

# 通信原理

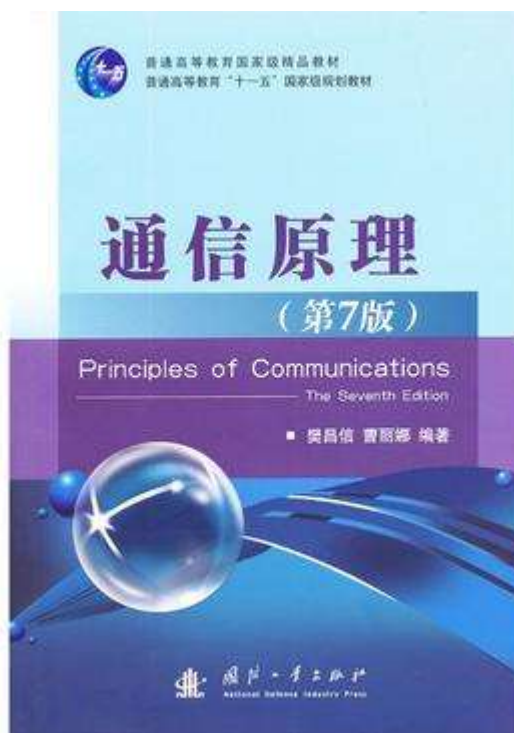
主讲教师: 徐洪梅

地 址: 信息学院南楼B209

邮 箱: [tinaxu@ouc.edu.cn](mailto:tinaxu@ouc.edu.cn)



## 选用教材



- 《通信原理》(第7版)
- 国防工业出版社
- 樊昌信等编著

- 先修课程: 电子技术、信号与系统



## 教学目标

- **【教学目标】** 使学生掌握现代通信系统的基本原理、基本性能和基本分析方法。
- **【教学重点】** 掌握通信基础知识；掌握数字通信、模拟信号数字化及数字信号最佳接收的基本原理；掌握数字通信中的同步和编码等技术
- **【教学要求】** 获得分析、研究通信系统的基本技能和方法；培养学生解决通信系统方面实际问题的能力和综合实践能力，并为今后学习《移动通信》、《数字通信》和《综合业务数字网》等课程以及从事无线电、通信方面的工作打好基础。

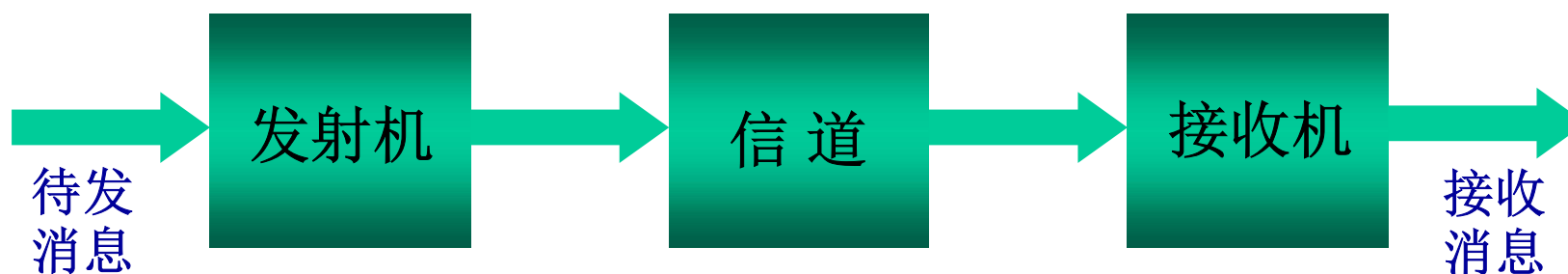


# 第1章 绪论

- 1.1 通信的定义
- 1.2 通信系统的组成
- 1.3 通信系统分类及通信方式
- 1.4 信息及其度量
- 1.5 通信系统的主要性能指标
- 1.6 信道容量



