

信息与电子工程导论

Introduction to Information Science and Electronic Engineering

2.3 编码和调制

章献民 主编

浙江大学出版社

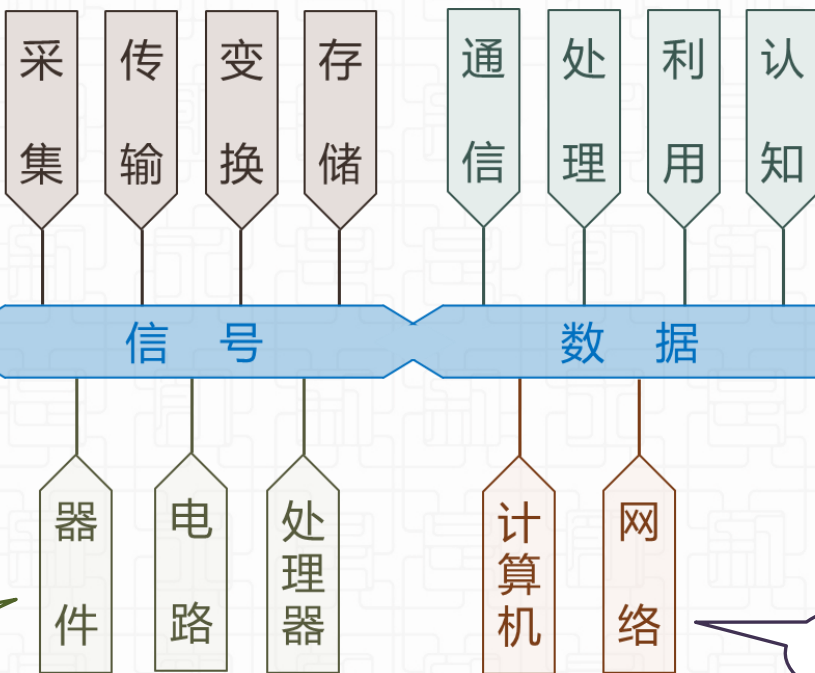
2023年9月

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 电磁场与波

2 信号与数据

场与波



3 电子器件与电路

- 3.1 电路模型和基本定律
- 3.2 晶体管和集成电路
- 3.3 集成运算放大器

4 逻辑与数字系统

- 4.1 数字逻辑和电路
- 4.2 组合逻辑和时序逻辑
- 4.3 微处理器和计算机系统
- 4.4 嵌入式系统
- 4.5 EDA技术

1 信息与信息技术概述

信息

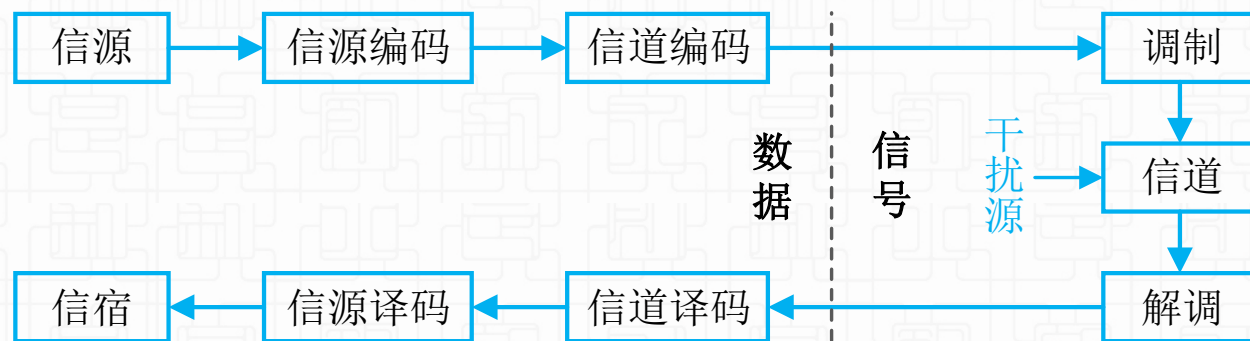
- 1.1 信息
- 1.2 信息科学技术概述
- 1.3 知识图谱

5 互联与计算

- 5.1 通信与网络
- 5.2 物联与数联
- 5.3 计算与智能

内容提要

- ❖ 信源编码
- ❖ 信道编码
- ❖ 信号调制
- ❖ 通信系统模型

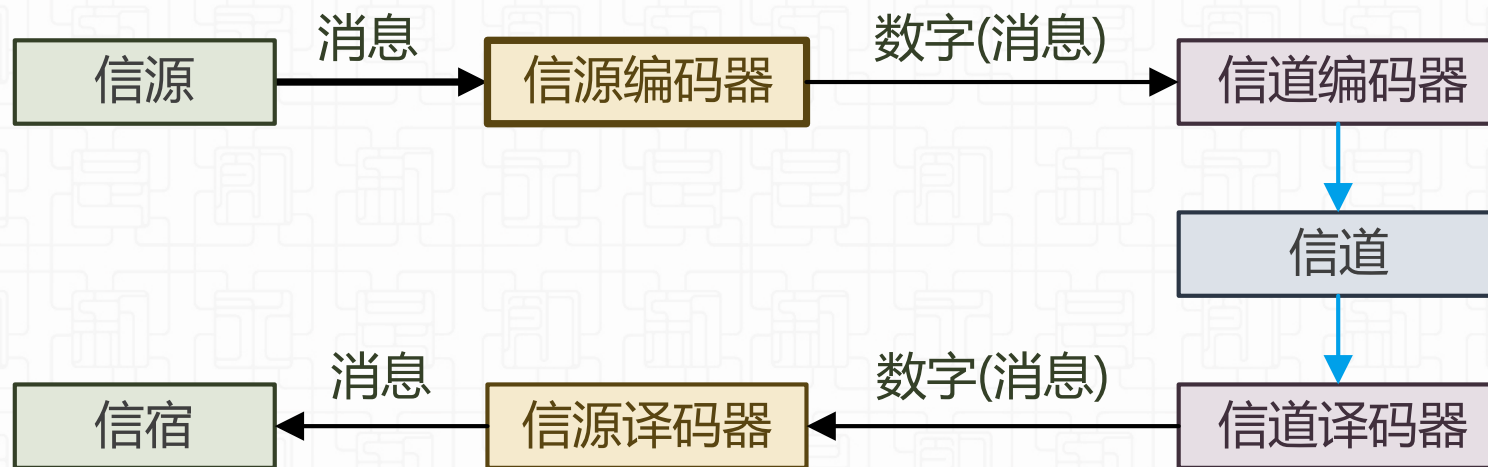


编码

- ❖ 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、数字或其他对象编成数码，或将信息、数据转换成规定的电脉冲信号，都属于编码的过程。解码（译码）是编码的逆过程。
- ❖ 编码在电子计算机、电视、遥控和通信等方面广泛使用，我们在之前介绍的数据和信号的数字化过程中就有信息编码的环节。
- ❖ 编码在现代通信系统中起着至关重要的作用，已经成为现代通信系统中不可或缺的一个重要组成部分。数字通信系统中编码分为信源编码和信道编码两类。
- ❖ 通过编码对发送端要传输的信息进行某种变换，使传输信号与信道相匹配，并提供给信息以某种保护以防止信息受到干扰。编码和解码还可以加密信息，让信息的传输更具安全性。

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**。



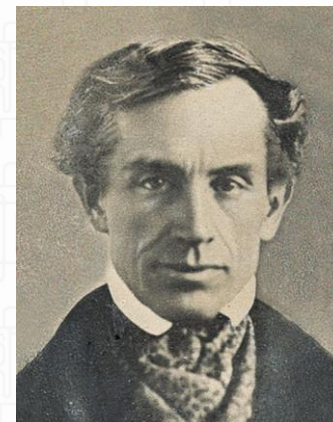
- ❖ **信道编码器**把信源编码输出的数字序列变换成适合于信道传输的，由信道入口符号组成的序列。其最主要作用是要**对其输出序列提供保护，以抵抗信道噪声和干扰**。

