

LA MISURA DELLA RISPOSTA ALL'IMPULSO PER LA CARATTERIZZAZIONE DI SISTEMI ACUSTICI E VIBRAZIONALI

Angelo Farina (1), Andrea Capra (1), Simone Campanini (1)

1) Università degli Studi di Parma, Dip. Ing. Industriale, Parma

1. Introduzione

Allorché si vuole analizzare il comportamento di un sistema acustico, elettroacustico o vibrazionale che possa ragionevolmente venire schematizzato come sistema LTI (Lineare Tempo Invariante), si tratta di determinarne sperimentalmente la cosiddetta "Risposta all'Impulso". Essa è definita come il segnale che esce dal sistema allorché si applica come input allo stesso uno speciale segnale impulsivo, definito matematicamente "funzione Delta di Dirac". Se, come usuale, utilizziamo segnali digitali con codifica PCM, un segnale Delta di Dirac è costituito da una lunga sequenza di campioni di ampiezza "zero", contenente nel mezzo un unico campione avente valore pari al fondo scala, nominalmente assunto pari a 1.

Tuttavia, la misura della Risposta all'Impulso utilizzando un segnale Delta di Dirac presenta numerosi problemi: cattivo rapporto segnale-rumore, rischio di eccitare fenomeni non lineari causa l'utilizzo di un segnale con elevatissimo "slew rate", presenza nel segnale di test di frequenze molto basse e molto alte che possono danneggiare i trasduttori.

Di conseguenza, sono state sviluppate tecniche "indirette" di misura della Risposta all'Impulso, basate sull'utilizzo di segnali di test diversi dal segnale Delta di Dirac. In ordine di tempo, si è visto affermarsi per primo il cosiddetto segnale di rumore bianco pseudo-causale "MLS", seguito dal segnale "sweep sinusoidale lineare", a cui si è recentemente iniziato a preferire il segnale "sweep sinusoidale esponenziale".

In questo articolo viene presentata la base matematica che consente di ricavare la risposta all'impulso dal risultato di una misura effettuata con questi "strani" segnali di test. Vengono poi discussi pregi e difetti di ciascuna delle tre tecniche su enunciate, ed infine viene presentata una serie di accorgimenti operativi che consentono di risolvere praticamente tutti i problemi, facendo impiego del segnale ESS (Exponential Sine Sweep) e di opportune tecniche di filtraggio digitale basate sul metodo di inversione di Kirkeby.

La presentazione è corredata di opportuni esempi, che illustrano in modo evidente gli artefatti di misura derivanti da inappropriati utilizzi dei metodi esposti.

2. I sistemi di rilevamento tradizionali

2.1 Il metodo impulsivo

Un modo classico per misurare un sistema come un altoparlante o un amplificatore è quello di applicare un impulso unitario all'ingresso ed osservare l'uscita del sistema. Se il segnale applicato all'ingresso è molto simile ad un impulso ideale, l'uscita sarà la risposta all'impulso del sistema. Da questa si possono calcolare la risposta in frequenza ed altre utili informazioni.

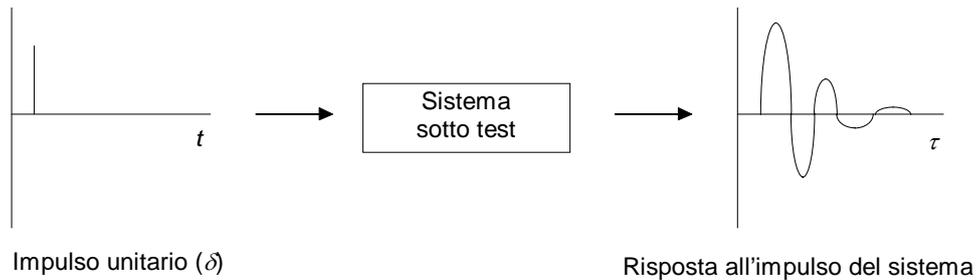


Figura 1 – Risposta all'impulso di un sistema

Questo metodo è valido ed accurato ed è comunemente usato; ha però uno svantaggio: il segnale di prova da applicare all'ingresso deve essere sufficientemente simile ad un impulso ideale per ottenere buoni risultati. Sfortunatamente, un impulso che si avvicini a quello reale è di durata così corta che, per qualsiasi ampiezza che non sovraccarichi l'apparecchio, contiene troppo poca energia. Se nella misura non c'è rumore, questo problema risulta irrilevante; tale metodo, infatti, funziona ottimamente in laboratorio ed in uffici silenziosi. In un ambiente reale, la situazione è invece quella mostrata in fig. 2:

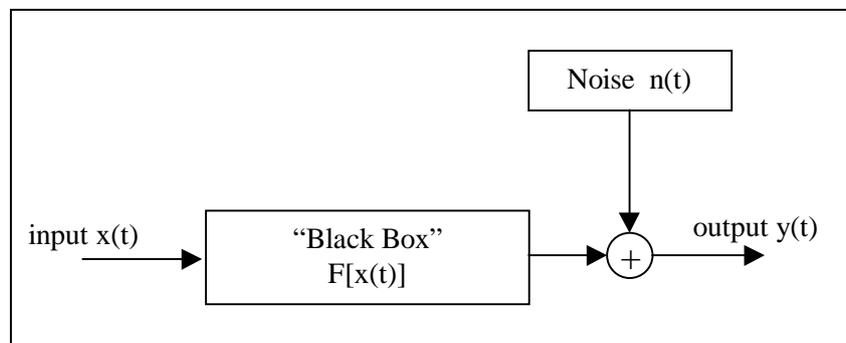


Figura 2 – Sistema lineare con rumore

Nel caso di misure acustiche nelle sale, perdipiù, il sistema in prova comprende inevitabilmente anche le distorsioni dei trasduttori impiegati, in particolare dell'altoparlante, come mostrato nella fig. 3.

