

# 5. 数据链路层

## 5.1 链路层服务

### 术语:

- ❖ 主机和路由器：结点(nodes)
- ❖ 连接相邻结点的通信信道：链路(links)
  - 有线链路(wired links)
  - 无线链路(wireless links)
  - 局域网(LANs)
- ❖ 链路层(第2层)数据分组：帧(frame)，封装网络层数据报



**数据链路层**负责通过一条链路从一个节点向另一个物理链路直接相连的相邻节点传送数据报。

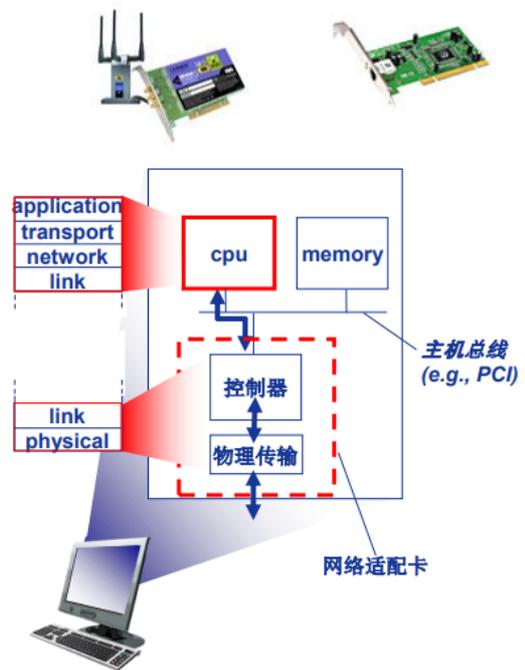
### 提供的服务

- 组帧(framing)
  - 封装数据报构成数据帧，加首部和尾部
  - 帧同步
- 链路接入(link access)
  - 如果是共享介质，需要解决信道接入(channel access)
  - 帧首部中的“MAC”地址，用于标识帧的源和目的
    - 与IP地址不同
- 相邻结点间可靠交付
  - 在低误码率的有线链路上很少采用(如光纤，某些双绞线等)
  - 无线链路：误码率高，需要可靠交付
- 流量控制(flow control)
  - 协调(pacing)相邻的发送结点和接收
- 差错检测(error detection)
  - 信号衰减和噪声会引起差错
  - 接收端检测到差错
    - 通知发送端重传或者直接丢弃帧
- 差错纠正(error correction)
  - 接收端直接纠正比特差错
- 全双工和半双工通信控制
  - 全双工：链路两端结点同时双向传输

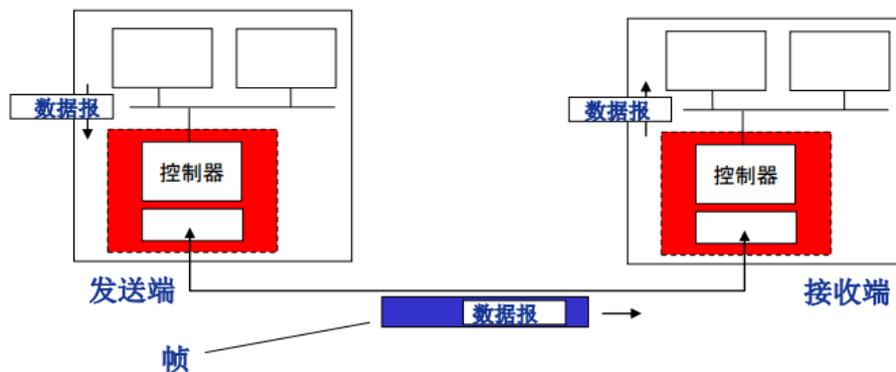
- 半双工：链路两端结点交替双向传输

## 链路层的具体实现

- ❖ 每个主机或路由器接口
- ❖ 链路层在“适配器” (即网络接口卡-NIC)中实现 或者在一个芯片上实现
  - 以太网网卡，802.11网卡；以太网芯片组
  - 实现链路层和物理层
- ❖ 链接主机的系统总线
- ❖ 由硬件、软件与固件组成



## 网卡间通信



- ❖ 发送端：
  - 将数据报封装成帧
  - 增加差错检测比特，实现可靠数据传输和流量控制等.
- ❖ 接收端：
  - 检测差错，实现可靠数据传输和流量控制等
  - 提取数据报，交付上层协议实体

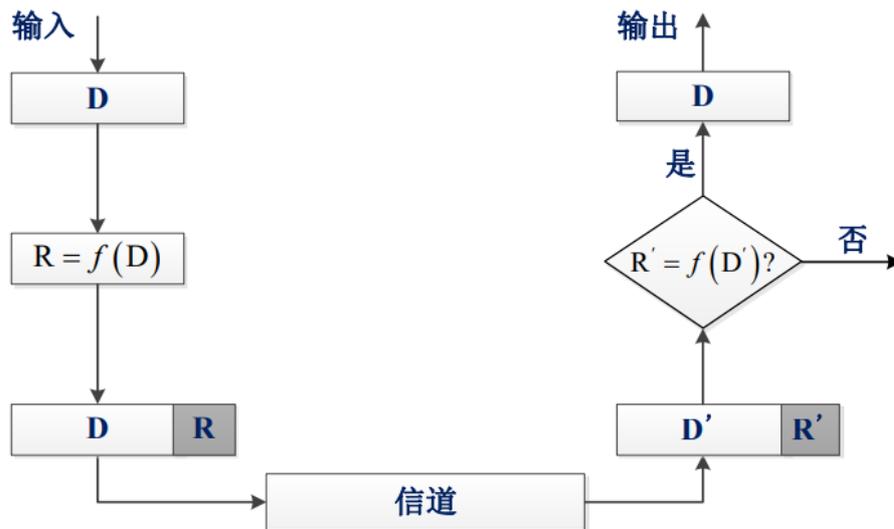
## 5.2 差错编码

### 差错编码

•

## 差错编码基本原理:

$D \rightarrow DR$ , 其中R为差错检测与纠正比特 (冗余比特)

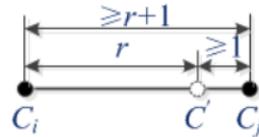


**差错编码不能保证100%可靠!**

- 差错编码的检错能力

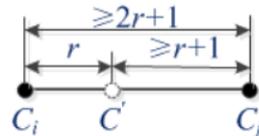
❖ 差错编码可分为**检错码**与**纠错码**

❖ 对于检错码, 如果编码集的汉明距离 $d_s=r+1$ , 则该差错编码可以检测 **$r$** 位的差错



- 例如, 编码集 {0000, 0101, 1010, 1111} 的汉明距离 $d_s=2$ , 可以100%检测1比特差错

❖ 对于纠错码, 如果编码集的汉明距离 $d_s=2r+1$ , 则该差错编码可以纠正 **$r$** 位的差错

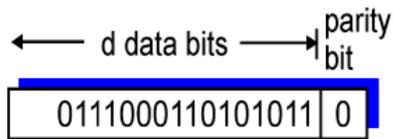


- 例如, 编码集 {000000, 010101, 101010, 111111} 的汉明距离 $d_s=3$ , 可以纠正1比特差错, 如100010纠正为101010。

## 奇偶校验码

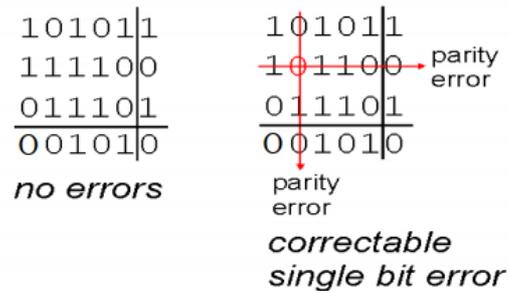
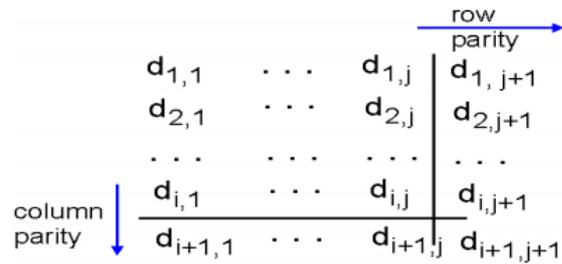
## 1比特校验位:

- ❖ 检测奇数位差错



## 二维奇偶校验:

- ❖ 检测奇数位差错、部分偶数位差错
- ❖ 纠正同一行/列的奇数位错



## Internet校验和(Checksum)

### 发送端:

- ❖ 将“数据”(校验内容)划分为16位的二进制“整数”序列
- ❖ 求和(sum): 补码求和(最高位进位的“1”, 返回最低位继续加)
- ❖ 校验和(Checksum): sum的反码
- ❖ 放入分组(UDP、TCP、IP)的校验和字段

### 接收端:

- ❖ 与发送端相同算法计算
- ❖ 计算得到的"checksum":
  - 为16位全0(或sum为16位全1): 无错
  - 否则: 有错

## 循环冗余校验码(CRC)



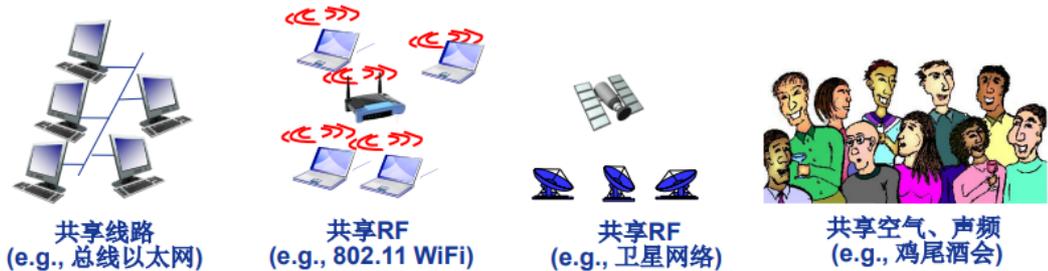
## 两类“链路”：

### ❖ 点对点链路

- 拨号接入的PPP
- 以太网交换机与主机间的点对点链路

### ❖ 广播链路 (共享介质)

- 早期的总线以太网
- HFC的上行链路
- 802.11无线局域网



- 单一共享广播信道
- 两个或者两个以上结点同时传输：干扰(interference)
  - 冲突(collision)
    - 结点同时接收到两个或者多个信号→**接收失败!**

## 多路访问控制协议(multiple access control protocol)

- 采用分布式算法决定结点如何共享信道，即决策结点何时可以传输数据
- 必须基于信道本身，通信信道共享协调信息!
  - 无带外信道用于协调

## 理想的MAC协议

给定：速率为R bps的广播信道

期望：

1. 当只有一个结点希望传输数据时，它可以以速率R发送
2. 当有M个结点期望发送数据时，每个节点平均发送数据的平均速率是R/M
3. 完全分散控制
  - 无需特定结点协调
  - 无需时钟、时隙同步
4. 简单

## 5.3.2 MAC协议分类

三大类

信道划分(channel partitioning)MAC协议

- 多路复用技术
- TDMA、FDMA、CDMA、WDMA等

随机访问(random access)MAC协议

- 信道不划分, 允许冲突
- 采用冲突“恢复”机制

### 轮转(“taking turns”)MAC协议

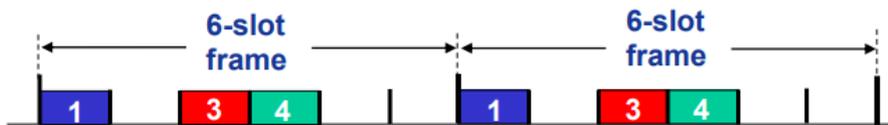
- 结点轮流使用信道

### 信道划分MAC协议 - 负载重时信道利用率高

- 两个例子:

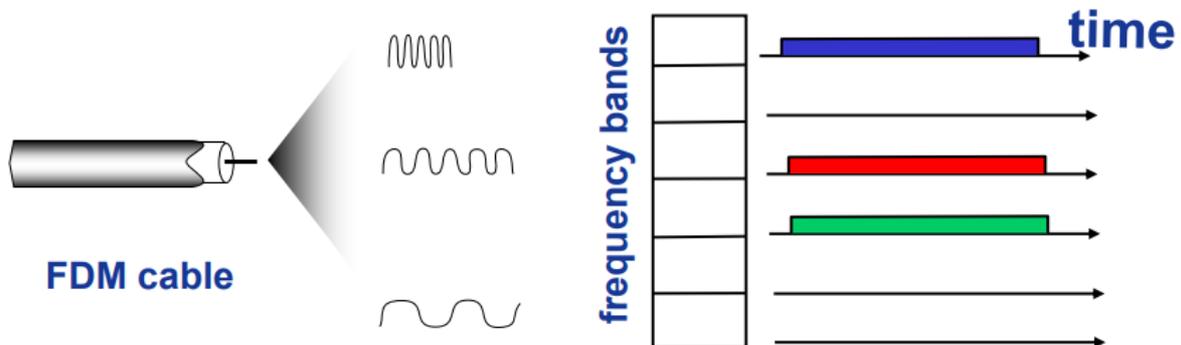
## TDMA: time division multiple access

- ❖ “周期性”接入信道
- ❖ 每个站点在每个周期, 占用固定长度的时隙(e.g.长度=分组传输时间)
- ❖ 未用时隙空闲(idle)
- ❖ 例如: 6-站点LAN, 1,3,4传输分组, 2,5,6空闲



## FDMA: frequency division multiple access

- ❖ 信道频谱划分为若干频带(frequency bands)
- ❖ 每个站点分配一个固定的频带
- ❖ 无传输频带空闲
- ❖ 例如: 6站点LAN, 1,3,4频带传输数据, 2,5,6频带空闲。



### 5.3.3 随机访问MAC协议

- ❖ 当结点要发送分组时：
  - 利用信道全部数据速率 $R$ 发送分组
  - 没有事先的结点间协调
- ❖ 两个或多个结点同时传输：→ “冲突”
- ❖ 随机访问MAC协议需要定义：
  - 如何检测冲突
  - 如何从冲突中恢复 (e.g., 通过延迟重传)
- ❖ 典型的随机访问MAC协议：
  - 时隙(slotted)ALOHA
  - ALOHA
  - CSMA、CSMA/CD、CSMA/CA

#### 时隙ALOHA协议

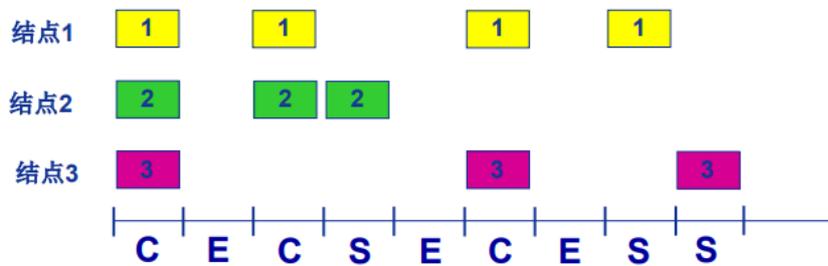
##### 假定：

- ❖ 所有帧大小相同
- ❖ 时间被划分为等长的时隙 (每个时隙可以传输1个帧)
- ❖ 结点只能在时隙开始时刻发送帧
- ❖ 结点间时钟同步
- ❖ 如果2个或2个以上结点在同一时隙发送帧，结点即检测到冲突

##### 运行：

- ❖ 当结点有新的帧时，在下一个时隙(slot)发送
  - 如果无冲突：该结点可以在下一个时隙继续发送新的帧
  - 如果冲突：该结点在下一个时隙以概率 $p$ 重传该帧，直至成功

- 示例



### 优点:

- ❖ 单个结点活动时，可以连续以信道全部速率传输数据
- ❖ 高度分散化：只需同步时隙
- ❖ 简单

### 缺点:

- ❖ 冲突，浪费时隙
- ❖ 空闲时隙
- ❖ 结点也许能以远小于分组传输时间检测到冲突
- ❖ 时钟同步

#### • 效率

**效率(efficiency):** 长期运行时，成功发送帧的时隙所占比例 (很多结点，有很多帧待发送)

- ❖ 假设:  $N$ 个结点有很多帧待传输，每个结点在每个时隙均以概率 $p$ 发送数据
- ❖ 对于给定的一个结点，在一个时隙将帧发送成功的概率 =  $p(1-p)^{N-1}$
- ❖ 对于任意结点成功发送帧的概率 =  $Np(1-p)^{N-1}$

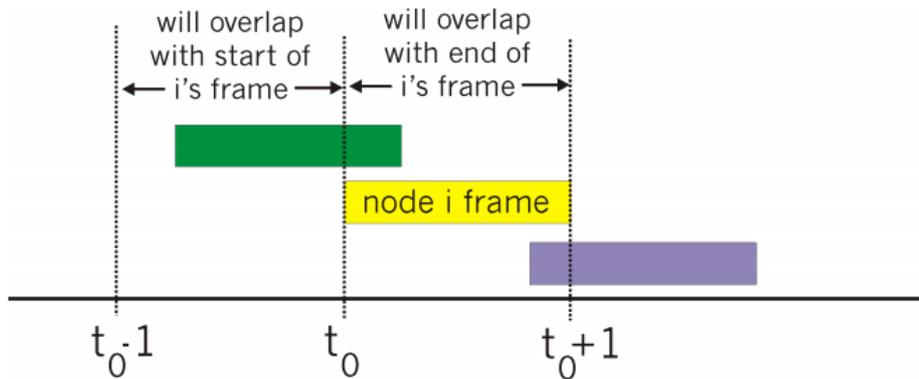
- ❖ 最大效率: 求得使  $Np(1-p)^{N-1}$  最大的  $p^*$
- ❖ 对于很多结点，求  $Np^*(1-p^*)^{N-1}$  当  $N$  趋近无穷时的极限，可得:

**最大效率 =  $1/e = 0.37$**

**最好情况: 信道被成功利用的时间仅占37%! !**

## ALOHA协议

- ❖ 非时隙(纯)Aloha: 更加简单, 无需同步
- ❖ 当有新的帧生成时
  - 立即发送
- ❖ 冲突可能性增大:
  - 在 $t_0$ 时刻发送帧, 会与在 $[t_0-1, t_0+1]$ 期间其他结点发送的帧冲突



$$\begin{aligned}
 P(\text{给定结点成功发送帧}) &= P(\text{该结点发送}) \cdot \\
 &\quad P(\text{无其他结点在}[t_0-1, t_0]\text{期间发送帧}) \cdot \\
 &\quad P(\text{无其他结点在}[t_0, t_0+1]\text{期间发送帧}) \\
 &= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1} \\
 &= p \cdot (1-p)^{2(N-1)} \\
 &\dots \text{选取最优的 } p, \text{ 并令 } n \rightarrow \infty \\
 &= 1/(2e) = 0.18
 \end{aligned}$$

