

Simulador de Sinais Acústicos Submarinos para um Sistema de SONAR Passivo

Anderson D. Santos, Eduardo F. de Simas Filho, Natanael N. de Moura Jr e José M. de Seixas.

Resumo—Sistemas de sonar passivo são utilizados em aplicações civis e militares para monitoramento do ambiente submarino, podendo ser empregados para a detecção desde animais a embarcações. A aquisição de sinais acústicos submarinos experimentais é necessária para o desenvolvimento de sistemas de detecção, mas demanda equipamento adequado e um considerável custo para instalação e manutenção. Neste trabalho, é proposto um sistema de simulação de sinais acústicos submarinos que compreende dois módulos distintos, para gerar amostras simuladas de ruído ambiente e de ruído irradiado por embarcações. Os modelos propostos utilizam uma combinação de filtros digitais, gerador de ruído branco Gaussiano e gerador de tons senoidais para sintetizar amostras dos processos aleatórios de interesse. Os sinais sintéticos produzidos são comparados com sinais experimentais, indicando a eficiência dos modelos de simulação propostos.

Palavras-Chave—Sistema Sonar Passivo, Ruído Ambiente, Ruído Irradiado.

Abstract—Passive sonar systems are used in civil and military applications for monitoring the underwater environment and can be used for the detection of animals and vessels. The acquisition of experimental underwater acoustic signals is necessary for the development of detection systems, but requires adequate equipment and a considerable cost for installation and maintenance. In this work an underwater acoustic signals simulation system is proposed, which comprising two distinct modules to generate simulated samples of ambient noise and noise irradiated by vessels. The proposed models use a combination of digital filters, Gaussian white noise generator and sinusoidal tone generator to synthesize samples of the random processes of interest. The produced synthetic signals are compared with experimental signals, indicating the efficiency of the simulation models.

Keywords—Passive Sonar System, Ambient Noise, Irradiated Noise.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve um aumento considerável na utilização de sistemas sonar (*SOund NAVigation and Ranging*) no âmbito submarino, tanto para aplicações militares como civis, entre as quais pode-se destacar, monitoramento de embarcações de interesse, mapeamento do leito marítimo, comunicação sub-aquática, detecção de animais, etc [1].

Um dos problemas associados à detecção de uma fonte acústica submarina em sonar passivo é o fato de que, em condições reais, o sinal de interesse pode estar contaminado por diversas fontes de ruídos acústicos, tanto ambientais quanto irradiadas por outras fontes. O ruído ambiente é proveniente de fontes naturais (ruído da chuva, estado do mar)

Anderson D. Santos e Eduardo F. de Simas Filho, Laboratório de Sistemas Digitais, PPGEE, Universidade Federal da Bahia – UFBA. E-mails: anderson.damacena@ufba.br, eduardo.simas@ufba.br. Natanael N. de Moura Jr, José M. de Seixas., Laboratório de Processamento de Sinais, COPPE/POLI, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. E-mails: natmourajr@lps.ufrj.br, seixas@lps.ufrj.br.

e fontes antropogênicas (ruído de tráfego marítimo) [2]. O ruído irradiado por embarcações é proveniente da vibração das máquinas e da propulsão (cavitação dos hélices) das embarcações [3].

Uma das técnicas utilizadas no processamento de sinais em sistema sonar passivo é a análise espectral DEMON (*Demodulation of Envelope MODulation on Noise*). A análise DEMON é utilizada para localização e classificação de embarcações a partir do ruído de cavitação. O ruído de cavitação é um ruído gerado pela rotação do hélice da embarcação no meio aquático. Bolhas de ar são geradas pelo movimento das pás do hélice, essas bolhas irão explodir e implodir, gerando assim um ruído característico. O objetivo principal é determinar a velocidade de rotação do eixo do hélice e a quantidades de pás da embarcação de interesse [4].

Devido ao fato de haver um alto custo financeiro para a aquisição de sinais experimentais em acústica submarina, pois, é necessário empregar uma grande quantidade de pessoas e equipamentos no processo, bem como a dificuldade em se controlar as condições ambientais no momento da aquisição, o desenvolvimento de simuladores que permitam o teste do sistema sonar em diferentes condições de operação torna-se fundamental. Devido à importância de se avaliar o desempenho de um sistema em variadas condições de operação, diferentes técnicas voltadas para a geração simulada de sinais acústicos com densidade espectral de potência (*PSD – Power Spectral Sensity*) específica foram apresentadas nos últimos anos [5].

