

CRIAÇÃO DE VARREDURAS COM ÊNFASE ARBITRÁRIA

Swen Müller e Paulo Massarani

LAENA - INMETRO

Av. Nossa Senhora das Graças, 50, Xerém
CEP. 25.250-020 Duque de Caxias, RJ - Brasil
e-mail: smuller@inmetro.gov.br

Resumo - Em medições acústicas, é quase sempre favorável utilizar sinais de excitação com ênfase em certas regiões espectrais, particularmente nas baixas frequências. Esse artigo propaga as varreduras como sinais mais aptos para a avaliação de funções de transferência e mostra como uma colorização qualquer pode ser fornecida a elas, mantendo o envelope temporal constante ou até controlável em função da frequência.

Abstract – In acoustical measurements, it's almost always favorable to use excitation signals with an emphasis in certain frequency regions, especially at the low end. This paper advocates sweeps as the best suited stimuli for transfer function measurements and shows how an arbitrary coloration which keeps the temporal envelope constant or even controlled by frequency can be achieved for them.

I. INTRODUÇÃO

A medição da resposta em frequência de qualquer DUT (device under test, dispositivo a ser ensaiado) sempre envolve o fornecimento de um sinal de banda larga, contendo porções suficientes de energia em todas as frequências de interesse. A avaliação da função de transferência pode então ser realizada analisando-se a resposta na saída do DUT e comparando o resultado com o da entrada.

São apresentados na primeira seção desse trabalho os três tipos básicos de sinais de banda-larga: o impulso, o ruído e as varreduras de seno. A partir de análise no domínio tempo-frequência, simulações e medições práticas é evidenciado por que as varreduras são o tipo de sinal de excitação preferível.

Em medições acústicas, é muito proveitoso adaptar o conteúdo espectral do sinal de excitação ao do ruído de fundo que prevalece no sítio. Adicionalmente, é recomendável também equalizar a resposta do alto-falante, introduzindo na pré-ênfase o inverso dessa resposta. Assim a relação sinal/ruído se tornará independente da frequência.

Enquanto a pré-ênfase de pulsos e de ruído pode ser realizado facilmente passando o sinal por um filtro, esse procedimento não é recomendável para as

varreduras. O que aconteceria é uma modulação da envoltória da varredura, o que corresponde a baixar a energia total contida nela caso os sinais forem normalizados ao mesmo valor máximo. Porém, existe um método simples para gerar varreduras com envoltória constante ou até livremente controlável a partir de qualquer distribuição espectral desejada. Esse método é pormenorizado na última seção do artigo.

II. SINAIS DE EXCITAÇÃO DE BANDA LARGA

A. Impulsos

Esse é o sinal de excitação mais simples. A resposta obtida na saída do DUT já é a própria resposta impulsiva (RI), adquirida sem nenhum processamento adicional. O pulso tem que ser bem estreito para exibir um espectro suficientemente plano. Como a altura dele é restrita na vida real, pouca energia pode ser concentrado nele. Isso normalmente acarreta uma relação sinal/ruído (S/R) insatisfatória. A solução desse problema é de espalhar a energia que se concentra no pulso para o intervalo inteiro da medição. Em termos de processamento de sinais, todas as frequências do espectro de um pulso têm fase 0. Em vez disso, é possível de jogar dados com as fases com o intuito de passar lhes valores aleatórias. O que então surge após uma IFFT é:

B. Ruído.

Correspondendo às fases aleatórias, o sinal temporal também tende a tomar um percurso aleatório e se espalha no período completo. Normalizando esse sinal ao mesmo valor de pico resulta em uma energia muitas vezes maior do que a do pulso.

Para avaliar a função de transferência complexa de um DUT alimentado com um sinal *branco*, é preciso subtrair das fases do sinal captado na saída os valores originais do sinal na entrada. Essa operação, ou seja correções só das fases e não das amplitudes, se chama *decorrelação*.

No entanto, qualquer sinal de excitação *não-branco* requer a correção das fases e das amplitudes para recuperar a função de transferência. Isso é realizado mediante a *deconvolução*, que é então o caso mais geral. Ambas, a decorrelação e a deconvolução, são

normalmente executadas mais rapidamente no domínio espectral, em princípio dividindo o espectro obtida na saída do DUT pelo na entrada.

No caso das famigeradas seqüências de comprimento máximo (MLS), contudo, existe um algoritmo que executa a decorrelação no domínio de tempo: a transformada rápida de Hadamard (FHT).

Infelizmente, medições acústicas com ruído em geral e com MLS em particular sofrem de desvantagens consideráveis. Em relação à medição com pulsos, o ganho de faixa dinâmica nem é tão grande quanto o aumento da energia, especialmente em medições acústicas que envolvem alto-falantes. Por traz disso são a alta vulnerabilidade à variância no tempo e principalmente as não-linearidades das quais todo alto-falante sofre até um certo grau. Essas não-linearidades são responsáveis por intermodulações que se espalham inevitavelmente pelo período inteiro da resposta impulsiva calculada. Na praxe, elas restringem a faixa dinâmica alcançável a algo em torno de 65 dB. Isso é suficiente para a maioria das aplicações, incluindo a medição de respostas em frequência de alto-falantes e a avaliação de parâmetros acústicos. Existem porém aplicações, tais como a “realidade virtual” à base de respostas impulsivas de salas, para as quais uma relação S/R acima da 90 dB é desejável. Esse valor é inalcançável com ruído como sinal de excitação porque é impossível de afastar da atual resposta impulsiva os resíduos causados pela distorção harmônica.

