

ESPECIFICAÇÃO, DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM MODEM ACÚSTICO PARA COMUNICAÇÃO SUBMARINA

Specification, Development and Validation of an Acoustic Modem for Underwater Communication

Jefferson Osowsky¹, Fábio Contrera Xavier², Celso Marino Diniz³, Marcus Vinícius da Silva Simões⁴, Leonardo Martins Barreira⁵

Resumo: Este trabalho visa apresentar a especificação, desenvolvimento e validação de um protótipo de modem acústico para comunicação submarina. Este trabalho surgiu a partir de um experimento de comunicação acústica que tinha por objetivo transmitir e receber textos curtos em código Morse através de um canal digital de banda estreita. Nesta primeira versão, o modem utiliza a modulação e demodulação por chaveamento de frequência (*frequency shift keying* - FSK) na transmissão e recepção dos dados, respectivamente. Antes da transmissão, para melhorar sua confiabilidade, os dados são processados por um código de correção antecipativo de erro (*forward error correction* - FEC) convolucional e então embaralhados (do inglês, *interleaved*) de forma a reduzir a distorção causada pelo canal de comunicação e o erro de *burst* entre símbolos contíguos, respectivamente. Um experimento recente de transmissão/recepção de dados em um canal de comunicação em águas rasas foi realizado em Maio 2012 na Enseada dos Anjos, Rio de Janeiro, para avaliar o desempenho deste primeiro protótipo.

Palavras-chave: Comunicação Digital. Comunicação Submarina. Acústica Submarina. Modem Acústico Submarino. Modulação por Chaveamento de Frequência. Código de Correção Antecipativa de Erro. Codificação Convolucional.

Abstract: In this paper it is presented the specification, development and validation of an acoustic modem prototype for underwater communication. This work stemmed from an acoustic communication experiment which had the aim at transmitting and receiving short texts in Morse code by a narrowband digital channel. In this first version, the modem uses frequency shift keying (FSK) modulation/demodulation to send/get data to/from the receiver. Before transmission, to improve its reliability, data are coded via a convolutional forward error correction (FEC) code and then interleaved in order to reduce the distortion yielded by the communication channel and the burst error between successive symbols, respectively. An recent experiment of data transmission/reception in a shallow water communication channel has been conducted in May 2012 at Enseada dos Anjos, Rio de Janeiro, to assess the first prototype performance.

Keywords: Digital Communication. Underwater Communication. Underwater Acoustic. Underwater Acoustic Modem. Frequency Shift Keying Modulation. Forward Error Correction Code. Convolutional Coding.

1. Doutorando em Modelagem Computacional no Laboratório Nacional de Computação Científica - Petrópolis, RJ - Brasil. Bolsista DTI/CNPq da Divisão de Comunicação Submarina no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: jefferson@ieapm.mar.mil.br

2. Mestrando em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, RJ - Brasil. Ajudante da Divisão de Comunicação Submarina no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: contrera@ieapm.mar.mil.br

3. Engenheiro Eletrônico pela Universidade Estadual de Campinas - Campinas, SP - Brasil. E-mail: celsodiniz@gmail.com

4. Doutorando em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, RJ - Brasil. Encarregado do Grupo de Acústica Submarina no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: simoes@ieapm.mar.mil.br

5. Doutor em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, RJ - Brasil. Encarregado do Grupo de Sistemas Acústicos Submarinos no Instituto de Pesquisas da Marinha - Ilha do Governador, RJ - Brasil. E-mail: barreira@ipqm.mar.mil.br

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a comunicação acústica submarina vem atraindo a atenção de institutos de pesquisa ao redor do mundo devido ao seu potencial de aplicação em áreas tais como: oceanografia, petróleo e gás e defesa naval (CHITRE et al., 2008a; CHITRE et al., 2008b; LACOVARA, 2008). Além disso, dada a facilidade com que o som se propaga no oceano, a comunicação acústica é um método de transmissão e recepção de dados mais adequado se comparado à comunicação eletromagnética. Por exemplo, a atenuação de uma onda eletromagnética de 1kHz se propagando no oceano é cerca de 60 vezes maior que a atenuação de uma onda acústica de mesma frequência. Por outro lado, a comunicação em alta velocidade em canais acústicos submarinos é um desafio, por possuir, dentre outros limitantes, a estreita largura de banda, os múltiplos percursos do sinal transmitido e o efeito *Doppler* (LACOVARA, 2008; LI et al., 2008a; 2008b).

Na literatura, pode-se encontrar trabalhos que visam reduzir alguns desses efeitos por meio do uso de modulação por multiportadora (BERGER et al., 2010; LI et al., 2008b; YEUNG et al., 2003), em especial a modulação por divisão de frequências ortogonais (*orthogonal frequency division multiplexing* – OFDM) (CARRASCOSA; STOJANOVIC, 2010; LI et al., 2008a; LEE et al., 2006; TU et al., 2011), inclusive para canais acústicos em águas rasas, onde o efeito de percursos múltiplos é ampliado (PANARO et al., 2012; RADOSEVIC et al., 2010). Portanto, neste tipo de comunicação de dados, pode-se encontrar diversos problemas ainda não solucionados.

Neste trabalho, os autores apresentam de forma sucinta as etapas do desenvolvimento de um protótipo de modem acústico implementado em ambiente MatLab, bem como os resultados preliminares obtidos na transmissão/recepção de dados via um canal acústico submarino, em águas rasas, sujeito a ruído aditivo tratado como um processo gaussiano branco (*additive white gaussian noise* – AWGN). Tal projeto tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modem acústico totalmente nacional que possa ser incorporado aos sistemas de comunicação da Marinha do Brasil. Este artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 relata o experimento que originou o projeto do protótipo do modem acústico para comunicação submarina; a Seção 3 descreve o

desenvolvimento de tal protótipo até o presente momento; os resultados alcançados por outro experimento realizado na Enseada dos Anjos e as conclusões obtidas são apresentados nas Seções 4 e 5, respectivamente.