Em [6], propõe-se gerar um ruído com diferentes distribuições e espectros coloridos, para obtenção do ruído com *PSD* específica um ruído branco gaussiano é filtrado por um filtro linear obtendo na saída do sistema um ruído colorido com a *PSD* desejada, outra abordagem é apresentada por [7]. Em [7], é proposto um modelo para geração de ruídos acústicos com comportamentos espectrais específicos (ruído colorido), o intuito é gerar um ruído sintético com espectro colorido e distribuição estatística não-gaussiano.

Neste contexto, o presente artigo propõe combinar um gerador de ruído branco gaussiano com um filtro digital, com o intuito de modificar o conteúdo espectral do sinal para que se torne semelhante ao ruído acústico submarino. Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver um sistema capaz de sintetizar diferentes tipos de ruídos ambientais e irradiados de embarcações para sistema sonar com o intuito de viabilizar a validação de técnicas de processamento de sinais de sonar passivo em diferentes condições de operação. Deste modo, foram elaborados dois módulos de simulação, onde cada módulo é responsável por gerar um determinado tipo de ruído acústico submarino. Entre os principais tipos de ruídos acústico submarino, este trabalho está concentrado nos ruídos

ambientais do tipo “estado do mar” e “chuva” e no “ruído de cavitação”. Para o ruído de cavitação serão usados geradores de tons senoidais para simular os ruídos acústicos do hélice da embarcação. Os resultados do simulador proposto foram validados a partir da comparação com um conjunto de sinais experimentais.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Ruído Ambiente

O ruído ambiente acústico submarino é proveniente de fontes naturais e antropogênicas presentes no ambiente subaquático. Entre as principais fontes de ruído acústico ambiente, pode-se destacar o ruído estado do mar e o ruído da chuva [1]. O ruído estado do mar é um ruído proveniente da incidência do vento na superfície do oceano e da quebra das ondas [8], sendo classificado em 7 níveis de intensidade e cada um deles está associado a uma altura das ondas e velocidade do vento. Já o ruído da chuva é gerado pelo impacto das gotas da chuva na superfície do oceano [8], podendo ser classificado em quatro níveis de intensidade, de acordo com a taxa de precipitação da chuva.

B. Ruído de Cavitação

O ruído de cavitação é um ruído proveniente do hélice da embarcação [3]: quando os hélices entram em funcionamento, as pás agitam o líquido a sua volta criando bolhas de ar, que implodem e explodem gerando, assim, um ruído característico [8]. O ruído de cavitação é um ruído composto por um sinal de banda larga (espectro contínuo) e um sinal de banda estreita (tons espectrais) [1].

O ruído de espectro contínuo (ruído de banda larga) é gerado a partir das explosões aleatórias causadas pelo colapso das bolhas de ar. A banda de frequência do ruído de espectro contínuo vai desde 10 Hz a 20 kHz, tendo o seu valor máximo de amplitude em torno de 100 Hz. Para a banda de frequência de 1 – 100 Hz, o espectro tem um acréscimo entre 6 dB/oct¹ e 12 dB/oct. Já para a banda de frequência superior a 100 Hz, o espectro de frequência tem um declive de -6 dB/oct. A amplitude do ruído de banda larga tem comportamento gaussiano [9].

O ruído de banda estreita é composto a partir de tons espectrais de frequência situados abaixo de 1 kHz. Este ruído relacionado com as características da embarcação, por exemplo, a propulsão do motor e a rotação dos hélices [10]. A partir da análise espectral, é possível estimar alguns parâmetros da embarcação como, por exemplo, a quantidade de pás do hélice e a velocidade de rotação do eixo. O número de pás está relacionado à quantidade de harmônicos encontrados na banda de frequência analisada, enquanto a frequência de rotação do eixo é dada pelo primeiro harmônico do espectro.

