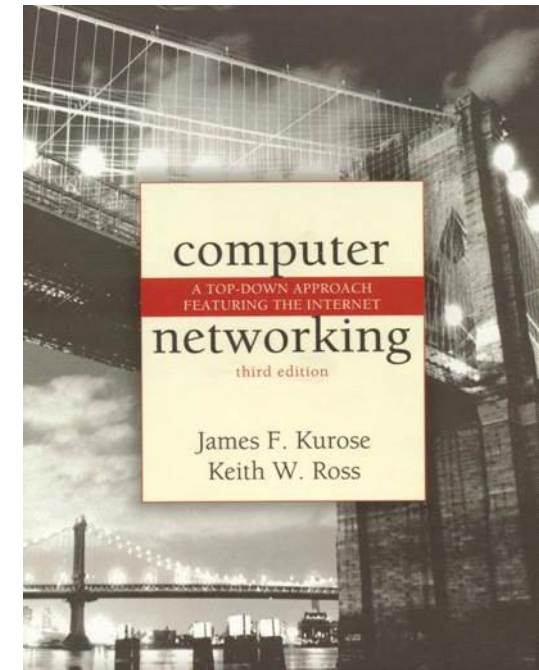


第六章 链路层：链路、接入网和局域网



第 6 章：数据链路层和局域网

目的：

- 了解数据链路层服务及协议原理：
 - 差错检测和纠错
 - 共享广播信道：多路访问协议
 - 链路层寻址
 - 可靠传输，流量控制

链路层

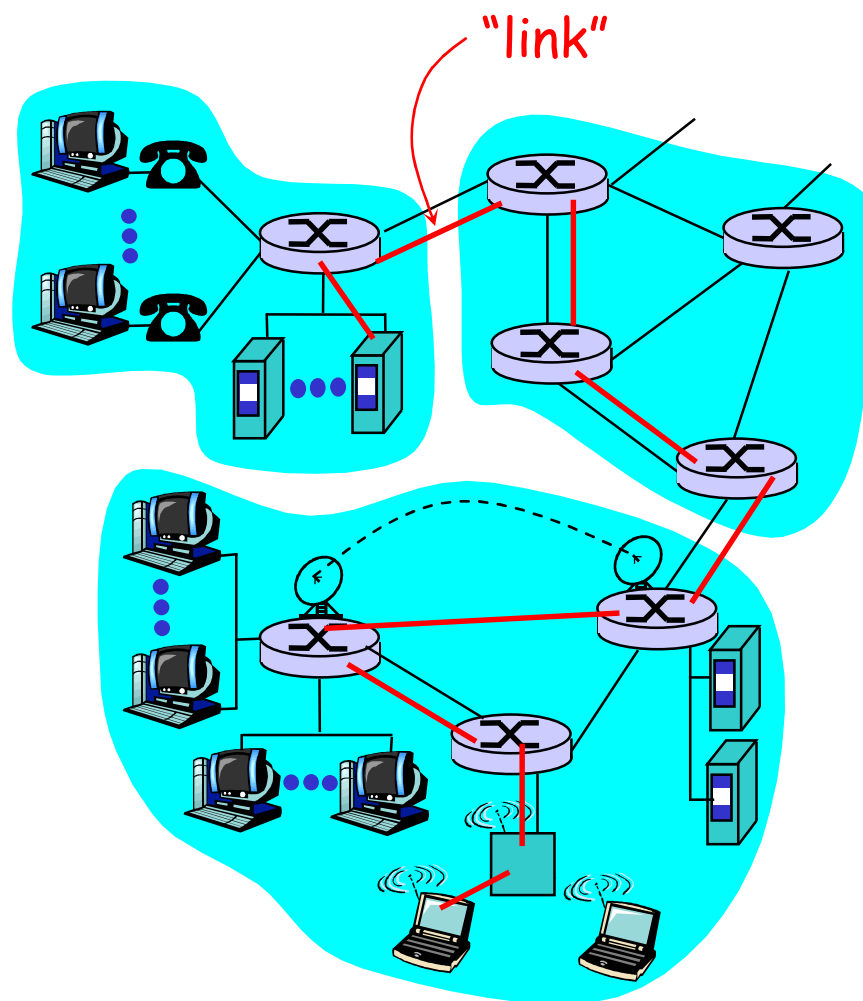
- 6.1 概述和服务
- 6.2 差错检测和纠错技术
- 6.3 多路访问链路和协议
- 6.4 交换局域网

链路层：介绍

常用术语：

- **节点：**主机和路由器(包括网桥和交换机)
- **链路：**沿着通信路径连接相邻节点的通信信道
 - 有线链路
 - 无线链路
 - 局域网
- **帧：**链路层协议交换的数据单元。封装网络层数据报

数据链路层的职责：将分组通过一个链路，从一个节点传输到临近的另一个节点。



链路层的特点

- 分组传输可以经过不同的链路使用不同的协议实现：
 - 例如，最初的链路是以太网，然后是帧中继，接着是 802.11
- 每个链路协议提供不同的服务
 - 例如，可以在链路上提供或不提供可靠的传输

传输类比

- 从成都到九寨沟的旅途
 - 打的：成都某地到成都机场
 - 飞机：成都机场到九寨沟机场
 - 大巴：九寨沟机场到清华风景区
- 旅客 = 数据包
- 运输段 = 通信链路
- 运输模式 = 链路层协议
- 旅行社 = 路由算法

链路层服务

□ 成帧：

- 把网络层数据报加头和尾，封装成帧
- 帧头中包括指明目的和源的“物理地址”（不同于**IP**地址）

□ 链路访问：

- 媒体访问控制（**Medium Access Control, MAC**）协议
- 共享媒体的多路访问

□ 在邻接节点间的可靠传输

- 我们已经在第三章学习了怎么做！
- 在出错率很低的链路上很少用（光纤，部分双绞线）
- 无线链路：高出错率
 - 问题：为何链路层和端到端的层都要提供可靠性服务？

链路层服务(续)

□ 差错检测:

- 差错由信号衰减和噪声引起
- 接收者检测错误：如果发现差错
 - 发送者重传帧或丢帧

□ 纠错:

- 接收者检测和纠正错误，不需发送者重传

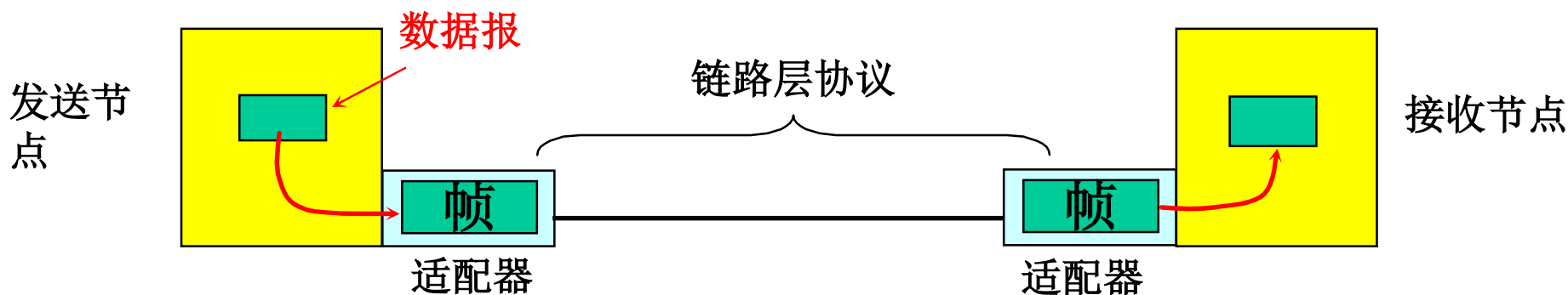
□ 半双工和全双工

- 半双工，一个节点不能同时传输和接收
- 全双工，节点可以同时传输和接收

□ 流量控制:

- 在邻接的发送节点和接收节点间的同步调节

适配器通信



□ 链路层在“适配器”（网卡）中实现

- Ethernet卡, PCMCIA卡, 802.11卡

□ 发送方:

- 封装分组成帧
- 增加检错位、可靠传输、流量控制等

□ 接收方

- 检测差错、可靠交付、流量控制等
- 提取分组，传给接收节点

□ 适配器是半自治的

□ 链路层 & 物理层

链路层

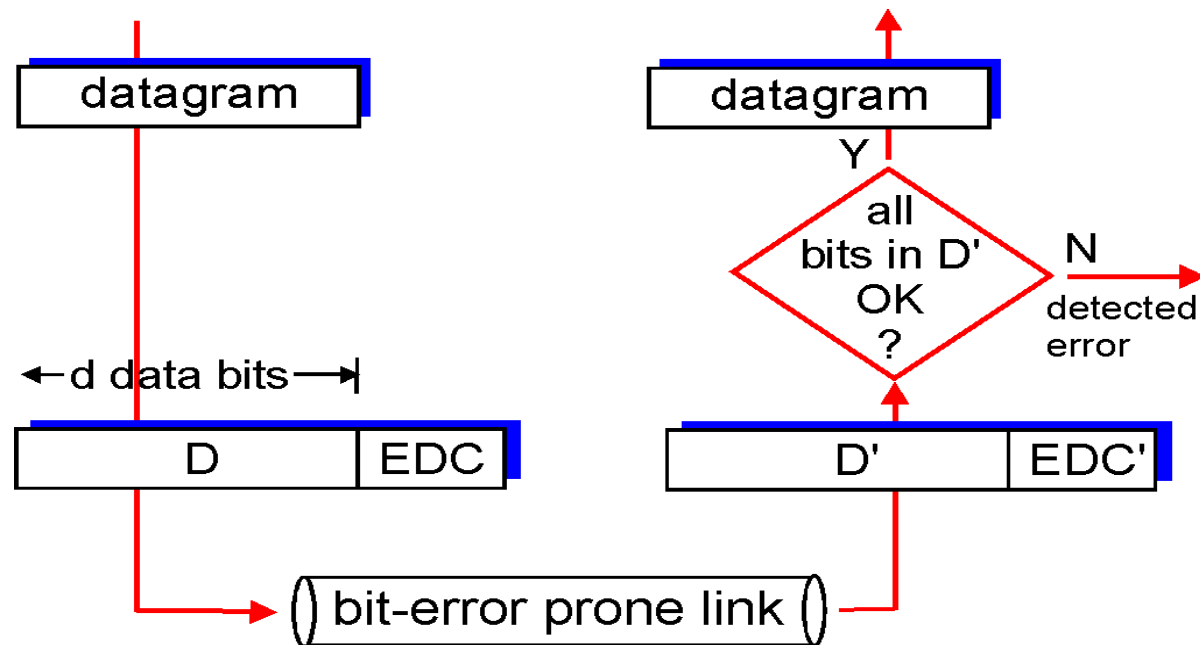
- 6.1 概述和服务
- 6.2 差错检测和纠错技术
- 6.3 多路访问链路和协议
- 6.4 交换局域网

错误检测

EDC= Error Detection and Correction bits (冗余)

D = 被EDC保护的数据，包括头部字段

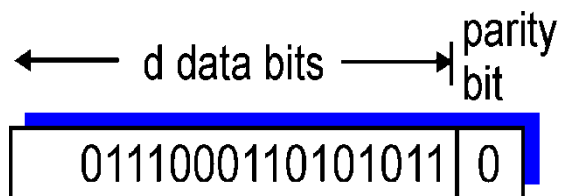
- 错误检测不是100%可靠！
 - 协议有可能漏掉一些错误，但很少
 - 大的EDC域能提供更好的检错和纠错能力



奇偶校验

单个奇偶位:

检测奇数个位的错误



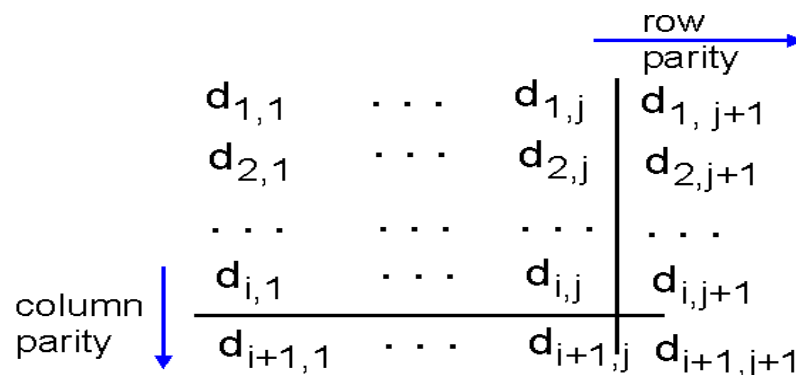
一比特奇校验

事实上, 发生未检测到错误的概率为**50%**-->有必要深入研究

接收方检测和纠正错误的
能力: 前向纠错**FEC**
可以减少发送方重传

二维偶数奇偶校验:

检测和纠正单个位的错误, 检测任意组合的两个错误



1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

no errors

1	0	1	0	1	1
1	0	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

parity error

parity error

*correctable
single bit error*

Internet检查和

目标: 检测在传输数据段中的 “错误”

发送方:

- 把数据段内容看成16-bit的整数序列
- 检查和: 把数据段内容加起来,求反码
- 发送方把检查和放入数据段的检查和域

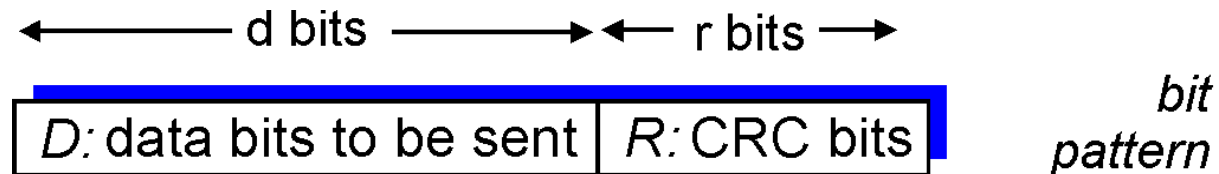
接收方:

- 计算接收数据的检查和
- 计算结果是否是全1?
 - NO - 检测到错误
 - YES - 没有检测到错误。但可能有错...