Seria então muito interessante empregar um sinal de excitação que permite identificar e excluir as distorções. Esse requisito é cumprido pelo terceiro tipo de sinal de banda larga:

C. Varreduras.

Elas percorrem continuamente toda a gama de frequências desejada. Porém, num determinado momento, demonstram uma determinada “frequência instantânea”. Subtraindo o tempo de propagação de som, a resposta do DUT também exibe essa frequência naquele determinado momento. Qualquer distorção produzida pelo DUT tem frequência diferente, o que permite de separá-la da informação útil.

Essa conjuntura é corroborada pelas figuras 1 e 2. São espectrogramas de uma varredura logarítmica reproduzida por um alto-falante. Após a deconvolução com o inverso da excitação, a fundamental é transformada numa linha vertical perto da borda esquerda. Essa é a resposta impulsiva.

No caso único da varredura logarítmica, os harmônicos igualmente formam linhas verticais, que podem ser consideradas como “respostas impulsivas dos harmônicos” e relacionadas à fundamental com o objetivo de avaliar o grau de distorção.

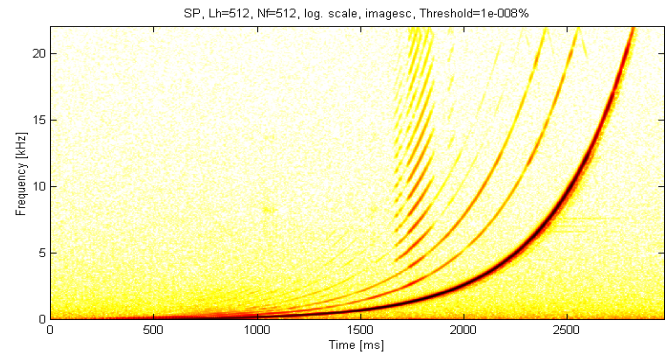


Figura 1: Esse espectrograma revela a fundamental (linha grossa à direita) e os harmônicos (na esquerda da fundamental) de uma alto-falante numa medição com varredura logarítmica

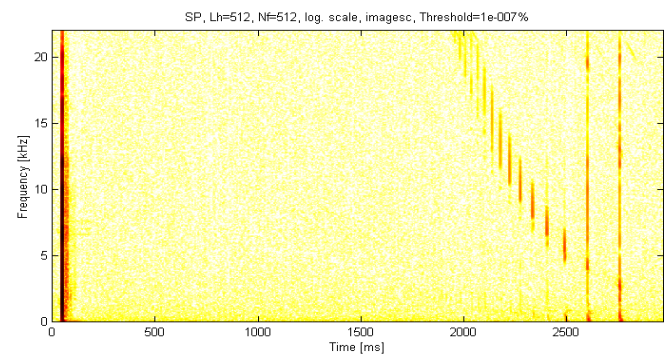


Figura 2: Após a deconvolução, a fundamental e os harmônicos aparecem como linhas verticais, formando respostas impulsivas. Os harmônicos podem ser excluídas facilmente - ou até ser relacionadas à fundamental para determinar a distorção dependente da frequência.

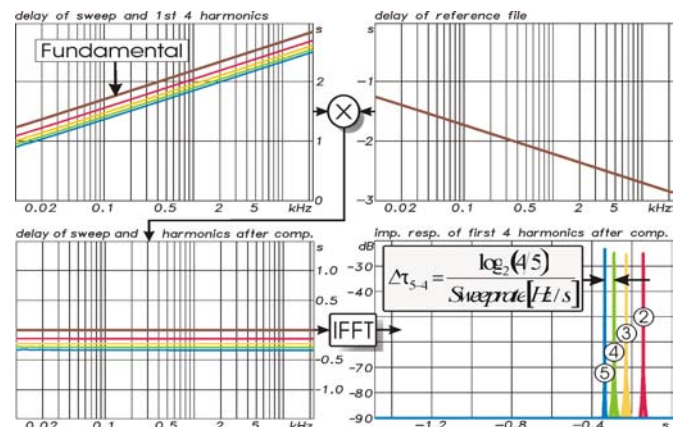


Figura 3: Por que os harmônicos aparecem na borda direita após a deconvolução? O gráfico tenta apurar isso mediante os atrasos de grupo da fundamental e dos quatro primeiros harmônicos da varredura. O espectro de deconvolução (na direita) é o inverso do sinal de excitação, isto é, a amplitude é invertida e o atraso de grupo negado. Multiplicando a varredura pelo sinal de deconvolução resulta na adição dos atrasos de grupo.

Todos os harmônicos são deslocados para tempos negativos. A IFFT (válida para sinais periódicos) revela as respostas dos harmônicos perto da borda direita, que pode se interpretada como linha de tempo 0.

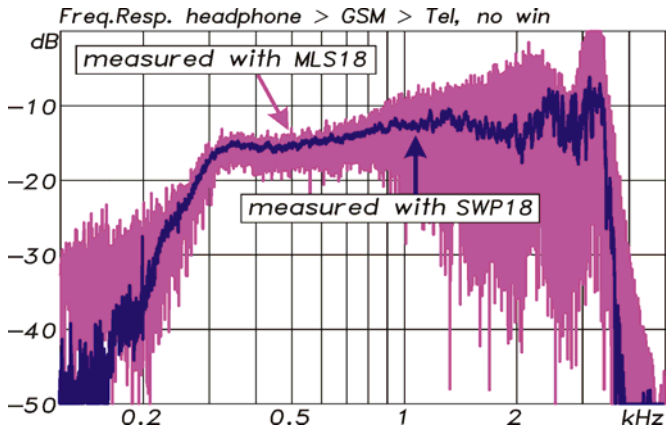


Figura 4: Devido à forte compressão psicoacústica, a medição da função de transferência de celulares sofre de imensas não-linearidades e variâncias no tempo. Varreduras lidam melhor com essas aberrações.

