绪论

通信的基本概念

- 通信
    - 利用电（或光）信号将信息中所包含的信息从信源传送到一个或多个目的地
- 消息
    - 信息的物理表现形式
- 信息
    - 消息中包含的有效内容
- 信号：
    - 消息的载体，离散信号成为数字信号，对应数字设备；连续信号称为模拟信号，对应模拟设备。
    - 两个信号区别含义是信号的某一参量的变化趋势是离散还是连续的

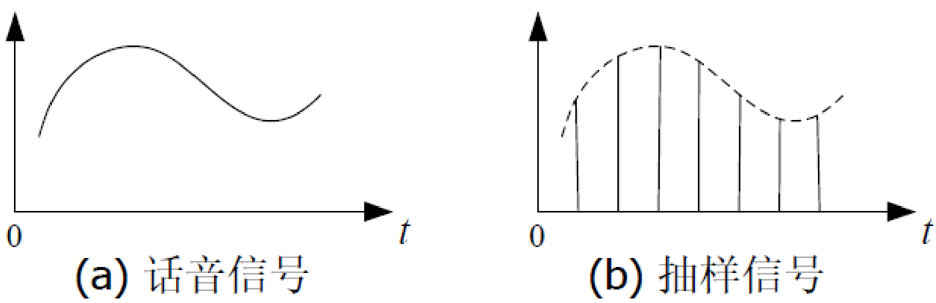
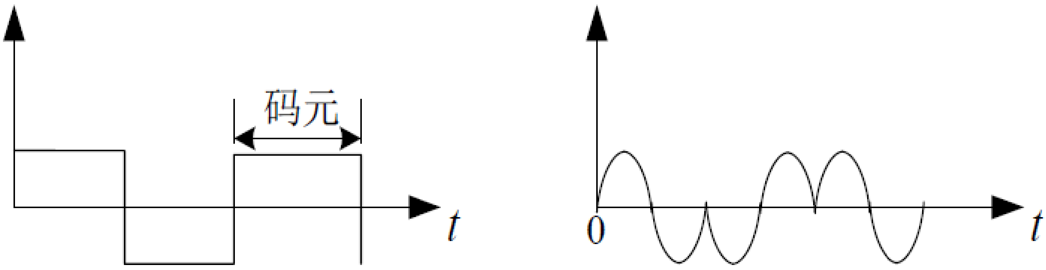


