

Uma Proposta de *Beamforming* de Transmissão para Sinais Subaquáticos

Denis Backer de Souza, José A. Apolinário Jr. e Marcello L. R. de Campos

Resumo— Este trabalho apresenta um esquema de conformação de feixe (*beamforming*) para a transmissão de sinais subaquáticos utilizando um arranjo linear de projetores. Observa-se no exemplo estudado que, ao usar um arranjo de projetores, tem-se um ganho de desempenho no sinal recebido por um hidrofone com respeito a uma fonte singular. Através de variações nos retardos dos sinais para cada fonte, é possível direcionar a transmissão e obter melhor rendimento na recepção. Este trabalho investiga, a partir do conhecimento do cenário subaquático, uma maneira de escolher retardos adequados.

Palavras-Chave— Beamforming de transmissão, acústica submarina, arranjo de sensores.

Abstract— This work presents an underwater transmit beamforming scheme using a linear array of projectors. It is observed in the example investigated herein that, when using an array of projectors, there is a performance gain in the signal received by a hydrophone with respect to a singular source. By varying the signal delays for each source, it is possible to steer the transmission and obtain better efficiency in the reception. This work investigates, from the knowledge of the underwater scenario, a way to choose suitable delays.

Keywords— Transmit beamforming, underwater acoustics, sensor array.

I. INTRODUÇÃO

A comunicação subaquática é um campo do conhecimento em crescimento devido à expansão de suas aplicações, tais como na exploração de petróleo e em operações militares, que exigem a transmissão de dados subaquáticos sem conexões com fio [1]. Existem basicamente três tipos de tecnologias disponíveis para transmissões subaquáticas sem fio [2]. Uma delas é a comunicação por radiofrequência (RF), que apresenta alta taxa de transferência de dados a curto alcance e sofre um efeito Doppler moderado [3]. Outra tecnologia é a transmissão óptica, preferencialmente em comprimentos de onda azul-verde, que requer posicionamento na linha de visada [4]. E a terceira tecnologia, a mais empregada, é a comunicação acústica que utiliza uma onda mecânica e possibilita a transmissão para longas distâncias [5]. Este artigo utiliza dados e parâmetros de transmissão de sinais subaquáticos baseados nas comunicações acústicas.

A modelagem do canal subaquático deve conter os principais fatores que influenciam o sinal: alteração da direção, da

Denis Backer de Souza e José A. Apolinário Jr., Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, e-mails: denis.backer@gmail.com e apolin@ime.eb.br. Marcello L. R. de Campos, Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, e-mail: campos@smt.ufjf.br. Os autores agradecem os dados fornecidos pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM). Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e pelo CNPq.

forma e atenuação da energia. Além disso, o canal é variante no tempo, o que dificulta mensurar esses fatores para realizar um experimento mais fiel ao modelo.

O objetivo aqui é realizar um *beamforming* de transmissão, no meio subaquático, através de um arranjo com múltiplos transmissores (projetores) para diferentes profundidades de um receptor. A conformação do feixe será realizada por retardos do sinal para cada projetor. Através de uma transmissão modulada em BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) é possível obter o melhor ângulo do *beamforming* que forneça uma menor taxa de erro de *bit* (BER, do inglês *Bit Error Rate*) e, assim, compará-la com a BER de uma transmissão realizada por uma fonte singular.

O tópico deste trabalho é relativamente escasso na literatura. Realizando uma pesquisa no *IEEEExplore* nos últimos 10 anos usando “*transmit beamforming underwater*” como *keywords*, obtêm-se 2 artigos sobre o tema de um universo de 18 procurados. Um *beamforming* de transmissão para comunicações subaquáticas com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) é investigado em [6]. Este *beamformer* utiliza uma técnica de precodificação linear, *Zero-Forcing Beamforming* [7], que busca anular as interferências entre os usuários. Por outro lado, [8] realiza o *beamforming* de transmissão com um arranjo linear de transmissores para melhorar o desempenho do sinal recebido, utilizando o sinal modulado em BPSK e um modelo simplificado de transmissão subaquática. Motivado pela dispersão do bit no diagrama de constelação, [8] escolhe como ângulo de partida do *beamforming* de transmissão o ângulo de visada direta. Tal escolha, como será visto posteriormente, devido às características da propagação de um sinal acústico submarino, usualmente não corresponde ao melhor resultado.

