



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  $\mathbb{N}$ .

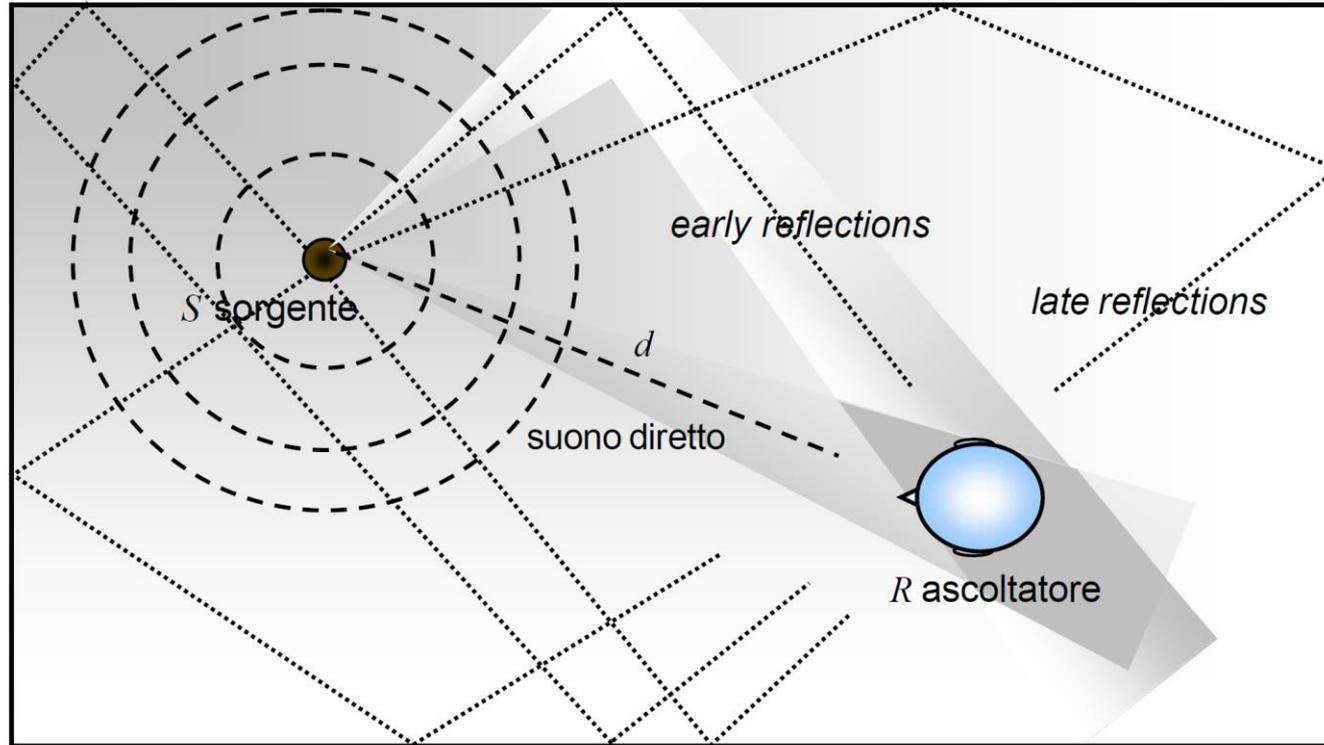
## Modi naturali di una stanza

- 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

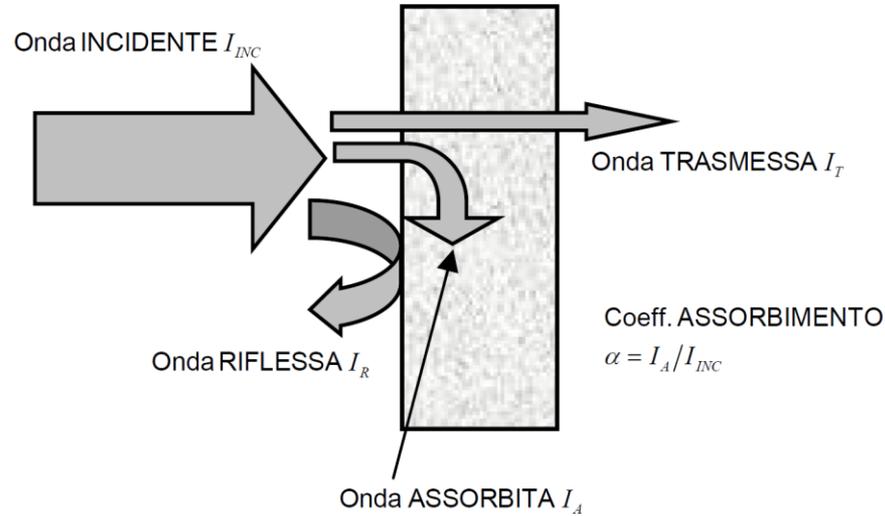
$$f_{Sh} \approx 2000 \sqrt{T_{60} / V}$$

