



哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



第6章 物理层

主讲人：李全龙



第6章 物理层

本章学习目标

- 理解数据通信相关概念与基本原理
- 掌握物理传输介质特性
- 掌握信道与信道容量的概念，信道容量的计算
- 理解基带传输与频带传输的基本概念
- 掌握基带传输典型编码与频带传输的典型调制技术
- 掌握物理层接口特性

主要内容

- 6.1 数据通信基础
- 6.2 物理介质
- 6.3 信道与信道容量
- 6.4 基带传输
- 6.5 频带传输
- 6.6 物理层接口规程

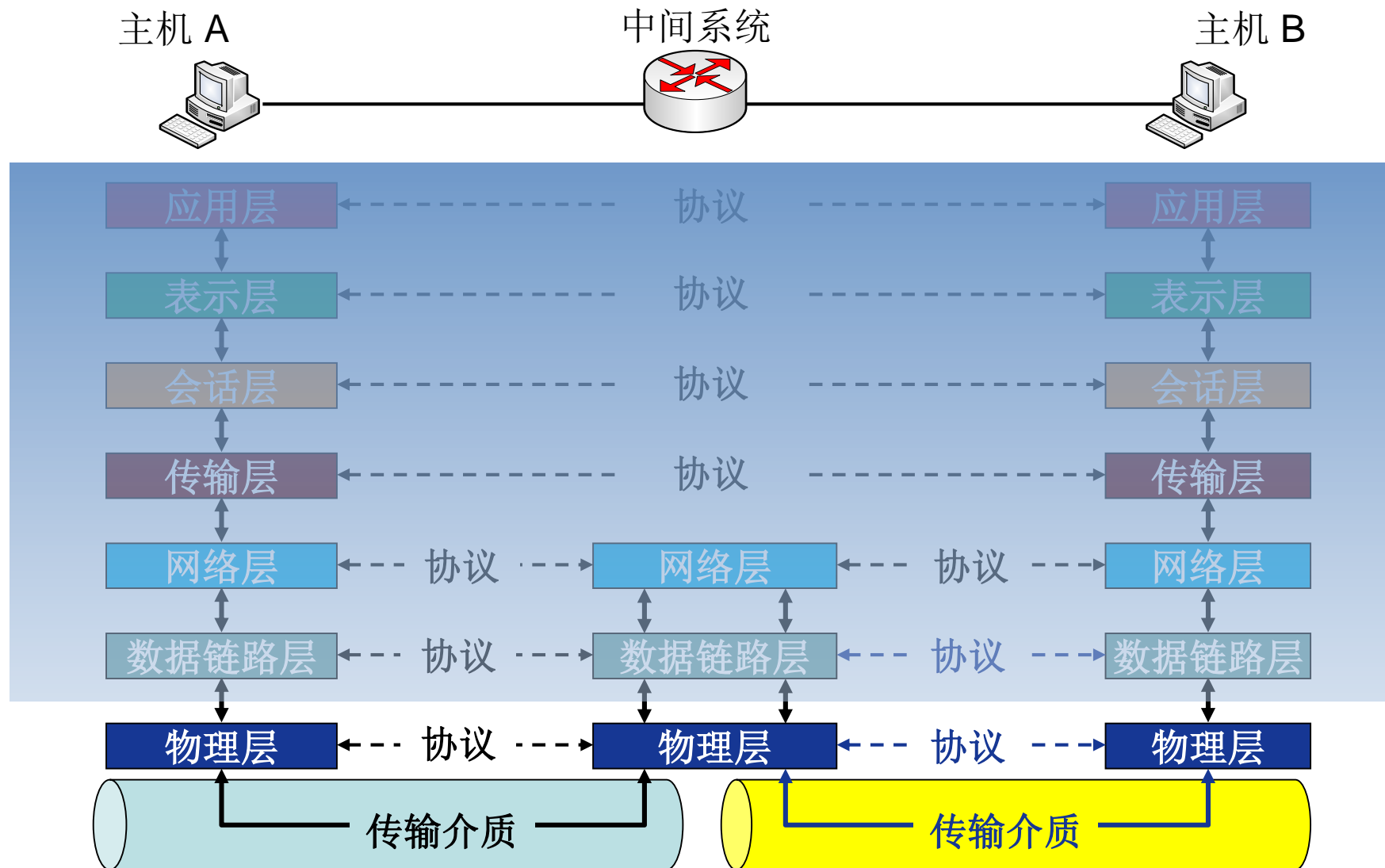




6.1 数据通信基础

物理层

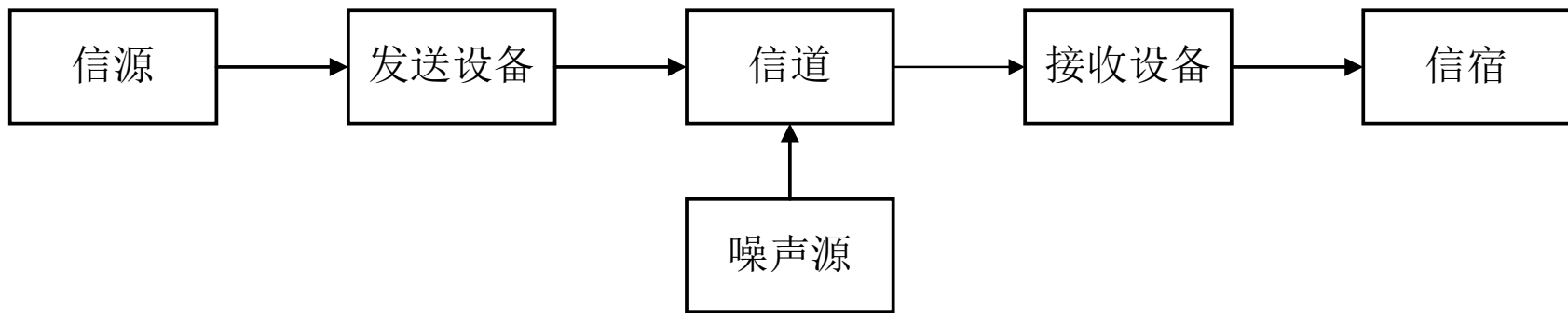
6.1 数据通信基础





数据通信系统

6.1 数据通信基础



- **信源**：将消息转换为信号的设备，如计算机等。
- **发送设备**：将信源产生的信号进行适当的变换装置，使之适合于在信道中传输。主要包括编码和调制。
- **信道**：信号传输通道，如物理介质。
- **噪声**：自然界和通信设备中所产生的干扰。
- **接收设备**：完成发送设备反变换，还原原始发送信号。
- **信宿**：信号终点，将信号转换为供人们能识别的消息。





常见数据通信术语

6.1 数据通信基础

- **数据(data)**: 传送消息的实体。
- **信号(signal)**: 数据的电气的或电磁的表示: $y(t) = A\sin(\omega t + \theta)$
- **“模拟的”(analogous)**: 参数的取值是连续的
- **“数字的”(digital)**: 参数的取值是离散的
- **码元(code)**: 信号基本波形 (信号基本单元)
- **频带(Spectrum)**: 信号频率范围
- **带宽(Bandwidth)**: 有效带宽
- **数据通信方式**: 单工、半双工、全双工
- **并行通信 vs 串行通信**





异步通信 VS 同步通信

6.1 数据通信基础

- Timing problems require a mechanism to **synchronize** the transmitter and receiver
- Two solutions
 - Asynchronous
 - Synchronous





异步通信

6.1 数据通信基础

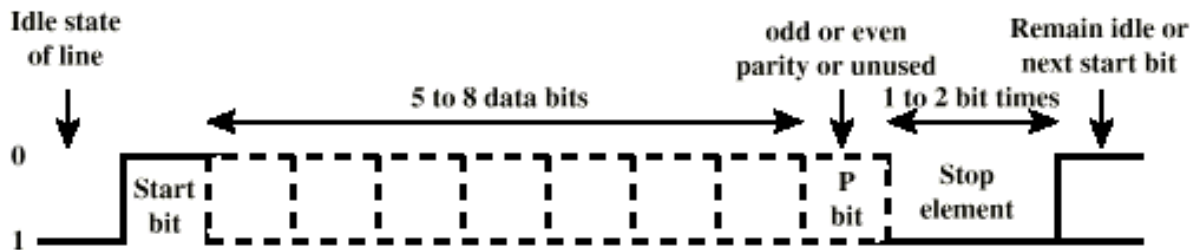
- Data transmitted on character at a time
 - 5 to 8 bits
- Timing only needs maintaining within each character
- Resync with each character





