

Estimação de Ângulo de Chegada de Sinais de Áudio por Método Não Paramétrico Clássico

Carlos A. de Lima Filho, Matheus F. de S. Dória, Danilo de S. Pena, Allan de M. Martins, Vicente A. de Sousa Jr.

Resumo— Este artigo apresenta a avaliação de desempenho de um método não paramétrico clássico para estimação de ângulo de chegada para ondas acústicas. Por meio do periodograma é estimado a densidade espectral, que determina a frequência dominante da fonte. Posteriormente, essa informação é utilizada para determinar o ângulo de chegada do sinal recebido. O desempenho do método foi analisado e comparado para dados sintéticos e reais, obtidos a partir de um *setup* de medição próprio. Os resultados de validação com sinais sintéticos indicam, como esperado, um comportamento decrescente do erro médio quadrático da estimação do ângulo ao se aumentar a SNR do sinal recebido. Já para os dados experimentais, o desempenho satisfatório do método de estimação advoga a favor de sua utilização para validação de medições reais.

Palavras-Chave— Ângulo de chegada, Estimação não-paramétrica, Periodograma, Acústica.

Abstract— This paper presents a performance evaluation of a classical non-parametric method for angle of arrival estimation for acoustic waves. The Periodogram technique is used in order to estimate the power spectral density, which determines the dominant frequency of the source. With this information, the angle of arrival of the received signal is determined. The performance of the method is analyzed and compared using simulated data, and real data obtained from a own measurement setup. The validation results with simulated signals indicate, as expected, a decreasing behavior of the mean square error of angle estimation when increasing the SNR of received signal. As for the experimental data, the satisfactory performance of the estimation method claims its use for the validation of real measurements.

Keywords— Angle of arrival, Non-parametric estimation, Periodogram, Acoustics.

I. INTRODUÇÃO

A estimação da localização de fontes emissoras de sinais acústicos é um problema que interessa a comunidade acadêmica e industrial e, é estudado por décadas [1]. Isso se deve a uma gama de aplicações em comunicações, segurança, rastreamento, teleconferência, sistemas militares, aparelhos auditivos, dispositivos *hands-free*, robôs interativos e os recentes *smart speakers* [2]–[6].

Recentemente, a União Internacional de Telecomunicações (ITU) lançou uma série de documentos [7] com sua visão dos requisitos para os sistemas 5G, o qual está sendo chamado de IMT (*International Mobile Telecommunications*) for 2020 and beyond. O 5G permitirá o crescimento de dispositivos conectados, incluindo a capacidade de se comunicarem entre si. O uso de ondas milimétricas (portadoras entre 30 e

300 GHz) e múltiplas antenas, tanto no transmissor quanto no receptor, habilita tais sistemas a atingir taxas de transmissão na ordem de 20 Gbps, explorando o potencial das técnicas de *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) [8]–[10]. Entre os novos serviços do 5G, se destacam o URLLC (*Ultra-Reliable and Low Latency Communications*) e o mMTC (*massive Machine Type Communciation*) [7]. Enquanto o URLLC popularizará o uso de drones e carros conectados e autônomos (por meio do sistema Celular-V2X (*Vehicular-to-Everything communication*) [11]), o mMTC promoverá a conexão de bilhões de dispositivos, formando uma rede de sensores (entre eles, sensores de voz) capaz de viabilizar diversas aplicações de IoT (*Internet of Things*) e Indústria 4.0. Nesse contexto, técnicas de LoT (*Location of Things*) [12] serão habilitadoras essenciais para tornar tais sistemas uma realidade comercial. Por exemplo, para sistemas MIMO é essencial a estimação de canal, tanto no transmissor quanto no receptor. Já para o V2X, técnicas de gerência de recursos de rádio necessitarão de exatidão na localização dos veículos para garantir disponibilidade irrestrita da conexão. No caso de aplicações de mMTC, a localização dos sensores fixos e móveis poderá ser a finalidade ou o meio de atingir a qualidade de serviço desejada. Essa diversidade de aplicações faz com que estimação de ângulo de chegada (*Direction-of-Arrival*, DOA) seja explorada de diferentes maneiras e soluções, surgindo uma variação de métodos, paramétricos e não paramétricos, e a necessidade de mais estudos de análise de valor agregado das soluções propostas e existentes [4], [13].

