

1 通信基础

1.1 基本概念

1.1.1 数据、信号和码元

计算机之间通信的目的是传输信息。（1）**数据 (Data)**是传递信息的**实体**（如文字、图像，本质是比特流）。（2）**信号 (Signal)**则是数据的**电气或电磁表现**，是数据在传输过程中的存在形式（如网线或USB线里传输的一系列高低电平）。根据取值，（1）（2）都可分为2类：

- 模拟 (Analogous)数据/信号：某范围内取值连续；
- 数字 (Digital)数据/信号：取值离散。

那么，信号如何携带信息？我们使用一个**固定时长**的信号波形来代表一个 k 进制数字（称为 k 进制（3）**码元 (Symbol)**），这个时长称为**码元宽度**或**信号周期**。例如，在一个信号周期内出现2个信号，每个信号就对应一个二进制数，该码元携带1 bit的信息。

1.1.2 信源、信道与信宿

一个通信系统主要包括三个部分：

- **信源 (Source)**：产生和发送数据的源头。
- **信宿 (Destination)**：接收数据的终点。
- **信道 (Channel)**：信号的传输媒介。一条双向通信线路通常包含一个发送信道和一个接收信道。

按照信源和信宿的交互方式，通信可分为下面3种类型：

1. **单向通信 (Simplex Communication)**：只有一个方向的通信，无反向交互。如：广播。
2. **半双工通信 (Half-Duplex Communication)**：通信双方都可以发送或接收，但不能同时进行。如：对讲机。
3. **全双工通信 (Full-Duplex Communication)**：通信双方可以**同时**发送和接收数据。如：电话。



1.1.3 速率的描述形式

数据传输速率指单位时间传输的数据量，有2种描述形式：

- **码元传输速率 (Symbol Rate)**，又称**波特率 (Baud Rate)**、调制速率。指的是**单位时间（秒）**内传输的码元个数。单位：**波特 (Baud)**。
- **信息传输速率 (Information Transfer Rate)**。又称**比特率 (Bit Rate)**、数据传输速率。指的是**单位时间（秒）**内传输的二进制比特数。单位：**比特/秒 (b/s)**。

注：如果一个码元携带 n 比特的信息量（即代表 2^n 种状态），那么：

比特率 = 波特率 $\times n$ 。即， $R_b = R_B \times \log_2 V$ ，其中 V 是码元的离散电平数目。

1.1.4 带宽和频分复用

在模拟系统中，带宽指的是一段频率范围（Hz）。如下图：



为了提升带宽利用率，我们很少将整个带宽只分配给一个用户或一种信号。相反，我们会将其划分成多个独立的“信道”（复用）。这样，多个用户或多种服务可以在同一时间、同一物理介质上进行通信而互不干扰（例如FM广播）。这就是频分复用。

为了实现频分复用，需要通过调制将多个（基带）信号搬移到互不重叠的高频信道上。由此，信道上传输的信号可以分为2类：

- 基带信号（Baseband signals）：从零到某一最大频率的信号；
- 带通信号（Passband signals）：被搬移到更高频率范围的信号。

相应的，信号传输分为：

- 基带传输：信号不经过任何频率搬移，直接使用原始信号（代表0和1的脉冲波形）在信道中传输。
- 带通传输：将原始的低频基带信号，通过调制的过程，“装载”到一个频率高得多的载波信号（carrier）上。

1.1.5 练习：限制带宽如何限制比特率？

（来自PPT *Bandwidth-Limited Signals* 处）一个例子：在带宽不超过 $B = 3000$ Hz中传输数据， $n = 8$ （即 $V = 2^8$ ）。易得 $T = 8/b$ sec 【信息层面】，而 $n = 8$ 【转化】，因此谐波的频率为 $f = 1/T = b/8$ Hz 【物理层面】，从而至多传输 $B/(b/8) = 24000/b$ 个谐波（频分复用以提升带宽利用率）。因此，当 $b > 24000$ 时，无法传输数据。



注意利用单个码元携带的 n 比特信息量来进行信息层面和物理层面的转化。

1.2 傅里叶级数

定理：任何行为良好的周期函数 $g(t)$ 都可以表示为不同频率的正弦和余弦函数的和，这个级数称为**傅里叶级数 (Fourier Series)**。具体地，

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n e^{j2\pi f_0 n t} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n (\cos(2\pi f_0 n t) + j \sin(2\pi f_0 n t)), \quad a_n = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) e^{-j2\pi f_0 n t} dt.$$

其中， f_0 称为基频（fundamental frequency）， $T = \frac{1}{f_0}$ 称为周期。

容易注意到 a_n, a_{-n} 互为共轭复数（conjugate）。因此，傅里叶级数可以进一步写为：

$$g(t) = C + \sum_{n=1}^{\infty} 2A_n \cos(2\pi n f_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} 2B_n \sin(2\pi n f_0 t). \text{其中,}$$
$$A_n = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt, \quad B_n = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt, \quad C = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt.$$

