

TE903 – Comunicação Digital

Exercício de Simulação N° 2

Estimação de Taxa de Erro de Bits em Modulações M-PAM

(devolver relatório em 08/12/2020)

25 de novembro de 2020

Evelio M. G. Fernández

O trabalho consiste em estimar a taxa de erro de bits (BER: *Bit Error Rate*) na recepção em sistemas de transmissão digital em banda base com modulação M-PAM.

- O sistema de transmissão será baseado no script *simulacao_4_pam.m* disponível na pasta Simulação. Será estimada a taxa de erro de bits das modulações 2-PAM, 4-PAM e 8-PAM através de simulação de Monte Carlo considerando a transmissão através de um canal Gaussiano. O script *ber_2_pam.m*, disponível também na pasta Simulação, pode ser usado como ponto de partida para a estimação da BER dos sistemas M-PAM;
- O resultado da simulação deve ser apresentado por meio de curvas de desempenho de erro (BER vs. E_b/N_0). No mesmo gráfico mostrar as curvas analíticas correspondentes. Como referência, na Figura 1 são mostradas as curvas teóricas de desempenho de erro de modulações M-PAM (**com mapeamento Gray**) no canal Gaussiano.

Na figura, a curva correspondente à constelação 4-PAM foi obtida com o seguinte script Matlab:

```
M=4; EbN0=[0:1:15];
for k=1:length(EbN0)
    EavN0=(log2(M))*(10^(EbN0(k)/10));
    Pe(k)=(1-1/M)*erfc(sqrt(3*EavN0/(M^2-1)));
    BER(k)=Pe(k)/log2(M);
end
semilogy(EbN0,BER);
xlabel('Eb/N0 (dB)');
ylabel('BER');
grid
```

- Na configuração dos parâmetros do sistema utilize um fator de *rolloff* $\alpha = 0,5$ nos filtros de transmissão e recepção e considere um filtro de Butterworth de

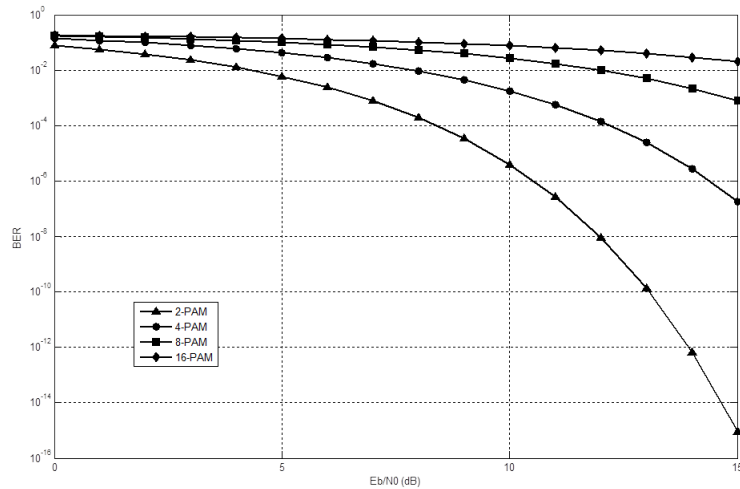


Figura 1: Desempenho de Erro de Modulações M-PAM no Canal Gaussiano

segunda ordem para simular o canal de comunicação passa baixas. Os demais parâmetros (frequência de amostragem, fator de oversampling e tamanho da resposta impulsiva dos filtros) podem ser mantidos como no script de simulação visto em sala de aula;

- Tenha em conta que as simulações consomem tempo. Como definir o critério de parada da simulação? Na medida em que a relação sinal ruído aumenta, será necessário transmitir um volume maior de dados para poder atingir uma contagem de erros adequada para se estimar a taxa de erro de bits. Valores muito pequenos de BER somente poderão ser atingidos através de simulação se o bloco de informação for suficientemente grande. Considere a opção de transmitir dados aleatórios.

O relatório deve conter:

1. Código gerado para realizar a simulação (sugere-se a utilização do ambiente interativo Live Editor do Matlab para elaborar o relatório);
2. Uma figura contendo as curvas de desempenho de erro (BER vs. E_b/N_0), analíticas e simuladas, para as modulações 2-PAM, 4-PAM e 8-PAM;

3. Considerações finais sobre o exercício de simulação incluindo comentários sobre eventuais discrepâncias entre os resultados analíticos e simulados obtidos.
-

Algumas Considerações sobre a Simulação do Canal AWGN para Modulações M-árias

Relação entre E_s/N_0 e E_b/N_0 :

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} \times \log_2 M.$$

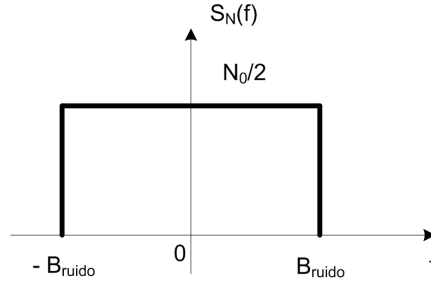


Figura 2: Densidade Espectral de Potência na Saída do Canal

Sabendo que a potência média de ruído pode ser calculada a partir da densidade espectral de potência de ruído na entrada do receptor, $S_N(f)$, mostrada na Fig. 2, como

$$N = \frac{N_0}{2} \times 2B_{\text{ruído}} = N_0 B_{\text{ruído}},$$

onde $B_{\text{ruído}}$ é a largura de banda do ruído medida na entrada do receptor. Então, a relação entre E_s/N_0 e $\text{SNR} = \frac{S}{N}$ pode ser determinada como

$$\begin{aligned} \frac{E_s}{N_0} &= \frac{\frac{S}{R_s}}{\frac{N}{B_{\text{ruído}}}} = \frac{S}{N} \times \frac{B_{\text{ruído}}}{R_s} \\ &= \frac{S}{N} \times \frac{f_s}{2R_s} = \frac{S}{N} \times \frac{\text{oversampling}}{2}, \end{aligned}$$

onde $B_{\text{ruído}} = \frac{f_s}{2}$ é a máxima frequência que pode ser representada na simulação respeitando-se o Teorema de Nyquist da amostragem. Note-se também que a razão $\frac{f_s}{R_s}$ é igual à taxa de sobreamostragem (oversampling).

Em dB:

$$\text{SNR}[\text{dB}] = \frac{E_b}{N_0}[\text{dB}] + 10 \log_{10}(\log_2 M) - 10 \log_{10} \left(\frac{\text{oversampling}}{2} \right).$$

É esse o valor de SNR que deve ser usado na função `awgn` do Matlab para implementar o canal AWGN na simulação.