

Il suono in uno spazio chiuso

Ridotto e adattato dalla Tesi di Laurea in Ingegneria Elettronica del Dott. Ing. Tommaso Giunti da Simone Bianchi (TangerineTech Engineering) <http://www.tangerinotech.net>.

Originariamente comparso sul Blog del M° Paolo Sarri all'indirizzo www.atelierdarcheterie.com/blog/index.html

Le proprietà acustiche di un locale destinato all'ascolto della musica sono determinate da molti fattori come i materiali impiegati nella costruzione del pavimento e delle pareti, l'arredamento e la presenza di aperture, e in particolare dalla forma geometrica della stanza e dalle sue misure. Per i fenomeni acustici il parametro da utilizzare nel giudicare grande o piccolo un ambiente è il rapporto tra le dimensioni lineari del locale e la lunghezza d'onda L :

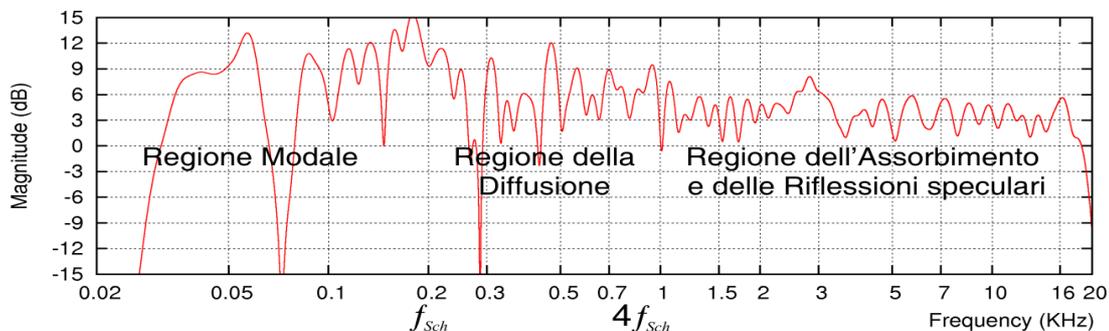
$$L = V_s / f$$

dove V_s (circa 343 m/s) è la velocità del suono ed f la frequenza del suono preso in considerazione. Se si considerano le frequenze di interesse per l'orecchio umano, la lunghezza d'onda in aria per la frequenza di 20 Hz è pari a circa 17 m, mentre quella per la frequenza di 20 kHz è di circa 1,7 cm. Pertanto la stessa stanza in cui è emesso il suono potrà essere piccola per quanto riguarda le basse frequenze, mentre sarà grande per quanto riguarda i suoni acuti. Per un ambiente chiuso è perciò necessario distinguere il problema della descrizione a bassa frequenza da quello ad alta frequenza, ovvero, è possibile definire l'ambiente di dimensioni piccole o grandi secondo la frequenza di interesse. Schroeder ha definito l'omonima frequenza limite, F_{sch} diversa per ogni singolo ambiente, che possa distinguere la regione di comportamento a bassa frequenza da quella ad alta frequenza, frequenza che essenzialmente dipende dal rapporto fra il tempo di riverbero dell'ambiente e il volume dell'ambiente stesso.

Quindi ambienti più grandi e più fonoassorbenti, ossia con un piccolo tempo di riverberazione, presentano questa frequenza a valori più bassi, mentre ambienti piccoli e poco assorbenti mostrano questa frequenza a valori più elevati. Ad esempio una stanza di 54 mc con tempo di riverberazione di un secondo presenta $F_{sch} = 272$ Hz, mentre una stanza di 400 mc con tempo di riverberazione di 2 secondi presenta $F_{sch} = 272$ Hz.

