

Estudo e Implementação de Métodos de Medição de Resposta Impulsiva em Salas de Pequeno Porte

Bruno Sanches Masiero¹, Fernando Iazzetta¹

¹ Laboratório de Acústica Musical – Escola de Comunicação e Artes da Universidade de São Paulo (ECA/USP)

Av. Prof. Lúcio M. Rodrigues, 443 – 05.508-900 – São Paulo – SP – Brazil

bruno.masiero@poli.usp.br, iazzetta@usp.br

***Abstract.** This paper describes the results obtained in an under-grad project in the area of acoustical measuring. In this project, a research about the various acoustic impulse response measurement systems for small room was made. A research about room acoustical parameters, as well as about impulse response processing methods for its derivation, was also done. As a result of this project, a acoustic impulse response measurement system was developed.*

***Resumo.** Neste projeto foi feita uma revisão das diferentes técnicas de medição da resposta impulsiva acústica para salas de pequeno porte. Foi feita também uma revisão dos parâmetros acústicos para salas, assim como métodos de processamento da resposta impulsiva para sua obtenção dos mesmos. Como resultado final do projeto, foi desenvolvido um sistema de medição da resposta impulsiva acústica.*

1. Métodos de Obtenção da Resposta Impulsiva

A resposta impulsiva acústica é uma função temporal da pressão sonora de um espaço acústico, que resulta da excitação desse espaço por uma função que se aproxima da função delta de Dirac [1]. A resposta impulsiva (IR) de um espaço acústico fornece uma descrição precisa desse sistema. Todos os parâmetros acústicos definidos pela norma ISO 3382 [2] são derivados diretamente da IR acústica.

A norma ISO 3381 faz algumas considerações importantes quanto à medição da IR acústica. Por definição, a IR acústica é medida com pares de emissor-receptor. Na acústica de salas, a IR obtida entre um receptor e um emissor caracteriza o sistema acústico entre a localização exata desses dois itens, mas essa IR não pode usada para caracterizar a resposta da sala como um todo. Para a obtenção dos parâmetros acústicos de uma sala, essa norma recomenda a IR de uma sala seja medida em um mínimo de dezoito posições distintas, posteriormente obtendo-se a média energética destas IR. Microfones e alto-falantes usados para este fim devem ser omnidirecionais.

Existem diversos métodos de medição acústica de salas entre eles a excitação por impulsos, a excitação estática por senóides, Time Delay Spectrometry (TDS) e

gravador de intensidade, mas atualmente os principais métodos são a análise por FFT, as Maximum Length Sequence (MLS), e o método da varredura, que serão descritos a seguir.

1.1 Maximum Length Sequences (MLS)

O método MLS utiliza um grupo especial de ruídos como sinal de excitação, as seqüências pseudo-aleatórias de máximo comprimento – dentre os ruídos, este é o que fornece a melhor SNR de acordo com [3]. Este método é bastante popular em todo o mundo.

A obtenção da IR a partir da MLS recebida pode ser realizada eficientemente por meio da Transformada Rápida de Hadamard (FHT). Devido a restrições de quantidade de memória e tempo de processamento, era de vital importância nos anos 70 e 80 o uso de métodos eficientes como a FHT. Com a velocidade dos computadores atuais, a técnica MLS já não apresenta vantagem significativa frente às demais técnicas.

O método MLS é bastante vulnerável à não-linearidades do meio, tornando seu uso desaconselhável para medição de grandes espaços abertos.

O MLS, assim como o TDS, possui um espectro branco, ou seja, menos energia nos graves que nos agudos, o que pode ser contornado com a pré-ênfase do sinal [4].

1.2 Análise por FFT

Esta é a única técnica que permite realizar medições acústicas durante uma apresentação musical, usando como sinal de excitação a própria música que está sendo executada (desde que esteja sendo reproduzida eletronicamente). A obtenção da IR é praticamente igual à do método anterior, baseando-se em comparar o espectro do sinal antes de ser enviado ao ambiente com um sinal capturado na sala em questão. Divide-se o espectro (deconvolução no domínio do tempo) do sinal capturado pelo espectro do sinal enviado.