注：（1）信号在有限范围内时，需做级数的延拓；（2）易验证 $a_n = A_n - jB_n$ 。（3）通常，信道能够传输的最高频率称为**截止频率 (Cutoff Frequency, f_c)**；能够无显著衰减传输的频率范围称为**带宽 (Bandwidth)**。

1.3 信道的极限速率

信号在信道中传输会失真，影响可靠传输的最大速率。针对**无、有噪声信道**，分别有下面的结论。



1.3.1 奈奎斯特定理 (Nyquist Theorem)

信号传输过程中，由于信道带宽有限，高频分量衰减，码元边界模糊。这种现象称为**码间串扰 (Inter-Symbol Interference, ISI)**。



上图中，前后码元由于信道中噪声等影响造成前一码元的拖尾过长与后一码元发生混叠，使得在接收端无法识别各个数字信号。

奈奎斯特定理 (Nyquist Theorem)：在理想低通（无噪声、带宽有限）信道中，为了避免码间串扰，码元传输速率最高为 $2W$ Baud（ W 为信道带宽，单位 Hz）。

注：奈式准则并未对每个码元携带的信息量作出限制。由奈式准则易知，数据传输速率最高为 $2W \log_2 V$ b/s（ V 为码元离散电平数(discrete signal levels)）。

1.3.2 香农定理 (Shannon's Theorem)

香农定理 (Shannon's Theorem)：在带宽受限、有**高斯噪声**的信道中，数据传输速率最高为 $W \log_2(1 + S/N)$ b/s，其中 S/N 为信噪比（无单位）。

信噪比表示**信号的平均功率/噪声的平均功率**，也可表示为 $10 \log_{10}(S/N)$ dB。

1.4 编码与调制

传输过程中，不论数字/模拟数据，都需要转化为信号。数据转为数字信号称为编码，转为模拟信号称为调制。

1.4.1 数字数据编码为数字信号

用于基带传输。编码的本质是：什么样的数字信号（如电平）表示数字数据0？什么样的表示1？



- 非归零编码（NRZ）：使用高电平表示1，低电平表示0；
- 反向非归零编码（NRZI）：使用电平是否跳变表示0或1，上图中跳变为1（但也有将跳变作为0的）；
- 曼彻斯特编码：在每个码元中嵌入跳变以进行时钟同步，“下阶梯”表示1，“上阶梯”表示0。
- 双极性编码（Bipolar Encoding）：使用0电平表示0，正或负电平表示1（正负交替出现）。

各种编码方式的trade-off:

（1）非归零编码（NRZ）：最简单直接的编码方式，但是会出现长时间连续的0或1，对发送、接受端时钟同步造成挑战。

（2）反向非归零编码（NRZI）：使用电平是否跳变表示1（或0），使得长时间连续的1（或0）不再有时钟同步问题，但是仍然没有解决长时间连续的0（或1）的时钟同步问题。

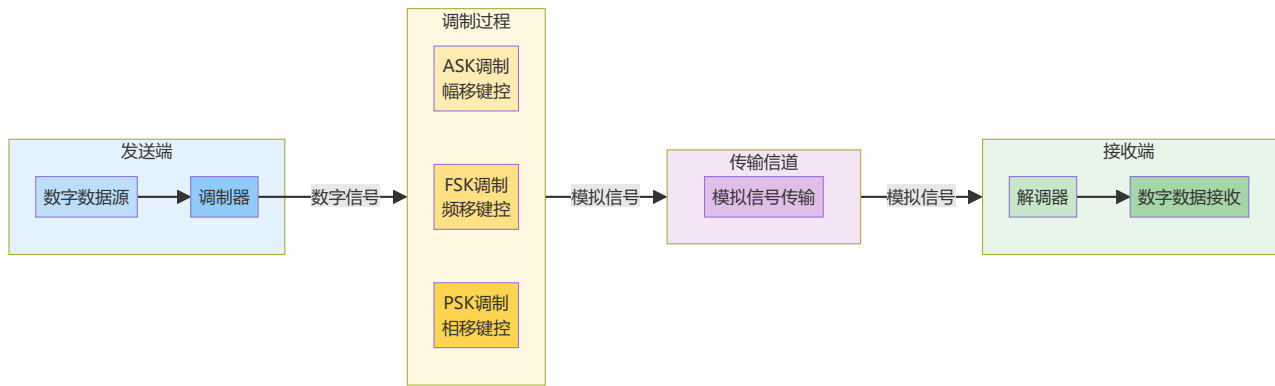
（3）曼彻斯特编码：在每个码元中嵌入跳变以进行时钟同步，解决了长时间连续0或1的时钟同步问题，但是带来overhead：需要NRZ两倍的带宽。

（4）双极性编码（Bipolar Encoding）：更符合DC balance（电气特性），但是没有解决长时间连续0或1的时钟同步问题。

1.4.2 模拟数据编码为数字信号

和数字数据编码不同的是，需要先进行“采样”、“量化”、“编码”（将量化得到的离散整数转化为二进制数据）这3个步骤，将模拟数据转化为数字数据，然后再使用之前的方法进行编码。

1.4.3 数字数据调制为模拟信号



1.5 复用

2 传输介质

非常通识且物理，略。详见PPT。

3 物理层设备