

# Sistema OFDM em Canais Acústicos Submarinos com Desvanecimento por Multipercursos

Daniel R. de Luna, Israel A. N. Dantas, Lívio C. Sousa, Vicente A. de Sousa Jr.

**Resumo**—Cerca de 70% da superfície da terra é coberta por água do mar, uma área ainda pouco explorada para fins de comunicação. Desde aplicações comerciais a aplicações militares (envolvendo também a obtenção e preservação de recursos naturais), explorar comunicações submarinas pode ser estratégico e uma vantagem competitiva para países com costa extensa, como o Brasil. Este trabalho tem como objetivo avaliar por meio de protótipos em software o desempenho de uma comunicação através de um canal acústico submarino sujeito a desvanecimento. A modelagem do canal submarino é comparada a um modelo clássico de canal sem fio por onda eletromagnética, apresentando efeitos similares em relação ao espalhamento temporal e em frequência. Assim, a análise se baseia em um sistema OFDM, o qual é capaz de combater os efeitos de desvanecimento em um canal sem fio tradicional. Após apresentar a modelagem do canal submarino e os trabalhos relacionados a proposta deste artigo, é evidenciado a diferença de desempenho da BER do OFDM nos canais analisados, evidenciando a hostilidade do canal submarino em termos de propagação.

**Palavras-Chave**—Canal Submarino; desvanecimento por multipercursos; OFDM.

**Abstract**—About 70% of earth surface is covered with sea water, an area that is few explored in communication. From commercial applications to military applications (involving preservation and exploration of natural resources), investigating submarine communications can be strategic and a competitive advantage to countries with long coast, as Brazil. This work aims at evaluating through prototypes in software the performance of a communication over submarine acoustic channel subject to fading. The submarine channel modeling is then compared to a classic wireless channel with electromagnetic wave, showing similar effects concerning temporal and frequency scattering. Thus, the analysis is based on OFDM system, in which it can mitigate the traditional wireless channel fading. After presenting the submarine channel model and the works related to this paper proposal, it is clear the difference of BER performance of OFDM in both traditional and submarine channel, highlighting the hostility of submarine channel in terms of propagation.

## I. INTRODUÇÃO

Os canais de transmissão submarinos são considerados um dos meios mais difíceis de comunicação e a utilização de sinais acústicos, em comparação com sinais eletromagnéticos, é tida como a melhor forma de transmissão nesse meio, para boa parte das aplicações [1]. Contudo, a largura de banda do canal acústico submarino (*Underwater Acoustic Channel - UWA*) é muito limitada, de forma que os

Os autores Daniel R. de Luna, Israel A. N. Dantas e Vicente A. de Sousa Jr. são do Departamento de Engenharia de Comunicações da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. Emails: {daniel, israel, vicente}.gppcom@gmail.com. O autor Lívio C. Sousa é Engenheiro de Equipamentos do Departamento de Exploração e Produção da Petrobras, Alto Rodrigues, RN.

equipamentos de comunicação operam em uma faixa de frequência de poucas dezenas de kHz. Ou seja, a frequência da portadora é da ordem de grandeza da largura de banda do canal, de modo que o sistema é considerado como sendo de banda larga [2]. Por essa razão, as comunicações acústicas submarinas apresentam vulnerabilidades quanto aos multipercursos e ao efeito Doppler, sendo este último causado principalmente pela baixa velocidade do som na água, em torno de 1500 m/s. Assim, um candidato natural para combater esses problemas é a técnica de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), pois procura utilizar a limitada banda de modo eficiente, particionando-a por meio de subportadoras (SC), transformando um sistema de banda larga em múltiplos sistemas de banda estreita (sujeitos a desvanecimento plano ao invés de seletivo).

