.4 FFT e IFFT.....	10
3.2.3.5 mf_to_ri.....	11
3.2.3.6 ri_to_mf.....	11
3.2.4 Moduli di visualizzazione.....	11
3.2.4.1 Visualizza f_f.....	11
3.2.4.2 Visualizza f_t.....	11
3.2.4.3 Visual f_f.....	12
4. Guida alla costruzione di una rete.....	12

Un programma di simulazione numerica, basato su AVS, per lo studio della propagazione di impulsi ultrasonici in mezzi stratificati.

N. Mancuso*, S. Minutoli*, A. Marchetti*, M. Bramanti*

*IEI-CNR, Via S. Maria 46, 56126 Pisa

1. Introduzione

In questo lavoro viene descritto un programma di simulazione numerica relativo alla propagazione di impulsi ultrasonici in mezzi costituiti da più strati di materiali diversi; tale programma consente uno studio approfondito della formazione del segnale di eco complessivo in funzione delle caratteristiche dei materiali attraversati e di quelle dell'impulso adottato.

Il vantaggio dell'impiego di questo strumento rispetto alle prove sperimentali consiste soprattutto nel poter seguire il cammino del segnale all'interno del materiale, consentendo così l'esame degli effetti sul suo spettro e sulla sua forma temporale prodotti dalla propagazione in ciascun strato e quelli dovuti alla riflessione e/o trasmissione nel passaggio da uno strato all'altro.

Prima di passare alla spiegazione dettagliata delle varie parti del programma, vengono richiamate brevemente alcune nozioni sulle modalità di propagazione delle onde elastiche in mezzi reali che presentino discontinuità nella densità e nella velocità del suono, come avviene appunto nei mezzi multistrato.

1.1 La propagazione in un mezzo stratificato

In figura 1 è schematizzata la struttura di un mezzo ad N strati, dove si è indicato con α_i , z_i , D_i , l'attenuazione, l'impedenza acustica e lo spessore dell'i-esimo strato.

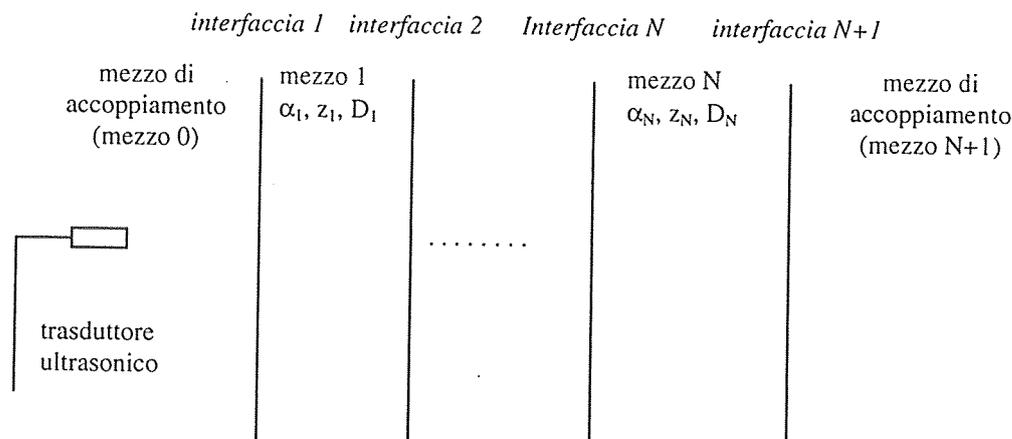


Fig. 1

Si definisce *interfaccia* la superficie di separazione tra due strati e, in questo caso, si suppone che ognuna di esse sia piana e parallela alle facce esterne del campione in esame.

Il mezzo generalmente adottato per l'accoppiamento tra il trasduttore e il campione è acqua.

L'impulso generato dal trasduttore è un segnale di durata temporale limitata, costituito da un treno di oscillazioni comprendente pochi cicli con una frequenza portante legata al tipo di trasduttore impiegato; tale impulso viaggia nell'acqua in direzione perpendicolare alla prima interfaccia e viene detto di esplorazione o incidente.

Com'è noto, in un'onda elastica che si propaga in un mezzo reale, a causa di molteplici fattori dissipativi che vanno sotto il nome di perdite, l'ampiezza si riduce secondo una legge del tipo:

$e^{-\alpha \cdot x}$ dove α è il coefficiente di attenuazione determinato dalle perdite proprie di ciascun materiale, mentre x è la distanza percorsa all'interno del mezzo.

Quando la vibrazione raggiunge la i -esima superficie di separazione tra il mezzo di indice $i-1$ e quello di indice i , una parte di essa viene riflessa e si propaga in direzione opposta a quella di incidenza nel mezzo $i-1$, mentre la parte rimanente (trasmessa) attraversa l'interfaccia e continua a viaggiare nel mezzo i -esimo. Il rapporto tra l'ampiezza dell'onda riflessa e quella dell'onda incidente si definisce *coefficiente di riflessione* r_i per la i -esima interfaccia; imponendo le opportune condizioni al contorno, si trova che l'ampiezza dell'onda trasmessa si ottiene da quella dell'onda incidente moltiplicandola per $1+r_i$, che quindi costituisce il coefficiente di trasmissione associato a tale interfaccia.

A questo punto, si può seguire il cammino dell'impulso di esplorazione attraverso le varie fasi che portano alla formazione degli echi, sfruttando anche lo schema della figura 2 in cui è riportato il percorso del segnale in funzione del tempo.

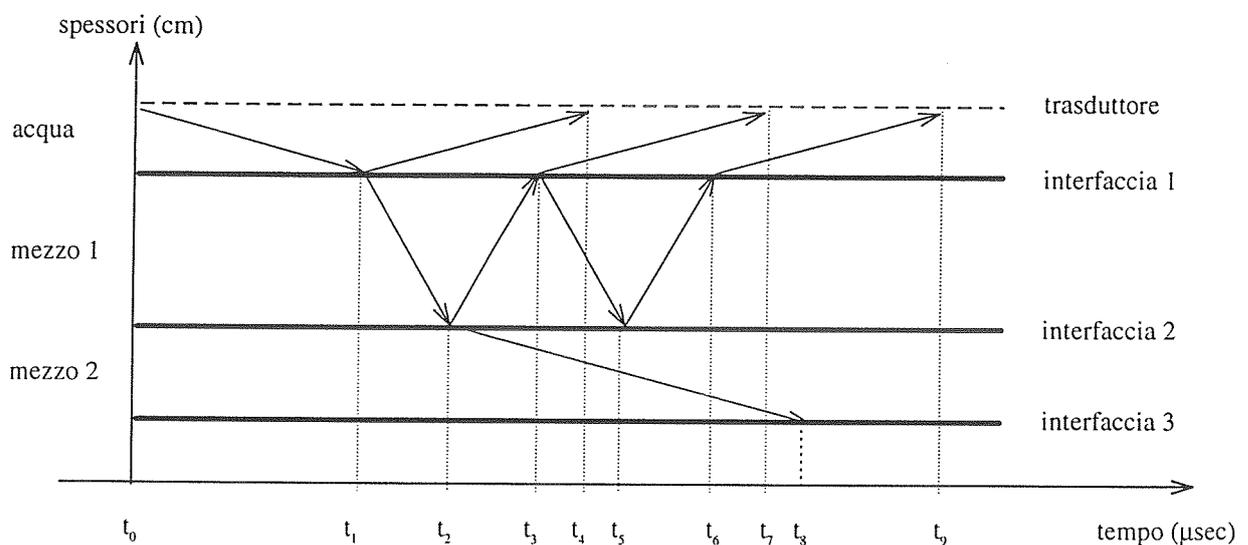


Fig. 2

L'impulso generato sul trasduttore all'istante t_0 , dopo aver attraversato lo strato di acqua, con conseguente attenuazione, si presenta all'interfaccia 1 acqua-mezzo 1 (istante t_1), e qui si divide in segnale riflesso e segnale trasmesso; il primo ritorna verso il trasduttore dove costituisce il primo eco (istante t_2), e in questo tratto subisce nuovamente l'attenuazione

dall'acqua, invece il segnale trasmesso viene attenuato, attraversando il mezzo, 1 prima di raggiungere l'interfaccia 2 (istante t_2).