**比时隙ALOHA协议更差!**

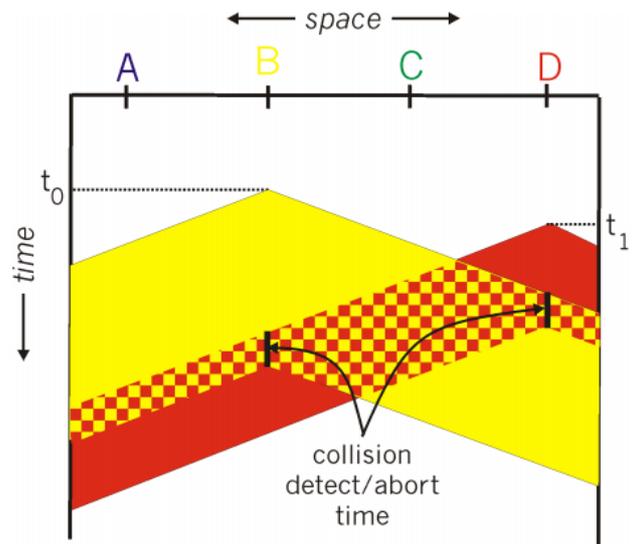
## CSMA协议

载波监听多路访问协议 CSMA (carrier sense multiple access)

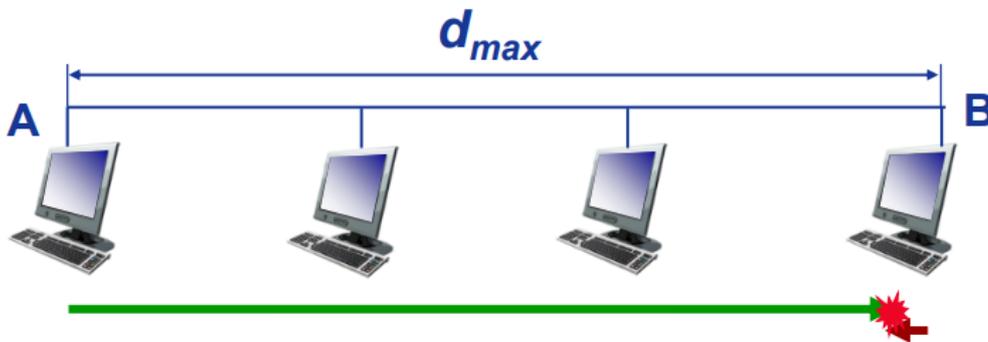
- 发送帧之前, 监听信道 (载波)
- 信道空闲: 发送完整帧
  - 信道忙: 推迟发送
    - 1-坚持CSMA
    - 非坚持CSMA
    - P-坚持CSMA
- 冲突可能仍然发生
  - 信号传播延迟
  - 发生冲突时, 继续发送冲突帧: 浪费信道资源

### CSMA/CD: CSMA with Collision Detection

- 短时间内可以检测到冲突
- 冲突后传输中止，减少信道浪费
- ❖ 冲突检测:
  - 有线局域网易于实现: 测量信号强度, 比较发射信号与接收信号
  - 无线局域网很难实现: 接收信号强度淹没在本地发射信号强度下



“边发边听，不发不听”



网络带宽:  $R$  bps  
 数据帧最小长度:  $L_{min}$  (bits)  
 信号传播速度:  $V$  (m/s)

$$L / R \geq 2d_{max} / V$$

$$L_{min} / R = 2d_{max} / V$$

$$L_{min} / R = RTT_{max}$$

- 例题

在一个采用CSMA/CD协议的网络中，传输介质是一根完整的电缆，传输速率为1 Gbps，电缆中的信号传播速度是200 000 km/s。若最小数据帧长度减少800比特，则最远的两个站点之间的距离至少需要

- A.增加160 m
- B.增加80 m
- C.减少160 m
- D.减少80 m

解：根据CSMA/CD协议工作原理，有

$$L_{\min}/R=2*d_{\max}/V, \text{则} d_{\max}=(V/2R)*L_{\min}, \text{于是}$$

$$\Delta d_{\max}=(V/2R)*\Delta L_{\min}$$

将 $V=200\ 000\ \text{km/s}$ ,  $R=1\ \text{Gbps}$ ,  $\Delta L_{\min}=-800\text{bit}$ ,代入得:

$$\Delta d_{\max}=(200000*10^3/(2*10^9))*(-800)=-80\ \text{m}$$

答案：D

- 效率

❖  $T_{\text{prop}}$  = LAN中2个结点间的最大传播延迟

❖  $t_{\text{trans}}$  = 最长帧传输延迟

$$\text{效率} = \frac{1}{1 + 5t_{\text{prop}}/t_{\text{trans}}}$$

❖  $t_{\text{prop}}$  趋近于0或者 $t_{\text{trans}}$  趋近于 $\infty$ 时，效率趋近于1

❖ 远优于ALOHA，并且简单、分散！

### 轮转访问MAC协议

信道划分MAC协议：

- 网络负载重时，共享信道效率高，且公平
- 网络负载轻时，共享信道效率低！

随机访问MAC协议：

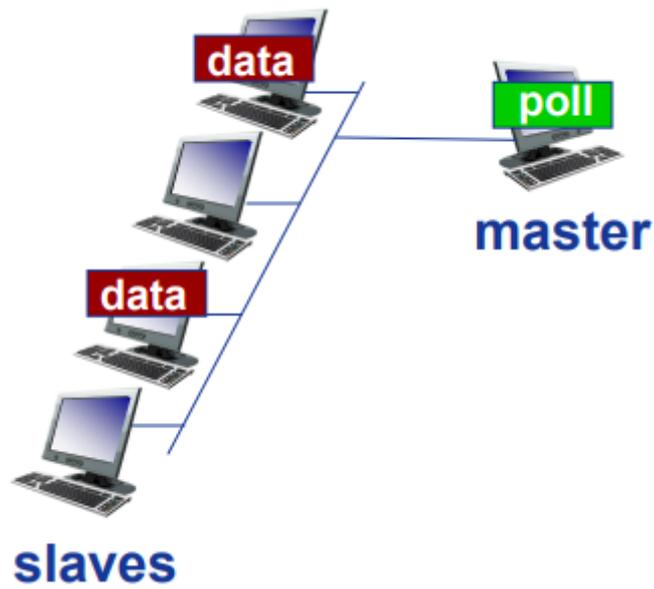
- 网络负载轻时，共享信道效率高，单个结点可以利用信道的全部带宽
- 网络负载重时，产生冲突开销

轮转访问MAC协议：

综合两者的优点！

## 轮询(polling)

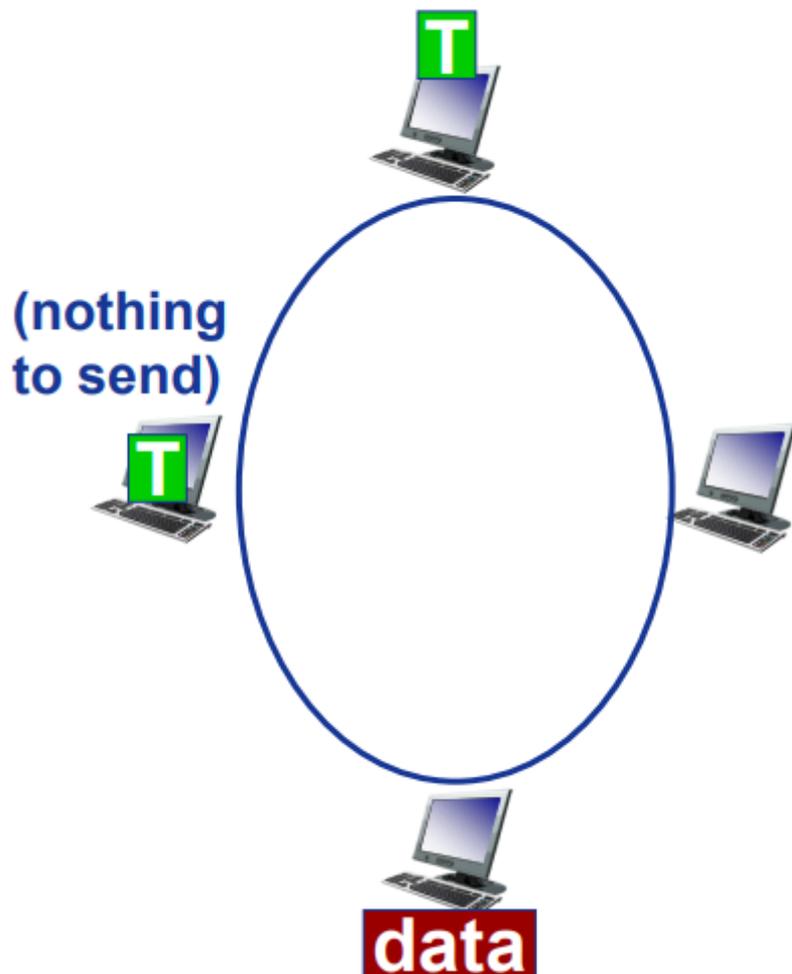
- 主节点轮流“邀请”从属节点发送数据
- 典型应用：“哑(dumb)”从属设备



- 问题：
  - 轮询开销
  - 等待延迟
  - 单点故障

## 令牌传递(token passing)

- 控制令牌依次从一个结点传递到下一个结点
- 令牌：特殊帧



- 问题
  - 令牌开销
  - 等待延迟
  - 单点故障

### 5.3.4 MAC协议总结

- ❖ **信道划分MAC协议**：时间、频带、码片划分
  - TDMA、FDMA、CDMA
- ❖ **随机访问MAC协议**：
  - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
  - CSMA/CD应用于以太网
  - CSMA/CA应用802.11无线局域网
- ❖ **轮转访问MAC协议**：
  - 主结点轮询；令牌传递
  - 蓝牙、FDDI、令牌环网

## 5.4 ARP协议

---

## MAC地址

### ❖ 32位IP地址:

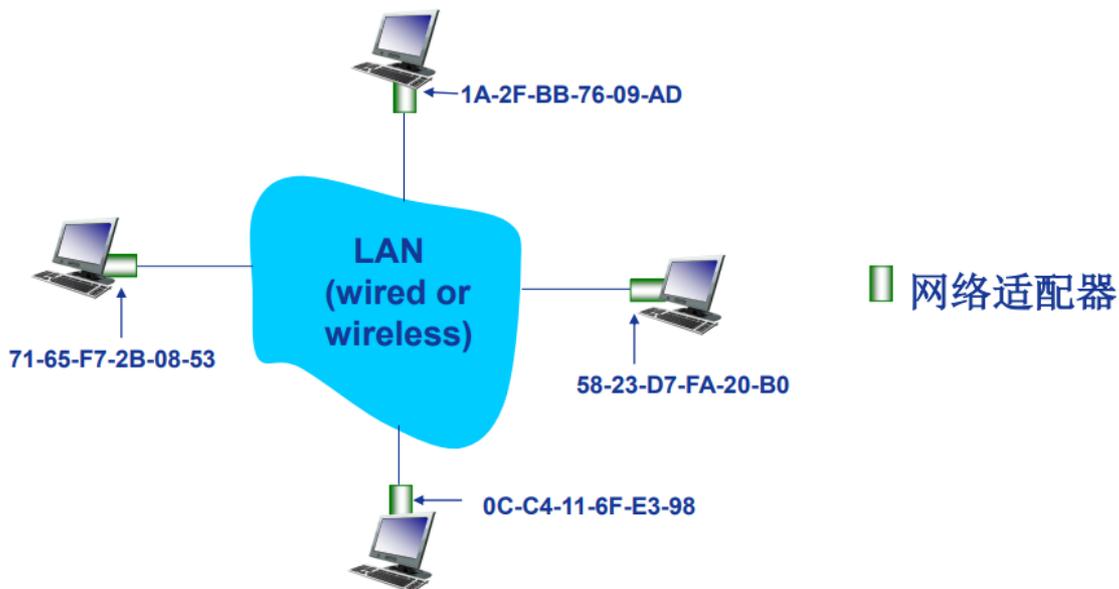
- 接口的网络层地址
- 用于标识网络层(第3层)分组，支持分组转发

### ❖ MAC地址(或称LAN地址,物理地址,以太网地址):

- 作用：用于局域网内标识一个帧从哪个接口发出，到达哪个物理相连的其他接口
- 48位MAC地址(用于大部分LANs)，固化在网卡的ROM中，有时也可以软件设置
- e.g.: 1A-2F-BB-76-09-AD

16进制表示

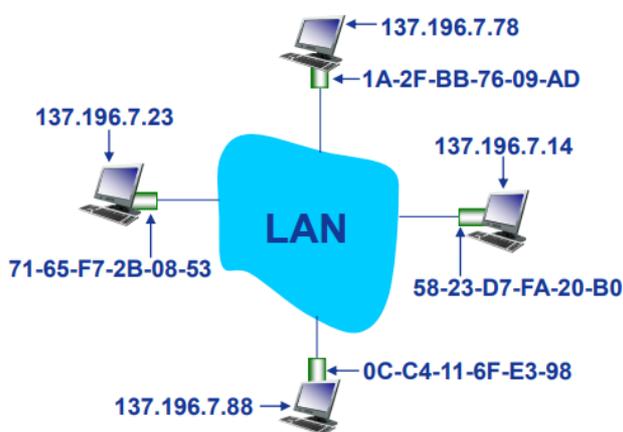
局域网中的每块网卡都有一个唯一的**MAC地址**



- ❖ MAC地址由IEEE统一管理与分配
- ❖ 网卡生产商购买MAC地址空间(前24比特)
- ❖ 类比：
  - MAC地址：身份证号
  - IP地址：邮政地址
- ❖ MAC地址是“平面”地址： → 可“携带”
  - 可以从一个LAN移到另一个LAN
- ❖ IP地址是层次地址： → 不可“携带”
  - IP地址依赖于结点连接到哪个子网

### ARP: 地址解析协议

**问题：**（在同一个LAN内）  
如何在已知目的接口的IP地址前提下确定其MAC地址？



**ARP表:** LAN中的每个IP结点(主机、路由器)维护一个表

- 存储某些LAN结点的IP/MAC地址映射关系：  
< IP地址; MAC地址; TTL >
- TTL (Time To Live): 经过这个时间以后该映射关系会被遗弃(典型值为20min)

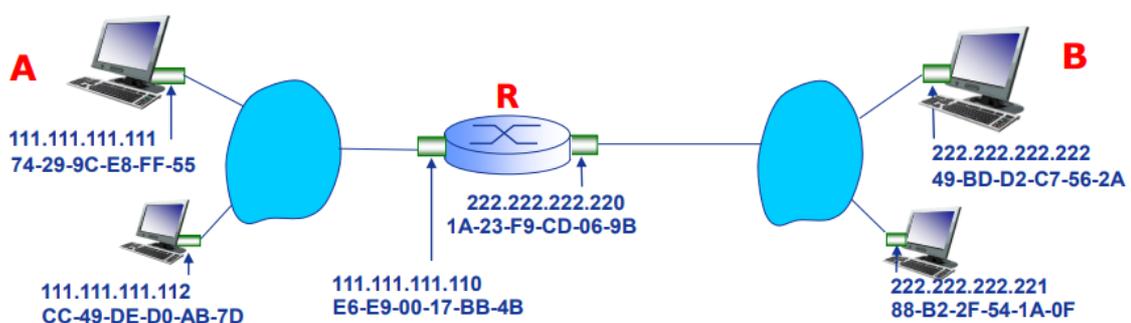
### ARP:同一局域网内

- ❖ A想要给同一局域网内的B发送数据报
  - B的MAC地址不在A的ARP表中.
- ❖ A广播ARP查询分组, 其中包含B的IP地址
  - 目的MAC地址 = FF-FF-FF-FF-FF-FF
  - LAN中所有结点都会接收ARP查询
- ❖ B接收ARP查询分组, IP地址匹配成功, 向A应答B的MAC地址
  - 利用单播帧向A发送应答
- ❖ A在其ARP表中, 缓存B的IP-MAC地址对, 直至超时
  - 超时后, 再次刷新
- ❖ ARP是“即插即用”协议:
  - 结点自主创建ARP表, 无需干预

## 寻址: 从一个LAN路由至另一个LAN

通信过程: A通过路由器R向B发送数据报

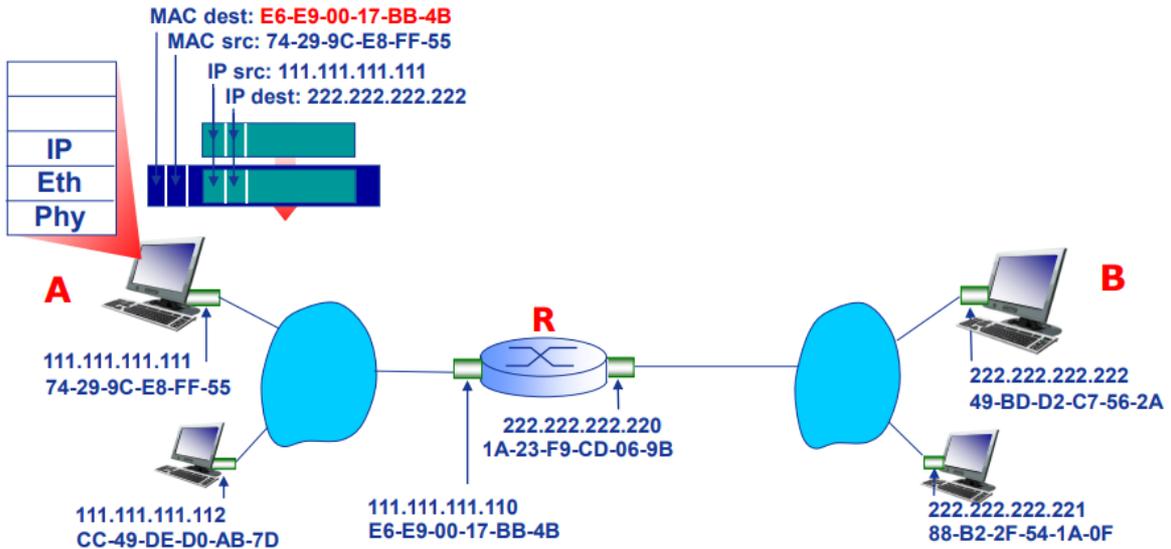
- 关注寻址: IP地址(数据报中)和MAC地址(帧中)
- 假设A知道B的IP地址(怎么知道的?)
- 假设A知道第一跳路由器R (左)接口IP地址 (怎么知道的?)
- 假设A知道第一跳路由器R (左)接口MAC地址 (怎么知道的?)



