

# 数据通信



## 1-6章复习课

殷亚凤

[yafeng@nju.edu.cn](mailto:yafeng@nju.edu.cn)

<http://cs.nju.edu.cn/yafeng/>  
Room 901, Building of CS



# 第1-6章内容概览

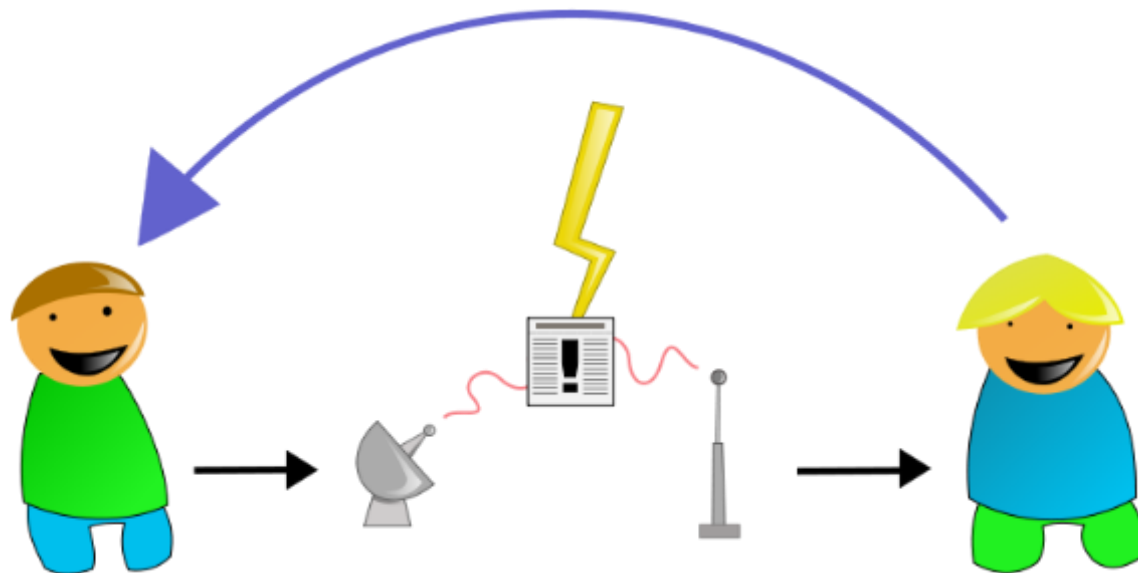


- 通信简史
- 数据通信综述
- 数据传输
- 传输媒体
- 信号编码技术
- 差错检测与纠正



## 第2章 数据通信综述

# 通信模型

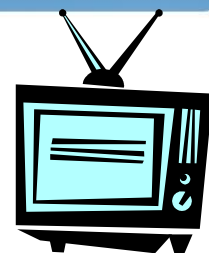
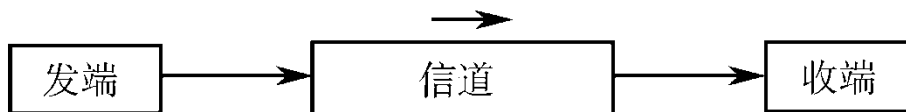


源系统

目的系统

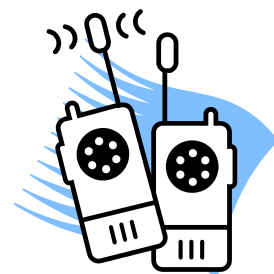
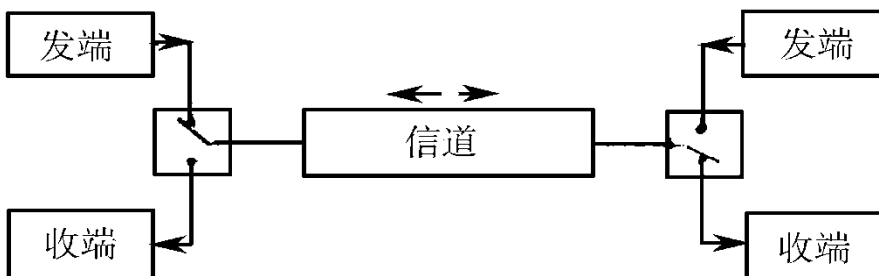
# 通信传输

- **单工**: 数据信息在通信线上始终向一个方向传输



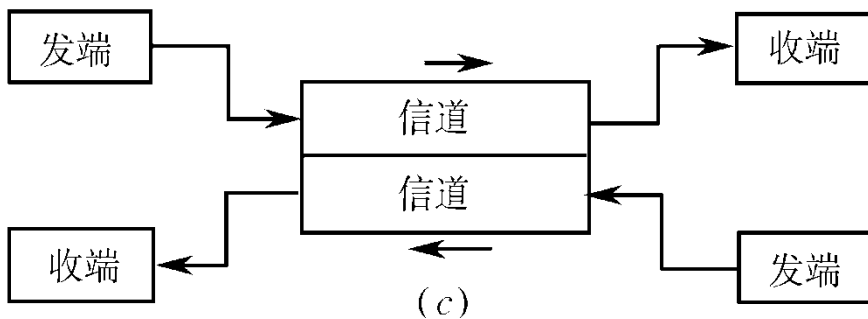
电视

- **半双工**: 可以双向传输, 但必须交替进行, 同一时刻一个信道只允许单向传送



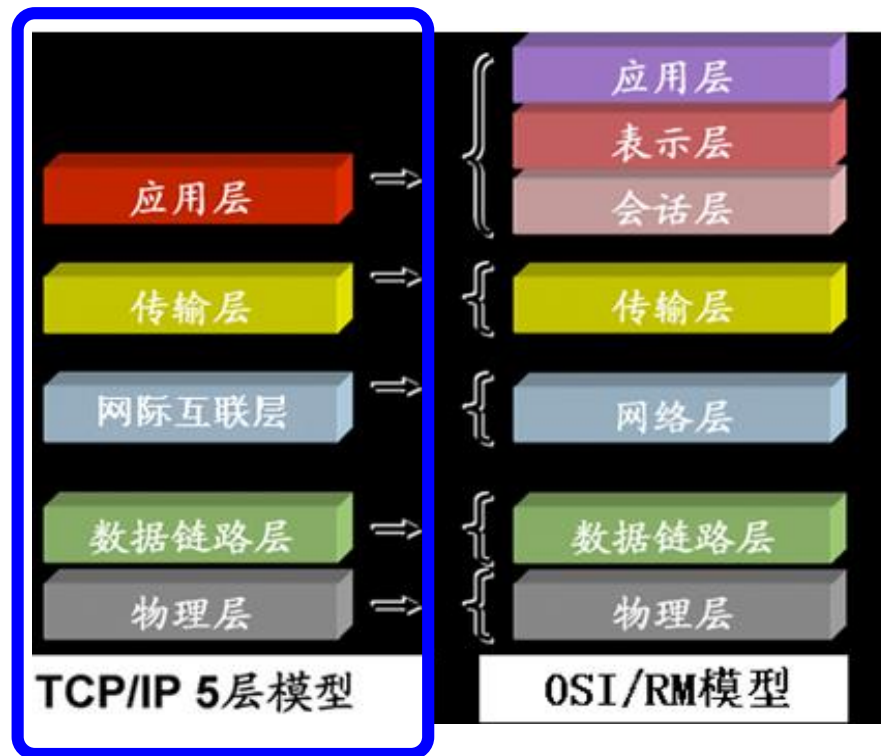
对讲机

- **双工**: 可同时进行双向的数据传输



电话

# 协议体系结构



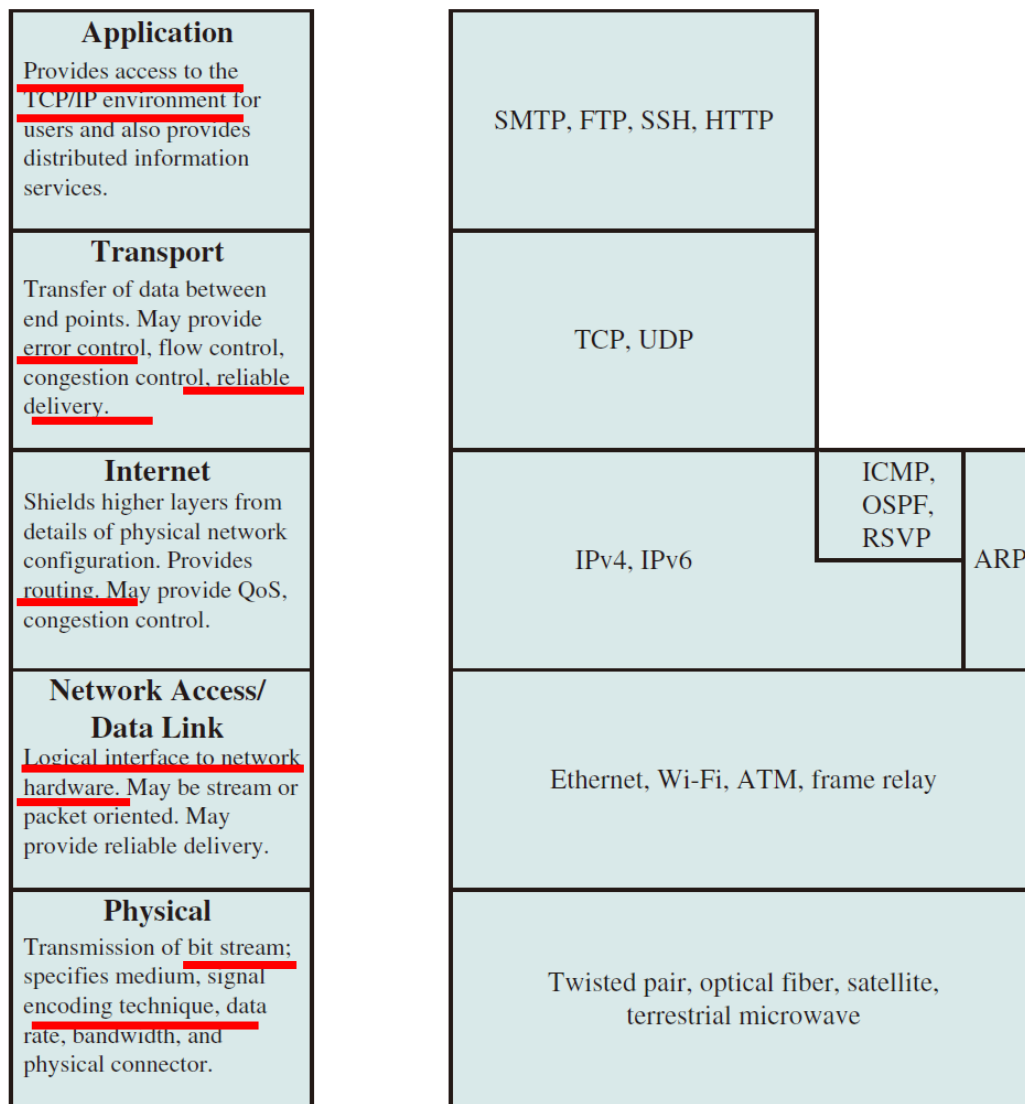
协议体系结构分层的好处:

- 为应用提供一个抽象, 对应用设计者隐藏网络的复杂性
- 促进标准化
- 各层相互独立, 技术升级和扩展灵活性好
- 便于方案设计和维护

# TCP/IP协议体系结构



- **应用层：**用于支持各种不同应用程序的逻辑
- **运输层：**提供端到端的传输服务
- **网际层：**提供多个网络的路由选择功能，能够让数据跨越多个互联的网络
- **数据链路层：**为与同一个网络相连的两个系统提供网络接入
- **物理层：**负责数据传输设备与传输媒体的物理接口



TCP/IP各层及其协议举例

# 套接字



**套接字**：端口值和IP地址组合，在整个互联网中是唯一的  
(在编写程序时，当套接字被用来定义API时，用三个要素标识：协议、本地地址、本地进程)

- **流套接字** (stream socket)
  - TCP, 面向连接的可靠数据传输, 并保证按发送时的顺序到达
- **数据报套接字** (datagram socket)
  - UDP, 快速, 交付没有保证, 也不一定会保留初始顺序
- **原始套接字** (raw socket)
  - 直接访问底层协议, 如IP



# 套接字的通信

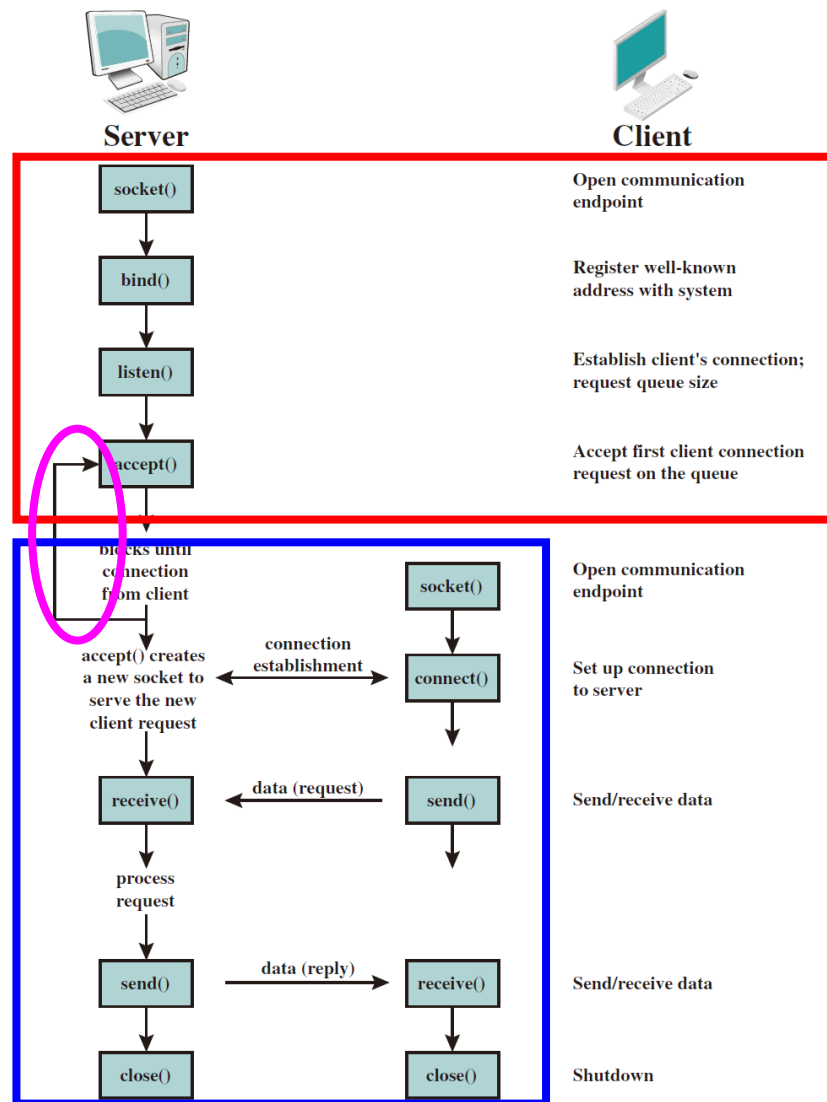


## • 服务器端的连接:

- 发出listen()调用, 表明指定的套接字已做好准备接受传入的连接;
- 传入的连接请求被放置在队列中, 直至服务器发出一个匹配的accept();
- accept()为请求的连接返回一个新的文件描述符, 创建新的套接字, 以便本地应用程序可以继续侦听其他请求

## • 客户端的连接:

- 发出connect(), 连接后在本地描述符中填写新的远程IP和端口号;
- 连接后, 发送接收数据



任何时候任何一方, 都可以用close()关闭连接

面向连接的协议的套接字系统调用



## 第3章 数据传输

# 概念与术语



## 导向媒体

(电磁波在导线引导下  
沿某一物理路径前进)

双绞线, 光纤  
同轴电缆

## 非导向媒体

(无线传输, 提供传输电磁波  
的方式, 但不引导传输方向)

空气, 真空  
海水

## 点对点 (导向媒体)

- **直连链路**
- 只有2个设备共享

## 多点 (导向媒体)

- 有2个以上的设备共享同一个传输媒体

# 概念与术语



- 数据：传达某种意义或信息的实体
- 信号：数据的电气或电磁表示方式
- 发送信号：信号沿适当媒体的物理传输
- 传输：用传播并处理信号的方式进行的  
数据通信过程

# 概念与术语

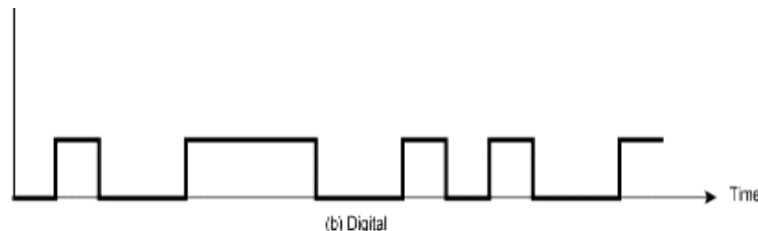
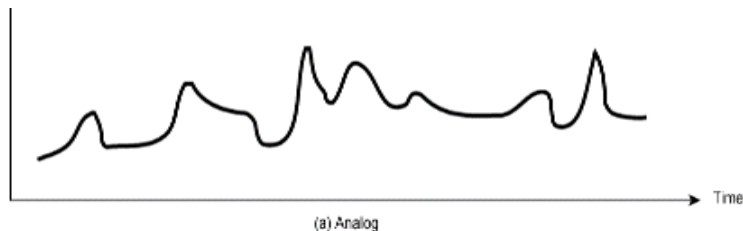