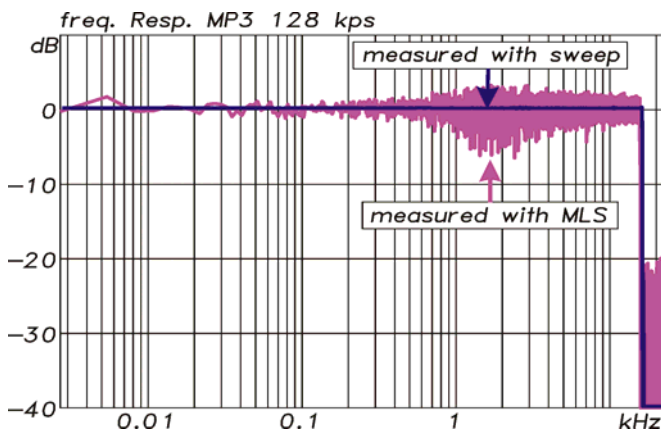


Figura 5: Medição de um compressor MPEG3 com taxa de 128 kb/s. A medição com varredura vinga perfeitamente por causa da complexidade reduzida desse sinal, facilitando bastante a compressão. No caso da MLS, todas as bandas contêm energia simultaneamente, o que força o compressor a escolher uma quantização bastante grossa, resultando em distorção e uma faixa dinâmica reduzida.

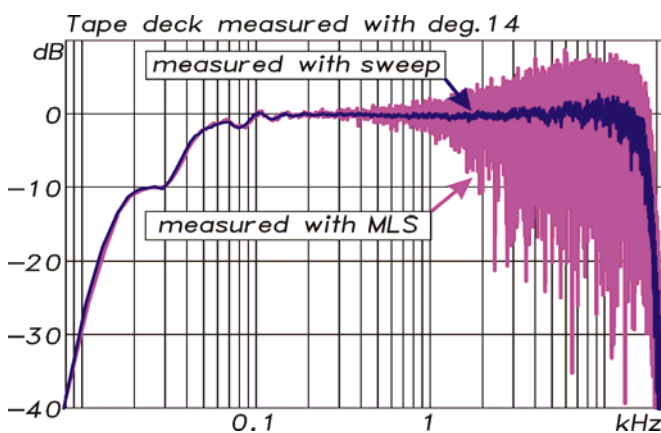


Figura 6: Medições com ruído são muito vulneráveis à variância no tempo, inerente aos gravadores analógicos. Essa medição foi executada com MLS e varredura, ambas com pré-ênfase, energia e comprimento idênticos.

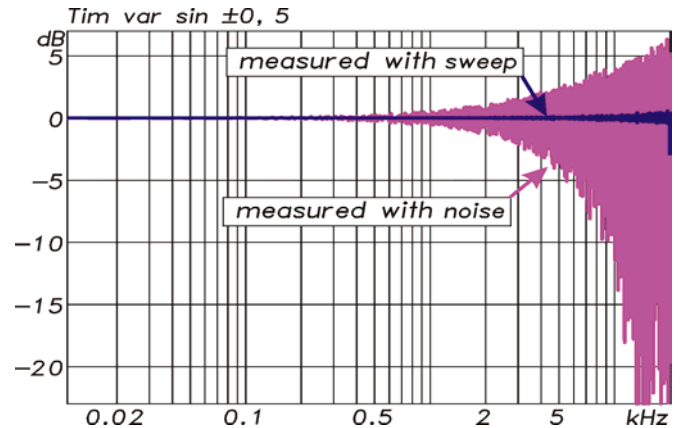


Figura 7: Nessa simulação, um ruído branco e uma varredura foram submetidos a uma variância senoidal de ± 0.5 samples. O espectro de ambos corrobora que o ruído é bem mais suscetível à variância no tempo.

A separação entre a fundamental e os harmônicos e entre os harmônicos entre si é feito mediante janelas, considerando atentamente os efeitos sobre a resolução espectral e a supressão de lóbulos [6]. Além dessa possibilidade poderosa, medições com varreduras ainda sofrem menos dos efeitos perturbantes de variância em tempo. Isso as torna às vezes a única opção em medições ao ar livre ou na avaliação de equipamentos inerentemente variantes no tempo, tais como gravadores analógicos (Figura 6).

III. CONSTRUÇÃO DAS VARREDURAS

São amplamente conhecidos dois tipos básicos de varreduras de seno: os lineares e os logarítmicos. No caso dos lineares, o aumento de frequência é constante no tempo, quer dizer em cada intervalo fixo de tempo, a frequência cresce pelo mesmo valor:

$$\frac{f_2 - f_1}{T_2 - T_1} = const \quad (1)$$

As varreduras lineares exibem uma distribuição espectral branca e portanto têm pouca serventia em medições acústicas. Esse é o sinal de excitação utilizado nos analisadores TDS, que de fato sofrem de baixa faixa dinâmica nas oitavas baixas.