C. Análise DEMON

A análise espectral DEMON busca obter informações da velocidade de rotação do eixo e números de pás do hélice de embarcações, a partir da análise do sinal acústico irradiado

¹Decibel por oitava: unidade logarítmica para proporções entre frequências. Dado uma frequência de referência, a expressão “oitava” significa o dobro ou a metade da frequência de referência

para o ambiente submarino [11]. O DEMON é uma análise de banda estreita que trabalha sobre o ruído de cavitação [11]. A Figura 1 mostra o diagrama de blocos da análise DEMON. Inicialmente, o ruído é filtrado utilizando um filtro passa faixa (FPF) com o objetivo de limitar o sinal à banda de frequência mais característica do ruído de cavitação. Uma vez que a frequência de amostragem do sinal é maior que a banda de frequência preservada pelo FPF, após a filtragem é feita uma sub-amostragem do sinal. Em seguida, o sinal é demodulado para desfazer a modulação em amplitude que ocorre no processo de geração do ruído de cavitação. Com o intuito obter as informações referentes à velocidade da embarcação, é aplicada a Transformada Rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform), obtendo assim o espectro de frequência do sinal demodulado. Após a FFT, o sinal é normalizado e apresentado.

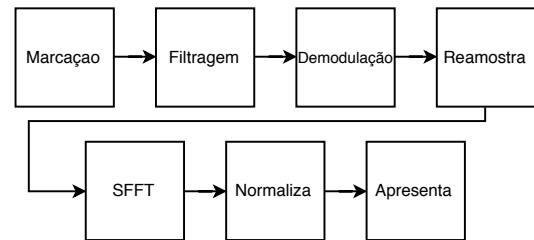


Fig. 1. Diagrama de blocos da análise DEMON.

III. MODELAGEM DO SISTEMA

A. Modelagem do ruído ambiente

Para modelagem do ruído ambiente, adotou-se o sistema apresentado na Figura 2, onde $x(n)$, $y(n)$ e $h(n)$ são a entrada, saída e a resposta ao impulso do sistema, respectivamente. Admitindo que o ruído estado do mar e da chuva tenham uma distribuição estatística gaussiana [8], o objetivo do algoritmo é gerar, em sua, saída um ruído com PSD específica, conhecida previamente [12].

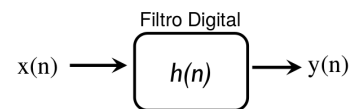


Fig. 2. Diagrama de blocos para o sistema proposto

Neste caso, para a obtenção do ruído $y(n)$, um ruído gaussiano branco $x(n)$ será filtrado por um filtro digital. Uma vez que o ruído gaussiano branco tem uma PSD constante para toda banda de frequência, é possível, a partir da escolha do filtro $h(n)$ mais adequado, obter um ruído gaussiano colorido com a PSD específica. O sistema proposto é equivalente a um modelo linear ARMA (Auto-Regressive Moving Average, ou auto-regressivo de média movel) [13].

Considerando o sistema adotado linear e invariante no tempo, e uma vez que, a transformação linear de um processo dito gaussiano produzirá em sua saída um sinal com distribuição gaussiana [14], é possível estimar a PSD do ruído colorido a partir da Equação (1), onde $S_y(e^{j\omega})$ e $S_x(e^{j\omega})$ são as PSD do sinal de saída (ruído colorido) e do sinal de entrada (ruído branco), respectivamente, e $|H(e^{j\omega})|$ é o módulo da resposta em frequência do filtro.

$$S_y(e^{j\omega}) = S_x(e^{j\omega}) |H(e^{j\omega})|^2 \quad (1)$$

A partir da Equação (1), assumindo que a PSD de saída do sistema, $S_y(e^{j\omega})$, é conhecida e fazendo $S_x(e^{j\omega}) = A$ para toda banda de frequência ω de interesse, é possível determinar a magnitude da resposta em frequência do filtro $|H(e^{j\omega})|$, conforme a Equação (2).

$$|H(e^{j\omega})| = \sqrt{\frac{|S_y(e^{j\omega})|}{|S_x(e^{j\omega})|}} = \sqrt{\frac{|S_y(e^{j\omega})|}{|A|}} \quad (2)$$

Para estimar $|H(e^{j\omega})|$, foram utilizados os pares $|S_y(e^{j\omega})|$ e ω_i obtidos de [8]. Sem perda de generalidade, neste trabalho, foi adotado $|S_x(e^{j\omega})| = 1$.