图1-2 模拟信号



(a) 二进制信号　　(b) 2PSK信号

图1-3 数字信号

通信模型

通信模型一般包含：信息源、发送设备、信道、接收设备、收信者

主要分为模拟通信系统模型和数字通信系统模型

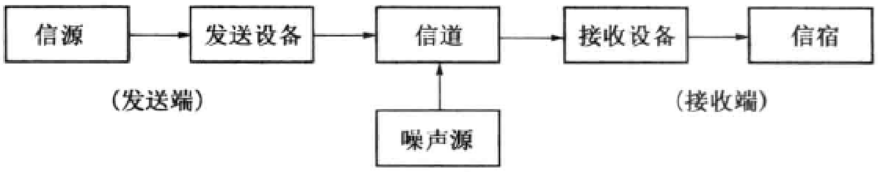


图 1－1　通信系统一般模型

- 模拟通信系统

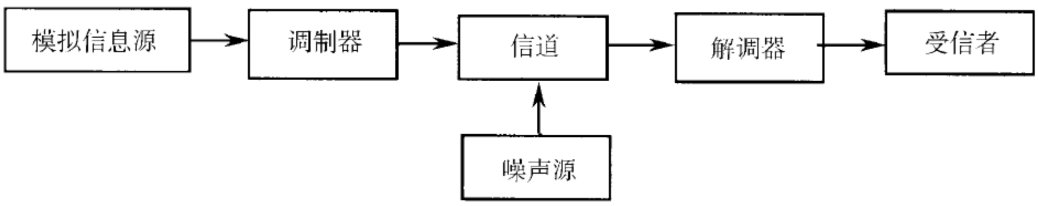


图1-4　模拟通信系统模型

  - 基带信号（原始电信号）（低频、用于调制载波信号）

$$A_m cos[w_m t + \varphi_m] = m(t) \tag{1}$$

  - 载波信号（高频、用于调幅、调频、调相，使得信号能长距离传输）

$$A_c cos[w_c t + \varphi_c] = c(t) \tag{2}$$

  - 用低频的基带信号调制载波信号可以得到用于传输的已调信号，这种信号的频谱的带通特点，我们又称已调信号为带通信号。
- 数字通信系统

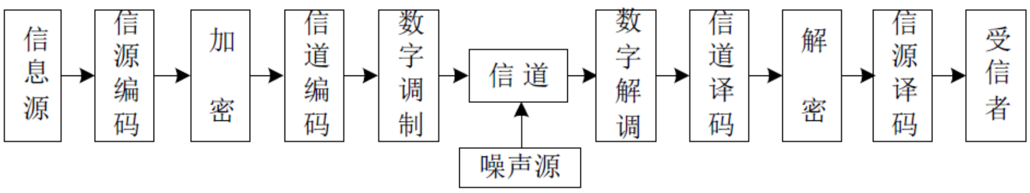


图1-5 数字通信系统模型

    - 信源编码：提高信息传输有效性、完成模/数(A/D)转换
    - 信道编码、译码：增强数字抗干扰能力
    - 加密、解密：保证传输信息的安全
    - 数字调制与解调：形成合适传输的带通信号
    - 同步：使收发双方信号在时间上保持一致
    - 优点：
        - 抗干扰能力强，且噪声不积累
        - 传输差错可控
        - 便于信息处理、变换、存储
        - 便于集成、加密

信息及其度量

- 单个事件的信息量(单位：bit)

$$I = log_2\frac{1}{P(x)} = -log_2 P(x) \qquad (b) \tag{3}$$

- M个波形等概率的单个波形的信息量

$$I = log_2 M \tag{4}$$

- 平均信息量(单位：bit / 符号)

$$H(x) = -\sum_{i=1}^{M} P(x_i) log_2 P(x_i) \tag{5}$$

主要性能指标

- 有效性：码元传输速率 R_B、信息传输速率 R_b 、频带利用率 η
- 可靠性：误码率 P_e 、误信率 P_b
- 码元传输速率（码元速率、传码率）
    - 单位时间传送的码元数目，单位：波特（Baud）
    - 设码元长度为T秒

$$R_B = \frac{1}{T} \tag{6}$$

- 信息传输速率（传信率、比特率）
    - 单位时间内传递的平均信息量/比特数,等于传码率乘以单个符号的信息量

$$R_b = R_B \cdot H \tag{7}$$

- 频带利用率
    - 真正的有效性指标，单位带宽内的传输速率，

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \qquad b/(s \cdot Hz) \tag{8}$$

- 误码率

- 码元在传输系统中被传错的概率

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \tag{9}$$

- 误信率（误比特率）
  - 比特数在传输系统中被传错的概率

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输中比特数}} \quad \xrightarrow{\text{二进制}} \quad P_b = P_e \tag{10}$$

	有效性	可靠性
模拟系统	$B(Hz)$	S_0/N_0
数字系统	$R_b(bit/s)$、$R_B(B)$	η

第一章习题

1-2 某信源符号集由 A、B、C、D 和 E 组成，设每一符号独立出现，其出现概率分别为 1/4，1/8，1/8，3/16 和 5/16。试求该信源符号的平均信息量。

解 平均信息量(熵) $H(x) = -\sum_{i=1}^{M} P(x_i)\log_2 P(x_i) = -\frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4} - \frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8} - \frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8} - \frac{3}{16}\log_2\frac{3}{16} - \frac{5}{16}\log_2\frac{5}{16} = 2.23$ (bit/ 符号)

1-4 设有一个由字母 A、B、C、D 组成的字，传输每一个字母用二进制码元编码，“00”代替 A，“01”代替 B，“10”代替 C，“11”代替 D，每个码元宽度为 5ms。