莫尔斯电码 (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

❖ 莫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。

香农第一定理

❖ 可变长无失真信源编码定理。

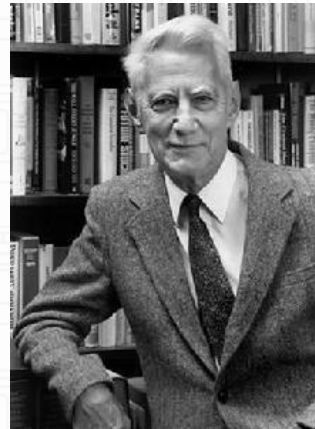
❖ 信息论中最重要的两个定律之一。

❖ 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

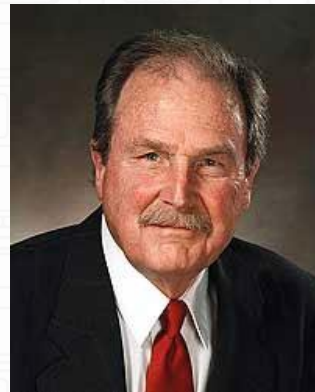
- ❖ 信息是用不确定性的量度定义的，一个消息的可能性愈小，其信息愈多；而消息的可能性愈大，则其信息愈少。
- ❖ 通常我们衡量的都是一个系统的信息量。如果一个系统内存在 N 个事件，若它们的概率分别为 p_1, p_2, \dots, p_N ，则这些事件的自信息的平均值为

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

- 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。

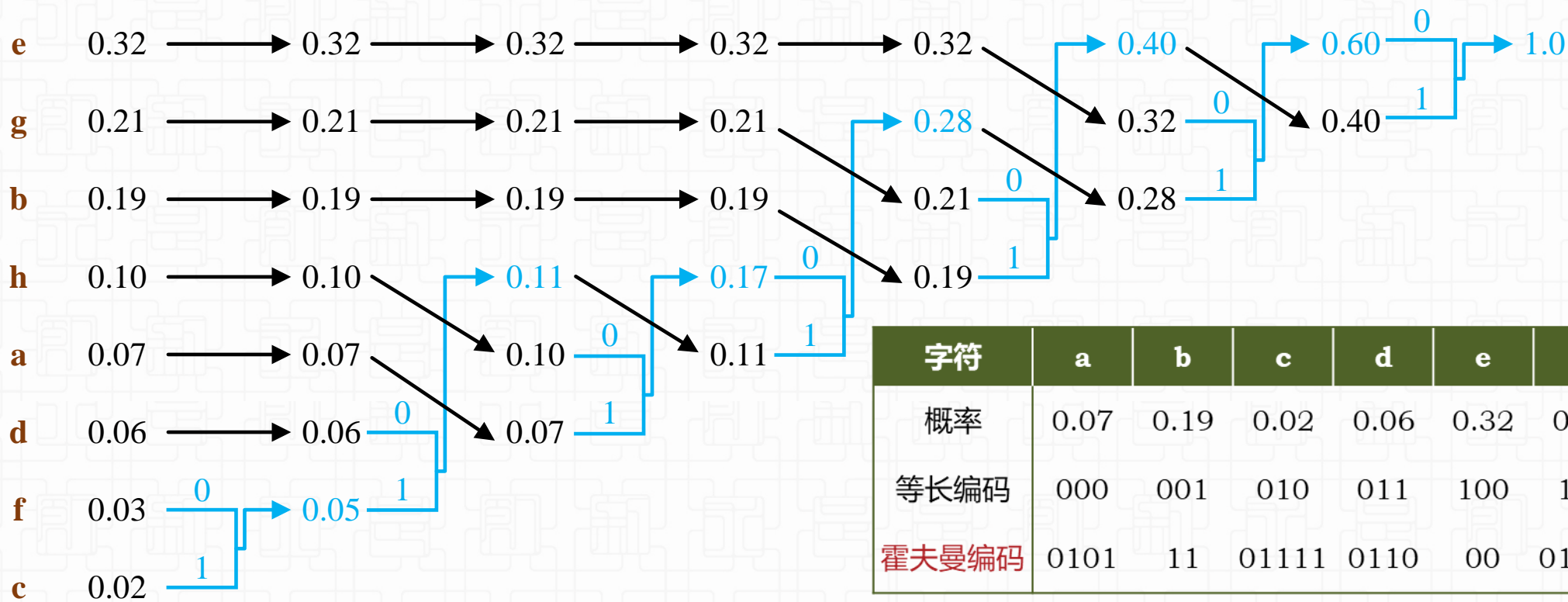


David Albert Huffman
Aug 9, 1925—Oct 7, 1999

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。

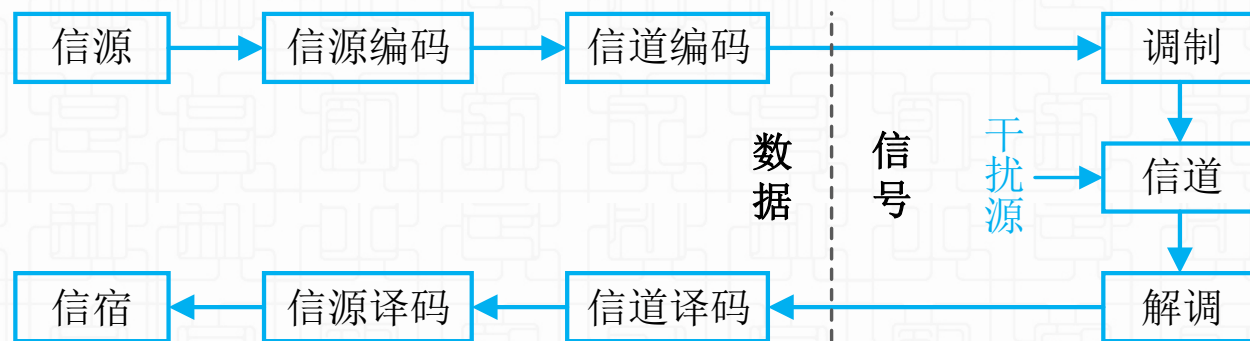
❖ 1970 年代开始的算术编码，虽然平均码长不是最佳，计算复杂性随码长**线性增加**，因此是一种实用的码。

