

MISURAZIONI ACUSTICHE CON TECNICA MLS

di

* Marco Gamarra

Le attività dei tecnici acustici sono spesso costituite da studi e valutazioni orientati alla caratterizzazione della qualità acustica di ambienti chiusi o finalizzati alla quantificazione delle proprietà acustiche di manufatti o allestimenti fonoisolanti e fonoassorbenti. Per quanto riguarda l'acustica degli ambienti chiusi, le indagini strumentali sono normalmente volte a quantificare i molteplici parametri che consentono di valutare la qualità dell'ascolto, a partire dal tradizionale spettro del tempo di riverbero (T) fino a parametri di più recente definizione utili per una più completa e strutturata comprensione delle proprietà acustiche delle sale. Essi sono ad esempio (ma non solo) lo STI (Speech Transmission Index), indice rappresentativo della comprensibilità del parlato, e il C50, indice della chiarezza del campo sonoro; quest'ultimo è espresso dal rapporto tra l'energia sonora ricevuta in un determinato punto nei primi 50ms dall'inizio della ricezione del segnale sonoro rispetto a quella ricevuta in tutto il tempo successivo.

Per quanto riguarda, invece, la caratterizzazione delle proprietà di manufatti o allestimenti, è di interesse la quantificazione in opera del fonoisolamento e del fonoassorbimento di specifiche realizzazioni quali, ad esempio, le barriere acustiche (stradali ma non solo), per le quali può essere richiesto a livello contrattuale un collaudo in opera delle effettive prestazioni per cui sono state progettate e realizzate. L'insieme di questi parametri e, di conseguenza, la possibilità di una loro misurazione sul campo, sta via via assumendo sempre maggiore importanza. La serie di norme tecniche UNI 11532 "*Caratteristiche*

acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione" di cui sono state già pubblicate la parte 1 (requisiti generali) e la parte 2 (dedicata agli edifici scolastici) e di cui si attende la pubblicazione delle parti relative ad altre tipologie di ambienti (uffici, etc...), indica esplicitamente i valori di riferimento dei descrittori della qualità acustica interna (anche relativamente ai già citati parametri STI e C50) al fine di perseguire la migliore comprensibilità del parlato.

Invece, le norme tecniche UNI EN 1793 "Dispositivi per la riduzione del rumore da traffico stradale - Metodo di prova per la determinazione della prestazione acustica" parte 5 e parte 6 forniscono una metodologia utile per quantificare le proprietà fonoisolanti e fonoassorbenti dei manufatti in opera; esse costituiscono, pertanto, uno strumento di riferimento per la stipula di contratti di fornitura di barriere acustiche che consente di poter verificare sul campo l'effettiva rispondenza della qualità acustica del manufatto e del suo montaggio con i valori di fonoisolamento e fonoassorbimento richiesti a capitolato.

In generale, sia negli ambienti chiusi sia all'aperto, le misurazioni atte a caratterizzare proprietà acustiche passive necessitano della generazione di un segnale sonoro da parte di una sorgente che serva da "stimolo" per eccitare l'ambiente. Contestualmente, è necessario rilevare – per mezzo degli strumenti di acquisizione – il segnale generato dalla fonte utilizzata e, a seconda dei casi, trasmesso, riflesso, diffratto, riverberato, ecc. dall'ambiente o dal manufatto oggetto di studio. In pratica la sorgente sonora gene-

ra un segnale “di input” $x(t)$ ed il microfono acquisisce il segnale “di output” $y(t)$ del sistema dinamico costituito dall’ambiente o dal manufatto che si vuole caratterizzare proprio grazie alla introduzione in esso di uno stimolo acustico ed alla sua contestuale rilevazione. $h(t)$ è la funzione rappresentativa del comportamento del sistema che si intende caratterizzare (Figura 1).

