



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE



Il modello dell'ambiente di ascolto

A.Carini – Elettronica per l'audio e l'acustica

L'ambiente d'ascolto

- L'ambiente è parte determinante per la qualità dell'ascolto: la presenza di code riverberanti influenza in modo non trascurabile il messaggio vocale e/o musicale.
- Alcuni generi sono legati alle caratteristiche della sala d'ascolto (e.g., un coro).
- Nelle rappresentazioni teatrali invece la sovrapposizione di code riverberanti potrebbe diminuire l'intelligibilità della parola.
- L'effetto dell'ambiente consiste nella persistenza, più o meno lunga e gradualmente attenuata, del suono dopo che la sorgente ha cessato di agire.
- L'effetto è dovuto alle riflessioni sulle pareti, sul soffitto e pavimento.
- La durata del tempo di riverbero dipende dalla forma, dal volume, dalle varie strutture presenti nell'ambiente e dalla distanza delle superfici riflettenti. Cose e persone nell'ambiente influiscono sul tempo di riverbero.

Modi naturali di una stanza

- Alle basse frequenze, una stanza può essere considerata un risonatore tridimensionale. A causa delle riflessioni, si possono generare interferenze costruttive e distruttive dando luogo a *modi* (onde stazionarie) che risuonano a precise frequenze.
- Per una stanza rettangolare:

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2};$$

- f_n è l'ennesima frequenza propria, c la velocità del suono, l_x, l_y, l_z sono le lunghezze degli spigoli e n_x, n_y, n_z sono degli indici in \mathbb{N} .

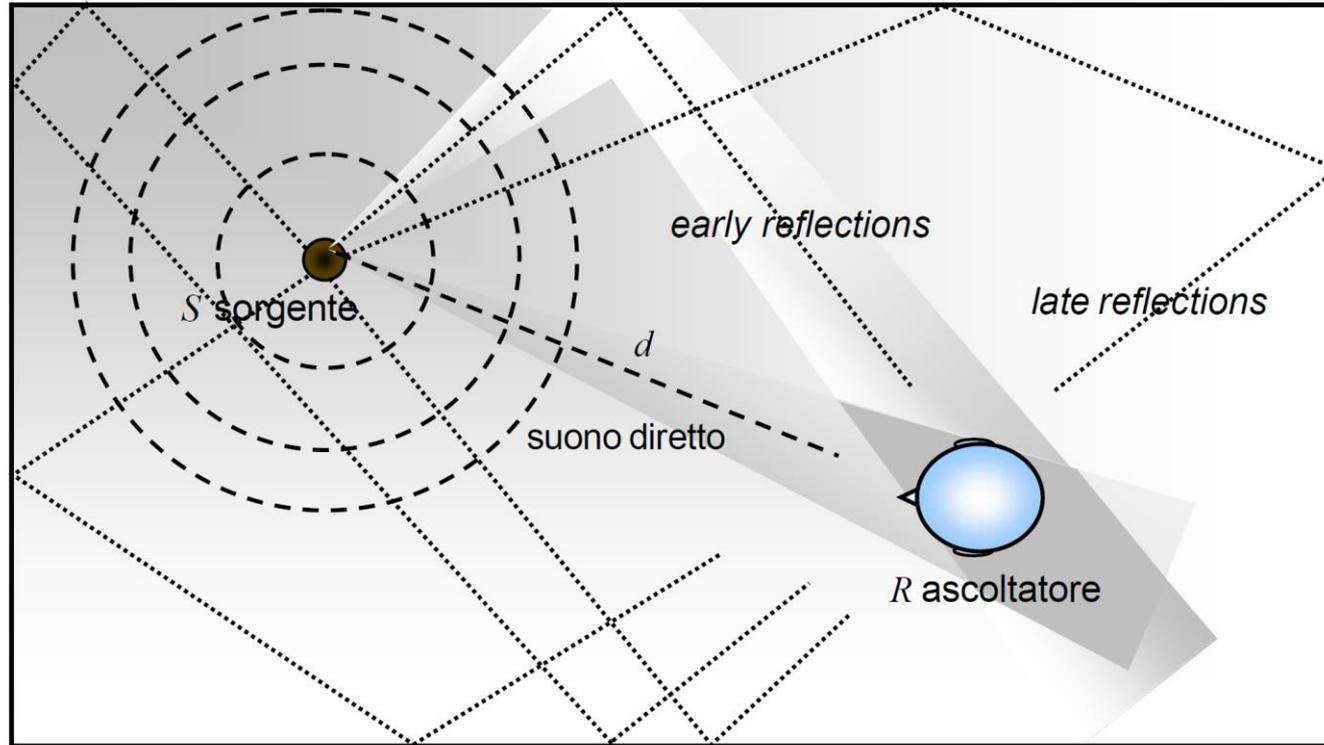
Modi naturali di una stanza

- Il numero di modi cresce molto rapidamente con la frequenza e intorno a una certa frequenza, detta *frequenza di Schroeder*, viene eccitato un numero così elevato di modi che il campo può considerarsi un campo diffuso.
- La frequenza di Schroeder dipende dal volume e dal tempo di riverbero T_{60} e può essere calcolata empiricamente con

$$f_{Sh} \approx 2000 \sqrt{T_{60} / V}$$

- Per una stanza con $V = 4 \times 6 \times 3 \text{ m}^3$ e $T_{60} \simeq 0.5 \text{ s}$ il campo può considerarsi diffuso per frequenze superiori a 170 Hz.

