

# 信息与电子工程导论

Introduction to Information Science and Electronic Engineering

## 2.3 编码和调制

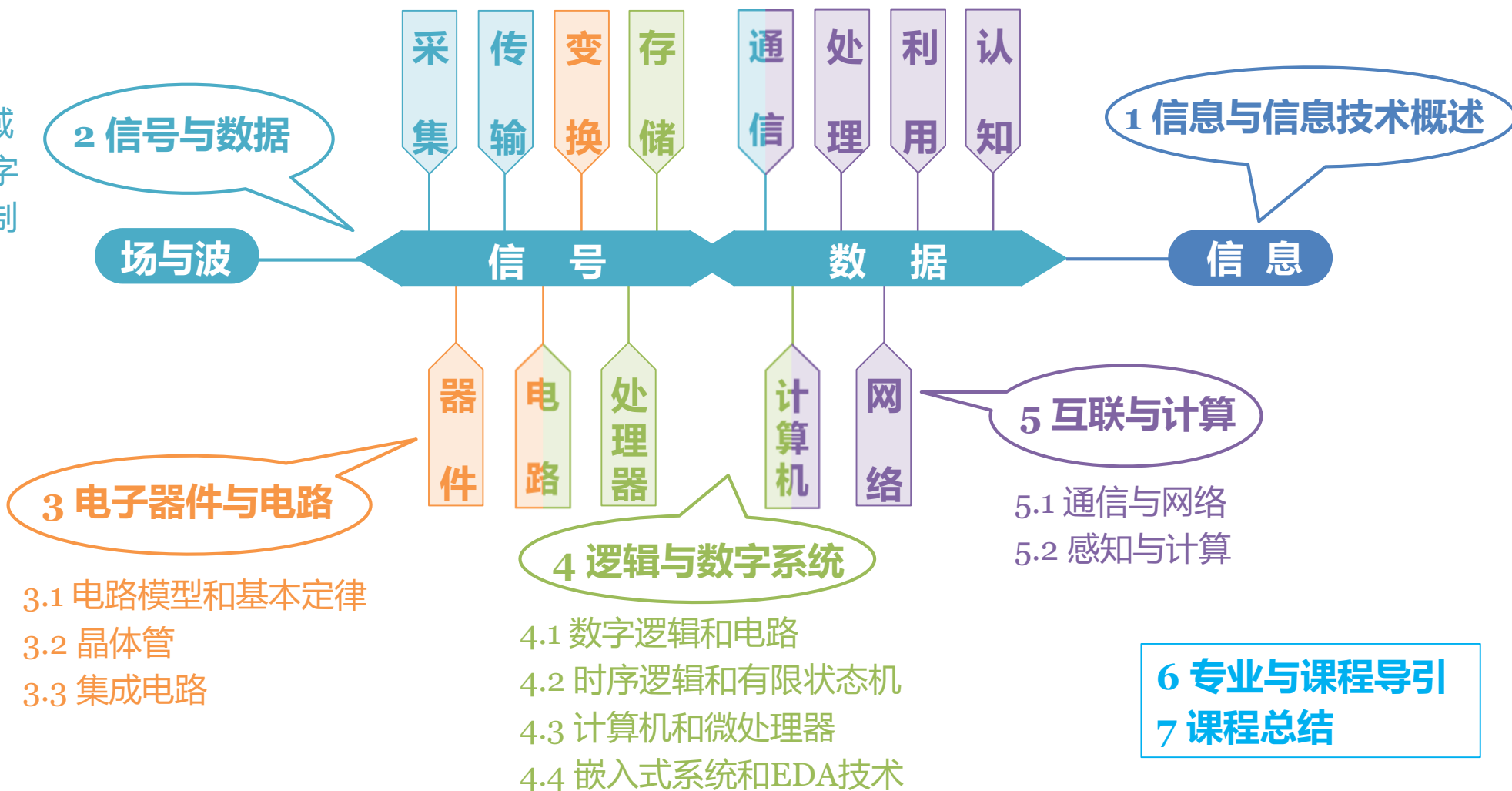
主讲：周成伟

《信息与电子工程导论》课程组

2022年3月4日星期五

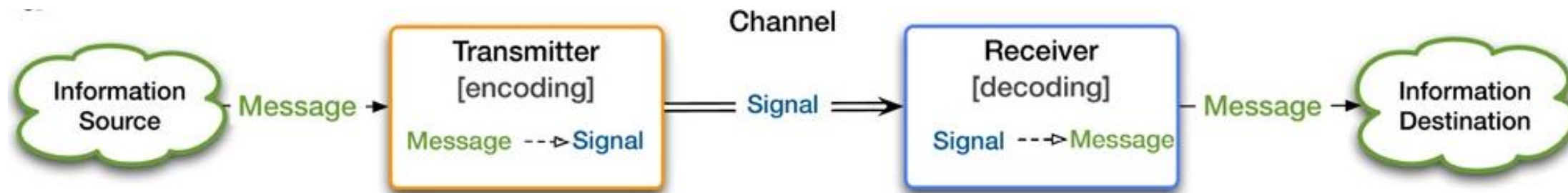
# 知识图谱

- 2.1 时域和频域
- 2.2 模拟和数字
- 2.3 编码和调制
- 2.4 场与波



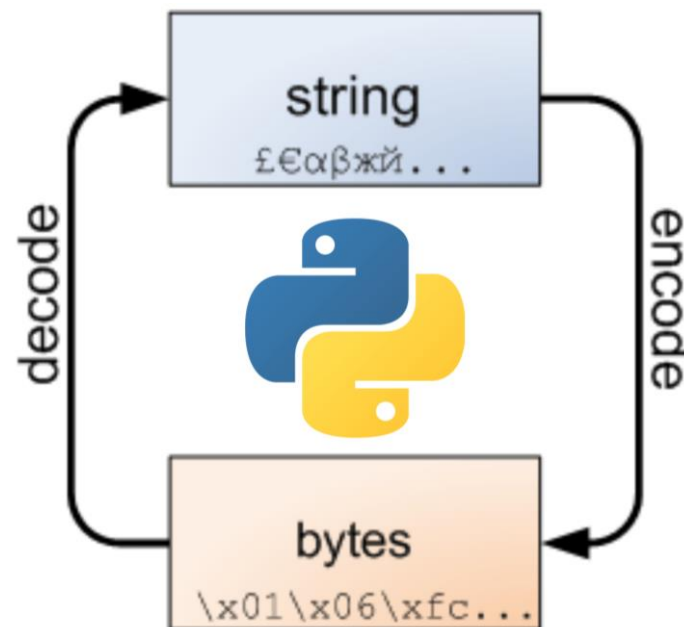
## 内容提要

- ❖ 信源编码
- ❖ 信道编码
- ❖ 调制技术
- ❖ 通信系统模型



# 编码

- ❖ **编码**是信息从**一种形式或格式**转换为**另一种形式**的过程。
- ❖ 用预先规定的方法将文字、数字或其它对象编成**数码**，或将信息、数据转换成规定的**电脉冲信号**。
- ❖ 编码在电子计算机、电视、遥控和通讯等方面广泛使用。
- ❖ **解码**，是编码的逆过程。



# 摩尔斯电码 (Morse Code)

A ● —  
 B — ● ● ●  
 C — ● — ●  
 D — ● ●  
 E ●  
 F ● ● — ●  
 G — — ●  
 H ● ● ● ●  
 I ● ●  
 J ● — — —  
 K — ● —  
 L ● — ● ●  
 M — —  
 N — ●  
 O — — —  
 P ● — — ●  
 Q — — ● —  
 R ● — ●  
 S ● ● ●  
 T —

U ● ● —  
 V ● ● ● —  
 W ● — —  
 X — ● ● —  
 Y — ● — —  
 Z — — ● ●

1 ● — — — —  
 2 ● ● — — —  
 3 ● ● ● — —  
 4 ● ● ● ● —  
 5 ● ● ● ● ●  
 6 — ● ● ● ●  
 7 — — ● ● ●  
 8 — — — ● ●  
 9 — — — — ●  
 0 — — — — —



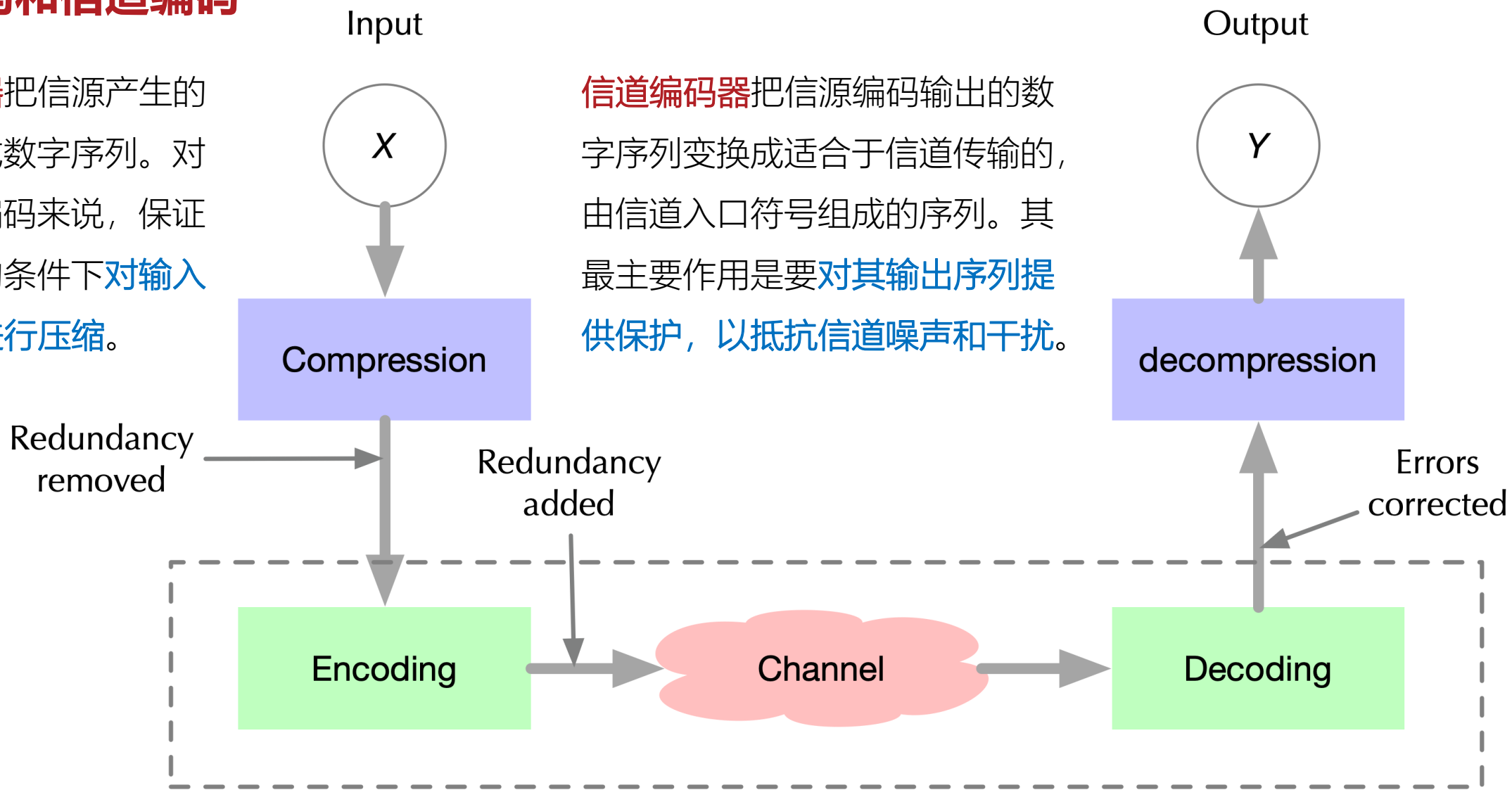
Samuel Finley Breese Morse  
 Apr 27, 1791—Apr 02, 1872

