

# 第一章 绪 论

教材：《数字通信基础》

仇佩亮，陈惠芳，谢磊

参考书：

《Communication Systems Engineering》 ,

J.G. Proakis and M. Salehi

《Digital Communications: Fundamentals and Applications 》

B. Sklar

《通信原理教程》 ， 樊昌信

## § 1.1 通信技术发展历史回顾

### 有线通信

1799年 Volta 发明电池；

1837年 S. Morse发明电报（变长度信源码）；

1844年 华盛顿——巴尔的摩电报演示；

1858年 第一条横跨大西洋的越洋电报电缆建成；

1875年 E. Baudet发明定长信源码；

1876年 Bell申请电话专利；

1877年 建立Bell电话公司；

1906年 De Forest发明电子三极管放大；

1915年 实现横跨美洲大陆的电话；

二次大战和经济大萧条推迟了越洋电话业务；

1953年 建立第一条横越大西洋电话电缆；

1897年 Strowger发明步进制自动交换；

1960年 Bell实验室发明数字交换；

在过去50年中电话有极大发展，光纤代替铜缆；

# 无线通信历史

1820年 Oersted 发现电流产生磁场;

1831年 Faraday发现导线作切割磁力线运动产生感应电流;

1864年 Maxwell提出电磁场方程, 预言电磁波存在;



1894年 O. Lodge发明粉末检波器,

在牛津检测到150码远发出的无线信号;



1895年 Marconi 发明的无线电报，传输2公里；

1897年 Marconi申请无线电报专利，建立无线电报公司；

1901年12月12日 Marconi在加拿大纽芬兰岛收到从英国Cornwall发出的无线信号，传输距离1700mile.

1900年 专利《调谐电话》获得批准，专利号为No. 7777；同年公司改名为Marconi公司；

1907年 获诺贝尔物理奖

1904年 Flemin发明电子二极管；

1906年 De Forest发明电子三极管放大；

1920年 AM广播在美国Pittsburgh开通；

在一次大战中 E. Armstrong发明超外差AM接收机；

1933年 E. Armstrong发明FM；

1929年 美国人Zworykin发明电视；

1933年 英国BBC广播电视开通；

## 近50年来通信的发展

1947年 Brattain, Bardeen, Shockley发明晶体管；



**W. SHOCKLEY**

(1910-1989)



**J. BARDEEN**

(1908-1991)



**W. H. BRATTAIN**

(1902-1987)