Analogamente a quanto detto per il segnale incidente, l'impulso che ora si presenta all'interfaccia 2 viene sdoppiato in una parte riflessa ed in una trasmessa; queste, propagandosi in due mezzi distinti, verranno attenuate in maniera diversa; comunque la prima ritornerà all'interfaccia 1 (istante t_1), mentre la seconda arriverà all'interfaccia 3 (istante t_3).

Ripetendo questo procedimento per ogni interfaccia si può teoricamente analizzare il percorso del segnale all'interno del mezzo col grado di accuratezza desiderato.

1.2 Principio di funzionamento del programma

Il programma di simulazione si fonda sulle considerazioni esposte sopra: il segnale che giunge alla generica interfaccia i , viene scomposto in due parti, riflesso e trasmesso, in base agli opportuni coefficienti di riflessione e di trasmissione associati all'interfaccia medesima; il segnale riflesso viene attenuato dal mezzo $i-1$ e raggiunge l'interfaccia precedente, mentre quello trasmesso attraversa il mezzo di indice i prima di raggiungere l'interfaccia successiva.

La parte principale del programma è la subroutine, o modulo, *interfaccia*, che implementa le operazioni descritte inserendo negli operandi le caratteristiche fisiche dei due mezzi che costituiscono l'interfaccia i -esima e che determinano i coefficienti di riflessione e di trasmissione citati nonché la funzione di attenuazione che moltiplica l'ampiezza dell'impulso su ciascun percorso.

Il cammino dell'impulso di esplorazione nel mezzo multistrato viene quindi sviluppato dall'utente utilizzando più copie della suddetta subroutine che differiscono tra loro solo per i materiali costituenti i due strati.

Si è scelto di operare nel dominio della frequenza perché i vari coefficienti di riflessione e di attenuazione generalmente dipendono da essa e quindi è necessario tenerne conto per ricavare risultati attendibili. Potendo estendere le elaborazioni ad un'ampia gamma di valori discreti della frequenza, la simulazione permette di quantificare le deformazioni dello spettro del segnale a differenza di quanto accade qualora si utilizzi un'analisi approssimata con r_i ed α_i costanti.

Inoltre, poiché l'*interfaccia* agisce in definitiva come un filtro, le operazioni da implementare nel programma sono delle semplici moltiplicazioni da ripetere per ogni valore della frequenza considerato.

1.3 Prestazioni e limiti

La simulazione si basa su un idoneo modello del segnale incidente e del mezzo da indagare; modificando i parametri dell'uno e/o dell'altro si possono ottenere diverse condizioni di propagazione che servono a mettere in risalto, le modifiche subite da ogni segnale riflesso e trasmesso nel dominio del tempo e della frequenza.

In particolare, è possibile:

- analizzare separatamente gli effetti dell'attenuazione e quelli della riflessione o trasmissione;
- confrontare gli effetti del diverso tipo di dipendenza del coefficiente di attenuazione dalla frequenza;
- studiare il comportamento di segnali diversi in uno stesso mezzo.

La bontà dei risultati dipende ovviamente dal numero di campioni elaborati, ma già con tempi di calcolo di pochi secondi si ottengono risoluzioni adeguate per gli impieghi comuni.

Va comunque sottolineato che la simulazione, allo stato attuale, non prevede la possibilità che gli impulsi possano sovrapporsi in quanto ciascuno di essi è valutato separatamente; l'utente può solo verificare se nella realtà tale ipotesi è verificata calcolando il ritardo temporale associato a ciascun eco in uno stesso punto del mezzo.

Inoltre, si deve anche prestare attenzione a che la durata temporale dell'impulso utilizzato non superi quella massima consentita dallo spessore di ciascun strato, provocando così la sovrapposizione dell'eco dell'impulso con se stesso; in definitiva dev'essere: $\tau < \frac{2D_i}{c_i}$ con

$i = 1, \dots, N$; dove τ è l'intervallo temporale in cui l'impulso è significativamente diverso da zero e D_i e c_i sono rispettivamente lo spessore e la velocità del suono dello strato i -esimo.

In [1], paragrafo 6, sono stati riportati alcuni esempi da cui si può avere una visione più chiara delle modifiche che subisce il segnale durante la propagazione all'interno di un mezzo e di come esse influiscano sulle prestazioni della tecnica di indagine esaminata in tale lavoro.

2. Ambiente di sviluppo. Il sistema AVS

Il sistema AVS (Advanced Visual System) [2] è un software che consente di sviluppare applicazioni orientate alla visualizzazione di dati. Esso contiene delle funzionalità per la visualizzazione di funzioni (*Graph Viewer*), immagini (*Image Viewer*) e volumi (*Geometry Viewer*). AVS contiene anche molti moduli che consentono di leggere ed elaborare dati. Questi moduli possono essere connessi tra di loro per formare una rete che rappresenta una applicazione. La composizione dei moduli avviene utilizzando il *Network Editor*. Questo mette a disposizione un menu che contiene tutti i moduli disponibili, evidenziando per ciascuno di essi i parametri di ingresso e di uscita, ed un'area di lavoro in cui viene composta la rete. Per fare ciò l'utente, o lo sviluppatore della applicazione, seleziona i moduli dal menu e li inserisce nell'area di lavoro. Successivamente si forma la rete collegando i moduli tra di loro. Questo avviene stabilendo delle connessioni tra un'uscita di un modulo ed un ingresso di un altro modulo. Le connessioni rappresentano il flusso dei dati che partono dai moduli di ingresso (che generalmente leggono i dati da un file oppure li generano in base ai parametri impostati dall'utente), passano nei vari moduli intermedi seguendo le connessioni stabilite, e vanno a finire in moduli di uscita che provvedono alla visualizzazione o al salvataggio su file. Una volta realizzata una rete è possibile modificarla inserendo, eliminando o sostituendo i moduli. La procedura di costruzione delle reti avviene in modo interattivo utilizzando una tecnica di 'visual programming' senza la necessità di dover scrivere il relativo codice. I moduli già presenti in AVS offrono un vasto insieme di funzionalità nell'ambito dell'elaborazione di segnali, immagini e volumi. È anche possibile implementare nuovi moduli che possono essere utilizzati per ampliare le funzionalità del sistema. La scrittura di codice per realizzare un modulo da aggiungere a quelli già presenti non presenta in genere grandi difficoltà. Esso consiste in procedure di calcolo che sono essenzialmente delle ordinarie subroutine scritte in C (o in FORTRAN) ed in procedure che specificano al sistema AVS il tipo di parametri di ingresso e di uscita (che verranno utilizzati per la connessione con gli altri moduli) ed il tipo di parametri che possono essere impostati dall'utente durante l'esecuzione dell'applicazione. La scrittura di queste ultime procedure è assistita da un modulo di AVS (*Module Generator*) che provvede a generare il codice necessario per la

descrizione dei parametri del modulo. Una volta realizzata una applicazione si può utilizzare il *Layout Editor* per costruire una interfaccia utente di più agevole utilizzo.

