

Marco Marinoni

ACUSTICA E PSICOACUSTICA MUSICALE

Lezione 12 – Il riverbero (M. Graziani)

Indice

1. *Introduzione*
2. *La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico*
3. *Reti di riverberazione*
4. *Riverberatori classici*
5. *Riverberatori a più canali*
6. *Riverberatori a convoluzione*
 1. *Metodologie di rilevamento della risposta all'impulso*
 2. *Risposte all'impulso di ambienti reali*
 3. *Convoluzione – come funziona*
 4. *Convoluzione – esempi*

1. Introduzione

- Il fenomeno della **riverberazione** che si sperimenta normalmente ascoltando i suoni in una grande sala è ben noto alla maggior parte delle persone, tuttavia pochi sanno come è perché questo fenomeno si verifica in natura.
- Molti ignorano, inoltre, che la riverberazione non è un semplice effetto da usare in sala per rendere un suono più carino o realistico, ma **un fenomeno strettamente legato alla natura del suono e al contesto ambientale** al punto da essere **un'importante sorgente di informazioni per il nostro sistema percettivo.**

1. Introduzione

- In musica, il **riverbero** contribuisce notevolmente a **formare la sensazione di realtà acustica del suono**.
 - Se pensiamo che, in genere, le sorgenti sonore naturali non sono direttive, ma irradiano energia in un largo angolo, possiamo renderci conto che solo una piccola parte di essa ci arriva come suono diretto, mentre *la maggior parte finisce nel riverbero che viene a costituire, così, una caratteristica percettiva molto importante nel determinare l'atmosfera emozionale collegata ai vari suoni.*
 - Una riverberazione accurata, quindi, è essenziale soprattutto quando si usano fonti sonore sintetiche che, per loro natura ed anche a causa del tipo di diffusione mediante casse acustiche, sono spesso molto fredde e direzionali.

*Dobbiamo, quindi, fabbricare, attorno al suono, il riverbero in modo non solo **realistico**, ma anche **corretto** e **dotato di senso**.*

1. Introduzione

- Se, per esempio, ascoltiamo un suono all'interno di una sala, anche se siamo ad occhi bendati o comunque non in grado di vedere direttamente la **sorgente sonora**, riusciamo a valutare con buona precisione la **localizzazione** e la **distanza** di quest'ultima e otteniamo indicazioni sulle dimensioni della sala in cui ci troviamo.

1. Introduzione

Come è possibile questo?

- Tutti questi dati vengono dedotti dal nostro sistema orecchio cervello basandosi essenzialmente sul complesso dei segnali acustici ricevuti e sul fatto che noi abbiamo due orecchie e non a caso: così come sono necessari due occhi per avere una visione del mondo tridimensionale e non semplicemente piatta, è indispensabile possedere due orecchie per localizzare correttamente la sorgente di un suono, capire la direzione da cui proviene e valutare le dimensioni della sala.

1. Introduzione

- Queste considerazioni ci guidano direttamente alla **spazializzazione**, argomento di cui ci occuperemo nel corso di *Esecuzione e interpretazione della musica elettroacustica*.
 - Prima di poterlo affrontare, infatti, occorre avere una certa conoscenza di fenomeni come l'**eco** e il **riverbero** che ne è una diretta conseguenza.
- In questa lezione vi invitiamo ad un viaggio all'interno del **riverbero** mediante una sorta di microscopio acustico in grado di evidenziarne le caratteristiche principali.

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

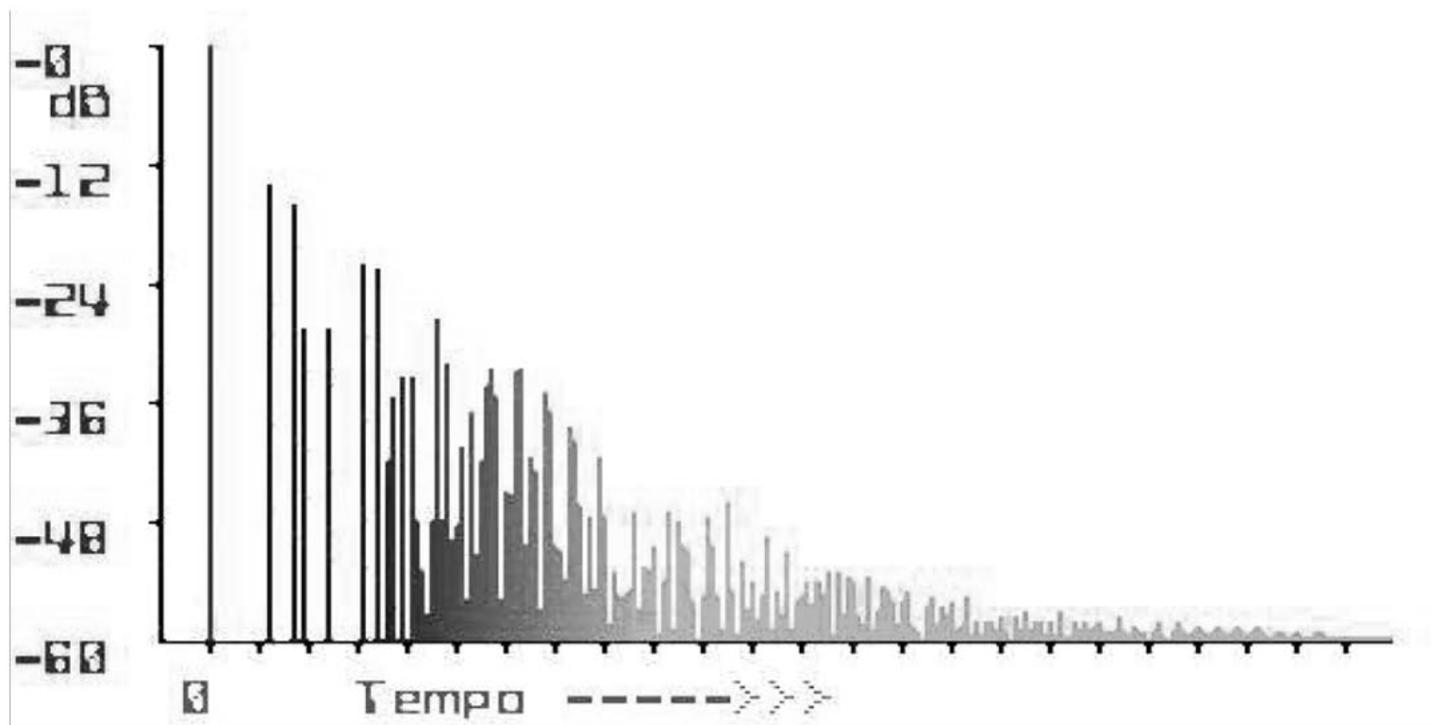
- Supponiamo, quindi, di entrare in una grande sala portandoci una macchina capace di emettere suoni impulsivi di durata molto breve, tipo battimani, e di piazzarla a una certa distanza da noi.
- Tale macchina, detta *sparkle machine* (macchina che genera scoppi) viene utilizzata spesso in acustica ambientale per lo studio del **riverbero** in quanto, **emettendo suoni molto brevi, permette di generare una riverberazione pura, non sovrapposta al suono originale.**

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Nell'immediatezza percettiva, **la riverberazione ci apparirà come un tutto unico:**
 - una sorta di *alone che circonda il suono e gli sopravvive estinguendosi lentamente.*
- Attiviamo ora il nostro microscopio acustico e andiamo a vedere in dettaglio l'evoluzione di questo suono nel tempo dal punto di vista dell'ampiezza.

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Questa figura mostra la **variazione in ampiezza della riverberazione** in una grande sala così come arriva alle orecchie di un ascoltatore, con un singolo suono impulsivo come eccitazione di partenza



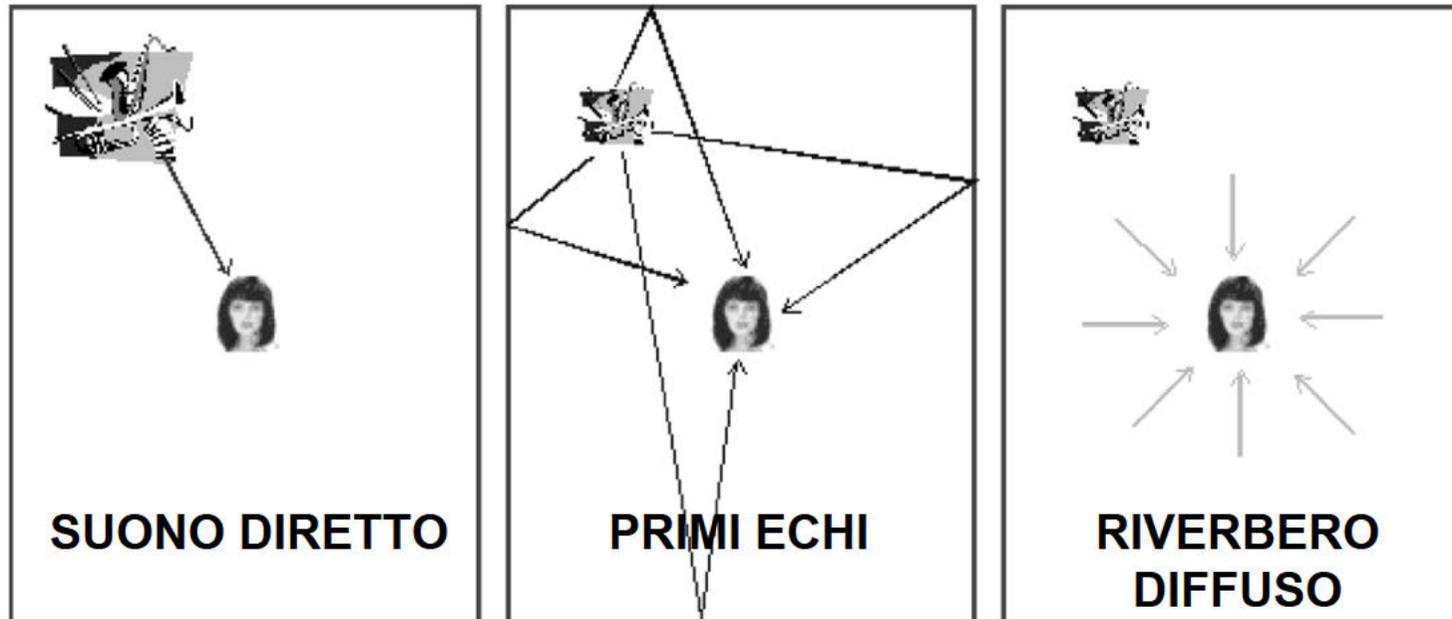
2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- il grafico [slide 10] visualizza, in pratica, **la risposta all'impulso** della sala mostrandoci come la sala stessa reagisce alla produzione di un impulso acustico
 - un singolo 'toc' di circa 1/100 di secondo, in rosso nel grafico.
- L'intero grafico rappresenta, sull'asse orizzontale, un tempo totale di circa 1 secondo e mezzo.

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Come si può ben vedere, il riverbero **non è uniforme**, ma **composto da una serie di impulsi che all'inizio sono ben separati fra loro diventando, via via, sempre più fitti fino a generare una linea pressoché uniforme**.
 - Questo dato è molto importante per il nostro sistema percettivo in quanto apporta una notevole quantità di informazioni che ora vedremo, tanto da spingerci a descrivere il fenomeno più in dettaglio.

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico



- Guardiamo la figura qui sopra: essa rappresenta una sala vista dall'alto nella quale si trovano **una sorgente sonora** (in alto a sinistra) e **un ascoltatore** (al centro) e schematizza la formazione del riverbero dividendola in tre distinte fasi, da sinistra a destra.

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Quando la sorgente sonora emette un suono, il primo "pacchetto" di onde sonore che colpisce le orecchie dell'ascoltatore è il **suono diretto** che viaggia nell'aria alla solita velocità di circa 344 metri al secondo (velocità che dipende anche dalla temperatura e dalla densità dell'aria) andando **in linea retta verso l'ascoltatore**.
 - È il suono **più fedele** dato che è **soggetto soltanto all'assorbimento dell'aria alle alte frequenze** (ne abbiamo già parlato nel caso dell'eco) e **ci permette di localizzare la sorgente sonora rispetto alla nostra posizione** e nel caso di suoni conosciuti, una **prima indicazione della distanza**.

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

Un breve inciso.

- Generalmente non ci pensiamo, ma in realtà **non sentiamo mai un suono nel momento stesso in cui viene emesso, ma alcuni istanti dopo.**
- La stessa cosa avviene anche per la **luce**, ma la velocità di quest'ultima è incommensurabilmente superiore a quella del suono e tale da annullare, di fatto, la distanza di qualsiasi fenomeno che si trovi a portata di vista: l'effetto è sensibile solo sulle grandi distanze.
 - La luce del sole, per esempio, ci arriva circa 8 minuti dopo essere stata emessa e quando l'ultimo pezzettino di sole scompare dietro le montagne, in realtà è se ne è già andato da 8 minuti.