1955年 Bell实验室皮尔斯（Pierce）提出卫星通信；

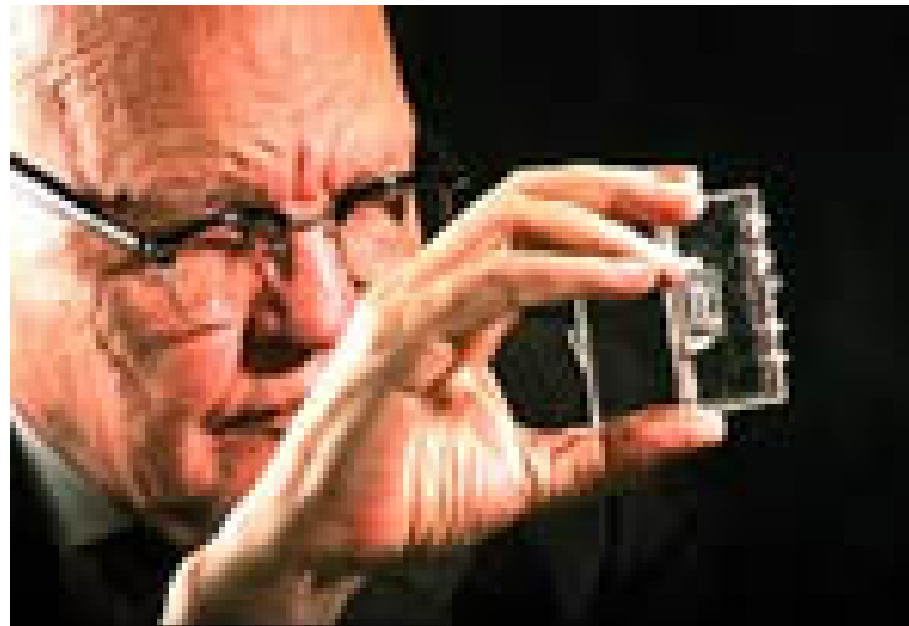
1962年 Telstar I卫星发射，转播欧、美之间电视广播；

1965年 发射商用通信卫星；

1958年 Townes, Schawlow发明激光；

1966年 英国学者高昆（K. C. Kao）与霍克汗姆（G. A. Hockham）预言光纤损耗可以降到20db/km以下，使光纤通信成为可能；

1958年 Kilby发明集成电路；



70年代末 Bell实验室提出蜂窝式无线公众移动通信网；  
目前2G→3G→B3G；



*To Richard Frenkiel  
Best Wishes  
Bill Clinton*

**Clinton总统给R. Frenkiel 授奖**



# 通信系统理论

1924年 奈奎斯特 (Nyquist) 研究表明带宽为 $W$ 的信道最多可以支持每秒 $2W$ 个符号的无码间干扰传输，现代数字通信的开端。

1928年 维纳 (Wiener) 提出滤波理论和预测理论，奠定了控制论；

1943年 诺斯 (D. O. North) 提出了匹配滤波器理论；

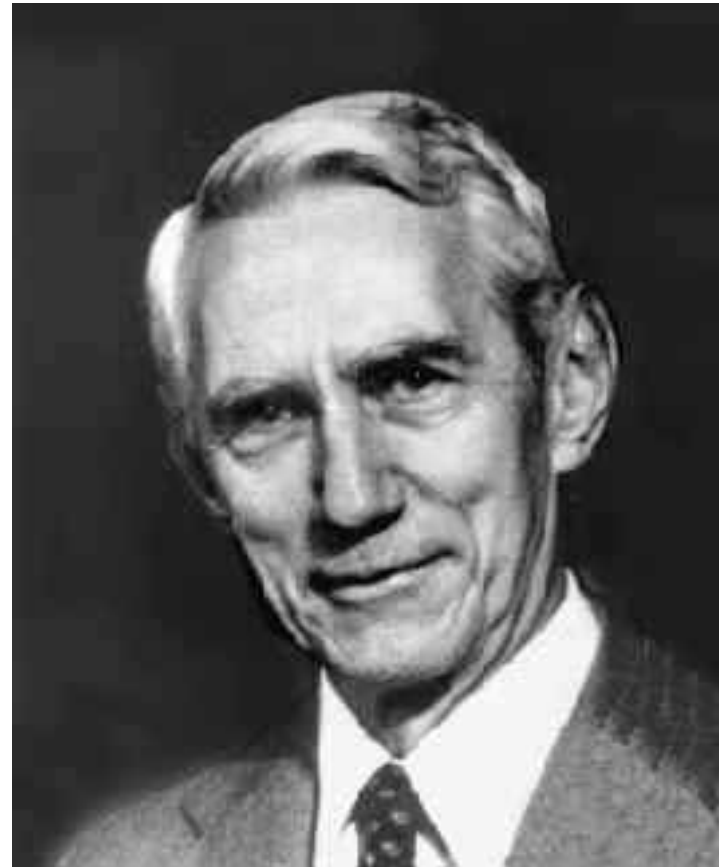
1947年 苏联学者卡捷尔尼可夫 (Kotelnikov) 发展了信号的几何表示理论，并建立了信号的潜在抗干扰理论；

