

## Laboratório de Princípios de Comunicação

Aulas Remotas - 2020.1

### Experimento 08

#### Multiplexação ortogonal por divisão de frequência (OFDM)

Data: 23/11/2020

#### Instruções gerais

- Organize os arquivos em um diretório específico para o laboratório em seu computador. Em caso de necessidade, os arquivos serão usados como evidência da participação em sala. Use nomes de arquivos do GRC com o formato

Matricula\_ExpXX\_ARYY.grc → Exemplo: 12345678\_Exp08\_AR01.grc

- O relatório será enviado em formato “.pdf” usando a nomenclatura

Matricula\_ExpXX\_Rel.pdf → Exemplo: 12345678\_Exp08\_Rel.pdf

- Quando solicitado, envie um arquivo compactado com o formato “.zip” com todos os arquivos relacionados ao experimento, contendo os arquivos “.grc” e “.pdf”.

Matricula\_ExpXX.zip → Exemplo: 12345678\_Exp08.zip

- Preferencialmente (mas não obrigatoriamente) use GUI do tipo “QT”.

## Atividade 01 – Transmissor OFDM

### Conceitos preliminares

A técnica OFDM (Multiplexação ortogonal por divisão de frequência) consiste na transmissão de dados em paralelo em diversas subportadoras moduladas em QAM ou PSK, em que a taxa de transmissão de dados em cada subportadora é uma fração da taxa global. A redução na taxa de transmissão de cada subportadora (e o consequente aumento na duração dos símbolos por ela transmitidos) implica na diminuição da sensibilidade à seletividade em frequência causada por efeitos de multi-percurso. A Figura 1 apresenta o espectro de 7 subportadoras ortogonais em que, embora exista superposição espectral, a informação conduzida por cada uma delas pode ser isolada das demais através de um correlator (ou filtro casado) adequado.

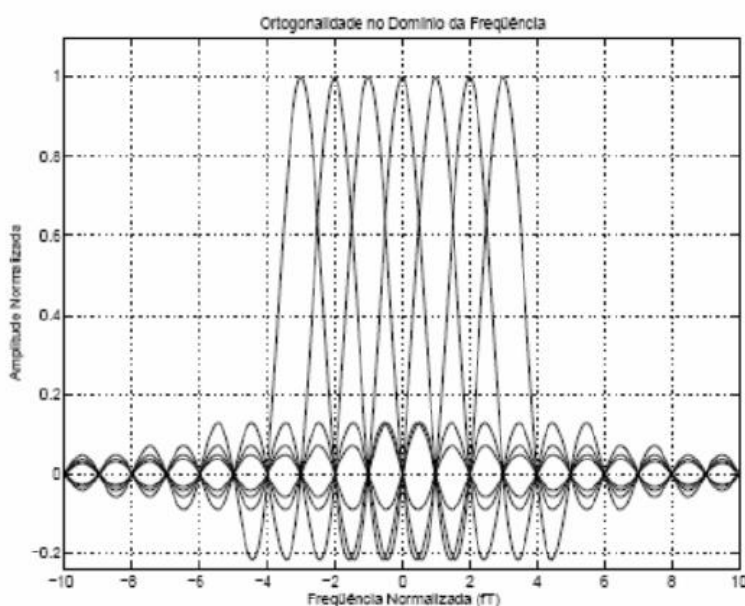


Figura 1 – Subportadoras ortogonais

Em princípio, a geração e demodulação do sinal OFDM requer conjuntos de osciladores coerentes, resultando em uma implementação complexa. Porém, esses processos podem ser executados de forma mais simples utilizando-se, respectivamente, as transformadas de Fourier discreta (DFT) inversa e direta em conjunto com o teorema da amostragem de Nyquist. Considerando uma sequência de dados a ser transmitida, e após mapeá-la em símbolos M-ários (1 símbolo complexo para cada 2 bits para modulação QPSK, por exemplo), esses símbolos são alocados nas  $N < \text{fft\_len}$  subportadoras disponíveis, em que  $\text{fft\_len}$  é o comprimento total do vetor da transformada inversa rápida de Fourier (IFFT). A IFFT de cada conjunto de símbolos de dados tem duração  $T = LB/\text{fft\_len}$ , em que  $LB$  é a largura de banda do sinal modulado (banda passante) disponível. Em nossas atividades  $LB$  é a frequência de amostragem  $\text{samp\_rate}$ .

A duração do símbolo OFDM ( $T_{\text{ofdm}}$ ) será a soma de  $T$  com um tempo de guarda  $T_g$ .  $T_g$  garante a não sobreposição de símbolos (ISI) ocasionados por distorções lineares do canal (efeito de multi-percurso). Portanto,  $T_{\text{ofdm}} = T + T_g = (\text{fft\_len} + \text{CP\_len})/\text{samp\_rate}$ . Durante o tempo de guarda em sinais OFDM, parte do símbolo OFDM é

repetido gerando um prefixo cíclico (CP) da informação<sup>1</sup>, de forma a se poder recuperá-la caso sofra ISI.