2. HISTÓRICO

O protótipo do modem acústico submarino surgiu a partir da implementação de um código de comunicação acústica simples, mas eficaz, desenvolvido em ambiente MatLab pelos pesquisadores do Grupo de Acústica Submarina (GAS) do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), que tinha por objetivo principal a transmissão em banda estreita de textos em código Morse. Este experimento foi composto por dois módulos: módulo de transmissão/codificação (MTx) e módulo de recepção/decodificação (MRx).

O protocolo de comunicação especificado para este experimento inicial foi baseado na regra de *pontos, traços e pausas* descrita pelo código Morse, i.e, um *ponto* foi codificado como uma forma de onda senoidal contínua (*continuous waveform* – CW) de 7kHz , duração de 0,3 segundos e amplitude unitária; um *traço* foi representado pela combinação de três pontos consecutivos. Além disso, uma *pausa* codificada como um período de silêncio de duração igual ao do *ponto* separava *pontos* e *traços*. Duas letras e duas palavras eram separadas por duas e três *pausas*, respectivamente. Como exemplificação deste protocolo, o sinal que codifica o texto “MARINHA DO BRASIL” é mostrado na Figura 1.

O módulo MTx era responsável por, dado um texto qualquer, codificá-lo em símbolos do código Morse para em seguida construir o sinal a ser enviado, $s(t)$, a partir do protocolo descrito acima. Cabe ressaltar que, como a implementação dos módulos foi realizada em ambiente MatLab, o sinal $s(t)$ foi discretizado em uma sequência $s[k]$, com frequência de amostragem de $44,1\text{kHz}$. O sinal discreto $s[k]$ era então transmitido para a porta de saída de áudio do computador, conectada a um amplificador de áudio e a uma fonte acústica. Assim, a energia sonora era transportada por um canal submarino aqui suposto como AWGN, cuja característica é a de adicionar um ruído $w(t)$ de média μ e variância σ^2 ao sinal $s(t)$. No módulo MRx, o sinal recebido $s(t) + w(t)$ era adquirido via um hidrofone, digitalizado com janela temporal de 13ms

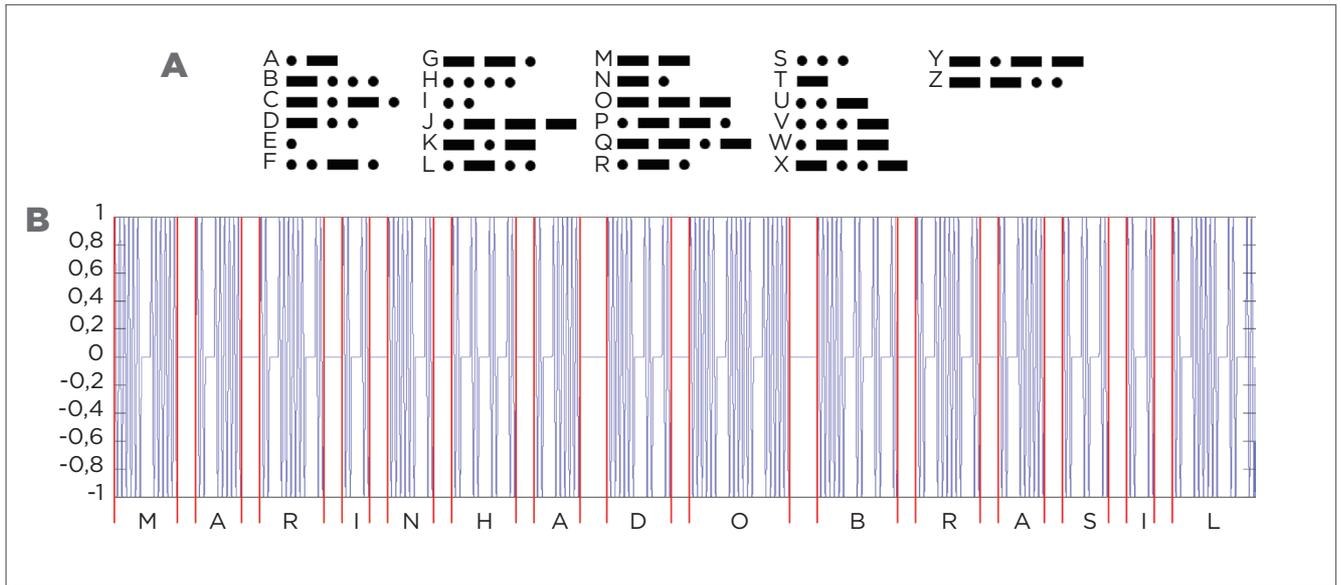


Figura 1. Exemplo de um sinal transmitido pelo MTx. (A) símbolos do código Morse para o alfabeto; (B) texto “MARINHA DO BRASIL” codificado pelo protocolo deste experimento.