Há uma gama de trabalhos envolvendo o OFDM ou um esquema de múltiplas portadoras em canais acústicos submarinos. Alguns focam na estimação dos parâmetros do canal [3]–[7], enquanto que outros grupos de pesquisa se dedicam a investigar sincronização e os parâmetros utilizados no OFDM [8]–[14]. De um modo geral, o ZP-OFDM (*Zero Padding - OFDM*) é o escolhido nos trabalhos citados para evitar um alto consumo de potência, e, por isso, não se tem analisado em detalhes a influência do intervalo de guarda utilizando o Prefixo Cíclico, nem da variação das subportadoras na taxa de erro de bit (*BER - Bit Error Rate*).

Este trabalho visa fazer uma análise do CP-OFDM (*Cyclic Prefix-OFDM*) em canais submarinos, comparando com canais sem fio TDL (*Tapped Delay Line*), que foram escolhidos por apresentarem certas similaridades de modelagem entre si, sendo organizado como a seguir. Na seção II, o canal submarino é modelado, detalhando os efeitos de larga e pequena escalas. A seção III traz um levantamento de trabalhos relacionados a proposta deste artigo. A modelagem do sistema CP-OFDM é apresentada na seção IV. A seção V traz a análise de desempenho do CP-OFDM nos canais sem fio TDL e submarino. Por fim, na seção VI estão as conclusões e comentários finais.

## II. MODELAGEM DO CANAL SUBMARINO

Nesta seção será discutida a modelagem do canal acústico submarino considerando os efeitos de larga e pequena escala. Para este tipo de canal, os efeitos de larga escala compreendem o multipercurso, o atraso de propagação e a incerteza da geometria do sistema [15], enquanto que os efeitos de pequena escala englobam um refinamento do espalhamento por multipercursos e o efeito Doppler [16].

### A. Efeitos de Larga Escala

De acordo com [16], os efeitos de larga escala de um sinal acústico são aqueles responsáveis pelas variações dos percursos causados pela incerteza exata da geometria do sistema, tais como distância entre os transceptores, alturas das marés etc. Por essa razão, diferentemente, dos canais sem fio tradicionais, o multipercurso para canais acústicos submarinos é modelado nos efeitos de larga escala.

Seja a função de transferência de cada percurso  $p$  dada por [16]:

$$H_p(f) = \frac{\Gamma_p}{\sqrt{A(l_p, f)}}, \quad (1)$$

em que  $A(l_p, f)$  é a atenuação do percurso  $p$  devido à separação  $l_p$  entre transmissor e receptor, a qual depende da frequência  $f$  da portadora.  $\Gamma_p$  é o coeficiente de reflexão acumulativo determinado pelo número de reflexões na superfície  $n_{sp}$  e no fundo do mar  $n_{bp}$ .

Na Equação (1), a atenuação do percurso é dada por:

$$A(l, f) = A_o l^k a(f)^l, \quad (2)$$

em que  $A_o$  é uma constante escalar e  $k$  é o fator de espalhamento geométrico, cujos valores dependem da geometria de propagação considerada, variando entre 1 (cilíndrica) e 2 (esférica). Neste trabalho, será atribuído  $A_o = 1$  e  $k = 2$ . O termo  $a(f)$  é chamado de coeficiente de absorção, medido em dB/km, e obtido pela equação de Thorp's [17]:

$$10 \log a(f) = 0,11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f^2} + 2,75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,003. \quad (3)$$

Ainda na Equação (1), o coeficiente de reflexão acumulativo  $\Gamma_p$  é calculado como:

$$\Gamma_p = \gamma_s^{n_{sp}} \gamma_b^{n_{bp}}(\theta), \quad (4)$$

em que  $\gamma_s$  é o coeficiente de reflexão na superfície ( $\gamma_s = -1$ , no caso ideal); e  $\gamma_b$  é o coeficiente de reflexão no fundo do oceano, sendo função do ângulo de incidência da onda  $\theta$ , e pode ser modelado por:

$$\gamma_b = \begin{cases} \frac{\rho_b \sin(\theta) - \rho \sqrt{\frac{c}{c_b} - \cos^2(\theta)}}{\rho_b \sin(\theta) + \rho \sqrt{\frac{c}{c_b} - \cos^2(\theta)}}, & \text{se } \cos(\theta) \leq \frac{c}{c_b} \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (5)$$