## ARP过程

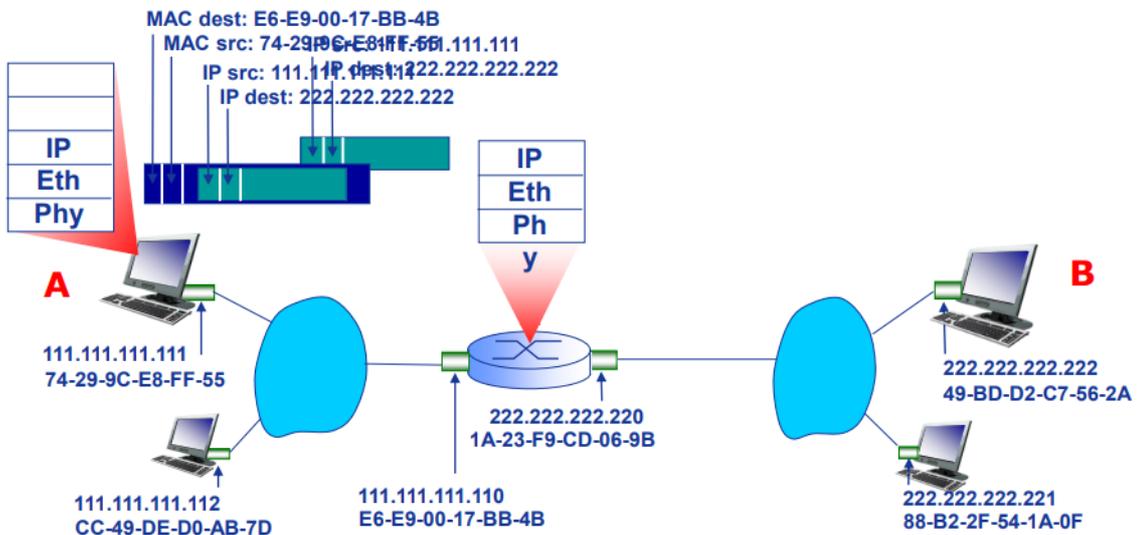
1.

- ❖ A构造IP数据报，其中源IP地址是A的IP地址，目的IP地址是B的IP地址
- ❖ A构造链路层帧，其中源MAC地址是A的MAC地址，目的MAC地址是R(左)接口的MAC地址，封装A到B的IP数据报。



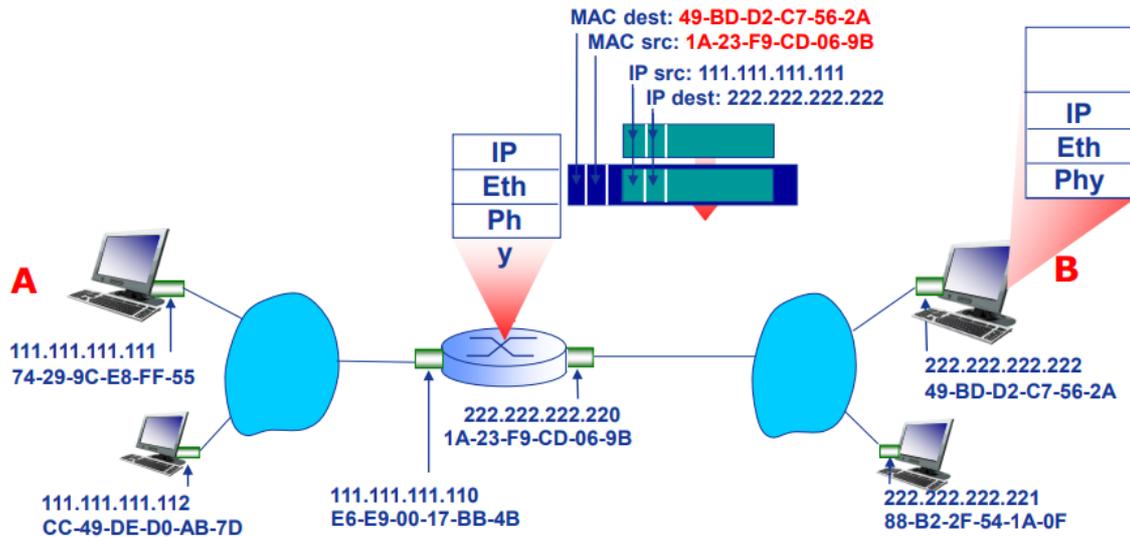
2.

- ❖ 帧从A发送至R
- ❖ R接收帧，提取IP数据报，传递给上层IP协议



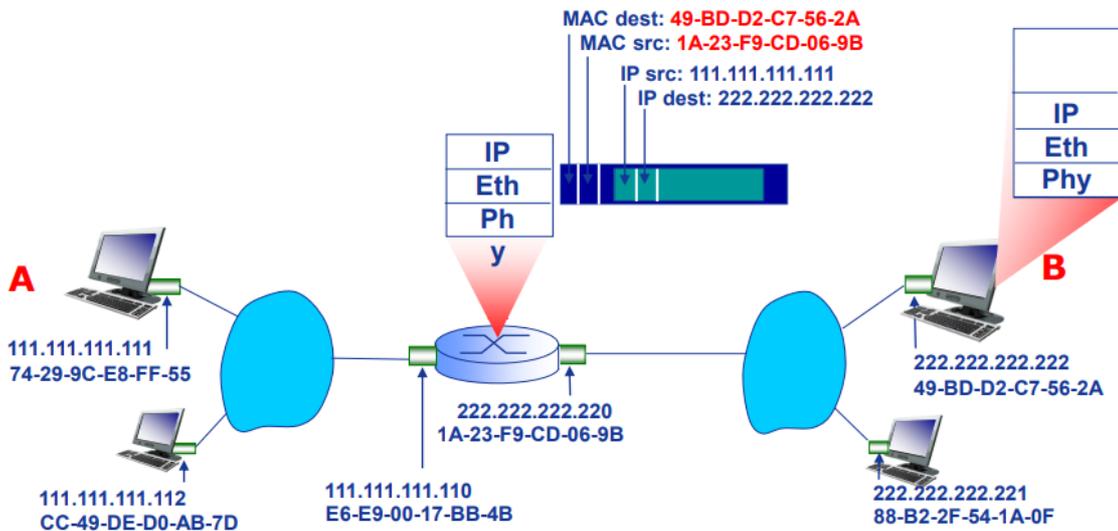
3.

- ❖ R转发IP数据报（源和目的IP地址不变！）
- ❖ R创建链路层帧，其中源MAC地址是R(右)接口的MAC地址，目的MAC地址是B的MAC地址，封装A到B的IP数据报。



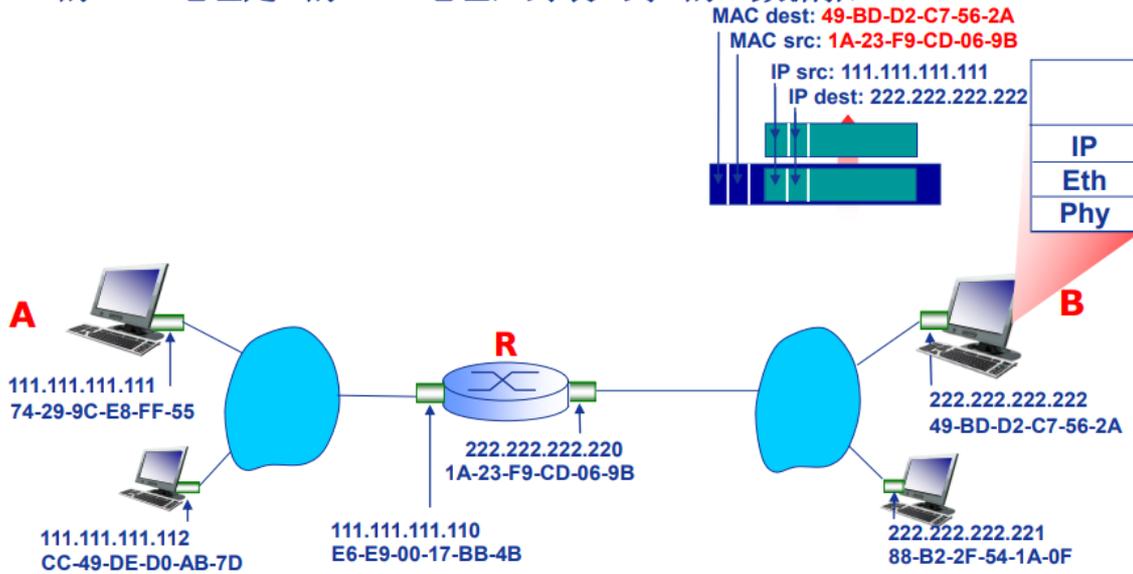
4.

- ❖ R转发IP数据报（源和目的IP地址不变！）
- ❖ R创建链路层帧，其中源MAC地址是R (右)接口的MAC地址，目的MAC地址是B的MAC地址，封装A到B的IP数据报。



5.

- ❖ R转发IP数据报（源和目的IP地址不变！）
- ❖ R创建链路层帧，其中源MAC地址是R (右)接口的MAC地址，目的MAC地址是B的MAC地址，封装A到B的IP数据报。



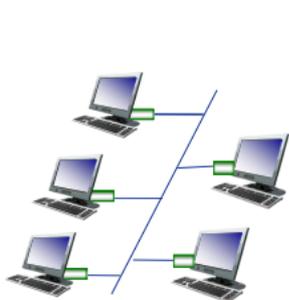
## 5.5 以太网

“统治地位”的有线LAN技术:

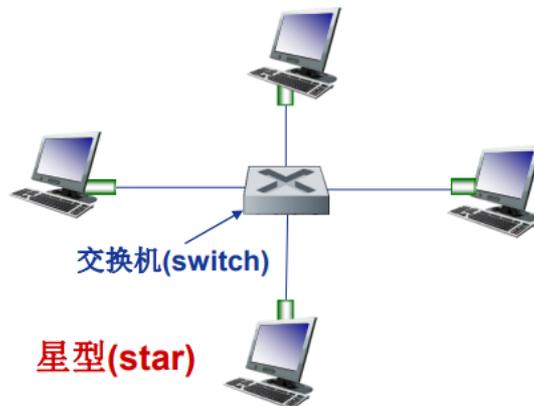
- 造价低廉(NIC不足 ¥ 100.00)
- 应用最广泛的LAN技术
- 比令牌局域网和ATM等，简单、便宜
- 满足网络速率需求：10 Mbps – 10 Gbps

### 以太网：物理拓扑

- ❖ **总线(bus):** 上世纪90年代中期前流行
  - 所有结点在同一冲突域(collision domain) (可能彼此冲突)
- ❖ **星型(star):** 目前主流网络拓扑
  - 中心交换机(switch)
  - 每个结点一个单独冲突域(结点间彼此不冲突)



**总线(bus):** 同轴电缆



**星型(star)**

## 以太网：不可靠、无连接服务

- 无连接(connectionless)
  - 发送帧的网卡与接收帧的网卡间没有“握手”过程
- 不可靠(unreliable)
  - 接收网卡不向发送网卡进行确认
    - 差错帧直接丢弃，丢弃帧中的数据恢复依靠高层协议 (e.g:TCP)，否则，发生数据丢失
- 以太网的MAC协议
  - 采用二进制指数退避算法的CSMA/CD

## 以太网CSMA/CD算法

1. NIC从网络层接收数据报，创建数据帧。
2. 监听信道：  
如果NIC监听到信道空闲，则开始发送帧；  
如果NIC监听到信道忙，则一直等待到信道空闲，然后发送帧。
3. NIC发送完整个帧，而没有检测到其他节点的数据发送，则NIC确认帧发送成功！
4. 如果NIC检测到其他结点传输数据，则中止发送，并发送堵塞信号 (jam signal)
5. 中止发送后，NIC进入**二进制指数退避**：
  - 第 $m$ 次连续冲突后：
    - 取 $n = \text{Min}(m, 10)$
    - NIC 从 $\{0, 1, 2, \dots, 2^n - 1\}$ 中随机选择一个数 $K$
    - NIC等待 $K \cdot 512$ 比特的传输延迟时间，再返回第2步
  - 连续冲突次数越多，平均等待时间越长。

## 以太网帧结构

发送端网卡将IP数据报(或其他网络层协议分组) 封装到以太网帧中



### 前导码(Preamble)(8B)

- 7个字节的10101010，第8字节为10101011
- 用于发送端与接收端的时钟同步

### 目的MAC地址、源MAC地址(各6B)

- 如果网卡的MAC地址与收到的帧的目的MAC地址匹配，或者帧的目的MAC地址为广播地址(FF-FF-FF-FF-FF-FF)，则网卡接收该帧，并将其封装的网络层分组交给相应的网络层协议，否则丢弃该帧。

### 类型(Type)(2B)

- 指示帧中封装的是哪种高层协议的分组 (如, IP数据报、Novell IPX数据报、AppleTalk数据报等)

数据(Data)(46-1500B): 指上层协议载荷

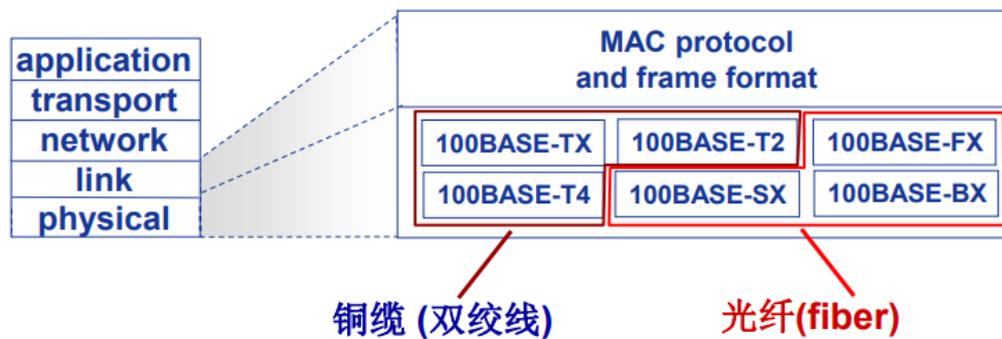
CRC(4B): 循环冗余校验码

- 丢弃差错帧

## 802.3以太网标准: 链路层与物理层

### ❖ 许多不同的以太网标准

- 相同的MAC协议和帧格式
- 不同速率: 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps, 10G bps
- 不同物理介质: 光纤, 线缆



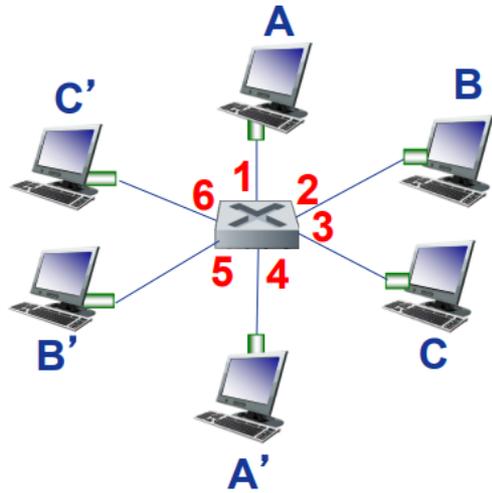
## 交换机

### 以太网交换机(switch)

- 链路层设备
  - 存储-转发以太网帧
  - 检验到达帧的目的MAC地址, 选择性 (selectively) 向一个或多个输出链路转发帧
  - 利用CSMA/CD访问链路, 发送帧
- 透明(transparent)
  - 主机感知不到交换机的存在
- 即插即用(plug-and-play)
- 自学习(self-learning): 交换机无需配置

### 交换机: 多端口间同时传输

- ❖ 主机利用独享(dedicated)链路直接连接交换机
- ❖ 交换机缓存帧
- ❖ 交换机在每段链路上利用CSMA/CD收发帧，但无冲突，且可以全双工
  - 每段链路一个独立的冲突域
- ❖ 交换(switching): A-A' 与 B-B' 的传输可以同时进行，没有冲突

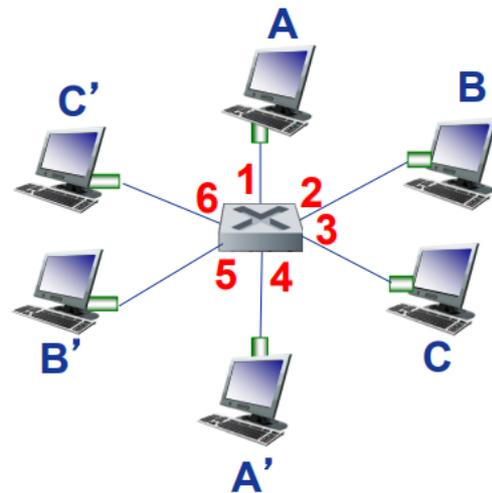


6个接口交换机  
(1,2,3,4,5,6)

### 交换机转发表: 交换表

**Q:** 交换机怎么知道A' 可以通过接口4到达，而B' 可以通过接口5到达？

- ❖ **A:** 每个交换机有一个交换表 (switch table), 每个入口(entry):
  - (主机的MAC地址, 到达主机的接口, 时间戳)
  - 看起来很像路由表!
- ❖ **Q:** 交换表入口信息如何创建和维护的那?
  - 类似于路由协议?

