



循环冗余校验码(CRC)

- ❖ 检错能力更强大的差错编码
- ❖ 将数据比特, **D**, 视为一个二进制数
- ❖ 选择一个**r+1**位的比特模式 (生成比特模式), **G**
- ❖ 目标: 选择**r**位的CRC比特, **R**, 满足
 - $\langle D, R \rangle$ 刚好可以被G整除(模2)
 - 接收端检错: 利用G除 $\langle D, R \rangle$, 余式全0, 无错; 否则, 有错!
 - 可以检测所有突发长度小于r+1位差错。
- ❖ 广泛应用于实际网络 (以太网, 802.11 WiFi, ATM)

← d bits → ← r bits →



bit
pattern

$$D * 2^r \text{ XOR } R$$

mathematical
formula

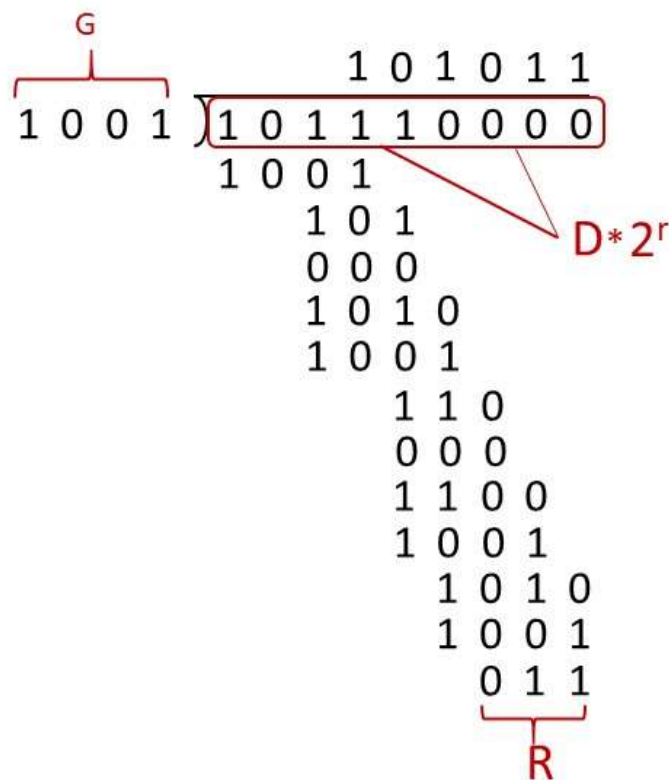
期望:

相当于:

相当于:

如果利用G去除D-2r,
则 余式即为R:

$$R = \text{余式} \left[\frac{D \cdot 2^r}{G} \right]$$





差错纠正

❖ 前向纠错 (Forward Error Correction, FEC)

- 纠错码

❖ 检错重发

- 停-等协议

- 滑动窗口协议

❖ 反馈校验

❖ 检错丢弃

- ❖



5.4 多路访问控制协议

刘亚维

37



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

多路访问控制(MAC)协议

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)

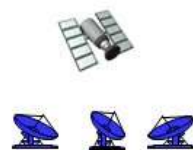
- 早期的总线以太网
- HFC的上行链路
- 802.11无线局域网



共享线路
(e.g., 总线以太网)



共享RF
(e.g., 802.11 WiFi)



共享RF
(e.g., 卫星网络)



共享空气、声频
(e.g., 鸡尾酒会)



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

多路访问控制(MAC)协议

- ❖ 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



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



理想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 发送数据.
2. 当有 M 个结点期望发送数据时，每个结点发送数据的平均速率是 R/M
5. 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