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。

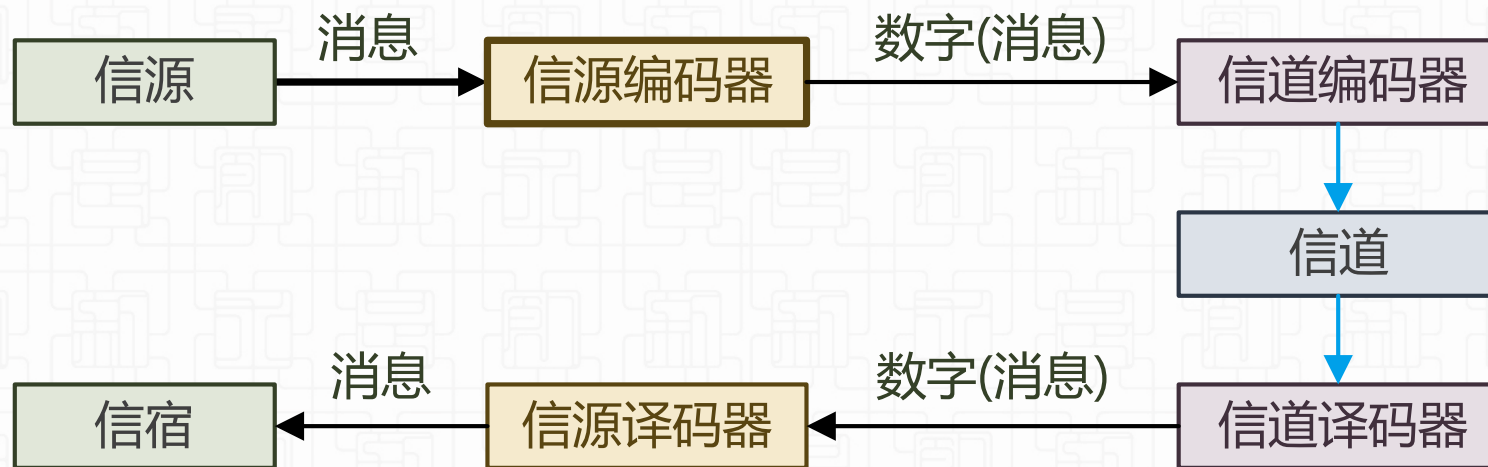
内容提要

- ❖ 信源编码
- ❖ 信道编码
- ❖ 信号调制
- ❖ 通信系统模型



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**。

二代身份证编码规则及校验码

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

❖ 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

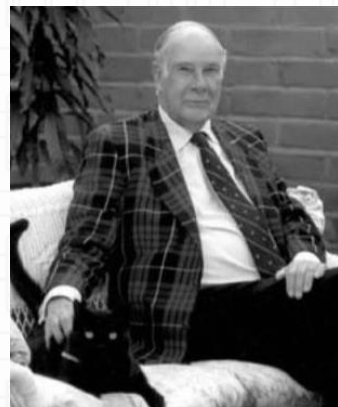
信道编码

- ❖ 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

❖ 贝尔实验室数学家

❖ 汉明码在传输的消息流中插入**校验码**，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。



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

❖ 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。

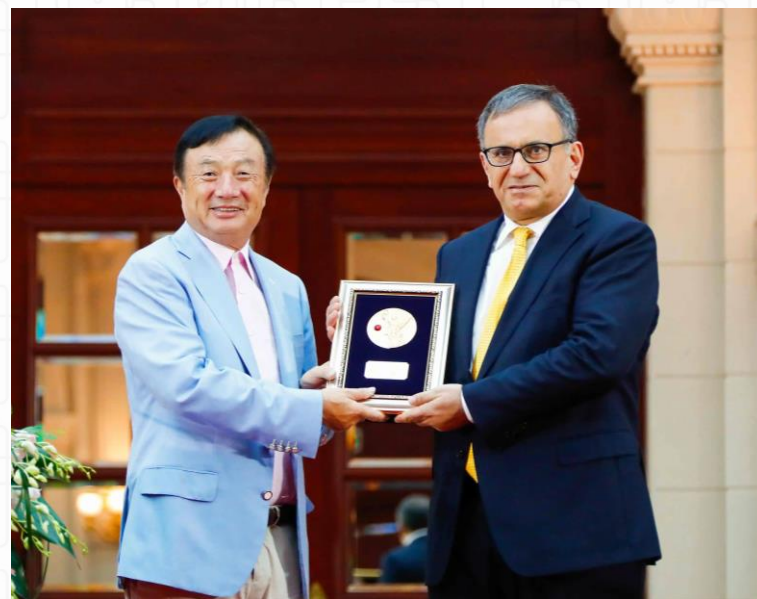
极化码

❖ 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**。

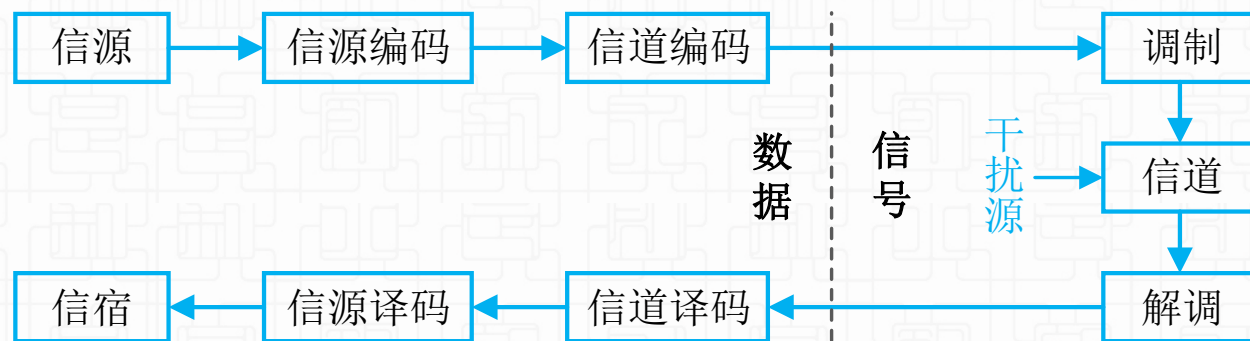
❖ 2018年7月26日, 华为为极化码最早提出者, 土耳其**Erdal Arikan**教授颁发特别奖项。

- “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。”