Outra gama de produtos e serviços, relacionados com a estimação de ângulo de chegada, está sendo popularizada pelos alto-falantes inteligentes (*smart speakers*). A Google, a Amazon e a fabricante chinesa LingLong comercializam o Google Home [14], o Amazon Echo Dot [15] e o DingDong [16], respectivamente. Algoritmos de reconhecimento de voz, de tradução, de automação residencial e de assistência digital (acesso a e-mails, *player* de músicas e etc) são embarcados em tais dispositivos, os tornando fortes candidatos a serem fenômenos de venda entre os *gadgets*. Outras empresas, tais como a Acoustic Magic que comercializa o *The Voice Tracker*TM [17], apostam no mercado de arranjo de microfones otimizado para serviços de vídeo conferência, gravação de conteúdo didático em colégios e universidades, sistema de telemedicina e reconhecimento de voz, automação residencial por comandos de voz e serviços de assistência digital.

Motivado pelos desafios e as aplicações descritos anteriormente, este artigo apresenta uma avaliação de desempenho de um método não paramétrico clássico para estimação de ângulo de chegada para ondas acústicas sintéticas e medidas.

Os autores Carlos A. de Lima Filho, Matheus F. de S. Dória e Vicente A. de Sousa Jr. são do Departamento de Engenharia de Comunicações (DCO), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN, Brasil, e-mails: carlos.gppcom@gmail.com, matheusf.gppcom@gmail.com, vicente.gppcom@gmail.com. O autor Allan de M. Martins pertence ao Departamento de Engenharia de Computação e Automação (DCA), da UFRN, e-mail: allan@dca.ufrn.br. Os autores Danilo de S. Pena (danilo.gppcom@gmail.com), Allan de M. Martins e Vicente A. de Sousa Jr. pertencem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPgEEC), da UFRN.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

A utilização de métodos paramétricos para estimação de DOA necessitam de suposições e conhecimento sobre o ambiente em que os dados foram coletados. Por outro lado, caso desconheça-se o ambiente, os métodos não paramétricos são mais eficazes [18]. Esses métodos baseiam-se na utilização de um arranjo de microfones para realizar a estimação do ângulo de chegada do sinal e experimentos reais confirmam sua eficácia [19], [20].

O arranjo de microfones tem um papel importante na estimação de DOA, facilitando ou dificultando a tarefa de discriminar os espaços do sinal e do ruído [1]. Diferentes configurações de arranjos são explorados em estimação de DOA, como a disposição em *L-shaped* [21], o arranjo circular uniforme (*Uniform Circular Array*, UCA) [22], o arranjo retangular uniforme (*Uniform Rectangular Array*, URA) [23] e, similar ao método utilizado neste artigo, o arranjo linear uniforme (*Uniform Linear Array*, ULA) [24]. O ULA foi escolhido por representar um arranjo clássico para esse tipo de aplicação.

Além de aplicados a estimação de DOA, métodos de estimação não paramétricos são aplicados em problemas da área de comunicação sem fio, como por exemplo, em rádio cognitivo [25], [26]. Métodos não paramétricos de estimação são discutidos em [13], [27]. Os autores indicam que a análise em ambientes desconhecidos é de demasiada importância para sistemas de localização.

Este artigo apresenta o desempenho da técnica clássica de estimação de DOA baseada em periodograma, o qual se destaca por sua simplicidade. A técnica de estimação foi calibrada utilizando um sinal sintético gerado por simulação. Em seguida, baseado nas recomendações da análise de estado da arte realizada, o desempenho da estimação foi avaliado em um sinal real. As medições foram realizadas no Complexo Tecnológico de Engenharia (CTEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O prédio do CTEC contém 4 pavimentos compostos por salas, laboratórios, auditórios e dispõe de um sistema de vedação estrutural variado, além de conter um fosso central, comum em shoppings, caracterizado como um cenário *indoor* diversificado, bem similar ao cenário *Dual-stripe* definido pelo 3GPP [28]. Dessa forma, esse cenário é representativo do uso do arranjo de microfones para aplicações em ambientes universitários e condomínios residenciais, sendo um diferencial deste artigo.