3. Realizzazione del programma di simulazione

Il programma è stato realizzato utilizzando moduli già presenti in AVS e moduli implementati ad hoc.

Per facilitarne l'uso, tutti i moduli sono stati raggruppati nella libreria *Eco*

3.1 Formato dei dati scambiati tra i vari moduli

Il programma elabora segnali rappresentati nel dominio della frequenza; essi vengono introdotti nell'algoritmo sotto forma di un vettore che contiene la parte reale e la parte immaginaria del segnale, calcolate per valori discreti della frequenza, spaziate tra loro di un intervallo Δf definito dall'utente. Così, la parte principale di ogni elaborazione è costituita da un ciclo in cui alcune operazioni vengono ripetute per tutti i campioni frequenziali.

Consideriamo un vettore complesso di N componenti che sia la Trasformata Discreta di Fourier di un segnale reale; le sue componenti $X(i)$ godono della proprietà:

$$\operatorname{Re}[X(i)] = \operatorname{Re}[X(i + N/2)],$$

$$\operatorname{Im}[X(i)] = -\operatorname{Im}[X(i + N/2)], \quad \text{per } 0 \leq i \leq N/2$$

dove $\operatorname{Re}[X(i)]$ ed $\operatorname{Im}[X(i)]$ indicano rispettivamente la parte reale e quella immaginaria della componente i -esima

Queste, se il segnale si può considerare a banda limitata nel range $0 - N/2 \cdot \Delta f$, hanno la seguente corrispondenza con la Trasformata Continua di Fourier $X_c(f)$:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[X(i)] &= \begin{cases} \operatorname{Re}[X_c(i \cdot \Delta f)] \\ \operatorname{Re}[X_c(-i \cdot \Delta f)] \end{cases} \\ \operatorname{Im}[X(i)] &= \begin{cases} \operatorname{Im}[X_c(i \cdot \Delta f)] \\ -\operatorname{Im}[X_c(-i \cdot \Delta f)] \end{cases} \end{aligned} \quad \text{per } 0 \leq i \leq N/2$$

E' quindi sufficiente elaborare $N/2 + 1$ componenti per la parte reale ed altrettante per quella immaginaria, per ottenere lo spettro campionato completo del segnale, evitando così operazioni nel campo complesso e riducendo contemporaneamente a circa la metà il tempo di calcolo e l'occupazione di risorse.

Insieme ai valori dello spettro si è ritenuto opportuno inserire delle informazioni aggiuntive tra i dati che passano da un modulo all'altro; qui verranno elencati con una descrizione sintetica del loro significato e l'indicazione del paragrafo/i in cui sono trattati con maggior dettaglio.

- Ritardo temporale t_i Specifica la posizione del segnale i -esimo nel tempo. Si può introdurre dai vari generatori e viene aggiornato in ogni interfaccia.
- Intervallo frequenziale Δf specifica quanto è fitto il campionamento dello spettro del segnale. Si introduce nei moduli *generatori*.
- Frequenza centrale f_c Per i segnali passa banda, specifica la frequenza intorno a cui si sviluppa lo spettro. Si introduce solo nel *Generatore d'impulso*.
- Frequenza iniziale f_i Fissa l'origine per l'asse delle frequenze. Si introduce solo nel *Generatore d'impulso*.

- Intervallo temporale Δt Specifica l'intervallo di campionamento del segnale nel tempo. Si introduce dai *generatori* e viene utilizzato solo dal modulo di *visualizzazione nel tempo*.

Per semplificare la costruzione grafica della rete, il collegamento tra due moduli è realizzato con un'unica connessione, per cui i campioni dello spettro e i dati supplementari sopra elencati vengono inseriti in un unico vettore di $N + 7$ componenti (*vettore dei dati*) disposte nel seguente ordine:

Indice da 0 a $N/2$,	$N/2 + 1$ valori della parte reale dello spettro;
da $N/2 + 1$ a $N + 1$,	$N/2 + 1$ valori della parte immaginaria dello spettro;
indice $N + 2$	ritardo temporale;
indice $N + 3$	intervallo frequenziale;
indice $N + 4$	frequenza centrale;
indice $N + 5$	frequenza iniziale;
indice $N + 6$	intervallo temporale.

Ovviamente, ogni modulo compone e scompone il *vettore dati* in maniera del tutto trasparente all'utente.

Qualora si voglia comporre un *vettore dati* con parametri immessi direttamente dall'utente, si può utilizzare un modulo denominato *compatta* che ricevendo in ingresso gli appropriati input, costruisce un vettore di uscita come descritto sopra. Analogamente, è possibile, mediante il modulo *scompatta*, estrarre da un *vettore dati* le singole parti che lo compongono.

3.2 Moduli realizzati

3.2.1 Generatore d'impulso

Questo modulo fornisce la parte reale e quella immaginaria dello spettro di un segnale ottenuto dal campionamento della seguente funzione di tipo gaussiano:

$$A \cdot e^{-\frac{f-f_c}{2\sigma^2}} \cdot e^{-j2\pi(f-f_c) \cdot t_r}$$

Tutte le variabili che compaiono in questa espressione hanno una corrispondenza più o meno diretta con altrettanti parametri d'ingresso che l'utente può modificare.

Esaminiamoli con l'ordine in cui si presentano quando viene selezionato il modulo.

- *Ampiezza (A)*. E' un semplice coefficiente moltiplicativo che indica l'ampiezza dello spettro; com'è evidente, il massimo di quest'ultimo si ha per $f = f_c$.
- *Numero campioni (N)*. Definisce il numero di componenti che costituiscono lo spettro e, per una proprietà della TDF anche l'impulso nel tempo. Se tra i moduli che verranno attraversati dal segnale è compreso qualcuno che adopera algoritmi FFT o IFFT, allora N dev'essere una potenza di 2.
- *Intervallo temporale (Δt)*. Definisce l'intervallo di campionamento del segnale nel tempo, in secondi. Il prodotto $N \cdot \Delta t$ è quindi la durata del segnale. Dipende da Δf nel di seguito specificato.
- *Intervallo frequenziale (Δf)*. Definisce l'intervallo tra due campioni dello spettro, in Hertz. Pertanto il prodotto $N/2 \cdot \Delta f$ è la banda su cui si estende il segnale calcolato. Poiché, per una nota proprietà della TDF è: $\Delta t \cdot \Delta f = \frac{1}{N}$, modificando uno di questi tre parametri, automaticamente vengono aggiornati gli altri due secondo le seguenti regole:

$$\text{- se } \Delta t \text{ cambia in } \Delta t', \text{ allora } \Delta f' = \frac{1}{N \cdot \Delta t'};$$

- se Δf cambia in $\Delta f'$, allora $\Delta t' = \frac{1}{N \cdot \Delta f'}$;

- se N cambia in N' , allora $\Delta f' = \Delta f \cdot \sqrt{\frac{N}{N'}}$, $\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{\frac{N}{N'}}$

