

Redução de interferências em aparelhos auditivos com um *beamformer multi-split* GSC e microfones direcionais

Diego da Silva de Medeiros e Leonardo Silva Resende

Resumo— À medida que a população mundial fica mais idosa, mais pessoas adquirem alguma forma de deficiência auditiva, dificultando o convívio social e reduzindo a qualidade de vida. Embora cada deficiência tenha uma causa e, portanto, uma solução específica, o aumento na relação sinal-ruído e sinal-interferência pode reduzir o seu impacto geral. Este trabalho propõe a utilização de um *beamformer Multi-Split* GSC (*Generalized Sidelobe Canceller*) em aparelhos auditivos com microfones direcionais, visando melhorar a relação sinal-interferência para portadores de deficiências auditivas. Testes realizados comparam o desempenho da técnica apresentada com uma técnica já consagrada em diferentes ambientes e configurações, e os resultados se mostraram positivos em todos os casos.

Palavras-Chave— Aparelhos auditivos, *beamformer*, *Multi-Split*, GSC.

Abstract— As the world's population gets older, more people acquire some form of hearing impairment, making the social interaction more difficult and reducing the quality of life. Although each deficiency has a cause, and therefore a specific solution, the increase in the signal to noise and signal to interference ratios can reduce their overall impact. This paper proposes the utilization of a *Multi-Split* GSC (*Generalized Sidelobe Canceller*) *Beamformer* in hearing aids with directional microphones, to improve the signal to interference ratio for people with hearing disabilities. Tests compare the performance of the presented technique with an established technique in different environments and settings, and the results were positive in all cases.

Keywords— Hearing Aids, *Beamformer*, *Multi-Split*, GSC.

I. INTRODUÇÃO

No Brasil, mais de 9,8 milhões de pessoas possuem alguma forma de deficiência auditiva, número que passa dos 5% do total da população [1]. Este número ainda tende a crescer, à medida que o Brasil aumenta o seu índice de envelhecimento populacional [2].

Dentre os problemas enfrentados por pessoas com perdas neurossensoriais, os mais comuns são a redução da faixa dinâmica, e a redução da seletividade espectral e temporal [3].

Tendo em vista este problema, a estrutura conhecida como *beamformer*, que consegue distinguir características de sinais baseada em suas propriedades espaciais [4], tem sido estudada como possibilidade de avanços em aparelhos auditivos [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11].

Este trabalho tem foco na melhoria de aparelhos auditivos através da redução de interferências. Com isso, uma

Diego da Silva de Medeiros, Área de Telecomunicações, Instituto Federal de Santa Catarina, E-mail: diegomedeiros@ifsc.edu.br. Leonardo Silva Resende, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, E-mail: leonardo@eel.ufsc.br.

minimização dos efeitos da baixa seletividade espectral e temporal é esperada, tendo em vista que com melhores relações sinal-ruído e sinal-interferência, tanto a probabilidade de mascaramento em frequência quanto a necessidade de uma alta resolução temporal são reduzidas [12]. De fato, deficientes auditivos precisam de relações sinal-ruído e sinal-interferência melhores para manter o mesmo nível de conversação que pessoas sem deficiências [3]. Ainda, esse artigo traz valiosas referências para aqueles que querem iniciar os estudos nesta sub área de processamento de sinais.

Para o processamento, será empregado um *beamformer*, que consiste em múltiplos microfones associados a filtros FIR (Finite Impulse Response) com coeficientes adaptáveis. Será aplicada, porém, uma estrutura diferenciada de *beamformer*, a *Multi-Split* GSC [13]. Embora haja resultados mostrando que esta estrutura é mais eficiente do que algoritmos adaptativos clássicos [14] [15], esta é a sua primeira aplicação em aparelhos auditivos. A estrutura será avaliada com e sem microfones direcionais, em ambientes com diferentes níveis de reverberação, e será comparada a uma estrutura já consagrada na literatura, o *beamformer* na forma direta com restrições de Frost [16].

II. O *Beamformer Multi-Split*

Nesta seção, o *beamformer Multi-Split* será apresentado.

