



# 通信原理(I)教程

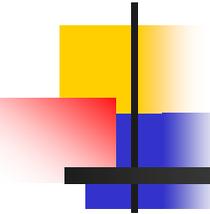
---

信息与通信工程学院  
无线通信系统与网络实验室(WCSN)

刘 丹 谱

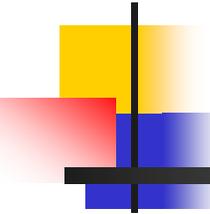
[dpliu@bupt.edu.cn](mailto:dpliu@bupt.edu.cn)

62282289



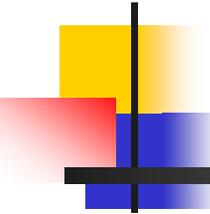
# 关于本课程

- 通信原理为专业技术基础课程，要求重点掌握通信系统的基本概念和分析方法，以及信息传输的基本原理；熟悉各种通信技术的基本特点以及性能；在此基础上，研究通信系统的设计，了解通信发展方向(教学大纲网上查询)
- 先修课程：《信号与系统》、《概率论与随机过程》等
- 学习方式：课堂教学/课后作业
- 考试方式：笔试，闭卷
- **成绩评定**：40%期末 + 40%期中 + 20%平时



# 主要参考书

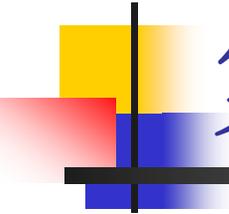
- 周炯磐等编，通信原理，北京邮电大学出版社
- 樊昌信等编，通信原理，第5版，国防工业出版社
- 曹志刚等编，现代通信原理，清华大学出版社
- **L.W. Couch, Digital and Analog Communication Systems (5<sup>th</sup> or 6<sup>th</sup> Edition), 清华大学出版社影印版**
- **Stephen G. Wilson, Digital Modulation and Coding, 电子工业出版社影印版, 1998年**
- **J. G. Proakis, Digital Communications(4<sup>rd</sup> Edition). 电子工业出版社影印版**
- **<http://txyl.ste.bupt.cn>**



# 课程的基本内容

---

- 绪论
- 确定信号分析
- 随机过程
- 模拟通信系统
- 数字信号的基带传输
- 数字信号的频带传输
- 信源和信源编码



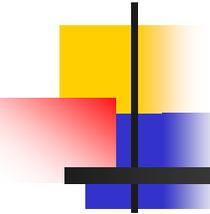
# 第一章 绪论

---

- 什么是通信？
- 通信的发展简史
- 通信系统的组成
- 通信系统的分类和通信方式
- 信息及其度量
- 通信系统的主要性能指标

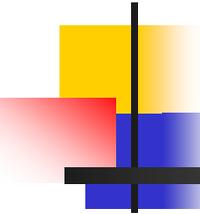
# 1. 什么是通信?

- 通信：交流，传递消息；信息的传输与交换
  - 信息是要表示和传送的对象。
  - 消息是表示信息的媒体，象语言、文字、图象、符号、声音等。同一条信息可以用不同的消息表示。信息是包含在消息中的不确定性，即有效(有用)的东西。消息的本质和价值取决于它所包含的信息量，即对接收者的不确定性。
  - 信号是消息的承载者，信号常常由消息变换而来，它是与消息对应的某种物理量，通常是时间的函数，例如随着时间变化的电压(电流)。通信系统中传送的是信号。
  - 通信就是以语言、图像、数据为媒体，通过电(光)信号将信息由一方传输到另一方
- 通信是一种产业，它生产的是一种信息在空间转移的效应



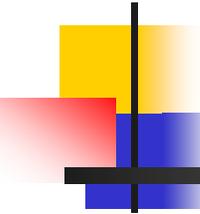
## 2. 通信的发展简史(1)

- 18世纪, 提出用电流进行通信的设想
- 1838年, **F.B. Morse** 发明有线电报
- 1864年, **J.C. Maxwell**提出电磁辐射方程
- 1876年, **A. G. Bell** 发明电话
- 1896年, **G. Marconi**发明无线电报
- 1901年, 横跨大西洋的无线通信成功
- 1906年, **Lee deForst** 发明真空管
- 1918年, **E.H. Armstrong**发明AM广播, 超外差接收机
- 1925年, 开始采用三路明线载波电话, 多路通信



## 2. 通信的发展简史(2)

- 1936年, E. H. Armstrong发明FM广播
- 1937年, A. Reeves发明PCM调制原理
- 1938年, 电视广播开始
- 1940-45年, 二次大战刺激了雷达和微波通信系统的发展
- 1948年, 发明了晶体三极管; 统计理论建立; Shannon发表《通信的数学理论》
- 1950年, 时分多路通信应用于电话
- 1953年, 敷设了第一条越洋电话电缆(36话路)
- 1957年, 前苏联发射第一颗人造地球通信卫星