- *Frequenza centrale (f_c)*. Definisce il valore della frequenza in Hertz intorno a cui si sviluppa lo spettro. Se $f_c \neq 0$, allora il segnale è passa_banda.
- *Frequenza iniziale (f_{in})*. Definisce il valore in Hertz a partire dal quale viene valutata la funzione gaussiana. Insieme all'intervallo frequenziale, costituisce la variabile discreta f che compare nell'espressione, secondo la relazione: $f = f_{in} + i \cdot \Delta f$ in cui i è un indice progressivo variabile tra 0 ed $N/2$. Viene utilizzata per ottenere, a parità di numero di campioni, un campionamento più fitto solo di una zona ristretta dello spettro. Se nella rete ci sono moduli in cui operano algoritmi FFT o IFFT, f_{in} dev'essere nulla.
- *Sigma (σ)*. È il parametro che determina la larghezza dello spettro. Poiché il grafico dello spettro è simmetrico rispetto alla frequenza $N/2 \cdot \Delta f$, per evitare la sovrapposizione delle due parti si devono dimensionare f_{in} , f_c e σ in maniera che i valori significativi dell'ampiezza siano contenuti nei primi $N/2 + 1$ campioni.
- *Ritardo (t_r)*. Introduce un ritardo temporale sul segnale che in frequenza si ripercuote sul termine di fase.
- *Esponente fase (γ)*. Consente di modificare la dipendenza della fase dello spettro dalla frequenza permettendo così una maggior flessibilità nella modellazione dell'impulso esplorante.
- *Start*. Questo parametro non ha alcuna corrispondenza nella funzione, ma serve ad avviare la routine che genera il segnale secondo le impostazioni definite sopra. Finché non si impartisce questo comando, l'output del modulo conserva lo stato dell'ultima elaborazione.

Le componenti dei vettori parte reale e parte immaginaria dello spettro, che vengono inseriti nel segnale di uscita, vengono calcolate all'interno di un ciclo di $\frac{N}{2} + 1$ passi con le seguenti relazioni:

$$\text{Re}(i) = A \cdot e^{-\frac{(i \cdot \Delta f + f_{in} - f_c)^2}{2\sigma^2}} \cdot \cos\left[2\pi \cdot (i \cdot \Delta f + f_{in} - f_c)^\gamma \cdot t_r\right]$$

$$\text{Im}(i) = A \cdot e^{-\frac{(i \cdot \Delta f + f_{in} - f_c)^2}{2\sigma^2}} \cdot \text{sen}\left[-2\pi \cdot (i \cdot \Delta f + f_{in} - f_c)^\gamma \cdot t_r\right]$$

con i indice del ciclo variabile tra 0 ed $N/2$.

Per valori dell'esponente della fase (γ) tali che questa sia una funzione dispari della frequenza, l'impulso generato in questo modulo sarà sempre una funzione reale del tempo.

3.2.2 Interfaccia

Compito di ciascun modulo *interfaccia* è quello di scomporre il segnale incidente (S_i) in una parte riflessa (S_r) ed in una trasmessa (S_t), valutando per entrambi anche l'effetto dell'attenuazione che essi subiscono nell'attraversare ciascuna il proprio mezzo prima di giungere come segnale incidente all'interfaccia successiva.

Pertanto, il modulo presenta una porta d'ingresso e due di uscita, quella di destra per il segnale riflesso e quella di sinistra per il segnale trasmesso.

Al momento della selezione del modulo, bisogna definire i due mezzi che costituiscono l'interfaccia, nell'ordine in cui essi vengono attraversati dal segnale.

In pratica questa operazione si effettua selezionando da un elenco, nella sezione dei parametri d'ingresso, il nome del materiale per il *mezzo 1* e per il *mezzo 2* e specificandone lo spessore corrispondente.

Fatto ciò, il programma attingerà da una tabella tutte le caratteristiche fisiche di cui ha bisogno per costruire le funzioni di attenuazione ed i coefficienti di riflessione e trasmissione per ogni valore della frequenza.

La tabella, inserita nel file *mezzi.h*, è stata compilata inserendo i valori dei seguenti parametri con la loro eventuale dipendenza dalla frequenza:

- densità ρ (g/cm^3)
- velocità c (cm/sec)
- impedenza acustica z (unità C.G.S.)
- Coefficiente di attenuazione ad 1 MHz $\mu(\omega)$ (Neper/cm)
- Legge di dipendenza dalla frequenza $F(\omega)$.

Qualora si volesse aggiornarla, bisognerebbe aggiungere in questo file il nome del materiale con i valori dei suoi parametri nell'ordine esposto, poi far compilare il nuovo modulo *interfaccia* che ingloberà così le modifiche apportate alla tabella.

Le operazioni svolte all'interno del modulo *interfaccia* seguono l'ordine con cui vengono ora esposte insieme ad un breve commento.

- *Estrazione dei componenti.* Dal vettore dati d'ingresso si ricavano i vettori parte reale e parte immaginaria dello spettro e le costanti ritardo temporale (t_r), intervallo frequenziale (Δf), frequenza centrale (f_c), frequenza iniziale (f_{in}), intervallo temporale (Δt).
- *Calcolo dei tempi di ritardo.* Conoscendo le velocità del suono nei due mezzi costituenti l'interfaccia ed i loro spessori, si ricavano subito i tempi di propagazione del segnale riflesso nel mezzo 1 e del segnale trasmesso nel mezzo 2, secondo la semplice relazione: $t = \frac{d}{c}$. Tali ritardi vengono subito sommati a quello d'ingresso, costituendo così i nuovi ritardi accumulati per le successive interfacce.
- *Calcolo del coefficiente di riflessione e dei segnali riflesso e trasmesso.*

L'espressione esatta del coefficiente di riflessione in funzione della frequenza è data dal rapporto di due numeri complessi $a + jb$ e $c + jd$, per cui si ha:

$$\text{Re}[R(\omega)] = \frac{a \cdot c + b \cdot d}{c^2 + d^2}$$

$$\text{Im}[R(\omega)] = -\frac{b \cdot c - a \cdot d}{c^2 + d^2}$$

dove:

$$a = \rho_2 \cdot c_2 - \rho_1 \cdot c_1$$

$$b = [\mu_1(\omega) \cdot \rho_2 - \mu_2(\omega) \cdot \rho_1] \cdot \frac{c_1 \cdot c_2}{\omega}$$

$$c = \rho_2 \cdot c_2 + \rho_1 \cdot c_1$$

$$d = [\mu_1(\omega) \cdot \rho_2 + \mu_2(\omega) \cdot \rho_1] \cdot \frac{c_1 \cdot c_2}{\omega}$$

Dove $c_1, c_2, \rho_1, \rho_2, \mu_1, \mu_2$, sono nell'ordine, la velocità del suono, la densità e il coefficiente di attenuazione rispettivamente del mezzo 1 e del mezzo 2.

Poiché a e c non dipendono dalla frequenza essi si calcolano una volta sola, invece per b e d si ricorre ad un ciclo che fa variare la frequenza da f_{in} a $f_{in} + \left(\frac{N-7}{2}\right) \cdot \Delta f$ a passi di

Δf . Qui N è il numero di elementi costituenti il *vettore dati*.

