

Filtro multicanal com regularização de fase mínima

Giordano Gatti Gomide*, Bruno Sanches Masiero*

*Depto. de Comunicações (DECOM), Faculdade de Eng. Elétrica e de Computação (FEEC)

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Campinas, Brasil

e-mail: g216796@dac.unicamp.br, masiero@unicamp.br

Resumo—Cada vez mais sistemas de áudio espacial vem ganhando espaço em ambientes como teatros, cinemas e residências. Tais sistemas também são de grande relevância no contexto da Indústria 4.0, onde possuem aplicações como mecanismos de aviso e suporte à produção. Em todos estes contextos, os sistemas de reprodução sofrem influência do espaço onde estão instalados, o que pode ser controlado por um banco de filtros de equalização. Para evitar distorções causadas por altos ganhos, é comum o uso de técnicas de regularização para o cálculo dos filtros que os limitam mas, em contrapartida, adicionam artefatos acausais ao sinal. Com o objetivo de minimizar estes artefatos foi proposta a técnica de regularização de fase mínima. Neste manuscrito avalia-se inicialmente o uso da técnica de regularização de fase mínima para um canal simples e, em seguida, compara-se duas formas distintas para a sua implementação com arranjos de múltiplos alto-falantes e microfones simulados, mostrando a viabilidade desta técnica.

Palavras-chave—Áudio espacial, Filtro multicanal, regularização de fase mínima.

I. INTRODUÇÃO

O impacto que o ambiente exerce sobre sinais de áudio pode ser um elemento chave para a avaliação do desempenho deste, podendo comprometer a qualidade da experiência dos usuários. No caso dos sistemas de áudio imersivo mais modernos, compostos por arranjos de alto-falantes distribuídos, este impacto se torna ainda mais rigoroso. Isso ocorre pois estes se baseiam principalmente em dois paradigmas: panorama [1] e síntese de campo [2]. Ambos, para calcularem seus pesos e filtros, assumem que todos os alto-falantes do arranjo possuem resposta em frequência plana, o que dificilmente é o caso. Assim, se faz necessário a equalização de cada alto-falante bem como a compensação da influência da sala no arranjo.

A equalização destes sistemas pode ser feita de diferentes formas, dentre as quais três são analisadas no presente projeto. O primeiro caso é relativo a inversão simples da resposta ao impulso da sala. No entanto, este método se mostra muito custoso em recursos, possui componentes "pre-ringing" audíveis

*Este trabalho foi financiado pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), CNPq.

[1] e pode acarretar em altos ganhos indesejados. Partindo de tais desvantagens, introduz-se o segundo método discutido (como uma forma de aprimorar o primeiro), a utilização de regularização. Este permite mitigar os efeitos de altos ganhos indesejado e uma diminuição nos recursos necessários para a implementação do filtro diretamente no domínio do tempo. No entanto, apenas a regularização por si só não é capaz de eliminar o "pre-ringing" do filtro. Com isso, parte-se para o terceiro método aplicado ao filtro (também como uma forma de melhoria ao método anterior), a aplicação do equivalente de fase mínima no fator de forma da regularização, o que permite reduzir o "pre-ringing" do filtro final e consequentemente economizar ainda mais recursos na implementação deste [3].

A sequencia de métodos descrita é utilizada em [4], implementando o terceiro método de forma a obter um fator de forma de fase mínima para cada canal do sistema. Porém, é notada uma limitação relativa à introdução de atrasos distintos em cada um dos canais, o que também prejudica a escuta do usuário. Desta forma, é proposto em [5], realizar o mesmo procedimento mas utilizando um fator de forma global aplicado em todos os canais, visando a eliminação de tais atrasos. Assim, o presente projeto se compromete a implementar, através de algoritmos em *Python*, ambas as propostas, retornando um comparativo entre elas.