A. *Beamformer*

O *beamformer* é construído a partir da incorporação de filtros FIR adaptativos à um arranjo de microfones (Figura 1). Com a redundância temporal e espacial disponibilizada, é possível controlar a resposta do sistema tanto em nível de frequência quanto de ângulo de incidência. Desta forma, o sinal de interesse é mantido enquanto as interferências presentes no meio são atenuadas.

O *beamformer* é definido pela equação:

$$y(t) = \mathbf{w}^t \mathbf{x}(t) \quad (1)$$

onde \mathbf{w} é o vetor de coeficientes dos filtros FIR de ordem $J+1$ da estrutura, definido por $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{J-1}]^t$, com $\mathbf{w}_j = [w_{j,0}, w_{j,1}, \dots, w_{j,K-1}]^t$; e $\mathbf{x}(t)$ é um vetor com os sinais captados pelos K microfones, definido por $\mathbf{x}(t) = [\chi(t), \chi(t-1), \dots, \chi(t-J+1)]^t$, com $\chi(t-j) = [x_0(t-j), x_1(t-j), \dots, x_{K-1}(t-j)]^t$.

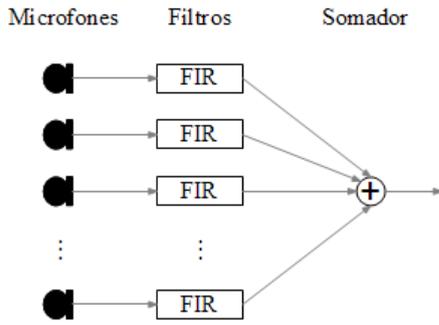


Fig. 1. O Beamformer

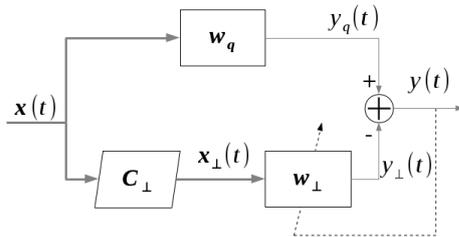


Fig. 2. O Beamformer GSC

Ao aplicar um algoritmo de adaptação nos coeficientes dos filtros, o *beamformer* consegue acompanhar variações nas características do ambiente. Algoritmos baseados em otimizações restritas (LCMV - *Linearly Constrained Minimum Variance*) são comumente aplicados, visando preservar um conjunto de ângulo de incidência e faixa de frequência, enquanto os demais são atenuados.

B. O beamformer GSC

Em 1982, Griffiths e Jim propuseram uma forma alternativa para o *beamformer*, chamada GSC (*Generalized Sidelobe Canceller*), que transformava o problema de otimização com restrições em um problema de otimização irrestrito [20]. Os filtros do *beamformer* são substituídos pela estrutura apresentada na Figura 2.

O caminho superior, chamado de “conformador convencional” é formado pelo vetor w_q , chamado de “vetor quiescente”, que traz a resposta desejada aos sinais dentro da faixa de interesse. No caminho inferior, chamado de “cancelador de lóbulo lateral”, os sinais desejados são bloqueados pela “matriz de bloqueio de sinal”, C_{\perp} , e somente os sinais de interferência são submetidos aos filtros adaptativos w_{\perp} . O problema de otimização neste caso, é irrestrito, pois as restrições do problema original estão distribuídas nas estruturas fixas do sistema.

O sinal de saída $y(t)$ é então definido como:

$$y(t) = (w_q - C_{\perp} w_{\perp})^t x(t) \quad (2)$$

C. A filtragem Split

A filtragem *Split* adaptativa surgiu a partir das ideias propostas por Delsarte e Genin [17], que propuseram uma versão *Split* do algoritmo de Levinson para matrizes Toeplitz reais. Esta solução foi estendida à predição linear por Ho e Ching [18], propondo um filtro adaptativo *Split* LMS.

Sendo w uma sequência finita representando a resposta ao impulso de um filtro FIR adaptativo, com N_m elementos, a sua decomposição em componentes conjugadas simétrica e antissimétrica é $w = w_s + w_a$, com $w_s = \frac{1}{2}[w + Jw^*]$ e $w_a = \frac{1}{2}[w - Jw^*]$, onde J é uma matriz quadrada com a diagonal secundária igual à 1 e demais elementos iguais à 0, chamada de *matriz de reflexão*.