TCP,UDP的校验和包括首部和数据,IP校验和只计算首部

循环冗余校验CRC (Cyclic Redundancy Check)

- 把数据 **D**，看成 **d** 位二进制数
- 发送方与接收方商定一个 **r+1** 位模式 (生成多项式), **G**
- 目标: 选择 **r** 位循环冗余位, **R**，将它们添加到 **D** 后面
 - $\langle D, R \rangle$ 的 **d+r** 位二进制数使用模2运算能被 **r+1** 位的二进制数 **G** 整除
 - 接收方用 **G** 去除接收到的 $\langle D, R \rangle$ 的 **d+r** 位二进制数，如果余数非零：错误发生
 - 能检测到少于 **r+1** 位的各种猝发错误
- 被各种链路层协议广泛使用



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

mathematical formula

CRC例子

想找到一个R, 对于n有:

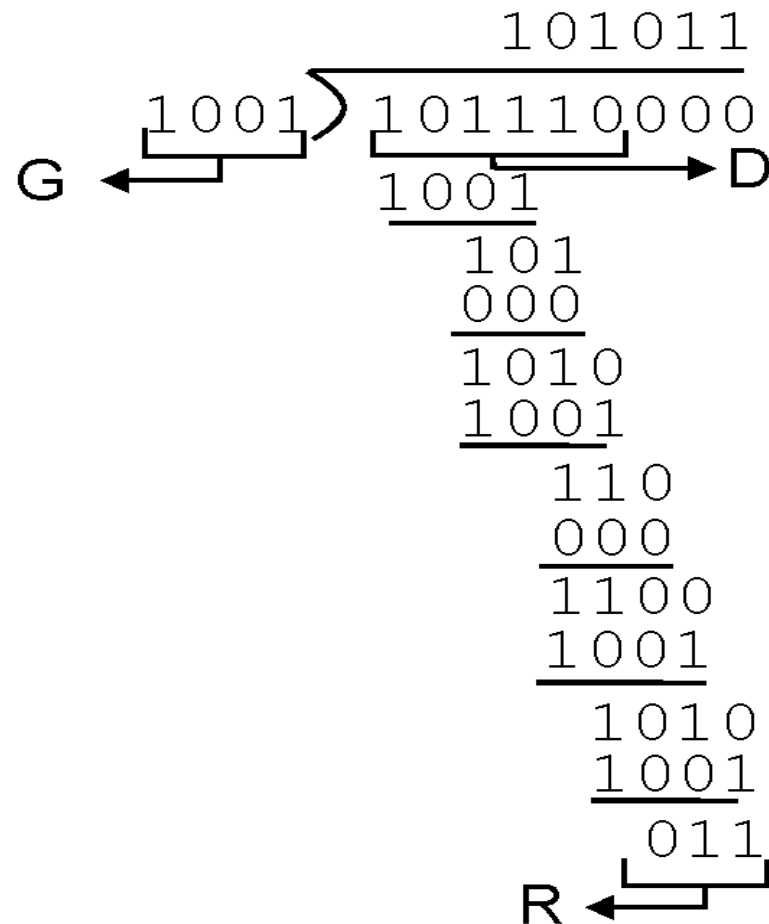
$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

两边都异或R:

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

如果用G来除 $D \cdot 2^r$, 余数等于R :

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



- 国际标准已经定义了8-、16-、32-位生成多项式**G**；8-位**CRC**用于**ATM**头部5字节的保护；32-**CRC**用于大量链路层**IEEE**协议。
- 每个**CRC**标准能够检测少于 $r+1$ 位的猝发错误和任意的奇数个比特错误.....
- 其他检错和纠错方法不常用，故不作专门介绍
- 校验和通常应用于网络层及其之上的层次，要求简单快速的软件实现方式，而**CRC**通常应用于链路层，可以适配器硬件实现复杂的算法。

链路层

- 6.1 概述和服务
- 6.2 差错检测和纠错技术
- 6.3 多路访问链路和协议
- 6.4 交换局域网

多路访问链路和协议（多路访问协议，多址接入协议）

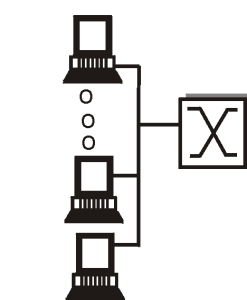
两种类型的“链路”：

□ 点对点

- PPP（用于拨号访问）或HDLC

□ 广播(有线或无线共享)

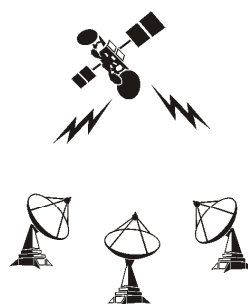
- 传统以太网
- 802.11无线局域网



shared wire
(e.g. Ethernet)



shared wireless
(e.g. Wavelan)



satellite



cocktail party

多址访问协议

- 单个共享广播信道
- 两个或多个节点同时传输：冲突（碰撞）
 - 冲突（碰撞）：一个节点同时接收两个或多个信号时发生冲突
 - 在某个时刻只有一个节点发送数据才可以发送成功信息

多址访问协议

- 分布式算法决定各节点如何共享信道，即决定节点什么时候可以传数据
- 共享信道既要负责进行数据传输，又要负责分布式算法的控制信息的传输
 - 没有带外信道传输控制信息

理想的多址访问协议

速率为 R bps的广播信道

1. 当一个节点有数据发送时，它能以 R bps的速率发送.
2. 当有 M 个节点要发送数据，每个节点的平均发送速率为 R/M
3. 完全分散：
 - 不需要主节点协调传输
 - 不需要时钟、时隙同步
4. 简单

MAC 协议:分类

3大类:

□ 信道划分

- 把信道划分为小“片” (时隙, 频分, 码分)
- 给节点分配专用的小“片”

□ 随机访问

- 不划分信道, 允许冲突
- 能从冲突中“恢复”

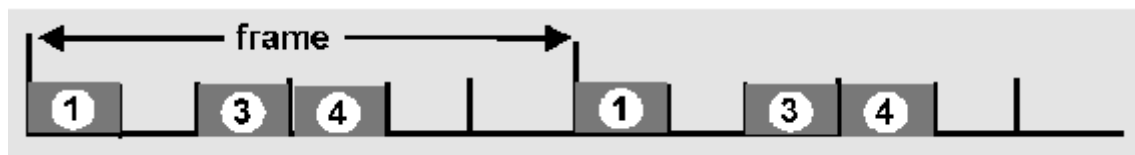
□ 轮流

- 通过集中调整共享访问避免冲突

6.3.1时分多路访问：TDMA

TDMA: time division multiple access

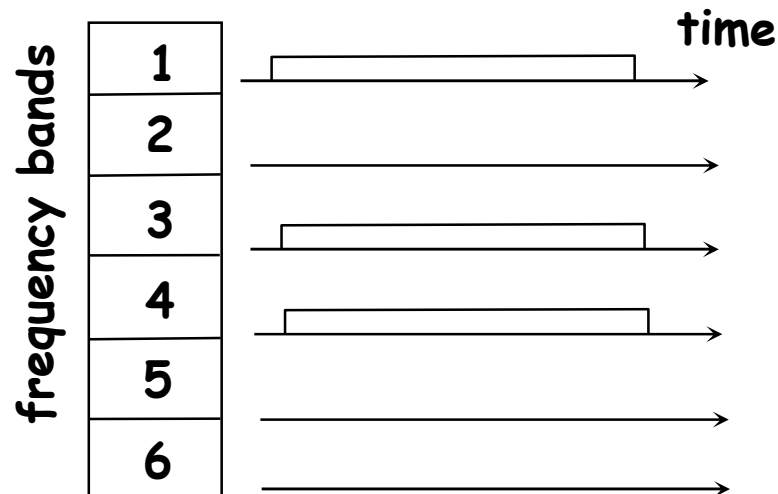
- 轮流访问信道
- 在每个循环中，每个站点得到一个固定长度的时隙
 - 时隙长度通常为数据服务单元的发送时间
- 未被使用的时隙空闲
- 例子：6个站点的局域网， 1,3,4 被使用， 2,5,6空闲



频分多路访问：FDMA

FDMA: frequency division multiple access

- 信道被分成不同频段
- 每个站点分配一个固定的频段
- 未被使用的频段空闲
- 例子：6个站点的局域网， 1,3,4 被使用， 2,5,6空闲



码分多路访问 (CDMA)

CDMA (Code Division Multiple Access)

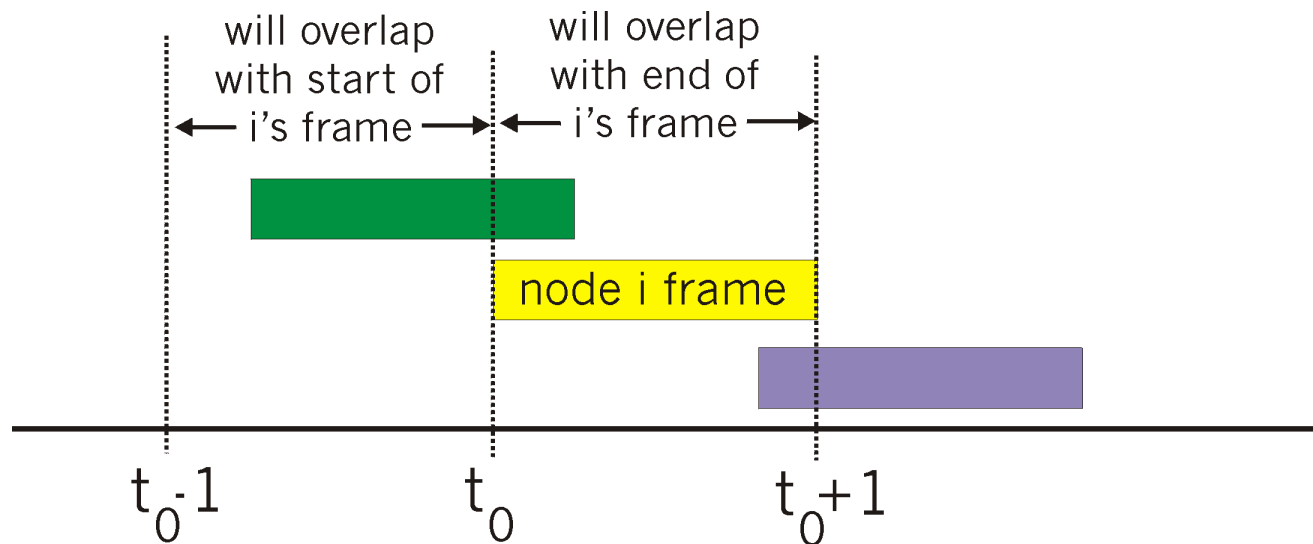
- 每个节点分配一个唯一的编码
- 每个节点用它唯一的编码来对它发送的数据进行编码
- 允许多个节点“共存”，信号可叠加，即可以同时传输数据而无冲突（如果编码是“正交化”的）

6.3.2随机接入协议

- 节点有数据包发送
 - 以信道满数据率 R 传送
 - 节点间没有协调者
- 2个或更多的发送节点 -> “冲突collision”,
- 随机访问**MAC**协议要求:
 - 能够检测冲突
 - 能够从冲突中恢复 (例如: 通过延时重传)
- 随机访问**MAC**协议实例:
 - **ALOHA**
 - 时隙**ALOHA**
 - **CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA**

纯（非时隙）ALOHA

- 非时隙Aloha: 简单, 不需同步
- 帧一到达
 - 立即传输
- 冲突概率增加:
 - 在 t_0 发送的帧和在 $[t_0-1, t_0+1]$ 的发送的其它帧冲突



纯Aloha效率

$P(\text{给定节点成功传送}) = P(\text{节点传送}) \cdot$

$P(\text{没有其他节点在}[t_0-1, t_0]\text{内传送}) \cdot$

$P(\text{没有其他节点在}[t_0, t_0 + 1]\text{内传送})$

$$= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1}$$

$$= p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$$

... 选择 p 值，然后求 $N \rightarrow$ 无穷时的极限...

$$= 1/(2e) = 0.18$$

时隙ALOHA

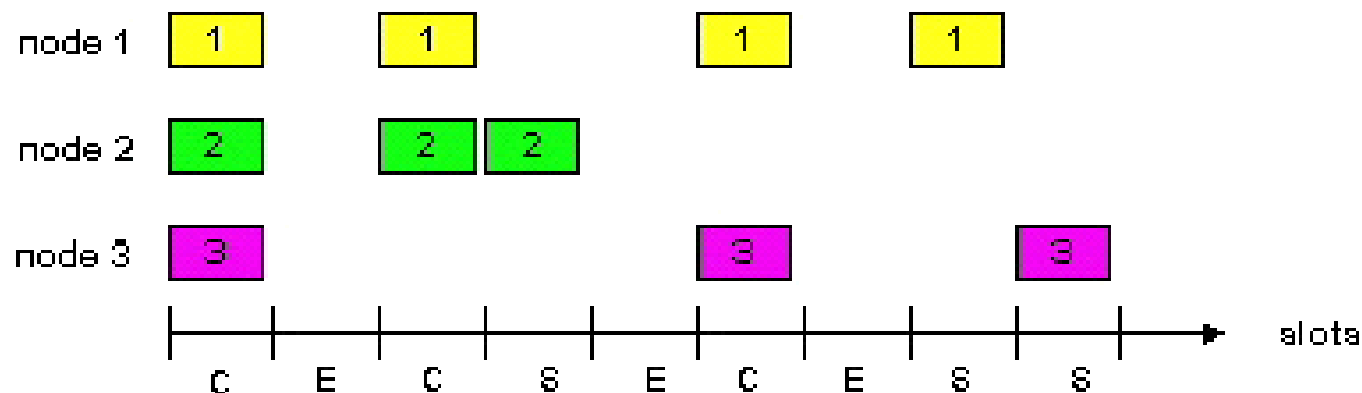
假设

- 所有帧大小相同
- 时间被划分为相同大小的时隙，一个时隙等于传送一帧的时间
- 节点只能在一个时隙的开始才能传送
- 节点需要同步
- 如果一个时隙有多个节点同时传送，所有节点都能检测到冲突

实现

- 当节点要发送新帧，它等到下一时隙开始时传送
- 没有冲突，节点可以在下一时隙发送新帧
- 如果有冲突，节点在随后的时隙以概率 p 重传该帧，直到成功为止。

时隙ALOHA



优点

- 单个活跃节点可以持续以满速率传送帧
- 具有高分散性：只需节点的时隙同步
- 简单

缺点

- 冲突，浪费时隙
- 空闲时隙
- 节点只有在传输数据包时才能检测到冲突

时隙Aloha效率

效率：当有很多节点，每个节点有很多帧要发送时，成功时隙所占的百分比

- 假设有 N 个节点，每个节点在时隙以概率 p 发送
- 一个节点在一个时隙成功传送的概率 = $p(1-p)^{N-1}$
- 任一节点传送成功的概率 = $Np(1-p)^{N-1}$

- 为了得到 N 个活跃节点的最大效率，必须找出使表达式 $Np(1-p)^{N-1}$ 取最大值的 p^*
- 为了得到大量活跃节点的最大效率，我们求 N 趋近无穷时 $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ 极限值，计算可知最大效率为 $1/e = 0.37$

最佳：信道有 37% 的有效传输

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

载波侦听多路访问

CSMA: 传送前侦听:

- 如果信道闲: 传送整个帧
- 如果信道忙: 延迟传送

- 类比人类行为: 不中断他人!

