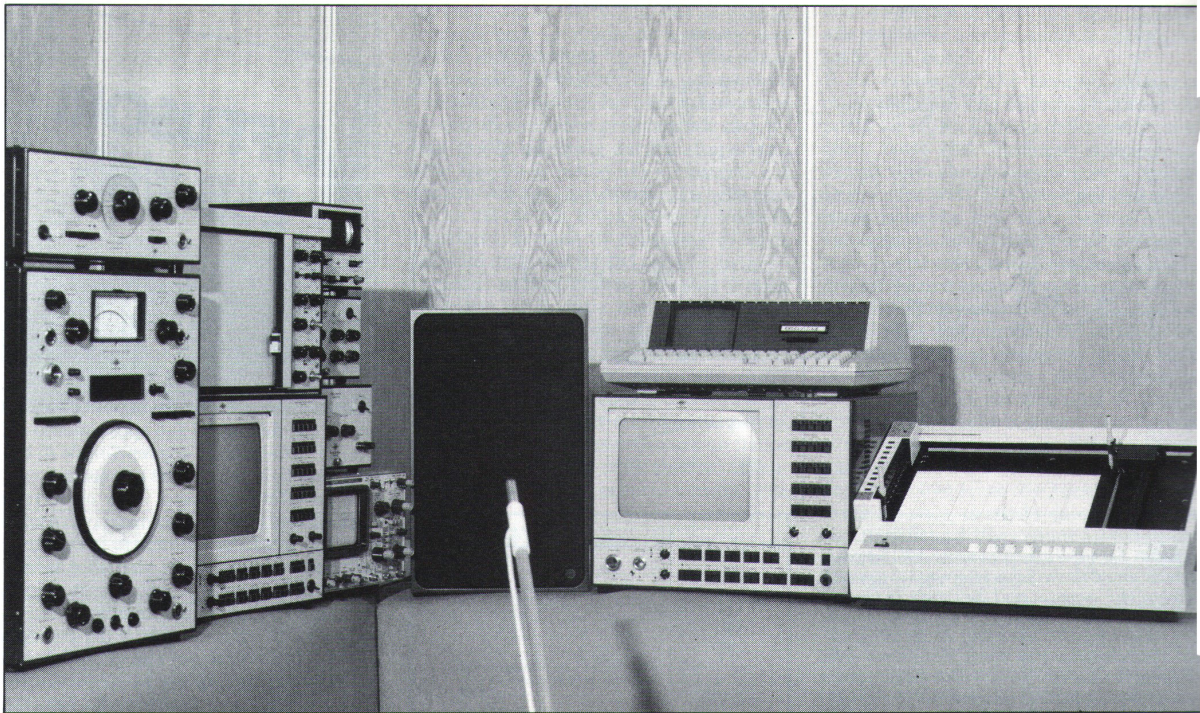


PDF

WWW.RENATOGIUSSANI.IT



Da quando il 30 aprile 1971 Richard Hayser comunicò [1] alla comunità scientifica i particolari del metodo di misura della risposta nel tempo di un sistema di altoparlanti da lui sviluppato, non si può certo dire che questo tipo di misura sia divenuto popolare nonostante esista un forte interesse ad affiancare alle classiche misure di risposta in frequenza misure significative nel dominio del tempo.

Le cause di questa strana situazione possono essere ricercate nel protrarsi per lunghi anni della irreperibilità di strumentazione adatta allo scopo, e nelle oggettive difficoltà concettuali del metodo.

Per lunghi anni lo stesso Heyser, che dal 1974 pubblica misure di risposta nel tempo sulla rivista americana Audio, ha continuato a servirsi di attrezzature autocostruite e solo recentemente il maggior costruttore di strumenti per misure acustiche ha reso disponibile [2] un dispositivo che consente l'esecuzione ad alta velocità di misure di risposta nel tempo.

D'altro canto risulta tutt'altro che intuitivo accettare che la risposta nel dominio del tempo di un sistema di altoparlanti sia qualcosa di più complesso di quel che si può rilevare con microfono ed oscilloscopio, al punto che per lunghi anni le uniche rilevazioni nel dominio del tempo su sistemi di altoparlanti sono state le risposte ai tone-burst. Scopo di questo articolo è chiarire il significato fisico delle misure di risposta nel tempo, illustrare i metodi di misura attualmente disponibili e presentare alcune applicazioni di questa tecnica.

(*) Bruel e Kjaer - Milano — (**) Technimedia - Roma

I SEGRETI DELLA RISPOSTA NEL TEMPO

A dieci anni dalla sua formalizzazione, la misura della risposta nel tempo si avvia ad essere una tecnica di misura di impiego comune. A differenza della frequenza, significato fisico e metodi di misura della risposta nel tempo sono poco intuitivi: per migliorarne la comprensione si suggerisce una similitudine meccanica. Tra le diverse tecniche di misura utilizzabili, quella mista analogico-digitale appare al momento superiore rispetto alle implementazioni parziali con desk top computer.

di Alberto Armani (*) e Paolo Nuti (**)

Cos'è la risposta nel tempo

Uno dei possibili sistemi per misurare la risposta *in frequenza* di un altoparlante consiste nell'inviare al dispositivo in prova un "impulso". L'impulso è un segnale molto importante nella teoria dei sistemi, caratterizzato da ampiezza infinita, durata infinitesima ed area finita. Una delle più interessanti proprietà dell'impulso è quella di essere caratterizzato nel dominio della

frequenza da una distribuzione assolutamente uniforme dell'energia per frequenze comprese tra zero e infinito. Naturalmente un impulso di queste caratteristiche non è fisicamente realizzabile e quindi dobbiamo accontentarci di impulsi di ampiezza finita A e di durata T breve, ma non infinitesima. A questo "impulso pratico" corrisponde nel dominio della frequenza una distribuzione dell'energia praticamente costante per frequenze molto minori di $1/T$ con uno zero alla frequenza $F = 1/T$ (figura 1).