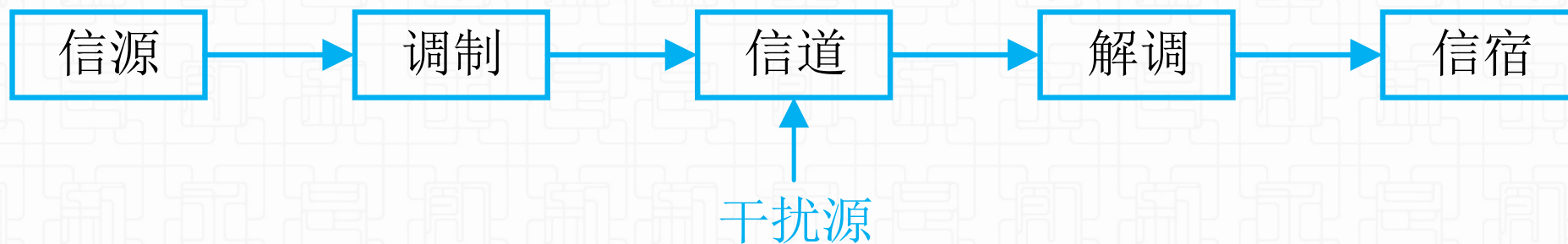
内容提要

- ❖ 信源编码
- ❖ 信道编码
- ❖ 信号调制
- ❖ 通信系统模型

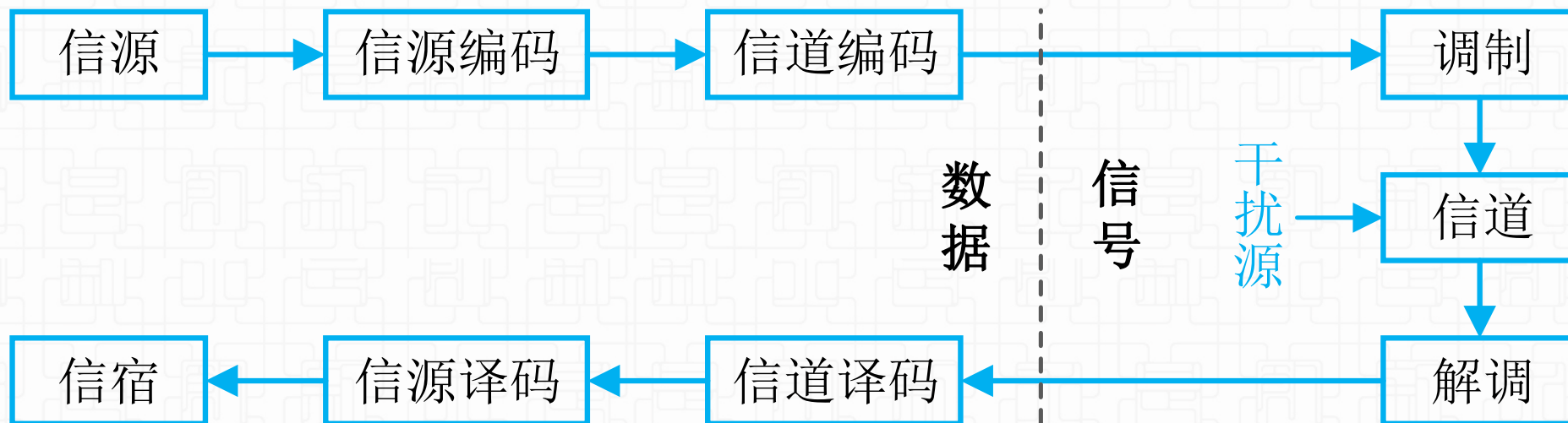


通信系统模型

模拟传输系统



数字传输系统



信号调制

- ❖ 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。

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

↑
瞬时振幅（包络线振幅）

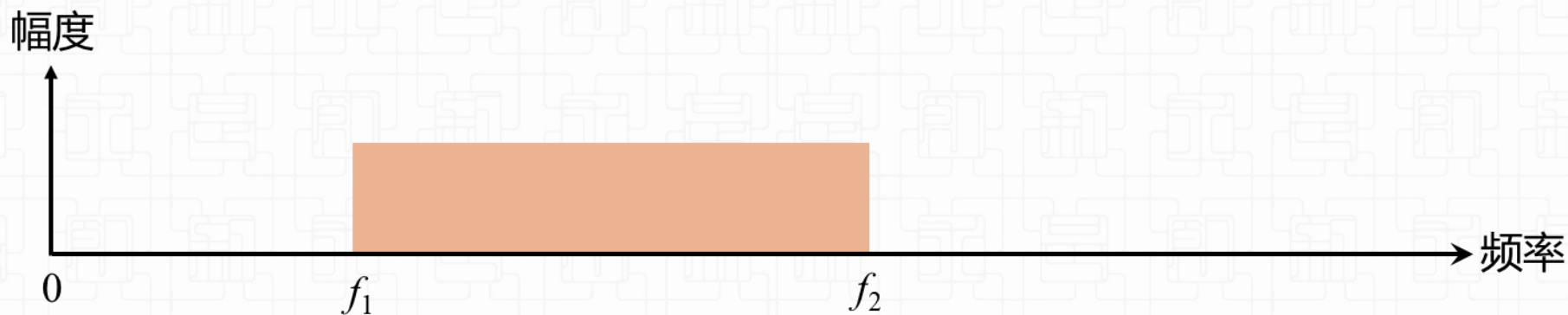
↑
瞬时频率

↑
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。

频带传输

- ❖ 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，需要把基带信号的频谱搬移到适合信道传输的通带内，变换后的信号就是频带信号。



- ❖ 频带信号经过信道传输，在接收端通过解调，再恢复为原始基带信号，这种传输称为频带传输系统。基带信号与频带信号之间的转换是由调制解调技术完成的。

三大移动运营商4G和5G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

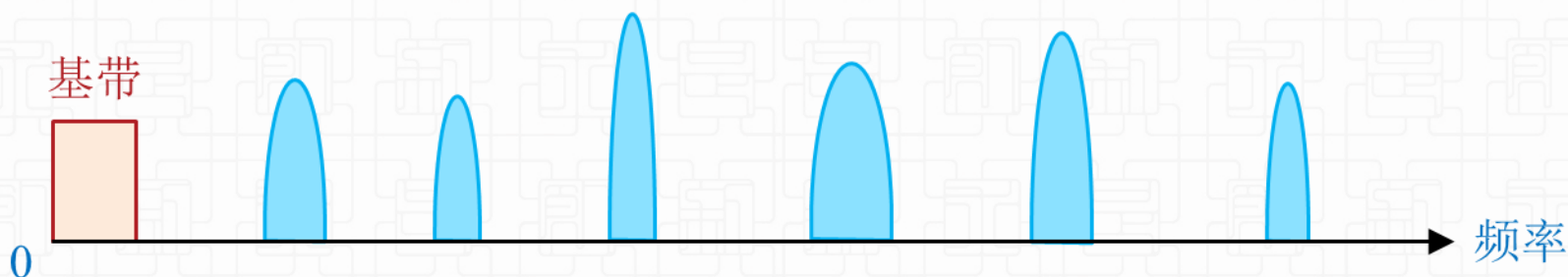
- 4G: 2300-2320 MHz、2555-2575 MHz、1745-1765 MHz、1840-1860 MHz
- 5G: 3500-3600 MHz

❖ 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。

模拟调制

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

❖ 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**)

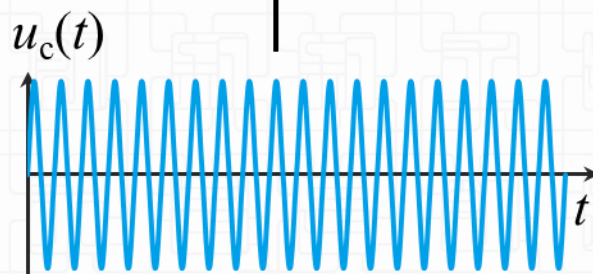
- 正弦载波的**瞬时相位偏移**随调制信号线性变化。

幅度调制 (AM)