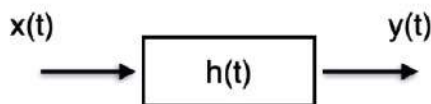


Figura 1: Schema di funzionamento del sistema

La teoria dei sistemi definisce quale sia il segnale “principe” di riferimento $x(t)$ da utilizzare per l’analisi di un sistema dinamico in generale, sia esso di tipo acustico, meccanico, ecc.: si tratta del cosiddetto “impulso” (analiticamente descritto dalla funzione delta di Dirac) ovvero di un segnale estremamente breve (idealmente istantaneo) e di energia sufficiente ad eccitare adeguatamente il sistema, tanto da consentire che esso produca una risposta strumentalmente rilevabile. Il segnale che si rileva nel punto di acquisizione è pertanto denominato “risposta all’impulso” del sistema stesso. Sempre dalla teoria sappiamo che in una risposta all’impulso sono contenute tutte le informazioni sulla risposta dinamica del sistema e, in particolare, la sua risposta in funzione della frequenza. Spesso i tecnici acustici acquisiscono una risposta all’impulso per quantificare lo spettro del tempo di riverbero (T), tralasciando il restante contenuto informativo che in esso è contenuto perché non necessario per i loro scopi; esso invece consente di quantificare anche molti altri parametri, tra i quali quelli già precedentemente citati e richiamati dalle norme tecniche.

Tradizionalmente in acustica si è fatto uso e si fa ancora largo uso di segnali impulsivi quali il colpo di pistola a salve o gli impulsi generati dalle cosiddette “claquettes” per acquisire una risposta all’impulso in modo diretto. Esistono tuttavia anche segnali alternativi al vero e proprio impulso, segnali che integrano e completano le possibilità di studio della risposta acustica di un sistema e che, rispetto all’utilizzo del metodo diretto, presentano caratteristiche utili a ricercare una migliore qualità della

misura in casi specifici. Tra di essi le sequenze di massima lunghezza (Maximum Length Sequences - da cui l’acronimo MLS) costituiscono una tipologia di segnale utile per l’esecuzione di indagini acustiche di sistemi lineari tempo invarianti e presentano caratteristiche che i tecnici acustici possono sfruttare a proprio vantaggio. I segnali MLS sono spesso denominati “pseudocasuali” poiché, pur essendo assolutamente deterministici (sono generati per mezzo di un algoritmo), presentano alcune caratteristiche assimilabili al segnale casuale (rumore bianco) quali, ad esempio, uno spettro sonoro pressoché privo di “colorazione”, che corrisponde pertanto anche ad una sensazione uditiva simile a quella di un segnale senza contenuto informativo.

Le sequenze di massima lunghezza sono generate da uno specifico algoritmo predefinito e sono binarie (i valori possono essere 0 ed 1) e periodiche con periodo $P = 2N-1$. N è un numero intero che rappresenta l’ordine della sequenza: definito questo, viene stabilita la lunghezza della sequenza e il numero di elementi dopo il quale la sequenza si ripete uguale a sé stessa. Ad esempio, se $N=4$ si ottiene $P=15$ e, pertanto, la sequenza si ripete uguale a sé stessa a partire dal sedicesimo elemento.

Ma perché utilizzare proprio questo segnale binario come stimolo (ovvero nel caso acustico riproducendolo con un altoparlante e acquisendolo con un microfono) per studiare un sistema dinamico? Per comprendere le proprietà e i possibili vantaggi dell’uso delle MLS occorre richiamare il concetto di cross-correlazione tra segnali. La cross-correlazione tra due segnali x e y è definita dalla relazione matematica [1], che, in maniera “operativa”, può essere così letta: “Si prende la funzione $x(t)$ e vi si fa “scorrere sopra” la funzione $y(t)$ (grazie all’introduzione della variabile τ che è di fatto uno “shift temporale”) e, in ogni istante, si valuta l’area sottesa dal prodotto delle due funzioni (ovvero si calcola l’integrale che ha proprio il significato di area sottesa da una curva)”.

$$[1] \quad R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t + \tau)dt$$

La nuova funzione avrà come argomento lo “shift temporale” τ (la variabile d’integrazione ovviamente sparisce) e avrà valore istante per istante pari all’a-