Il riverbero



Il riverbero

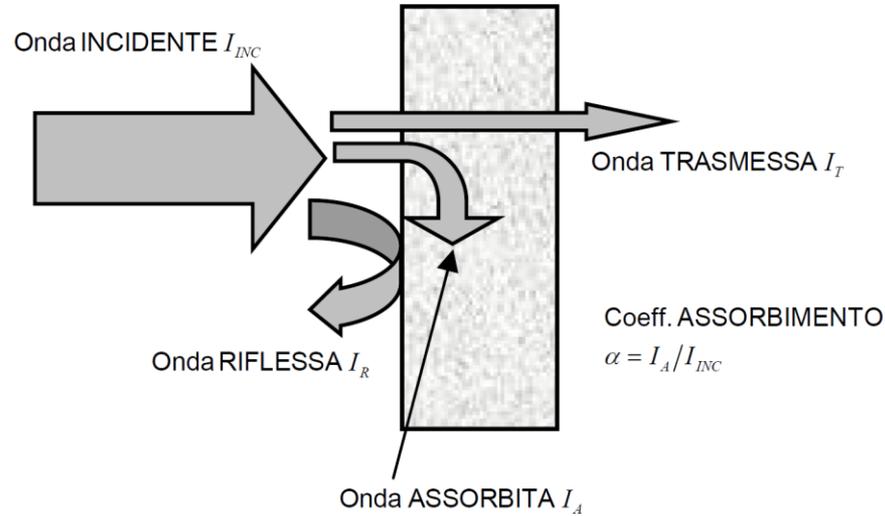


Figura 4.1 Schematizzazione di una parete investita da un'onda acustica incidente e rappresentazione delle grandezze acustiche di interesse (onda assorbita, riflessa, trasmessa e coefficiente di assorbimento).

Il riverbero

- Le ripetute riflessioni sulle pareti danno origine a raggi riflessi di ordine multiplo, detti *late reflections*.
- Il fenomeno dà luogo a modi molto complessi e il fenomeno prende il nome di *riverberazione*.
- Il campo sonoro costituito dall'insieme delle onde riflesse, ognuna caratterizzata da un diverso ritardo temporale e una diversa attenuazione, viene indicato come *campo di riverberazione*.
- Le caratteristiche acustiche di riverberazione sono fondamentali per la qualità del suono percepito: i suoni utili che ascoltiamo sono costituiti da una successione di diversi segnali acustici di breve durata che devono essere percepiti distintamente e chiaramente.

Il riverbero

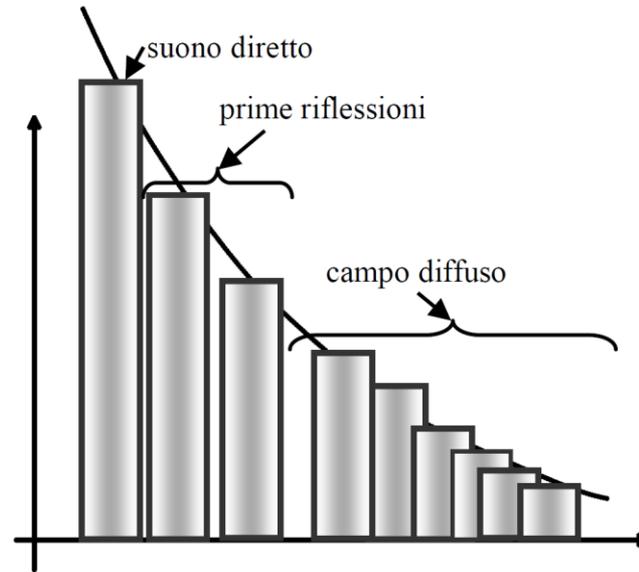
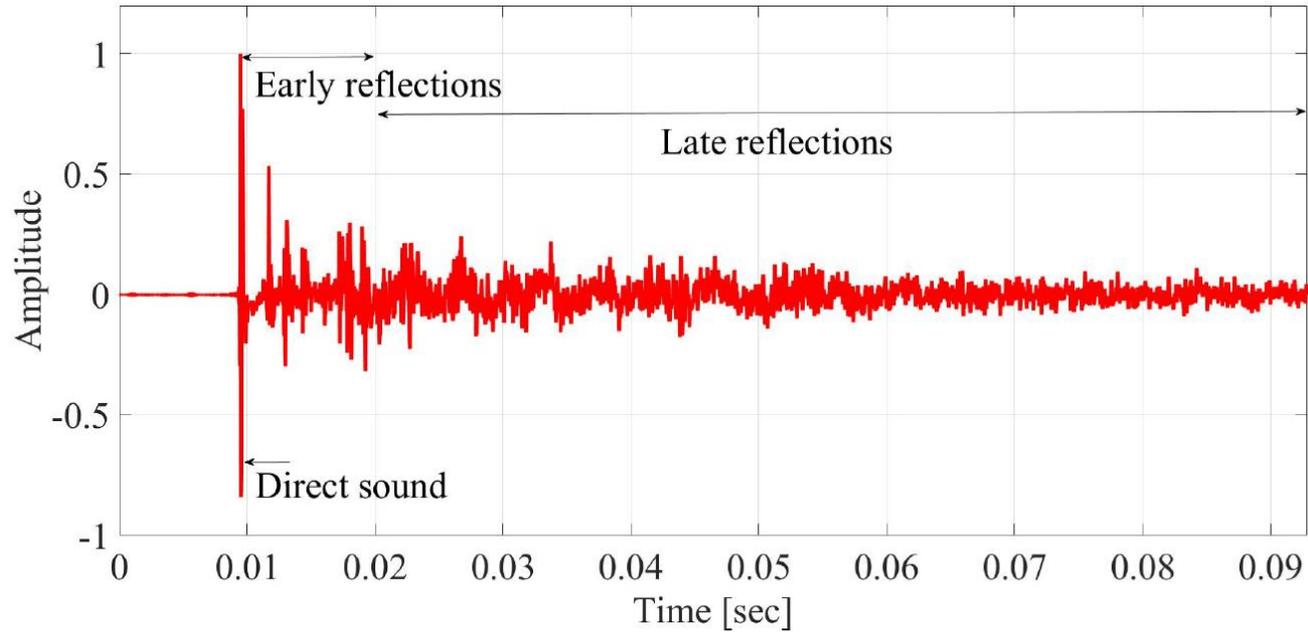


