

ANÁLISE COMPARATIVA DA FORMAÇÃO DE FEIXES ATRASO E SOMA NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA PARA SINAIS DE BANDA LARGA.

Fabricio de Abreu Bozzi
Fabio Oliveira
Fernando de Souza Pereira Monteiro
Stilson Veras Cardoso
William Soares Filho
Leonardo Martins Barreira

Instituto de Pesquisas da Marinha
Rua Ipiru, n 02, Cacua, Ilha do Governador, Rio de Janeiro
bozzi@ipqm.mar.mil.br

Resumo: *Este trabalho visa comparar dois modos de aplicação da técnica de formação de feixes (beamforming) atraso-e-soma. Em aplicações onde é desejável uma acurada estimação da direção chegada (DoA) de uma fonte e é exigido o requisito de processamento em tempo real, busca-se o equilíbrio entre o tempo de processamento e a precisão alcançada na determinação da direção da fonte.*

Uma análise qualitativa do beamforming no domínio da frequência mostra um maior tempo de processamento devido ao número de multiplicações do sinal com a matriz de atrasos, quando comparado ao beamforming no domínio do tempo. Em contrapartida, o truncamento das amostras do beamforming no domínio do tempo pode degradar a informação da DoA. Desta forma, busca-se comparar os parâmetros de direcionalidade, tempo de processamento e acurácia da DoA para as duas implementações aplicadas a um arranjo cilíndrico de hidrofones.

Palavras-chave: *beamforming no domínio da frequência, DoA, arranjo cilíndrico de hidrofones.*

Abstract: *This work aims to compare two methods of employment of the delay-and-sum beamforming technique. In applications where an accurate estimation of the direction of arrival (DoA) of a source is desirable, and a real-time processing is required, one pursues the balance between runtime and the precision achieved while determining the source location. A qualitative analysis of the frequency-domain beamforming reveals a greater runtime in comparison to the time-domain beamforming, due to the greater number of multiplications of the signal by the time-delay matrix. On the other hand, the truncation of samples in time-domain beamforming might spoil the DoA information present in the signal. Therefore, the goal is to compare directivity, runtime and accuracy of both implementations applied to a cylindrical array of hydrophones (CHA).*

Keywords: *cylindrical hydrophone array; beam-forming; estimators.*

1. Introdução

A estimação da direção de chegada de múltiplas fontes de sinais é um problema clássico em processamento de arranjo de sensores. As primeiras tentativas de executar um processamento espaço-tempo de dados amostrados de um arranjo foram por meio de filtragem espacial ou *beamforming*. Assim, desde a Segunda Guerra até os dias atuais, diversas técnicas foram desenvolvidas e aperfeiçoadas, tais como os *beamformers* convencionais (atraso-e-soma), adaptativos, métodos baseados em subspaços e os métodos paramétricos[1].

Apesar da aplicação das técnicas de *beamforming* ter se iniciado provavelmente na área militar—especificamente com o sonar e radar— a introdução do *beamforming* em áreas tais como comunicação móvel, imageamento remoto, exploração geofísica, astronomia e biomédica levou, nas últimas décadas, a um intenso incremento nas pesquisas [2]. Devido às pesquisas militares geralmente serem sigilosas, o que restringia o número de trabalhos disponíveis no passado, a aplicação de técnicas de *beamforming* no meio civil pode justificar o maior número de publicações encontradas recentemente.

Ainda que as diversas técnicas para estimação da direção de chegada propiciem maior acurácia, elas exigem uma alta carga computacional. Além disso, grande parte dos métodos de DoA fornecem como saída energia versus marcação – o que é importante para a detecção e acompanhamento de fontes. No entanto, para um sistema sonar o áudio referente à marcação também deve ser gerado. Desta forma, ainda que se empregue um método de DoA de alta-resolução é comum na maioria dos sonares se adotar a técnica convencional de atraso-e-soma [3].