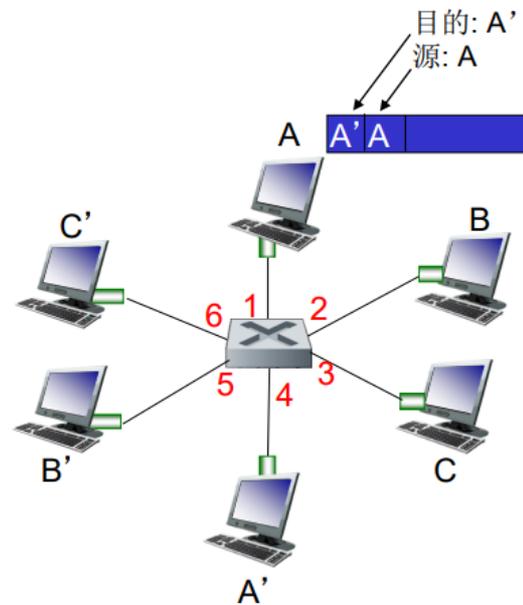


6个接口交换机  
(1,2,3,4,5,6)

### 交换机: 自学习

❖ 交换机通过**自学习**，获知到达主机的接口信息

- 当收到帧时，交换机“学习”到发送帧的主机（通过帧的源MAC地址），位于收到该帧的接口所连接的LAN网段
- 将发送主机MAC地址/接口信息记录到交换表中



交换表  
(初始为空)

MAC地址	接口	TTL
A	1	60

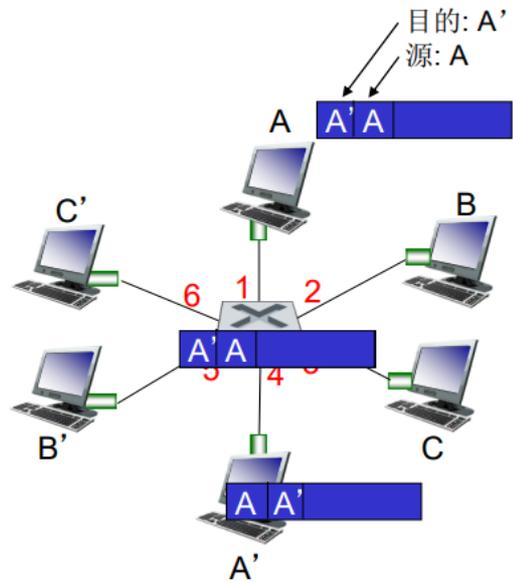
**交换机: 帧过滤/转发**

当交换机收到帧:

1. 记录帧的源MAC地址与输入链路接口
2. 利用目的MAC地址检索交换表
3. if 在交换表中检索到与目的MAC地址匹配的入口(entry)  
then {  
    if 目的主机位于收到帧的网段  
    then 丢弃帧  
    else 将帧转发到该入口指向的接口  
    }  
else 泛洪(flood) /\* 向除收到该帧的接口之外的所有接口转发 \*/

**自学习与转发过程举例**

- ❖ 目的MAC地址A'，位置未知：  
泛洪
- ❖ 目的MAC地址A，位置已知：  
选择性转发

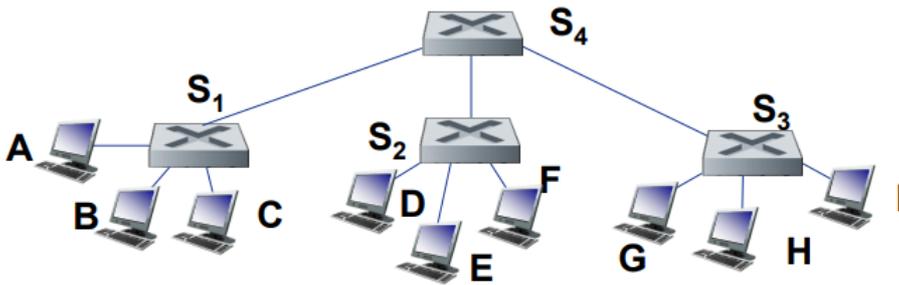


交换表  
(初始为空)

MAC地址	接口	TTL
A	1	60
A'	4	60

### 交换机互联

- ❖ 交换机可以互联

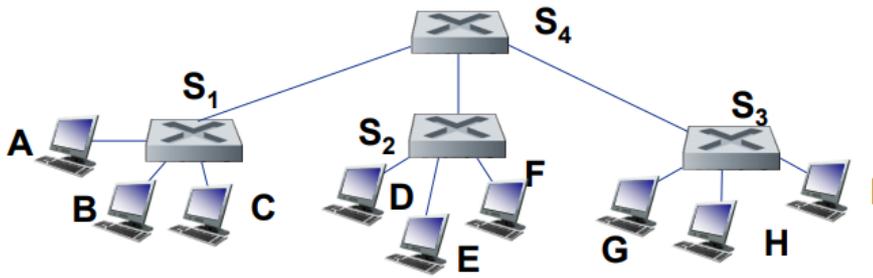


**Q:** 当A向G发送帧时，S<sub>1</sub>怎么知道通过S<sub>4</sub>转发？S<sub>4</sub>又怎么知道通过S<sub>3</sub>转发？

- ❖ **A:** 自学习！(工作过程与单一交换机情形相同！)

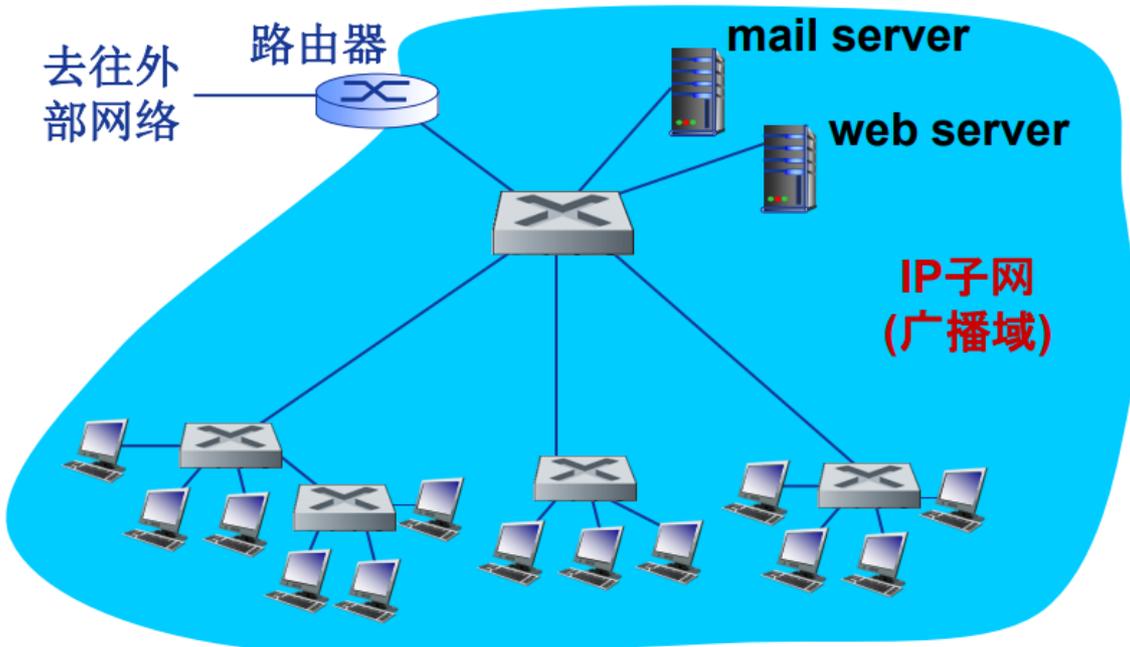
例题:

假设C向H发送帧，H向C发送应答帧



- ❖ **Q:** 请给出 $S_1, S_2, S_3, S_4$ 的交换表，并说明帧的转发过程？

组织机构(Institutional)网络



交换机vs路由器

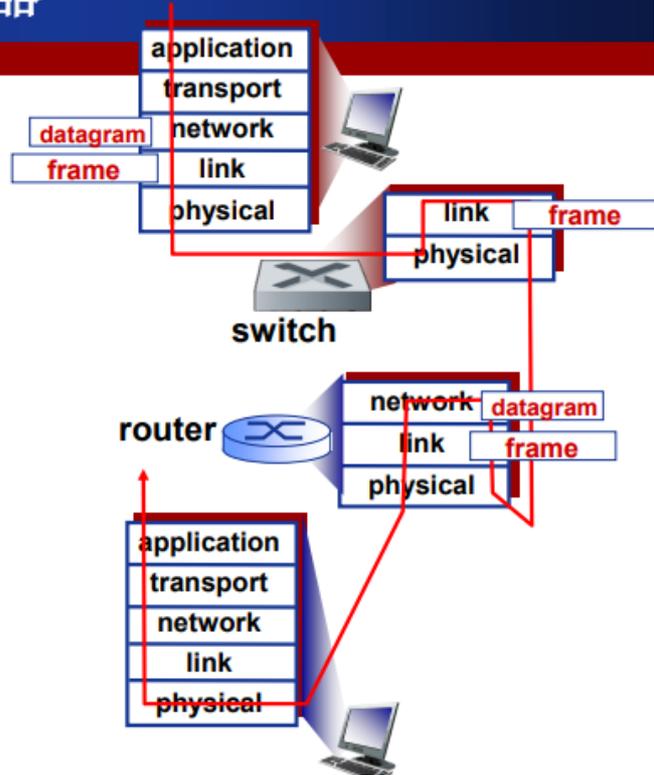
# 交换机 vs. 路由器

两者均为存储-转发设备:

- **路由器**: 网络层设备 (检测网络层分组首部)
- **交换机**: 链路层设备 (检测链路层帧的首部)

二者均使用转发表:

- **路由器**: 利用路由算法(路由协议)计算(设置), 依据IP地址
- **交换机**: 利用自学习、泛洪构建转发表, 依据MAC地址



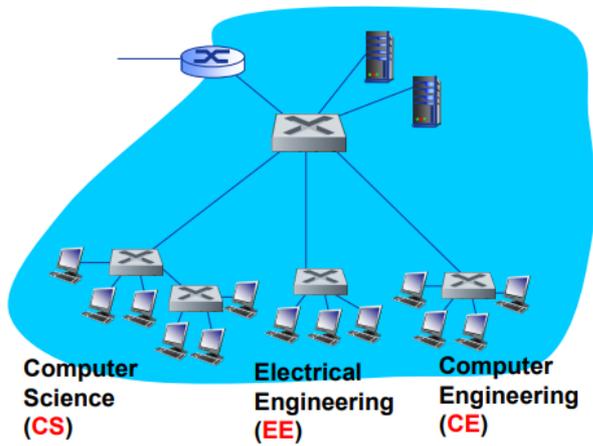
## 网络设备对比

	集线器 (hub)	交换机 (switch)	网桥 (bridge)	路由器 (router)
层次	1	2	2	3
流量(冲突域)隔离	no	yes	yes	yes
广播域隔离	no	no	no	yes
即插即用	yes	yes	yes	no
优化路由	no	no	no	yes
直通传输 (Cut through)	yes	yes	yes	no

**直通传输**: 交换机、网桥可以在一个接口接收数据帧的同时直接转发到另一个接口上, 即边收边发, 只检查目的mac地址 (6B)

## 虚拟局域网(VLAN)

VLANs: 动机



考虑一下情形:

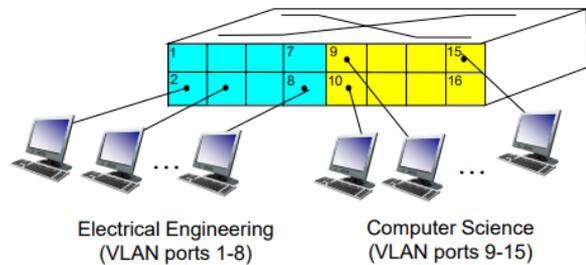
- ❖ CS用户迁移到EE, 但是希望连接至CS交换机, 怎么办?
- ❖ 单一广播域:
  - 所有第2层广播流量(ARP, DHCP, 未知目的MAC地址位置)必须穿越整个LAN
  - 安全/隐私、效率问题

## VLANs

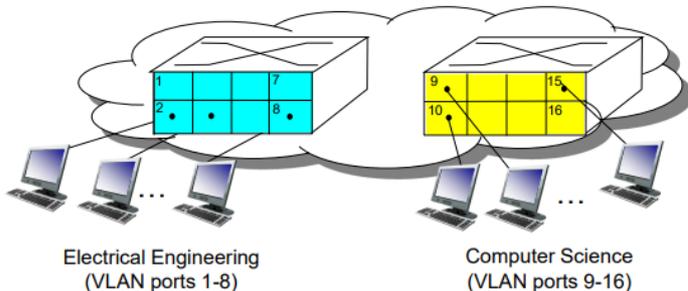
### 虚拟局域网(Virtual Local Area Network)

支持VLAN划分的交换机, 可以在一个物理LAN架构上配置、定义多个VLAN

基于端口的VLAN: 分组交换机端口 (通过交换机管理软件), 于是, 单一的物理交换机 .....

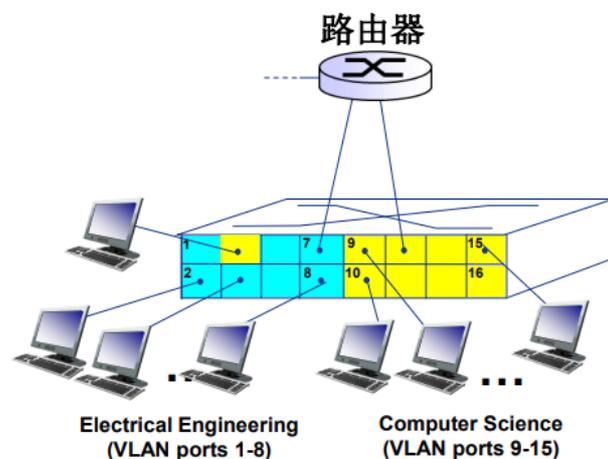


...就像多个虚拟交换机一样运行



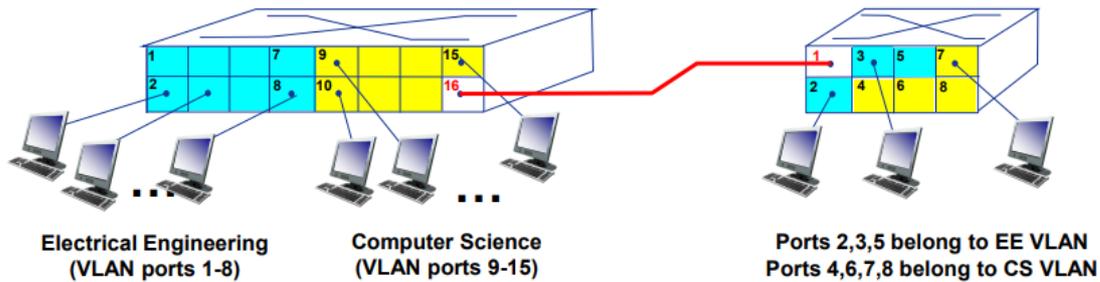
## 基于端口的VLAN

- ❖ 流量隔离(traffic isolation): 去往/来自端口1-8的帧只到达端口1-8
  - 也可以基于MAC地址定义VLAN, 而不是交换端口
- ❖ 动态成员: 端口可以动态分配给不同VLAN



- ❖ 在VLAN间转发: 通过路由(就像在独立的交换机之间)
  - 实践中, 厂家会将交换机与路由器集成在一起

## 跨越多交换机的VLAN



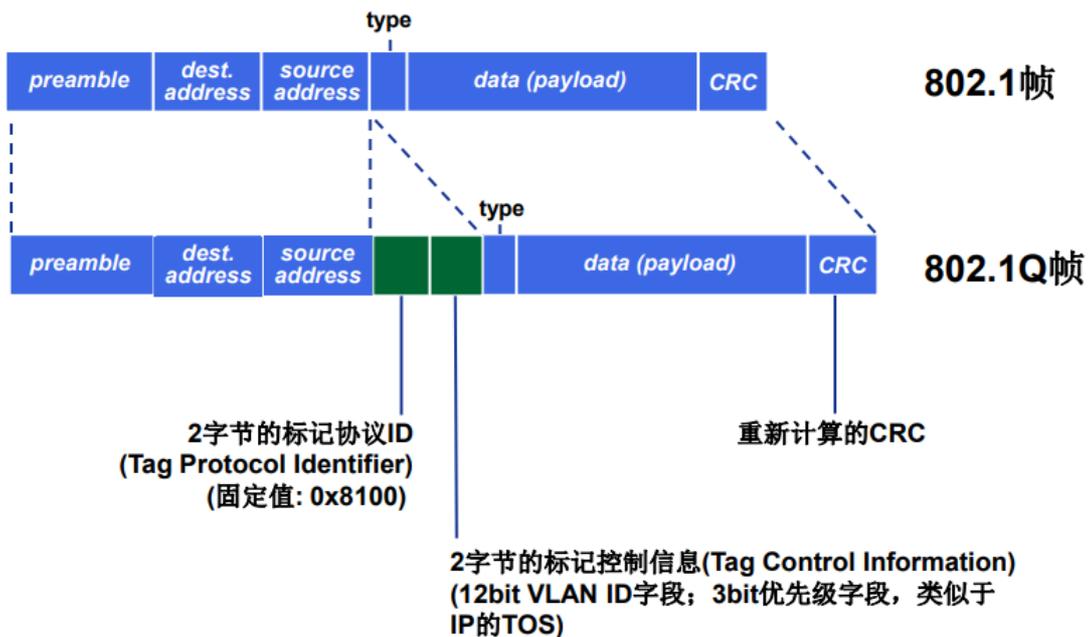
### ❖ 多线缆连接

- 每个线缆连接一个VLAN

### ❖ 中继端口(trunk port): 在跨越多个物理交换机定义的VLAN承载帧

- 为多VLAN转发802.1帧容易产生歧义 (必须携带VLAN ID信息)
- 802.1q协议为经过中继端口转发的帧增加/去除额外的首部域

## 802.1Q VLAN帧格式



## 5.6 PPP协议

### 点对点数据链路控制

- 一个发送端, 一个接收端, 一条链路: 比广播链路容易
  - 无需介质访问控制(Media Access Control)
  - 无需明确的MAC寻址
  - e.g. 拨号链路, ISDN链路
- 常见的点对点数据链路控制协议
  - HDLC: High Level Data Link Control
  - PPP (Point-to-Point Protocol)

## PPP设计需求[RFC 1557]

**组帧**: 将网络层数据报封装到数据链路层帧中

- 可以同时承载任何网络层协议分组(不仅IP数据报)
- 可以向上层实现分用(多路分解)

**比特透明传输**: 数据域必须支持承载任何比特模式

**差错检测**: 无纠正

**连接活性(connection liveness)检测**: 检测、并向网络层通知链路失效

**网络层地址协商**: 端结点可以学习/配置彼此网络地址

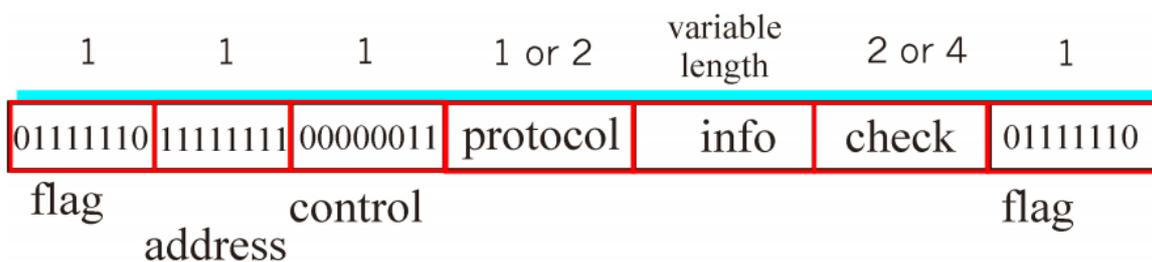
### PPP无需支持的功能

- 无需差错纠正/恢复
- 无需流量控制
- 不存在乱序交付
- 无需支持多点链路

**差错恢复、流量控制等由高层协议处理!**

### PPP数据帧

- ❖ **标志(Flag)**: 定界符(delimiter)
- ❖ **地址(Address)**: 无效(仅仅是一个选项)
- ❖ **控制(Control)**: 无效; 未来可能的多种控制域
- ❖ **协议(Protocol)**: 上层协议 (eg, PPP-LCP, IP, IPCP, etc)
- ❖ **信息(info)**: 上层协议分组数据
- ❖ **校验(check)**: CRC校验, 用于差错检测



### 字节填充(Byte Stuffing)

❖ “数据透明传输”需求: 数据域必须允许包含标志模式<01111110>

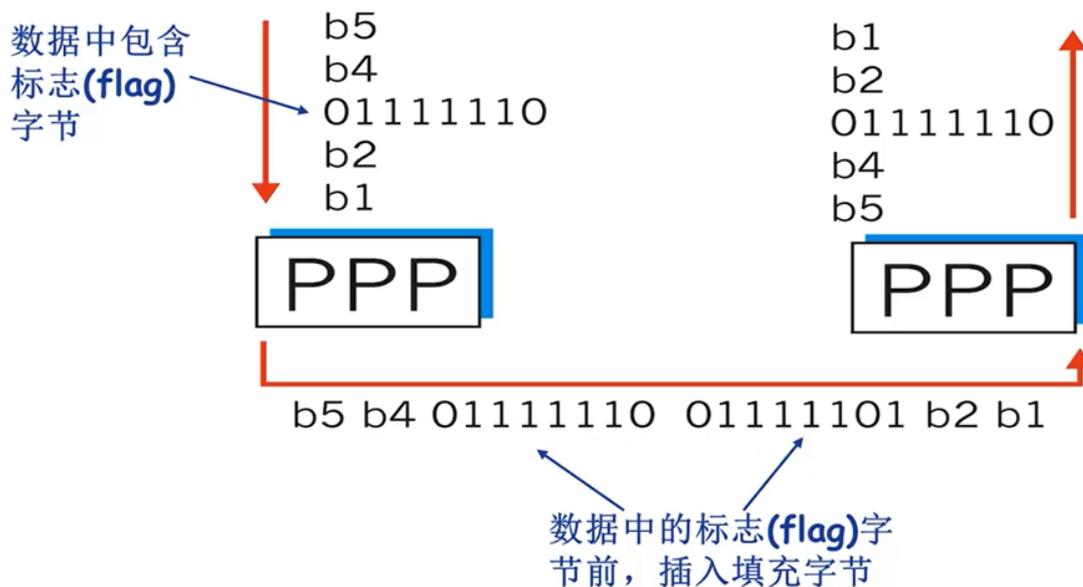
- **Q:** 如何判断该作为数据接收, 还是作为标志处理?