❖ 摩尔斯电码是一种早期的数字化通信形式，采用时通时断的信号代码，通过不同的排列顺序来表达不同的英文字母、数字和标点符号。

## 信源编码和信道编码

**信源编码器**把信源产生的消息变换成数字序列。对无损信源编码来说，保证在不失真的条件下**对输入消息序列进行压缩**。

**信道编码器**把信源编码输出的数字序列变换成适合于信道传输的，由信道入口符号组成的序列。其最主要作用是要**对其输出序列提供保护，以抵抗信道噪声和干扰**。



## 香农第一定理

❖ 可变长无失真信源编码定理。

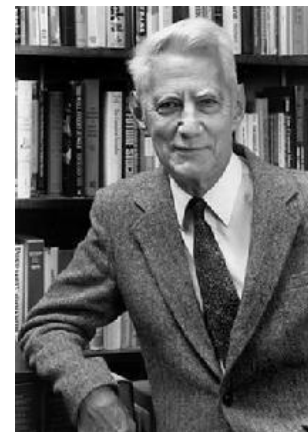
❖ 信息论中最重要的两个定律之一。

❖ 香农第一定理的意义：

— 将原始信源符号转化为新的码符号，使码符号尽量服从**等概分布**，从而每个码符号所携带的信息量达到最大，进而可以用尽量少的码符号传输信源信息。

❖ 数据就是一种信息，要让每一个码符号包含的信息量最大，这样就可以用最小的码还原信息。

❖ 通过信息来消除不确定性就是大数据的思维方式。



Claude Elwood Shannon  
Apr 30, 1916—Feb 26, 2001

## 信息的度量

- ❖ 信息是用不确定性的量度定义的，一个消息的可能性愈小，其信息愈多；而消息的可能性愈大，则其信息愈少。
- ❖ 通常我们衡量的都是一个系统的信息量。如果一个系统内存在  $N$  个事件，若它们的概率分别为  $p_1, p_2, \dots, p_N$ ，则这些事件的自信息的平均值为

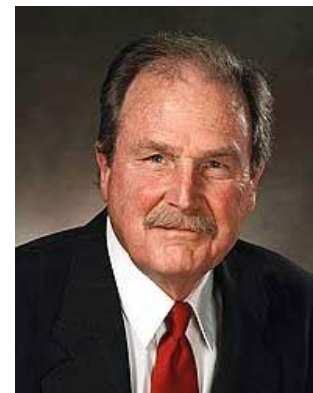
$$H(x) = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \log_2 p(x_i)$$

- 式中， $H(x)$  表示信息量， $p(x_i)$  表示某状态  $x_i$  不确定的概率。



## 霍夫曼编码

- ❖ 霍夫曼编码是是一种用于无损数据压缩的熵编码（权编码）算法。1952年，霍夫曼在MIT攻读博士时所发明。
- ❖ 在计算机数据处理中，霍夫曼编码使用变长编码表对源符号（如文件中的一个字母）进行编码。
- ❖ 出现机率高的字母使用较短的编码，出现机率低的则使用较长的编码，这便使编码之后的字符串的平均长度降低，达到无损压缩数据的目的。
- ❖ 霍夫曼编码的核心是使出现概率越高的字符采用越短的编码，其本质反映了最好的资源（最短编码）给予最常见的情况。

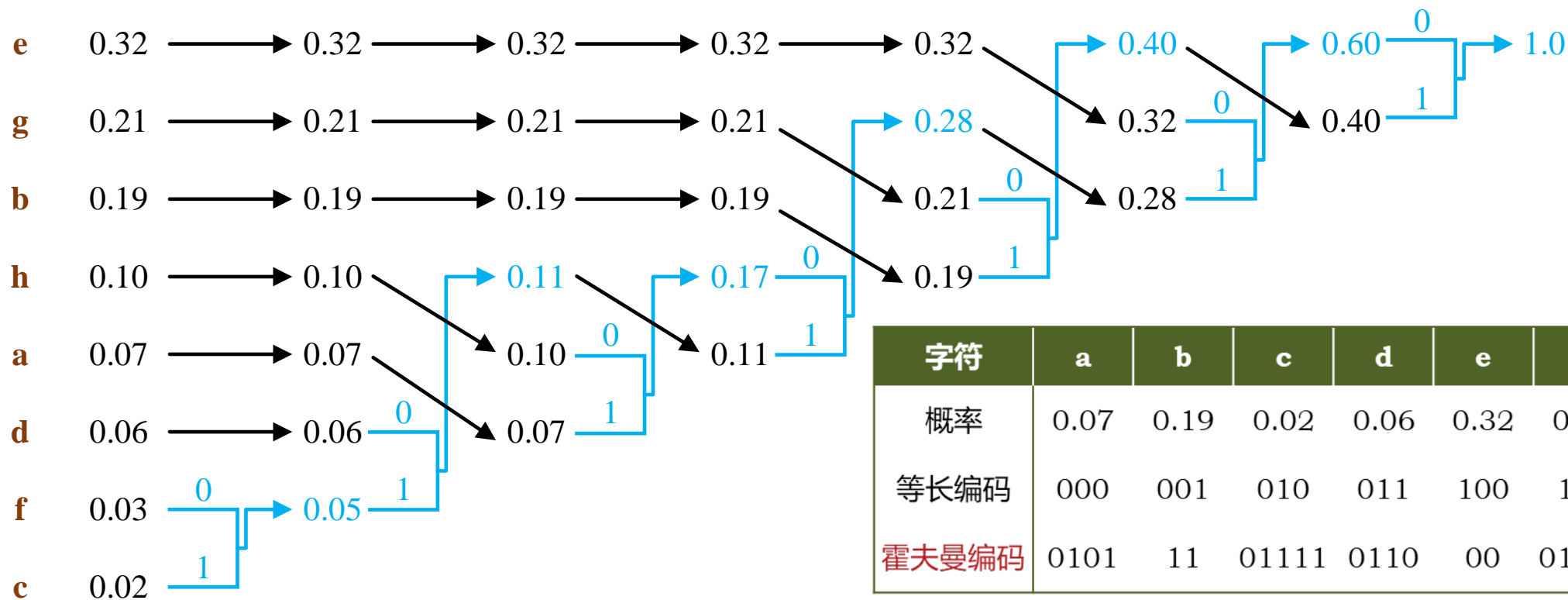


David Albert Huffman  
Aug 9, 1925—Oct 7, 1999

## 霍夫曼树

❖ 例：假设用于电文由字符{a, b, c, d, e, f, g, h} 中的字母构成，出现的概率分别为 {0.07, 0.19, 0.02, 0.06, 0.32, 0.03, 0.21, 0.10}。

符号 概率



字符	a	b	c	d	e	f	g	h
概率	0.07	0.19	0.02	0.06	0.32	0.03	0.21	0.10
等长编码	000	001	010	011	100	101	110	111
霍夫曼编码	0101	11	01111	0110	00	01110	10	0100

## 霍夫曼编码

字符	a	b	c	d	e	f	g	h
概率	0.07	0.19	0.02	0.06	0.32	0.03	0.21	0.10
等长编码	000	001	010	011	100	101	110	111
霍夫曼编码	0101	11	01111	0110	00	01110	10	0100

❖ 其编码的平均码长为：

$$- 4 \times 0.07 + 2 \times 0.19 + 5 \times 0.02 + 4 \times 0.06 + 2 \times 0.32 + 5 \times 0.03 + 2 \times 0.21 + 4 \times 0.10 = \mathbf{2.61 \text{ bit}}$$

❖ 是等长编码平均长度的 **87%**，所以平均压缩率为 **13%**。

❖ 霍夫曼编码的复杂性随着码长的增大**急剧增加**，所以对于大的码长来说霍夫曼编码是不实际的。

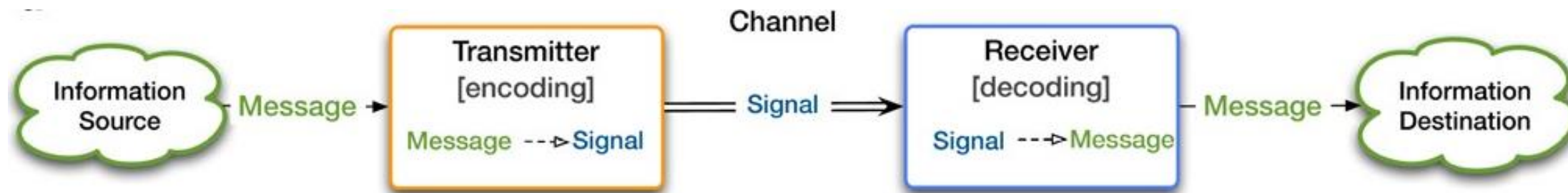
❖ 1970 年代开始的算术编码，虽然平均码长不是最佳，计算复杂性随码长**线性增加**，因此是一种实用的码。

## 数据的压缩

- ❖ 一个多媒体文件，例如一幅画，一段音乐或一段影视节目数字化后所生成的数据量比较大。所以，声音、图像和视频的数字化数据一般都要采用压缩 (compress) 技术。
  - JPG是静态图像信息的压缩标准，MP3是音乐信息压缩标准，MPEG和RM是视频信息的压缩标准等。
- ❖ 数据之所以可以压缩，是因为有冗余信息存在的缘故。
- ❖ 无损压缩：
  - 能够完全还原为原来的数据。（Winzip、Winrar 等压缩文件）
- ❖ 有损压缩：
  - 还原的数据没有原来的精确，质量有所损失，但在可接受的限度之内。主要用于音频和视频数据。

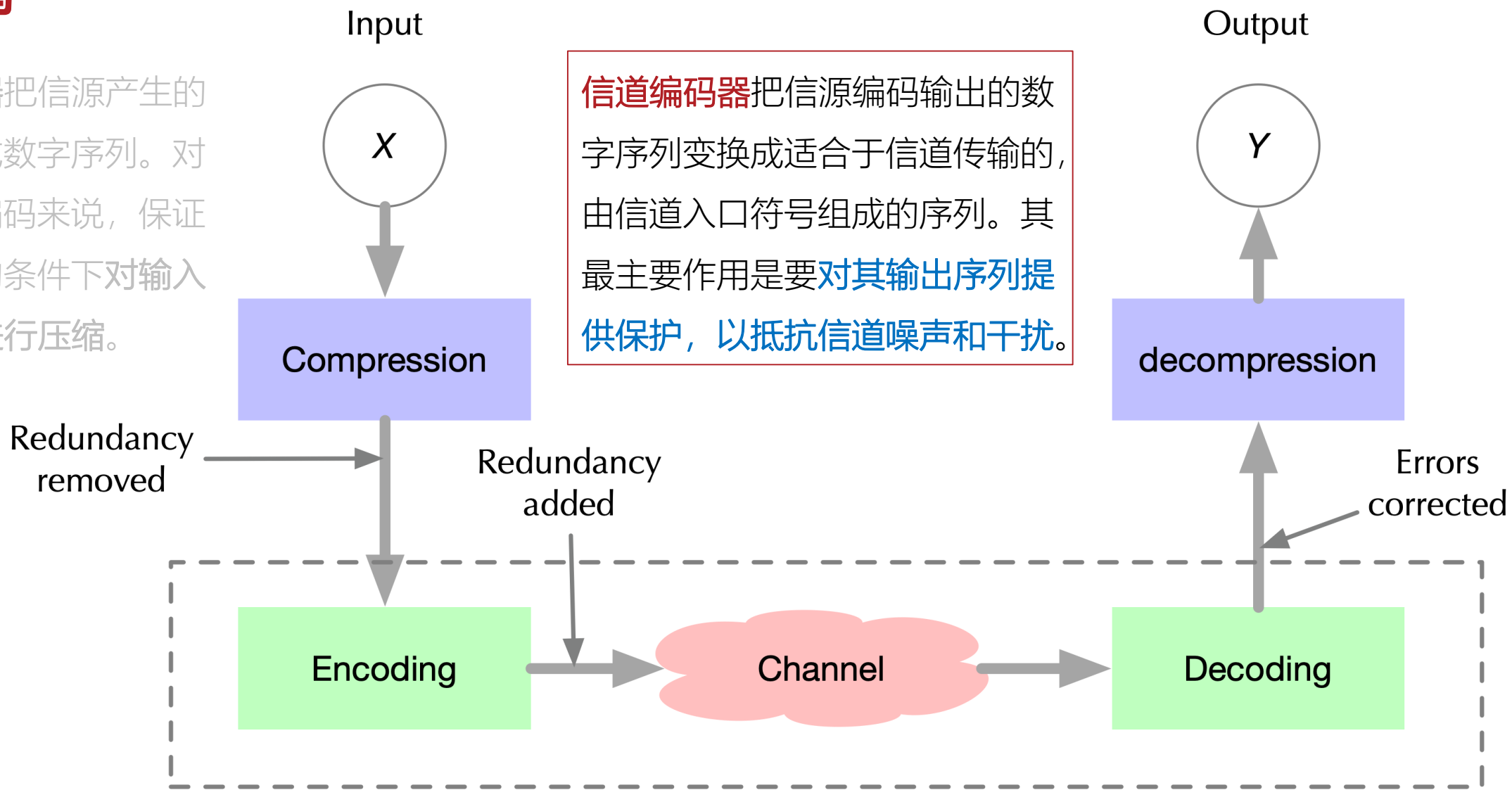
## 内容提要

- ❖ 信源编码
- ❖ 信道编码
- ❖ 调制技术
- ❖ 通信系统模型



## 信道编码

信源编码器把信源产生的消息变换成数字序列。对无损信源编码来说，保证在不失真的条件下对输入消息序列进行压缩。



## 二代身份证编码规则及校验码

校验码

公民身份号码为18位:

ABCDEF YYYYMMDD XXX R

地址码

出生日期码

顺序码

### ❖ 校验码算法:

#### — 加权因子

位置序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
加权因子	7	9	10	5	8	4	2	1	6	3	7	9	10	5	8	4	2

#### — 校验码表

余数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
校验码	1	0	X	9	8	7	6	5	4	3	2

例: 34052419800101001X

1) 本体码乘以加权因子:  $3 \times 7 + 4 \times 9 + 0 \times 10 + \dots + 0 \times 4 + 1 \times 2 = 189$

2) 计算除以11的余数:  $189 \div 11 = 17 \text{ 余 } 2$

3) 在检验码中查询余数对应的检验码: 对应的校验码是 X



人民日报

22-1-6 14:56 来自 微博 weibo.com

4717万  
阅读

【你知道吗? #身份证第18位的X读作shí#】1月6日, #2021十大语文差错发布#。据《咬文嚼字》主编黄安靖介绍, 2021年, 身份证上的公民身份号码最后一位“X”的误认、误读, 引起了社会的广泛议论, “X”表示的是罗马数字“10”, 读作shí最为妥当。(人民日报记者曹玲娟)

## 信道编码

- ❖ 信号在传输中往往由于各种噪声，使得在传送的数据流中产生误码，从而使接收端产生图像跳跃、不连续、出现马赛克等现象。
- ❖ 信道编码技术通过对数码流进行编码处理，使系统具有一定的**纠错能力和抗干扰能力**，可极大地避免码流传送中误码的发生。
- ❖ **信道编码的实质**是在信息码中增加一定数量的**多余码元**（称为监督码元），使它们满足一定的约束关系，这样，由信息码元和监督码元共同组成一个由信道传输的码字。
- ❖ 一旦传输过程中发生错误，则**信息码元和监督码元间的约束关系**被破坏。在接收端按照既定的规则校验这种约束关系，从而可达到发现和纠正错误的目的，实现可靠的传输。



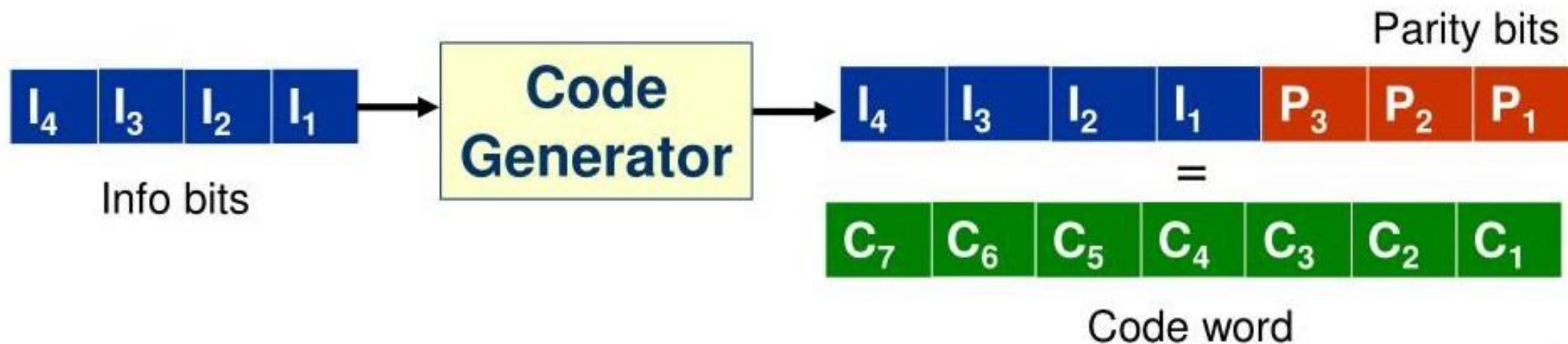
## 汉明码



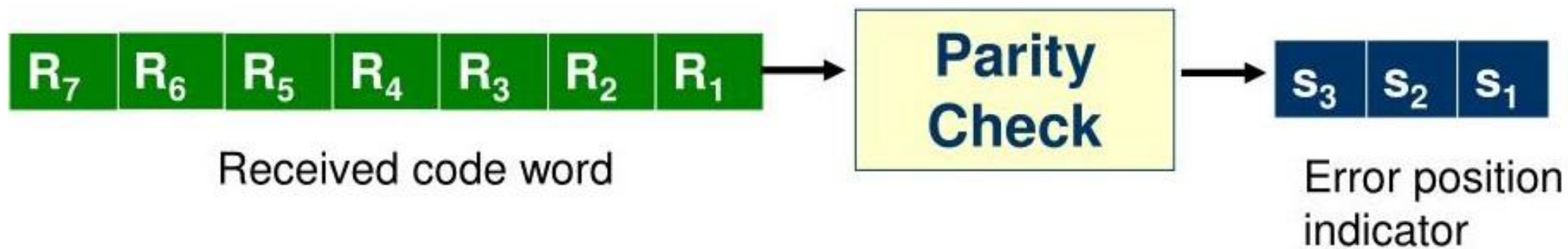
Richard Wesley Hamming  
Feb 11, 1915—Jan 7, 1998

- ❖ 贝尔实验室数学家
- ❖ 汉明码在传输的消息流中插入**验证码**，当存储或移动数据时，可能会产生数据位错误，以侦测并更正单一比特错误。
- ❖ 将输入数据每**4个比特分为一组**，然后通过计算这些信息比特的线性组合来得到**3个校验比特**，得到**7个比特的数据**。
- ❖ 不仅能够检测到是否有错误发生，同时还可以找到发生单个比特错误的比特的位置。
- ❖ 由于汉明编码简单，被广泛应用。但编码效率比较低。

## Hamming Code



### Decoding



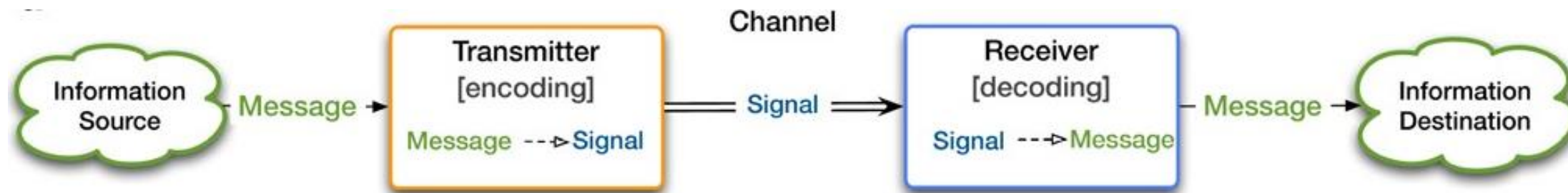
## 极化码

- ❖ 极化码 (Polar Codes) 不仅开拓出了信道编码的一个新方向, 还是**全球第一类能被严格证明达到香农极限的信道编码方法**。极化码的颠覆性优势在于, 其能够可观地减低设计复杂程度, 同时确保服务的质量, 提高5G编码的整体性能。
- ❖ 2016年11月17日, **华为的 Polar Code 方案**, 在 3GPP RAN1 87 次会议上被通过为 5G 控制信道 eMBB 场景编码最终方案, **成为中国企业在通信核心技术话语权上零的突破**。
- ❖ 2018年7月26日, 华为极化码最早提出者, 土耳其**Erdal Arikan教授**颁发特别奖项。
  - “极化码能在短短十年内就走出实验室, 成为一项标准, 离不开华为领导和工程师的远见卓识以及在技术方面做出的贡献。我对此感到非常高兴。作为研究人员, 最大的奖励莫过于见到我们的构想成为现实。”



