

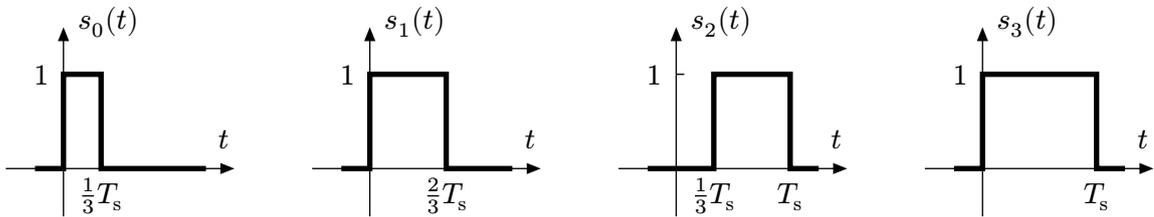
Sistemas de Comunicação I
Engenharia de Telecomunicações

Professor: Roberto Wanderley da Nóbrega

Semestre: 2025.1

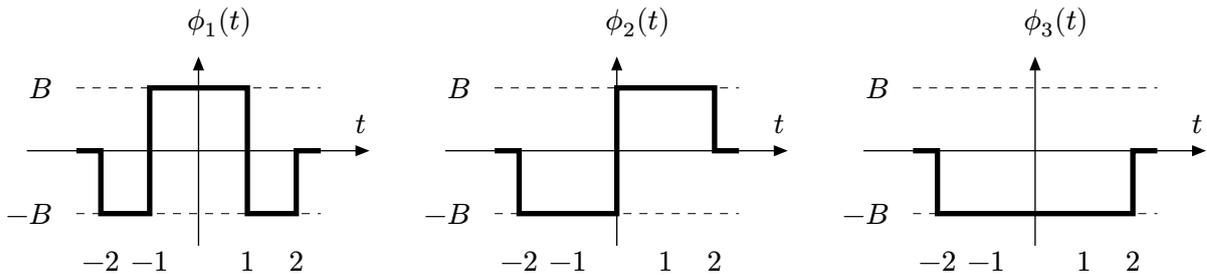
Lista de Exercícios 3

1. [1, 5.3] A figura abaixo mostra a forma de onda de quatro sinais, $s_0(t)$, $s_1(t)$, $s_2(t)$ e $s_3(t)$.



- (a) Determine um conjunto base de funções ortonormais (a dimensão do espaço é 3).
(b) Esboce a constelação correspondente.

2. [2, 3.2] Considere as três funções abaixo.



- (a) Mostre que as três funções formam um conjunto ortogonal.
(b) Determine o valor da constante B de modo que o conjunto seja ortonormal.
(c) Expresse a forma de onda

$$s(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \leq t \leq 2, \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

como uma combinação linear das funções ortonormais obtidas no item anterior.

3. Determine um conjunto base de funções ortonormais e a constelação referente aos seguintes códigos de linha binários:

- (a) Polar NRZ. (b) Polar RZ.
(c) On-off NRZ. (d) On-off RZ.
(e) Manchester.

Em seguida, identifique quais dos casos apresentam constelação de energia mínima. Finalmente, determine uma fórmula para a probabilidade de erro de bit em função de E_b/N_0 , para cada código de linha. Assuma bits equiprováveis, canal AWGN e detecção ótima.

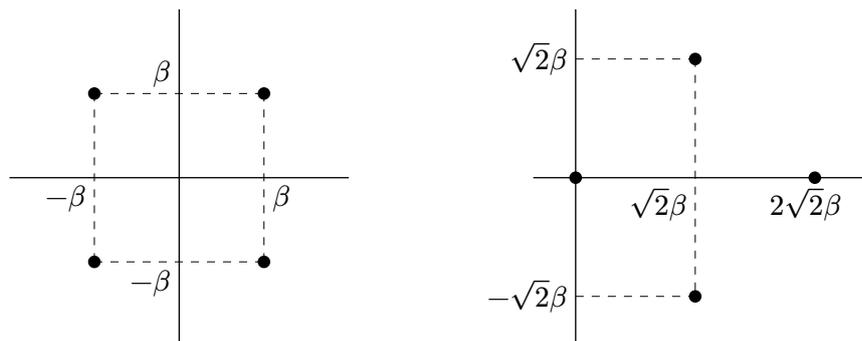
4. [1, 5.2] Considere um esquema PAM 8-ário cujos possíveis sinais transmitidos são

$$s_i(t) = A_i \text{rect}\left(\frac{t - T_s/2}{T_s}\right),$$

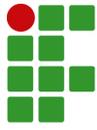
onde $A_i = \pm A, \pm 3A, \pm 5A, \pm 7A$.