Na abordagem apresentada em [13], a condição de simetria e antissimetria pode ser visualizada através de um conjunto de restrições lineares, definidas por $C_s^t w_s(t) = f_s$ e $C_a^t w_a(t) = f_a$, com $C_s = [I_U, -J_U]^t$, $C_a = [I_U, J_U]^t$ e $f_s = f_a = \mathbf{0}_U$, onde I_U , J_U e $\mathbf{0}_U$ são respectivamente *matriz de identidade*, *matriz de reflexão* e vetor coluna de zeros de tamanho $U = N_m/2$ para um N_m par.

Utilizando a estrutura GSC, as componentes w_s e w_a do filtro adaptativo w são substituídas pelas suas equivalentes GSC, definidas como $w_s = C_a w_{\perp s}$ e $w_a = C_s w_{\perp a}$ [12]. Devido sua natureza irrestrita de otimização, o algoritmo adaptativo age apenas nas componentes $w_{\perp s}$ e $w_{\perp a}$.

D. A filtragem Multi-Split

A partir de sucessivas decomposições das componentes $w_{\perp s}$ e $w_{\perp a}$, Ching e Wan [19] propuseram a filtragem *Multi-Split*, formada por N_m filtros com apenas 1 coeficiente [21]. Para um sinal $x_{\perp}(t) = T^t x(t)$, o sinal de saída do filtro *Multi-Split* é:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N_m-1} x_{\perp i}(t) w_{\perp i}(t-1) \quad (3)$$

Assim, o esquema *Multi-Split* pode ser visto como uma transformação linear de $x(t)$. Dentre as suas formas possíveis, a transformação T pode ser obtida a partir de uma matriz de Hadamard H_{N_m} com ordem N_m .

E. O algoritmo Multi-Split LMS

Além da estrutura *Multi-Split*, o trabalho [21] propõe ainda um algoritmo de passo variável normalizado pelas estimativas da potência dos sinais de entrada dos filtros, chamado de MS-LMS (*Multi-Split* LMS). A cada iteração, a potência dos sinais de entrada é estimada, podendo um fator de esquecimento ser utilizado para atribuir um maior peso às amostras mais recentes do sinal. Isto se dá através da equação recursiva:

$$\tilde{\lambda}_i(t) = \frac{x_{\perp i}^2(t) + \tilde{\lambda}_i(t-1)[p(t)-1]}{p(t)} \quad (4)$$

onde $p(t) = \gamma p(t-1) + 1$ e $p(0) = \gamma$. A adaptação dos coeficientes é realizada através da equação:

$$w_{\perp i}(t) = w_{\perp i}(t-1) + \frac{\mu}{\tilde{\lambda}_i(t)} x_{\perp i} e(t) \quad (5)$$

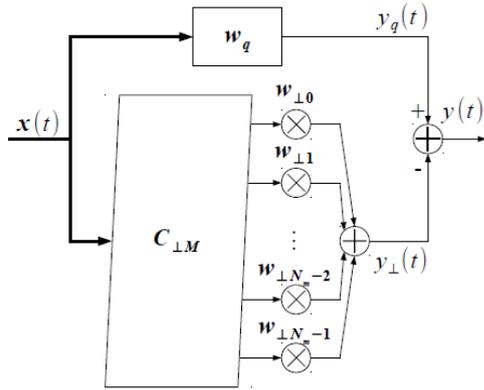


Fig. 3. O “Beamformer” na forma Multisplit GSC

onde μ é o passo constante de adaptação do algoritmo, que para garantir a convergência do algoritmo, deve se situar no intervalo $1 < \mu < 1/(N_m \lambda_{\max})$ [22], com λ_{\max} o maior autovalor da matriz de autocorrelação do sinal $x_{\perp i}(t)$, e $e(t)$ o erro de estimação do sinal de saída.

