

## Plataforma de Rádio Definido por Software utilizando OFDM Acústico

### Software Defined Radio platform using Acoustic OFDM

#### RESUMO

Este trabalho apresenta o processo de desenvolvimento de uma plataforma de rádio definido por software utilizando a técnica de Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência (sigla em inglês, OFDM). Computadores, alto-falantes e microfones são utilizados para a transmissão e a recepção das mensagens desejadas, compondo assim uma plataforma de baixo custo quando comparada com as que empregam radiofrequência. Esta plataforma também tem potencial para uso em sala de aula. Para simplificar a implementação e eliminar tarefas complexas neste cenário, como a estimação de canal e a equalização, é proposto o uso de uma modulação diferencial para os símbolos transmitidos. Além disso, o algoritmo de Schmidl-Cox é utilizado para sincronismo de quadro.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transmissão acústica, OFDM, Modulação diferencial.

#### ABSTRACT

This work presents the development process of a Software Defined Radio platform using acoustic OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Computers, loud-speakers and microphones are used for transmission and reception of the desired messages, creating a low-cost platform when compared to the ones that use radiofrequency. This platform can also be used in the classroom. To simplify the implementation and eliminate complex tasks in this scenario, like channel estimation and equalization, the usage of a differential modulation for the transmitted symbols is proposed. Moreover, the Schmidl-Cox algorithm is used for frame synchronism.

**KEYWORDS:** Acoustic transmission, OFDM, Differential modulation.

**Gabriel Botogoske**  
[botogoske@alunos.utfpr.edu.br](mailto:botogoske@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba, Curitiba, Paraná, Brasil

**Bruno Sens Chang**  
[bschang@utfpr.edu.br](mailto:bschang@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba, Curitiba, Paraná, Brasil

**Recebido:** 04 set. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

O modem acústico é um dispositivo capaz de transmitir dados através de ondas sonoras. A vantagem de plataformas acústicas quando comparadas com as plataformas de rádio definido por software que utilizam rádio frequência é que estas permitem a utilização de equipamentos baratos e comumente encontrados para a transmissão/recepção, como alto-falantes e microfones, facilitando assim uma utilização em sala de aula ou para *hobby*. Além disso, devido à natureza das ondas acústicas, elas permitem melhor desempenho em meios onde as eletromagnéticas têm atenuação muito alta, como os meios aquáticos (HEIDEMANN, 2012).

Neste trabalho, o modem acústico utilizado a modulação multiportadora OFDM (Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência), pela facilidade de equalização e aplicação (GOLDSMITH, 2005), uma vez que utiliza IFFT (Transformada Inversa Rápida de Fourier) e a FFT (Transformada Rápida de Fourier), operações que são realizadas de forma rápida e pouco complexa nos dias de hoje.

Além disso, para este trabalho foi utilizada a plataforma de programação Matlab, para implementação dos blocos da modulação e demodulação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta o modelo do sistema considerado. Apresentamos também nesta seção uma breve descrição do sistema.

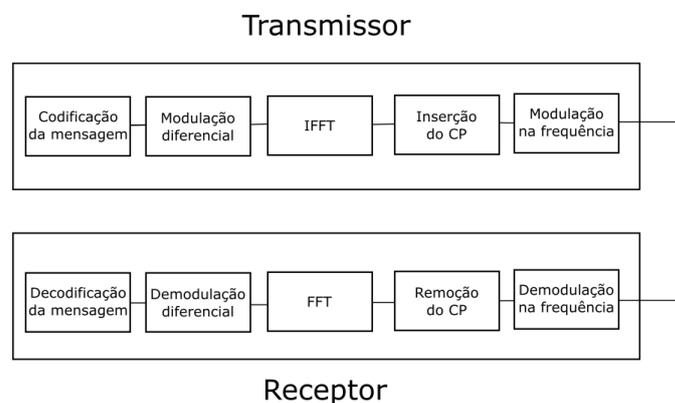


Figura 1 – Modelo do sistema (autoria própria)

No transmissor, inicialmente mensagens a serem transmitidas são codificadas e transformadas em bits. A seguir, estes bits serão modulados para a geração de símbolos a serem transmitidos. Estes símbolos serão separados em blocos, cada um composto por  $N$  símbolos.

A principal diferença do sistema proposto em relação a outros sistemas OFDM/acústicos similares já apresentados na literatura (KLAINÉ, 2013; GONÇALVES, 2017) é a utilização da modulação diferencial. Com a utilização deste tipo de modulação, não há necessidade de sincronismo de fase, estimação de canal e equalização, o que simplifica muito a implementação do sistema. Entretanto, há

uma perda de desempenho quando comparado com o que pode ser obtido com modulações não-diferenciais.