No caso das varreduras logarítmicas, a frequência aumenta pela mesma fração de oitava em cada intervalo fixo de tempo. Em outras palavras: o logaritmo da relação de duas frequências dividido pela diferença dos tempos em que ocorrem é uma constante:

$$\frac{\log(f_2/f_1)}{T_2 - T_1} = const \quad (2)$$

Varreduras logarítmicas têm um espectro rosa, quer dizer o espectro declina com 3 dB/oitava. Assim, toda oitava contém a mesma energia. Esse sinal já era utilizado pelos velhos registradores gráficos da B&K

que funcionam com tecnologia puramente analógica. A varredura logarítmica já consegue uma boa compensação do ruído ambiental em muitos lugares e por isso é um sinal bem mais hábil em medições acústicas do que sinais brancos.

A. Síntese no domínio de tempo

Gerar os dados de amostragem de varreduras lineares e logarítmicas é tarefa fácil com as equações indicadas na Figura 8. Enquanto as varreduras construídas dessa maneira demonstram uma envoltória perfeita com o baixo fator de crista de 3,02 dB típico para os sinais senoidais, o espectro delas não é exatamente o que se espera.

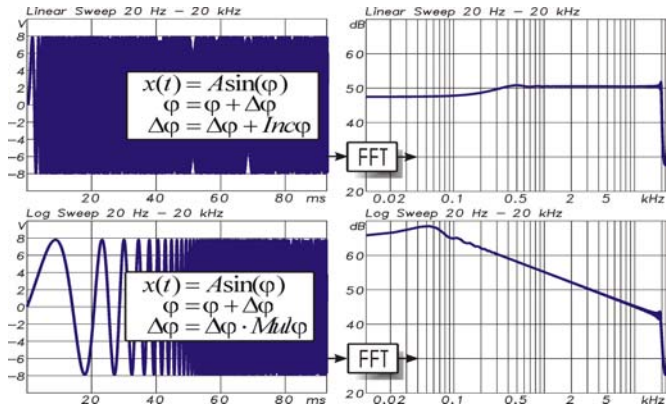


Figura 8: Geração de varreduras no domínio de tempo e espectros resultantes

A FFT revela ondulações marcantes no início e no fim do intervalo de frequências a ser varrido. O chaveamento brusco nos tempos inicial e final da varredura pode ser visto como multiplicação com uma janela retangular (cuja largura equivale à duração da varredura). No domínio espectral, isso corresponde à convolução do espectro do sinal retangular, isto é a função $\text{sin}(x)/x$, com o espectro ideal da varredura. As irregularidades resultando dessa operação atrapalham os resultados de medições perto das frequências inicial e final da varredura, especialmente se não há possibilidade de compensá-las, como é o caso dos velhos registradores analógicos e os analisadores TDS. O jeito para contornar essas encrencas é a:

B. Síntese no domínio de frequência

É necessário um pequeno mergulho em equações para descrever o processo de criar sweeps a base de espectros. As equações dadas aqui não seguem exatamente o padrão matemático, mas são formuladas de uma maneira que facilita a implementação direta em programas de computador.

Para bem entender os rudimentos, é fundamental familiarizar-se com o chamado “atraso de grupo”, que caracteriza a chegada do “centro de gravidade” da energia em cada frequência. O atraso de grupo é

proporcional à derivada em frequência da fase do sinal. No caso dos espectros de FFT (compostos por valores de amplitude equidistantes em frequência), o atraso calcula se a partir de dois valores adjacentes do espectro da fase (representado em radianos):

$$\tau_G(f_2) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\varphi(f_2) - \varphi(f_1)}{f_2 - f_1} \quad (3)$$

No caso de ruído, fala e música, o atraso de grupo é praticamente aleatório e não presta informações úteis. Uma varredura, no entanto, exibe uma curva bem definida do atraso, pois apresenta uma relação exata entre a frequência momentânea e o tempo em que ocorre. A varredura linear possui um percurso linear num gráfico com as frequências espaçadas linearmente no eixo horizontal. A varredura logarítmica, por sua vez, exibe uma linha reta num gráfico com eixo logarítmico de frequências.

Aqui já surge a idéia de mexer com o percurso do atraso de grupo para gerar varreduras fora do padrão linear e logarítmico. Calma. Primeiramente, para sintetizar esses dois tipos, cabe desenhar o espectro de amplitude branco e rosa, respectivamente, e sintetizar o atraso de grupo correspondente pelas equações seguintes. A formulação do atraso de grupo da varredura linear é simples:

$$\tau_G(f) = \tau_G(0) + f \cdot k \quad (4)$$

com a constante k sendo:

$$k = \frac{\tau_G(f_S/2) - \tau_G(0)}{N} \quad (5)$$

A síntese do espectro de atraso de grupo de uma varredura logarítmica é ligeiramente mais difícil:

$$\tau_G(f) = A + B \cdot \log_2(f) \quad (6)$$

com as duas constantes B e A sendo:

$$B = \frac{\tau_G(f_{END}) - \tau_G(f_{START})}{\text{ld}(f_{END} - f_{START})} \quad (7)$$

$$A = \tau_G(f_{START}) - B \cdot \text{ld}(f_{START}) \quad (8)$$

Depois de formular o atraso de grupo, a fase pode ser calculada por integração, utilizando o inverso da equação 3:

$$\varphi(f_2) = \varphi(f_1) + 2\pi \cdot (f_2 - f_1) \cdot \tau_G(f_2) \quad (9)$$

Um detalhe importante é que a fase na frequência Nyquist deve atingir exatamente os 0° ou 180°. Essa correção pode ser feita facilmente subtraindo das fases um pequeno valor que cresce proporcionalmente com a frequência até alcançar exatamente o valor a ser corrigida na frequência Nyquist:

$$\varphi_{NEW}(f) = \varphi_{OLD}(f) - \frac{f}{f_S/2} \cdot \varphi(f_S/2) \quad (10)$$

Isso corresponde a adicionar um atraso de grupo minúsculo, equivalendo a um deslocamento de $\pm 0,5$ vezes a distância entre duas amostras.