em que  $\rho$  e  $c$  são a densidade e velocidade do som na superfície da água, respectivamente, enquanto que  $\rho_b$  e  $c_b$  são a densidade da água e a velocidade da água no fundo do mar, respectivamente ( $\rho = 1000 \text{ g/m}^3$ ,  $c = 1500 \text{ m/s}$ ,  $\rho_b = 1800 \text{ g/m}^3$  e  $c_b = 1300 \text{ m/s}$  são os valores usualmente utilizados) [16]. A Fig. 1 ilustra o modelo de larga escala do canal submarino, mostrando diferentes percursos partindo do transmissor e chegando ao receptor com um número de reflexões e ângulos de chegada diferentes.

De um modo geral, a função transferência de cada percurso  $p$  pode ser modelada com base na função de transferência de

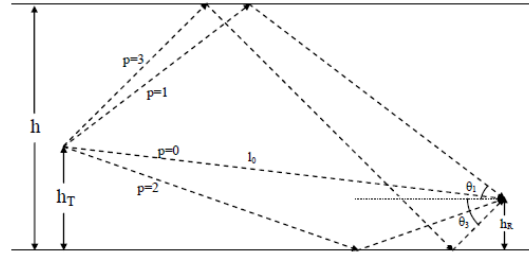


Fig. 1. Ilustração dos multipercursos da onda acústica (adaptado de [15]).

um percurso de referência  $p_0$ , ponderada, porém, com ganhos diferentes [16]. Assim, a função transferência normalizada em relação ao percurso de referência pode ser escrita como:

$$H_p(f) = \frac{\Gamma_p}{\sqrt{\left(\frac{l_p}{l_o}\right)^k a(f)^{l_p - l_o}}} H_o(f), \quad (6)$$

na qual, ao se atribuir

$$\bar{h}_p = \frac{\Gamma_p}{\sqrt{\left(\frac{l_p}{l_o}\right)^k a(f)^{l_p - l_o}}}, \quad (7)$$

pode-se reescrever a equação (6) como:

$$H_p(f) = \bar{h}_p H_o(f), \quad (8)$$

em que  $H_o(f) = \frac{1}{\sqrt{A(l_o, f)}}$  e  $l_o$  são, respectivamente, a função de transferência e a distância percorrida no percurso  $p_0$ ; com  $\bar{h}_p$  sendo o ganho correspondente ao percurso  $p$ .

No canal submarino não se tem certeza exata das posições dos transceptores devido aos movimentos das marés, dificultando a modelagem do canal. Contudo, foi proposto em [16] modelar tal incerteza refinando o ganho  $\bar{h}_p$ , obtendo-se assim:

$$h_p \approx \bar{h}_p e^{-\frac{\varepsilon_p \Delta l_p}{2}}, \quad (9)$$

em que  $\varepsilon_p = a_o - 1 + \frac{k}{l_p}$  e a variação  $\Delta l_p$  é tratada como aleatória, representando a incerteza da geometria espacial do canal.

Finalmente, inserindo a influência do atraso de propagação de cada percurso, a função transferência considerando os efeitos de larga escala é dada por [16]:

$$H(f) = H_o(f) \sum_p h_p e^{-i2\pi f \tau_p}, \quad (10)$$

sendo  $\tau_p$  o atraso de propagação do percurso  $p$  ( $\tau_p = \frac{l_p}{c} - t_o$  e  $t_o = \frac{l_o}{c}$ ).

### B. Efeitos de Pequena Escala

Há dois principais efeitos de pequena escala a considerar na modelagem do canal acústico submarino: o espalhamento em torno de cada multipercurso (micropercursos) e o efeito Doppler [16]. Assim, o modelo de canal consiste em refinar o modelo proposto para os efeitos de larga escala adicionando a influência dos efeitos de pequena escala. Deste modo, a

nova função de transferência pode ser obtida alterando a Equação (10) para [16]:

$$H(f) = H_o(f) \sum_p \sum_i h_p \gamma_i(f) e^{-j2\pi f \tau_{pd}(t)}, \quad (11)$$

em que se introduz o espalhamento em cada percurso com o novo somatório, e o efeito Doppler pelo termo  $\tau_{pd}(t)$ .