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



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”)访问MAC协议

- 结点轮流使用信道



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

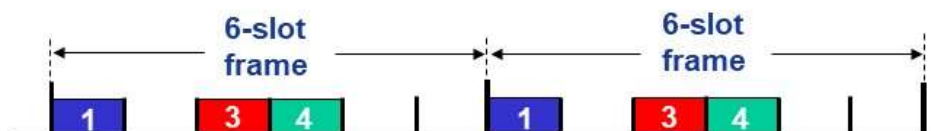
5.4 多路访问控制协议



信道划分MAC协议：TDMA

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





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

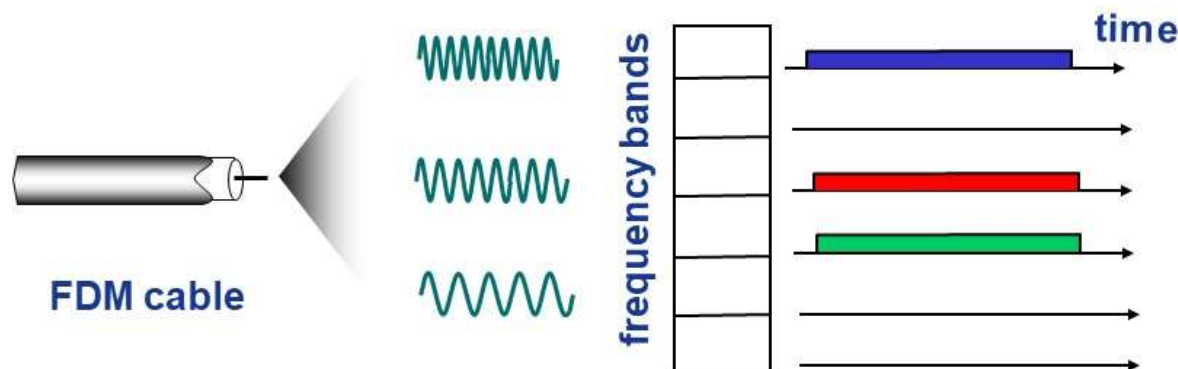
5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

信道划分MAC协议：FDMA

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。





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



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



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



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

随机 – why?



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



ALOHA协议

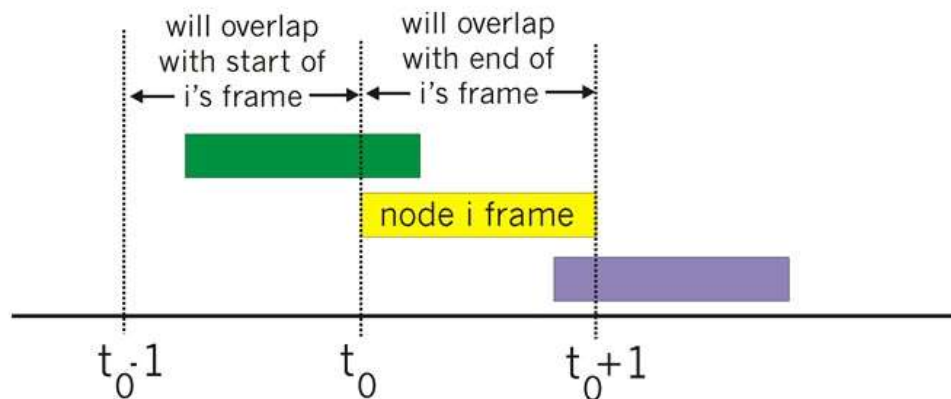
❖ 非时隙(纯)Aloha: 更加简单, 无需同步

❖ 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





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

ALOHA协议

$$\begin{aligned}P(\text{给定结点成功发送帧}) &= P(\text{该结点发送}) \cdot \\&\quad P(\text{无其他结点在}[t_0-1, t_0]\text{期间发送帧}) \cdot \\&\quad P(\text{无其他结点在}[t_0, t_0+1]\text{期间发送帧}) \\&= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1} \\&= p \cdot (1-p)^{2(N-1)}\end{aligned}$$

... 选取最优的 p , 并令 $n \rightarrow \infty$

$$= 1/(2e) = \mathbf{0.18}$$

比时隙**ALOHA**协议更差!