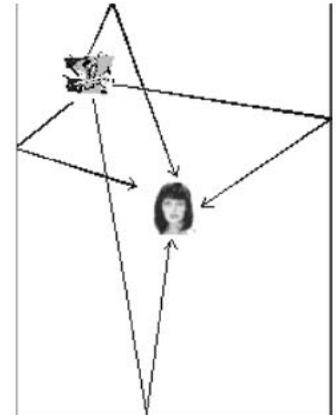
2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

(un breve inciso – continua)

- Nel caso del suono, però, l'effetto è tale che due musicisti che si trovino a soli 30 metri di distanza non riusciranno mai a suonare a tempo perché tale distanza corrisponde a circa 1/10 di secondo di ritardo che è tantissimo in termini musicali
 - se riprendete la tabella pubblicata nella lezione sull'utilizzo musicale dell'eco, noterete che corrisponde a una semicroma a metronomo 150: in ogni caso, è sufficiente per sentire uno sfasamento, come ben sanno i registi che, nella messa in scena di lavori teatrali con musica dal vivo, a volte cercano di porre alcuni strumenti lontano dagli altri per creare particolari effetti e poi si chiedono come mai non siano perfettamente sincronizzati; in questi casi sono assolutamente necessari un direttore e la capacità di ignorare gli altri strumenti oppure si ricorre alle cuffie.

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Subito dopo il suono diretto, all'ascoltatore arrivano i **primi echi** dovuti alle riflessioni del suono sulle pareti della stanza.
- **Ogni riflessione comporta una perdita di energia da parte del suono perché**
 - 1. come abbiamo già visto, le pareti non restituiscono il 100% del segnale, ma ne assorbono una parte;
 - 2. il fatto di seguire un percorso più lungo comporta anche una perdita dovuta alla maggiore distanza, per cui l'intensità sonora dei riflessi è minore rispetto a quella del suono diretto.

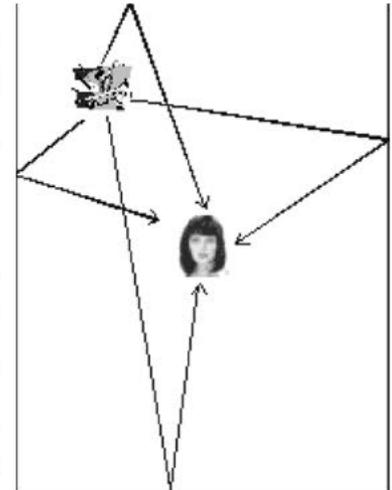


2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Da questa **differenza di intensità**, il nostro sistema percettivo ricava delle indicazioni sulla capacità di assorbimento della sala.
- Ben più importante, però, è **il tempo che separa il suono diretto dai primi echi che fornisce precise informazioni sulla grandezza della sala**:
 - esso, ovviamente, è funzione della lunghezza del percorso che le onde sonore devono coprire per arrivare alle pareti e rimbalzare fino all'ascoltatore, quindi, in definitiva, *dipende strettamente dalle dimensioni della sala*.

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- A titolo di **esempio**, possiamo quantizzare, in linea di massima, questo ritardo per la stanza della nostra figura **misurando le linee dei primi echi e mettendole in rapporto con la distanza fra sorgente e ascoltatore**.
 - Il rimbalzo sulla parete sinistra, per esempio, è circa 2.5 volte la distanza diretta: supponendo che quest'ultima sia di 10 metri (con il lato più lungo della stanza pari a circa 40 metri), la distanza percorsa dal suono nel primo rimbalzo sarà di 25 metri. A 344 m/sec., il suono diretto impiegherà circa 0.029 secondi per arrivare all'ascoltatore, mentre l'eco ne impiegherà circa 0.072: una differenza di 0.043 sec. (quasi mezzo decimo di secondo) non è poco in assoluto, tanto più se si considera che questo è solo il primo eco ad arrivare. Il rimbalzo più lungo, per esempio, è circa 5 volte la distanza diretta il che equivale, nel nostro esempio, a 50 metri con un tempo di 0.145 e un ritardo di 0.116 (più di 1/10 di secondo).



2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- In modo del tutto automatico, *la combinazione orecchio cervello trasforma le differenze di intensità e i ritardi temporali in un senso delle dimensioni e delle caratteristiche di assorbimento della sala.*

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Ma le onde sonore non muoiono una volta raggiunto l'ascoltatore e **continuano a viaggiare rimbalzando sulle pareti e perdendo, via via, di intensità.**
 - In tempi brevi la densità dei riflessi cresce al punto che questi ultimi non sono più distinguibili singolarmente nemmeno da un sistema percettivo raffinato come il nostro, arrivando da tutte le direzioni e formando quello che viene percepito come un riverbero diffuso che circonda la sorgente sonora con un caldo alone ambientale.
- La **soglia percettiva** fra la fase dei primi echi e quella del riverbero percepibile come un suono continuo è stata stimata in una densità dei riflessi pari a circa **1000 echi al secondo.**

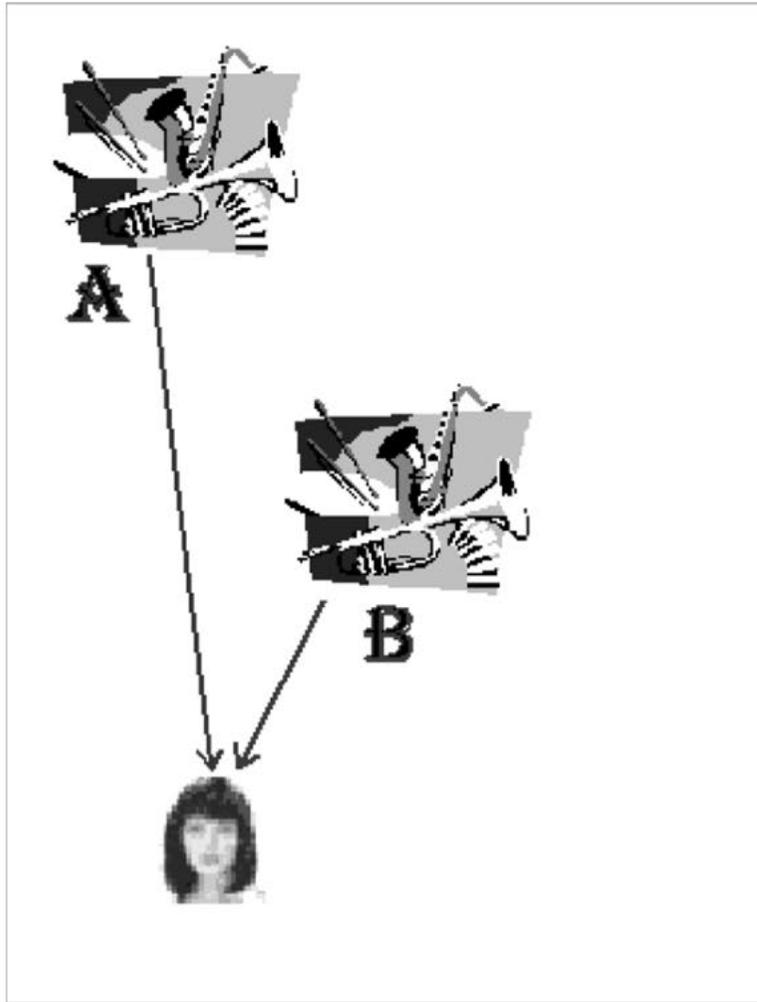


2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

Anche il riverbero, comunque, viene utilizzato dal nostro sistema percettivo per ottenere altre indicazioni sulle dimensioni della sala e sulla distanza della fonte sonora.

- Quest'ultimo dato è particolarmente interessante:
 - la **sensazione di distanza in un ambiente chiuso**, infatti, dipende anche dal rapporto di volume fra il suono diretto e quello riverberato e dalle loro differenze timbriche dovute al fatto che le pareti e l'aria si comportano come un filtro passa basso, attenuando maggiormente le alte frequenze rispetto alle basse (lo abbiamo già visto nel caso dell'eco).

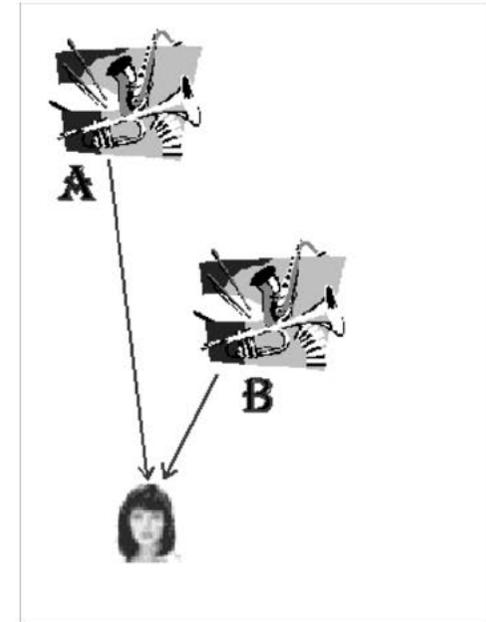
2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico



- A tale proposito, osservate questa figura.
 - Abbiamo due sorgenti sonore A e B, che supponiamo uguali, piazzate a diversa distanza dall'ascoltatore. Supponiamo anche che le due sorgenti emettano, l'una dopo l'altra, lo stesso suono alla stessa intensità di partenza; solo la distanza, dunque, è diversa: *che cosa cambia, per l'ascoltatore, nei due casi?*

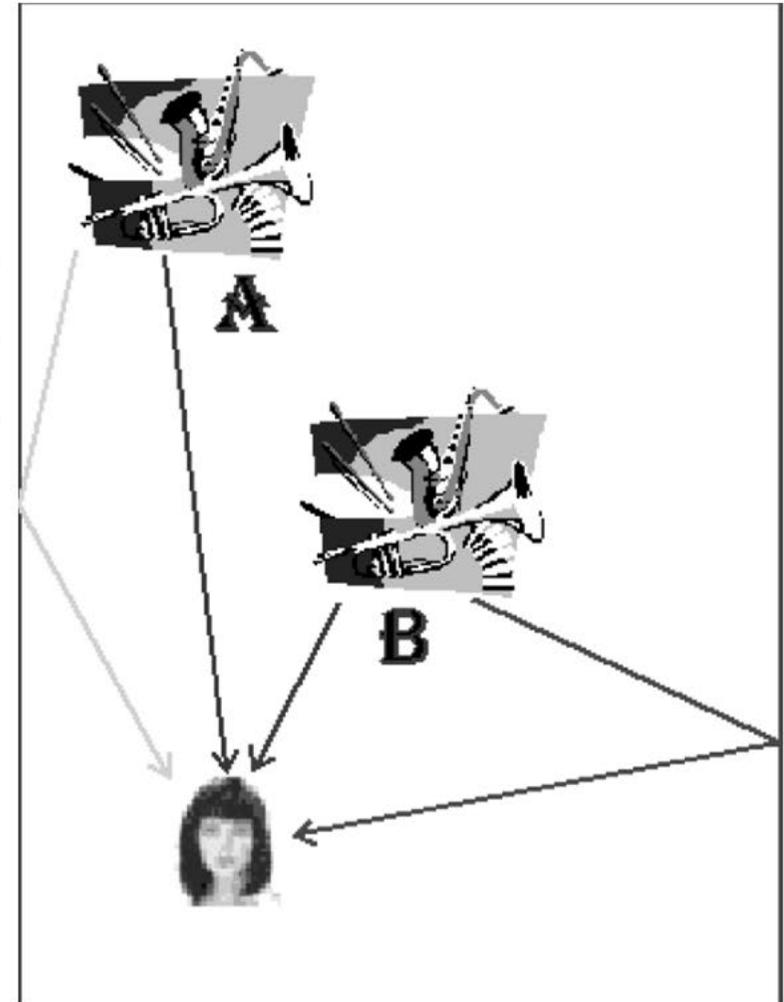
2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Ebbene, una prima considerazione è che il volume del suono diretto percepito da chi ascolta sarà maggiore nel caso B rispetto al caso A:
 - la sorgente, infatti, è più vicina e il suono deve viaggiare meno nell'aria, perdendo meno energia.



2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Anche la configurazione dei **primi echi** sarà diversa nei due casi: il ritardo fra il suono diretto e i primi echi sarà maggiore nel caso B rispetto al caso A.
 - Per verificarlo, osservate la figura a fianco e comparate i rapporti di lunghezza fra le frecce che rappresentano il percorso dei suoni diretti e quelle dei relativi echi.



2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Abbiamo, infine, il **riverbero diffuso**.
 - A differenza di quanto ci si potrebbe aspettare, quest'ultimo sarà **identico nei due casi**:
 - una volta che è stata superata la soglia dei 1000 echi al secondo, infatti, non esiste più alcun senso di direzione collegato al suono riverberato che sembra provenire da ogni luogo.
 - **Anche la sua intensità sarà più o meno la stessa**: il riverbero è la risposta dell'ambiente al suono e se quest'ultimo rimane immutato, la risposta dell'ambiente sarà la stessa, in qualsiasi posizione sia stato emesso.
 - Quest'ultimo dato è, però, molto importante per il sistema percettivo che confronta le differenze di intensità fra il suono diretto e quello riverberato per completare **la sensazione di distanza**.