O termo  $\gamma_i(f)$  é uma variável aleatória que representa os ganhos dos micropercursos  $i$  de cada percurso  $p$ . Pelo teorema do limite central, quando houver um número suficientemente grande de micropercursos, pode-se aproximar o somatório dos  $\gamma_i(f)$  a uma variável complexa gaussiana de média  $\bar{\gamma}_p(f)$  e variância  $2\sigma^2(f)$ , ou seja:

$$\bar{\gamma}_p(f) = \mu_{p0} + \mu_p S_p \rho_p(f), \quad (12)$$

$$2\sigma^2(f) = \mu_p^2 S_p [1 - \rho_p^2(f)], \quad (13)$$

sendo:

$$\rho_p(f) = e^{-(2\pi f)^2 \frac{\sigma_{\delta p}^2}{2}}, \quad (14)$$

e

$$\sigma_{\delta p}^2 = \frac{1}{c^2} [2\sin(\theta_p)]^2 [n_{sp}\sigma_s^2 + n_{bp}\sigma_b^2], \quad (15)$$

A média  $\bar{\gamma}_p(f)$  é composta pela média das amplitudes dos micropercursos, considerando o percurso de referência  $p_0$ , adicionado com termo que diferencia a média de cada percurso,  $\mu_p S_p \rho_p(f)$ . Esse termo é formado pela média das amplitudes dos micropercursos do percurso  $p$  ( $\mu_p$ ), pelo número de micropercursos ( $S_p$ ), e pela distribuição gaussiana dos atrasos de propagação ( $\rho_p(f)$ ), todos mostrados na Equação (12) e na Equação (13).

A variável  $\rho_p(f)$ , mostrada na Equação (14), é a distribuição gaussiana dos atrasos de propagação dos micropercursos, de média zero e variância  $\sigma_{\delta p}^2$  dada pela Equação (15), na qual  $\sigma_s^2$  e  $\sigma_b^2$  são as variâncias do número de reflexões ao longo do percurso na superfície ( $n_{sp}$ ), e no fundo do oceano ( $n_{bp}$ ), respectivamente.

O efeito Doppler é modelado a partir do atraso de propagação  $\tau_{pd}(t) = \tau_p - a_d t$ , em que  $a_d$  é o fator escalar Doppler [16], que é influenciado por ao menos três tipos de movimentos: o deslocamento não-intencional dos transmissores/receptores ( $a_{dp}$ ), o deslocamento intencional veicular ( $a_{vdp}$ ) e o movimento das ondas do mar que afetam tanto o transmissor quanto o receptor ( $a_{sp}$ ).

Assim:

$$a_d = a_{dp} + a_{vdp} + a_{sp} = \frac{v_{dp}}{c} + \frac{v_{vp}}{c} + \frac{v_{sp}}{c} \quad (16)$$

O deslocamento não-intencional ( $v_{dp}$ ) é dado por:

$$v_{dp} = v_{td} \cos(\theta_p - \theta_{td}) - v_{rd} \cos(\theta_p - \theta_{rd}) \quad (17)$$

em que  $v_{td}$  e  $v_{rd}$  são as velocidades do transmissor e receptor, respectivamente;  $\theta_p$  é o ângulo de incidência da onda acústica no receptor; e  $\theta_{td}$  e  $\theta_{rd}$  são os ângulos das direções de  $v_{td}$  e  $v_{rd}$ , respectivamente.