CSMA冲突

冲突还是可能发生：

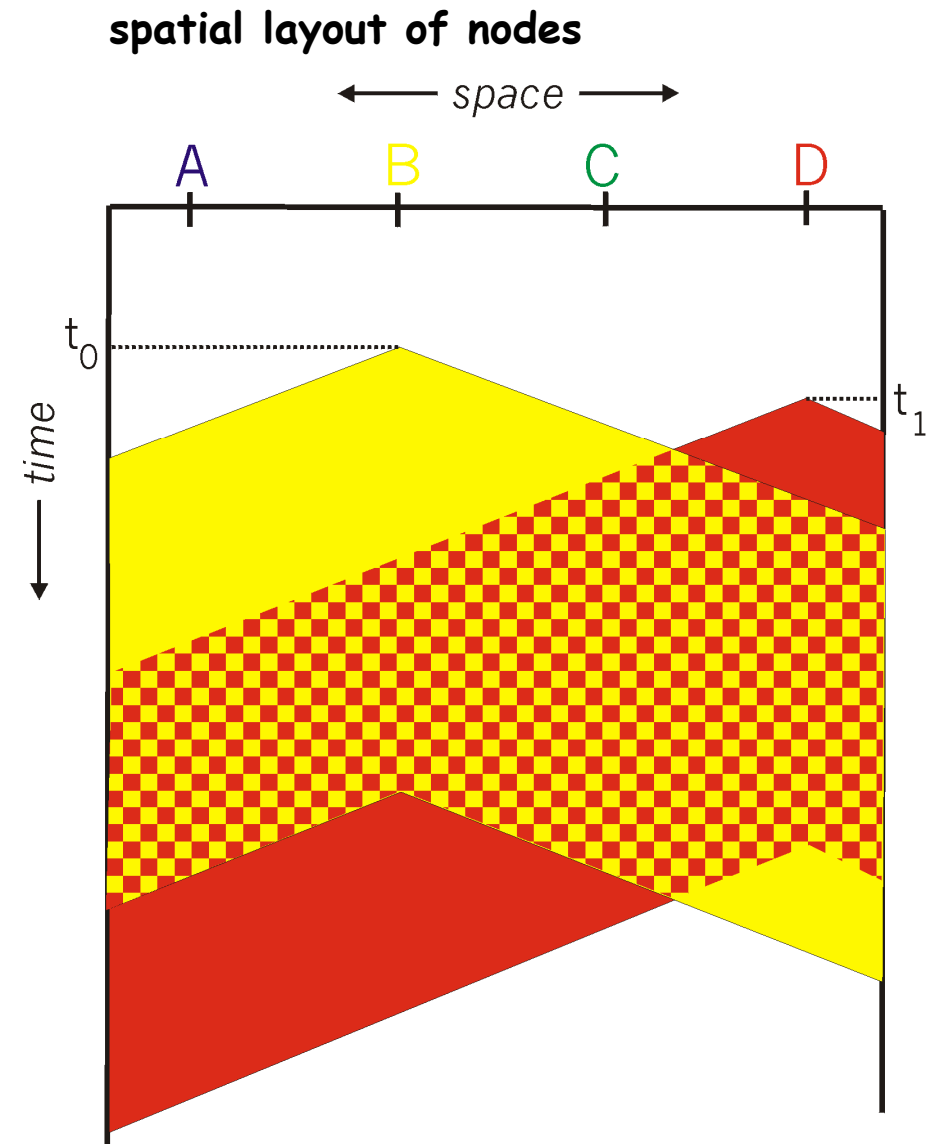
传播延迟可能导致两个节点没侦听到其它节点的传送

冲突：

整个数据包的传送时间被浪费

注意：

距离和传播延时决定冲突概率



CSMA/CD (冲突检测)

CSMA/CD:

- 在一个短时间内检测冲突
- 放弃冲突传送，减少带宽浪费

□ 冲突检测:

- 在有线LANs中容易：测量信号强度，比较传送和接收信号
- 在无线LANs中困难：传输中接收可能关闭

□ 人类行为：有礼貌的会谈

CSMA/CD协议

基本思想:

- 1. 当一个节点要发送数据时，首先监听信道，看是否有载波。
- 2. 如果信道空闲，则发送数据；如果信道忙，则继续对信道进行监听。一旦发现空闲，便立即发送。
- 3. 如果在发送过程中未检测到碰撞，则传输成功；否则停止正常发送，转而发送一短暂的干扰信号jam，强化冲突，使其它站点都能知道出现了冲突。
- 4. 发送了干扰信号后，指数退避一随机时间，即假设该帧经过n次冲突后，适配器在 $\{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\}$ 中随机选取一个K值，其中 $m = \min(n, 10)$ ，然后等待 $K \times 512$ 比特时间后，回到第2步

CSMA/CD协议

拥塞信号：48比特，确保所有传送者知道冲突发生

比特时间：对于10 Mbps Ethernet 为0.1微秒，当K=1023，等待时间大约50毫秒

指数回退：

- **目标：**适配器依据当前负载情况重传
 - 重负载：等待时间变长
- **第一次冲突：** 在{0,1}中选k值；延迟 $K \times 512$ 比特时间传送
- **第二次冲突：** 在{0,1,2,3}中选k值...
- **10次以后，** 在{0,1,2,3,4,...,1023}中选k值。

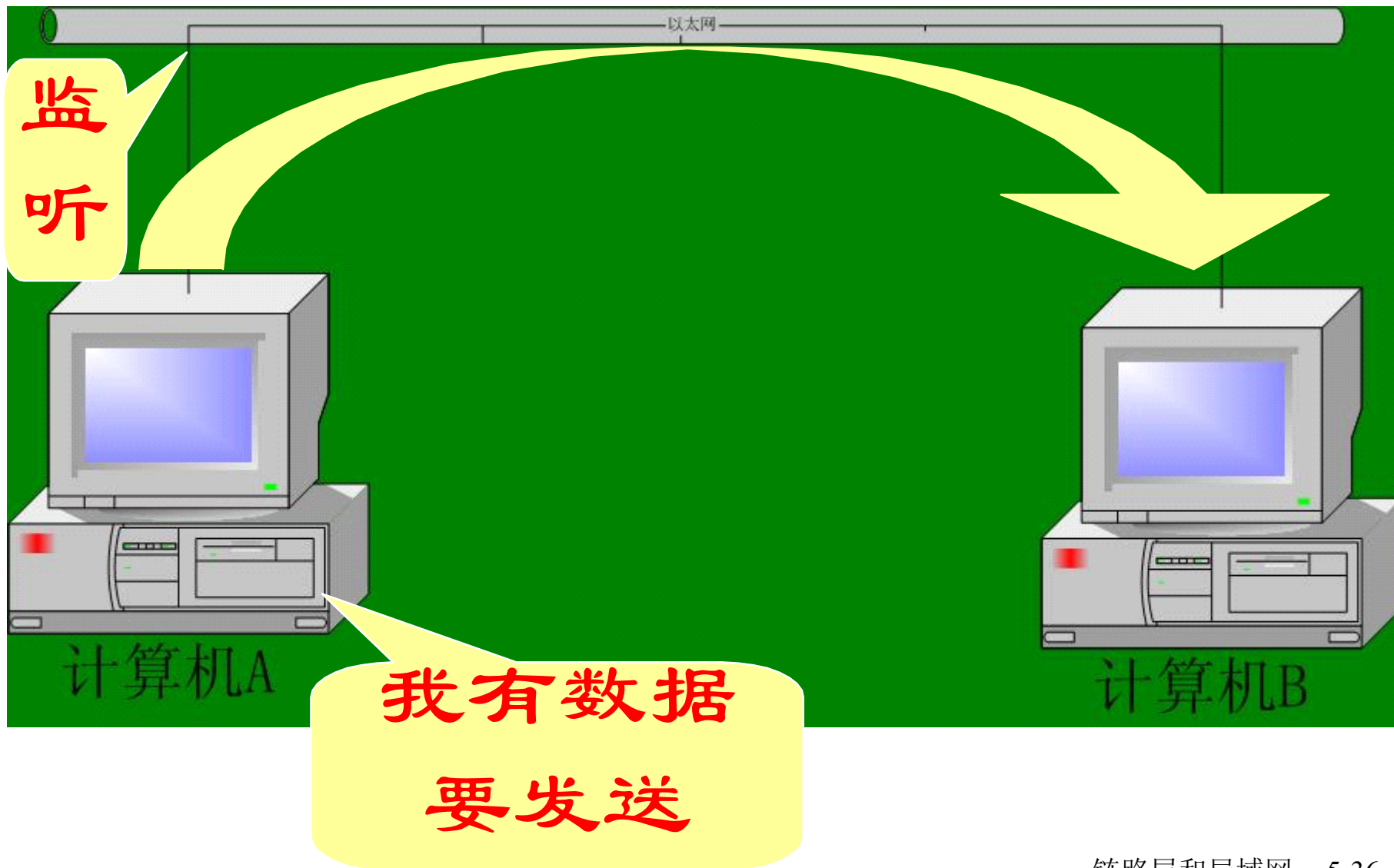
CSMA/CD 效率

- t_{prop} = 在LAN中任两个节点间传播所用最大时间
- T_{trans} = 发送最大帧所用时间

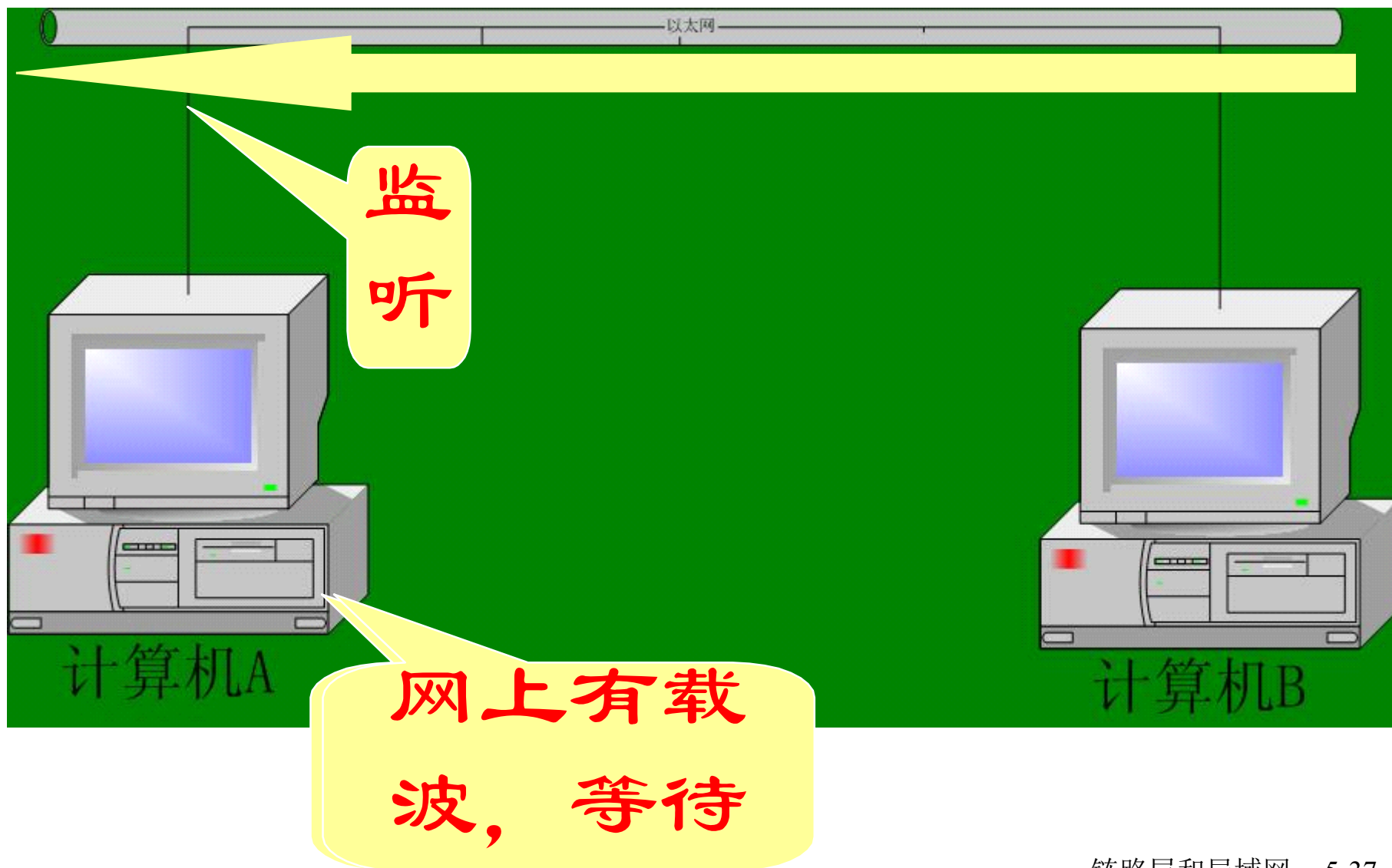
$$\text{efficiency} \approx \frac{1}{1 \pm 5t_{prop} / t_{trans}}$$