Figura 4.3 Nel riverbero le riflessioni non vengono più percepite singolarmente, ma fuse insieme fino a formare una coda sonora.

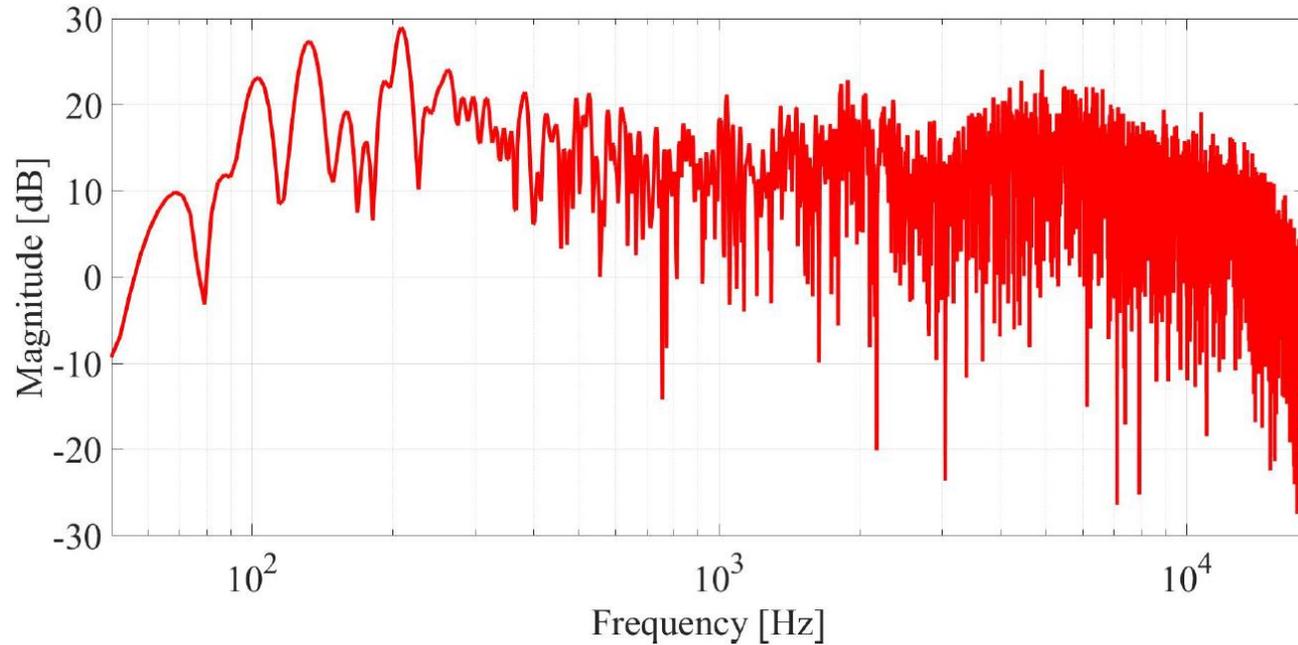
Il riverbero

- Il suono diretto e le prime riflessioni sono fondamentali per la localizzazione di una sorgente sonora e per la percezione del suo timbro, mentre le late reflections forniscono un'indicazione della dimensione dell'ambiente.
- Il contenuto spettrale dei suoni diretti e riflessi è diverso. Le pareti, tende, mobili, etc. assorbono tipicamente le alte frequenze.
- Alle basse frequenze, possono formarsi onde stazionarie e la risposta in freq. ha un andamento dolce con risonanze e valli (notches o nulli) ben separate.
- Le risonanze e notches sono determinate dalle figure di interferenza causate dal suono diretto e dalle riflessioni, con i nulli che compaiono quando la differenza di cammino è un multiplo dispari di mezza lunghezza d'onda.
- I nulli diventano molto densi per frequenze superiori alla f. di Schroeder. I picchi sono molto dipendenti dalla posizione. Hanno poca influenza soggettiva.