La "risposta impulsiva" dell'altoparlante, cioè il suono emesso quando viene sollecitato con un impulso, può essere registrata e successivamente analizzata in frequenza. Se la durata dell'impulso è sufficientemente breve in relazione alla massima frequenza che si desidera prendere in esame, il risultato di questa analisi è proprio la risposta in frequenza del nostro altoparlante.

L'analisi in frequenza della risposta impulsiva può essere condotta sia con metodi tradizionali, sia con tecniche numeriche. Con l'uno o l'altro sistema, nel passaggio dal dominio del tempo a quello della frequenza avremo eseguito una "trasformata di Laplace". Nel caso delle tecniche numeriche, l'operazione da compiere è una "trasformata di Fourier" (caso particolare di trasformata di Laplace) il cui risultato è, per ciascuna frequenza, una risposta suddivisa in "parte reale" e "parte immaginaria". La parte reale e la parte immaginaria possono essere rappresentati sul "piano complesso" I, R con due vettori ortogonali, la cui somma vettoriale è la risposta a quella frequenza. Il "modulo", cioè la lunghezza del vettore somma, costituisce la risposta del sistema a quella frequenza. Mettendo insieme tutti i moduli calcolati per le diverse frequenze, otteniamo la classica risposta in frequenza che a rigore dovrebbe essere chiamata modulo della risposta in frequenza. Sempre partendo dalla componente reale e quella in quadratura, è possibile calcolare l'argomento (fase) del vettore somma e riportarla in funzione della frequenza (figura 3).

Riassumendo, dalla risposta impulsiva (dominio del tempo), si può passare tramite una trasformata di Fourier al modulo della risposta in frequenza, (risposta in frequenza comunemente intesa) ed alla fase. Questa digressione sulla risposta in frequenza ha lo scopo di introdurre il concetto di risposta nel tempo. Così come la risposta in frequenza è il modulo di un vettore ottenuto dalla somma della parte reale e della parte immaginaria della risposta in frequenza, la risposta nel tempo è il modulo di un vettore costituito dalla somma della parte reale e della parte immaginaria della risposta nel tempo (figura 4).

La parte reale della risposta nel dominio del tempo altro non è che la risposta impulsiva ed ha un preciso significato fisico, ma la parte immaginaria, che Heyser ha battezzato "doppietto" (Doublet) a causa della sua caratteristica simmetria, cos'è? Se riusciamo a rispondere a questa domanda, non solo apparirà chiaro il significato fisico di risposta nel tempo, ma anche come arrivare ad ottenerla!

Una similitudine meccanica

Come spesso accade in elettrotecnica, elettronica e fisica, una similitudine meccanica può essere di grande aiuto per comprendere come vanno le cose.

Consideriamo un sistema costituito da una massa collegata ad una molla. Per nostra comodità supponiamo che la massa sia in

grado di muoversi, senza alcun attrito, lungo una retta orizzontale (figura 5). L'altro estremo della molla sia collegato ad un "muro" perfettamente rigido. Inizialmente il sistema è a riposo; se ora esercitiamo una forza sulla massa, per esempio atta a comprimere la molla, la posizione di riposo cambia e quando la nostra azione cessa il sistema si mette ad oscillare con moto armonico, vale a dire che sia lo spostamento rispetto al punto di riposo sia la velocità con cui la massa è messa in movimento variano nel tempo con legge sinusoidale. Cosa è avvenuto? Comprimento la molla, abbiamo eseguito un certo lavoro; l'energia corrispondente a questo lavoro è stata ceduta alla molla e immagazzinata nel sistema come energia potenziale; rilasciando la molla, la massa si mette in movimento, l'energia potenziale si trasforma gradualmente in energia cinetica e poi di nuovo in energia potenziale quando la molla raggiunge il massimo dell'allungamento. Poiché abbiamo supposto che il tutto avvenga senza attriti, il movimento dura indefinitamente.

Ricordando alcuni semplici concetti di meccanica, si possono scrivere le equazioni che esprimono la posizione e la velocità della massa nonché l'energia cinetica e l'energia potenziale del sistema in funzione del tempo. I calcoli, per altro elementari sono in appendice, in questa sede preme solo sottolineare due risultati fondamentali:

1 - l'energia totale del sistema, somma di quella potenziale e di quella cinetica, è costante e pari a quella inizialmente trasmessa dall'esterno.

2 - la legge (sinusoidale) di variazione nel tempo dell'energia cinetica può essere ottenuta a partire da quella dell'energia potenziale mediante un semplice sfasamento di 90 gradi.

Vediamo ora di applicare questi risultati al caso dell'altoparlante. L'energia potenziale accumulata a causa delle variazioni di pressione (l'omologo acustico della forza esercitata dal nostro dito) nel d'intorno di un certo punto dello spazio è proporzionale al quadrato della pressione, mentre l'energia cinetica è proporzionale al quadrato della velocità dell'aria.