O uso de música como sinal de excitação não é recomendável, devido ao comportamento espectral inconsistente, bastante rugoso. Para este tipo de sinal é necessário considerar um longo período de tempo para a obtenção do espectro, e ainda assim é necessário realizar uma média com diversas realizações de medida, para obter-se um resultado consistente.

1.3 Varredura Logarítmica

Na análise por FFT, qualquer tipo de sinal de excitação pode ser usado. Recomenda-se então usar sinais de excitação que apresentem comportamento espectral favorável para medições, em especial ruído ou varredura.

Atualmente, existe a tendência de usarem varreduras logarítmicas como sinal de excitação, por apresentarem boa distribuição da energia em seu espectro (espectro rosa) para aplicações acústicas [4] e serem bastante robustas a não-linearidades.

Quando uma MLS é usada como sinal de excitação, não-linearidades do sistema podem ser notadas na IR como rugosidades ou repetições do sinal deslocadas no tempo de menor amplitude. Quando a varredura logarítmica é usada como sinal de excitação, é possível isolar completamente a resposta impulsiva desejada das componentes presentes no sinal devido à não-linearidades. Isto é possível porque as harmônicas geradas por

não-linearidades do sistema, após a deconvolução, aparecem em tempos negativos da IR.

2. Processamento da IR para análise acústica de salas

Respostas impulsivas reais diferem em basicamente três aspectos das respostas impulsivas teoricamente esperadas:

1. Uma IR real apresenta um atraso antes da chegada do som direto, devido à velocidade de propagação do som. A norma ISO 3382 fornece a seguinte recomendação: “Determina-se o início do som direto a partir da IR de banda larga, como o ponto onde o sinal é 20dB menor que valor máximo da IR, mas significativamente maior que o ruído de fundo”.
2. O decaimento pode conter várias partes com diferentes taxas de decaimento, ou nem mesmo ser exponencial.
3. A IR possui ruído de fundo, o que limita o decaimento a um certo patamar. A subestimação do efeito do ruído pode causar um erro sistemático na obtenção dos parâmetros acústicos. A norma ISO 3382 propõe que o limite de integração superior da curva de decaimento seja tomado num ponto 10dB acima do ponto de cruzamento entre a assíntota de decaimento da IR e o nível de ruído. Desta forma, minimiza-se a energia de ruído presente na curva de decaimento.

2.1 Minimização da influência do ruído

Existem alguns métodos para minimizar a influência do ruído no cálculo da curva de decaimento, entre eles o método de Chu [5] e o método de Hirata[6]. O método de Lundeby[7] se propõe a minimizar o ruído conjuntamente com a minimização do efeito de truncamento da integral inversa.

3. Comparação entre Métodos de Medida

O uso da FFT é provavelmente o método mais interessante nos dias de hoje. Sendo assim, cabe apenas selecionar o sinal de excitação mais adequado, ou seja, aquele que oferece a melhor SNR. De acordo com a teoria do fator de crista, os melhores sinais para esta aplicação seriam a varredura logarítmica e a MLS.

Em primeira instância, um sinal MLS bipolar seria o sinal ideal no sentido de se extrair o máximo de energia de uma medição, já que apresenta um FC=0dB. Mas, o fator de crista das MLS's usadas na prática é sensivelmente maior que 0dB. Na placa de áudio, após o conversor D/A, o sinal passa por um filtro “anti-aliasing”, que acaba por alterar a forma de onda da MLS. Verifica-se então a presença de picos no sinal de saída, o que degrada o fator de crista do sinal. Para evitar que estes picos sejam saturados, o sinal MLS deve ser enviado ao conversor D/A com nível entre 8dB e 5dB menor que o nível máximo do conversor.

A varredura de senóide apresenta um FC teórico de 3dB. Por este sinal conter energia apenas nas frequências de interesse, ele não será afetado pelos filtros da placa de áudio, e poderá na prática ser reproduzido com uma intensidade maior que uma MLS. Uma varredura utilizada para a excitação de salas (após passar pelo filtro “anti-aliasing”) apresentava FC=3.6dB, valor bastante próximo do FC teórico.