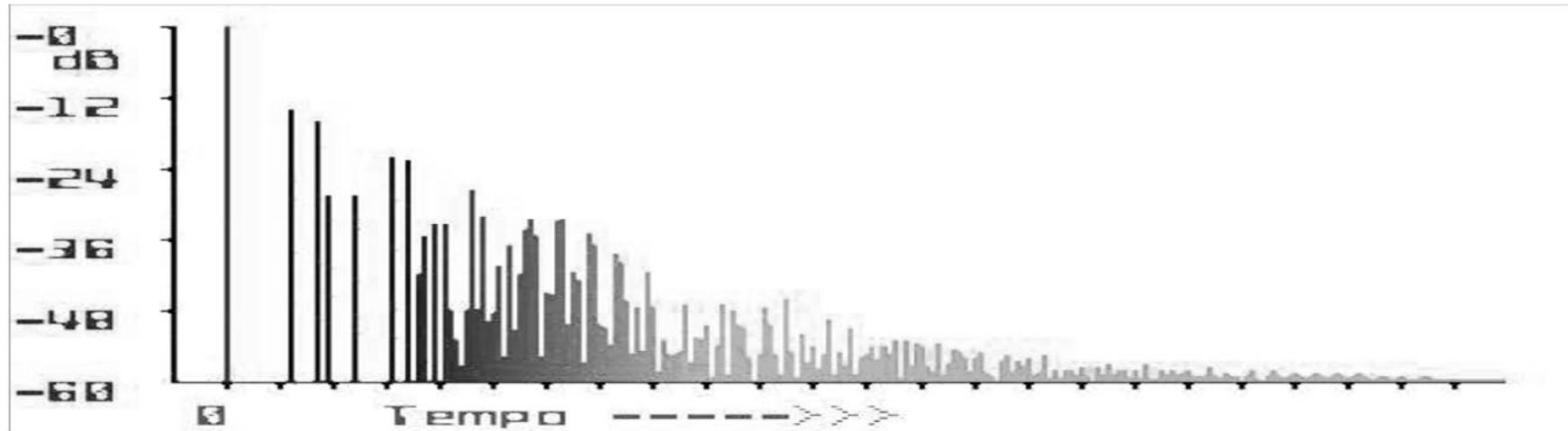
2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Il dato di fatto è che, in un ambiente chiuso, il volume del suono diretto decresce rapidamente con la distanza (è inversamente proporzionale al quadrato della distanza) mentre quello del suono riverberato rimane identico anche se la distanza dalla sorgente sonora cambia.
 - Facendo i debiti confronti, quindi, il sistema percettivo è in grado di stimare la distanza della sorgente sonora e distinguere anche casi ambigui, come, per esempio, quello di una sorgente vicina che emette un suono a basso volume e la stessa lontana che suona forte.
 - Ne consegue che, per dare una sensazione di distanza in un messaggio, è necessario regolare attentamente il rapporto fra il suono vero e proprio e il riverbero;
 - ne consegue anche che, per dare la sensazione di un suono che si allontana in distanza, il volume del suono diretto deve abbassarsi più rapidamente rispetto al riverbero.

2. La riverberazione e la percezione dell'ambiente acustico

- Abbiamo visto, quindi, come una cosa che viene considerata dai più come un semplice effetto abbia conseguenze notevoli sulla percezione e sulla sensazione di realtà e di posizionamento di un suono rispetto all'ascoltatore.
- Nella prossima sezione vedremo come viene creato il riverbero nei processori per effetti e nel software.

3. Reti di riverberazione



- Abbiamo visto che **il riverbero non è uniforme**, ma composto da una serie di impulsi che all'inizio sono separati fra loro diventando, via via, sempre più fitti fino a generare una linea pressoché uniforme con densità superiore a 1000 echi al secondo. Il fenomeno, quindi, ha uno sviluppo temporale ben preciso che fornisce al nostro sistema percettivo quelle informazioni che creano la sensazione di ambiente. L'intero sviluppo della riverberazione deve essere simulato accuratamente per produrre, alle orecchie dell'ascoltatore, sensazioni simili a quelle reali.

3. Reti di riverberazione

- Un primo problema può essere quello della **densità**:
 - 1000 echi al secondo sono molti e non possono certo essere prodotti da una singola unità di ritardo come quelle già viste nel caso dell'eco.
 - La soluzione consiste nell'utilizzarne più di una con un **collegamento in serie**.

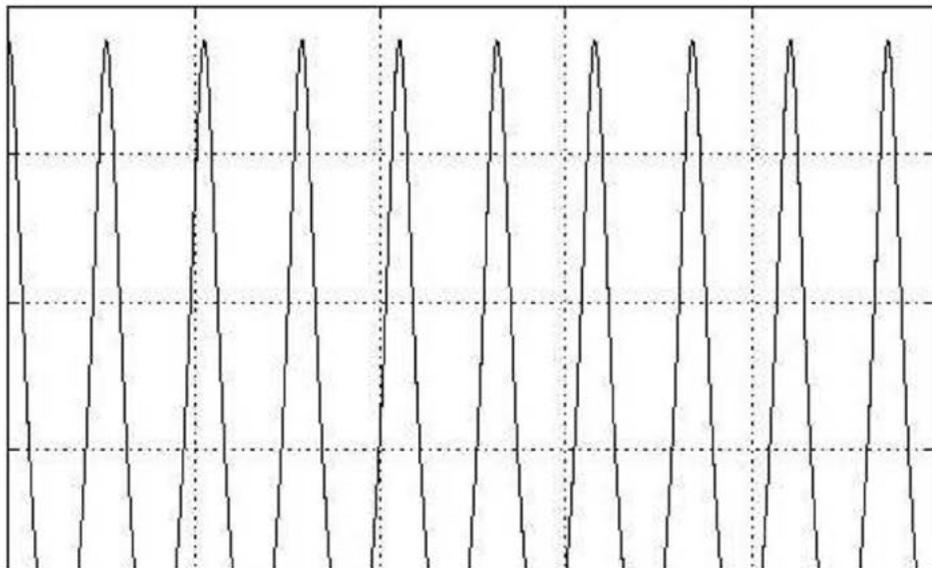
3. Reti di riverberazione



- In questa immagine, la rete di riverberazione è schematizzata con un grafo in cui ogni freccia rappresenta una **unità d'eco** che ha l'input alla sua sinistra e l'output alla destra.
 - In una rete di questo tipo ogni unità crea degli echi a tutto ciò che proviene da quella precedente, così, se l'unità C1, a partire da un singolo impulso, genera 4 echi e la C2 ne genera 5, all'uscita dell'unità C2 avremo 20 echi ($4 \times 5 = 20$) perché quest'ultima avrà generato 5 echi per ognuno dei 4 che arrivano da C1. Se, poi, l'unità, C3 genera, a sua volta, 9 echi, alla sua uscita avremo 180 echi (20×9) e infine, regolando la C4 a 11 echi, arriveremo a 1980, quantità sufficiente a creare la sensazione di un riverbero diffuso.

3. Reti di riverberazione

- Il problema sembrerebbe risolto, ma non è così.
 - Il riverbero creato con questo sistema, infatti, non è naturale per varie ragioni.



- In primo luogo, infatti, le unità d'eco di cui abbiamo parlato nella prima puntata hanno un effetto filtrante che è secondario nell'uso come eco singolo ma, nell'utilizzo in serie, colora troppo il segnale con un effetto innaturale. Queste unità, infatti, vengono chiamate "**comb**" che significa **pettine** perché la loro risposta in frequenza non è piatta ma contiene un certo numero di picchi regolarmente spaziat, la cui posizione dipende dall'entità del ritardo (figura a sin.).

3. Reti di riverberazione

- Per risolvere questo problema sono state create delle unità d'eco apposite chiamate "**allpass**" (**passa-tutto**) dotate di risposta in frequenza piatta e in grado di generare degli echi senza nessun effetto filtrante.
 - Si possono, quindi, utilizzare queste unità nella rete di slide 31, ma rimangono altri problemi.
 - Con una rete di questo tipo, infatti, è impossibile differenziare sufficientemente i primi echi dal riverbero diffuso e creare un processo graduale di accrescimento dai primi al secondo.
 - Nel corso di anni di esperimenti è risultata evidente, invece, la **necessità di differenziare queste due fasi** utilizzando reti collegate, ma distinte, per la prima e per la seconda fase.

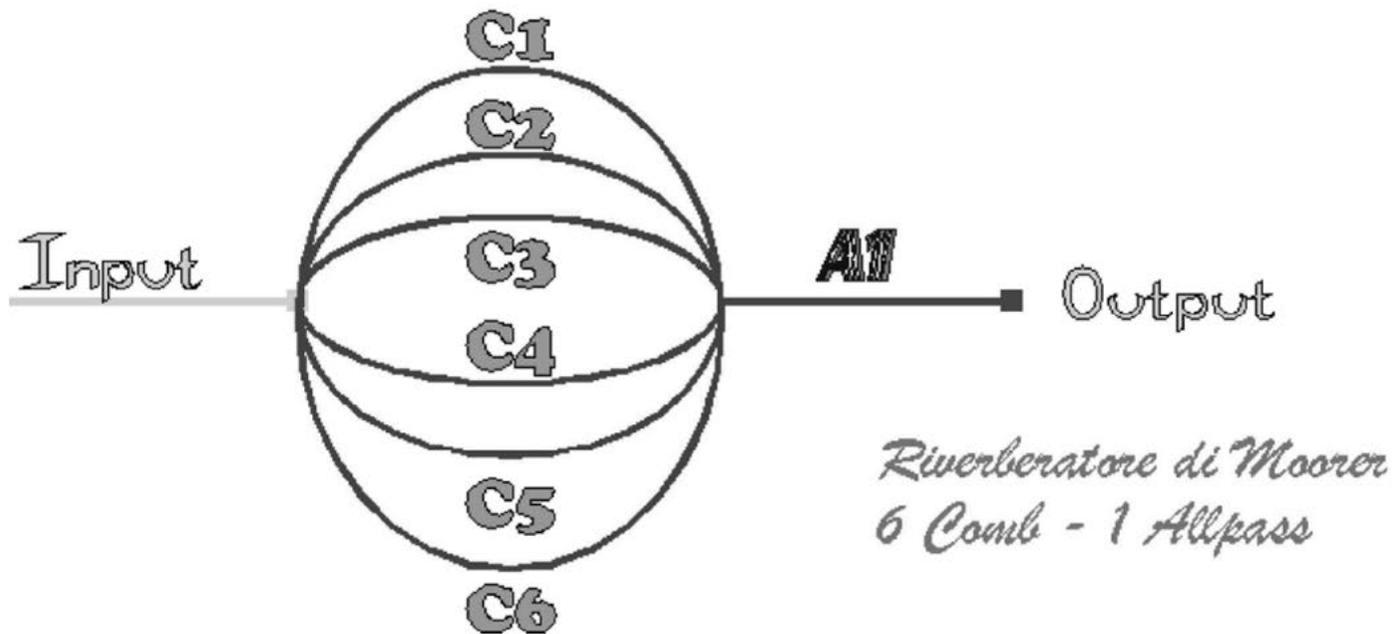
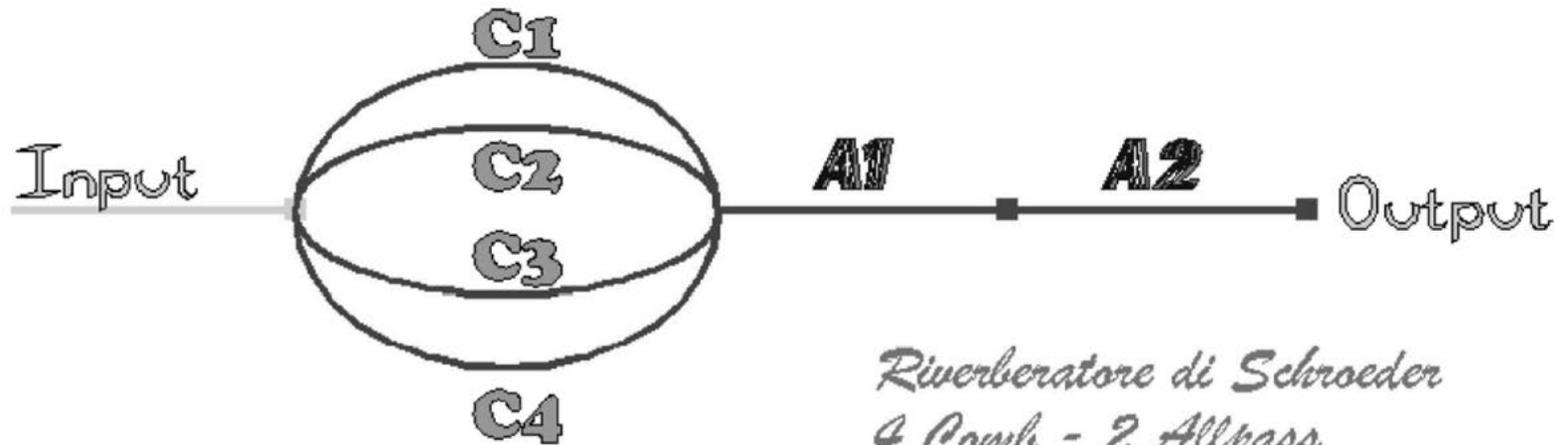
4. Riverberatori classici

- Ecco quindi i primi **riverberatori** impiegati anche nei processori commerciali:
 - i più noti sono i modelli dello studioso americano **J. A. Moorer** e quello di **Schroeder** che hanno trovato impiego in vari *effect processor* qualcuno dei quali è sicuramente a casa vostra o nel vostro studio.