Pertanto il comportamento del suono può essere studiato distinguendo idealmente tre regioni spettrali:

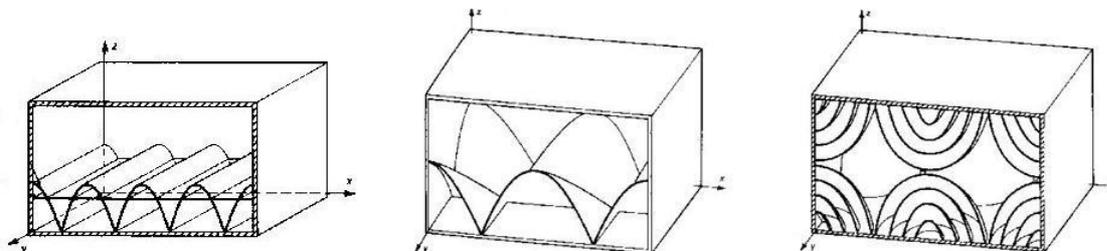
1. Alle frequenze basse, ossia al disotto della frequenza di Schroeder, l'acustica è dominata dalla presenza delle onde stazionarie, per cui il livello della pressione sonora rilevato in regime permanente sinusoidale fluttua ampiamente, spostandosi da punto a punto nell'ambiente, così pure la risposta in frequenza dell'ambiente è fortemente non lineare, inquinando drasticamente l'ascolto.
2. La seconda regione spettrale, al disopra della frequenza di Schroeder, è una banda di transizione che copre circa due ottave.
3. Alle medio-alte frequenze il comportamento acustico dell'ambiente è di tipo statistico: le onde di pressione possono essere approssimate come raggi sonori, simili a quelli della luce secondo la teoria dell'acustica geometrica. Infatti ciò che ascoltiamo in uno spazio chiuso è la complessa combinazione tra il suono diretto che proviene dalla sorgente sonora e il suono indiretto, costituito dalle molteplici riflessioni che ci giungono all'orecchio dalle varie superfici della stanza.



Teoria modale

Concentriamoci prima sulla regione delle basse frequenze dove il campo acustico nello spazio è dominato dalle risonanze dell'ambiente stesso: le frequenze di risonanza di una stanza si possono calcolare secondo l'analisi modale. Trascurando i dettagli matematici, si può considerare la stanza come una guida d'onda chiusa, vale a dire una cavità risonante.

L'onda di pressione acustica viene riflessa dalle pareti e la distribuzione del campo sonoro è la complessa combinazione lineare di modi di propagazione assiali tangenziali ed obliqui: i modi assiali considerano una sola dimensione della stanza, quelli tangenziali coinvolgono due superfici e quelli obliqui tutte e tre. La distribuzione della pressione sonora è fortemente simmetrica e presenta zone a maggiore e minore pressione.



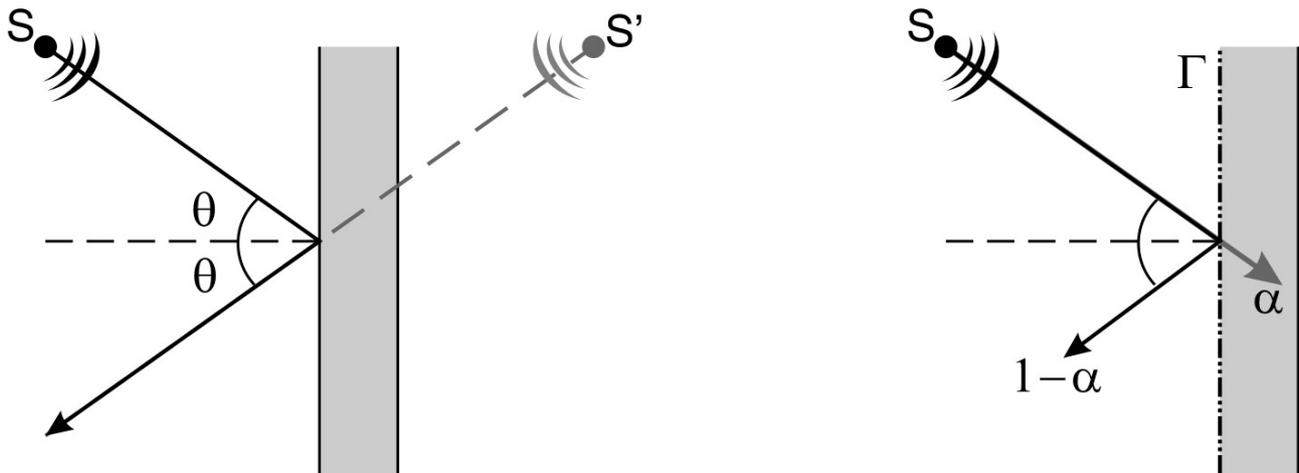
Quando all'onda di pressione sonora proveniente dalla sorgente si sovrappone un'onda che è stata riflessa dalla parete si origina un'interferenza: se l'interferenza è costruttiva il risultato è l'instaurarsi di onde stazionarie all'interno del locale. Di conseguenza la pressione sonora di un tono a quella frequenza di risonanza verrà rinforzato dalla vibrazione dell'aria contenuta all'interno della stanza; gli altri toni, al di fuori delle frequenze di risonanza, vengono attenuati senza ricevere alcun sostegno energetico da parte del comportamento acustico del locale. Le frequenze di risonanza si calcolano in base alle dimensioni geometriche del locale stesso e ad alcuni parametri accessori che assumono valore di numeri interi. Riportiamo a titolo di esempio le frequenze di risonanza per una stanza con dimensioni 5, 4 e 3 metri:

34.30 Hz, 42.88 Hz, 52.91 Hz, 57.17 Hz, 71.46 Hz, 79.26 Hz, 85.75 Hz, 92.36 Hz, 103.06 Hz, 108.62 Hz, 109.81 Hz, 123.80 Hz, 128.63 Hz, 133.12 Hz, 140.76 Hz.

Acustica geometrica

Al di sopra della frequenza di Schroeder le risonanze sono talmente sovrapposte tra loro da non poter più distinguere i singoli contributi di queste al suono complessivo, perciò è necessario sostituire la descrizione del comportamento del suono secondo la teoria modale con un nuovo modello valido anche alle frequenze la cui lunghezza d'onda è trascurabile rispetto alle dimensioni dell'ambiente e degli oggetti presenti in esso. La letteratura suggerisce un approccio di natura geometrica basato sul concetto di raggio sonoro, anziché su quello di onda, che si propaga nello spazio lungo traiettorie rettilinee e che viene riflesso in modo speculare quando incontra un ostacolo.

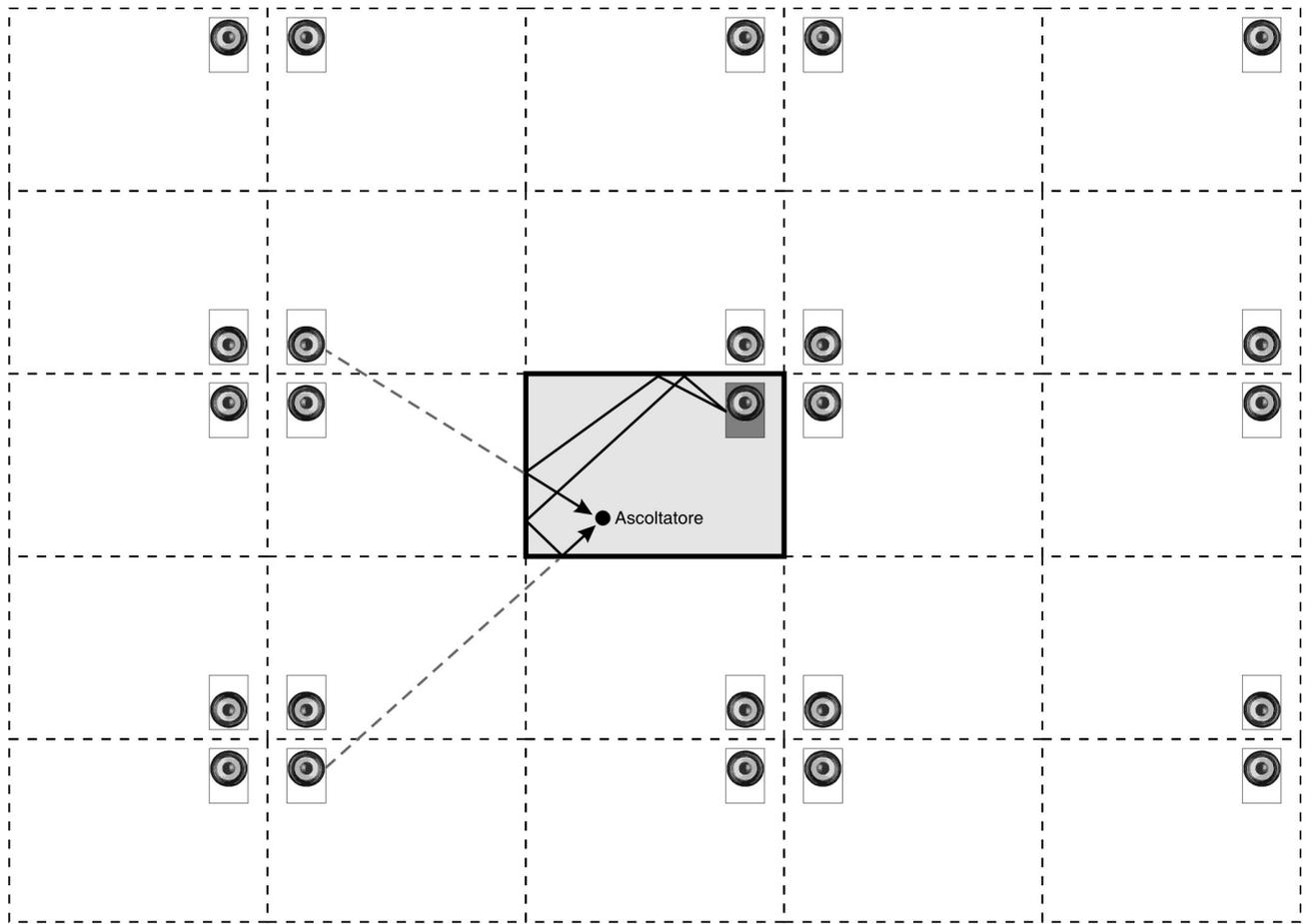
La riflessione di un raggio sonoro su una superficie rigida è tale che il raggio incidente e quello riflesso si trovano sullo stesso piano e formano angoli uguali con la perpendicolare alla superficie d'incidenza. È lecito pensare al raggio sonoro riflesso come se fosse emesso da una sorgente ipotetica dall'altra parte della superficie: è una sorgente dello stesso segnale in posizione speculare rispetto a quella reale.