## 1.1 通信的定义



**通信的定义：**是消息从发信者传输到收信者的过程（有效传递）。

**通信的目的：**传递消息。

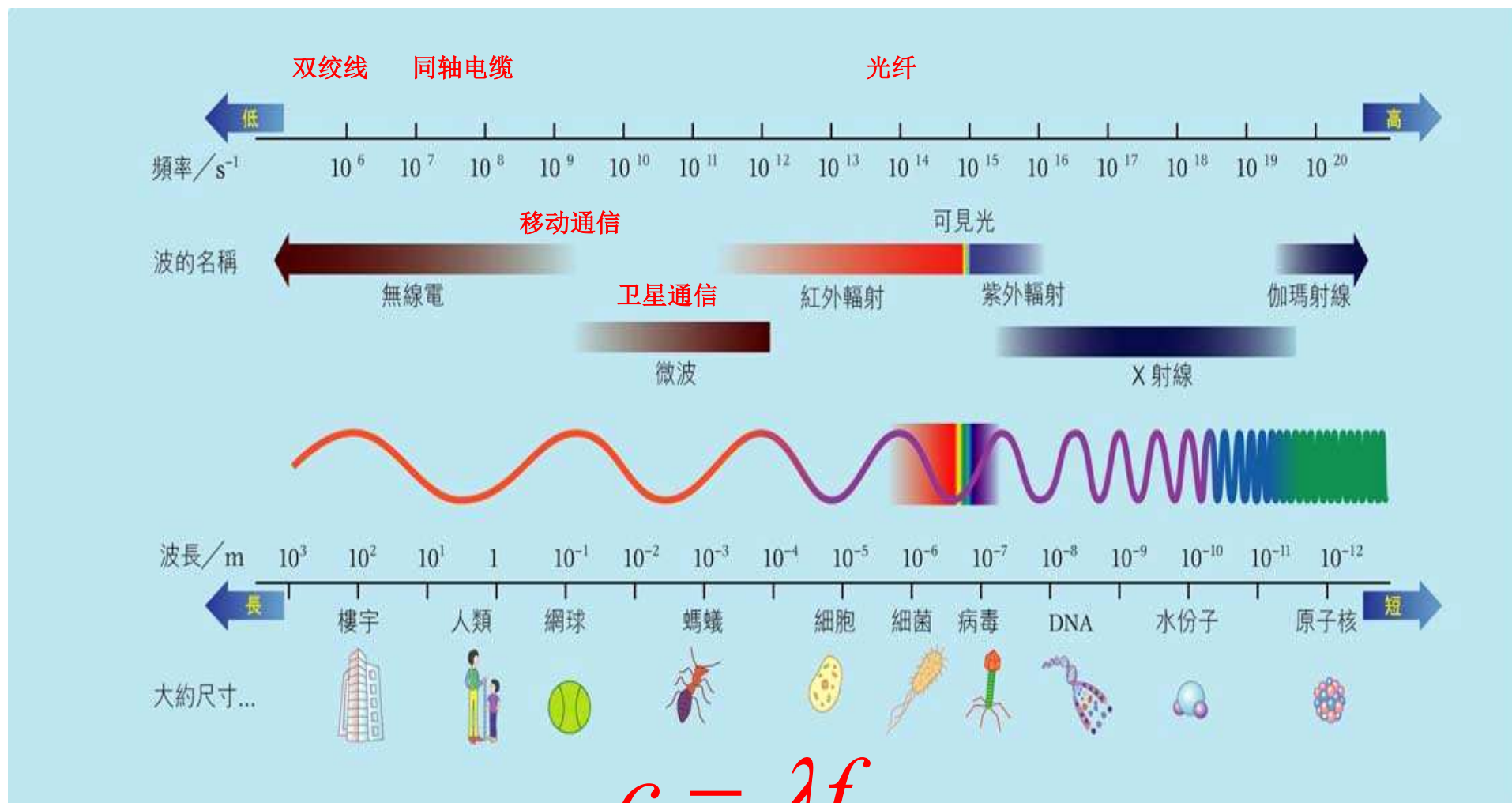


## 现代通信的定义

- 电通信：利用电子等技术手段，借助电（光）信号实现消息的有效传递与交换。
- 包括：
  - ✓ 狭义：电报、电话、传真、可视电话
  - ✓ 广义：广播、电视、雷达、遥控、遥测



# 电磁波波谱图



$$c = \lambda f$$

通信原理



## 几个基本概念

- 消息：用以载荷信息的有次序的符号序列或连续时间函数。
- 信息：消息中包含的有意义的内容，对消息的统计特性的定量描述。
- 信号：与消息一一对应的电量，是消息的物质载体。