F. O beamformer Multi-Split GSC

Para aplicar a estrutura *Multi-Split* num *beamformer*, faz-se uso deste na forma do GSC [15]. A estrutura resultante substitui os filtros adaptativos do GSC pela estrutura *Multi-Split*, e incorpora a matriz de Hadamard na matriz de bloqueio do *beamformer* GSC (Figura 3).

III. TESTES REALIZADOS

Para avaliar o uso do *beamformer Multi-Split* na redução de ruídos em aparelhos auditivos, uma comparação com uma estrutura já consolidada foi realizada. Assim, um conformador *Multi-Split* GSC com algoritmo MS-LMS foi comparado com um conformador na forma direta, com algoritmo CLMS e restrições de Frost [12]. Para fins de conveniência, as estruturas foram denominadas “Multi-Split” e “Frost”.

O ambiente utilizado nos testes foi uma sala virtual de $5.2 \times 3.4 \times 2.8$ metros, onde duas fontes sonoras foram distribuídas, sendo a de interesse à frente (0°) do arranjo de microfones e a de interferência à 45° . Os microfones do arranjo foram dispostos linearmente em broadside com a fonte de interesse, usando uma separação de 1 cm. A resposta ao impulso reverberante da sala foi calculada usando o método das imagens de Allen e Berkley [23] com a expansão a arranjos de microfones de Peterson [24]. Além disso, foi acrescentado ao método o uso de microfones direcionais [12]. A partir de alterações nos coeficientes de absorção, a mesma sala resultou em dois ambientes de teste diferentes, um com pouca reverberação ($T_{60} = 150\text{ms}$) e outro com muita reverberação ($T_{60} = 600\text{ms}$). Ainda, foram utilizados microfones direcionais (cardioide) e omnidirecionais. Os dois ambientes, em conjunto com os dois tipos de microfones, resultaram em 4 cenários de teste, resumidos na Tabela I.

Um ruído gaussiano branco foi utilizado para modelar as incertezas do processo, com potência 10 dB menor que o nível

TABELA I
CENÁRIOS DE TESTE

Cenário	T_{60}	Microfones
1	Pouco reverberante (150 ms)	Omnidirecional
2	Pouco reverberante (150 ms)	Cardioide
3	Muito reverberante (600 ms)	Omnidirecional
4	Muito reverberante (600 ms)	Cardioide

TABELA II
CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS NOS TESTES

Configuração	Microfones	Coefficientes
A	2	90
B	4	40
C	5	30
D	7	80

de pressão sonora (dB SPL) [25] dos sinais de fala utilizados, reproduzindo ambientes silenciosos descritos em [26].

O projeto das estruturas utilizadas iniciou com a definição das restrições dos algoritmos adaptativos. Devido a natureza dos sinais de fala, foi definida como banda de interesse as baixas frequências até 5000 Hz. Assim, a estrutura “Frost” foi definida segundo a resposta ao impulso de um filtro equiripple com banda de passagem em 5000 Hz e banda de rejeição a partir dos 6000 Hz. Para a estrutura “Multi-Split”, restrições autovetoriais [27] [28] [29] foram utilizadas, de forma a garantir uma magnitude unitária e fase linear à sinais incidentes à 0° na faixa de frequência de 160 Hz a 5000 Hz. Estas restrições foram obtidas a partir da decomposição em valores singulares (SVD) da matriz de restrições pontuais criada [12]. A partir da maior redução de posto possibilitada, 4 configurações de microfones e coeficientes foram escolhidas para os testes, disponíveis na Tabela II. As mesmas configurações foram utilizadas para a estrutura “Frost”. Embora o uso de 7 microfones espaçados de 1 cm da configuração D aparente impossibilitar seu uso em aparelhos auditivos, formas alternativas de distribuição de microfones podem ser utilizadas, como em armações de óculos [30] ou em colares [31]. Para mais informações, ver [10].

Os parâmetros dos algoritmos adaptativos foram escolhidos de forma a garantir a convergência dos coeficientes. Para o CLMS, o passo de adaptação utilizado foi $\mu = 0.05$. No MS-LMS foi usado um passo de adaptação $\mu = 0.0005$ e um fator de esquecimento correspondente a um tempo de 30 ms.