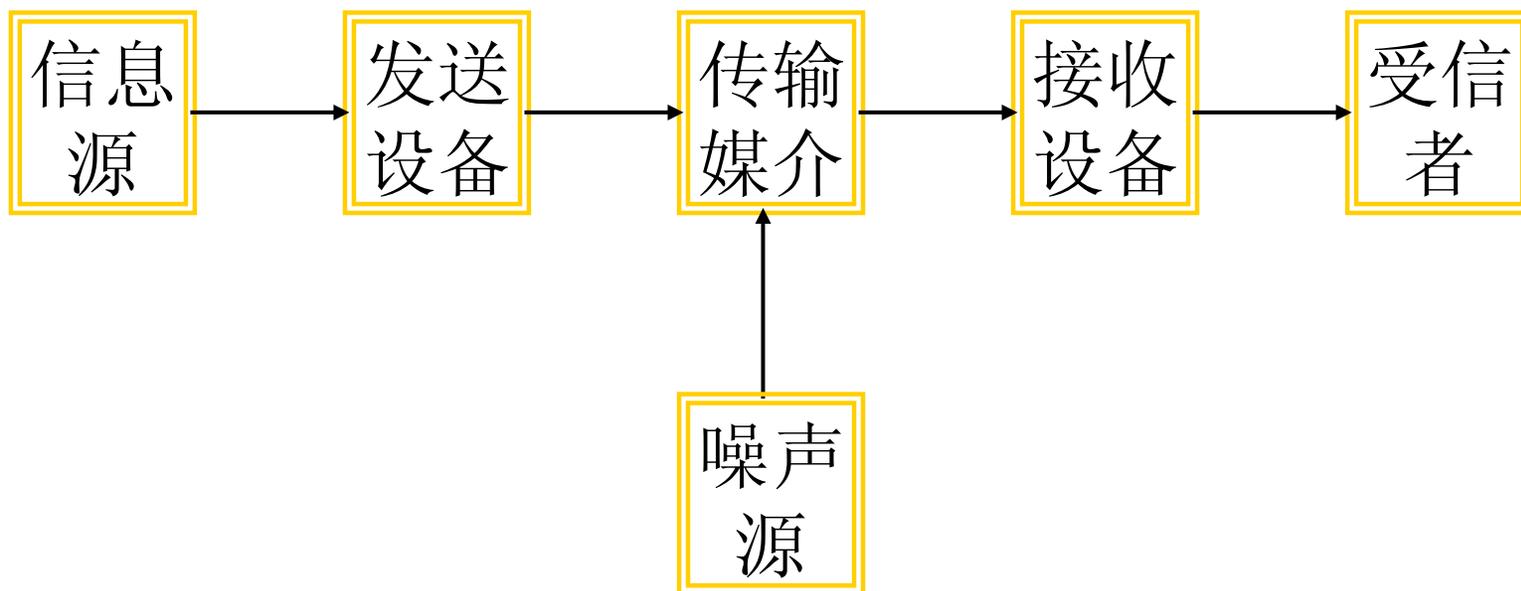


## 2. 通信的发展简史(3)

- 1958年，发明第一块集成电路
- 1961年，FM立体声广播开播
- 1964年，第一台全电子电话系统问世
- 1972年，Motorola发明蜂窝电话
- 1976年，个人PC问世
- 1989年，“便携式”蜂窝电话问世
- 1990—，超大规模集成电路的大量使用，计算机和通信正向着兼容互补的方向发展
- 未来的通信

# 3. 通信系统的组成(1)

## ■ 通信系统模型

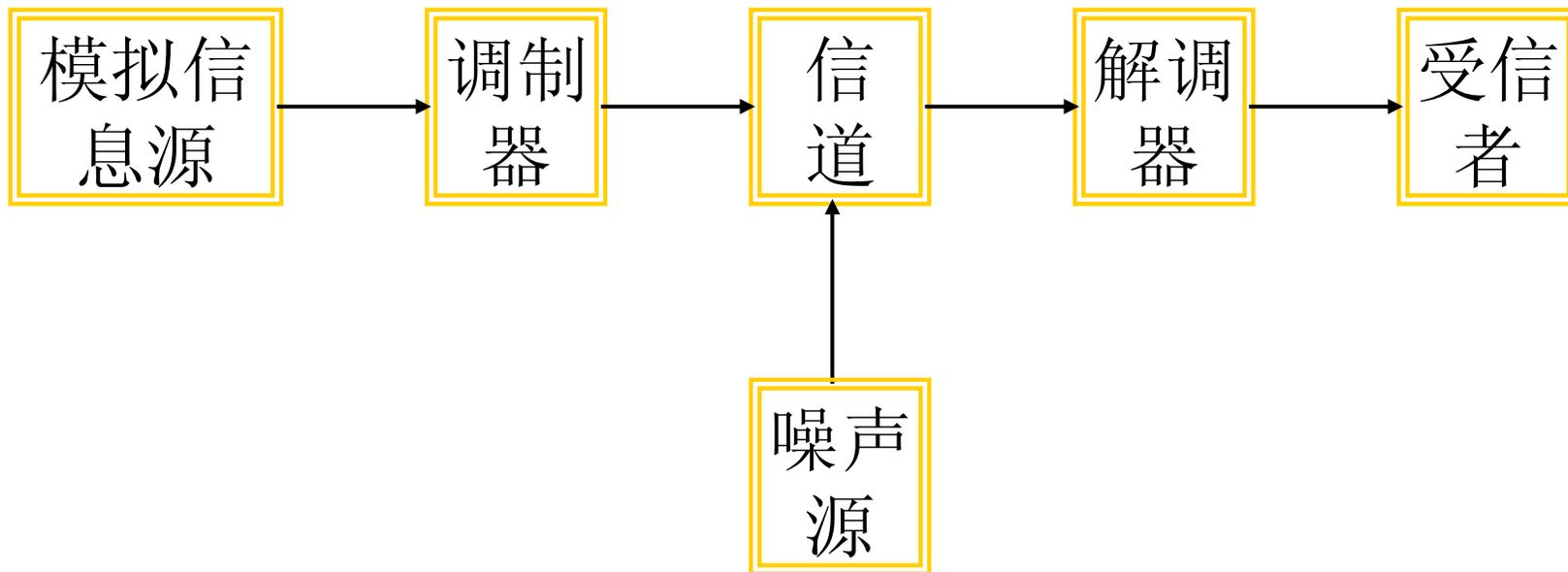


# 3. 通信系统的组成(2)

- 模拟通信和数字通信
  - 模拟(连续)消息：状态连续变化，例如语音，图像
  - 数字(离散)消息：状态可数或离散，如符号，文字，数据
  - 模拟信号：载荷消息的电参量连续取值
  - 数字信号：载荷消息的电参量离散取值
  - 模拟通信系统：信道中传输模拟信号，例如传统广播和电视
  - 数字通信系统：信道中传输数字信号，例如2G, 3G