Para o deslocamento intencional veicular, as velocidades do transmissor e receptor e os ângulos das direções

correspondentes são referenciadas, respectivamente, pelas variáveis  $v_{tv}$ ,  $v_{rv}$ ,  $\theta_{tv}$  e  $\theta_{rv}$ .  $\theta_o$  é o ângulo de incidência da onda, considerando o percurso de referência  $p_0$ . Desta forma, a Equação (18) mostra como  $v_{vp}$  é caracterizado.

$$v_{vp} = v_{tv} \cdot \left[ -2\sin\left(\frac{\theta_p - \theta_o - 2\theta_{tv}}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_p - \theta_o}{2}\right) \right] + v_{rv} \cdot \left[ -2\sin\left(\frac{\theta_p - \theta_o + 2\theta_{rv}}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_p - \theta_o}{2}\right) \right] \quad (18)$$

E por fim, a caracterização do  $v_{sp}$  é dada fazendo algumas considerações: o movimento das ondas que afetam os transceptores é vertical, criando assim um deslocamento que varia senoidalmente no tempo com amplitude  $A_w$  e frequência  $f_w$ . Além disso, considera-se que a  $j$ -ésima reflexão ao longo do percurso  $p$  contribui para alterar a fase do sinal,  $\phi_{p,j}$ , influenciada por tal movimento. Assim, a caracterização do fator Doppler para o movimento das ondas nos transceptores pode ser escrita como [16]:

$$v_{sp} = 4\pi f_w A_w \sin(\theta_p) \sum_j^{n_{sp}} \sin(2\pi f_w t + \phi_{p,j}) \quad (19)$$

### III. TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção apresenta um levantamento de trabalhos em OFDM com o canal apresentado na Seção II-A.<sup>1</sup> A maioria dos trabalhos exploram o tema estimação de canal [18]–[21]. Os autores de [18] introduzem o canal definido em [16], o referenciando como SACM (*Statistical Acoustic Channel Model*), e apresentam uma representação discreta e variante no tempo de um canal esparsos, baseada numa simplificação do SACM. É proposta uma técnica de estimação de canal com um número reduzido de pilotos através de sensoriamento comprimido. Outros dois métodos de estimação de canal são apresentados em [19] e [20], entretanto, a modelagem do canal utilizada é diferente da encontrada em [16]. Para fins ilustrativos, foram utilizadas 128 e 256 subportadores, com banda de 5 kHz, frequência mínima de 10.5 kHz e modulação QPSK. Já os autores de [21] propõem dois algoritmos iterativos para realizar a estimação de um canal *Multi-Scale Multi-Lag* (MSML) utilizando OFDM. O canal submarino é citado somente para justificar a escolha de alguns parâmetros utilizados na modelagem de canal, contudo é desenvolvido um canal distinto daquele exposto neste trabalho.

Em [22], se propõe uma maneira energeticamente eficiente de realizar agregação de portadoras em um sistema de comunicação submarina com OFDM. Foram utilizadas 1024 subportadoras no OFDM e foi indicado que experimentos estão sendo conduzidos para confirmar os resultados obtidos na simulação. Os autores de [23] analisam a SINR para sistemas OFDM através de um modelo de canal proposto que leva em conta a geometria do ambiente submarino. O trabalho [16] é citado para justificar uma das equações

<sup>1</sup>Considerando o banco de dados da *IEEE Xplore Digital Library* no mês de abril de 2017, somente oito artigos relacionam o OFDM à modelagem de canal apresentada em [16] e usada neste trabalho.

utilizadas. Outro trabalho que disponibiliza seu próprio modelo de canal é o [24], apresentando muitas semelhanças com o que fora descrito em [16].

O trabalho [25] tem participação de uma das autoras de [16] e se propõe a investigar vários temas, entres eles: alocação de potência, capacidade do canal acústico, imperfeições no conhecimento do canal e modelagem de fenômenos inerentes ao canal submarino, como o ruído colorido.

Em suma, o levantamento de estado da arte conduzido pelos autores deste artigo aponta que não existem trabalhos que explorem a análise parametrizada da taxa de erro de bit (BER) do OFDM no canal acústico submarino descrito em [16], nem tampouco fazendo o paralelo com o desempenho de um canal sem fio tradicional que apresente similaridades em sua modelagem.