O artigo foi organizado como a seguir. A seção III apresenta a modelagem do sistema, principalmente no tocante ao problema de estimação de DOA. Enquanto na Seção IV apresenta o estimador não paramétrico clássico utilizado, a Seção V disserta sobre a geração do sinal sintético e o *setup* de medição do sinal real. Os resultados são apresentados e discutidos na Seção VI, seguida da Seção VII, com as conclusões e trabalhos futuros.

III. MODELAGEM DO SISTEMA

Um dispositivo de estimação de DOA tem o objetivo de estimar a direção de chegada de um sinal em um ponto de recepção. Geralmente, um sistema de estimação de DOA é baseado no uso de um arranjo de sensores igualmente espaçados acoplado a um módulo de processamento de sinais, que pode se valer da informação de fase dos sinais captados pelos sensores para realizar a estimação.

Este trabalho aborda a recepção de ondas acústicas utilizando um arranjo de microfones (sensores). O sinal transmitido intercepta os microfones em tempos distintos, gerando um atraso de captação do sinal entre um microfone e outro, realizando assim uma amostragem espacial. Esses atrasos dependem da direção em que se encontra a fonte do sinal e, para um arranjo com geometria conhecida, existem diversos métodos que processam essas informações para determinar a direção [29].

Como ilustrado na Fig. 1, assumindo que se trata de campo distante, o sinal acústico chega ao arranjo de microfones como uma frente de onda plana, formando um ângulo θ em relação ao arranjo (formado pelos microfones m_1 até m_M).

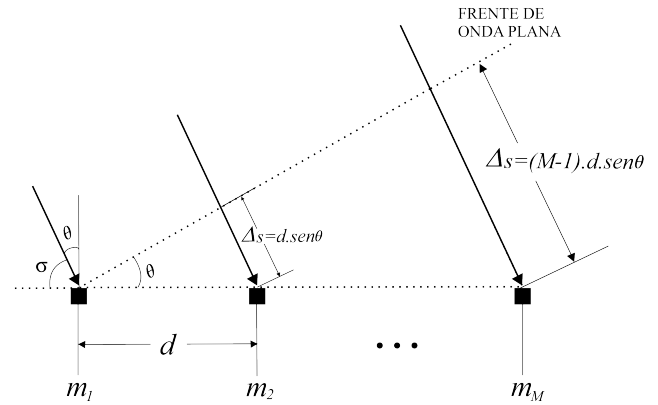


Fig. 1. Chegada da onda acústica no arranjo de microfones.

O atraso de tempo que a onda leva para percorrer a distância Δs , indicada na Fig. 1, é dado pela equação (1):

$$\Delta t = \frac{d \cdot \sin(\theta)}{\mu}, \quad (1)$$

em que d é a distância entre cada microfone subsequente, e θ é o ângulo de chegada, ambos ilustrados na Fig. 1. A velocidade de propagação do som no ar (μ) é aproximadamente conhecida e considerada constante. Dessa maneira é possível obter o atraso do sinal em segundos. Para obter o atraso do sinal em radiano, multiplica-se os dois lados da equação pela frequência angular (ω) e tem-se:

$$\tau = \Delta t \cdot \omega = \frac{d \cdot \sin(\theta) \cdot \omega}{\mu}, \quad (2)$$

em que τ é o atraso de chegada do sinal em radianos, e ω é a frequência angular obtida a partir de estimação espectral (seleção da frequência dominante).

IV. ESTIMADOR NÃO PARAMÉTRICO CLÁSSICO

A técnica de estimação de DOA usada neste artigo utiliza o periodograma para estimar a densidade espectral de potência dos sinais de cada microfone. Em seguida, a seleção de frequência dominante é realizada tomando-se o valor máximo do periodograma. A frequência dominante pode ser mapeado em fase por meio do espectro de fase do sinal. Finalmente, é possível calcular as diferenças de fases. Esta técnica destaca-se pela simplicidade, sendo uma boa candidata para sinais determinísticos, como o tom de 1 kHz utilizado neste trabalho.