$$u_{\Omega}(t) = \sum_n U_n \cos(\Omega_n t)$$



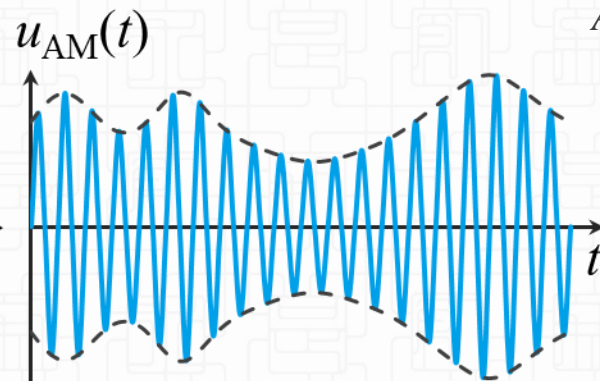
调制器



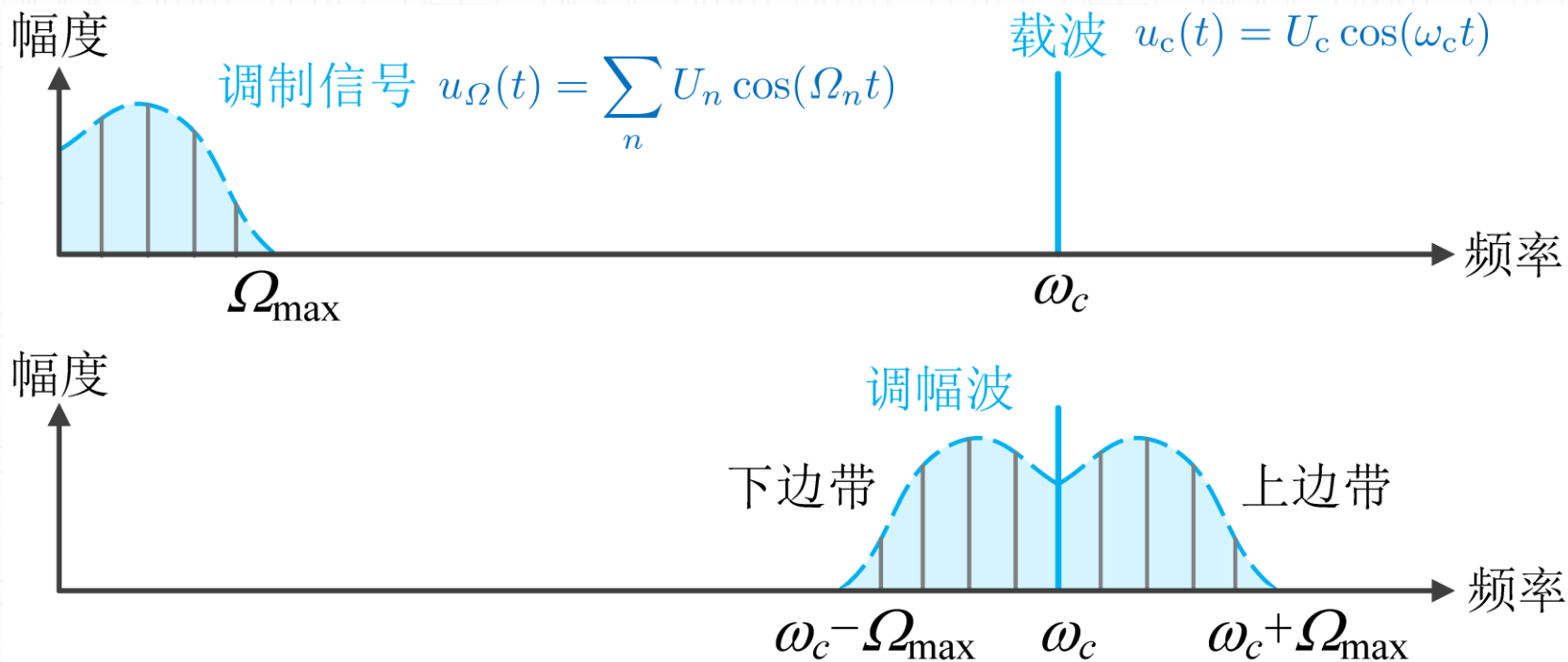
$$u_c(t) = U_c \cos(\omega_c t)$$

$$u_{AM}(t) = U_c [u_{\Omega}(t) + A_0] \cos(\omega_c t)$$

A_0 是直流信号

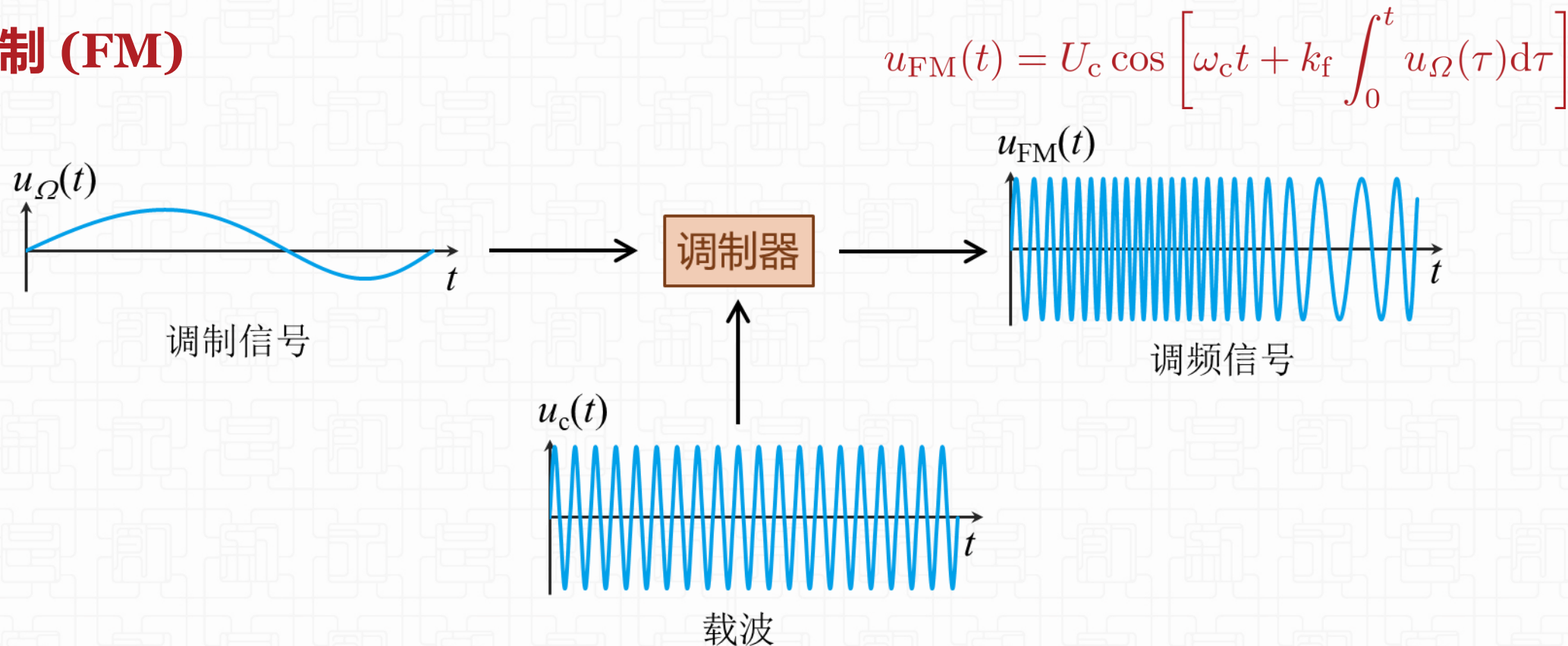


AM 频谱和带宽



$$u_{\text{AM}}(t) = U_c \left[A_0 \cos(\omega_c t) + \frac{1}{2} \sum_n U_n \cos(\omega_c + \Omega_n)t + \frac{1}{2} \sum_n U_n \cos(\omega_c - \Omega_n)t \right]$$

频率调制 (FM)

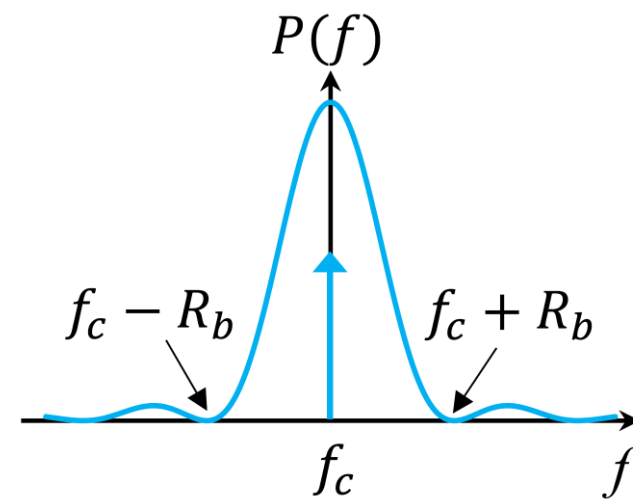
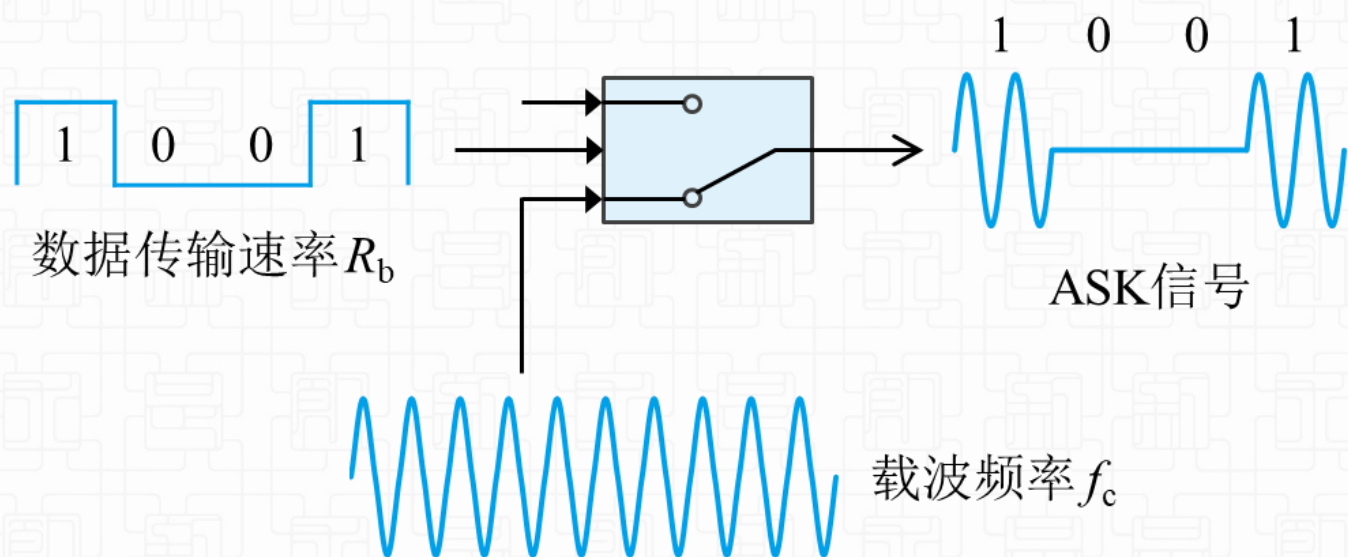