II. MÉTODO

A metodologia aplicada ao desenvolvimento do projeto foi dividida em dois grandes grupos: O desenvolvimento de filtros de canal simples e filtros multicanal. O primeiro foi feito com o intuito de capacitação nas técnicas de filtragem a serem aplicadas, enquanto o outro mira os objetivos finais do trabalho. Todo o processamento necessário foi realizado por meio da linguagem *Python* através do ambiente *Google Colaboratory*.

A. Canal Simples

Neste processamento, tomou-se como referencia a resposta ao impulso da sala FE-22 da FEEC.

Primeiramente, aplicou-se a inversão simples em cada uma das amostras da *FFT* (*Fast Fourier Transform*) do sinal de entrada (domínio da frequência), definido por:

$$H_{inv-simp}(f) = \frac{1}{C(f)} = \frac{1}{C(f)} \cdot \frac{C^*(f)}{C^*(f)} = \frac{C^*(f)}{|C(f)|^2} \quad (1)$$

Após a implementação do filtro de inversão simples, inicia-se o estudo sobre a aplicação de regularização. Primeiramente, esta é introduzida na *FFT* do sinal de entrada de forma direta, assim como foi feito no filtro anterior. Vale ressaltar que β e $A_R(f)$ são, respectivamente, os parâmetros da regularização introduzidos para realizar a ponderação e a seleção das faixas de frequências nas quais a regularização atuará.

$$H_{reg}(f) = \frac{C^*(f)}{|C(f)|^2 + \beta \cdot |A_R(f)|^2} \quad (2)$$

Entrando mais a fundo na aplicação da regularização, esta é separada no produto de dois componentes, a própria inversão simples, anteriormente adquirida, e o fator de forma da regularização $A(f)$:

$$H_{reg}(f) = \frac{C^*(f)}{|C(f)|^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\beta \cdot |A_R(f)|^2}{|C(f)|^2}} \quad (3)$$

$$H_{reg}(f) = H_{inv-simp}(f) \cdot A(f) \quad (4)$$

Apenas a efeito de estudo, este filtro também é implementado e comparado a regularização direta, esperando a obtenção do mesmo resultado.

Com este teste bem sucedido, procura-se obter o equivalente de fase mínima do fator de forma da regularização. Este processo é realizado através da manipulação do *Cepstrum* do sinal. O domínio temporal do *Cepstrum* é definido como:

$$A_{Cepstrum} = IFFT(\log(A(f))) \quad (5)$$

Neste domínio, primeiramente divide-se o sinal em duas metades. Com isso, o equivalente de fase mínima é obtido somando a primeira metade com o espelho da segunda metade (primeira amostra somada com a ultima, segunda com a penúltima e assim por diante) e zerando todas as amostras relativas à segunda metade. Vale ressaltar que por estar trabalhando com um sinal real, espera-se que a primeira metade do sinal no *Cepstrum* seja igual à segunda, de forma que a soma descrita seja equivalente a dobrar o valor das amostras.

Com este sinal já construído, retorna-se ao domínio da frequência aplicando as operações matemática inversas a migração do *Cepstrum*:

$$A_{minphase}(f) = \exp(FFT(A_{Cepstrum})) \quad (6)$$

Obtido este equivalente de fase mínima do fator de forma da regularização, o filtro com regularização de fase mínima é finalizado ao aplicar esse sinal em 4, mantendo o sinal de inversão simples previamente obtido.

B. Multicanal

Nesta etapa, utilizou-se como referencia a resposta ao impulso de uma sala com um arranjo de alto-falantes e microfones simulada através da biblioteca `PyRoomacoustics`.

Para os sistemas multicanal, o método aplicado é similar ao utilizado para canal simples, no entanto deve-se levar em conta que o sinal digital que anteriormente era visto como um vetor de amostras, agora se torna um tensor. Essa alteração impacta em certas sutilezas, principalmente na inversão das matrizes de amostras.