- 模拟与数字数据：

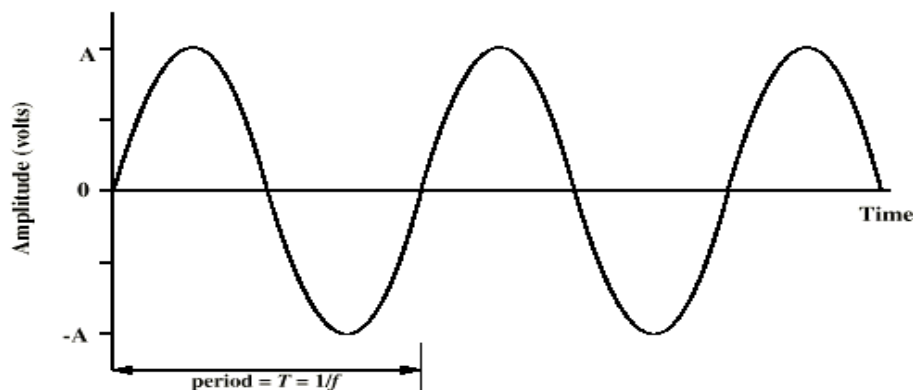
- 模拟数据：一段时间内具有连续的值，如传感器数据(温度)
- 数字数据：值是离散的，如计算机产生的数据(文本、数字)

- 模拟与数字信号

- 模拟信号，连续变化的电磁波，可以在导向和非导向媒体传输，如音频信号
- 数字信号，电压脉冲序列，在导向媒体传输，如文本编码(ASCII, GB)



# 正弦波:周期连续信号



$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \Phi)$$

- **振幅** Peak Amplitud **A** (volt) 一段时间内信号值或信号强度的峰值
- **频率** Frequency **f** (Hz) 信号循环的速度
- **周期** Period **T** (sec) 信号重复一周所花的时间  $T = 1/f$
- **相位** Phase  **$\phi$**  一个周期内信号在时间轴的相对位置  $t/T$  的余数
- **波长** Wavelength  **$\lambda$**  信号一个周期所占的空间长度  $\lambda = vT$ ,  $v^* = 3 \times 10^8$  m/s

# 傅立叶分析



## 周期信号的傅立叶级数表示

- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和
- 周期信号的频谱包含离散的频率分量
  - 基频 (Fundamental frequency); 谐频 (Harmonic frequency);
  - 直流分量 (DC component)

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(2\pi n f_0 t) + B_n \sin(2\pi n f_0 t)]$$

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$

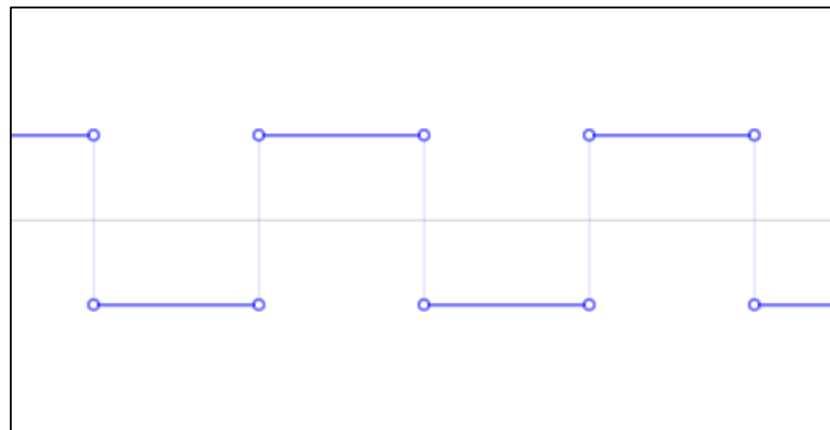
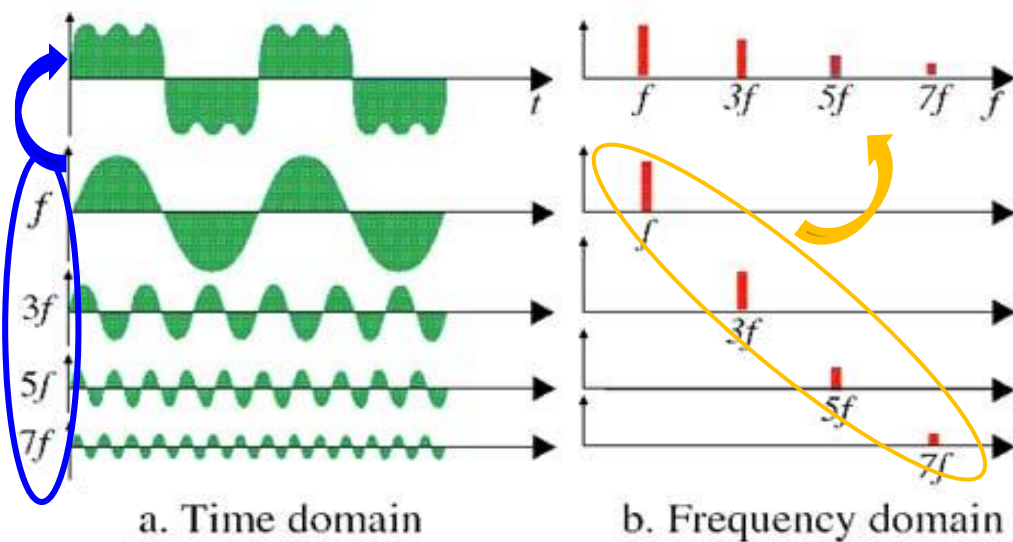
$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$$



# 方波的时域与频域表示



$$s(t) = A \times \frac{4}{\pi} [\sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \frac{1}{7} \sin 7\omega_1 t]$$





# 信号的频谱与带宽



频谱

- 信号所包含的频率范围

绝对  
带宽

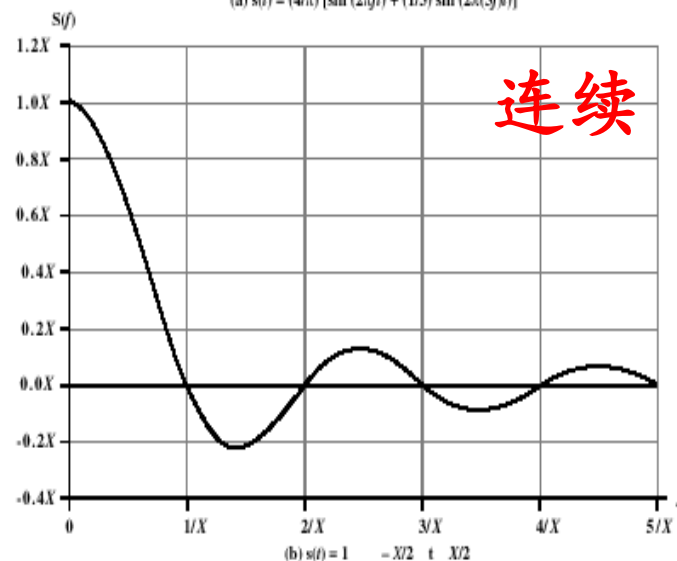
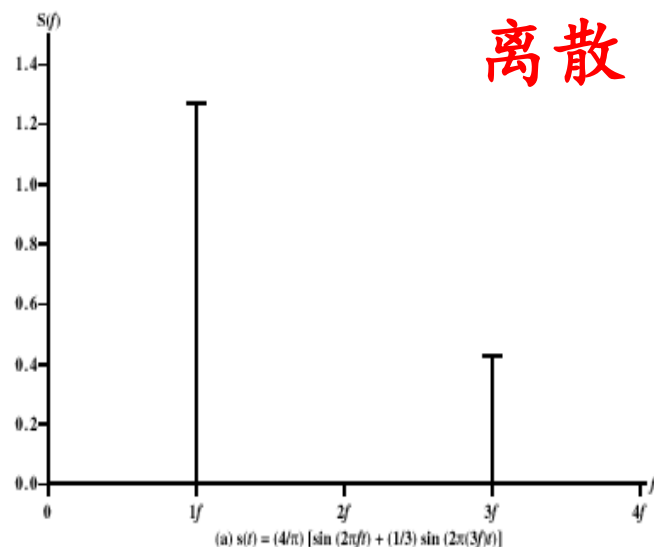
- 信号的频谱宽度

有效  
带宽

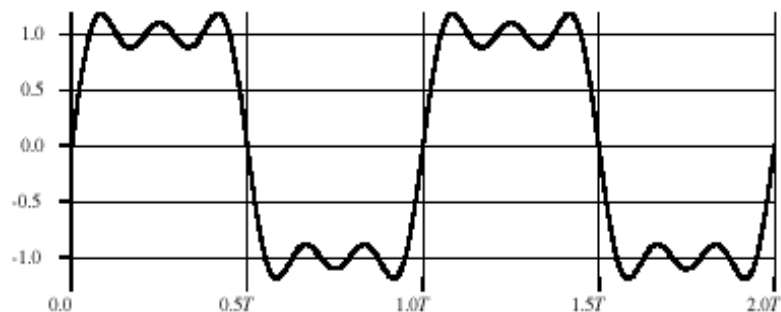
- 包含信号**绝大多数**能量的窄带
- 功率谱, 半功率带宽(3dB带宽)

直流  
分量

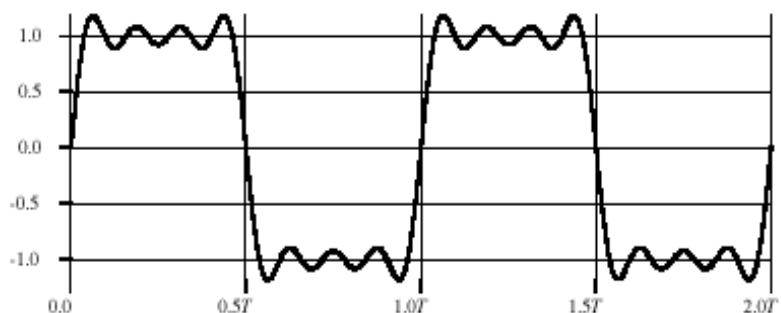
- 信号中频率为零的成份



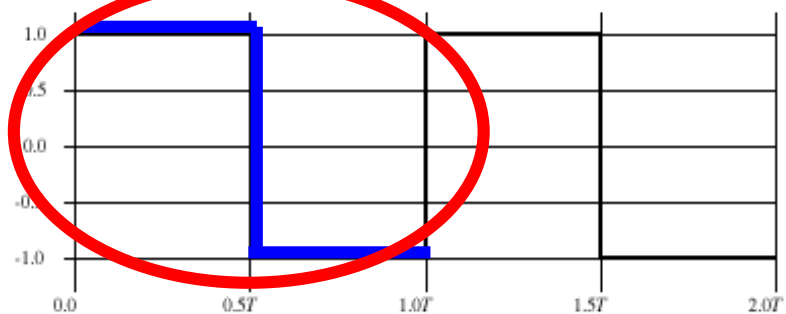
# 数据率与带宽的关系



(a)  $(4/\pi) [\sin(2\pi ft) + (1/3) \sin(2\pi(3f)t) + (1/5) \sin(2\pi(5f)t)]$



(b)  $(4/\pi) [\sin(2\pi ft) + (1/3) \sin(2\pi(3f)t) + (1/5) \sin(2\pi(5f)t) + (1/7) \sin(2\pi(7f)t)]$



(c)  $(4/\pi) \sum (1/k) \sin(2\pi(kf)t), \text{ for } k \text{ odd}$

数据率:

$$R_b = 2 \text{ 比特}/T = 2f \text{ (bps)}, f \text{ 是信号频率}$$

有效带宽:

- 方波包含无限个频率成份
- 方波中第k个频率成份的振幅为  $1/k$
- 可以将带宽限制在有限的频率成份上

# 数据率与带宽（开源与节流）

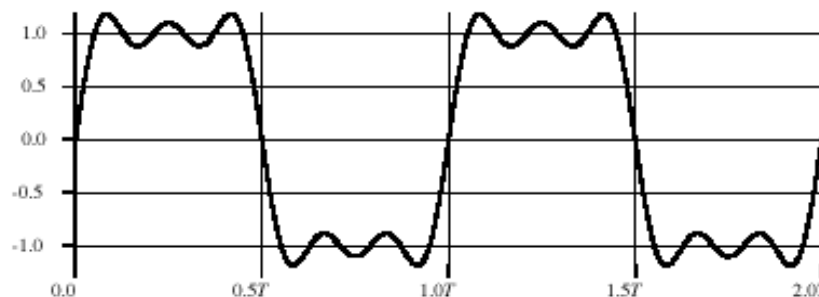


- 例1: Bandwidth=4MHz

$$f = 1\text{MHz}, T = 1\mu\text{s},$$

$$R_b = 2\text{bits} / 1\mu\text{s} = 2\text{Mbps}$$

$$BW = 5f - f = 4f = 4\text{MHz}$$



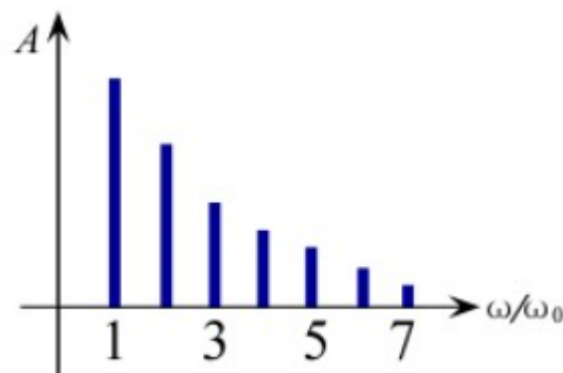
(a)  $(4/\pi) [\sin(2\pi f t) + (1/3) \sin(2\pi(3f)t) + (1/5) \sin(2\pi(5f)t)]$

- 例2: Bandwidth=8MHz

$$f = 2\text{MHz}, T = 0.5\mu\text{s},$$

$$R_b = 4\text{bits} / 1\mu\text{s} = 4\text{Mbps}$$

$$BW = 5f - f = 4f = 8\text{MHz}$$

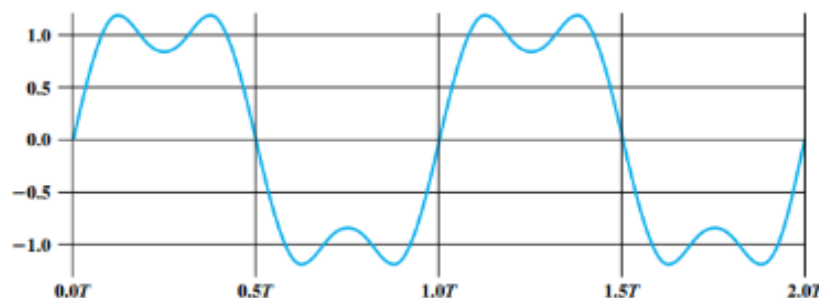


- 例3: Bandwidth=4MHz

$$f = 2\text{MHz}, T = 0.5\mu\text{s},$$

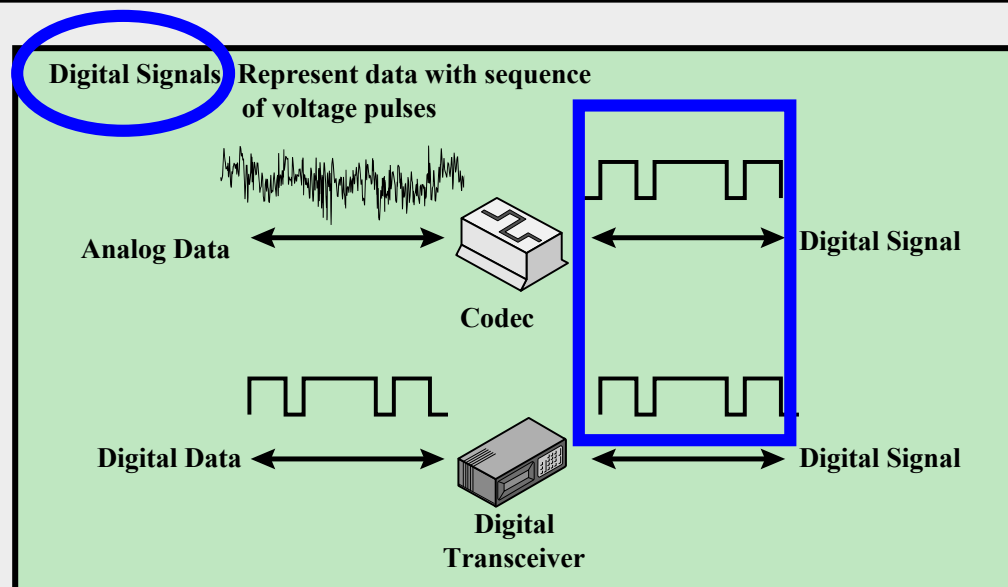
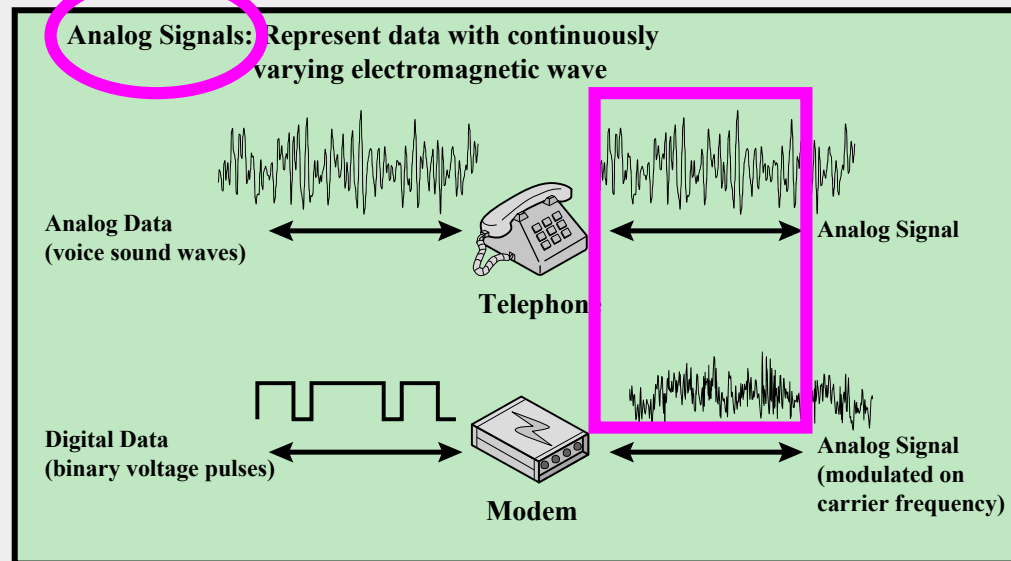
$$BW = 3f - f = 2f = 4\text{MHz}$$

