

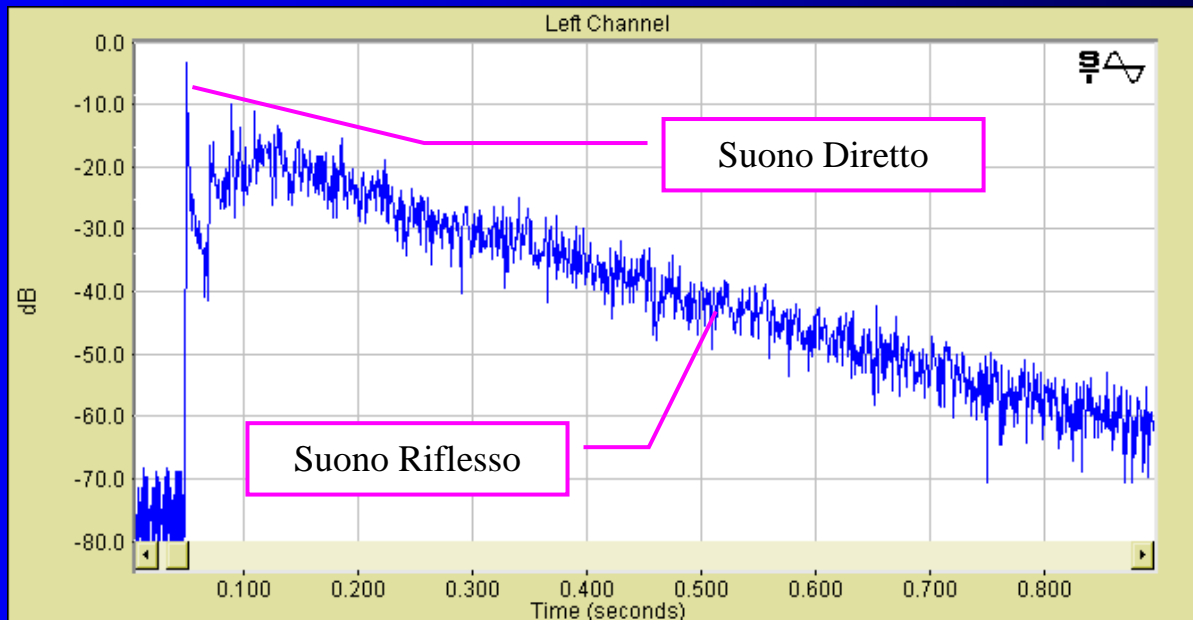
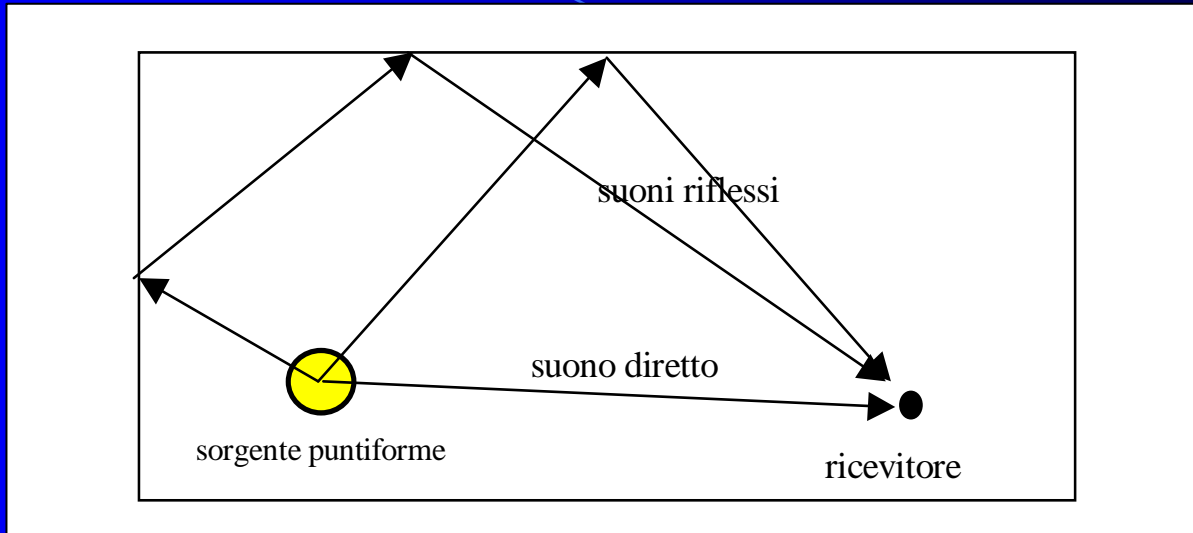
# Registrazione della risposta acustica delle sale da concerto per i poster

**Angelo Farina – Andrea Avanzini**

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma, Via delle Scienze 181/A  
Parma, 43100 ITALIA – [HTTP://pcfarina.eng.unipr.it](http://pcfarina.eng.unipr.it) - mail: [farina@unipr.it](mailto:farina@unipr.it)

*AES Italia – Workshop 2003 sulle tecniche di ripresa - Adria*

# Meccanismi di propagazione del suono nelle sale



# Livello sonoro in funzione della distanza dalla sorgente



# La formula del campo semiriverberante

$$L_p(d) = L_W + 10 \cdot \lg \left[ \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{4}{\sum \alpha_i \cdot S_i} \right]$$

Suono diretto

Suono riflesso

$$d_{cr} = \sqrt{\frac{Q}{16 \cdot \pi} \cdot \sum \alpha_i \cdot S_i}$$

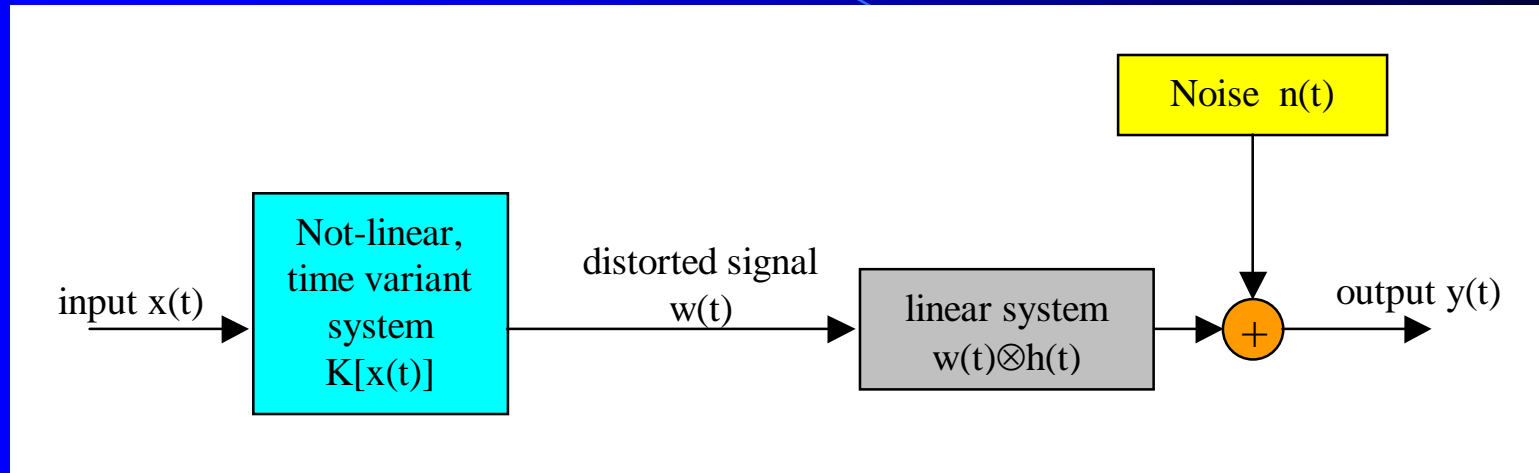
# La formula di Sabine

$$T_{60} = \frac{0.16 \cdot V}{\sum \alpha_i \cdot S_i}$$

- Sostituendo nella formula della distanza critica:

$$d_{cr} = \sqrt{\frac{Q}{16 \cdot \pi} \cdot \frac{0.16 \cdot V}{T_{60}}} = \sqrt{\frac{Q}{100 \cdot \pi} \cdot \frac{V}{T_{60}}}$$

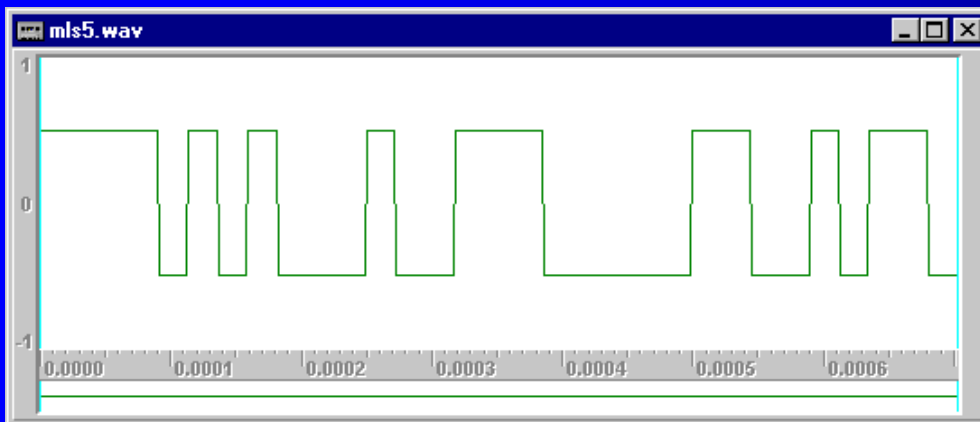
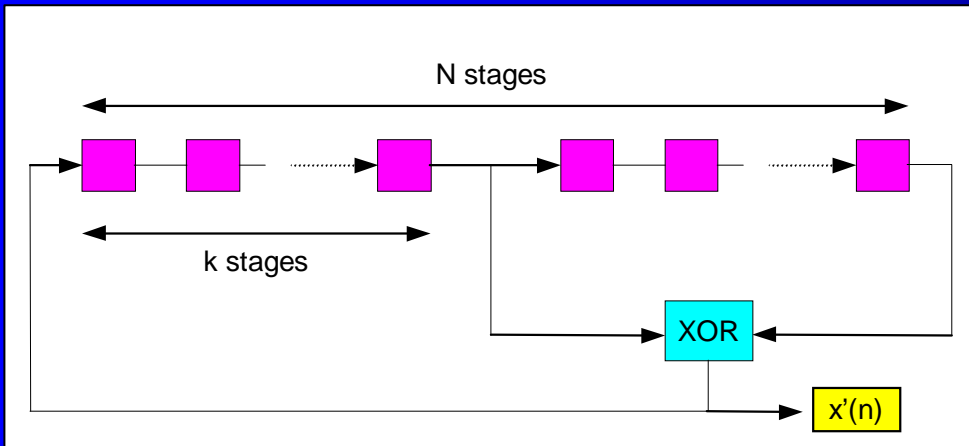
# Schema del processo di misura



- Si desidera misurare la risposta impulsiva lineare  $h(t)$ . Essa può essere ricavata dalla conoscenza del segnale di test  $x(t)$  e del segnale misurato  $y(t)$ . L'influenza della parte non lineare  $K$  e del rumore  $n(t)$  deve essere minimizzata.