O algoritmo para a estimação do atraso τ e, consequentemente, do ângulo de chegada, é ilustrado

no diagrama de blocos da Fig. 2. O sinal atinge os microfones e é adquirido pelo ADC. No bloco seguinte é estimado o espectro com o uso do Periodograma e a seleção de frequência dominante, então, obtida a diferença de fase. Realiza-se o procedimento para os demais microfones e assim obtêm-se as diferenças de fase, em relação ao primeiro microfone, utilizadas para o cálculo do ângulo de chegada.

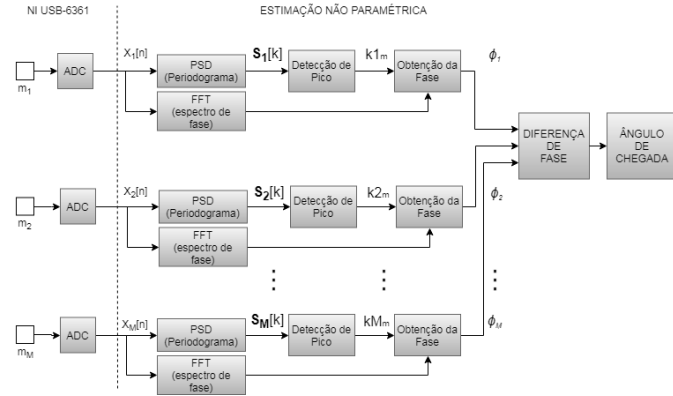


Fig. 2. Diagrama de blocos do método de estimação de DOA.

A. Periodograma

Entre outras informações, o periodograma pode ser utilizado para identificar as frequências significativas de um sinal em termos de potência [30], [31]. Neste artigo, o objetivo é encontrar a frequência do sinal emitido pela fonte (um tom de 1 kHz).

O periodograma é obtido pela autocorrelação janelada do sinal, como mostrado na equação (3):

$$r[k] = \frac{1}{L} \cdot \sum_{n=0}^{L-1} x[n] \cdot x[n+k] \cdot w[n] \cdot w[n+k] \quad (3)$$

em que $x[n]$ é o sinal recebido no sensor, e $w[n]$ é uma janela usada para redução da variância do estimador. Neste trabalho, foi usado uma janela retangular.

Finalmente, a PSD pode ser estimada pela transformada de Fourier da autocorrelação, como:

$$S[k] = \frac{1}{L} \cdot \left| \sum_k r[k] \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi k n}{L}} \right|^2 \quad (4)$$

B. Seleção de Frequência Dominante

A partir da PSD estimada, como descrito na seção anterior, pode ser realizada a seleção da frequência dominante de acordo com a equação (5):

$$k_m = \arg \max_k (S[k]), \quad (5)$$

em que

$$\omega = \frac{2\pi k_m}{L}. \quad (6)$$

Conhecendo a frequência dominante do sinal, pode-se consultar espectro de fase do sinal, e obter a fase (ϕ_n) correspondente ao microfone n [32].

C. Estimação do Ângulo de Chegada

Realizando os passos apresentados até o momento, é possível estimar a fase de cada microfone do arranjo. Como ilustrado na Fig. 3, a diferença de fase τ_n de cada microfone em relação ao primeiro pode ser calculada como:

$$\tau_n = \phi_n - \phi_1. \quad (7)$$

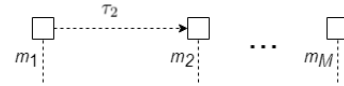


Fig. 3. Atraso entre microfones.

Para obter um valor mais preciso da diferença de fase, calcula-se um τ relacionado com todos os microfones, como a seguir:

$$\tau = \frac{1}{M-1} \sum_{n=2}^M \frac{\tau_n}{n-1}. \quad (8)$$

Para obter a estimação do ângulo de chegada do sinal, isola-se θ da Equação (2), resultando em:

$$\sigma = 90 - \arcsin \left(\frac{\tau \cdot \mu}{d \cdot \omega} \right), \quad (9)$$

em que σ é o ângulo de chegada do sinal em relação ao eixo do arranjo de microfones, como ilustrado na Fig. 1.