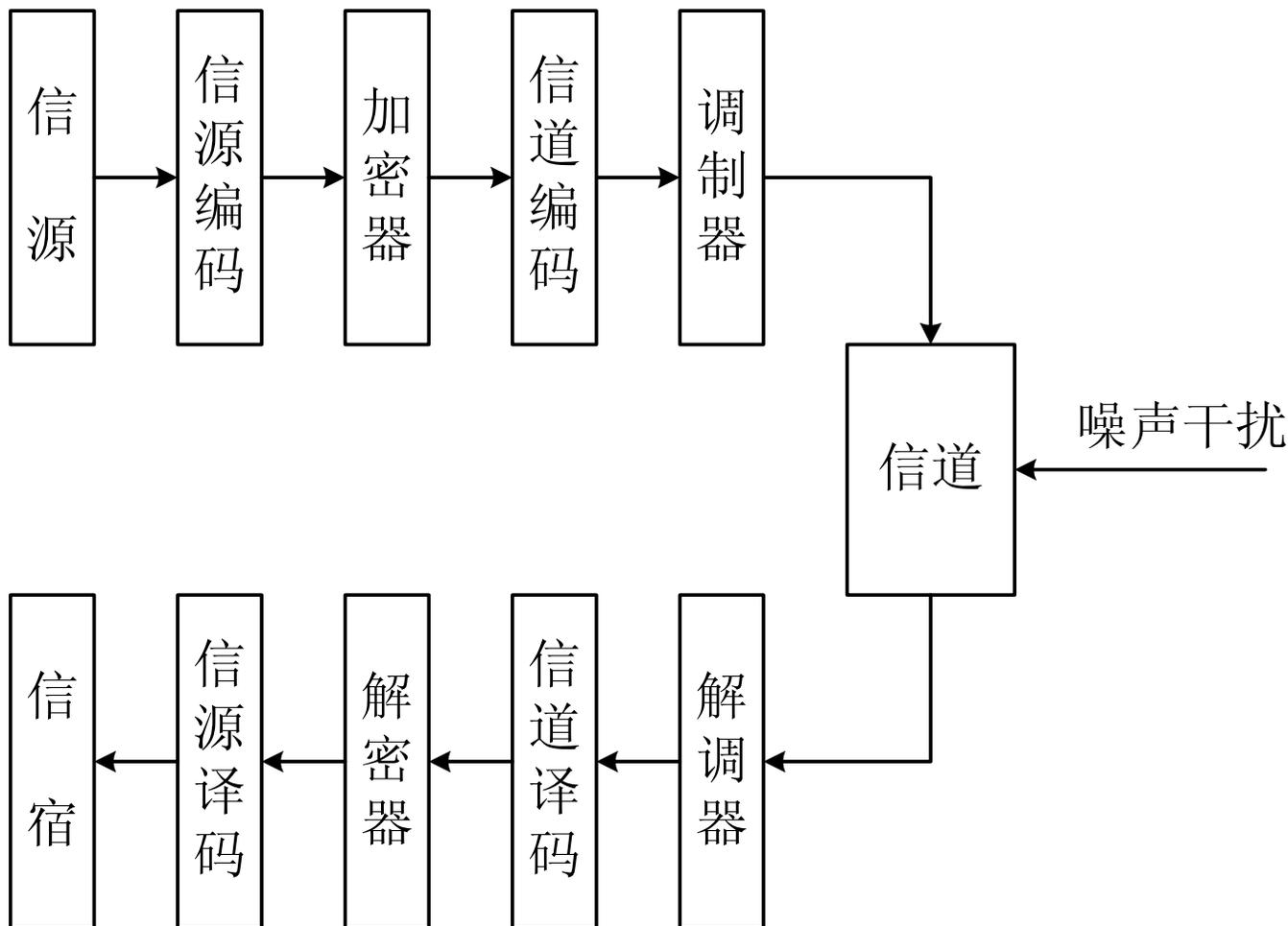
# 3. 通信系统的组成(3)

- 模拟通信系统模型



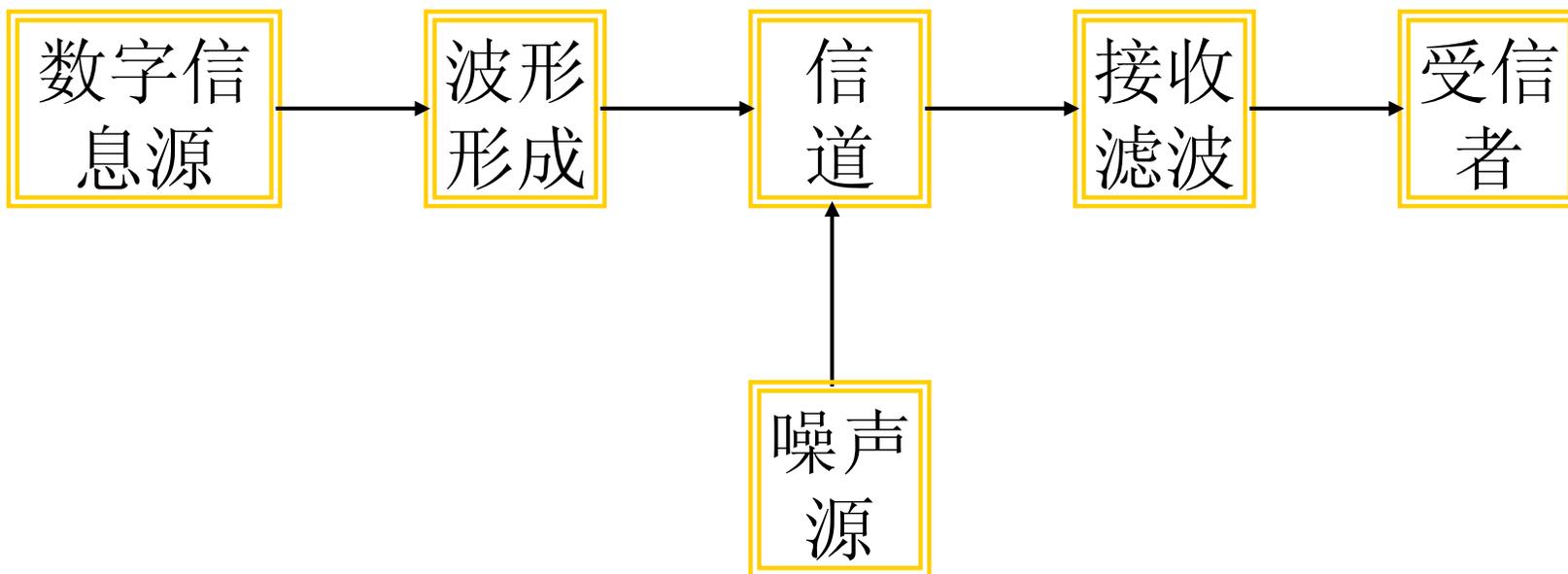
# 3. 通信系统的组成(4)