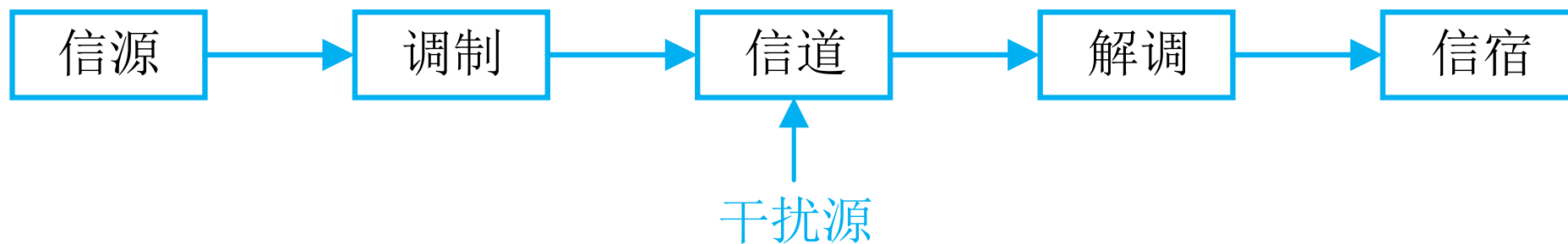
## 内容提要

- ❖ 信源编码
- ❖ 信道编码
- ❖ 调制技术
- ❖ 通信系统模型

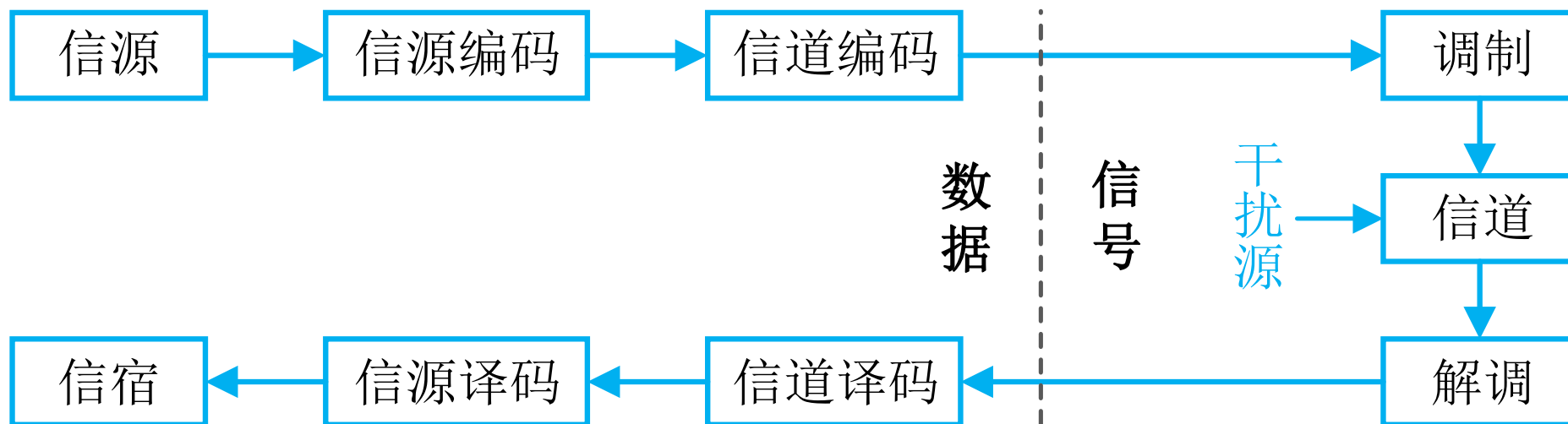


## 通信系统模型

模拟传输系统



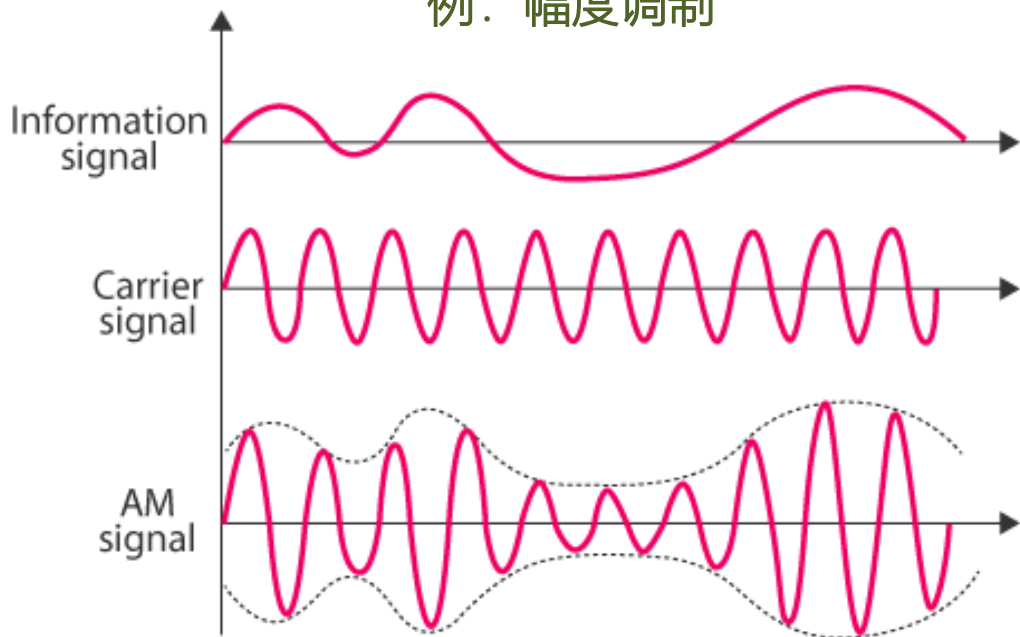
数字传输系统



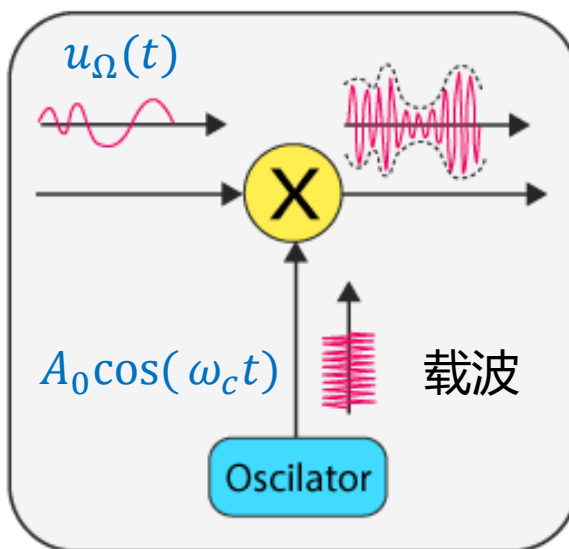
# 调制

❖ 用**原始信号**对载波波形的某些参数（如**幅度、相位、频率**）进行控制，使这些参数随原始信号的变化而变化。

例：幅度调制



调制信号



已调信号

$$s(t) = A_m(t) \cos[\omega_m(t)t + \phi_m(t)]$$

↑  
瞬时振幅（包络线振幅）

↑  
瞬时频率

↑  
瞬时相位偏移

❖ 不同的调制方式，其可靠性和有效性不同。选择不同的调制方式满足不同的服务品质。

## 信号的数据调制方式

四种情况：

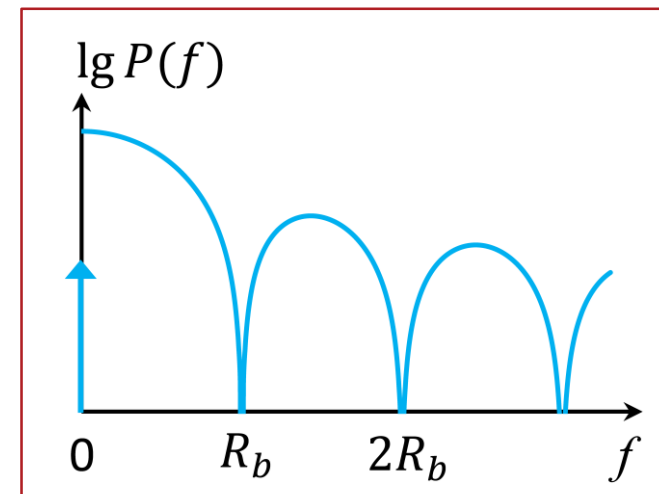
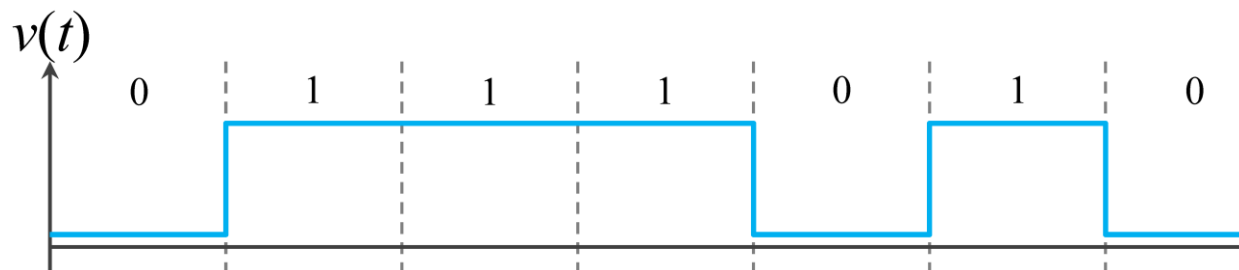
- ❖ 数字信号使用**数字信道**传送
- ❖ 模拟信号使用**数字信道**传送
- ❖ 数字信号使用**模拟信道**传送
- ❖ 模拟信号使用**模拟信道**传送

} **基带传输**

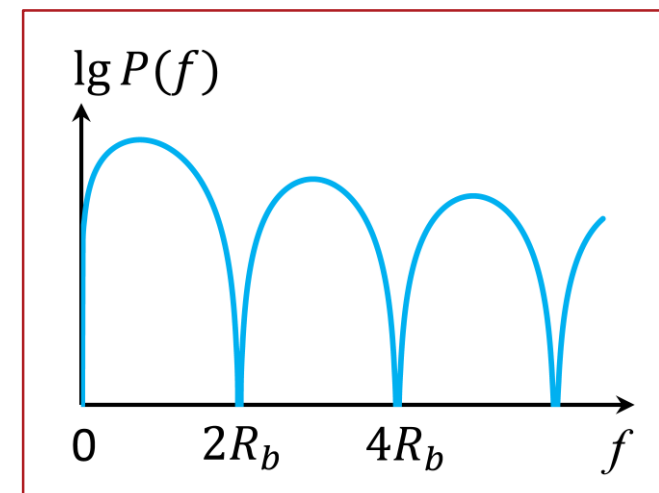
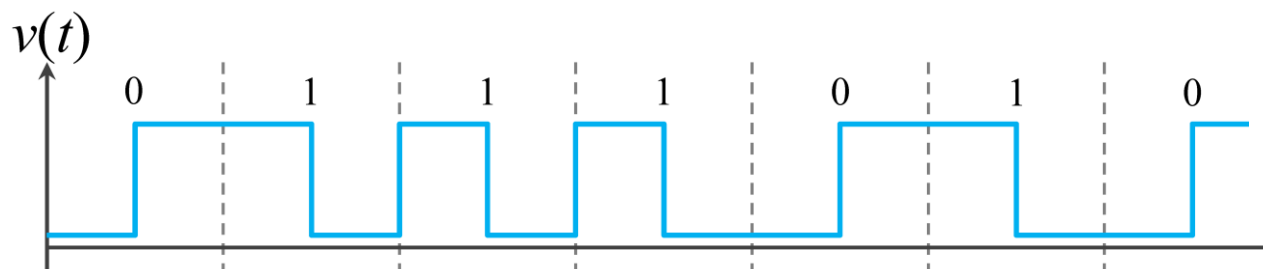
} **频带传输**

## 数字信号使用数字信道传送

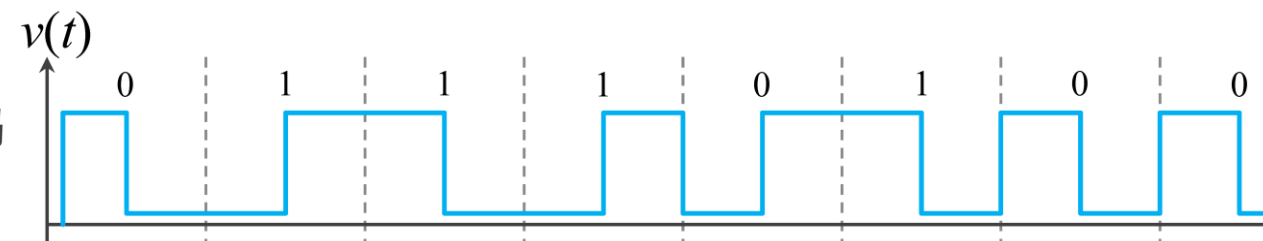
非归零码



曼彻斯特编码



差分曼彻斯特编码





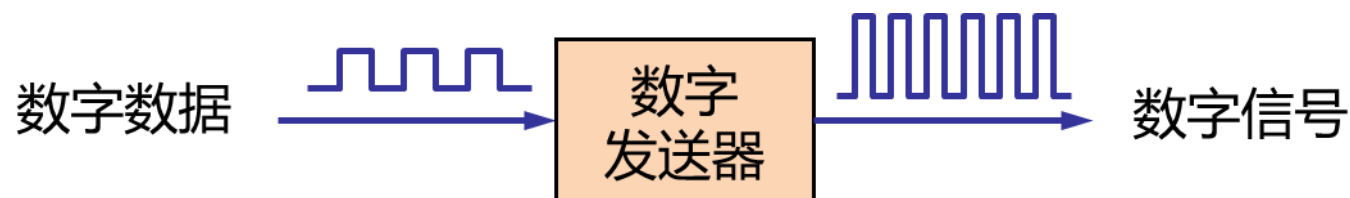
## 模拟信号使用数字信道传送

- ❖ 把一个时间连续，取值连续的**模拟信号**变换成时间离散，取值离散的**数字信号**后在信道中传输。
- ❖ 对模拟信号先抽样，再对样值幅度量化，编码的过程。
  - 脉冲编码调制 (Pulse Code Modulation, PCM)
  - 增量脉码调制方式 (Delta Modulation, DM)
  - 脉冲幅度调制 (Pulse Amplitude Modulation, PAM)
  - 差分脉冲编码调制 (Differential PCM, DPCM)



## 基带传输

- ❖ 基带信号就是发出的直接表达了要传输的信息的信号。
- ❖ 数字信道传输数字信息，以0、1数字形式传输。



- ❖ 其特点是频率较低，信号频谱从零频附近开始，具有低通形式。

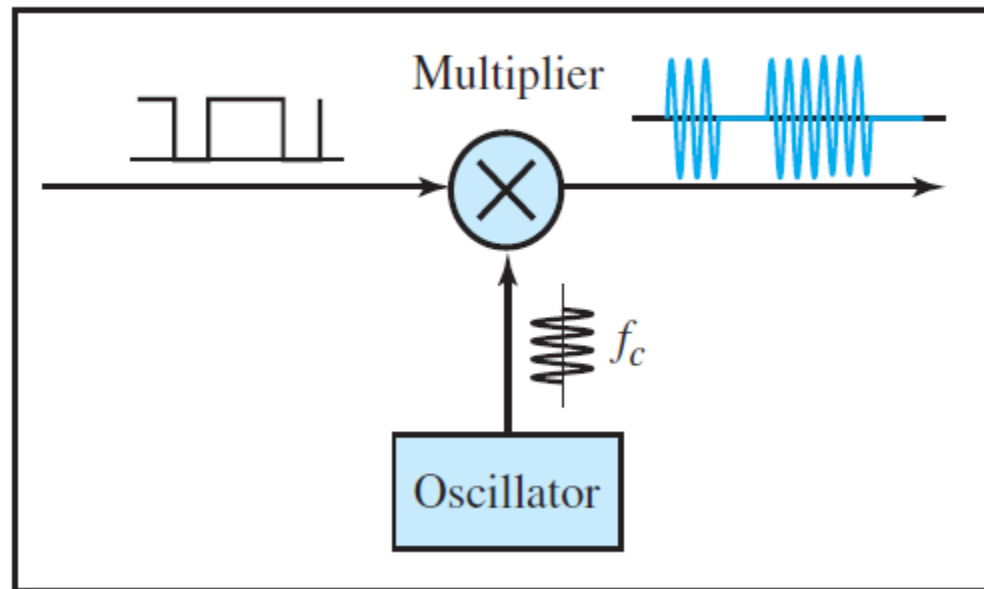
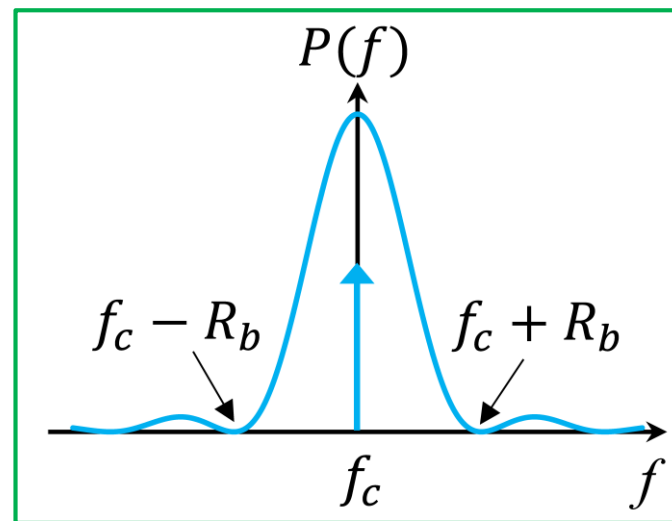
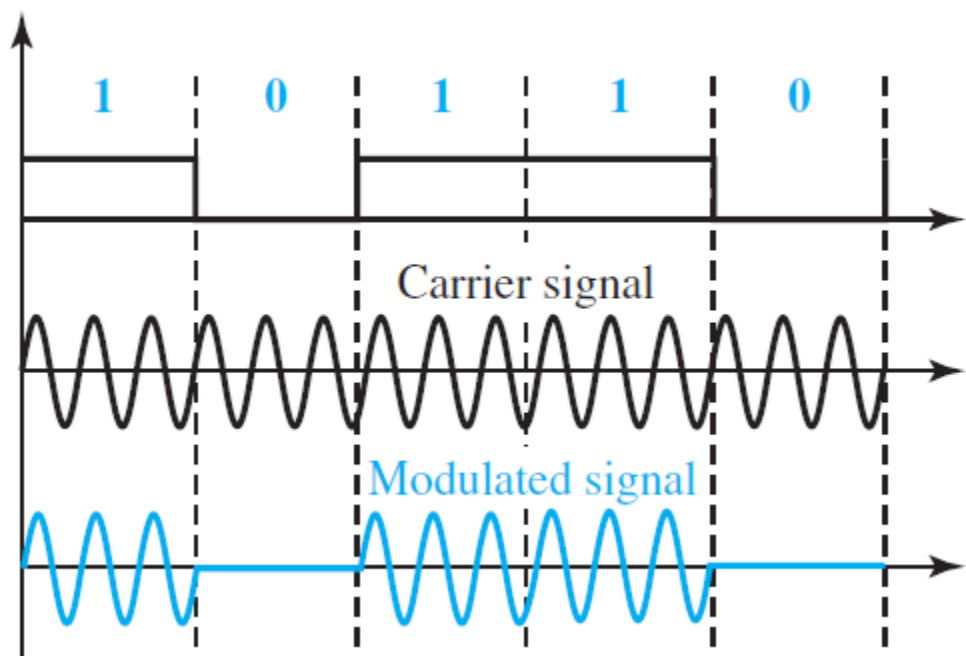


