

Caracterização Acústica de salas utilizando a teoria de transição de fonões

J. L. Bento Coelho e D. Alarcão

CAPS - Instituto Superior Técnico, P - 1096 Lisboa Codex, Portugal

Summary

The calculation of room acoustical parameters is an important factor for the characterisation of inherent room sound quality. Statistical theories usually fail to yield good results when compared with more elaborate simulation techniques, which are generally based on ray-tracing or sound images techniques. This paper describes a method to calculate the room acoustical parameters in enclosures with different wall materials and arbitrary geometrical arrangements from an alternative theory. A computer program was developed to calculate the steady-state sound pressure level, the reverberation time T_{60} and the intelligibility indexes C_7 , C_{70} and C_{80} .

Introdução

O estudo de acústica de salas exige, sobretudo na fase de projecto, o conhecimento dos índices que caracterizam a sua qualidade sonora com um razoável rigor. As técnicas mais expeditas, como as teorias estatísticas, não fornecem valores satisfatórios quando comparadas com teorias mais elaboradas e com maior peso computacional como as teorias geométricas (método das imagens ou método dos raios), excepto para casos muito simples ou ideais com campo difuso e revestimentos homogéneos.

Descreve-se neste trabalho uma teoria alternativa para estudo acústico de salas muito pouco utilizada, implementada inicialmente por Kruzins e Fricke [1], e que descreve a radiação sonora com base no movimento de partículas de energia sonora, os fonões. Foi desenvolvido um algoritmo implementado em computador para o cálculo de tempos de reverberação T_{60} , índices de inteligibilidade C_7 , C_{70} e C_{80} e distribuição de níveis sonoros no interior de salas de geometria e revestimentos interiores quaisquer.

Teoria

Considere-se um espaço fechado limitado por superfícies planas e com uma fonte sonora emissora omnidireccional. O campo sonoro será considerado como sendo constituído por um elevado número de pacotes de energia sonora, os fonões. O movimento de um fonão, desde que abandona a fonte e até ser detectado será considerado aleatório.

As superfícies das paredes que o fonão pode encontrar serão denotadas como W_1, W_2, \dots, W_n e assumiremos que um fonão é emitido pela fonte e colide com a parede W_i . O fonão será radiado dentro de um intervalo de tempo ϵ , de W_i para W_j com a probabilidade $\langle j|P|i \rangle$. Este processo repete-se no próximo intervalo 2ϵ , mas a posição provável do fonão depende da sua história temporal, ou seja, depende do seu percurso anterior.

Admitindo que o fonão se encontra inicialmente em W_i pode definir-se um vector de posição inicial

$$\mathbb{E}^0 = (0,0,0,\dots,1,\dots,0) \quad (1)$$

onde a posição i representa a probabilidade unitária do fonão se encontrar inicialmente em W_i . Após um intervalo de tempo t (em que ocorreu uma reflexão,

$$E^1 = (\langle 1|P|i\rangle, \langle 2|P|i\rangle, \dots, \langle n|P|i\rangle) \quad (2)$$

Como uma parede não pode radiar energia para ela própria, $\langle K|P|K\rangle=0$.

Pode construir-se uma matriz de probabilidades P com elementos $\langle j|P|i\rangle$ com $i, j = 1, 2, \dots, n$, e onde a soma de cada linha é igual à unidade. O vector de posição após k transições dentro de um intervalo de tempo kt vem dado por [1]:

$$E^k = E^0 P^k \quad (3)$$

onde P^k é a potência de ordem k da matriz P . O componente de ordem i do vector de posição E^k representa a probabilidade do fonão se encontrar em W_i após k reflexões sucessivas. Estes sucessivos passos são entendidos como independentes, pelo que a evolução do fonão pode ser considerada com seguindo um Processo de Markov.