（1）~~不同的字母是等可能出现时，试计算传输的平均信息速率~~；

（2）若每个字母出现的可能性分别为 $P_A = \frac{1}{5}$，$P_B = \frac{1}{4}$，$P_C = \frac{1}{4}$，$P_D = \frac{3}{10}$

试计算传输的平均信息速率。

解 （1）一个字母对应两个二进制码元，属于四进制符号，故一个字母的持续时间(码元宽度)为 2×5ms，传送字母的符号速率为 $R_B = \frac{1}{2 \times 5 \times 10^{-3}} = 100$ (Baud)

等概时的平均信息速率 $R_b = R_B\log_2 M = R_B\log_2 4 = 200$ (bit/s)

（2）平均信息量为 $H = \frac{1}{5}\log_2 5 + \frac{1}{4}\log_2 4 + \frac{1}{4}\log_2 4 + \frac{3}{10}\log_2\frac{10}{3} = 1.985$ (bit/符号)

非等概时的平均信息速率为 $R_b = R_B \cdot H = 100 \times 1.985 = 198.5$ (bit/s)

评注：符号速率(码元速率)仅与码元宽度有关；

等概时才能获得最大信息速率，这是因为等概时有最大熵。

第一章例题

例 1-1 设有一个二进制离散信源(0,1),每个符号独立发送。

(1) 若"0"、"1"等概出现,求每个符号的信息量和平均信息量(熵);

(2) 若"0"出现概率为1/3,重复(1)。

解 (1) 由等概独立条件可知,$P(0)=P(1)=1/2$,故其信息量

$$I_0 = I_1 = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 2 = 1 \quad (\text{bit})$$

平均信息量(熵) $H(x) = -\sum_{i=1}^{M} P(x_i)\log_2 P(x_i) = P(0)I_0 + P(1)I_1 = 1 \quad (\text{bit/符号})$

或用式(1.1-4)来计算 $H = \log_2 M = \log_2 2 = 1 \quad (\text{bit/符号})$

(2) 已知 $P(0)=1/3$,且 $P(0)+P(1)=1$,则 $P(1)=2/3$,故每个符号的信息量

$$I_0 = \log_2 \frac{1}{P(0)} = \log_2 3 = 1.584 \quad (\text{bit})$$

$$I_1 = \log_2 \frac{1}{P(1)} = \log_2 3/2 = 0.585 \quad (\text{bit})$$

平均信息量(熵) $H = P(0)I_0 + P(1)I_1 = 0.918 \quad (\text{bit/符号})$

评注:等概时,二进制的每个波形所含的信息量为1bit;

等概时,信源的平均信息量(熵)就等于每个符号的信息量;

非等概时,概率越小的符号,其信息量越大;

对比(1)和(2)可知:等概时,信源的熵有最大值 $H_{\max} = \log_2 M$。

例 1-2 设有一个四进制离散信源(0,1,2,3),独立等概发送,求传送每一符号的信息量。

解 由于每个符号出现的概率为 $P(x)=1/4$,故其信息量 $I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 4 = 2 \quad (\text{bit})$

评注:独立等概时,四进制的每个码元所含的信息量,恰好是二进制每个码元包含信息量的2倍。这是因为四进制的每个码元需要用两个二进制码元来表示。

推广 若 $M=2^K$,则 M 进制的每个码元所含的信息量为 K(bit),恰好是二进制的 K 倍,即 M 进制的每个码元所含的信息量等于用二进制码元表示时所需的二进制码元数目 K。

例 1-3 已知某四进制离散信源(0,1,2,3)中各符号出现的概率分别为3/8,1/4,1/4,1/8,且每个符号的出现都是独立的,试求:

(1) 信源的平均信息量(熵);

(2) 信源发送 20010102013020103OO12…消息的信息量。其中,0 出现 38 次,1 出现 25 次,2 出现 24 次,3 出现 13 次,共有 100 个符号。

解 (1)由式(1.1-3)可得

$$H = -\sum_{i=1}^{4} P(x_i)\log_2 P(x_i) =$$

$$-\frac{3}{8}\log_2\frac{3}{8} - \frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4} - \frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8} = 1.906 \quad (\text{bit/符号})$$