## ■ 数字通信系统模型



# 3. 通信系统的组成(5)

## ■ 基带数字通信系统模型

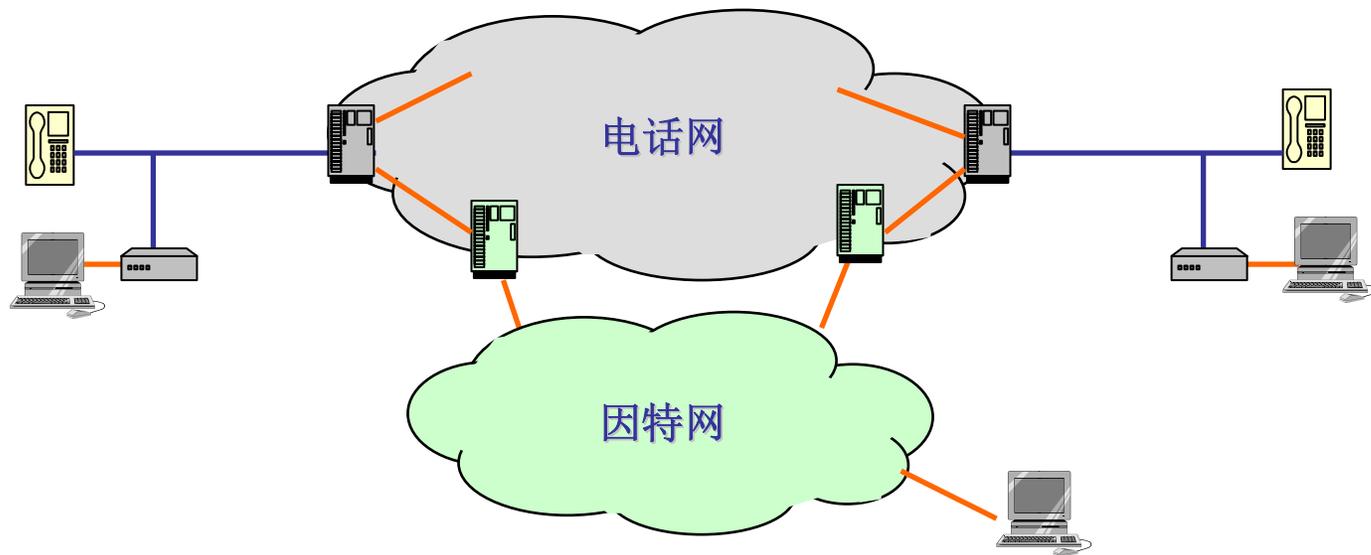


# 3. 通信系统的组成(5)

- 数字通信的优点：
  - 抗干扰能力强，可消除噪声积累；差错可控，传输性能好；
  - 便于处理和管理，便于传输和交换
  - 便于与各种数字终端接口，用现代计算技术对信号进行处理、加工、变换、存储，形成智能网；
  - 便于集成化，从而使通信设备微型化；
  - 便于加密处理，且保密程度高。
- 数字通信的缺点：
  - 频带利用率低：比模拟通信占据更宽的系统频带。  
一路模拟电话：**4KHz**，接近同样话音质量的一路数字电话：**20-60KHz**。
  - 对同步要求高，系统设备比较复杂。