4. Riverberatori classici

- Nelle figure seguenti sono visibili gli schemi di questi due **riverberatori** classici sotto forma di grafi.
- Le linee contrassegnate con **C** indicano i **comb**, quelle con **A**, gli **allpass**. Entrambi si basano sugli stessi presupposti:
 - l'idea è quella di creare i primi echi con un certo numero di **comb** in parallelo, ognuno con un ritardo leggermente diverso, per poi aumentare la densità del segnale con gli **allpass**.
 - Abbiamo, quindi, **due reti distinte, ma collegate.**

4. Riverberatori classici



4. Riverberatori classici

- In questo caso, si possono usare i **comb** perché le unità non sono in serie, ma in parallelo:
 - gli effetti filtranti, quindi, non si sommano e rimangono entro limiti accettabili, anzi, un po' di colorazione fa bene al segnale, differenziando il timbro dei primi echi da quello del segnale diretto.

4. Riverberatori classici

- Generalmente, quando questi **riverberatori** sono utilizzati nei processori, l'utente non può accedere ai parametri di controllo delle singole unità (sarebbe troppo complicato), ma pilota l'apparecchio con pochi valori di tipo più generale come il **tempo di riverbero** che in genere varia fra 0,1 e 10 o 20 secondi.
 - Nel regolarlo, si deve considerare che il riverbero di una sala da concerto varia fra 1 e 2 secondi, 4 secondi è quello di un grande auditorium e oltre i 5 passiamo alla cattedrale.

Il **tempo di riverbero**, comunque, è definito, per convenzione, come **il periodo di tempo impiegato dal segnale a scendere di 60 dB sotto alla sua ampiezza di ingresso.**

- Ora, 60 deciBel sono molti e corrispondono a dimezzare per 10 volte l'ampiezza di ingresso, quindi, se il segnale è già a basso volume, considerate che è probabile che il tempo di riverbero impostato vi sembri in realtà più breve.

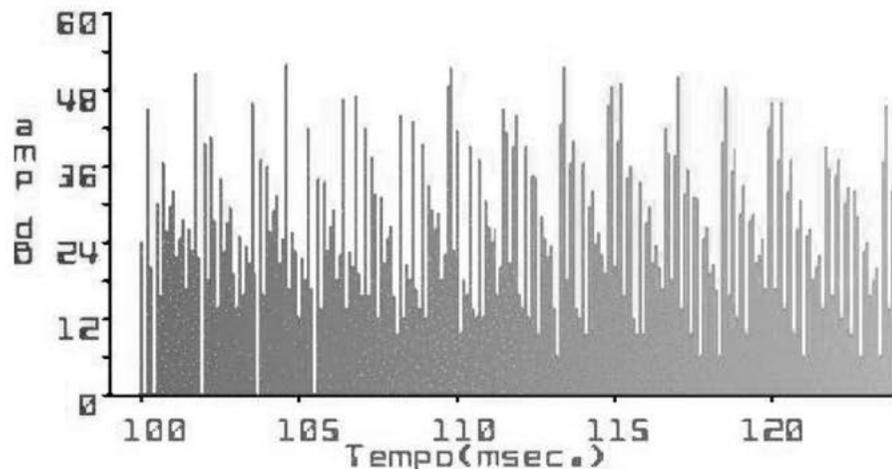
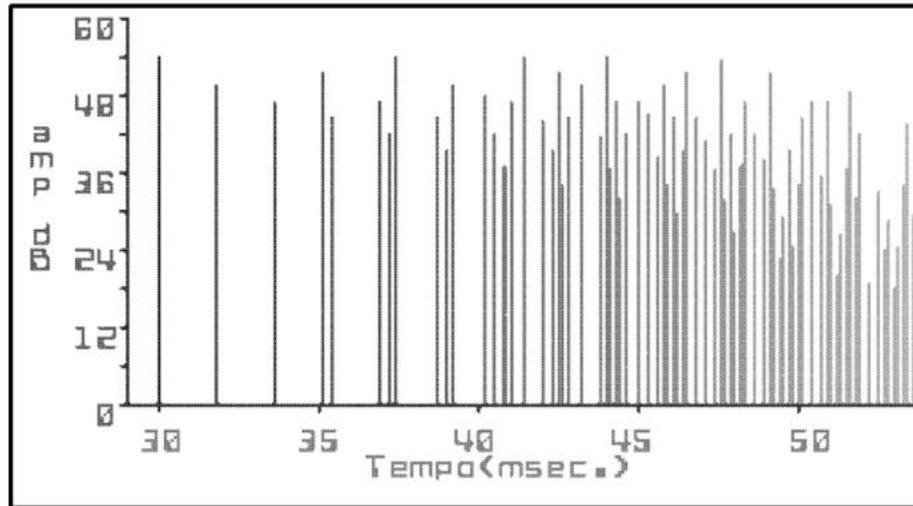
4. Riverberatori classici

- Un altro valore importante, quando è disponibile, è quello del **predelay** che è **il ritardo fra il segnale diretto e il riverbero vero e proprio.**
 - Esso controlla, in pratica, lo spazio dato ai primi echi, prima della formazione dell'alone riverberante, e **concorre a creare l'effetto di vastità della sala.**
 - Si misura in millisecondi e **dovrebbe aumentare proporzionalmente alla durata del riverbero** andando da 40 o 60 msec per un salone fino a 100 o 150 per un grande auditorium o una cattedrale.
 - Questi valori sono quelli tipici di ambienti normali, ma, con combinazioni appropriate di **predelay** e **tempo di riverbero**, si possono creare anche ambienti di altro tipo. Per esempio, la combinazione predelay lungo con riverbero breve suggerisce un ambiente molto vasto ma poco riflettente (grande sala con pareti tappezzate o spazio parzialmente aperto), mentre la combinazione inversa crea la sensazione di uno spazio piccolo ma molto riflettente.

4. Riverberatori classici

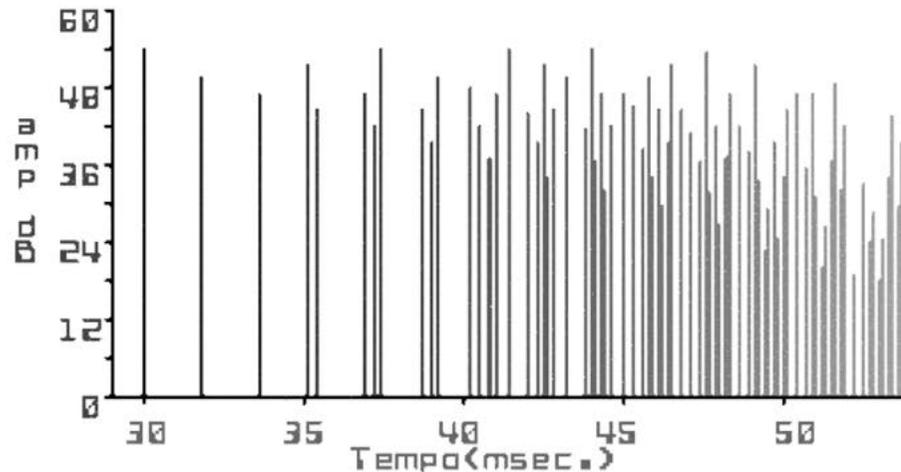
- Ora prendiamo un microscopio e andiamo a vedere cosa succede quando si butta un impulso (un singolo 'tac', come un battito di mani) all'interno di uno di questi riverberatori.
- Le due immagini seguenti riproducono la **risposta all'impulso** del riverberatore di Schroeder, con tempo di riverbero pari a un secondo, in due istanti temporali distinti.

4. Riverberatori classici

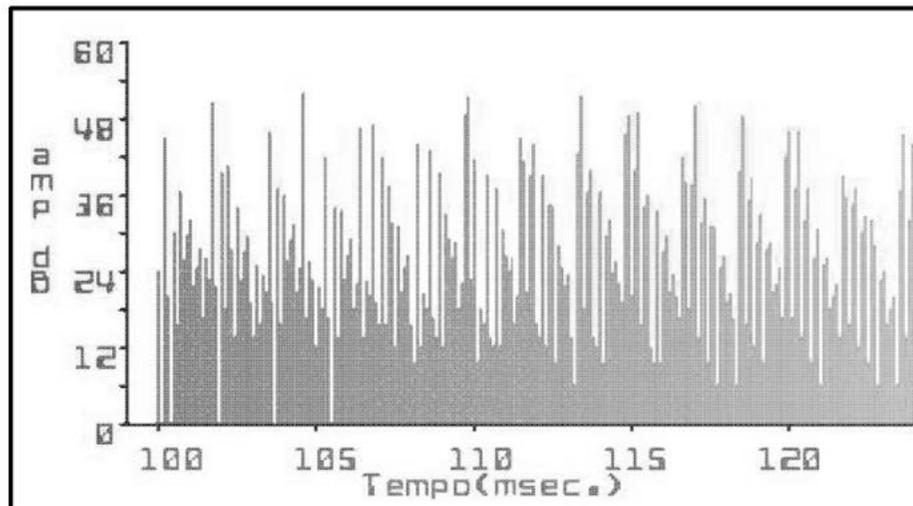


- Nella **prima immagine**, il campione va da zero (l'istante di emissione del suono diretto che non è visibile in figura e deve intendersi come una singola linea di ampiezza 60 dB all'istante zero) a 55 millisecondi: potete vedere chiaramente il processo di accrescimento che porta dai primi echi (in blu) alla riverberazione continua. Il primo fra i primi echi arriva dopo 30 msec. che corrispondono a un percorso del suono nell'aria di circa 10 metri; gradualmente, poi, gli echi si intersecano, sommandosi anche fra loro, mentre il suono diventa via via più denso e continuo.

4. Riverberatori classici



- Nella **seconda figura**, il campione è preso dopo 100 msec., quando, ormai, il suono assume già le caratteristiche di un riverbero diffuso. Potete notare come i singoli echi che formano la riverberazione arrivino in piccole serie la cui configurazione è sempre più regolare con il passare del tempo. Ogni serie, però, non è mai perfettamente uguale alla precedente, anzi, l'uguaglianza deve essere assolutamente evitata pena la produzione di una riverberazione falsa. Nella realtà, invece, il riverbero si evolve in modo sensibile conservando sempre, a livello microscopico, piccole differenze da un istante all'altro.

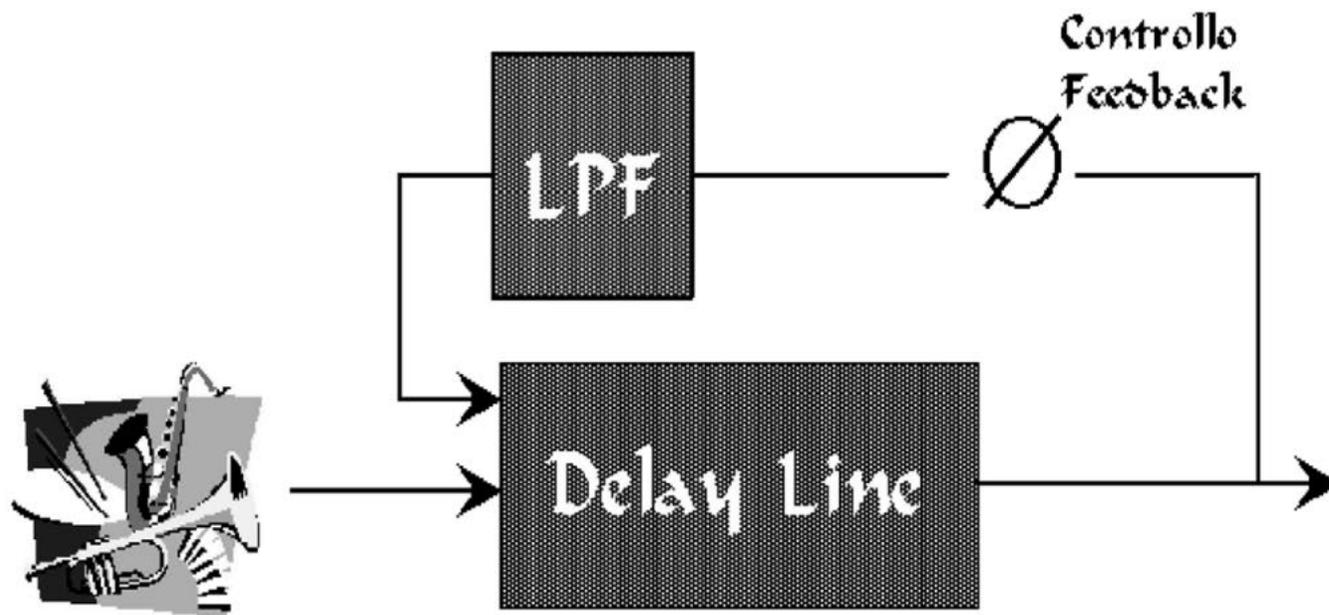


4. Riverberatori classici

- Per **ottenere questa evoluzione evitando le ripetizioni**, è vitale regolare in modo accurato i tempi di ritardo delle singole unità che fanno parte della rete di riverberazione (in questo caso, i 4 comb e i 2 allpass) ed è per questo che, nelle unità in commercio, questi parametri non sono accessibili all'utente.
 - La regola generale, comunque, è quella di **scegliere dei ritardi che siano assolutamente primi fra loro, cioè privi di divisori comuni**: i ritardi dei 4 comb, per esempio, non dovrebbero mai essere numeri tipo 30, 40, 50 e 60, perché questi valori hanno almeno tre divisori comuni (10, 5 e 2) e sono a distanza regolare fra loro, con il risultato di produrre degli echi a distanza sempre uguale, ma piuttosto 31, 39, 45 e 53 che, essendo privi di divisori comuni e irregolari producono dei primi echi più realisti
 - (per maggiori particolari, il lettore interessato può consultare un famoso articolo considerato come la bibbia sull'argomento: "Moorer J. A., *About This Reverberation Business*, Computer Music Journal, Vol. 3, Num. 2, 1979").