- ❖ 由于在近距离范围内基带信号的衰减不大，从而信号内容不会发生变化。因此在传输距离较近时，计算机网络都采用基带传输方式。

## 数字信号使用模拟信道传送

### ❖ 幅移键控 ASK

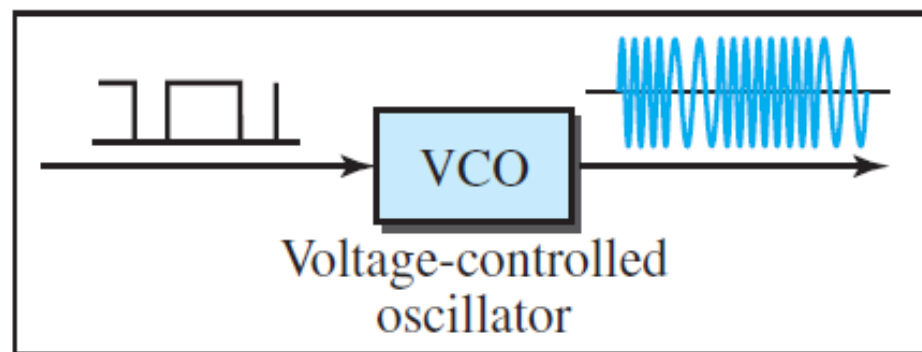
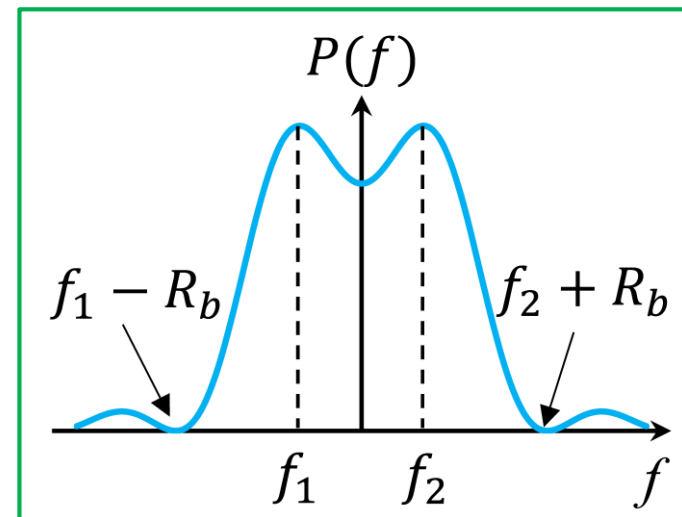
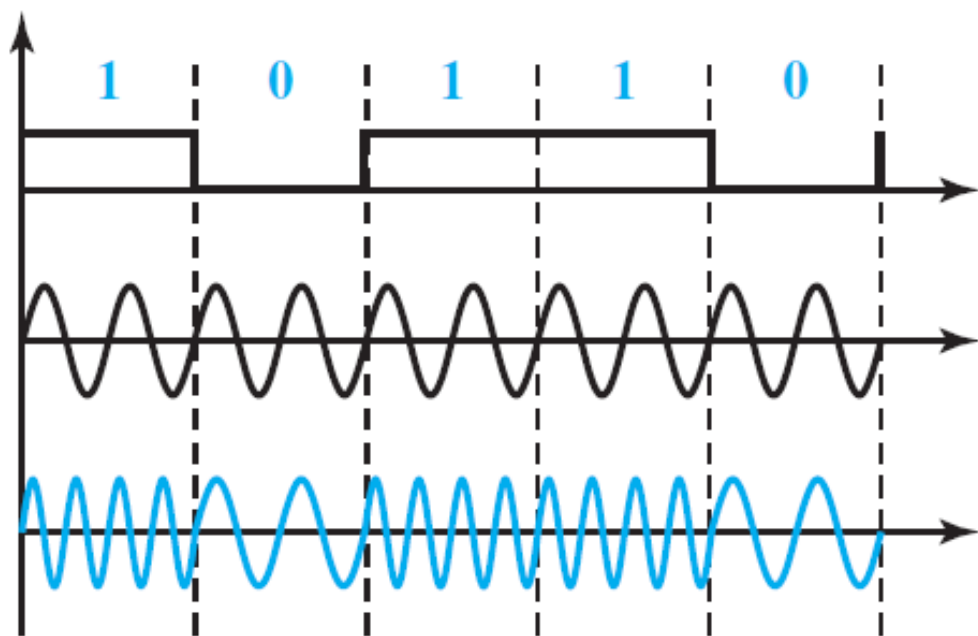
#### – Amplitude-Shift Keying



## 数字信号使用模拟信道传送

### ❖ 频移键控 FSK

– Frequency-Shift Keying

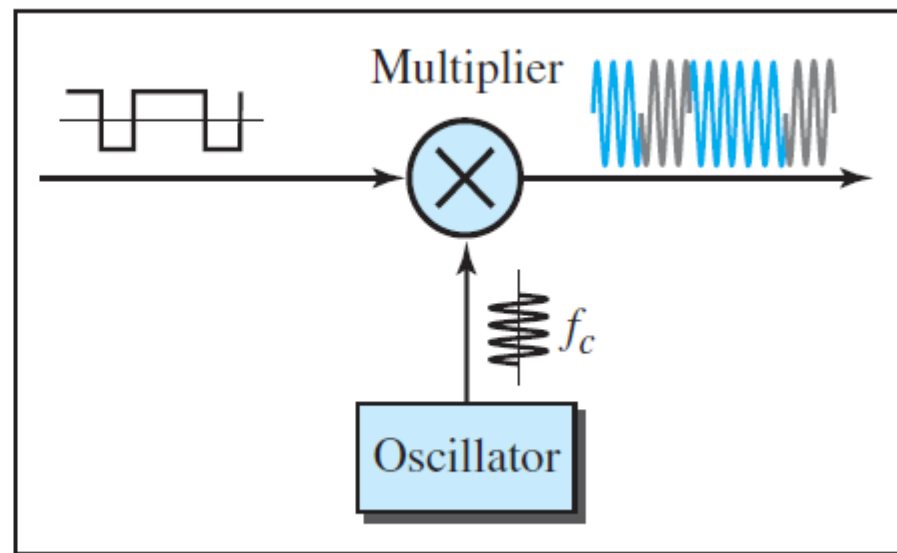
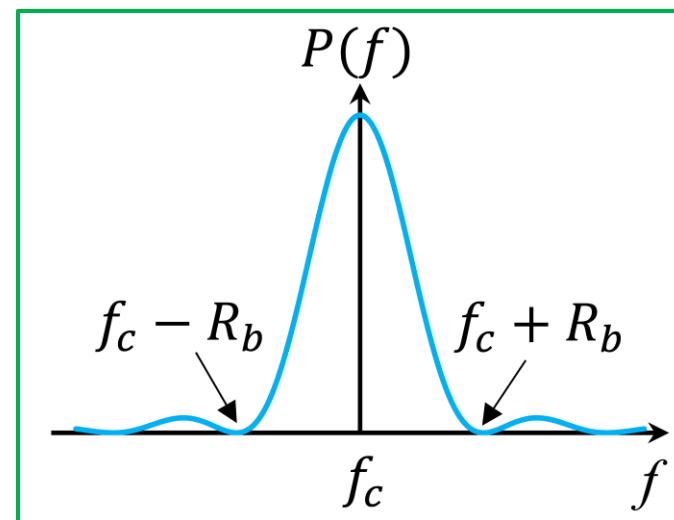
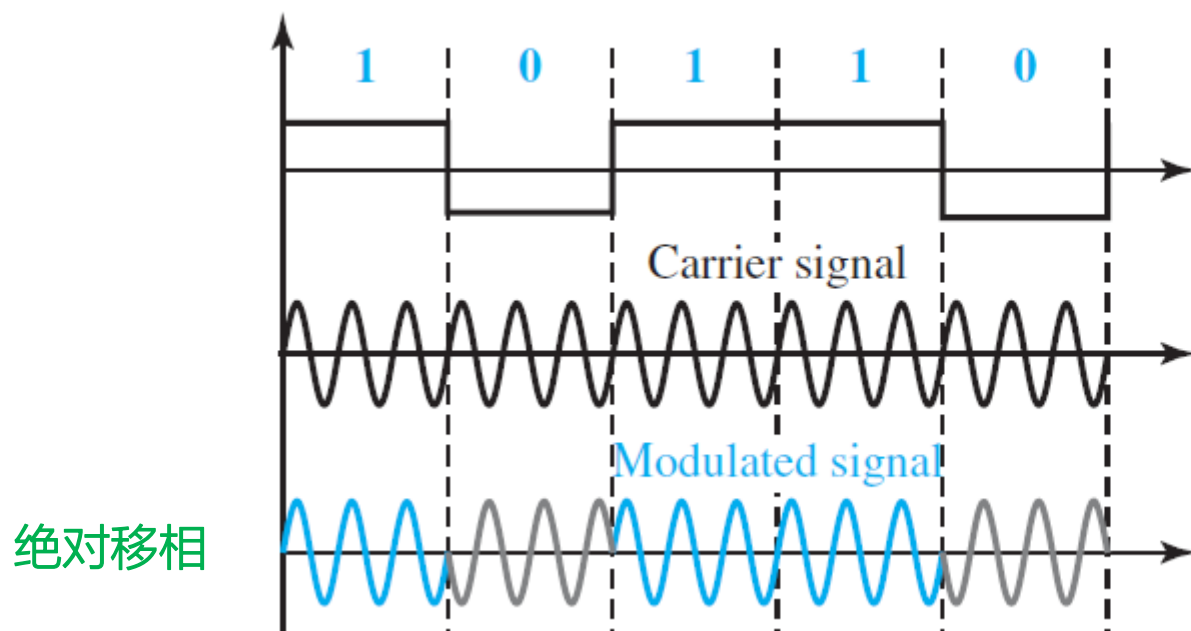


## 数字信号使用模拟信道传送

### ❖ 相移键控 PSK

– Phase-Shift Keying

❖ 分为绝对移相和相对移相 (教材图2.29(c)所示为相对移相)