Este artigo é organizado da seguinte maneira: após uma breve introdução, a Seção II apresenta as principais características de um canal subaquático. A seguir, a Seção III apresenta a modelagem do sistema de transmissão com arranjo de transmissores (projetores). Os resultados experimentais são mostrados na Seção IV e as conclusões vistas na Seção V.

II. CANAL SUBAQUÁTICO

A velocidade do som no oceano é uma função crescente de temperatura, salinidade e pressão, sendo esta última uma função de profundidade [9]. Esses parâmetros são afetados por mudanças sazonais e diurnas, principalmente em regiões de plataforma continental (águas rasas).

Uma outra característica da onda subaquática para águas rasas é o múltiplo percurso. Como o meio de propagação é limitado pela superfície e o fundo do mar, os sinais transmitidos

sofrem reflexões sucessivas nas interfaces [10]. As variações de velocidade do som dentro do meio também alteram os caminhos das ondas sonoras. Essas múltiplas versões atrasadas e distorcidas do sinal transmitido chegam ao receptor e podem causar interferências entre símbolos.

Um dos modelos matemáticos da propagação do som no canal é a teoria de raios [11], que define a frente de onda como o lugar geométrico onde a fase de uma onda acústica é constante. Um raio acústico é uma linha que representa a direção de propagação da onda e é perpendicular à frente de onda. O diagrama de raios é um conjunto de raios traçados a partir de uma fonte, em um dado ambiente, para um receptor. O programa *Bellhop* [12], para uma determinada frequência, utiliza a teoria de raios para, a partir de um conjunto de informações disponíveis (distância e profundidade dos sensores, perfil de velocidade, perdas, superfície, etc.), estimar a atenuação (amplitude e fase) e o tempo que cada raio leva para ir da fonte ao receptor. A Figura 1 exemplifica um diagrama de raios onde: os raios vermelhos representam uma propagação sem reflexão, os raios azuis a propagação com apenas uma reflexão no fundo mar, os raios verdes a propagação com apenas uma reflexão na superfície da água, e os raios pretos a propagação com duas ou mais reflexões.

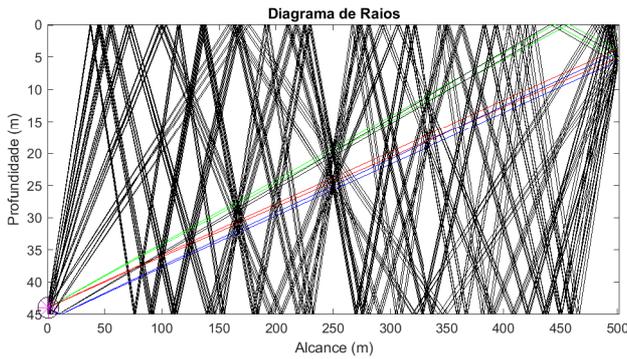


Fig. 1: Raios representando a propagação de sinais transmitidos a partir de um arranjo a 44 m de profundidade para um hidrofone (transdutor do som na água para sinal elétrico) a 5 m de profundidade e 500 m de distância.

III. BEAMFORMING DE TRANSMISSÃO

Seja um sinal banda estreita $x(t)$, com frequência angular $\Omega_0 = 2\pi f_0$ e que será transmitido por uma fonte de áudio subaquática (projektor), dado por $x(t) = e^{j\Omega_0 t}$.