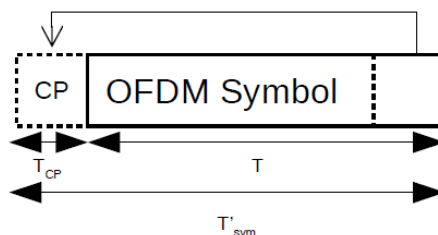


Figura 2 – Estrutura de um símbolo OFDM

O transmissor de sinal OFDM banda base pode ser ilustrado pela Figura 3.

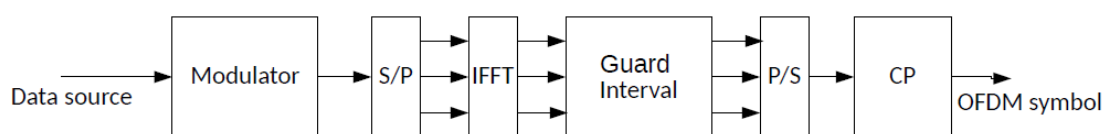


Figura 3 – Transmissor OFDM

Nesta figura, o bloco “Modulador” representa o mapeamento entre os bits e os símbolos PSK ou QAM. S/P e P/S representam a paralelização e serialização dos dados, respectivamente. Vários símbolos OFDM são transmitidos em um único quadro precedidos por símbolos de sincronismo e preâmbulo. O tamanho do pacote packet\_len (em bytes) vai definir a quantidade de símbolos que cada quadro vai conter.

Além das  $N$  subportadoras, símbolos de referência  $N_p$  (ou pilotos) são transmitidos para fins de equalização do espectro do sinal. Esses símbolos são conhecidos nas duas pontas de comunicação o que ajuda na estimação da função de transferência do canal e consequente equalização.  $N + N_p$  é sempre menor que  $\text{fft\_len}$ , fazendo com que ocorram zeros em algumas das frequências. A frequência central (DC) será sempre de valor nulo, além daquelas das extremidades. Veja abaixo.

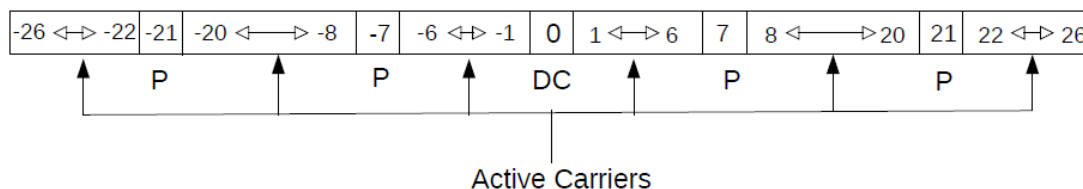


Figura 4 – Posições de portadoras ativas (setas), pilotos e nulos para  $\text{fft\_len} = 64$ . Os números faltantes nas extremidades são compostos por zeros.

<sup>1</sup> Lembre-se que a FFT e a IFFT são domínios cíclicos ou periódicos

## Atividade 02 – Canal e Receptor OFDM

### Conceitos preliminares

O meio de propagação pode causar diversos problemas para a comunicação. O efeito de multi-percursos (reflexões e difrações entre transmissor e receptor) causa dispersão temporal dos símbolos e consequente ISI. A mobilidade do canal pode causar desvio de frequência através do efeito Doppler. E o enfraquecimento do sinal no meio de propagação pode deixá-lo vulnerável ao ruído.

O processo de demodulação do sinal OFDM é inverso àquele da Figura 3. Retira-se o CP, paraleliza-se cada símbolo OFDM e aplica-se a FFT. Com os símbolos no domínio da frequência pode-se estimar o canal de propagação (com a ajuda dos pilotos e um interpolador) e efetua-se a equalização. Serializa-se novamente os símbolos e os mapeia com os bits correspondentes.

### AR 01 – Transmissor OFDM

#### Setup da simulação AR01

Taxa de amostragem	32 ksps
Instrumentos virtuais	Osciloscópio ( $T_{ofdm}$ samp_rate = 33 pontos) Analisador de Espectro com N = 4096 pontos, Average = High Espectrograma <QT GUI Waterfall Sink> com N = 32 pontos Transmissor OFDM <OFDM Transmitter>
Observações adicionais	- Utilizar bloco “Throttle”

Implemente o diagrama de blocos da Figura 5 conforme parâmetros da Tabela 1. Faça um *print* (ou vários) da tela (**Fig. 1.1**).