B. Modelagem do Ruído de Cavitação

O ruído de cavitação, de acordo com [8], é um ruído modulado em amplitude definido pela Equação (3), onde $A(t)$ é o ruído de banda estreita, $s(t)$ o ruído de banda larga e α o índice de modulação.

$$G(t) = [1 + \alpha A(t)] s(t) \\ = \left[1 + \alpha \sum_{n=1}^N A_n \cos(2\pi n f_{sh} t) \right] s(t). \quad (3)$$

O ruído de banda estreita é composto por tons espectrais periódicos, onde f_{sh} é a frequência de rotação do eixo, N é o número de harmônicos (número de pás) e A_n é a amplitude de cada harmônico. No ruído de banda estreita estão contidas informações referentes à velocidade de rotação e ao número de pás do eixo.

Para a modelagem do ruído de banda larga $s(t)$, admitindo que tem uma distribuição estatística gaussiana [9], adotou-se o sistema apresentado na Figura 2, fazendo $y(n) = s(n)$. Para estimar $|H(e^{j\omega})|$ da resposta em frequência do filtro $h(n)$, foram utilizadas as informações do ruído de banda larga apresentadas na seção II-B. O sistema proposto é equivalente a um modelo linear ARMA [13].

IV. RESULTADOS

Nesta seção, inicialmente, serão apresentados os resultados referentes à simulação do ruído ambiente (*estado do mar e chuva*). Em seguida, serão apresentados resultados relacionados à simulação do ruído de cavitação.

Com o intuito avaliar de formas quantitativa e qualitativa o desempenho do algoritmo, foram utilizadas enquanto medidas de desempenho a divergência de Kullback-Leibler-KL, Equação (4), adaptada para a análise espectral, o erro médio absoluto, Equação (5), onde $R(\omega_k)$ é o espectro de referência e $S(\omega_k)$ é a PSD estimada do ruído ambiente.

$$D_{kl} = \sum_{k=1}^n \ln \left(\frac{S(\omega_k)}{R(\omega_k)} \right) S(\omega_k) \quad (4)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |R(\omega_k) - S(\omega_k)| \quad (5)$$

A. Resultado do Ruído Ambiente

Para a síntese da resposta ao impulso $h(n)$ dos ruídos ambientes, foram utilizados filtros digitais do tipo FIR (*Finite Impulse Response*) e IIR (*Infinite Impulse Response*). A Tabela I mostra os filtros utilizados e suas respectivas nomenclaturas. Os filtros foram projetados usando uma frequência de amostragem de 31.250 Hz, mesma frequência usada no sistema de aquisição de dados do sistema sonar em [15] [16].

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DOS FILTROS USADOS NO PROJETO

Tipo de Filtro	Metodo de Projeto	Nomenclatura
FIR	Amostragem na Frequência	Filtro FIR
	Algoritmo Parks-McClellan	Filtro FIRPM
	Mínimos Quadrados	Filtro FIRLS
IIR	Aproximação de Yule-Walker	Filtro IIR

Para a análise dos resultados, foram realizadas comparações entre o espectro de frequência estimado dos ruídos simulados e o espectro de referência do ruído [8]. Assim, serão apresentados os gráficos do espectro de frequência do ruído estado do mar de baixa intensidade e do ruído da chuva fraco usando os filtros projetados indicando suas respectivas ordens. Resultados gráficos semelhantes foram obtidos para as demais intensidades de ruído. Para a estimação espectral do ruído simulado foi usado o periodograma modificado de Welch [13].

A Figura 3 mostra a estimação espectral dos ruídos simulados para o estado do mar. Analisando a Figura 3, observa-se que as PSD dos ruídos simulados acompanham o espectro de referência [8]. Pode-se observar que o ruído simulado usando filtro IIR foi o que mais se aproximou do ruído de referência com $\bar{E} = 0,493$ e $D_{kl} = 4,01 \times 10^{-5}$, enquanto que o ruído simulado usando filtro FIRPM apresentou o pior desempenho, $\bar{E} = 1,01$ e $D_{kl} = 6,39 \times 10^{-5}$.