异步通信

6.1 数据通信基础



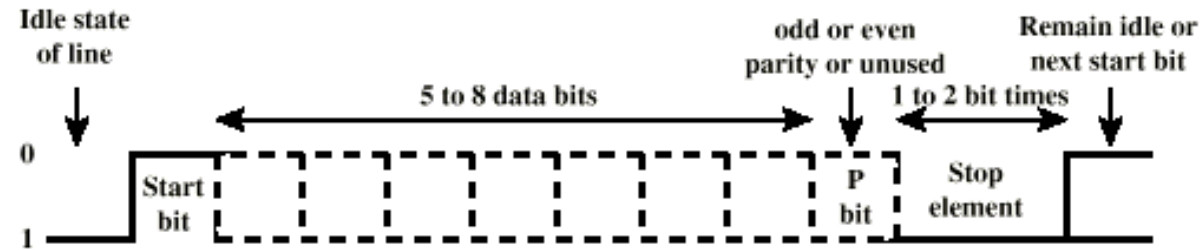
(a) Character format



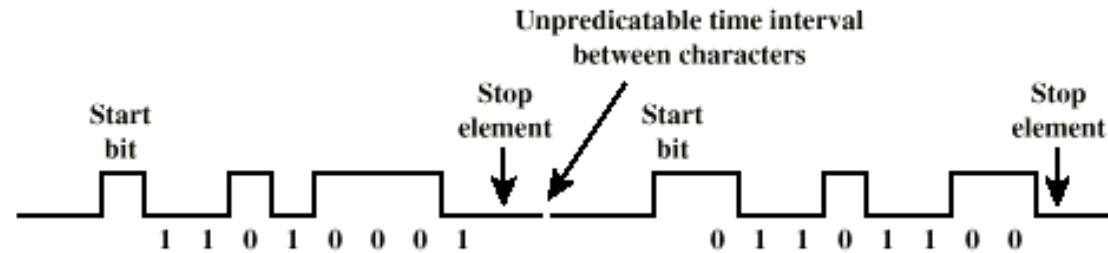


异步通信

6.1 数据通信基础



(a) Character format



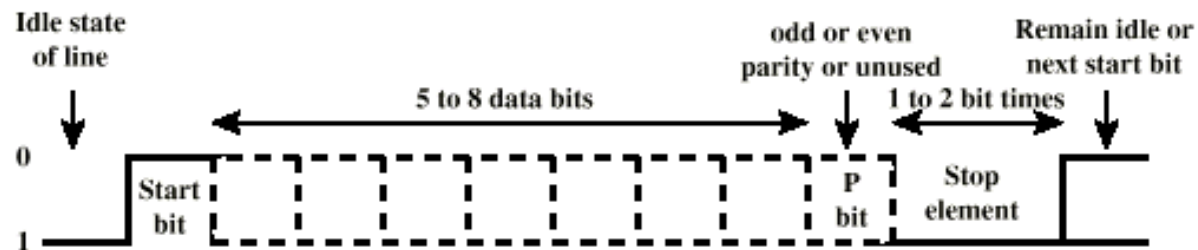
(b) 8-bit asynchronous character stream



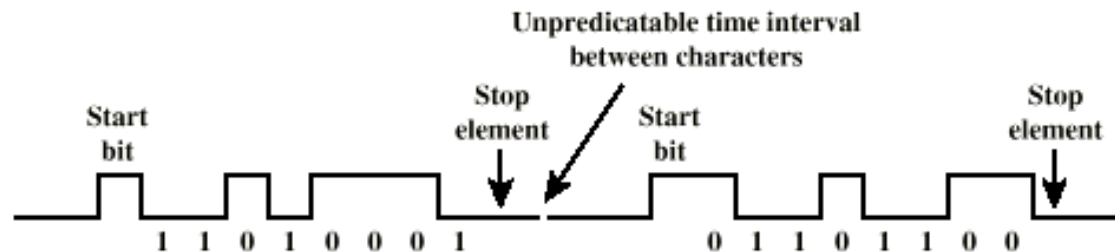


异步通信

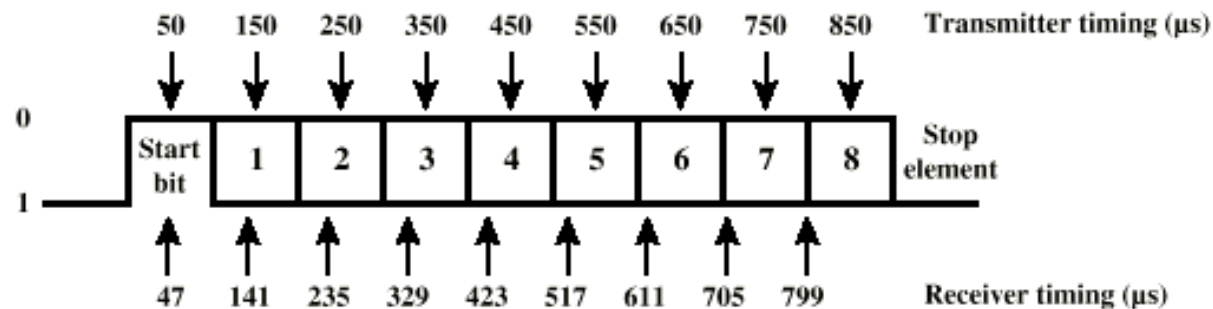
6.1 数据通信基础



(a) Character format



(b) 8-bit asynchronous character stream



(c) Effect of timing error





异步通信

6.1 数据通信基础

- In a steady stream, interval between characters is uniform (length of stop element)
- In idle state, receiver looks for transition 1 to 0
- Then samples next seven intervals (char length)
- Then looks for next 1 to 0 for next char
- **Simple**
- **Cheap**
- Overhead of 2 or 3 bits per char (~20%)
- Good for data with large gaps (keyboard)





同步通信

6.1 数据通信基础

- **Block of data** transmitted without start or stop bits
- **Clocks must be synchronized**
- **Can use separate clock line**
 - Good over short distances
 - Subject to impairments
- **Embed clock signal in data**
 - Manchester encoding
 - Carrier frequency (analog)
- **More efficient** (lower overhead) than async



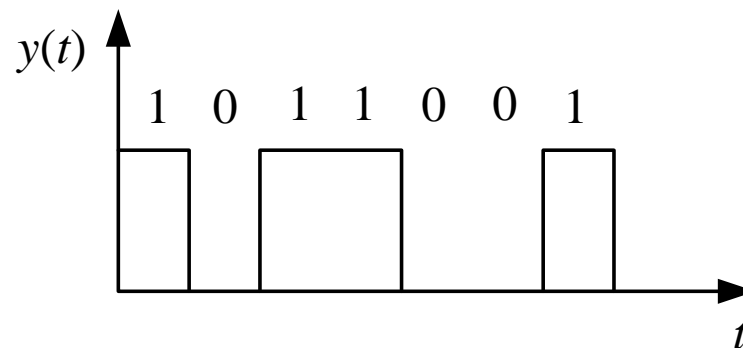
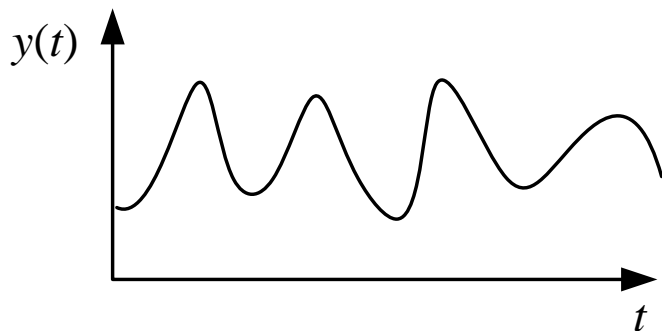


模拟通信 VS 数字通信

6.1 数据通信基础

➤ 区别在于信道中传输的是：

- 模拟信号
- 数字信号





信源编码

6.1 数据通信基础

- Q: 如果信源产生的是模拟数据，如何在数字通信系统中传输？
- A: 信源编码
- 典型的信源编码：PCM

PCM包括三个步骤：采样 → 量化 → 编码

采样：目的就是要用一系列在时间上离散的采样值，代替时间上连续的模拟数据，即实现时间上的离散化。

量化：就是使采样值在取值上离散化

编码：就是将量化后的采样值用一定位数的二进制数码来表示。如果量化级数为 N ，则每个采样值就编码成 $\log_2 N$ 位二进制码



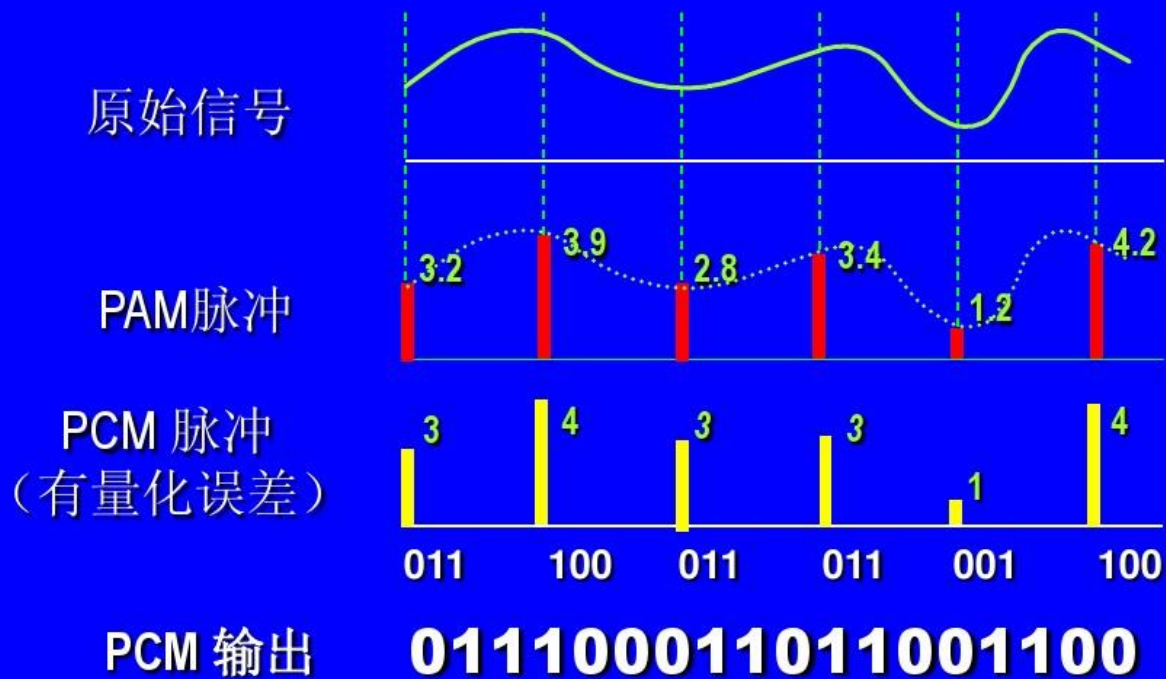


PCM举例

6.1 数据通信基础



PCM转换过程举例





6.2 物理介质



6.2.1 导引型传输介质

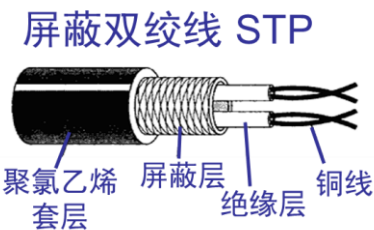
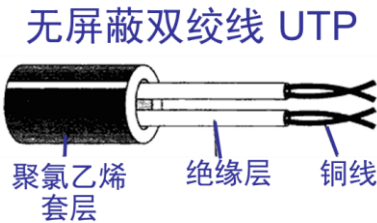
➤ 架空明线

- 易受天气和外界电磁干扰，对外界噪声敏感，带宽有限



➤ 双绞线

- 主要用于基带传输
- 屏蔽双绞线 STP (Shielded Twisted Pair)
- 非屏蔽双绞线 UTP (Unshielded Twisted Pair)



UTP类别	带宽	典型应用
3	16 MHz	低速网络，电话网络
4	20 MHz	10Base-T以太网
5	100 MHz	10Base-T以太网，100Base-T快速以太网
5E（超5类）	100 MHz	100Base-T快速以太网，1000-BaseT吉比特以太网
6	250 MHz	1000Base-T吉比特以太网，ATM网络