Tabela 1. Parâmetros do transmissor OFDM.

Parâmetro	Valor
samp_rate	32000
packet_len	100
Modulação	BPSK
fft_len	32
N (número de sub-portadoras)	22
CP_len	1
em “OFDM Trans.”: Portadoras ocupadas	(list(range(-13,-9))+list(range(-8,-4))+list(range(-3,0))+list(range(1,4))+list(range(5,9))+list(range(10,14))),)
sem símbolos pilotos ou de sincronismo	( )
em “Random Source”	0 a 256 10000 amostras Repetir (Yes)

Printe as três curvas de saída (**Fig. 1.2-1.4**), ajustando bem o eixo Y para melhor observação<sup>2</sup>.

Observe que o osciloscópio apresenta um tempo de símbolo OFDM na tela, enquanto que o espectrograma apresenta o vetor de 22 símbolos e 10 zeros variando com o tempo. Com uma maior resolução frequencial e fazendo-se uma média para centenas de símbolos, a curva no analisador de espectro permite observar a forma espectral do sinal OFDM de acordo com os parâmetros dados.

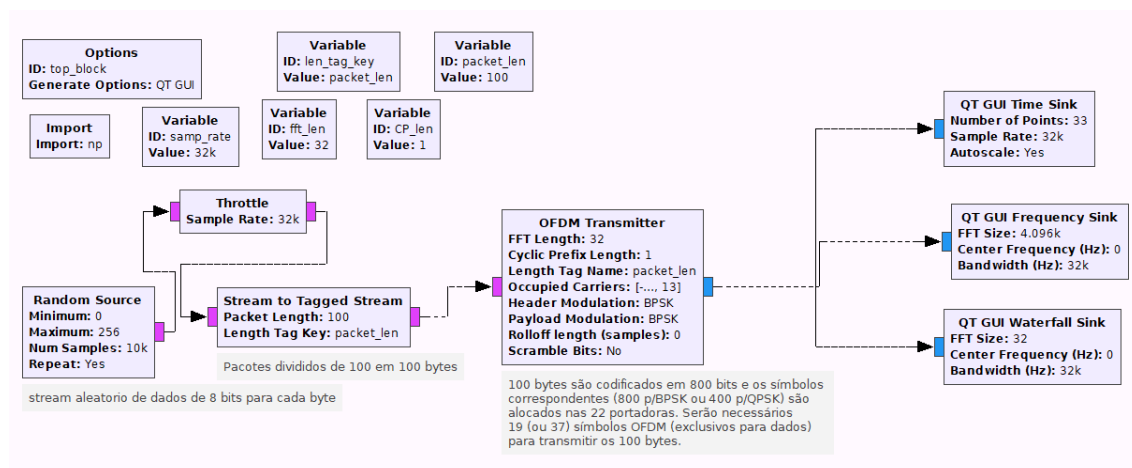


Figura 5 – Blocos para implementação do transmissor OFDM

**A1a)** Perceba que os símbolos OFDM são compostos por amostras complexas. Sugira uma forma de transmitir esse sinal em um canal banda básica.

Faça agora a transmissão de um sinal real banda passante desse sinal OFDM centrado em 62,5 kHz. Para isso aumente `samp_rate` para 256000 Hz e `fft_len` para 256. Configure as interfaces gráficas (Nº de Pontos e FFT size) com a mesma lógica já apresentada. Apresente o esquema e as 3 curvas (**Fig. 1.5-1.8**).

**A1b)** Comente suas impressões dos resultados.

<sup>2</sup> Observe o máximo e mínimo do espectro no analisador de espectro para ajustar o espectrograma.

## AR 02 – Canal e Receptor OFDM

## Setup da simulação AR02

Taxa de amostragem	32 ksps
Instrumentos virtuais	Osciloscópio ( $T_{ofdm}$ samp_rate = 36 pontos) Analisador de Espectro com N = 4096 pontos, Average = High Transmissor OFDM <OFDM Transmitter> Transmissor OFDM <OFDM Receiver> Modelo de Canal <Channel Model>
Observações adicionais	- Utilizar bloco “Throttle”

Implemente o diagrama de blocos da Figura 6 conforme parâmetros da Tabela 2. Faça um *print* (ou vários) da tela (Fig. 2.1).

Tabela 2. Parâmetros do canal e receptor OFDM.

