

AT1 - Sistemas de Comunicação 2

Orthogonal frequency-division multiplexing

OFDM

Leticia Coelho, Schaiana Sonaglio

Agosto 2018

1 Introdução

Este relatório apresenta os resultados de quatro experimentos propostos na disciplina de Sistemas de Comunicação 2 (COM2), ministrada pelo professor Roberto da Nóbrega no curso de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia de Santa Catarina. Os experimentos foram realizados no software Matlab®, a fim de proporcionar maior entendimento sobre o método de codificação digital OFDM (do inglês *Orthogonal frequency-division multiplexing*).

2 Fundamentação teórica

2.1 Conceitos básicos

Nesta seção, serão apresentados alguns conceitos teóricos básicos para melhor entendimento dos resultados dos experimentos realizados.

2.1.1 Modulação e Modulação Digital

O processo de modulação é utilizado para transmissão de sinais analógicos ou digitais. A modulação digital consiste em transformar símbolos em formas de onda compatíveis com as características do canal de transmissão, onde se utilizará uma onda portadora para realizar a transmissão do sinal.

A modulação digital (banda base) possui técnicas de realização que consideram modificações na amplitude, frequência e/ou fase do sinal modulado.

O processo de demodulação é realizado retirando-se a onda portadora para detectar o sinal de informação. Entre as técnicas utilizadas para esse processo, a detecção do sinal poderá ser coerente, ou seja, utilizar a fase da portadora para detectar o sinal, ou não coerente, não utilizar a fase da portadora. [5]

2.1.2 Modulação BPSK

A modulação PSK (do inglês *Phase Shift Keying*) é a modulação digital por deslocamento de fase, onde a fase da portadora é variada para representar os níveis do sinal. A amplitude e a frequência não são alteradas nesta modulação. [2]

2.2 OFDM

A técnica de codificação OFDM *Orthogonal frequency-division multiplexing* consiste na modulação por divisão de frequência, onde um grande número de subportadoras ortogonais é utilizado para transportar, em fluxos paralelos de dados, a informação desejada. No OFDM, cada subportadora pode ser modulada com uma modulação convencional diferente, como a PSK (do inglês *Phase-shift Keying*) ou a QAM (do inglês *Quadrature Amplitude Modulation*). [1]

Quando um sinal se propaga por diferentes percursos, ele chega no receptor em diferentes intervalos de tempo, ou seja, com atraso de um sinal em relação aos outros. Devido aos atrasos provocados por este multipercurso, é possível que ocorra a “fuga” do símbolo enviado por um percurso mais longo para um símbolo diferente, provocando distorções entre símbolos, também chamado de interferência intersimbólica. [1]

No OFDM, a transmissão do fluxo com alta taxa de bits é dividida em múltiplos fluxos lentos, tornando a interferência intersimbólica irrelevante; como os dados transmitidos são divididos em subportadoras, cada uma carrega uma parte da informação, portanto, a taxa de transferência de dados para uma subportadora é baixa, o que reduz significativamente as interferências causadas pelo multipercurso; além disso, há a adição de um prefixo cíclico, que será explicado no próximo tópico. [1]

Um esquemático de como o OFDM funciona está representado na Figura 1, que ilustra o transmissor (com a adição do prefixo cíclico), o canal, o receptor (com a retirada do prefixo cíclico) e o equalizador OFDM.

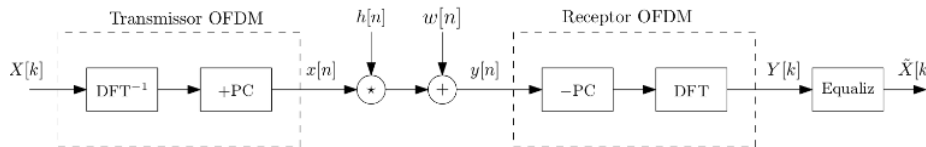


Figure 1: Esquemático OFDM. Fonte: Material da Aula de COM2.