- (a) Determine e esboce um conjunto base de funções ortonormais.
(b) Determine E_s (energia média de símbolo) em função de A e T_s .
(c) Esboce a constelação do esquema em questão.
(d) Determine uma fórmula para a probabilidade de erro de bit no canal AWGN, em função de E_b/N_0 . Assuma mapeamento Gray e regime de alta SNR.

5. [1, 5.17] Considere as duas constelações mostradas abaixo.



- (a) As duas constelações apresentam a mesma probabilidade de erro de símbolo? Justifique sua resposta.
(b) Qual das duas constelações é de energia mínima? Justifique sua resposta.
(c) Utilizando uma translação, transforme a constelação que não é de energia mínima em uma constelação de energia mínima.



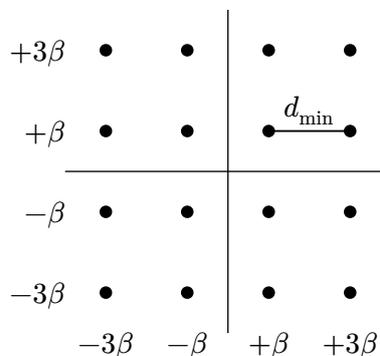
6. Considere a sequência de entrada binária 11001011. Esboce as formas de onda transmitidas considerando as modulações abaixo. Assuma que a taxa de bit é de 1 kbit/s e que a energia de bit é de $2 \cdot 10^{-3} \text{ V}^2\text{s}$. Indique cuidadosamente os instantes de tempo no eixo horizontal e as amplitudes de tensão no eixo vertical.
- (a) BPSK com frequência da portadora de 2 kHz.
 - (b) DBPSK com frequência da portadora de 2 kHz.
 - (c) BFSK com $f_0 = 2 \text{ kHz}$ e $f_1 = 3 \text{ kHz}$.
 - (d) QPSK com mapeamento Gray e frequência da portadora de 2 kHz.

7. Determine um conjunto base de funções ortonormais e a constelação referente às seguintes modulações em banda passante:

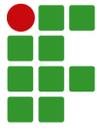
- (a) 4-ASK.
- (b) 8-PSK.
- (c) 3-FSK.

Em seguida, identifique quais dos casos apresentam constelação de energia mínima. Finalmente, determine a aproximação de alta SNR para a probabilidade de erro de símbolo em função de E_s/N_0 , para cada modulação. Assuma símbolos equiprováveis, canal AWGN e detecção ótima.

8. Considere a modulação 16-QAM, cuja constelação está mostrada abaixo.



- (a) Determine a energia média de símbolo, E_s , em função da constante β .
- (b) Determine d_{\min} , a distância entre vizinhos, em função de E_s .
- (c) Determine V , o número médio de vizinhos dos pontos da constelação.
- (d) Determine uma aproximação para a probabilidade de erro de símbolo, P_s , em função de E_s/N_0 , válida para alta SNR.
- (e) Determine uma rotulação bits-para-símbolos que satisfaça a propriedade de Gray: símbolos vizinhos devem diferir de apenas um bit.
- (f) Determine uma aproximação para a probabilidade de erro de bit, P_b , em função de E_b/N_0 , válida para alta SNR, assumindo a rotulação do item anterior.



9. Determine a mínima energia de bit necessária para que se tenha uma probabilidade de erro de bit de no máximo 10^{-6} considerando as modulações abaixo. Assuma canal AWGN com densidade espectral de potência de $N_0 = 2 \mu\text{W/Hz}$. Assuma mapeamento Gray sempre que aplicável.

- | | | |
|------------------------|-------------|--------------------|
| (a) BPSK. | (b) DBPSK. | (c) BFSK coerente. |
| (d) BFSK não-coerente. | (e) QPSK. | (f) 8-PSK. |
| (g) 16-PSK. | (h) 16-QAM. | (i) 64-QAM. |

10. Para cada modulação do item anterior, determine a largura de banda ocupada (em Hz) e a eficiência espectral (em bps/Hz) assumindo uma taxa de bits de 100 kbit/s e fator de rolloff mínimo possível.

Bibliografia

- [1] S. Haykin, *Communication Systems*, 4th ed. John Wiley & Sons, 2001.
- [2] Bernard Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Prentice Hall PTR, 2001.

Respostas

1. Em breve.
2. Em breve.
3. Em breve.
4. Em breve.
5. Em breve.
6. Em breve.
7. Em breve.
8. Em breve.
9. Em breve.
10. Em breve.