Os testes foram realizados utilizando sinais de fala gravados em ambiente silencioso, com frequência de amostragem de 11,025 kHz e resolução de 16 bits. A base de dados [32] é constituída de frases foneticamente balanceadas, pronunciadas por homens e mulheres.

A medida de desempenho utilizada foi baseada no esquema descrito em [33], com a inteligibilidade dos sinais de interesse e de interferência calculada usando o CSII (Coherence-based Speech Intelligibility Index) [34]. Desta forma, o Ganho de Inteligibilidade (G_i) é um número real entre -1 e 1, onde resultados próximos de 1 indicam um grande ganho de inteligibilidade do sinal de interesse sobre o sinal de interferência; resultados próximos de -1 indicam um grande ganho do sinal de interferência sobre o sinal de interesse; e zero indica

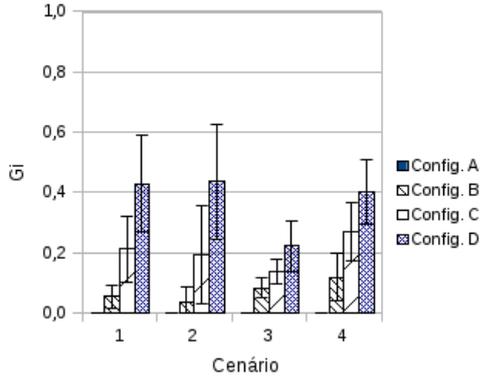


Fig. 4. Resultados para a estrutura "Frost"

nenhum ganho ou ambos os sinais igualmente realçados.

IV. RESULTADOS

Segundo os parâmetros apresentados na seção anterior, as duas estruturas foram testadas em quatro cenários diferentes, variando o tipo de ambiente e microfone. Em cada cenário, quatro testes foram realizados, cada um com uma configuração de número de microfones e coeficientes. Cada teste foi realizado com 10 pares diferentes de sinal, aleatoriamente escolhidos dentro da base de dados, e para cada par de sinal 10 realizações foram executadas.

A. Estrutura "Frost"

Os resultados da estrutura Frost podem ser vistos na Figura 4, sendo o G_i da configuração A nulo. Como pode ser visto, para todos os cenários, o aumento do número de microfones (configurações A a D) resulta em melhores resultados.

Resultados muito próximos foram obtidos para os cenários 1 e 2. Como o ambiente é pouco reverberante, a contribuição da componente de linha de visada é muito significativa, e esta componente do sinal de interferência é pouco atenuada pelo microfone direcional.

Comparando os cenários 1 e 3, é possível observar um pior resultado no ambiente mais reverberante. Devido à maior reverberação, mais componentes do sinal de interesse são recebidas fora da linha de foco do arranjo, assim como mais componentes do sinal de interferência são recebidas dentro da linha de foco. Desta forma, para o algoritmo, sinais dentro e fora da linha de interesse são mais correlacionados, o que explica a piora nos resultados. O uso de microfones direcionais reduz este efeito, tendo os cenários 2 e 4 retornando resultados semelhantes, e superiores ao cenário 3.

B. Estrutura "Multi-Split"

A mesma relação de resultados melhores com maior número de microfones pode ser observada na estrutura "Multi-Split", cujos resultados estão disponíveis na Figura 5.

A comparação dos resultados aponta para uma leve melhoria no desempenho do cenário 2 em relação ao cenário 1, principalmente nas configurações A e D.

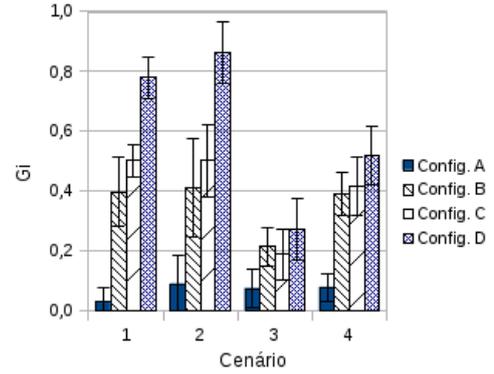


Fig. 5. Resultados para a estrutura "Multi-Split"