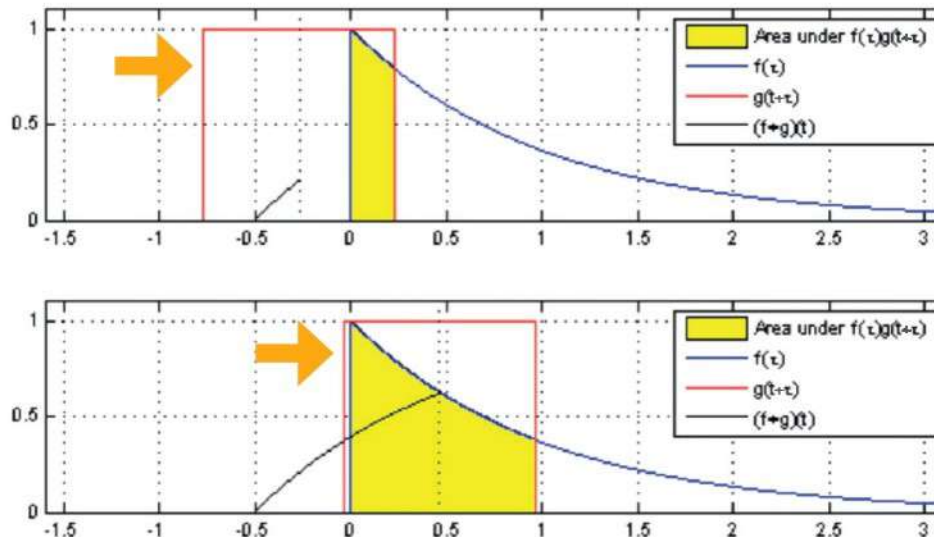


Figura 2: Esempio grafico di calcolo della funzione di cross-correlazione tra 2 segnali (grafico pubblicato da Wikipedia - l'enciclopedia libera)

rea sottesa dalla sovrapposizione delle due funzioni. Nel caso particolare in cui la funzione x è uguale alla funzione y la cross-correlazione prende il nome di auto-correlazione.

Nella Figura 2 si ha che:

La funzione esponenziale decrescente (linea blu) corrisponde a $x(t)$;

La funzione porta rettangolare (linea rossa) corrisponde a $y(t+\tau)$ e scorre orizzontalmente al di sopra della precedente;

L'area gialla corrisponde all'area sottesa dalla sovrapposizione delle due funzioni istante per istante;

La linea nera è la funzione risultante $R_{xy}(\tau)$ e il suo valore corrisponde in ogni punto dell'asse orizzontale τ al valore dell'area gialla. Si osservi come per le funzioni x e y l'asse orizzontale abbia variabile indipendente "t" mentre per la funzione $R_{xy}(\tau)$ la variabile indipendente sia ovviamente τ e di conseguenza il medesimo asse orizzontale sia da leggere come "t" o "τ" a seconda della funzione a cui si fa riferimento.

Questo vale nel "mondo reale del continuo" ma un'operazione analoga può essere eseguita anche nel "discreto" per i segnali campionati (così come avviene nella pratica degli strumenti di misura elettronici) e, nello specifico, per segnali campionati e

periodici (come sono le sequenze MLS). La formula può essere pertanto riscritta come [2], con il simbolo di integrazione sostituito nel discreto da una sommatoria di indice k che avviene tra $k=0$ e $k=P-1$ poiché al P -esimo campione la sequenza si ripete.

$$[2] \quad R_{xy}(n) = \sum_{k=0}^{P-1} x(k)y(k+n)$$

In un mondo campionato e periodico tutto termina in quell'istante $P-1$ -esimo per poi ripetersi: il tempo non scorre da $-\infty$ a $+\infty$ con incrementi infinitesimi come nel mondo reale, bensì da 0 a $P-1$ con incrementi finiti di passo pari ad 1.

La proprietà significativa del segnale MLS è quella di avere una funzione di auto-correlazione ($x=y$) circolare (in quanto trattasi di funzioni periodiche) che approssima una funzione delta di Dirac; tale approssimazione è tanto migliore quanto più è elevato l'ordine della sequenza. Ad esempio, per la precedentemente citata sequenza di ridottissimo ordine ($N=4$ – utile per lo scopo illustrativo ma ovviamente insufficiente per l'esecuzione di misurazioni reali), la funzione di autocorrelazione circolare è rappresentata nella Figura 3: già si può osservare come il suo valore per $\tau=0$ sia significativamente più elevato rispetto agli altri. Per sequenze di applicazione reale,

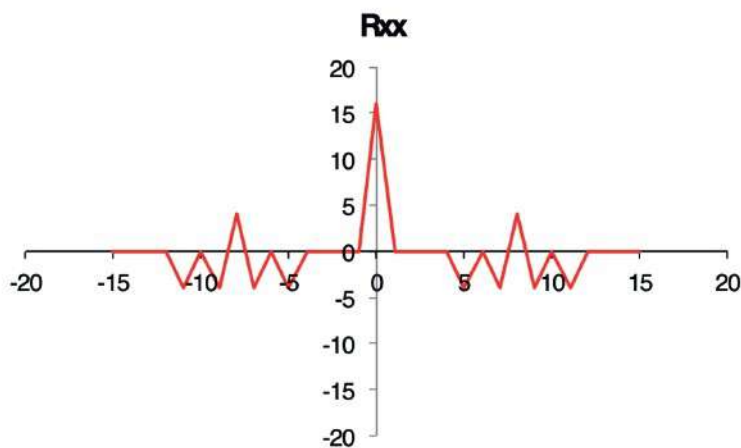


Figura 3: Funzione di autocorrelazione circolare di una sequenza di ordine 4

di ordine 15 o anche superiore, l'approssimazione della funzione Delta è di qualità estremamente più elevata.