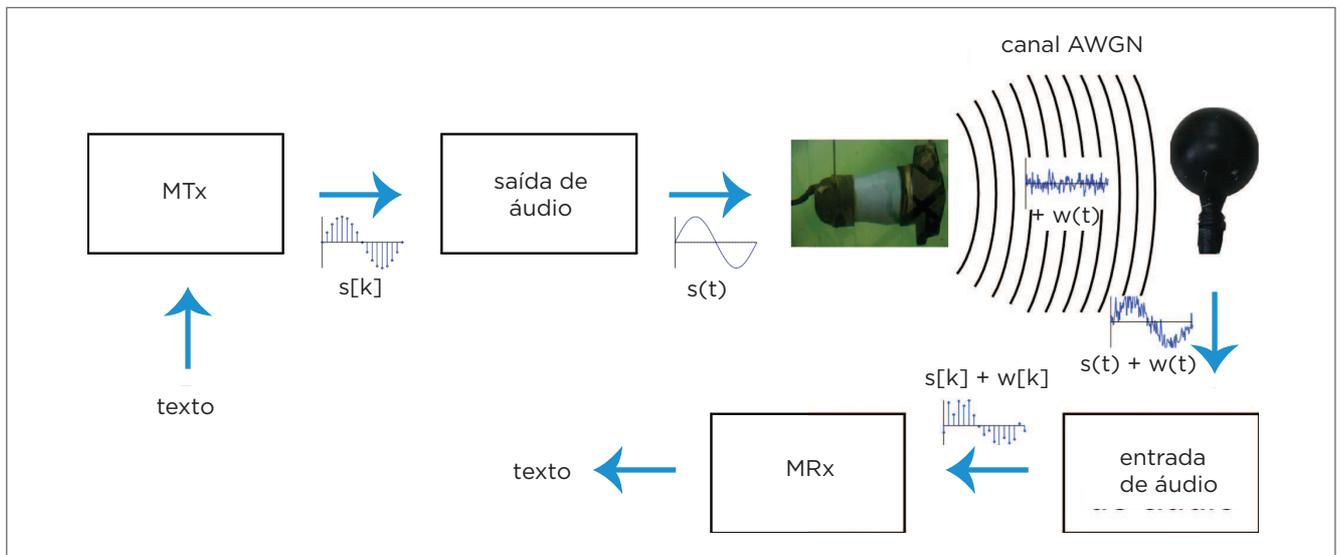


Figura 2. Diagrama em blocos do sistema de comunicação submarina utilizando código Morse.

e frequência de amostragem igual a $44,1 \text{ kHz}$. Em seguida, o espectro do sinal discreto $s[k] + w[k]$ era analisado e sua densidade calculada (OPPENHEIM; SCHAFFER, 1999). Se a densidade espectral fosse maior que um limiar, dependente de $w[k]$ naquele instante, o sinal era detectado e sincronizado no tempo para uma decodificação mais eficaz. Finalmente,

$s[k]$ era identificado e decodificado em tempo real. A Figura 2 mostra o diagrama em blocos deste sistema.

Cabe ressaltar que os resultados obtidos por este experimento realizado no tanque acústico de testes do IEAPM possibilitou o desenvolvimento do protótipo do modem acústico para comunicação submarina a ser descrito na próxima seção.

3. O MODEM ACÚSTICO SUBMARINO

Na primeira etapa deste projeto, foram feitos alguns estudos sobre técnicas de modulação e demodulação a fim de melhorar o desempenho do experimento anterior, que até então tinha sua eficácia garantida em ambiente controlado. Dentre as técnicas de modulação existentes, foi utilizada a modulação digital (*frequency shift keying* – FSK), por razões de simplicidade e confiabilidade. Esta modulação consiste, resumidamente, em associar cada símbolo a ser transmitido a um pulso senoidal de frequência específica com duração predefinida. Desta forma, os dados se transformam em uma série de pulsos modulados em n frequências distintas sendo transmitidos sequencialmente para o canal de comunicação (WATSON, 1980).

A fim de reduzir a taxa de erro de bit (*bit error rate* – BER) e elevar a taxa de transmissão de dados (*bits per second* – bps) neste tipo de canal de comunicação, um protocolo mais robusto e eficaz foi especificado, fazendo com que os módulos MTx e MRx fossem reprojatados. Primeiramente, foi escolhida a modulação 16-FSK, chaveamento de 16 frequências distintas (canais), a qual permite transmitir 4 bits por símbolo. A frequência f_{ck} de cada canal é definida como $f_{ck} = f_0 + (k - 1) \Delta f$, $k = 1, \dots, 16$, onde f_0 e Δf são a menor frequência utilizada na modulação e o espaçamento entre os canais, respectivamente. O k -ésimo canal modula a sequência de 4 bits que representa o número k na base binária, i.e, o dado em binário 0111 é transformado em $k = 7$ na base decimal que, por sua vez, será modulado pelo canal 7, com frequência igual à $f_{C7} = f_0 + 6\Delta f$.

O formato do protocolo de comunicação está exemplificado na Figura 3 e é descrito a seguir. A mensagem é empacotada de forma que no início e no final de cada transmissão seja enviado um sinal CW_STT, que indica o seu início, e um sinal CW_STP, que indica o seu final, com duração de t_{CW} segundos e frequência f_{CW} , usado na etapa de demodulação como indicativo do momento de início e de término da mensagem, permitindo que o sinal recebido seja analisado dentro de uma janela temporal conhecida, facilitando assim o sincronismo, detecção e decodificação dos seus símbolos.

Cada símbolo (SYMB # k), $k = 1, \dots, N$, é codificado por um pulso de duração igual à $t_s + t_g$ segundos, onde nos primeiros t_s segundos reside o pulso senoidal que identifica o canal da modulação 16-FSK como já descrito anteriormente. Após este pulso, segue-se um tempo de guarda ou silêncio de t_g segundos necessário

para reduzir o efeito da interferência intersimbólica, causada, principalmente, pelo espalhamento de retardo (*delay spread*) do pulso, devido aos múltiplos percursos a que ele está sujeito durante sua propagação no meio de transmissão (VITERBI; OMURA, 1979). Cabe ressaltar que um canal de comunicação acústica em águas rasas exibe um tempo considerável de *delay spread*.

Note que, pela Figura 3, o pulso que identifica cada um dos símbolos na mensagem não é definido por um sinal senoidal puro, mas sim, pela multiplicação de um sinal senoidal por uma janela cuja forma se assemelha à de uma onda senoidal de meio ciclo conhecida na literatura como “Janela de *Hanning*”, tendo como principais características a distinção eficiente entre sinais de baixa e alta amplitude que possuam frequências próximas; a atenuação dos lóbulos laterais; e a redução significativa de contaminação espectral (*spectral leakage*) do sinal (OPPENHEIM; SCHAFER, 1999).