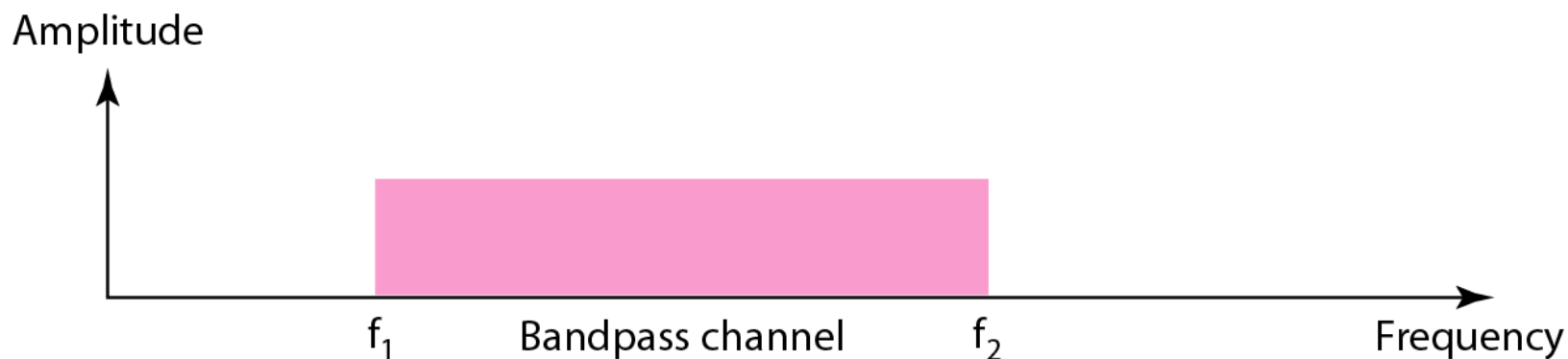
## 频带传输

❖ 利用模拟信号传输数字信号

❖ 将数字信号**调制**成模拟信号传输



❖ 在通信中，由于基带信号具有频率很低的频谱分量，出于抗干扰和提高传输率考虑一般不宜直接传输，需要把基带信号变换成其频带适合在信道中传输的信号，变换后的信号就是频带信号。



## 三大移动运营商4G频段

### ❖ 中国移动

- 4G: 1880 -1900 MHz、2320-2370 MHz、2575-2635 MHz
- 5G: 2515-2675 MHz、4800-4900 MHz

### ❖ 中国联通

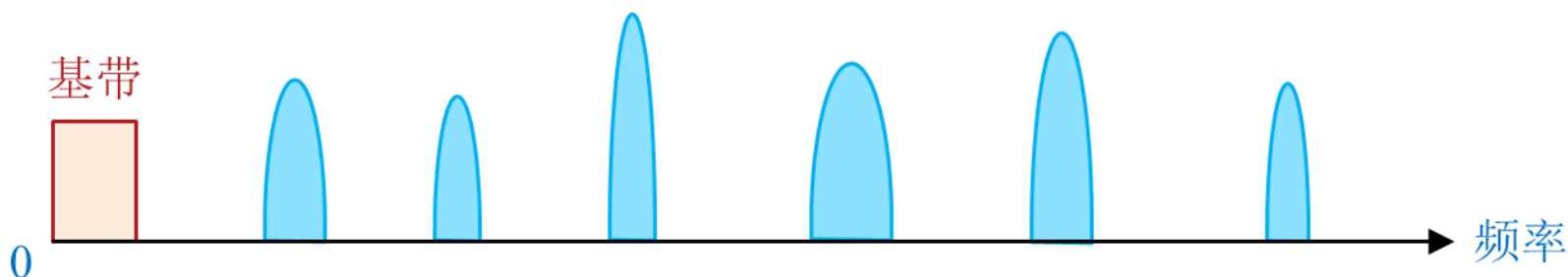
- 4G: 2300-2320 MHz、2555-2575 MHz、1745-1765 MHz、1840-1860 MHz
- 5G: 3500-3600 MHz

### ❖ 中国电信

- 4G: 2370-2390 MHz、2635-2655 MHz、1765-1780 MHz、1860-1875MHz
- 5G: 3400-3500 MHz

## 频带调制

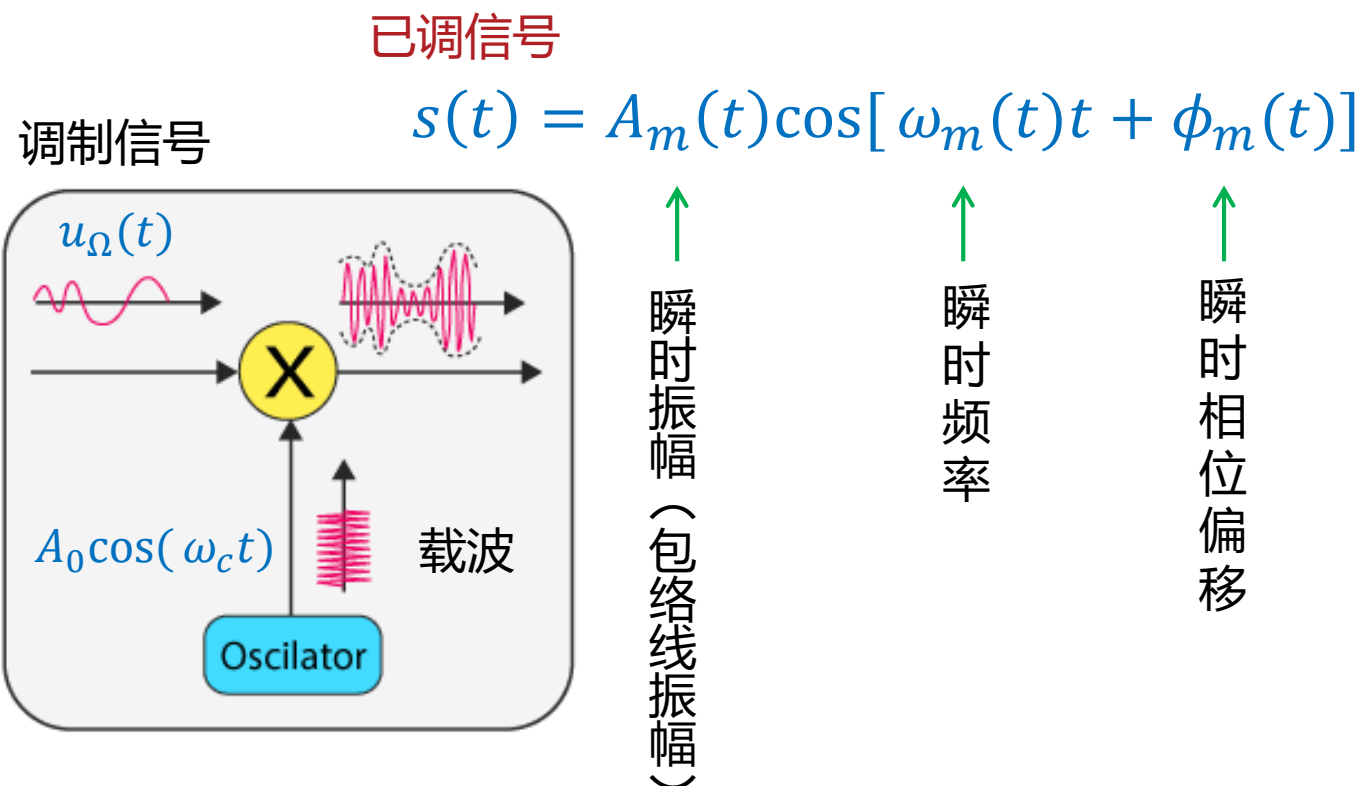
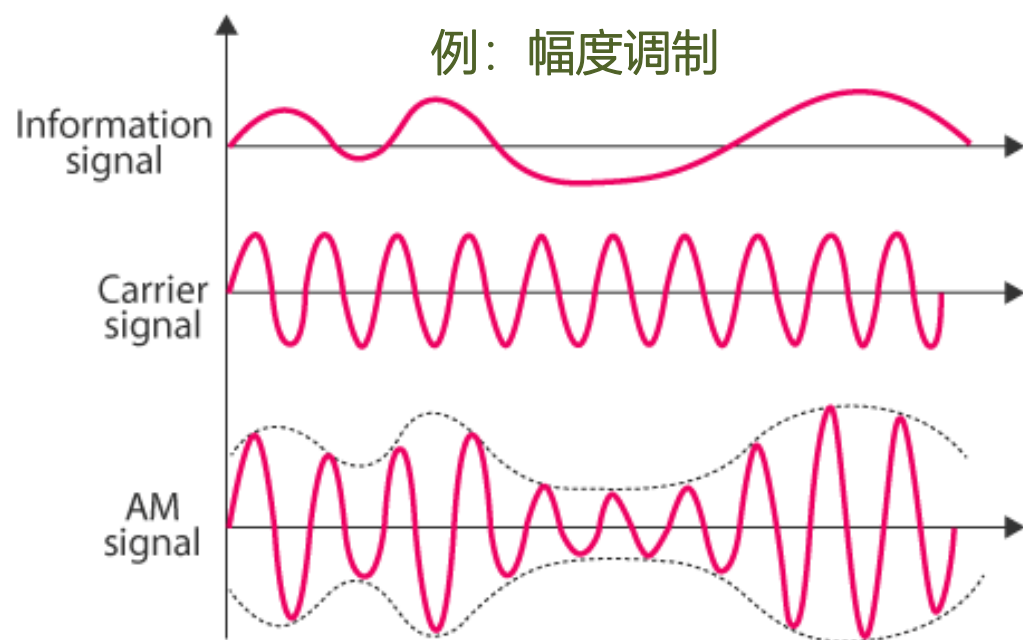
- ❖ 频带调制的实质是进行**频谱搬移**，其作用和目的是：
- ❖ 将调制信号（基带信号）的频谱搬移到所希望的位置上，从而将调制信号转换成适合于信道传输的信号；