Dal coefficiente di riflessione si ottiene poi quello di trasmissione con le semplici relazioni:

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}[T(\omega)] &= \operatorname{Re}[R(\omega)] + 1 \\ \operatorname{Im}[T(\omega)] &= \operatorname{Im}[R(\omega)]\end{aligned}$$

Sfruttando questi due parametri, all'interno dello stesso ciclo, si calcola ciascuna componente del segnale riflesso (S_r) e del segnale trasmesso (S_t) mediante le relazioni:

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}[S_r(\omega)] &= \operatorname{att}_1(\omega) \cdot \{ \operatorname{Re}[S_i(\omega)] \cdot \operatorname{Re}[R(\omega)] - \operatorname{Im}[S_i(\omega)] \cdot \operatorname{Im}[R(\omega)] \} \\ \operatorname{Im}[S_r(\omega)] &= \operatorname{Im}[S_i(\omega)] \cdot \operatorname{Re}[R(\omega)] + \operatorname{Re}[S_i(\omega)] \cdot \operatorname{Im}[R(\omega)] \\ \operatorname{Re}[S_t(\omega)] &= \operatorname{att}_2(\omega) \cdot \{ \operatorname{Re}[S_i(\omega)] \cdot \operatorname{Re}[T(\omega)] - \operatorname{Im}[S_i(\omega)] \cdot \operatorname{Im}[T(\omega)] \} \\ \operatorname{Im}[S_t(\omega)] &= \operatorname{Im}[S_i(\omega)] \cdot \operatorname{Re}[T(\omega)] + \operatorname{Re}[S_i(\omega)] \cdot \operatorname{Im}[T(\omega)]\end{aligned}$$

Dove S_i è il segnale trasmesso e $\operatorname{att}_1, \operatorname{att}_2$ sono le funzioni di attenuazione della sola ampiezza che vengono ricalcolate ad ogni passo inserendo il valore del coefficiente di attenuazione alla frequenza considerata e lo spessore del mezzo attraversato: $e^{-\mu(\omega) \cdot d}$.

- *Assegnazione delle uscite*. La parte finale della routine costruisce i *vettori dati* per ciascuna delle due uscite, secondo il formato standard descritto, utilizzando i risultati delle elaborazioni eseguite.

3.2.3 Moduli di supporto

3.2.3.1 Compatta e scompatta

Questi due moduli hanno il compito, rispettivamente, di scomporre il *vettore dati* nei suoi componenti e di comporlo a partire da questi, seguendo il criterio esposto nel paragrafo 3.1. L'ordine delle uscite (o ingressi, a seconda del modulo) da destra verso sinistra è il seguente: vettore di $N/2$ componenti per la parte reale del segnale, vettore di $N/2$ componenti per la parte immaginaria del segnale, ritardo temporale, intervallo frequenziale, frequenza centrale, frequenza iniziale, intervallo temporale.

3.2.3.2 View-Time

Questo modulo è stato implementato per poter visualizzare correttamente una funzione mediante il modulo di *AVS Graph Viewer*, in particolare per quel che riguarda la scala sugli assi. Il modulo *Graph Viewer*, infatti, quando gli viene passato un vettore unidimensionale utilizza per l'asse x gli indici del vettore stesso, e quindi i valori da 0 ad $N - 1$, dove N indica il numero di elementi del vettore. Questo funzionamento non è stato ritenuto soddisfacente in

quanto, per questo tipo di applicazione, è molto importante conoscere i valori del tempo a cui si riferiscono le ampiezze del segnale. Il presente modulo fornisce in uscita un vettore bidimensionale che dato in ingresso al *Graph Viewer* gli consente di visualizzare sull'asse x i valori corretti.

Gli ingressi di questo modulo sono costituiti dal vettore che contiene le ampiezze del segnale ($In[i]$) e da due ulteriori parametri: $Delay$ che indica il tempo iniziale e $Delta_t$ che indica l'intervallo di tempo tra due campioni del segnale.

L'uscita è composta da un vettore bidimensionale di dimensioni $2 \times N$.

I componenti $Out[0][i]$ hanno valore $Delay + i \cdot Delta_t$

i componenti $Out[1][i]$ hanno valore $In[i]$

Passando il vettore così composto al *Graph Viewer*, questo utilizzerà i componenti $Out[0][i]$ per l'asse x ed i componenti $Out[1][i]$ per l'asse y.

3.2.3.3 *View-Freq*

Il funzionamento di questo modulo ed i motivi per cui è stato realizzato sono identici al modulo *View-Time*. L'unica differenza è che questo modulo applica un fattore di scala di 10^{-6} all'uscita. L'uso di questo modulo, infatti, è previsto per la visualizzazione nel dominio delle frequenze e consente la visualizzazione dei valori sull'asse x espressi in MHz.

Gli ingressi di questo modulo sono costituiti dal vettore che contiene le ampiezze del segnale e da due ulteriori parametri: $Freq_in$ che indica la frequenza iniziale e $Delta_f$ che indica l'intervallo di tempo tra due campioni del segnale.

L'uscita è composta da un vettore bidimensionale di dimensioni $2 \times N$.

I componenti $Out[0][i]$ hanno valore $(Freq_in + i \cdot Delta_f) \cdot 10^{-6}$

i componenti $Out[1][i]$ hanno valore $In[i]$

Passando il vettore così composto al *Graph Viewer*, questo utilizzerà i componenti $Out[0][i]$ per l'asse x ed i componenti $Out[1][i]$ per l'asse y.

3.2.3.4 *FFT e IFFT*

Il package che esegue l'FFT (Fast Fourier Transform) e l'IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) è stato prelevato via rete. L'autore è Steven Trainoff.

Sono state implementate delle funzioni per permettere l'uso del package sotto forma di moduli AVS.

Per l'FFT l'ingresso è costituito da due vettori unidimensionali contenenti rispettivamente la parte reale e la parte immaginaria del segnale a cui si vuole applicare la trasformata di Fourier. L'uscita è costituita da due vettori, anch'essi unidimensionali, che contengono rispettivamente la parte reale e la parte immaginaria della trasformata di Fourier.

I due vettori di ingresso devono avere la stessa dimensione e questa deve essere un numero che è potenza di 2. I vettori di uscita avranno la stessa dimensione dei vettori di ingresso.

Per l'IFFT l'ingresso è costituito da due vettori unidimensionali contenenti rispettivamente la parte reale e la parte immaginaria della trasformata di Fourier. L'uscita è costituita da due vettori, anch'essi unidimensionali, che contengono rispettivamente la parte reale e la parte immaginaria del segnale ottenuto eseguendo l'antitrasformata di Fourier.

3.2.3.5 *mf_to_ri*

Questo modulo effettua la conversione della rappresentazione di un segnale da modulo e fase a parte reale e parte immaginaria.

L'ingresso è costituito da due vettori unidimensionali aventi la stessa dimensione che contengono rispettivamente il modulo e la fase del segnale.

L'uscita è costituita da due vettori aventi la stessa dimensione dei vettori di ingresso contenenti rispettivamente la parte reale e la parte immaginaria del segnale.

3.2.3.6 *ri_to_mf*

Questo modulo effettua la conversione della rappresentazione di un segnale da parte reale e parte immaginaria a modulo e fase .

L'ingresso è costituito da due vettori unidimensionali aventi la stessa dimensione che contengono rispettivamente la parte reale e la parte immaginaria del segnale.

L'uscita è costituita da due vettori aventi la stessa dimensione dei vettori di ingresso contenenti rispettivamente il modulo e la fase del segnale.