- 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

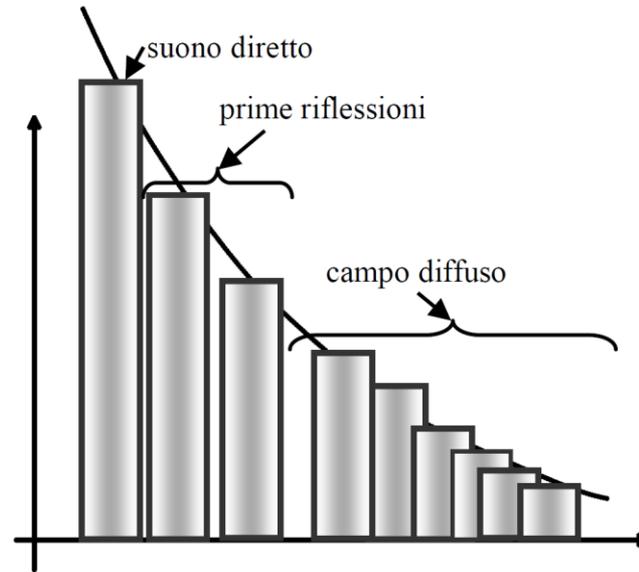


**Figura 4.1** Schematizzazione di una parete investita da un'onda acustica incidente e rappresentazione delle grandezze acustiche di interesse (onda assorbita, riflessa, trasmessa e coefficiente di assorbimento).