Il riverbero



Il riverbero



Tempo di riverberazione T_{60}

- Il tempo di riverberazione T_{60} è quello necessario affinché la densità media dell'energia sonora rilevata in un punto diminuisca di 60 dB rispetto al valore che aveva all'istante in cui la sorgente ha cessato d'agire.
- L'ambiente è molto riverberante quando il T_{60} supera i 2 s, è molto asciutto se è inferiore a 1 s.
- La regolazione del tempo di riverbero è uno dei principali parametri di progettazione acustica: indica direttamente l'effetto percepibile dall'uomo della durata della coda sonora.

Tempo di riverberazione T_{60}

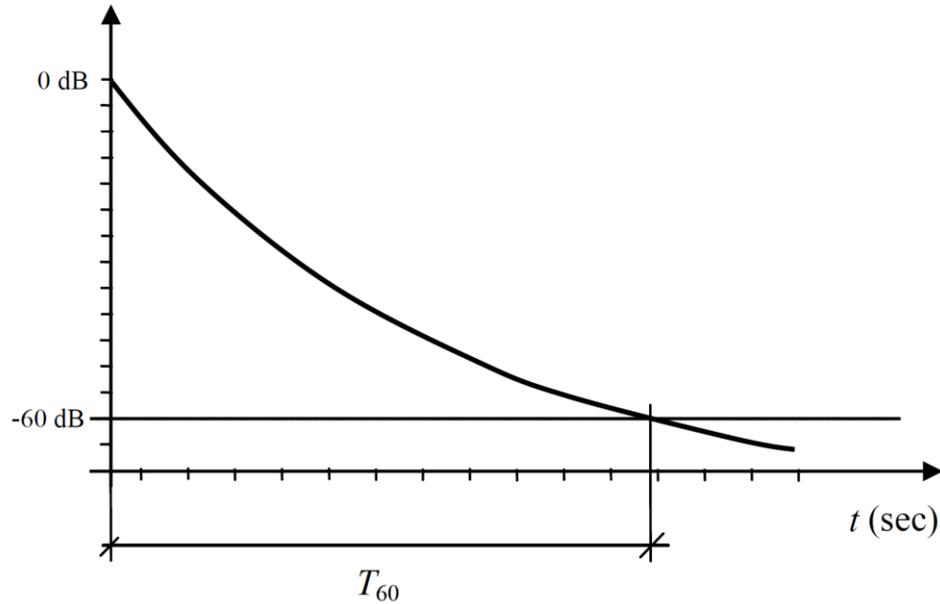


Figura 4.5 La caratteristica degli ambienti di ascolto viene espressa numericamente con il *tempo di riverberazione*, definito come il tempo che un suono impiega per subire un'attenuazione di 60 dB.

Tempo di riverberazione T_{60}

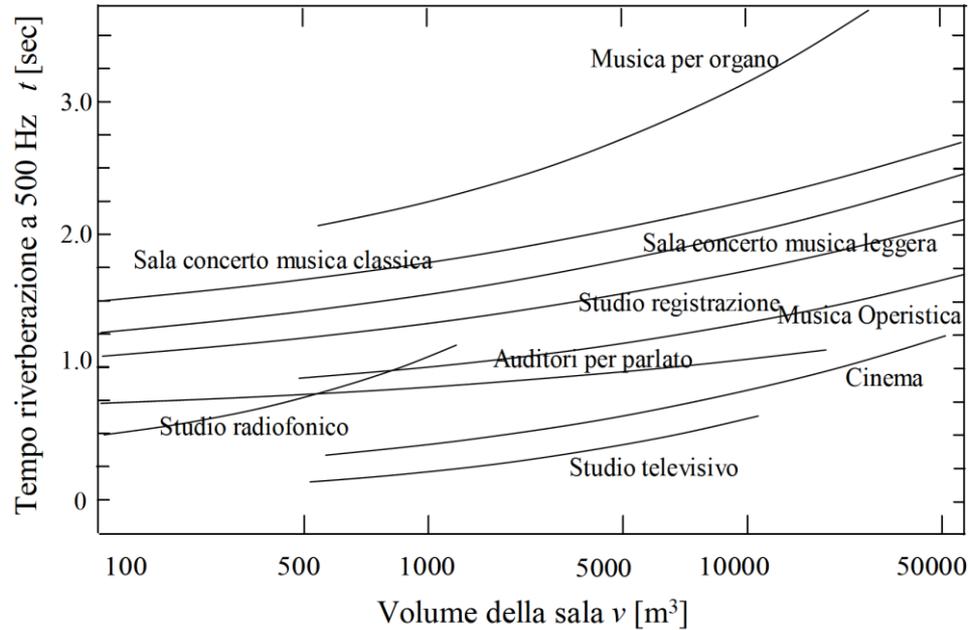


Figura 4.6 Tempi di riverberazione tipici di alcuni ambienti caratteristici.