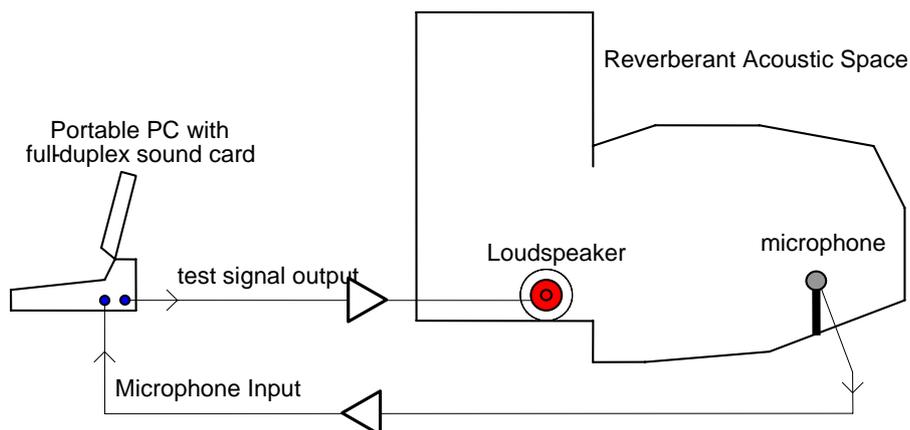


Figura 3 – Catena di misura in un teatro

In queste condizioni può divenire necessario effettuare una media sincrona su numerose ripetizioni del segnale di test, onde ottenere un ragionevole rapporto S/N, senza essere costretti a spingere l’altoparlante a potenze insostenibili.

2.2 Il metodo MLS

Una sequenza di massima lunghezza (*MLS*) è un tipo di segnale che può essere usato per misurare sistemi a due porte, come altoparlanti, sale e la maggior parte degli apparecchi che abbiano un’entrata ed un’uscita. Un segnale *MLS* riprodotto da un altoparlante assomiglia ad un rumore bianco. La caratteristica del rumore bianco è di essere casuale e non periodico, quindi per misurare il rumore bianco è necessario mediare la misura per un tempo relativamente lungo, per essere sicuri di stimare correttamente il suo spettro a lungo termine.

Le sequenze di massima lunghezza appartengono alla famiglia dei segnali pseudocasuali. Un segnale pseudocasuale è la ripetizione di una sequenza, di durata definita, ma con qualche caratteristica simile a quelle del rumore casuale. Il rumore pseudocasuale può avere un andamento temporale ed uno spettro simili a quelli del rumore bianco. Infatti, se la sequenza che verrà ripetuta è abbastanza lunga (forse qualche minuto), il segnale pseudocasuale è essenzialmente indistinguibile dal rumore bianco.

Questo è il metodo su cui sono basati la maggior parte di generatori di rumore “casuale”.

Un segnale *MLS* si può pensare come una ripetizione di una stessa sequenza di impulsi positivi e negativi, di uguale ampiezza, distribuiti in modo casuale. Poiché, tipicamente, ci sono migliaia di questi impulsi per ogni sequenza, il segnale contiene un più elevato contenuto energetico del classico impulso di prova, il quale contiene un solo impulso per ogni intervallo di misura. Come per altri segnali di misura pseudocasuali, anche il segnale *MLS* potrebbe essere utilizzato, per ottenere la risposta dell’apparecchio, insieme alle tradizionali tecniche di *FFT*. Ma, viste le peculiarità dell’*MLS*, si può utilizzare un metodo più semplice: la correlazione.

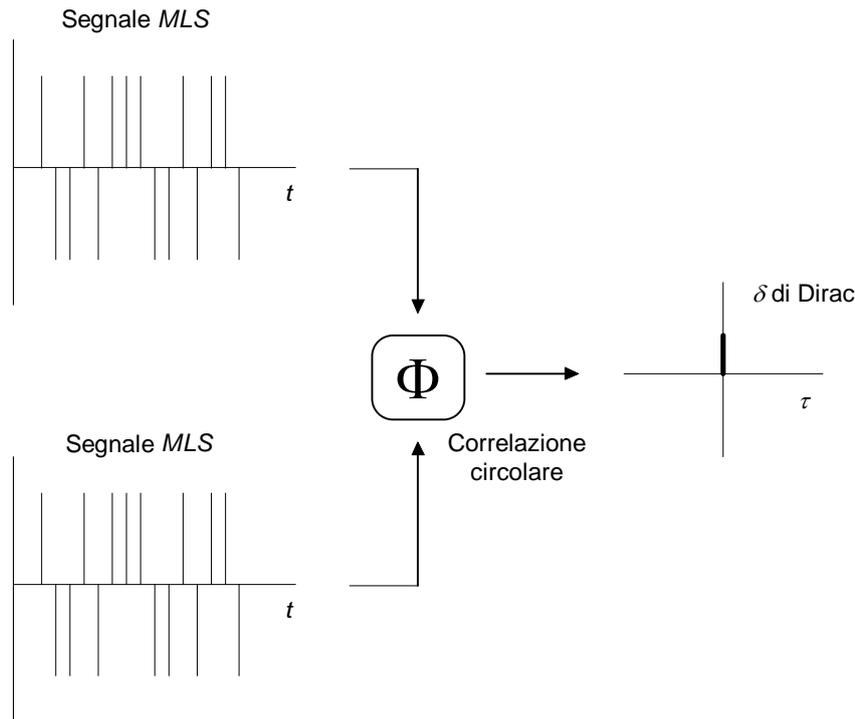


Figura 4 – L'autocorrelazione di un segnale MLS con se stesso produce una δ di Dirac

La correlazione è un'operazione mediante la quale si confronta una cosa con un'altra. Nelle misure audio, solitamente vengono confrontati due segnali nel dominio del tempo. Se essi sono uguali, la correlazione è massima. In pratica, la correlazione consiste nell'introdurre un ritardo temporale fra i due segnali da confrontare. Tale ritardo viene solitamente indicato con τ , al posto di t che indica il tempo "reale". Per segnali identici, non ritardati fra di loro, con $\tau = 0$, la correlazione è massima e vale 1.

La correlazione circolare, che a volte viene implementata attraverso la *FHT* (Fast Hadamard Transform), può essere persino più veloce ed efficiente della normale *FFT*. La correlazione circolare di un segnale *MLS* con se stesso risulta essere un impulso.

Per misurare la risposta all'impulso di un sistema, si applica il segnale *MLS* al suo ingresso. Il segnale di uscita viene correlato con il segnale di ingresso, e si ricava così la risposta all'impulso del sistema. Il segnale *MLS* utilizzato deve essere lungo almeno quanto il tempo di riverbero dell'ambiente da misurare. Di solito si usano due sequenze di tale lunghezza: la prima assicura che l'apparecchio sia veramente a regime, mentre la seconda serve per la misura vera e propria [1].