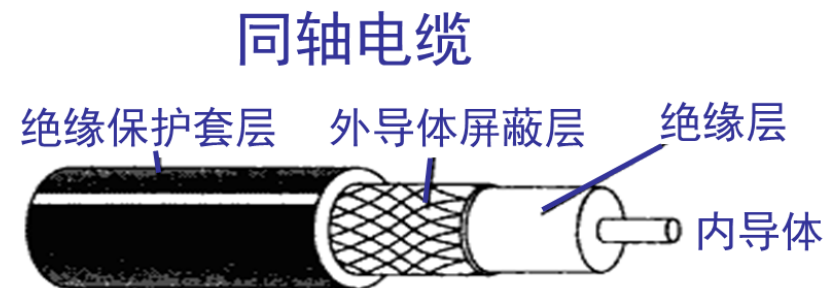
6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.2.1 导引型传输介质

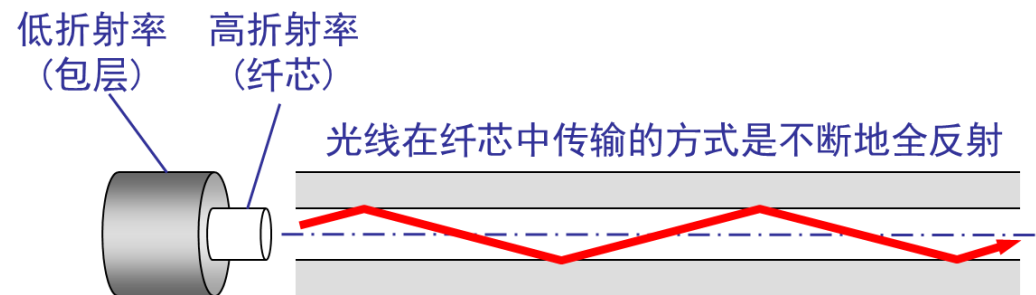
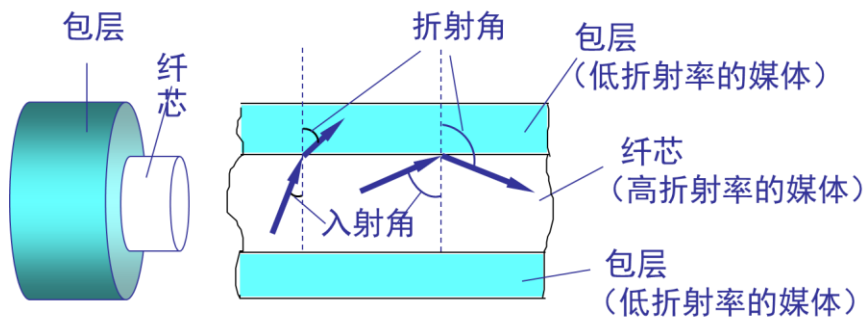
➤ 同轴电缆

- 主要用于频带传输



➤ 光纤

- 基本原理：光的全反射
- 分为：多模光纤和单模光纤两类





6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.2.2 非导引型传输介质

- 自由空间
 - 无线电传播途径
 - 不同频段具有不同传播特性

频段	名称	典型应用
3~30 Hz	极低频 (ELF)	远程导航, 水下通信
30~300 Hz	超低频 (SLF)	水下通信
300~3000 Hz	特低频 (ULF)	远程导航
3~30 kHz	甚低频 (VLF)	远程导航, 水下通信, 声纳
30~300 kHz	低频 (LF)	导航, 水下通信, 无线电信标
300~3000kHz	中频 (MF)	广播, 海事通信, 测向, 救险, 海岸警卫
3~30 MHz	高频 (HF)	远程广播, 电报, 电话, 传真, 搜救, 飞机与舰船通信
30~300 MHz	甚高频 (VHF)	电视, 调频广播, 陆地交通, 空中交通管制, 导航, 飞机通信
0.3~3 GHz	特高频 (UHF)	电视, 蜂窝网, 微波链路, 导航, 卫星通信, GPS, 监视雷达
3~30 GHz	超高频 (SHF)	卫星通信, 微波链路, 机载雷达, 气象雷达, 公用陆地移动通信
30~300 GHz	极高频 (EHF)	雷达着陆系统, 卫星通信, 移动通信, 铁路业务
300 GHz~3 THz	亚毫米波 (0.1~1mm)	尚为划分, 实验应用
43~430 THz	红外线 (7~0.7μm)	光通信系统
430~750 THz	可见光 (0.7~0.4μm)	光通信系统
750~3000 THz	紫外线 (0.4~0.1μm)	光通信系统



6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

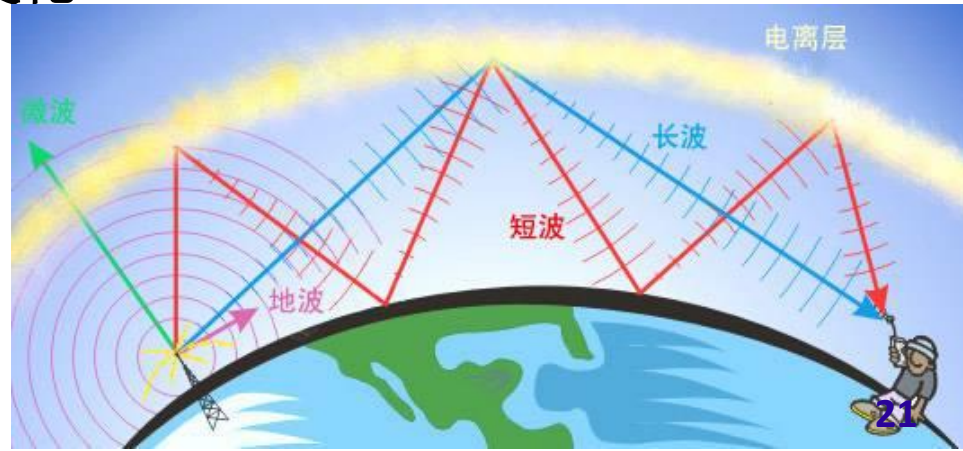
6.2.2 非导引型传输介质

➤ 地波传播

- 频率较低（大约2 MHz以下）的电磁波趋于沿地球表面传播
- 有一定的绕射能力
- 在低频和甚低频段，地波传播距离可以超过数百米或数千公里

➤ 天波传播

- 电离层，距离地表约60~400km高度
- 频率较高（大约在2~30MHz之间）的电磁波会被电离层反射
- 电离层的密度和厚度随时间随机变化
- 电磁波可以传播10000km以上
- 随参信道





6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.2.2 非导引型传输介质

➤ 视线传播

- 频率高于30MHz的电磁波将穿透电离层，不会被反射回来
- 沿地面绕射能力也很弱
- 通常采用视线无障碍的点对点直线传播
- 可以设立地面中继站或卫星中继站进行接力传输





6.3 信道与信道容量



信道分类与模型

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

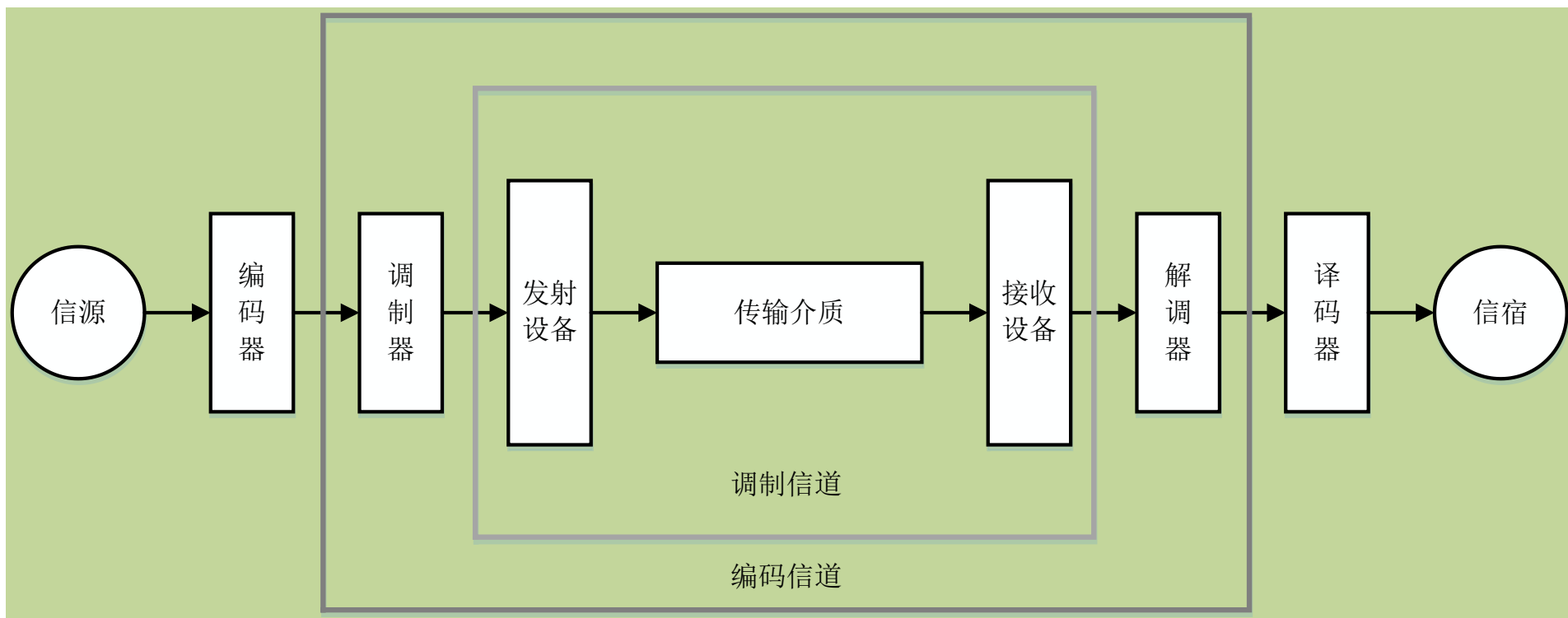
6.3 信道与信道容量

➤ 狭义信道

- 信号传输介质

➤ 广义信道

- 包括信号传输介质和通信系统的一些变换装置，如发送设备、接收设备、天线、调制器等





信道传输特性

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

➤ 恒参信道传输特性

- 各种有线信道和部分无线信道，如微波视线传播链路和卫星链路等，都属于恒参信道
- 理想的恒参信道是一个理想的无失真传输信道
- 对信号幅值产生**固定的衰减**
- 对信号输出产生**固定的时延**