❖ **发送端:** 在数据中的<01111110>和<01111101>字节前添加额外的字节<01111101> (“填充(stuffs)”)

❖ **接收端:**

- 单个字节<01111101>表示一个填充字节;
- 连续两个字节<01111101>: 丢弃第1个, 第2个作为数据接收
- 单个字节<01111110>: 标志字节

例:



**PPP数据控制协议**

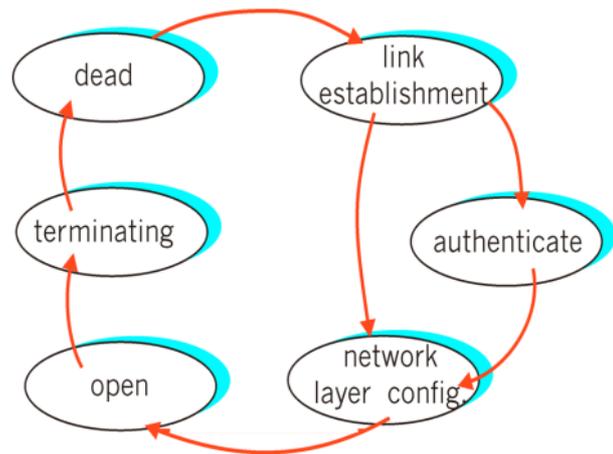
在交换网络层数据之前，PPP数据链路两端必须：

❖ 配置PPP链路

- 最大帧长
- 身份认证(authentication)
- etc.

❖ 学习/配置网络层信息

- 对于IP协议: 通过交换IPCP协议 (IP Control Protocol) 报文 (IP分组首部的“上层协议”字段取值: 8021), 完成IP地址等相关信息配置



## 5.7 802.11 无线局域网

### IEEE 802.11无线局域网

#### 802.11b

- ❖ 2.4-2.5GHz免费频段 (unlicensed spectrum)
- ❖ 最高速率：11 Mbps
- ❖ 物理层采用直接序列扩频 (DSSS)技术
  - 所有主机使用相同的码片序列

#### 802.11a

- 5-6 GHz频段
- 最高速率：54 Mbps

#### 802.11g

- 2.4-2.5 GHz频段
- 最高速率：54 Mbps

#### 802.11n: 多天线(MIMO)

- 2.4-2.5 GHz频段
- 最高速率：600 Mbps

- 
- ❖ 均使用CSMA/CA多路访问控制协议
  - ❖ 均有基础设施(基站)网络模式和特定网(自组网)网络模式

标准	频段	数据速率	物理层	优缺点
802.11b	2.4 GHz	最高11 Mb/s	扩频	最高数据率较低，价格最低，信号传播距离最远，且不易受阻碍
802.11a	5 GHz	最高54 Mb/s	OFDM	最高数据率较高，支持更多用户同时上网，价格最高，信号传播距离较短，且易受阻
802.11g	2.4 GHz	最高54 Mb/s	OFDM	最高数据率较高，支持更多用户同时上网，信号传播距离最远，且不易受阻，价格比802.11b贵
802.11n	2.4 GHz 5 GHz	最高600 Mb/s	MIMO OFDM	使用多个发射和接收天线以允许更高的数据传输率，当使用双倍带宽(40 MHz)时速率可达600 Mb/s

## IEEE 802.11体系结构



### ❖ 无线主机与基站通信

- 基站(base station) = 访问点(access point-AP)

### ❖ 基本服务集BSS(Basic Service Set)，也称为单元(cell)

- 基础设施网络模式:
  - 无线主机
  - AP: 基站
- 自组网(ad hoc)模式:
  - 只有主机

## 802.11: 信道与AP关联

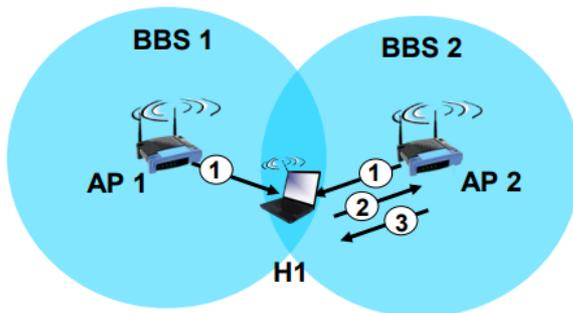
## ❖ 802.11b: 2.4GHz-2.485GHz频谱划分为11个不同频率的信道

- 每个AP选择一个频率(信道)
- 存在干扰可能: 相邻的AP可能选择相同的信道!

## ❖ 主机: 必须与某个AP关联(associate)

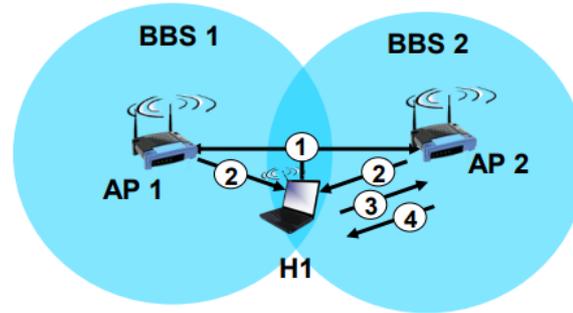
- 扫描信道, 监听包含AP名称(服务集标识符-SSID)和MAC地址的信标(beacon)帧
- 选择一个AP进行关联
- 可能需要进行身份认证
- 典型情形: 运行DHCP获取IP地址等信息

### 802.11AP关联: 被动扫描与主动扫描



#### 被动扫描(scanning):

- ❖ 各AP发送信标帧
- ❖ 主机(H1)向选择的AP发送关联请求帧
- ❖ AP向主机(H1)发送关联响应帧

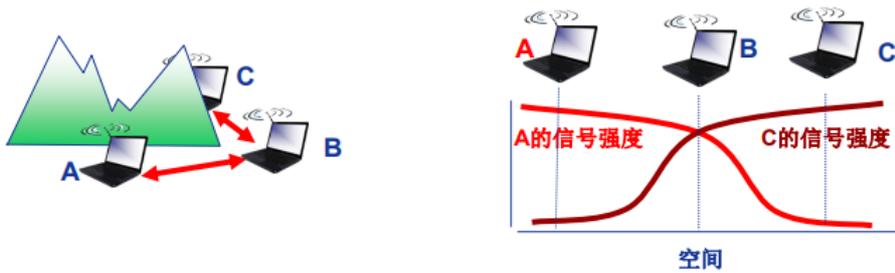


#### 主动扫描:

- ❖ 主机(H1)主动广播探测请求帧(Probe Request Frame)
- ❖ AP发送探测响应帧(Probe Response Frame)
- ❖ 主机(H1)向选择的AP发送关联请求帧
- ❖ AP向主机(H1)发送关联响应帧

### 802.11: 多路访问控制

- ❖ 避免冲突: 2+结点同时传输
- ❖ 802.11: CSMA – 发送数据前监听信道
  - 避免与正在进行传输的其他结点冲突
- ❖ 802.11: 不能像CSMA/CD那样, 边发送、边检测冲突!
  - 无线信道很难实现
  - 无法侦听到所有可能的冲突: 隐藏站、信号衰落
  - 目标: 避免冲突(avoid collisions)-CSMA/C(ollision)A(voidance)



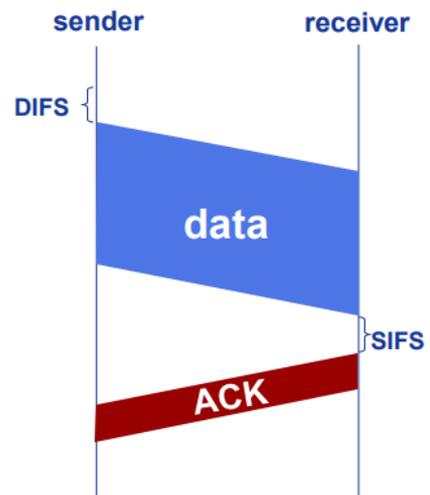
## IEEE 802.11 MAC协议: CSMA/CA

### 802.11 sender

- 1 if 监听到信道空闲了 **DIFS**时间 then  
发送整个帧(无同时检测冲突, 即CD)
- 2 if 监听到信道忙 then  
开始随机退避计时  
当信道空闲时, 计时器倒计时  
当计时器超时时, 发送帧  
if 没有收到ACK then  
增加随机退避间隔时间  
重复第2步

### 802.11 receiver

- if 正确接收帧  
延迟 **SIFS** 时间后, 向发送端发送ACK  
(由于存在隐藏站问题)

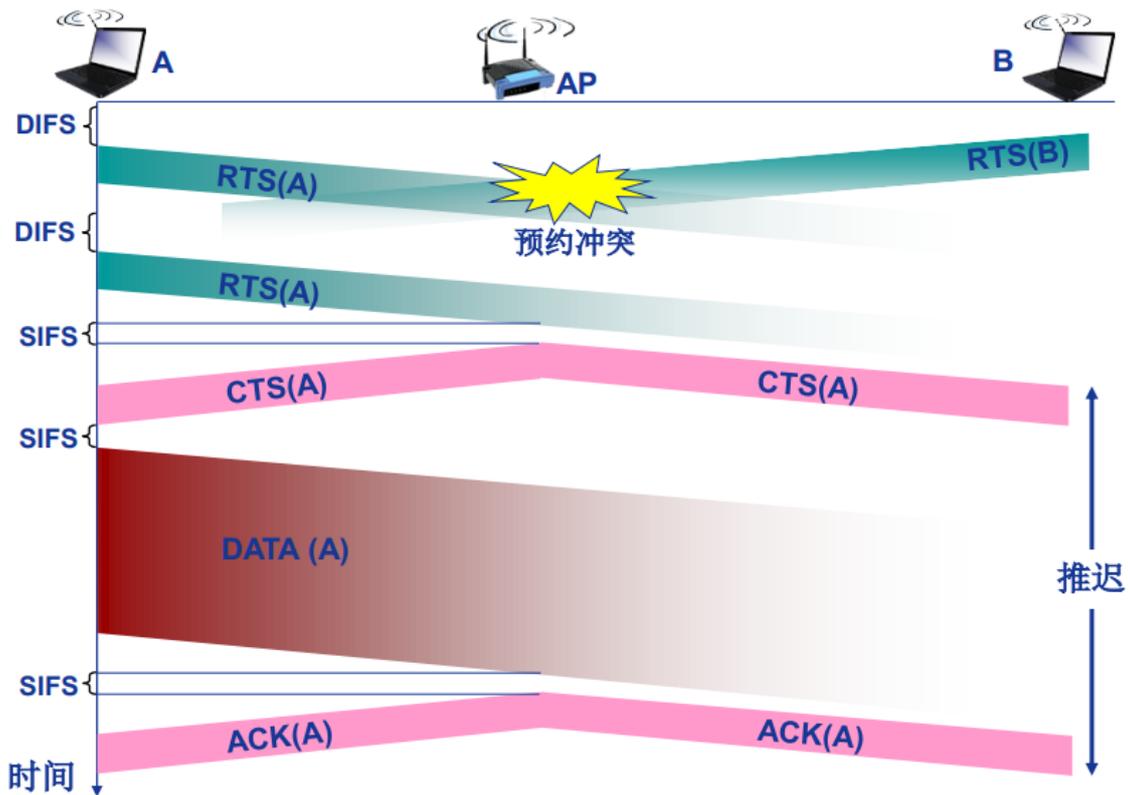


**基本思想：**允许发送端“预约”(reserve)信道，而不是随机发送数据帧，从而避免长数据帧的冲突

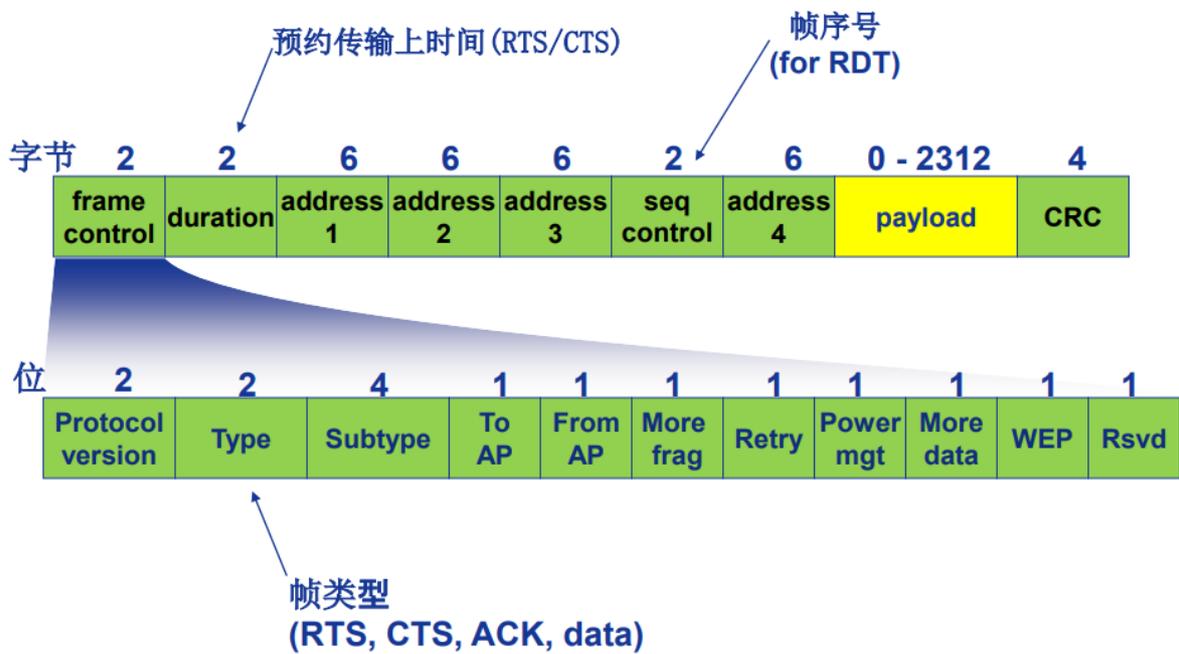
- ❖ 发送端首先利用CSMA向BS发送一个很短的RTS (request-to-send)帧
  - RTS帧仍然可能彼此冲突 (但RTS帧很短)
- ❖ BS广播一个CTS (clear-to-send)帧作为对RTS的响应
- ❖ CTS帧可以被所有结点接收
  - 消除隐藏站影响
  - 发送端可以发送数据帧
  - 其他结点推迟发送

**利用很小的预约帧彻底避免了数据帧冲突！**

### 冲突避免(CA): RTS-CTS交换



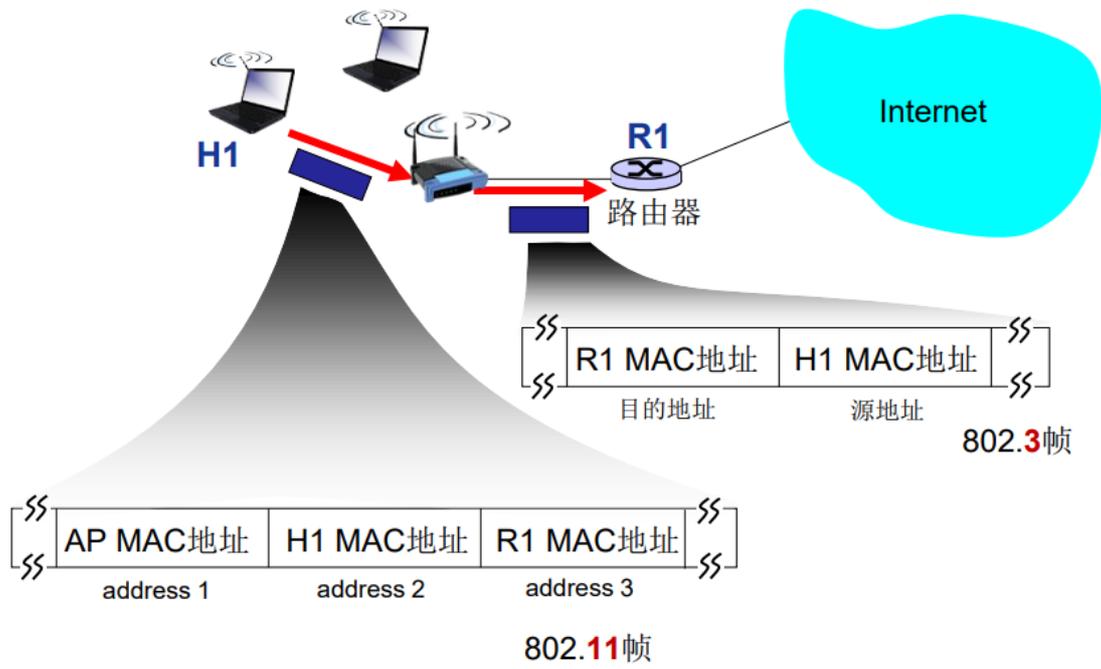
IEEE 802.11 MAC帧



### IEEE 802.11数据帧地址

- ❖ 802.11数据帧有4个地址字段
- ❖ 地址 4 用于自组网络
- ❖ 地址1~地址3:

去往 AP (To AP)	来自 AP (From AP)	地址 1	地址 2	地址 3
0	1	目的地址	AP 地址	源地址
1	0	AP地址	源地址	目的地址