Após essa correção, as amplitudes e as fases do espectro podem ser convertidas em partes real e imaginária. Uma IFFT agora revela a varredura.

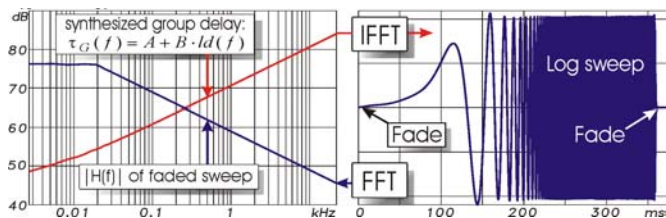


Figura 9: Geração de varreduras logarítmicas a partir da síntese do atraso de grupo. O patamar entre 0 e 20 Hz é de propósito para reduzir a energia subsônica.

Como apontado na secção III.A, a criação direta de varreduras no domínio de tempo inevitavelmente traz alguma contaminação no domínio de frequência. Já é de se esperar que a síntese no domínio espectral deve também trazer alguns efeitos colaterais indesejáveis no domínio temporal. De fato a envoltória deixa de ser perfeita: o sweep construído no domínio espectral demonstra “overshoots”, mas esses normalmente não passam a piorar o fator de crista em mais de 0,5 dB.

Um problema mais sério é que após a IFFT, o sinal temporal ainda não está confinado nos limites estipulados na equação 7. É um efeito colateral negativo do afastamento das ondulações espectrais que ocorrem na síntese direta no domínio de tempo. A não-ocorrência das ondulações é condizente com uma evolução inicial suave da varredura, por isso a primeira meia-onda começa a surgir bem antes do tempo inicial desejado. A parte que cai em tempos negativos é dobrada ao fim do intervalo (uma consequência do fato que a FFT trata de sinais periódicos). Lá, pode se misturar com o último trecho da varredura composto pelas frequências mais altas. Para que isso não aconteça, é recomendável de utilizar um intervalo de FFT que seja pelo menos o dobro em comprimento do que a varredura.

Para limitar a varredura aos limites temporais desejados sem introduzir sujeira espectral notável, é imprescindível um “fade-in” no início e um “fade-out” no fim, realizados de preferência com metades de janelas. Nesse ponto, acontece inevitavelmente uma mudança do espectro nas extremidades porque as janelas tiram um pouco de energia. Porém, o efeito é muito menor do que o exibido pelo chaveamento das varreduras produzidos no domínio de tempo. Com as janelas adequadamente posicionadas, as ondulações não ultrapassam 0,1 dB de amplitude.

Caso esse erro não possa ser corrigido automaticamente por uma medição de referência (o que vale para os

analisadores TDS, por exemplo) ou fira o sentido estético (o que vale para os autores, por exemplo), é possível utilizar um simples processo iterativo para finalmente suprimir qualquer irregularidade espectral, porém mantendo a varredura confinada nos limites temporais estipulados (Figura 10).

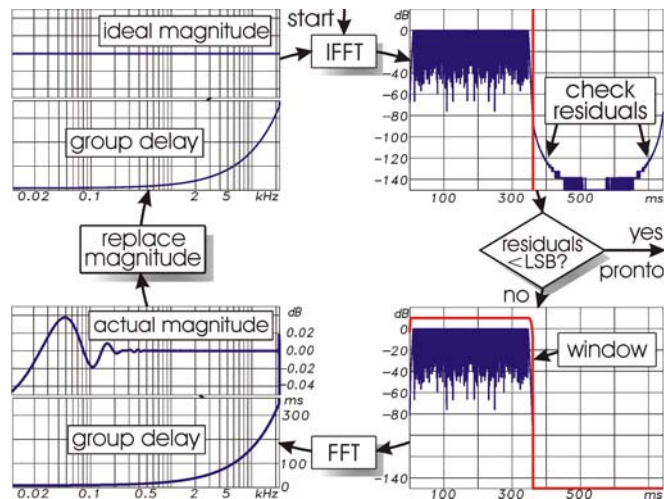


Figura 10: Processo iterativo para obter varreduras com comprimento definido e resposta em frequência perfeita.

O primeiro passo dessa iteração consiste em checar se a amplitude de qualquer dado de amostragem fora dos limites temporais ultrapassa a amplitude do LSB (least significant bit) da quantização final do sinal. Se isso não for o caso, a meta já foi alcançada e a iteração termina. Em contrapartida, se ainda existem componentes que não serão zerados pela quantização final, o janelamento é repetido mais uma vez. A varredura novamente confinada é transformado ao domínio de frequências, onde as ondulações introduzidas pelo janelamento se manifestam no espectro de amplitudes. O núcleo da iteração agora é de substituir o espectro de amplitudes encrespado pelo percurso ideal, no exemplo um espectro branco (correspondendo a uma linha horizontal). As fases não são alteradas nesse passo. Uma IFFT reproduz a varredura, que agora apresenta resíduos com um nível tipicamente em 6 dB menor do que no último passo. Após poucas iterações, eles caem completamente a baixo do limite da quantização. Assim, essa iteração primitiva é capaz de produzir varreduras estritamente confinadas no tempo, porém exibindo um espectro ideal entre 0 Hz e $f_s/2$.