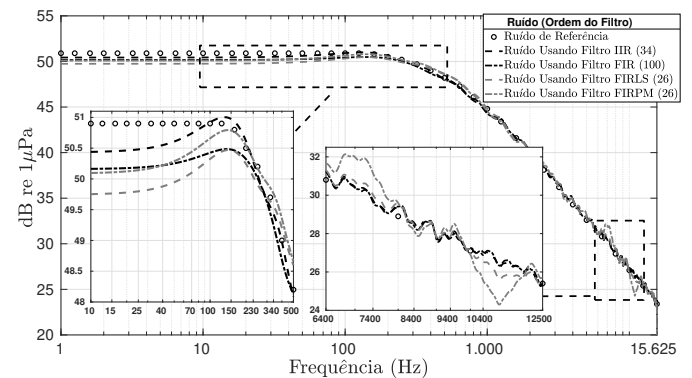


Fig. 3. Espectro de frequência do ruído simulado estado do mar nível 0 (baixa intensidade) usando diferentes projetos de filtros.

Na Figura 4, temos a estimação espectral referente à simulação do ruído da chuva utilizando os filtros IIR, FIR e FIRLS. Observa-se que, para frequências superiores a 100 Hz, a estimativa espectral do ruído simulado acompanha o espectro de referência. No entanto, para frequências entre 0 e 100 Hz, o ruído gerado usando o filtro FIR de ordem 6000 obteve melhor desempenho. Devido à ordem muito elevada o tempo de processamento para a geração do ruído foi consideravelmente

maior. O ruído simulado usando filtro FIR de ordem 6000 apresentou um $\bar{E} = 2,34$ e $D_{kl} = 6,10 \times 10^{-5}$, enquanto que o ruído simulado usando filtro FIRPM produziu o pior desempenho com o $\bar{E} = 3,57$ e $D_{kl} = 20,29 \times 10^{-5}$.

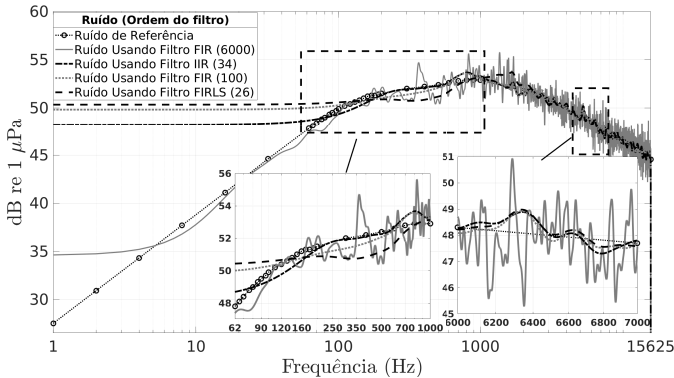


Fig. 4. Espectro de frequência do ruído simulado da chuva leve utilizando diferentes filtros.

B. Resultado do Ruído de Cavitação

Inicialmente serão apresentados os resultados referentes à simulação do ruído de cavitação de uma embarcação hipotética, tendo como finalidade avaliar o desempenho do simulador, em seguida, o algoritmo será validado usando um sinal experimental disponibilizado por [17]. Posteriormente, foi gerado o ruído de cavitação em conjunto com o ruído ambiente (*estado do mar e chuva*), com a finalidade averiguar o comportamento do ruído do hélice em diferentes cenários.

Embarcação Hipotética

Inicialmente, foram gerados sinais simulados para uma embarcação com um hélice contendo 4 pás. O sinal simulado contém 4 harmônicos, onde o primeiro harmônico representa a frequência de rotação do eixo do hélice (f_{sh}) configurado em 60 rpm (harmônicos 120, 180 e 240 rpm). A análise DEMON é aplicada sobre o sinal gerado com o intuito de verificar se o resultado da análise espectral corresponde às características esperadas. Para avaliação do resultado foi calculado o \bar{E} entre os picos dos harmônicos e as informações previamente especificadas.