- 当 t_{prop} 接近0时，效率接近于1
- 当 t_{trans} 趋于无穷时，效率接近于1

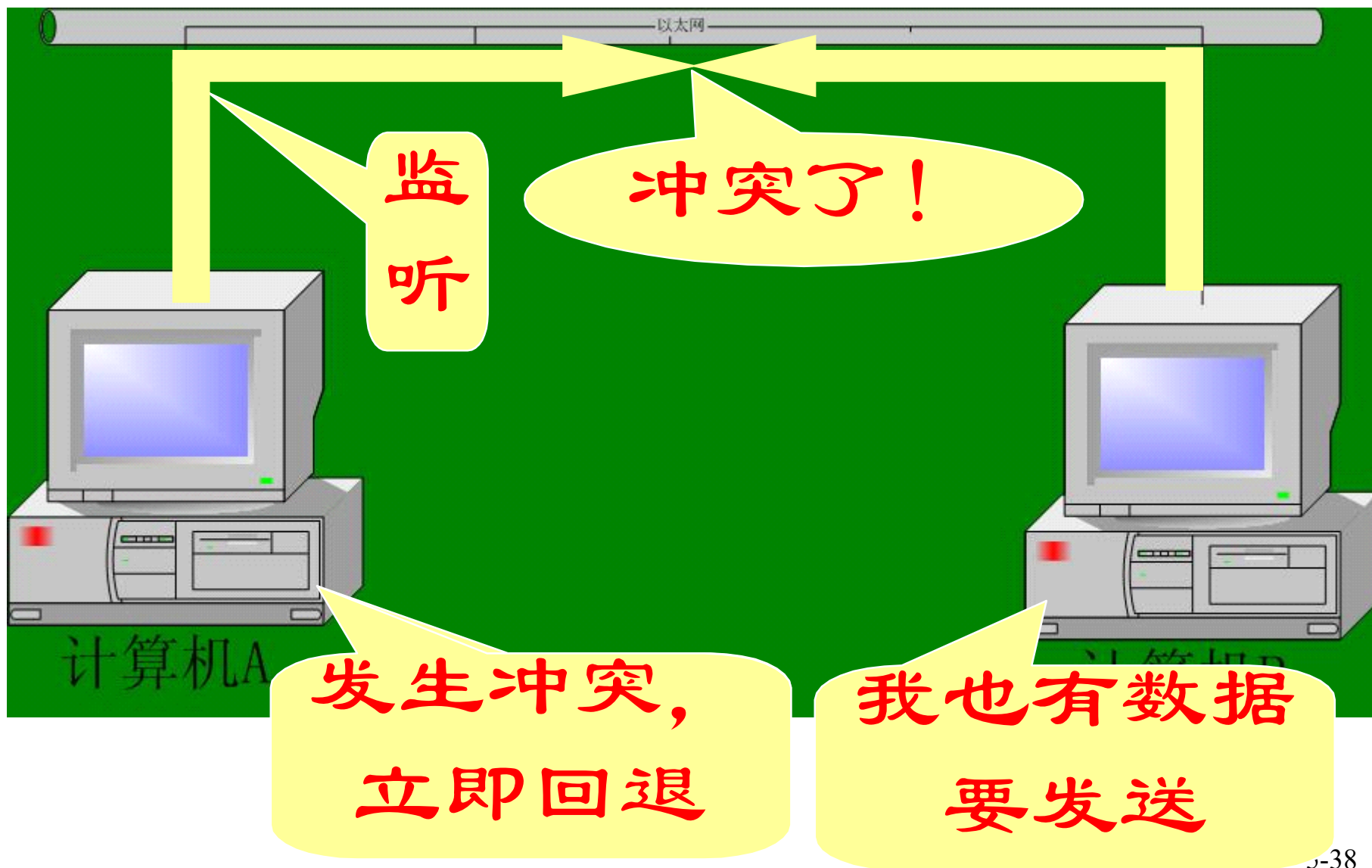
CSMA/CD协议讨论



CSMA/CD协议讨论



CSMA/CD协议讨论



6.3.3 “轮转” MAC协议

分割信道MAC协议

- 在高负载的情况下，信道共享公平高效
- 低负载效率低：延迟访问，如果只有一个活跃节点只分配了 $1/N$ 的带宽

随机访问MAC协议

- 低负载效率高：单个节点可以获得整个信道
- 高负载：冲突开销大

“轮转” 协议

两者的折中!

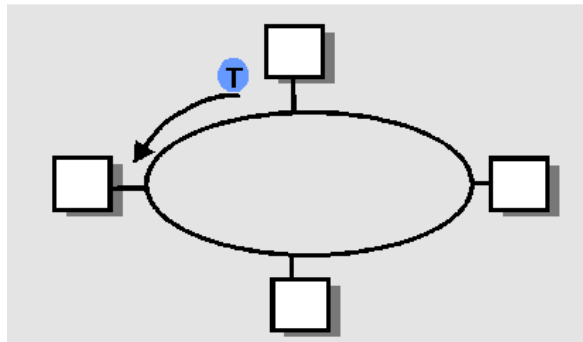
“轮转” MAC协议

轮询：

- 主节点轮流 “邀请” 从属节点传送数据
- 关注：
 - 轮询开销
 - 延迟
 - 主节点失效，整个网络失效

令牌传递：

- 控制令牌从一个节点顺序传到下一个节点
- 令牌消息
- 关注：
 - 令牌开销
 - 延时
 - 令牌失效



MAC协议总结

□ 共享介质

- 信道分割：时间，频率，代码
 - 时分，码分，频分
- 随机分割 (动态)
 - **ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD**
 - 载波侦听：有线网络容易实现，无线网络困难
 - **CSMA/CD**用于以太网, **CSMA/CA**用于无线网络
- 轮转
 - 中心节点轮询，令牌传递

6.4 交换局域网

- 多址访问协议广泛应用于局域网
- 基于随机访问的**CSMA/CD**广泛应用于局域网
- 基于令牌传递技术的令牌环和**FDDI**在局域网技术中变得次要

链路层

- 6.1 概述和服务
- 6.2 差错检测和纠错技术
- 6.3 多路访问链路和协议
- 6.4 交换局域网

6.4.1 链路层寻址和ARP

32位IP地址

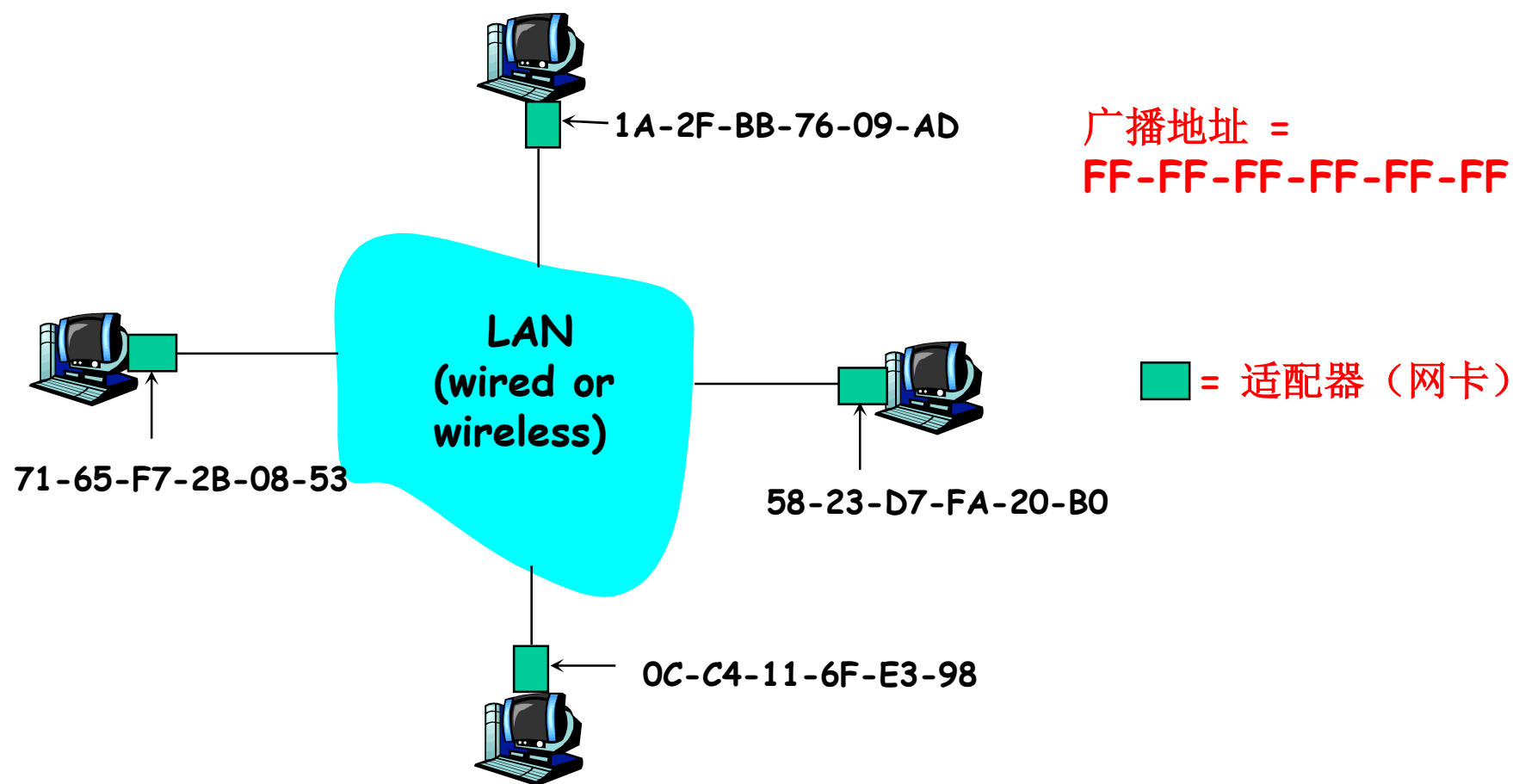
- 网络层地址
- 用于把分组送到目的IP网络 (回忆IP网络定义)
- IP协议初始化前配置

48位MAC(或LAN 或物理或Ethernet)地址:

- 链路层地址
- 用于把数据帧从一个接口传送到另一个接口 (同一网络中)
- 48位MAC地址固化在适配器的ROM

局域网地址

在局域网中的每一个适配器都有一个唯一的**LAN**地址



局域网地址

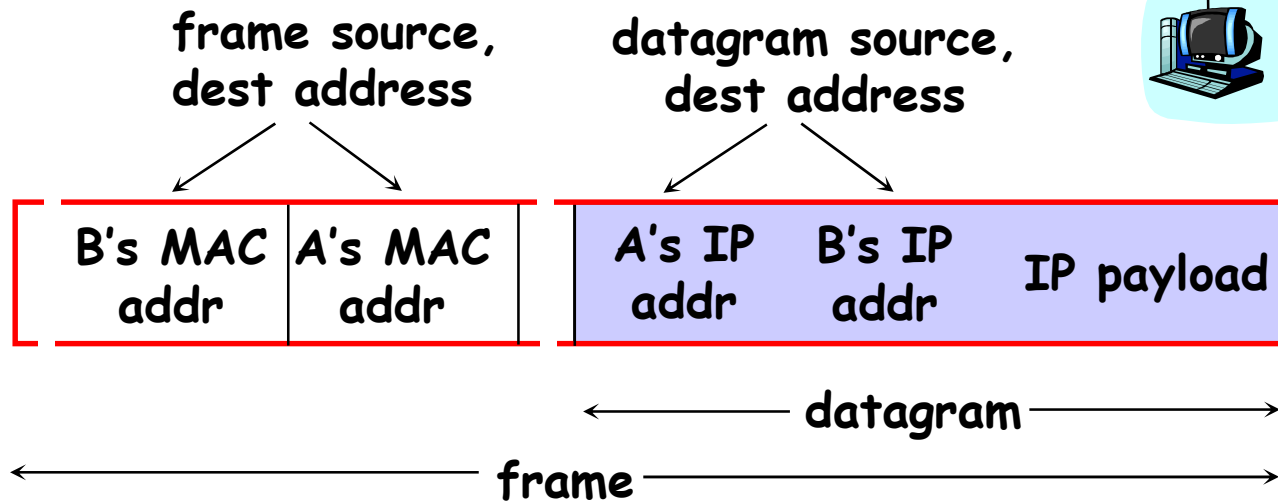
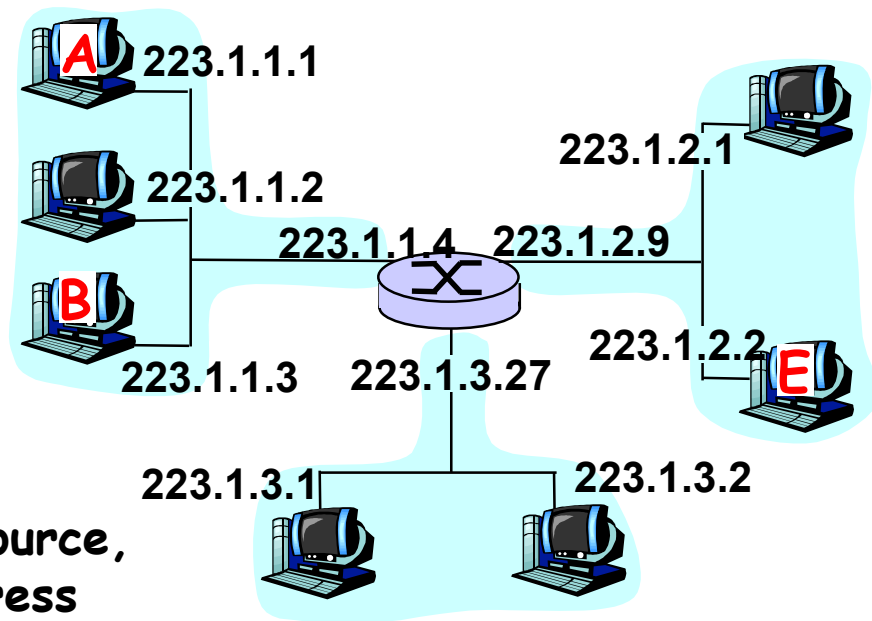
- **MAC**地址由**IEEE**统一分配
- 厂商购买一块**MAC**地址空间 (要保证唯一性)
- 比较:
 - (a) **MAC**地址: 好像身份证号码
 - (b) **IP**地址: 好像邮政地址
- **MAC**平面地址 => 可移动
 - 能从一个**LAN**移动到另一个**LAN**
- **IP**层次地址
 - 依赖节点所依附的**IP**网络