# 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

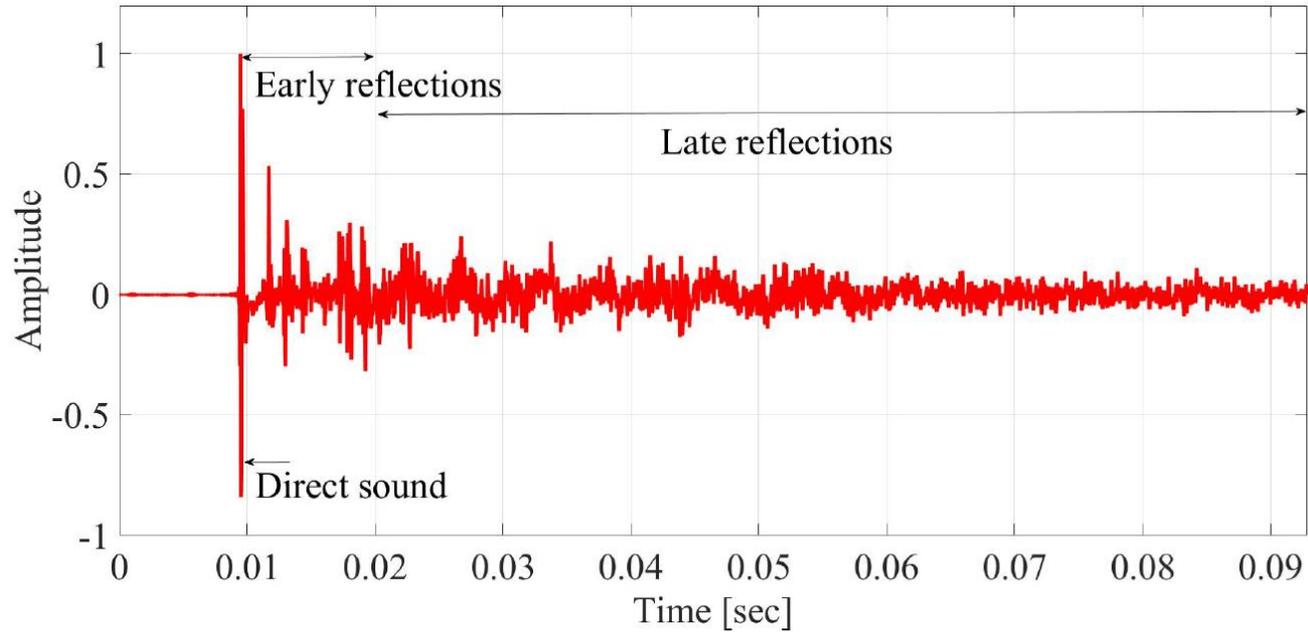


**Figura 4.3** Nel riverbero le riflessioni non vengono più percepite singolarmente, ma fuse insieme fino a formare una coda sonora.