O vector inicial E^0 vem dado por

$$E^0 = (e_1^0, e_2^0, \dots, e_n^0) \quad (4)$$

onde e_i^0 é a densidade de energia inicial do fonão, considerada constante sobre W_i . O elemento de ordem i de $E^k = E^0 P^k$ define a densidade de energia do fonão em W_i após k transições.

Para o cálculo da densidade inicial do fonão, considera-se que a fonte é omni-direccional e emite ondas esféricas

$$e_j^0 = \frac{\Omega W}{4\pi A_j} \quad (5)$$

onde Ω é o ângulo sólido pelo qual se vê a parede W_j com área A_j e W é a potência da fonte.

A definição das probabilidades de transição $\langle j|P|i\rangle$ deverá tomar em consideração a área da superfície da parede W_j bem como o seu ângulo de visibilidade a partir do centro de W_i . A probabilidade $\langle j|P|i\rangle$ do fonão ser radiado de W_i para W_j pode ser estimada pelo ângulo sólido através do qual W_j é visto pelo centro da parede W_i . Por razões de normalização, estes ângulos sólidos deverão ser divididos por 2π .

A matriz P pode ser transformada na matriz de transição T [1] tomando em conta os fenómenos de absorção sonora. São considerados os coeficientes de absorção α_j de cada superfície elementar e o coeficiente de atenuação sonora do ar m , ambos função da frequência

$$T_{ij} = (1 - \alpha_i) \langle j|P|i\rangle e^{-md_{ij}} \quad (6)$$

onde d_{ij} é a distância média entre W_i e W_j .

Se o vector inicial E^0 for multiplicado por T em intervalos temporais discretos sucessivos $\tau = 4V/cS$ [2], onde V =volume, S =área total e c =velocidade do som, a densidade de energia pode ser calculada em "tempo real".

A intensidade sonora num ponto $\{x,y,z\}$, devida à radiação difusa de uma parede finita W_j , com densidade de energia constante e_j^0 vem dada por [3]

$$I_j^d(x,y,z) = \frac{e_j^0 \Omega_j (1 - \alpha_j)}{\pi^2} \quad (7)$$

onde Ω_j é o ângulo sólido pelo qual o ponto $\{x,y,z\}$ vê a parede W_j . A intensidade sonora total radiada em equilíbrio vem dada por [4]:

$$I_{\text{r}}(x,y,z) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^k I_j(x,y,z) \quad (8)$$

onde k é a ordem de transição a partir da qual se considera que a densidade de energia sobre a parede decai para valores desprezáveis. A pressão sonora pode ser obtida a partir de $I_{\text{r}} = p^2 / \rho c$ admitindo que no interior da sala o campo sonoro nem é directo ($I = p^2 / \rho c$) nem difuso ($I = p^2 / 4\rho c$). A esta intensidade deve somar-se a contribuição do sinal directo emitido pela fonte [5]:

$$L_p = 10 \log \left[\left\{ \frac{c\rho}{2 \times 10^{-5}} \right\} \left\{ \frac{W}{4\pi r^2} + 3 I_{\text{r}}(x,y,z) \right\} \right] \quad (9)$$

onde r é a distância entre o ponto de recepção $\{x,y,z\}$ e a fonte sonora

O decaimento sonoro dentro da sala pode ser calculado considerando as várias transições k ao longo do intervalo de tempo $k\tau$ [4]

$$I_{\text{r}}(k\tau) = \sum_{j=1}^n \frac{e^{-k_j} \Omega_j (1 - \alpha_j)}{\pi^2} \quad (10)$$

A partir da resposta impulsiva, podem ser estimados os tempos de reverberação T_{60} calculando a transição k para a qual o nível de intensidade decaiu de 60 dB. Os índices de inteligibilidade e de claridade podem igualmente ser calculados.