Utilizando informações do cenário (assumido conhecido) de uma fonte (singular) e um receptor, o programa *Bellhop* fornece, para a frequência de operação, o número de raios (L) que chegam no receptor, a amplitude e a fase (valor complexo A), e o atraso (*delay* τ) de cada raio. Assim, pode-se expressar o sinal recebido por um receptor, de uma única fonte transmissora, com sinal banda estreita $x(t)$ centrada na frequência f_0 como

$$y_1(t) = \sum_{l=1}^L A_l x(t - \tau_l). \quad (1)$$

Considerando um arranjo de projetores transmitindo o mesmo sinal, ao mesmo tempo, para um dado receptor, o sinal

recebido será:

$$\bar{y}(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L A_{m,l} x(t - \tau_{m,l}), \quad (2)$$

onde m , de 1 a M , corresponde ao índice dos projetores. $A_{m,l}$ e $\tau_{m,l}$ são a amplitude e o atraso, respectivamente, de cada raio (l) para a fonte m do arranjo.

A Equação (2) representa um sinal (modelo complexo) transmitido por um arranjo de projetores após sua propagação no meio subaquático. Para realizar a conformação do feixe em uma determinada direção (θ), é necessário inserir retardos r_m para cada fonte de transmissão do arranjo como ilustrado na Figura 2.

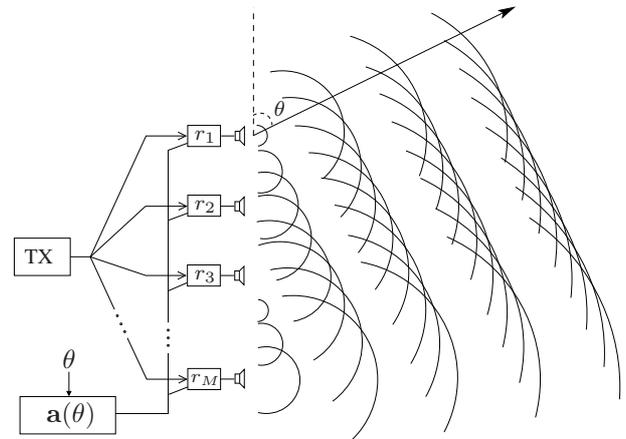


Fig. 2: Conformação de feixe de transmissão na direção θ . r_m representa o retardo imposto a cada transmissor para conformar o feixe na direção de θ .

O retardo aplicado para cada fonte transmissora, assumindo a primeira fonte como referência, será $r_m = \frac{d_m \cos(\theta)}{c}$, onde d_m é a distância da fonte m em relação a referência e c a velocidade do som no meio. Assim, o *steering vector* [13] $\mathbf{a}(\theta)$ é definido como

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} a_1(\theta) \\ a_2(\theta) \\ \vdots \\ a_M(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\Omega_0 r_2} \\ \vdots \\ e^{j\Omega_0 r_M} \end{bmatrix} \quad (3)$$

e o diagrama simplificado da transmissão de um sinal banda estreita de M projetores para um receptor singular no meio subaquático é apresentado na Figura 3.

Conforme a Figura 3, o sinal do *beamforming* de transmissão (sinal banda estreita centrado em f_0) na direção θ , recebido no hidrofone pode ser expresso por

$$y(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L A_{m,l} x(t - \tau_{m,l}) a_m(\theta) \right\} + n(t). \quad (4)$$

Considerando que o sinal contendo a informação (mensagem a ser transmitida) será modulado em BPSK, pode-se realizar uma busca nos ângulos de θ da Equação (4) para encontrar aquele que resulta na menor taxa de erro de *bits* recebida pelo hidrofone, para uma determinada SNR.

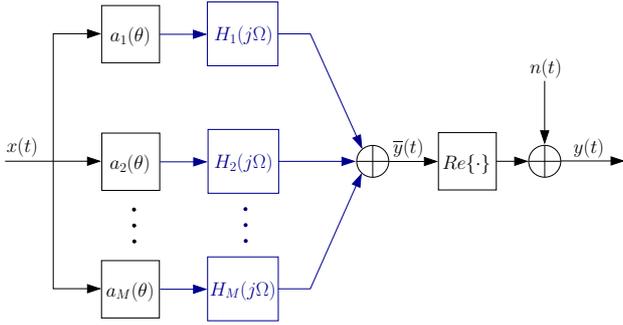


Fig. 3: Transmissão com arranjo de M projetores para um hidrofone. Note que $H_m(j\omega)$ não é conhecido mas uma mera representação do canal (subaquático) da Equação (4).