- ❖ 便于信道多路复用的已调信号（频带信号），提高信道利用率；
- ❖ 对系统的传输有效性和传输可靠性有着很大的影响，如减少干扰，提高系统抗干扰能力。

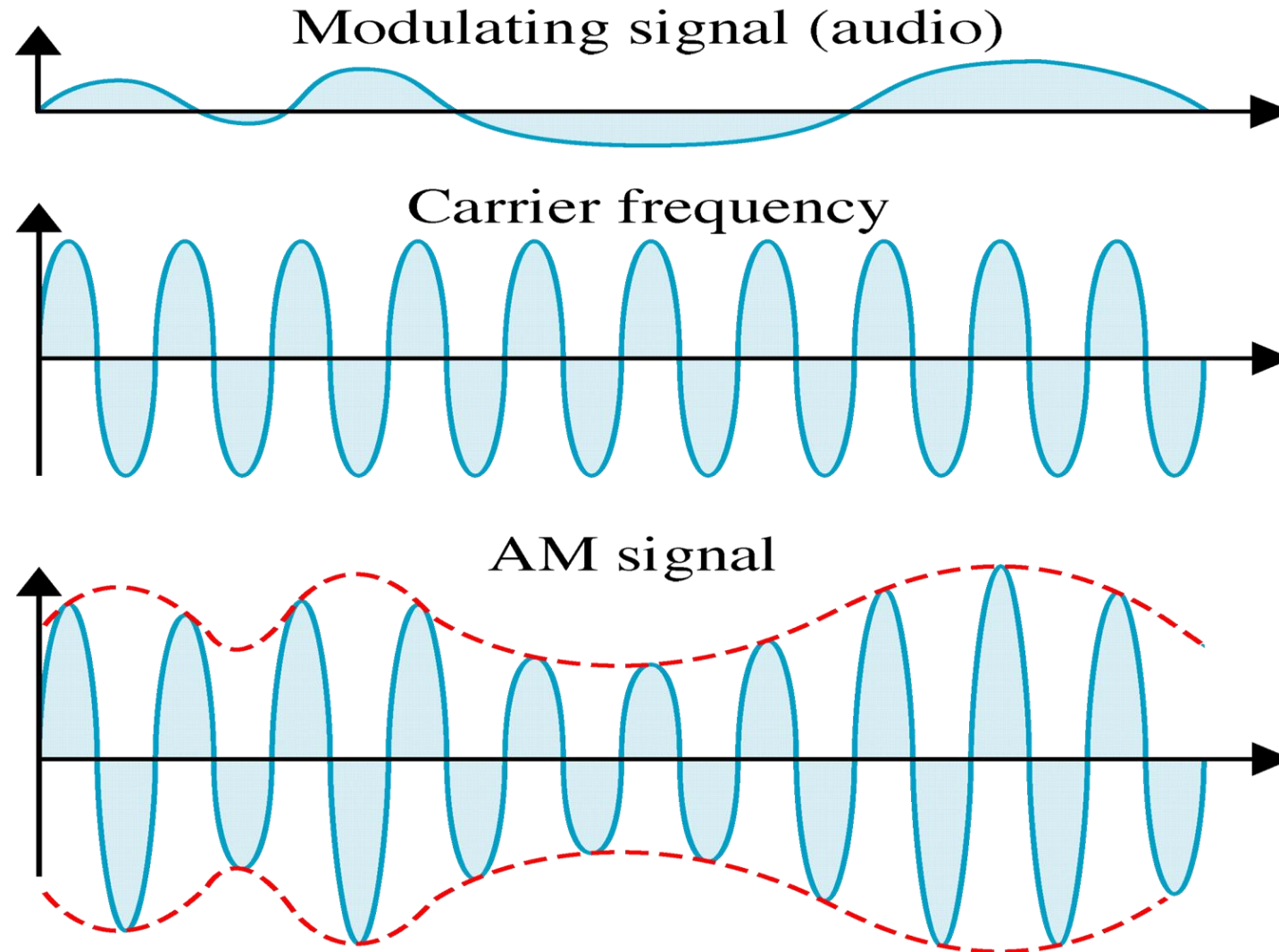


## 模拟信号使用模拟信道传送

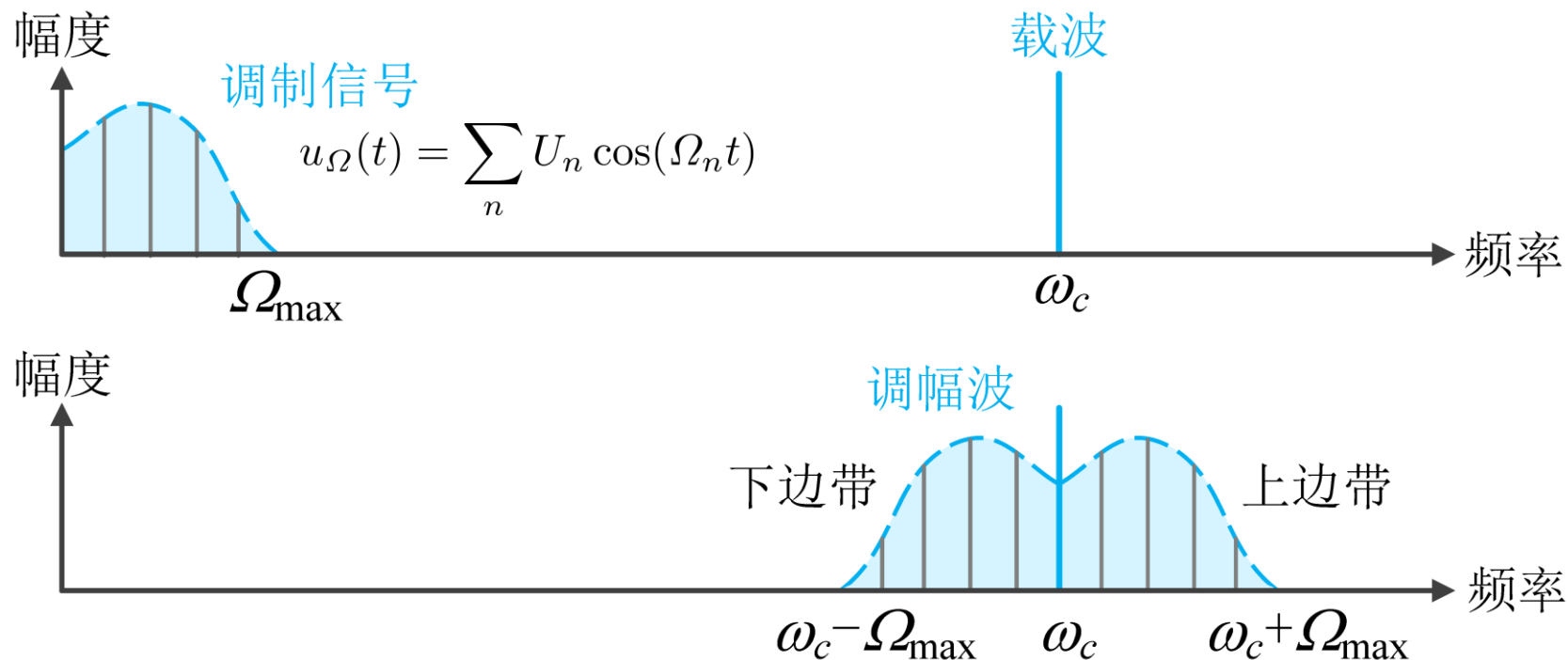


- ❖ 最常用和最重要的模拟调制方式是用**正弦波**作为载波的调制。
- ❖ **幅度调制** (Amplitude Modulation, **AM**) —— 正弦载波的**瞬时幅度**随调制信号线性变化。
- ❖ **频率调制** (Frequency Modulation, **FM**) —— 正弦载波的**瞬时频率**随调制信号线性变化。
- ❖ **相位调制** (Phase Modulation, **PM**) —— 正弦载波的**瞬时相位偏移**随调制信号线性变化。

## 幅度调制 (AM)



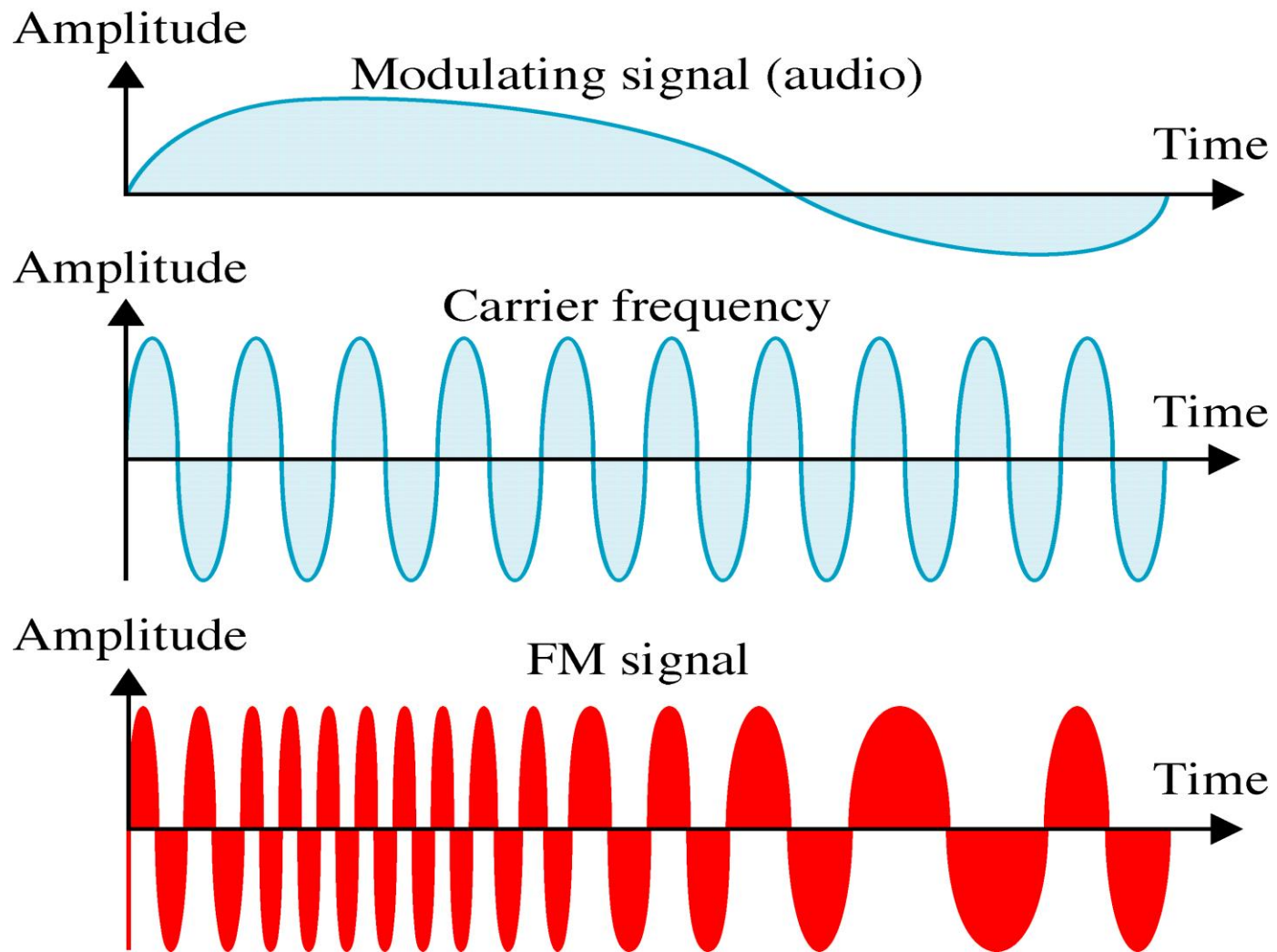
## AM 频谱和带宽



$$u_{\text{AM}}(t) = U_c [1 + m u_{\Omega}(t)] \cos(\omega_c t)$$

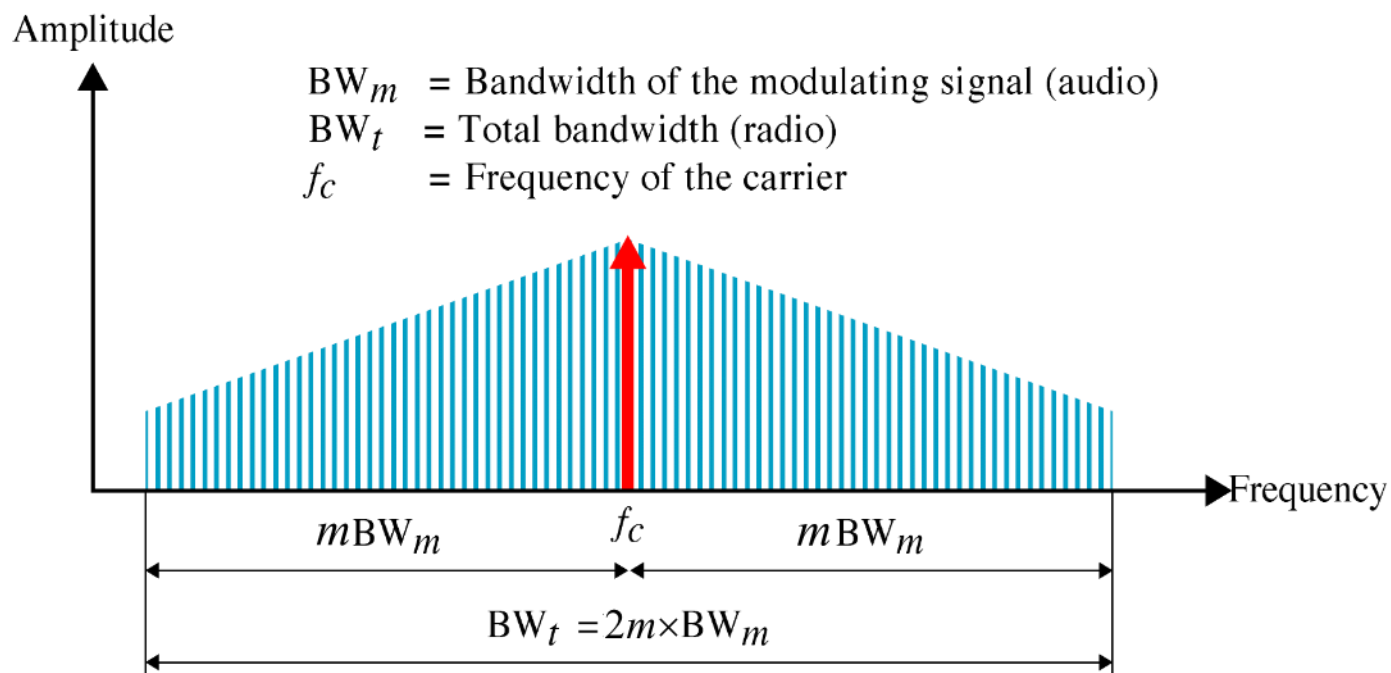
$$u_{\text{AM}}(t) = U_c \left[ \cos(\omega_c t) + \frac{m}{2} \sum_n U_n \cos(\omega_c + \Omega_n)t + \frac{m}{2} \sum_n U_n \cos(\omega_c - \Omega_n)t \right]$$