Sendo em geral o *beamforming* convencional amplamente empregado [4], este trabalho se propõe a estudar dois modos de implementação do atraso-e-soma. Em [5], é citado o problema do *beamforming* implementado no domínio do tempo, onde é demonstrada a necessidade de uma alta taxa de amostragem dos sinais coletados para minimizar a degradação dos lóbulos laterais e da máxima resposta direcional. No entanto, em [5] não é apresentada uma comparação em termos de resposta da DoA com a frequência, nem é analisado o tempo de processamento.

Em [6] e [7] mostra-se uma implementação do atraso-e-soma, no domínio da frequência para localização de fontes. Nestes trabalhos, o *beamforming* convencional é aplicado como pré-processamento, ou *pre-steering* [8], para métodos adaptativos. Contudo, nestes trabalhos não são realizadas comparações com o método no domínio do tempo.

Desta forma, o objetivo deste estudo é comparar parâmetros de diretividade e tempo de processamento a partir dos resultados da DoA de alvos simulados. Além disso, se pode verificar algumas vantagens e desvantagens de cada método associado especificamente a um sistema sonar.

2. Atraso-e-Soma no Domínio do Tempo

O *beamforming* atraso-e-soma se baseia no conceito de a interferência destrutiva de sinais desalinhados no tempo tender a anulá-los quando somados. Por outro lado, a soma desses sinais será maior quanto melhor for o alinhamento temporal entre eles [9]. O ângulo cujo atraso maximiza a energia na saída do filtro corresponde ao ângulo de incidência da frente de onda. Pode-se perceber que a função do *beamforming* é direcionar o ganho do arranjo na direção de um alvo, estimando a sua direção em relação ao eixo do arranjo.

A equação que representa o *beamforming* é dada por:

$$B_m(k) = \sum_{p=0}^{M-1} w_p s_p(k - \tau_{m,p}) \quad (1)$$

onde w_p são pesos, s_p é o sinal do sensor p e $\tau_{m,p}$ é o atraso do m -ésimo feixe aplicado ao sensor p expresso pelo inteiro mais próximo.

Dada a Equação 1, observa-se um possível erro relacionado aos atrasos desta técnica, já que estes são inteiros e podem não representar adequadamente a fase a ser atrasada para o alinhamento do sinal.

A partir da Figura 1, calcula-se o atraso do i -ésimo hidrofone para um setor de arranjo circular aplicando a técnica de projeção de corda apresentada em [6],[7] e [10].

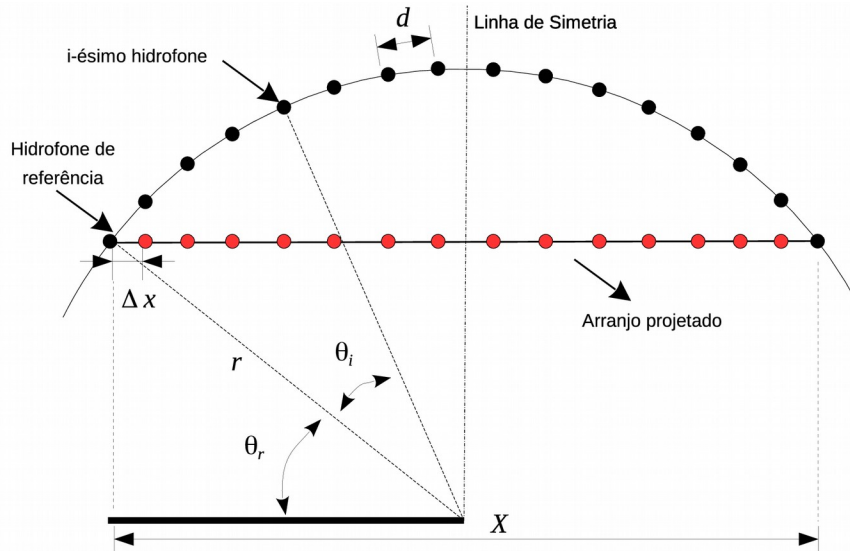


Figura 1: Geometria para o cálculo dos atrasos (baseado em 9)

Este atraso, representado por amostras temporais, é dado por

$$n_i = \left\{ r \frac{\sin(\theta_i + \theta_r) - \sin(\theta_r)}{c} f_a \right\}, \quad (2)$$

onde f_a é a frequência de amostragem, $\{.\}$ é a função de arredondamento para o inteiro mais próximo, θ_i e θ_r são os ângulos dos hidrofones i e da referência r e c é a velocidade de propagação no meio.