# Il metodo MLS

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



$$L = 2^{N-1}$$

# Deconvoluzione MLS

- Il segnale misurato  $y(i)$  è cross-correlato con il segnale di test  $x(i)$  mediante una trasformata veloce di Hadamard. Se il sistema in prova è lineare e tempo-invariante, il risultato è la risposta impulsiva  $h(i)$

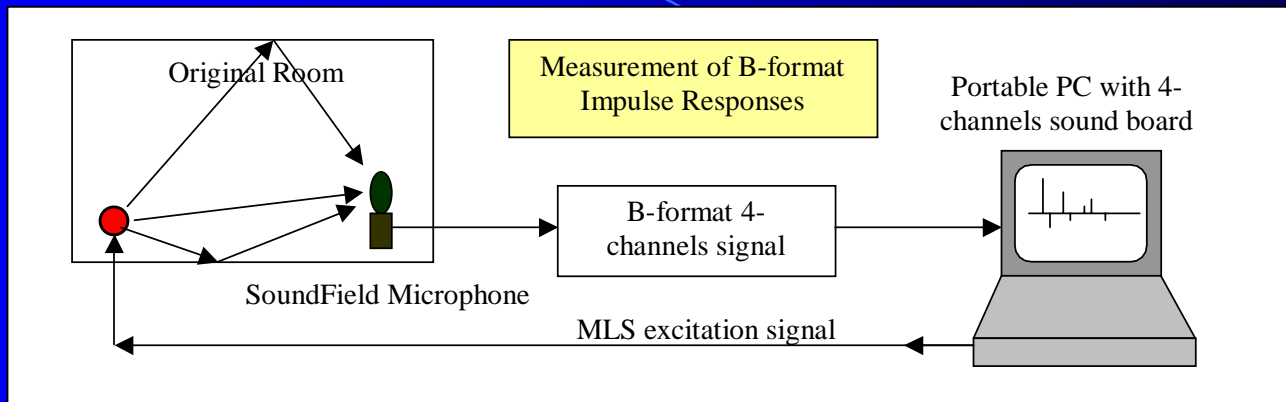
$$\mathbf{h} = \frac{1}{L+1} \cdot \tilde{\mathbf{M}} \cdot \mathbf{y}$$

- In cui  $\mathbf{M}$  è la matrice di Hadamard trasposta, ottenuta permutando la sequenza MLS originaria  $m(i)$

$$\tilde{\mathbf{M}}(i, j) = m[(i + j - 2) \bmod L] - 1$$



# Esempio di misura MLS



**Generate Multiple MLS Sig...** [X]

MLS Order: 15 B [OK]

Amplitude: 16384 [Cancel]

N. sequences: 16 [Help]

Repetitions: 1

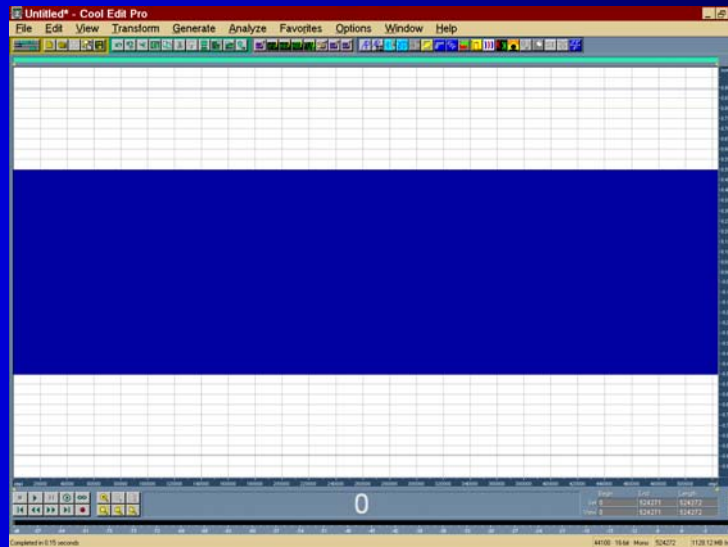
Generate control pulses on right channel

Control Pulse Event:

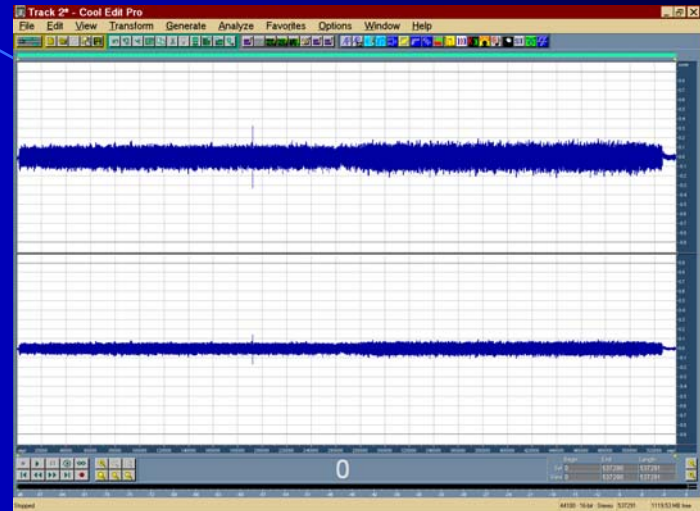
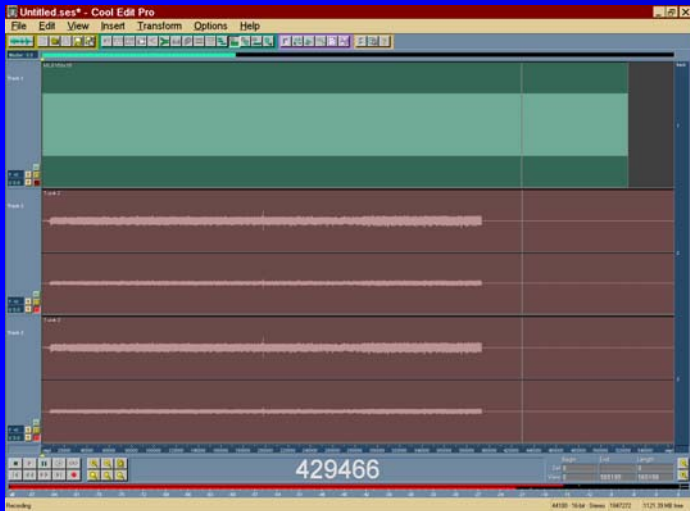
- At the beginning of each repetition
- At the beginning of each repetition but first
- At the end of each repetition

User: Andreas Langhoff

Reg. key: [XXXXXXXXXX]



# MLS example



**Deconvolve Multiple MLS Sequ...**

Input Data

MLS Order: 15 B

N. of measurements: 1

N. of sequences / measurement: 16

N. of first sequences to skip: 1

Output Results

N. of samples for each sequence: 32767

N. of samples to skip: 0

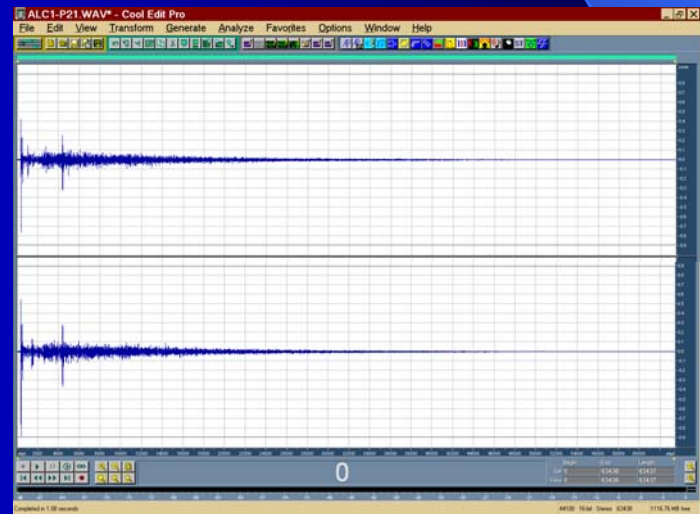
Scale each response separately

Remove DC component

User: Andreas Langhoff

Reg. key: \*

OK Cancel Help



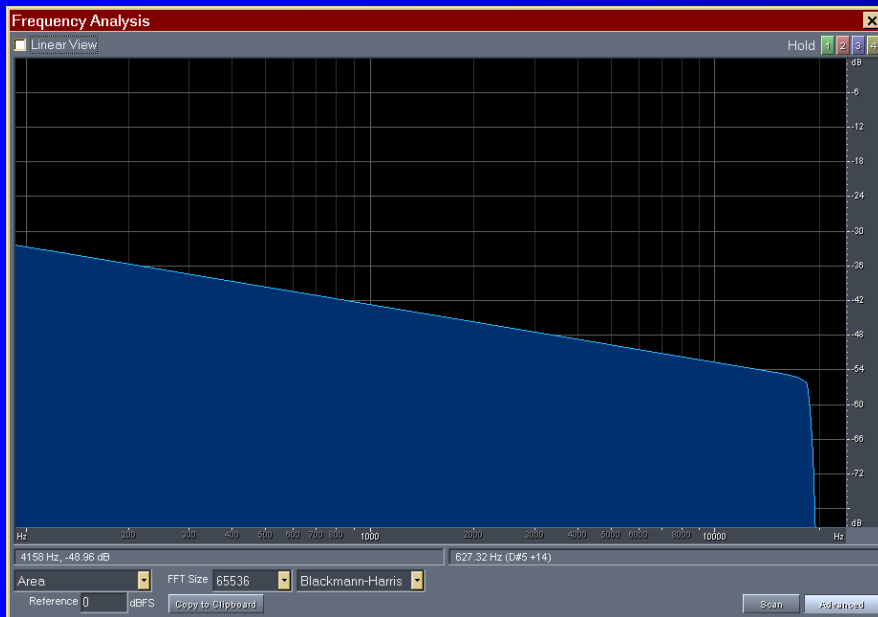
# Il metodo Log Sine Sweep

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

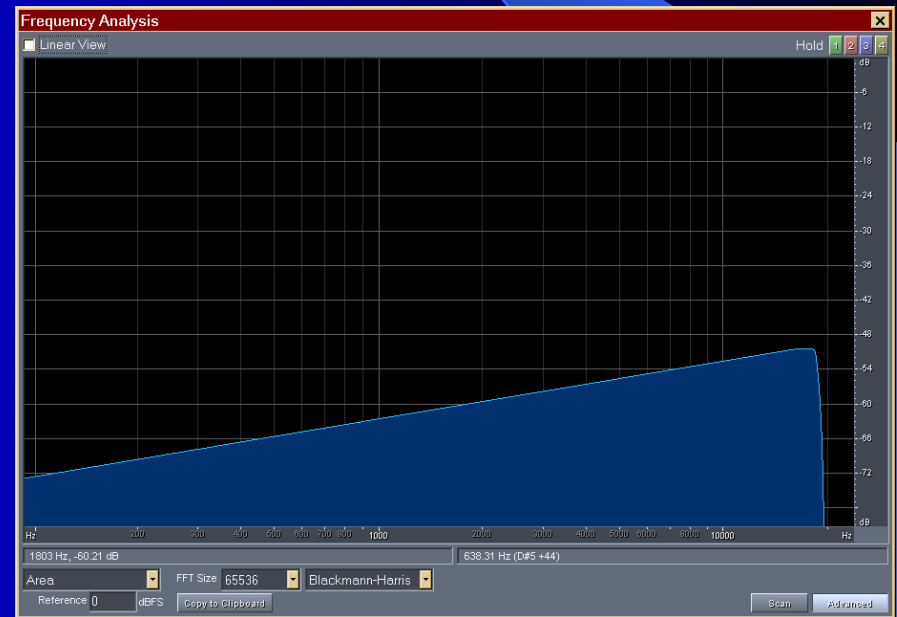
$$x(t) = \sin \left[ \frac{\omega_1 \cdot T}{\ln \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \cdot \left( e^{\frac{t}{T} \cdot \ln \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} - 1 \right) \right]$$

# Deconvoluzione del Log Sine Sweep

- Viene usata la tecnica del “time reversal mirror”, cioè la convoluzione del segnale misurato con lo stesso segnale di test, temporalmente invertito. Se il contenuto spettrale del segnale non è piatto, occorre una opportuna ri-equalizzazione del risultato.