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





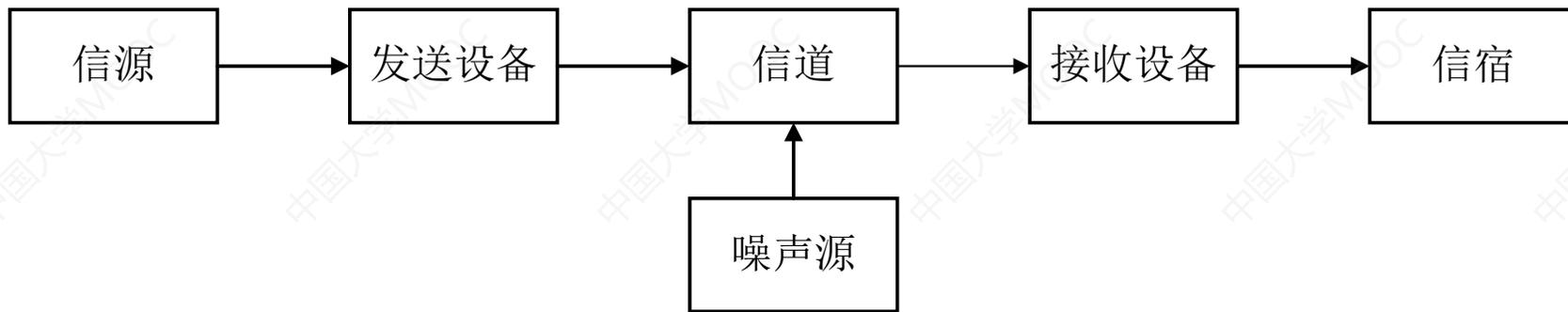
## 6.1 数据通信基础





# 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





## 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

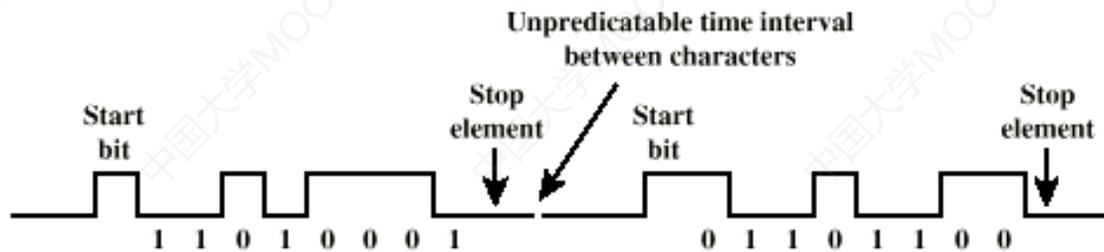


# 异步通信

## 6.1 数据通信基础



(a) Character format



(b) 8-bit asynchronous character stream

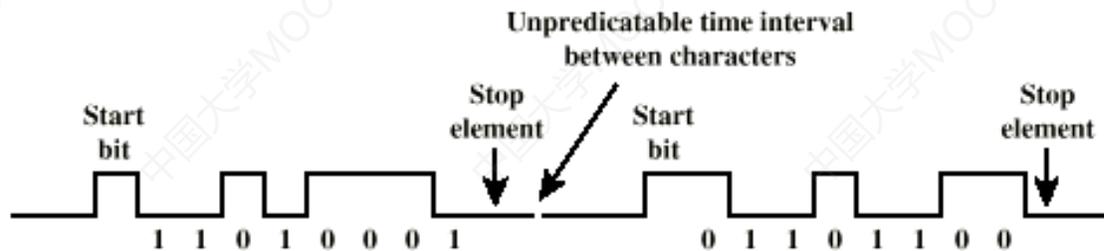


# 异步通信

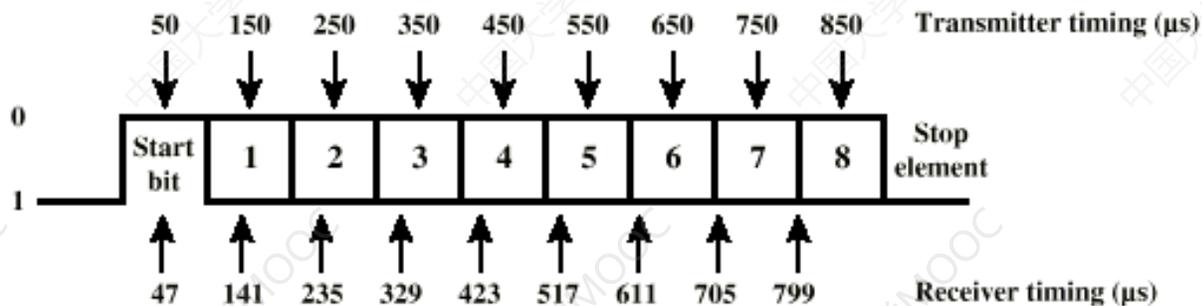
## 6.1 数据通信基础



(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**



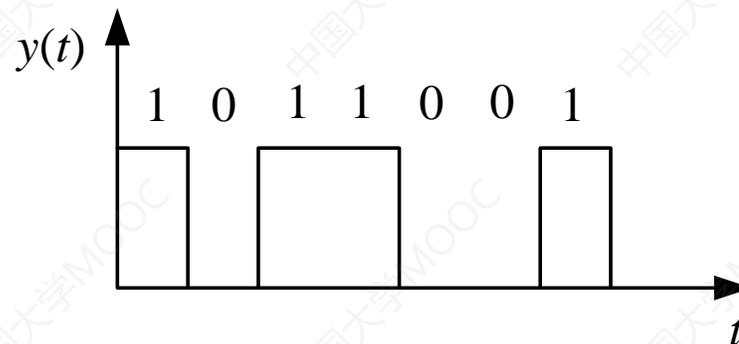
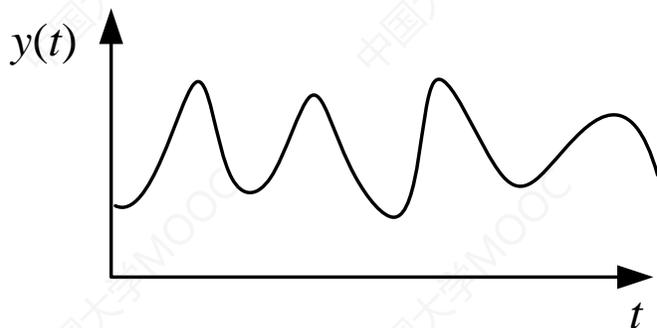


# 模拟通信 VS 数字通信

## 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



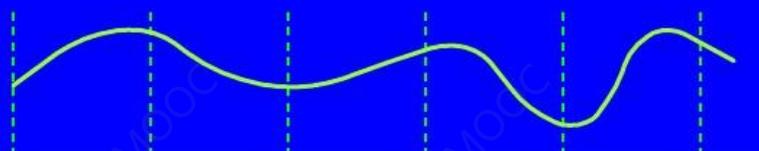


# PCM举例

## 6.1 数据通信基础

### PCM转换过程举例

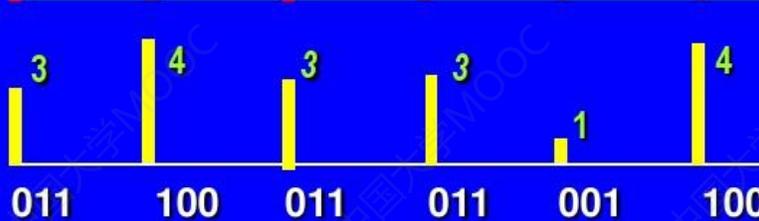
原始信号



PAM脉冲



PCM 脉冲  
(有量化误差)



011 100 011 011 001 100

PCM 输出

**011100011011001100**





## 6.2 物理介质



# 物理介质

## 6.1 数据通信基础

## 6.2 物理介质

### 6.2.1 导引型传输介质

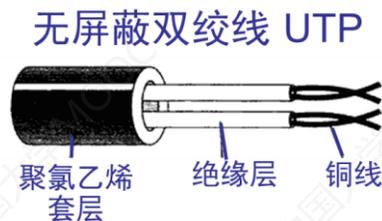
#### ➤ 架空明线

- 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

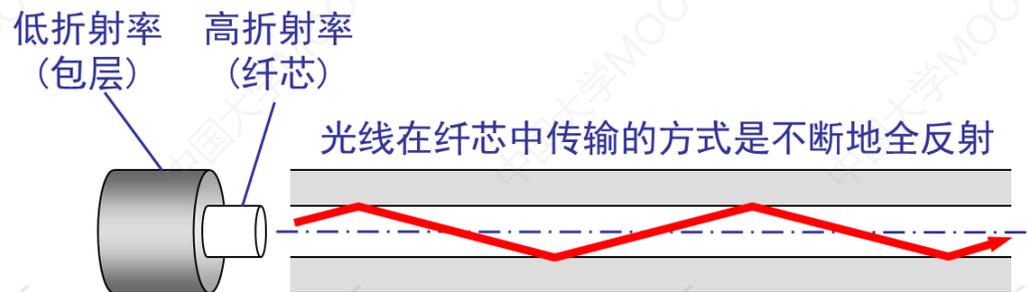
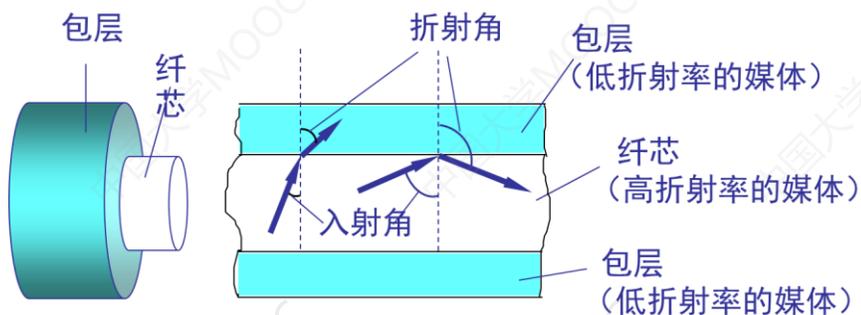
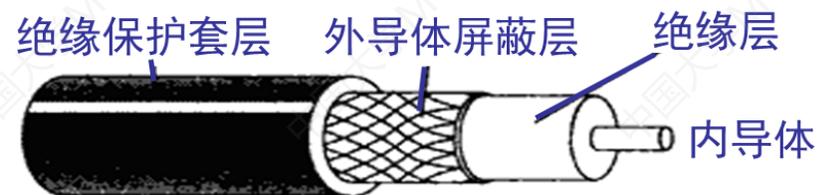
#### ➤ 同轴电缆

- 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

### 同轴电缆





## 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 (7~0.7 $\mu$ m)	光通信系统
430~750 THz	可见光 (0.7~0.4 $\mu$ m)	光通信系统
750~3000 THz	紫外线 (0.4~0.1 $\mu$ m)	光通信系统