$$R_b = 4\text{bits} / 1\mu\text{s} = 4\text{Mbps}$$



(c)  $(4/\pi) [\sin(2\pi f t) + (1/3) \sin(2\pi(3f)t)]$

# 模拟/数字数据和模拟/数字信号



# 模拟和数字传输



表3.1 模拟和数字传输

(a) 数据和信号

	模拟信号	数字信号
模拟数据	两种选择：(1) 信号与模拟数据占相同的频谱；(2) 模拟数据被编码后占不同的频谱段	模拟数据通过编解码器的编码产生数字比特流
数字数据	数字数据通过调制解调器产生模拟信号	两种选择：(1) 信号由两个电平组成，分别代表了两个二进制的值；(2) 数字数据被编码后产生具有所要求的属性的数字信号

(b) 对信号的处理

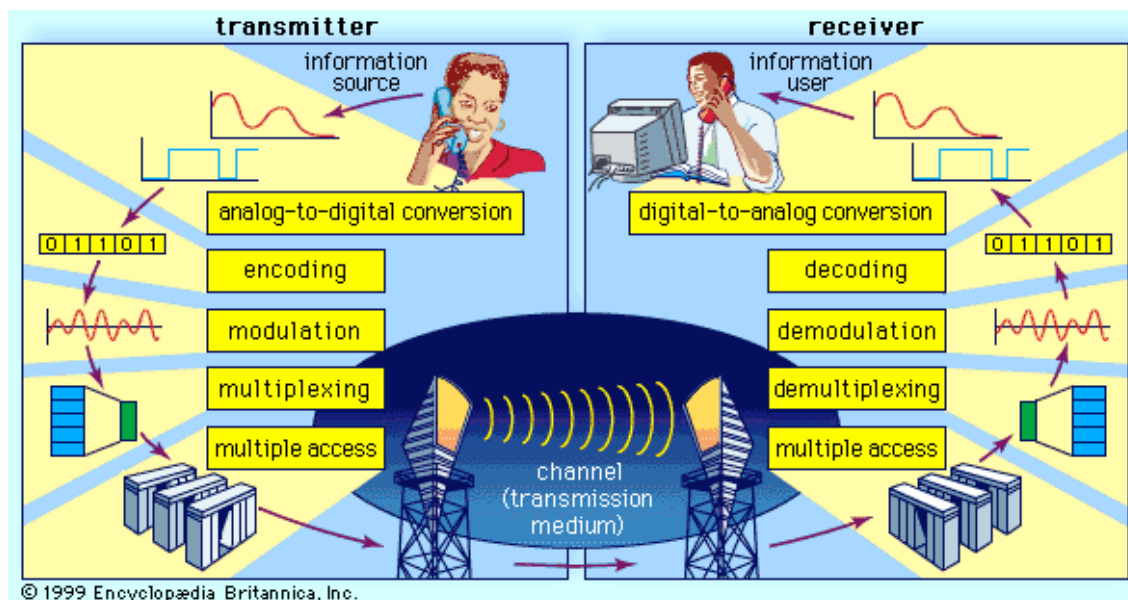
	模拟传输	数字传输
模拟信号	通过放大器来传播；不论信号是用来表示模拟数据的，还是数字数据的，处理方式相同	假设这个模拟信号表示的是数字数据。信号通过转发器传播。在每个转发器上，根据入口信号恢复数字数据，并用它来生成新的外出模拟信号
数字信号	不使用	数字信号表示的是0和1的比特流，它代表了数字数据，或者是经过编码的模拟数据。信号通过转发器传播。在每个转发器上，根据入口信号恢复数字数据，并用它来生成新的外出数字信号

# 数字信号传输的优势



目前普遍采用数字技术的原因

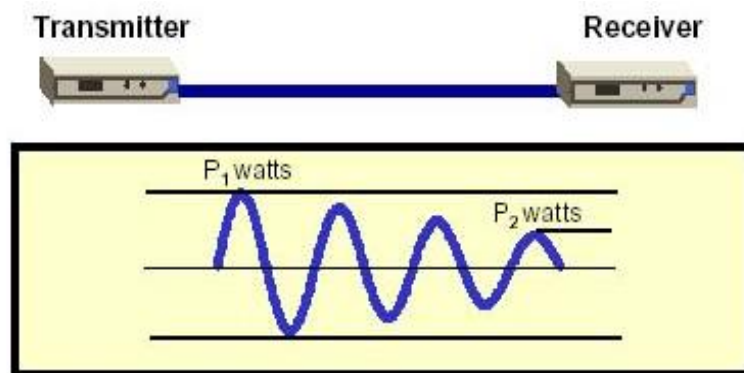
1. 数字技术
2. 数据完整性
3. 容量利用率
4. 安全和保密
5. 综合性



# 传输损伤



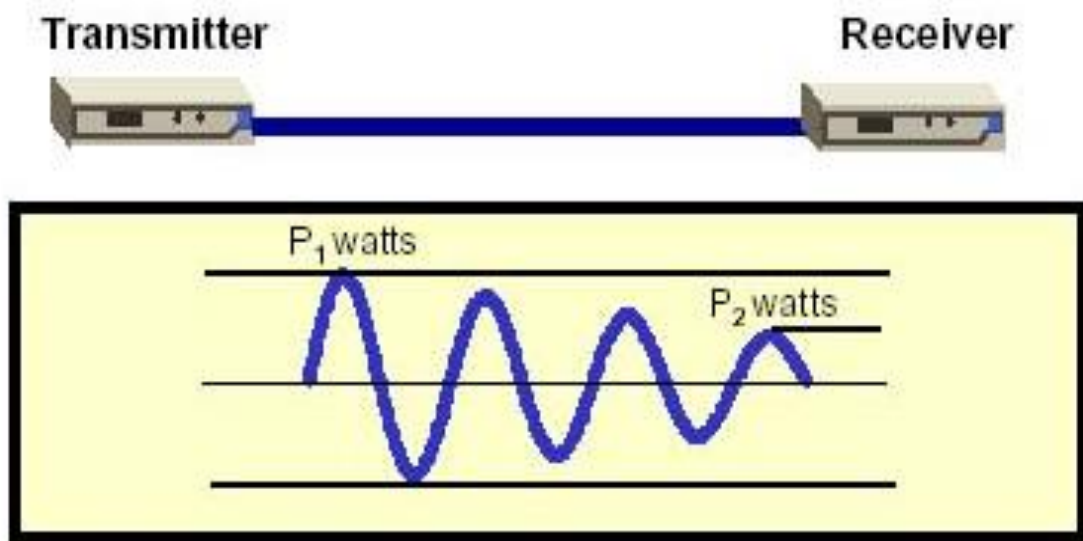
- 接收信号通常与发送信号不同:
  - 降低模拟信号质量（如话音）
  - 数字信号比特差错
- 主要考虑的损伤包括
  - 衰减
  - 失真
  - 噪声



# 衰减



- 信号随着传输距离增加，强度不断减弱
- 由于衰减存在，传输工程需要考虑的因素：
  - 接收信号足够强，以便能够检测
  - 信号电平比噪声电平高
- 解决方法：放大器与转发器





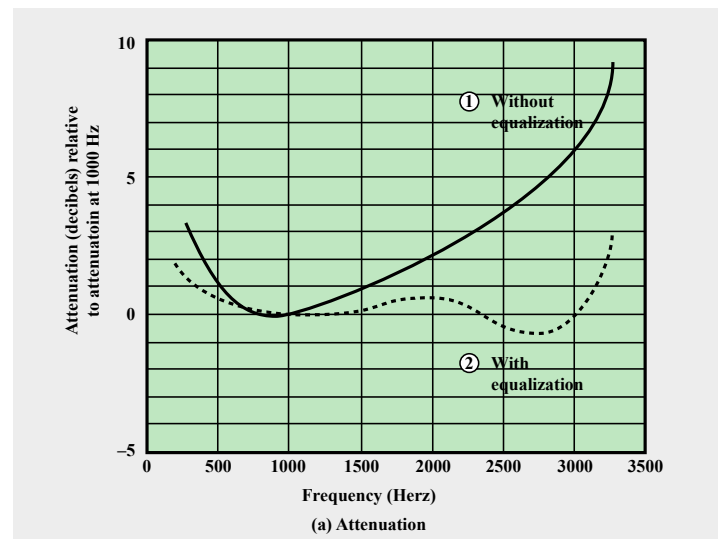
# 衰减失真

- 频率越高，衰减越严重（衰减失真）
  - 频率越小，传输损耗越小，覆盖距离越远，绕射能力越强。低频资源紧张，系统容量有限，用于广播，电视等系统
  - 频率越高，传播损耗越大，覆盖距离越小，绕射能力越弱。高频资源丰富，系统容量大，实现技术难度大，系统成品也相应提高

- 衰减均衡技术
  - 改变线路的电气特性

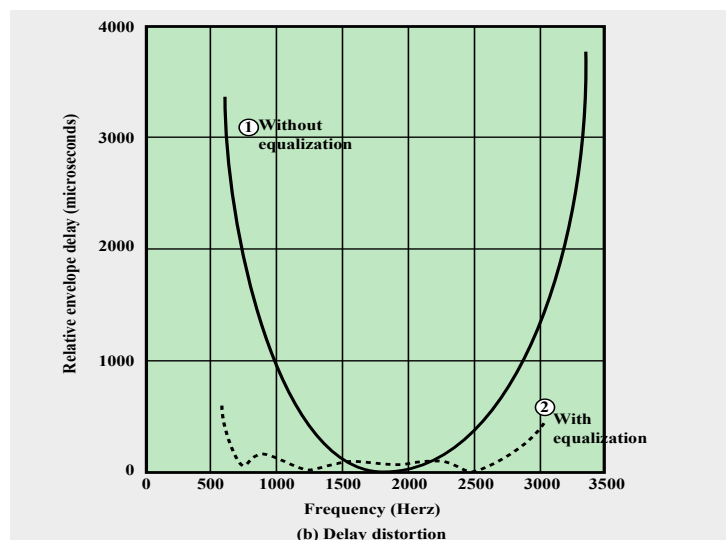
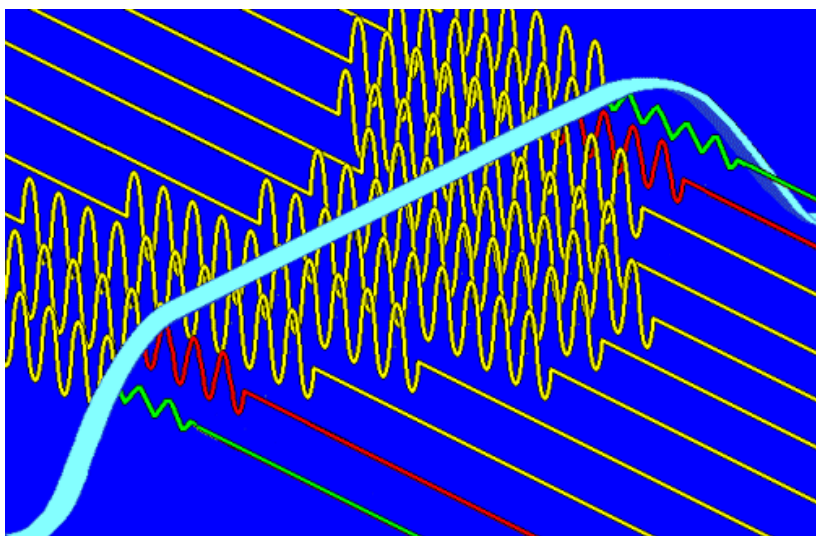
- 放大器

- 放大高频的倍数比放大低频的倍数要高



# 时延失真

- 在**导向媒体**上**信号传播速度**随频率的不同而改变
  - 靠近中心频率的地方传播速度快



- 时延失真对数字信号影响严重
  - 码间串扰

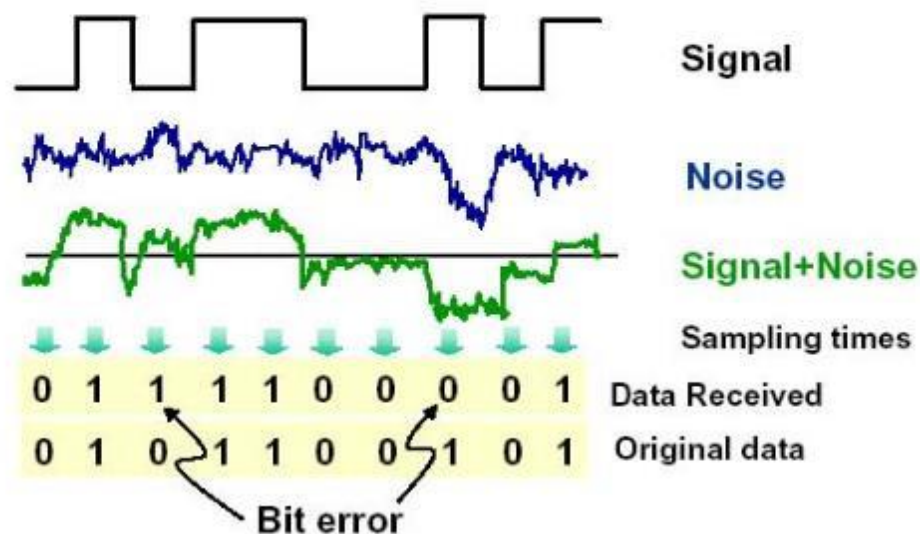
# 噪声



- 噪声：传输系统中的无用信号

- 噪声是传输系统性能的主要制约因素

Effect of noise



- 信噪比 Signal-to-Noise Ratio

$$SNR_{dB} = 10 \lg \frac{S}{N}$$

$S$  — 信号功率  
 $N$  — 噪声功率

# 噪声



- 热噪声
  - 由电子的热运动造成
- 互调噪声
  - 由于在发送器、接收器存在非线性因素，或者时传输系统收到干扰产生互调噪声
- 串扰
  - 微波天线收到不需要的信号
- 冲击噪声
  - 外部电磁干扰（如雷电）以及通信系统本身的故障和缺陷引起