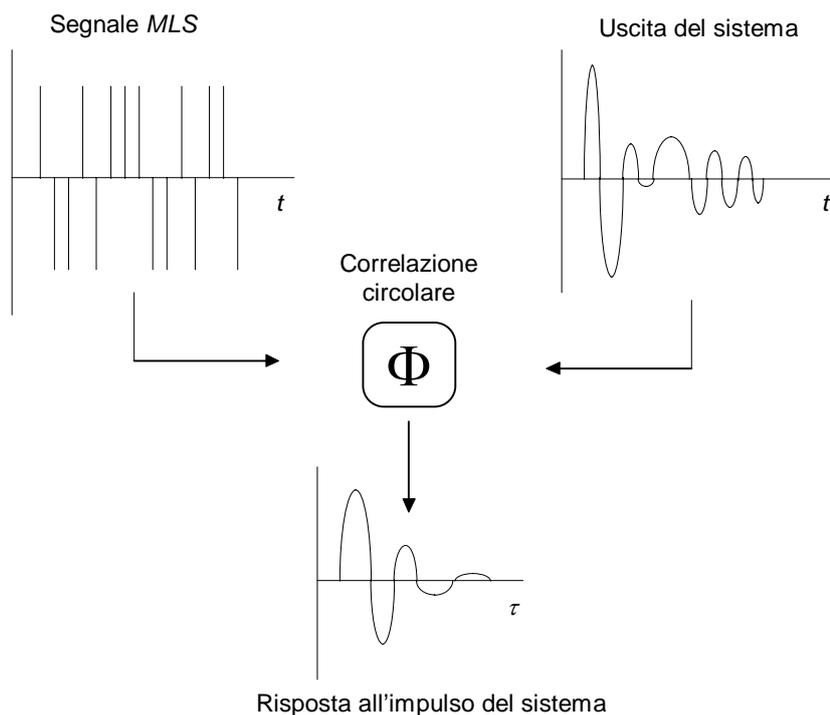


Figura 5 – La Correlazione circolare dell'uscita del sistema con il segnale MLS applicato al suo ingresso dà la risposta all'impulso del sistema

Una volta ottenuta la risposta all'impulso del sistema, la sua risposta in frequenza è facilmente ottenibile applicando la *FFT*. Ci sono due modi per rappresentarla: in ampiezza e fase o come parte reale e parte immaginaria. La trasformata di Fourier, viene applicata una volta sola dopo che si è effettuata la media.

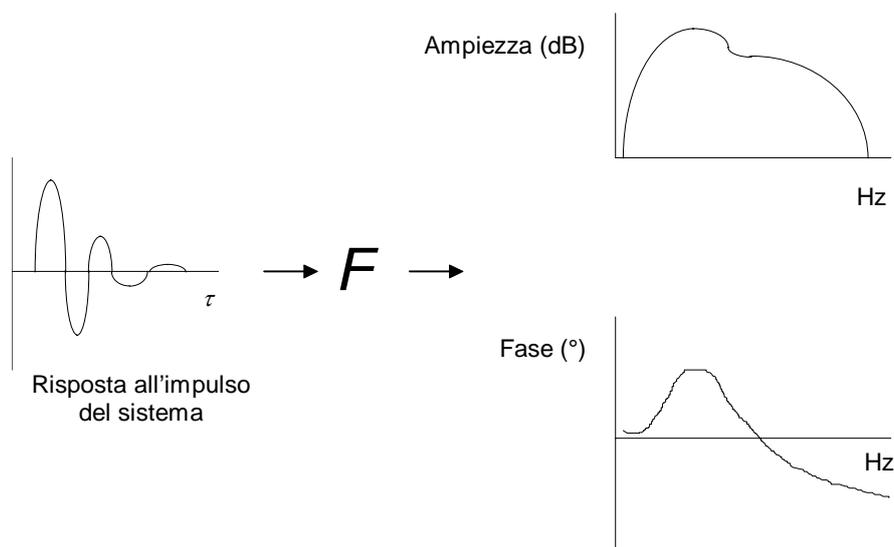


Figura 6 – La risposta in frequenza di un sistema è la trasformata di Fourier della risposta all'impulso del sistema

Negli anni scorsi, dopo anni di studio sull'efficacia del metodo MLS [2], si è notato come si verificano distorsioni di diversa natura nelle risposte all'impulso ricavate con questa metodologia e come queste anomalie influenzino i rilievi del tempo di riverbera-

zione nello studio dell'acustica degli ambienti chiusi. Le distorsioni di basso ordine (low order distortion) contaminano la PIR (periodic impulse response) e hanno effetti deleteri sull'andamento della funzione di Schroeder. La figura 5 mostra la risposta all'impulso di una chiesa, misurata con un altoparlante omnidirezionale ed un microfono da misura. La PIR mostra un suono estraneo ed un comportamento irregolare negli istanti in cui la risposta dovrebbe decadere in modo omogeneo. Anche nell'andamento del diagramma di Schroeder il normale decadimento è impedito dal rumore dovuto alla distorsione in banda larga e dall'irregolare segnale alle basse frequenze. Altre non-linearità come distorsioni trasversali, cambi di guadagni all'origine, clipping, limitazioni di slew hanno conseguenze significative sulle misurazioni in MLS; conseguentemente tale metodo è oggi considerato del tutto obsoleto, e chi lo usa ancora si espone al rischio di commettere errori significativi.