# 3. 通信系统的组成(6)

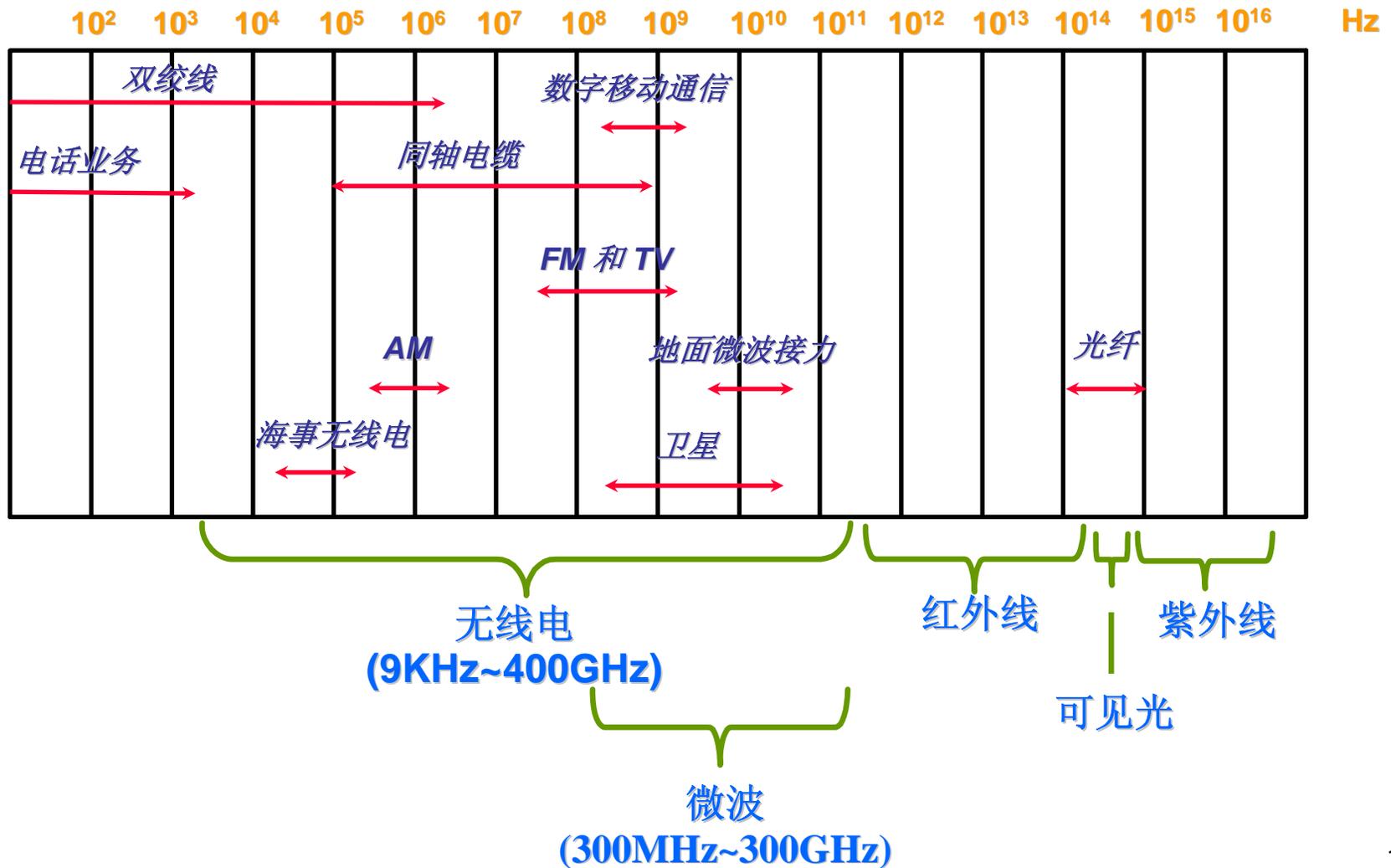
- 两种应用
  - 利用数字通信系统传送模拟消息
    - A/D, D/A变换, 例如电话
  - 利用模拟通信系统传送数字信号
    - 加装数字终端, 例如调制解调器



# 4.1 通信系统的分类(1)

- 根据信号特征
  - 模拟通信系统
  - 数字通信系统
- 根据消息的物理特征：电话、数据、电视等
- 根据调制方式
  - 基带传输：周期性脉冲序列作为载波
  - 频带传输：正弦型载波
- 根据传输媒介
  - 有线传输：双绞线、同轴电缆、光纤
  - 无线传输

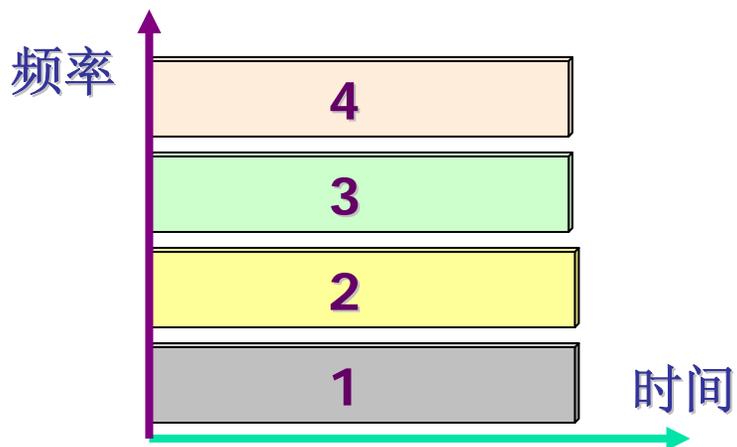
# 4.1 通信系统的分类(2)



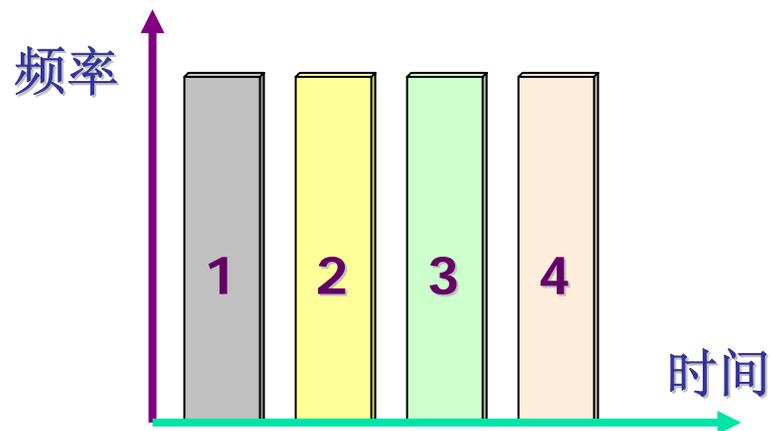
# 4.1 通信系统的分类(3)

## ■ 根据信号复用方式

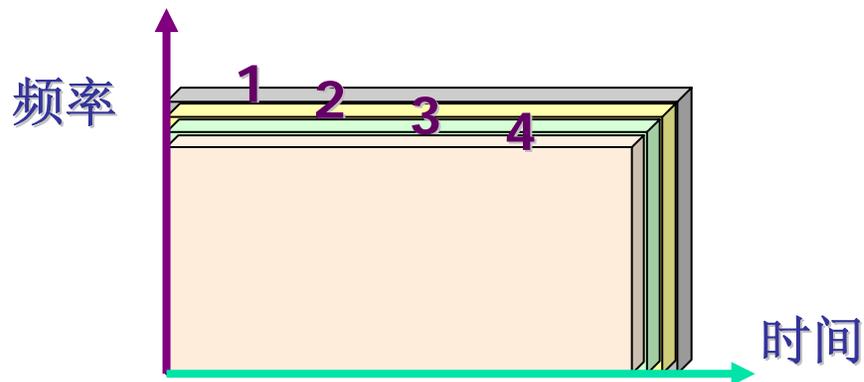
### ■ 频分复用(FDM)