(2) 若用信息相加性概念来计算,这条消息的总信息量为

$$I = 38I_0 + 25I_1 + 24I_2 + 13I_3 =$$

$$38\log_2 8/3 + 25\log_2 4 + 24\log_2 4 + 13\log_2 8 = 190.7 \quad (\text{bit})$$

每个符号的算术平均信息量为 $\bar{I} = \dfrac{I}{\text{符号数}} = \dfrac{190.7}{100} = 1.907 \quad (\text{bit/符号})$

若用熵的概念来计算，则由式(1.1 - 5)可得这条消息的总信息量

$$I = m \cdot H = 100 \times 1.906 = 190.6 \quad (\text{bit})$$

评注：求一条消息（m 个符号组成）的总信息量，可利用信息相加性的概念来计算，也可利用熵的概念来计算，即 $I = m \cdot H$。

当消息序列较长时，用熵的概念计算更为方便。而且，随着消息序列长度的增加，两种计算误差将更小（参考并比较原教材中的【例 1.4 - 2】）。

例 1 - 4　设 A 系统以 2000b/s 的比特率传输 2PSK 调制信号的带宽为 2000Hz，B 系统以 2000b/s 的比特率传输 4PSK 调制信号的带宽为 1000Hz。试问：哪个系统更有效？

解　两个传输速率相等的系统其传输效率并不一定相同。因为，真正衡量数字通信系统的有效性指标是频带利用率：

A 系统　$$\eta_b = \frac{R_b}{B} = \frac{2000}{2000} = 1 \quad (\text{b/(s} \cdot \text{Hz))}$$

B 系统　$$\eta_b = \frac{R_b}{B} = \frac{2000}{1000} = 2 \quad (\text{b/(s} \cdot \text{Hz))}$$

所以，B 系统的有效性更好。

例 1 - 5　设某数字传输系统传送二进制码元的速率为 1200B，试求该系统的信息速率；若该系统改为传送八进制信号码元，码元速率不变，则这时系统的信息速率为多少？

解　(1) $R_b = R_B \log_2 2 = 1200 \quad (\text{b/s})$

(2) $R_b = R_B \log_2 8 = 1200 \times 3 = 3600 \quad (\text{b/s})$

评注：R_B 一定时（即带宽一定），增加进制数 M，可以增大 R_b，从而在相同的带宽中传输更多的信息量。

例 1 - 6　设某四进制数字传输系统的每个码元的持续时间（宽度）为 833×10^{-6}s，连续工作 1h 后，接收端收到 6 个错码，且错误码元中仅发生 1bit 的错误。

(1) 求该系统的码元速率和信息速率；

(2) 求该系统的误码率和误信率。

解　(1) 码元速率　$$R_B = \frac{1}{T} = \frac{1}{833 \times 10^{-6}} = 1200 \quad (\text{Baud})$$

信息速率　$$R_b = R_B \log_2 M = 1200 \times 2 = 2400 \quad (\text{b/s})$$

(2) 由式(1.2 - 4)可求出 1h 传送的码元数

$$N = R_B \cdot t = 1200 \times 3600 = 432 \times 10^4 \quad (\text{个})$$

误码率为　$$P_e = \frac{N_e}{N} = \frac{6}{432 \times 10^4} = 1.39 \times 10^{-6}$$

若每个错误码元中仅发生 1bit 的错误，则可由式(1.2 - 2)计算误信率，即

$$P_b \approx P_e / \log_2 M = 6.94 \times 10^{-7}$$

或者，先由式(1.2－3)算出1h内传送的信息量

$$I = R_b \cdot t = 2400 \times 3600 = 8.64 \times 10^6 \quad (\text{bit})$$

然后由定义式(1.1－15)来计算误信率

$$P_b = \frac{错误接收的比特数}{传输的总比特数} = \frac{6}{8.64 \times 10^6} = 6.94 \times 10^{-7}$$

评注：多进制系统的误信率小于误码率。