Quando con il nostro microfono rileviamo la risposta impulsiva dell'altoparlante, di fatto misuriamo una pressione sonora, grandezza, lo abbiamo detto, correlata all'energia potenziale. A questo punto dovrebbe essere chiaro che il famoso Doublet, componente immaginaria della risposta nel tempo e quindi per definizione in quadratura con la componente reale, altro non è che il termine corrispondente all'energia cinetica e che può essere ottenuto dalla risposta impulsiva mediante una "semplice" rotazione di fase di 90 gradi. La somma dell'energia potenziale (proporzionale al quadrato della risposta impulsiva) e dell'energia cinetica (proporzionale al quadrato della componente immaginaria) costituisce, nell'ipotesi di trascurare la dissipazione nell'aria, l'energia totale. Per questo motivo Heyser ha originariamente chiamato questa misura "Energy Time" o "ETC" (Energy Time Curve) pur utilizzando indifferentemente [3] anche il termine "Time Response", risposta nel tempo, duale del ben noto "Frequency Response", risposta in frequenza.

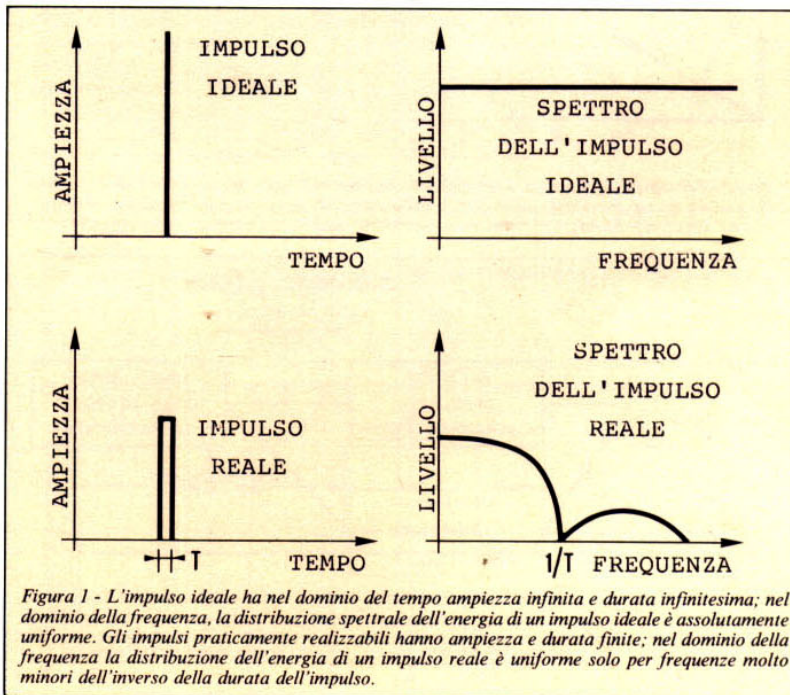


Figura 1 - L'impulso ideale ha nel dominio del tempo ampiezza infinita e durata infinitesima; nel dominio della frequenza, la distribuzione spettrale dell'energia di un impulso ideale è assolutamente uniforme. Gli impulsi praticamente realizzabili hanno ampiezza e durata finite; nel dominio della frequenza la distribuzione dell'energia di un impulso reale è uniforme solo per frequenze molto minori dell'inverso della durata dell'impulso.

Metodi di misura della risposta temporale

Dicevamo che per ottenere il fatidico doppietto o componente immaginaria della risposta impulsiva è sufficiente una "semplice" rotazione di fase di 90 gradi. Ma se è facile ruotare di 90 gradi un segnale sinusoidale (basta scambiare un seno in coseno) come ruotare di 90 gradi la risposta impulsiva?

È stato recentemente scritto [4] "È evidente che soltanto il computer consente questo salto di qualità, cioè il ragionamento con grandezze vettoriali anziché con numeri semplici". Questa frase è destituita di fondamento al punto che il primo banco di misura realizzato da Richard Heyser [1] era completamente analogico e che in atte-

sa che trovi pratica realizzazione l'analizzatore numerico veloce di risposta nel tempo, le procedure di misura completamente digitali implementate fino a questo momento (desk-top computer + FFT Analyzer) sono da 10 a 200 volte più lente dei metodi misti (TDS + FFT).

È viceversa vero che, pur nella sua obiettiva complessità, è inizialmente più facile comprendere il funzionamento della procedura presupponendo che sia completamente numerica.

Per ruotare di 90 gradi (nel dominio del tempo) la risposta impulsiva occorre prima di tutto passare dal dominio del tempo a quello della frequenza, cioè eseguire una trasformata di Fourier; arrivati nel dominio

della frequenza si ruota la fase di 90 gradi e poi, con una "antitrasformata" si torna al dominio del tempo. Fatto: quel che abbiamo ottenuto è la componente immaginaria della risposta impulsiva, cioè il famoso doppietto.

Il procedimento di trasformazione da un dominio all'altro, rotazione di 90 gradi, rientra nel dominio originario mediante antitrasformazione che abbiamo descritto, realizza una operazione che va sotto il nome di "trasformata di Hilbert".

Anche la trasformata di Hilbert ha un ruolo di primaria importanza nei legami che intercorrono nella mappa dei domini di figura 6. Al pari della risposta impulsiva e del doppietto, anche la parte reale ed immaginaria della risposta impulsiva sono legate da una trasformata di Hilbert; così come tramite una trasformata di Hilbert è possibile passare dalla risposta in frequenza alla risposta in fase a condizione che il sistema sia "a fase minima"; in caso contrario la "fase di Hilbert" calcolata a partire dalla risposta in frequenza e quella rilevata direttamente non coincidono; di fatto questo confronto consente di stabilire con certezza se il sistema come spesso accade nel caso degli altoparlanti, non è a fase minima.