Considerando uma onda plana incidente em um dos arcos do arranjo circular, consistindo de um tom puro f_c , quando $f_a \gg f_c$ o valor de n_i , calculado na Equação 2, não causará erros consideráveis ao se atrasar as amostras para que os sensores entrem em fase. Chega-se a esta conclusão pelo fato de haver muitos valores amostrados da onda durante um ciclo, fazendo com que, n_i/f_a seja próximo ao atraso necessário para alinhar os sinais.

O problema ocorre quando f_a é da mesma ordem de f_c . Neste caso, a aproximação para um inteiro mais próximo pode causar um erro significativo. Assim, para uma onda sonora limitada em banda, o conhecimento da componente de maior frequência f_{super} e da frequência de amostragem é extremamente importante.

Uma das técnicas aplicadas para resolver o erro relacionado à amostragem é a interpolação. Nesta técnica, aumenta-se artificialmente a taxa de amostragem por um fator L . Assim, a nova frequência de amostragem é dada por $\hat{f}_a = L f_a$. O valor de L deve ser escolhido de forma a atender à condição $\hat{f}_a \gg f_{super}$.

Apesar da técnica de interpolação resolver o problema em questão, existe um compromisso ao se aumentar o valor de L . Quando L é aumentado, minimiza-se o erro com relação à fase, no entanto aumenta-se a carga computacional [11]. Desta forma, uma técnica diversa de aplicação de *beamforming* atraso-e-soma, que evita a interpolação foi proposta, sendo implementada no domínio da frequência.

3. Atraso-e-Soma no Domínio da Frequência

Um método alternativo para contornar a necessidade de interpolação é o processo de formação de feixes no domínio da frequência. Nesta técnica os atrasos complexos são introduzidos no domínio da frequência, pela aplicação da transformada de Fourier ao sinal do arranjo. Ao final do processo o sinal conformado é reconvertido ao domínio temporal pela transformada inversa de Fourier.

Para um arranjo circular uniformemente espaçado, a equação que representa o *beamforming* para um único tom de frequência é dada por [5]:

$$B_m(k) = \sum_{p=0}^{M-1} s_p w_{m-p} e^{-j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(2\pi \frac{m-p}{M}\right)} \quad (3)$$

onde R é o raio, w_{m-p} são os pesos dos sensores de um arco e s_p é o sinal do sensor p . Os pesos e a exponencial complexa podem ser representados em termos de uma transformada discreta de Fourier:

$$w_{m-p} e^{-j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(2\pi \frac{m-p}{M}\right)} = \sum_{q=0}^{M-1} C_q e^{+j \frac{2\pi q(m-p)}{M}} \quad (4)$$

onde:

$$C_q = DFT \left[w_{m-p} e^{-j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\left(2\pi \frac{m-p}{M}\right)} \right] \quad (5)$$

Substituindo a Equação 4 em 3 obtém-se:

$$B_m(k) = \sum_{q=0}^{M-1} C_q \sum_{p=0}^{M-1} s_p e^{+j \frac{2\pi(qm-qp)}{M}} = \sum_{q=0}^{M-1} C_q s_q e^{j \frac{2\pi qm}{M}} = IDFT [C_q s_q] \quad (6)$$

onde:

$$s_q = DFT [s_p] \quad (7)$$

Para a realização do *beamforming* em banda-larga, uma técnica adotada é se empregar N formadores de feixes de banda estreita [11]. Assim, o atraso de fase é realizado para cada componente de frequência.