- ❖ 频带宽度与调制系数有关，调制系数大，频带宽。
- ❖ 调频中常取调频系数大于1，而调幅系数是小于1的，所以，调频波的频带宽度比调幅波的频带宽度大得多。例如，调幅广播的调制系数在0.3左右，而调频广播的调制系数为5。

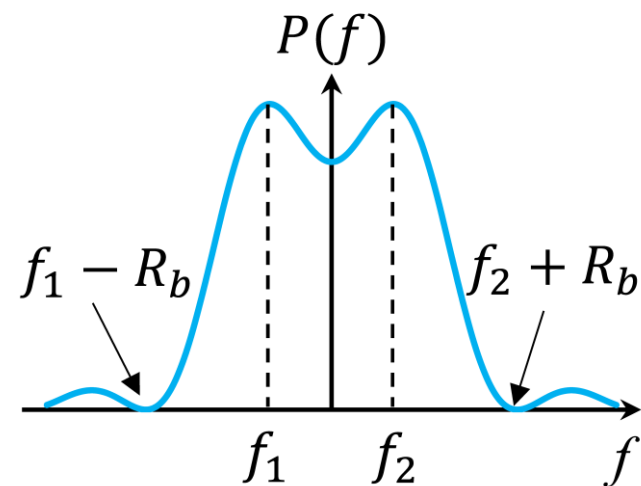
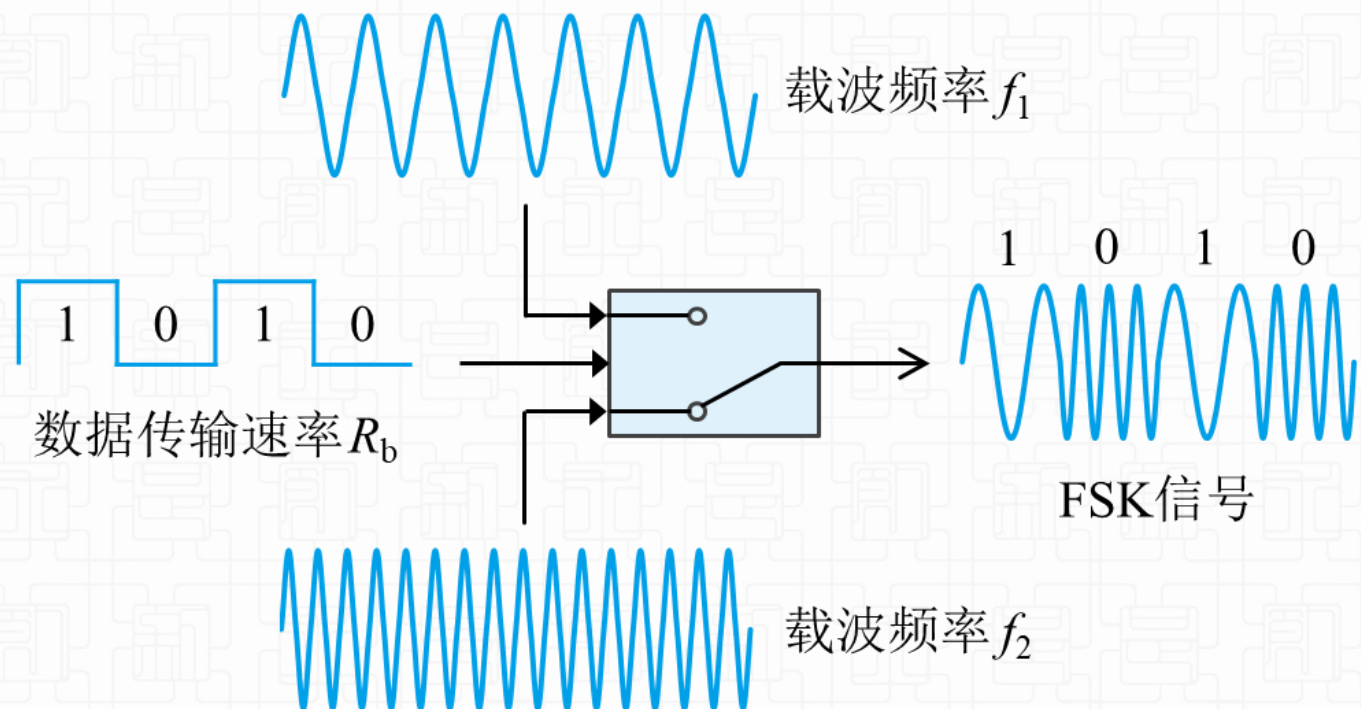
数字调制

- ❖ 数字调制是以数字信号作为调制信号的调制技术，一般采用**正弦波作为载波**，这种数字调制又称为**载波键控**。
- ❖ 数字频带调制的过程就是将二进制数据调制到模拟载波上。一个正弦波可以通过三个特性来定义：**振幅、频率和相位**，当改变其中任何一个特性时，就有了波的另一个形式。如果用原来的波表示二进制数“1”，那么波的变形就可以表示二进制数“0”，反之亦然。
- ❖ 利用正弦波的两个特性，至少有三种将数字数据调制到模拟信号的机制：
 - **幅移键控** (Amplitude-Shift Keying, **ASK**)
 - **频移键控** (Frequency-Shift Keying, **FSK**)
 - **相移键控** (Phase-Shift Keying, **PSK**) 。

幅移键控 (ASK)

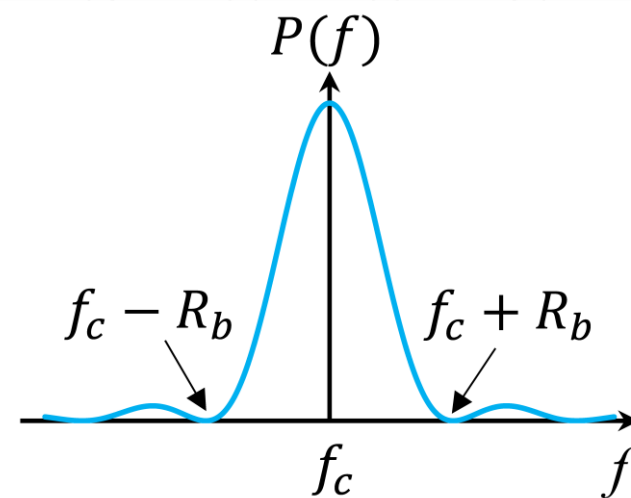
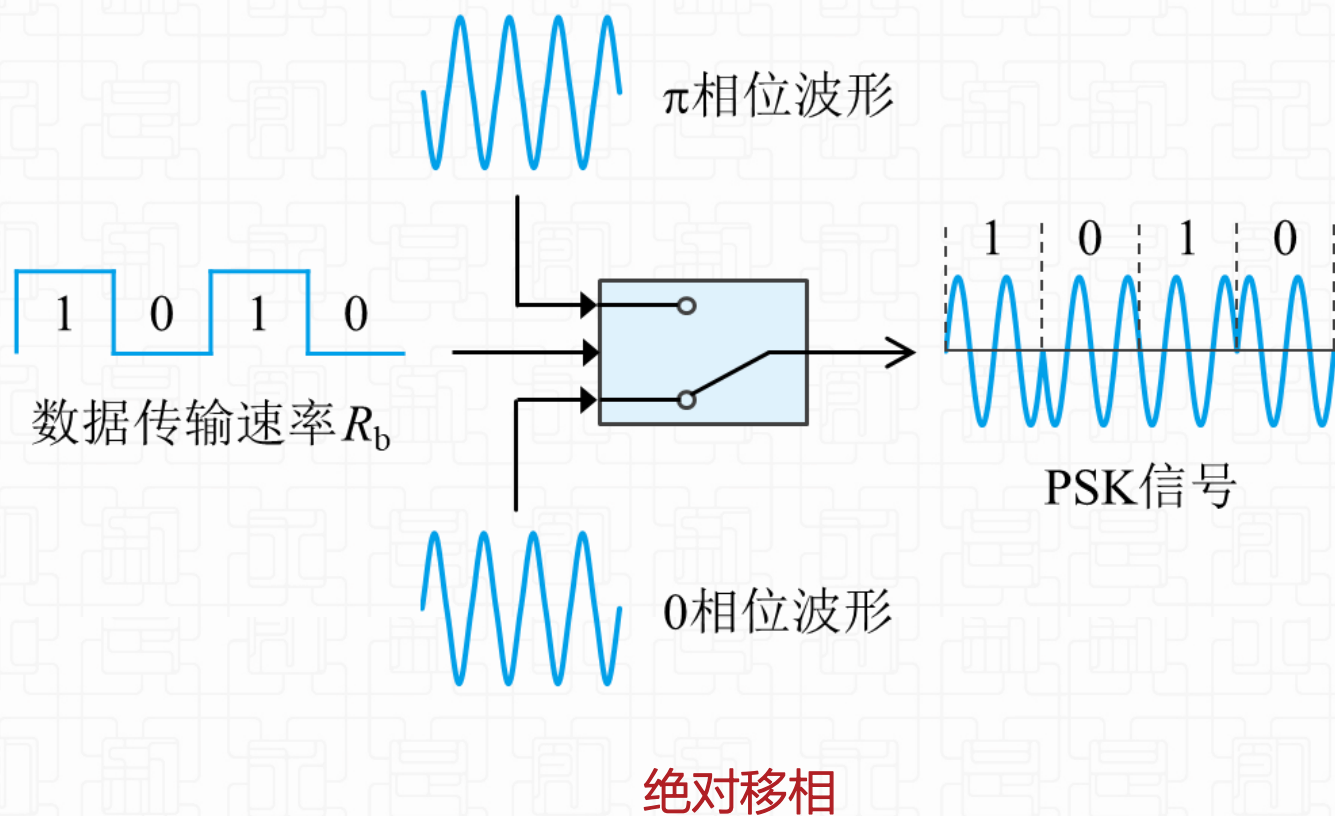