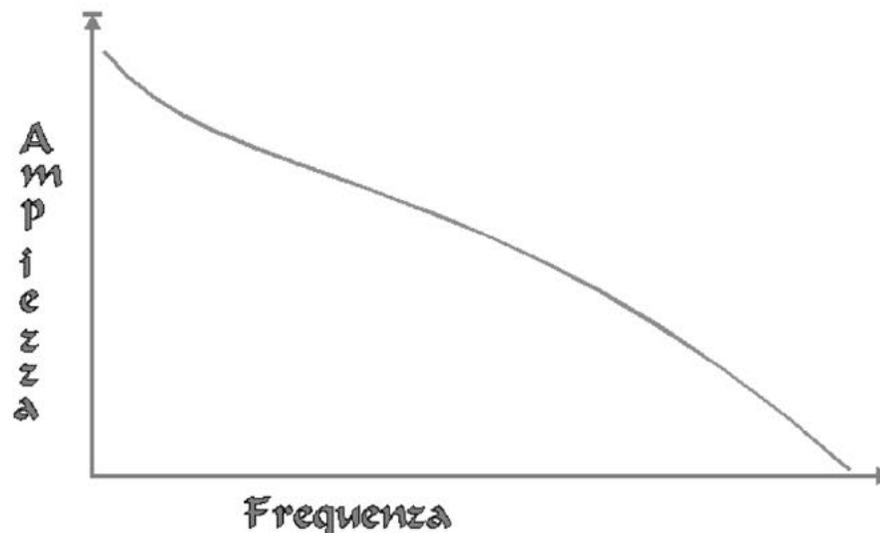
4. Riverberatori classici

- In linea di massima, il riverbero prodotto da questa rete è buono anche se, quando è applicato a suoni molto brevi e impulsivi, si producono alcune fluttuazioni dinamiche nella risposta e la parte finale è, a volte, un po' metallica. Per ovviare a questi inconvenienti, **Moorer** ha proposto la seconda rete già vista in figura, anch'essa ampiamente utilizzata in unità commerciali, composta di **6 comb** che però incorporano un leggero filtro passa-basso sul segnale in retroazione, come nella figura seguente.



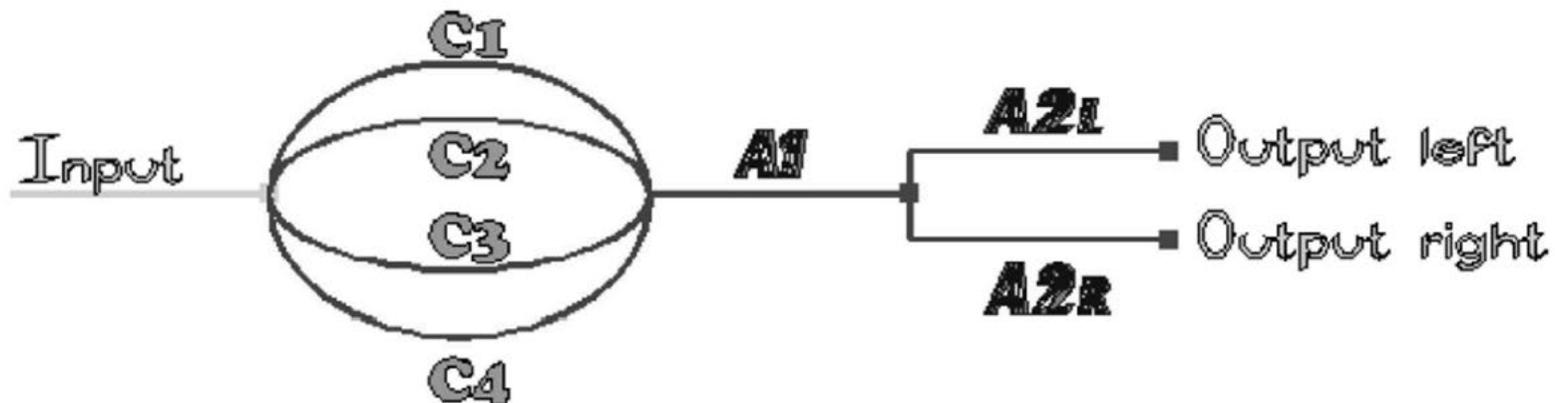
4. Riverberatori classici

- Si tratta di un banale **filtro del primo ordine**, con poca pendenza, che si limita ad attenuare in misura sempre maggiore le alte frequenze come accade nella realtà a causa dell'assorbimento dell'aria (risposta in frequenza in figura).



4. Riverberatori classici

- Per quanto riguarda l'**uscita stereofonica**, infine, è **bene differenziare leggermente il riverbero sui due canali**.
 - Ciò si ottiene semplicemente differenziando l'ultima unità della catena e assegnando alle due unità ritardi leggermente diversi, come in figura. Naturalmente, sarebbe bene differenziare stereofonicamente anche i primi echi, ma ciò comporta l'utilizzo di reti ben più complesse che ora vedremo.

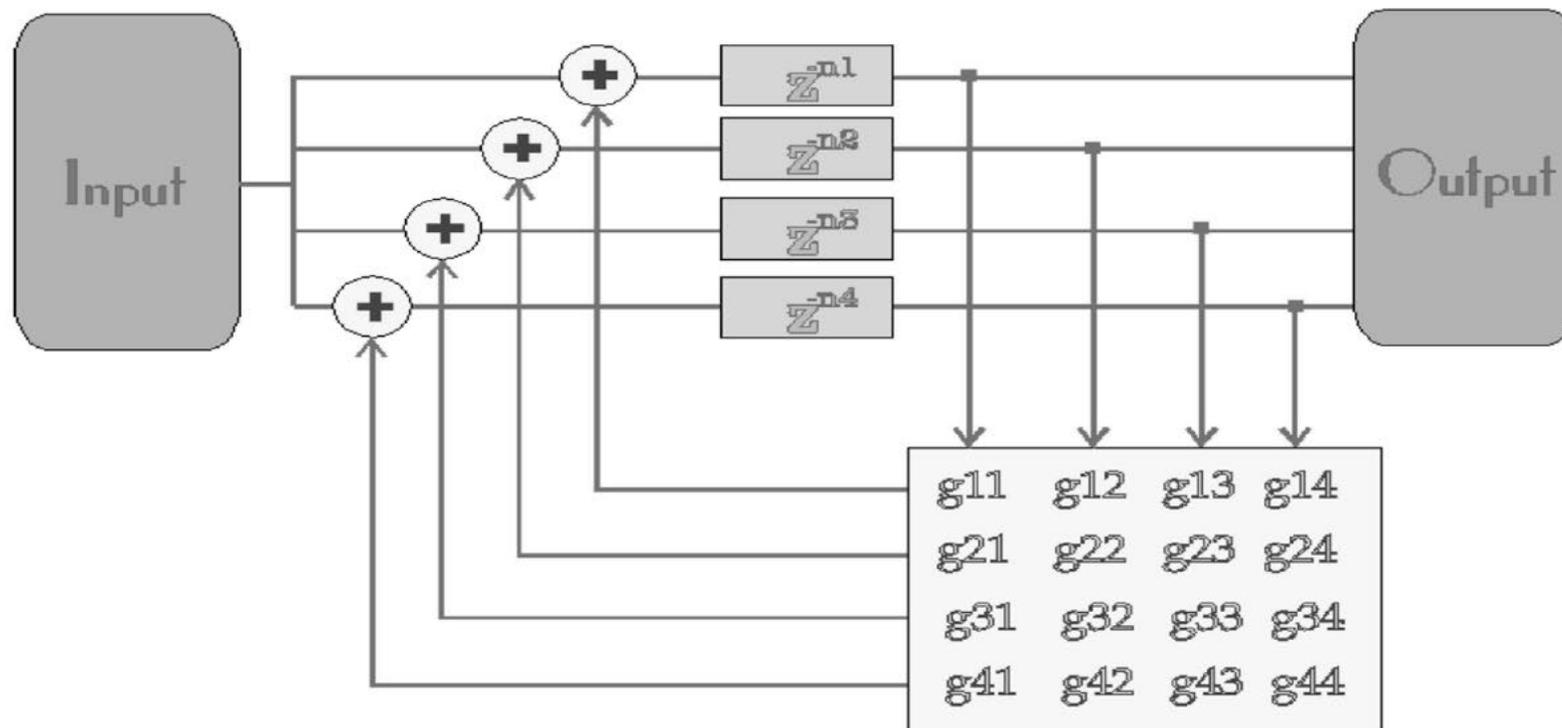


5. Riverberatori a più canali

- **Le reti di riverberazione multichannel**, definite da Stautner e Puckette nel 1982 (Stautner J., Puckette M., *Designing Multi-Channel Reverberators*, *Computer Music Journal*, Vol. 6, Num. 1, 1982), costituiscono un deciso passo avanti verso una simulazione più realistica del riverbero.
 - Esse tentano di ricostruire il fenomeno con un modello che si avvicina a ciò che avviene nella realtà.
 - Il **riverbero**, in effetti, è costituito semplicemente dalla **somma degli echi generati dalle onde sonore che viaggiano nell'ambiente e ogni qualvolta incontrano una parete rimbalzano perdendo di intensità e proseguendo il viaggio fino ad incontrare altre pareti.**

5. Riverberatori a più canali

- In questa figura si vede una rete di questo tipo.
 - Il segnale in input viene inviato a 4 linee di ritardo di lunghezza diversa, il cui output costituisce i primi 4 echi. Fin qui non c'è niente di diverso dai riverberatori classici. La differenza fondamentale risiede nel modo in cui viene gestito il segnale in feedback: nei riverberatori classici, ogni unità ha il suo feedback; in questo modello, invece, ogni unità riceve un feedback da tutte le altre con ampiezze controllate da appositi valori di guadagno (i vari G_{xx} visibili in figura in quella che viene chiamata matrice di distribuzione).



5. Riverberatori a più canali

- Per simulare l'assorbimento alle alte frequenze basta aggiungere **4 filtri passa-basso di primo ordine** (come quello già visto) nei loop.
- Queste reti danno risultati migliori rispetto a quelle classiche, ma sono anche più difficili da controllare.
 - Nelle **reti classiche**, per esempio nel riverberatore di Schroeder, si tratta di fornire alla rete un totale di 12 valori di controllo (ci sono 6 unità ognuna delle quali ha 1 delay time e 1 guadagno di feedback) e sono stati messi a punto dei validi algoritmi per calcolare questi valori a partire dal tempo di riverbero desiderato. In realtà i **delay times** sono preimpostati per ogni tipologia di riverbero (*room, hall, big hall, etc.*) e la lunghezza dell'alone viene controllata agendo sui guadagni dei **feedback**, quindi i valori che cambiano sono solo 6.
 - La rete di [slide 48], invece, necessita di ben 20 valori, cioè **4 delay times e 16 guadagni di feedback** e analogamente al caso precedente, sono questi ultimi che controllano il tempo di riverbero e devono essere ricalcolati ogni volta che il tempo cambia.

6. Riverberatori a convoluzione

- A molti sarà capitato di trovarsi in qualche luogo ad ascoltare un bell'eco o riverbero, chiedendosi come riprodurlo in studio.
 - Il desiderio (ovvio) è quello di portarselo a casa per applicarlo a qualsiasi suono.
- Questa possibilità esiste e in teoria è molto semplice: **basta avere la risposta all'impulso tipica di quel luogo.**
 - A partire da quest'ultima, c'è un metodo per applicare quel riverbero a un suono qualunque.

6.1 Metodologia di rilevamento della risposta all'impulso

- La durata ideale dell'**impulso** è "*infinitamente breve*".
 - Ovviamente si tratta di un concetto matematico.
 - Il metodo utilizzato per la generazione dell'impulso è variabile. A volte si usa un suono reale molto breve, come un colpo di pistola, un 'ciak' cinematografico o l'esplosione di un palloncino. Esiste anche una macchina, chiamata appunto "**sparkle machine**", la cui funzione è di emettere suoni impulsivi.
- Oggi si può anche **generare un suono con un sistema digitale e inviarlo, amplificato, a uno o più altoparlanti**.
 - In un sistema digitale, la durata più breve possibile è di 1 campione. Lavorando a 44100, tale durata è 1/44100 di secondo.
 - Naturalmente non esiste un sistema di amplificazione in grado di riprodurre una tale durata, non fosse altro per l'inerzia del cono.
 - Comunque **si approssima mandando effettivamente un impulso di un campione e usando un sistema con coni sufficientemente rigidi.**

6.1 Metodologia di rilevamento della risposta all'impulso

- Un altro sistema è quello, più complesso, detto "**sine-sweep**".
 - Si invia una sinusoide che fa un glissato logaritmico attraverso tutte le frequenze per una durata anche lunga (18 - 20 sec.).
 - Al segnale registrato viene poi applicata una **de-convoluzione** che, conoscendo il segnale di partenza, è in grado di estrarre la risposta ambientale.

