

1. Princípios de Comunicações Digitais

a. Introdução

O primeiro passo em um sistema de comunicações digitais é a codificação da mensagem a ser enviada, por exemplo um vídeo ou transmissão de voz, em uma sequência de bits. Esta conversão está, porém, fora do escopo deste texto.

Iremos aqui estudar como podemos transmitir esta sequência de bits em um canal de comunicações. Esta transmissão envolve na grande maioria a representação destes bits em um sinal, ou uma forma de onda no tempo contínuo, que pode então ser propagada no tempo e/ou espaço pelo canal. Este sinal pode ser uma onda eletromagnética de rádio, como em transmissões sem fio, sinais de luz, como em fibras ópticas, sinais acústicos em transmissões subaquáticas, ou mesmo em alterações mecânicas em algum material, como em discos ópticos, entre outros tipos menos comuns de transmissão. Veremos aqui quais formas de onda podemos gerar e como estas formas de onda são detectadas nos receptores.

Veremos ainda que, por termos processos aleatórios em toda a cadeia de transmissão, trata-se de um sistema probabilístico, em que sempre haverá a probabilidade de errarmos a detecção. Um dos principais problemas é a presença de ruído térmico, como escrito no Capítulo 1, e veremos aqui a probabilidade de erro de detecção na presença de ruído.

b. Conceitos Básicos

Queremos enviar uma sequência de bits b_l com N_{bits} em um intervalo de tempo T . Precisamos então transmitir a uma **taxa de bits** $R_b = \frac{N_{bits}}{T}$, usualmente expressa em bps (bits/segundo). Caso esta taxa seja constante, podemos dizer que cada bit leva um tempo

$$T_b = \frac{1}{R_b} \quad (1)$$

para ser transmitido, chamado de **intervalo de bit**.

Para transmitir estes bits, podemos formar blocos de n_b bits, e cada bloco será transmitido portanto com uma duração

$$T_s = n_b T_b, \quad (2)$$

conhecida como **intervalo de símbolo**.

Da mesma forma que para bits, temos uma **taxa de símbolos**

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{R_b}{n_b}, \quad (3)$$

usualmente representada com a unidade bauds¹. A taxa de símbolos é também conhecida como taxa de bauds.

Cada bloco de n_b bits $\mathbf{b}_k = [b_{n_b k}, b_{n_b k+1}, \dots, b_{n_b(k+1)-1}]$ é mapeado em um sinal $s_i(t)$ dentre um conjunto de $M = 2^{n_b}$ sinais diferentes possíveis. Ou seja, para o bloco l de bits vamos escolher um índice $I_k(\mathbf{b}_k)$, com $0 \leq I_k < M$ e escolher o sinal $s_{I_k}(t)$. Os sinais escolhidos serão enviados no respectivo intervalo, de modo que a forma de onda enviada será

¹ Em homenagem ao matemático francês Émile Baudot

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_{l_k}(t - kT_s) \quad (4)$$

Exemplo 1

Vamos supor um sistema quaternário, $M = 4$ ($n_b = \log_2 M = 2$) em que usamos o mapeamento da Figura 1.

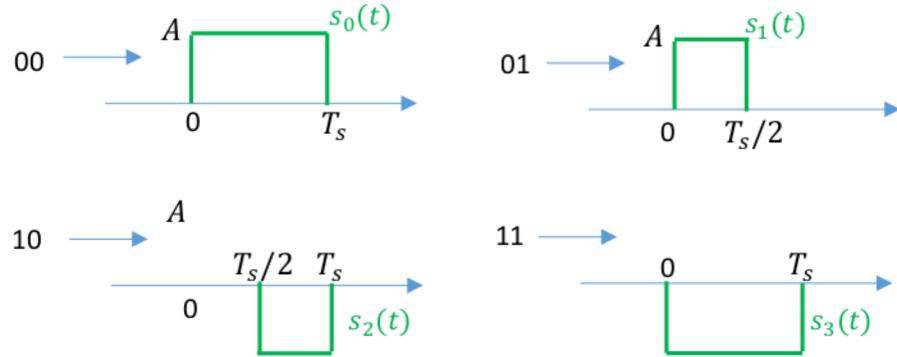


Figura 1. Exemplo de um mapeamento quaternário

Se enviarmos por exemplo a sequência $b_k = [0111010010]$, ela será agrupada em cinco blocos de $n_b = 2$ bits cada, $b_l = [(01), (11), (01), (00), (10)]$, correspondente aos índices $I_l = [1; 3; 1; 0; 2]$, e o sinal enviado será

$$x(t) = s_1(t) + s_3(t - T_s) + s_1(t - 2T_s) + s_0(t - 3T_s) + s_2(t - 4T_s)$$

Que pode ser visualizado na Figura 2.