A modulação diferencial considerada, o OQPSK (Offset quadrature phase-shift keying), pode ser expressa da seguinte forma: dado dois símbolos subsequentes  $S_k$  e  $S_{k-1}$ , a diferença de fase entre esses símbolos é dado pelos bits (X Y) que serão mapeados em DQPSK (Differential quadrature phase shift keying). O critério de mapeamento está logo abaixo na Eq. (1):

$$\begin{cases} \Delta\theta_k = \theta_k - \theta_{k-1} = 0 \text{ radianos, se } (X Y) = (1 1); \\ \Delta\theta_k = \theta_k - \theta_{k-1} = \frac{\pi}{2} \text{ radianos, se } (X Y) = (0 1); \\ \Delta\theta_k = \theta_k - \theta_{k-1} = \pi \text{ radianos, se } (X Y) = (0 0); \\ \Delta\theta_k = \theta_k - \theta_{k-1} = \frac{3\pi}{2} \text{ radianos, se } (X Y) = (1 0); \end{cases} \quad (1)$$

Assim é possível chegar nas seguintes expressões booleanas apresentadas na Eq. (2):

$$\begin{aligned} I_k &= \bar{X} \cdot \bar{Y} \cdot \bar{I}_{k-1} + \bar{X} \cdot Y \cdot \bar{Q}_{k-1} + X \cdot \bar{Y} \cdot Q_{k-1} + X \cdot Y \cdot I_{k-1} \\ Q_k &= \bar{X} \cdot \bar{Y} \cdot Q_{k-1} + \bar{X} \cdot Y \cdot I_{k-1} + X \cdot \bar{Y} \cdot \bar{I}_{k-1} + X \cdot Y \cdot Q_{k-1} \end{aligned} \quad (2)$$

No qual (I Q) são pontos na mapeação QPSK (Quadrature phase shift keying), como segue abaixo na Figura 2:

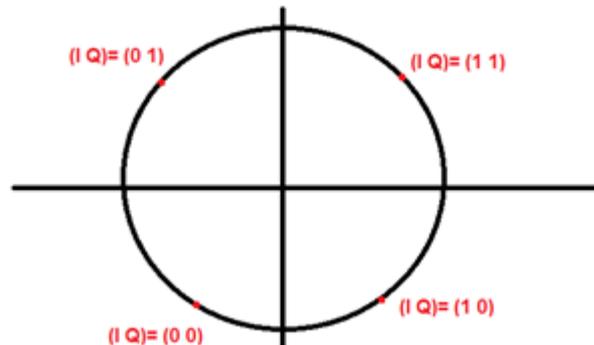


Figura 2- Mapeamento do conjunto (I Q) (autoria própria)

Estes símbolos OQPSK passam pelo modulador OFDM, que utiliza uma IFFT de tamanho  $N$  para a alocação destes símbolos em várias bandas de frequência. Estas bandas de frequência dividirão o espectro em  $N$  subportadoras ortogonais entre si.

Para garantir a ortogonalidade entre blocos, um prefixo cíclico é inserido ao bloco correspondente à saída da IFFT. Este prefixo cíclico nada mais é do que a cópia das últimas  $L$  amostras do bloco na frente deste, de modo a que estas sirvam de amostras de sacrifício para as interferências provenientes dos blocos anteriores e do canal de transmissão. O sinal com o prefixo cíclico inserido será modulado para ocupar uma frequência central cujo valor estará na faixa acústica das ondas (até 20 kHz).

No receptor, o sinal recebido é demodulado na frequência e cada bloco terá o seu prefixo cíclico removido. Uma FFT é realizada e os símbolos obtidos na sua

saída são demodulados, a fim de obter uma mensagem estimada. Para a recuperação do sinal, multiplicamos o símbolo  $S_k$  com o complexo conjugado do símbolo anterior  $S_{k-1}^*$ , de forma que:

$$S_k \cdot (S_{k-1})^* = e^{i\theta_k} e^{-i\theta_{k-1}} = e^{i\Delta\theta_k} \quad (3)$$

Para facilitar, rotaciona-se o resultado em  $\pi/4$  radianos, para manter cada diferença de fase em um quadrante distinto no plano complexo, como apresentado na Eq. (4).

$$s_k = e^{i\Delta\theta_k} e^{i\pi/4} \quad (4)$$

Assim obtemos:

$$\begin{cases} (X Y) = (1 1), & \text{se } s_k \text{ estiver no primeiro quadrante;} \\ (X Y) = (0 1), & \text{se } s_k \text{ estiver no segundo quadrante;} \\ (X Y) = (0 0), & \text{se } s_k \text{ estiver no terceiro quadrante;} \\ (X Y) = (1 0), & \text{se } s_k \text{ estiver no quarto quadrante;} \end{cases} \quad (5)$$

Para o sincronismo de quadro entre o transmissor e o receptor, o algoritmo de Schmidl-Cox (SCHMIDL, 1997) foi utilizado. Este algoritmo procura por um símbolo de treinamento conhecido, que possui duas metades iguais. Isso é feito construindo um símbolo, no qual é transmitido um pseudoruído nas frequências pares e zero nas frequências ímpares. Este sinal é repetido quantas vezes for necessário no domínio do tempo. Este símbolo não será confundido com o sinal de dados, pois a mensagem não possui zeros nas frequências ímpares. Um segundo símbolo de treinamento é gerado, enviando um pseudoruído nas frequências pares e um outro pseudoruído nas frequências ímpares.