V. SINAIS SIMULADOS E SETUP DE MEDIÇÃO

O estimador discutido na seção anterior foi implementado em software, validado com sinais sintéticos e testado em um sinal acústico real adquirido com um *setup* de medição próprio, mostrado na Fig. 4.

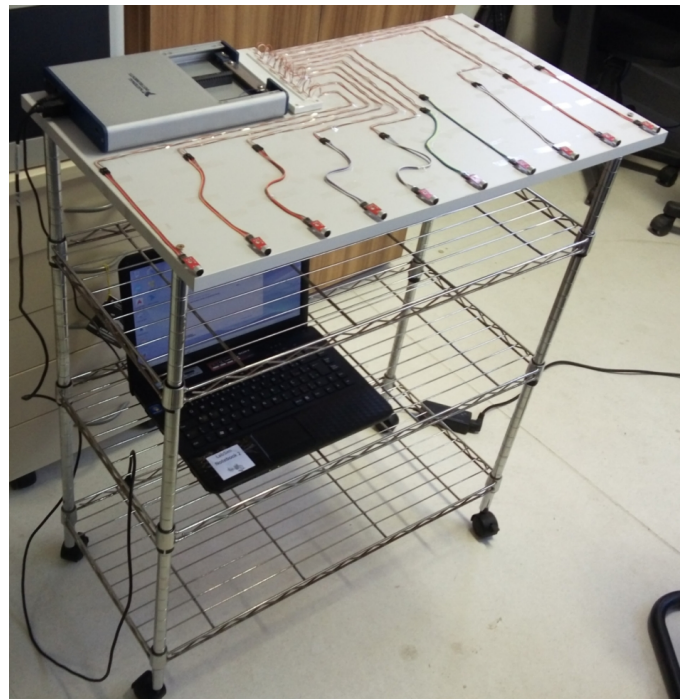


Fig. 4. Setup de aquisição de sinais.

A. Geração de sinais sintéticos

Um passo importante antes de realizar experimentos reais é a análise em ambiente simulado. Com os sinais sintéticos gerados no simulador, foi realizada uma análise do método proposto variando a Relação Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) do sinal recebido. O sinal sintético foi modelado como na Equação (10):

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{A}(\phi)\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t), \quad (10)$$

em que $\mathbf{S}(t)$ é o sinal emitido pela fonte, $\mathbf{N}(t)$ é o ruído adicionado ao sinal e $\mathbf{A}(\phi)$ representa o vetor de atraso dos microfones, escrito como nas Equações (11) e (12):

$$\mathbf{A}(\phi) = [\mathbf{a}(\phi_1), \mathbf{a}(\phi_2), \dots, \mathbf{a}(\phi_n)] \quad (11)$$

$$\mathbf{a}(\phi_n) = [1, e^{j\omega}, \dots, e^{j\omega(M-1)}]^T \quad (12)$$

B. Medição de sinais reais

O *setup* de medição (Fig. 4) foi composto dos seguintes equipamentos:

- Um aquisitor NI USB-6361 da National Instruments;
- Dez microfones FC-109;
- Um notebook Sony Vaio PCG-61A11X;
- Uma caixa de som JBL Flip 3.

Em uma mesa de 90 cm de altura, os 10 microfones foram organizados como um Arranjo Linear Uniforme (ULA), espaçados a uma distância $d = 8$ cm. Com a mesa parada em uma determinada posição, cada bateria de medição consistiu em posicionar a fonte sonora (Caixa JBL Flip 3) a uma distância predeterminada do primeiro microfone, com também 90 cm de altura em relação ao solo. A distância predeterminada entre a fonte e a mesa de medição respeita a definição de campo distante e estabelece uma linha de visada direta entre elas. O experimento realizado assumiu que a distância do primeiro microfone para a única fonte foi de 8 m, com ângulo de 30° . As medições foram realizadas em ambiente silencioso, evitando interferência cocanal, e possibilitando emular a presença somente de ruído.