A Figura 5 mostra o resultado obtido da análise DEMON. A partir das informações fornecidas pelo demograma, observa-se que a frequência do primeiro harmônico está próxima à frequência de rotação do eixo do hélice, sendo que o número de harmônicos mostrados pelo DEMON indica a quantidade de pás do hélice da embarcação. O \bar{E} entre os picos dos harmônicos do sinal experimental e o simulado é de 1,16 rpm.

Após a geração do ruído de cavitação, adicionaram-se os ruídos *estado do mar nível 2* e *chuva médio*, tendo como objetivo analisar o comportamento do ruído de cavitação em diferentes condições. O resultado é mostrado na Figura 6. Pode-se observar que, ao adicionar os ruído ambiente, a relação sinal/ruído foi alterada, fazendo com que haja uma possibilidade de interpretação errônea da velocidade da embarcação.

Em seguida, foi introduzida no ruído de cavitação, uma variação de velocidade de rotação do hélice (Figura 7). A variação de velocidade tem início em 50 segundos, com aumento de 8 rpm. Analisando a Figura 7, nota-se que o sinal

simulado com variação de velocidade está em conformidade com as informações da embarcação hipotética.

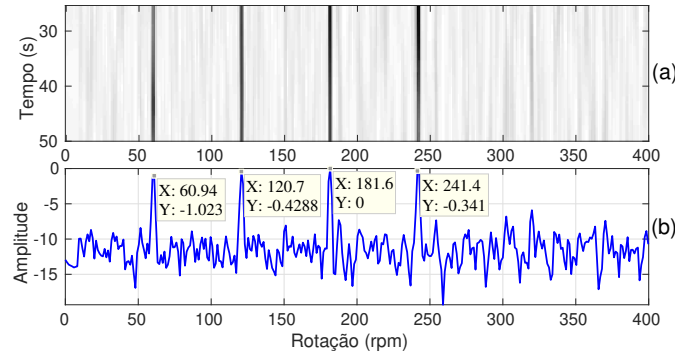


Fig. 5. Análise DEMON do ruído de cavitação sem ruído ambiente: (a) demograma, (b) espectro médio.

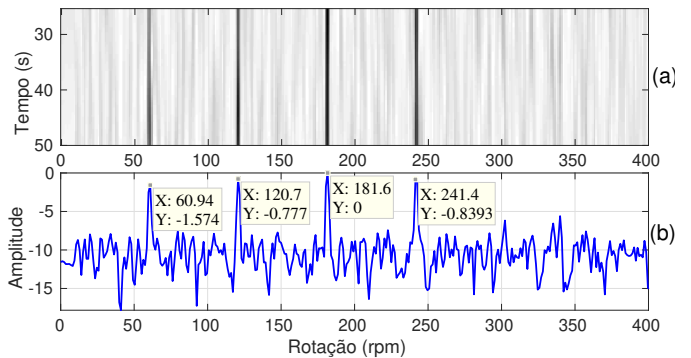


Fig. 6. Análise DEMON do ruído de cavitação com ruídos da Chuva Médio e Estado do Mar Nível 2: (a) demograma, (b) espectro médio.

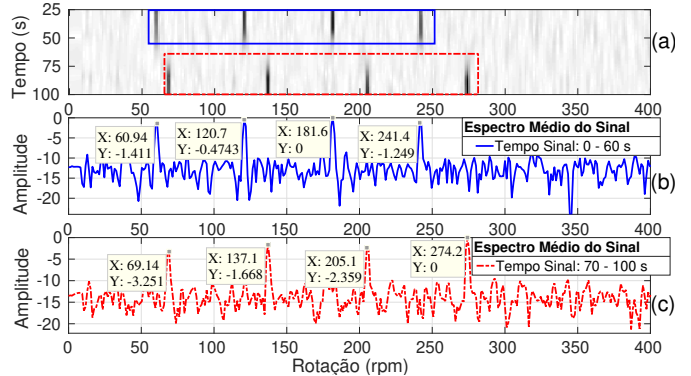


Fig. 7. Análise DEMON do ruído de cavitação com variação de velocidade sem ruído ambiente: (a) demograma, (b) e (c) espectro médio.