# 热噪声



- 由电子的热运动造成
- 热噪声均匀地分布在通信系统常用的频率范围内，因此通常称为白噪声。
- 热噪声的度量：1Hz带宽内存在的热噪声的值

$$N_0 = kT (W / Hz)$$

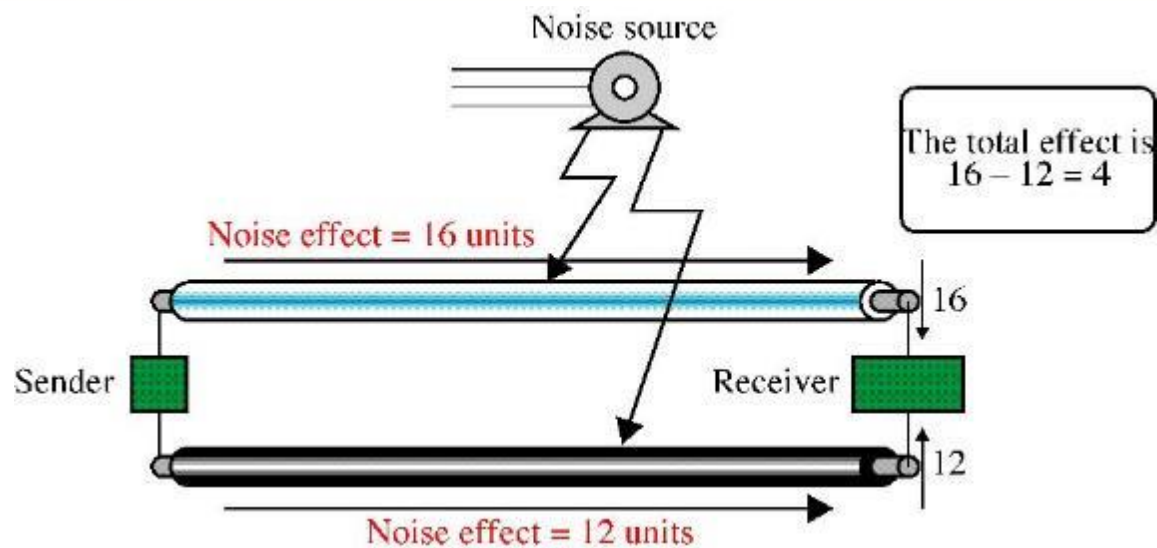
$N_0 =$  噪声功率密度 (W/Hz)

$k =$  玻尔兹曼常量  $= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

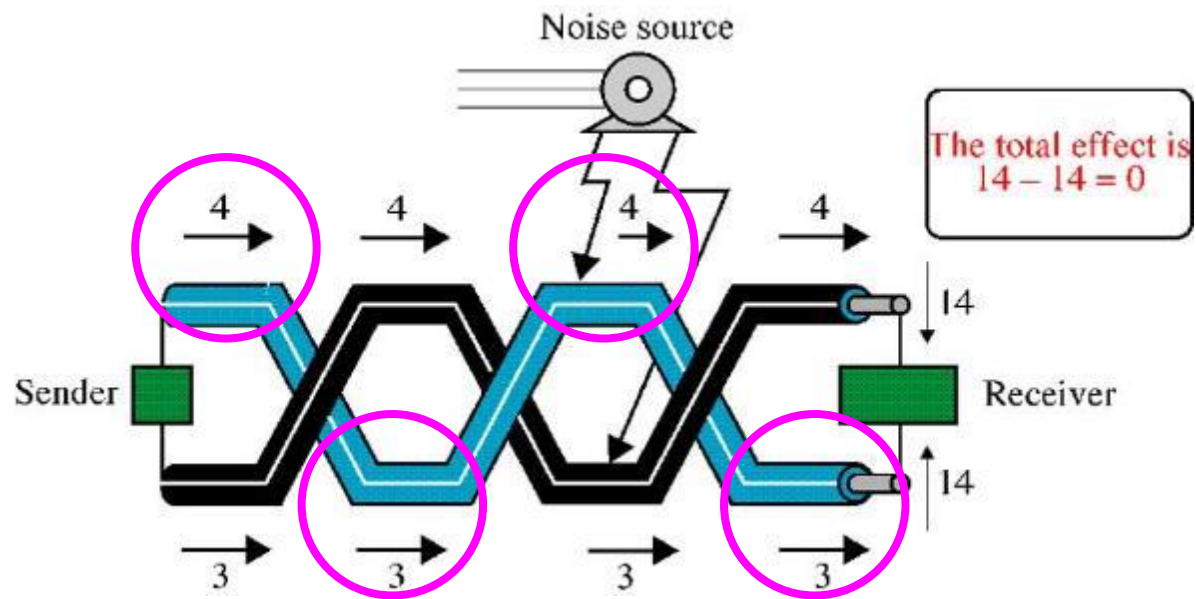
$T =$  温度，以开尔文为单位（绝对温度），符号K表示1开尔文

# 串扰—双绞线

- 线缆间**串扰**：信号通道之间的耦合现象



- 双绞线的**扭绞结构**是为了减少相邻导线之间的串扰和消除外界干扰



# 信道容量



给定条件下，某一通信信道上所能达到的  
最大数据传输速率

**数据率:**

数据能够通信的速率，用比特每秒(bps)表示

**带宽:**

在发送器和传输媒体的**特性限制下**的带宽，用赫兹或每秒的周数表示

**噪声:**

通信通路上的平均噪声电平

**误码率:**

差错发生率  
( $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$ )

# 奈奎斯特带宽



考虑**信道无噪声**的情况:

- 奈奎斯特带宽

如果信道带宽为**B**，那么可能实现的最大信号传输速率为**2B**

- 对于**二进制信号**， $B$  Hz带宽能承载的数据率是 $2B$  bps  
奈奎斯特带宽公式： $C = 2B$
- 对于**多进制信号**，如 $M$ 个信号电平，每个电平代表 $\log_2 M$ 比特，  
奈奎斯特带宽公式： $C = 2B \log_2 M$

理想（极限）传输速率是对于无噪声的信道而言的，对于 $B$  Hz的带宽，极限传输速率为**2B 波特/秒**，而不是**2B bps**，这跟调制方式有关，若采用二进制调制，则一个符号只能携带1bit信息，波特率就等于比特率，而对于多进制调制，一个符号可以携带多个比特的信息 [online]。



# 香农容量公式



考虑**噪声存在**（高斯白噪声）的情况：

- 噪声会影响信号，导致接收端错误判决，产生误比特
- 可以提高信号强度来抵御噪声的影响
- 定义信噪比  $\text{SNR}_{\text{db}} = 10 \log_{10} (\text{信号功率}/\text{噪声功率})$ 
  - 信号功率  $S$  可以通过信道传输模型获得
  - 高斯信道噪声功率与带宽成正比  
 $N = N_0 B$ ,  $N_0$  每赫兹噪声功率密度 W/Hz, 常数
- 高斯信道的信噪比
  - $\text{SNR} = S / N_0 B$

# 香农公式



- 香农给出了一个热噪声环境下的数据率上限

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR})$$

- C 是信道容量 (bps)
- B 是信道带宽
- SNR 是信噪比 (注意 不是  $\text{SNR}_{\text{db}}$ )

- C 是理论最大值，实际值要小于香农容量
- 给定噪声值，可以通过增加信号强度和带宽提高数据率
- 增加信号强度，系统非线性程度提高，导致互调噪声
- 带宽增加，噪声也会增加，SNR反而下降

香农容量和奈奎斯特带宽的关系呢？

# 第1-6章内容概览

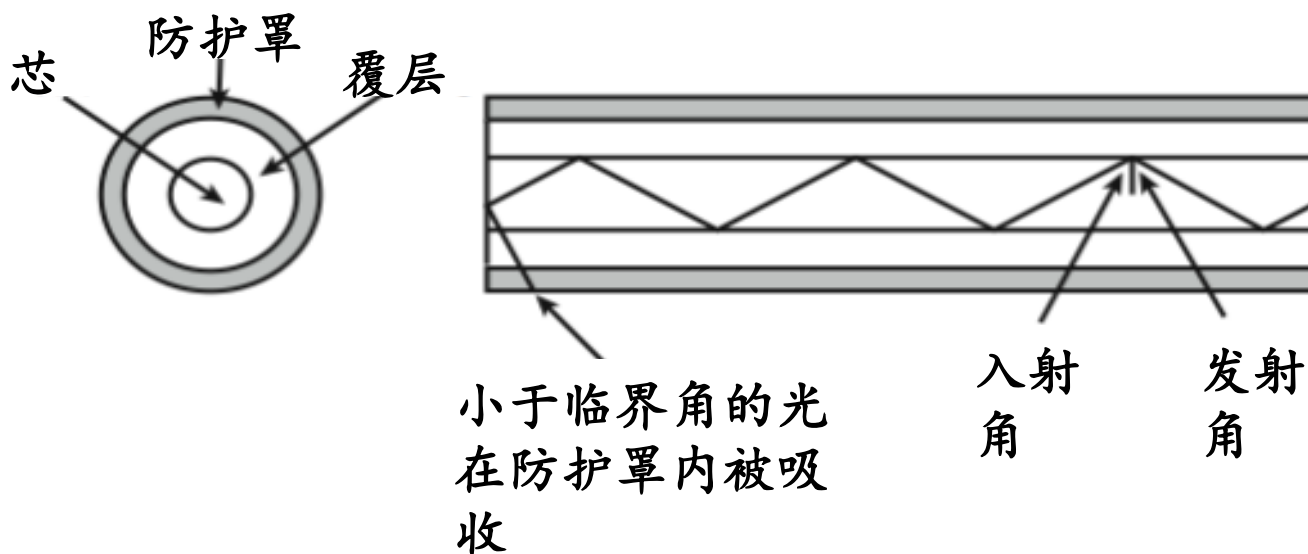


## 第4章 传输媒体

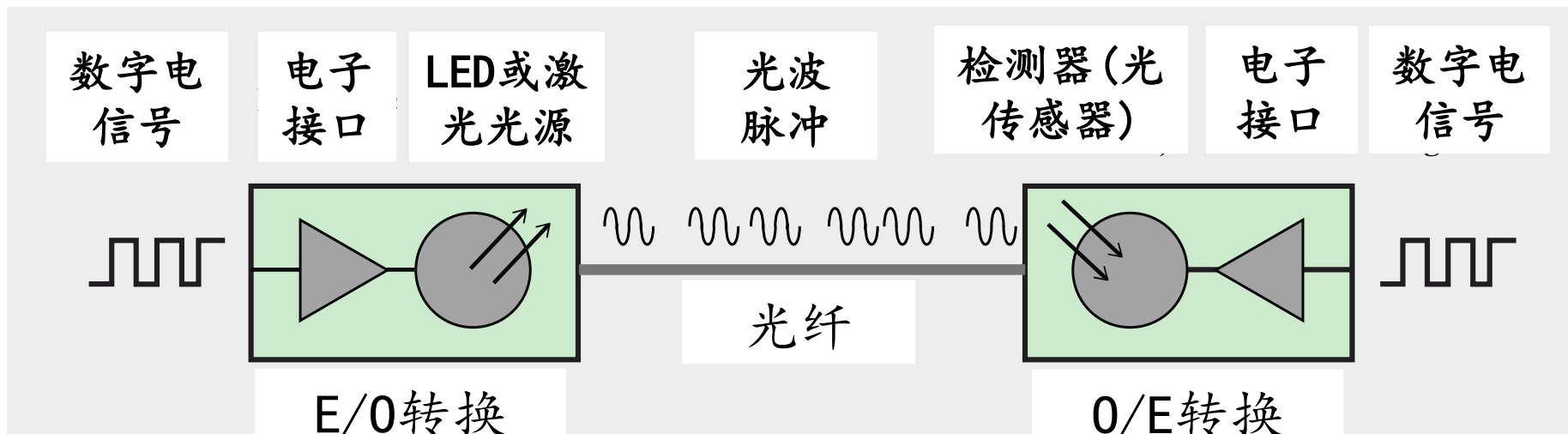
# 光纤



- 光纤是一种纤细、柔韧并能够传到光线的媒体。有多种玻璃和塑料可用于制造光纤。
  - 芯：由玻璃或塑料制成的细丝构成
  - 覆层：由光特性与芯不同的玻璃或塑料制成
  - 防护罩：是一层硬塑料外套，用来保护玻璃不受潮湿和其他物理损害。



# 传输特性



## 光纤通信

- **发送器**以数字信号为输入，电信号通过电子接口被送入LED或激光光源；
- **光源**根据输入的电信号对数字数据进行编码，产生一系列光脉冲；
- **接收器**包括一个光传感器，用于检测传入的电信号，并将其转回数字电信号。

# 传输特性

- 按折射率分类

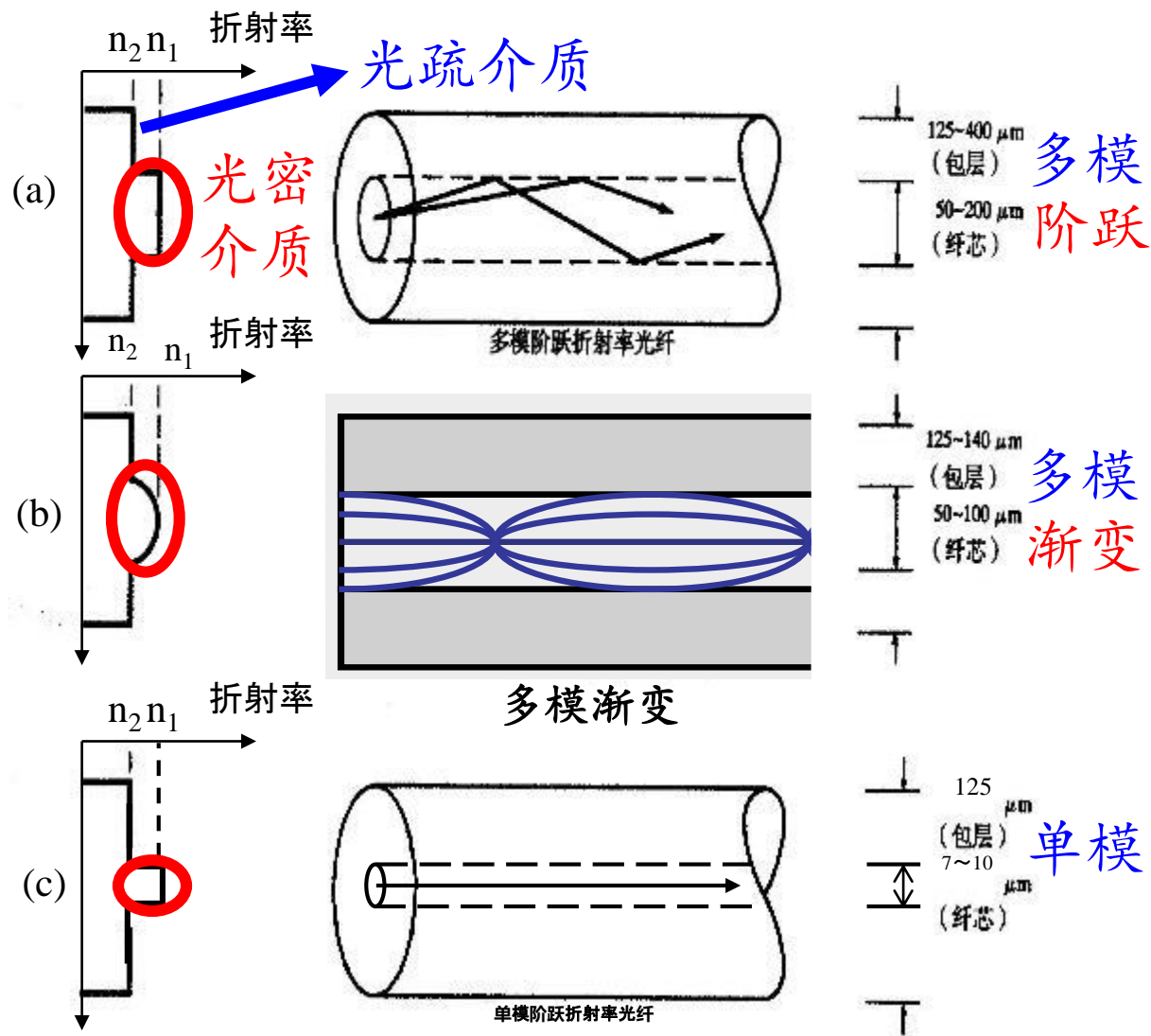
- 阶跃型

- 渐变型

- 按模式分类

- 多模光纤

- 单模光纤

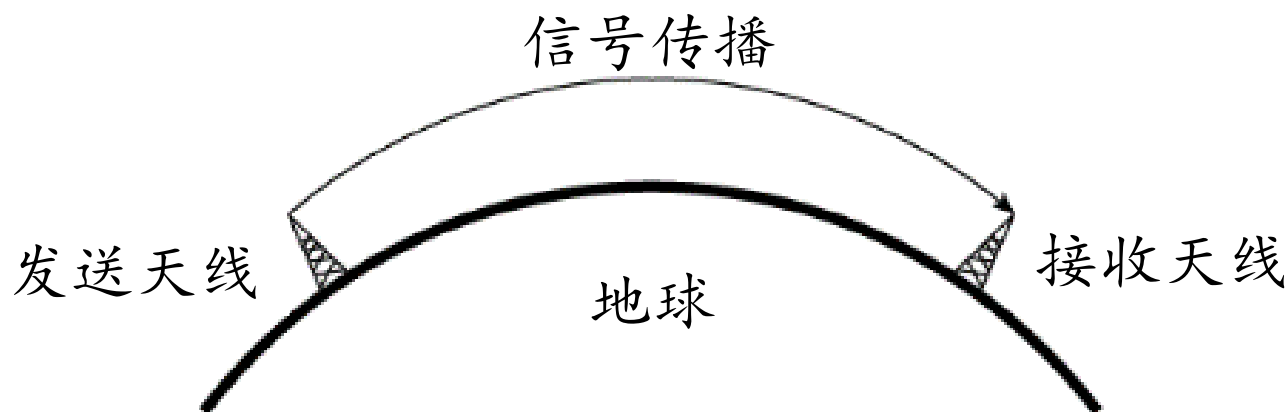


光纤结构示意图

# 无线传播



- 从天线发射出去的信号沿以下3条路径之一传播：  
地波、天波或视距
- **地波传播**：或多或少总沿着地球表面轮廓传播，并且能到达相当远的地方，超出视平线之外。
  - 频率小于**2MHz**可以到到这个效果
  - 例子：**调幅无线电广播**