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Seja o cenário representado na Figura 4(b): uma área de interesse com 45 metros de profundidade e 500 metros de distância entre os transmissores e o receptor. O arranjo de transmissão com 4 projetores (TX) está a 44 m (1° elemento) de profundidade, com espaçamento entre eles de $d=0.1$ m. O hidrofone (RX) estará localizado a uma profundidade p (nos experimentos feita igual a 5, 10, 20, 30 e 40 metros). A velocidade do som neste cenário (baseado na região da Baía dos Anjos, em Arraial do Cabo, RJ) foi obtida com dados fornecidos pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) tal como ilustrado na Figura 4(a). Tal velocidade se aproxima de uma constante, sendo um perfil de velocidade típico de uma zona isotermal. O fundo do mar foi considerado plano.

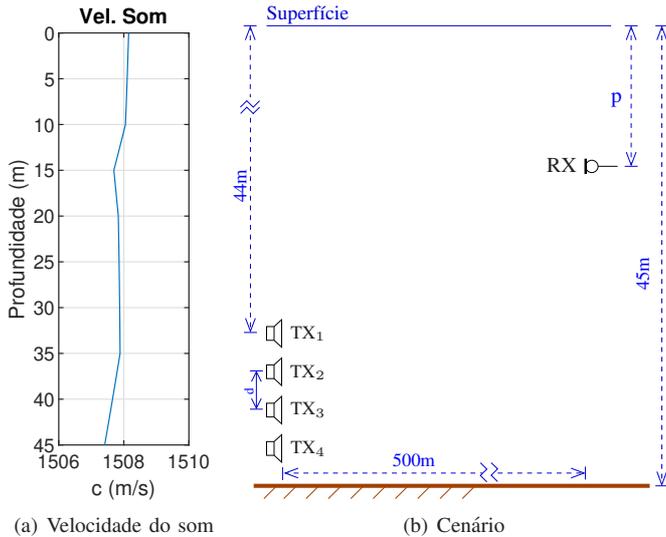


Fig. 4: Ilustração do cenário e a velocidade do som da região Baía dos Anjos (fornecida pelo IEAPM).

O sinal (mensagem) a ser transmitido, modulado em BPSK [14], é expresso por:

$$x(t) = s_k e^{j2\pi f_0 t} = \begin{cases} e^{j2\pi f_0 t} & \text{bit 1,} \\ e^{j(2\pi f_0 t + \pi)} & \text{bit 0,} \end{cases} \quad (5)$$

onde s_k é igual a 1 (*bit 1*) ou -1 (*bit 0*). Os dados da simulação estão listados a seguir.

- Uma mensagem foi escolhida de forma aleatória com 10.000 símbolos;
- A taxa de transmissão foi ajustada para 100 bps;
- A frequência de amostragem usada na simulação é igual a 48 kHz (taxa usual para os conversores A/D e D/A empregados pelo IEAPM) e a da portadora igual a 7,5 kHz, escolhida de modo que $d = \lambda/2$, para $c=1.500$ m/s;
- O ruído ambiente foi considerado branco gaussiano, com SNR variando de -30 a 0 dB.

A Figura 5 indica a detecção em um receptor de um sinal modulado em BPSK. O sincronismo será definido por um retardo de referência (τ_{ref}) como sendo o *delay* da maior correlação entre o sinal transmitido e o sinal recebido (sequência de treinamento). A seguir é realizada a demodulação do sinal em cada intervalo de símbolo (T). O sinal demodulado passa por um decisor e é comparado com a mensagem original para se estimar a BER.