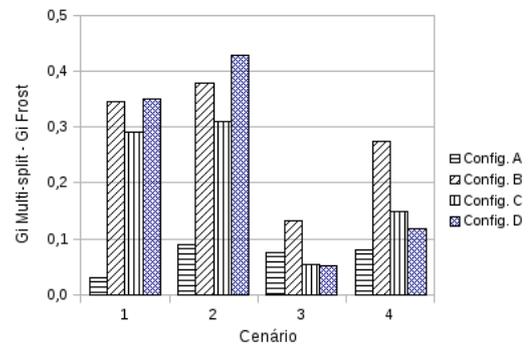


Fig. 6. Comparação dos ganhos obtidos pelas duas estruturas

O cenário 1 retornou melhores resultados que o cenário 3, que como esperado, apresentou um maior cancelamento do sinal de interesse devido à maior reverberação do ambiente.

O cenário 4 ainda apresentou um grande cancelamento do sinal de interesse quando comparado ao cenário 2, mas este foi menor do que o obtido no cenário 3. Isto indica que o aumento da correlação dos sinais, causado pela maior reverberação do ambiente, dificulta a ação do algoritmo *Multi-Split* LMS. A adição de microfones direcionais reduz a correlação entre os sinais de interesse e interferência, melhorando o desempenho.

C. Comparação das estruturas

Para comparar os resultados das duas estruturas, o Ganho de Inteligibilidade obtido na estrutura "Multi-Split" é subtraído pelo ganho da estrutura "Frost". A Figura 6 apresenta esta comparação, que por estar concentrada na parte positiva do eixo, mostra que a primeira estrutura obteve melhores resultados em todos os testes. É possível notar também que os microfones direcionais são melhores aproveitados pela estrutura "Multi-Split" do que pela estrutura "Frost", pois a comparação dos cenários 1 e 3 respectivamente com os cenários 2 e 4 apresenta um comportamento crescente. Porém, a superioridade da estrutura "Multi-Split" com relação à estrutura "Frost" é abalada pela maior reverberação do ambiente, como demonstra a comparação dos cenários 1 e 2 respectivamente com os cenários 3 e 4.

TABELA III

RESULTADOS PARA OS TESTES FINAIS, COM TRÊS FONTES SONORAS

		Estrutura	
		Frost	Multi-Split
Gi	Média	0.619	0.924
	Desvio padrão	0.001	0.004

V. TESTE ADICIONAL COM TRÊS FONTES SONORAS

Todos os testes até aqui relatados compreenderam um sinal de interesse e um sinal de interferência. Nesta seção, resultados são apresentados a partir de um cenário onde três fontes sonoras competem a atenção do ouvinte. No caso, as fontes de interferência estão localizadas respectivamente a 45° e a 270° do foco do arranjo.

Diferentemente dos outros testes, este foi realizado com os mesmos sinais de áudio nas duas estruturas, de forma a retirar a incerteza que sinais diferentes possam trazer nos resultados. Sendo um teste adicional, apenas a configuração D e o cenário 2 foram utilizados.

Os resultados podem ser vistos na Tabela III. Como pode ser visto, a superioridade da estrutura "Multi-Split" se confirmou também nesse cenário.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a utilização de *beamformer Multi-Split GSC* visando a redução de ruídos e interferências em aparelhos auditivos com microfones direcionais. Reduzindo interferências, a capacidade de seletividade espectral e temporal da audição humana é aumentada, tornando a conversação mais agradável.

Para ilustrar o desempenho do *beamformer Multi-Split GSC*, um *beamformer* na forma direta com algoritmo CLMS e restrições de Frost foi usado como referência.

Resultados mostram que a estrutura proposta é superior à de referência em todos os cenários de testes e configurações. Além disso, a introdução de microfones direcionais aumentou o desempenho em ambas as estruturas, especialmente em ambientes mais reverberantes. Por fim, o aumento no número de microfones trouxe avanços significativos nos resultados, comprovando a eficiência do uso de *beamformers* em aparelhos auditivos.