6.1 Metodologia di rilevamento della risposta all'impulso

- Il dilemma altoparlanti/oggetti, cioè il fatto di usare un impulso amplificato oppure emesso da un oggetto, non è proprio banale.
 - Innanzitutto, l'utilizzo di un **sistema di amplificazione** è più complesso in termini logistici (serve la corrente, non bastano una pistola e un DAT a pile). Inoltre lo **speaker** deve avere una risposta per quanto possibile lineare, cosa difficile ad alto volume.

6.1 Metodologia di rilevamento della risposta all'impulso

- Infine, si tratta anche di capire se la **risposta** che si desidera deve essere generata da un suono **direzionale** (con la maggior parte dell'emissione concentrata in una direzione, come nel caso degli altoparlanti) o **diffuso** (emissione a sfera, tipo colpo di pistola).
- Per il nostro utilizzo si dovrebbe cercare una emissione **parzialmente direzionale**, cioè con buona parte dell'energia diretta in avanti e in piccola parte in alto e dietro, tipica della media degli strumenti musicali.

6.1 Metodologia di rilevamento della risposta all'impulso

- Un altro problema è **dove piazzare i microfoni che registrano la risposta, rispetto al suono diretto.**
 - A meno di ricerche particolari, di solito si piazzano molto vicino all'oggetto che crea l'impulso.
 - In tal modo si registra l'impulso al suo volume reale e si ottiene un rapporto corretto con il volume della risposta.
 - Soltanto nel caso in cui si voglia, per es., indagare su come il suono si diffonda nei vari punti della sala, i microfoni sono piazzati lontano dall'impulso.

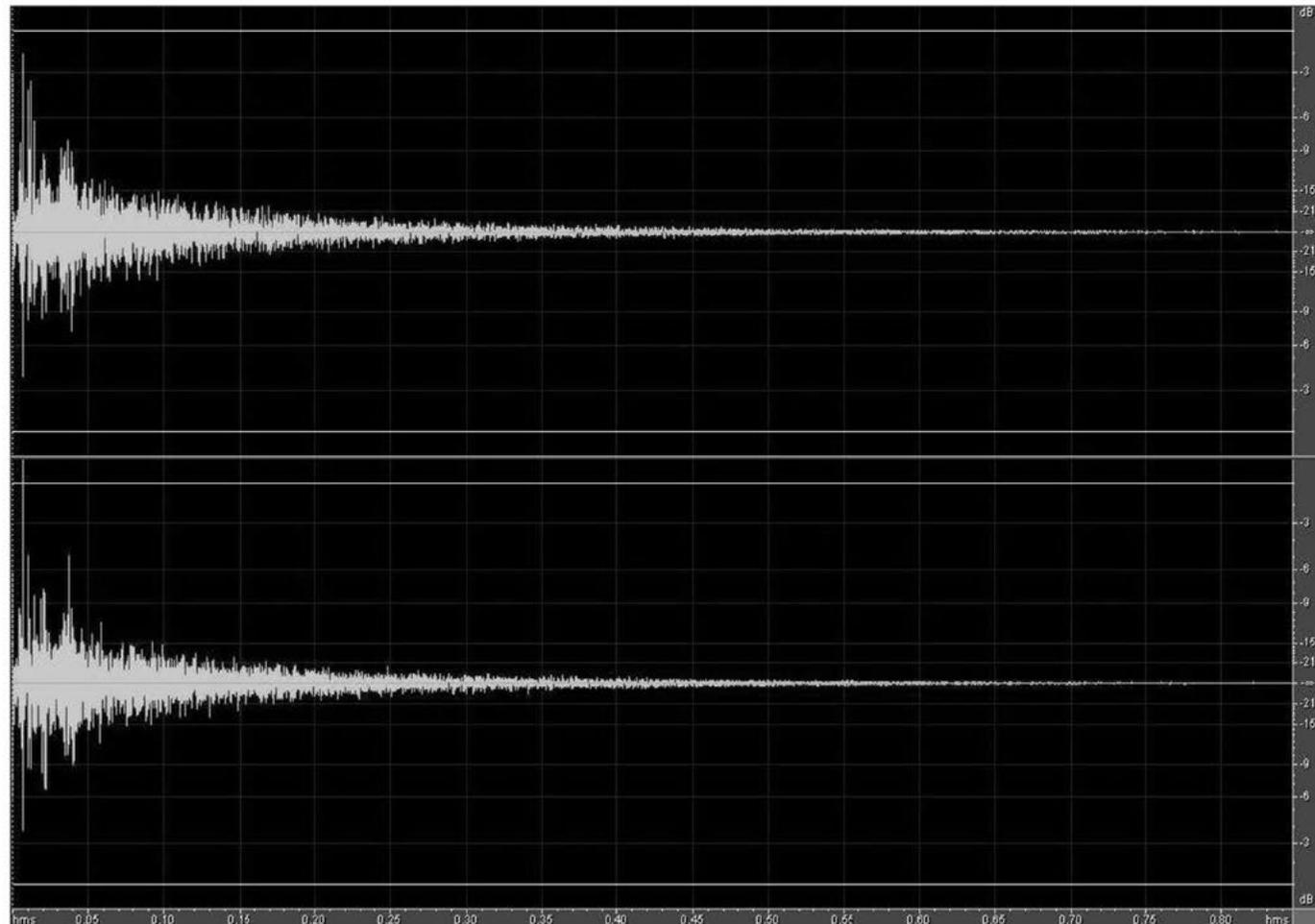
6.1 Metodologia di rilevamento della risposta all'impulso

- L'ultimo punto è la **scelta della posizione di microfoni e impulso nell'ambiente.**
 - Occorre cercare un punto non troppo "particolare", cioè tale da influenzare più di tanto la risposta, quindi evitare di essere molto vicino alle pareti, al pavimento, al soffitto.
 - Nello stesso tempo, però, si dovrebbe evitare anche una posizione troppo centrale, cioè simmetrica rispetto alle pareti perché anche questa è una posizione particolare in cui le riflessioni a destra e a sinistra impiegano lo stesso tempo a ritornare.

Quindi il punto ideale può essere in mezzo alla sala, ma un po' eccentrico.

6.2 Risposte all'impulso di ambienti reali

- In base a quanto scritto da **Fokke**, questa è la **risposta all'impulso (IR d'ora in poi)** della piccola chiesa di Schellingwoude, presso Amsterdam (canale sinistro sopra, destro sotto). Dura poco meno di 1 sec.

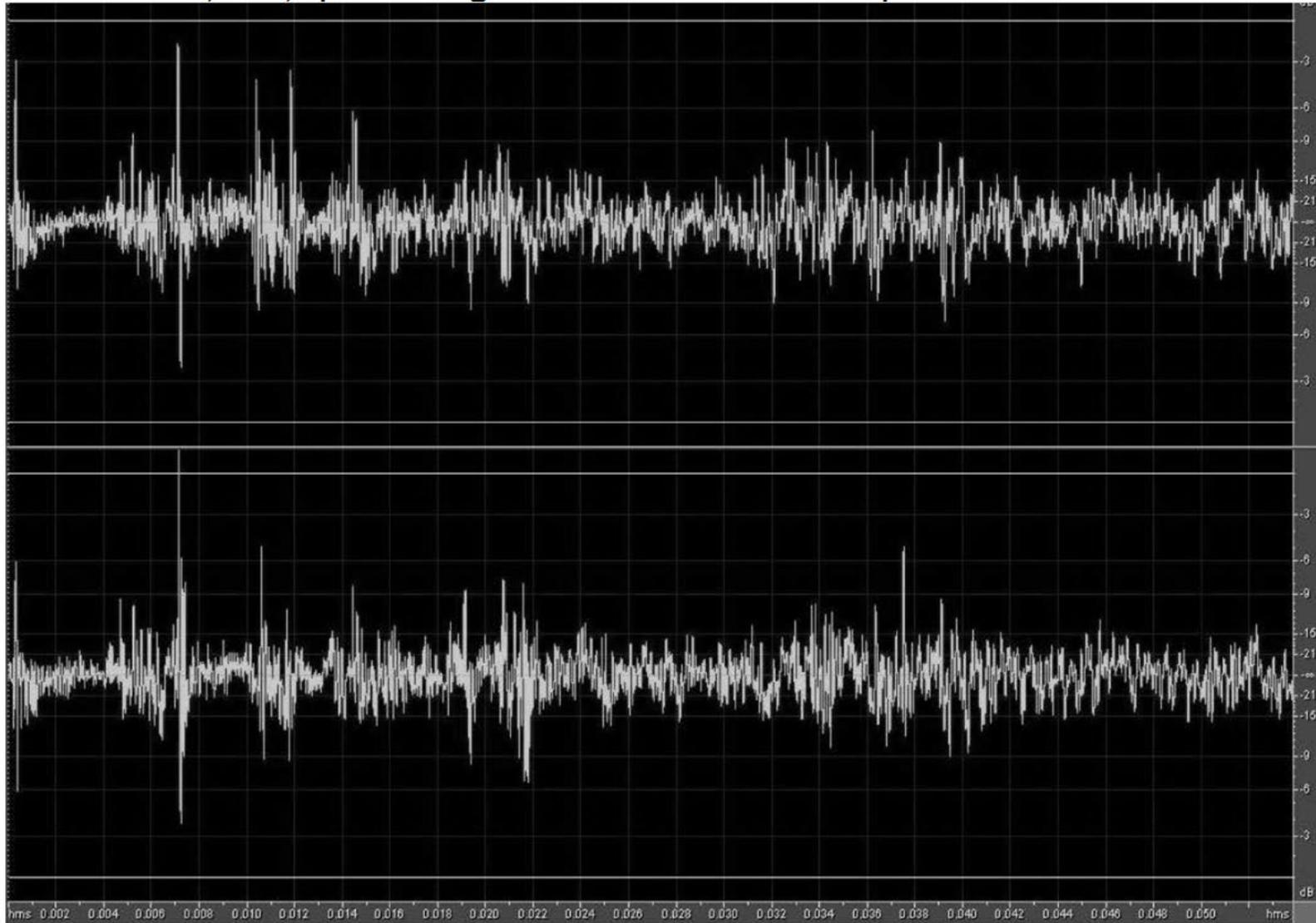


6.2 Risposte all'impulso di ambienti reali

- La prima cosa che si nota, rispetto al grafico utilizzato come esempio, è che **gli echi sono sia positivi che negativi**.
 - Questa è la "vera realtà"; il grafico era volutamente semplificato.
 - In base alla distanza, infatti, **gli echi dell'impulso possono arrivare anche in opposizione di fase con l'effetto di colorare il segnale**.
- Inoltre qui abbiamo **una risposta per il canale sinistro e una per il destro**.
 - Anche questo è corretto: nel mondo reale le risposte che arrivano alle orecchie sin. e des. sono necessariamente diverse.
 - Sarebbero (quasi) uguali solo in un ambiente simmetrico (anche come disposizione degli oggetti) con sorgente e ascoltatore piazzati esattamente sulla linea mediana.