Inicialmente, é realizada a inversão direta da *FFT* do sinal recebido. Esta pode ser realizada através da expressão $H_{inv-simp} = C^{-1}$ caso as matrizes de amostras do tensor sejam quadradas. Caso contrário este filtro deve ser calculado através da pseudo-inversa da matriz, definida em 7 (o expoente "H" aplicado é relativo ao hermitiano da matriz em que se aplica). No presente caso tais operações foram implementadas por meio das funções `inv` e `pinv` respectivamente, contidas na biblioteca `Numpy.linalg`.

$$H_{pseudo-inv} = (C^H \cdot C)^{-1} \cdot C^H \quad (7)$$

Realizada a inversão direta, são inseridos os parâmetros ponderativos da regularização $\beta(f)$ (multiplicado a uma matriz identidade), visando a obtenção da regularização pura:

$$H_{reg} = (C^H \cdot C + \beta(f) \cdot I)^{-1} \cdot C^H \quad (8)$$

Vale ressaltar que a partir desta etapa os métodos implementados em [5] e [4] se diferem e inicia-se a comparação entre estes. Em [4], obtém-se um tensor de fatores de forma (um fator de forma para cada canal do sistema), por meio de uma comparação (divisão) entre os filtros de inversão simples 7 e o filtro de regularização pura 2:

$$A_i = H_{reg} \cdot H_{inv}^{-1} \quad (9)$$

Já em [5], propõe-se a utilização de único fator de forma a ser aplicado na regularização de todos os canais, tal fator de forma global é definido em 12. Este é obtido através da comparação entre a expressão que representa aplicação dos parâmetros de regularização e outra que compacta as influencias destes parâmetros em uma única variável $A(f)$ (igualdade de 10 com 11, assumindo que esta é válida para valores pequenos de β). As expressões igualadas são obtidas através da aplicação da identidade $(\cdot)^{-1} = adj(\cdot)/det(\cdot)$ em 8 e 7 (tal que 'det' é o determinante da matriz e 'adj' é o adjunto da matriz):

$$H(f) = \frac{adj(C^H \cdot C + \beta(f) \cdot I) \cdot C^H}{det(C^H \cdot C + \beta(f) \cdot I)} \quad (10)$$

$$H(f) = A(f) \cdot \frac{adj(C^H \cdot C) \cdot C^H}{det(C^H \cdot C)} \quad (11)$$

$$A(f) = \frac{det(C^H \cdot C)}{det(C^H \cdot C + \beta(f) \cdot I)} \quad (12)$$

Obtidos os fatores de forma de cada um dos métodos, parte-se para a obtenção dos filtros finais, tal que em ambos os métodos é proposta a aplicação do equivalente de fase mínima nos fatores de forma adquiridos. A aplicação da fase mínima nos fatores de forma consistem do mesmo processo de manipulação do *Cepstrum* já aplicado no filtro de canal simples [5, 6], já que estes seguem sendo vetores. Obtendo os equivalentes de fase mínima estes são substituídos em [4], sendo neste caso o filtro de inversão simples o tensor obtido em [7]. Vale ressaltar que o fator de forma global é multiplicado amostra por amostra como o produto de um escalar com uma matriz, enquanto os múltiplos fatores de forma obtidos pelo método de [4] são multiplicados como um produto de Hadamard entre duas matrizes.

III. RESULTADOS

Do primeiro estudo sobre os filtros de canal simples foram obtidos os três filtros desejados e feita uma comparação entre estes a fim de confirmar o funcionamento do método.