Como descrito na Seção II, as medições foram realizadas em um local representativo do uso do arranjo de microfones para aplicações em ambientes universitários e condomínios residenciais, bem similar ao cenário *Dual-stripe* definido pelo 3GPP [28].

VI. RESULTADOS

Para construção das curvas de desempenho envolvendo os sinais sintéticos utilizou-se janelas de 400 amostras do sinal para construir o periodograma e estimar o ângulo. Assim, para melhor visualização das curvas, a janela foi deslocada 10000 vezes, gerando 10000 experimentos independentes de recepção do sinal e estimação do ângulo. Para os sinais medidos, a janela foi de 4000 amostras.

A. Validação com sinais sintéticos

A Fig. 5 mostra o periodograma com janela retangular para três sinais sintéticos sujeitos a SNR igual à 0, 5 e 15 dB. A principal observação é sobre o desempenho satisfatório do periodograma na estimação do pico espectral, resultando na

convergência do pico espectral para a frequência de 1 kHz para os três valores de SNR analisados. Esses gráficos são resultado da média dos periodogramas dos dez microfones do arranjo.

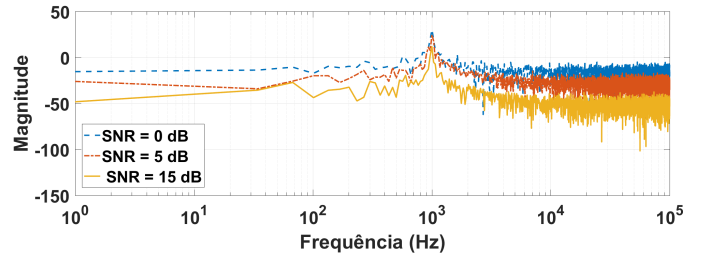


Fig. 5. Periodograma para dados sintéticos para SNR igual à 0, 5 e 15.

Outra abordagem para validação dos dados sintéticos foi realizar o cálculo do Erro Médio Quadrático (*Mean Squared Error*, MSE) entre o ângulo conhecido (usado para gerar o sinal da fonte) e o ângulo estimado. Para tal fim, a Fig. 6 mostra o MSE para alguns valores de SNR. Observando a figura, visualiza-se a diminuição do MSE ao passo que a SNR cresce, mostrando uma consistência qualitativa tanto na geração do sinal sintético quanto na implementação do periodograma.

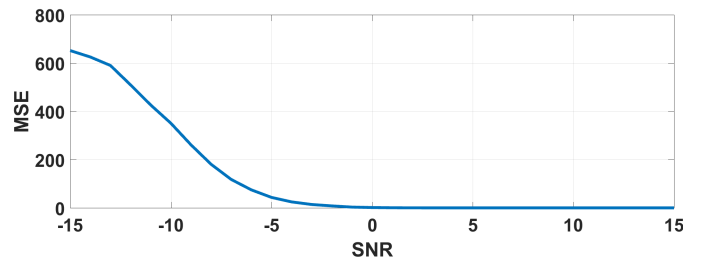


Fig. 6. MSE do ângulo com a variação da SNR (sinal sintético).

Finalmente, objetivando analisar a confiabilidade na estimação do ângulo, a Fig. 7 mostra a variância dos ângulos estimados nos 10000 experimentos envolvendo o sinal sintético. Mais uma vez se observou consistência com o decaimento da variância ao passo do crescimento da SNR.

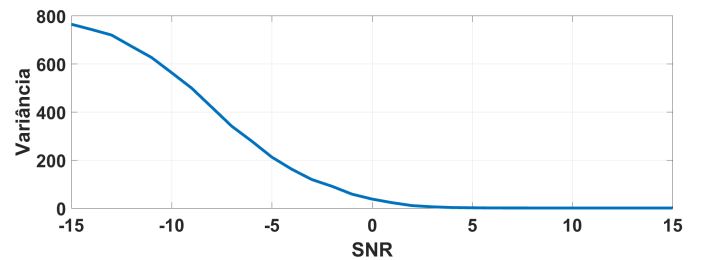


Fig. 7. Variância dos ângulos estimados (sinal sintético).