上世纪40年代，赖斯 (O. Rice) 关于随机噪声的数学研究；

1948年 Shannon建立信息论（通信的数学理论）

1950年 Hamming提出纠错编码；

之后在Shannon理论指导下，各种信道纠错编码，信源压缩编码，调制方式，多用户通信理论，网络理论，扩谱理论，多天线理论，合作通信理论等蓬勃发展起来；



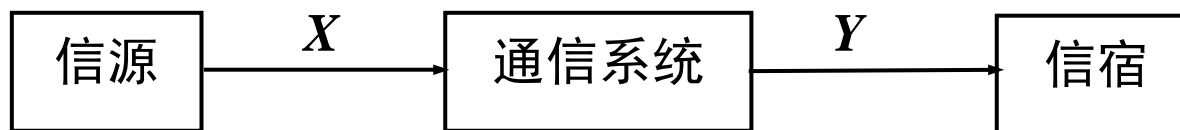
**C. Shannon (1916-2001)**

## § 1.2 不确定性与信息量

### 1.2.1 消息，信号与信息

- (1) 信源和信宿：
- (2) 消息：
- (3) 信号：
- (4) **信息：不确定性（熵）的减小**

通信系统简单框图



$$I(X;Y) = H(X) - H(X | Y)$$

## 1.2.2 熵和互信息

### 一、熵

用随机变量 $X$ 来描述消息。设 $X$ 是一个离散随机变量，它可以取 $M$ 个可能值  $\{x_1, x_2, \dots, x_M\}$  并且 $X$ 取  $x_i$  的概率为  $p(x_i)$ 于是把  $X$  的平均不确定性（熵）定义为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^M p(x_i) \log_a p(x_i)$$

当对数的底  $a$  等于2时，熵的单位为比特（bit），当  $a$  等于 $e$  时，熵的单位称为奈特（nat）。

## 两个例子说明熵定义的合理性

**[例1.2.1]** 设 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  是三个二元随机变量，它们的概率分布分别为

$$\begin{Bmatrix} X \\ p(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 \\ 0.01 & 0.99 \end{Bmatrix}$$

$$H(X) = -0.01 \log 0.01 - 0.99 \log 0.99 \approx 0.08 \text{ bit}$$

---

$$\begin{Bmatrix} Y \\ p(y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y_1 & y_2 \\ 0.4 & 0.6 \end{Bmatrix}$$

$$H(Y) = -0.4 \log 0.4 - 0.6 \log 0.6 \approx 0.97 \text{ bit}$$

---

$$\begin{Bmatrix} Z \\ p(z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} z_1 & z_2 \\ 0.5 & 0.5 \end{Bmatrix}$$

$$H(Z) = -0.5 \log 0.5 - 0.5 \log 0.5 = 1 \text{ bit}$$

**[例1.2.2]** 设随机变量  $X$  等可能地取4个值，而  $Y$  等可能地取二个值，即

$$\begin{Bmatrix} X \\ p(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \end{Bmatrix}$$

$$H(X) = 4 \cdot \left\{ \frac{-1}{4} \lg \frac{1}{4} \right\} = 2bit$$

---

$$\begin{Bmatrix} Y \\ p(y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y_1 & y_2 \\ 0.5 & 0.5 \end{Bmatrix}$$

$$H(Y) = 1bit$$

## 二、互信息

通信信道的输入、输出  $X$  和  $Y$  是一对相关的随机变量， $X$  和  $Y$  的关系是通过条件概率  $\{p(y_j | x_i)\}$  描述的，表示当发送为  $X = x_i$  时，接收到  $Y = y_j$  的概率。于是

$$\begin{aligned} p(x_i | y_j) &= P\{X = x_i | Y = y_j\} \\ &= \frac{p(x_i, y_j)}{p(y_j)} \\ &= \frac{p(x_i)p(y_j | x_i)}{p(y_j)} \end{aligned}$$

在收到  $Y = y_j$  条件下，对  $X$  的平均不确定性为：

$$H(X | Y = y_j) = -\sum_i p(x_i | y_j) \log p(x_i | y_j)$$

由于接收方也可能收到其它的  $Y$  值，所以条件不确定性  $H(X | Y = y_j)$  应对  $Y$  取平均。于是在  $Y$  给定条件下  $X$  的平均不确定性，或称条件熵为：