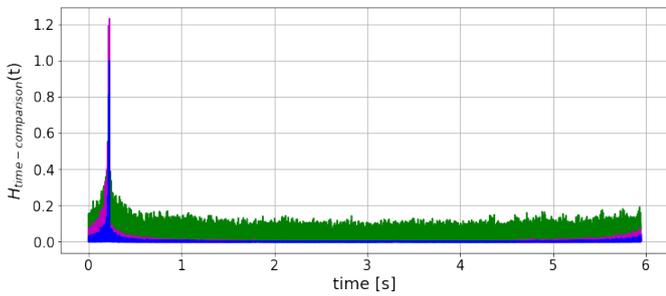


Figura 1. Sobreposição dos filtros de canal simples obtidos (verde: inversão simples, magenta: regularização pura, azul: regularização de fase mínima)

Desta sobreposição, é possível confirmar os efeitos esperados da regularização e da aplicação do equivalente de fase mínima. Observa-se que os filtros que utilizam da regularização geram ganhos significativamente menores em instantes não relacionados a resposta ao impulso bem como possuem durações menores (menos gasto de recursos). Já comparando os filtros com regularização, observa-se que o estímulo inicial do filtro com fase mínima ocorre de forma mais rápida em relação ao filtro com regularização pura, ilustrando a diminuição do *pre-ringing*.

Para a obtenção dos filtros com regularização pura e de fase mínima, as etapas descritas em II podem ser ilustradas através dos sinais apresentados nas Figuras 3 e 4:

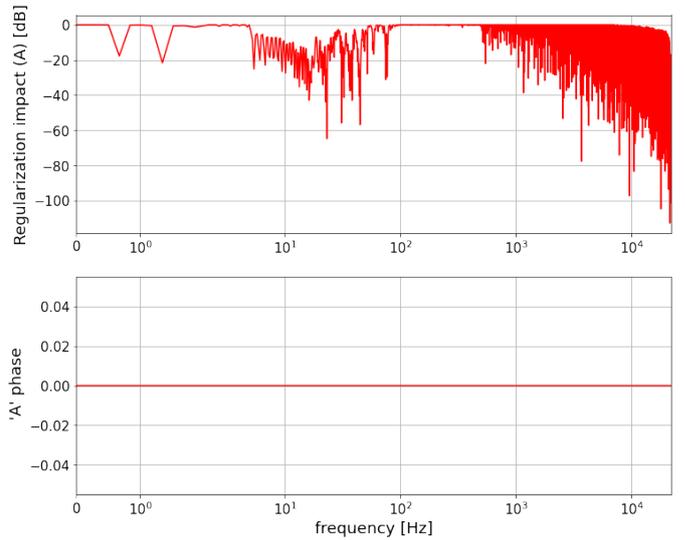


Figura 2. Fator de forma da regularização pura, com parâmetro $\beta = 10^6$ aplicado nas faixas de 0Hz a 2Hz, 5Hz a 100Hz e 500Hz a 22050Hz (máximo)



Figura 3. Fator de forma da regularização pura no domínio do *Cepstrum*

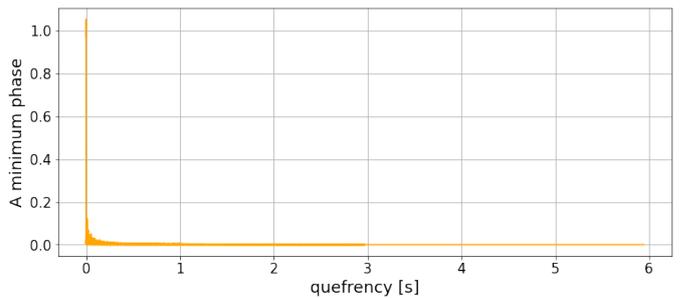


Figura 4. Fator de forma da regularização de fase mínima no domínio do *Cepstrum* (pós processamento do sinal da Figura 3)