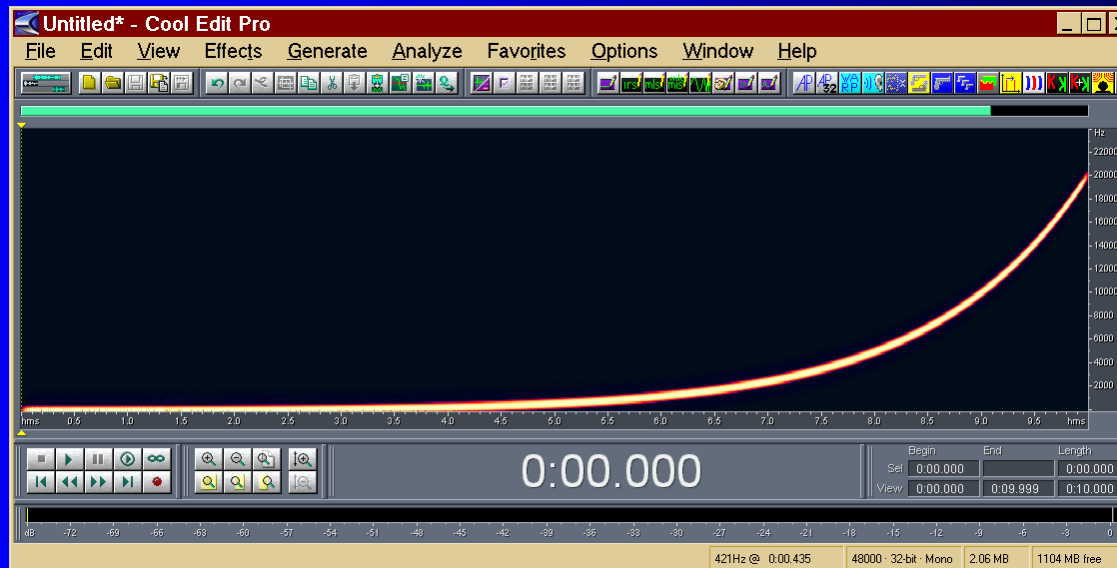
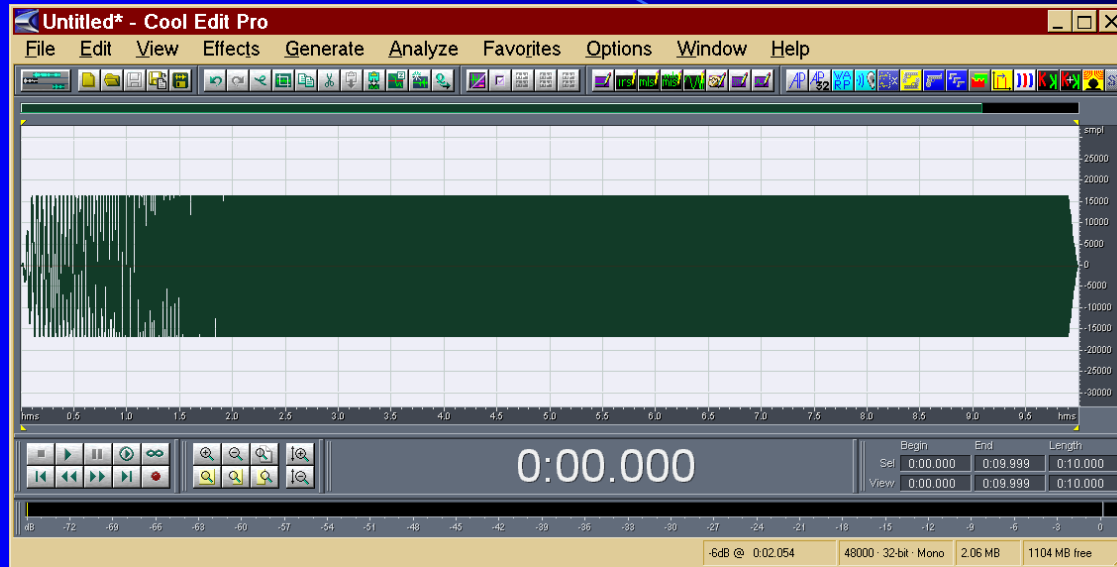