#### IV. MODELAGEM DO SISTEMA

Esta seção descreve como o sistema OFDM foi modelado assim como os canais envolvidos nos testes.

##### A. Canal sem fio tradicional

Foi utilizado o modelo *Tapped Delay Line* (TDL) para representar um canal sem fio tradicional com desvanecimento por multipercursos. Os parâmetros de simulação do canal TDL bem como do sistema OFDM são apresentados na Tabela I [26].

TABELA I  
PARÂMETROS DO SISTEMA SEM FIO TRADICIONAL.

Parâmetros do canal TDL	
Banda	20 MHz
PDP	[ 0 -1 -2 -2 -3] dB
Delay	[0 150 250 300 400] ns
Tempo de Amostragem ( $T_s$ )	50 ns
Parâmetros do OFDM para o canal TDL	
Subportadoras (SC)	{128, 512}
Modulação	16 QAM
$T_s$	50 ns

Esse canal foi escolhido por apresentar similaridades com a modelagem do canal submarino apresentada na Seção II-A e por ter desempenho conhecido para sinais OFDM, o que serviu como *benchmarking* e atestado da correta modelagem do sistema OFDM construído.

##### B. Canal sem fio Submarino

A modelagem do canal submarino segue a formulação apresentada na Equação 10 da Seção II-A. Essa formulação modela os efeitos de larga escala com a presença de multipercursos, incluindo características de seletividade em frequência do canal similares a encontrada no canal sem fio TDL. Contudo, o canal submarino inclui especificidades em relação à incerteza do posicionamento do transmissor e do receptor, não presentes no canal TDL.

Para implementação do canal submarino foi utilizado uma simplificação descrita em [16], baseado no código disponível em [27]. O canal foi integrado ao modelo de transmissão e recepção OFDM implementado, o qual já havia sido testado

com o canal sem fio tradicional. Na Tabela II encontram-se os principais parâmetros utilizados para gerar o canal submarino e seu sistema OFDM correspondente.

TABELA II  
PARÂMETROS DO CANAL SUBMARINO.

Parâmetros do canal submarino	
Profundidade do Mar	100 m
Profundidade de Tx	20 m
Profundidade do Rx	50 m
Distância entre Tx e Rx	500 m
Frequência Central	10 kHz
Banda	10 kHz
$T_s$	0.1 ms
Parâmetros OFDM para o canal submarino	
Banda	10 kHz
Subportadoras (SC)	{128, 512}
Modulação	16 QAM
$T_s$	0.1 ms

#### V. RESULTADOS

Nesta seção são discutidos os resultados das simulações comparando o desempenho do OFDM em um canal sem fio tradicional e no canal submarino. O desempenho é avaliado através de curvas de taxa de erro de bit (BER) para valores de  $E_b/N_0$  entre 0 e 30 dB (com a  $E_b$  normalizada para 1). Configurações diferentes do sistema e do canal são identificadas por legenda e geram curvas distintas.

A Fig. 2 mostra o desempenho do OFDM em um canal TDL com uma variação no número de subportadoras e o tamanho (em percentual) do prefixo cíclico. Conclusões clássicas podem ser evidenciadas: (i) Com o aumento no número de subportadoras e duração do prefixo cíclico, os canais seletivos em frequência tendem a se tornar planos (curva teórica); e (ii) O uso do prefixo cíclico evita a perda de ortogonalidade entre subportadoras, mitigando a interferência entre elas. O tamanho do prefixo cíclico utilizado dependerá principalmente do *delay spread* do canal. Também é possível perceber o piso de BER (*BER floor*) nos casos em que se usa 0% de prefixo cíclico.