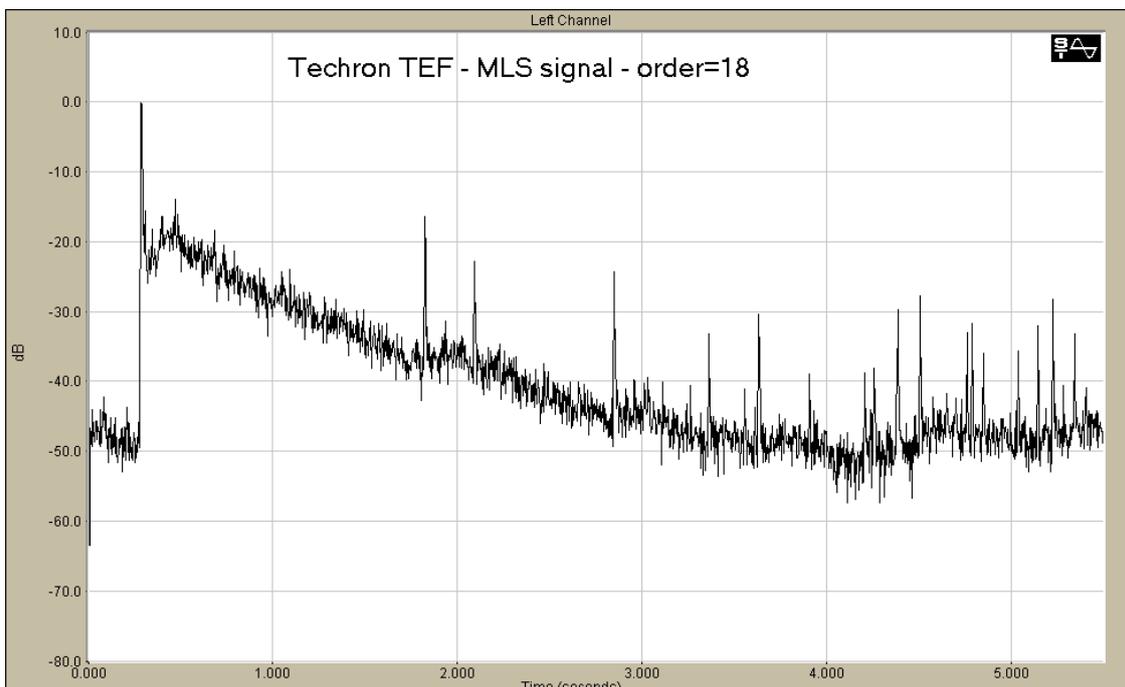


Figura 7 – Esempio di misura con tecnica MLS che mostra numerosi picchi “di distorsione”, tali da rendere la misura del tutto inusabile

2.3 Il metodo TDS (sweep lineare)

La spettrometria a ritardo di tempo (TDS) si basa su un segnale di eccitazione con sweep di frequenza e su un ricevitore, sintonizzato in modo sincrono con lo sweep. Il terzo elemento fondamentale è l'offset, che può introdurre un ritardo di tempo tra il segnale di eccitazione sweepato e il ricevitore. La figura 8 spiega la sincronizzazione tra lo sweep e il ricevitore. Il segnale sweepato inizia in A (t_1, f_1) e si sviluppa linearmente fino a B (t_3, f_2). Dopo un ritardo di tempo (t_d), lo sweep del ricevitore inizia in C (t_2, f_1) e insegue linearmente il primo segnale, con velocità identica, fino a D (t_4, f_2). Il ricevitore, che viene ritardato di un tempo t_d , è ora perfettamente sintonizzato per ricevere l'onda sinusoidale sweepata, dopo che essa ha il viaggiato nell'aria per il tempo t_d . In ogni istante, il ricevitore ha un offset di f_0 hertz rispetto al segnale di eccitazione. I vantaggi di questa soluzione sono diversi. Se il segnale impiega un certo tempo per raggiungere la

parete e un intervallo ulteriore è necessario affinché la riflessione ritorni al microfono di misurazione. Se l'offset del ricevitore è uguale alla somma di questi due intervalli, il ricevitore vede solamente la componente riflessa. L'offset può essere visto come una differenza di frequenza: infatti, quando il ricevitore è in grado di accettare la riflessione dalla parete, tutte le riflessioni non volute arrivano al microfono quando il ricevitore che le analizza è sintonizzato su un'altra frequenza, per cui non vengono captate: il ricevitore è infatti fuori sintonia e lo è quindi per il rumore, per la riverberazione e per tutte le riflessioni non volute. [3]