Verificou-se que o método de excitação por varredura logarítmica com deconvolução via FFT – sugiro o nome “*Log-sweep FFT method*” (LSF) – mostra-se o método mais indicado para medição acústica de salas nos dias de hoje.

4. Sistema de Medição

A arquitetura de um sistema de medição acústica é geralmente constituída por dois módulos. O primeiro módulo responsável pela geração do sinal, obtenção da IR e cálculo dos parâmetros acústicos, é implementado por um microcomputador. O segundo módulo responsável pela reprodução e aquisição de sinais sonoros é implementado por uma placa de áudio e um conjunto de transdutores.

4.1 Reprodução e Aquisição de Áudio

Uma placa de áudio de boa qualidade é um requisito chave para a qualidade de reprodução e gravação dos sinais. Os requisitos básicos para que uma placa de áudio possa ser usada para medição acústica são:

1. Apresentar linearidade e boa SNR;
2. trabalhar com taxas de amostragem superiores a 40kHz;
3. funcionar em modo “stereo full duplex” (produzir um sinal estéreo e gravar outro sinal estéreo simultaneamente).

Como transdutor de entrada recomenda-se usar um microfone de medição com resposta praticamente plana e omnidirecional. O mesmo vale para o transdutor de saída.

A IR de uma sala obtida por meio destes equipamentos contém não só a resposta da sala, mas também a resposta de todos os elementos deste sistema. Para obter uma medição o mais fiel possível, é necessário que os elementos deste sistema possuam função de transferência o mais lineares possível. Como esses elementos estão todos ligados em série, a qualidade do sistema é limitada pela resposta do elemento de qualidade mais baixa.

Caso o sinal esteja sendo reproduzido por uma fonte externa, como um CD-player, e sendo apenas gravado pela placa de áudio, é necessário atentar ao sincronismo entre estes dois equipamentos. Mesmo uma diferença mínima entre as frequências de amostragem acarreta uma diferença no número de amostras, o que para sinais como o MLS é inaceitável.

4.2 Geração e Tratamento do Sinal

A geração e, principalmente, o tratamento dos sinais usados para as medições acústicas requer uma elevada taxa computacional. Portanto é recomendável o uso de um bom computador para acelerar a realização desses cálculos. Também, como se trata de arquivos de áudio não comprimidos, é necessária disponibilidade de memória física e memória RAM. Estes requisitos são facilmente atingidos pelos microcomputadores disponíveis atualmente no mercado.

4.2.1 Geração do Sinal

O primeiro passo para a realização da medição é a criação de um sinal de excitação para a sala. Os sinais recomendados para medição acústica são varreduras e seqüências MLS.

Tanto varreduras senoidais quanto seqüências MLS podem ser geradas por algoritmos relativamente simples. A varredura linear ou logarítmica é geralmente gerada no domínio do tempo, mas pode também ser gerada no domínio da frequência, como explicado em [4]. Para as seqüências MLS, além da seqüência MLS propriamente dita, a função deve também retornar os vetores de permutação de linha e coluna necessárias para o uso da FHT, conforme especificado por Chu [5].

O sinal gerado de forma digital deve ser gravado num formato adequado para sua reprodução.

4.2.2 Recepção do Sinal

A placa de áudio e o sistema operacional do PC devem permitir a reprodução e aquisição simultânea de som. Um arquivo estéreo com a resposta da sala ao sinal de excitação em um canal e o sinal de referência (curto elétrico) no outro canal deve ser gerado

Na fase de aquisição do sinal, é importante que o aplicativo de aquisição avise caso ocorra saturação do sinal, ou seja, quando o nível do sinal está acima do nível máximo de amostragem do conversor A/D.

4.2.3 Deconvolução

De posse da resposta da sala ao sinal de excitação, é necessário deconvoluir o sinal, de forma a obter-se a IR. As MLS devem ser deconvoluídas através da FHT, conforme Peltonen [8].