3.2.4 Moduli di visualizzazione

I seguenti moduli sono in realtà, utilizzando la terminologia di AVS, dei macro moduli in quanto sono composti da alcuni moduli elementari collegati tra di loro.

3.2.4.1 *Visualizza f_f*

È stato realizzato per consentire all'utente di visualizzare un segnale semplicemente collegando il *vettore dati* a un solo modulo nel punto in cui è presente il segnale stesso.

Questo modulo consente la visualizzazione di un segnale nel dominio delle frequenze mediante due grafici: uno per il modulo ed uno per la fase.

Nella figura 3 è mostrato uno schema a blocchi del modulo. Inizialmente il *vettore dati* di ingresso viene scomposto nelle sue singole componenti. Le due componenti del segnale, parte reale e parte immaginaria, vengono date in ingresso al modulo *ri_to_mf* per la conversione in modulo e fase. A questo punto il modulo e la fase vengono visualizzati su due grafici separati (moduli *Graph Viewer*) utilizzando i moduli *view_freq* per la corretta visualizzazione dei valori della frequenza in MHz.

3.2.4.2 *Visualizza f_t*

È stato realizzato per consentire all'utente di visualizzare un segnale semplicemente collegando il *vettore dati* a un solo modulo nel punto in cui è presente il segnale stesso.

Questo modulo consente la visualizzazione del grafico di un segnale nel dominio del tempo.

Come si può vedere dallo schema del modulo in figura 4, dal vettore in ingresso vengono estratte le singole componenti utilizzando il modulo *Scompatta*. Al segnale viene quindi applicata la IFFT. La parte reale del segnale così ottenuta viene visualizzata mediante il *Graph Viewer* dopo aver applicato il modulo *view_time* per inserire i valori corretti per l'asse x.

3.2.4.3 *Visual f_f*

Questo modulo è simile a *Visualizza f_f* ma consente di visualizzare, oltre al grafico, anche i valori numerici del segnale. Ciò consente una valutazione più precisa dei dati elaborati.

Nella figura 5 è mostrato lo schema a blocchi del modulo. Dopo aver estratto le varie componenti del vettore di ingresso viene effettuata la conversione in modulo e fase. La parte reale del segnale ottenuto viene visualizzata, dopo aver applicato il modulo *view_freq*, con il *Graph Viewer*. Il segnale visibile nel grafico viene anche visualizzato in forma numerica mediante il modulo *print field*.

4. Guida alla costruzione di una rete

Durante la realizzazione del software si è tenuto conto soprattutto del fatto che un obiettivo importante era quello di avere una certa flessibilità. L'utente, infatti, in genere ha la necessità di decidere il numero di strati del materiale, il numero di propagazioni, e diversi punti in cui inserire la visualizzazione dei dati presenti. Questo va un po' a scapito della semplicità di uso in quanto l'utente è costretto a costruirsi una rete in base alle effettive necessità. La conseguenza di ciò è che l'utente finale deve possedere una minima conoscenza del modo di operare di AVS. Ciò, comunque, non pone grosse difficoltà in quanto, come detto precedentemente, la costruzione delle reti avviene in modo semplice senza dover fare ricorso alla scrittura di codice.

Per ogni simulazione, bisogna innanzitutto scegliere il modello matematico del segnale esplorante e definire i suoi parametri caratteristici. Ciò avviene mediante la selezione di uno dei moduli di input (*Generatori*) realizzati e la modifica dei parametri se quelli di default non corrispondono alle esigenze dell'utente.

Successivamente, utilizzando i vari moduli *interfaccia*, connessi tra loro e al generatore, si costruisce graficamente la rete desiderata, specificando la natura e gli spessori dei due mezzi che compongono ciascuna interfaccia.

La presentazione dei risultati può aversi sia nel dominio del tempo che in quello della frequenza, semplicemente collegando l'appropriato modulo di visualizzazione al flusso di dati che interessa esaminare.

Questo permette di rappresentare il segnale in ogni punto con notevoli vantaggi, oltre che per l'analisi finale, anche durante la sintesi della rete.

La costruzione e le successive modifiche del programma che realizza la simulazione avviene perciò senza che l'utente debba scrivere nessuna riga di codice, consentendone il suo utilizzo anche ad operatori che non conoscono il linguaggio con cui sono stati generati i vari moduli.

Per meglio spiegare il funzionamento del programma di simulazione vediamo la sua applicazione all'esempio descritto in [1] da pag. 12 a pag. 14.

Si vuole dunque simulare l'utilizzo di un impulso avente frequenza della portante pari a 2.25 MHz e durata non superiore a 2 microsecondi per l'indagine di un mezzo a tre strati, immerso in acqua, così strutturato:

1° strato. Plexiglas, spessore 1.154 cm.

2° strato. Acqua, spessore 1.215 cm.

3° strato. Plexiglas, spessore 1.778 cm.

Avviato il programma AVS, dall'ambiente *network editor* si carica la libreria *Eco* e si procede nel seguente ordine:

1. Costruzione dell'impulso esplorante.

Selezionato il modulo *Gen_Impulso*, nella finestra a sinistra dello schermo, compaiono tutti i parametri d'ingresso. L'*ampiezza* si può lasciare al valore 1. Per quanto riguarda il numero dei campioni, poiché si utilizzeranno dei moduli *IFFT*, si sceglie un valore che sia una potenza di 2, un buon compromesso tra risoluzione e tempi di elaborazione è dato dal valore $N = 4096$.

Inserendo poi un *intervallo temporale* di 50 nanosecondi, si ottiene automaticamente un *intervallo frequenziale* di 4882.81 Hz. Ciò implica che il segnale calcolato si estenderà su un intervallo di $5 \cdot 10^{-8} \cdot 4096 = 204.75 \mu\text{sec}$ e una banda di $4882.81 \cdot 2048 = 10 \text{ MHz}$. Inoltre, impostando la *frequenza centrale* a 2.25 MHz, la *frequenza iniziale* a zero, a meno di non scegliere valori di σ piccoli, si evita la sovrapposizione dei primi $\frac{N}{2} + 1$ campioni dello

spettro con i secondi $\frac{N}{2} - 1$. Per il caso in esame, si è posto $\sigma = 650000$.

Si è introdotto un *ritardo* di 5 μsec per consentire la completa visualizzazione del segnale nel tempo; infatti, essendo la posizione dell'impulso riferita al suo punto centrale, se non ci fosse alcun ritardo ($t_r=0$) l'uscita del generatore, vista nel tempo, conterrebbe metà del segnale tra i primi campioni e l'altra metà negli ultimi. L'esponente γ si è posto pari a 1, ottenendo così una fase direttamente proporzionale alla frequenza centrata sulla portante.

Ultimata la modellazione dell'impulso incidente, selezionando *Start*, si rende disponibile all'uscita del modulo il segnale in forma compatta.

Collegando a questo un modulo *Visualizza f_f* si potrà vedere lo spettro dell'impulso generato, in modulo e fase, per le frequenze tra 0 ed $\frac{N}{2} \cdot \Delta f$.

Analogamente, si potrebbe utilizzare un modulo *Visual f_t* per vedere l'impulso nel tempo tra 0 ed $(N-1) \cdot \Delta t$.

Sfruttando le funzionalità del *Graph Viewer*, si possono ingrandire le parti che interessano di più, ottenendo risultati come quelli delle figure 7 e 8.