O sinal no receptor  $v(t)$  é multiplicado por:

$$v(t) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t} = v(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t) - \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t) \quad (6)$$

No qual  $f_c$  é a frequência da portadora. Esse sinal é filtrado por um filtro passa-baixa e obtém-se o sinal  $r$ .

É realizado uma autocorrelação de um pedaço sinal com  $L$  amostras com outro pedaço do sinal, porém  $L$  amostras na frente do primeiro. Este segundo pedaço. Lembrando que o segundo pedaço, será utilizado a sua versão complexa conjugada. A Eq. (7) apresenta esta operação:

$$P(d) = \sum_{m=0}^{L-1} r_{d+m} \cdot (r_{d+m+L})^* \quad (7)$$

Cada um dos termos que será somado, no somatório acima, terá uma fase relacionado com a diferença de ângulo entre as amostras. Ao multiplicar duas amostras separadas de meio período de um símbolo ( $T/2$ ), a fase corresponde será  $\pi \cdot T \cdot \Delta f$ , uma vez que esse o símbolo de treinamento é simétrico com relação a sua metade. Portanto, no começo de um quadro, essas fases serão aproximadamente idênticas, e o somatório acima terá um módulo grande, permitindo assim a detecção do começo do quadro.

Por fim foi implementado um algoritmo de detecção de portadora, no qual também se utiliza os dois símbolos de treinamento. Este algoritmo estima o offset da frequência através da seguinte equação (8):

$$\Delta f = \frac{\phi}{\pi T} + \frac{2g}{T} \quad (8)$$

No qual:

$$\phi = \text{fase}(P(d)) \quad (9)$$

No ponto de início do sinal, obtido no sincronismo de quadro. Já “g” é obtido a partir de (10):

$$B(g) = \sum_k (x_{1,k+2g})^* \cdot x_{2,k+2g} \cdot (v_k)^* \quad (10)$$

O valor de  $g$  é aquele no qual maximiza a equação acima. O sinal  $x_1$ , é a FFT do primeiro sinal de treinamento multiplicado por  $e^{-2\phi \frac{t}{T}}$ . O sinal  $x_2$ , é o equivalente, porém para o segundo sinal de treinamento. Já  $v$  é descrito pela razão no domínio da frequência, do primeiro pseudoruído pelo segundo pseudoruído nas frequências pares, e zero nas frequências ímpares.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Testes do sistema foram realizados, nos quais o usuário insere um texto e esse texto é convertido letra por letra em binário, através da codificação ASCII. Esse conjunto de bits foi então codificado e modulado em frequências de até 20kHz. Foi adicionado um offset antes do sinal, para testar o sincronismo de quadro, e por fim adicionado um ruído gaussiano para testar a capacidade do sinal de lidar com erros. Este sinal foi convertido em um arquivo wave.

Um segundo algoritmo foi responsável por ler este arquivo, e aplicar os passos de sincronismo de quadro, detecção de portadora, demodulação e decodificação. Por fim, foi convertido o sinal em binário em string novamente. Este sistema se mostrou eficiente, e tudo funcionou como esperado, sem erros na decodificação.

Para validar a transmissão de arquivos maiores, uma imagem de 500x500 pixels foi convertida em bits e transmitida. Observou-se a mesma decodificação eficiente e sem erros.

Em seguida, foram realizados testes em meio físico. Para isso foi tocado o arquivo wave gerado anteriormente (sem a adição do ruído gerado por software) na saída de um fone de ouvido e capturado o som através de um microfone. Este teste obteve bons resultados, porém alguns erros foram obtidos, no qual a frase recuperada apresentava alguns erros de caracteres. Porém, isso foi devido à utilização de equipamentos não ideais para esse tipo de teste.

## CONCLUSÃO

O presente relatório apresentou o processo de desenvolvimento de uma plataforma de rádio definido por software utilizando OFDM acústico. O diferencial desta plataforma em relação a outras similares já propostas é a utilização da modulação diferencial, que facilita a implementação do sistema.

O modem funcionou a contento, e todos os estágios funcionaram como esperado. Este sistema servirá como base para futuros projetos, seja em atividade didáticas ou outras atividades de pesquisa.

### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Araucária FA – Paraná/Brasil.

### REFERÊNCIAS

HEIDEMANN, J.; STOJANOVIC, M.; ZORZI, M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 370, n. 1958, p. 158-175, 2012.

GOLDSMITH, A. **Wireless communications**. Cambridge university press, 2005.

KLAINE, P.H.V. **Rádio Definido por Software em Matlab**. Trabalho de Conclusão de Curso – UTFPR Curitiba, 2013.

GONÇALVES, M.A; LOUREDO, R.V; TCHEOU, M.P; LOVISOLO, L. Modem Acústico Usando Modulação Multiportadora via OFDM. **XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBRT2017**

SCHMIDL, T. M.; COX, D. C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM. **IEEE Transactions on Communications**, v. 45, n. 12, p. 1613-1621, 1997.