Tempo di riverberazione T_{60}

- Per una buona acustica è importante anche la qualità della riverberazione.
- Il colore del suono tenderà al brillante se la riverberazione agisce prevalentemente alle alte frequenze, tenderà al cupo se saranno le basse frequenze a essere esaltate.
- Per un ascolto ottimale, il riverbero alle basse frequenze dovrebbe essere più elevato delle alte:

$$T_{60}(bf) > T_{60}(af).$$

Tempo di riverberazione T_{60}

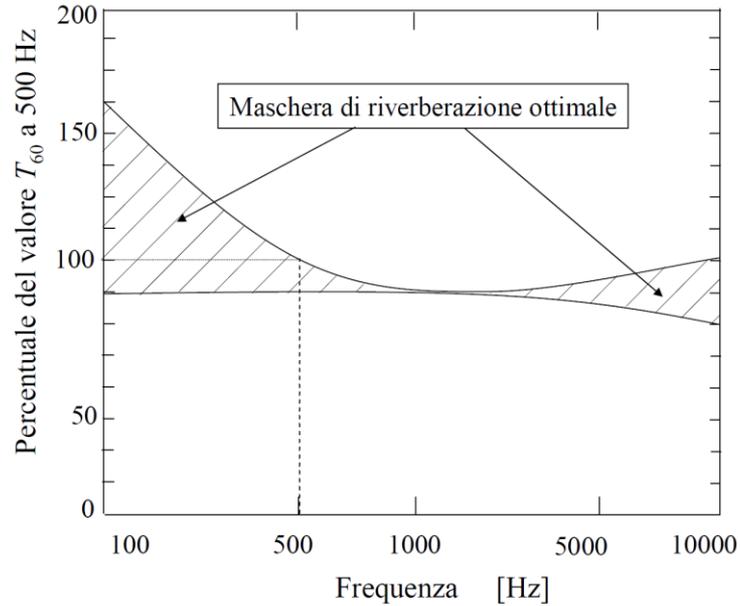


Figura 4.7 Tempo di riverberazione in funzione della frequenza. Alle alte frequenze le pareti dovrebbero avere un coefficiente di assorbimento maggiore.

Distanza di riverberazione

- E' la distanza dalla sorgente per cui il campo possa considerarsi diffuso.
- Il livello di pressione sonora percepito da un ascoltatore sarà la somma di due contributi: la radiazione diretta e quella riflessa.
- Si definisce *distanza di riverberazione* la distanza dalla sorgente per cui il livello di campo diretto è uguale a quello del campo riverberante.

Progetto acustico

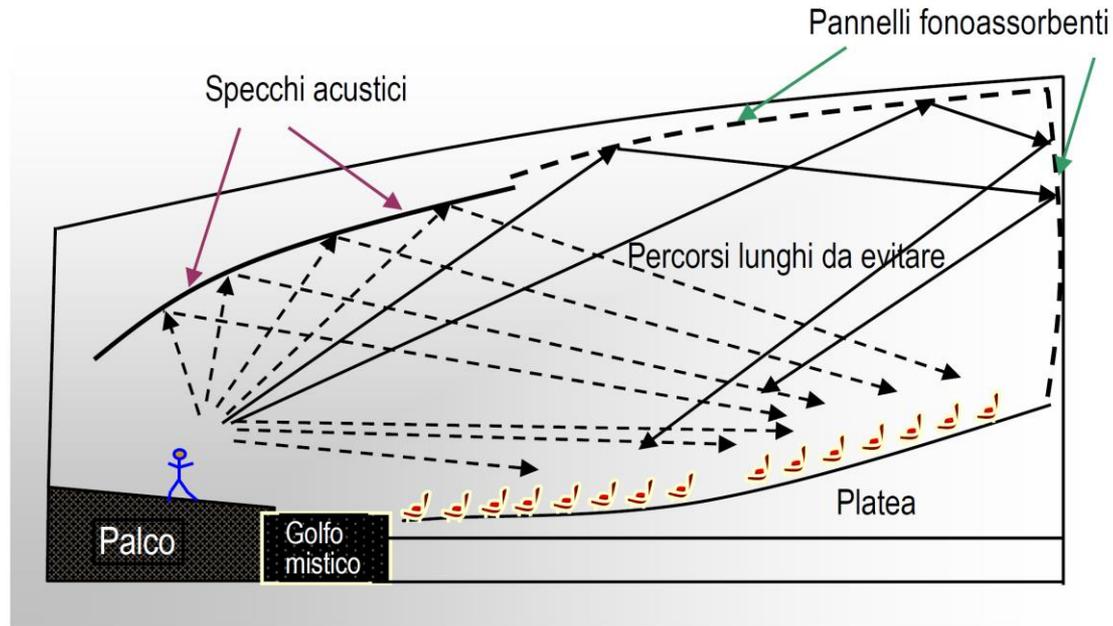


Figura 4.9 Per una buona acustica occorre disporre strategicamente specchi acustici e pannelli fonoassorbenti.

Misura della risposta impulsiva d'ambiente

- È importante sia nell'ambito dell'acustica che dell'elaborazione di segnali audio.
- È il primo passo per analizzare e caratterizzare la risposta di una stanza misurando:
 - Tempo di riverbero,
 - *Indice di definizione*, rapporto in percentuale tra l'energia dei primi 50 o 80 ms dopo il picco e l'energia totale (D50 o D80)
 - *L'indice di chiarezza*, rapporto logaritmico dei primi 50 o 80 ms (C50 o C80) dopo il picco principale e la restante energia della risposta impulsiva
 - *Early decay time*, tempo per un decadimento di 10 dB moltiplicato per 6.
 - *Direct to reverberation ratio*, rapporto logaritmico tra il picco principale e la restante parte della *room impulse response* (RIR).
 - *Center time*, centro di gravità della RIR.
- Viene usato in tante applicazioni: equalizzazione, audio spaziale, suono virtuale, ...