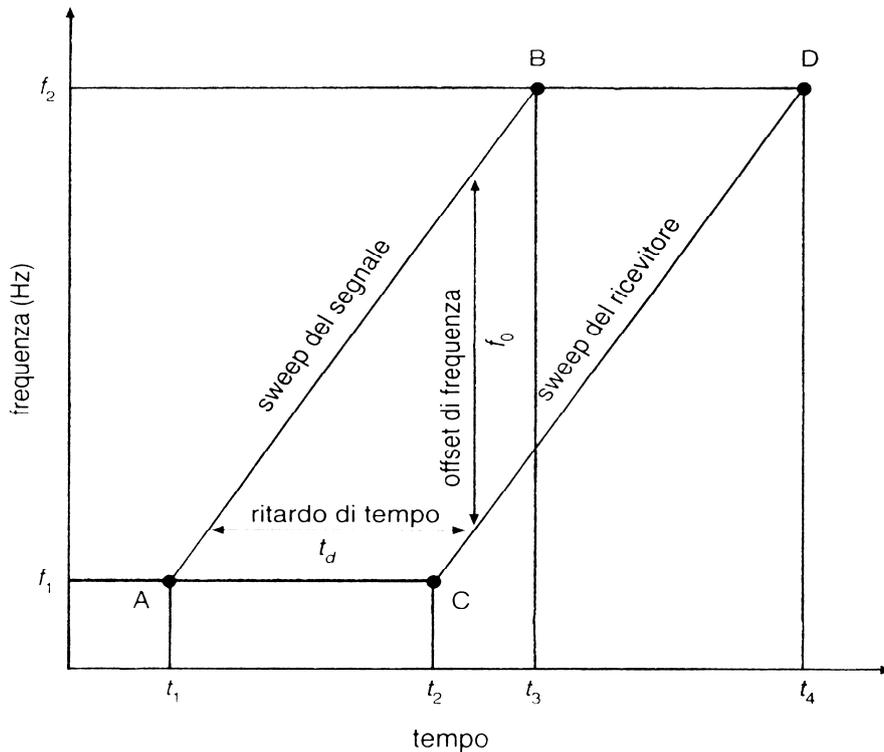


Figura 8 - Principio di funzionamento della spettrometria a ritardo di tempo

Per effettuare misure TDS si utilizza un analizzatore TEF, che sta per tempo, energia, frequenza (Time, Energy, Frequency). L'analizzatore TEF genera una scansione di frequenza sinusoidale, la quale è riprodotta attraverso il sistema in prova e restituita al TEF. Un microfono collegato all'ingresso dell'unità riceve questo segnale che viene immesso attraverso un filtro che traccia, a sua volta, una scansione. Il filtro è sincronizzato con la scansione di frequenza del generatore. Per compensare il ritardo dovuto alla propagazione del suono nel suo tragitto dall'altoparlante, ovvero dalla sorgente, al microfono c'è un ritardo di tempo (offset). Modificando la larghezza di banda ed il ritardo interno del tracciamento del filtro, si può studiare lo spettro del suono diretto, con certe riflessioni o in una combinazioni di entrambi. Per esempio, supponiamo che in una scansione di frequenza un tono 1 kHz vada al microfono essendo prodotta da un altoparlante. In questo istante il centro banda del filtro tracciante (tracking filter) è predisposto ad un 1 kHz. Supponiamo ora che il suono emesso dalla sorgente venga riflesso da una superficie ed entri nel ricevitore con un certo Δt di ritardo. Nel momento in cui questa riflessione entra nel microfono, il filtro tracciante si è spostato su una frequenza superiore a quella riflessa (fig. 9). Se la larghezza di banda del filtro è sufficientemente stretta, le riflessioni vengono ignorate, o escluse dal filtro, cioè l'analizzatore TDS i-

gnorerà i segnali riflessi. In questo modo con il TEF si possono eseguire misure anecoiche in un ambiente che non lo è.

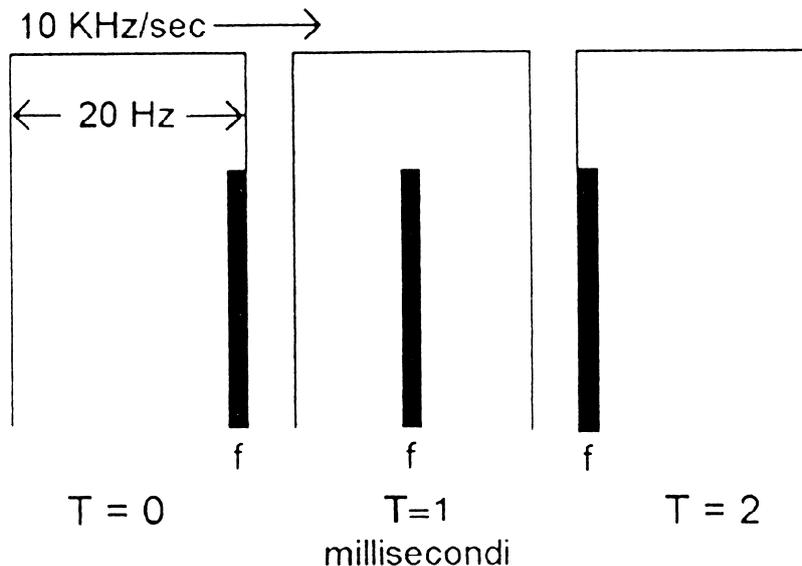


Figura 9 - L'analizzatore TDS ignora le riflessioni escluse dallo spostamento del filtro tracciante che si è spostato su una frequenza più alta di quella della riflessione.

Il sistema TDS tradizionale oggi non viene più impiegato, in quanto si è scoperta una nuova, più semplice tecnica per ottenere la risposta all'impulso a partire dal risultato di una misura con segnale di test costituito da uno sweep sinusoidale lineare. È infatti possibile deconvolvere la risposta all'impulso del sistema, applicando un opportuno filtraggio inverso al segnale registrato dal microfono.

In pratica, passando nel dominio della frequenza, si ha:

$$Y = X * H$$

Da cui si ricava:

$$H = Y / X$$

È dunque sufficiente effettuare il rapporto, ad ogni frequenza, fra lo spettro del segnale misurato dal microfono (Y) e lo spettro del segnale sinusoidale di test (X). Questa operazione viene chiamata "deconvoluzione circolare" in quanto il calcolo degli spettri, a partire dai segnali nel tempo, viene effettuato utilizzando l'operatore FFT, che è un operatore "circolare".

Affinche' l'operazione riesca correttamente, è tuttavia necessario che la lunghezza del segnale analizzato (e quindi anche della sweepata) sia significativamente maggiore del tempo di riverbero dell'ambiente. In questo senso, ritroviamo la stessa limitazione già vista per il segnale MLS, ed il problema del "time aliasing" se tale condizione non viene rispettata.

3. Un nuovo metodo di misurazione acustica: il metodo ESS (Exponential Sine Sweep)

Fino ad ora si parlava di sweep di frequenza inteso come sweep lineare, ovvero il segnale di prova veniva emesso con la frequenza che variava linearmente col tempo.

Questa limitazione in realtà non è necessaria, e possiamo pensare ad una vasta famiglia di sweepate, in cui la legge con cui la frequenza “istantanea” varia nel tempo può essere arbitraria. Fra di esse, assume particolare interesse il caso di una sweepata esponenziale, in cui il segnale di test ha forma sinusoidale, e frequenza che cresce con una funzione esponenziale del tempo.

Un altro caposaldo della nuova tecnica di misura è costituito dal fatto che il procedimento di deconvoluzione non è più circolare, in quanto viene effettuato rimanendo nel dominio del tempo. L'effetto del sistema sul segnale di test x può essere descritto come:

$$y = x \otimes h$$

in cui \otimes è il simbolo della convoluzione. Definiamo ora $x'(t)$ il “filtro inverso” del segnale $x(t)$, come quel segnale che, convoluto con x , mi dà la funzione delta di Dirac. Convolvendo tale filtro inverso con entrambi i membri, abbiamo:

$$y \otimes x' = x \otimes h \otimes x'$$

Quindi:

$$h = y \otimes x'$$

Rimane da definire come determinare il “filtro inverso” x' . La tecnica più semplice consiste nell'usare come filtro inverso il segnale di test stesso, riprodotto in senso inverso (quindi il primo campione diventa l'ultimo). Nel caso la sweepata non fosse lineare, tuttavia, essa avrà un contenuto spettrale non piatto, e sarà quindi necessario applicare una opportuna equalizzazione onde “spianare” la risposta in frequenza della risposta all'impulso deconvoluta.