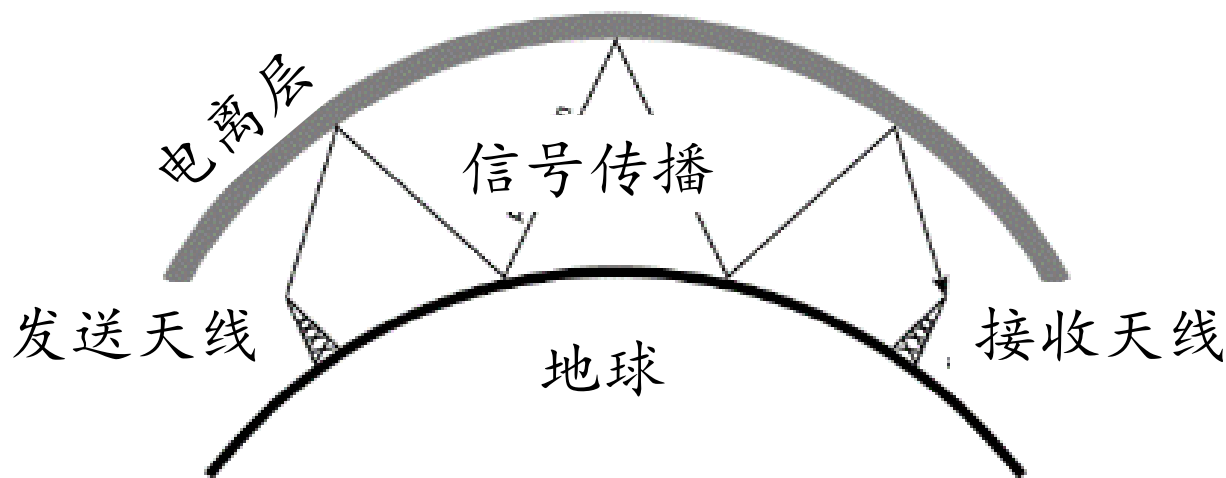


(a) 地波传播 (2MHz以下)

# 无线传播



- **天波传播**：从基地天线发射出去的信号被上空大气层（电离层）反射回地球。看起来是反射，实际上是折射。
  - 在距离发送器几千米以外的地方也能收到信号
  - 例子：业余无线电和国际电台广播（如BBC、美国之音）



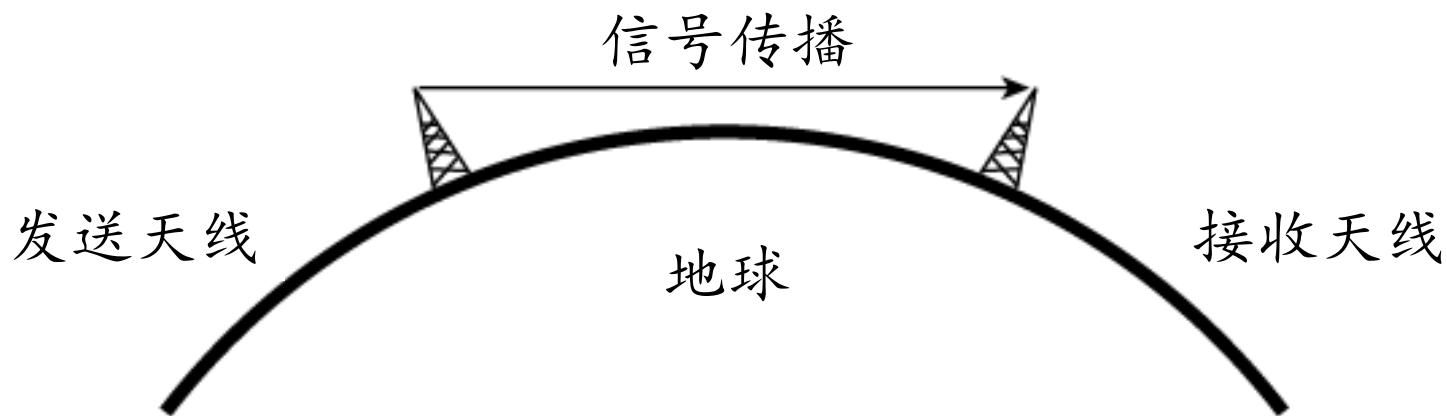
(b) 天波传播 (2MHz到30MHz)



# 无线传播



- **视距传播**：信号在地球站和位于地球站上空且在其视平线以内的卫星之间传送。
  - 高于30MHz的频段地波和天波传播模式都无法工作，只有视距通信可行；
  - 发送天线和接收天线必须在双方的**有效**视距之内



(c) 视距传播 (30MHz 以上)

# 自由空间损耗



- **自由空间损耗**：表示成发射功率 $P_t$ 与天线接收到的功率 $P_r$ 的比值。对于理想化的全向天线，自由空间损耗为：

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2}$$

其中， $P_t$ 是发送天线的信号功率， $P_r$ 是接收天线的信号功率， $\lambda$ 是载波波长， $d$ 是天线间的传播距离， $c$ 是光速。

- **考虑天线增益**：

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi)^2 (d)^2}{G_r G_t \lambda^2} = \frac{(\lambda d)^2}{A_r A_t} = \frac{(cd)^2}{f^2 A_r A_t}$$

其中， $G_t$ 是发送天线的增益， $G_r$ 是接收天线的增益， $A_t$ 是发送天线的有效面积， $A_r$ 是接收天线的有效面积。

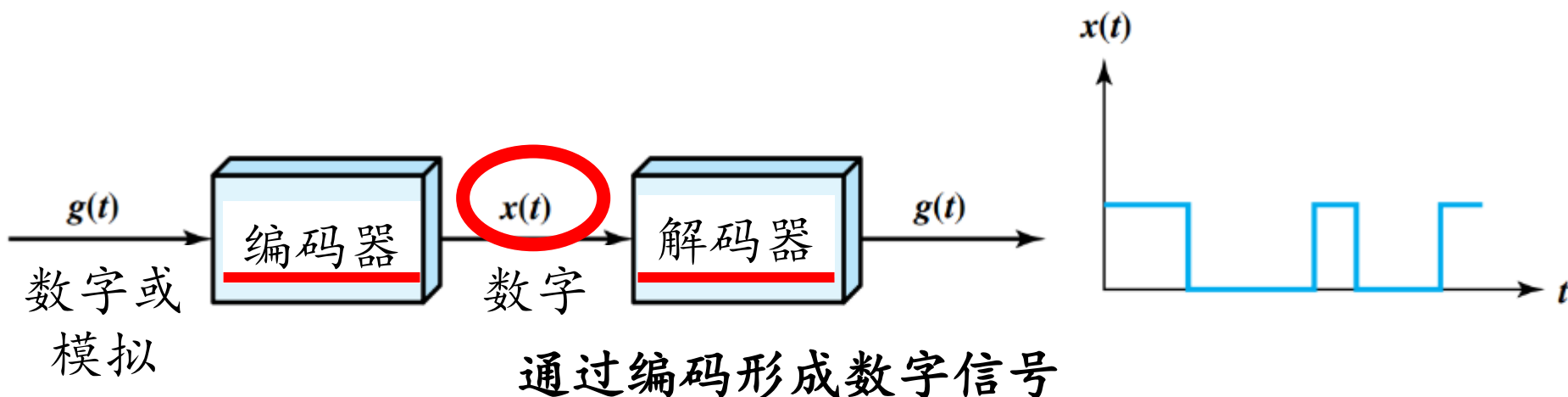


## 第5章 信号编码技术

# 编码与调制技术



## • 数字信号传输

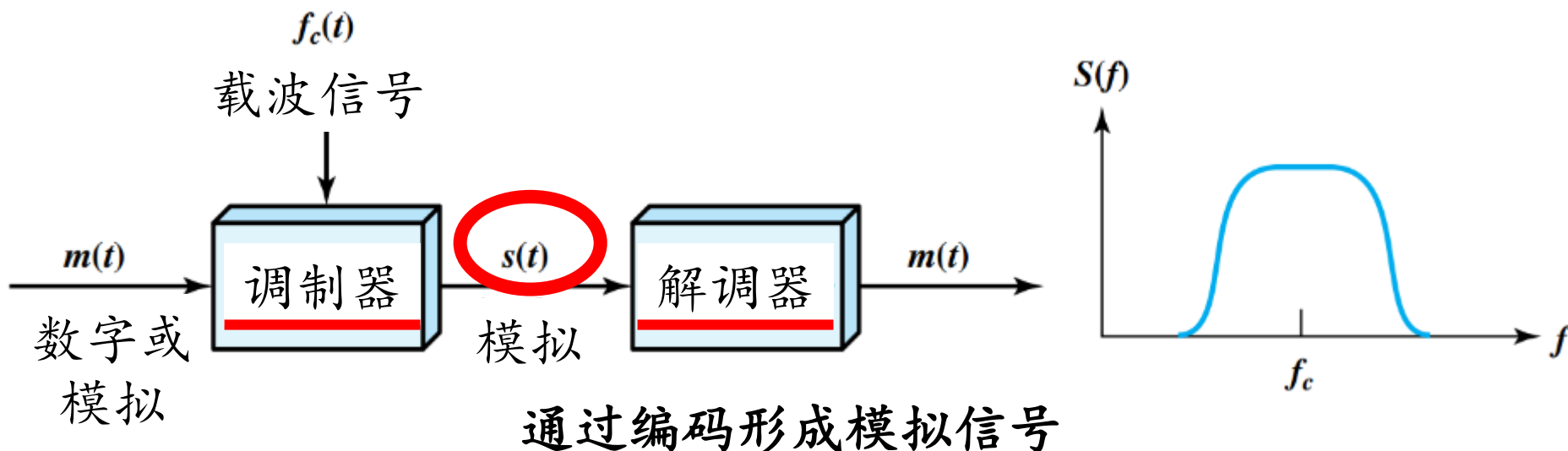


- 数据源可能是数字的，也可能是模拟的
- 数据源被编码成数字信号
- 数字信号的实际格式取决于编码的技术，并以如何优化使用传输媒体为选择原则

# 编码与调制技术



## • 模拟信号传输



- 输入信号可以是模拟的，也可以是数字的，称为被调信号或基带信号
- 调制是将元数据编码到频率为 $f_c$ 的载波信号上
- 载波信号是一种连续且频率恒定的信号，是模拟信号传输的基础

# 数字信号编码



## • 极性

- 单极性：正电平和零电平对应二进制码 1 和 0

➤ 有直流分量，不适用有交流耦合的远距离传输

- 双极性：正电平和负电平表示二进制码 1 和 0

➤ “1”和“0”等概率出现时无直流分量

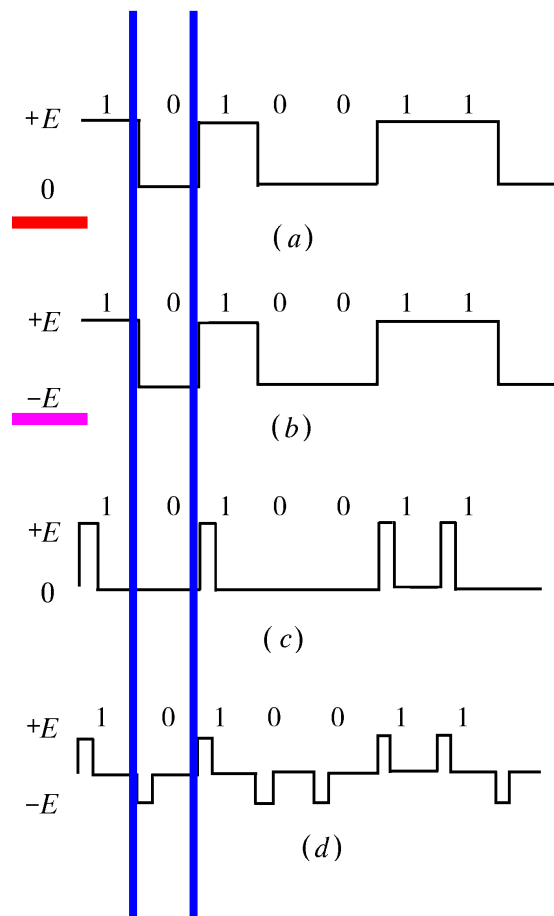
## • 归零/不归零

- 归零：电脉冲宽度小于码元宽度，即信号电压在一个码元终止时刻前总要回到零电平

➤ 占空比：电脉冲宽度/码元宽度

➤ 易于提取同步信息

- 不归零：占空比为100%



# 数字信号编码

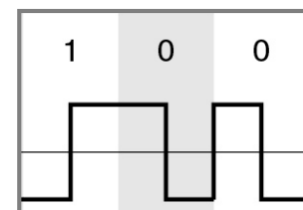


## ➤ 双相位

- “0”码用“10” 两个相位表示；“1”码用“01” 两个相位表示

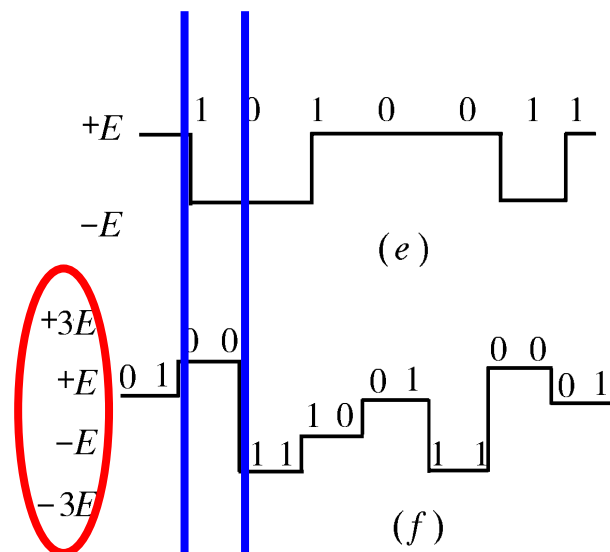
## ➤ 差分波形

- 利用**相邻码元**的**电平跳变和不变**来表示消息代码
- 与码元本身的电位和极性无关
- 检测信号跳变相对于检测信号强度更为可靠
- 可以消除设备初始状态和设备多样性的影响（如载波相位模糊问题）

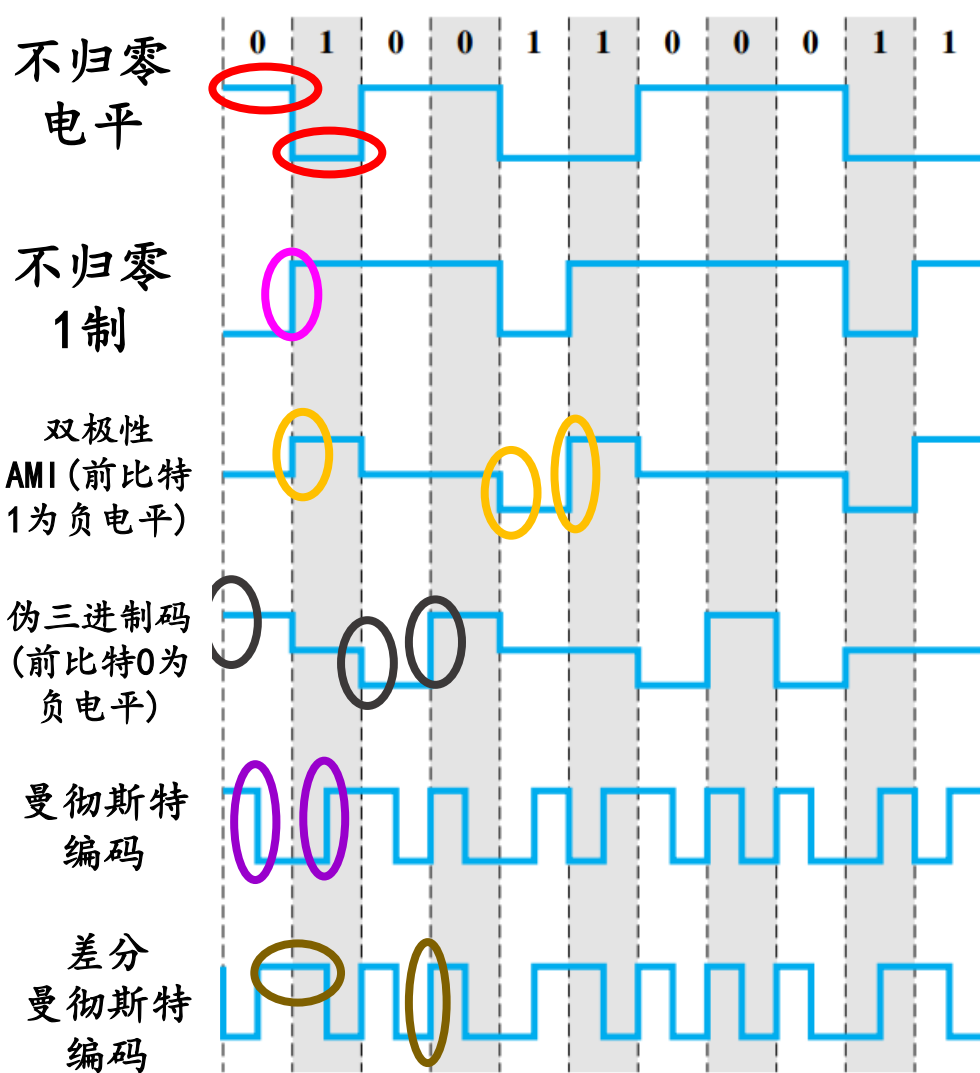


## ➤ 多电平波形

- 多电平波形
- 多值波形
- 在波特率相同的情况下**提高比特率**



# 数字信号编码格式



不归零电平 (NRZ-L)