## 1.2 通信系统的组成

### 1.2.1 通信系统的一般模型

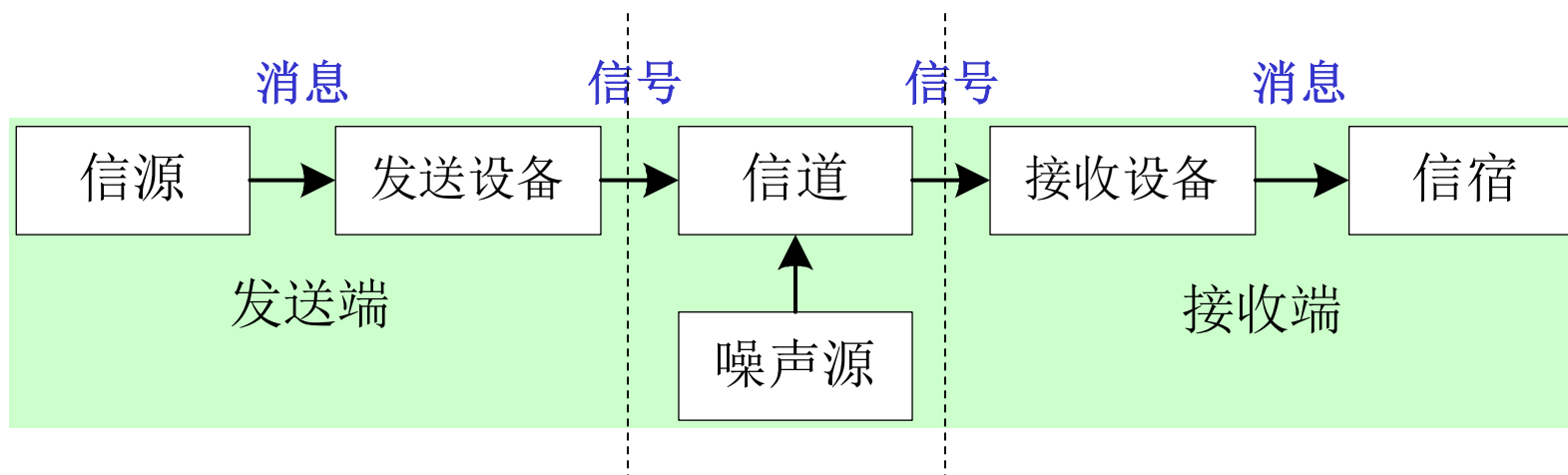


图1-1 通信系统的一般模型



## 1.2.2 模拟通信系统

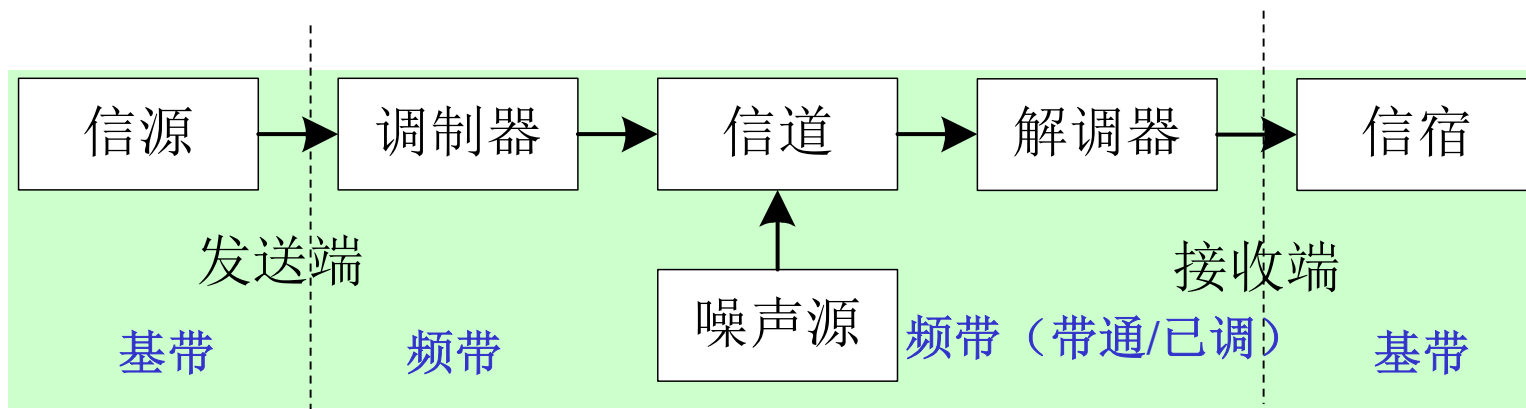


图1-2 模拟通信系统的模型

模拟通信系统中两种重要变换：

- (1) 连续消息到电信号相互变换；
- (2) 基带信号到调制信号的变换；



## 调制的定义

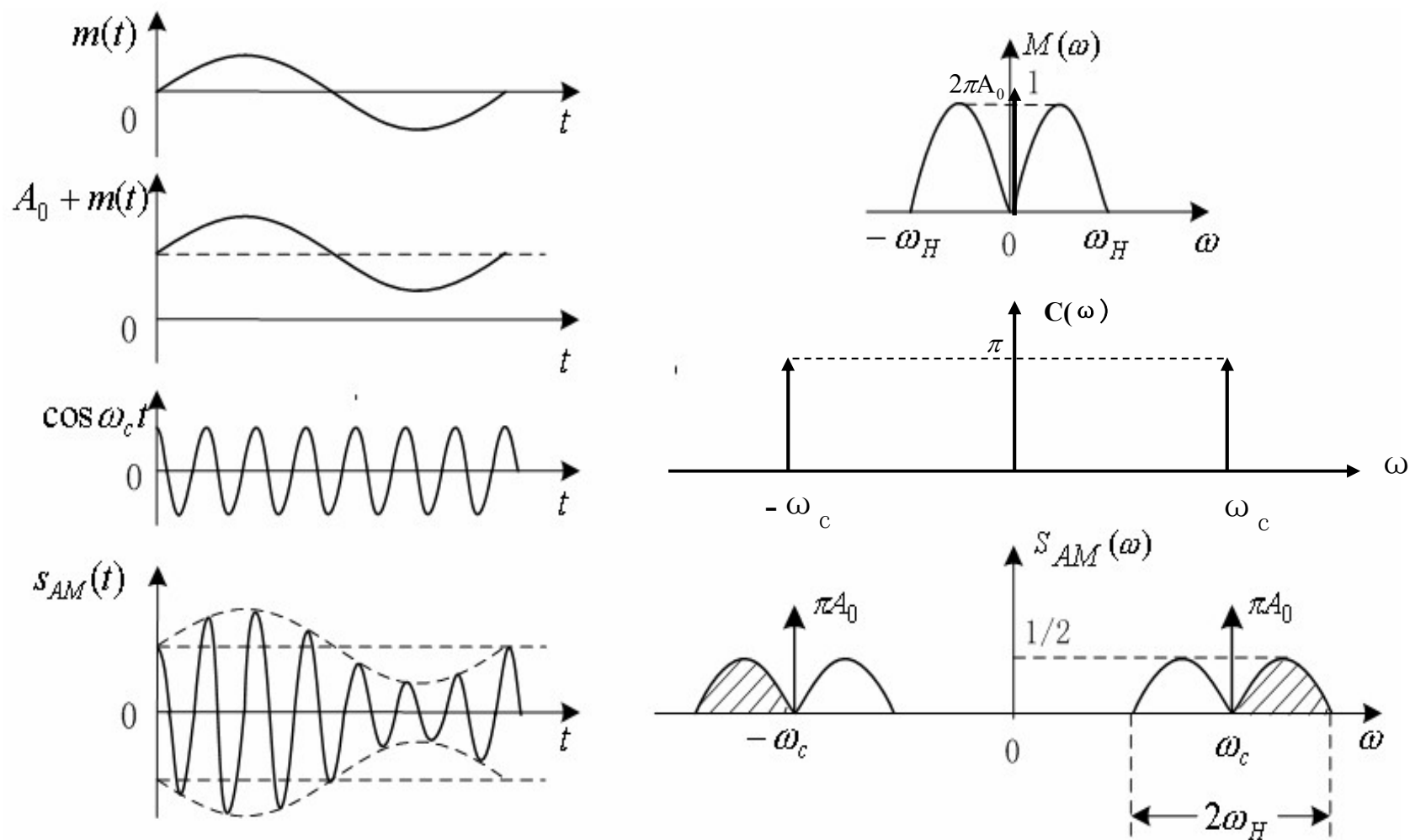
$$A\cos(\omega t + \varphi)$$

- 定义：用待传输的原始信号控制载波的某一个（或某几个）参数，使其按信号的规律而变化的过程。
- 目的：
  - ✓ 提高频率以便于辐射（无线通信）；
  - ✓ 实现信道复用；
  - ✓ 改善系统性能；  $B \leftrightarrow S/N$
  - ✓ 改善信号占据的带宽

基带与频带的概念！



# 调制的过程



通信原理



## 调制的分类

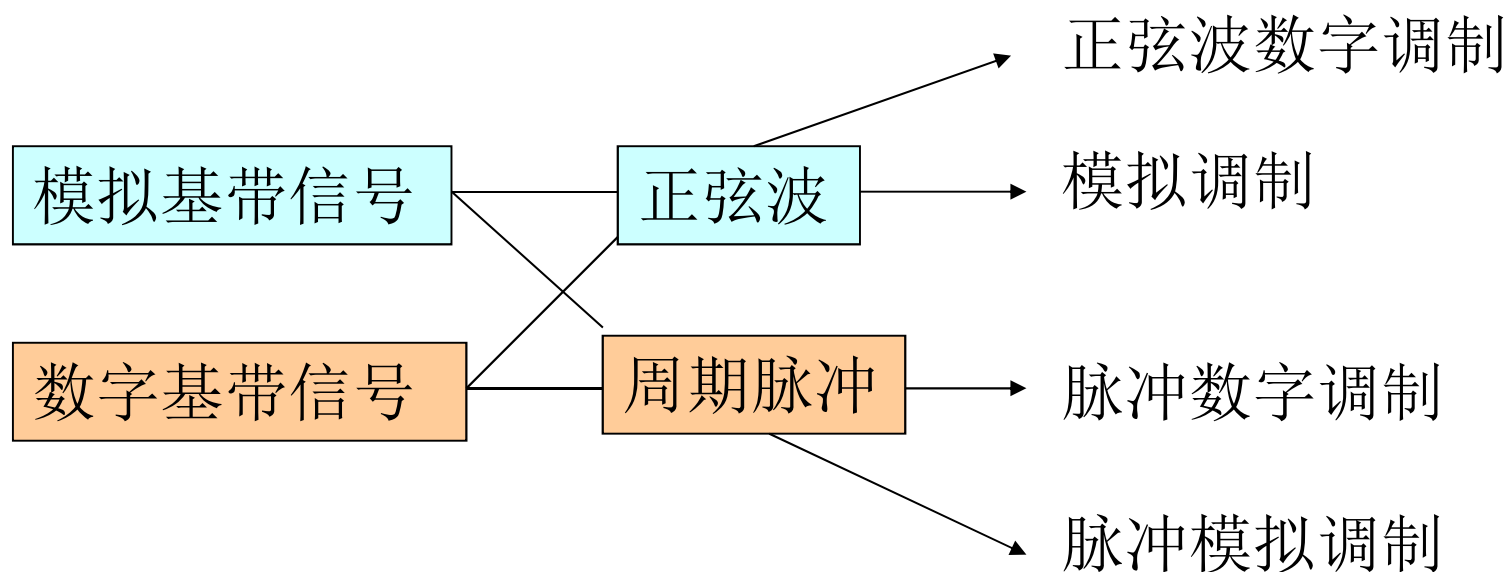




表 1-1 常见的调制方式

调制方式			用途
连续波调制	线性调制	标准调幅AM	广播
		抑制载波双边带调幅DSB	立体声广播
		单边带调幅SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅VSB	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制FM	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制PM	中间调制方式
	数字调制	幅度键控ASK	数据传输
		频率键控FSK	数据传输