Validação usando um sinal experimental

Para validação do simulador, foram utilizados dados experimentais provenientes de um banco de dados disponibilizado pela Universidade de Vigo (Espanha) [17]. O sinal experimental é proveniente de uma embarcação de passageiros chegando no porto. A Figura 8 apresenta a análise DEMON do sinal experimental. Observa-se, no demograma, a presença de três picos de amplitude. O primeiro pico (847,7 rpm) é referente à rotação do eixo do hélice, os harmônicos seguintes (2.^a e 3.^a ordem) indicam a quantidade de pás do hélice da embarcação. Na Figura 8, a largura a meia altura dos harmônicos é indicada.

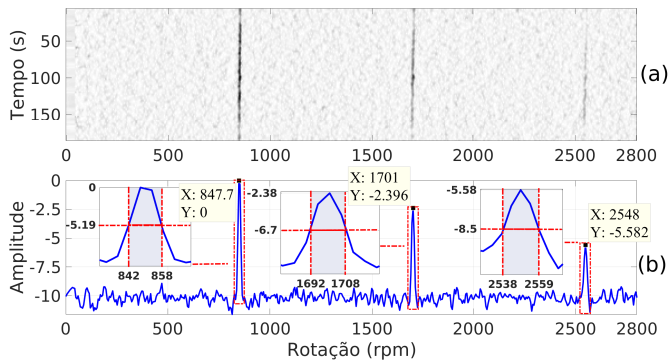


Fig. 8. Análise DEMON do do Sinal Experimental: (a) demograma, (b) espectro médio.

Após a análise do sinal experimental, a partir das informações obtidas, foi simulado um ruído de cavitação utilizando como referência o primeiro harmônico do sinal experimental, e o mesmo número de harmônicos. O resultado é mostrado na Figura 9. Comparando as Figuras 8 e 9. O \bar{E} entre os picos dos harmônicos do sinal experimental e simulado foi de 25,8 rpm. O cálculo da divergência Kullback-Leibler feita entre os espectros do sinal simulado e experimental foi realizado excluindo os picos dos harmônicos tendo como resultado $D_{kl} = 0,059 \pm 0,014$, a partir da D_{kl} vemos que o ruído de banda larga do sinal experimental e simulado estão próximo.

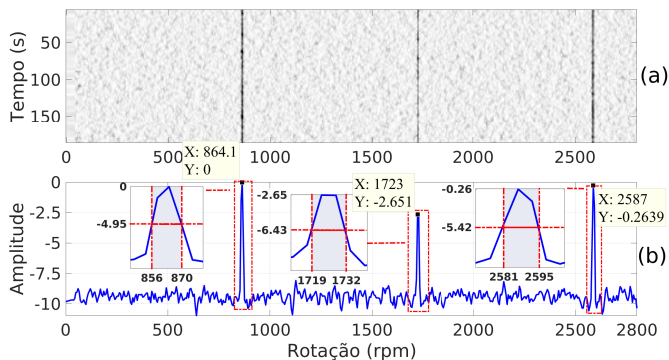


Fig. 9. Análise DEMON do do Sinal Simulado: (a) demograma, (b) espectro médio.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema capaz de sintetizar ruído ambiente (*ruído estado do mar e chuva*) juntamente com *ruído de cavitação* de embarcações. Analisando o ruído estado do mar, considerando-se o erro médio absoluto juntamente com a divergência KL, observa-se que a utilização dos filtros IIR proporciona um ruído simulado mais fiel aos sinais utilizados como referência. Sendo assim, a utilização do filtro projetado usando o método aproximação de Yule-Walker (filtro IIR) se torna vantajosa. Com relação ao ruído da chuva, constatou-se que o ruído gerado com o filtro FIR de ordem 6000 obteve um melhor desempenho, no entanto, devido à ordem o tempo de convergência do filtro se torna muito alto. Com relação ao *ruído de cavitação*, os resultados obtidos pela análise DEMON mostraram que o sistema é capaz de produzir uma simulação próxima das especificações fornecidas. Outro ponto a ser destacado é que, com a adição do ruído ambiente, a relação sinal/ruído do sinal simulado foi reduzida, dificultando determinação dos componentes harmônicos do sinal simulado. Para validação

do algoritmo foram utilizados dados experimentais fornecidos pela Universidade de Vigo. Após a análise do sinal experimental, foi gerado o *ruído de cavitação* tendo como base os sinais experimentais. A análise feita através de medidas de desempenho e comparação do ruído simulado com sinais experimentais mostrou que o sinal simulado obtido é bastante semelhante ao sinal experimental.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores gostariam de agradecer também à FAPESB, FAPERJ e CNPq pelo apoio financeiro, e à Marinha do Brasil, por disponibilizar os dados experimentais e pelas discussões frutíferas sobre este trabalho. Este artigo é dedicado à memória de nosso estimado colega, Dr. Natanael Nunes de Moura.