C. Síntese de varreduras com distribuição espectral arbitrária, mas envoltória temporal quase constante

Até aqui, só falamos da criação de varreduras lineares e logarítmicas. No entanto, o que seria desejável é a geração de varreduras com uma coloração qualquer. Produzir ruído pseudo-aleatório com pré-ênfase

arbitrária é tarefa fácil, passando o sinal simplesmente por um filtro com a resposta em frequência desejada. No entanto, passar uma varredura por um filtro com a finalidade de cunhar a coloração desejada não traz um resultado satisfatório, pois acarreta amplitudes grandes em algumas frequências e baixas em outras. Isso significa que tal processamento iria prejudicar o baixo fator de crista (que caracteriza a relação do pico do sinal ao valor RMS) de somente 3 dB demonstrado por uma varredura com envelope constante. Em outras palavras: A energia total iria declinar consideravelmente (pressupondo o mesmo limite de voltagem, dado pelo nível de ceifa do amplificador de potência, por exemplo).

Aqui convém mencionar que assim que passam por um filtro, as MLS também perdem o fator de crista ideal de 0 dB. Tendem a assumir uma distribuição Gaussiana, indicada por um fator de crista em torno de 11 dB, ao passar por um filtro passa-baixa.

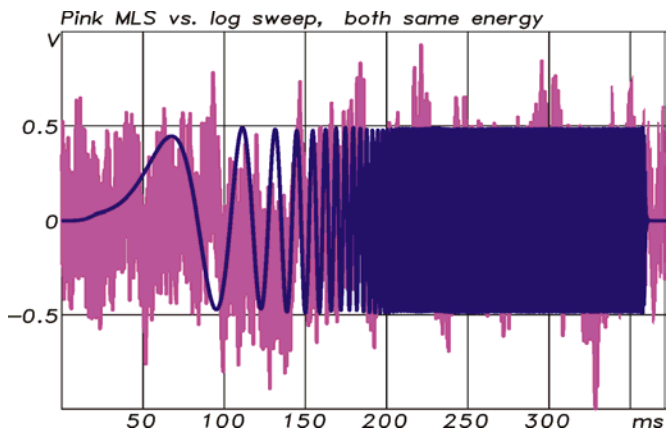


Figura 11: MLS rosa e varredura logarítmica, ambas com energia e coloração idêntica. O fator de crista da MLS é 6 dB mais alto do que o da varredura

No caso dos sweeps, todavia, é possível de alcançar qualquer coloração sem desviar do envelope temporal constante, portanto mantendo o baixo fator de crista.

Principalmente, existem duas possibilidades para influenciar a energia contida numa certa região de uma varredura: variar a *amplitude* (o que acontece quando ela passa por um filtro) ou alterar a *velocidade* da varredura, ou seja, a taxa do incremento da frequência. Quanto mais devagar o aumento da frequência, mais energia é concentrada na região percorrida, sem que a amplitude do sinal mude.

A idéia simples é então de controlar a velocidade da varredura, dependendo da energia desejada em cada frequência. Essa velocidade é inversamente proporcional à *derivada* do atraso de grupo: Quanto mais alta a *inclinação* dele numa certa região espectral, mais devagar a varredura atravessa essa faixa de frequências, assim fornecendo mais energia a ela.

Para realizar uma varredura com envelope constante e qualquer distribuição espectral de energia desejada, o truque é de simplesmente tornar o *incremento* do atraso de grupo proporcional à energia nessa frequência:

$$\tau_G(f) = \tau_G(f - df) + C \cdot |H(f)|^2 \quad (11)$$

A constante C equivale ao comprimento da varredura dividido pela energia total dela:

$$C = \frac{\tau_G(f_{END}) - \tau_G(f_{START})}{\sum_{f=0}^{f_s/2} |H(f)|^2} \quad (12)$$

O processo é ilustrado na figura 12. O espectro desejado aqui é composto pelo inverso da resposta em frequência de um alto falante (a fim de eliminar a coloração introduzida por ele em medições subsequentes) e uma ênfase adicional de 10 dB. Para não introduzir demasiada energia subsônica, um passa-alta de 30 Hz foi também aplicado. A partir desse espectro de amplitudes, o atraso de grupo é sintetizado. O percurso dele apresenta uma inclinação íngreme no primeiro meio segundo que corresponde a um aumento da frequência bem devagar, como revela o sinal

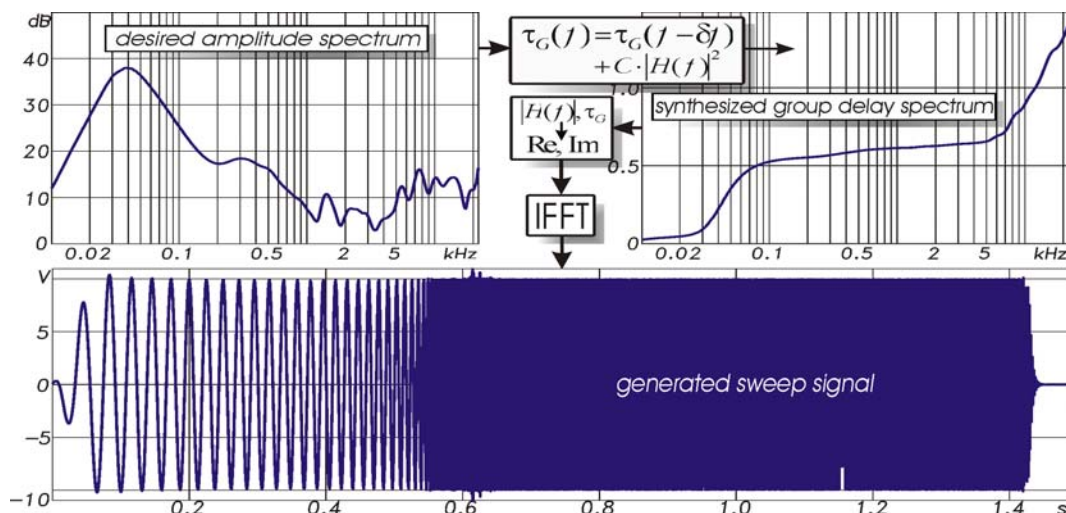


Figura 12: Síntese de varredura com distribuição espectral arbitrária e envelope constante