Segnale di test  $x(t)$

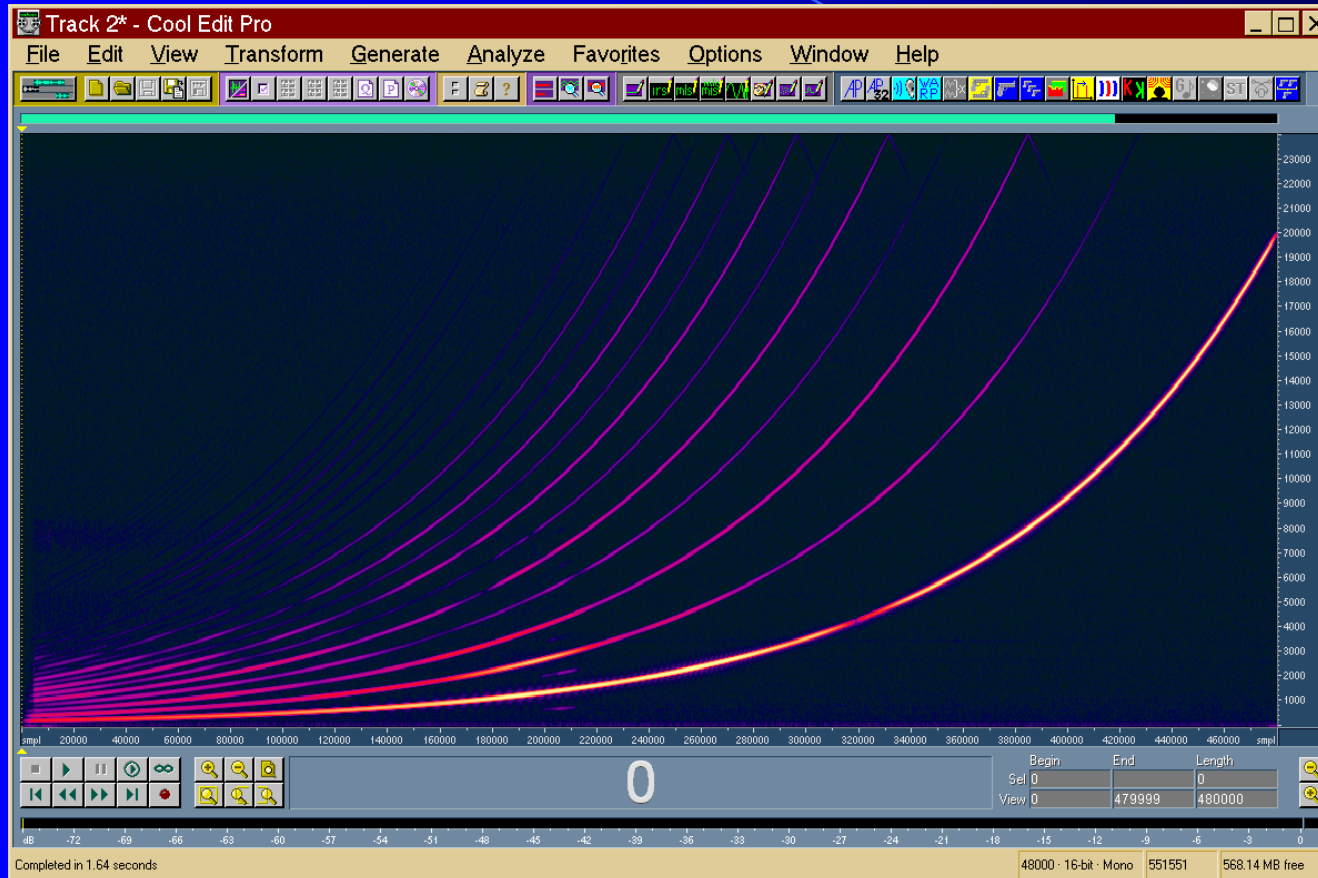


Filtro Inverso  $z(t)$

# Segnale di test Log Sine Sweep

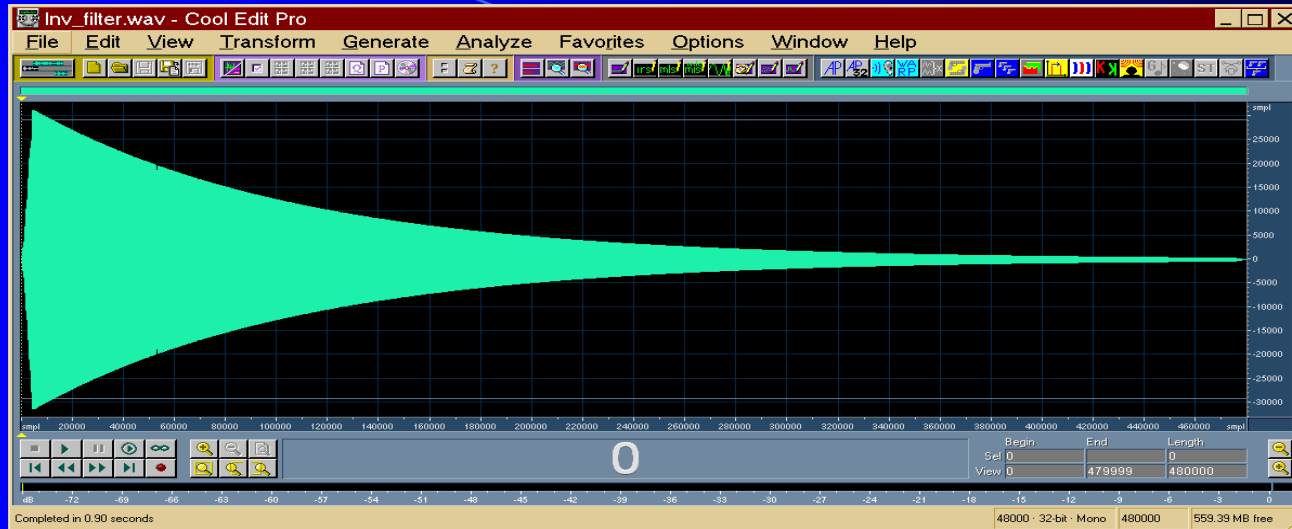


# Segnale misurato $y(t)$



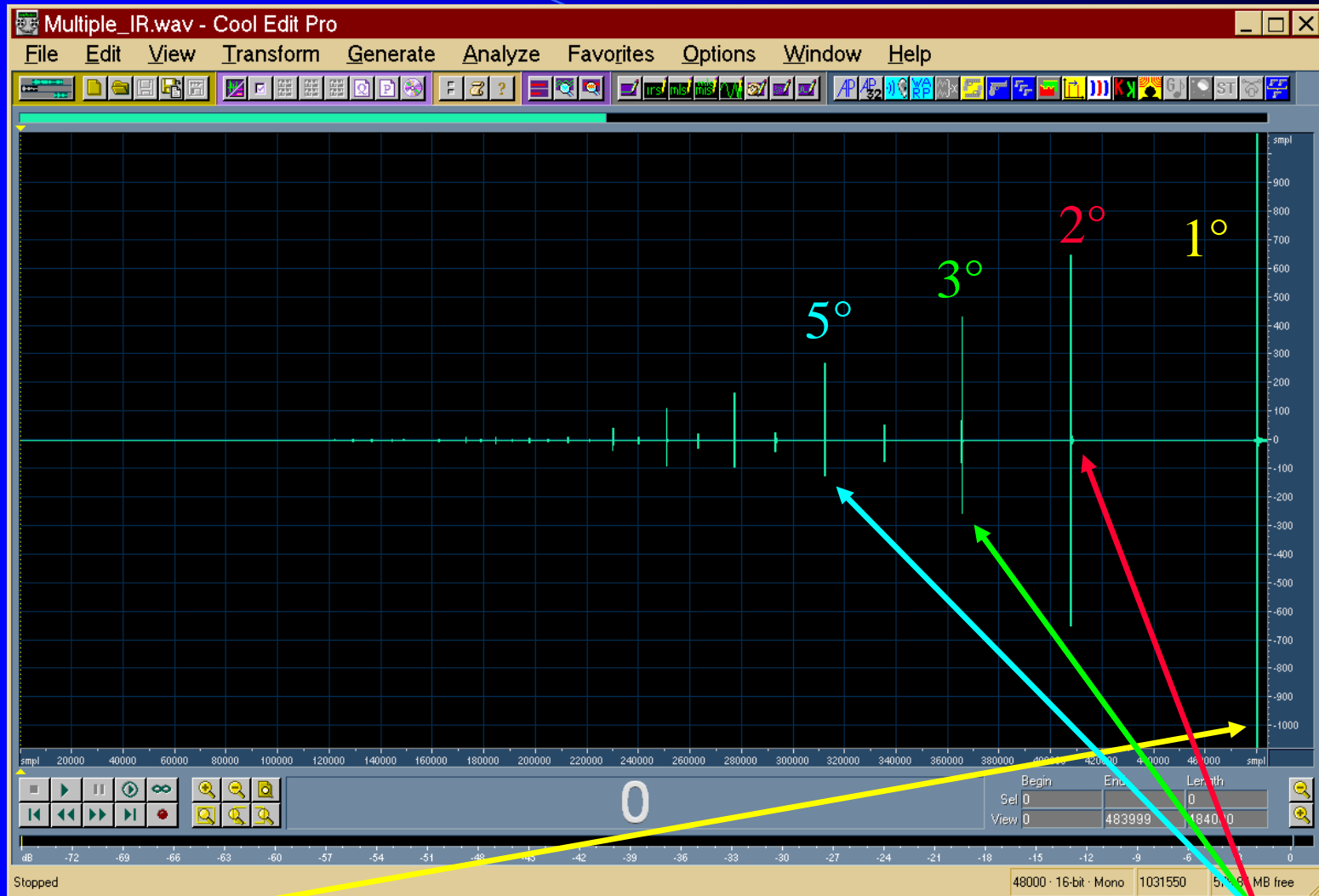
- ❖ La presenza di distorsione fa apparire numerose strisciate a frequenze multiple di quella di base

# Deconvoluzione della risposta all'impulso



La deconvoluzione viene ottenuta convolvendo il segnale misurato  $y(t)$  con un opportuno filtro inverso  $z(t)$

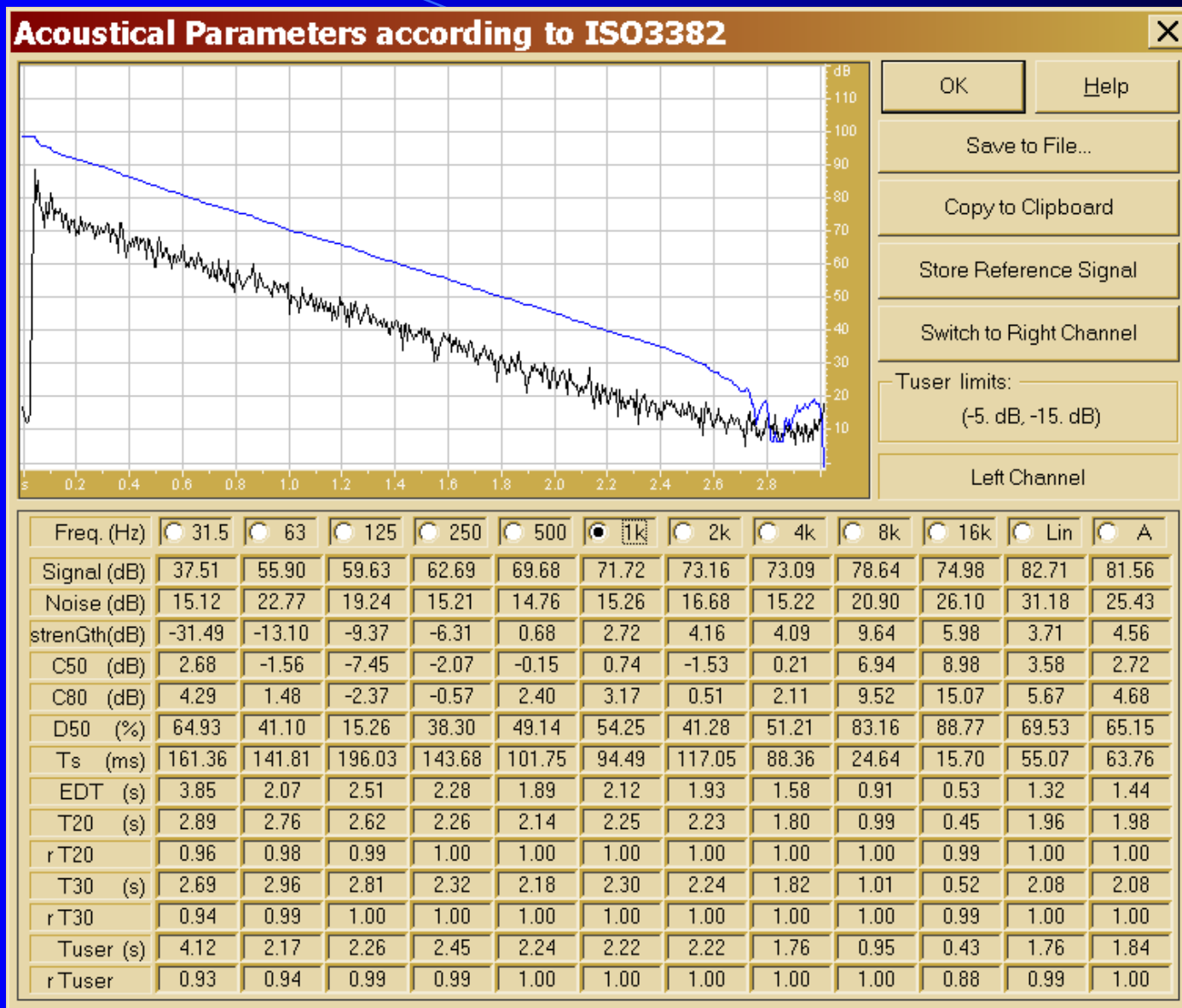
# Si ottiene una serie di risposte all'impulso



L'ultima è la risposta all'impulso lineare, quelle precedenti sono i prodotti di distorsione armonica