## 频率调制 (FM)



## FM 频谱和带宽

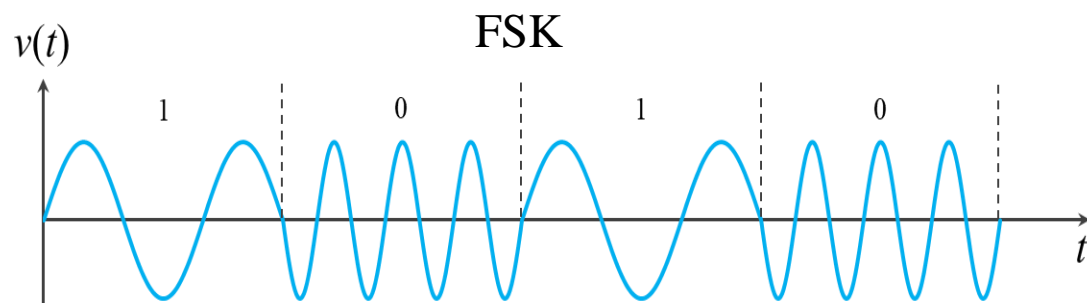
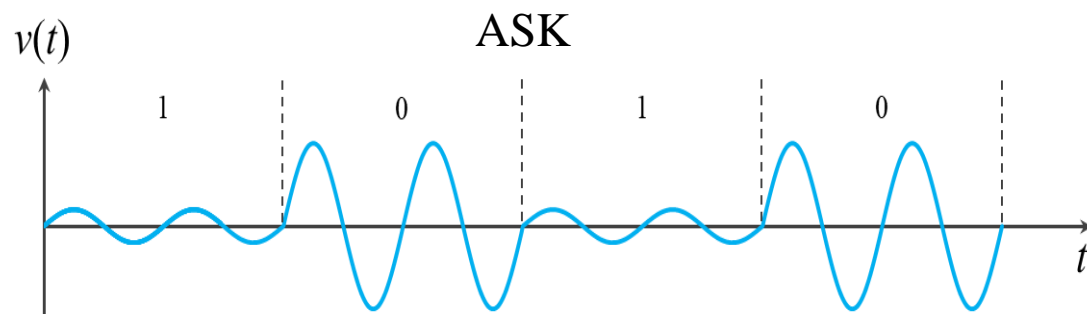
$$u_{\text{FM}}(t) = U_c \cos 2\pi [f_c + m u_{\Omega}(t)] t$$



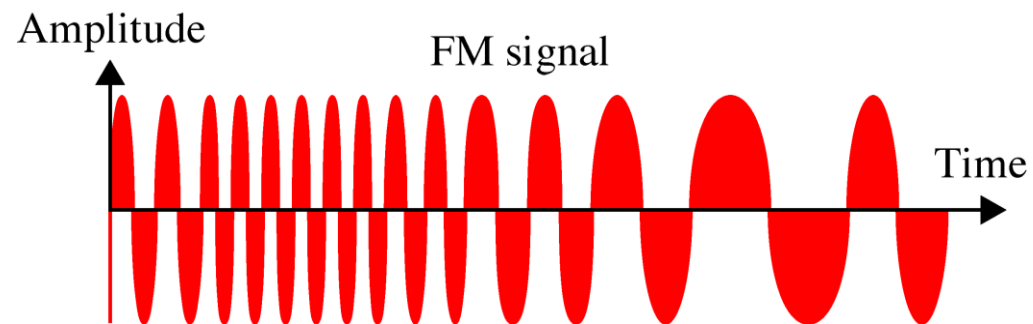
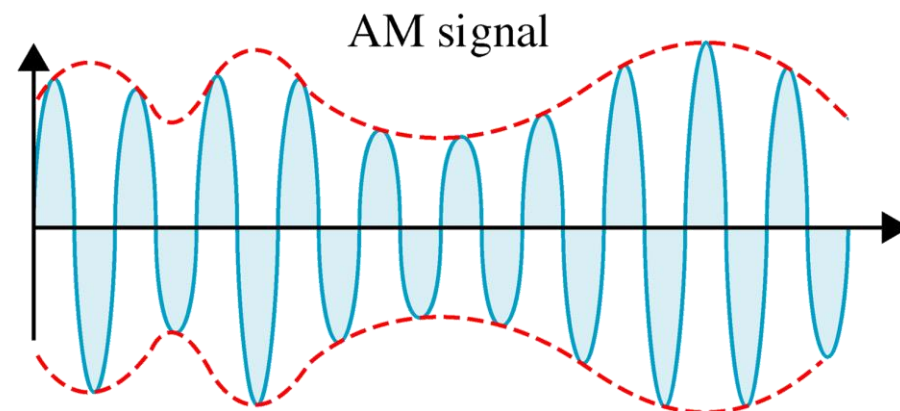
- ❖ 频带宽度与调制系数有关，调制系数大，频带宽。
- ❖ 调频中常取调频系数大于1，而调幅系数是小于1的，所以，调频波的频带宽度比调幅波的频带宽度大得多。
- ❖ 例如，调幅广播的调制系数在0.3左右，而调频广播的调制系数为5。

# 频带调制

## 数字信号

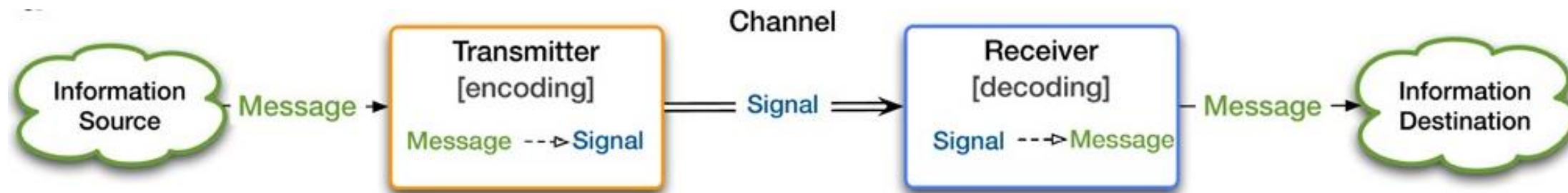


## 模拟信号



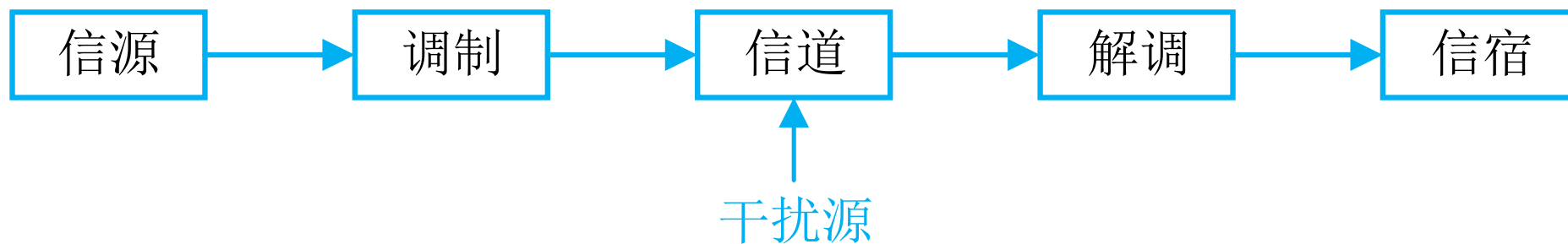
## 内容提要

- ❖ 信源编码
- ❖ 信道编码
- ❖ 调制技术
- ❖ 通信系统模型

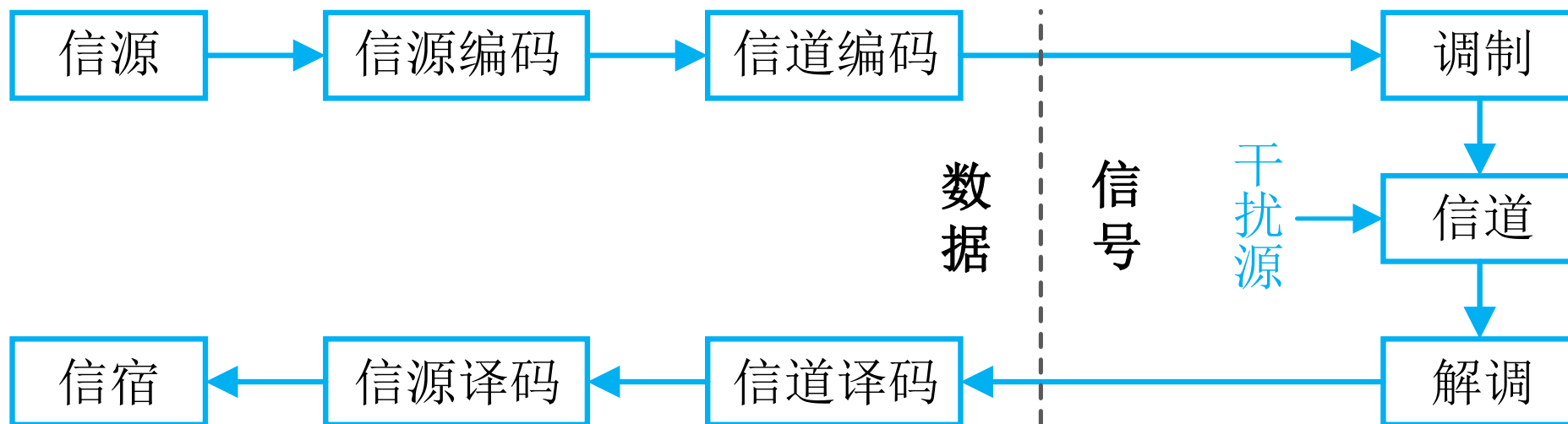


## 通信系统模型

模拟传输系统



数字传输系统





## 通信系统的主要性能指标

❖ 通信的任务是快速、准确地传递信息。因此，评价一个通信系统优劣的主要性能指标是系统的**有效性和可靠性**。

- 有效性是指在给定时间内所传输的信息内容的多少，是传输的“速度”问题；
- 可靠性是指接收信息的准确程度，也就是传输的“质量”问题。

### ❖ 模拟通信系统

- 有效性：用**有效传输频带**来度量
- 可靠性：用接收端最终输出**信噪比**来度量

### ❖ 数字通信系统

- 有效性：用**传输速率**来度量
- 可靠性：用**差错率**来度量

## 信噪比

❖ 消除噪声影响的有效方法之一是提高通信通道的信噪比。

❖ 信噪比 $SNR$  (Signal to Noise Ratio) 的定义:

$$SNR = \frac{Signal\ Power}{Noise\ Power}$$

❖ 通信通道上的信号功率相比噪声功率强得多，这样计算出来的 $SNR$ 值很大。所以，通常用**分贝 (dB)** 作为 $SNR$ 的单位，则有

$$SNR(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left( \frac{Signal\ Power}{Noise\ Power} \right)$$

❖ 理想状态下的无噪声通道，其 $SNR$ 是 $\infty$ 。

## 差错率

❖ 误码率SER (Symbol Error Rate) , 是指发生差错的码元数在传输总码元数中所占的比例。

更确切的说, 误码率是码元在传输系统中被传错的概率, 即:

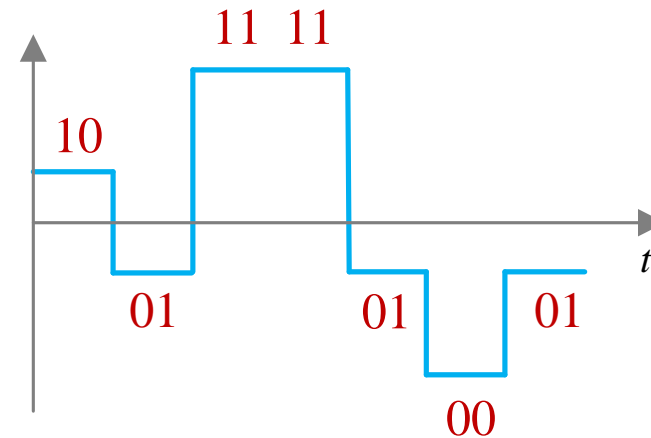
$$SER = \frac{Errors}{Total\ Number\ of\ Symbols}$$

❖ 误比特率 BER (Bit Error Rate) , 是指发生差错的比特数占传输总比特数中所占的比例, 即:

$$BER = \frac{Errors}{Total\ Number\ of\ Bits}$$

❖ 在二进制中, 有:  $SER = BER$

$$SER = BER \times \log_2 M \quad M \text{ 为码元状态数}$$



## 2.3 知识点

2.3.1 信源编码 ⊖ 将信源的数据数字化，以实现数字化传输

数据压缩

2.3.2 信道编码 ⊖ 对原数据添加冗余信息，使系统具有一定的纠错能力和抗干扰能力

2.3.3 调制技术

- 基带调制 ⊖
  - 数字信号使用数字信道传送 ⊖ 非归零码、曼彻斯特编码.....
  - 模拟信号使用数字信道传送 ⊖ 脉冲编码调制、增量脉码调制..... (数字化)
- 频带调制 ⊖
  - 数字信号使用模拟信道传送 ⊖ ASK、FSK、PSK
  - 模拟信号使用模拟信道传送 ⊖ AM、FM、PM

2.3.4 通信系统模型

- 模拟传输系统 ⊖ 信源-调制-信道-解调-信宿
- 数字传输系统 ⊖ 信源-信源编码-信道编码-调制-信道-解调-信道译码-信源译码-信宿

# The End.



中国大学MOOC

周成伟  
zhouchw@zju.edu.cn