### ■ 时分复用(TDM)

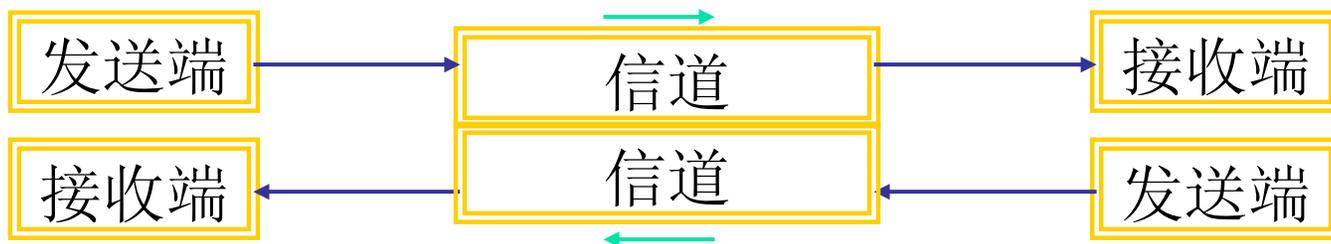
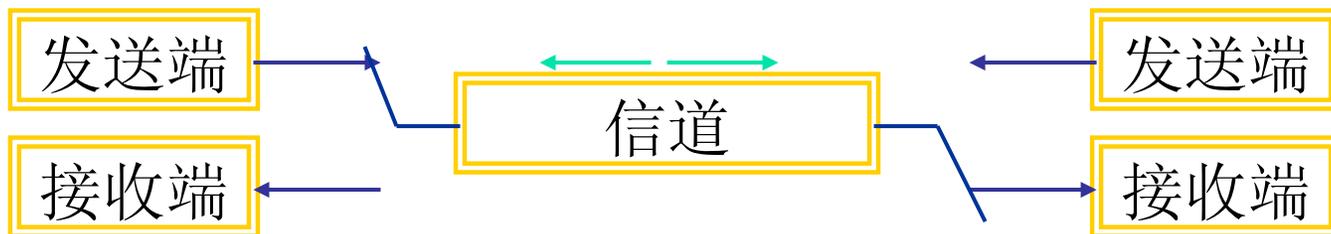


### ■ 码分复用(CDM)



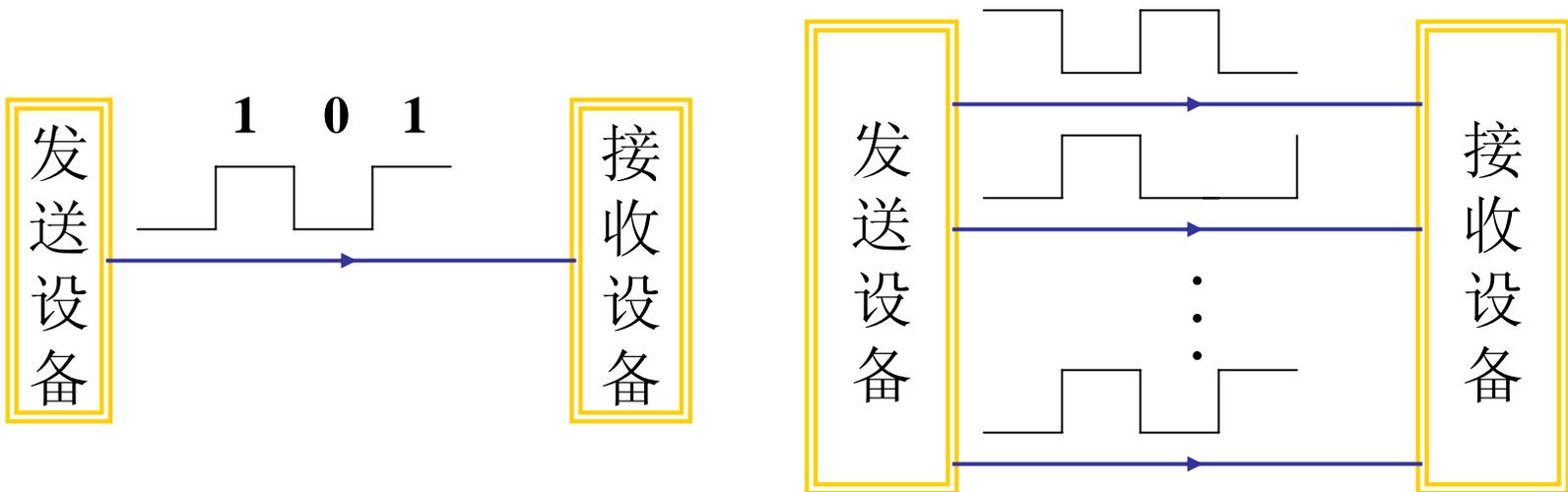
## 4.2 点到点的通信方式(1)