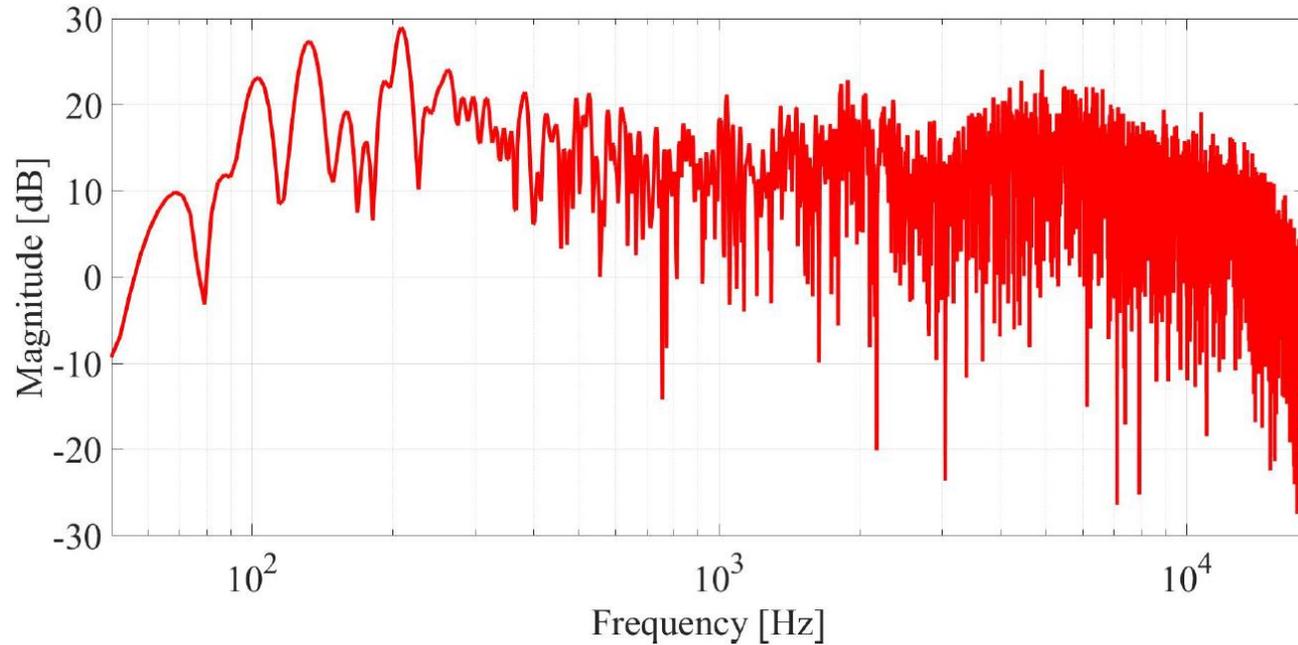
# Il riverbero

- 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



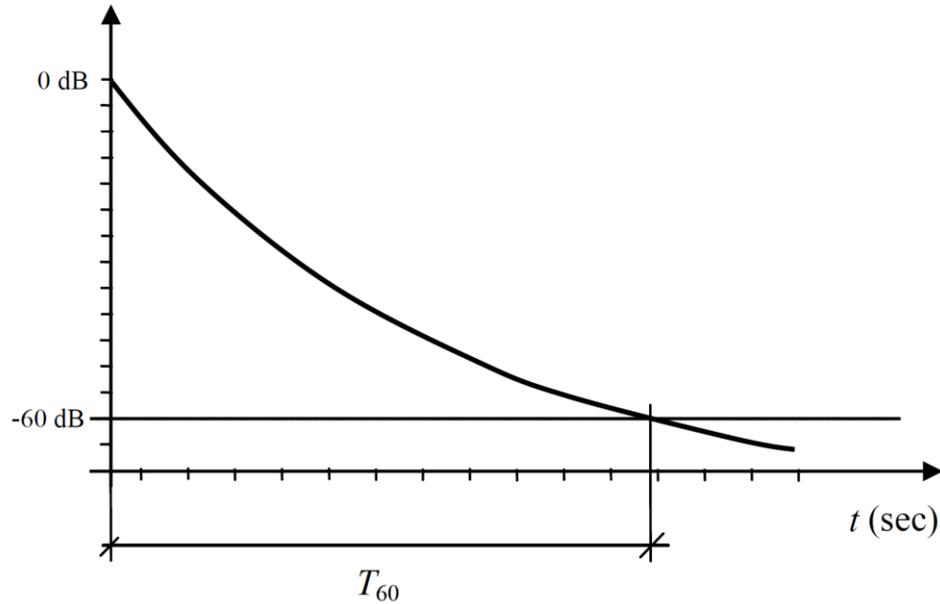
# Il riverbero



## Tempo di riverberazione $T_{60}$

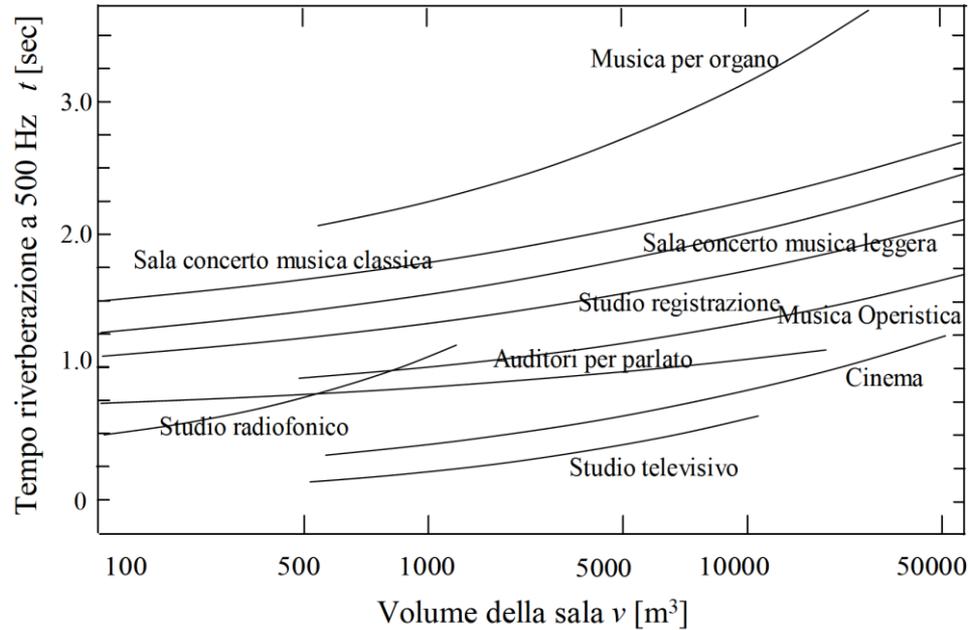
- Il tempo di riverberazione  $T_{60}$  è quello necessario affinché la densità media dell'energia sonora rilevata in un punto diminuisca di 60 dB rispetto al valore che aveva all'istante in cui la sorgente ha cessato d'agire.
- L'ambiente è molto riverberante quando il  $T_{60}$  supera i 2 s, è molto 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 $T_{60}$