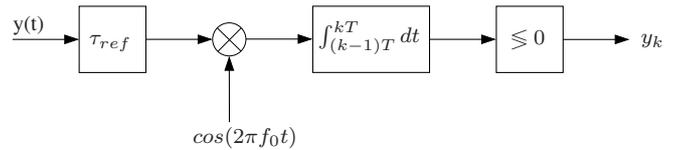


Fig. 5: Detecção do sinal BPSK recebido.

A. Receptor a $p = 5$ metros de profundidade

De acordo com o cenário, representado pela Figura 4(b), a primeira simulação será a transmissão pelo arranjo (TX₁ a TX₄) e a recepção por um hidrofone (RX) a 5m de profundidade. Com a finalidade de obter o melhor ângulo θ_{ot} , foi realizada uma busca pelo menor valor da BER para os ângulos de θ da Equação (4), variando de 0° a 180° . Assim, plota-se a variação da BER em função de θ para uma determinada razão sinal-ruído (SNR), como visto na Figura 6. O valor -14dB foi definido como a maior SNR em que ocorre pelo menos um erro (em 10.000 bits transmitidos) em todos os ângulos de θ . Neste caso, o ruído ambiente foi feito gaussiano branco.

A Figura 7 apresenta o gráfico da taxa de erro de *bits* para o receptor a 5 m; percebe-se nessa figura uma boa redução na BER quando transmitido por um arranjo, usando $\theta_{ot}=21^\circ$, em relação a uma fonte singular. No caso de fonte singular, um único projetor foi colocado na posição central do arranjo (44,15 m de profundidade).

Devido à modulação em fase (BPSK), onde o bit “0” representa os números negativos e o bit “1” os números positivos, pode-se verificar o comportamento da transmissão dos bits através da distribuição do sinal demodulado no receptor. A Figura 8 indica a dispersão dos bits (sinal demodulado antes do decisor) para uma transmissão com uma fonte singular e com um arranjo ($\theta_{ot}=21^\circ$). Percebe-se que a transmissão com arranjo na direção do θ_{ot} possui uma melhor separação

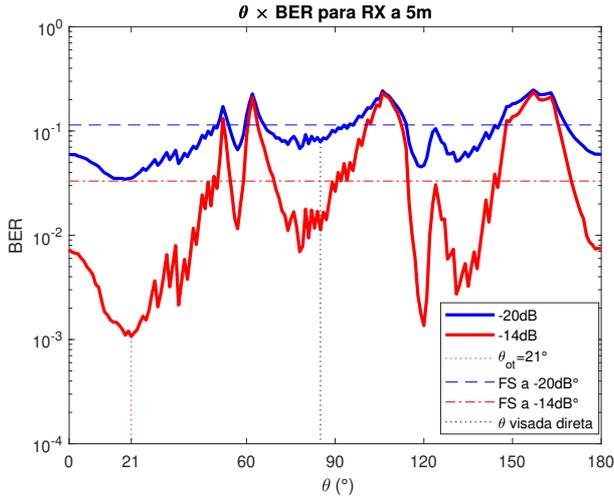


Fig. 6: Gráfico da variação da taxa de erro de bit (BER) em função de θ . O $\theta_{ot}=21^\circ$ foi definido pela menor BER com SNR de -14 dB. Como forma de comparação foram assinalados os valores da BER de uma fonte singular (FS) com SNR de -20 dB e -14 dB, e o ângulo (85°) de visada direta do centro do arranjo para o receptor como usado em [8]. As curvas foram obtidas por uma média de 50 realizações independentes.

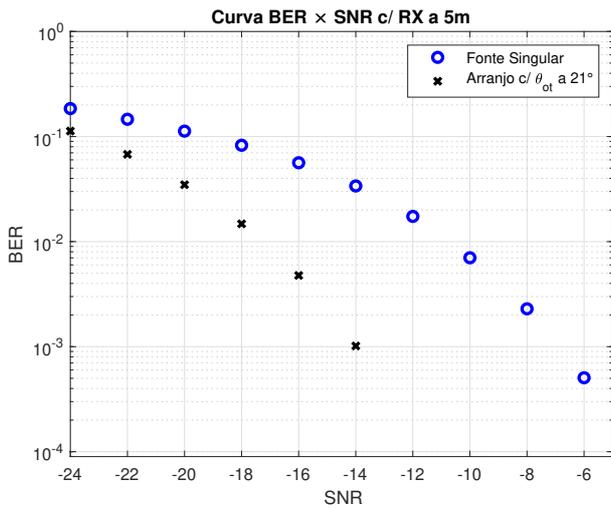


Fig. 7: Bit Error Rate (BER) de uma fonte singular e de um arranjo com SNR variando de -24 dB a -5 dB.