Abbiamo visto come sia possibile risalire alla risposta nel tempo attraverso il calcolo della componente immaginaria della risposta nel tempo a partire dalla risposta impulsiva mediante un'operazione chiamata trasformata di Hilbert implementata con tecniche numeriche. È però possibile giungere allo stesso risultato partendo dal dominio della frequenza ed in particolare dalla risposta in frequenza complessa.

Dal punto di vista storico, questo è il metodo originariamente impiegato da Heyser che realizzò un dispositivo completamente analogico per eseguire una trasformata inversa di Fourier a partire dalla risposta in frequenza del sistema misurata con il metodo della spettrometria a ritardo di tempo (TDS, Time Delay Spectrometry).

Per rendersi conto di come sia possibile risalire dalla risposta in frequenza complessa alla risposta nel tempo, basta dare un'occhiata alle figure 2 e 4: così come dal dominio del tempo si può risalire alla risposta in frequenza mediante una trasformata di Fourier e poi calcolarne il modulo come radice quadrata della somma dei quadrati della parte reale e immaginaria, dal dominio della frequenza basta una trasformata inversa di Fourier seguita dalle stesse operazioni.

In definitiva e sotto opportune ipotesi, lo stesso strumento in grado di calcolare la risposta in frequenza a partire dalla risposta impulsiva, è in grado di calcolare la risposta nel tempo a partire dalla risposta in frequenza complessa. In base a questa considerazione è possibile realizzare il sistema di misura illustrato in figura 7 composto da un banco per misure di risposta in frequenza e fase con il metodo della TDS ed un analizzatore FFT. Questa combinazione di strumenti presentata per la prima

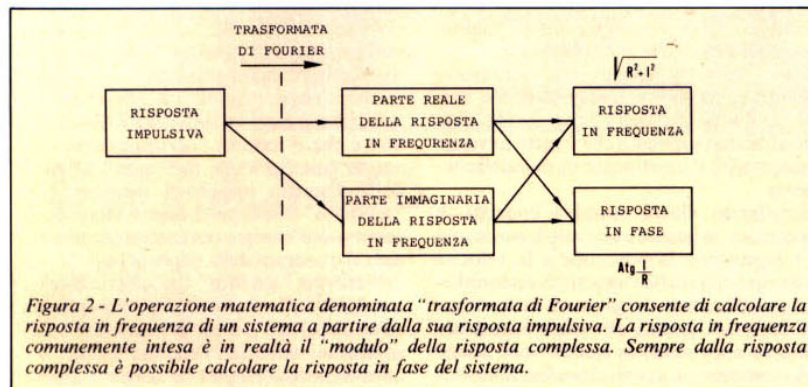


Figura 2 - L'operazione matematica denominata "trasformata di Fourier" consente di calcolare la risposta in frequenza di un sistema a partire dalla sua risposta impulsiva. La risposta in frequenza comunemente intesa è in realtà il "modulo" della risposta complessa. Sempre dalla risposta complessa è possibile calcolare la risposta in fase del sistema.

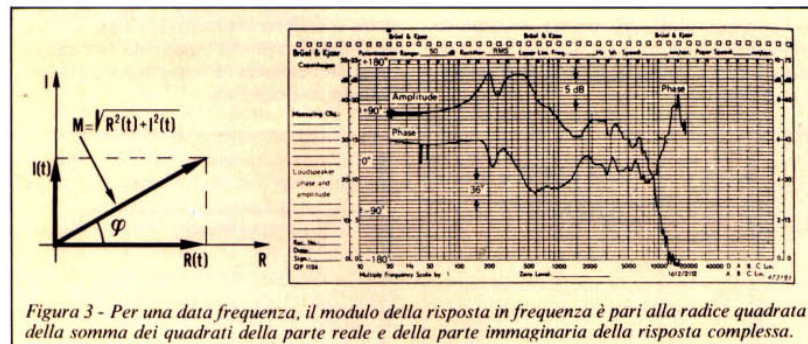


Figura 3 - Per una data frequenza, il modulo della risposta in frequenza è pari alla radice quadrata della somma dei quadrati della parte reale e della parte immaginaria della risposta complessa.

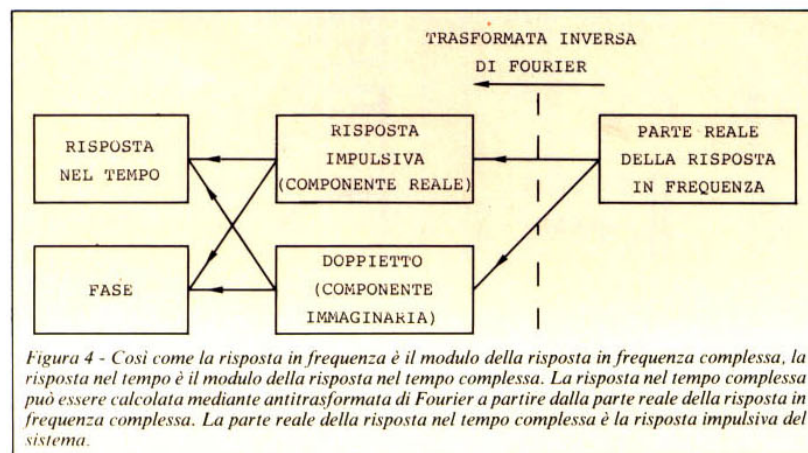


Figura 4 - Così come la risposta in frequenza è il modulo della risposta in frequenza complessa, la risposta nel tempo è il modulo della risposta nel tempo complessa. La risposta nel tempo complessa può essere calcolata mediante antitrasformata di Fourier a partire dalla parte reale della risposta in frequenza complessa. La parte reale della risposta nel tempo complessa è la risposta impulsiva del sistema.

volta da Heyser [6], sperimentata anche in Italia [7] ed ormai reperibile in commercio [2], consente di rilevare la risposta nel tempo o curva energia tempo in uno o due secondi. La velocità di esecuzione della misura è di notevole aiuto sia nella ricerca che nell'eliminazione delle cause di eventuali anomalie.