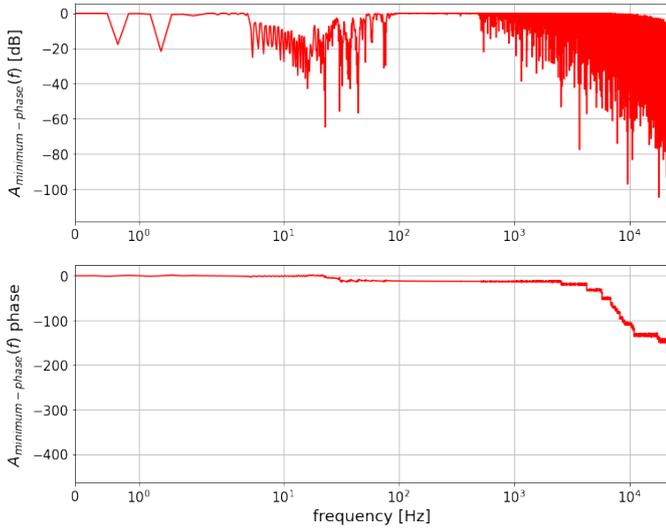


Figura. 5. Equivalente de fase mínima do fator de forma obtido na Figura 2

Destes sinais, pode-se visualizar o processamento realizado no fator de forma através do domínio *cepstrum* descrito em II, bem como seu resultado coerente com o esperado, já que o equivalente de fase mínima visto em 5 possui a mesma magnitude que o fator de forma inicial mas com uma fase decrescente introduzida (equivalente a aplicação de um filtro passa-tudo com fase mínima).

Partindo para o sistema multicanal, a efeito de validação, tomou-se como base um sistema de dois microfones e quatro alto-falantes. Com isso, assim como esperado obtém-se para análise um tensor com amostras em forma de matrizes 2x4, o que equivale a 8 vetores cada um representando um canal.

Comum aos dois métodos apresentados, o filtro de inversão simples é obtido, neste caso, através da pseudo-inversão de cada uma das amostras de matrizes (já que não se trata de matrizes quadradas), resultando em um banco de 8 filtros na forma de um tensor 4x2. Tal quantidade e formatação dos filtros permite que estes sejam aplicados ao sinal da RI de entrada, os colocando a prova. Ao fazê-lo os filtros demonstraram o comportamento esperado.

Prosseguindo, aplica-se a regularização pura 2 com parâmetro $\beta = 0.1$ na faixa de 20 Hz a 22050 Hz (máximo), e realiza-se o mesmo processo para a validação a partir do formato e das dimensões do filtro. Este apresentou as mesmas do filtro de inversão simples, assim como esperado. Além disso, seu comportamento também pode ser confirmado ao se anular os parâmetros de regularização e verificar que o filtro se iguala ao de inversão simples.

Com isso, são obtidos os fatores de forma de cada método utilizado. Inicia-se pelo proposto em [5]. Ao aplicar 12 e realizar o mesmo processamento do *Cepstrum* utilizado no caso do canal simples, obtém-se um equivalente de fase mínima com magnitude equivalente ao esperado, no entanto com fase distinta.

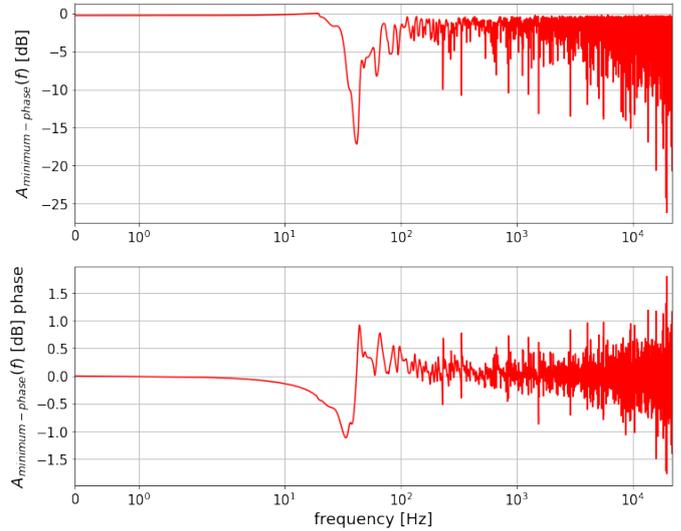


Figura. 6. Equivalente de fase mínima do fator de forma de regularização obtido pelo método proposto em [5]

A partir deste fator de forma é obtido o filtro com regularização de fase mínima e então este é colocado a prova, assim como os outros filtros, através do seu desempenho na filtragem do sinal de entrada.