em relação à fonte singular. Para a transmissão de uma fonte singular, neste ambiente (SNR igual a -14 dB), ocorreram 325 erros de bits enquanto que com um arranjo houve 12 bits errados, de um total de 10.000 bits.

B. Receptor em outras profundidades

A seguir, foram realizadas simulações de transmissão com a fonte singular e arranjo para outras profundidades do receptor ($p = 10, 20, 30$ e 40 m). Observando, na Figura 9, o gráfico da variação da BER em função de θ para valores de SNR iguais a -20 dB e -14 dB, para o receptor a 10 e 20 m, -20 dB e -12 dB, para 30 m, e -20 dB e -16 dB, para 40 m. Os valores de θ_{ot} foram definidos conforme ilustrado nos gráficos.

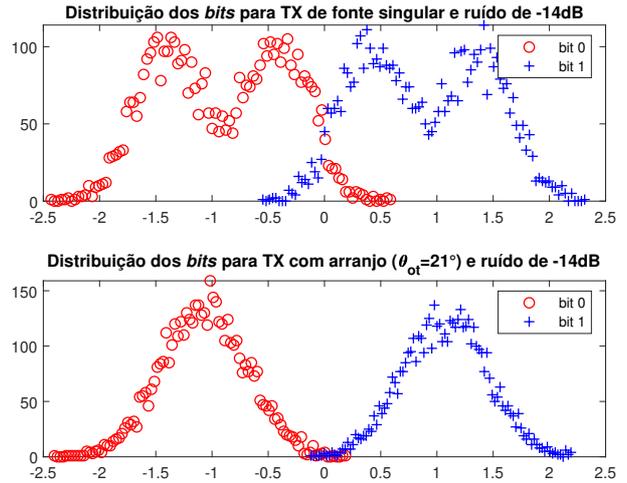


Fig. 8: Histograma dos valores dos bits demodulados (antes do decisor) por um receptor a 5 m de profundidade, SNR = -14 dB, para os casos de uma fonte singular e de um arranjo com $\theta_{ot}=21^\circ$.

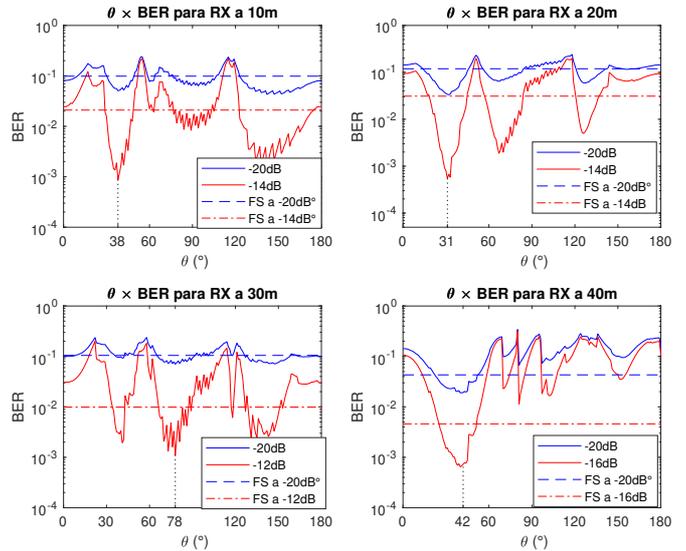


Fig. 9: Gráfico da variação da BER em função de θ para as profundidades $p = 10, 20, 30$ e 40 m com suas respectivas SNRs.