## 6.1 数据通信基础

## 6.2 物理介质

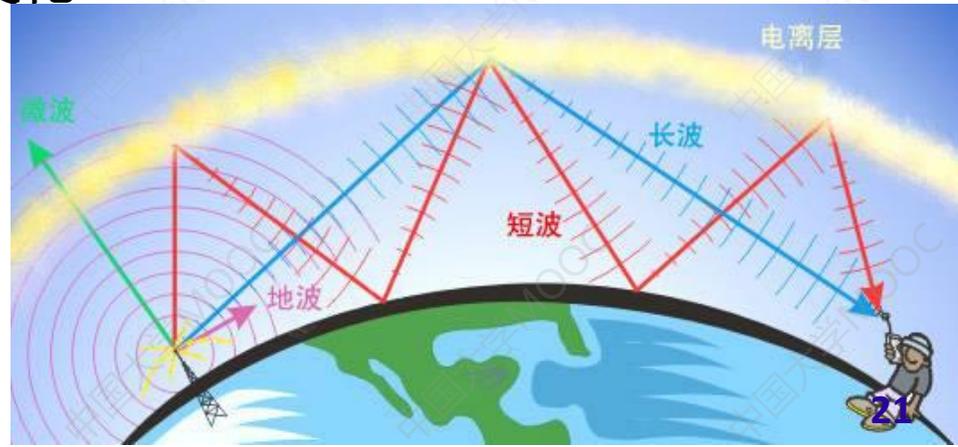
## 6.2.2 非导引型传输介质

## ➤ 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

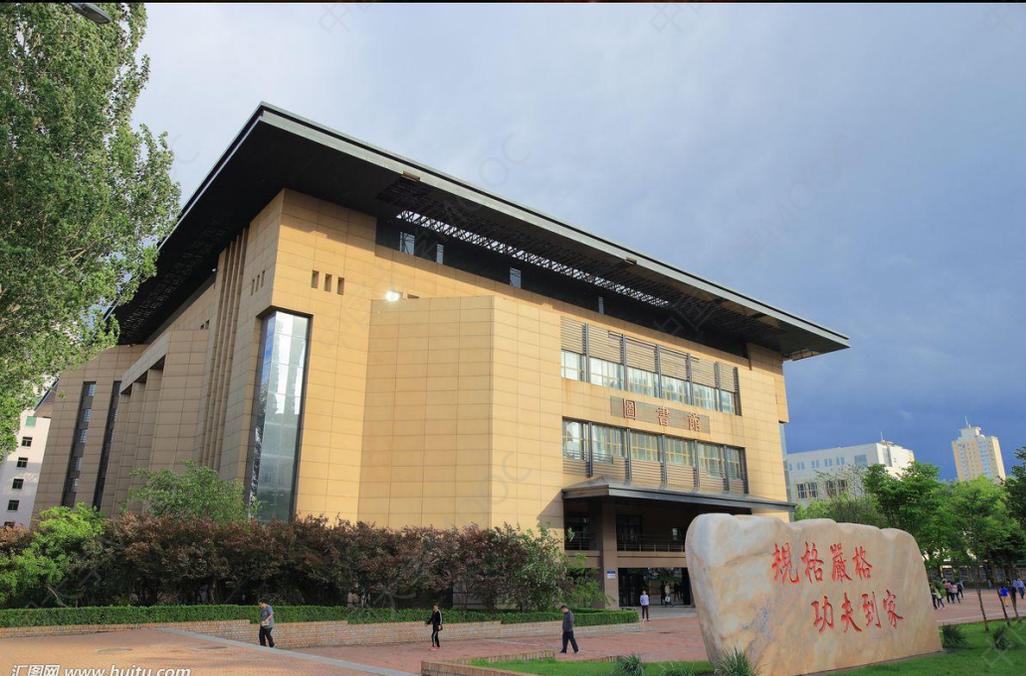
## 6.2 物理介质

### 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

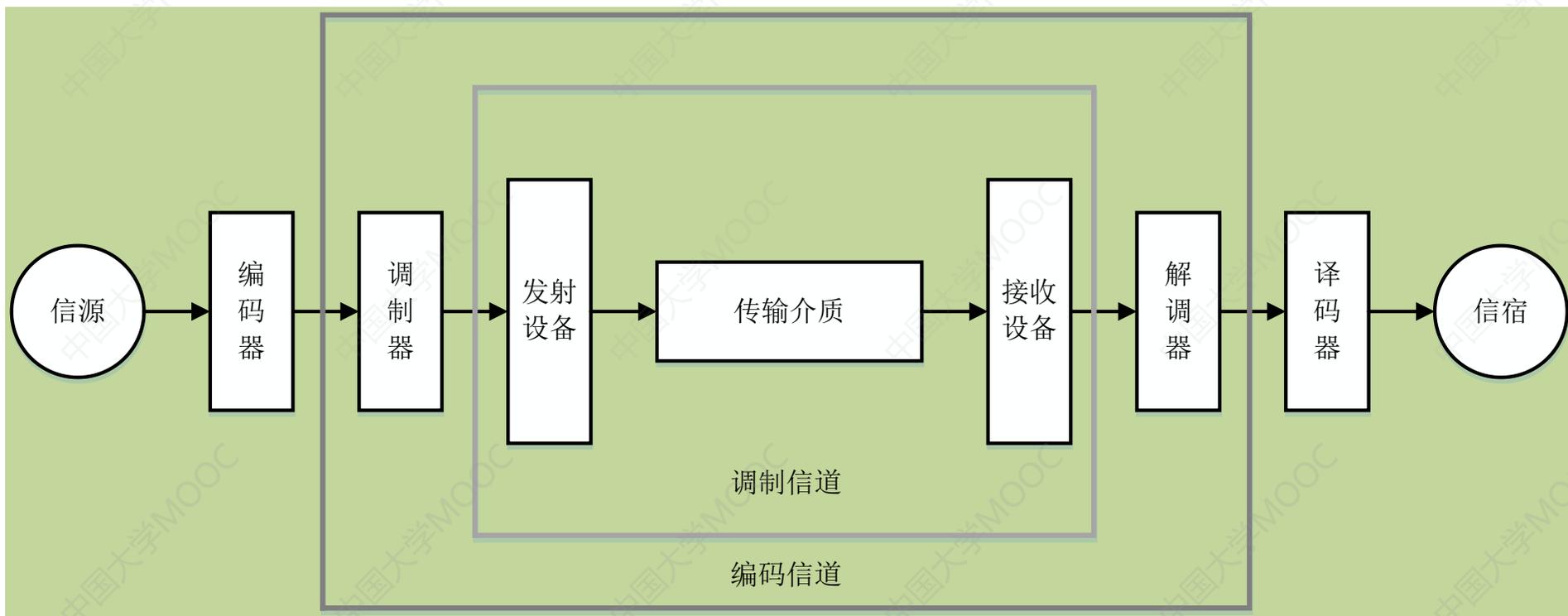
## 6.3 信道与信道容量

### ➤ 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： **$C=2B\log_2M$**

■ 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**





## 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**





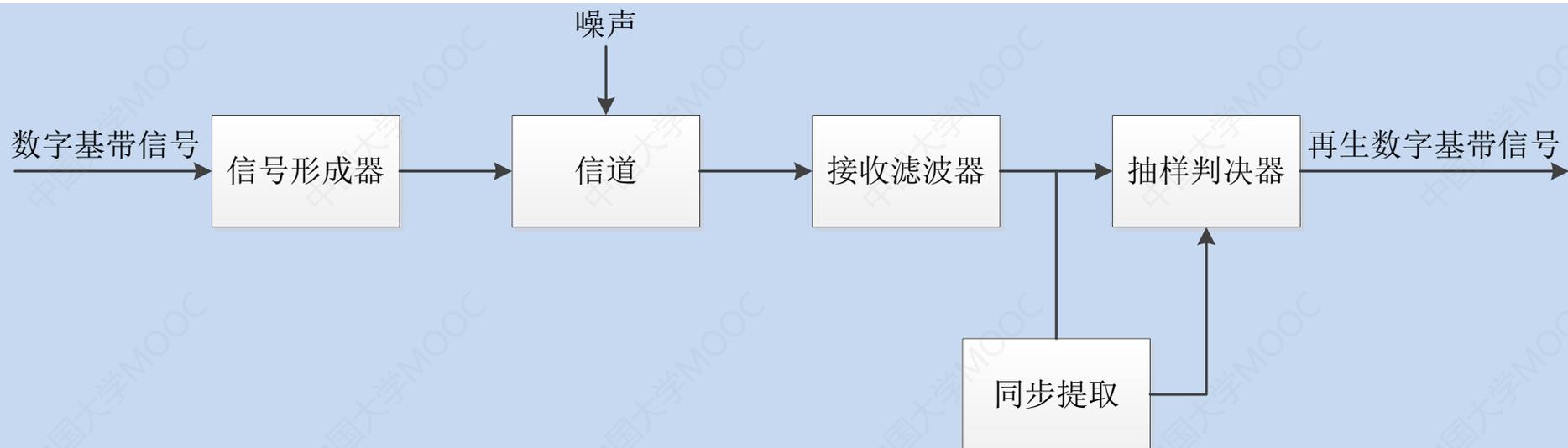
# 数字基带传输系统

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

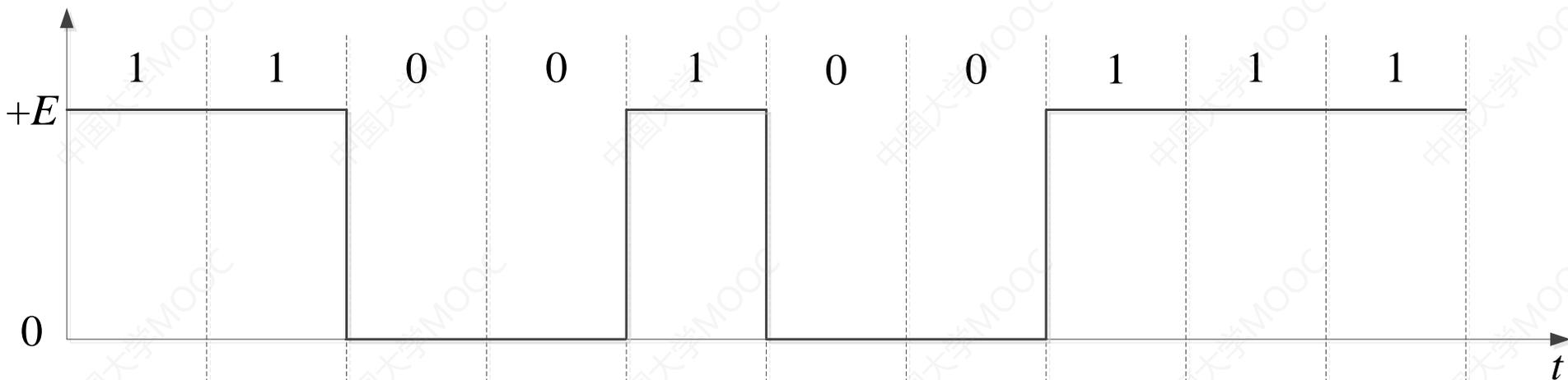
6.2 物理介质

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

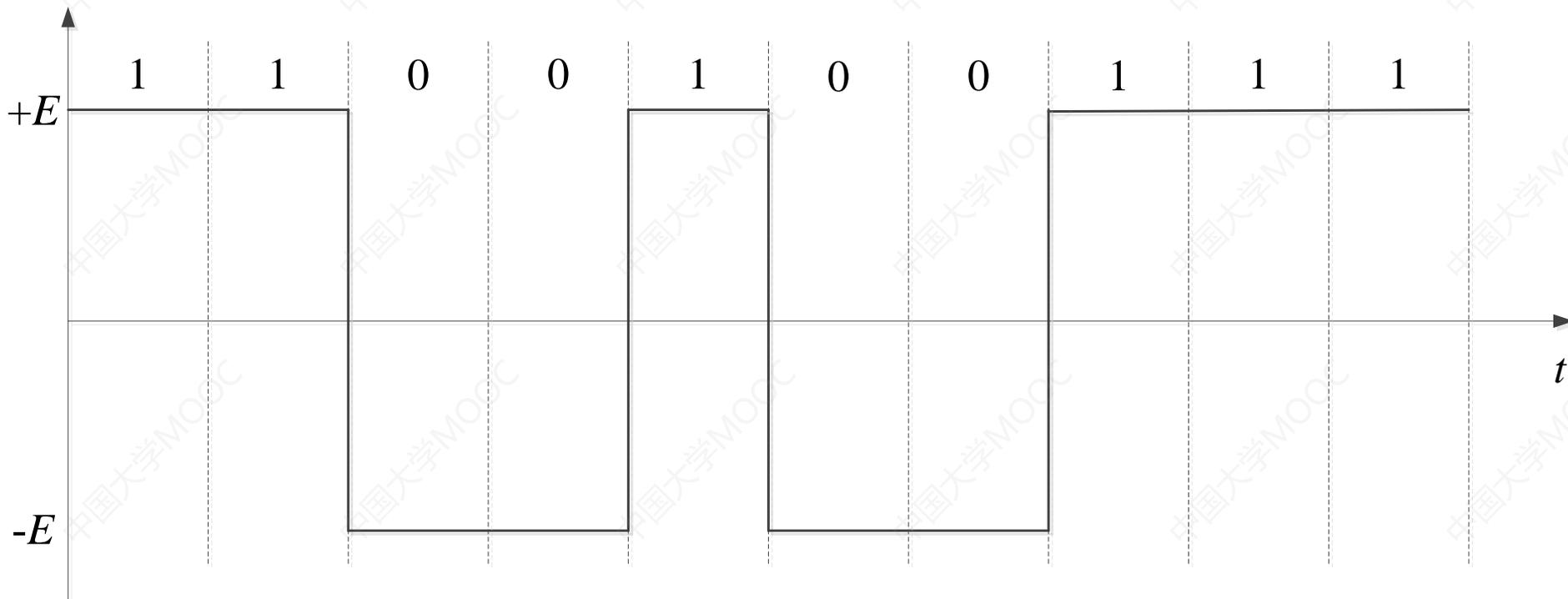
6.1 数据通信基础

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

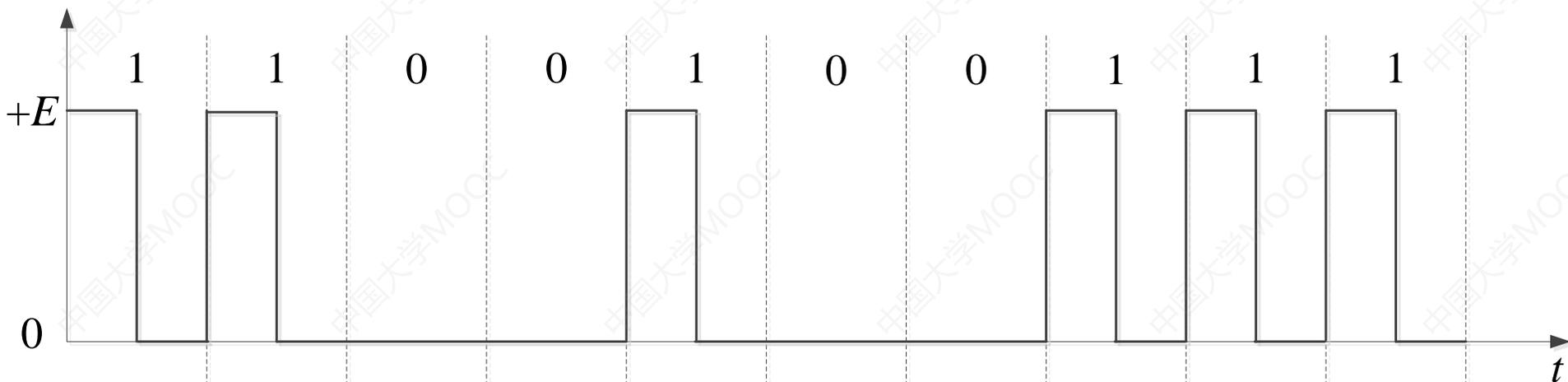
6.2 物理介质

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

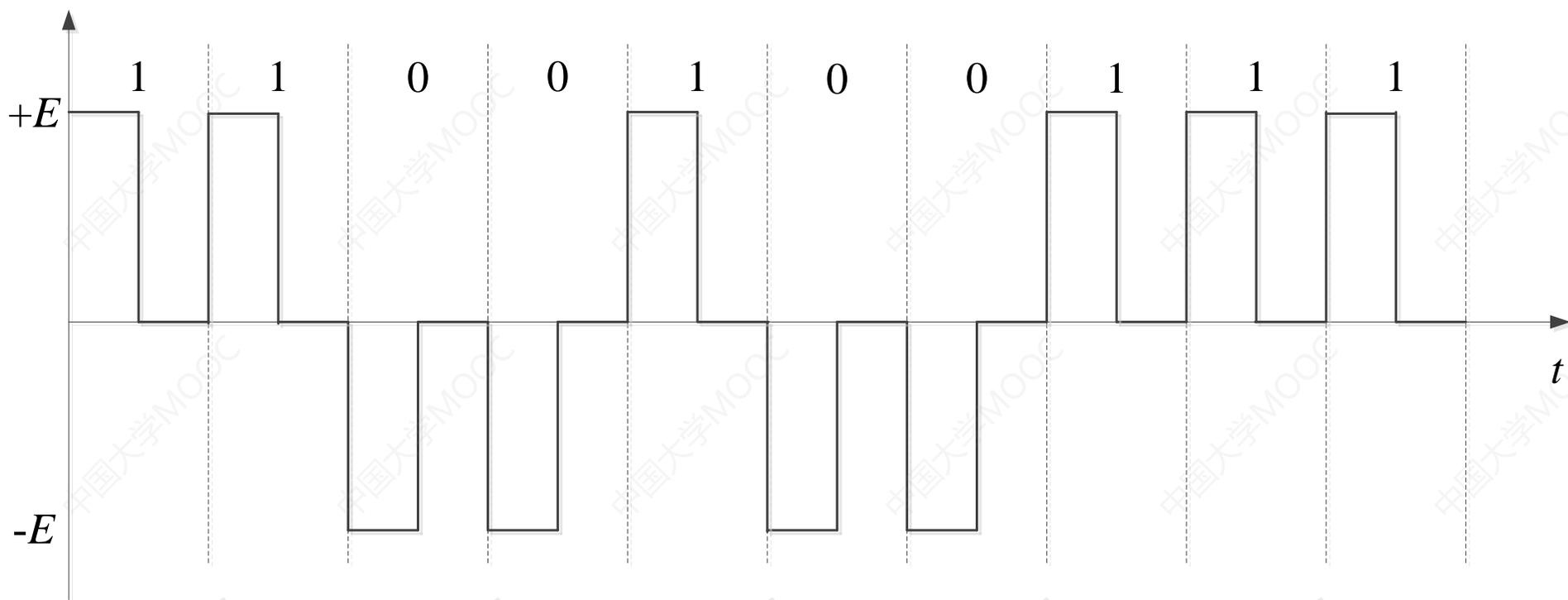
6.1 数据通信基础

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

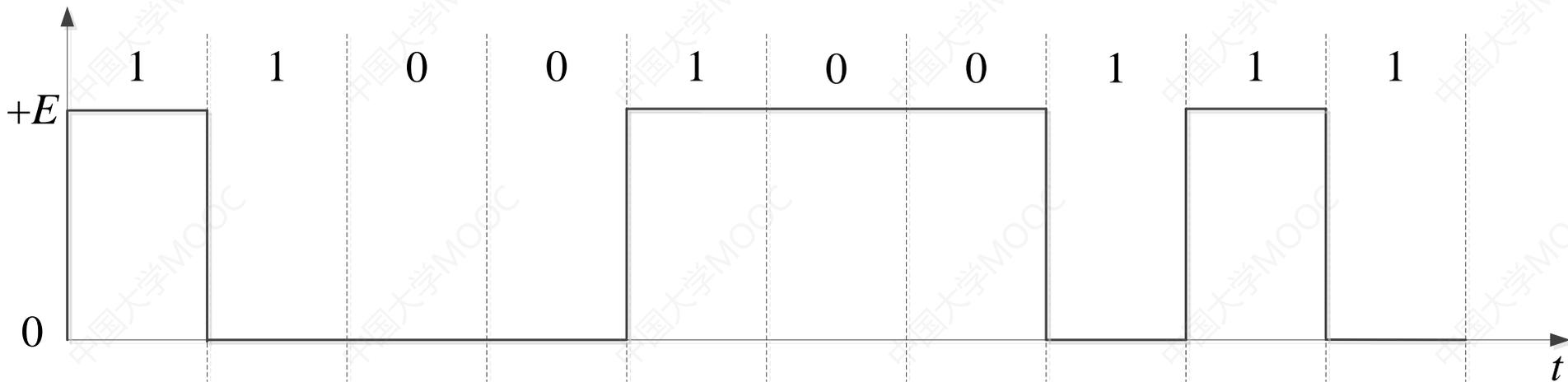
6.3 信道与信道容量

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

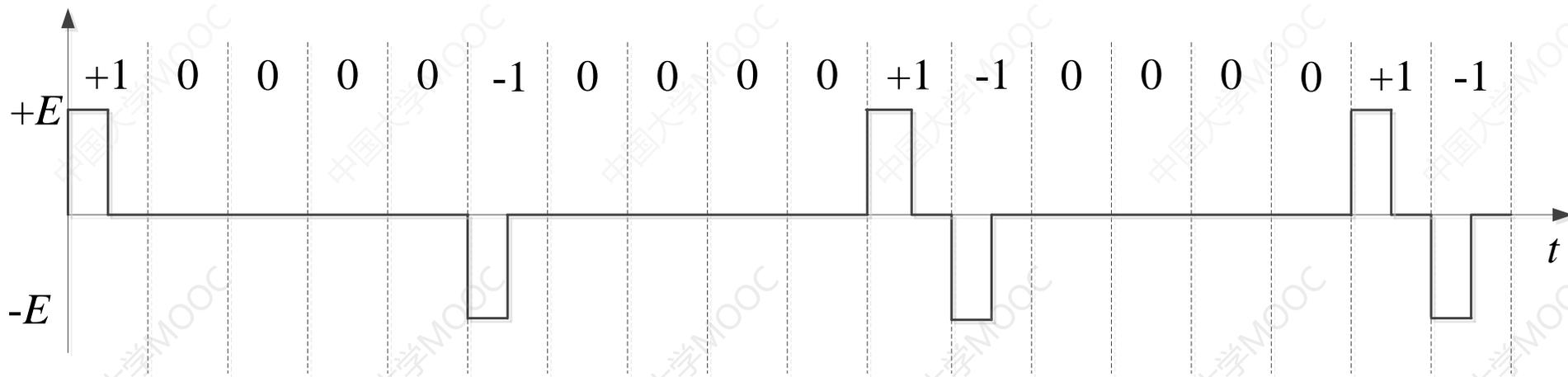
## ➤ AMI码

■ 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)
- 信号码中的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