Na recepção, primeiramente, dentro do sinal discreto recebido, $s[k]$, devem ser identificados os pulsos CW_STT e CW_STP, permitindo assim que apenas a sequência existente entre estes marcadores, chamada daqui em diante de $\{s\}$, seja encaminhada para o processo de demodulação FSK. Nesta etapa, a sequência $\{s\}$ é dividida em subsequências $\{s\}t$ de duração igual a $t_s + t_g$ segundos, que são analisadas por um banco de filtros digitais passa-banda, cada um sintonizado em uma frequência f_{ck} , $k = 1, \dots, 16$, que identifica o canal recebido. Contudo, pelo fato de $\{s\}t$ estar corrompido por ruídos inerentes ao meio de comunicação, *delay spread* e *fading* devido aos múltiplos percursos e *Doppler shift*, este procedimento deve ser realizado via um algoritmo de decisão que analisa a probabilidade da frequência f_{ck} estar presente em $\{s\}l$. Ao final, o símbolo correspondente ao canal que possui a maior probabilidade de ter sido recebido é armazenado em um *buffer*.

Até o presente momento, além das etapas de modulação e demodulação 16-FSK do sinal transmitido e recebido, respectivamente, os módulos MTx e MRx realizam três outras funções ilustradas nos diagramas em blocos da Figura 4. Tais funções são descritas de forma sucinta a seguir.

- Conversor ASCII (binário) para binário (ASCII): converte um caracter da tabela ASCII para a sua representação na base binária e vice-versa. Por exemplo, o caracter ‘A’ é representado na tabela ASCII pelo número inteiro 65, que transformado em binário torna-se 01000001.
- Codificador (decodificador) convolucional (MUNIZ, 2011; VITERBI; OMURA, 1979): sua função principal é a de

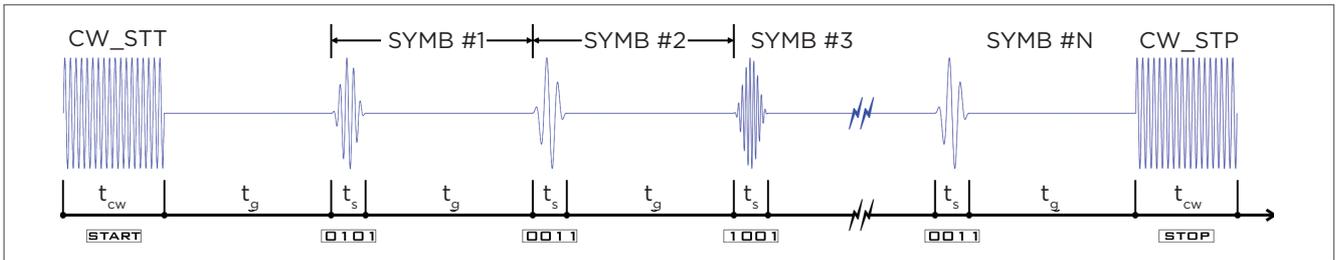


Figura 3. Especificação do protocolo de comunicação do protótipo do modem acústico submarino.

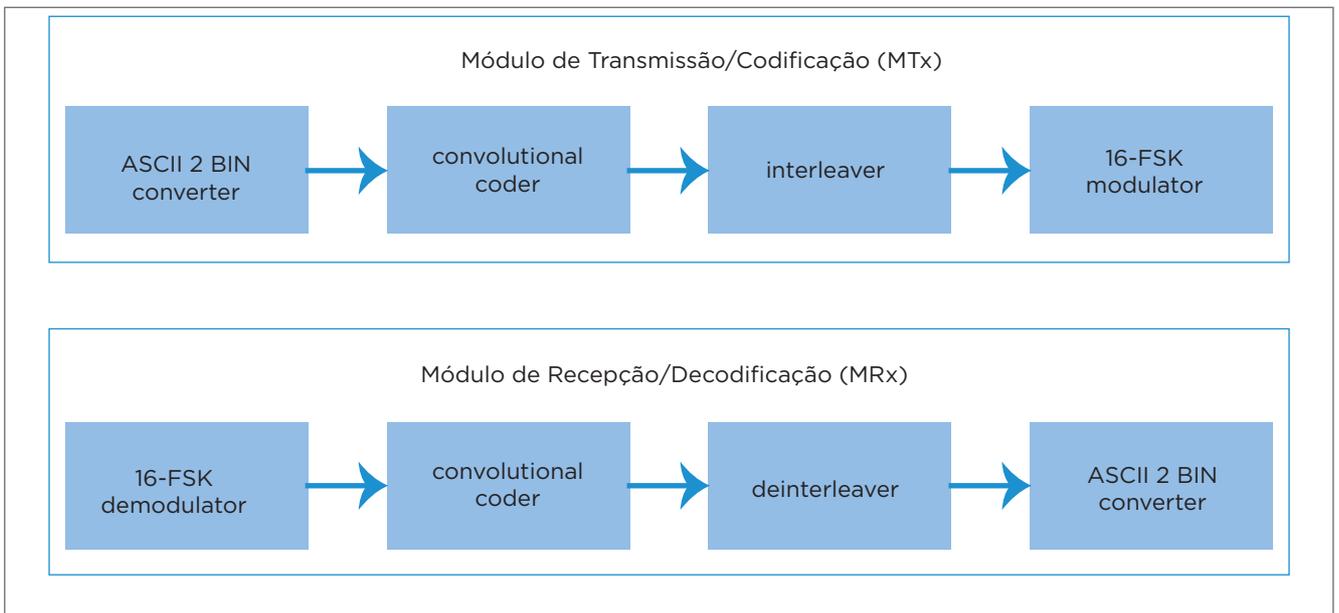


Figura 4. Módulos implementados para o sistema de comunicação submarina.

adicionar bits de redundância à sequência de bits contendo a informação desejada de forma que esta possa ser recuperada no seu destino mesmo que a distorção causada pelo canal de comunicação tenha corrompido alguns bits originais. Tal técnica pertence à classe de códigos FEC. Em relação ao decodificador, utilizou-se o Algoritmo de Viterbi (VA), por possuir o melhor desempenho em relação aos outros do ponto de vista probabilístico. O VA infere os valores da sequência de entrada dos bits recebidos e distorcidos pelo canal de comunicação de forma a produzir uma sequência de saída que possui a maior probabilidade de ter sido transmitida. Neste processo, os bits corrompidos podem ser corrigidos.