A Figura 10 indica os gráficos de BER para o receptor a 10, 20, 30 e 40 m de profundidade e com SNR variando de -30 a 0 dB, e demonstra uma melhora na taxa de erro do bit transmitido pelo arranjo (com θ_{ot}) em relação a uma fonte singular. Para o receptor a 30 m e 40 m, obtém-se melhoras discretas do desempenho do arranjo em relação a uma fonte singular, enquanto que, para o receptor a 10 m e 20 m, a redução da BER é significativa.

O IEAPM forneceu também gravações do ruído ambiente submarino de um local similar ao que está sendo simulado. Tal ruído apresenta uma característica impulsiva como se observa na Figura 11(a) e maior energia nas frequências abaixo de 15 kHz, com se observa na Figura 11(b).

Realizando as mesmas simulações com este ruído ambiente,

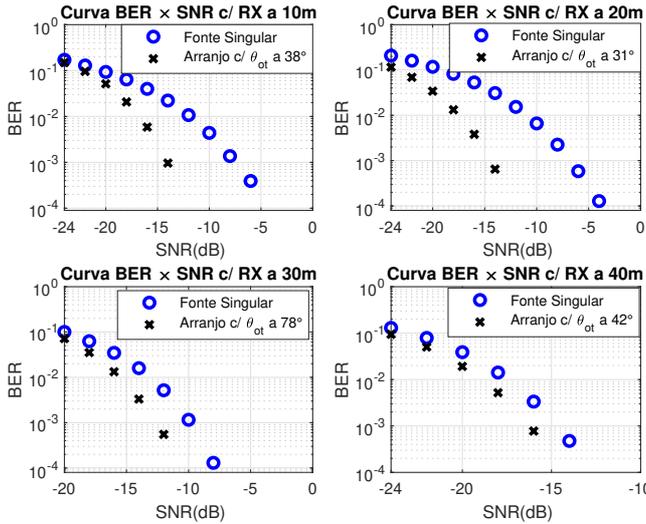


Fig. 10: *Bit Error Rate* de uma fonte singular e de um arranjo, para receptores posicionados a 10, 20, 30 e 40 m de profundidade e com SNR variando de -24 a 0 dB.

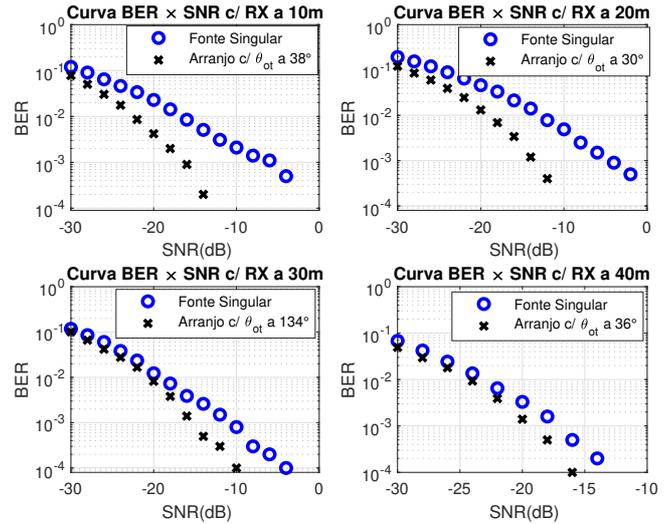


Fig. 12: *Bit Error Rate* (BER) de uma fonte singular e um arranjo para receptores posicionados a 10, 20, 30 e 40 m de profundidade e com SNR variando de -30 a 0 dB.