Uma implementação deste método para o arranjo circular pode ser realizado utilizando as seguintes etapas [3]:

1. Amostra-se o sinal e aplica-se a FFT;
2. Ordenam-se os sensores da seção desejada;
3. Exclui-se metade dos bins (por conta da simetria da FFT);
4. Seleciona-se uma banda de interesse e multiplica tal sinal pelo atraso correspondente à distância até a corda e a banda selecionada;
5. Completa-se o sinal com zeros
6. Aplica-se a IFFT e multiplica-se pelo fator de diretividade, somando-se em seguida o sinal; e
7. Calcula-se a energia, selecionando-se uma janela específica.

Apesar do dispensável uso da interpolação, percebe-se que, conforme a largura da banda em análise, a matriz de atrasos complexos pode se tornar grande o suficiente para que o

método tenha relativa complexidade computacional, o que anularia a sua vantagem em relação ao método no domínio do tempo.

4. Simulações e Resultados

A comparação entre as DoA's utilizando os métodos de *beamforming* nos domínios do tempo e frequência é realizada a partir do uso de uma fonte simulada incidindo em um arranjo de 32 sensores. O modelo de fonte é dado segundo [12] já que o arranjo cilíndrico de hidrofones é caracterizado com *staves* direcionais [9].

A Figura 2 ilustra a representação do arranjo e os sinais incidentes de acordo com o ganho direcional do arranjo.

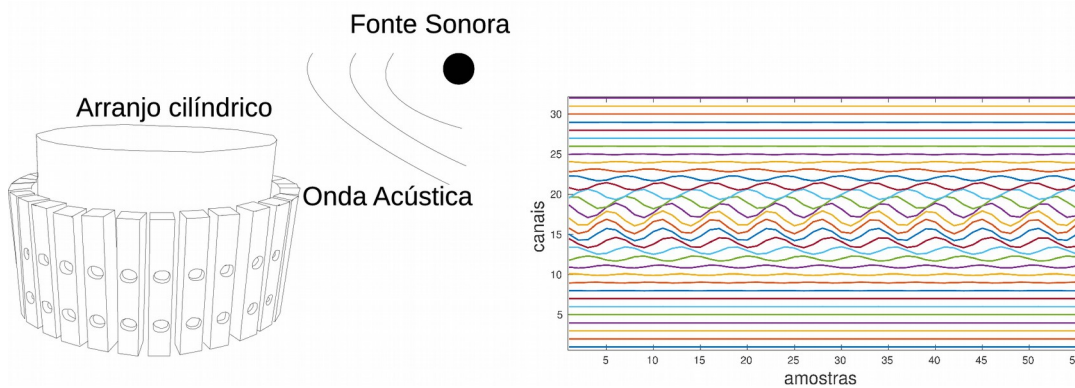


Figura 2: Arranjo cilíndrico de hidrofones e sinal simulado incidente

O valor da frequência máxima de operação do arranjo pode ser calculado de acordo com [7], resultando em $f_{super} < \frac{c}{2*d} < 7,5 kHz$. Assim, um filtro deve ser aplicado ao sinal, a fim de evitar o aparecimento dos denominados *aliasing* espacial ou *grating-lobes* [13]. A frequência de amostragem do sinal gerado é de 31,25kHz para que a análise realizada possa ser aplicada aos dados reais coletados nesta frequência.

A Figura 3 apresenta a energia na saída do *beamforming* para a simulação de uma fonte incidindo a -10° em relação ao eixo do arranjo cilíndrico.