➤ 随参信道传输特性

- 许多无线信道都是随参信道
- 信号的传输**衰减**随时间随机变化
- 信号的传输**时延**随时间随机变化
- 存在**多径传播现象**





信道容量

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

➤ 信道容量是指信道无差错传输信息的**最大平均信息速率**

➤ **奈奎斯特(Nyquist)信道容量公式**

■ 理想无噪声信道的信道容量： **$C=2B\log_2 M$**

■ 其中：**C**为信道容量，单位为**b/s**（或**bps**）；**B**为信道带宽，单位为**Hz**；**M**为进制数，即信号状态数

■ 理想信道的极限容量

➤ **Example:**

■ **Q:** 在无噪声情况下，若某通信链路的带宽为**3 kHz**，采用**4**个相位、每个相位具有**4**种振幅的**QAM**调制技术，则该通信链路的最大数据传输速率是多少？

■ **A:** **24kbps**





信道容量

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

➤ 香农(Shannon)信道容量公式

- 有噪声信道的信道容量: $C = B \log_2(1 + S/N)$
- 其中: S/N 为信噪比, 即信号能量与噪声能量之比
- S/N 通常以分贝 (dB) 为单位描述:
 - $(S/N)_{dB} = 10 \log_{10}(\text{Signal power}/\text{Noise power})$

➤ Example:

- Q: 若某通信链路的带宽为2 MHz, 信噪比为30 dB, 则该通信链路的最大数据传输速率约是多少?
- A: 20 Mbps





6.4 基带传输基础



基带传输

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

- 信源发出的原始电信号是**基带信号**
 - 模拟信源→模拟基带信号
 - 数字信源→数字基带信号
- 基带信号往往包含有较多的**低频成分**，甚至有直流成分
- 直接在信道中传送基带信号称为**基带传输**
- 实现基带传输的系统称为**基带传输系统**
- 在信道中直接传输数字基带信号，称为**数字基带传输**，相应的系统称为**数字基带传输系统**





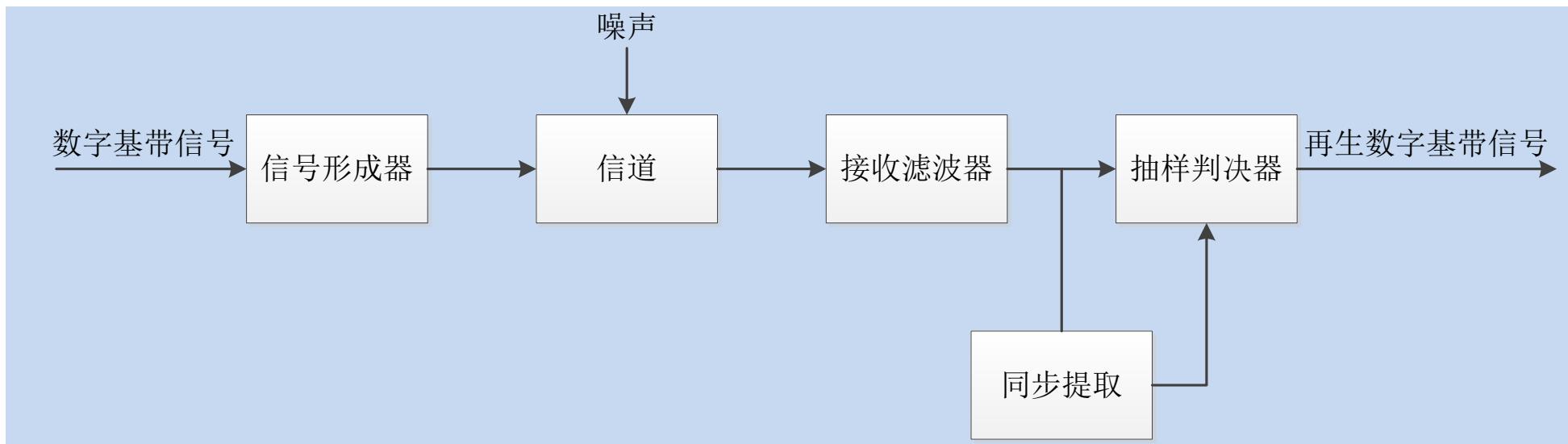
数字基带传输系统

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础



- 基带信号比较适合在具有**低通特性的有线信道**中传输，通常不适合在无线信道中直接传输
- 信道的传输特性会引起波形失真，并会受噪声的影响
- 信道中的信号传播一定距离后，信号质量就会有所下降，甚至出现传输误码现象





典型数字基带信号码型

6.1 数据通信基础

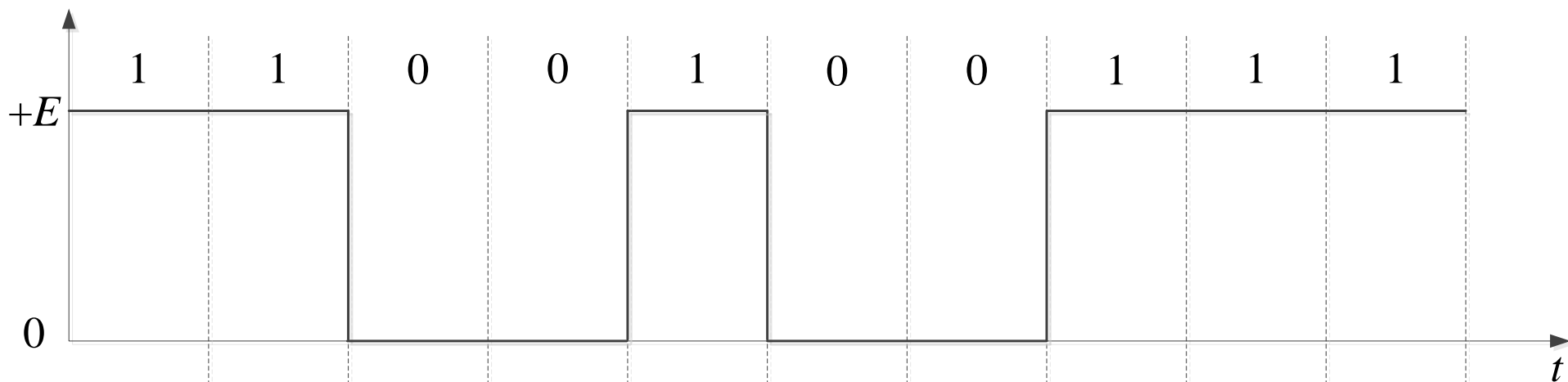
6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

➤ 单极不归零码 (Not Return to Zero-NRZ)

■ 这种码型易于产生，但不适合长距离传输





典型数字基带信号码型

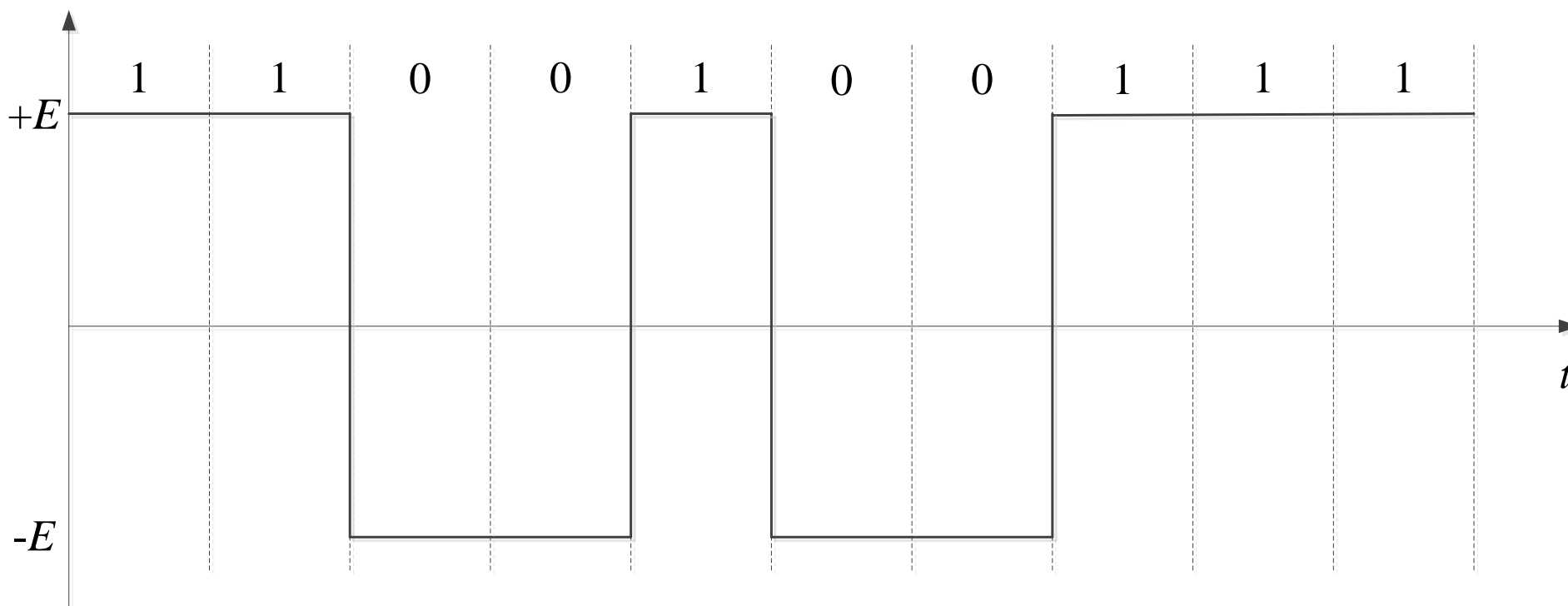
6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