$$H(X | Y) = \sum_j p(y_j) H(X | Y = y_j)$$

**互信息：**  $I(X; Y) = H(X) - H(X | Y)$

**[例1.2.3]** 信源以相等概率，输出二进制数字“0”和“1”，在信道传输过程中“0”错成“1”和“1”错成“0”的概率都等于1/10，二个符号不错的概率为9/10，求从信道收到一位二进制数字对发送数字平均提供多少信息。

[解] 互信息为

$$I(X; Y) = H(X) - H(X | Y) = 0.531 \text{ bit}$$

如接收到  $Y$  后，完全消除  $X$  的不确定性，则由  $Y$  对  $X$  所获得得信息就是

$$I(X; Y) = H(X)$$

所以信源的熵也可称为是信源所输出的信息量。



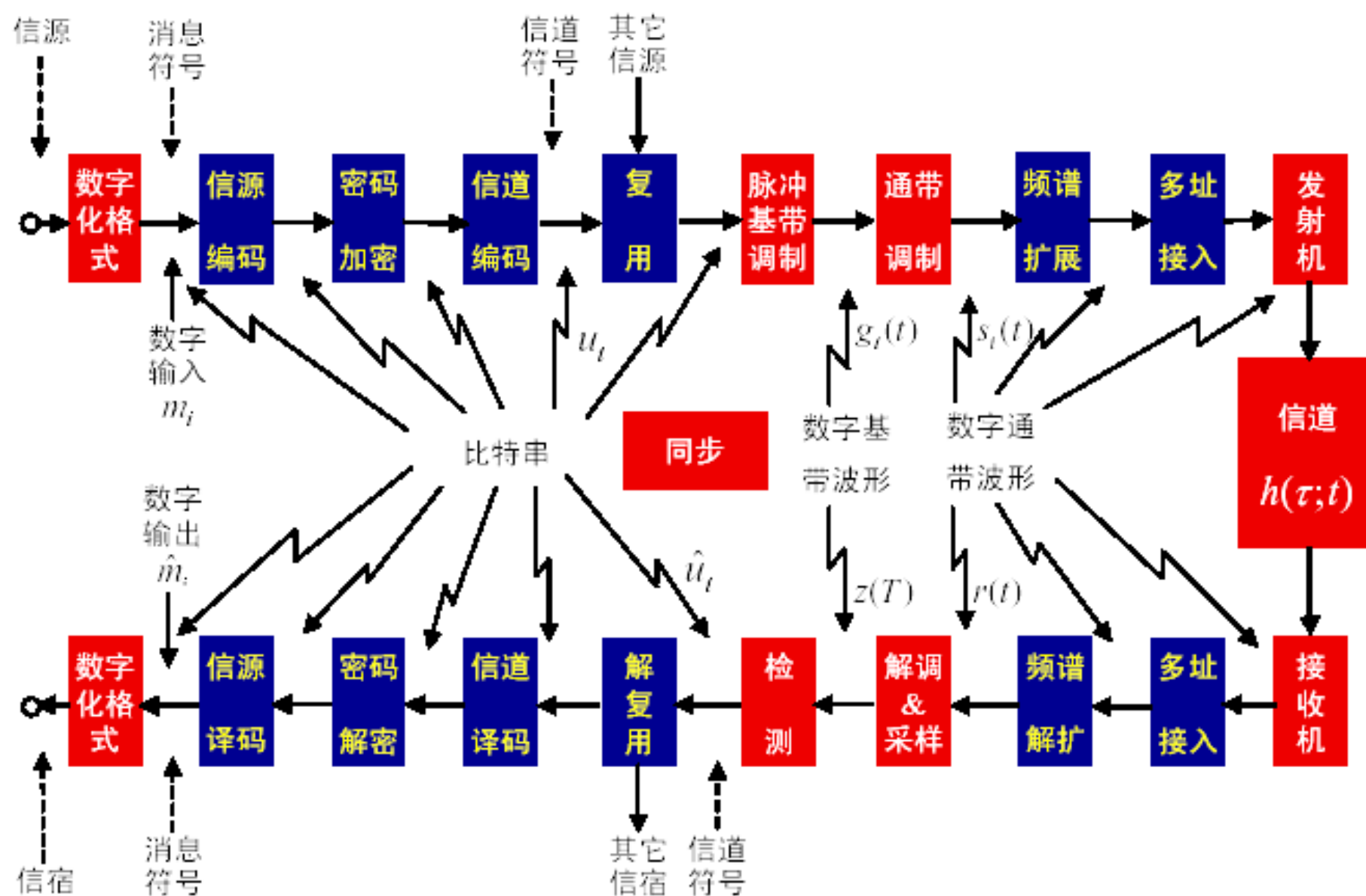
## § 1.3 数字通信系统

### 1.3.1 基本概念

数字通信与模拟通信相比有许多优点：

- (1) 在良好设计的数字通信链路上，中继转发不会产生误差积累；
- (2) 在数字通信中可以通过纠错编码技术极大提高抗干扰性能；
- (3) 数字通信系统中容易采用保密措施，大大提高通信安全性；
- (4) 在数字通信中，可以通过各种方式把语音、图像和文字都变换成数字，在同一信道中传输多种媒体信息；并便于存贮和处理；
- (5) 数字信号可以通过信源压缩编码，减少冗长度，提高信道利用率；
- (6) 数字通信系统可采用大规模数字集成电路，使设备重量轻，体积小，功耗省。
- (7) 数字通信系统更加适合于信息论的理论框架，有利于在信息论理论指导下发展新技术，新体制。

### 1.3.2 数字通信系统的组成



## 一个数字通信系统主要包括如下九部分信号处理功能：

- 1、模拟信号的数字格式化，和信源编、译码；
- 2、基带信号方式；
- 3、通带信号方式；
- 4、均衡；
- 5、信道编、译码；
- 6、复用与多址；
- 7、扩展频谱与解扩；
- 8、密码的加密与解密；
- 9、同步；

### 1.3.3 数字通信系统的主要性能指标

#### (1) 传输速率:

① 符号速率(码元速率): 每秒传送的符号数目, 用  $R_B$  表示, 单位“波特 (Baud) ”。