调制方式			用途
	数字调制	相位键控PSK、DPSK、QPSK等	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM、MSK等	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制PDM(PWM)	中间调制方式
		脉位调制PPM	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 $\Delta M$	军用、民用电话
		差分脉码调制DPCM	电视电话、图像编码
		其他语言编码方式 ADPCM、APC、LPC	中低速数字电话
		通信原理	



## 1.2.3 数字通信系统

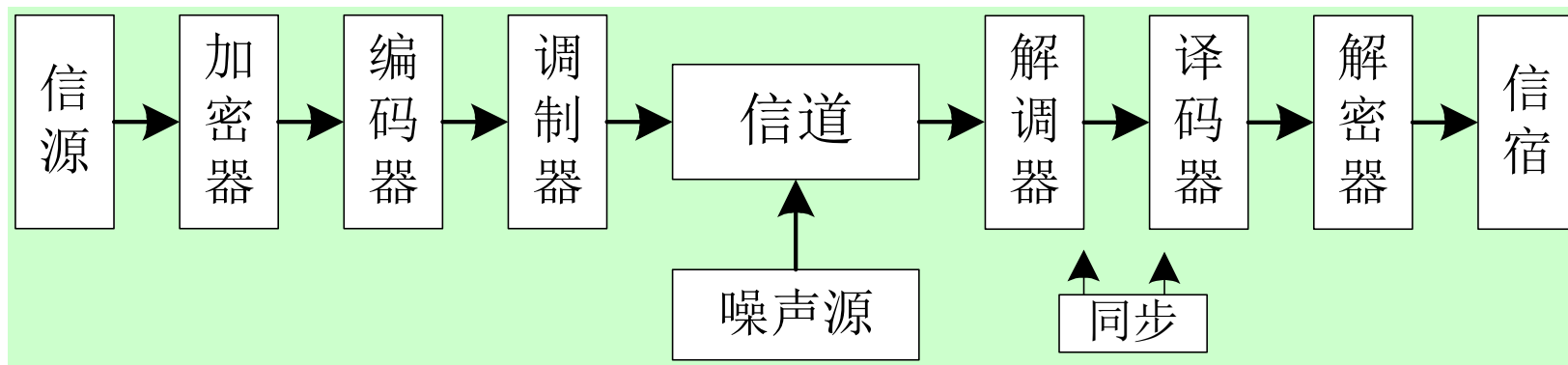
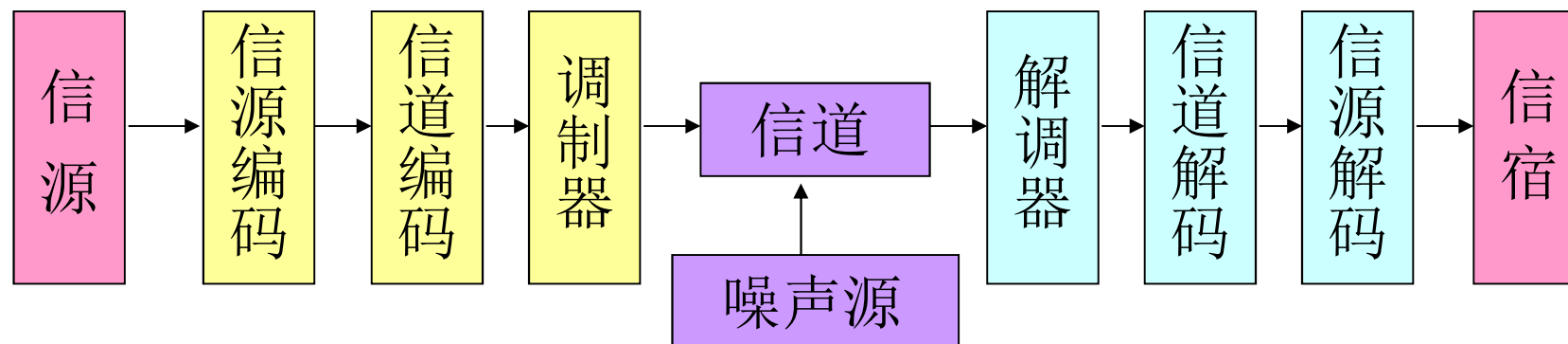