回忆应用层的主机名，网络层**IP**地址，链路层**MAC**地址。
有利于保持各层独立的原则。

回忆前面的路由讨论

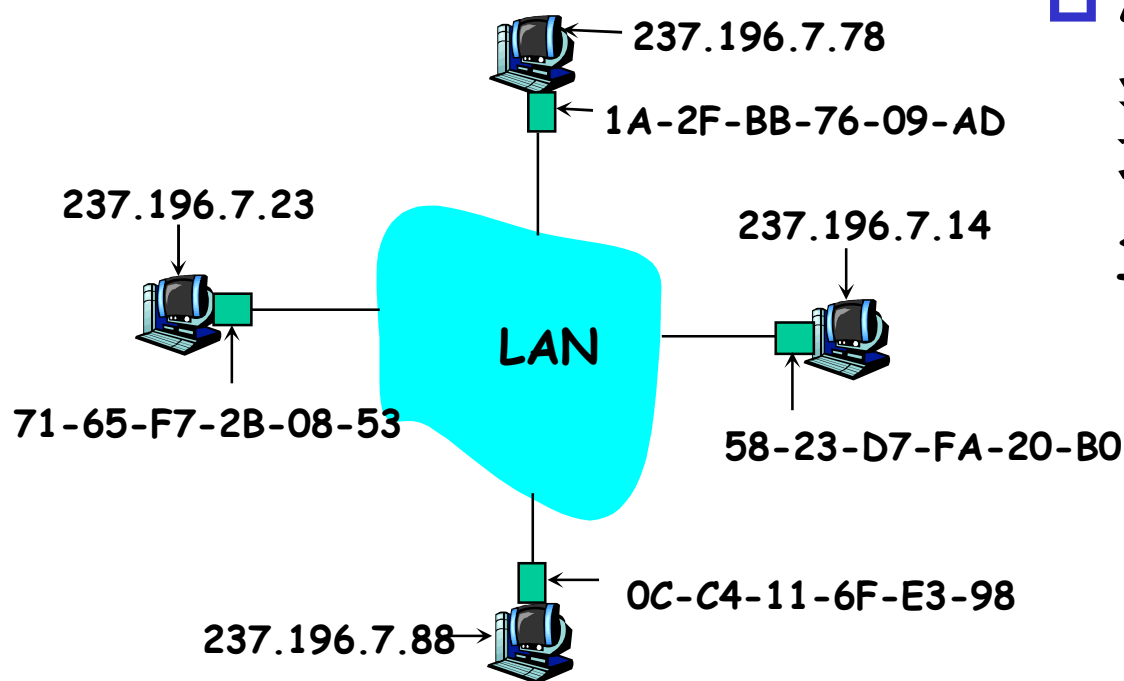
A把IP分组发送给 B:

- 查找**B**的网络地址，发现**B**和**A**在同一网络中
- 链路层发送分组给**B**，该分组包含在链路层帧中



ARP: 地址解析协议

问题: 知道B的IP地址怎么知道它的MAC地址



□ 每个在局域网上的IP节点 (Host, Router) 都有 **ARP** 表

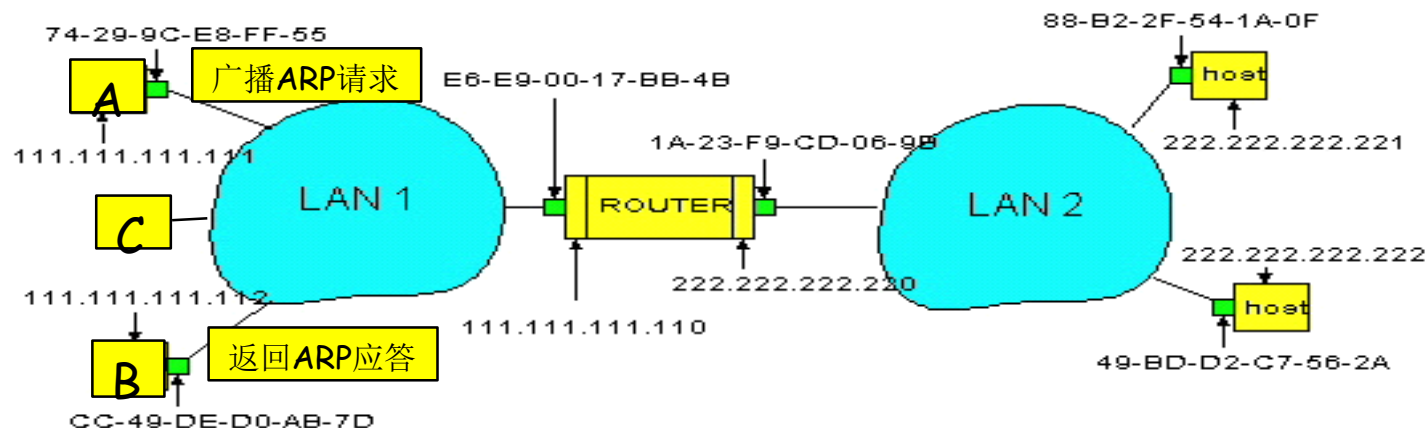
□ ARP表: 局域网上一些节点的IP/MAC地址映射

< IP address; MAC address; TTL >

○ TTL (Time To Live): 映射地址的失效时间 (典型为20分钟)

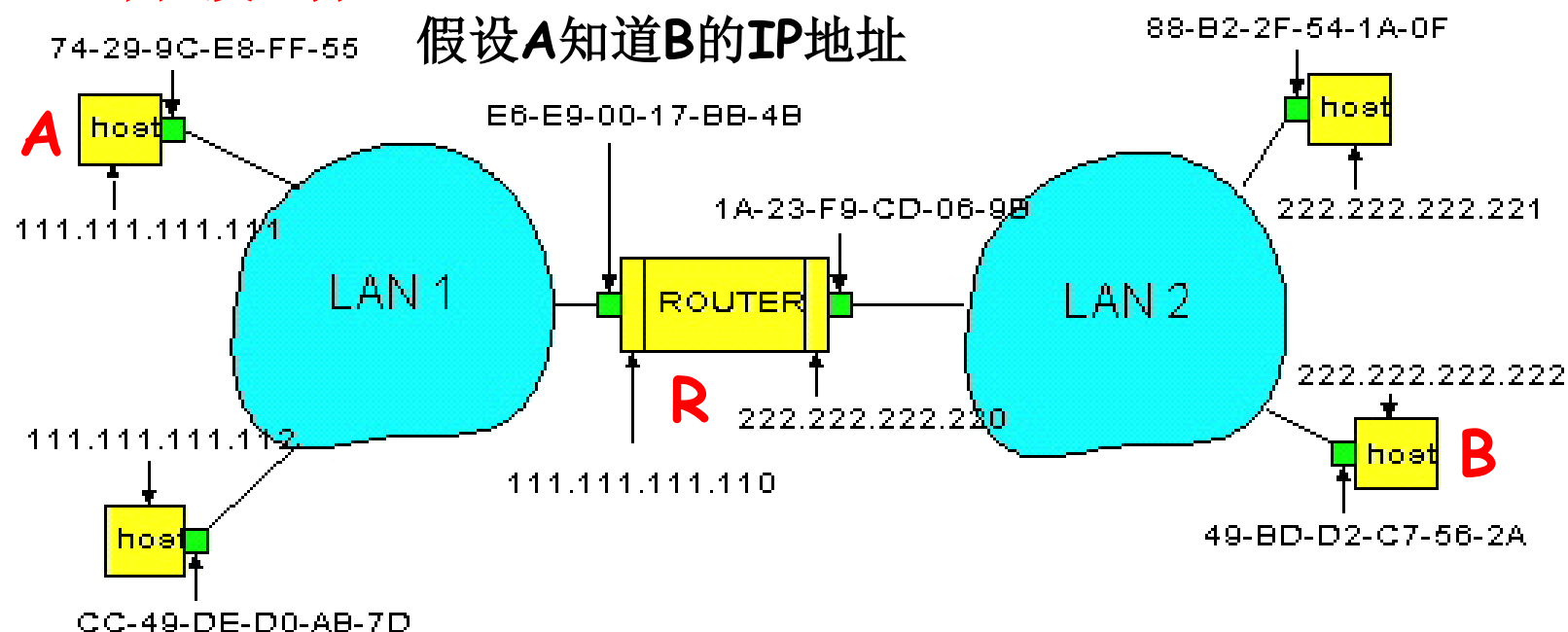
ARP协议

- A想发送分组给 B，A知道 B的IP地址（假设B的MAC地址不在A的ARP表中）
- A广播包含B的IP地址的ARP查询包
 - 目的MAC地址= FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - 在局域网上的所有机器都能收到ARP查询
- B收到 ARP包，回给A一个带有B的MAC地址的包
 - 包单播unicast发送给A的MAC地址
- A缓存IP-to-MAC地址对在 ARP表中，直到信息过期 (timeout)
 - 软件规定：如果ARP表的信息在一定时间内没有刷新，则信息将过期。
- ARP是即插即用的：
 - 无需网络管理员干预，节点就能创建ARP表



路由数据到子网以外

A通过R向B发送分组

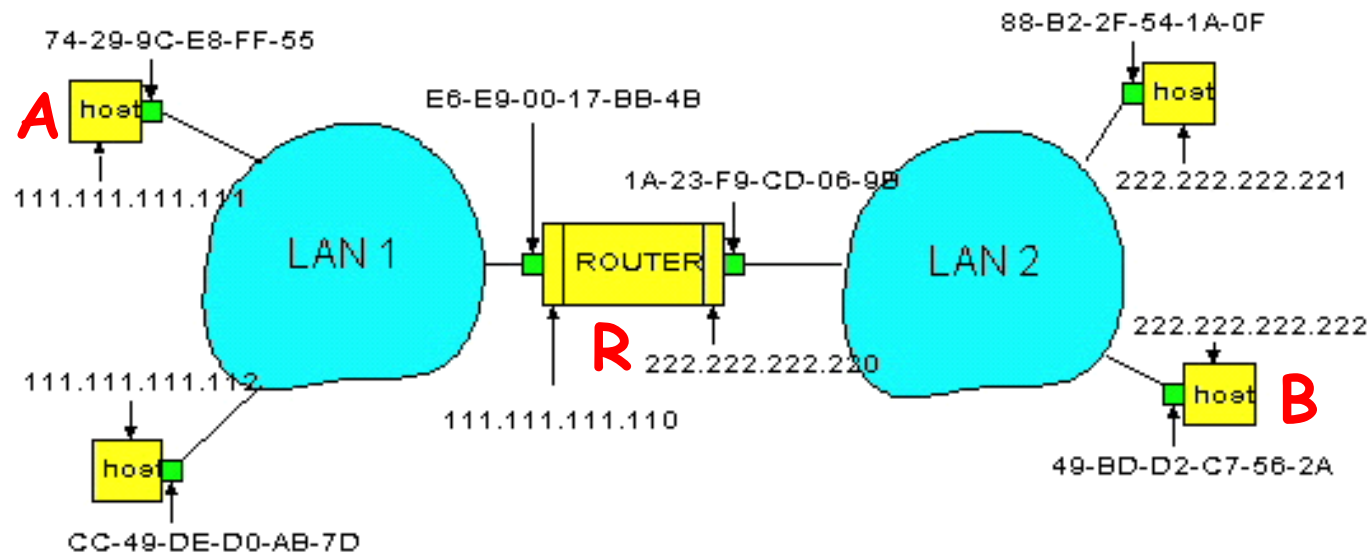


- ❑ 在路由器R中有两个**ARP**表，每个针对一个**IP**网络(**LAN**)
- ❑ 在主机的路由表中发现路由器的**IP**: 111.111.111.110
- ❑ 在主机的**ARP**表中发现**MAC**地址: E6-E9-00-17-BB-4B等等

- **A**创建一个分组，源地址为**A**，目的地址为**B**
- **A**使用**ARP**得到**R**的111.111.111.110的**MAC**地址
- **A**创建一个链路层帧，该帧以**R**的**MAC**地址为目的地址，并包含 **A-to-B**的**IP**数据包

帧头			IP首部			IP数据	帧尾
目的MAC E6-E9-00-17-BB-4B	源MAC 74-29-9C-E8-FF-55	.....	.....	源IP地址 111.111.111.111	目的IP地址 222.222.222.222	DATA	CRC校验