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



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



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



CSMA协议

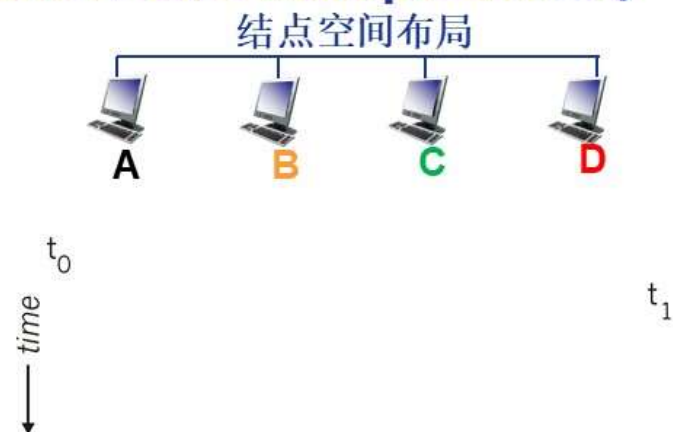
❖ **载波监听多路访问协议CSMA** (carrier sense multiple access)

❖ **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

❖ **继续发送冲突帧：浪费信道资源**





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



CSMA/CD协议

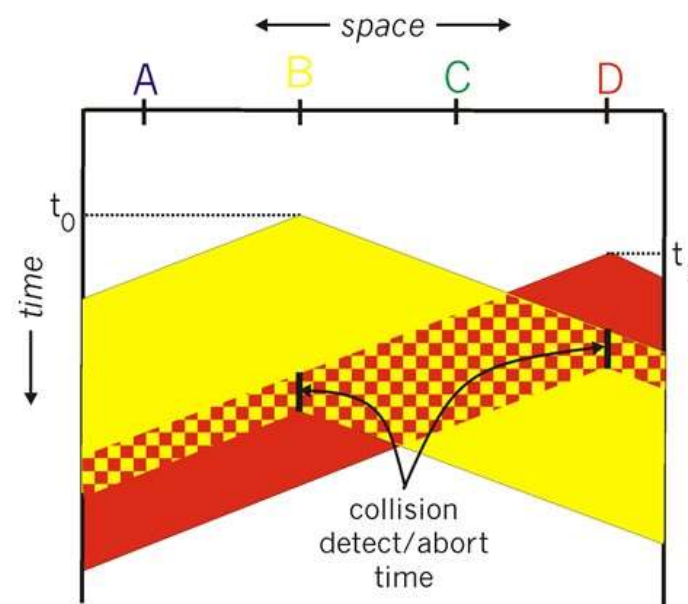
CSMA/CD: CSMA with Collision Detection

- 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”





5.1 数据链路层基本服务

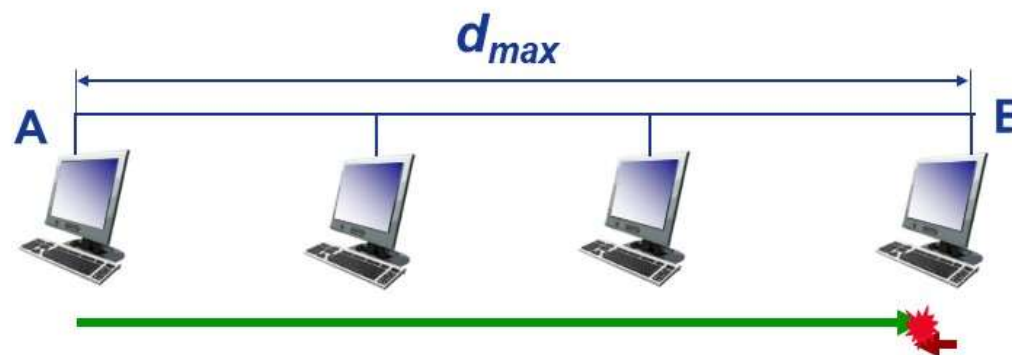
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



CSMA/CD协议

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)

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

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

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

单选题 1分



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**





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



例题

【例2】 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

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



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



CSMA/CD效率

❖ T_{prop} = LAN中2个结点间的最大传播延迟

❖ t_{trans} = 最长帧传输延迟

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

❖ t_{prop} 趋近于0或者 t_{trans} 趋近于 ∞ 时, 效率趋近于1

❖ 远优于ALOHA, 并且简单、分散!