图1-3 数字频带传输通信系统的模型







## 数字基带传输系统

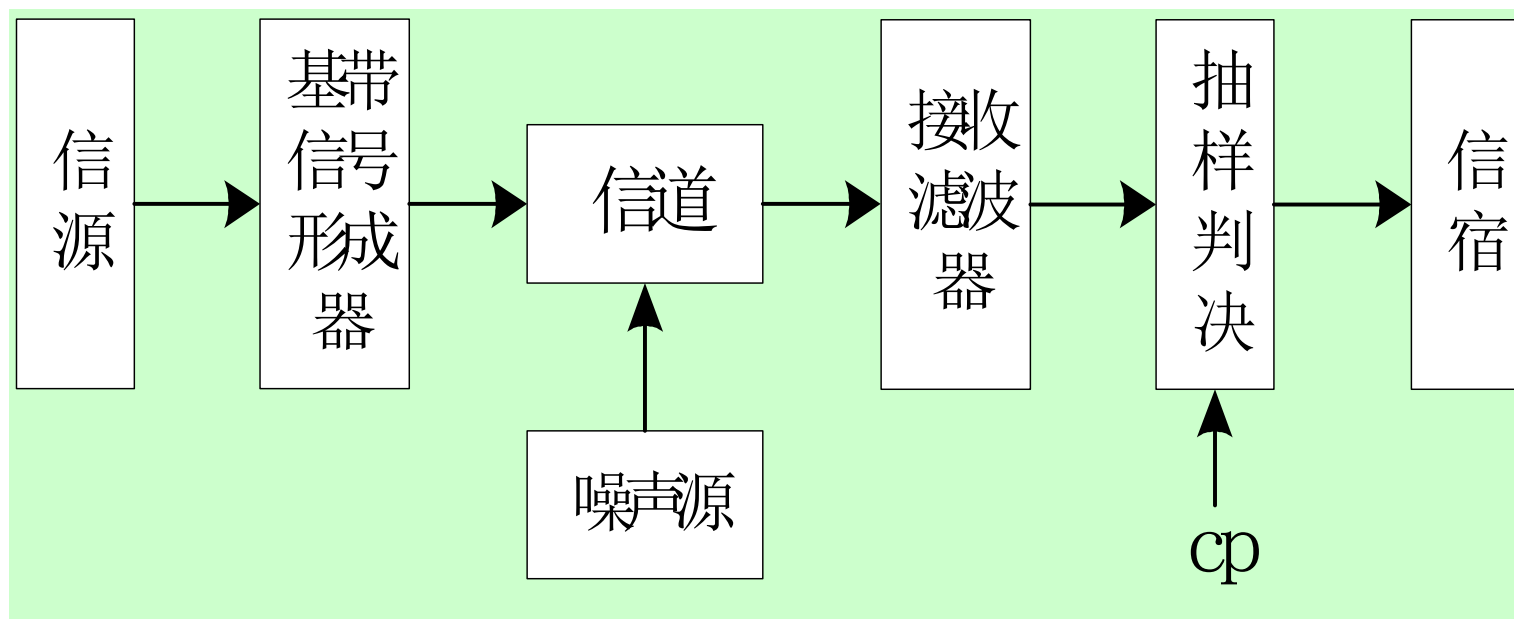


图1-4 数字基带传输系统模型



## 数字通信的主要特点

### ➤ 优势:

- ✓ 抗干扰能力强（中继再生，消除噪声累积）
- ✓ 可实现差错控制编码即信道编码；
- ✓ 易实现保密通信；
- ✓ 便于与数字终端接口，利用计算机进行DSP。

### ➤ 存在的问题:

- ✓ 占用更宽的频带资源；
- ✓ 接收端与发送端必须“同步”，设备复杂。



## 思考

### ➤ 生活中的通信系统的类型

✓ PSTN

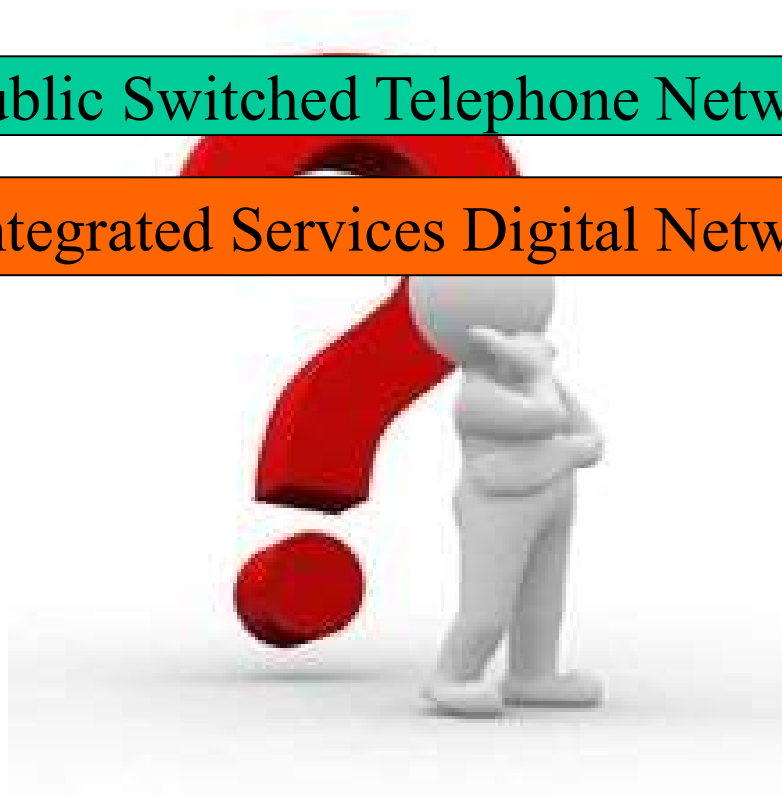
PSTN: Public Switched Telephone Network

✓ ISDN

ISDN: Integrated Services Digital Network

✓ CATV

✓ 计算机通信





## 1.3 通信系统分类及通信方式

### ➤ 通信的分类

- ✓ 按信号的特征分：模拟通信系统与数字通信系统；
- ✓ 按调制方式分：基带传输和频带传输（见表1-1）；
- ✓ 按传输媒质分：有线通信和无线通信；
- ✓ 按信号复用方式分：频分复用、时分复用、码分复用；
- ✓ 按工作频段分：长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等。
- ✓ 按业务类型分：电报通信、电话通信、数据通信和图像通信等；
- ✓ 其他分类方式：光纤通信、卫星通信、移动通信、计算机通信



## 四大新兴通信系统

- 光纤通信
- 卫星通信
- 移动通信
- 网络通信



通信原理



## 光纤通信

- 以光波为载频，以光纤为传输媒质的通信方式
- 高带宽、低损耗、通信容量大
- 密集波分复用（DWDM）、光放大器、相干光通信、光孤子通信等新技术



## 卫星通信

- 利用人造地球卫星作为中继站转发无线电波的通信方式
- 属于宇宙无线电通信形式，也是微波中继通信的一种
- 卫星高度35800km，中继距离18000km，三颗卫星便可覆盖全球范围
- 覆盖区域大，通信距离远，适于远距离通信



## 移动通信

- 通信双方至少有一方是在运动中进行信息交换的通信方式。
- 移动通信的特点：
  - ✓ 无线电波传播模式的复杂性
  - ✓ 移动台工作环境恶劣，干扰严重
- 起源于海上救难，经历了三代的发展：
  - ✓ 第一代： 模拟移动通信系统
  - ✓ 第二代： 数字移动通信系统
  - ✓ 第三代： 3G系统