In attesa che vengano realizzati analizzatori digitali di risposta nel tempo di alta velocità, l'unica alternativa al sistema di figura 7 è quello illustrato in figura 8 composto da un analizzatore FFT e un desk top computer. A seconda della potenza del computer, della risoluzione richiesta, della ottimizzazione del programma, il tempo di calcolo di una risposta temporale è compreso tra i 20 secondi e i 5-8 minuti. Il primo programma di calcolo della "Time response" per configurazioni simili a quella di figura 8 è stato implementato nel 1979 in Danimarca per un analizzatore Bruel Kjaer 2031 connesso a desk-top computer HP 9825 con linguaggio HPL; successivamente Armani ne realizzò una versione in BASIC per computer HP85 e analizzatori BK 2031 o 2033 facilmente adattabile ad altre macchine in BASIC con BUS IEEE 488 (HP-IB) come, ad esempio, l'HP-9835.

Applicazioni pratiche della risposta nel tempo

Il risultato di una misura di risposta nel tempo di un altoparlante esprime la quantità di energia totale emessa dal sistema e pervenuta nel punto in cui è posto il microfono.

Supponiamo (figura 9) di aver posto il microfono ad 1 metro esatto dall'altoparlante. In questo caso, assunta una velocità del suono pari a 341 metri al secondo, l'energia emessa giunge al microfono dopo 2.93 ms. Se l'altoparlante fosse ideale e caratterizzato da larghezza di banda infinita, il picco di energia sarebbe infinitamente stretto. La larghezza di banda è invece ridotta ed il picco di energia si "allarga" tanto più quanto più ridotta è la larghezza di banda del trasduttore impiegato. Supponiamo ora di disporre una superficie riflettente come in figura 10. Nel punto di misura si riceverà un picco di energia dopo il tempo corrispondente al cammino di 1 metro (2.93 ms) ed un secondo picco dopo il tempo corrispondente alla lunghezza del percorso del suono riflesso (3.43 millisecondi). Ad un risultato analogo si può giungere ponendo (figura 11) una parete riflettente (per esempio il fondo di una casa!) dietro l'altoparlante.

Picchi secondari possono essere causati non solo per riflessione, ma anche per diffrazione. E questo, purtroppo, avviene spesso nei sistemi di altoparlanti. Il tempo di ritardo tra l'emissione principale e le spurie, consente spesso di identificare la causa di una anomalia nella risposta temporale dovuta a riflessione o rifrazione, ma per maggior sicurezza si possono schermare o altrimenti assorbire le emissioni indesiderate. Questa procedura è di particolare interesse in sede di progetto del sistema di

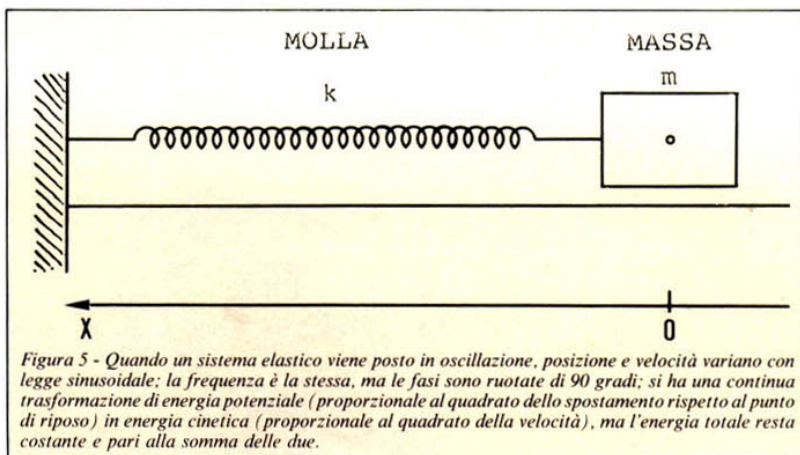


Figura 5 - Quando un sistema elastico viene posto in oscillazione, posizione e velocità variano con legge sinusoidale; la frequenza è la stessa, ma le fasi sono ruotate di 90 gradi; si ha una continua trasformazione di energia potenziale (proporzionale al quadrato dello spostamento rispetto al punto di riposo) in energia cinetica (proporzionale al quadrato della velocità), ma l'energia totale resta costante e pari alla somma delle due.

altoparlanti durante il quale ricopre particolare importanza la possibilità di verificare rapidamente gli effetti di una correzione (per esempio pannello assorbente sul fron-

tale della cassa, eliminazione di cornici e/o spigoli, etc.) e dunque il banco di misura più adatto è quello di figura 7. Sottolineiamo come la progressiva elimi-

ENERGIA POTENZIALE ED ENERGIA CINETICA DI UN SISTEMA ELASTICO

Si consideri il sistema costituito da una molla di costante elastica k ed una massa m . Esercitando sull'elemento m una forza F , si ha uno spostamento proporzionale alla forza secondo la relazione

$$F = k x \quad (1)$$

Se la forza applicata è tale da determinare uno spostamento A , il lavoro compiuto ed accumulato sotto forma di energia potenziale è pari a:

$$U = 1/2 k A^2 \quad (2)$$

Al cessare improvviso della forza F il sistema si mette ad oscillare con pulsazione $\omega = \sqrt{k/m}$ (3)

cui corrisponde la frequenza

$$f = 2\pi \omega \quad (4)$$

lo spostamento in funzione del tempo è dato da:

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (5)$$

mentre la velocità (derivata dello spostamento) vale:

$$v(t) = A \omega \cos(\omega t) \quad (6)$$

ed è quindi costantemente in quadratura con lo spostamento.