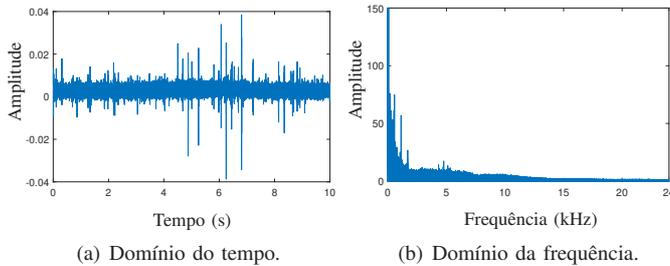


Fig. 11: Ruído ambiente do fundo do mar gravado na Baía de Anjos (Arraial do Cabo, RJ).

foram obtidas novas taxas de erro de bit para as profundidades de 10, 20, 30 e 40 m. Comparando a transmissão de uma fonte singular com um arranjo na direção do feixe para um θ_{ot} conforme ilustrado na Figura 12, verifica-se novamente uma melhoria do desempenho do sistema, mais acentuada para baixas profundidades.

Finalmente, observa-se dos gráficos apresentados que, se fosse usada uma conformação dos feixes para a visada direta ($85,09^\circ$ para 5 m até $89,42^\circ$ para 40 m), a abordagem de [8] resultaria em valores de BER maiores que os obtidos na abordagem proposta.

V. CONCLUSÕES

A conformação de feixe utilizada assume o conhecimento do ambiente submarino e busca otimização na taxa de erro de *bits* numa comunicação BPSK. Observou-se que, através de uma transmissão com arranjo de projetores realizando um *beamforming* em uma dada direção θ_{ot} , obteve-se um melhor rendimento em relação a uma fonte singular, reduzindo assim a BER e aumentando a concentração de *bits* certos. Verificou-se ainda que o esquema proposto tem um desempenho melhor que o obtido em [8]. Utilizando ruídos reais, fornecido pelo IE-APM, obteve-se resultados similares aos resultados simulados.

Um próximo passo dessa investigação será um experimento real com sinais transmitidos por um arranjo de projetores e coletados por um hidrofone em uma região similar ao cenário simulado.

REFERÊNCIAS

- [1] R. S. H. Istepanian and M. Stojanovic, "Underwater acoustic digital signal processing and communication systems," Jan. 2002.
- [2] C. M. G. Gussen, P. S. R. Diniz, M. L. R. de Campos, W. A. Martins, F. M. Costa, and J. N. Gois, "A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 242–255, 2016.
- [3] A. Palmeiro, M. Martin, I. Crowther, and M. Rhodes, "Underwater radio frequency communications," in *OCEANS 2011 IEEE - Spain*, June 2011, pp. 1–8.
- [4] J. Simpson, B. L. Hughes, and J. Muth, "Smart transmitters and receivers for underwater free-space optical communication," vol. 30, June 2012, pp. 964–974.
- [5] M. Chitre, S. Shahabudeen, and M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges," vol. 42, March 2008, pp. 103–116.
- [6] L. Liao, Y. Zakharov, and P. Mitchell, "Underwater localization based on grid computation and its application to transmit beamforming in multiuser UWA communications," vol. June, 01 2018, pp. 4297–4307.
- [7] A. Wiesel, Y. Eldar, and S. Shamai, "Zero-forcing precoding and generalized inverses," *Trans. Sig. Proc.*, vol. 56, no. 9, pp. 4409–4418, Sep. 2008.
- [8] K.-M. K. Yong-Ju Lee, Oe-Hyung Lee, "Transmit array for acoustic communications in multipath underwater channel," in *MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey*, vol. 3, 2001, pp. 1573–1576.
- [9] K.-W. A. P.-M. B. JENSEN, F. B., "Computational ocean acoustics," vol. 1. Springer Publishers, 2011.
- [10] X. Lurton, "An introduction to underwater acoustics: Principles and applications." Praxis Publishing, 2002.
- [11] P. Etter, "Underwater acoustic modeling: Principles, techniques, and applications." CRC Press, 2003.
- [12] M. B. Porter, "The Bellhop manual and user's guide: Preliminary draft," Jan. 2011.
- [13] H. L. Van Trees, "Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory." John Wiley and Sons, Inc, 2004.
- [14] S. Haykin, "Communication systems, 4th ed." John Wiley and Sons, Inc, 2001.