6.2 Risposte all'impulso di ambienti reali

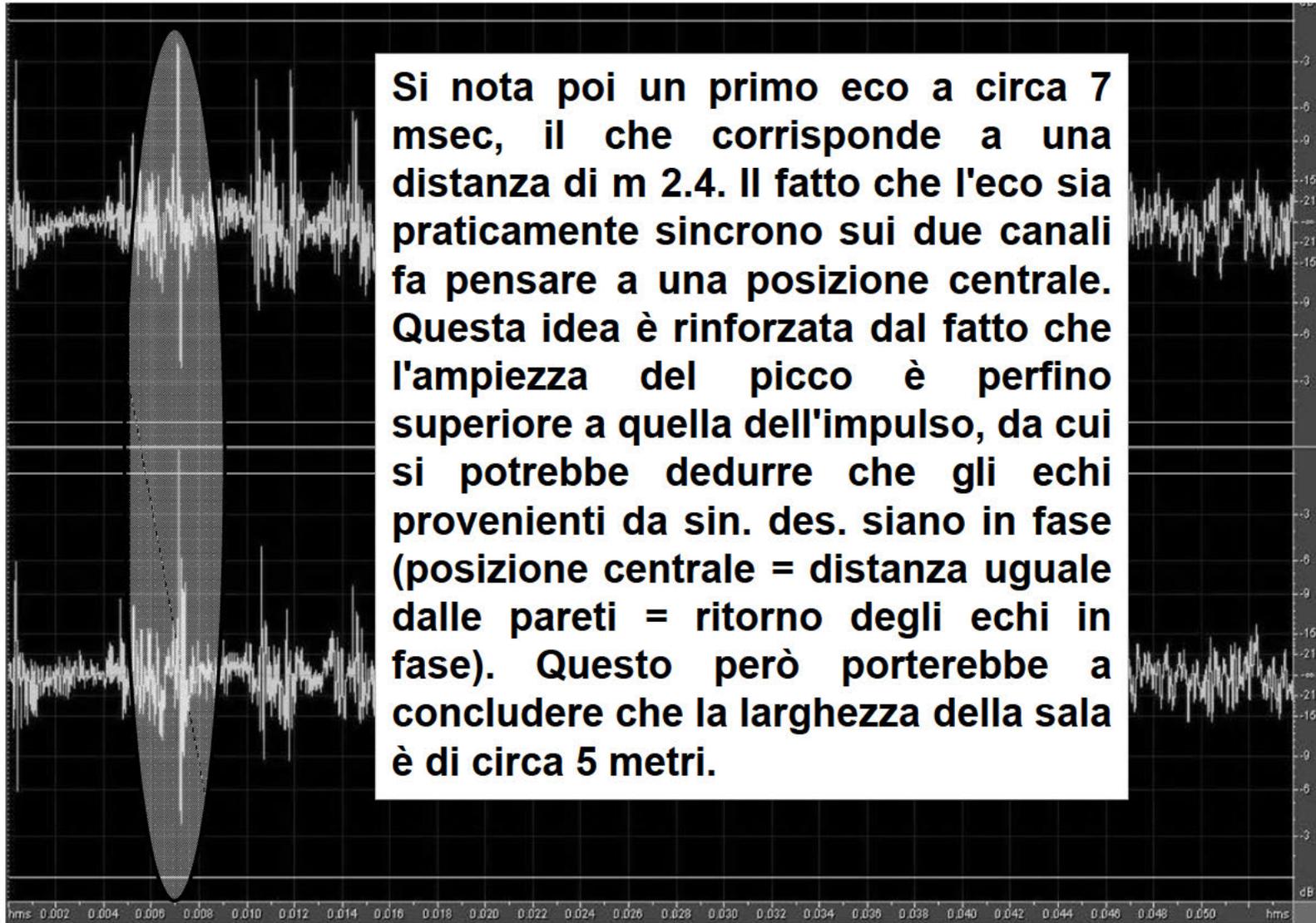
- Osservate, ora, questo ingrandimento relativo ai primi 50 msec.



6.2 Risposte all'impulso di ambienti reali



6.2 Risposte all'impulso di ambienti reali



6.2 Risposte all'impulso di ambienti reali

- Questa è una immagine dell'edificio, sempre tratta dal sito di **Fokke van Saane**. Da qui non è possibile stimare la larghezza reale e anche altre immagini trovate su internet non ne consentono una misura sicura, tuttavia alcune suggeriscono che potrebbe essere realmente così stretta (guardate l'organo, in fondo, e pensate che le canne prendono circa 2 m).



6.2 Risposte all'impulso di ambienti reali

Ora fate questo esperimento.

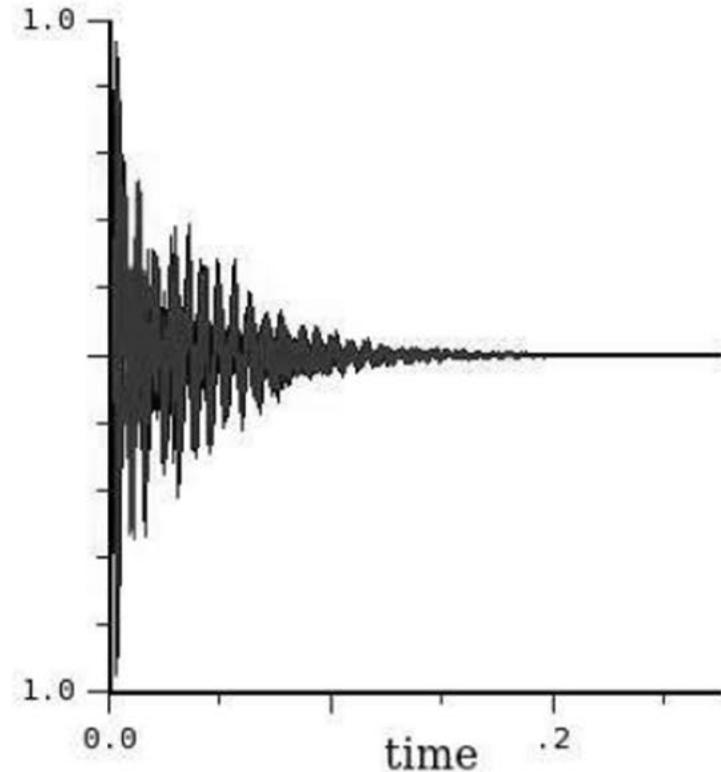
- Ascoltate il file di cui stiamo parlando, cioè ascoltate direttamente la pura e semplice **IR**: [IRChurchSchellingwoude.wav](#). Notate come, anche ascoltando la sola **IR** si abbia già un'idea abbastanza precisa del tipo di riverbero.
 - **NB:** *i file delle IR non possono essere compressi in MP3 (cioè con una compressione lossy) perché verrebbero modificati: non si tratterebbe più della IR originale. Non sono file da ascoltare ma da usare per elaborare un altro segnale e il togliere qualcosa potrebbe tradursi in differenze di fase nelle componenti del segnale elaborato. Al massimo, si possono comprimere con una compressione loseless. Invece i file audio a cui è stata già applicata la riverberazione possono essere tranquillamente compressi.*

6.2 Risposte all'impulso di ambienti reali

- Adesso prendiamo il suono di un rullante abbastanza secco [file 02 snare] e applichiamo, con il metodo che vedremo poi, la riverberazione della chiesa di Schellingwoude ottenendo quello che sentite qui [file 03 snare schellingwoude reverb]. Questo è il rullante come suonerebbe nella chiesa di Schellingwoude.
- Per fini musicali, poi, si può **mixare a questo segnale il suono diretto**. È vero che, dato che la IR contiene anche l'impulso, il suono diretto c'è già, ma qui ricadiamo nell'area delle scelte estetiche. Con l'effetto di presenza dato dal rinforzo del suono diretto abbiamo questo risultato [file 04 snare schellingwoude].

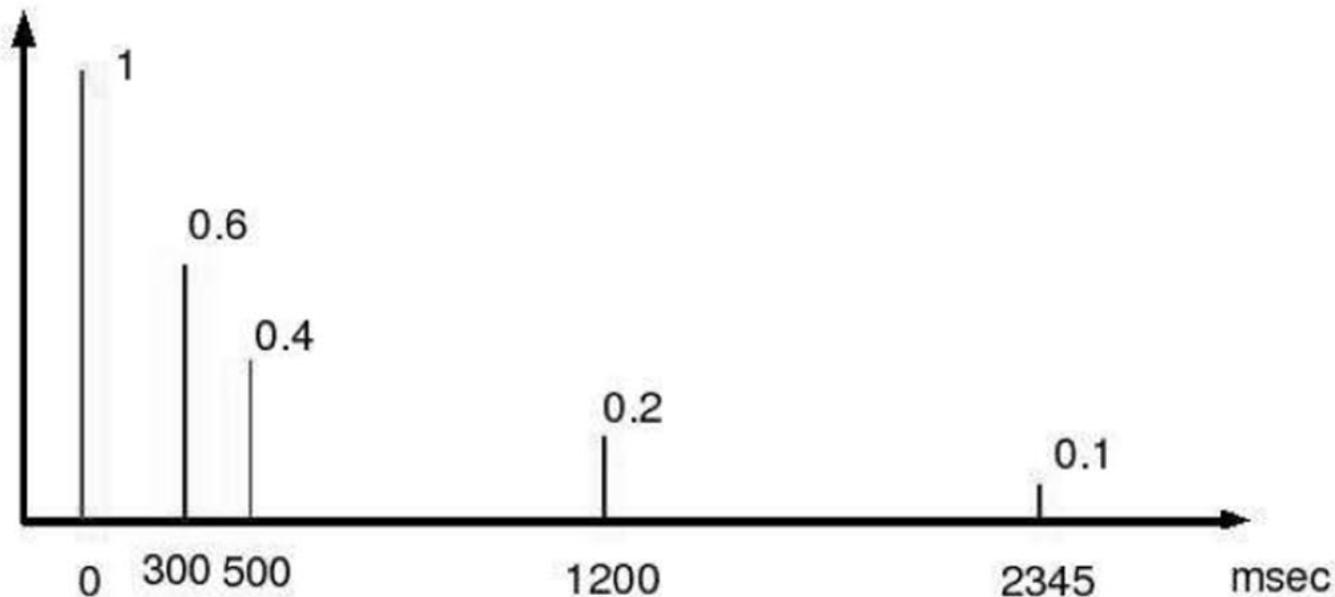
6.3 Convoluzione – come funziona

- Vediamo come funziona la **convoluzione**.
 - In realtà è molto semplice: *l'operazione di convoluzione fra due segnali* consiste nel **moltiplicare tutti i campioni del primo per ogni campione del secondo**.
 - Facciamo un esempio pratico. Prendiamo il segnale del rullante usato poco fa. Come si vede si tratta di un segnale breve (circa 0.2 sec).



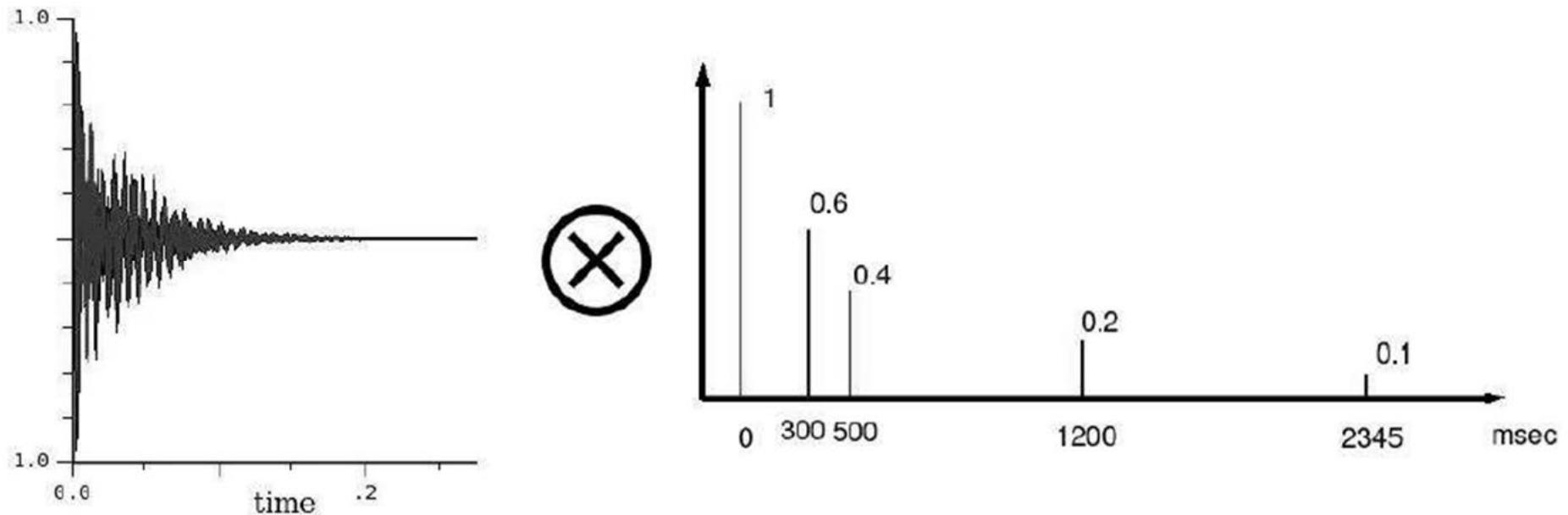
6.3 Convoluzione – come funziona

- Ora costruiamo una ipotetica **risposta all'impulso** molto semplice. Fatta a mano con l'impulso a ampiezza massima e 4 echi a distanza variabile e ampiezza calante. Una **IR** di questo tipo è tipica di luoghi larghi e aperti, con qualche parete non simmetrica su cui il suono si riflette (es. montagna).