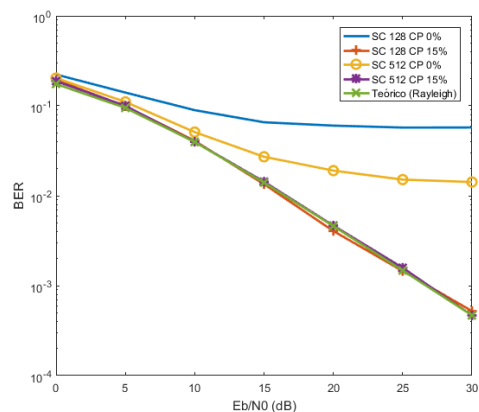


Fig. 2. OFDM 16-QAM para um canal TDL com diferentes números de subportadoras e tamanhos de prefixo cíclico.

A Fig. 3 mostra o desempenho do OFDM no canal submarino. É visível que o comportamento das curvas é semelhante ao do canal TDL tradicional. Também é observado que o aumento do número de subportadoras e no tamanho do prefixo cíclico proporcionam melhor BER. A configuração com 512 subportadoras e 15% de prefixo cíclico não converge completamente para o caso teórico devido a inclusão da perda de percurso e suas incertezas presente no canal submarino e não incluídas no canal TDL. Essa diferença de desempenho aumenta quanto maior for a distância entre Tx e Rx e diminui quando mais portadoras são utilizadas com durações de prefixos cíclicos maiores.

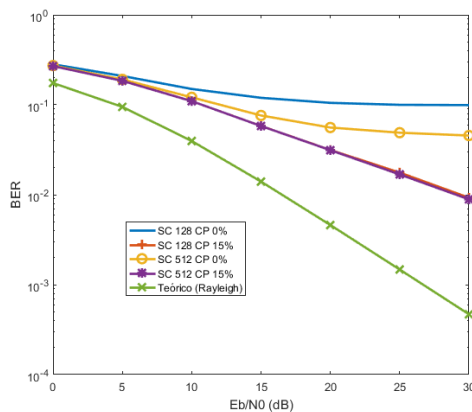


Fig. 3. OFDM 16-QAM para um canal Submarino com diferentes números de subportadoras e tamanhos de prefixo cíclico.