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



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!



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



轮转访问MAC协议

轮询(polling):

- ❖ 主结点轮流“邀请”从属结点发送数据
- ❖ 典型应用:
“哑(dumb)”从属设备



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



轮转访问MAC协议

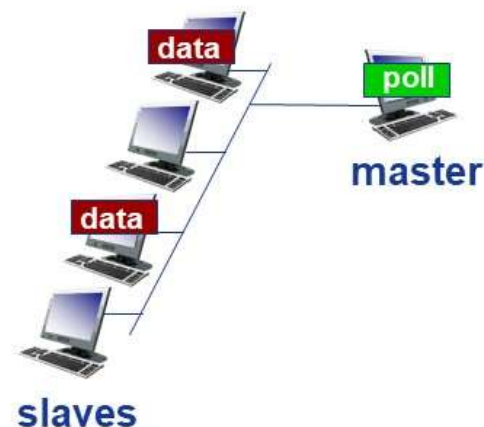
轮询(polling):

❖ 主结点轮流“邀请”从属结点发送数据

❖ 典型应用：
“哑(dumb)”从属设备

❖ 问题：

- 轮询开销
- 等待延迟
- 单点故障





轮转访问MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

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





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



轮转访问MAC协议

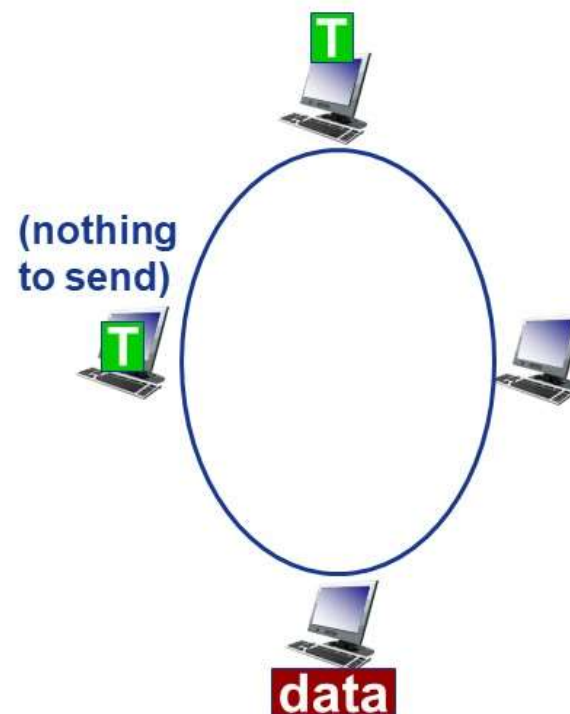
令牌传递(token passing):

❖ 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





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

轮转访问MAC协议

❖ **讨论：** 总结两个轮转访问MAC协议：轮询和令牌传递的相同点和不同点？

■ 共同点：

- 开销
- 等待延迟
- 单点故障
- 无冲突
- 信道预约+数据传输

■ 不同点：

- 轮询：集中式预约（分配）信道
- 令牌：分布式预约信道

■ 能否设计一个新的轮转访问MAC协议？

轮转访问MAC协议

轮询(polling):

- ❖ 主结点轮流“邀请”从属结点发送数据
- ❖ 典型应用：“哑(dumb)”从属设备
- ❖ 问题：
 - 轮询开销
 - 等待延迟
 - 单点故障



哈尔滨工业大学 计算机网络之实验实训 主讲人：李全东

轮转访问MAC协议

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



哈尔滨工业大学 计算机网络之实验实训 主讲人：李全东



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



轮转访问MAC协议

比特映像介质访问控制协议:

- ❖ 将时间划分成一系列的**预约周期**和**数据传输周期**
- ❖ 每个预约周期包括N个时隙，每个时隙1比特，对应一个站
- ❖ 任何一个站想发送数据，必须在它的时隙到来时发一个“1”
- ❖ 当预约周期结束后，所有站都知道有哪些站希望发送数据，于是这些预约过的站按编号顺序发送，永不冲突
- ❖ 最后一个站发完数据后，开始新一轮的预约周期