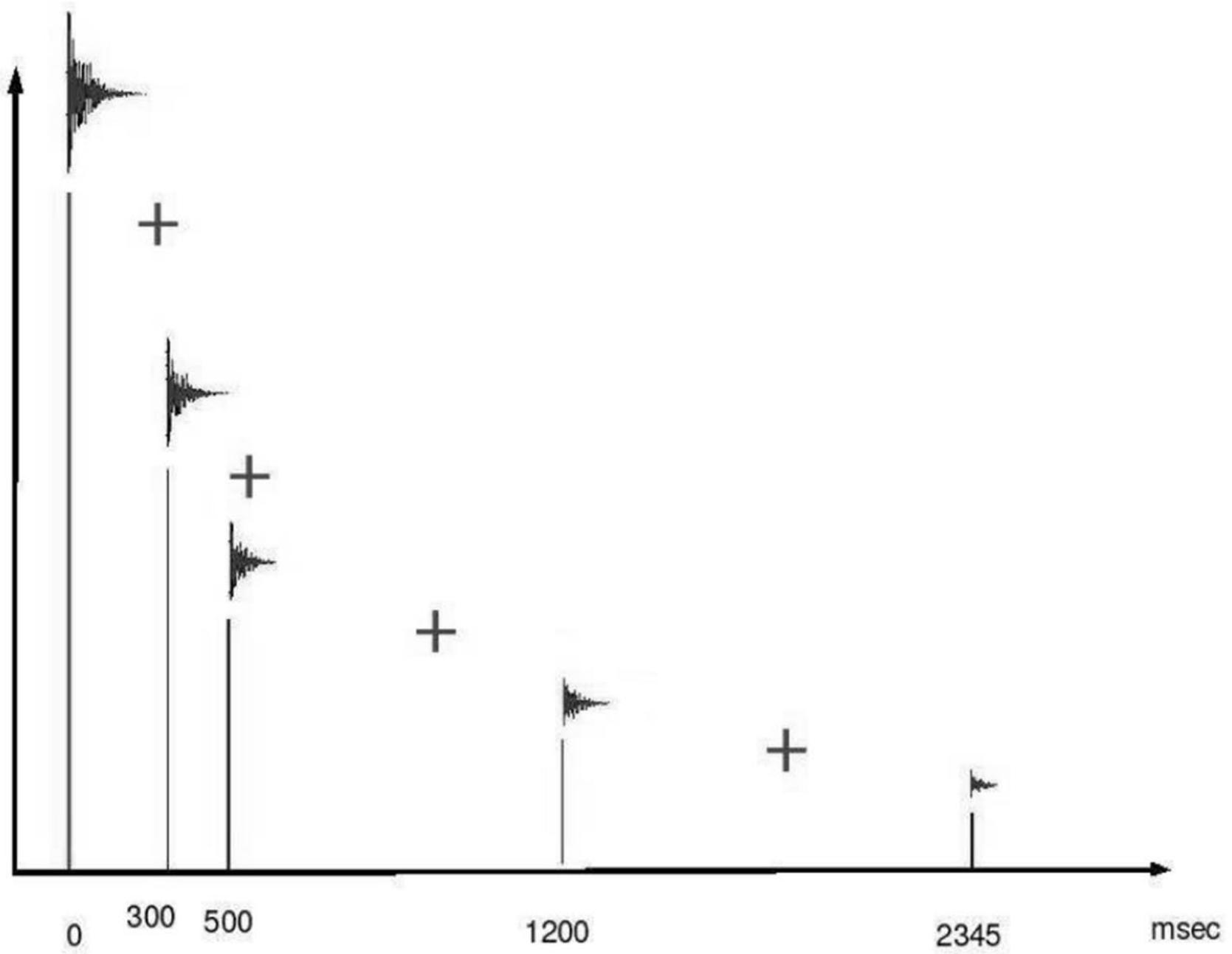


6.3 Convoluzione – come funziona

- Ora si tratta solo di eseguire questa serie di moltiplicazioni



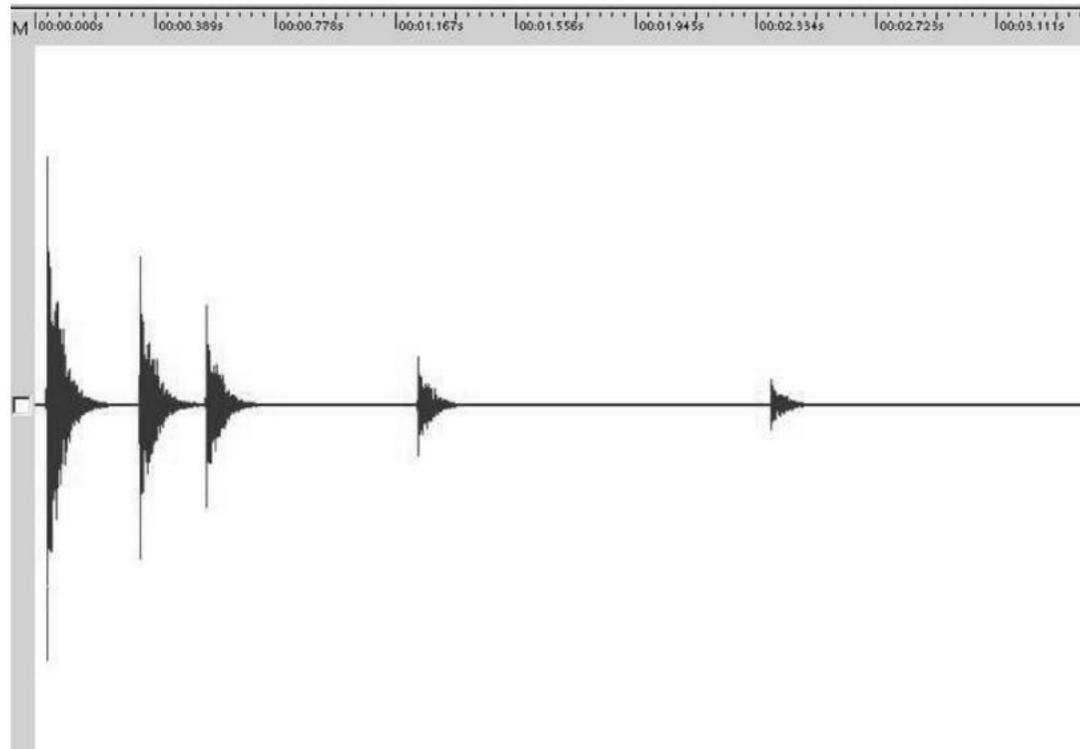
- in cui **tutto il segnale di sinistra** viene moltiplicato **per ogni campione** della risposta all'impulso (a destra) e tutti i segnali risultanti vengono sommati. Ora, se ci pensate, **i campioni di questa IR sono tutti a zero tranne l'impulso e i 4 echi**. Quindi il risultato finale sarà la somma del rullante ripetuto 5 volte e ogni volta riscalato in ampiezza in base all'ampiezza dell'eco.



Marco Marinoni - Conservatorio
"L. Marenzio" di Brescia

6.3 Convoluzione – come funziona

- Si ottiene, così, questo che è il vero risultato finale [file 05 snare-conv]



6.3 Convoluzione – come funziona

- Abbiamo preso un segnale. Abbiamo calcolato la convoluzione con la IR di un determinato ambiente e ottenuto quel segnale immerso in quell'ambiente.
 - Qui ce la siamo cavata con poco. In fondo avevamo un segnale breve e solo 4 echi. Anche così, però, la mole di calcoli è imponente. Se pensiamo che un segnale monofonico che dura 0.2 sec. a SR 44100 è composto da 8820 campioni, qui la macchina ha eseguito $8820 * 5 = 44100$ moltiplicazioni e altrettante somme. Per fare la convoluzione con la IR della chiesa (e in qualsiasi altro caso reale) in cui la IR è piena di echi, le moltiplicazioni e le somme da eseguire sono milioni.
 - Ne consegue che difficilmente si può eseguire questa operazione in tempo reale. Di solito il software impiega alcuni secondi per eseguire il calcolo.

6.3 Convoluzione – come funziona

- Ci sono alcune cose da tener presenti quando si esegue questa operazione. Il fatto che queste indicazioni debbano essere seguite o meno, dipende dal software:
 - alcuni suppliscono senza lamentarsi, altri si lamentano, altri ancora eseguono e basta dando un risultato falsato. Comunque eccole:

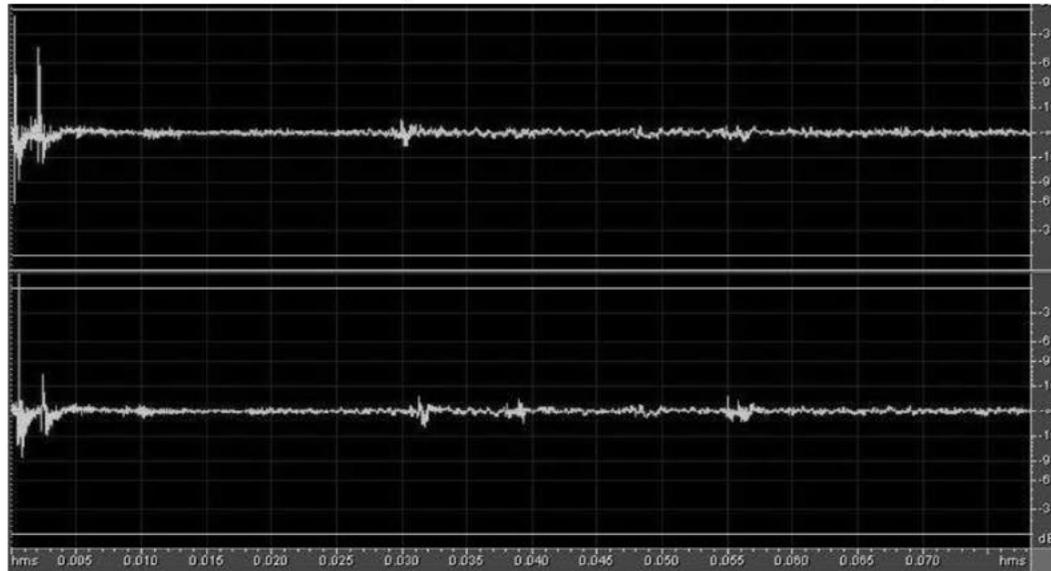
6.3 Convoluzione – come funziona

1. Il segnale e la IR **devono avere lo stesso SR**. Questa indicazione è imperativa altrimenti il risultato è falsato. Se, con SR diversi, un software non si lamenta significa che lui esegue la conversione oppure lavora alla cieca dando un risultato falso.
2. È bene che il segnale e la IR abbiano lo stesso formato: entrambi a 16 o 24 bit, ma di questo potete preoccuparvi meno perché di solito i software risolvono automaticamente il problema.
3. Per quanto riguarda i canali, la situazione migliore si ha con un segnale monofonico e una IR stereo. In questo caso un buon software dovrebbe creare un segnale stereo eseguendo la convoluzione del segnale monofonico due volte (una per ogni canale della IR) e piazzando i risultati sui rispettivi canali. Nel caso il software volesse lo stesso formato, basta far diventare stereo il segnale di partenza mettendolo uguale su entrambi i canali.
4. Non preoccupatevi se il risultato esce ad ampiezza bassissima: riscalatelo! Il fatto è che la moltiplicazione di due campioni numerici pone problemi di estensione. Moltiplicando due numeri interi a 16 bit si ottiene un risultato a 32 bit e due numeri a 24 bit danno 48 bit, quindi, per non bucare il range numerico, molti software fanno l'intera convoluzione con calcoli in floating point, considerando il massimo valore del campione (± 32767 a 16 bit) come ± 1.0 . A questo punto il risultato ha per forza di cose una ampiezza minore dell'originale perché la moltiplicazione di due numeri fra 0 e 1 dà un valore più piccolo rispetto a entrambi (es.: $0.5 * 0.3 = 0.15$). Considerando, poi, che nelle IR reali ci sono molti echi in controfase, il tutto può arrivare a livelli molto bassi.
5. Ovviamente il segnale da riverberare dovrebbe essere il più secco possibile. L'ideale sarebbe una registrazione in camera anecoica (totalmente priva di echi).

6.4 Convoluzione – esempi

Fabbrica

- Quella che vedete qui sotto è la parte iniziale della IR di un capannone di questa grande fabbrica (dal sito di Fokke).



6.4 Convoluzione – esempi

Fabbrica

- La risposta è stata generata con un colpo di pistola ed è caratterizzata da un singolo eco quasi immediato (circa 3 msec che corrisponde alla distanza di 1 metro: il pavimento?), seguito da una estesa coda di piccole riflessioni che creano un riverbero lungo e bello, esemplare nel suo decadimento regolare.
 - Potete ascoltare l'intera risposta [file 06_factoryhall].
 - Qui invece sentite il nostro rullante nella fabbrica [file 07_snare-factory].
 - Ho provato anche con un suono armonico [file 08_test] che inserito nella fabbrica diventa così [file 09_test-factory].

6.4 Convoluzione – esempi

- Per gli esempi che seguono sono state utilizzate alcune IR tratte dal sito di Noisevault. In tutti i casi la IR è stata applicata ai seguenti suoni:
 - Rullante [file 10 snare]
 - accordo percussivo, breve durata [file 11 test]
 - violini varie frasi con staccati - ca. 12 sec. [file 12 violins]

6.4 Convoluzione – esempi

Chiesa del 1400

- Come eccitazione è stato usato lo scoppio di un palloncino piazzato nello spazio del coro (in fondo alla chiesa, un po' elevato rispetto alla base), ma qui il microfono è stato messo in mezzo alla sala, a poco più di 10 m di distanza.
 - Rullante [file 13 snare-caps-xy3]
 - Accordo [file 14 test-caps-xy3]
 - Violini [file 15 violins-caps-xy3]

6.4 Convoluzione – esempi

Auditorium da 1800 posti

- IR presa a 12 m di distanza e 4 m dal pavimento.
 - rullante si nota un doppio colpo iniziale dovuto alla grandezza della sala e al fatto che l'attacco del rullante è molto percussivo [file 16 snare-1800]
 - accordo qui infatti il colpo doppio è quasi sparito perché l'attacco è appena più dolce [file 17 test-1800]
 - violini qui il colpo doppio non si sente come tale, ma il suo effetto è di addolcire gli attacchi [file 18 violins-1800]