Istantaneamente, l'energia potenziale U vale

$$U(t) = 1/2 k A^2 \sin^2(\omega t) \quad (7)$$

mentre l'energia cinetica T vale

$$T(t) = 1/2 m A^2 \omega^2 \cos^2(\omega t) \quad (8)$$

L'energia totale E vale (sostituendo la 3 nella 8)

$$E(t) = U(t) + T(t) = 1/2 k A^2 (\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t)) \quad (9)$$

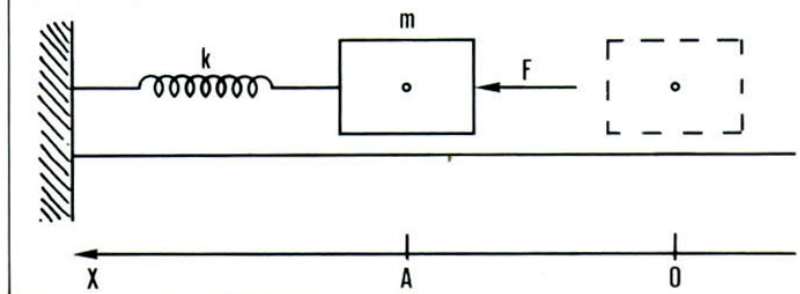
La somma del quadrato del seno e del coseno vale 1 e quindi l'energia totale è costante!

Sviluppando il quadrato del seno e del coseno si ottengono per l'energia potenziale e l'energia cinetica le espressioni

$$U(t) = 1/2 k A^2 (1/2 - 1/2 \cos(2\omega t)) \quad (10)$$

$$T(t) = 1/2 k A^2 (1/2 + 1/2 \cos(2\omega t)) \quad (11)$$

U e T , in opposizione di fase alla pulsazione 2ω , sono in quadratura (sfasate di 90 gradi) alla pulsazione ω , esattamente come spostamento e velocità.



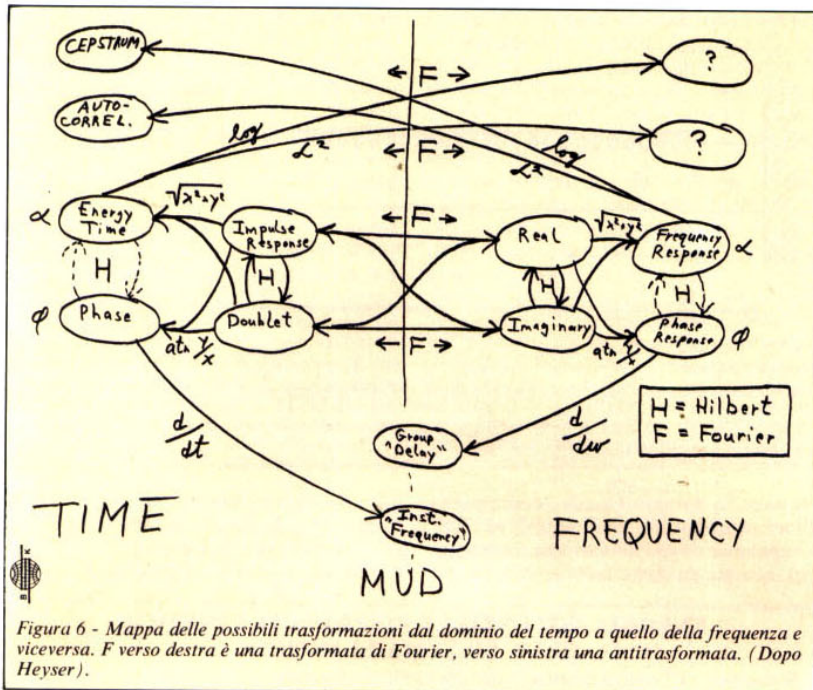


Figura 6 - Mappa delle possibili trasformazioni dal dominio del tempo a quello della frequenza e viceversa. F verso destra è una trasformata di Fourier, verso sinistra una antitrasformata. (Dopo Heyser).

nazione di anomalie della risposta nel tempo dovute a effetti di riflessione, rifrazione, ritardi di emissione tra gli altoparlanti o ritardi di gruppo introdotti dalla rete di crossover, trovi puntuale riscontro nel miglioramento della risposta in frequenza. Le applicazioni delle misure energia-tempo non si esauriscono però nella progettazione o verifica dei sistemi di altoparlanti: riveste ad esempio elevato interesse la possibilità di misurare coefficienti di riflessione di materiali acustici già installati. Ad esempio, con riferimento alla figura 10, il rapporto tra l'energia diretta e quella riflessa, tenuto conto delle differenze di percorso, consente di risalire facilmente al coefficiente di riflessione.