Previsões

Foi realizado um trabalho de simulação para uma geometria simples de um espaço cúbico 20mx20mx20m e uma fonte pontual omni-directional de 100 W localizada em $\{2,0,10,0,1,5\}$ referido a um sistema de coordenadas com centro num vértice do cubo. As paredes interiores foram divididas num total de 54 quadrados para garantir uma distribuição mais uniforme de energia em cada superfície elementar. Estas foram revestidas com materiais diferentes, tais como tijolo, madeira e espuma acústica.

A Tabela 1 mostra os valores dos tempos de reverberação calculados para várias frequências, para o cubo com paredes em madeira e um ponto recepção em $\{10,0,10,0,10,0\}$. Mostram-se, também os valores obtidos pela teoria de Sabine e de Eyring.

	Sabine	Eyring	Phonon
500 Hz	2.68	2.41	2.38
1000 Hz	3.15	2.88	2.85
2000 Hz	3.09	2.88	2.85
4000 Hz	3.02	2.94	2.91
8000 Hz	1.53	1.50	1.53

Tabela 1. Tempos de reverberação

A Figura 1 mostra curvas de decaimento de energia sonora em função da distância à fonte obtidas a partir desta técnica, da teoria de Eyring e da recente teoria revista de Barron-Lee [5].

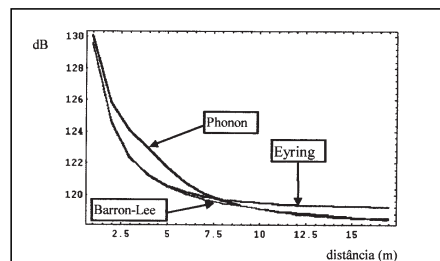


Figure 1. Curvas de decaimento em função da distância à fonte

Os testes comparativos efectuados revelaram, na generalidade, uma boa concordância de resultados dos diferentes métodos previsionais.

A Figura 2 mostra um gráfico de distribuição de níveis sonoros em regime estacionário num plano do interior da sala cúbica revestida internamente a madeira. A área mais clara corresponde à localização da fonte sonora. A gama de valores varia entre 129,4 e 119,2 dB com uma definição correspondente a 0,7 dB.

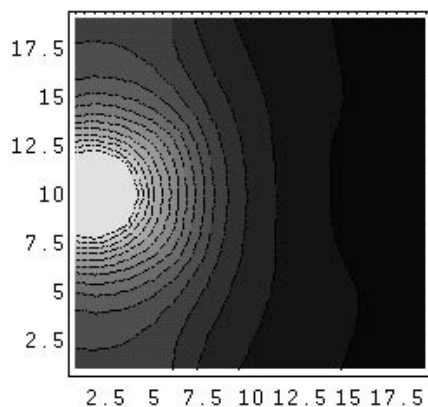


Figura 2. Distribuição sonora num plano interior de uma sala cúbica

Conclusões

A teoria de transição de fonões parece ser uma técnica previsionial válida para estudo e projecto acústico de salas, com vantagens em termos de tempos de computação, por exemplo, sobre outras técnicas igualmente rigorosas como as baseadas em ray-tracing.

Estão em curso, actualmente medições em salas e auditórios de geometria variada, tendo os resultados preliminares mostrado uma boa correlação entre os resultados experimentais e de simulação.

Referências

1. H. Kuttruff, "Room Acoustics", London Applied Science (1973)
2. E. Kruzins and F. Fricke, "The prediction of sound fields in non-diffuse spaces by a random walk approach", Journal of Sound and Vibration 81 (4), 549-564 (1982)
3. H. Skudrzyk, "Über die Eigentöne von Räumen mit nichtebenen Wänden und die diffuse Schallreflexion", Akustische Zeitschrift 4, 172-186 (1939)
4. D. Alarcão, "Cálculo de parâmetros acústicos através da teoria da transição de fonões segundo um processo de Markov", CAPS/IST Report (1996) (em Português)
5. M. Barron and L-J Lee, "Energy relations in concert auditoriums I", Journal of the Acoustical Society of America 84 (2), 618-628 (1988).