# Analisi della risposta all'impulso

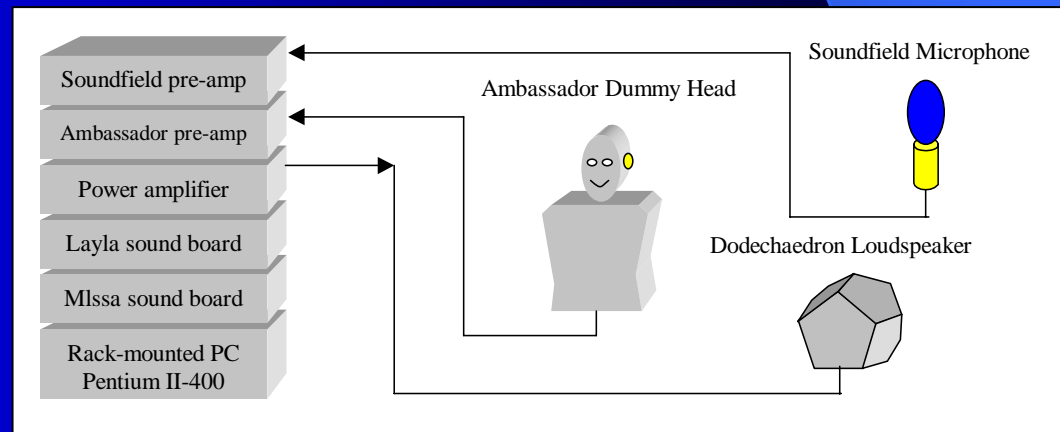


# Esperimento di comparazione

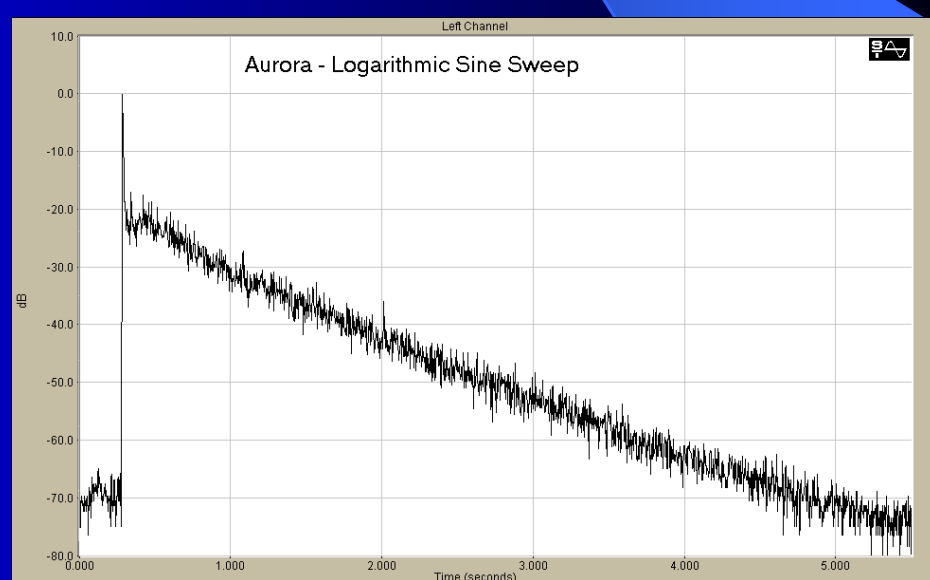
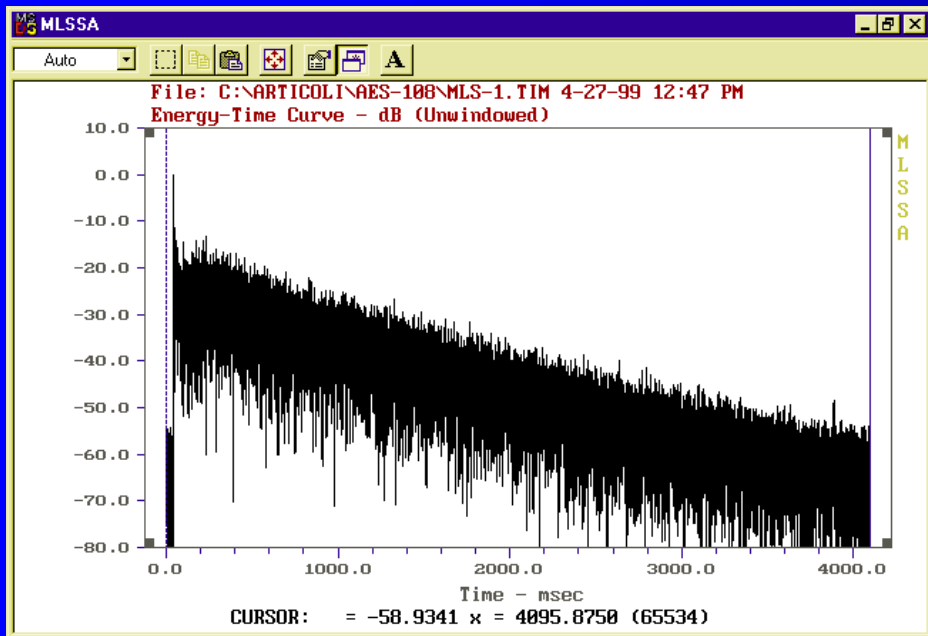
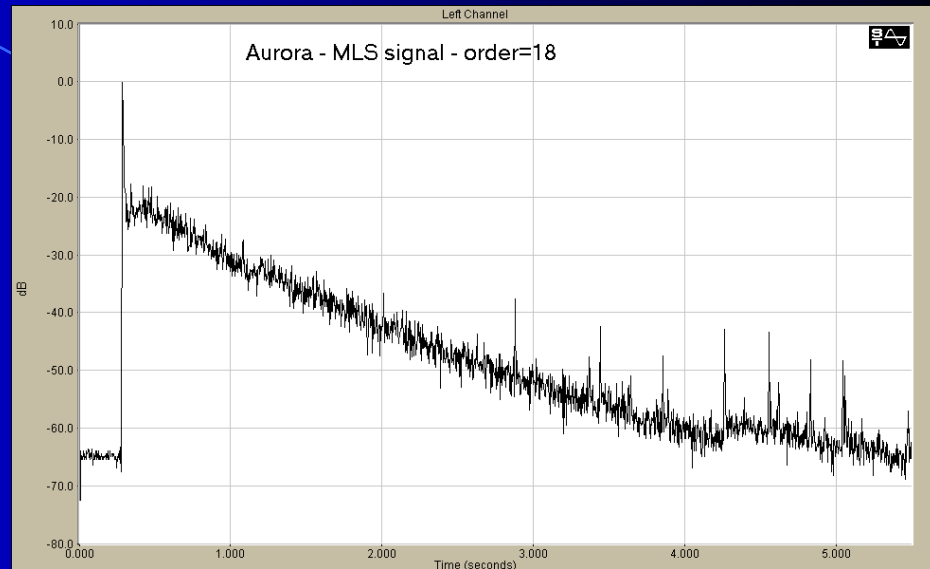
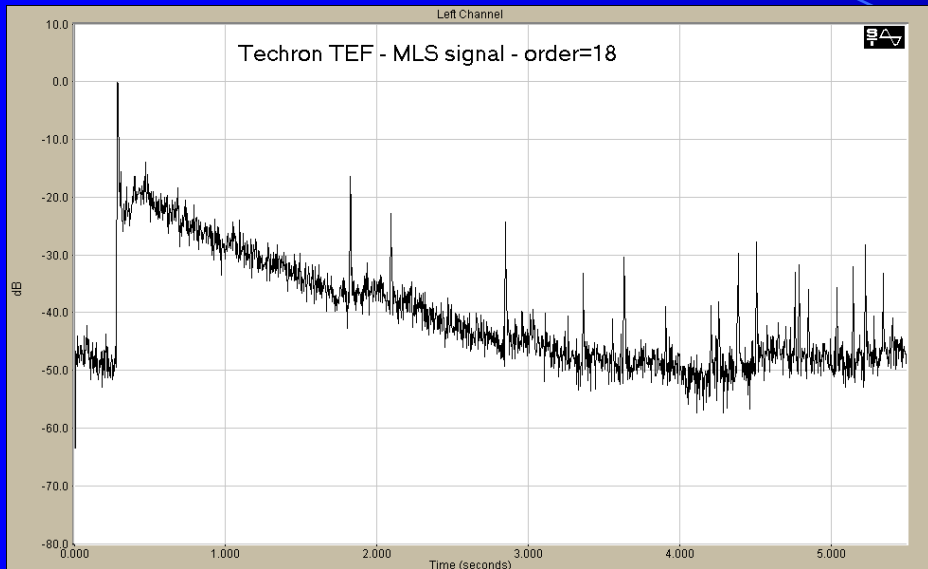
Test comparativo fra diverse tecniche di misurazione  
Organizzato dalla AES Italian Section  
(Bergamo's Workshop 1999, 27/28 aprile 1999)

Sperimentatore	Sistema di misura - Metodo	Altoparlante	Microfono
Angelo Farina	Aurora (synchronous measurement on PC+Layla) – MLS	Dodechaedron (Look Line D1)	Soundfield MKV + binaural (Ambassador)
Angelo Farina	Aurora (synchronous measurement on PC+Layla) – log sweep	Dodechaedron (Look Line D1)	Soundfield MKV + binaural (Ambassador)
Angelo Farina	MLSSA board – MLS	Dodechaedron (Look Line D1)	Soundfield channel W
A. Ricciardi	MLSSA board – MLS	Directional, custom-made	Stage Accompany omnidirectional
Walter Conti	Techron TEF 20 – MLS & TDS	Directional, custom-made	B&K Omnidirectional
Nicola Prodi	Aurora (asynchronous playback & record through a Tascam DA38 recorder) – log sweep	Dodechaedron (Look Line D-300)	Soundfield ST250 + binaural (Neumann KU-100)

# Apparecchi



# Risultati



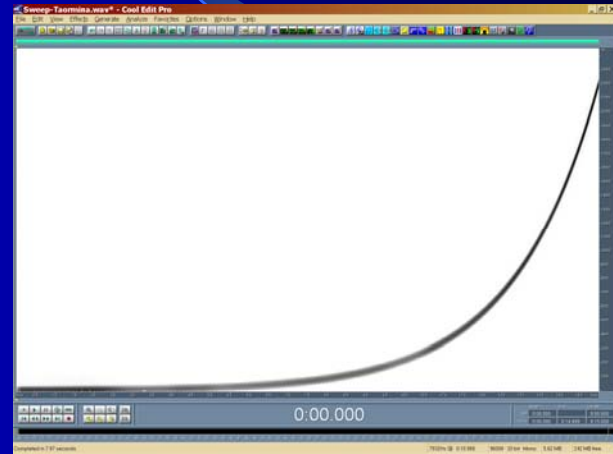
# Evoluzione recente

- Nuovo approccio di misura comprendente tutte le precedenti tecniche conosciute:
  - Binaurale
  - B-format
  - WFS
  - ITU 5.1 surround ( Williams MMA, OCT e INA)
  - Binaural Room Scanning
  - M. Poletti
- Il nuovo metodo è stato denominato “**Waves 2003**”, in quanto sviluppato in collaborazione con la nota società Waves, produttrice di software ed hardware per studi di registrazione.

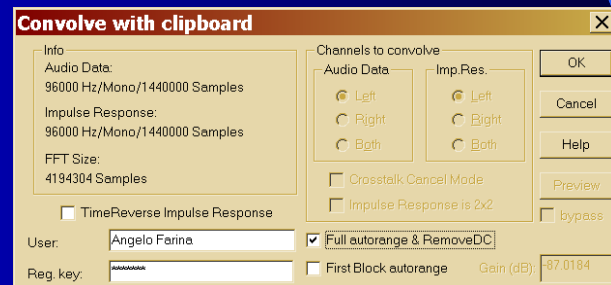
# Metodo di misura ottimizzato “Waves” (2003)

- Il segnale di Test: 1o SWEEP equalizzato

Frequenza iniziale	22 Hz
Frequenza finale	22 kHz
Durata della sweep	15 s
Silenzio tra due sweep	10 s
Tipo di sweep	LOG

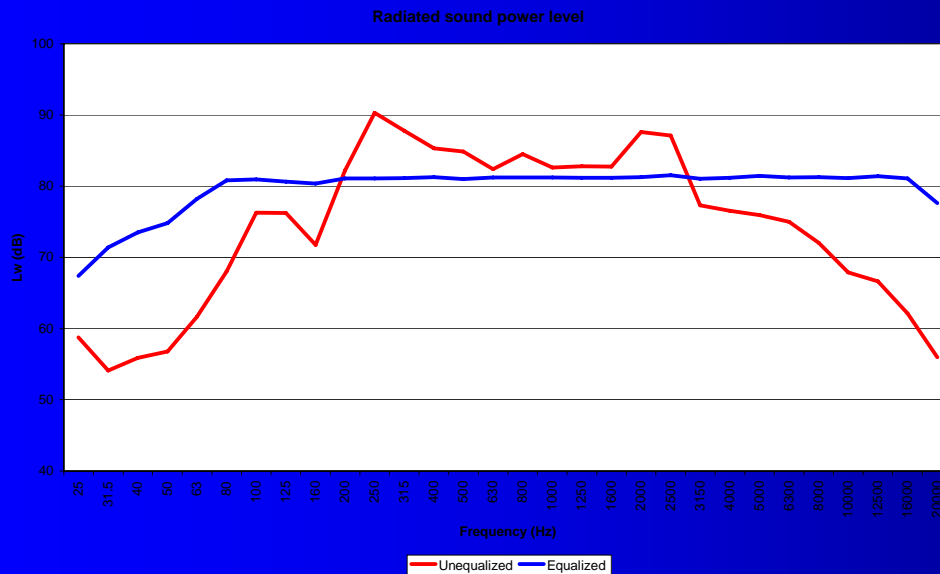


- La deconvoluzione:



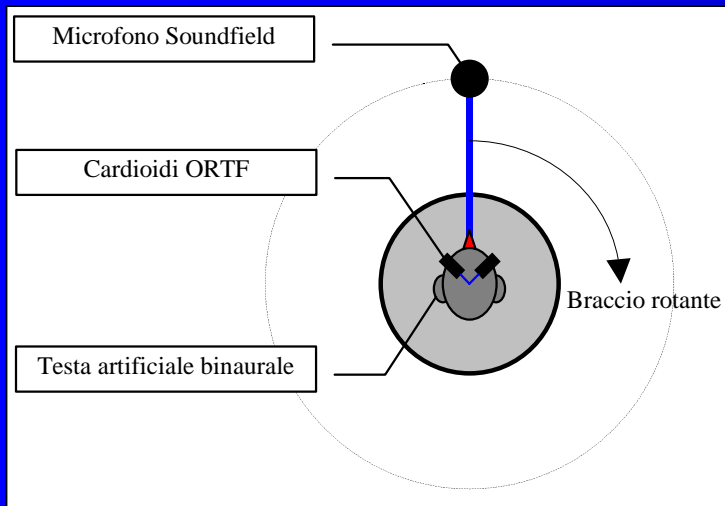
# Apparecchiatura

- La sorgente sonora equalizzata:
  - Il dodecaedro
  - Il subwoofer



# Metodo di misura

- I microfoni:
  - Testa artificiale binaurale (Neumann KU-100)
  - Microfoni a cardioide ORTF (Neumann K-140)
  - Microfono pressione-velocità B-Format 4 canali (Soundfield ST-250)





# Apparecchiature

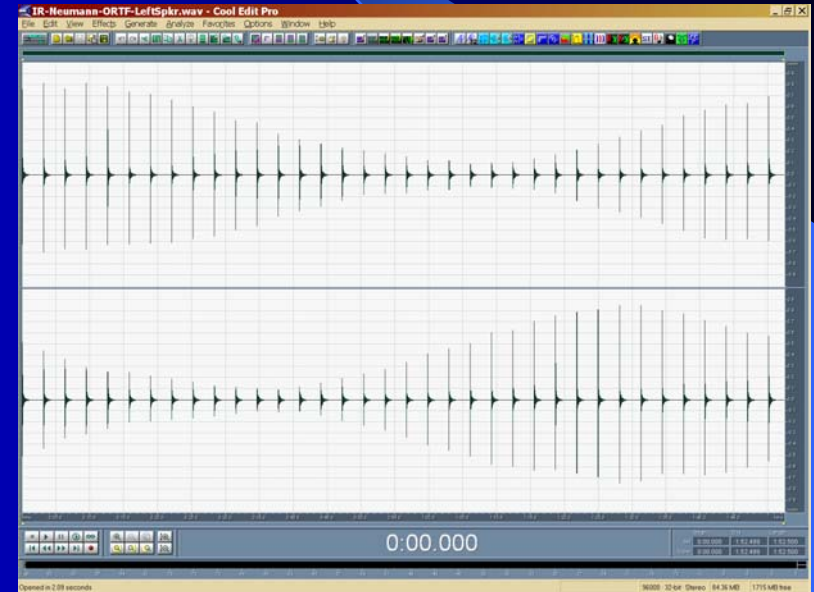
- Il piatto rotante:
  - Outline ET-1



- Il computer e la scheda audio:
  - Signum Data Futureclient P-IV 1.8 GHz
  - Aardvark Pro Q-10 96 kHz – 24 bits

# Metodo di misura

- I dati acquisiti:



# I parametri acustici

- Tempo di riverbero  $T_{30}$
- Indice di chiarezza  $C_{80}$ :
- Indice di definizione  $D$ :
- Tempo baricentrico  $T_s$ :

$$C_{80} = 10 \cdot \lg \frac{\int_0^{80ms} p^2(\tau) \cdot d\tau}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(\tau) \cdot d\tau}$$

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} p^2(\tau) \cdot d\tau} \cdot 100$$

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} \tau \cdot p^2(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} p^2(\tau) \cdot d\tau}$$

# I parametri acustici

- Strenght:

$$G = \text{SPL} - L_w + 31 \quad \text{dB}$$

- IACC:

$$\rho(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} h_d(\tau) \cdot h_s(\tau + t) \cdot dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_d^2(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} h_s^2(\tau + t) \cdot dt}}$$

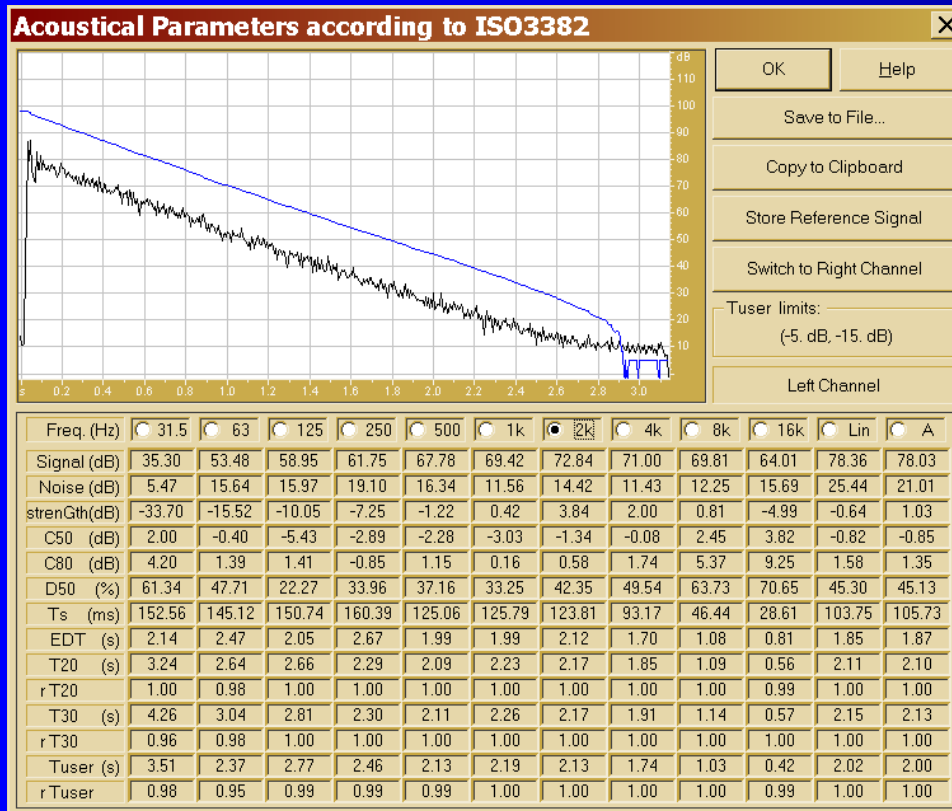
- LF:

$$LF = \frac{\int_{0ms}^{80ms} h_Y^2(\tau) \cdot d\tau}{\int_{0ms}^{80ms} h_W^2(\tau) \cdot d\tau}$$

- LFC:

$$LFC = \frac{\int_{0ms}^{80ms} h_Y(\tau) \cdot h_W(\tau) \cdot d\tau}{\int_{0ms}^{80ms} h_W^2(\tau) \cdot d\tau}$$

# I plug-ins di Aurora



**Ando's Parameters**

IACC:

Tau IACC:

WIACC:

dt1:  Left

Right

T sub:  Left  Right

OK

Clipboard

**Lateral Fraction**

OK

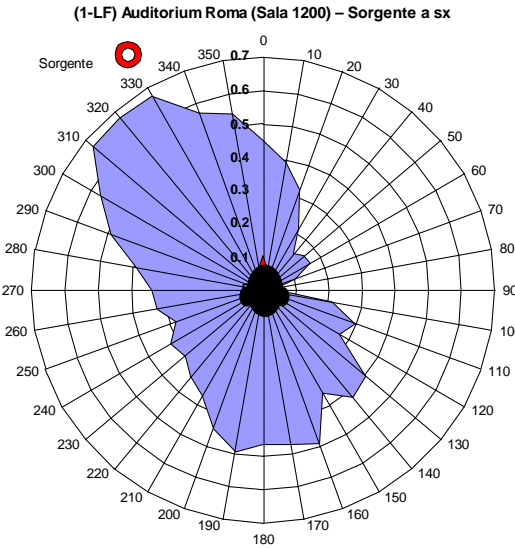
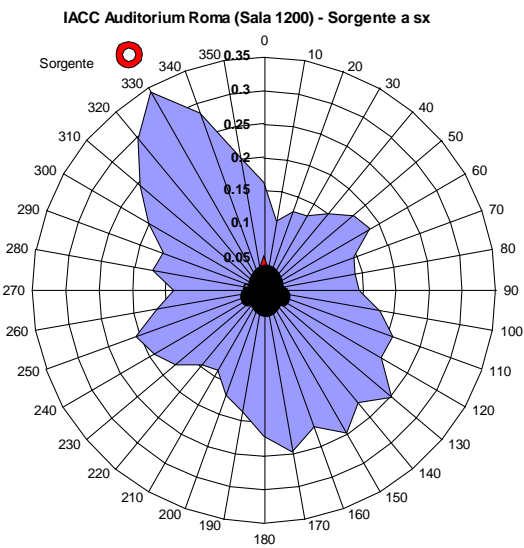
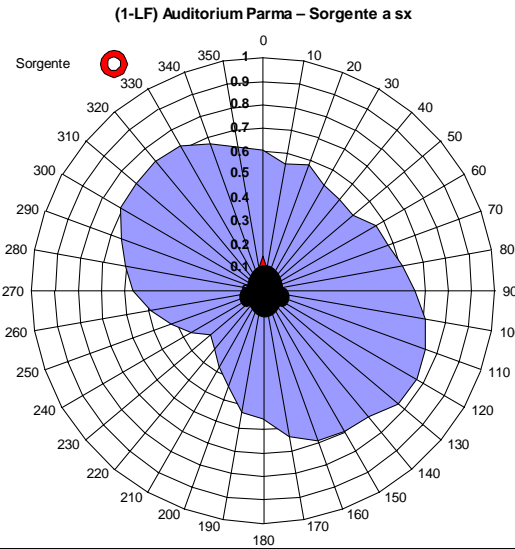
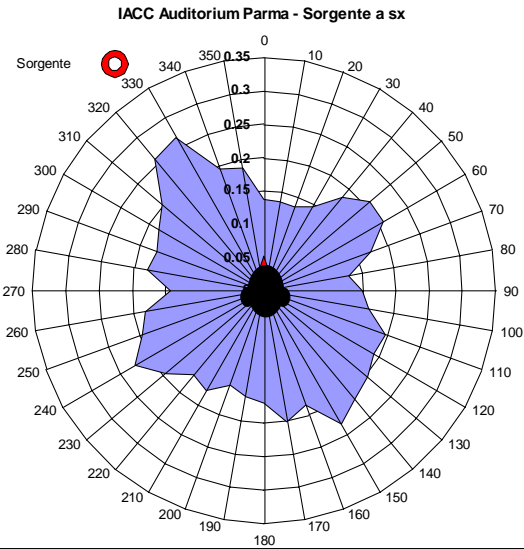
Clipboard