Conclusioni

La misura della risposta nel tempo di un altoparlante o sistema di altoparlanti è più complessa della misura della risposta in frequenza, ma consente di trarre utili informazioni sulle cause di anomalie introdotte nel sistema da riflessioni, rifrazioni, sfasamenti e ritardi. Pur nella generale complessità concettuale, il metodo di misura con analizzatore FFT + desk-top computer appare sostanzialmente meno complesso di quello misto

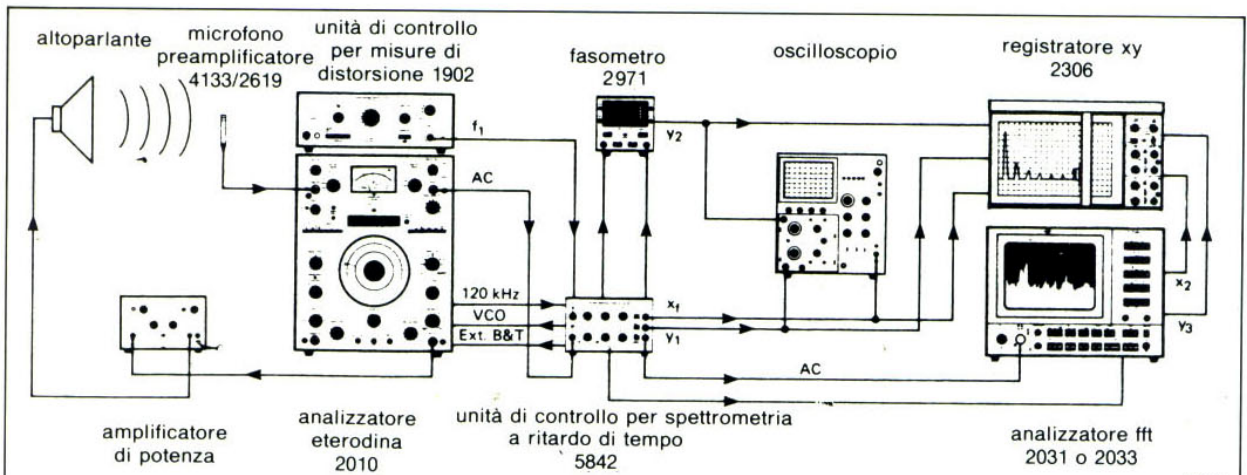


Figura 7 - Banco per misure di risposta nel tempo e spettrometria a ritardo di tempo. La spettrometria a ritardo di tempo consente di eseguire misure di risposta in frequenza e fase in campo libero simulato in un tempo tipicamente compreso tra 0.5 e 2 secondi. Partendo dalla risposta in frequenza misurata con il metodo della TDS (Time Delay Spectrometry) è possibile ottenere risposte nel tempo aggiornate ogni 2 secondi.

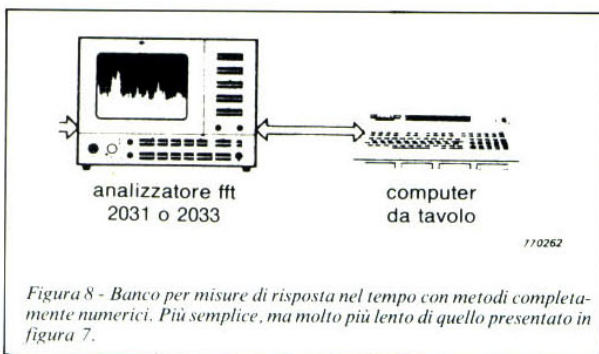
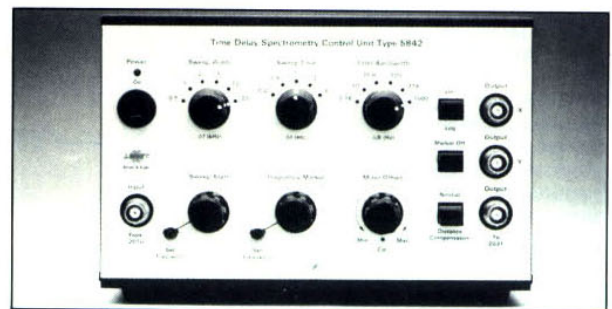


Figura 8 - Banco per misure di risposta nel tempo con metodi completamente numerici. Più semplice, ma molto più lento di quello presentato in figura 7.



Unità di controllo per misure di risposta nel tempo e spettrometria temporale modello 5842 di costruzione Bruel Kjaer.

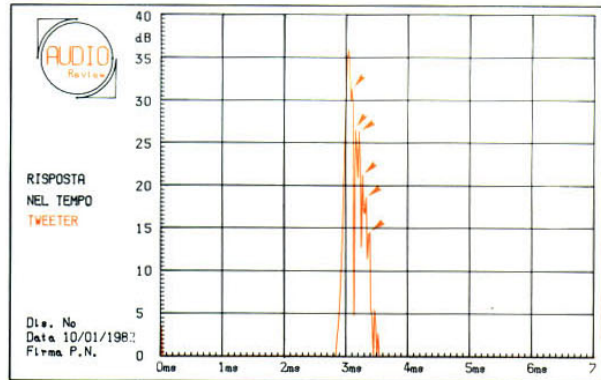
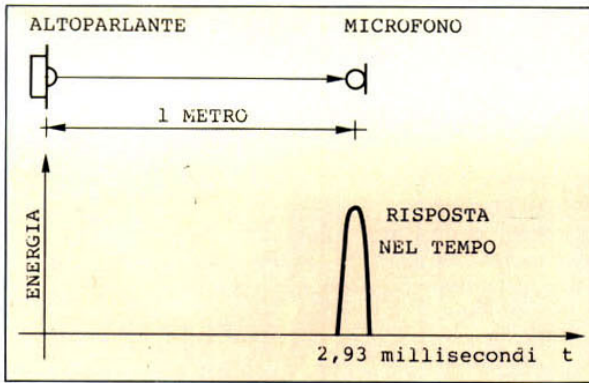


Figura 9 - Risposta nel tempo di un altoparlante ideale (sinistra) e caso reale (destra). I picchi indicati dalle frecce sono dovuti alla diffrazione originata da viti e bordi dell'altoparlante.