- (Des)Embaralhador (VITERBI; OMURA, 1979): A maioria dos canais de comunicação, na prática, possuem

dependência estatística entre os símbolos contíguos transmitidos. Tais canais são chamados “com memória” e degradam consideravelmente o desempenho de codificadores projetados para operar em canais “sem memória”. Isso ocorre porque esta memória reduz o número de graus de liberdade independentes dos sinais transmitidos, causando o erro de *burst* (ELLIOTT, 1963). Se o número de símbolos contíguos errados exceder a capacidade de correção de erro do código (*forward error correction – FEC*), o decodificador falha na recuperação do sinal original na sua íntegra. Uma técnica utilizada na prática para reduzir o erro de *burst* de forma a melhorar o desempenho do FEC e que não requer nenhum conhecimento *a priori* sobre a memória do canal de comunicação, já que na prática isso se torna impossível, é a de embaralhamento dos

bits do sinal a ser transmitido, eliminando assim a dependência existente entre bits contíguos. O embaralhamento consiste em separar dois bits contíguos provenientes de um codificador FEC de uma distância L de forma que após este processo a memória estatística entre bits consecutivos seja reduzida. Por exemplo, seja uma sequência binária dada por $\left\{ \begin{matrix} 1,0,1,0,0,1,0,1 \\ 1,2,3,4,5,6,7,8 \end{matrix} \right\}$, os números em subscrito indicam a posição do bit na sequência, e seja $L = 1$ a separação entre bits do embaralhador. Então o sinal de saída do embaralhador, tendo como entrada a sequência acima, é dada por $\left\{ \begin{matrix} 1,0,0,1,1,0,0,1 \\ 1,5,2,6,3,7,4,8 \end{matrix} \right\}$. Cabe ressaltar que quanto maior o valor de L , menor a dependência estatística entre os símbolos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de se avaliar o desempenho deste primeiro sistema de comunicação acústica submarina desenvolvido pelo GAS/IEAPM, primeiramente foram realizadas simulações em ambiente MatLab. Neste contexto, um conjunto com distribuição uniformemente aleatória contendo 2.000 bytes foi gerado. Esta sequência de bytes foi codificada pelo MTx de forma a obtermos o sinal modulado a ser transmitido. Os parâmetros de configuração do modem acústico foram os seguintes: $f_0 = 4.235 \text{ Hz}$, $\Delta f = 235 \text{ Hz}$, $t_s = 10 \text{ ms}$, $t_g = 50 \text{ ms}$, $t_{c_w} = 30 \text{ ms}$, $f_{c_w} = 8.005 \text{ Hz}$ e *code rate* igual a 1/2. Estes valores foram tomados a partir da análise da faixa espectral de operação do projetor e do hidrofone que foram utilizados no experimento realizado na Enseada dos Anjos e da análise do *fading* que ocorre neste canal de comunicação.

A este sinal foi adicionado um ruído gaussiano branco (AWG) ou um ruído impulsivo (IMP), de forma a gerar um sinal ruidoso com um dado (*signal-to-noise ratio* – SNR) que em seguida foi processado pelo MRx desenvolvido neste laboratório. Os resultados alcançados de BER *versus* SNR para ambos os ruídos antes e depois do processo de decodificação — curvas em azul e vermelho, respectivamente — são mostrados na Figura 5.

O experimento realizado para avaliar o desempenho do protótipo de um modem acústico submarino em ambiente real ocorreu em maio de 2012, na Enseada dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ. O hidrofone utilizado, modelo ITC 1001, estava fundeado na Praia dos Anjos a uma profundidade de

7.3 metros e a fonte sonora, modelo Lubell 1424HP, estava instalada no Aviso de Pesquisas Oceanográficas (AvPqOc) *Diadorim* a 3 metros de profundidade e distante de 1.180 a 3.400 metros do hidrofone.

A mensagem escolhida para este teste de desempenho do modem foi o pantograma em inglês “*the quick brown fox jumps over the lazy dog*”, que possui a característica de compreender todas as letras do alfabeto, repetido 5 vezes com um espaço entre frases, totalizando 219 caracteres, i.e., 1.752 bits. Os parâmetros de configuração do modem foram mantidos os mesmos daqueles utilizados nas simulações em MatLab. Note que, com *code rate* igual a 1/2, o total de bits transmitidos foi de 3.504.

Seis mensagens foram transmitidas do AvPqOc *Diadorim* e processadas de forma *offline* pelo algoritmo descrito neste trabalho. Para exemplificar o procedimento de transmissão e recepção da mensagem, são plotados nas Figuras 6a e 6c os gráficos contendo os primeiros 7 segundos dos sinais transmitido e recebido, respectivamente. Ao lado destes, Figuras 6b e 6d, são mostrados seus respectivos espectrogramas, onde a coloração vermelha indica o símbolo que foi transmitido por seu respectivo canal.

Para avaliar o desempenho do modem, foram calculados os BERs antes e depois da etapa de decodificação para cada uma das mensagens. Note que, o BER obtido antes da decodificação é calculado a partir dos 3.504 bits recebidos — resultados mostrados em azul escuro na Figura 7 — e o BER após a decodificação é calculado com os 1.752 bits da mensagem original — resultados mostrados em azul claro na Figura 7.