# 网络通信

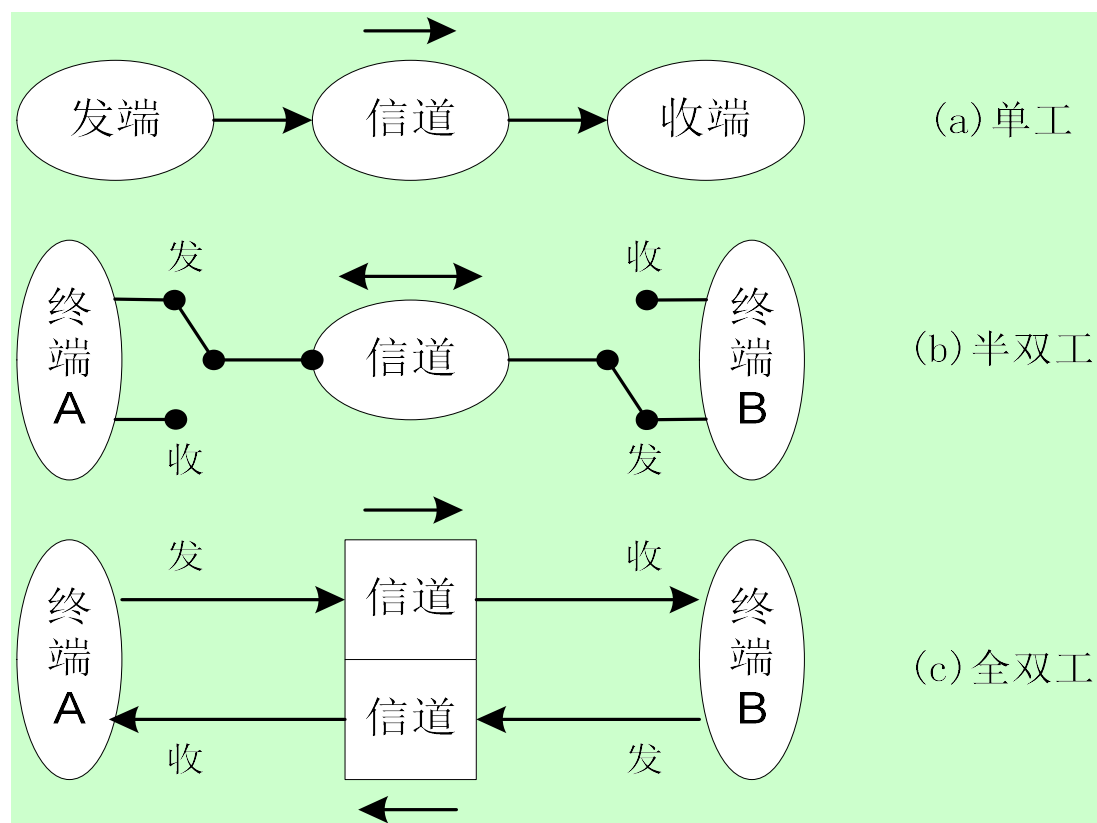
- 是指通过计算机和网络通讯设备对图形和文字等形式的资料进行采集、存储、处理和传输等,使信息资源达到充分共享的技术。
- 特点:
  - ✓ 多媒体传输
  - ✓ 分组交换和电路交换
  - ✓ 网络传输协议