Questo aspetto ha una conseguenza importantissima: per ricavare la risposta all'impulso di un sistema è dunque sufficiente eseguire la cross-correlazione circolare tra il segnale MLS di input e il segnale di output, ossia quello acquisito dal microfono nel punto di interesse. Purtroppo (anzi per fortuna nostra!) il mondo reale non è però né discretizzato (campionato) né tantomeno periodico. Occorre pertanto, nella pratica, ricondurre al meglio la modalità di osservazione del sistema reale (continuo e non periodico) all'utilizzo delle sequenze MLS campionate e periodiche. A questo fine, ovvero per ricondurre il sistema reale a una situazione iniziale assimilabile a quella di uno scenario di periodicità, la misurazione avviene eseguendo inizialmente una intera sequenza "a vuoto", ossia riproducendo semplicemente il segnale senza una sua iniziale acquisizione. Solo a partire dalla seconda esecuzione della sequenza si svolge l'effettiva misurazione e il sistema provvede a generare il segnale e a cross-correlarlo con quanto ricevuto in tempo reale dal microfono. Questa procedura consente di pre-eccitare il sistema reale in modo tale da ricreare una situazione non già di "quiete" iniziale come sarebbe necessario per il metodo diretto ma, al contrario, atta a simulare la periodica ripetizione della sequenza (ovvero lo "stato di natura" del mondo campionato e periodico in cui

i opera con le sequenze MLS).

Ovviamente la misurazione deve essere gestita da un elaboratore elettronico capace al contempo di generare la sequenza e di acquisire il segnale dal microfono per svolgere l'operazione di cross-correlazione tra i due segnali.

Il principale vantaggio dell'utilizzo del segnale MLS è quello di poter eseguire la cross-correlazione per un numero consecutivo di sequenze grande a piacere. Questo ha come risultato quello di esaltare, a ogni successiva ripetizione della sequenza (e della relativa cross-correlazione), il segnale utile della sequenza stessa rispetto al rumore di fondo eventualmente presente: pertanto, più si eleva il numero di ripetizioni della sequenza, più aumenta il rapporto segnale/rumore (+3dB ad ogni raddoppio del numero di ripetizioni).

Con questa tecnica di misura è pertanto possibile eseguire rilevazioni delle risposte all'impulso anche in condizioni che sarebbero giudicate non ideali, se non addirittura proibitive, per l'applicazione del metodo diretto quali, ad esempio, la presenza di un elevato rumore di fondo non eliminabile (impianti che non è possibile disattivare, traffico stradale, ecc.) A questo scopo è sufficiente impostare un adeguato numero di ripetizioni della sequenza per ottenere come risultato una misurazione in cui il rapporto segnale/rumore è sufficiente per la quantificazione dei parametri di interesse.

Nel caso di misurazioni orientate alla caratterizzazione della risposta all'impulso di ambienti chiusi questo metodo consente inoltre di discriminare l'influenza del rumore di fondo dall'influenza delle caratteristiche acustiche passive della sala sulla qualità dell'ascolto. Si provvede in questo caso a eseguire una misurazione della risposta all'impulso con un elevato numero di ripetizioni della sequenza e, quindi, con un elevato rapporto segnale/rumore; questo elimina in maniera efficace l'influenza del rumore di fondo. Si può così calcolare il parametro STI (o altri parametri di interesse) in un caso ideale in cui nella sala non è presente rumore di fondo significativo. Successivamente si registra con la medesima catena di misura il solo rumore di fondo e lo si miscela con la risposta all'impulso precedentemente acquisita, ottenendo la risposta all'impulso comprensiva del rumore di fondo. Si ripete ora il calcolo del parametro STI a partire dalla risposta all'impulso comprensiva di rumore di fondo: questo secondo valore

risulterà ovviamente inferiore a quello calcolato in precedenza. Il valore di STI ottenuto senza l'influenza del rumore di fondo, infatti, è espressione delle massime potenzialità che la sala può esprimere in termini di comprensibilità del parlato: ad esempio, se il valore di STI così ricavato è giudicato insufficiente, la sala dovrà giocoforza essere oggetto di trattamenti di correzione acustica perché la qualità minima richiesta non è raggiunta anche nella situazione ideale di completa eliminazione del rumore di fondo. Infine, la differenza tra i valori di STI ricavati dalle due risposte all'impulso, con e senza rumore di fondo, è indice del contributo del rumore di fondo stesso al deterioramento della qualità dell'ascolto.