► 双极不归零码





典型数字基带信号码型

6.1 数据通信基础

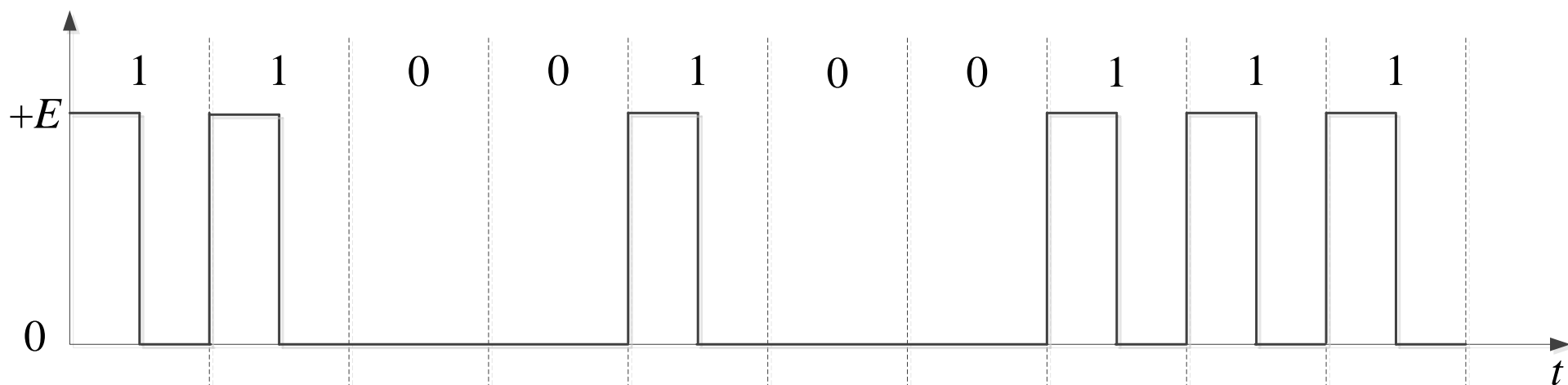
6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

➤ 单极归零码 (Return to Zero-RZ)

- 码元不为零的时间占一个码元周期的百分比称为**占空比**
- 若码元不为零时间为 $T_b/2$ ，码元周期为 T_b ，则该单极归零码的占空比为**50%**





典型数字基带信号码型

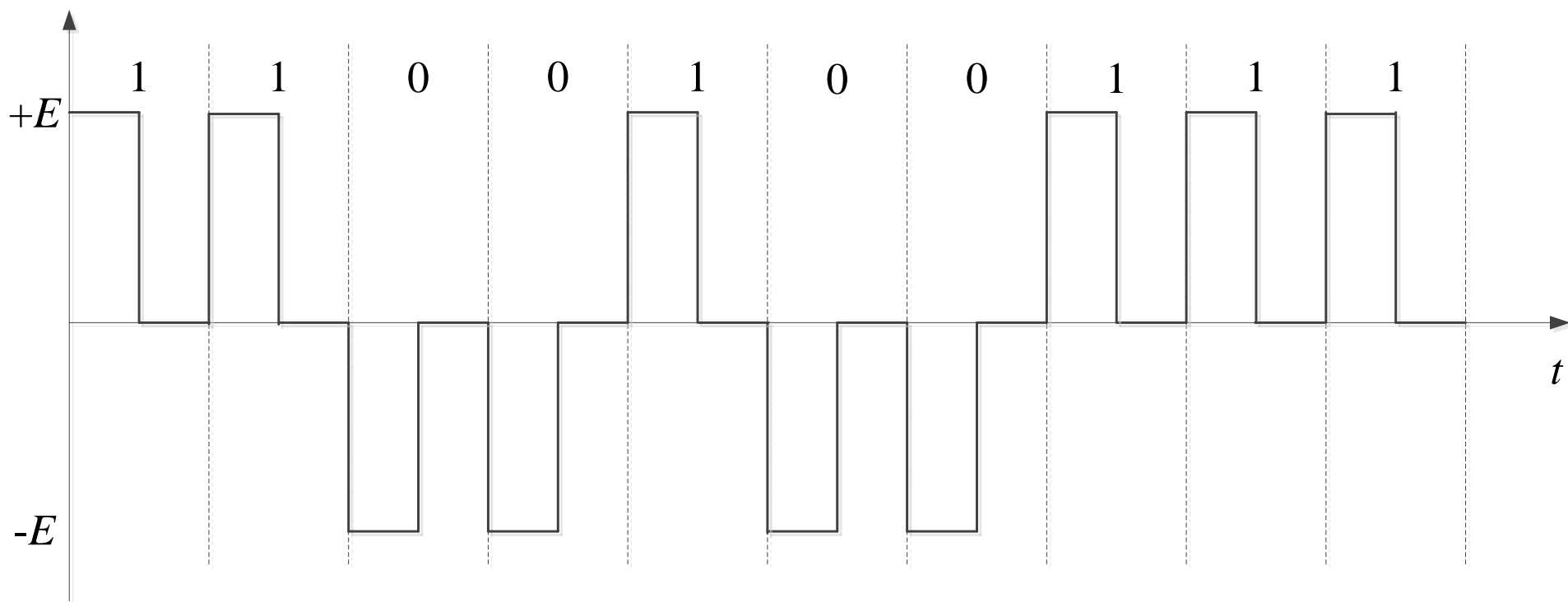
6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

➤ 双极归零码





典型数字基带信号码型

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

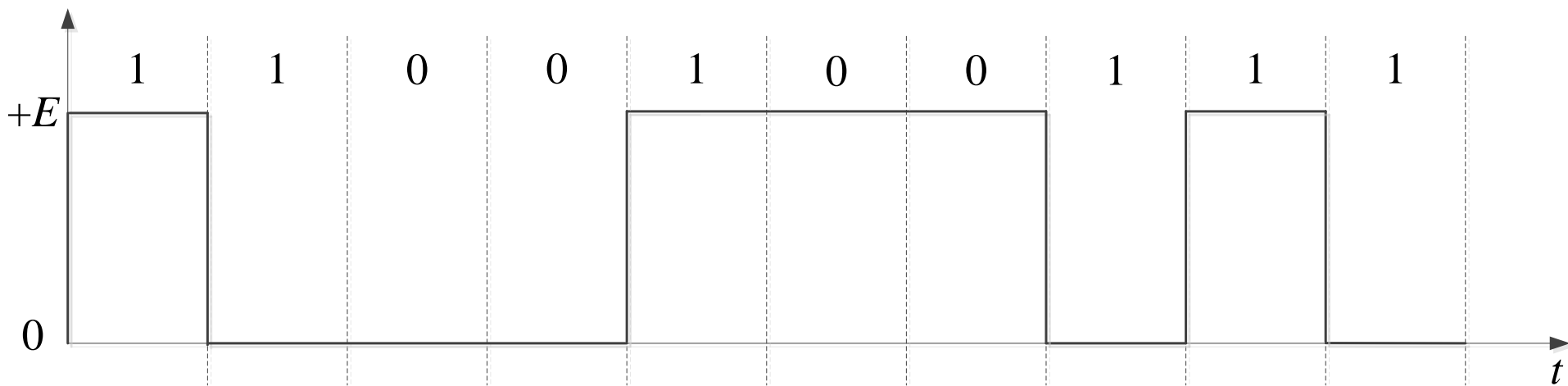
6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

➤ 差分码

■ 差分码又称为**相对码**

■ 例如：相邻脉冲有电平跳变表示**1**，无跳变表示**0**





典型数字基带传输码型

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

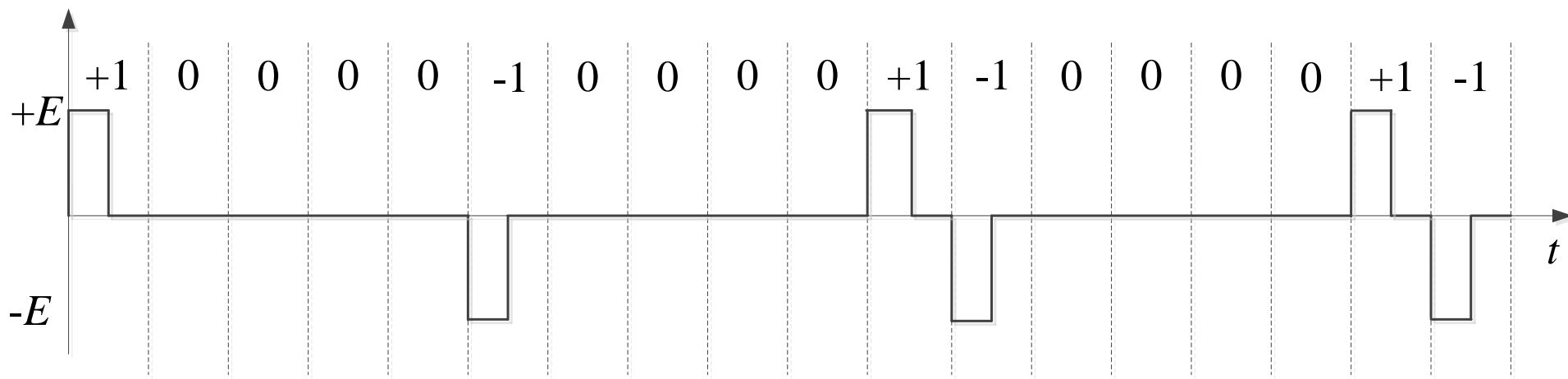
➤ AMI码

■ AMI (Alternative Mark Inversion) 码的全称是**信号交替反转码**

■ AMI码的编码规则:

- 信息码中的0编码为AMI传输码中的0 (零电平)
- 信息码中的1交替编码为AMI传输码中的+1 (正脉冲) 和-1(负脉冲)

■ 例如:





典型数字基带传输码型

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

► 双相码

- 双相码（Biphase Code）又称为**曼彻斯特（Manchester）码**
- 双相码只有正、负两种电平
- 每个比特持续时间的**中间时刻**要进行电平跳变
- 正（高）电平跳到负（低）电平表示**1**
- 负电平跳到正电平表示**0**
- 双相码在每个比特周期中间时刻都会有电平跳变，因此**便于提取定时信息**
- 双相码利用了两个脉冲编码信息码中的一个比特，相当于双极码中的两个比特
- 10Mbps的以太网采用曼彻斯特码





典型数字基带传输码型

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

► 双相码

- 双相码的另一种码型是差分双相码，也称为**差分曼彻斯特码**
- 差分双相码的每个比特周期的中间时刻也要进行电平跳变，但该跳变**仅用于同步**
- 利用每个比特开始处是否存在电平跳变编码信息：
 - 开始处有跳变表示**1**
 - 无跳变表示**0**
- IEEE802.5令牌环网采用差分曼彻斯特码