I vantaggi nell'uso della sweepata non lineare (o logaritmica) rispetto a quella lineare sono due:

1. Una migliore distribuzione dell'energia sullo spettro, infatti una sweepata logaritmica ha più energia alle basse frequenze che alle alte perché l'avanzamento della frequenza è più lento alle basse e più veloce alle alte. Il risultato è che alla fine si ha uno spettro rosa e non più bianco.

2. In presenza di un sistema lineare che distorce, è possibile studiare la distorsione del sistema.

Infatti, quando un sistema distorce, se, per esempio, si immette un segnale a 1 kHz, il sistema risponde anche a 2 kHz, a 3 kHz, ..., cioè genera le armoniche, si ha quindi la distorsione armonica. Nel caso lineare (fig. 8), il sistema distorcente risponde ancora in modo lineare, ma risponde anche a frequenze doppie e triple (multiple) del segnale emesso. Per arrivare alle risposte all'impulso, queste rette vengono fatte ruotare sul piano (f, t) finché non si ha un impulso di Dirac. Le rette corrispondenti ad un comportamento distorsivo ruotano maggiormente e si posizionano prima di quella lineare, ovvero la IR lineare è preceduta da altre IR dovute alla distorsione del sistema.

Con uno sweep lineare queste IR precedenti non sono distribuite in modo ordinato, poiché non si ha sempre lo stesso anticipo temporale perché la distanza tra le curve cor-

rispondenti ad ogni armonica varia sull'asse del tempo. Se invece la sweepata è esponenziale (fig. 9), dal momento che, a causa del carattere logaritmico dell'asse delle frequenze, è costante l'intervallo di tempo che passa tra ciascuna frequenza e la sua prima armonica, è costante l'anticipo di tempo con cui ogni ordine armonico va ad impaccarsi prima della risposta lineare.

Quindi sull'asse del tempo si avranno separate le singole IR dei vari ordini armonici e l'ultima è quella lineare. Questa separazione più nitida tra i termini distortivi e quello lineare permette di analizzare separatamente le singole distorsioni armoniche, di sommarle e di avere la distorsione armonica totale. Quindi il grande vantaggio della sweepata esponenziale è che, in presenza di un sistema che distorce, è possibile studiare la distorsione del sistema.

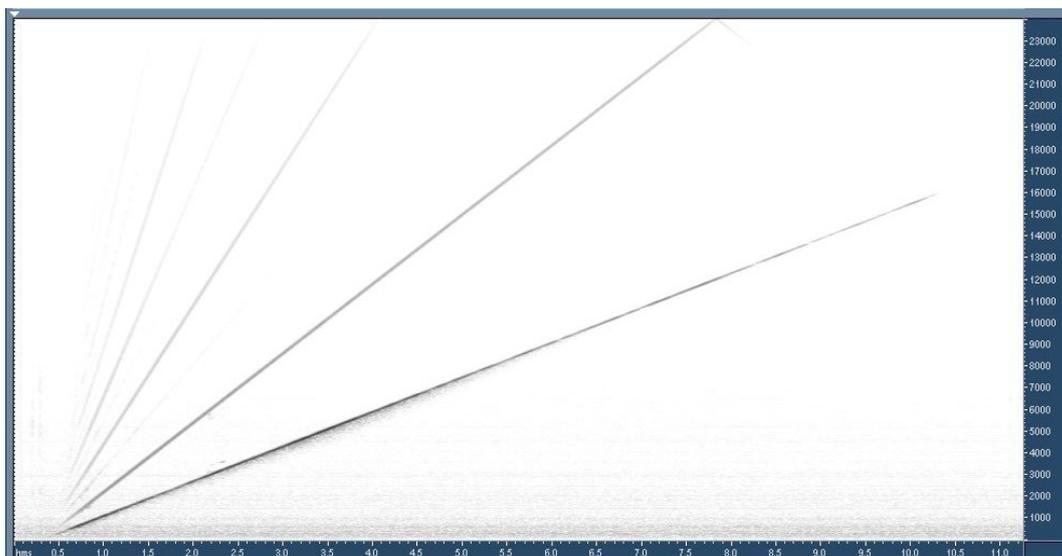


Figura 10 - Il sistema distortente risponde in modo lineare anche a frequenze multiple di quella del segnale emesso.

Nell'acustica dei teatri questo fatto è irrilevante in quanto si parte dall'ipotesi che l'altoparlante sia lineare e, nel caso non lo fosse, si eliminerebbero tutte le distorsioni.

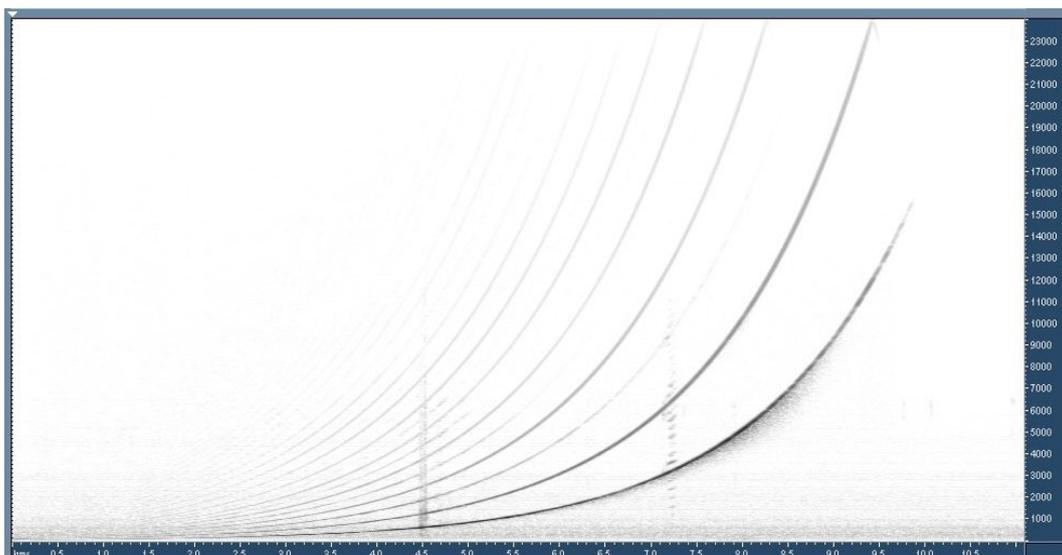


Figura 11 - Spectral view nel caso di segnale logaritmico: in questo caso è costante l'intervallo di tempo tra ciascuna frequenza e quando questa raddoppia.