Nel caso invece di misurazioni orientate alla quantificazione in opera delle proprietà acustiche dei manufatti schermanti, la misurazione eseguita con tecnica MLS consente di ricavare l'aliquota di energia sonora trasmessa oppure riflessa dalla barriera oggetto di studio, senza la necessità di chiudere al traffico l'infrastruttura presso la quale è stata eretta la schermatura e scartando altresì eventuali ulteriori contributi derivanti da altre fonti sonore potenzialmente disturbanti (impianti esterni a servizio di aziende limitrofe, ecc.) Come già indicato in precedenza, nel caso specifico della caratterizzazione delle proprietà acustiche delle barriere, la metodologia di misura è normata dalla serie di norme UNI EN1793. In particolare, la parte 5 tratta la misurazione dello spettro di assorbimento acustico e la parte 6 quella dello spettro di isolamento acustico. A esse si rimanda per i dettagli operativi relativi alle attività di misura sul campo e di calcolo in post-processing dei risultati. In questa sede è utile illustrare il principio che sta alla base delle misurazioni: in entrambi i casi, esso è quello di eseguire una analisi nel dominio del tempo della risposta all'impulso ricavata in una specifica e ben precisata configurazione geometrica relativa al posizionamento reciproco di sorgente, barriera e microfoni. Questo allo scopo di isolare - in post-processing - la sola porzione di segnale trasmessa attraverso la barriera (nel caso della misura di isolamento acustico) oppure riflessa dalla barriera (nel caso della misura di assorbimento acustico).

In entrambi i casi le misurazioni devono essere svolte sia in presenza della barriera sia in sua assenza, avendo cura di mantenere inalterata la posizione relativa tra sorgente sonora e postazioni microfoniche. Il risultato della misura - consistente in uno spettro

di isolamento o di assorbimento acustico - è dato dal raffronto tra le due condizioni di presenza ed assenza della barriera in esame.

Nella Figura 4 è riportato un estratto della norma UNI EN 1793-6 che illustra la configurazione di posizionamento di sorgente sonora e microfoni nel caso di presenza della barriera acustica per una misurazione di isolamento.

La norma indica in almeno 16 ripetizioni della sequenza MLS il valore minimo utile per l'esecuzione della misurazione. Il numero minimo di ripetizioni è comunque da valutarsi caso per caso da parte dei tecnici operatori sul campo per poter ottenere un adeguato rapporto segnale/rumore. Allo scopo è possibile eseguire una rapida analisi sul campo di una risposta all'impulso richiedendo al sistema di misura di calcolare proprio lo spettro del rapporto segnale/rumore, così da poterne valutare l'entità e regolare adeguatamente il numero di ripetizioni in base alle necessità dello specifico caso in esame. **E**

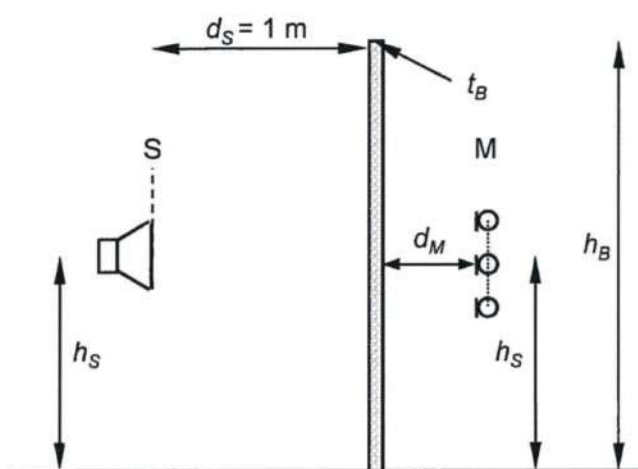


Figura 4: Schema di posizionamento di sorgente sonora e microfoni rispetto alla barriera acustica secondo la norma UNI EN 1793-6

* Marco Gamarra

* ingegnere elettronico specialista in acustica e vibrazioni, titolare dello Studio MRG di Torino.