REFERÊNCIAS

- [1] P. C. ETTER, *Underwater acoustic modeling and simulation*. CRC Press, 2018.
- [2] WEI, Kun; LIU, Zengli; ZHANG, Xuchen. "Research of underwater acoustic confrontation technology based on warship radiated noise modeling." In: Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2014 IEEE International Conference, 2014. p. 659-662.
- [3] KAWADE, Akshada N. et al. "Analysis of ship noise from underwater ambient noise." In: Advances in Signal Processing (CASP), Conference on. IEEE, 2016. p. 265-269.
- [4] Wang, Yichuan and Li, Haitao and Dai, Weiguo. "Application of Duffing oscillator in ship propeller blade number recognition". In: IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA), 2016. p. 1-5.
- [5] Moliassa, Lawrence T and Awad, Selim S. "On the generation of non-Gaussian noise using the discrete-Fourier transform method." In: Proceedings of 1995 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference-IMTC'95, 1995. p.72.
- [6] Zao, L and Coelho, R. "Generation of coloured acoustic noise samples with non-Gaussian distributions." In: IET signal processing, 2012. v. 6.
- [7] Nichols, JM and Olson, CC and Michalowicz, JV and Bucholtz, F. "A simple algorithm for generating spectrally colored, non-Gaussian signals." Probabilistic Engineering Mechanics, 2010. v. 25 p. 315-322.
- [8] R. P. HODGES *Underwater Acoustics Analysis Design and Performance of SONAR*. John Wiley and Sons, Ltd, 2010.
- [9] Zhi, Zhou and Yong-sheng, Zhu. "Research on The underwater vehicle radiated noise model and the linear spectrum extraction method". In: 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2016. p. 819-823.
- [10] Gao, Xin and Liu, Qijun and Wang, Yichuan and Dai, Weiguo. "Simulation of ship radiated noise based on sub-bands spectrum feature". IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2017. p. 2200-2203;
- [11] N. N. de Moura, J. M. de Seixas, e R. R. Ramos. "Passive Sonar Signal Detection and Classification Based on ICA." In: N. Z. Kolev (Org.). Sonar Systems. IN-TECH, 2011, ch. 5, pp. 93-104.
- [12] S. MINFEN, L. SUN e F. CHAN. "Generation of noise sequences with desired non-gaussian distribution, and covariance." Proceedings of IEEE TENCON'02, p. 1105-1108, 2002.
- [13] HAYES, Monson H. *Statistical digital signal processing and modeling*. John Wiley & Sons, 2009.
- [14] WANG, Yichuan; LI, Haitao; DAI, Weiguo. Application of Duffing oscillator in ship propeller blade number recognition. In: Ocean Acoustics (COA), 2016 IEEE/OES China. IEEE, 2016. p. 1-5.
- [15] Zhao, Anbang and Niu, Fang and Hui, Juan and Hou, Baochun. "Suppression of ship harmonic lines using the coherent onion peeler". In: IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA), 2016. p. 1-4.
- [16] A. D. SANTOS, E. F. S. FILHO, N. N. MOURA, J. M. SEIXAS. "Modelo para Geração Simulada de Ruído de Cavitação de Embarcações." In: XIII ENCONTRO DE TECNOLOGIA EM ACÚSTICA SUBMARINA. Rio de Janeiro - RJ, Novembro de 2018.
- [17] Santos-Domínguez, David and Torres-Guijarro, Soledad and Cardenal-López, Antonio and Pena-Gimenez, Antonio. ShipsEar: An underwater vessel noise database. In: Applied Acoustics, 2016 v. 113. p. 64-69. publisher: Elsevier;