O melhor desempenho foi obtido para a mensagem rotulada de “28May2012-1215” com $BER^{(1)} = 3,14 \cdot 10^3$ e $BER^{(2)} = 5,71 \cdot 10^4$, Sendo $BER^{(1)}$ antes da decodificação (*undecoded*) e $BER^{(2)}$ depois da decodificação (*decoded*), e o pior resultado foi alcançado pela mensagem “28May2012-1307”, $BER^{(1)} = 3,77 \cdot 10^{-2}$ e $BER^{(2)} = 1,71 \cdot 10^{-2}$. Para este conjunto de dados, tem-se como BER médio os seguintes valores: $BER^{(1)} = 1,31 \cdot 10^2$ e $BER^{(2)} = 6,28 \cdot 10^3$. Cabe ressaltar que, em vista dos BERs obtidos antes e depois do bloco de decodificação, o método de codificação convolucional aplicado na versão deste modem se mostrou eficiente e robusto, corrigindo significativamente os erros ocorridos durante a transmissão dos dados. Por exemplo, para as mensagens “28May2012-1215” e “28May2012-1307” seus $BER^{(1)}$ são 444,91% e 120,47% maiores que seus $BER^{(2)}$, respectivamente.

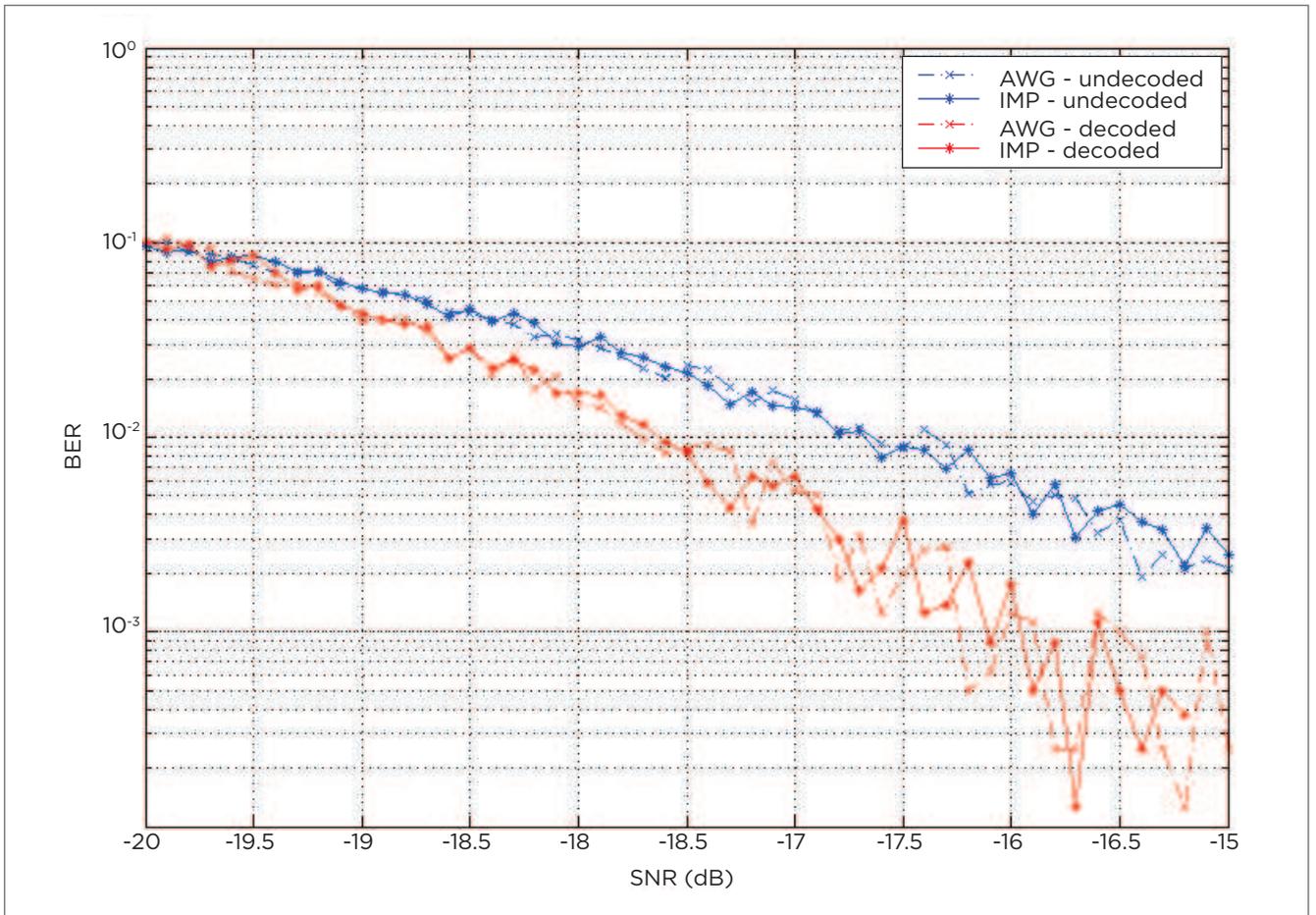


Figura 5. Resultados das simulações realizadas em MatLab para uma mensagem de 2.000 bytes.