典型数字基带传输码型

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

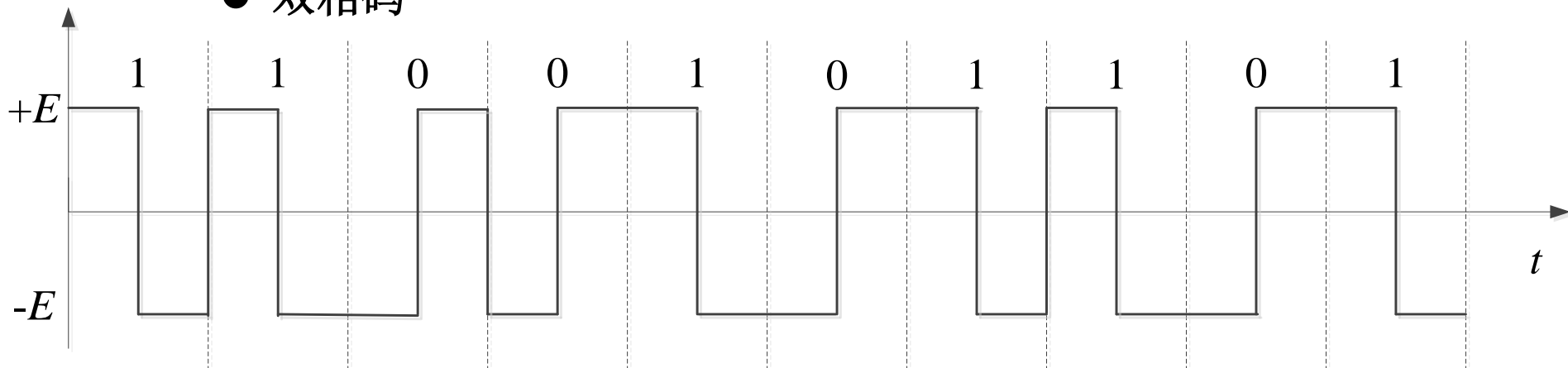
6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

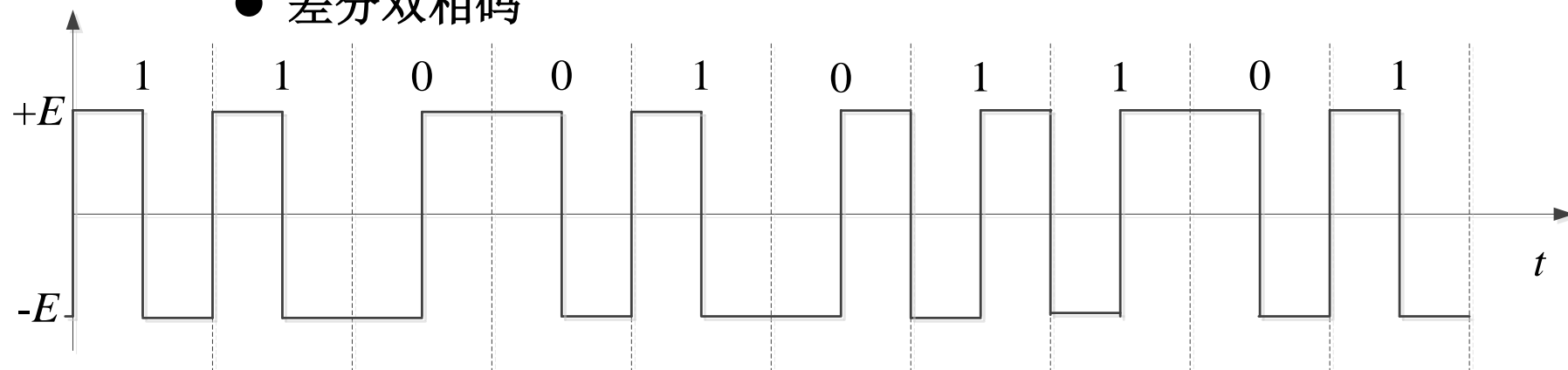
➤ 双相码

■ 例如：

● 双相码



● 差分双相码





典型数字基带传输码型

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

➤ $nBmB$

- $nBmB$ 码将 n 位二进制信息码作为一组，映射成 m 位二进制新码组，其中 $m > n$
- 由于 $m > n$ ，因此 2^m 个码的新码组中只会用到 2^n 个，多出 $(2^m - 2^n)$ 个码
- 可以从 2^m 个码中优选出 2^n 个码作为有效码，已获得良好的编码性能，其余码则作为禁用码，可以用于检错
- 快速以太网（100BASE-TX和100BASE-FX）传输码采用的是4B5B编码
 - 这样只需从 $2^5=32$ 个码中优化选择 $2^4=16$ 个码，以便保证足够的同步信息，并且可以利用剩余的16个禁用码进行差错检测





6.5 频带传输基础



频带传输

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

- 基带信号具有低通特性，可以在具有低通特性的信道中进行传输
- 许多**带通信道**（如无线信道）不具有低通特性，因此不能在这些信道中直接传输基带信号
- 只能利用基带信号去调制与对应信道传输特性相匹配的载波信号
- 通过在信道中传送经过调制的载波信号实现将基带信号所携带信息传送出去
- 利用模拟基带信号调制载波，称为**模拟调制**，利用数字基带信号调制载波，称为**数字调制**
- 数字调制就是利用数字基带信号控制（或影响）载波信号的某些特征参量





数字调制系统

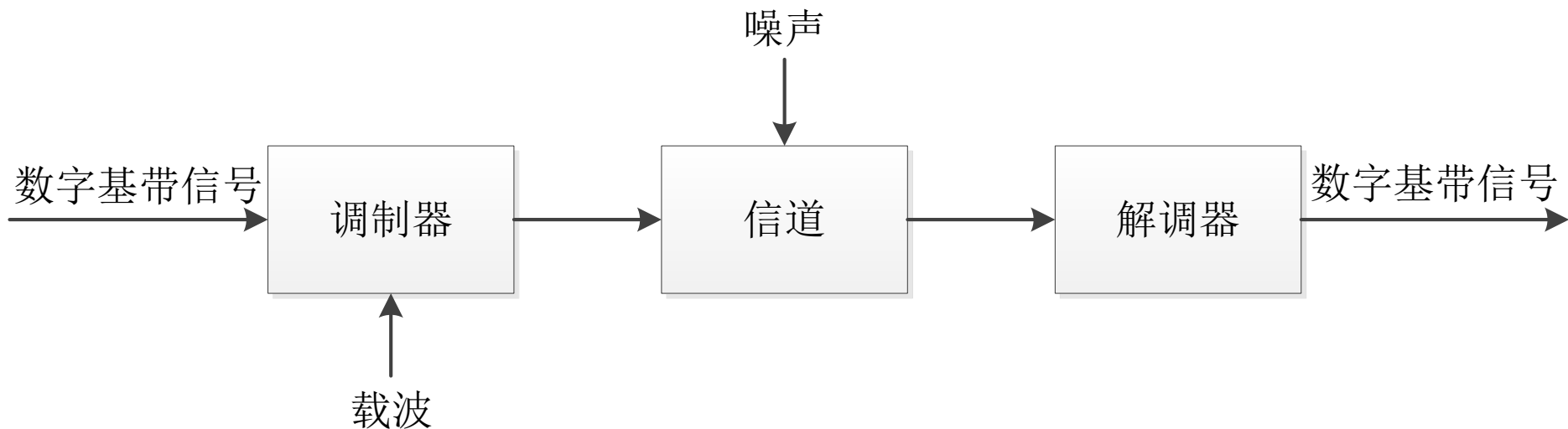
6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础



➤ 频带传输系统通常选择正弦波信号作为载波：

$$y(t) = a \cos(2\pi ft + \varphi)$$

➤ 二进制数字调制：

- 二进制幅移键控 (2ASK)
- 二进制频移键控 (2FSK)
- 二进制相移键控 (2PSK)





二进制幅移键控 (2ASK)

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

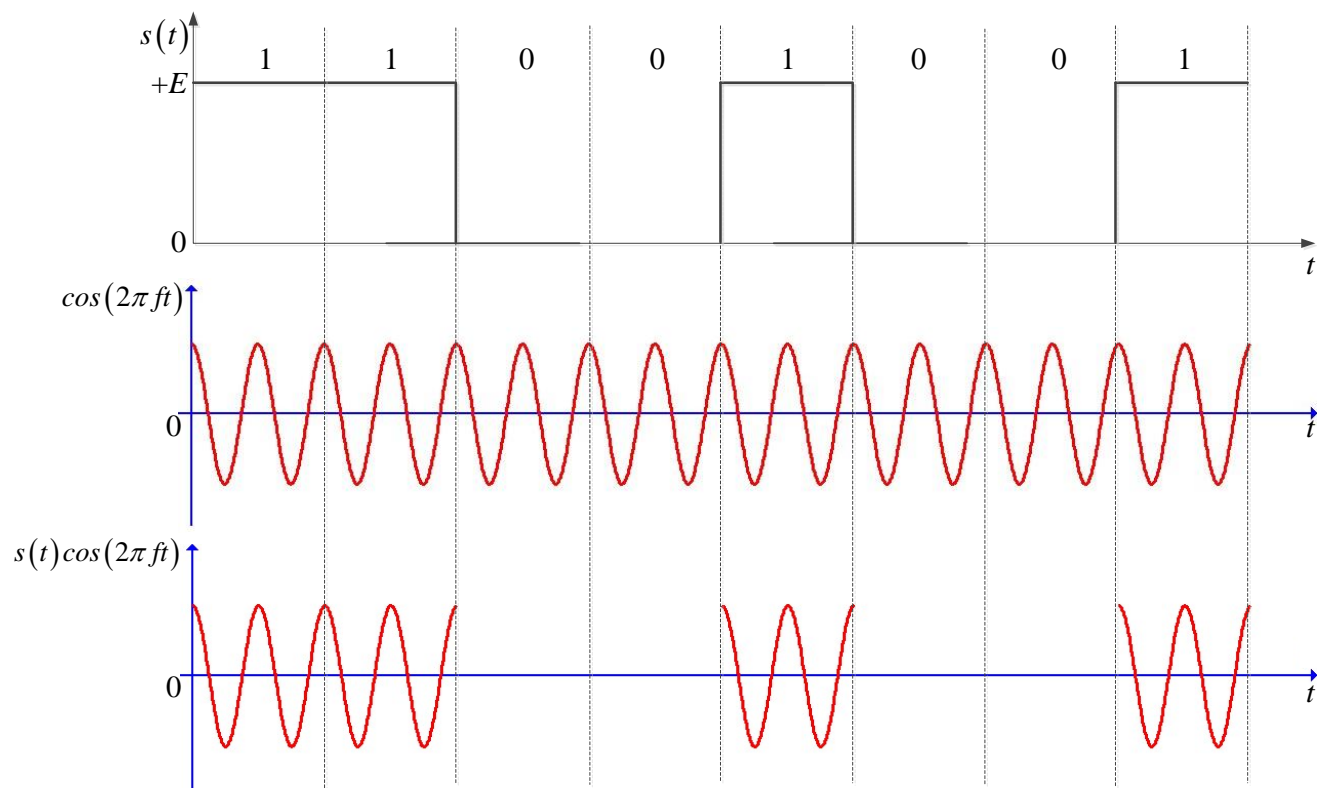
6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