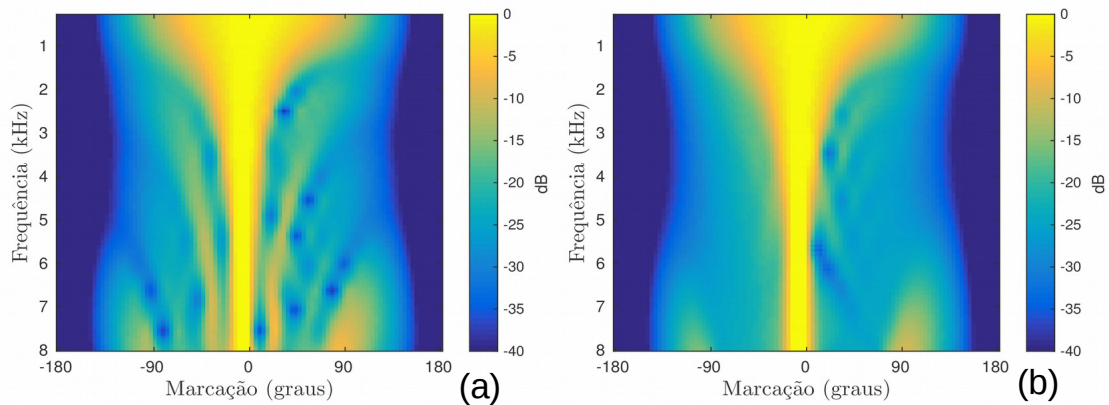


Figura 3: DoA para frequência de 0,3 a 8kHz

Na Figura 3 pode-se perceber o efeito da variação da frequência na DoA, onde, para as frequências baixas a discriminação direcional do arranjo é baixa. Com o aumento da frequência nota-se a melhora da discriminação espacial do arranjo. Para a Figura 3 (a), tem-se o *beamforming* no domínio do tempo. Percebe-se em (a) que além do lóbulo principal, aparecem lóbulos secundários que aumentam de intensidade ao se aumentar a frequência. Este é um efeito do erro relacionado ao truncamento das amostras [5]. Nota-se que a presença dos lóbulos secundários é intensificada a partir de 6 kHz. Neste caso, a frequência de amostragem é cinco vezes seu valor. Além disso, a partir de 7 kHz inicia-se um efeito de *aliasing* espacial, onde lóbulos adicionais aos secundários começam a surgir em -90° e 90° . Este efeito é devido a características geométricas do arranjo, sendo intensificado pelo erro do truncamento.

Em (b), é apresentada a saída do *beamforming* para a implementação do método no domínio da frequência, para a banda de 300Hz a 8kHz. Nesta figura pode-se notar a ausência dos lóbulos secundários. O efeito do *aliasing* espacial também ocorre devido às limitações geométricas do arranjo.

Analisando-se apenas os parâmetros direcionais do arranjo, o uso do *beamforming* no domínio da frequência se mostra mais adequado que no domínio do tempo. No entanto, quando o requisito de processamento em tempo real é exigido, fica-se limitado à implementação que exija menor carga computacional. Assim, será realizada uma análise de tempo de processamento de forma numérica utilizando a ferramenta de “*profile*” do Matlab. Esta ferramenta mede cada função e seu tempo de processamento de acordo com o *clock* do computador.

Será medido o erro entre as saídas do *beamforming* nos domínios do tempo e da frequência para a frequência máxima de operação—o que equivale à diferença entre as saídas. Toma-se como padrão a saída do *beamforming* no domínio da frequência, uma vez que este não apresentou lóbulos secundários. A fim de se realizar uma estatística do tempo gasto pelos processos, serão efetuadas 50 realizações, com variação angular da onda incidente em 10° em torno do ângulo de 0° .

A Figura 4 apresenta a relação do erro entre o *beamforming* no domínio do tempo e o *beamforming* no domínio da frequência, à medida em que é aumentada a taxa de amostragem do sinal gerado (número N Interpolação).

Nota-se que a implementação no domínio do tempo, sem realizar a interpolação (N Interpolação = 1) é cinco vezes mais rápida que no domínio da frequência, no entanto gera um erro que é até 20 dB superior (erro este relacionado à presença do lóbulo secundário).