0 = 高电平

1 = 低电平

不归零1制 (NRZI)

0 = 在间隔的起始位置没有跳变 (一个比特时间)

1 = 在间隔的起始位置跳变

双极性AMI

0 = 没有线路信号

1 = 正电平或负电平, 如果是连续的比特1, 则在正负电平之间不断交替  
伪三进制码

0 = 正电平或负电平, 如果是连续的比特0, 则在正负电平之间不断交替

1 = 没有线路信号

曼彻斯特编码

0 = 在间隔的中间位置从高向低跳变

1 = 在间隔的中间位置从低向高跳变

差分曼彻斯特编码

在间隔的中间位置总是有一个跳变

0 = 在间隔的起始位置跳变

1 = 在间隔的起始位置没有跳变



# 扰码技术



➤ 使用**扰码**替代产生恒定电压的序列

➤ **填充序列**：

- 必须产生足够的**跳变**以利于同步
- 必须被接收器**识别**并以原始序列替换回来
- 和原始序列**长度相同**

➤ 设计目标

- 不含直流
- 含有丰富的定时信息
- 不会降低数据率
- 可提供差错检测
- 易于检测，不会被接收端误判

# HDB3码：高密度双极性3零码



➤ 使AMI码连“0”个数不超过3个。

➤ 编码规则：

1. 检查消息码中“0”的个数。当连“0”数目小于等于3时，HDB<sub>3</sub>码与AMI码一样，+1与-1交替
2. 连“0”数目超过3时，将每4个连“0”化作一小节，定义为B00V，称为破坏节，其中V称为破坏脉冲，而B称为调节脉冲
3. V与前一个相邻的非“0”脉冲的极性相同(这破坏了极性交替的规则，所以V称为破坏脉冲)，并且要求相邻的V码之间极性必须交替。V的取值为+1或-1
4. B的取值可选0、+1或-1，以使V同时满足（3）中的两个要求
5. V码后面的号码极性也要交替

# HDB3码：3阶高密度双极性码



## ➤ 例：

消息码： 1 0 0 0 0    1 0 0 0 0    1    1 0 0 0    0    0 0 0 0    0    1    1

AMI码： -1 0 0 0 0    +1 0 0 0 0    0    -1 +1 0 0 0    0    0 0 0 0    0    -1 +1

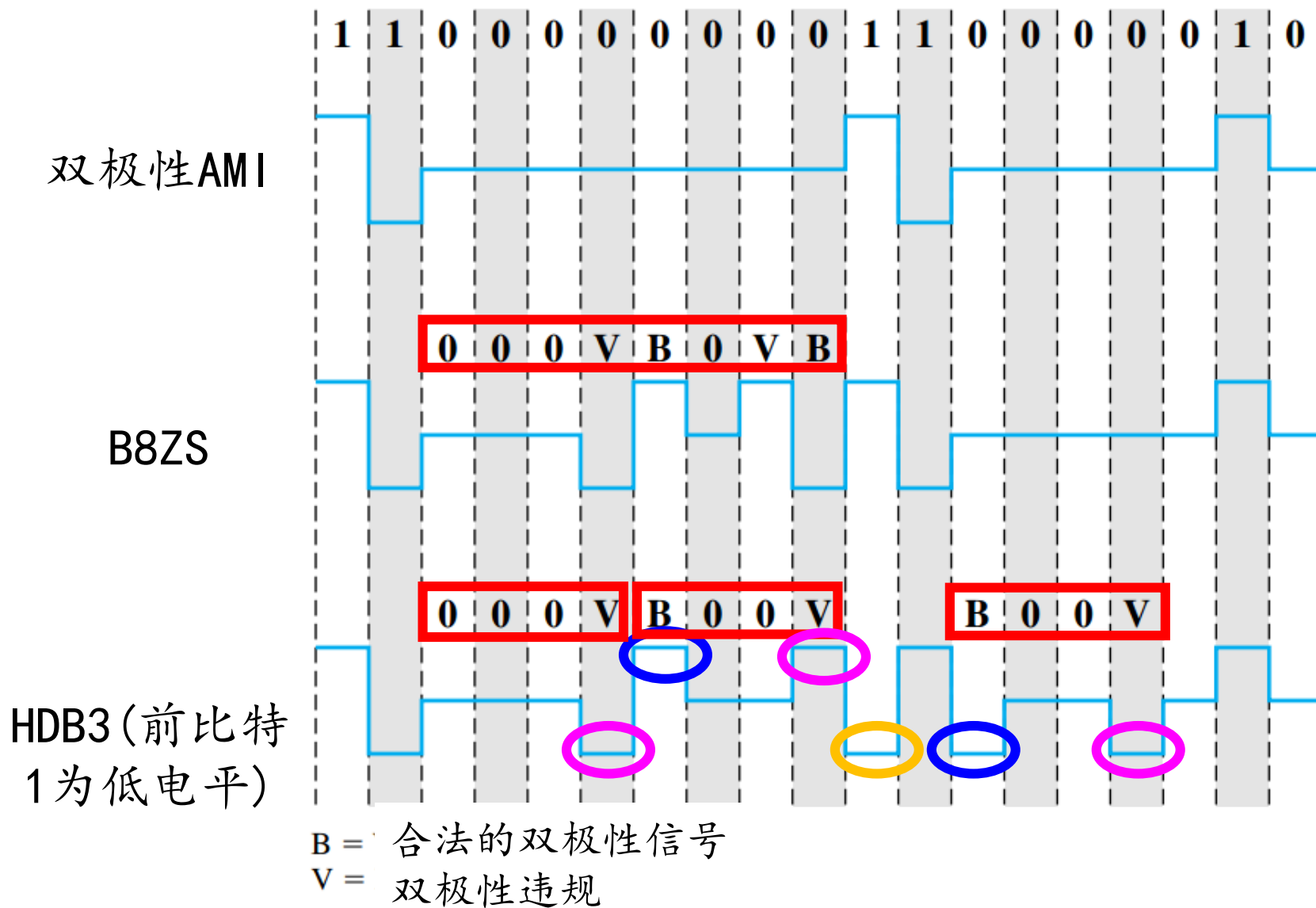
HDB码： -1 0 0 0 -V **+1** 0 0 0 **+V** -1 +1 **-B** 0 0 **-V** **+B** 0 0 **+V** -1 +1

其中的 **$\pm V$ 脉冲**和 **$\pm B$ 脉冲**与 **$\pm 1$ 脉冲**波形相同。

## ➤ 译码

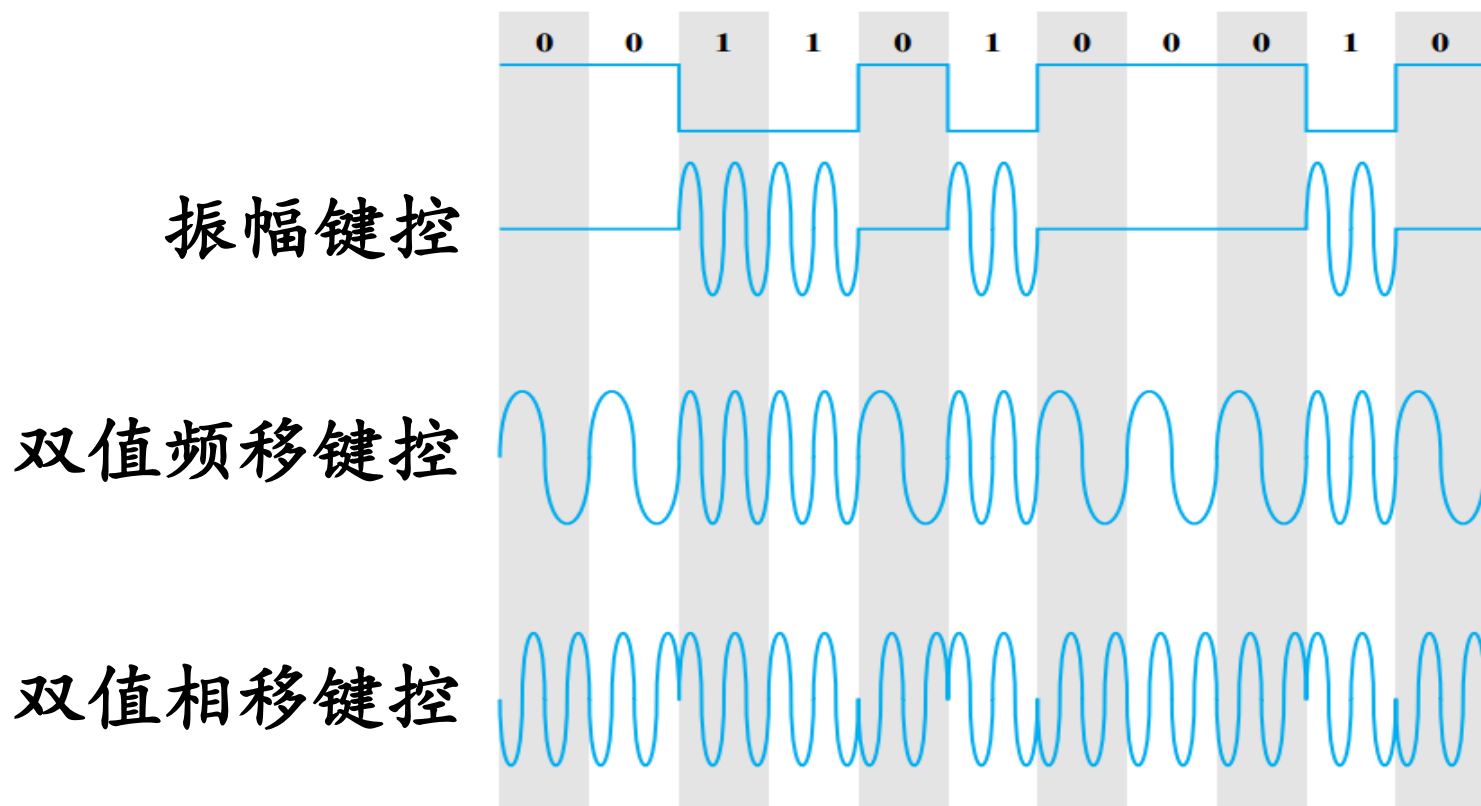
因为每一个破坏脉冲V总是与前一非“0”脉冲**同极性**(包括B在内)，从收到的符号序列中可以容易地找到**破坏点V**，于是也断定V符号及其前面的3个符号必是连“0”符号，从而恢复4个连“0”码，再将所有-1变成+1后便得到原消息代码。

# 扰码技术



## • 数字数据的模拟信号调制

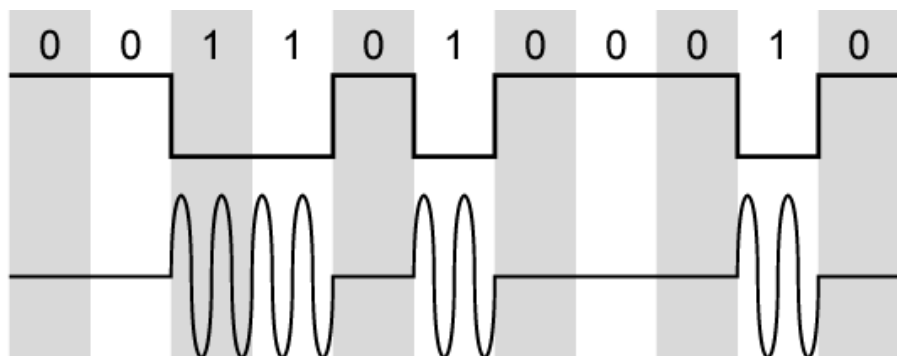
- 得到的信号所占的带宽都以载波频率为中心
- 载波频率是一种连续的频率，能够被调制或承载另一个（携带信息的）信号



# 振幅键控 ASK

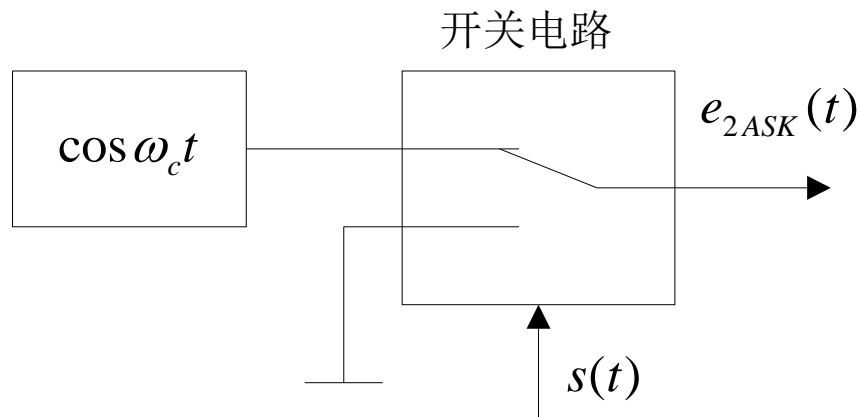


➤ 0/1 由载波频率的两个不同**振幅**值来表示



$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ 0 & \text{binary 0} \end{cases}$$

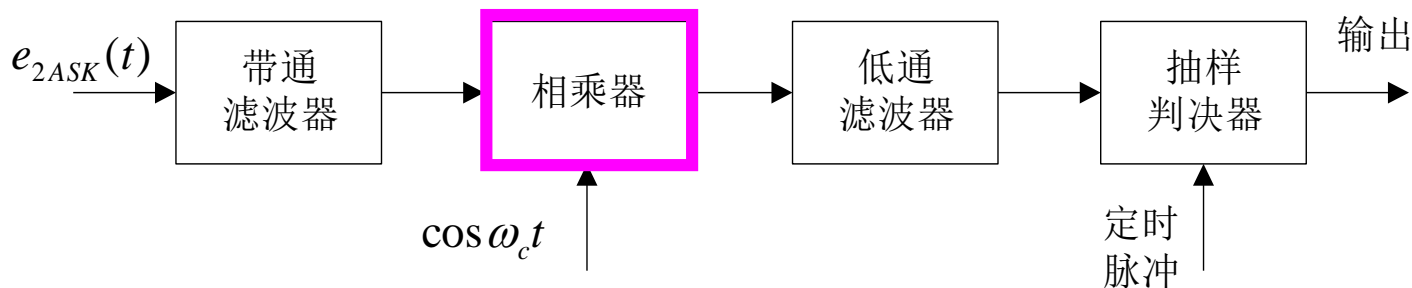
- 键控法



# 相干解调



相干解调



$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ 0 & \text{binary 0} \end{cases}$$

$$y(t)$$

$$= A \cos(\omega_c t) \cos(\omega_c t)$$

$$= A[\cos(\omega_c t + \omega_c t) + \cos(\omega_c t - \omega_c t)]$$

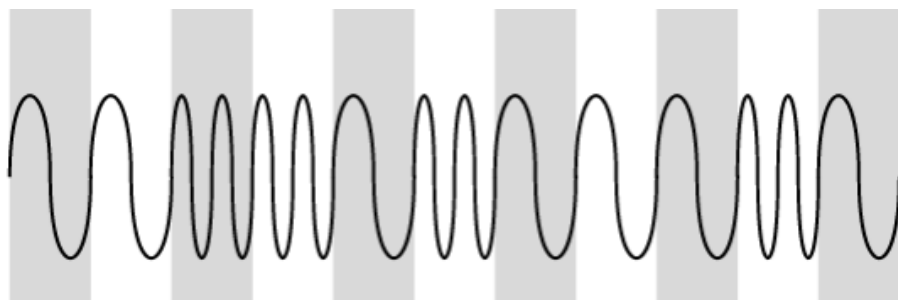
$$= A - A \cos(2\omega_c t)$$

$$\begin{aligned} \cos \alpha \sin \beta &= \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) - \sin(\alpha - \beta)] \\ \sin \alpha \cos \beta &= \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)] \\ \cos \alpha \cos \beta &= \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)] \\ \sin \alpha \sin \beta &= -\frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) - \cos(\alpha - \beta)] \end{aligned}$$

# 二进制频移键控BFSK



➤ 由两个不同的**频率**来代表二进制数的两个值



$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & \text{binary 0} \end{cases}$$