LF:

LE:

LFC:

# Diagrammi polari di IACC ed (1-LF)



Auditorium	1-LF	IACC
Parma	0.725	0.266
Roma	0.676	0.344

# Auralizzazione

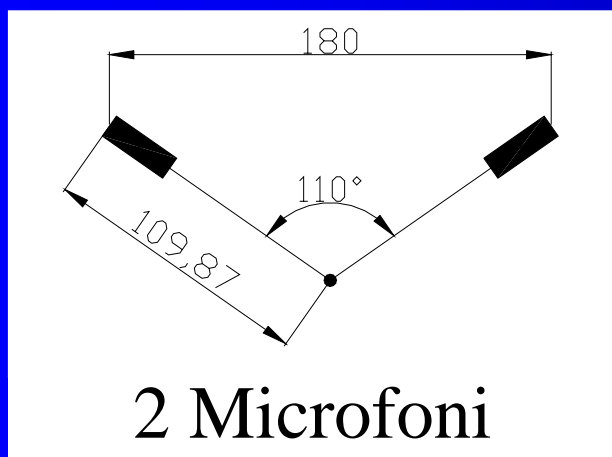
- Stereo ORTF su 2 altoparlanti standard
- Binaural Room Scanning, con riproduzione in cuffia o mediante Stereo-Dipolo
- Metodo B-format (Ambisonics 1° ordine)
- Surround secondo standard ITU 5.1 canali
- Tecnica 2D di Mark Poletti (Ambisonics 3° ordine orizzontale)
- Wave Field Synthesis (array di altoparlanti)
- Metodi ibridi (Ambiophonics)

# Auralizzazione

- In ogni caso, la base del metodo è la convoluzione di segnali “asciutti” (anecoici) con risposte all’impulso preparate nel formato “surround” prescelto (da 2 a 24 canali).
- Tale operazione di convoluzione può oggi essere realizzata in tempo reale anche su un PC molto economico, purchè dotato in uscita di una scheda audio multicanale



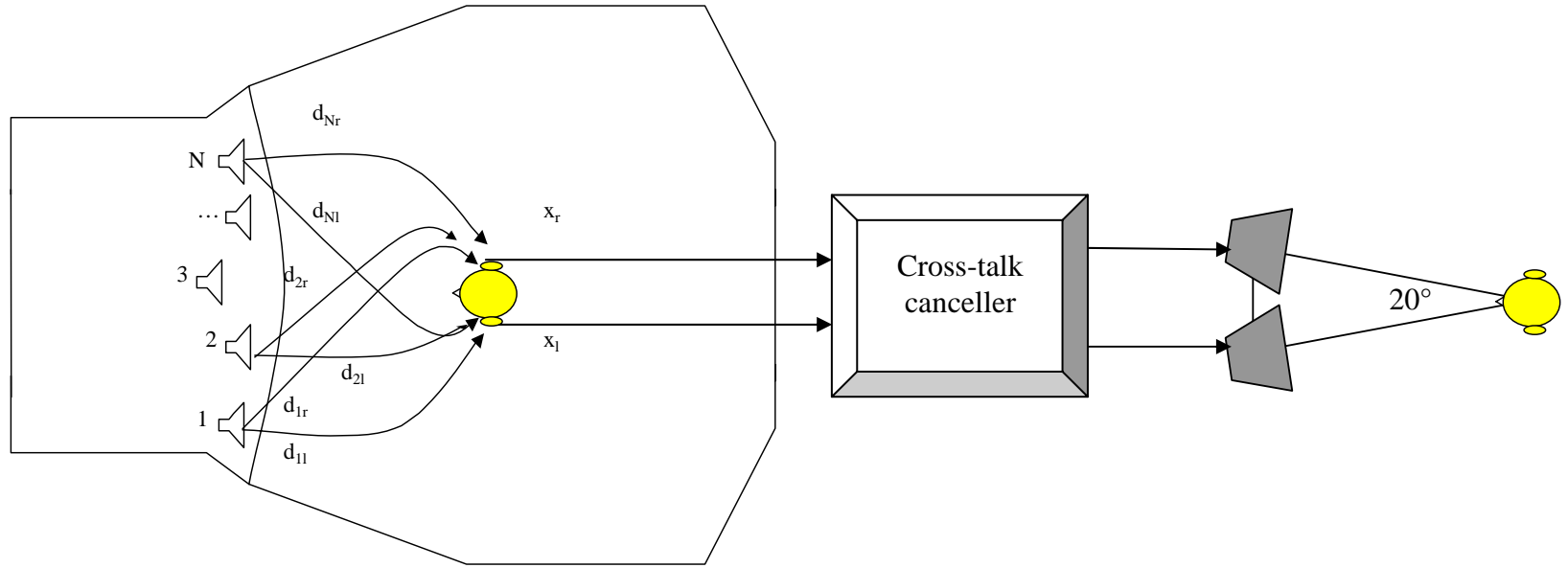
# ORTF Stereo



- La riproduzione avviene su due altoparlanti posti a  $\pm 30^\circ$ , ciascuno alimentato dal segnale del corrispondente microfono

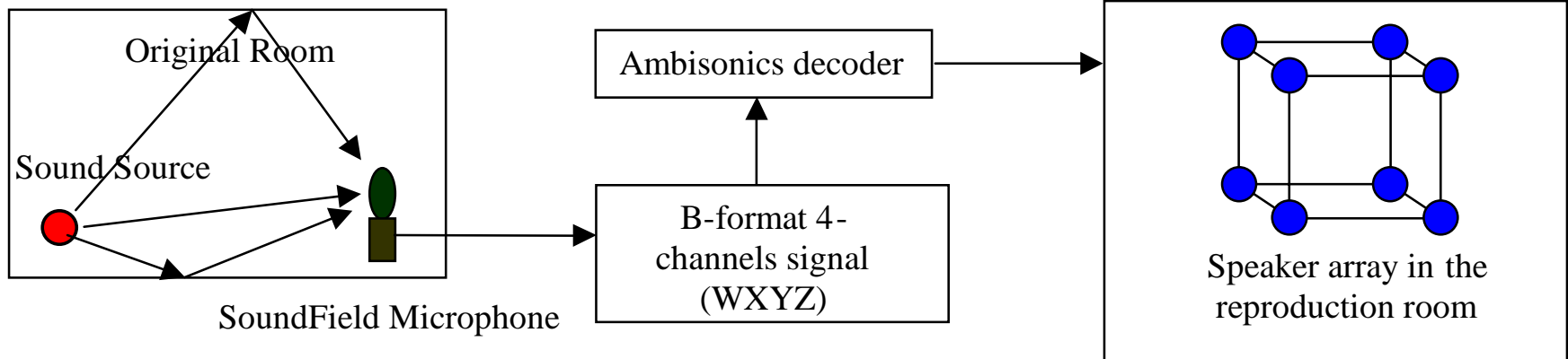
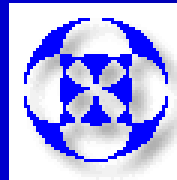
# Binaural (Stereo Dipole)

Original 2-channels recording of the signals coming from N sources



- La riproduzione avviene su due altoparlanti posti a  $\pm 10^\circ$ , alimentati attraverso un sistema digitale di cancellazione del “cross-talk”

# Metodo B-format (Ambisonics 3D 1° ordine)



- La riproduzione avviene su un array di 8-24 altoparlanti, attraverso un “decoder” Ambisonics

# ITU 5.1 surround

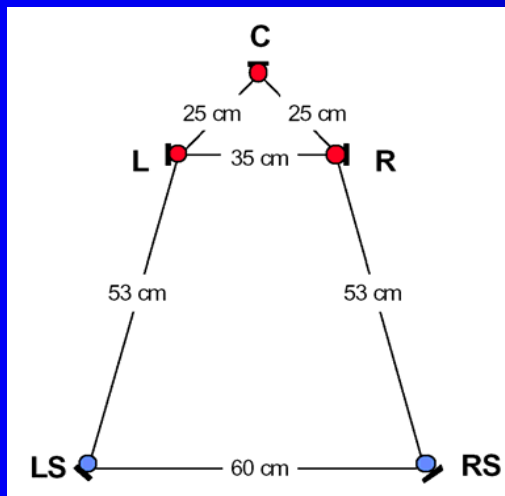
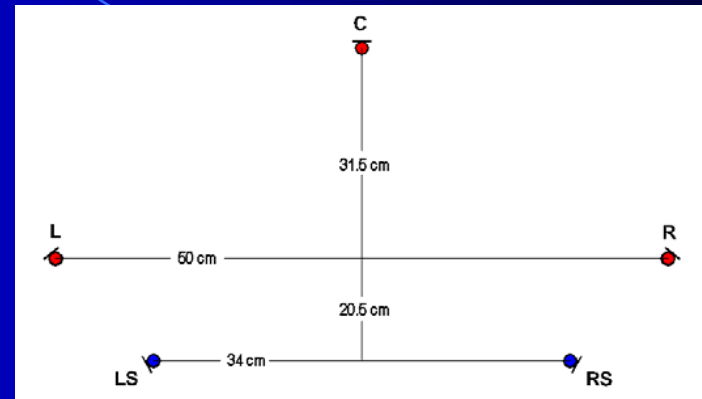
## ● Williams MMA