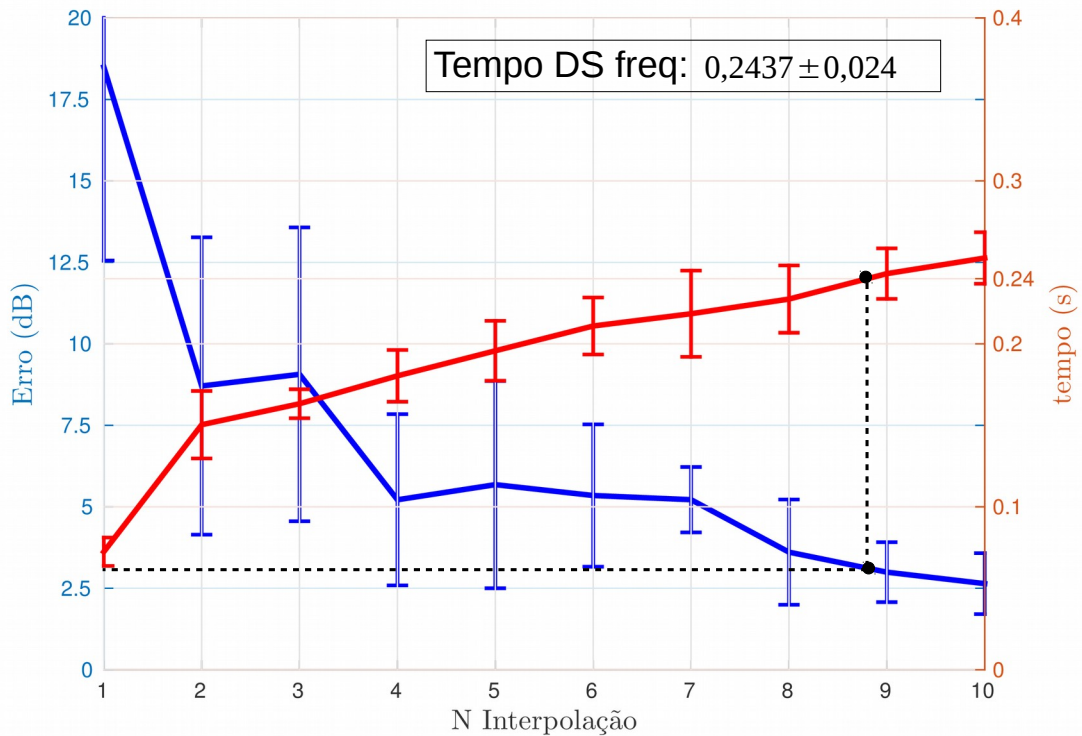


Figura 4: Erro x Interpolação x tempo

Nesta figura, nota-se o incremento de tempo ao aumentar a taxa de amostragem para o *beamforming* no domínio do tempo. Percebe-se que interpolando o sinal em cerca de 9 vezes, o *beamforming* no tempo alcança erro de 3dB e tem tempo próximo ao domínio da frequência. Esta é a equivalência de tempo entre as implementações, que neste caso, favoreceria a escolha pelo domínio da frequência. Vale ressaltar que 3dB na região de lóbulos laterais é um erro pequeno, já que esta região está em torno de 25dB do lóbulo principal (vide Figura 3).

Uma opção intermediária seria escolher um tempo menor de processamento interpolando apenas em quatro vezes, o que causaria um erro próximo a 5 dB – que eventualmente pode ser aceitável.

Entre as vantagens do domínio do tempo, pode-se citar a simplicidade de implementação e o baixo custo computacional, caso haja tolerância a erro. Além disso,

não é necessário a escolha de uma banda de frequência específica, como ocorre no domínio da frequência.

O *beamforming* no domínio da frequência apresenta a vantagem de minimizar os erros provenientes do truncamento do sinal. Além disso, pode-se perceber que sua implementação gera resultados mais acurados mesmo ao interpolar o sinal no domínio do tempo.