Considerando que o periodograma é um estimador simples e de baixo custo computacional, os resultados da simulação foram os esperados, obtendo um desempenho insatisfatório para SNRs baixas e resultados consistentes para SNRs altas.

B. Resultados Experimentais

A Fig. 8 mostra o resultado do periodograma médio considerando todos os microfones. É possível visualizar

a coerência dos resultados dos diversos microfones, que convergem para uma mesma frequência, mesmo quando o método de estimação é simples, como o periodograma.

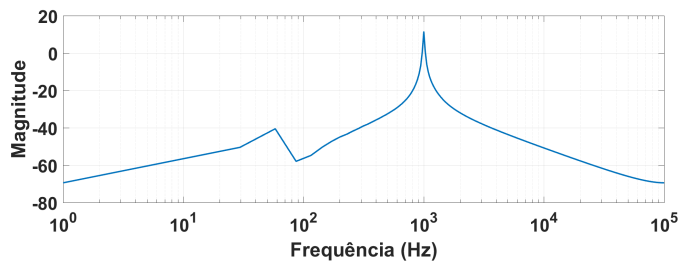


Fig. 8. Periodograma para dados reais.

De posse do espectro de fase do sinal e com estimação da frequência obtida pelo periodograma, a estimação do ângulo de chegada foi realizada e comparada com o ângulo da fonte (30°). O ângulo estimado foi de $31,6^\circ$ (média de todos os experimentos), mostrando a eficácia do método para os dados reais, pelo baixo MSE (2,81).

VII. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com as comparações realizadas, percebe-se que o periodograma utilizando janela retangular obteve um desempenho satisfatório para estimação da densidade espectral de potência para SNRs altas, possibilitando uma boa estimação de ângulo, e, como esperado, um resultado adverso para SNRs severas, afetando a precisão da estimação. Esse método pode ser uma boa escolha para validação de *setups* de medição, configurando o sinal da fonte em ângulos predefinidos e verificando, em situação de alta SNR, se o *setup* de aquisição não está causando desvios significativos na estimação de ângulo do periodograma.