- **A**的适配器发送帧，**R**的适配器收到帧

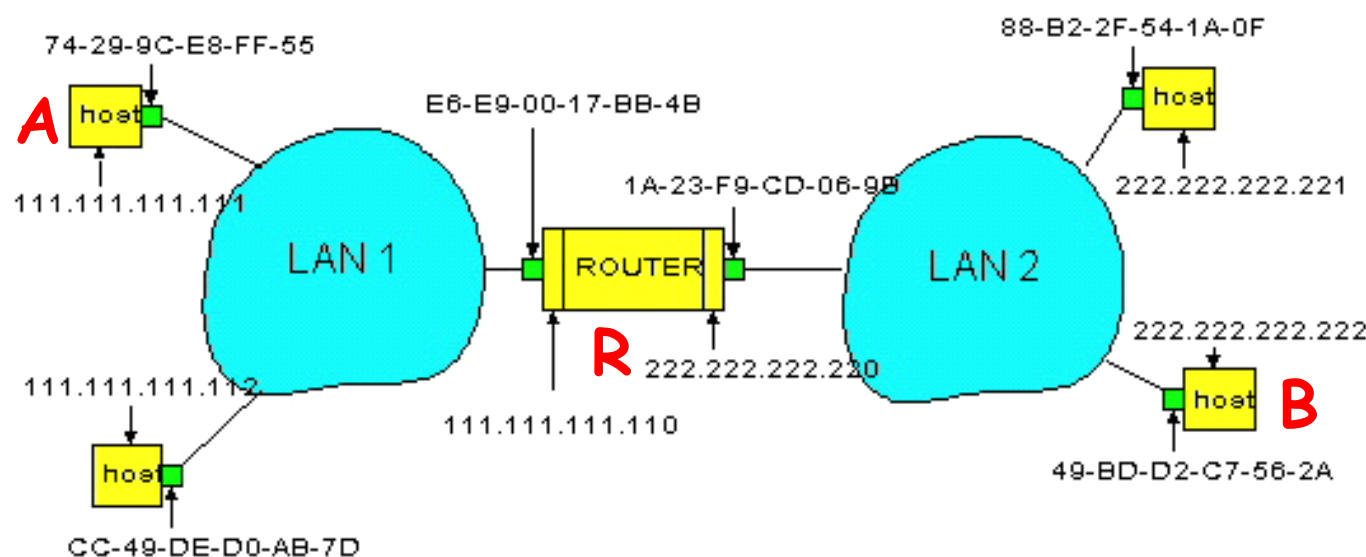


- R从Ethernet帧中提取IP数据包，得知目的地址为B

IP首部				IP数据
.....	源IP地址 111.111.111.111	目的IP地址 222.222.222.222	.....	DATA

- R查找路由表，得知B在LAN2中，使用222.222.222.220接口运行ARP得到B的MAC地址
- R创建一个包含A-to-B的IP数据包的帧发送给B

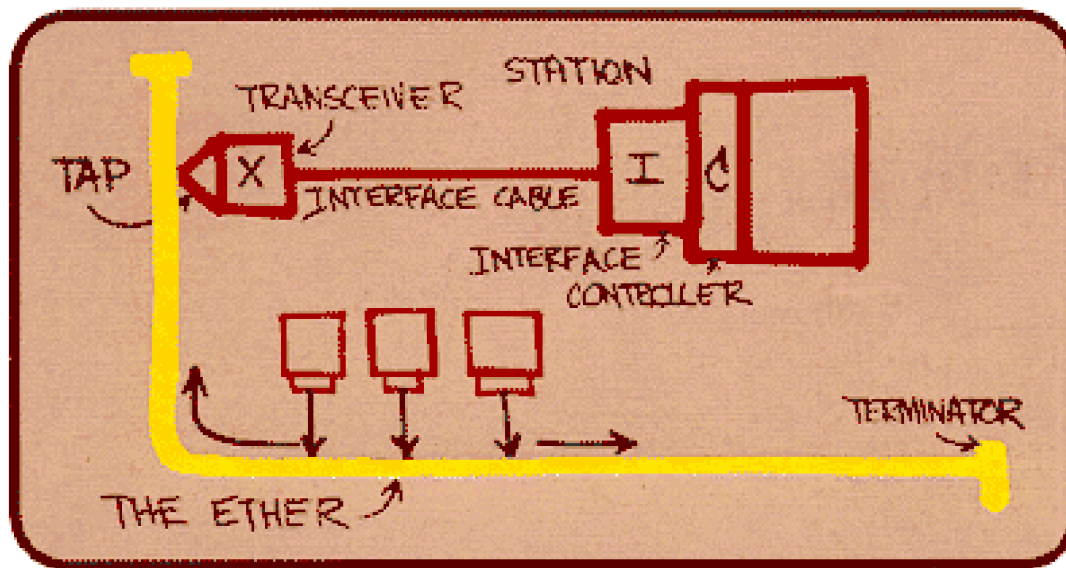
帧头			IP首部				IP数据	帧尾
目的MAC 49-BD-D2-C7-56-2A	源MAC 1A-23-F9-CD-06-9D	.....	.....	源IP地址 111.111.111.111	目的IP地址 222.222.222.222	.....	DATA	CRC校验



6.4.2 以太网Ethernet

主流的 LAN技术

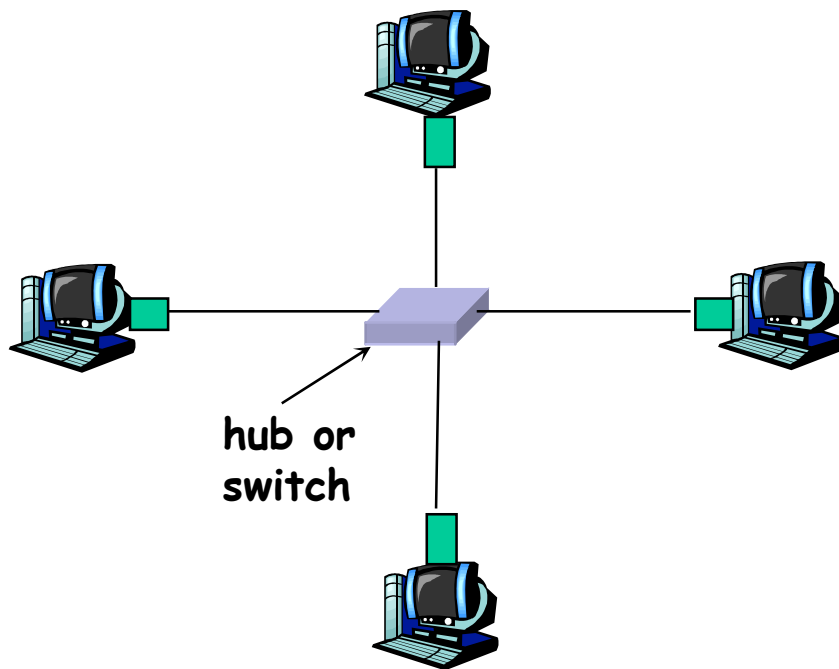
- 价格便宜!
- 第一个广泛使用的LAN技术
- 比令牌和ATM简单、便宜
- 更高速率，其速度可达到：10, 100, 1000 Mbps, 10Gbps



Metcalfe的以太网草图

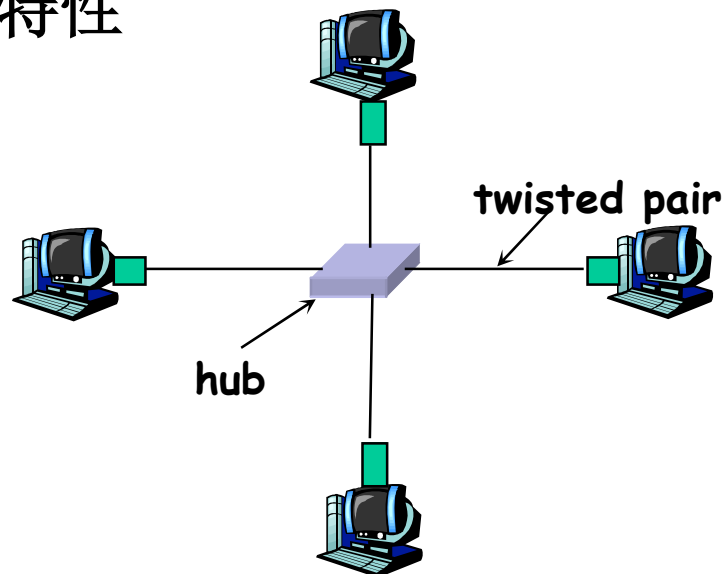
星型拓扑

- 90年代中期流行总线拓扑结构
- 现在星型拓扑结构盛行
- 连接设备：集线器**hub**或交换机**switch** (后面介绍)



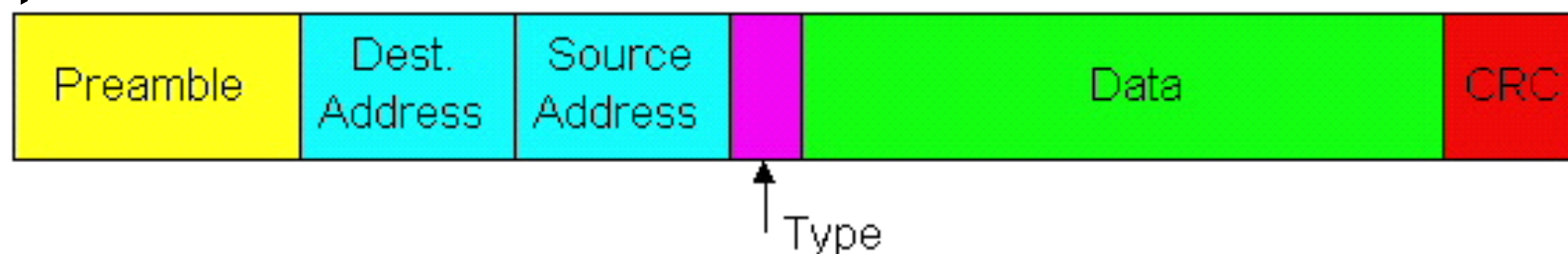
集线器Hub

- 集线器本质上是物理层的中继器：
 - 比特信号的整形放大和信号的转换，比如光信号与电信号的转换（带电口光口的集线器）
 - 收到的比特信号发送给所有其它连接节点
 - 多个端口使用相同的传输速率
 - 没有帧缓存，也没有**CSMA/CD**（适配器检测冲突）
 - 提供了网络管理特性



Ethernet帧结构

把**IP**分组(或其它网络层协议包)封装在 **Ethernet**帧中

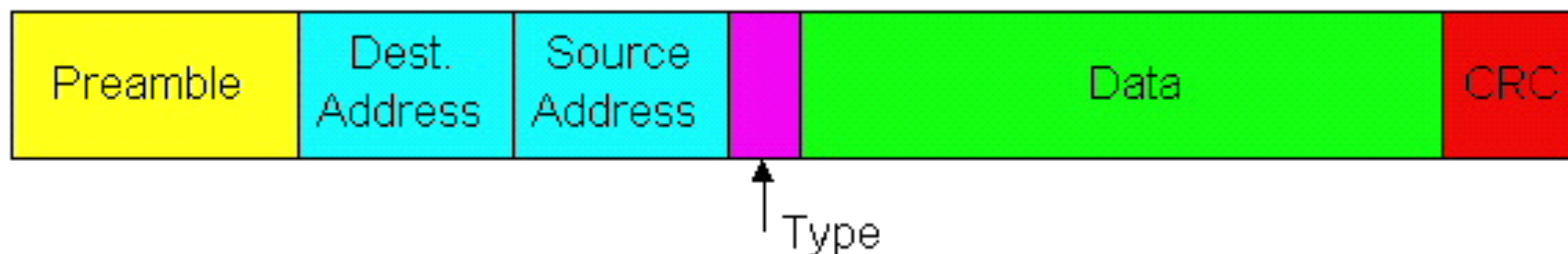


Preamble: 前同步码，8个字节

- 前7个字节为 **10101010**，最后一个为 **10101011**
- 用于发送方和接收方的时钟同步

Ethernet帧结构(续)

- **Addresses: MAC**地址，6个字节
 - 如果适配器收到的帧的目的地址与之匹配或者是一个广播地址(**ARP**包)，就把帧传给网络层
 - 否则，抛弃该帧
- **Type: 类型**，2个字节，
 - 指明可以支持的高层协议，主要是**IP**协议，也可以是其他协议如：**Novell IPX**和 **AppleTalk**
- **Data: 46~1500**字节
- **CRC: 循环冗余校验(帧校验序列)**，4个字节。
 - 接收方检测，如果有错，丢弃该帧



不可靠的无连接服务

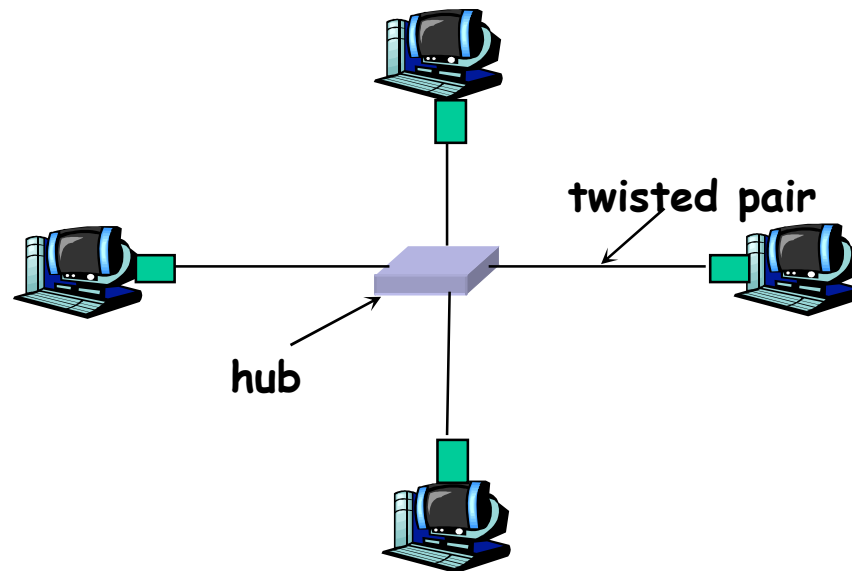
- **无连接：** 发送和接收适配器间不“握手”
- **不可靠：** 接收适配器不向发送适配器发送确认帧
 - 传递到网络层的数据报流可能有间隙
 - 如果应用使用**TCP**协议，间隙会被填好
 - 否则，应用能看见间隙

Ethernet使用 CSMA/CD

- 非时隙
- 适配器检测到有其它适配器发送的时候，就不会发送帧，即它采用了**载波侦听机制**
- 在发送过程中，适配器检测到有其他适配器发送，它将中止发送，即它采用了**冲突检测机制**
- 在试图重传之前，适配器会等待一个随机时间，即**随机访问**

Ethernet技术:10BaseT 和 100BaseT

- 10/100 Mbps速率；后者被称为 “快速 ethernet”
- BASE表示基带以太网；T 表示双绞线
- 早期通过转发器（**repeater**，中继器）延长网段
- 各节点都连接到集线器上 “星型拓扑结构”；在节点和适配器间最大距离为100米



Gbit Ethernet

- 使用标准的**Ethernet**帧格式
- 允许点到点链路和共享广播信道
- 共享模式使用**CSMA/CD**技术；必须限制节点间的最大距离,以确保效率
- 使用的集线器，被称为“有缓冲器的分配装置”
- 点到点的信道是全双工的**1 Gbps**速率
- 现在已经有**10 Gbps**!