2. Modello del mezzo multistrato.

Per la costruzione della rete di *interfacce*, basta seguire idealmente il cammino del segnale esplorante, all'interno del mezzo, fino al punto in cui interessa visualizzarlo.

Ad esempio, per trovare il primo eco si collega al *generatore* un modulo *interfaccia* con le seguenti caratteristiche:

- mezzo 1 acqua, spessore 0 cm
- mezzo 2 plexiglas, spessore 1.154 cm.

L'uscita di destra rappresenta perciò il segnale riflesso verso il trasduttore dall'interfaccia acqua-plexiglas.

Per ottenere l'impulso di ritorno dalla seconda interfaccia, quella tra il plexiglas e l'acqua, si sfrutta l'uscita di sinistra (segnale trasmesso) del modulo già utilizzato e si collega ad un modulo *interfaccia* descritto dai seguenti parametri:

- mezzo 1 plexiglas, spessore 1.154 cm.
- mezzo 2 acqua, spessore 1.215 cm.

L'uscita corrispondente al segnale riflesso si collega all'ingresso di un altro modulo *interfaccia* con parametri:

- mezzo 1 plexiglas, spessore 1.154 cm.
- mezzo 2 acqua, spessore 0 cm

Il segnale trasmesso da questa (uscita di sinistra), costituisce il secondo eco.

Naturalmente, connettendo una qualsiasi di queste uscite ad un modulo di visualizzazione si può osservare il segnale in quel punto, sia nel tempo che in frequenza.

La figura 6 riporta la struttura completa di una rete per visualizzare nel tempo l'impulso esplorante (fig. 7) e i quattro echi principali (fig. 8) per il mezzo multistrato esaminato in [1]. Con un procedimento analogo si potrebbero studiare le riflessioni multiple all'interno di ciascun strato, nonché gli effetti dell'attenuazione in relazione alle caratteristiche del segnale.

Bibliografia

- [1] M. Bramanti, N. Mancuso *"Ricostruzione del profilo di impedenza e di attenuazione di materiali multistrato mediante tecniche riflettometriche ad ultrasuoni"*. IEI_CNR. Nota interna B4-35, ottobre 1995.
- [2] *"AVS Developer's Guide"*. Advanced Visual Systems Inc.; release 4, May 1992

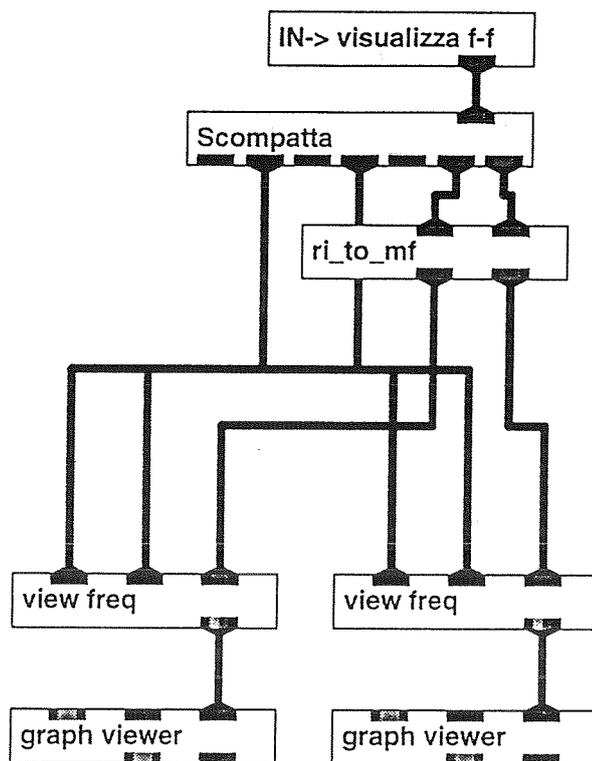


Fig. 3 Schema della sottorete per il modulo *Visualizza f_f*.

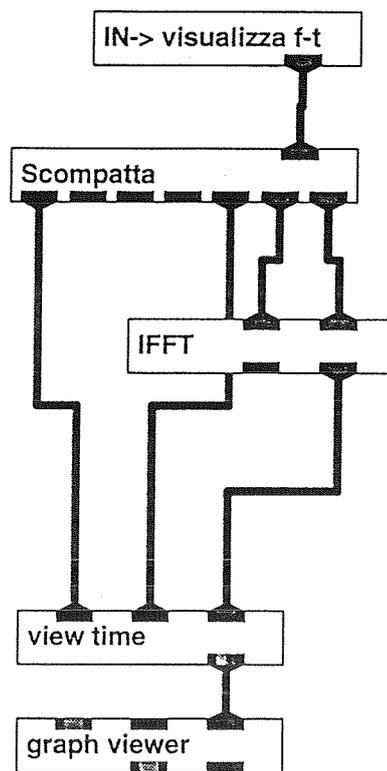


Fig. 4 Schema della sottorete per il modulo *Visualizza f_t*.

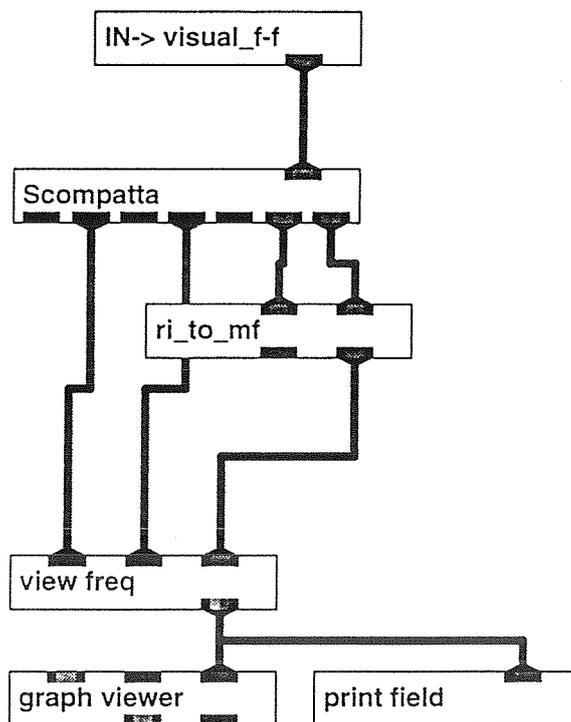


Fig. 5 Schema della sottorete per il modulo *Visual_f_f*.