## 通信方式

### ➤ 按消息传送的方向与时间分

单工通信、半双工通信及全双工通信三种。

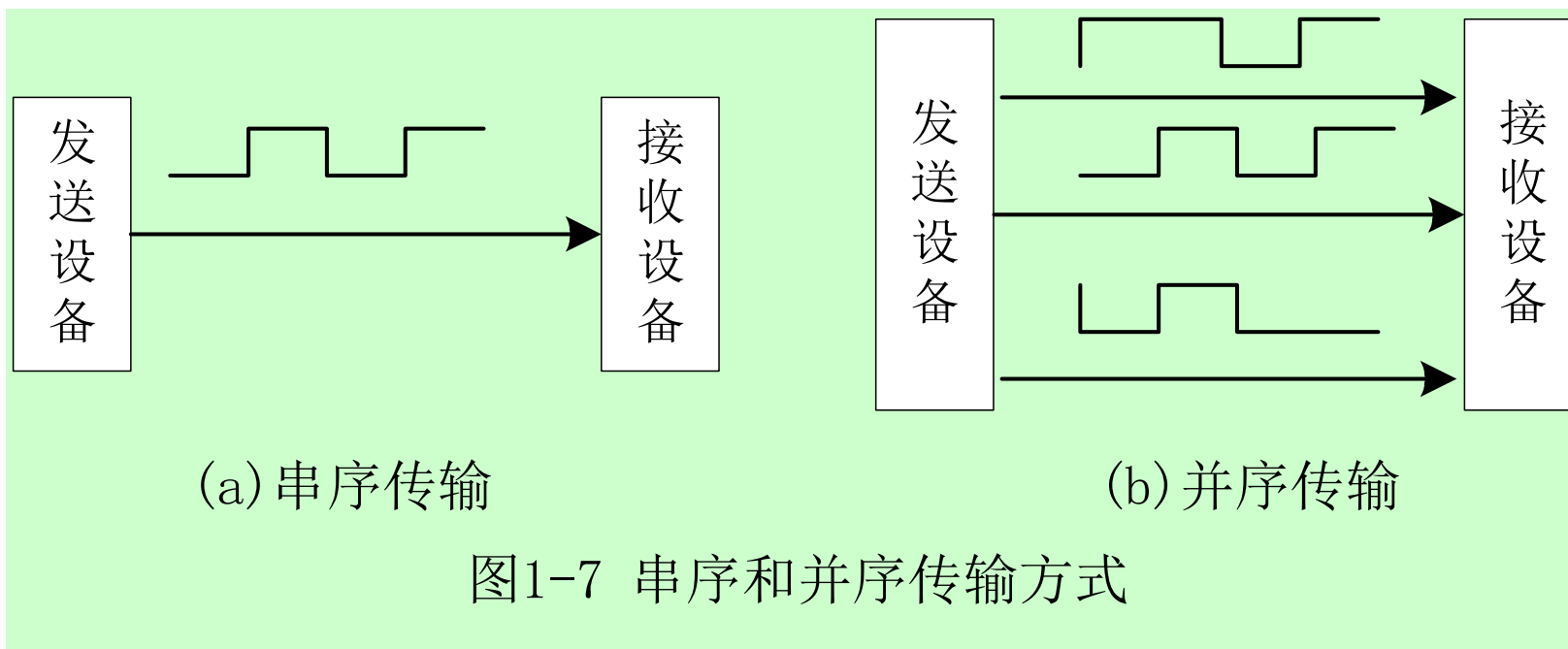


通信原理



## ➤ 按数字信号排序分

可将通信方式分为串序传输和并序传输。





## ➤ 按通信网络形式分

可分为三种：两点间直通方式、分支方式和交换方式。

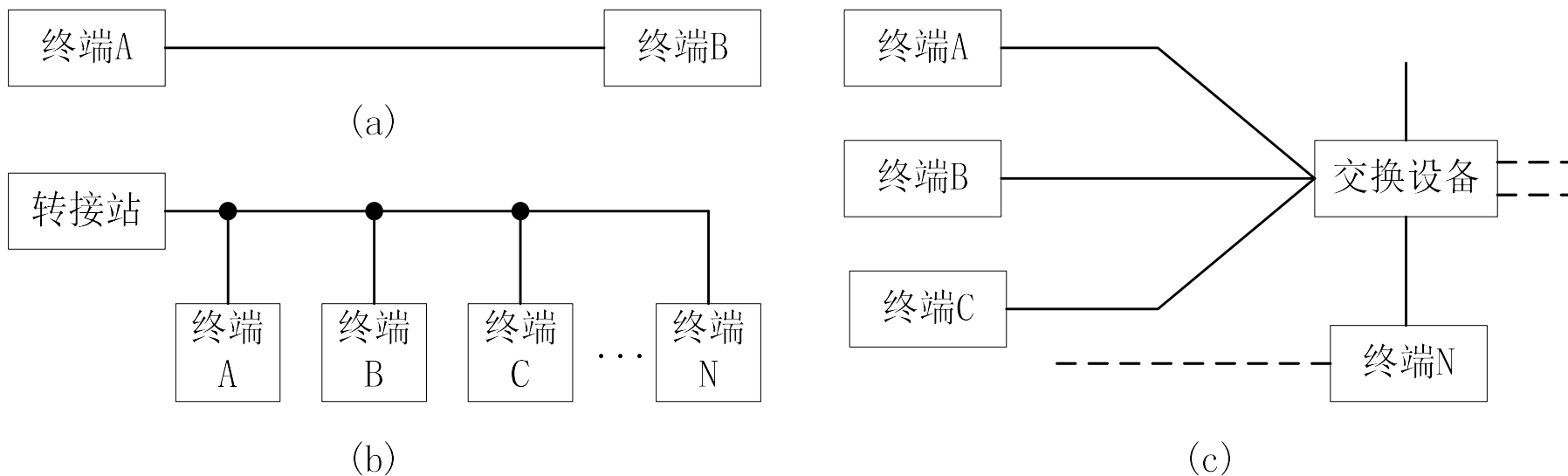


图1-8 按网络形式划分的通信方式

(a) 两点间直通方式； (b) 分支方式； (c) 交换方式



# 通信发展简史

- 1844年, Morse在华盛顿与巴尔的摩之间发送世界上第一份电报;
- 1864年, Maxwell提出电磁辐射方程(无线通信的基础);
- 1876年, Bell发明电话并获得专利;
- 1896年, Marconi发明无线电报;
- 1918年, AM广播; 超外差接收机问世;
- 1936年, BBC开始电视广播;
- 1948年, Shannon提出信息论, 标志近代通信的开始;
- 1962年, 第一颗同步通信卫星; PCM进入实用;
- 1960~1970年, 彩色电视机、电子计算机问世;
- 1970~1980年, VLSI、程控数字交换机、光纤通信、微处理器;
- 1989年, Motorola引入便携式蜂窝移动电话;
- 1990年至今, 宽带交换网、数字移动通信、公用数据网飞速发展



综合化  
宽带化  
自动化  
智能化



## 现代通信技术的发展方向

### ➤ 个人通信(PC)

通信到终端→通信到个人

五个w: Whoever

Whenever

Wherever

Whomever

Whatever



## 个人通信是新的挑战

- “任何人” 要求支持巨大用户量：频谱资源有限；
- “任何时间” 要求支持动中通：无线通信是前提；
- “任何地方” 要求无缝覆盖：传输能力有限；
- “任何形式” 要求多媒体：处理能力有限。



## 1.4 信息及其度量

- 信息：消息中包含的有意义的内容。
- 信息量：与消息出现的概率有关，具体可描述为：
  - ✓ 消息中所含信息量是消息出现概率的函数；  $I = I[P(x)]$
  - ✓ 消息出现的概率愈小，它所含信息量愈大；反之亦然

$$P(x) = 1, I = 0; \quad P(x) = 0, I = \infty$$

- ✓ 若干个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的和。  $I[P(x_1)P(x_2)\cdots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \cdots$





信息量  $I$  和消息出现概率  $P(x)$  的关系为:

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

信息量的单位取决于对数底数  $a$  的取值:

$a = 2$  单位为比特 (bit, 简写为b) ;

$a = e$  单位为奈特 (nat, 简写为n) ;

$a = 10$  单位为哈特莱。



**[例1.1]** 设二进制离散信源，数字0或1以相等的概率出现，试计算每个符号的信息量。

解：二进制等概率时

有 
$$P(1) = P(0) = \frac{1}{2} = 0.5$$

$$I(1) = I(0) = -\log_2 0.5 = 1\text{bit}$$

即二进制等概时，每个符号的信息量相等，为**1bit**。



## 信息量的计算及熵

➤ 消息等概率出现时

设有M个消息,  $P_1(x) = P_2(x) = \cdots = P_M(x) = P$

$$\text{则} \sum_{i=1}^M P_i(x) = 1, \quad P = \frac{1}{M}$$

每一消息的信息量:  $I_i = \log_2 1/P = \log_2 M (bit)$

事件的总信息量:  $I = MI_i = M \log_2 M (bit)$

事件的平均信息量:  $\bar{I} = \log_2 M (bit / \text{符号})$



## 信息量的计算及熵

➤ 当各个符号出现的概率不相等时

设各符号出现的概率为：

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

则每个符号的信息量为：

$$-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \cdots -\log_2 P(x_n) \text{ bit}$$



则平均信息量（信息源的熵）为：

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



## 最大熵的概念

➤ 当各符号等概率出现时，熵最大

$$H_{\max} = \log_2 M (\text{bit} / \text{符号})$$



**[例1.2]**一离散信源由0, 1, 2, 3四个符号组成, 它们出现的概率分别为 $3/8, 1/4, 1/4, 1/8$ , 且每个符号的出现都是独立的。试求某消息201020130213001203210100321010023102002010312032100120210的信息量。

**解法一:**

此消息中, 0出现23次, 1出现14次, 2出现13次, 3出现7次, 共有57个符号, 故该消息的信息量为

$$I = 23 \log_2 \frac{8}{3} + 14 \log_2 4 + 13 \log_2 4 + 7 \log_2 8 = 108(\text{bit})$$

每个符号的算术平均信息量为

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



## 解法二：

若用熵的概念来计算，得

$$\begin{aligned} H &= -\frac{3}{8}\log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4}\log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4}\log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8}\log_2 \frac{1}{8} \\ &= 1.906(\text{bit} / \text{符号}) \end{aligned}$$

则消息的信息量为

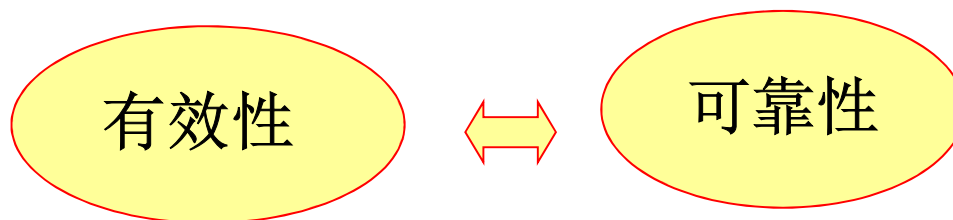
$$I = 57 \times 1.906 = 108.64(\text{bit})$$