➤ 应用：

- **话音**信道(典型数据率为1200bps)
- **高频无线电**传输 (3-30M 天波传输)
- 使用**同轴电缆的局域网**



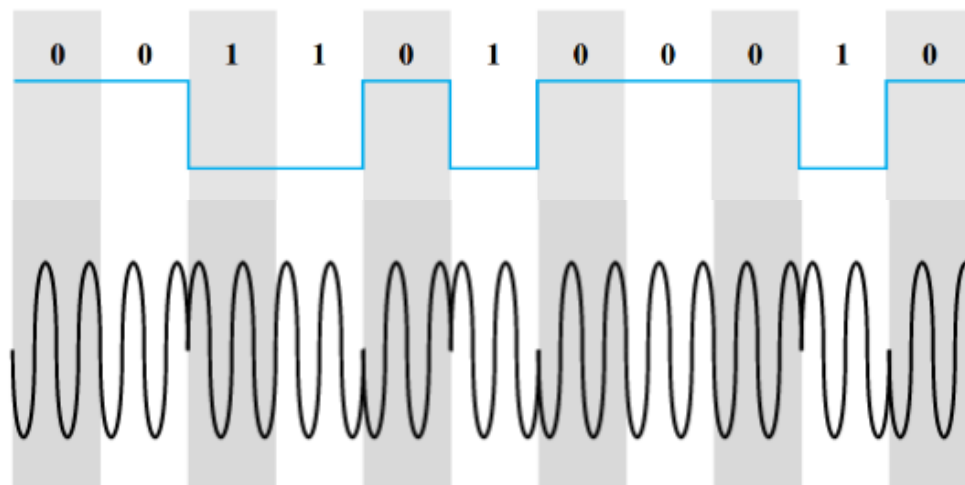
# 相移键控 PSK



➤ 通过载波信号的**相位偏移**来表示数据

➤ 二进制相移键控 (Binary PSK, BPSK)

$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{binary } 0 \\ A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary } 1 \end{cases}$$



BPSK

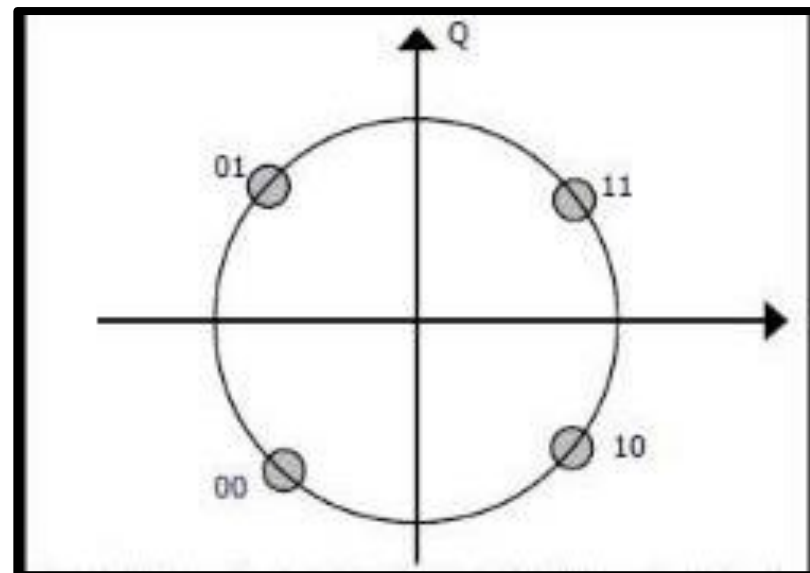
# 四相相移键控 QPSK



➤ 如果一个信号元素表示多个比特，能够更有效的利用带宽

- QPSK相位偏移为  $\pi/2$  ( $90^\circ$ )
- 每个元素代表2个比特

$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}) & 11 \\ A \cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}) & 01 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}) & 00 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}) & 10 \end{cases}$$



# 正交调幅QAM



$$S(t) = d_1(t) \cos(2\pi f_c t) + d_2(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- ASK 和 PSK 的组合
- QPSK的扩展，在**同样的载波频率**上发送两个不同的信号
  - 使用两个载波，具有**90° 偏移**
  - **每个**载波通过 **ASK** 调制
  - 在同样的传输媒体发送**两个独立的信号**
- QAM 常用于ADSL（非对称数字用户线路）和无线模拟信号传输

# 模拟数据数字化



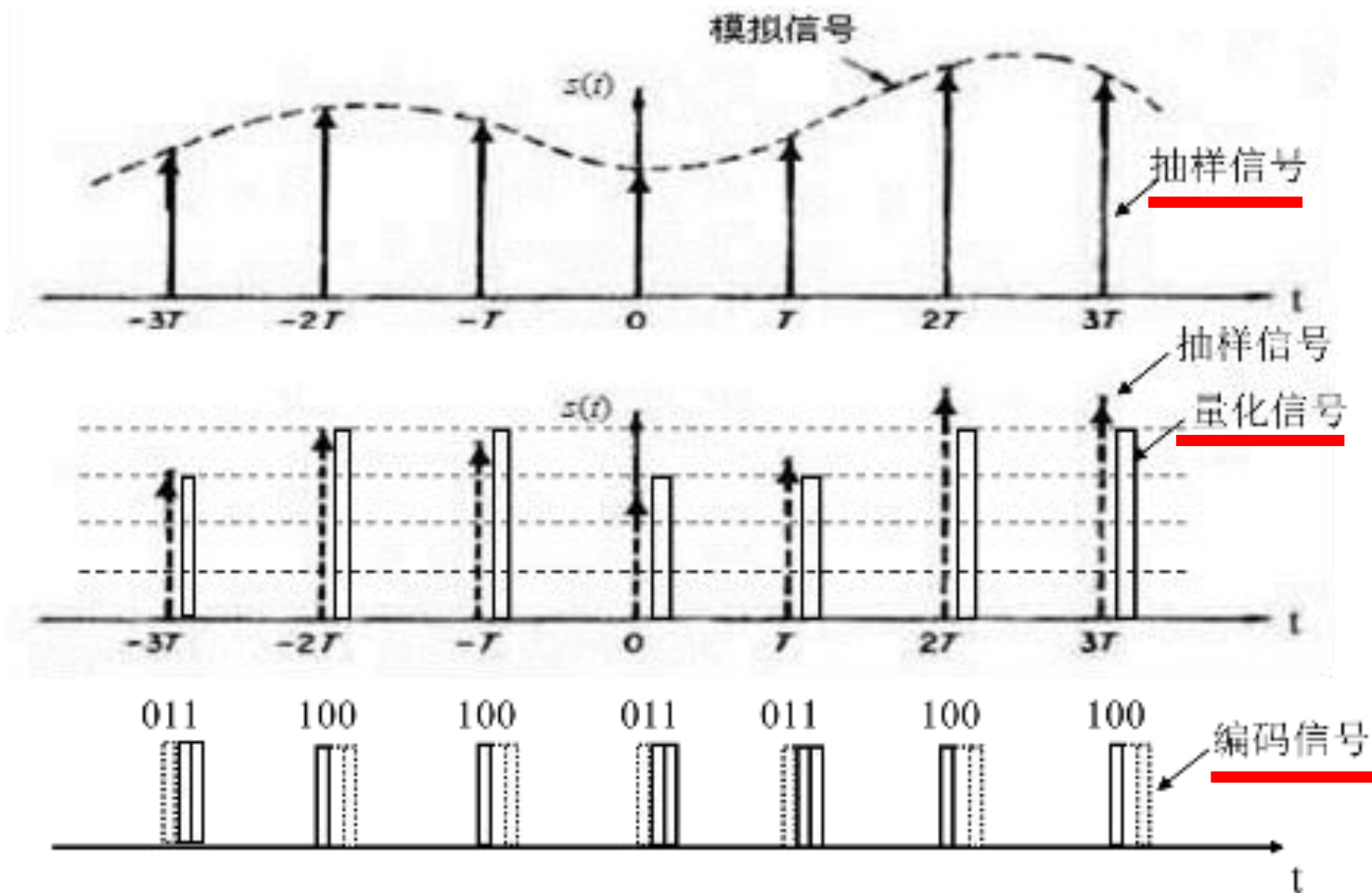
➤ **编解码器**：将模拟数据转换成可传输的数字形式，或相应地将数字信号恢复成原始模拟信号

➤ 编解码器使用的主要两种技术：

- **脉码调制**
- **增量调制**

# 脉码调制

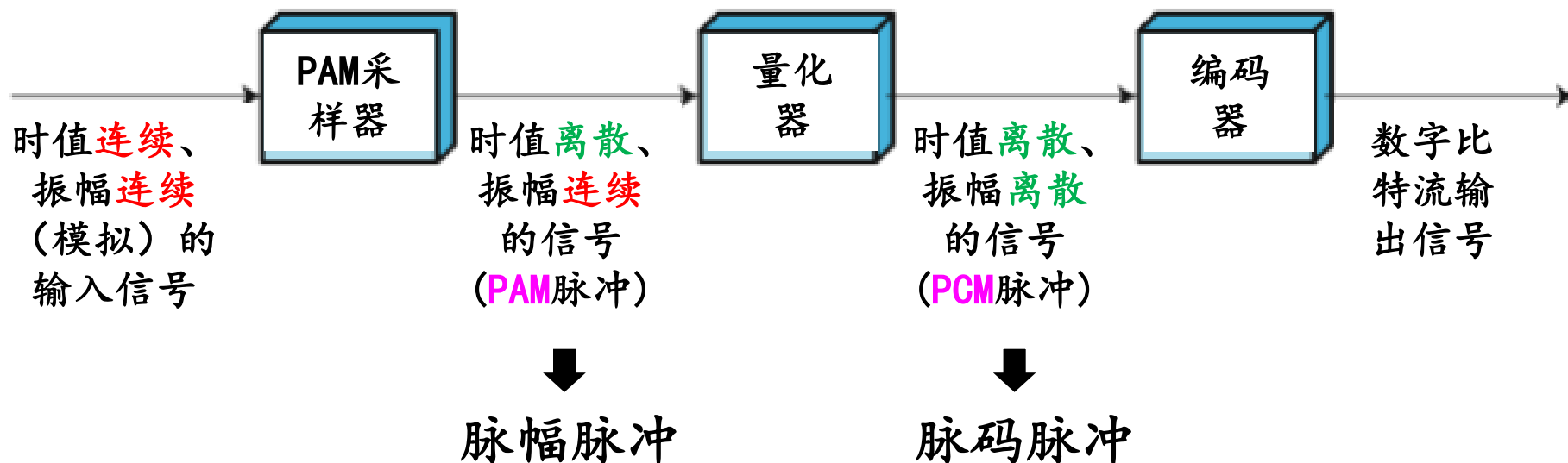
- 脉码调制：采样、量化、编码



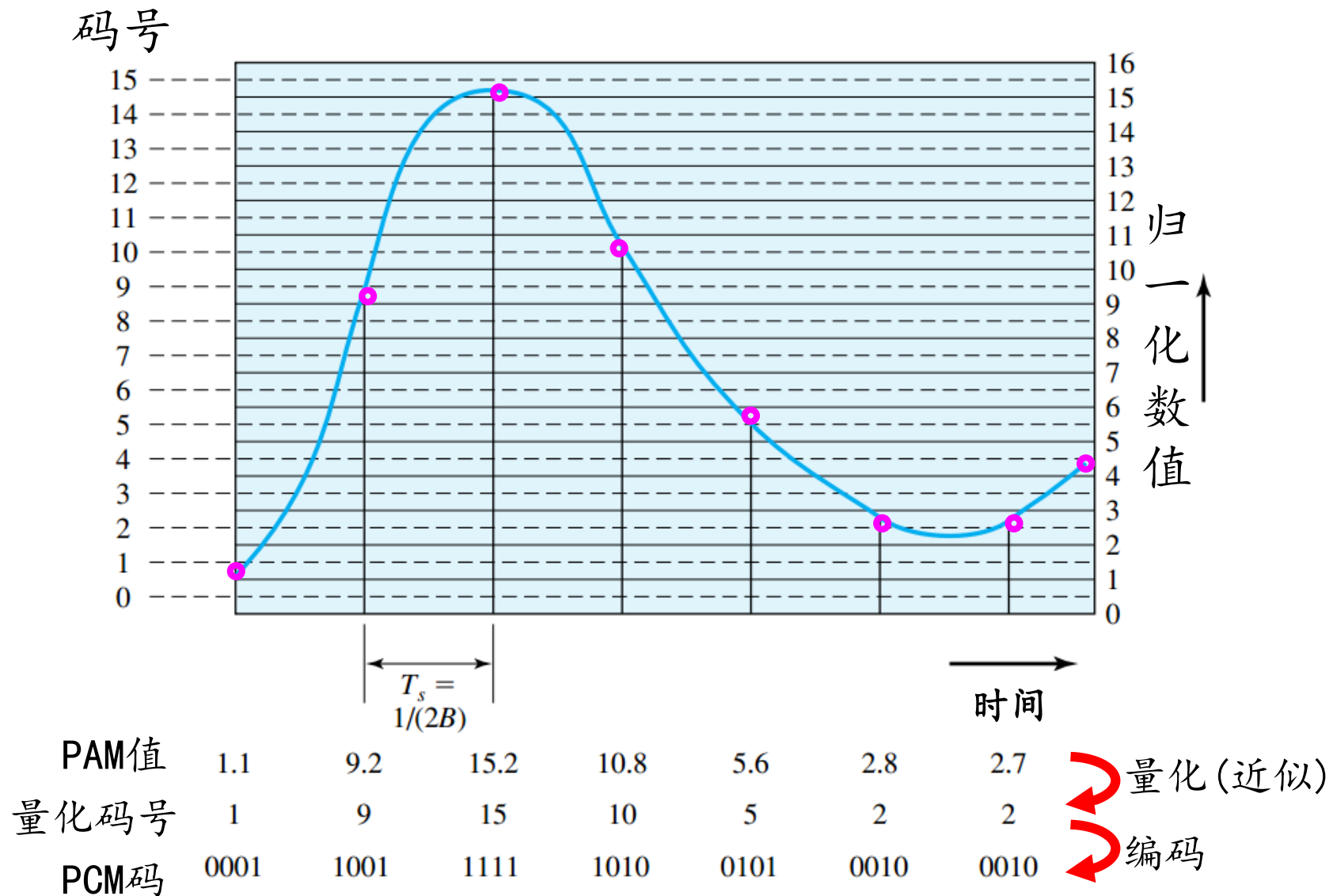
# 脉码调制



- **采样**：对模拟信号（脉幅调制/PAM样本）采样
- **量化**：每个脉幅调制样本被近似地量化为一个离散值
- **编码**：为每个样本赋予一个二进制码

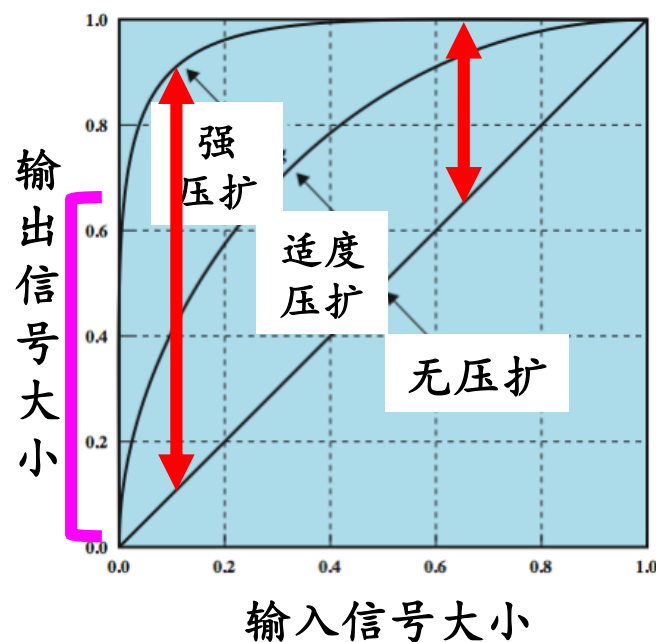
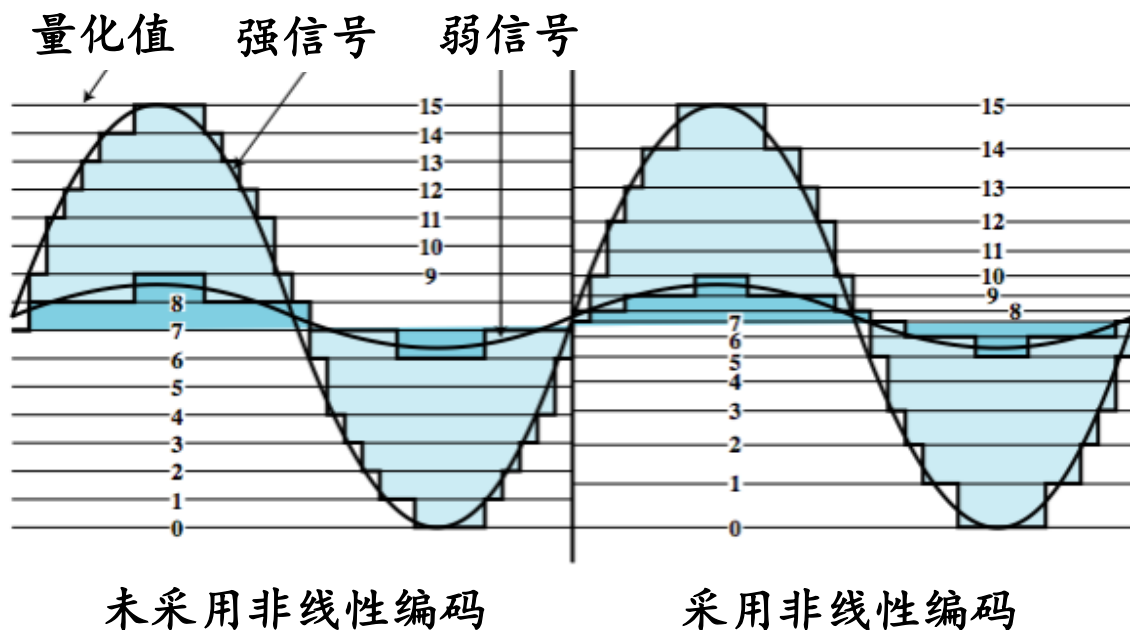