- 利用二进制基带信号控制载波信号的幅值变化:

$$y'(t) = s(t) \cos(2\pi ft)$$

- 二进制基带信号 $s(t)$ 为单极不归零码信号波形





二进制频移键控 (2FSK)

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

- 选择两个不同频率的载波, f_1 和 f_2
- 二进制基带信号编码的信息 (比特) 序列为 $\{b_n\}$

$$y'(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_1 t), & b_n = 0 \\ \cos(2\pi f_2 t), & b_n = 1 \end{cases} \quad 0 < t < T_b$$

- 例如:



二进制频移键控 (2FSK)

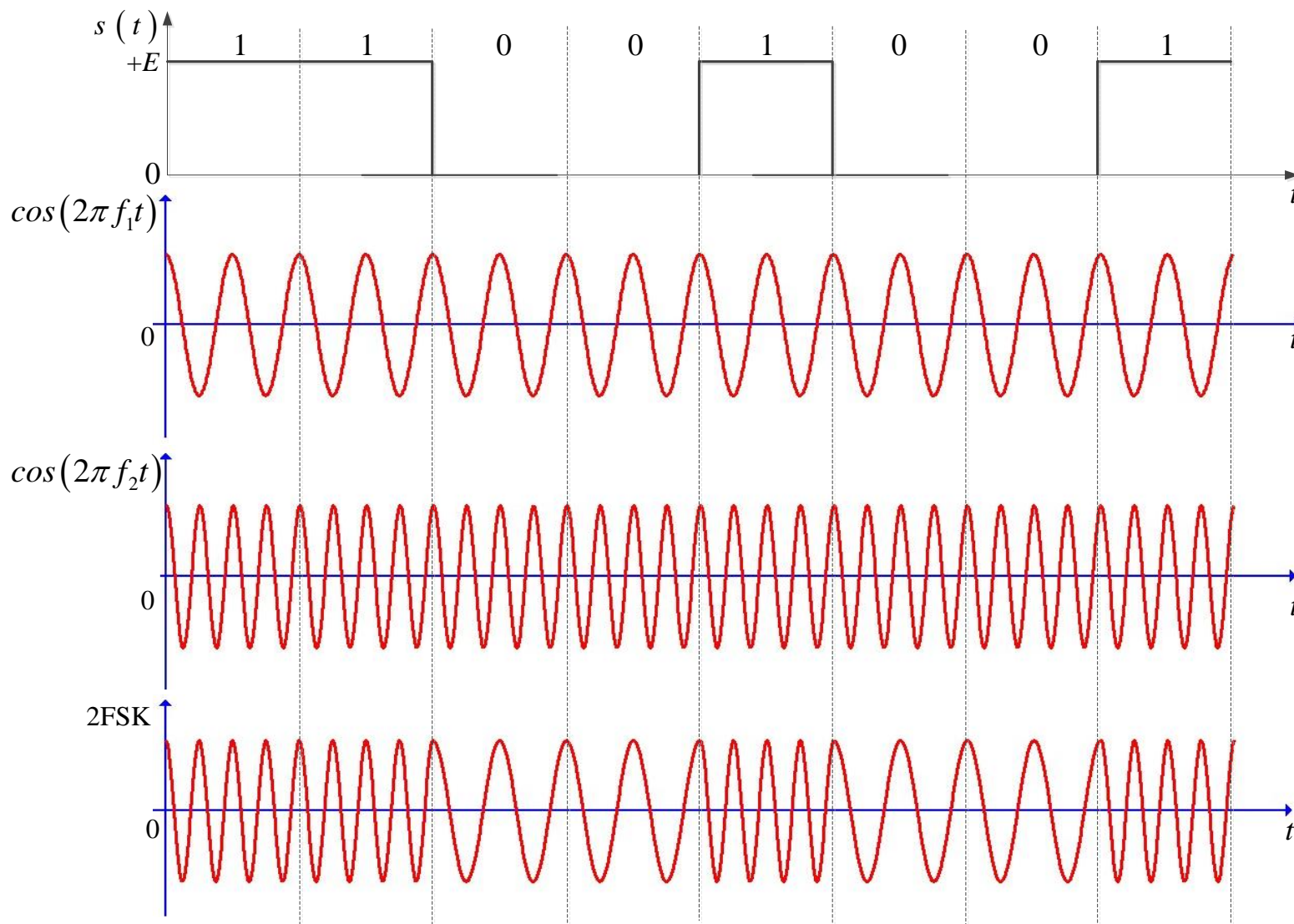
6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础





二进制相移键控 (2PSK)

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

- 利用二进制基带信号控制载波信号的相位变化
- 二进制基带信号编码的信息（比特）序列为 $\{b_n\}$

$$y'(t) = \cos(2\pi ft + \varphi(b_n))$$

- 其中：

$$\varphi(b_n) = \begin{cases} \varphi_0, & b_n = 0 \\ \varphi_0 + \pi, & b_n = 1 \end{cases}$$





二进制相移键控 (2PSK)

6.1 数据通信基础

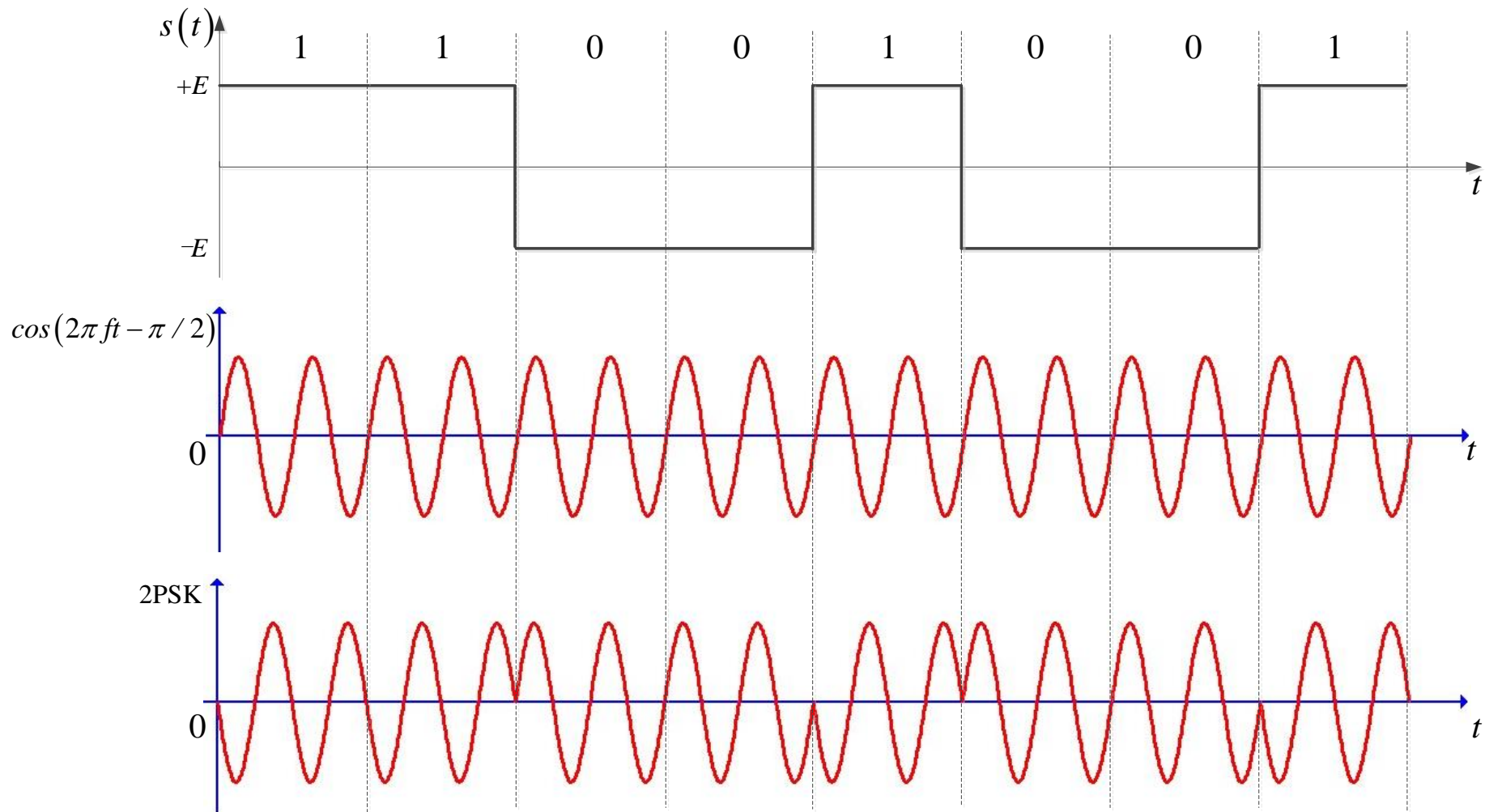
6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

➤ 例如（载波信号初始相位 $\varphi_0 = -\pi/2$ ）：





二进制差分相移键控 (2DPSK)

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

- 利用相邻两个码元载波间的相对相位变化表示数字基带信号的数字信息
- 二进制基带信号编码的信息（比特）序列为 $\{b_n\}$:

$$y'_n(t) = \cos(2\pi ft + \varphi_{n-1} + \Delta\varphi(b_n))$$

- 其中:

$$\Delta\varphi(b_n) = \begin{cases} 0, & b_n = 0 \\ \pi, & b_n = 1 \end{cases}$$