Para a deconvolução via SLF, usá-se uma função FFT. Primeiramente obtém-se o espectro do sinal de excitação e do sinal de resposta. O espectro do sinal de resposta é então dividido pelo espectro do sinal de excitação, o que fornece a função de transferência da sala. A IR é obtida por meio da transformada inversa de Fourier (IFFT) da função de transferência. Este método para a obtenção da IR é bastante suscetível ao ruído. Existem diversos métodos de estimação espectral que tentam tornar esta operação mais confiável, mas que não foram tratados neste projeto.

4.3 Tratamento da IR

Os parâmetros acústicos são usualmente calculados por faixas de frequência. Deve-se então filtrar a IR de banda larga por um banco de filtros de oitava ou terço-de-oitava.

Após a filtragem, ainda é necessário um tratamento da IR, como já comentado anteriormente, antes de se calcular os parâmetros acústicos.

4.4 Cálculo dos Parâmetros Acústicos

Uma vez que o sinal já foi tratado, e já está filtrado na banda de interesse, resta então calcular os parâmetros acústicos detalhados na norma ISO 3382, entre eles: Tempo de Decaimento, Força Sonora, Clareza, Definição e Tempo Central.

5. Conclusão

O método MLS, baseado na *transformada rápida de Hadamard* (FHT), calcula muito eficientemente a resposta impulsiva de sistemas lineares e invariantes no tempo.

Verificou-se que para sistemas acústicos que não respeitam as premissas de linearidade ou invariância no tempo o resultado apresenta presença elevada de ruído. Já o método baseado na FFT apresenta relativa imunidade à distorção harmônica e certa tolerância à variação temporal, mostrando-se mais apropriado para medições acústicas. Com o constante avanço da capacidade de memória e de processamento dos computadores pessoais, o método FFT pode ser facilmente realizado com qualquer computador doméstico.

Os parâmetros acústicos abordados neste projeto são definidos em função de um decaimento idealmente exponencial. A resposta impulsiva medida terá sempre um comportamento não-ideal com a presença de ruído de fundo e atraso devido ao caminho acústico. Três destes métodos foram implementados visando reduzir este efeito, mas não foi realizado um estudo objetivo para a escolha de um desses métodos como o método ideal para o projeto.

Os parâmetros acústicos devem ser calculados por bandas de frequência. Para isto, foram implementados filtros de oitava de acordo com normas internacionais. Para reduzir o efeito de distorção causado pela fase não linear dos filtros IIR, utilizou-se a técnica da filtragem causal.

As vantagens da medição da resposta impulsiva baseada na excitação da sala por uma varredura logarítmica deconvoluída via FFT frente à técnica da MLS ficou clara através das medições realizadas. Este é, portanto, o método indicado para ser implantado no aplicativo de medição do software que está sendo desenvolvido pelo projeto AcMus.

Referências Bibliográficas

- [1] Vorländer M., Bietz H. 1994. Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time. *Acustica* Vol. **80**. pp. 205–215.
- [2] ISO 3382:1997. Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [3] Burt, Phillip M. S. “Measuring Acoustic Responses with Maximum-Length Sequences”. In *ITS Proceedings*, pp 284-289. Agosto 1998.
- [4] Müller, S., Massarani P., “Transfer Function Measurements with Sweeps”. *J.AES*, Vol. 49, number 6, pp.443. 2001.
- [5] Chu W. T. “Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method”. *J. Acoust. Soc. Am.* **63**(5), May 1978. pp. 1444–1450.
- [6] Hirata Y. “A Method of Eliminating Noise in Power Responses” *J. Sound Vib.* vol. **82** pp. 593–595. 1982.
- [7] Lundeby A., Vigran T.E., Bietz H., Vorländer M. 1995. Uncertainties of Measurements in Room Acoustics. *Acustica* Vol. **81** (1995). pp. 344–355.
- [8] Peltonen, Timo. A Multichannel Measurement System for Room Acoustics Analysis. This thesis has been submitted for official examination for the Degree of Master of Science, in Espoo, on October 23rd, 2000.