# 脉码调制举例



# 非线性编码

- **等间距量化**：导致无论信号电平是多少，每个样本的绝对误差都相等，结果振幅较低的地方失真较严重。
- **非线性编码**：在信号振幅值较低时量化的次数较多，而在信号振幅值较高时量化的次数较少，则信号的整体失真就可大幅度降低。



- **压缩-扩展**：压扩过程是指对信号的密度范围进行压缩，在压缩时输入的弱信号强信号获得的增益要大，在输出端执行相反的过程。

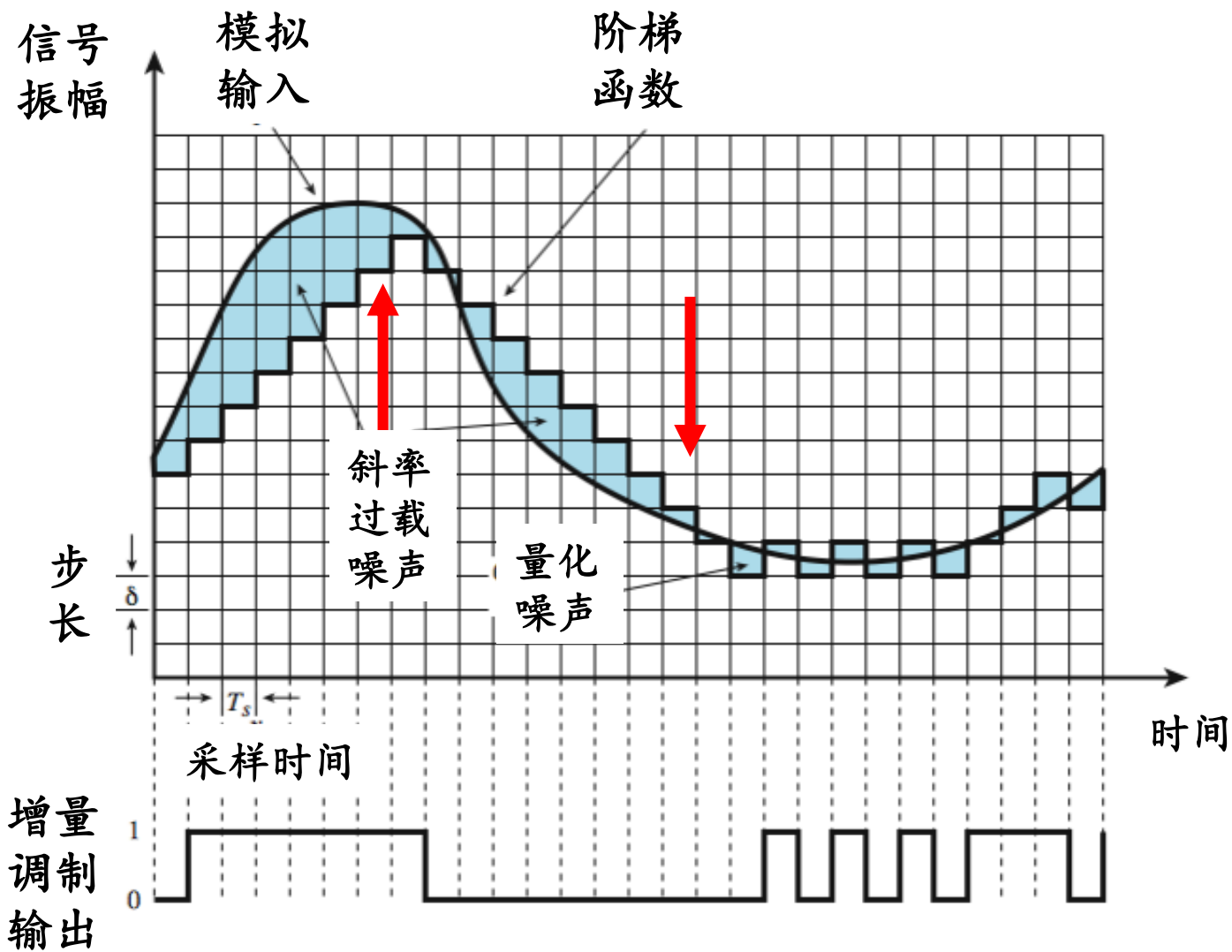


# 增量调制



- 输入的模拟信号用一个**阶梯函数**来近似
  - 在每个采样周期**上升或下降**一个步长值
- 增量调制通过近似一个模拟信号的**导数**，而不是振幅值，产生一个数据流：
  - 具有二进制行为，即在每个采样时刻，函数**上升或下降**一个恒定的步长值  $\delta$
  - 输出可以用一个样本对应一个**二进制值表示**
  - 1表示上升，0表示下降

# 增量调制举例



# 模拟调制系统



- 将数据信号与载波信号合并的过程
- 为什么调制模拟信号？
  - 高频信号更适于有效信号传输（如 天线长度要求）
  - 允许使用频分复用
  - 扩展信号带宽，提高系统抗干扰能力，还可实现传输带与信噪比之间的转换
- 模拟数据调制技术
  - 调幅
  - 调频
  - 调相

# 调幅



幅度调制是用调制信号去控制高频载波的振幅，使其按调制信号的规律而变化的过程。

时域表示式

$$s_{AM}(t) = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t = \underbrace{A_0}_{\text{直流分量}} \cos \omega_c t + \underbrace{m(t)}_{\text{调制信号}} \cos \omega_c t$$

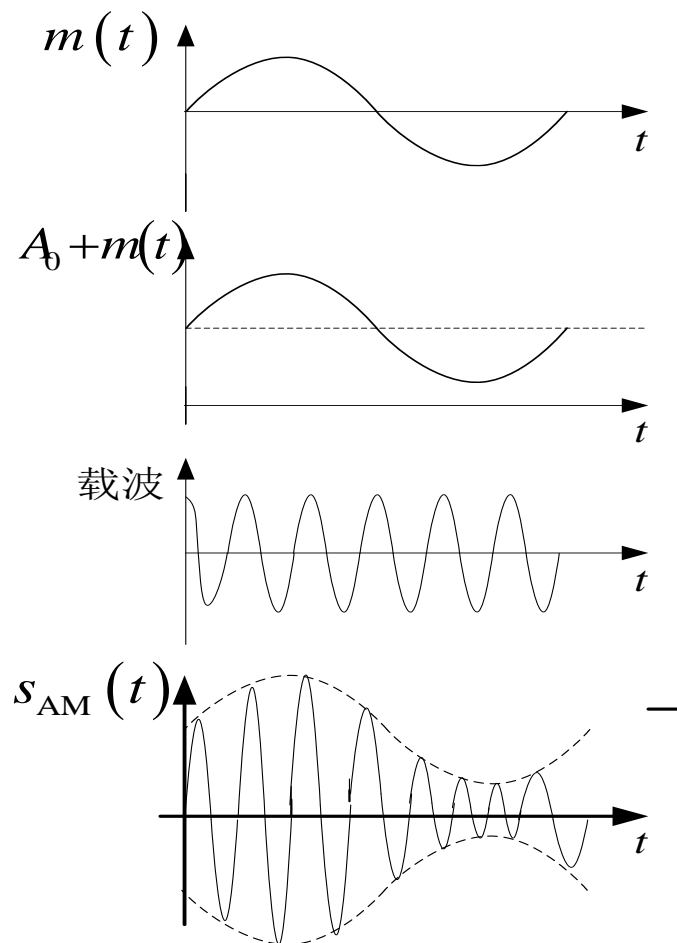
$m(t)$  — 调制信号； $A_0$  — 直流分量。

归一化的载波和输入信号

$$s(t) = [1 + n_a x(t)] \cos 2\pi f_c t$$

$x(t)$  = 归一化输入信号

$n_a$  = 输入信号与载波振幅比  
(调制系数  $n_a < 1$ )





## 第6章 差错检测和纠正

# 奇偶校验比特



- **奇偶校验**：使整个字符中1的个数为偶数（偶校验）或奇数（奇校验）

**偶校验**：偶数个1

- 一般用于同步传输

**奇校验**：奇数个1

- 一般用于异步传输

- 在数据块的末尾附加奇偶校验比特；
- 比如，字符传输，7比特字符1110001 → 附加1比特奇偶校验比特11110001（右边为字符的最低位，左边为最高位的奇偶校验比特）；
- 如果有一个（或任意奇数个）比特被错误地反转（如11100001），接收器将会检测出这个差错；
- 如果有两个（或任意偶数个）比特因错误而翻转，就会出现检测不到的差错

# 因特网检验和



- **因特网检验和**是许多因特网协议所采用的差错检测码，包括IP，TCP，UDP
- 因特网检验和的计算利用了二进制反码运算以及反码求和
- **反码运算**：将数字1替换为数字0，将数字0替换为数字1
- **反码求和**：
  - 将两个数字视为无符号二进制整数，然后相加
  - 如果最左边有进位比特，则和再加1（循环进位）

$$\begin{array}{r} 0011 \\ + 1100 \\ \hline 1111 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 1101 \\ + 1011 \\ \hline 11000 \\ + 1 \\ \hline 1001 \end{array}$$

# 因特网检验和



00 01 F2 03 F4 F5 F6 F7 00 00

发送方

局部和	0001 F203 F204
局部和	F204 F4F5 1E6F9
进位	E6F9 1 E6FA
局部和	E6FA F6F7 1DDF1
进位	DDF1 1 DDF2
对结果执行反码运算	220D

计算检验和

- 将检验和字段全部置为0;
- 将首部中所有的八位组执行反码求和;
- 将计算结果进行反码运算;
- 将结果存放在检验和字段中。

接收方

局部和	0001 F203 F204
局部和	F204 F4F5 1E6F9
进位	E6F9 1 E6FA
局部和	E6FA F6F7 1DDF1
进位	DDF1 1 DDF2
局部和	DDF2 220D FFFF

验证检验和

- 再次对所有八位组，包括检验和字段，进行反码求和;
- 如果结果为全1，则验证成功。



# 循环冗余检验



## 循环冗余检验(Cyclic Redundancy Check, CRC)

- 一种最常用也最有效的差错检验码
- 给定 **k位的比特块**，发送器生成一个 **n-k位** 的比特序列，即 **帧检验序列** (Frame Check Sequence, FCS)
- 含有 **n比特的帧能被** 一些预先设定好的数值 **整除**
- 接收器用同样的数值对接收到的帧进行除法运算，若 **没有余数**，则认为没有差错

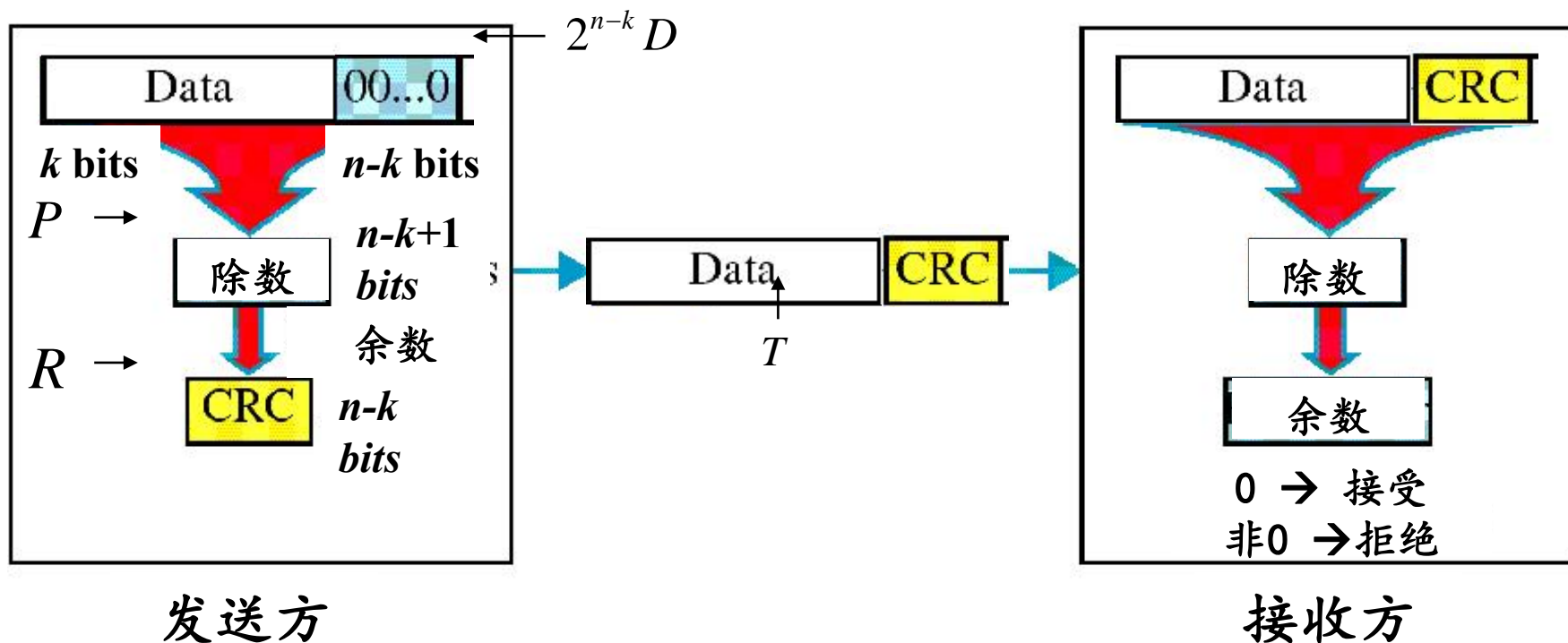
# 循环冗余检验

- **T**: 要发送的 $n$ 比特;
- **D**:  $k$ 比特数据块;
- **F**:  $(n-k)$ 比特检验序列;
- **P**:  $(n-k+1)$ 比特的预定除数

$$T = 2^{n-k} D + F$$

问题: 如何选择 $F$ , 使得

$$T \% P = 0, \text{ i.e., } (2^{n-k} D + F) \% P = 0$$



# 差错纠正流程



- 差错纠正通过在传输报文上附加**冗余信息**完成：冗余信息使接收器能够推算出原报文
- **块纠错码**：一种广泛使用的纠错码

将k比特块映射成  
n比特的码字

如果接收到无效的码字，就  
选择与它最接近的合法码字

每个码字都  
是唯一的

# 块码原理



- **汉明距离**：  $d(v_1, v_2)$  是指  $v_1$  和  $v_2$  之间不同比特的个数。

$$v_1 = 011011, \quad v_2 = 110001$$

$$d(v_1, v_2) = 3$$

011011
110001

- 将  $k$  比特数据块  
映射成  $n$  比特码字；

数据块	码字
00	00000
01	00111
10	11001
11	11110

# 块码原理



- 如果接收到一个非法码字，那么选择与它最近（最短距离）的合法码字。

00100

$$d(00000, 00100) = 1;$$

$$d(11001, 00100) = 4;$$

$$d(00111, 00100) = 2;$$

$$d(11110, 00100) = 3$$

01010

$$d(00000, 01010) = 2;$$

$$d(11001, 01010) = 3;$$

$$d(00111, 01010) = 3;$$

$$d(11110, 01010) = 2;$$

?

# 块码原理



- $(n, k)$ 块码：共有 $2^n$ 个码字，其中合法码字为 $2^k$ 个
- $(n-k)/k$ ：编码的冗余度
- $k/n$ ：编码率
- 假设一个编码由码字 $w_1, w_2, \dots, w_s$ 组成，其中 $s=2^n$ ，则编码的最短距离为为：

$$d_{\min} = \min_{i \neq j} [d(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}_j)]$$

- 如果 $d_{\min} \geq (2t + 1)$ ，可纠正 $t$ 个比特差错
- 如果 $d_{\min} \geq 2t$ ，能检测 $t$ 比特差错，纠正小于等于 $t-1$ 个比特差错

纠正： $t = \left\lfloor \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rfloor$

检测： $t = d_{\min} - 1$

# 总结



## 问题？

殷亚凤

[yafeng@nju.edu.cn](mailto:yafeng@nju.edu.cn)

<http://cs.nju.edu.cn/yafeng/>

Room 901, Building of CS