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



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；比特映像介质访问控制
- 蓝牙、FDDI、令牌环网

单选题 1分

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



假设一个局域网采用时隙ALOHA协议，每个结点以概率 $P=0.5$ 决策下一个时隙发送数据帧。若当前只有两个结点A、B在当前时隙竞争发送帧并产生冲突，则下个时隙A成功发送帧的概率是

A 0.125

B 0.25

C 0.5

D 0.75



5.5 局域网技术

刘亚维





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

链路层寻址：MAC地址

❖ 链路层寻址关键需求：唯一

❖ 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
- 广播地址：FF-FF-FF-FF-FF-FF

❖ IP地址：

- 32位 (IPv4)
- 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



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

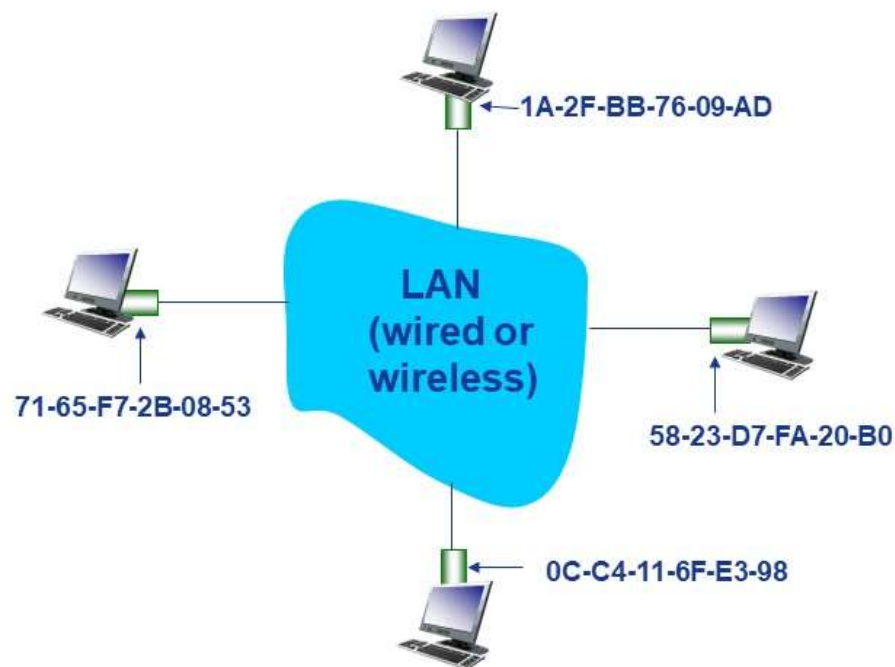
5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术



MAC地址

局域网中的每块网卡都有一个唯一的**MAC地址**



网络适配器



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术



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



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

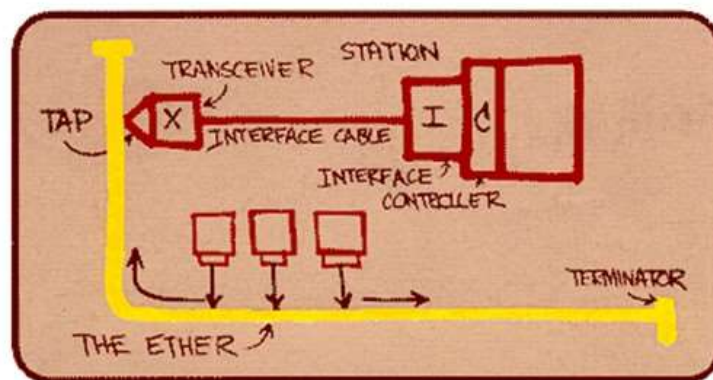
5.5 局域网技术



以太网(Ethernet)

“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 – 400 Gbps



Metcalfe的以太网草图