- 按消息传送方向与时间关系
  - 单工：遥测、遥控、寻呼
  - 半双工：无线电对讲机(同一载频)
  - 全双工通信：电话



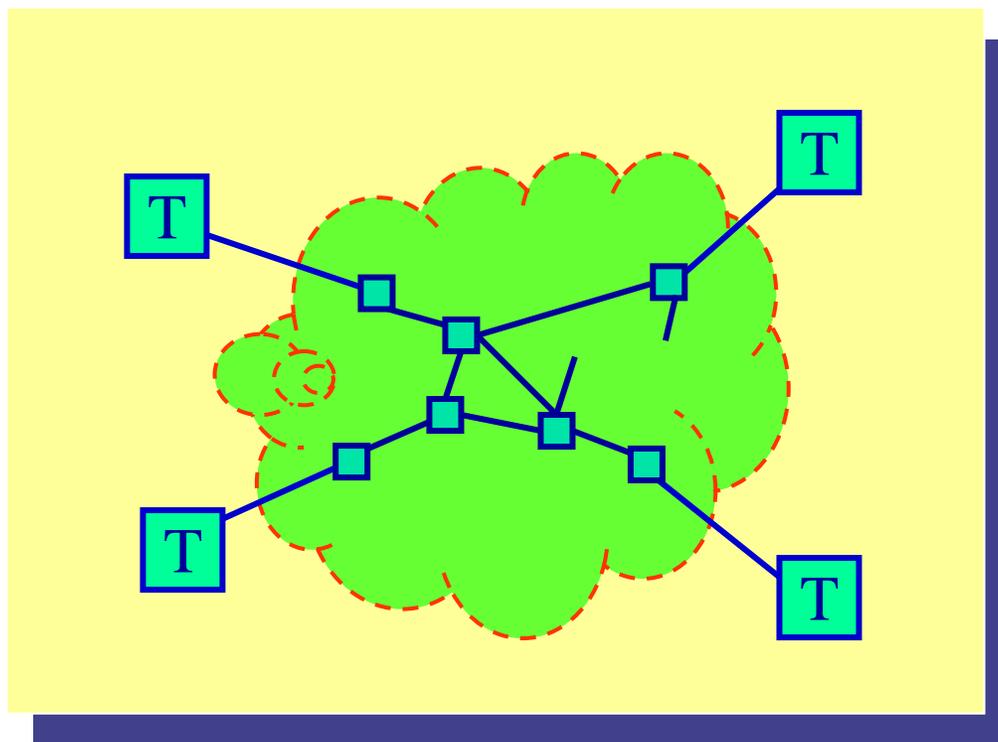
## 4.2 点到点的通信方式(2)

- 按数字信号的码元排列方法
  - 串行传输：远距离数字通信
  - 并行传输：近距离数字通信



## 4.3 实际通信系统

- 通信网和专线



# 5 信息及其度量(1)

- 信息：消息中包含的有意义的内容
- 信息的度量：信息量
  - 与消息的种类及重要程度无关
  - 事件的不确定程度越大，信息量越大
  - 消息  $x$  中所含信息量  $I$  与消息出现概率  $P(x)$ 
    - $I(x) = I[P(x)]$
    - $P(x) = 1, I = 0; P(x) = 0, I = \infty$
    - 若干互相独立事件构成的消息，所含信息量等于各独立事件信息量之和

$$I(x_1, x_2, \dots, x_n) = I(x_1) + I(x_2) + \dots + I(x_n)$$

## 5 信息及其度量(2)

- 信息量  $I$  的定义

$$I(x) = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x)$$

- $a=2$ : 比特(bit)  $\rightarrow P(x)=1/2$  时,  $I(x)=1\text{bit}$
- $a=e$ : 奈特(nit)
- $a=10$ : 哈特莱

$$I(x_1, x_2, \dots, x_n) = \log_a \frac{1}{P(x_1, x_2, \dots, x_n)}$$
$$= \log_a \frac{1}{P(x_1)P(x_2)\cdots P(x_n)} = -\sum_{i=1}^n \log_a P(x_i) = \sum_{i=1}^n I(x_i)$$

# 5 信息及其度量(3)

## ■ 离散消息的度量

设离散信息源是一个由 $n$ 个符号组成的符号集, 且

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ P(x_1) & P(x_2) & \dots & P(x_n) \end{bmatrix}, \text{ 且 } \sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

- 各符号  $x_1 x_2 \dots x_n$  所包含的信息量分别为

$$-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_n)$$

- 每个符号所含信息量的统计平均值(平均信息量)为

$$\begin{aligned} H(x) &= E[I(x)] = P(x_1)[- \log_2 P(x_1)] + \\ &\quad P(x_2)[- \log_2 P(x_2)] + \dots P(x_n)[- \log_2 P(x_n)] \\ &= \sum_{i=1}^n P(x_i)[- \log_2 P(x_i)] \text{ (bit / 符号)} \end{aligned}$$

信息源的熵

## 5 信息及其度量(4)

- 信息源的最大熵，发生在每一个符号等概率出现时  
如果各符号 $x_1 x_2 \dots x_n$ 等概出现，即 $P(x_i)=1/n$ ，则有

$$I(x_1) = I(x_2) \dots = H(x) = -\log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \text{ (bit / 符号)}$$

例如 $n = 2^k$ ， $H(x) = \log_2 2^k = k \text{ (bit / 符号)}$

- 用平均信息量计算消息的信息量

若消息传送的符号总数为 $m$ ，则  $I = m H(x) \text{ (bit)}$

例信息源由独立等概的符号0, 1组成， $n = 2$

$$H(x) = \log_2 n = 1 \text{ bit/符号}$$

此时符号数与比特数相等。

## 5 信息及其度量(5)

例1.4.1 一信息源由四个符号0, 1, 2, 3组成, 它们出现的概率分别为 $\frac{3}{8}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$ , 且每个符号的出现都是独立的。试求某个消息201020130.....(57个符号: 0~23, 1~14, 2~13, 3~7)的信息量。

■ 方法一: 
$$I = -23 \log_2 \frac{3}{8} - 14 \log_2 \frac{1}{4} - 13 \log_2 \frac{1}{4} - 7 \log_2 \frac{1}{8}$$
$$= 108(\text{bit})$$

$$\bar{I} = \frac{108}{57} = 1.89(\text{bit / 符号})$$

■ 方法二: 
$$H = -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8}$$
$$= 1.906(\text{bit / 符号})$$

$$I = 57 * H = 108.64(\text{bit})$$

# 5 信息及其度量(6)

## ■ 连续消息的度量

- 连续信源的熵是一个相对熵(比 $\infty$ 多出的相对量), 而离散信源的熵是一个绝对熵

$$H_1(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log_a p(x) dx,$$

其中  $p(x) \sim$  连续消息出现的概率密度函数

- 连续信源的熵不具有非负性

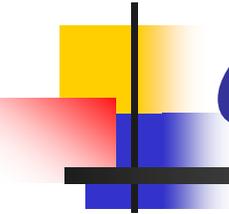
$$\text{例. } p(x) = \begin{cases} 1/(b-a), & a < x < b \\ 0, & x > b \text{ 或 } x < a \end{cases}, \quad \text{则}$$