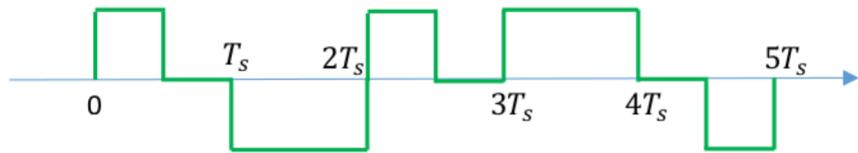


Figura 2. Exemplo de sinal quaternário transmitido

Exemplo 2 Cálculo de taxa de bits

Supondo que usamos o sistema do Exemplo 1, com um intervalo de símbolos $T_s = 1\text{ms}$, a taxa de símbolos será de $R_s = \frac{1}{T_s} = 1\text{ kbauds}$, e a taxa de bits será de $R_b = \frac{n_b}{T_s} = n_b R_s = 2\text{ kbps}$.

No receptor, basta então identificarmos qual dos M sinais foi provavelmente enviado, o que é chamado de detecção, e mapeá-lo nos bits correspondentes. Esta detecção pode ocorrer com erro, e queremos minimizar a probabilidade de estes erros ocorrerem. Esta probabilidade é usualmente conhecida como taxa de erro de bit (BER – *bit error rate*), que é a relação entre o número de bits recebidos com erro N_{err} e o número de bits enviados N_{bits} . Veremos mais tarde como escolher o conjunto de sinais e como a detecção pode ser feita da melhor maneira.

O sinal transmitido $x(t)$ é um sinal aleatório, pois depende de uma sequência aleatória de bits, e possui uma densidade espectral de potência $S_x(f)$. Caso esta densidade espectral de potência ocupe uma faixa do espectro em banda base, ou seja, $S_x(f) \approx 0$, se $|f| > B$, dizemos que temos um **código de linha**.

Em muitas aplicações o canal está disponível apenas em uma faixa do espectro. Isto pode ocorrer por questões físicas, como limitações das frequências que podem ser transmitidas por uma antena. Isto é necessário por exemplo também em transmissões ópticas, pois temos que ocupar o espectro de luz visível. Alternativamente, esta é uma necessidade para multiplexarmos diferentes sinais em um mesmo meio físico, transmitindo cada um em uma faixa de frequência diferente. Nestes casos dizemos que o sinal é transmitido em banda passante, e realizamos uma **modulação digital**.

Como veremos, não existe um código ou esquema de transmissão ideal, mas códigos com características diferentes, adequados a situações diferentes. Dentre as características de esquemas de transmissão que iremos analisar, podemos mencionar

- A **largura de banda** B_T ocupada, em Hz, ou seja, a largura de banda do sinal analógico $x(t)$. Lembrando que a mensagem é aleatória, $x(t)$ também é, e a largura de banda deve ser analisada a partir de sua densidade espectral de potência.
- Aliado à largura de banda, temos a **eficiência espectral**, que é a razão entre a taxa de bits e a banda ocupada $\eta = \frac{R_b}{B_T}$, em bps/Hz. A banda ocupada é geralmente limitada, e queremos transmitir a uma taxa o maior possível, ou seja, queremos a maior eficiência espectral possível.
- Além da banda ocupada, o formato do espectro também é relevante. Em particular, é desejado que o sinal não tenha um componente de corrente direta (DC). Um **componente DC** implica que o sinal tenha uma média não-nula em períodos de tempo relativamente longos, de modo que o sinal tenha uma média não-nula em alguns intervalos de tempo. Deste modo, o sinal pode sofrer uma acumulação de DC ao ser integrado, podendo saturar alguns circuitos elétricos. Da mesma forma o componente DC é bloqueado por exemplo em transformadores. Um sinal sem componente DC é tal que sua densidade espectral de potência não tenha componente DC, ou seja, $S_x(0) = 0$.
- Uma das principais figuras de mérito de sistemas de transmissão é a eficiência de potência. Todos os sistemas de comunicações sofrem com a presença de ruído que produzem erros, os sistemas devem ser projetados para uma certa **taxa de erro de bit** (BER) desejada, que depende da aplicação. Veremos que a taxa de erro de bit é uma função da potência de transmissão, e, para uma mesma BER, queremos uma potência de transmissão a menor possível.
- Algumas técnicas de transmissão permitem que sejam detectados alguns eventuais erros. Como veremos mais tarde, isso pode ser obtido também por meio do uso de códigos corretores e detectores de erro.
- Em qualquer sistema de transmissão digital é importante sabermos onde começa e termina cada símbolo. Isto é o que chamamos de recuperação de relógio ou sincronização. Algumas técnicas de transmissão permitem que isto seja obtido por características inerentes ao sinal de comunicação. Alternativamente, a sincronização pode ser obtida pelo envio de um sinal de referência conhecido a priori no receptor.
- É desejável que a probabilidade de erro de bit seja a mesma, independentemente da mensagem enviada. Isto é o que se chama de transparência.