Misura con segnali impulsivi

Metodi tradizionali



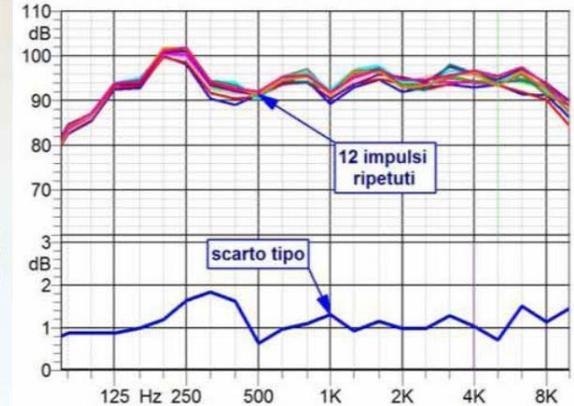
- Sorgenti veramente impulsive: palloni, pistole

8 novembre 2010

Misura della Risposta all'Impulso

7

Il “clappatore”



- Verifica di riproducibilità

8 novembre 2010

Misura della Risposta all'Impulso

11

Immagini di Angelo Farina

Misura con Maximal Length Sequences

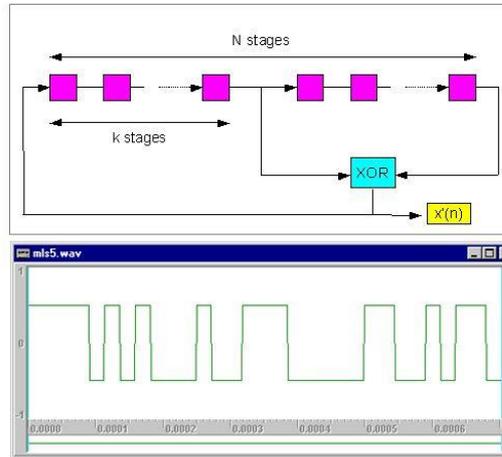
- Le MLS sono delle sequenze binarie periodiche pseudo-casuali di periodo $2^n - 1$
- Hanno una autocorrelazione periodica quasi perfetta (un treno di impulsi di Dirac a parte un termine costante) e spettro a banda larga.
- La risposta impulsiva può essere calcolata con il metodo di cross-correlazione, calcolando la cross-correlazione tra l'uscita di un sistema e la stessa MLS

$$h(n) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} y(n)x(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)}$$

- La misura con MLS è molto sensibile alle nonlinearità causate dagli alti volumi:
- Il prodotto di una MLS con la stessa MLS ritardata è la stessa MLS con un diverso ritardo.

Misura con Maximal Length Sequences

Il metodo MLS



$x(t)$ è un segnale periodico binario, ottenuto mediante uno “shift-register”, configurato per la massima lunghezza del periodo di ripetizione

$$L = 2^N - 1$$

8 novembre 2010

Misura della Risposta all'Impulso

4

Immagini di Angelo Farina

Misura con Maximal Length Sequences

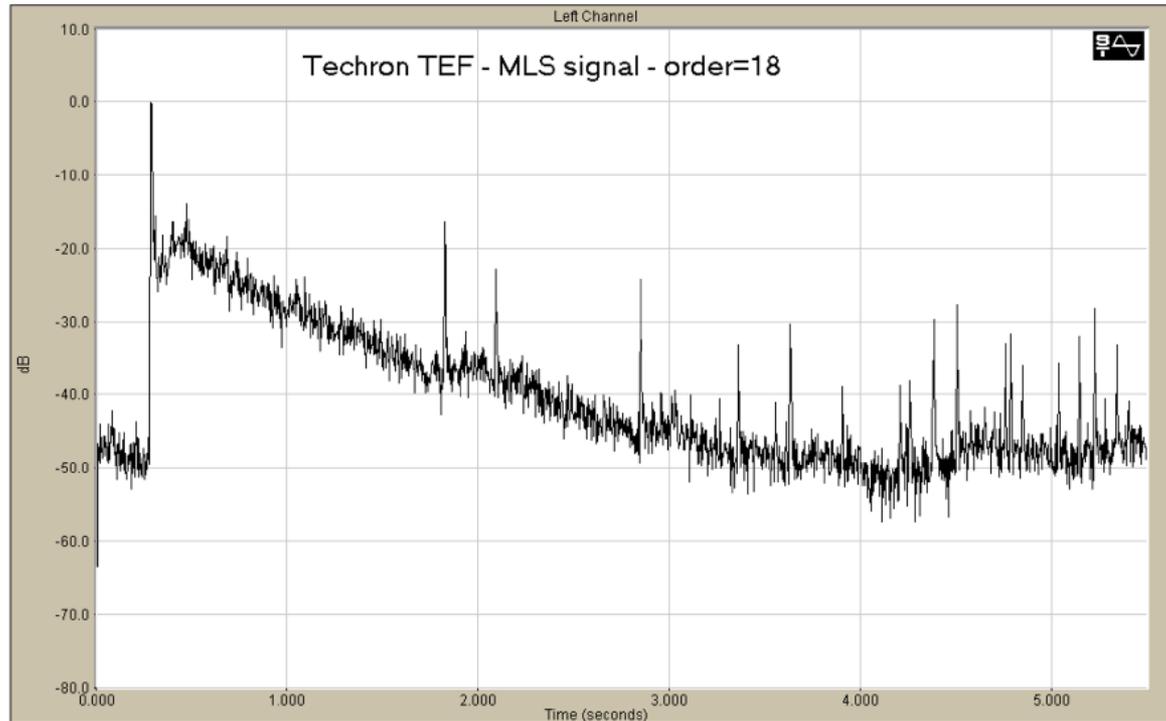


Fig. 3 – a MLS measurement made in presence of a strongly not-linear system

Immagini di Angelo Farina

Misura con perfect periodic sequences (PPS)