temporal na figura. Entre 80 Hz e 6 kHz, o atraso de grupo aumenta em meramente 200 ms, o que significa que toda essa gama é percorrida nesse tempo curto. Acima de 6 kHz, o atraso de grupo volta a crescer mais rápido como induzido pelo espectro de amplitudes, portanto reduzindo a velocidade da varredura. Apesar de um pequeno overshoot no início da varredura e uma irregularidade perto de 650 ms (causada pelas mudanças abruptas na faixa dos médios), a varredura tem uma envoltória basicamente plana. É claro que o processo iterativo da Figura 10 também pode ser aplicado para aperfeiçoar a resposta nas bordas da varredura.

D. Síntese de varreduras com distribuição espectral arbitrária e envoltória controlada em frequência

Será que varreduras com conteúdo espectral adaptado e envelope constante são a melhor opção para qualquer tipo de medição? Nem sempre. Uma caixa de som, por exemplo, é comumente composta por duas ou três vias, das quais o tweeter normalmente agüenta bem menos potência do que o woofer. Caso o amplificador não seja o elo mais fraco, mas sim o próprio alto-falante, a potência instantânea tem que ser adequada a essa conjuntura. Quer dizer, a amplitude da varredura tem que diminuir assim que a frequência chega na faixa do tweeter. Não raramente o ganho tem que ser baixado em mais que 10 dB para evitar superaquecê-lo.

Outro tipo de medição em que o envelope da varredura deve diminuir nas altas frequências é a de gravadores de fita magnética. Devido à baixa velocidade de transporte, o material magnético de cassetes comuns entra em saturação com níveis bem mais baixos nos agudos do que nos graves. Na medição prática apresentada na Figura 6, a envoltória da varredura teve que declinar gradualmente em 24 dB para tomar conta dessa propriedade.

Seria então desejável controlar a potência instantânea (correspondendo à largura da envoltória) em função da frequência. E esse controle pode ser facilmente realizado mediante uma pequena mudança do processo de síntese das varreduras no domínio espectral. Como esclarece a figura 13, o truque é de *dividir* o espectro da distribuição energética desejada pelo espectro da amplitude da envoltória desejada *antes* de sintetizar o atraso de grupo. *Depois*, o espectro da varredura é *multiplicado* pelo espectro da envoltória para restabelecer o conteúdo espectral desejado. A IFFT agora revela uma varredura cuja envoltória segue fielmente o gabarito.

Essa é a forma mais generalizada de sintetizar uma varredura: Ela é malhada apropriadamente em tempo e amplitude para apresentar exatamente a distribuição espectral desejada e ainda o envelope temporal requisitado.

E. Síntese de varreduras de dois canais com função de crossover embutida

O jogo de forjar varreduras dedicadas a tarefas especiais ainda não acabou. Falando em caixas de som com múltiplas vias, é interessante de incluir a funcionalidade de crossover ativo no sinal de excitação, usufruindo todas as vantagens conhecidas de controle independente dos alto-falantes individuais. Praticamente todas as placas de som para computadores são equipadas com conversores em estéreo, favorecendo tal empreitada.

A criação de uma varredura em estéreo (ou até mais canais) pode ser realizada com algumas emendas da síntese descrita nos capítulos III.C e III.D.

Primeiramente, é importante de medir as duas vias sem alterar o lugar do microfone para estabelecer as relações certas entre amplitude, fase e atraso de grupo. No primeiro passo, as diferenças da fase e do atraso de

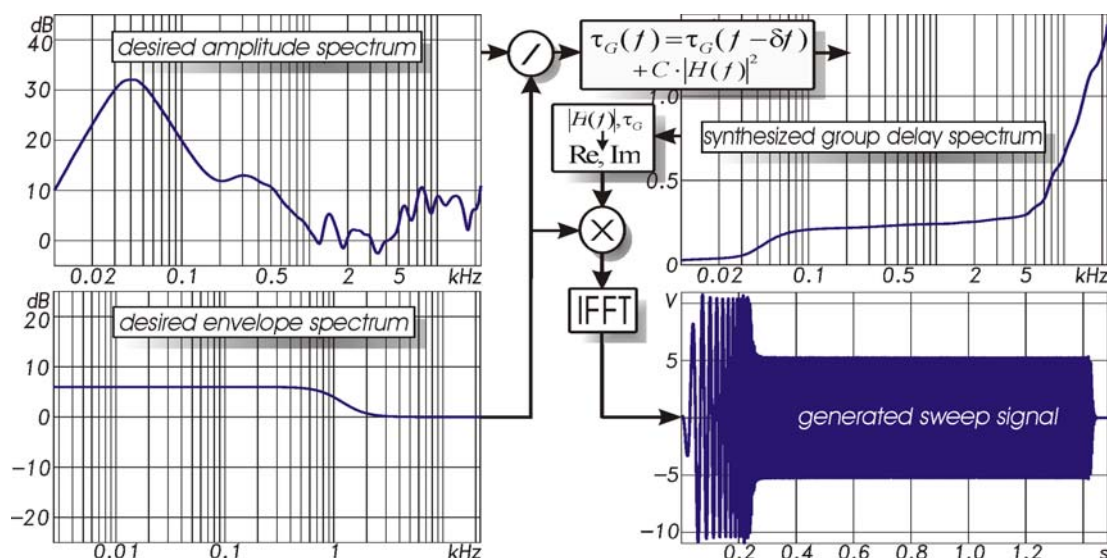


Figura 13: Síntese de varredura com distribuição espectral arbitrária e envelope controlado

grupo entre as duas vias na frequência do x-over são avaliados e armazenados. Eles entrarão no cálculo mais tarde.