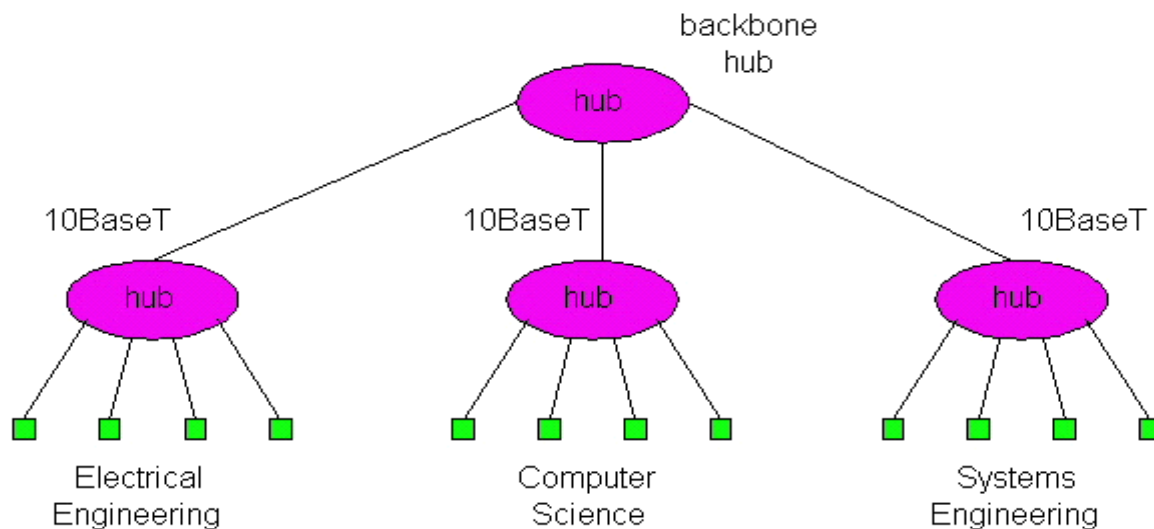
6.4.3 链路层交换机

如何互联局域网网段

- 集线器（物理层）
- 交换机（链路层）

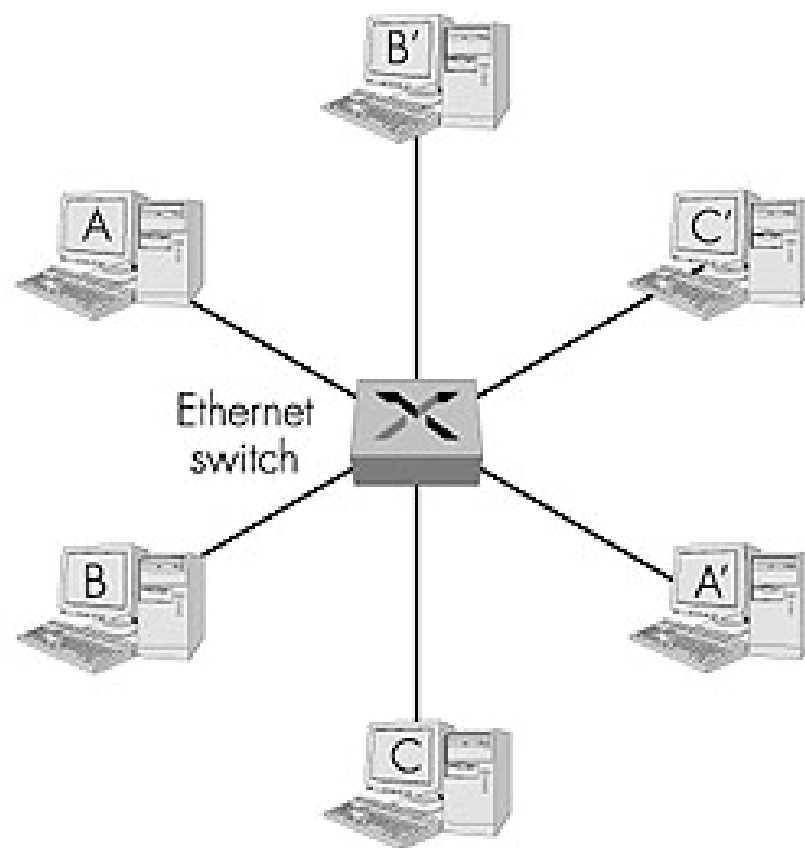
集线器(Hub)

- 连接局域网内各网段的设备
- 扩展各节点间的最大距离
- 但是各物理网段的冲突域仍然汇集成一个大的冲突域（逻辑网段）
 - 如果一个在**CS**域的节点和一个在**EE**域的节点同时通信：冲突
- 不能使 **10BaseT**和**100BaseT**网段互联



Ethernet交换机

- 本质上是多口网桥
- 2层 (帧)转发, 使用LAN地址过滤
- 交换: **A-to-A'** 和 **B-to-B'** 同时工作, 不冲突
- 大量接口
- 经常: 单个主机, 星型结构连到交换机
 - **Ethernet**, 但不冲突!



Ethernet交换机(Switch)

□ 链路层设备

- 存储和转发以太网帧
- 检查帧头,并根据目的**MAC**地址有选择的转发帧
- 当**MAC**帧被转发到某一共享网段时,需要使用**CSMA/CD**访问该网段

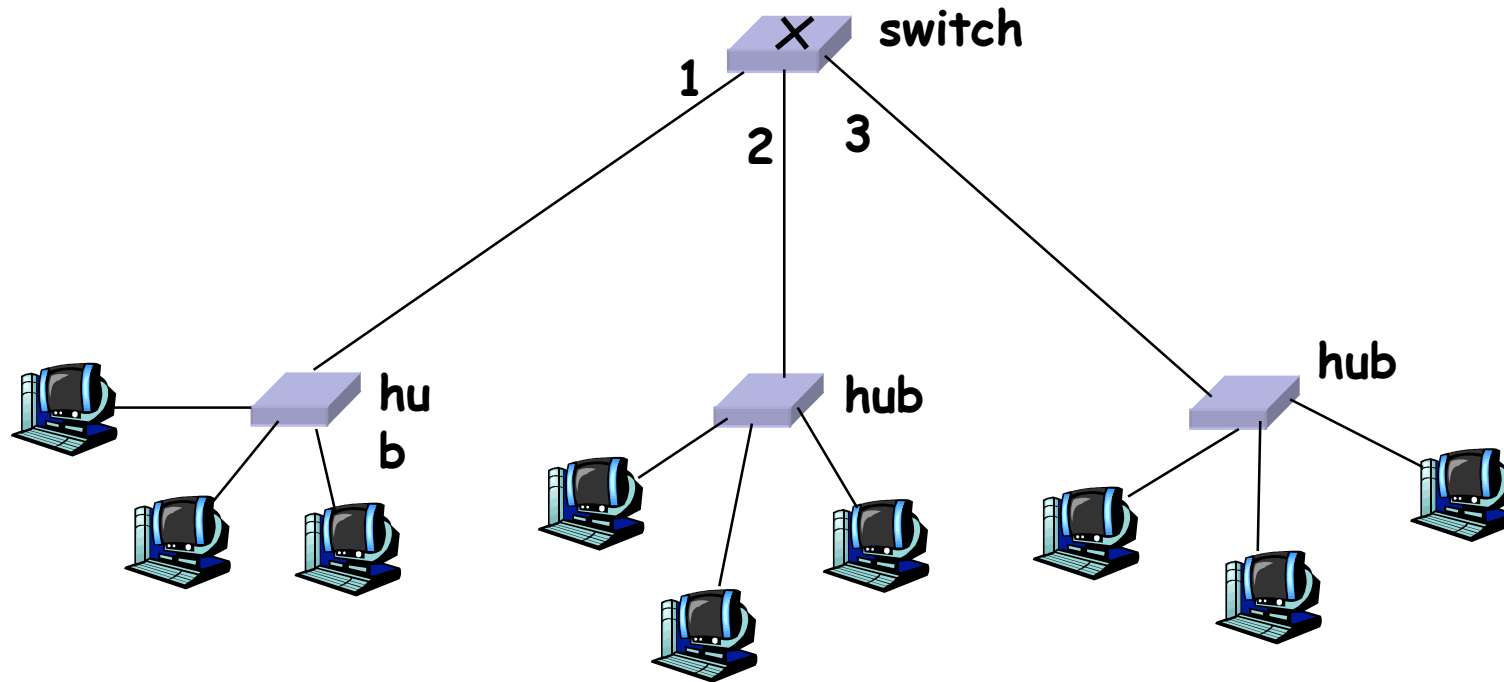
□ 透明性

- 主机不关心交换机的存在

□ 即插即用,自学习

- 交换机不需要被配置

交换机转发



- 交换机怎么确定将接收到的**MAC**帧转发到哪一个网段呢？
- 这听起来象是一个路由问题...

自学习

- 交换机有一个**交换表**
- 交换表的表项：
 - **(MAC地址, 接口, 时间)**
 - 交换表中过期的表项将被删除 (**TTL** 可以是**60分钟**)
- 交换机**学习**哪一个主机可以通过哪一个接口到达交换机
 - 当接收一数据帧时, 交换机“学习”发送者的位置: 进入交换机的**LAN网段**
 - 在交换表中记录发送者/位置对应关系

Address	Interface	Time
62-FE-F7-11-89-A3	1	9:32
7C-BA-B2-B4-91-10	3	9:36
....

Figure 5.30 ♦ Portion of a switch table for the LAN in Figure 5.28

过滤/转发

当交换机接收一数据帧时：

根据接收帧的目的**MAC**地址检索交换表

if 目的**MAC**地址的表项被发现

then{

if 如果目的地址在接收帧的网段中

then 丢弃该帧

else 转发该帧到指定的接口

}

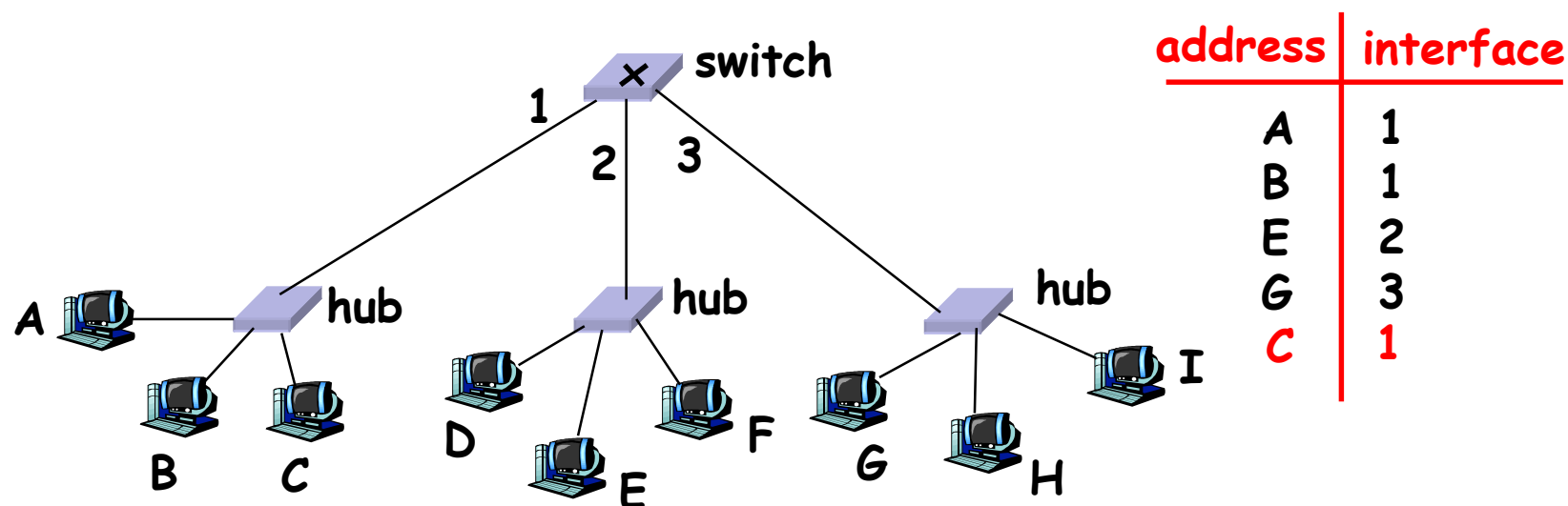
else 广播



向所有(除接收帧所在的接口外)其它接口转发

交换机举例

假设**C**发送数据帧到**D**



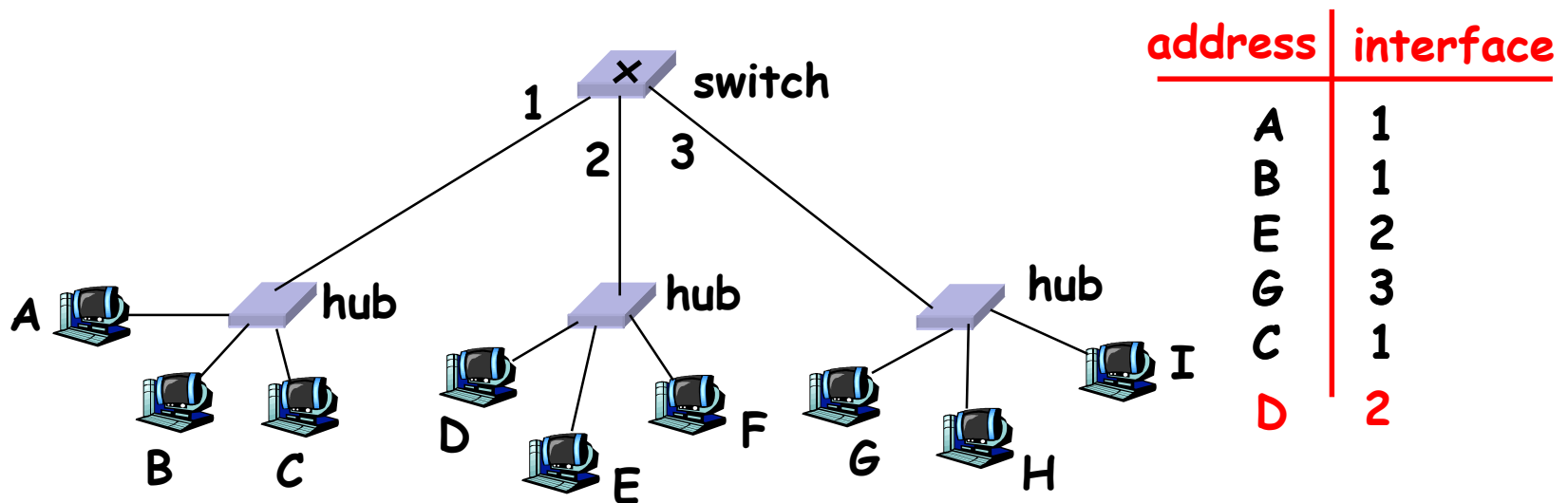
□ 交换机接收来自**C**的数据帧

- 因为**D**不在交换表中,交换机将转发数据帧到接口**2**和**3**
- 注意交换机在接口**1**接收到来自发送者**C**的帧,“学习”,添加新的表项

□ 数据帧被**D**接收

交换机举例

假设D回复数据帧给C.