5. Conclusões

Este estudo visou analisar dois modos de implementação do *beamforming*, um no domínio do tempo e outro no domínio da frequência. Ele permitiu verificar a relação entre tempo de execução dos algoritmos, onde as características simuladas são baseadas em um sistema desenvolvido pela Marinha do Brasil.

O *beamforming* no domínio do tempo é uma implementação simples e apresenta resultados que podem atender aos requisitos de baixa carga computacional. Esta implementação apresenta erros de truncamento das amostras que resulta no surgimento de lóbulos secundários, que por sua vez degradam a DoA. Uma alternativa para diminuir este efeito é dada pela interpolação do sinal, o que melhora sua acurácia, despendendo menos tempo que no *beamforming* no domínio da frequência.

O *beamforming* no domínio da frequência tem a vantagem de minimizar erros de truncamento das amostras. No entanto, pelo fato de sua implementação ser dada por N -*beamformers* de banda estreita, possui um custo computacional alto, mas com o benefício de atenuação dos lóbulos secundários. Quando existe a disponibilidade de carga computacional, esta é uma implementação que pode trazer melhores resultados.

6. Bibliografia

[1] Krim, Hamid, and Mats Viberg. "Two decades of array signal processing research: the parametric approach." *IEEE Signal processing magazine* 13.4 (1996): 67-94.

[2] Jackson, Brad R., et al. "Direction of arrival estimation using directive antennas in uniform circular arrays." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 63.2 (2015): 736-747.

[3] Li, Qihu. *Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications*. Springer Science & Business Media, 2012.

[4] T. Yardibi, C. Bahr, N. Zawodny, F. Liu, L.N. Cattafesta III, J. Li, Uncertainty analysis of the standard delay-and-sum beamformer and array calibration, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 329, Issue 13, 21 June 2010, Pages 2654-2682, ISSN 0022-460X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2010.01.014>.

- [5] DeMuth, G. "Frequency domain beamforming techniques." *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'77.* Vol. 2. IEEE, 1977.
- [6] Rodrigues P. S. Márcio, "Estudo e Análise de Métodos Empregados em Array Cilíndrico Passivo para Determinação da Direção de Fontes Sonoras", Dissertação Mestrado – COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- [7] Felzky A. Marcelo, "Uma Contribuição às Técnicas de Localização de Fontes Sonoras Através de um Sistema Sonar Passivo Utilizando Filtros Fracionários", Dissertação Mestrado – COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- [8] Ebrahimi, Reza, and Saeid R. Seydnejad. "Elimination of pre-steering delays in space-time broadband beamforming using frequency domain constraints." *IEEE Communications Letters* 17.4 (2013): 769-772.
- [9] Bozzi A. Fabricio, "Conformação de Feixe em Sonar Passivo para um Arranjo Cilíndrico de Hidrofonos", Dissertação Mestrado – COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.
- [10] Bozzi A. Fabricio, Moura. N.J. ; Seixas M.J. . "Estudo da Estimação de Sinais de um Arranjo Cilíndrico de Hidrofonos". Encontro de Tecnologia Submarina, 2014, Rio de Janeiro. XI Encontro de Tecnologia Submarina, 2014.
- [10] Diniz, Paulo SR, Eduardo AB da Silva, and Sergio L. Netto. *Processamento Digital de Sinais-: Projeto e Análise de Sistemas*. Bookman Editora, 2014.
- [11] Krishnaveni, V., T. Kesavamurthy, and B. Aparna. "Beamforming for direction-of-arrival (DOA) estimation-a survey." *International Journal of Computer Applications* 61.11 (2013).
- [12] Jackson, Brad R., et al. "Direction of arrival estimation using directive antennas in uniform circular arrays." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 63.2 (2015): 736-747.
- [13] Van Trees, Harry L. *Detection, estimation, and modulation theory, optimum array processing*. John Wiley & Sons, 2004.