② 比特速率(信息速率): 每秒传送的比特数目, 用  $R_b$  表示, 单位是“比特/秒 (bit/s)”。

若符号是  $M$  进制的, 则每个符号要用  $\log_2 M$  个比特表示它, 则这个系统的信息速率为

$$R_b = R_B \log_2 M \text{ (bit / s)}$$

$$R_B = R_b / \log_2 M \text{ (波特)}$$

## (2) 错误概率:

① 误码率或误符号率: 指在所传送的符号总数中错误符号所占的比例, 即

$$P_e = \text{错误符号数目} / \text{总传输符号数目}$$

② 误比特率: 指在所传输的总比特数中, 错误比特所占的比例, 即

$$P_b = \text{错误比特数目} / \text{总传输比特数目}$$

如果一个符号有  $k$  个比特组成, 若其中有一个比特出错, 则这个符号必然错了, 所以  $P_e \geq P_b$  ; 如果一个符号错了, 则组成它的  $k$  个比特中至少有一个比特错, 所以,  $P_e = 1 - (1 - P_b)^k \leq kP_b$  。

③ 误码字率或者误帧率:

$$P_f = \text{错误码字数 (误帧数)} / \text{总码字数 (总帧数)}$$

- (3) **频带利用率**：每赫兹频带所能支持的信息速率，用比特/秒/赫作为单位。频带利用率和调制方式与编码方式有关。
- (4) **能量利用率**：为了达到一定的误比特率，传输每比特所需的信号能量。在通信中用误码率与  $E_b / N_0$  的关系曲线来衡量，其中  $E_b$  是每比特能量， $N_0$  为噪声功率谱密度。

## § 1.4 课程内容

第一章 绪 论

第二章 确定性信号、随机变量与随机过程

第三章 通信信道

第四章 模拟调制系统

第五章 模拟信号的数字化

第六章 数字基带传输

第七章 数字通带传输

**第八章 数字通信中的同步技术**

**第九章 基本信道编码技术**

**第十章 先进信道编码技术**

**第十一章 扩展频谱通信技术**

**第十二章 衰落信道上的数字通信**

**第十三章 通信中的多用户技术**