**Schema del sistema microfonico Williams MMA**

C : Cardioide,  $0^\circ$

L, R : Cardioide,  $\pm 40^\circ$

LS, RS : Cardioide,  $\pm 120^\circ$



## ● INA-5

**Schema del sistema microfonico INA-5**

C : Cardioide,  $0^\circ$

L, R : Cardioide,  $\pm 90^\circ$

LS, RS : Cardioide,  $\pm 150^\circ$

# ITU 5.1 surround

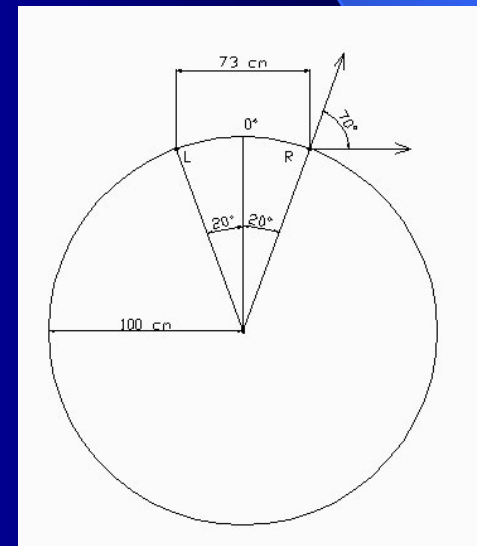
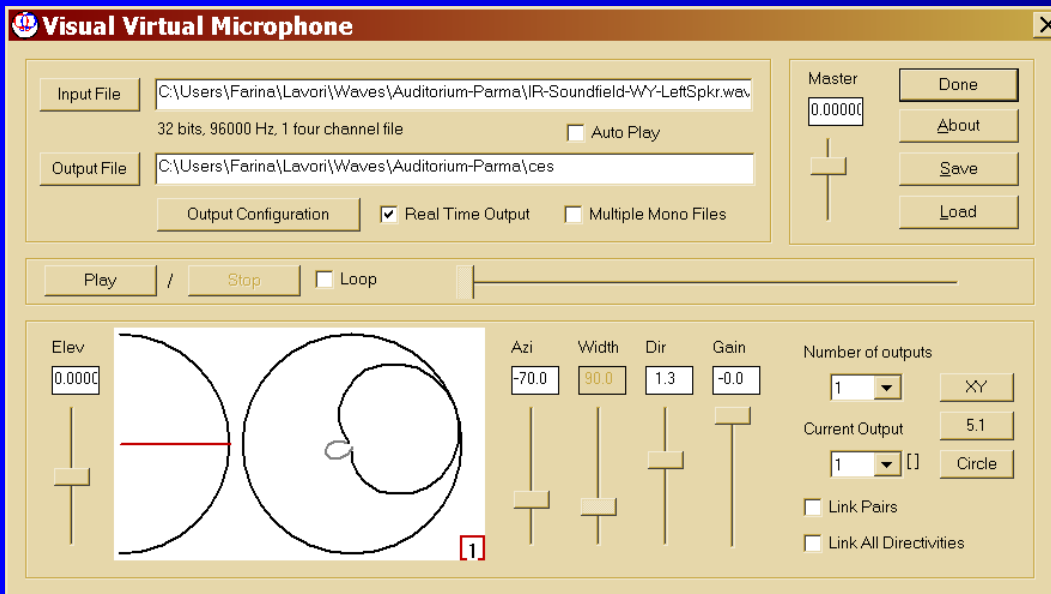
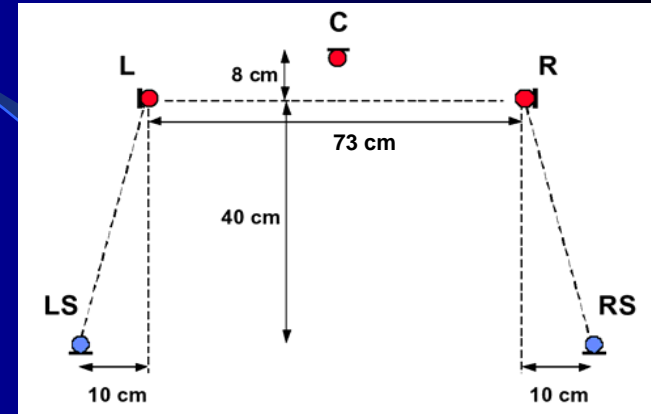
## ● OCT

### Schema del sistema microfonico OCT

C : Cardioide,  $0^\circ$

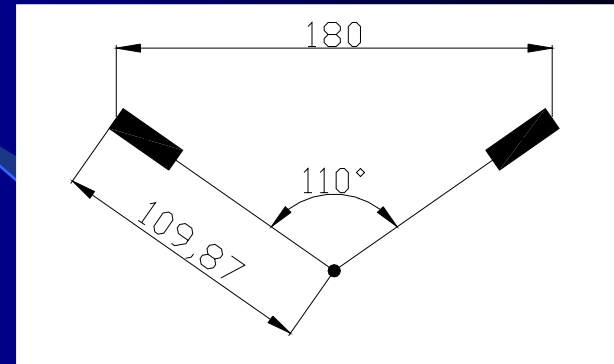
L, R : Super Cardioide,  $\pm 90^\circ$

LS, RS : Cardioide,  $\pm 180^\circ$



# Microfoni virtuali di M. Poletti

- Si usa uno dei due microfoni ORTF, che campiona 36 posizioni poste su una circonferenza con raggio di 110mm.



Elaborando tali 36 risposte all'impulso, è possibile ricavare 7 risposte all'impulso rappresentative di 7 microfoni virtuali di ordine 0,1,2,3:

$$D_0 = 1$$

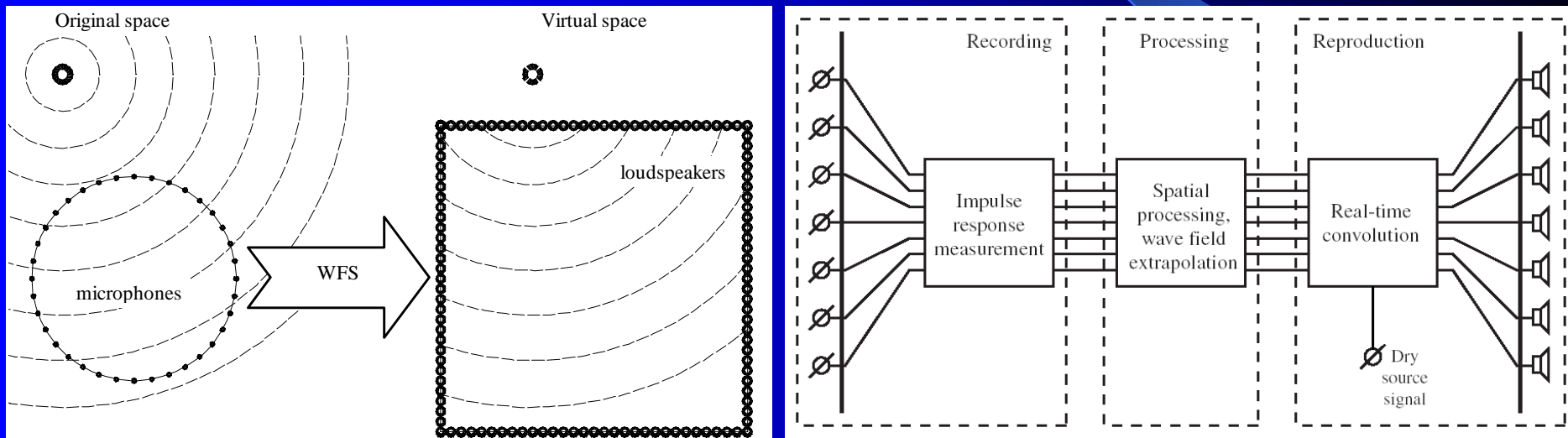
$$D_{1,n} = \cos\left(\vartheta + n \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad n = 0,1$$

$$D_{2,n} = \cos\left(2 \cdot \vartheta + n \cdot \frac{\pi}{4}\right) \quad n = 0,1$$

$$D_{3,n} = \cos\left(3 \cdot \vartheta + n \cdot \frac{\pi}{6}\right) \quad n = 0,1$$

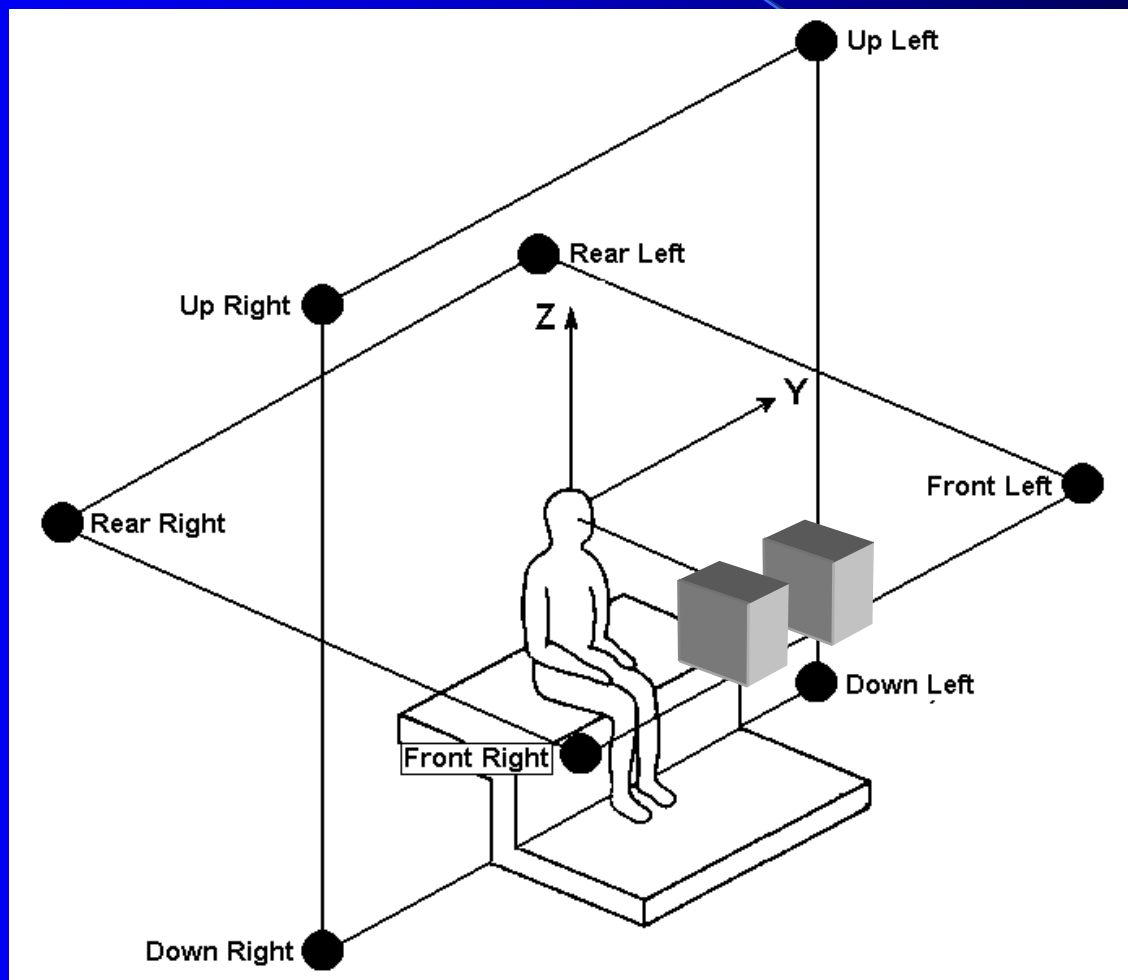
# Wave Field Synthesis ( WFS)

- Schema del processo:



# Metodi ibridi (Ambiophonics)

- Sistema Ambiophonics 3D (10 altoparlanti):





# Conclusioni

- Principali vantaggi della nuova procedura di misura “Waves 2003”:
  - ingloba tutte le precedenti tecniche conosciute in un approccio unico e coerente
  - consente di registrare le caratteristiche acustiche di teatri e sale da concerto, con particolare cura riguardo gli aspetti spaziali, preservandole per le generazioni future