O OFDM é utilizado em diversas aplicações, como sistemas digitais de banda larga DSL, VDSL, telefonia móvel, televisão digital terrestre DVB-T, DVB-T2, DVB-H, T-DMB e ISDB-T, rede Wi-Fi IEEE 802.11a e 802.11g, PLC (do inglês *Power Line Communication*), além de aplicações ponto-a-ponto ou ponto-multiponto.

2.2.1 Prefixo Cíclico

No OFDM, o prefixo cíclico é utilizado em cada símbolo para evitar distorções no sinal, causadas por interferência intersimbólica. É necessário conhecer a resposta ao impulso do canal, para saber como ele afetará o sinal que passará por ele, ou seja, como será o espalhamento que os símbolos sofrerão, a partir disso, escolhe-se um tamanho de prefixo cíclico que conseguirá evitar com maior sucesso a degradação do sinal. Podemos exemplificar o prefixo cíclico supondo que uma parte do sinal de tamanho determinado é repetida, o que gera a desvantagem de maior *overhead* no sinal. [4]

2.2.2 SNR

O SNR (do inglês: *signal-to-noise ratio*) é a relação sinal ruído, que é determinada pela razão entre a potência do sinal e a potência do ruído sobreposto a ele. Quanto mais alta a relação sinal-ruído, menor é o efeito do ruído de fundo sobre a detecção ou medição do sinal.[3]

3 Experimentos práticos

Nas sessões a seguir, serão apresentados os quatro experimentos propostos sobre o sistema de comunicação OFDM e seus resultados.

3.1 Experimento 1: Transmissor OFDM

O experimento prático 1 propôs implementar uma função para transmissor OFDM, que teve como entrada uma sequência de símbolos de modulação, um número de subportadoras e o comprimento do prefixo cíclico. A Figura 2 demonstra a sequência das operações realizadas para o transmissor OFDM.

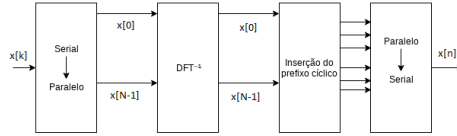


Figure 2: Transmissor OFDM. Fonte: Elaboração própria

3.1.1 Resultados

A transmissão do sinal foi realizada com sucesso, pois, ao analisar o retorno da função implementada no Matlab, utilizando a a sequência de símbolos determinada para testar a função, que foi:

$$X[k] = [+1, +1, -1, -1, -1, -1, +1, -1, +1],$$

com $\mu = 2$ e $N = 4$,

obteve-se o valor de retorno esperado:

$$x[n] = [0, \frac{1}{2} - j\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2} + j\frac{1}{2}, \frac{1}{2} - j\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2} - j\frac{1}{2}, -1, 0, 0, 0, -1, 0].$$

$x[n]$ representa a informação com a adição do prefixo cíclico.

3.2 Experimento 2: Receptor OFDM

O experimento prático 2 propôs implementar uma função para receptor OFDM, que teve como entrada uma sequência recebida do canal, um número de subportadoras, o comprimento do prefixo cíclico e os coeficientes do canal. A Figura 3.2 demonstra a sequência das operações realizadas para o receptor OFDM.

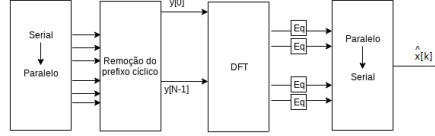


Figure 3: Receptor OFDM. Fonte: Elaboração própria

3.2.1 Resultados

Após a transmissão do sinal ter sido realizada corretamente no experimento anterior, a função do receptor implementada neste experimento foi testada, havendo variação nos resultados da função, conforme o coeficiente do canal $h[n]$ era alterado:

- Para $h[n] = [1]$,
 $\tilde{X}[k] = [1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, 1]$
- Para $h[n] = [1, 0.25]$,
 $\tilde{X}[k] = [0.8, 0.9412 + 0.2353j, -1.3333, -0.9412 + 0.2353j, -0.8, 0.9412 + 0.2353j, -1.3333, 0.9412 - 0.2353j]$
- Para $h[n] = [1, 0.25, 0.50]$,
 $\tilde{X}[k] = [0.5714, 1.6 + 0.8j, -0.8, -1.6 + 0.8j, -0.5714, 1.6000 + 0.8j, -0.8, 1.6 - 0.8j]$
- Para $h[n] = [1, 0.25, 0.50, 0.25]$,
 $\tilde{X}[k] = [0.5, 2, -1, -2, -0.5, 2, -1, 2]$

Para o primeiro caso de $h[n]$, $\tilde{X}[k]$ assumiu valor igual à entrada $X[k]$, pois não houve alteração no canal em relação à seletividade de frequência. Nos dois casos seguintes, o comprimento do canal influenciou na transmissão, porém, não houve alteração na informação final; já no último caso, o comprimento do canal alterou a informação final, pois não satisfaz a condição $\mu \geq L_n - 1$, onde L_n é o comprimento do canal e μ é o tamanho do prefixo cíclico; neste caso, como o L_n tinha valor 4, μ não era menor ou igual a L_n e sim menor.

3.3 Experimento 3: Desempenho de erro de bit

O experimento prático 3 propôs a utilização do transmissor e do receptor OFDM elaborados nos experimentos 1 e 2; a partir deles, deveríamos simular o desempenho de erro de bit de um sistema OFDM com os seguintes parâmetros:

- Modulação BPSK.
- $N = 16$ (Número de subportadoras).
- $\mu = 4$ (Comprimento do prefixo cíclico).
- $L = 50000$ (Número de blocos OFDM transmitidos).
- $h[n] = [2 \ -0.5 \ 0.5]$ (Coeficiente do canal).
- E_b/N_0 no RX variando de 0 a 10 dB, com passo de 1 dB.

A implementação do experimento está representado pela Figura 4.

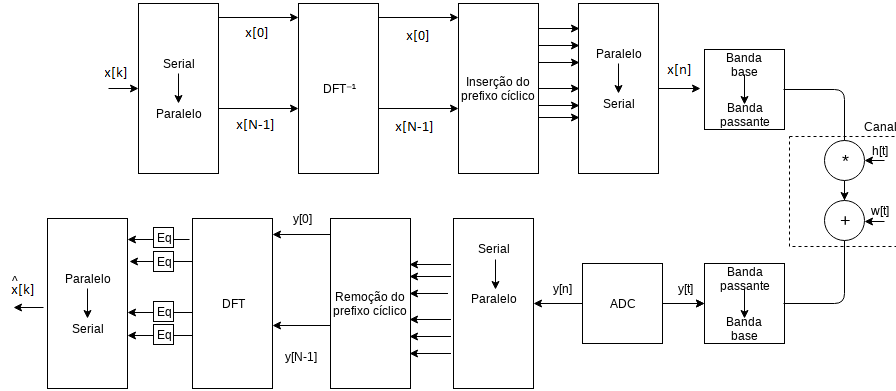


Figure 4: Codificador OFDM. Fonte: Elaboração própria

O desempenho teórico também precisou ser calculado, para fins de comparação com o desempenho prático.

3.3.1 Resultados

Conforme observado na Figura 5, o desempenho de erro de bit simulado ficou semelhante ao teórico, obtido através da equação 1.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (1)$$

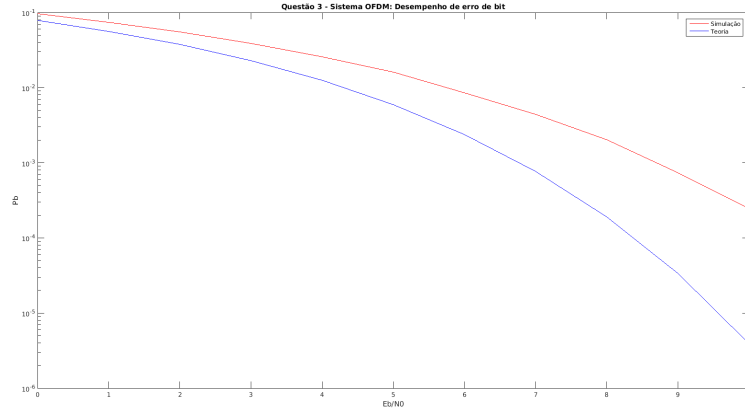


Figure 5: Desempenho de erro de bit de um sistema OFDM. Fonte: Elaboração própria.