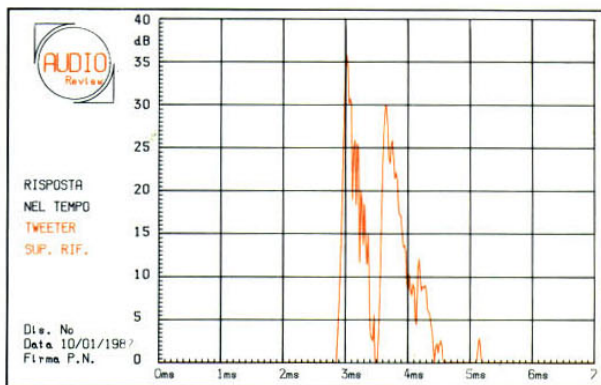
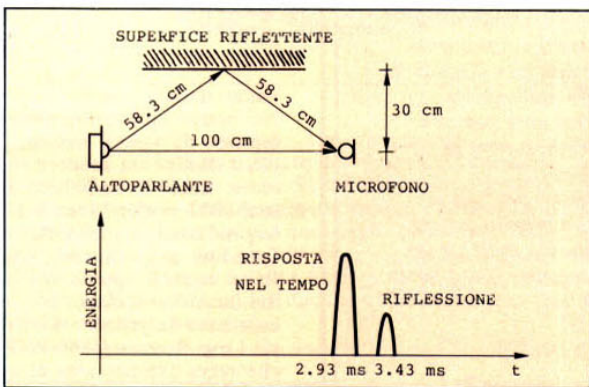


Figura 10 - Risposta nel tempo di un altoparlante ideale in presenza di una riflessione (sinistra) e caso reale (destra).

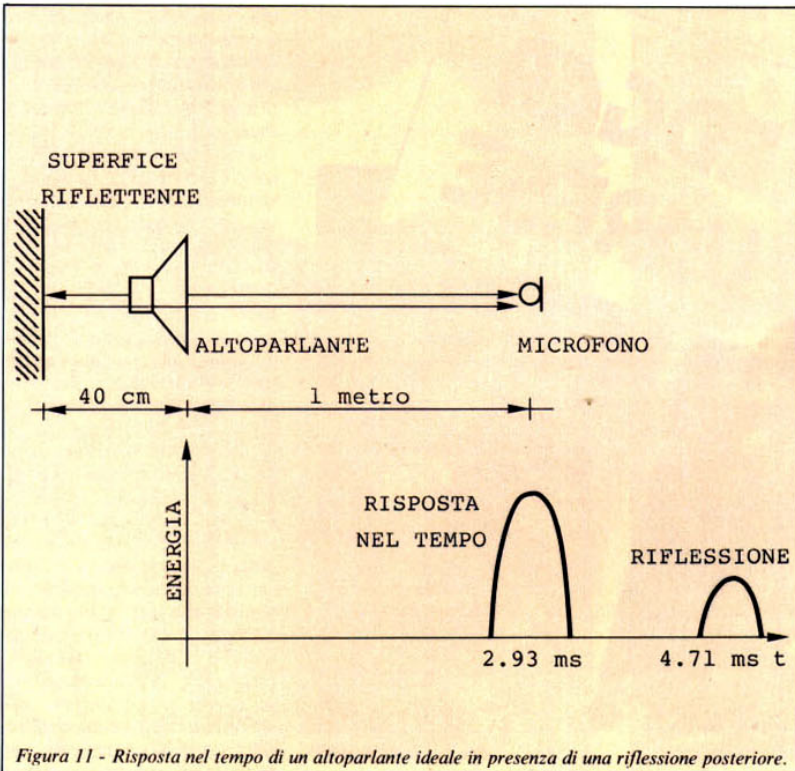


Figura 11 - Risposta nel tempo di un altoparlante ideale in presenza di una riflessione posteriore.

analogico-digitale. Quest'ultimo è però nettamente superiore dal punto di vista del tempo di esecuzione della misura e consente di verificare immediatamente le ipotesi sulle cause delle anomalie l'effetto delle correzioni apportate.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Heyser C. R. - Determination of Loudspeaker Signal Arrival Times - JAES Oct, Nov, Dec 1971 (ripubblicato in "Loudspeakers, An Antology", AES 1978 pp 225-244).
- [2] Bruel Kjaer System Development - Time Delay Spectrometry Control Unit Type 5842.
- [3] Heyser C. R. - Energy-Time Test - Audio, June 1976, pp 74-80.
- [4] Gandolfi G., Mazzacurati G. - TR risposta nel tempo degli altoparlanti parte prima teoria - Suono, Dic. 1981, pp. 90-95.
- [5] Heyser C. R. - Acoustical Measurements by Time Delay Spectrometry - JAES Vol 15, 1967, pp. 337.
- [6] Heyser C. R. - Advanced Audio Measurements - Seminario 29-31 agosto 1979, Bruel Kjaer, Naerum Denmark (presenti per l'Italia: Armani A., Gandolfi G., Giussani R., Nuti P.).
- [7] Nuti P. - TDS e energia tempo - Suono n. 82, Aprile 1980, p. 82.

www.renatogiussani.it