频移键控 (FSK)



相移键控 (PSK)

❖ 分为绝对移相和相对移相



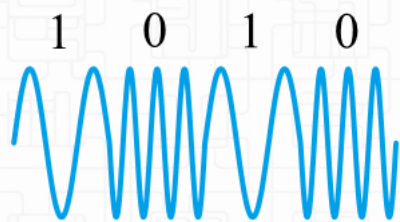
频带调制

数字信号

ASK

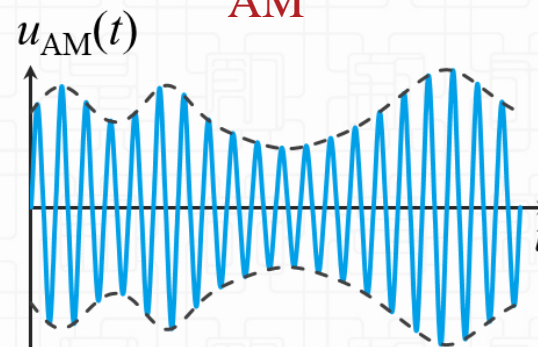


FSK

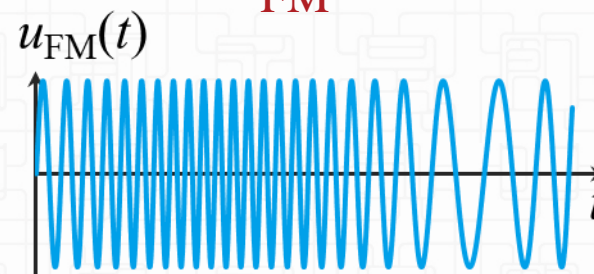


模拟信号

AM

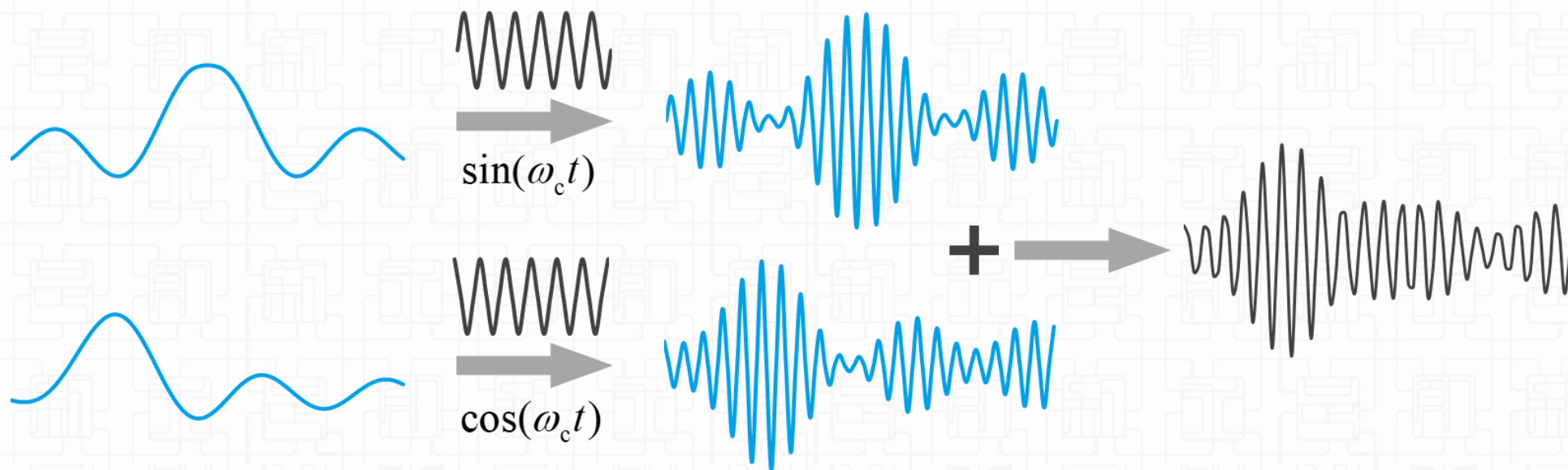


FM



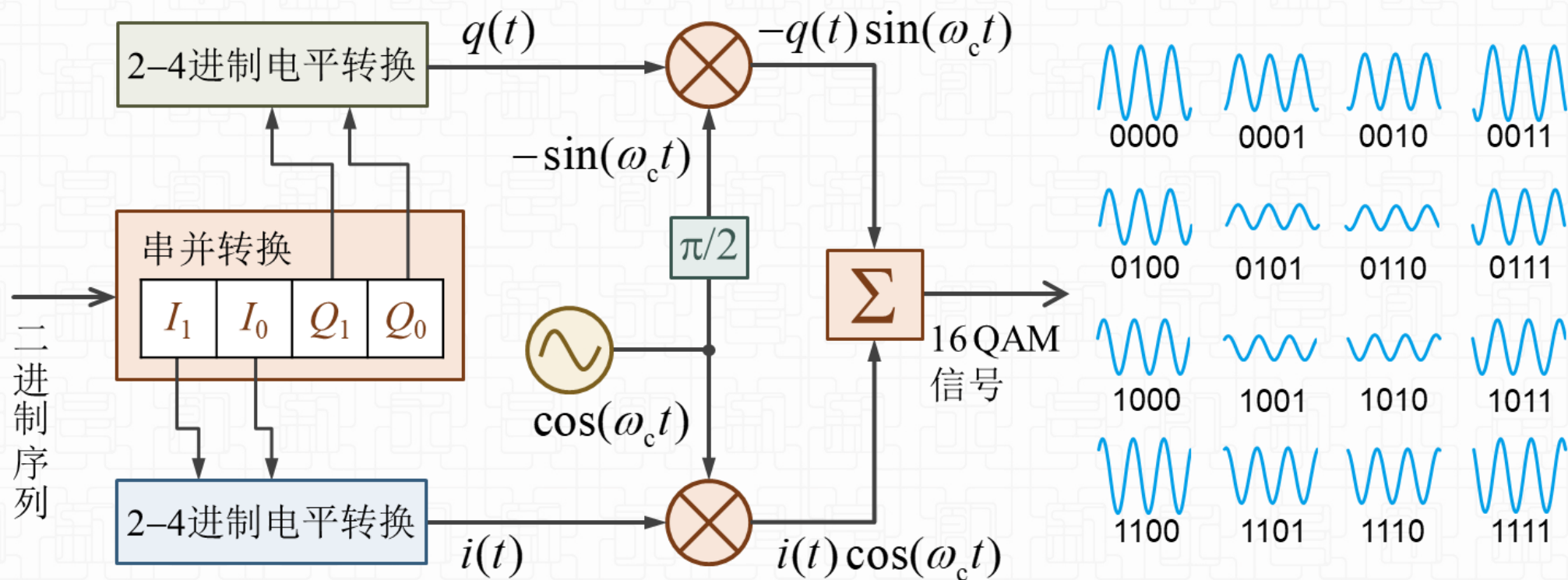
正交振幅调制 (QAM)