Vediamo ora con un esempio la sequenza di operazioni necessaria ad effettuare una misura ESS. Si parte generando il segnale di test, segnale che puo' essere descritto matematicamente come:

$$x(t) = \sin \left[\frac{\omega_1 \cdot T}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \cdot \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} - 1 \right) \right]$$

Il segnale viene riprodotto, e contemporaneamente si campiona la risposta del sistema con idoneo trasduttore (microfono, o, in caso di misura vibrazionali, accelerometro). La seguente figura mostra il sonogramma del segnale emesso e di quello captato dal microfono, nel caso di un sistema dotato di significativa distorsione non lineare.

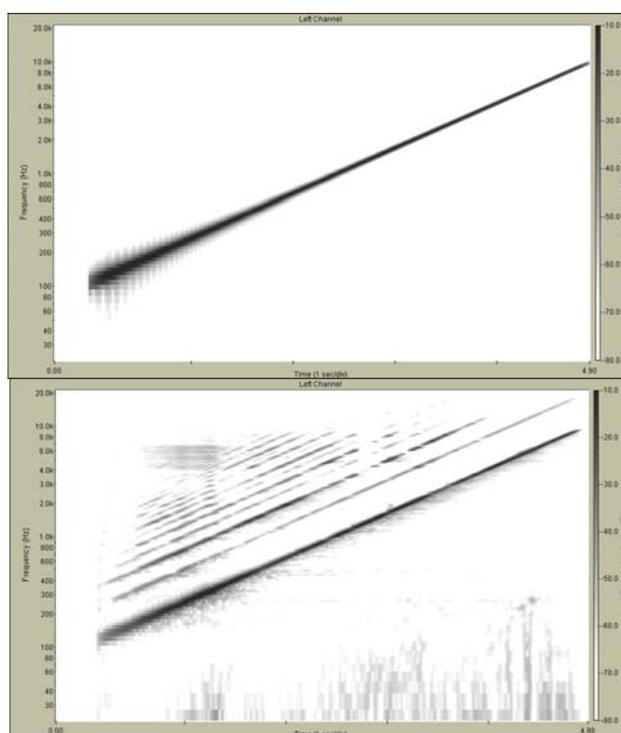


Figura 12 – sonogramma del segnale emesso (x) e del segnale ricevuto (y)

Al segnale ricevuto va applicat il filtro inverso h' , che viene di seguito mostrato.

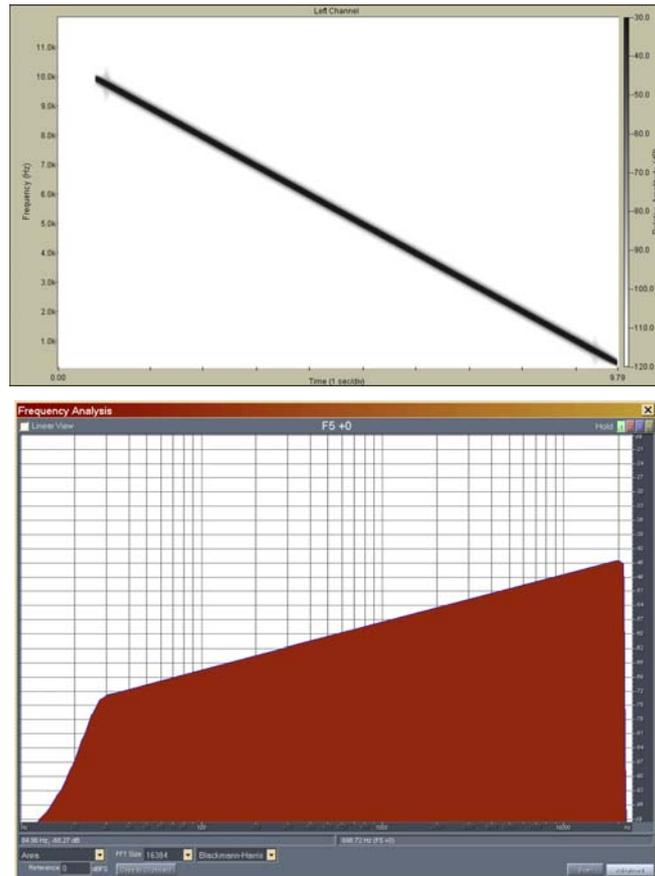


Figura 13 – sonogramma e spettro del filtro inverso x'

Quando il filtro inverso viene convoluto con il segnale registrato, si ottiene una sequenza di risposte all'impulso, di cui l'ultima è quella che ci interessa (risposta lineare), come mostrato in fig. 14.

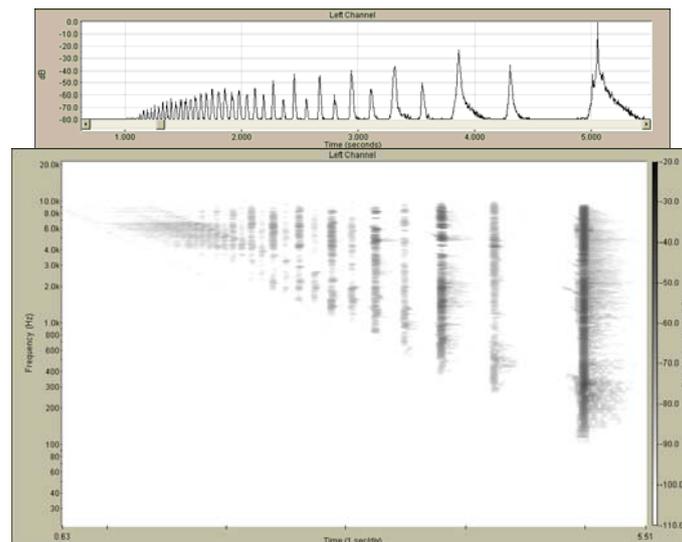


Figura 14 – traccia temporale e sonogramma del segnale deconvoluto

A questo punto si isola solo la risposta all'impulso piu' a destra, che risulta cosi deprivata di ogni effetto-parassita derivante dai fenomeni di distorsione non lineare.