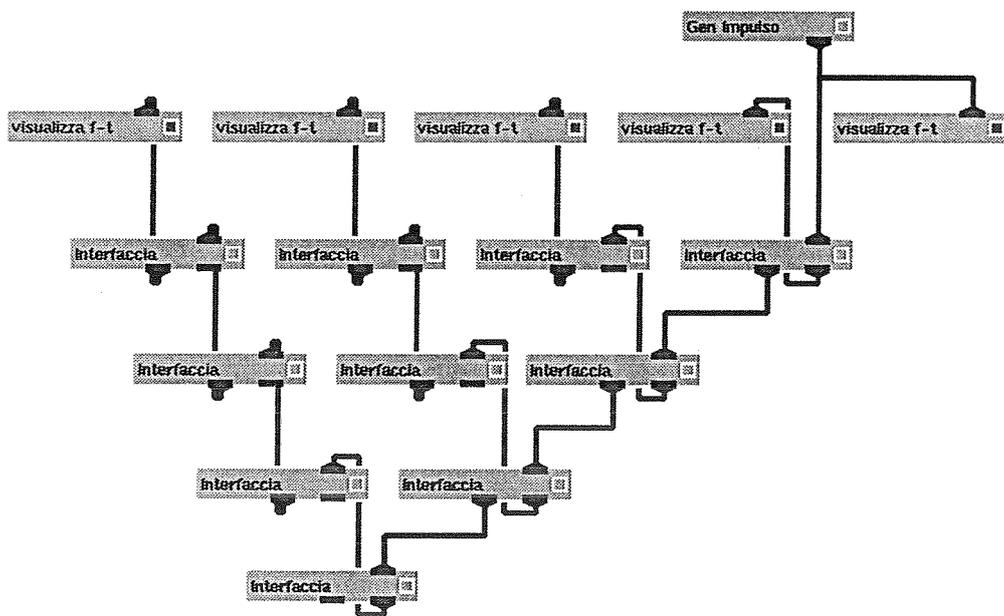


Fig. 6 Struttura della rete per un mezzo a tre strati con il generatore dell'impulso e i moduli per visualizzare il segnale nel tempo.

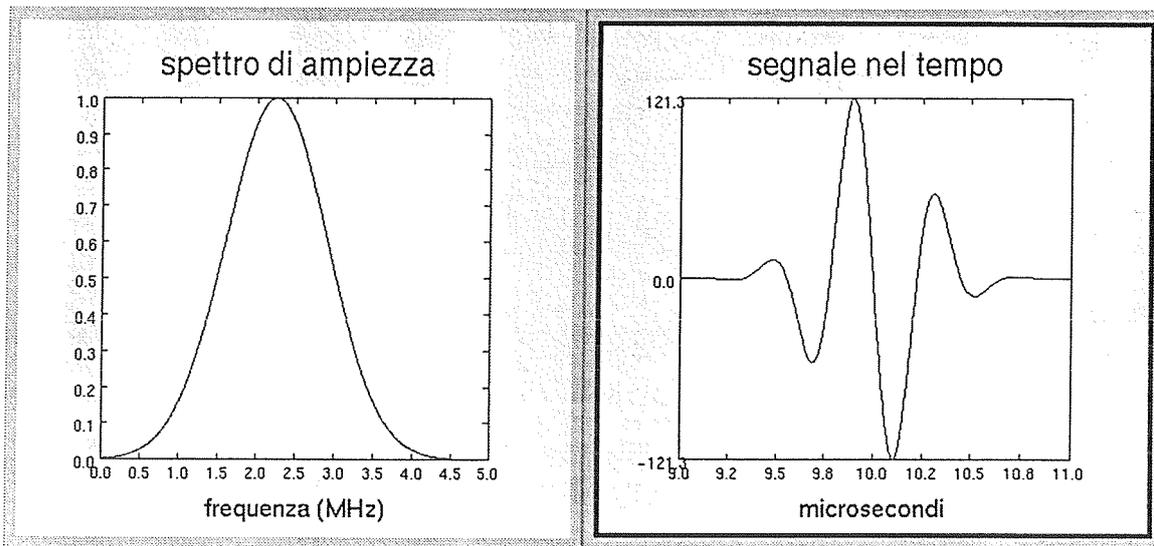


Fig. 7 Mezzo a tre strati (plexiglas, acqua, plexiglas).
Impulso esplorante a banda larga.

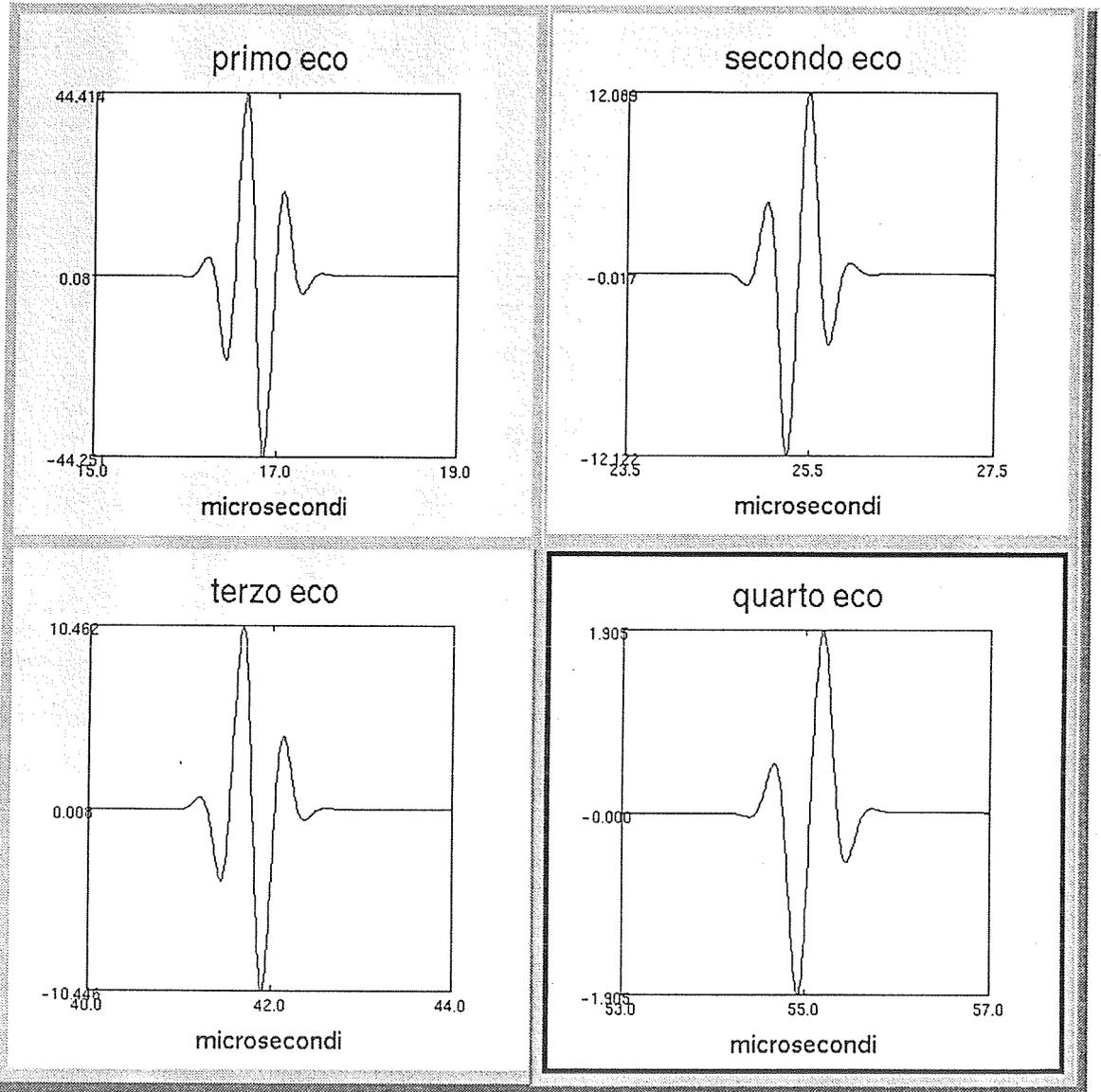


Fig. 8 Mezzo a tre strati (plexiglas, acqua, plexiglas).
 Impulso a banda larga.
 Echi principali ottenuti dal primo lato del campione.