二进制差分相移键控 (2DPSK)

6.1 数据通信基础

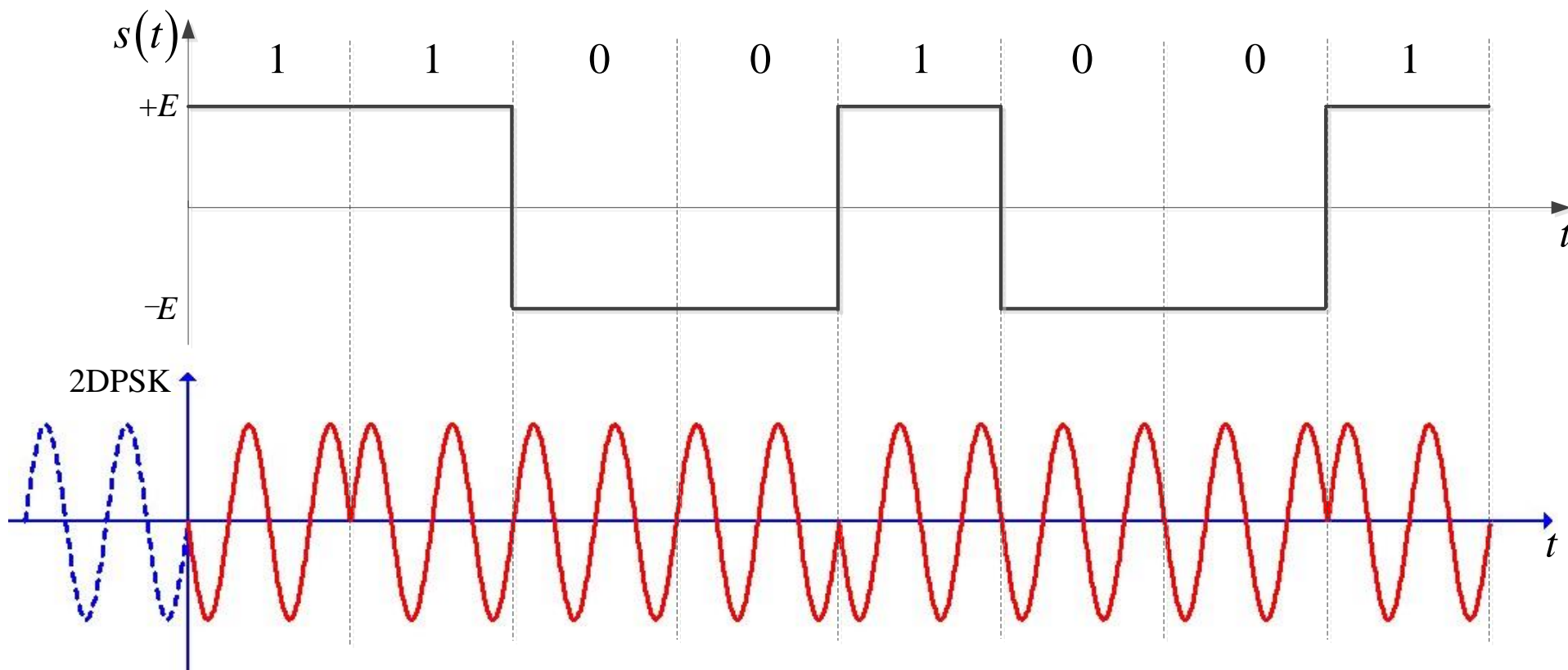
6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

➤ 例如（虚线为前一码元调制信号或初始参考载波信号）：





二进制数字调制性能

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

➤ 频带利用率:

- 2ASK、2PSK以及2DPSK的频带利用率相同
- 2FSK的频带利用率最低

➤ 误码率:

- 在相同信噪比下，2PSK的误码率最低，而2ASK的误码率最高
- 二进制相移键控抗噪声性能优于二进制频移键控，二进制频移键控优于二进制幅移键控

➤ 对信道特性的敏感性:

- 2ASK对信道特性变化比较敏感，性能最差
- 2FSK与2PSK对信道特性变化不敏感





多进制数字调制

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

➤ 在确定带宽与频带利用率的情况下，提高数据传输速率的有效方法：

■ 提高每个码元传输信息量，每个码元调制多个比特信息，即
多进制数字调制

➤ 数据传输速率 R_b (bps) 与码元传输速率 R_B (Baud) 以及进制数 M (通常为2的幂次) 之间的关系为：

$$R_b = R_B \log_2 M$$

➤ R_b 也称为**比特率**，单位为bps；码元传输速率 R_B 也称为调制速率，或称为**波特率**，单位为Baud

➤ 多进制数字调制需要更大的信噪比，发送端需要增大发送信号的功率





正交幅值调制QAM

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

- 正交幅值调制（QAM）也称为幅值相位联合键控(APK)
- 具有高频带利用率，且可以自适应调整调制速率
- QAM系统设备比较简单，应用广泛
- QAM的调制信号的幅值和相位均受基带信号调制，可表示为：

$$y'(t) = A_n \cos(2\pi ft) + B_n \sin(2\pi ft)$$

- 其中：
$$\begin{cases} A_n = s_n \cos(\varphi_n) \\ B_n = -s_n \sin(\varphi_n) \end{cases}$$
- QAM信号是由两路相互正交载波经调制后叠加而成：
 - 两路载波信号的幅值分别被离散幅值序列 $\{A_n\}$ 和 $\{B_n\}$ 所调制，分别称为同相信号（I信号）和正交信号（Q信号）



正交幅值调制QAM

6.1 数据通信基础

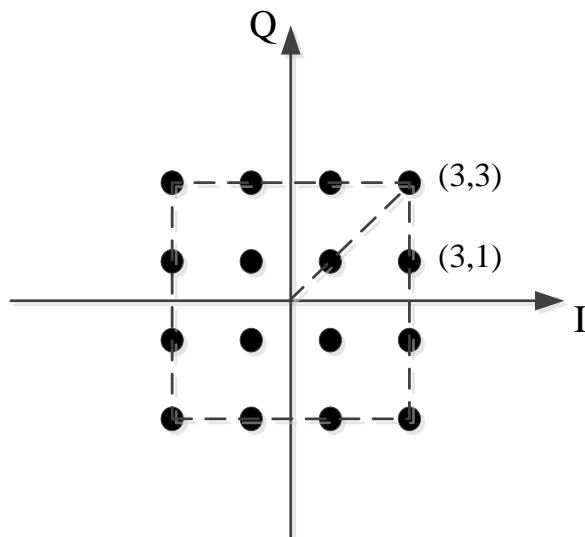
6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

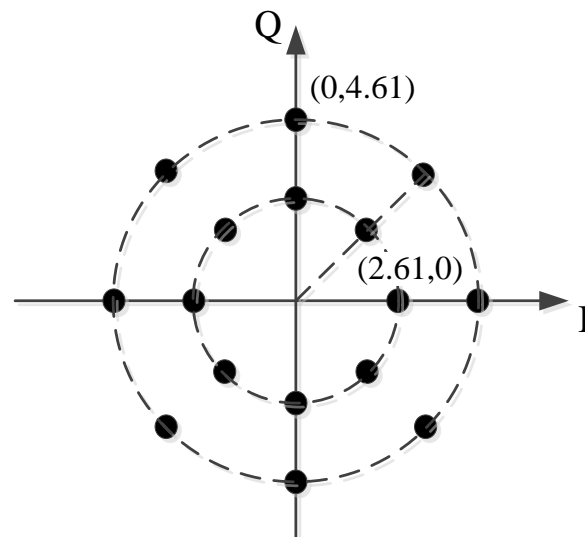
6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

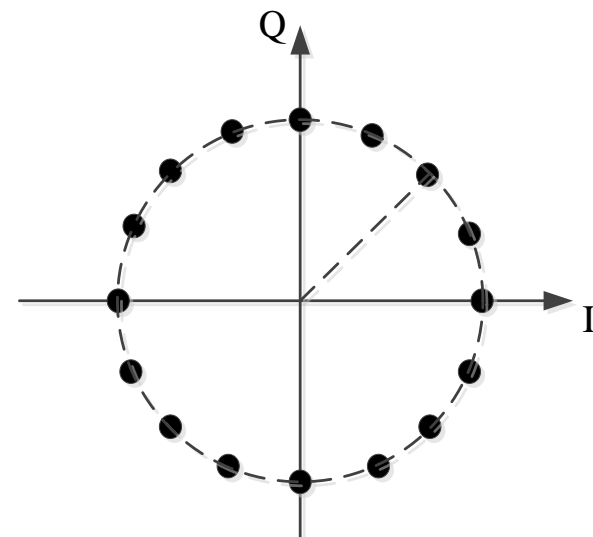
➤ QAM已调信号的矢量端点在I-Q平面上的分布, 称为**QAM星座图**



a) 方形16QAM星座图



b) 圆形16QAM星座图



c) 16PSK星座图

➤ **QAM优点:**

- 频带利用率高
- 抗噪声能力强
- 调制解调系统简单



Spread Spectrum

- 6.1 数据通信基础
- 6.2 物理介质
- 6.3 信道与信道容量
- 6.4 基带传输基础
- 6.5 频带传输基础

- Analog or digital data
- Analog signal
- Spread data over wide bandwidth
- Makes jamming and interception harder
- **Frequency hopping**
 - Signal broadcast over seemingly random series of frequencies
 - Invented by a Hollywood star (Hedy Lamarr)
- **Direct Sequence**
 - Each bit is represented by multiple bits in transmitted signal
 - Chipping code





6.6 物理层接口规程



物理层接口

- 6.1 数据通信基础
- 6.2 物理介质
- 6.3 信道与信道容量
- 6.4 基带传输基础
- 6.5 频带传输基础

6.6 物理层接口规程

- Data processing devices (or data terminal equipment, **DTE**) do not (usually) include data transmission facilities
- Need an interface called data circuit terminating equipment (**DCE**)
 - e.g. modem, NIC
- DCE transmits bits on medium
- DCE communicates data and control info with DTE
 - Done over interchange circuits
 - Clear **interface standards** required





物理层接口特性

6.1 数据通信基础

6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

6.6 物理层接口规程

- **机械特性：**指明接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等等。
- **电气特性：**指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。
- **功能特性：**指明某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义。
- **过程特性：**指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。





哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



谢谢!