## 通信系统的主要性能指标

- 有效性—传输速率
- 可靠性—准确性
- 安全性
- 标准性
- 适应性
- 经济性





## 通信系统的有效性

### ➤ 模拟通信系统的有效性

✓ 带宽

### ➤ 数字通信系统的有效性

✓ 传输速率

- 码元传输速率
- 信息传输速率
- 频带利用率



## 码元传输速率：传码率

定义：单位时间内传输码元的数目；

单位：波特（**Baud**），用符号“**B**”表示；

符号： $R_B = 1/T_b$   $T_b$ 为码元宽度。



## 信息传输速率：传信率

定义：单位时间内传输的信息量；

单位：比特/秒(**bit/s**)，简记为**b/s**或**bps**；

符号： $R_b$ ，它与N有关。



## $R_B$ 与 $R_b$ 之间的互换

- 它们之间在数值上有如下关系：

$$R_{bN} = R_{BN} \cdot \log_2 N$$

$$R_{BN} = \frac{R_{bN}}{\log_2 N}$$



## 频带利用率

➤ 定义为单位带宽上的传信率或传码率。

$$\eta = \frac{R_B}{B} \text{ 或 } \frac{R_b}{B}$$

单位：波特/赫兹或比特/(秒·赫兹)



# 通信系统的可靠性

## ➤ 模拟通信系统的可靠性

- ✓ 信噪比

## ➤ 数字通信系统的可靠性

- ✓ 误码率

- ✓ 误比特率



## 码元差错率（误码率）

➤ 发生差错的码元数在传输总码元数中所占的比例，也就是说，误码率就是码元在传输系统中被传错的概率。

$$P_e = \frac{\text{接收的错误码元数}}{\text{系统传输的总码元数}}$$





## 信息差错率（误信率）

➤ 发生差错的信息量在信息传输总量中所占的比例，或者说，它是码元的信息量在传输系统中被丢失的概率。

$$P_{eb} = \frac{\text{系统传输中出错的比特数}}{\text{系统传输的总比特数}}$$



## 1.6 连续信道的信道容量

### 1. 信道容量的定义

信道无差错传输信息所能达到的最大信息速率为信道容量，记之为 $C$ ，单位为bps。



## 2. 香农公式

假设连续信道的加性高斯白噪声功率为  $N$  (W)，信道的带宽为  $B$  (Hz)，信号功率为  $S$  (W)，则该信道的信道容量为：

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (b/s)$$

当信道特性 ( $B$ 、 $S$ 和 $n_0$ ) 给定以后，上式表示理论上单位时间内可能传输的信息量的极限数值。



### 3. 关于香农公式的几点讨论

(1) 在给定 $B$ 、 $S/B$ 的情况下，信道的极限传输能力为 $C$ ，而且此时能够做到无差错传输（即差错率为零）。

(2) 提高信噪比，可提高信道容量。

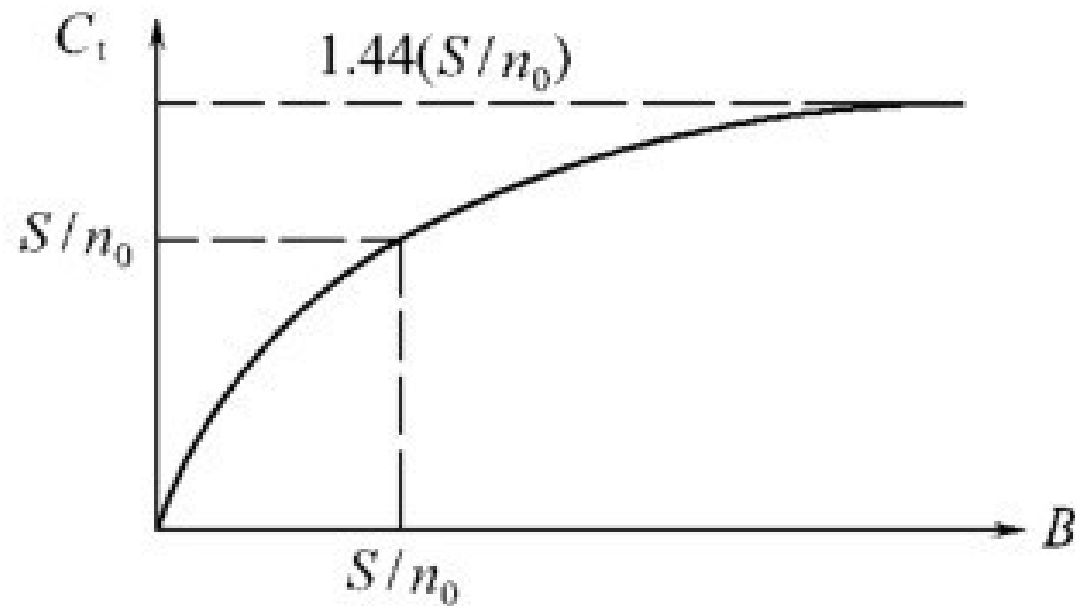
(3) 增加信道带宽，只可有限的增加信道的容量。

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \frac{S}{n_0} \log_2 e \approx 1.44 \frac{S}{n_0}$$

(4) 信道容量可以通过系统带宽与信噪比的互换而保持不变。



## 信道容量随带宽的变化规律





【例1-3】 已知黑白电视图像信号每帧(frame)有30万个像素(pixel)，每个像素有8个亮度电平，各电平独立地以等概率出现，图像每秒发送25帧。若要求接收图像信噪比达到30dB，试求所需传输带宽。

【解】 因为每个像素独立地以等概率取8个亮度电平，故每个像素的信息量为

$$I_p = -\log_2(1/8) = 3 \quad (\text{b/pix})$$

并且每帧图像的信息量为

$$I_F = 300000 \times 3 = 900000 \quad (\text{b/F})$$

因为每秒传输25帧图像，所以要求传输速率为

$$R_b = 900000 \times 25 = 22500000 = 22.5 \times 10^6 \quad (\text{b/s})$$

信道的容量 $C_t$ 必须不小于此 $R_b$ 值。将上述数值代入：

$$C_t = B \log_2(1 + S/N)$$

得到

$$22.5 \times 10^6 = B \log_2(1 + 1000) \approx 9.97B$$

最后得出所需带宽为

$$B = (22.5 \times 10^6) / 9.97 \approx 2.26 \quad (\text{MHz})$$



## 第一章 绪论

- 一. 通信的基本概念与通信系统的组成
- 二. 通信系统的分类与通信方式
- 三. 信息的度量  $I = -\log_2 P(x)$

$$H(x) = P(x_1)[- \log_2 P(x_1)] + P(x_2)[- \log_2 P(x_2)] + \cdots + P(x_n)[- \log_2 P(x_n)]$$

- 四. 通信系统的性能指标

$$R_b = R_{B_N} \log_2 N$$

- 五. 信道容量

$$C = \frac{I}{T} = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)$$



# 作业

1-3, 1-5, 1-6, 1-7, 4-8