Confrontando il sistema a sweepata non lineare con il sistema MLS già descritto, i vantaggi della nuova metodologia sono tre:

1. L'immunità da distorsioni.
2. La possibilità di funzionamento asincrono, cioè non è necessario il rispetto esatto del clock del campione da parte del clock del generatore del suono.
3. Un miglior rapporto segnale-rumore; la sweepata è più pulita.

A titolo di esempio, in fig. 15 è mostrata la risposta all'impulso misurata con la tecnica Sweep esponenziale nella stessa chiesa e con gli stessi trasduttori elettroacustici (altoparlante, microfono) impiegati per la misura con metodica MLS illustrata in fig. 7. Si osserva come la risposta all'impulso sia ora perfettamente pulita e priva di artefatti causati dalla distorsione non lineare, e come il rapporto segnale rumore sia molto piu' elevato.

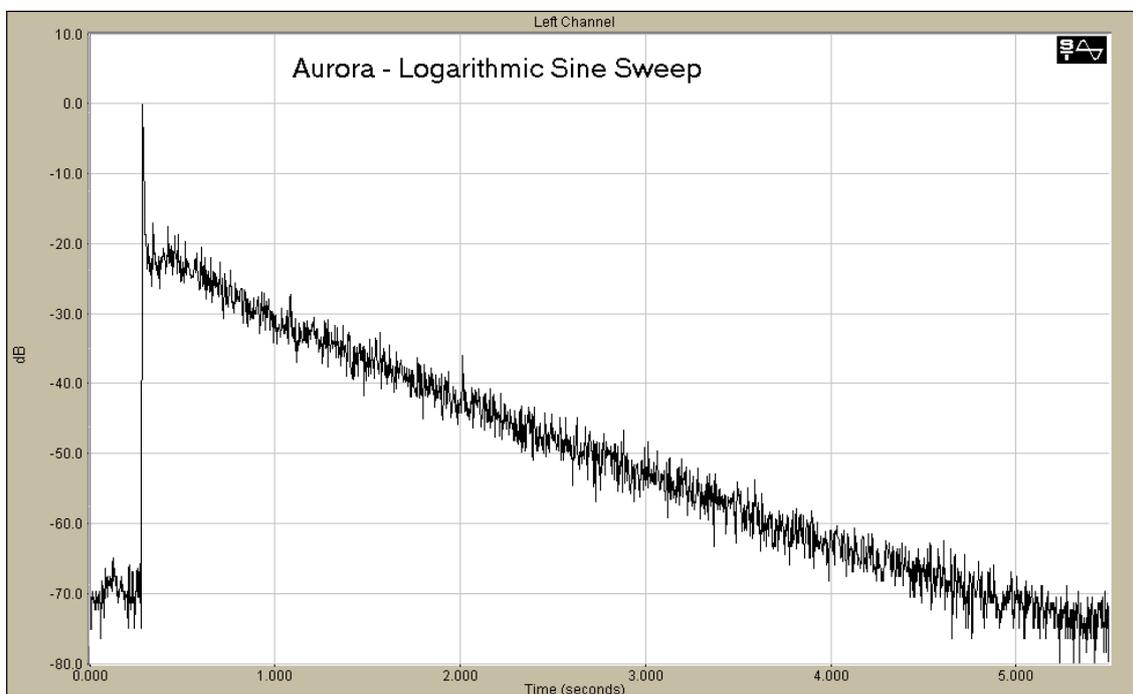


Figura 15 – Esempio di misura con tecnica ESS che mostra un ottimo rapporto S/N ed un decadimento (coda sonora) perfettamente lineare

4. Conclusioni

Il metodo ESS ha portato nuova linfa al settore delle misure elettroacustiche di rumore e vibrazioni. Il migliorato rapporto S/N rende oggi possibili le misure anche senza fare medie sincrone per lunghi periodi, utilizzando sorgenti poco potenti e strumentazione molto economica (basta un PC con scheda audio di bassa qualita').

Poiche' il metodo è sostanzialmente immune alle distorsioni ed ai problemi di sincronizzazione fra generatore e campionario, si puo' operare anche con segnali di test riprodotti a partire da un supporto audio indipendente (CD, lettore MP3, etc.).

Infine, la tecnica ESS consente di operare anche abbandonando le iniziali ipotesi di sistema LTI, in quanto essa è altrettanto idonea a caratterizzare sistemi fortemente non lineari, e tempo-varianti (ovviamente ripetendo la misura piu' volte).

Maggiori dettagli sull'implementazione del metodo ESS possono essere trovati in letteratura [4,5,6]. In particolare, in [7] viene illustrata una estesa campagna di misura della risposta all'impulso dei migliori teatri del mondo: le risposte all'impulso cosi' ottenute sono di qualita' cosi' elevata da poter essere usate come filtri digitali per la riverberazione artificiale delle registrazioni "asciutte" o anecoiche effettuate in studio di registrazione.

5. Bibliografia

- [1] A. Farina, F. Righini, "Software implementation of an MLS analyzer, with tools for convolution, auralization and inverse filtering", Pre-prints of the 103rd AES Convention, New York, 26-29 September 1997.
- [2] J. Vanderkooy, "Aspects of MLS measuring systems", *JAES* vol. 42, n. 4, 1994 April, pp. 219-231.
- [3] "Time Delay Spectrometry", edited by John R. Prohs. Thirty-two articles of the works of Richard C. Heyser, reprintd by the Audio Engineering Society. 280 Pages
- [4] A. Farina – "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique", 110th AES Convention, February 2000.
- [5] S. Müller, P. Massarani – "Transfer-Function Measurement with Sweeps", *JAES* Vol. 49, Number 6 pp. 443 (2001).
- [6] G. Stan, J.J. Embrechts, D. Archambeau – "Comparison of Different Impulse Response Measurement Techniques", *JAES* Vol. 50, No. 4, p. 249, 2002 April.
- [7] A. Farina, R. Ayalon – "Recording concert hall acoustics for posterity" - 24th AES Conference on Multichannel Audio, Banff, Canada, 26-28 June 2003