$$H_1(x) = -\int_a^b \frac{1}{b-a} \log \frac{1}{b-a} dx = \log(b-a)$$

若  $b-a < 1$ , 则  $H_1(x) < 0$

# 6. 主要性能指标(1)

- 有效性：系统传输消息的效率/通信资源(频率、时间)的充分利用，在给定的信道内能够容纳多大的信息量，或允许传输多高的信息率
- 可靠性：信息传输的准确程度，传送消息的准确还原
- 根据信息论观点，通信系统的有效性和可靠性常常是一对矛盾。也就是说有效性很高的通信系统往往带来可靠性不足的缺点；或者是保证了很高的可靠性，但导致有效性的降低。可靠性是矛盾的主要方面，即发送消息在接收端的准确还原。
- 形成矛盾的根本原因：信道不理想
  - 噪声和干扰
  - 带宽、时间受限

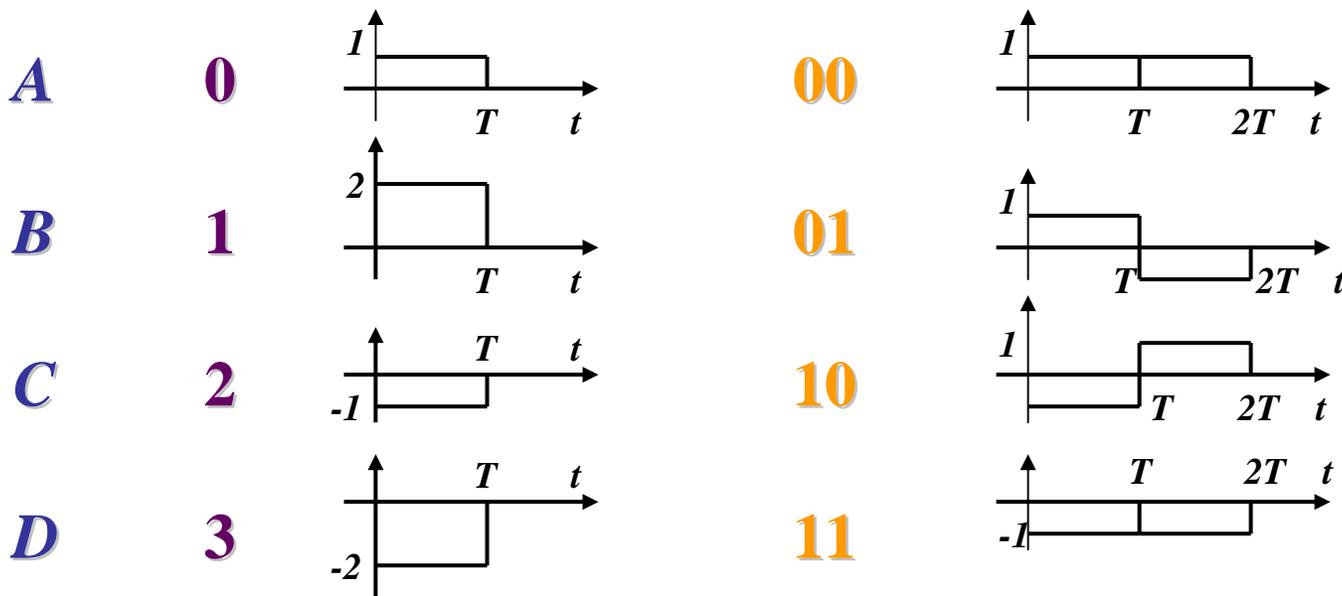


## 6. 主要性能指标(2)

- 模拟通信系统的性能指标
  - 有效性：用所传信号的有效传输带宽来表征
  - 可靠性：均方误差
    - 输出信噪比(仅考虑加性干扰)：接收端输出的信号平均功率与噪声平均功率之比(SNR)
      - 电话：SNR > 40dB, 话音清晰度 > 95%
      - 电视：SNR = 40~60dB

# 6. 主要性能指标(3)

- 离散数字信号的表示
  - 离散信源的  $N = 2^k$  种可能状态可以用  $k$  位二进制数字或一位  $N$  进制数字表示
  - 用时间间隔相同的信号来表示一位二进制或  $N$  进制数字
    - 这个固定的时间间隔长度称为符号/码元长度
    - 时间间隔内的信号称为符号/码元(二进制或  $N$  进制)



## 6. 主要性能指标(4)

- 数字通信系统的性能指标：传输速率和差错率
  - 符号(码元)传输速率 $R_s$ ：每秒钟传送的符号数量，单位为“波特”(baud或B)，又称传码率
  - 信息传输速率 $R_b$ ：每秒钟传送的信息速率，单位为“比特/秒”(bit/s)，又称传信率
  - 符号速率与信息速率之间的关系：若每个符号有  $N$  种可能状态(或称 $N$ 进制符号)，则有

$$R_b = R_s \log_2 N \text{ (bit/s)}$$

$$R_s = R_b / \log_2 N \text{ (baud)}$$

- 频带利用率 $\eta$ ：传输速率与系统带宽之比，单位为bit/s/Hz或Baud/Hz

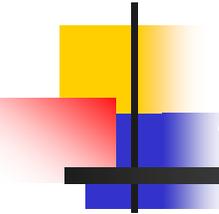
## 6. 主要性能指标(5)

- 误符号率(误码率)：符号在传输系统中被传错的概率

$$P_s = \frac{\text{错误符号数}}{\text{传输总符号数}}$$

- 误比特率(误信率)：符号信息量在传输系统中被丢失的概率

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}}$$



# 思考题和作业

- 什么是通信？通信的目的是什么？如何进行通信？
- 通信系统的组成以及分类？
- 什么是模拟通信系统、数字通信系统？并比较它们的异同。
- 什么是信息、消息和信号？信息的度量？
- 衡量通信系统优劣的指标有哪些？
- 作业：1-1, 1-2, 1-4, 1-5, 1-8, 1-9