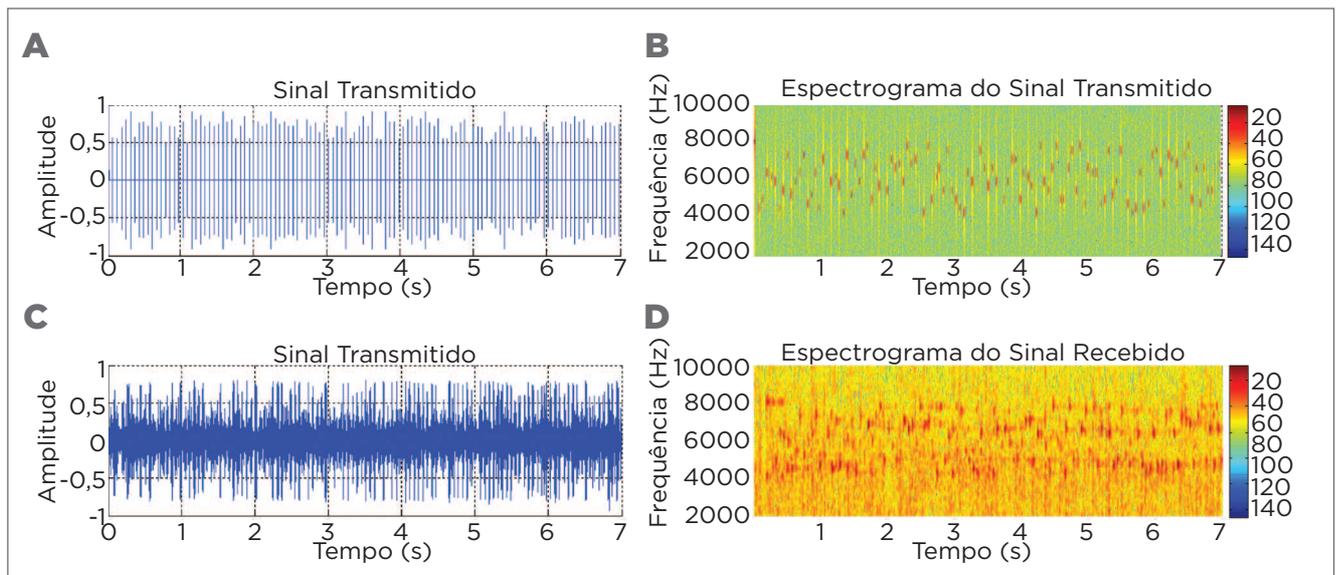


Figura 6. Sinais transmitido e recebido pelo modem acústico submarino durante os 7 primeiros segundos. (A) sinal transmitido e (B) seu espectrograma; (C) sinal recebido e (D) seu espectrograma.

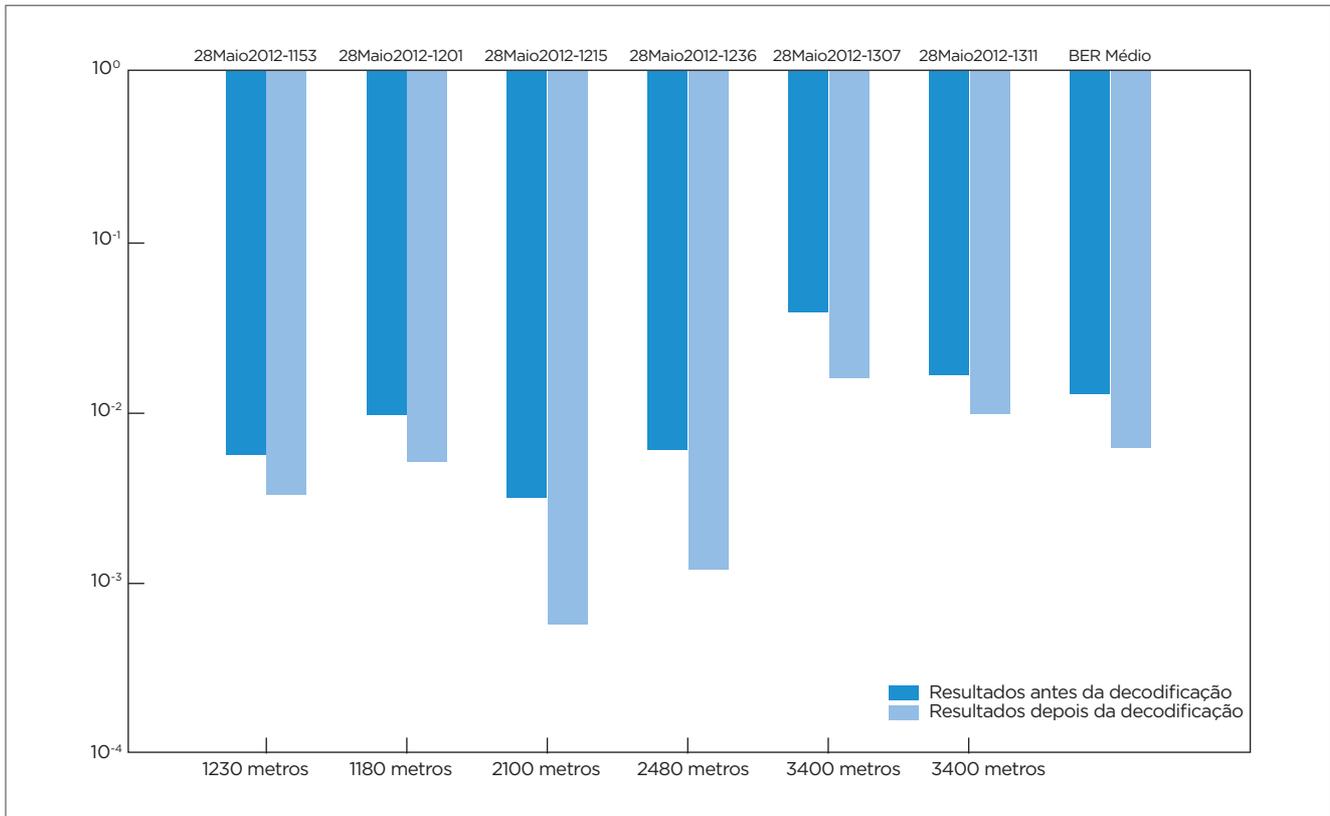


Figura 7. BERs das mensagens transmitidas no teste de validação do modem acústico e seu valor médio.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram descritas as etapas de projeto e implementação de um modem acústico para comunicação submarina, definido por software com modulação 16-FSK e codificação convolucional, bem como foram apresentados os resultados preliminares obtidos durante sua validação. Ante os resultados do experimento na Enseada dos Anjos, as seguintes alterações estão sendo implementadas:

- inserção de um sinal de *chirp* no lugar dos sinais CW_STT e CW_STP a fim de melhorar o sincronismo entre transmissor e receptor;
- selecionar as frequências f_{ck} dos canais de forma a serem ortogonais duas a duas no intuito de reduzir a interferência intersimbólica;
- substituição dos bancos de filtros digitais passa-banda por um banco de filtros casados (*matched filters*) a fim de melhorar a identificação do canal recebido através da maximização de sua relação sinal-ruído (NORTH, 1963; SUSSMAN, 1960; TURIN, 1960);

- correção do efeito de Doppleração via técnicas de interpolação; e
- utilização de técnicas de equalização adaptativa para compensar os efeitos de distorção do canal de comunicação.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à tripulação do AvPqOc *Diadorim* pelo constante apoio nos diversos experimentos realizados pelo GAS; ao 1º Ten (EN) Vale, ao 1º Ten (RM2-T) Giuseppe, ao SO-EL (RM1) Nonato e ao estagiário Marcos Felipe Medeiros pela condução, organização e participação eficaz no experimento realizado na Enseada dos Anjos; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro concedido mediante a subvenção número 381984/2012-5/DTI. Cabe ressaltar que, este trabalho tem o suporte financeiro da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil (SecCTM), processo número TC 53000/2011-001/2011.

REFERÊNCIAS

- BERGER, C.R.; ZHOU, S.; PREISIG, J.C.; WILLETT, P. Sparse Channel Estimation for Multicarrier Underwater Acoustic Communication: From Subspace Methods to Compressed Sensing. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 58, n. 3, p. 1708-1721, 2010.
- CARRASCOSA, P.C.; STOJANOVIC, M. Adaptive Channel Estimation and Data Detection for Underwater Acoustic MIMO-OFDM Systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 35, n. 3, p. 635-646, 2010.
- CHITRE, M.; SHAHABUDEEN, S.; STOJANOVIC, M. Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges, *Marine Technology Society Journal*, v. 42, n. 1, p. 103-116, 2008.
- CHITRE, M.; SHAHABUDEEN, S.; FREITAG, L.; STOJANOVIC, M. Recent Advances in Underwater Acoustic Communications & Networking. In: *MTS/IEEE OCEANS'08 Conf.*, 15-18 de setembro, Cidade de Quebec, Canadá, 2008.
- ELLIOTT, E.O. Estimates of Error Rates for Codes on Burst-Noise Channels, *Bell System Technical Journal*, v. 42, n. 5, p. 1977-1997, 1963.
- LACOVARA, P. High-Bandwidth Underwater Communications, *Marine Technology Society Journal*, v. 42, n. 1, p. 93-102, 2008.
- LI, B.; HUANG, J.; ZHOU, S.; BALL, K.; STOJANOVIC, M.; FREITAG, L.; WILLETT, P. Further Results on High-Rate MIMO-OFDM Underwater Acoustic Communications. In: *MTS/IEEE OCEANS'08 Conf.*, 15-18 de setembro, Cidade de Quebec, Canadá, 2008.
- LI, B.; ZHOU, S.; STOJANOVIC, M.; FREITAG, L.; WILLETT, P. Multicarrier Communication over Underwater Acoustic Channels with Nonuniform Doppler Shifts. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 33, n. 2, p. 198-209, 2008.
- LEE, J.; LOU, H-L.; TOUMPAKARIS, D.; CIOFFI, J.M. SNR Analysis of OFDM Systems in the Presence of Carrier Frequency Offset for Fading Channels. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, v. 5, n. 12, p. 3360-3364, 2006.
- MUNIZ, D.A. *Decodificador de Viterbi com Complexidade Reduzida Baseado no Algoritmo-M e na Treliça Mínima*. 2011. Dissertação de Mestrado: CPGEI/UTFPR, Curitiba (PR). 2011.
- NORTH, D.O. An Analysis of the Factors which Determine Signal/Noise Discrimination in Pulsed-Carrier Systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 51, n. 7, p. 1016-1027, 1963.
- OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W. *Discrete-Time Signal Processing*, NJ, EUA: Prentice Hall, 1999.
- PANARO, J.S.G.; LOPES, F.R.B.; BARREIRA, L.M.; SOUZA, F.E. Underwater Acoustic Noise Model for Shallow Water Communications. Aceito no XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 13-16 de setembro, Brasília, Brasil, 2012.
- RADOSEVIC, A.; FERTONANI, D.; DUMAN, T.M.; PROAKIS, J.G.; STOJANOVIC, M. Capacity of MIMO Systems in Shallow Water Acoustic Channels. In: 44a. *Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*, 07-10 de novembro, Pacific Grove, EUA, 2010.
- SUSSMAN, S. A Matched Filter Communication System for Multipath Channels. *IRE Transactions on Information Theory*, v. 6, n. 3, p. 367-373, 1960.
- TU, K.; FERTONANI, D.; DUMAN, T. M.; STOJANOVIC, M.; PROAKIS, J. G.; HURSKY, P. Mitigation of Inter-carrier Interference for OFDM over Time-Varying Underwater Acoustic Channels. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 36, n. 2, p. 156-171, 2011.
- TURIN, G. An Introduction to Matched Filters. *IRE Transactions on Information Theory*, v. 6, n. 3, p. 311-329, 1960.
- VITERBI, A.J.; OMURA, J.K. *Principles of Digital Communications and Coding*, EUA: McGraw-Hill, 1979.
- WATSON, B. FSK: Signals and Demodulation. *WJ Tech-notes: The Communications Edge*, v. 7, n. 5, 1980.
- YEUNG, L.F.; BRADBEEER, R.S.; LAW, E.T.M.; WU, A.; LI, B.; GU, Z.G. Underwater Acoustic Modem Multicarrier Modulation. In: *OCEANS'03 Conf.*, 22-26 de setembro, San Diego, EUA, 2003.