## VI. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Baseado nos resultados apresentados neste artigo, é possível perceber que o desempenho do sistema OFDM é severamente afetado pelo canal submarino devido não só aos efeitos de multipercursos, mas também aos fatores geométricos de um sistema submerso. Assim, o projeto do sistema OFDM submarino precisa ser feito com muito cuidado, pois escolher a banda (já limitada pelo espectro acústico), o tamanho do prefixo cíclico e o número de subportadoras pode influenciar bastante no tempo do símbolo OFDM. Em trabalhos futuros, espera-se incluir os efeitos de pequena escala (espalhamento Doppler) na implementação do canal submarino. Dessa forma, será analisado o projeto do sistema OFDM submarino perante não só a seletividade em frequência, mas também a seletividade temporal e o compromisso entre o tempo de coerência do canal, o número de subportadoras, a largura banda e o tempo de símbolo OFDM.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Sendra, J. Lloret, J. M. Jimenez, and L. Parra, "Underwater acoustic modems," *IEEE Sensors Journal*.
- [2] x. zhang, K. Song, C. Li, and L. Yang, "Parameter estimation for multi-scale multi-lag underwater acoustic channels based on modified particle swarm optimization algorithm," *IEEE Access*, 2017.
- [3] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag, and P. Willett, "Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform Doppler shifts," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008.
- [4] S. Mason, C. Berger, S. Zhou, K. Ball, L. Freitag, and P. Willett, "An OFDM design for underwater acoustic channels with Doppler spread," in *Proc. IEEE 13th Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop*, 2009.
- [5] M. Stojanovic, "Low complexity OFDM detector for underwater acoustic channels," in *Proc. OCEANS 2006*, 2006.
- [6] —, "MIMO OFDM over underwater acoustic channels," in *Proc. Systems and Computers 2009 Conf. Record of the Forty-Third Asilomar Conf. Signals*, 2009.
- [7] B. Li, J. Huang, S. Zhou, K. Ball, M. Stojanovic, L. Freitag, and P. Willett, "MIMO-OFDM for high-rate underwater acoustic communications," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009.
- [8] S. F. Mason, C. R. Berger, S. Zhou, and P. Willett, "Detection, synchronization, and Doppler scale estimation with multicarrier waveforms in underwater acoustic communication," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008.
- [9] S. Mason, C. Berger, S. Zhou, K. Ball, L. Freitag, and P. Willett, "An OFDM design for underwater acoustic channels with Doppler spread," in *Proc. IEEE 13th Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop*, 2009.
- [10] X. Wang and S. Zhu, "Mitigation of intercarrier interference based on general precoder design in OFDM systems," in *Proc. Int. Conf. Advanced Information Networking and Applications*, 2009.
- [11] A. Y. Kibangou, C. Siclet, and L. Ros, "ZF OFDM receiver for underwater communications," in *Proc. Control and Signal Processing (ISCCSP) 2010 4th Int. Symp. Communications*, 2010.
- [12] H.-W. Jeon, S.-J. Lee, and H. N. Lee, "LDPC coded OFDM system design and performance verification on a realistic underwater acoustic channel model," in *Proc. - MILCOM 2011 Military Communications Conf.*, 2011.
- [13] K. Tu, D. Fertoni, T. M. Duman, M. Stojanovic, J. G. Proakis, and P. Hursky, "Mitigation of intercarrier interference for OFDM over time-varying underwater acoustic channels," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011.
- [14] A. Radosevic, R. Ahmed, T. M. Duman, J. G. Proakis, and M. Stojanovic, "Adaptive OFDM modulation for underwater acoustic communications: Design considerations and experimental results," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014.
- [15] P. Qarabaqi and M. Stojanovic, "Statistical modeling of a shallow water acoustic communication channel," in *Proc. Underwater Acoustic Measurements Conference, Nafplion, Greece*. Citeseer, 2009.
- [16] —, "Statistical characterization and computationally efficient modeling of a class of underwater acoustic communication channels," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013.
- [17] L. Berkhovskikh and Y. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Springer, 1982.
- [18] Y. Zhang, R. Venkatesan, C. Li, and O. A. Dobre, "Compressed sensing-based time-varying channel estimation in uwa-ofdm networks," in *2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2015, pp. 1520–1525.
- [19] M. Stojanovic and S. Tadayon, "Estimation and tracking of time-varying channels in ofdm systems," in *2014 52nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, Sept 2014.
- [20] S. Tadayon and M. Stojanovic, "Iterative sparse channel estimation for acoustic ofdm systems," in *2016 IEEE Third Underwater Communications and Networking Conference (UComms)*, Aug 2016.
- [21] S. Beygi and U. Mitra, "Multi-scale multi-lag channel estimation using low rank approximation for ofdm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 63, no. 18, pp. 4744–4755, Sept 2015.
- [22] X. Zhao, D. Pompili, and J. Alves, "Energy-efficient ofdm bandwidth selection for underwater acoustic carrier aggregation systems," in *2016 IEEE Third Underwater Communications and Networking Conference (UComms)*, Aug 2016, pp. 1–5.
- [23] D. V. Ha, N. V. Duc, and M. Pätzold, "Sinr analysis of ofdm systems using a geometry-based underwater acoustic channel model," in *2015 IEEE 26th (PIMRC)*, 2015.
- [24] Y. Wang, Z. Zeng, Y. Li, W. Zhang, H. Feng, and S. Jin, "Research on improvement of spectrum efficiency of spread spectrum ofdm communication scheme for cruising sensor network," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 10, 2014.
- [25] Y. M. Aval, S. K. Wilson, and M. Stojanovic, "On the achievable rate of a class of acoustic channels and practical power allocation strategies for ofdm systems," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Oct 2015.
- [26] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Wiley Publishing, 2010.
- [27] P. Qarabaqi and M. Stojanovic, "Acoustic channel simulator code," <http://millitsa.coe.neu.edu/?q=research/simulator>, 2013.