Parâmetro	Valor
samp_rate	32000
packet_len	100
Modulação	QPSK
fft_len	32
N	22
N <sub>p</sub>	4
CP_len	4
em “OFDM Receiver”: Portadoras ocupadas	(list(range(-13,-9))+list(range(-8,-4))+list(range(-3,0))+list(range(1,4))+list(range(5,9))+list(range(10,14))),)
Portadora dos pilotos	((-9, -4, 4, 9),)
Valores dos pilotos	((-1, 1, -1, 1),)
Sincronismo	( )
em “Random Source”	0 a 256 100 amostras Repetir (Yes)
em “Modelo de Canal”	variar Noise Voltage de 0 a 3 Volts (não usar Gui Range)
	a) Taps = [0, 0, 0, 1] b) Taps = [0, 0, 0, 1, 0.71] c) Taps = [0, 0, 0, 1, 0.71, 0.5] d) sugira

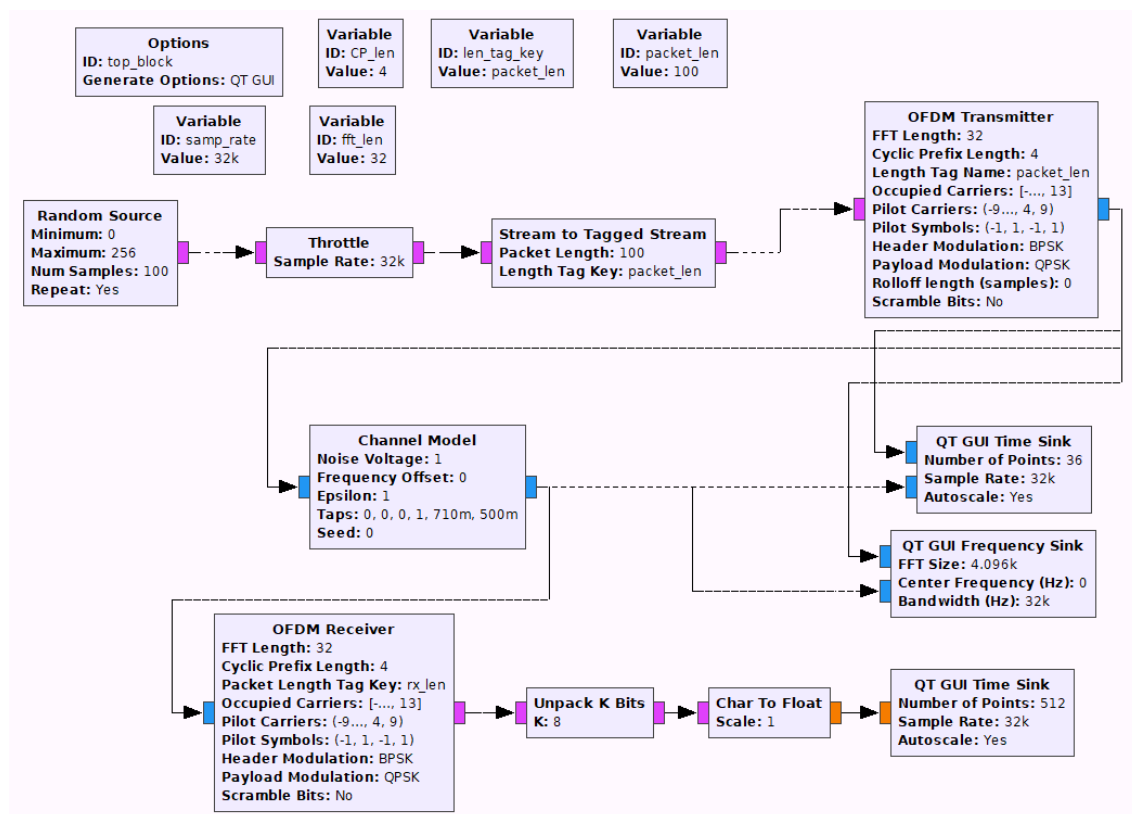


Figura 6 – Blocos para implementação do canal e do receptor OFDM

Observe para diversas combinações de potência de ruído e Taps do canal o resultado sobre os símbolos OFDM no tempo e o espectro de frequência. Escolha 4 combinações e plote as curvas de entrada e saída do canal (num mesmo gráfico) no tempo e frequência (**Fig. 2.2a-d** e **Fig. 2.3a-d**), além da sequência de bits de saída (**Fig. 2.4a-d**), e comente as diferenças (**A2a**).

**A2b)** O que ocorre com os símbolos no tempo conforme os TAPs mais distantes (últimos) ganham mais peso? Pesquise sobre o efeito de multi-percursos e a estrutura dos TAPs.

Se você configurou tudo corretamente, a saída de bits estará sempre certa ou cheia de zeros quando o estimador/detector não for capaz de recuperar tudo. Esta é uma limitação do bloco/configuração utilizada.

Por último, compare os espectros do sinal OFDM na saída do transmissor com daquele da primeira parte da AR1. (**A2c**) Como explicar essa diferença em função do número de amostras que se repetem no bloco <Random Source>?