

# Comunicações Digitais

## Lista de Exercícios 6 OFDM

Prof. André Noll Barreto

### Exercício 1

- Um sistema baseado em OFDM tem largura de banda de 10 MHz e um fator de superamostragem de 6/5 (O fator de superamostragem é a razão entre a frequência de amostragem e a largura de banda). Dado que é utilizada uma IFFT/FFT de 1024 elementos, qual o intervalo de símbolos útil e o espaçamento entre subportadoras deste sistema?
- Sabemos que o espalhamento de atraso máximo do canal é de cerca de 10  $\mu$ s, e é utilizado um prefixo cíclico com uma margem de 10% de folga. Quantas amostras são utilizadas para o prefixo cíclico?
- A subportadora DC e as 20% subportadoras mais externas são mantidas nulas e é utilizada uma subportadora piloto a cada 10 subportadoras. Sabemos também que os dois primeiros símbolos são reservados para um preâmbulo contendo um sinal de referência, e que são enviados pacotes de 1000 bytes. Qual a taxa efetiva de transmissão de dados (em bps) se utilizarmos modulação 16-QAM com códigos de taxa  $R=2/3$ ?
- Repita os itens (a), (b) e (c), porém com uma IFFT de 512 elementos.
- Com base nos resultados acima, e com os conhecimentos adquiridos sobre OFDM, quais as vantagens e desvantagens de termos uma IFFT de 1024 elementos em vez de uma de 512

### Exercício 2

Um sistema OFDM utiliza todas as subportadoras de uma IFFT de 4 elementos, espaçadas 100 kHz, e com um prefixo cíclico de 2 amostras.

O canal discreto pode ser representado pela seguinte resposta impulsional:

$$h(k) = 0,05 \delta(k) - 0,05j \delta(k-1)$$

a) Neste sistema é utilizada a modulação QPSK, sem codificação de canal. Supondo que a potência do sinal é de -10 dBm e que a densidade espectral de potência do ruído é dada por  $N_0/2 = 10^{-13}$  W/Hz, determine a taxa de erro média para cada usuário.

b) Repita o exercício para

$$h(k) = 0,07j \delta(k) - 0,02 \delta(k-1) + 0,02 \delta(k-2)$$

c) Suponha agora que possamos escolher esquemas de modulação diferentes em cada subportadora, sendo escolhido sempre o esquema que maximiza a taxa de transmissão satisfazendo uma certa taxa de erro de bit. Podem ser utilizados os esquemas BPSK, QPSK, 8-PSK, e M-QAM com qualquer constelação quadrada. Pode também ser utilizado um código de repetição com qualquer número de repetições em conjunto com o BPSK. Supondo uma BER desejada de  $10^{-4}$ , qual a taxa de bits alcançada em cada um dos dois canais.

# Comunicações Digitais

## Exercício 3

Um sistema OFDM com prefixo cíclico é projetado para um sistema com atraso de multipercursos de no máximo  $4\mu\text{s}$ , com 1024 subportadoras espaçadas 10kHz.

a) Qual a taxa de amostragem do sinal na saída da IFFT do transmissor?

A subportadora central (DC) e as 10% subportadoras mais externas não são utilizadas para transmissão de dados. Também utilizamos 1 portadora piloto a cada 16 subportadoras. A transmissão é feita utilizando quadros de 5ms, sendo que no começo de cada quadro no downlink é enviado um preâmbulo com duração de 2 símbolos OFDM.

b) Dado que podemos utilizar modulação 64-QAM com codificação convolucional de taxa  $R=4/5$ , qual a taxa de dados que pode ser alcançada?

c) Qual seria a taxa máxima se tivéssemos apenas 256 subportadoras ocupando a mesma banda total? Considere que o preâmbulo tem a mesma duração em segundos que no item anterior.

## Exercício 4

Considere um canal com resposta discreta

$$h[0] = 1.0; h[1] = -0,5; h[2] = 0,3$$

O canal apresenta também ruído branco Gaussiano aditivo com densidade espectral de potência  $N_0/2$ .

Considere um sistema OFDM com 16 subportadoras, com prefixo cíclico de tamanho adequado. Considerando BPSK, ache uma expressão para a taxa de erro de bit de cada subcanal e a taxa de erro de bit média.

# Comunicações Digitais

## Soluções

### Exercício 1

a)

$$f_a = \frac{6}{5} B_T = 1,2 \times 10^7$$
$$T_s = N T_a = \frac{N}{f_a} = 85,33 \mu s$$
$$\Delta f = \frac{1}{T_s} = 11,72 \text{ kHz}$$

b)

$$T_G = 11 \mu s$$
$$G = \left\lceil \frac{T_G}{T_a} \right\rceil = 132$$

c)

$$N_z = 1 + 0,2 * 1024 = 206$$
$$N_p = \frac{1024 - N_z}{10} = 82$$
$$N_d = 1024 - N_z - N_p = 736$$

Em cada símbolo OFDM enviamos

$$N_b = N_d R \log_2 M = 736 \left( \frac{2}{3} \right) 4 = 1962,7 \text{ bits}$$

Para 1000 bytes=8000bits, precisamos de ao menos 5 símbolos. Além disso, temos 2 símbolos a mais de referência, ou seja, precisamos de  $N_{simb} = 7$  símbolos.

Para enviarmos 500 bytes, precisamos portanto de um tempo

$$T_{500bytes} = N_{simb} (T_s + T_G) = 0,674 \mu s$$

E a taxa será

$$R_{b,eff} = \frac{8000}{T_{500bytes}} = 11,9 \text{ Mbps}$$

### Exercício 3

a)

$$f_a = N \Delta f = 1024(10\text{kHz}) = 10,24 \text{ MHz}$$

b)

Cada símbolo OFDM completo tem duração  $T = T_s + T_G = \frac{1}{10k} + 4\mu = 104\mu s$ .

Em 5ms, enviamos portanto  $N_{simb} = \left\lfloor \frac{5ms}{T} \right\rfloor = 48$  símbolos, dos quais 2 são de preâmbulo, portanto  $N_{simb,eff} = 46$  símbolos de dados.

Em 46 símbolos OFDM enviamos  $N_b = 46 N_d R \log_2 M = 46 (862) \left( \frac{4}{5} \right) 6 = 190326$  bits, ou seja, uma taxa efetiva de

$$R_b = \frac{190326}{5ms} = 38,06 \text{ Mbps}$$