3.4 Experimento 4: Envolvórias instantâneas no tempo e espectros na frequência

O experimento prático 4 propôs a ilustração das envoltórias no tempo dos sinais $x[t]$ e $y[t]$ e os espectros na frequência dos sinais $x[n]$ e $y[n]$, utilizando os seguintes parâmetros:

- Modulação BPSK.
- $R_b^{info} = 16$ Mbps (Taxa de bits de informação).
- $N = 16$ (Número de subportadoras).
- $\mu = 16$ (Comprimento do prefixo cíclico).
- $L = 100$ (Número de blocos OFDM transmitidos).
- $h[n] = [\frac{2}{\sqrt{5}} \quad 0 \quad \frac{1}{\sqrt{5}}]$ (Coeficiente do canal).
- Ausência de ruído.

3.4.1 Resultados

Conforme observado na Figura 5, as envoltórias no tempo dos sinais $x[t]$ e $y[t]$ e os espectros na frequência dos sinais $x[n]$ e $y[n]$ foram ilustrados conforme o esperado.

Podemos observar que o sinal $y[n]$ demonstra distorções causadas pela seletividade de frequência, ressaltadas pela diferenciação do sinal antes de passar pelo canal em $x[n]$ e após passar pelo canal, ou seja, realizar a transmissão em $y[n]$.

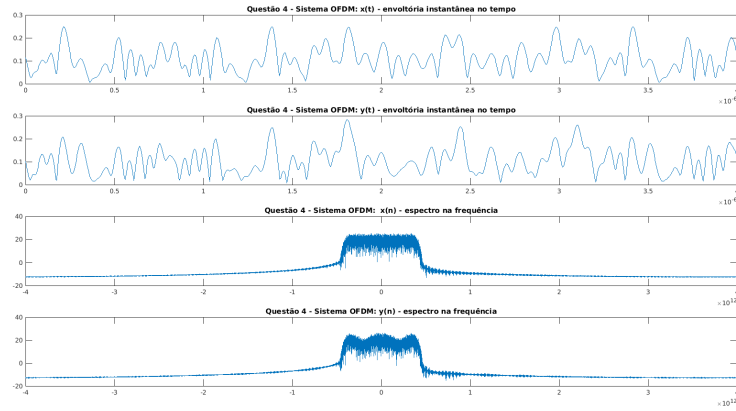


Figure 6: Exercício 4: Envoltórias instantâneas no tempo e espectros a frequência.
Fonte: Elaboração própria.

4 Conclusão

Com a realização destes experimentos, conclui-se que a técnica OFDM é uma importante ferramenta para transmissão de dados, pois possibilita transmissão multipercurso com as mesmas taxas de transferência e maior resistência a meios ruidosos, atenuação em altas frequências, interferência intersimbólica e interferência multipercurso. Além das vantagens principais, é importante ressaltar que uma característica negativa é o aumento de *overhead*, devido à utilização de prefixo cíclico, mas que, dependendo do sistema, não será impeditivo para questão de utilização de banda.

References

- [1] Delta. *Modulação OFDM*.
https://shopdelta.eu/modulacao-ofdm_id789.html.
- [2] Paulo Gomes. *Modulação*.
<http://www.pgomes.com.br/arquivos/7e55280848b003093bdeb621d54bda02.pdf>.
- [3] Teleco. *SNR – O que é? Como funciona?*
<http://www.entelco.com.br/blog/snr-o-que-e-como-funciona/>.
- [4] Teleco. *Redes Ópticas I: Sistemas OFDM em Banda Base com Detecção Direta*
– 2. <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialofdm/pagina4.asp>.
- [5] UFRG. *Modulação Digital*. <http://penta2.ufrgs.br/Alvaro>.