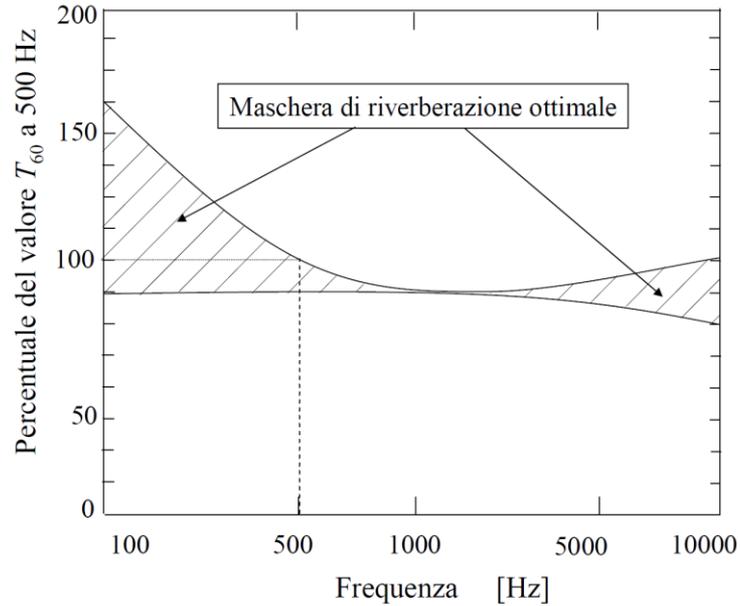
**Figura 4.6** Tempi di riverberazione tipici di alcuni ambienti caratteristici.

## 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 $T_{60}$

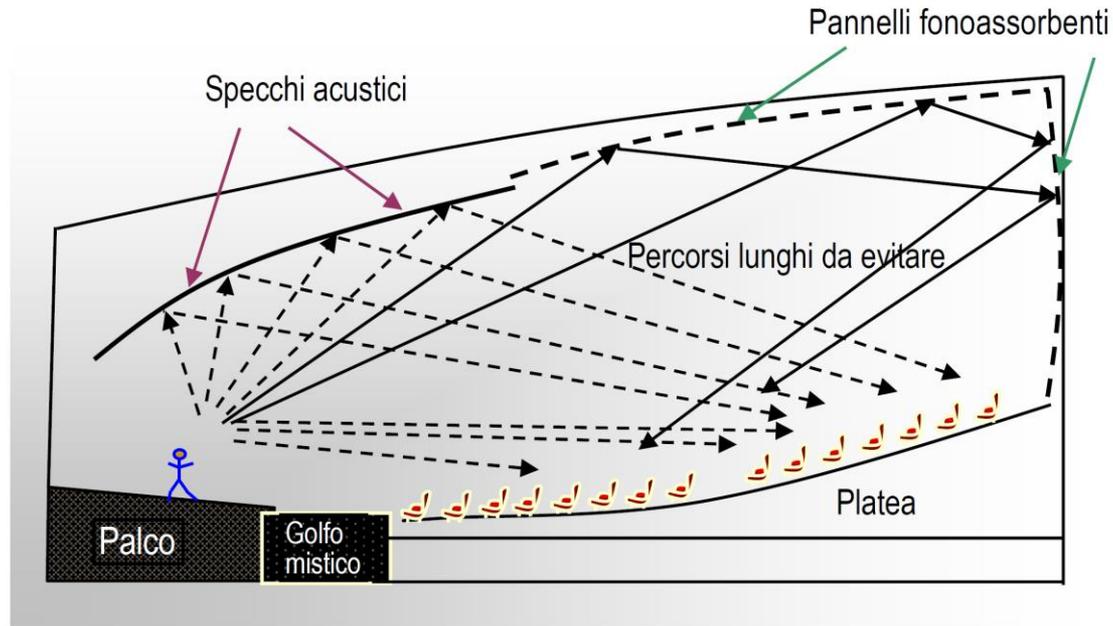


**Figura 4.7** Tempo di riverberazione in funzione della frequenza. Alle alte frequenze le pareti dovrebbero avere un coefficiente di assorbimento maggiore.

# 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:
  - Il tempo di riverbero,
  - *L'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
  - *L'Early decay time*, tempo per un decadimento di 10 dB moltiplicato per 6.
  - *Il Direct to reverberation ratio*, rapporto logaritmico tra il picco principale e la restante parte della *room impulse response* (RIR).
  - *Il Center time*, centro di gravità della RIR.
- Viene usato in tante applicazioni: equalizzazione, audio spaziale, suono virtuale, ...