- Le PPS sono delle sequenze pseudo-casuali che hanno una autocorrelazione periodica perfetta (un treno di impulsi di Dirac) e spettro a banda larga.
- La risposta impulsiva può essere calcolata con il metodo di cross-correlazione,

$$h(n) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} y(n)x(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)}$$

- Anche qui non c'è protezione nei confronti delle nonlinearità.
- Le PPS hanno sempre più di due livelli.
- Esistono delle PPS che hanno tre livelli [0, +1, -1].
- Il modo più semplice per creare una PPS: costruisco la IDFT di uno spettro uniforme con fase aleatoria e a simmetria coniugata (*Random Phase Multi-sine Sequence*)

Misura con sweep esponenziali

- Gli sweep esponenziali sono dei segnali sinusoidali in cui la frequenza istantanea varia con legge esponenziale da una frequenza minima (e.g. 20 Hz) a una massima (e.g. 20 kHz).
- Lo spettro di uno sweep esponenziale ha ampiezza inversamente proporzionale alla frequenza, ovvero è *pink*, simile allo spettro del rumore ambientale.
- La misura con sweep esponenziali può essere resa robusta nei confronti delle nonlinearità, purché queste siano assimilabili a un filtro nonlineare privo di memoria, cui segue in cascata un filtro lineare.

Misura con sweep esponenziali

Il metodo Log Sine Sweep

- $x(t)$ è un segnale sinusoidale a frequenza variabile, con variazione esponenziale della frequenza nel tempo.

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

Misura con sweep esponenziali

Il metodo Log Sine Sweep

- La metodica di deconvoluzione della risposta all'impulso è semplice: supponiamo di realizzare un filtro inverso $z(t)$ tale che:

$$x(t) \otimes z(t) \Rightarrow \delta(t) \quad (\text{impulso ideale})$$

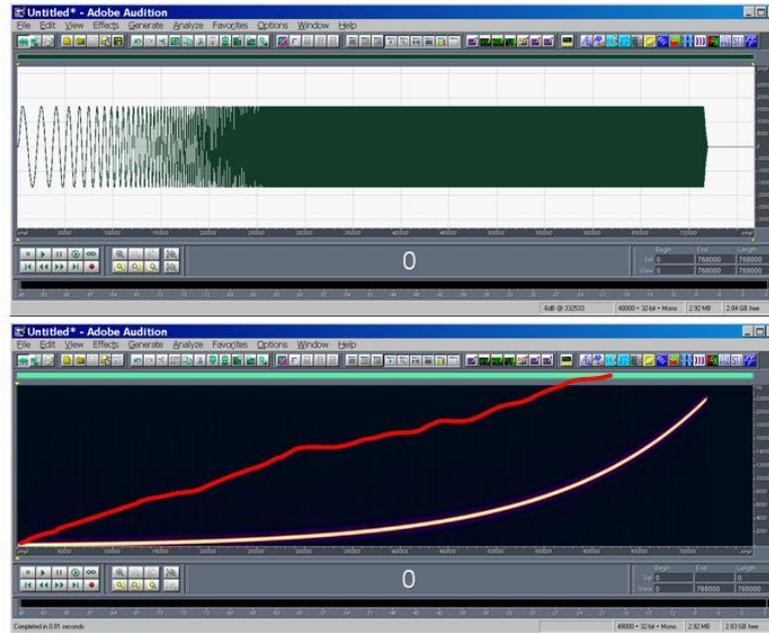
- Se ora applichiamo tale filtro inverso al risultato della misura $y(t)$, che altro non è che la convoluzione di $x(t)$ con la risposta all'impulso dell'ambiente, $h(t)$, otteniamo:

$$y(t) \otimes z(t) = x(t) \otimes h(t) \otimes z(t) \Rightarrow h(t)$$

- Il filtro inverso $z(t)$ è semplicemente il “time reversal” del segnale originario $x(t)$, con applicata una appropriata equalizzazione