Depois disso, as fases podem ser desconsideradas e os espectros submetidas a uma suavização optativa.

No próximo passo, as funções de transferência dos alto-falantes individuais são invertidas. Em seguida, elas são multiplicadas:

- pela pré-ênfase desejada (optativamente)
- por um passa-banda para restringir a faixa de frequências em uso,
- e finalmente pelo passa-baixa (woofer) e pelo passa-alta (tweeter) para introduzir a função de crossover.

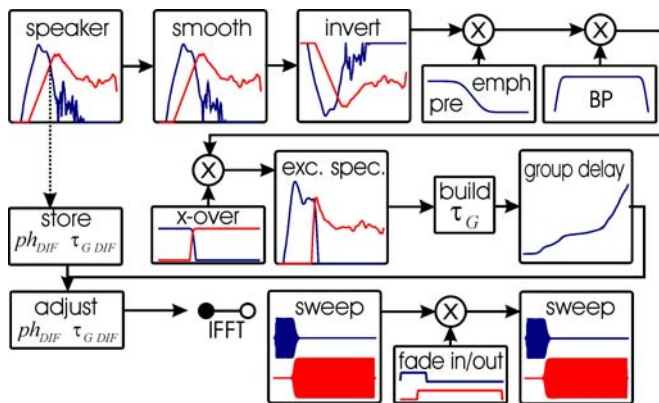


Figura 14: Processamento para criar varreduras de dois canais com equalização dos alto-falantes e pré-ênfase.

O que resulta é o conteúdo espectral desejado para os dois canais, a partir do qual o atraso de grupo é sintetizado. Como a frequência momentânea deve ser igual nas duas vias, o atraso de grupo é idêntico para os dois canais e se calcula à base da soma da energia de ambas as amplitudes:

$$\tau_G(f) = \tau_G(f - df) + C \cdot \sum_{Ch=1}^2 |H(f)|^2 \quad (13)$$

A constante C, desta vez, é o comprimento da varredura dividida pela energia total dos dois espectros:

$$C = \frac{\tau_G(f_{END}) - \tau_G(f_{START})}{\sum_{Ch=1}^2 \sum_{f=0}^{f_s/2} |H(f)|^2} \quad (14)$$

Na região do ponto de x-over, ambos os alto-falantes receberão o sinal e vão então interferir. Para evitar que haja queda na resposta da caixa, é proficuo aplicar uma correção do atraso de grupo e da fase previamente armazenados. Quer dizer o sinal que chegará antes do outro é atrasado pela diferença dos dois. Após essa correção do atraso de grupo, a fase é adaptada, adicionando mais um pequeno atraso de grupo à

maneira da equação 10, substituindo $\varphi(f_s/2)$ por $\varphi(f_{X-OVER})$.

A IFFT dos dois espectros revela a varredura de dois canais. Após o janelamento para confinar as duas varreduras aos limites temporais (nesse ponto, o processo iterativo da Figura 10 pode ser inserido), o sinal de excitação está pronto para uso.

É claro que o controle da envoltória em função da frequência também pode ser incluído. Nesse caso, os dois espectros devem ser *divididos* pelo espectro da envoltória antes da geração do atraso de grupo e *multiplicados* pelo mesmo depois (não incluído na Figura 14 para não sobrecarregar o desenho).

V. CONCLUSÕES

Varreduras são mais imunes contra as adversidades comuns no dia-a-dia de medições da função de transferência. A partir de uma só medição, não é somente possível de rejeitar toda distorção harmônica da resposta impulsiva (e correspondentemente da função de transferência), mas até de calcular o grau de distorção em função da frequência, independentemente para cada harmônica.

Esse trabalho esclareça como varreduras com qualquer conteúdo espectral podem ser malhadas sem perder o controle sobre a envoltória temporal. Além da adaptação ao ruído ambiental, a equalização da caixa de som e até a separação nas várias bandas das vias dela podem ser embutidos no sinal de excitação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Swen Müller e Paulo Massarani, “Transfer-Function Measurement with Sweeps”, *J.AES*, vol. 49, pp. 443-471, junho de 2001.
- [2] A.J. Berkhout, D. de Vries, M. M. Boone, “A New Method to Acquire Impulse Responses in Concert Halls”, *J.ASA*, p. 179, 1980.
- [3] Nobuharo Aoshima, “Computer-generated pulse signal applied for sound measurement”, *J.ASA*, p. 1484, maio de 1981.
- [4] Yôiti Suzuki, Futoshi Asano, Hack-Yoon Kim, Toshio Sone, “An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses”, *J.ASA*, p. 1119, fevereiro de 1995.
- [5] Fredric J.Harris, “On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform”, *Proc. IEEE*, p. 51, janeiro de 1978.