# Misura con segnali impulsivi

## Metodi tradizionali



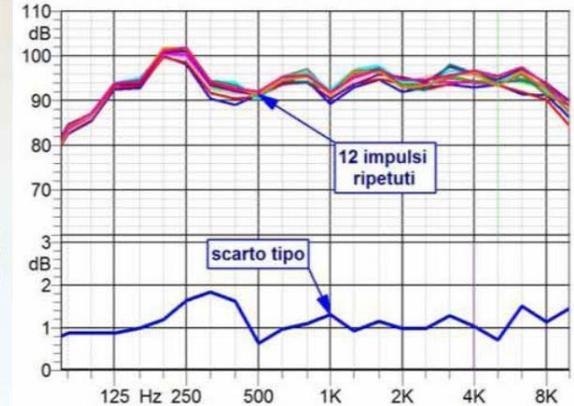
- Sorgenti veramente impulsive: palloni, pistole

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

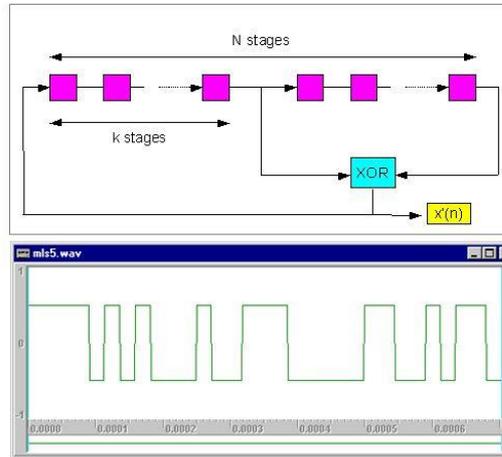
- Le MLS sono delle sequenze binarie periodiche pseudo-casuali di periodo  $2^n - 1$
- Hanno una autocorrelazione periodica quasi perfetta (un treno di impulsi di Dirac a parte un termine costante) e spettro a banda larga.
- La risposta impulsiva può essere calcolata con il metodo di cross-correlazione,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