Se l'interfaccia non è perfettamente rigida il raggio riflesso ha un'ampiezza ridotta dal coefficiente di riflessione della superficie, il quale vale 1 se una superficie è totalmente riflettente e 0 per una superficie totalmente assorbente. Il coefficiente di assorbimento acustico dipende dall'angolo d'incidenza e dalla frequenza del suono, variabili che modificano lo spettro di potenza del suono riflesso e che ne riducono l'intensità.

Questi principi dell'acustica geometrica permettono di studiare il comportamento di un raggio sonoro anche all'interno di uno spazio chiuso come ad esempio la stanza di un appartamento: si può considerare ciascuna riflessione come se avvenisse su un'interfaccia di dimensioni infinite a patto che la superficie sia uniforme, ovvero non presenti irregolarità di dimensioni paragonabili a quelle della lunghezza d'onda del suono. Si possono descrivere riflessioni multiple creando una sorgente immagine del second'ordine S'' , simmetrica a quella di prim'ordine S' che a sua volta è posta dietro la superficie d'incidenza simmetricamente alla sorgente reale S , e così via fino a che il raggio sonoro non incontra una parete totalmente assorbente o la sua energia si esaurisce.

La figura seguente illustra, in due dimensioni, la dislocazione di alcuni diffusori immagine rispetto ad una stanza rettangolare al centro: evidenzia come un raggio sonoro riflesso coincida con quello diretto diffuso da un ipotetico altoparlante posteriore. Il suono totale percepito nel punto d'ascolto è la somma coerente del contributo diretto e di ciascun diffusore immagine; è lecito formulare una trattazione analitica secondo il modello di canale *multi-path*.



La risposta in ampiezza di un canale *multi-path* è una funzione fluttuante in frequenza che effettivamente assomiglia alla risposta di una stanza reale.

La descrizione del comportamento acustico dell'ambiente d'ascolto, secondo i criteri dell'acustica geometrica, si complica notevolmente nel caso di stanze la cui geometria non sia rettangolare; a maggior ragione se all'interno della stanza vi sono oggetti ed arredamento che rendono impraticabile l'uso di questa teoria se non attraverso approssimazioni. Tuttavia questo approccio geometrico aiuta a comprendere la natura della distorsione acustica ed è molto utile nello studio della risposta di un ambiente ai fenomeni transitori, sia che si tratti di suoni impulsivi isolati, sia che si tratti delle fasi di transizione che precedono e seguono lo stato stazionario di un suono.