Misura con sweep esponenziali

Test Signal – $x(t)$



8 novembre 2010

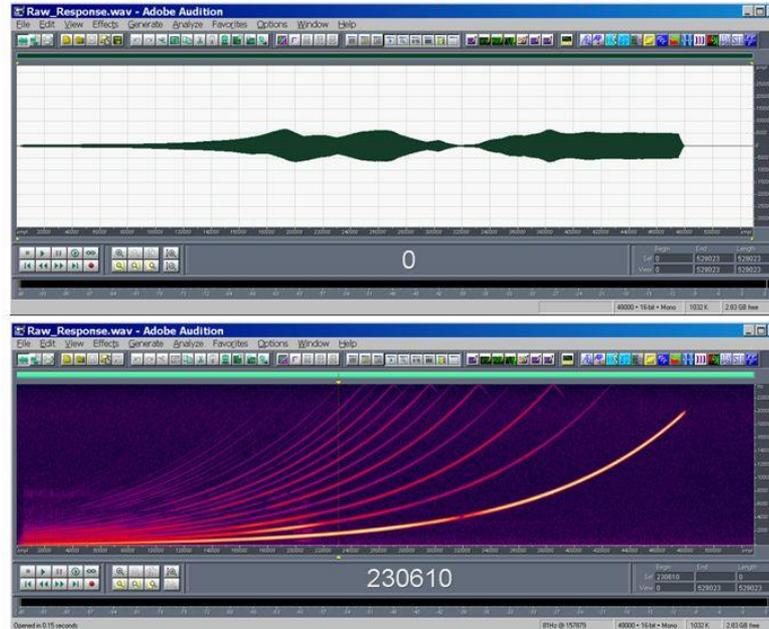
Misura della Risposta all'Impulso

15

Immagini di Angelo Farina

Misura con sweep esponenziali

Measured signal - $y(t)$



- Le armoniche sono causate dalla distorsione non lineare dell'altoparlante

8 novembre 2010

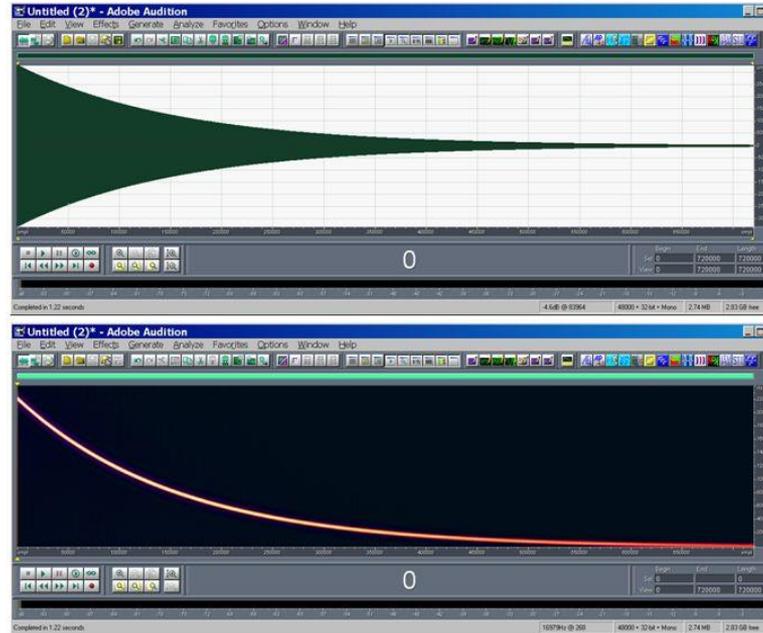
Misura della Risposta all'Impulso

16

Immagini di Angelo Farina

Misura con sweep esponenziali

Inverse Filter – $z(t)$



8 novembre 2010

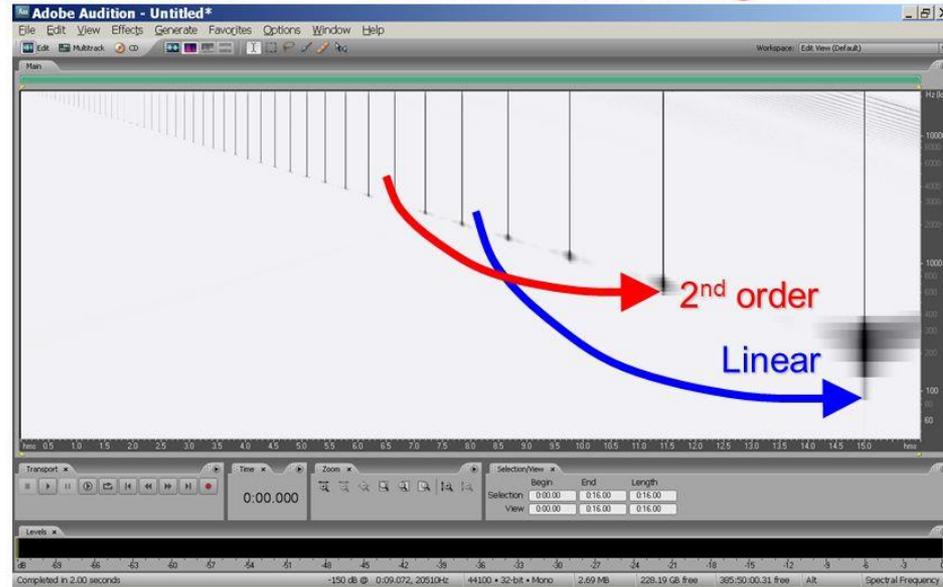
Misura della Risposta all'Impulso

17

Immagini di Angelo Farina

Misura con sweep esponenziali

Deconvoluzione = rotazione del sonogramma



- La convoluzione con il filtro inverso fa ruotare il piano tempo-frequenza in senso antiorario

8 novembre 2010

Misura della Risposta all'Impulso

19

Immagini di Angelo Farina

Misura con sweep esponenziali

Risultato della deconvoluzione



The last impulse response is the linear one, the preceding are the harmonics distortion products of various orders

8 novembre 2010

Misura della Risposta all'Impulso

20

Immagini di Angelo Farina

Vedere:

- Aurelio Uncini “Audio digitale”, McGraw-Hill, 2006
 - Cap. 4.1-4.3