❖ QAM 是一种在两个正交载波上进行幅度调制的调制方式。这两个载波通常是相位差为 $\pi/2$ 的正弦波，因此被称作**正交载波**。



❖ 两路载波一路叫 **I 路** (In-Phase, 同相)，一路叫 **Q 路** (Quadrature, 正交)，所以正交调制方式又被称为 **IQ 调制**。

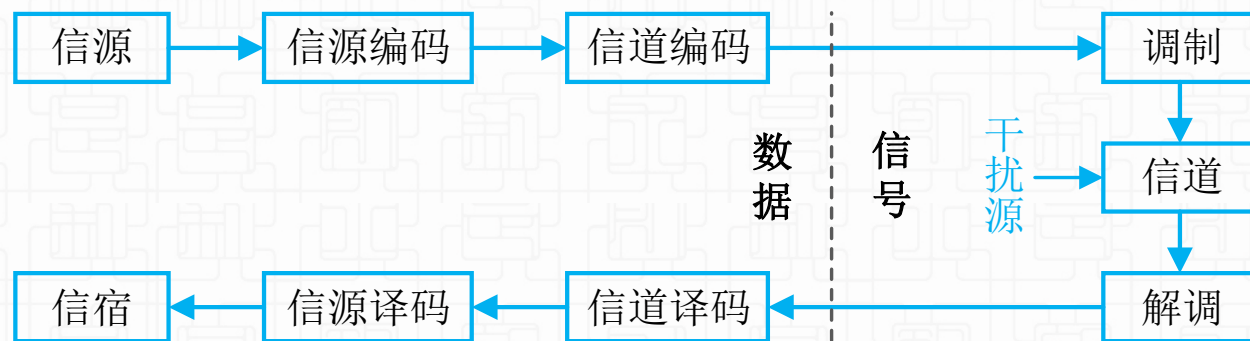
16QAM调制



❖ QAM技术具有频带利用率高、抗噪声能力强等优点，被广泛应用于高速数据传输系统中。

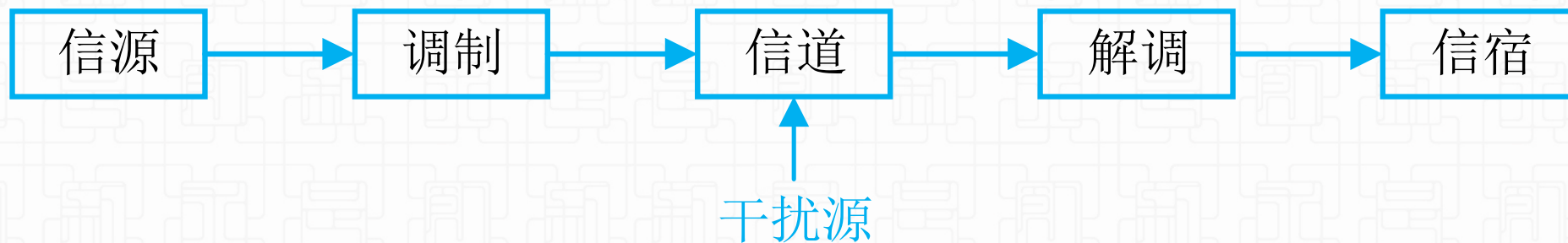
内容提要

- ❖ 信源编码
- ❖ 信道编码
- ❖ 信号调制
- ❖ 通信系统模型

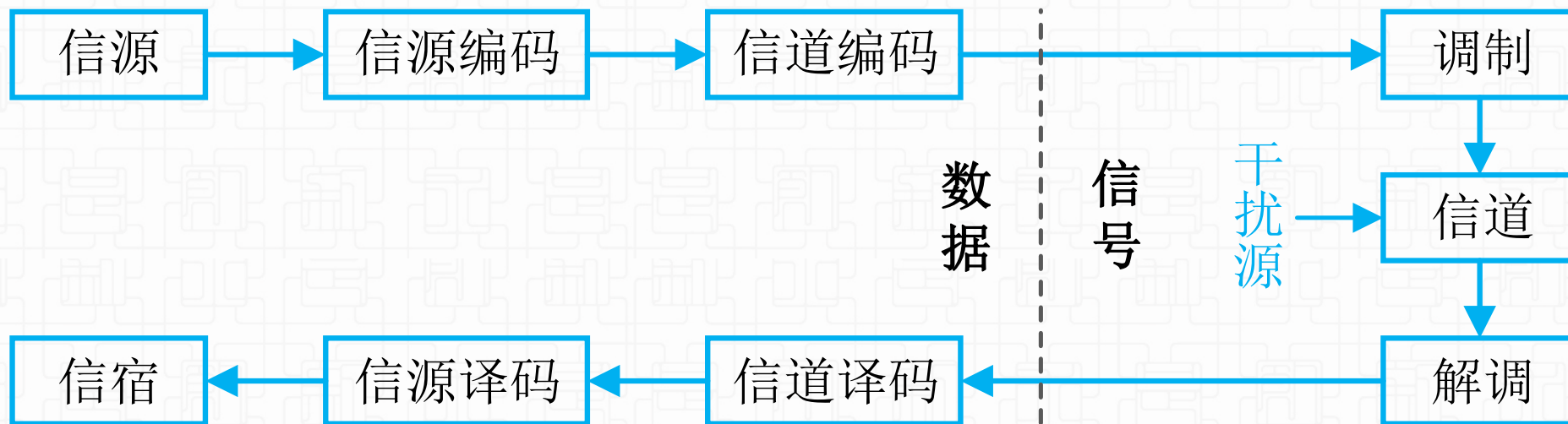


通信系统模型

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:

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

❖ 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

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

❖ 理想状态下的无噪声通道，其SNR是 ∞ 。

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:

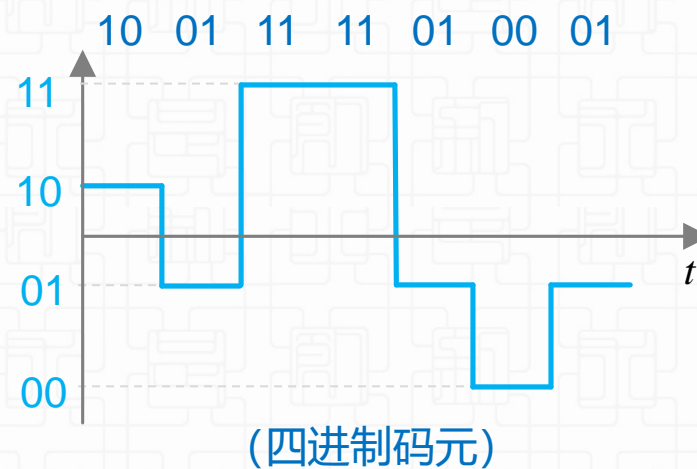
$$SER = \frac{Errors}{Total\ Number\ of\ Symbols}$$

❖ 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: $SER = BER$

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



The End.



中国大学MOOC

章献民

zhangxm@zju.edu.cn