A continuação deste trabalho considera o estudo de diferentes tipos de janelas aplicadas ao periodograma e a análise do impacto de cada uma na detecção de ângulo de chegada. Outro caminho de investigação é a aplicação de outros método de estimação em cenários mais desafiadores, como os que envolve interferência cocanal.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Benesty, J. Chen, and J. Dmochowski, "On Microphone-Array Beamforming From a MIMO Acoustic Signal Processing Perspective," vol. 15, no. 3, pp. 1053–1065, 2007.
- [2] C. Busso, S. Hernanz, C. W. Chu, S. I. Kwon, S. Lee, P. G. Georgiou, I. Cohen, and S. Narayanan, "Smart room: Participant and speaker localization and identification," *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, 2005.
- [3] Z. Yu and Y. Nakamura, "Smart meeting systems: A survey of state-of-the-art and open issues," *ACM Computing Surveys*, 2010.
- [4] K. Kowalczyk, O. Thiergart, M. Taseska, G. D. Galdo, V. Pulkki, and E. A. P. Habets, "Parametric Spatial Sound Processing," *IEEE Signal Processing Magazine*, 2015.
- [5] S. Astapov, J. Ehala, J. Berdnikova, and J. S. Preden, "Gunshot acoustic component localization with distributed circular microphone arrays," *International Conference on Digital Signal Processing, DSP*, 2015.
- [6] K. Kowalczyk, S. Wozniak, T. Chyrowicz, and R. Rumian, "Embedded system for acquisition and enhancement of audio signals," in *Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, 2016.
- [7] ITU-R, "Recommendation ITU-R M.2083-0: IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," ITU, Tech. Rep., 2015.
- [8] T. Wang, B. O. Ai, R. He, and Z. Zhong, "Two-Dimension Direction-of-Arrival Estimation for Massive MIMO Systems," *IEEE Access*, 2015.
- [9] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, 2014.
- [10] J. J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. S. Hanly, A. Lozano, A. A. C. K. Soong, and J. J. C. Zhang, "What will 5G be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014.
- [11] G. Americas, "5G americas white paper: Cellular V2X communications towards 5G," 5G Americas, Tech. Rep., 2018.
- [12] R. C. Shit, S. Sharma, D. Puthal, and A. Y. Zomaya, "Location of Things (LoT): A Review and Taxonomy of Sensors Localization in IoT Infrastructure," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2018.
- [13] S. Qin, Q. Wu, Y. D. Zhang, and M. G. Amin, "DOA estimation of nonparametric spreading spatial spectrum based on bayesian compressive sensing exploiting intra-task dependency," in *ICASSP*, 2015.
- [14] Google. (2018) Google Home Smart Speaker. [Online]. Available: <https://store.google.com/gb/product/google.home>
- [15] S. Wright, *Amazon Echo Dot: Amazon Dot Advanced User Guide: Step-by-Step Instructions to Enrich Your Smart Life!* CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.
- [16] J. D. Bateman. (2017) Behold China's Answer to Amazon Echo: The LingLong DingDong. [Online]. Available: <https://www.wired.com/2016/11/behold-chinas-answer-amazon-echo-linglong-dingdong/>
- [17] (2018) Acoustic Magic User Comments. Acoustic Magic. [Online]. Available: <https://www.acousticmagic.com/about-us/user-comments/>
- [18] C. B. A. Wael, N. Armi, and R. Sariningrum, "Wideband spectrum sensing using Welch periodogram in cognitive radio," in *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications (ICRAMET)*, 2015.
- [19] Y. Sun, X. Yang, L. Guo, and T. Long, "Experimental array signal processing demonstration system by utilizing microphone array," in *CIE International Conference on Radar (RADAR)*, 2016.
- [20] G. Li, X. Bao, and Z. Wang, "The design and implementation of a smartphone-based acoustic array system for DOA estimation," *Chinese Control Conference, CCC*, pp. 5416–5423, 2017.
- [21] S. Mazlout, M. B. Ben Salah, and A. Samet, "Performance analysis of 2-D DOA estimation using L-shaped array in scattered channel," in *International Symposium on Signal, Image, Video and Communications (ISIVC)*, 2016.
- [22] V. L. Do, T. B. Nguyen, V. K. Dao, and C. H. Nguyen, "Direction finding in multipath environments using moving uniform circular arrays," in *3rd International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP)*, 2017.
- [23] Y. Bin, H. Dongmei, and L. Su, "2D-DOA estimation for uniform rectangular array using noncircular HOSVD method," in *11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2016.
- [24] S. M. Alamoudi, M. A. Aldhaheri, S. A. Alawsh, and A. H. Muqaibel, "Sparse DOA estimation based on a shifted coprime array configuration," *Mediterranean Microwave Symposium*, pp. 4–7, 2017.
- [25] K. Shahzad, S. Saleem, W. Aziz, and Q. Islam, "Periodogram spectrum sensing using Blackman Tukey method in Matlab," *World Applied Sciences Journal*, vol. 21, no. 12, pp. 1729–1733, 2013.
- [26] H. Sarvanko, M. Mustonen, A. Hekkala, and M. Aarne, "Cooperative and Noncooperative Spectrum Sensing Techniques Using Welch's Periodogram in Cognitive Radios," *Ieee*, pp. 6–10, 2008.
- [27] Y. Guo, H. Zhu, and Q. Cheng, "Indoor multi-sound source localization based on nonparametric Bayesian clustering," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2017.
- [28] 3GPP, "3GPP R4-092042: Simulation assumptions and parameters for FDD HeNB RF requirements," 3GPP, Tech. Rep., 2009.
- [29] Y. Yuan, B. Zhang, D. Fan, and G. Tong, "DFT and PSD for estimating DOA with an active acoustic array," *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2008.
- [30] G. M. Jenkins, "General Considerations in the Analysis of Spectra," *Technometrics*, vol. 3, no. 2, p. 133, 5 1961.
- [31] G. Processes and P. O. Box, "Spectral analysis of a Plio-Pleistocene multispecies time series using the Mantel periodogram," 2007.
- [32] R. Telgarsky, "Dominant Frequency Extraction," *Computing Research Repository - arXiv:1306.0103v1*, 12p, 2013.