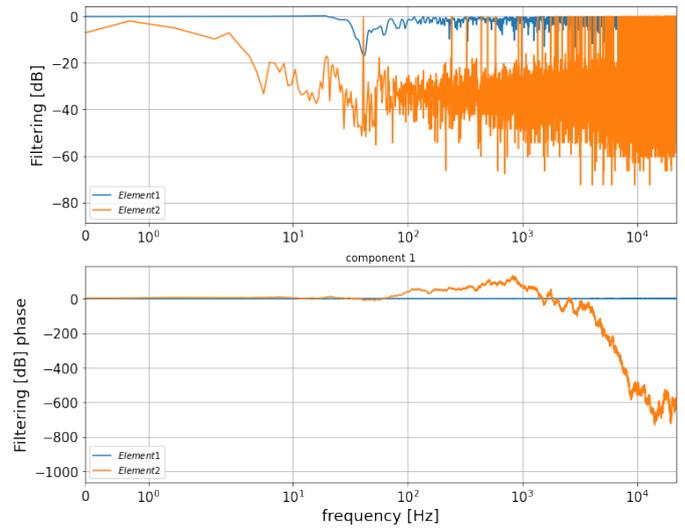


Figura. 7. Filtragem de um dos canais do sistema (azul)

A partir do resultado desta filtragem observa-se que o filtro exerceu controle sobre o sinal de entrada, anulando parte deste. Notam-se limitações, já que há atenuações significativas em torno de 50 Hz e entre 1 KHz e 10KHz.

De posse de tais resultados, também obteve-se o banco de fatores de forma previsto em [4], porém antes de prosseguir com a replicação do filtro com regularização de fase mínima investiga-se as razões das divergências teóricas e práticas

encontradas na fase resultante da aplicação do processamento do *Cepstrum*.

Por fim, vale ressaltar que a fim de contornar descontinuidades matemáticas relativas a inversão de matrizes singulares, a ordem dos operandos nos produtos de Hadamard indicados em II foi alterada de acordo com as dimensões da matriz de entrada em cada etapa.

IV. CONCLUSÃO

O estudo realizado mostrou que para o caso de um único canal, a aplicação da regularização pura e seu equivalente de fase mínima geraram impactos concordantes aos esperados pela teoria. Já para sistemas multicanal, pode-se afirmar que a aplicação de regularização pura teve resultado também coerente ao esperado. No entanto, após a obtenção de seu fator de forma através dos métodos propostos em [5] e [4], foram notadas distinções na fase de seu equivalente de fase mínima.

Tais resultados seguem sob análise, já que ao desenvolver os filtro de canal simples também encontrou-se dificuldade na obtenção do equivalente de fase mínima do fator de forma da regularização. Com isso, a obtenção do equivalente de fase mínima vem a ser uma possível fonte de erro na obtenção dos filtros multicanal, levando tal processo para reavaliação e estudo mais aprofundado.

REFERÊNCIAS

- [1] V. Pulkki and M. Karjalainen, *Communication Acoustics: an introduction to speech, audio and psychoacoustics*. John Wiley & Sons, 2015.
- [2] B. Masiero, "Qual o futuro do MP3? Áudio espacial e codificação orientada a objetos," *NICS Reports*, no. 19, 2017.
- [3] M. Bouchard, S. Norcross, and G. Soulodre, "Inverse filtering design using a minimal-phase target function from regularization," *Journal of the Audio Engineering Society*, october 2006.
- [4] S. Norcross and M. Bouchard, "Multichannel inverse filtering with minimal-phase regularization," *Journal of the Audio Engineering Society*, october 2007.
- [5] B. Masiero, "Multichannel equalization with global minimum-phase regularization," *15 Congresso de Engenharia de Áudio da AES Brasil, Florianópolis, SC, Brasil*, 2017.