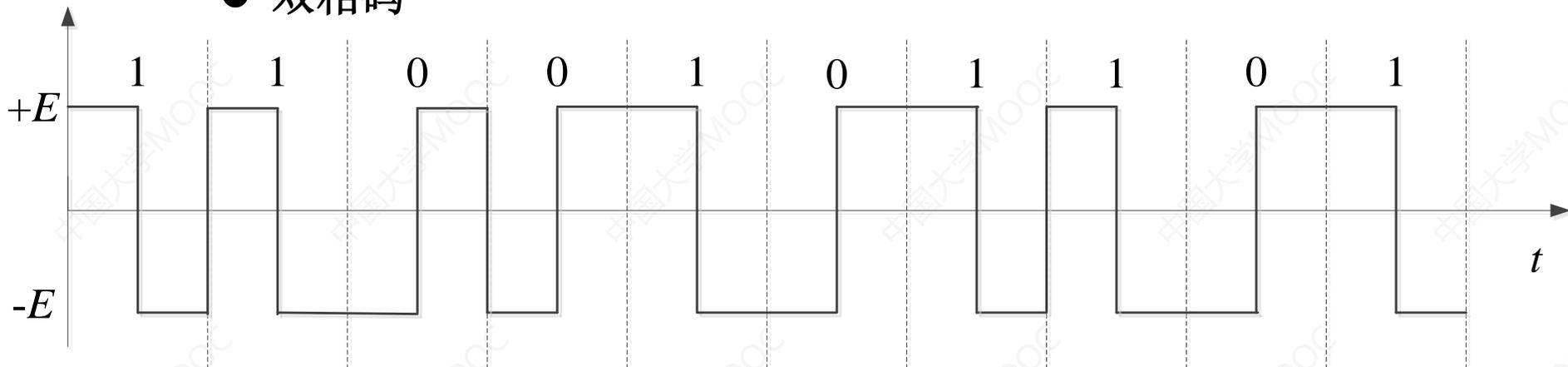
6.3 信道与信道容量

6.4 基带传输基础

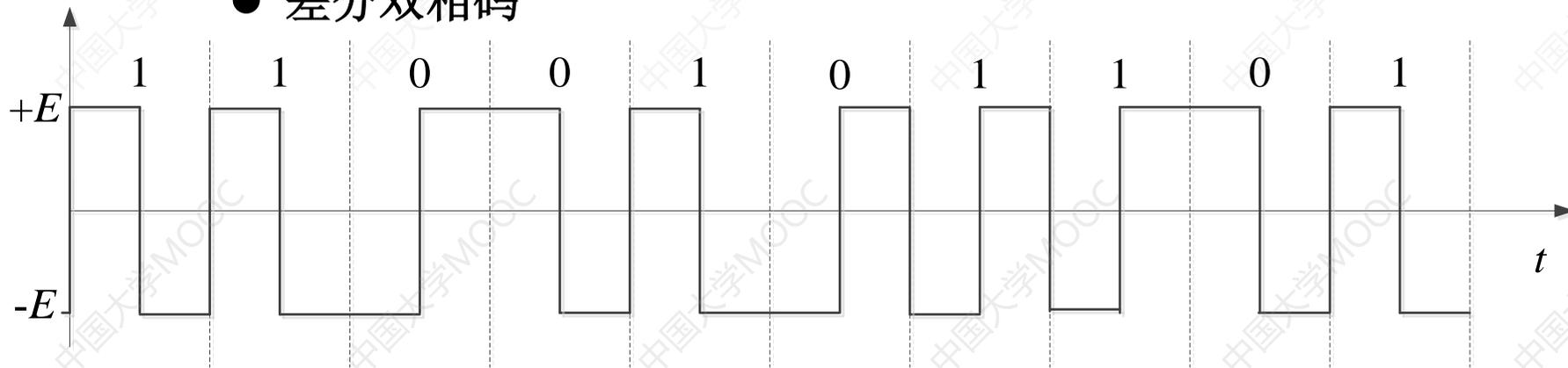
## ► 双相码

■ 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

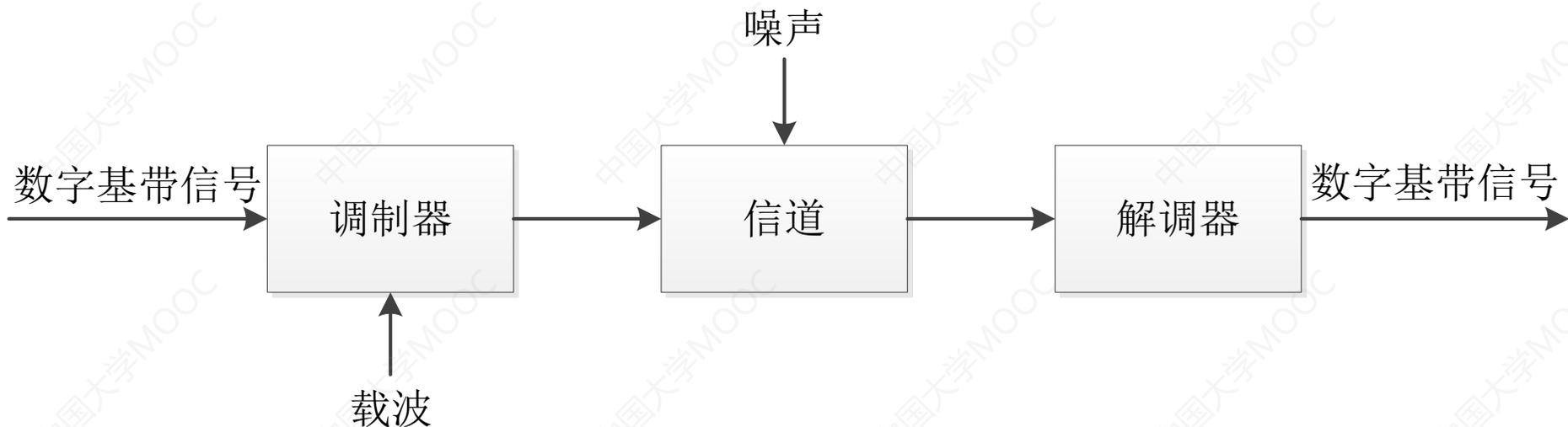
6.1 数据通信基础

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

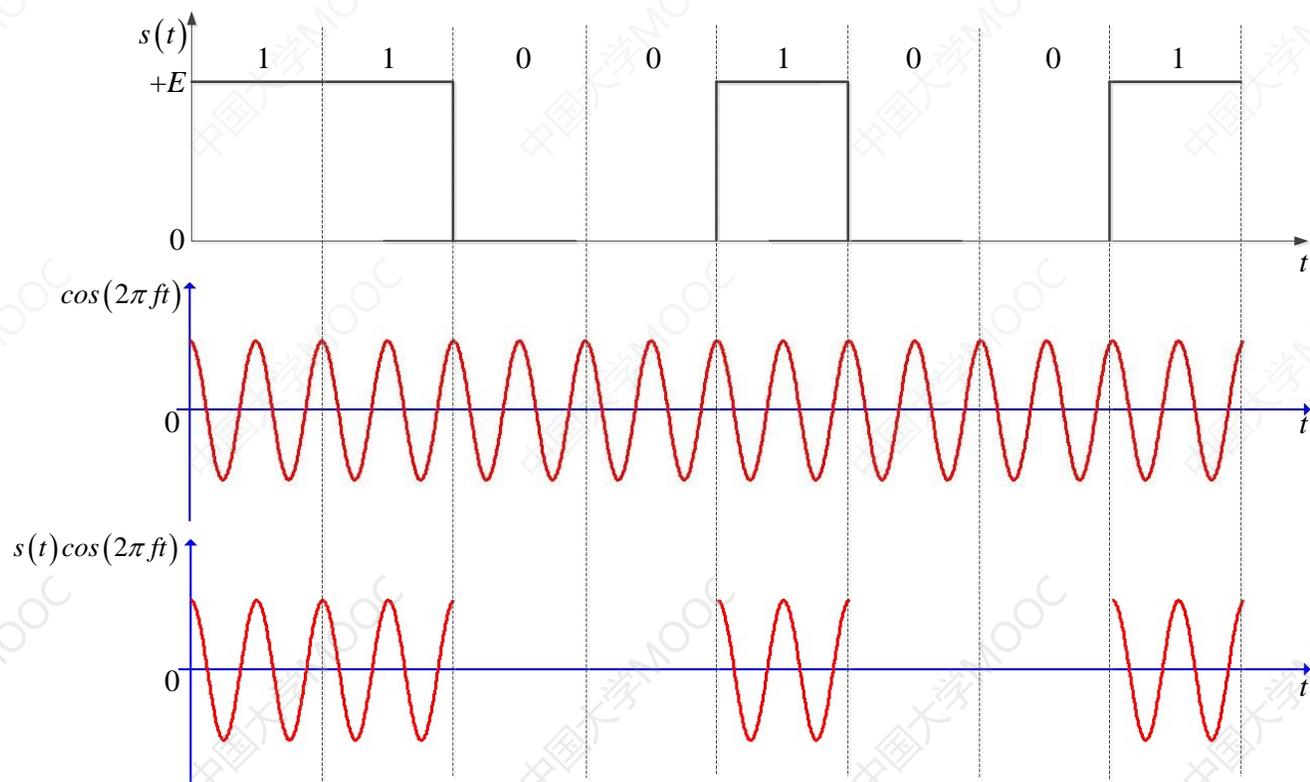
6.4 基带传输基础

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)

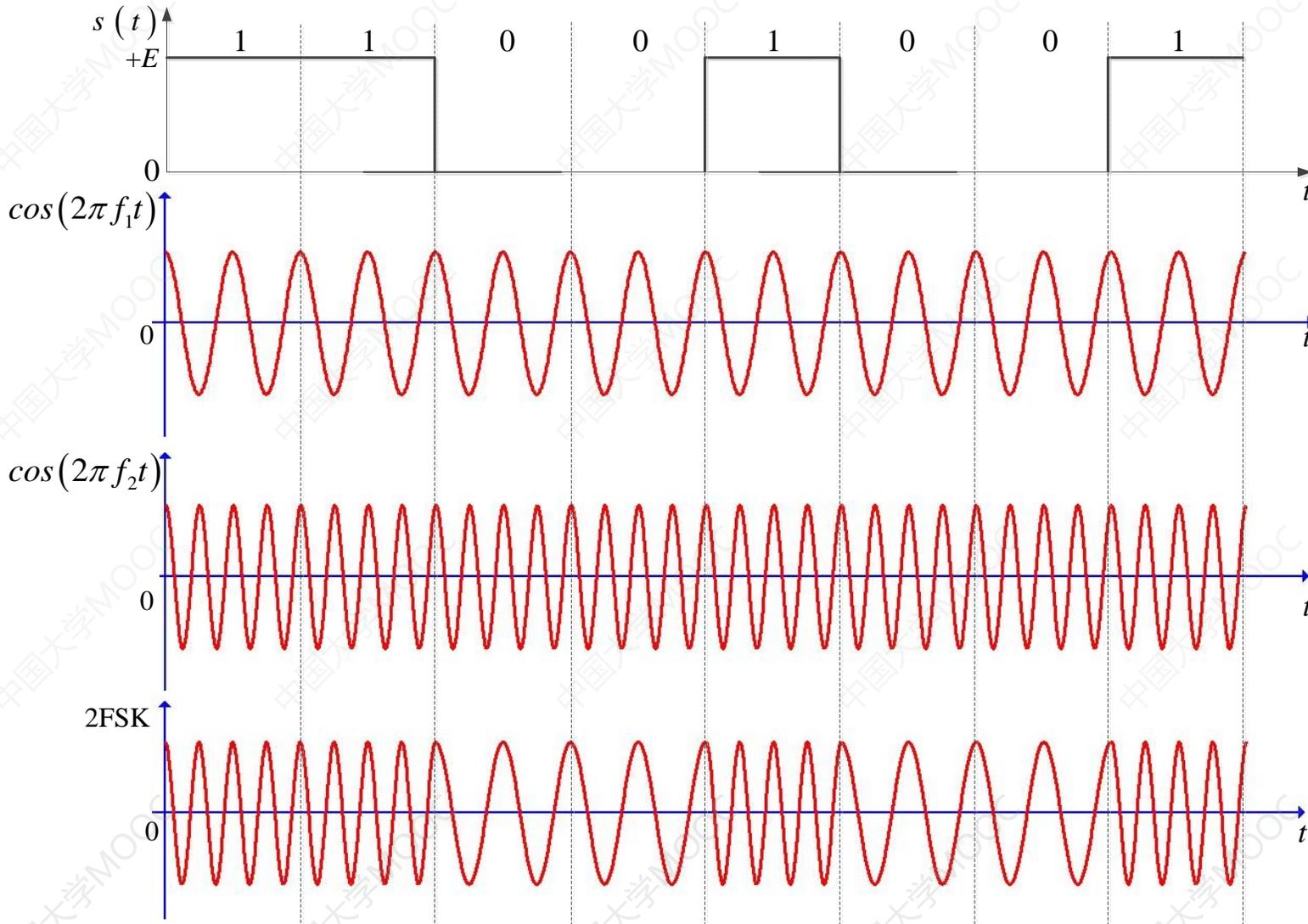
6.1 数据通信基础

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

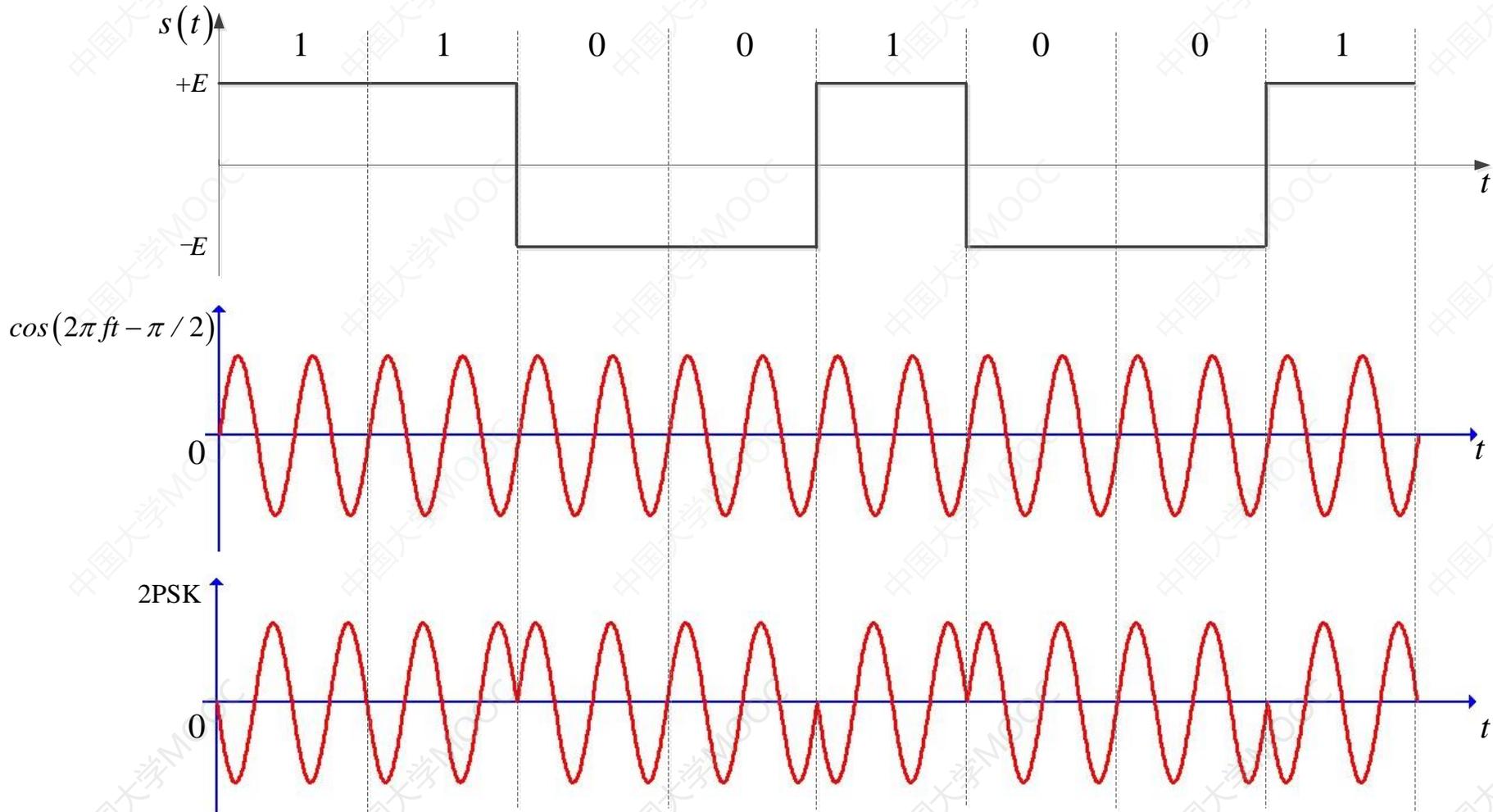
6.2 物理介质

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

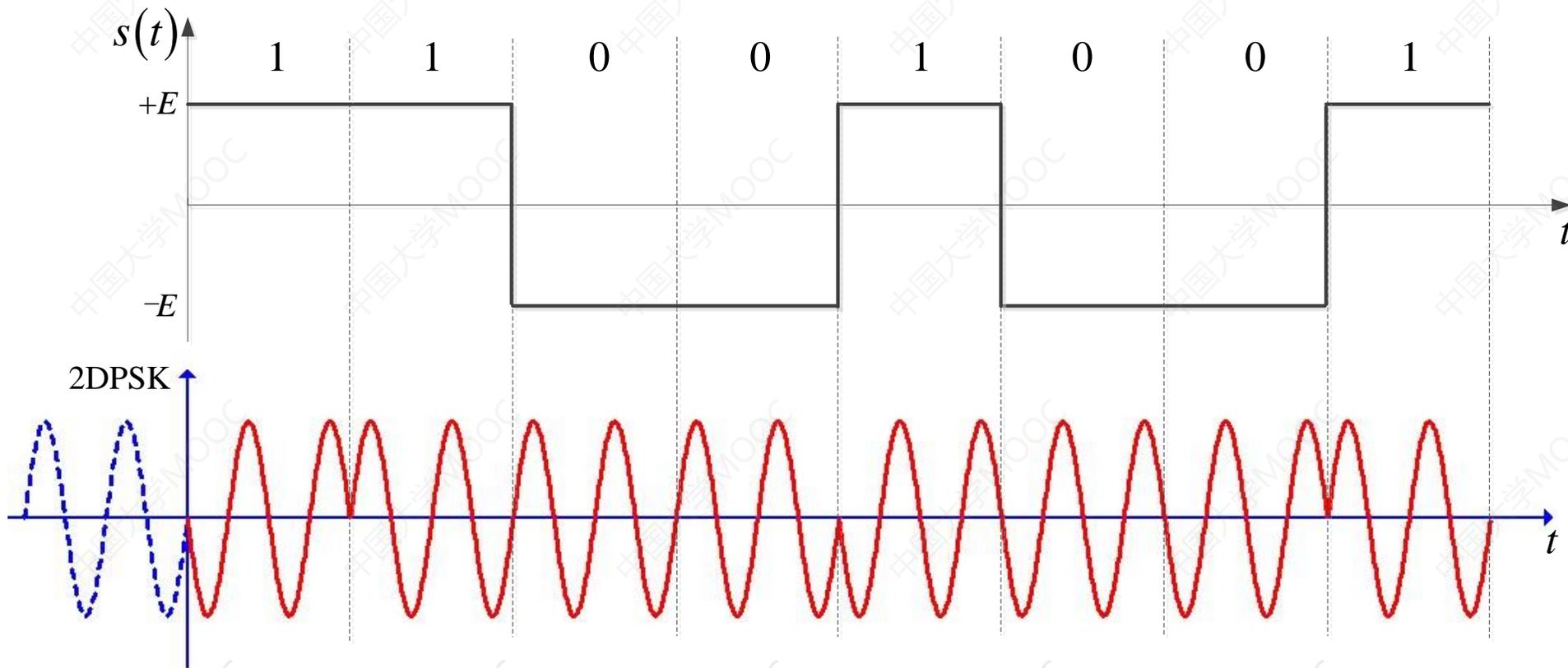
6.2 物理介质

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

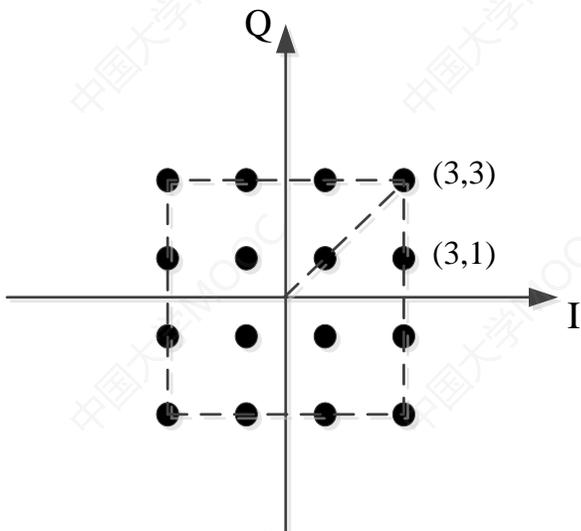
6.2 物理介质

6.3 信道与信道容量

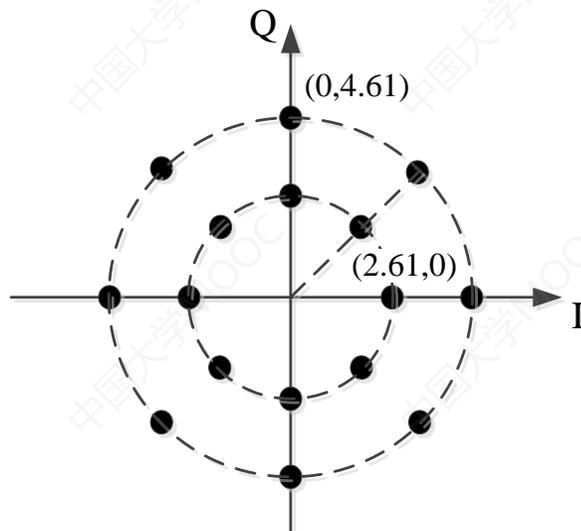
6.4 基带传输基础

6.5 频带传输基础

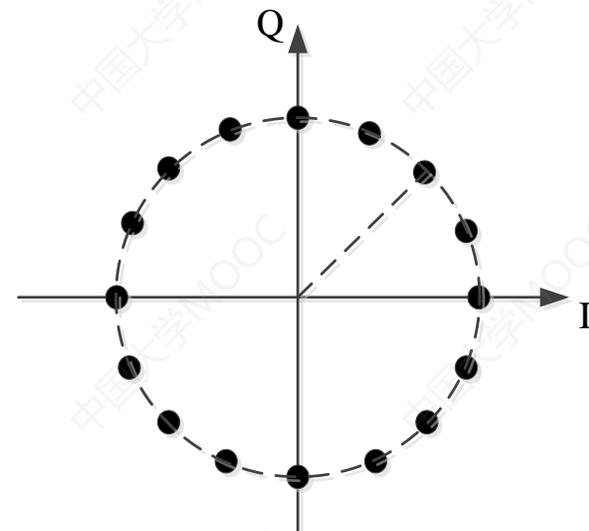
➤ QAM已调信号的矢量端点在I-Q平面上的分布，称为QAM星座图



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!