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

- 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

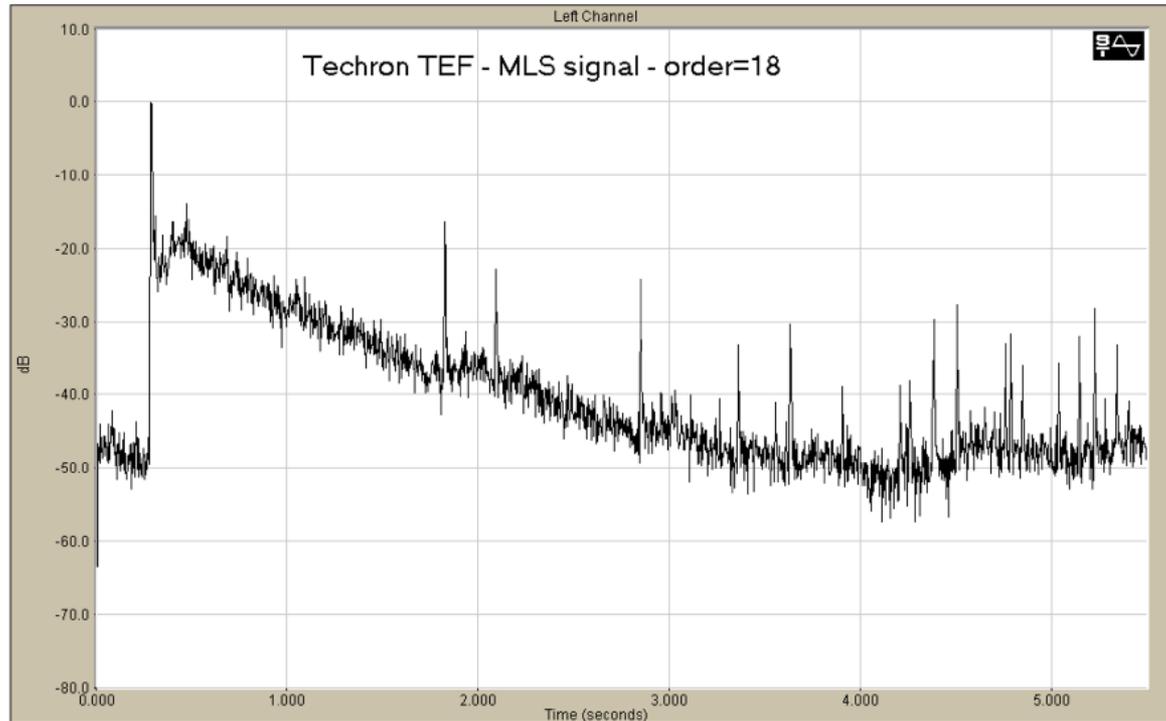


Fig. 3 – a MLS measurement made in presence of a strongly not-linear system

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) e spettro a banda larga.
- La risposta impulsiva può essere calcolata con il metodo di cross-correlazione,

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

- Anche qui non c'è protezione nei confronti delle nonlinearità (a meno che non si considerino particolari PPS).
- Le PPS hanno sempre più di due livelli.
- Ne esistono alcune che hanno tre livelli [0, +1, -1].
- Il modo più semplice per creare una PPS: calcolo la IDFT di uno spettro uniforme con fase aleatoria e 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:

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

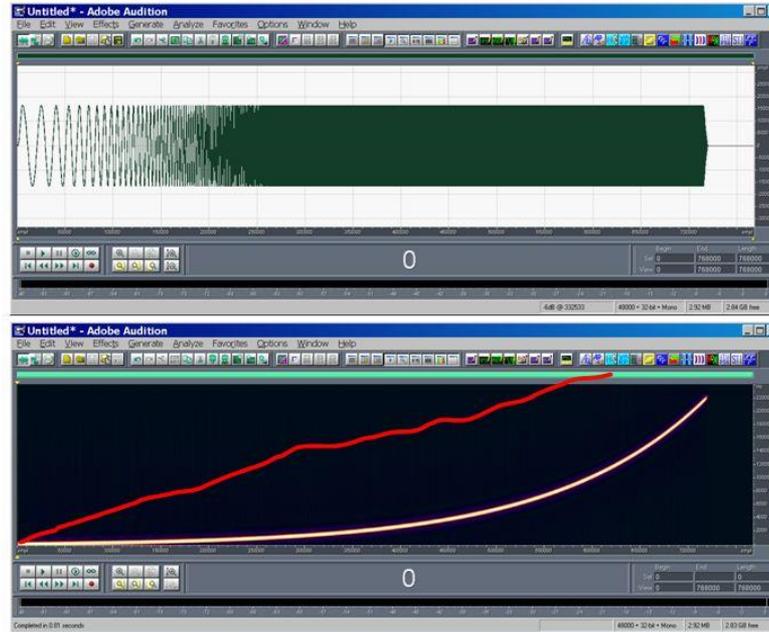
- Se ora applichiamo tale filtro inverso al risultato della misura  $y(t)$ , che altro non è che la convoluzione di  $x(t)$  con la risposta all'impulso dell'ambiente,  $h(t)$ , otteniamo:

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

- 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 – $x(t)$



Stop

8 novembre 2010

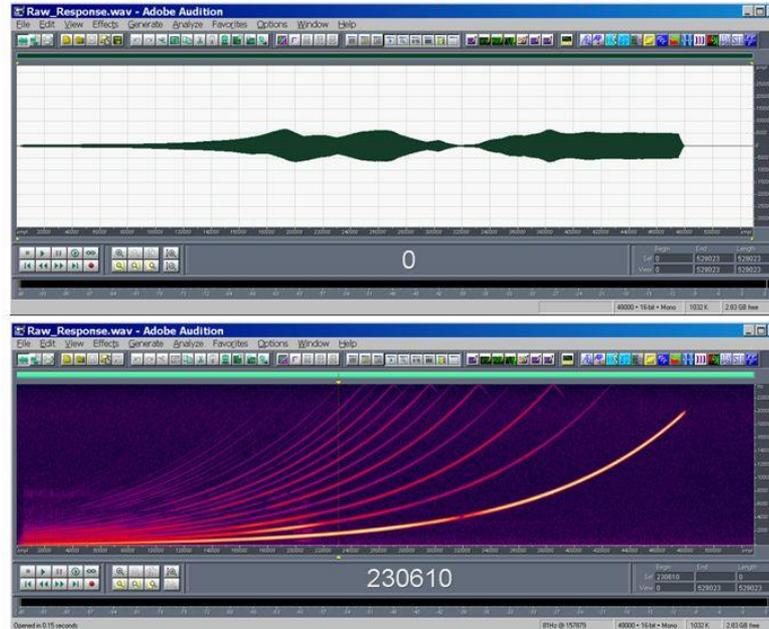
Misura della Risposta all'Impulso

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

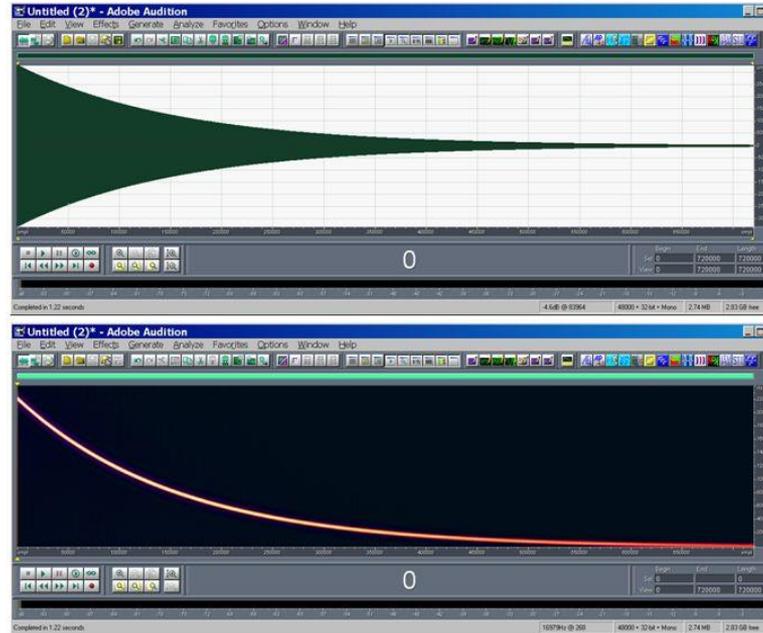
Misura della Risposta all'Impulso

16

Immagini di Angelo Farina

# Misura con sweep esponenziali

## Inverse Filter – $z(t)$



Stop

8 novembre 2010

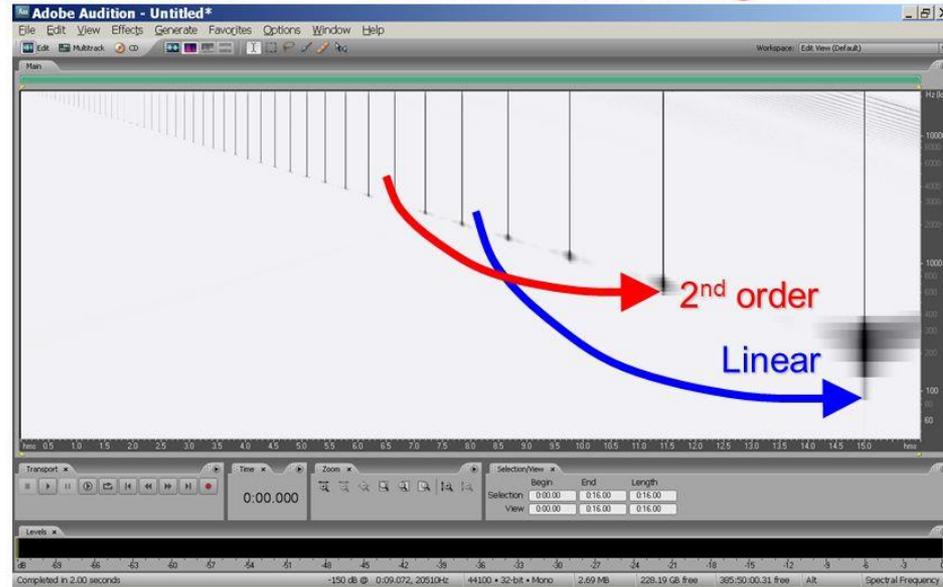
Misura della Risposta all'Impulso

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