REFERÊNCIAS

- [1] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), "Censo demográfico 2010: Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência," 2010.
- [2] R.P. Veras and L.C. Mattos, "Audiology and aging: literature review and current horizons," *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, 2007.
- [3] H. Dillon, *Hearing aids*, Thieme, 1 edition, 2001.
- [4] S. Haykin, *Adaptive filter theory*, Prentice Hall, 4 edition, 2002.
- [5] J.E. Greenberg and P.M. Zurek, "Evaluation of an adaptive beamforming method for hearing aids," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1992.
- [6] J.M. Kates and W.R. Weiss, "A comparison of hearing-aid array processing techniques," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996.
- [7] M. Kompis, P. Feuz, G. Valentini, and M. Pelizzone, "A combined fixed/adaptive beamforming noise-reduction system for hearing aids," in *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE*, 1998.
- [8] P.M. Peterson, N.I. Durlach, W.M. Rabinowitz, and P.M. Zurek, "Multi-microphone adaptive beamforming for interference reduction in hearing aids," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 1987.
- [9] W. Soede, A.J. Berkhout, and F.A. Bilsen, "Development of a directional hearing instrument based on array technology," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993.
- [10] B. Widrow and F. Luo, "Microphone arrays for hearing aids: An overview," *Speech Communication*, 2003.
- [11] A. Spriet, *Adaptive filtering techniques for noise reduction and acoustic feedback cancellation in hearing aids*, Ph.D. thesis, Katholieke universiteit Leuven, 2004.
- [12] D.S. Medeiros, "Cancelamento de sinais interferentes usando arranjo de microfones: Aplicação em aparelhos auditivos," M.S. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- [13] L.S. Resende, J.M.T. Romano, and M.G. Bellanger, "Adaptive split transversal filtering: a linearly-constrained approach," in *Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000*, 2000.
- [14] R.D. Souza L.S. Resende and M.G. Bellanger, "Multisplit least-mean-square adaptive generalized sidelobe canceller for narrowband beamforming," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, 2003.
- [15] G.C. Marra, "Utilização do algoritmo multisplit lms em conformadores adaptativos de feixe," M.S. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [16] O.L. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing," *Proceedings of the IEEE*, 1972.
- [17] P. Delsarte and Y. Genin, "The split Levinson algorithm," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1986.
- [18] K.C. Ho and P.C. Ching, "Performance analysis of a split-path lms adaptive filter for ar modeling," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992.
- [19] P.C. Ching and K.F. Wan, "A unified approach to split structure adaptive filtering," in *1995 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1995.
- [20] L. Griffiths and C. Jim, "An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982.
- [21] L.S. Resende, J.M.T. Romano, and M. Bellanger, "Multi-split adaptive filtering," in *2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2001.
- [22] R.D. Souza, L.S. Resende, and M.G. Bellanger, "A justification for the improved performance of the multi-split LMS algorithm," in *2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2003.
- [23] J.B. Allen e D.A. Berkley, "Image method for efficiently simulating small-room acoustics," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1979.
- [24] P.M. Peterson, "Simulating the response of multiple microphones to a single acoustic source in a reverberant room," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1986.
- [25] L.L. Beranek, *Acoustics*, Amer Inst of Physics, 1986.
- [26] P.C. Loizou, *Speech Enhancement: Theory and Practice*, CRC Press, 2007.
- [27] K. Buckley, "Spatial/spectral filtering with linearly constrained minimum variance beamformers," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1987.
- [28] L.S. Resende, *Algoritmos recursivos de mínimos quadrados para processamento espacial/temporal com restrições lineares: Aplicação em antenas adaptativas*, Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas, 1996.
- [29] D.Z. Filho, "Algoritmos de processamento espacial para enlaces de comunicação sem fio," M.S. thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- [30] W. Soede, A.J. Berkhout, and F.A. Bilsen, "Development of a directional hearing instrument based on array technology," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993.
- [31] B. Widrow, "A microphone array for hearing aids," in *Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000*, 2000.
- [32] C.A. Ynoguti, *Reconhecimento de Fala Contínua Utilizando Modelos Ocultos de Markov*, Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas, 1999.
- [33] J.E. Greenberg, "A real-time adaptive-beamforming hearing aid," M.S. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- [34] J.M. Kates and K.H. Arehart, "Coherence and the speech intelligibility index," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005.