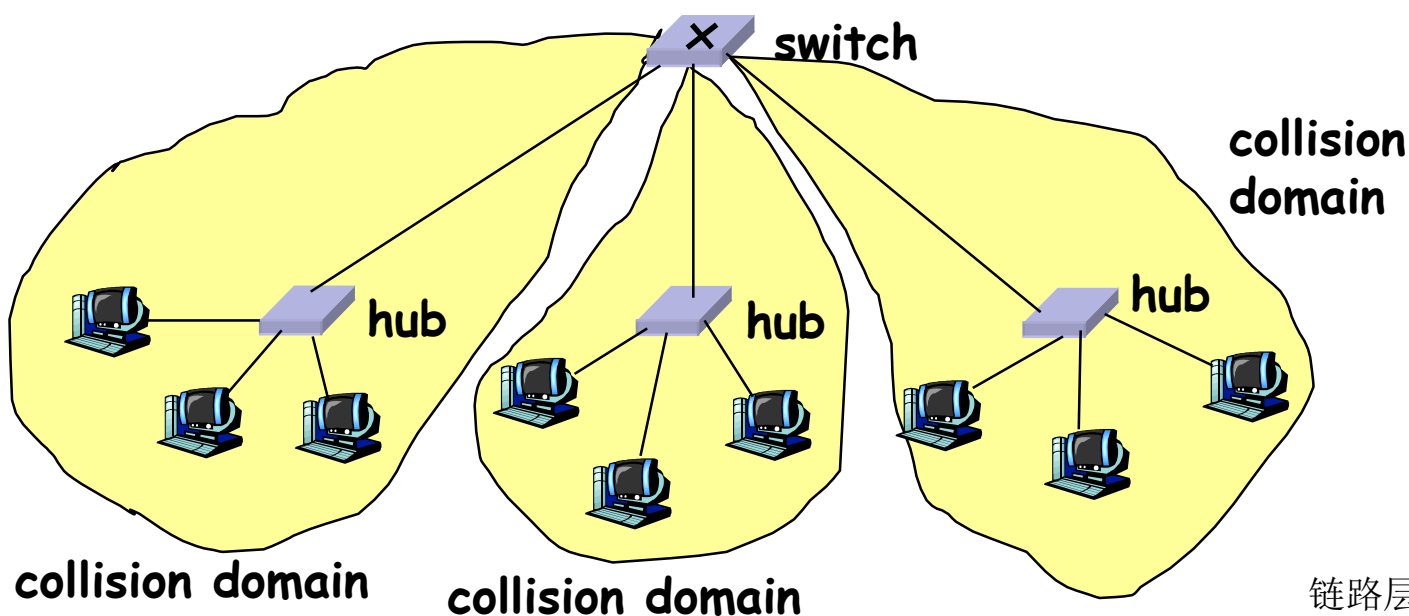
□ 交换机接收来自D的数据帧

- 因为C在交换表中,所以交换机只向接口1转发数据帧
- 交换机在接口2接收到来自发送者C的帧,“学习”,添加新的表项

□ 数据帧被C接收

交换机：冲突隔离

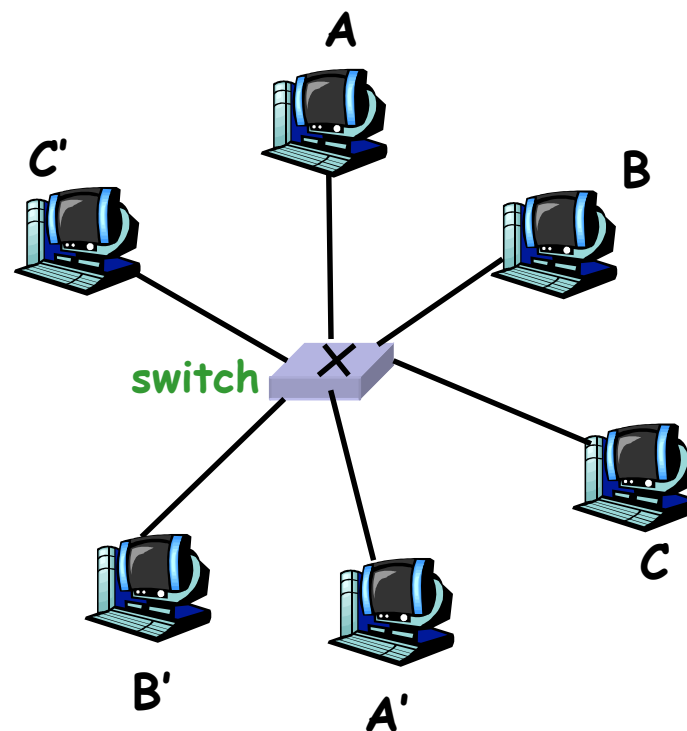
- ❑ 交换机将一个子网划分成若干个**LAN**网段
- ❑ 交换机**过滤**数据包：
 - 同一**LAN**网段的数据帧传输不被转发到其它**LAN**网段
 - 每个**LAN**网段变成一个独立的**冲突域**



交换机：专用接入

- 交换机具有大量接口
- 主机可以直接连接到交换机
- 没有冲突：全双工模式运行

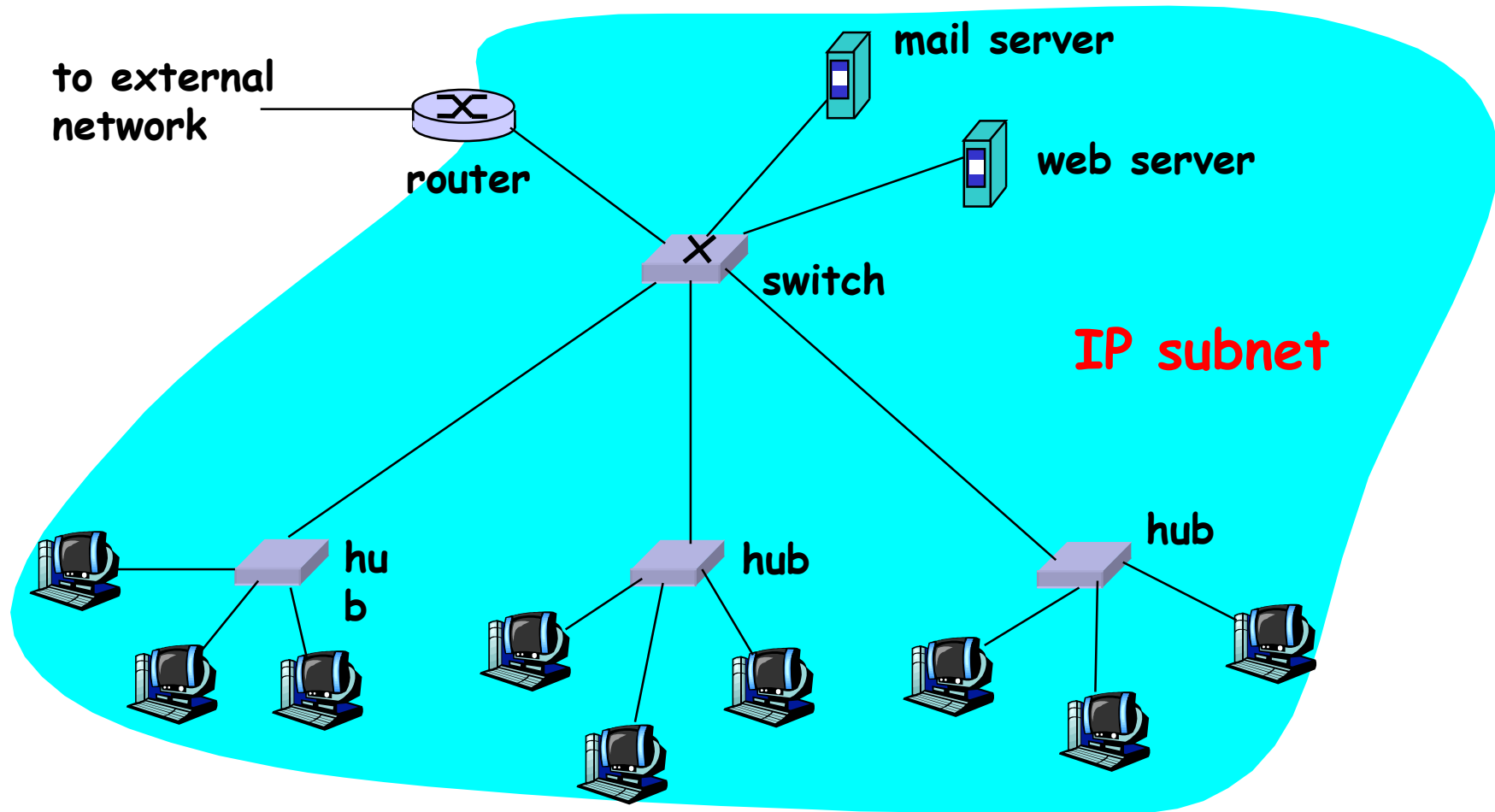
交换：**A-到-A'** 和 **B-到-B'**
同时交换，没有冲突



交换机

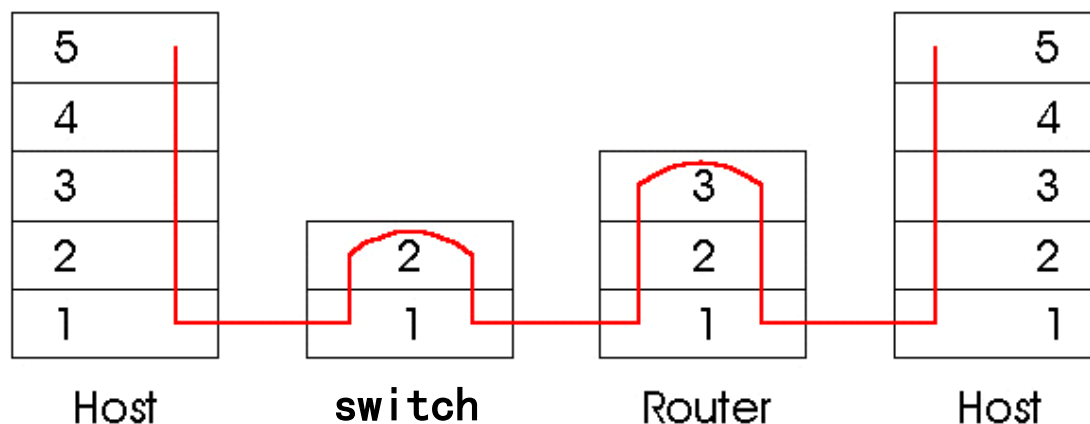
- **直通交换:** 帧从输入转发到输出端口，不必等待整个帧的装配
 - 轻微减少延时
- 可混合各种共享/专用, **10/100/1000 Mbps** 接口

机构网络举例



交换机 vs. 路由器

- 都是存储转发设备
 - 路由器：网络层设备，转发分组
 - 交换机：数据链路层设备，转发帧
- 路由器实现路由算法建立路由表，并转发分组
- 交换机实现自学习包含交换表、转发/过滤



综合比较

	<u>hubs</u>	<u>routers</u>	<u>switches</u>
流量隔离	no	yes	yes
即插即用	yes	no	yes
优化路由	no	yes	no
直通交换	yes	no	yes

第六章：总结

- 数据链路层服务：
 - 差错检测，纠错
 - 共享广播信道：多址访问
 - 链路层寻址，**ARP**
- 链路层技术的实例和实现：
 - **Ethernet**
 - 交换式**LAN**

第六章：复习大纲

- 链路层提供的服务
 - 成帧
 - 链路访问
 - 差错检测
- 链路类型：点对点和共享
- 共享介质使用多址访问技术
 - 信道划分
 - 随机访问
 - 轮转
- 链路层编址
 - MAC地址是一种全局性的平面地址
 - ARP协议的功能

第六章：复习大纲

□ 以太网技术

- 以太网技术定义链路层和物理层的实现方式
- 帧格式
- 以太网提供无连接、不可靠的服务
- 共享式以太网采用**CSMA/CD**介质访问控制技术的基本原理
- 物理层采用曼彻斯特编码
- 连接设备使用集线器和交换机
- 集线器和交换机各自的特点

本章作业

□ 习题: R2, R6, P1, P5, P18, P21

第5章 数据链路层

- ❑ 数据链路层功能：完成帧在两个相邻节点的传输
- ❑ 分组传输可经由不同链路，使用不同链路层协议传输（**IP over everything**）
- ❑ 数据链路层提供服务：成帧、链路访问控制、可靠传输、差错检测和纠错、流量控制
- ❑ 适配器（网卡）是链路层设备，实现了数据链路层和物理层功能
- ❑ 差错检测：原数据**D**添加冗余信息**EDC**，检测不是**100%**可靠
 - 奇偶校验：检测奇数个错误；二维奇偶校验：检测并纠正单个**bit**错误，检测任意组合两个**bit**错误
 - 校验和：接收方计算校验和，结果不全**1**意味着出错，全**1**表明未检测到错误（可能有错）
 - ***CRC**校验：检测**r+1bit**猝发错误
 - 数据**D**，**r+1 bit**生成多项式**G**，**r bit CRC**校验位**R**， $R = D * 2^r \bmod G$ （余数不足**r bit**左侧需补0）
 - 用硬件实现

多路访问控制

- ❑ 在共享信道上解决节点什么时候传输数据的问题
- ❑ 信道划分类：共享信道划分为若干子信道，分配给节点专用的固定子信道
 - **TDMA**，子信道为时隙
 - **FDMA**，子信道为频段
 - **CDMA**，子信道为编码
 - 高负载效率高，低负载效率低
- ❑ 随机访问类：竞争信道，成功则以满速率发送
 - 纯**ALOHA**协议：有数据即可发送，冲突概率大
 - 时隙**ALOHA**协议：只能在时隙开始处发送，降低了冲突概率
 - **CSMA**协议：发送前监听信道，闲则发，忙则延迟发送。距离和传播延迟决定冲突概率
 - **CSMA/CD**协议：发送过程中监听信道，冲突后停止发送
 - 高负载冲突概率大，效率低
- ❑ 轮转类：轮流访问共享信道

CSMA/CD协议*

- 1. 发送数据时监听信道是否有载波存在
- 2. 闲则发送；忙则继续监听至空闲后发送
- 3. 发送过程中未检测到碰撞，则传输成功；否则停止发送，并发送**48bit**干扰信号**jam**，强化冲突
- 4. 指数退避等待随机时间 **$K \times 512\text{bit}$** 时间，**K**值在 **$\{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\}$** 中选取， **$m = \min(n, 10)$** ，**n**为冲突次数，回到第2步
- 网络最远两台主机**AB**之间传播延迟为 **t** ，节点**A**在 **t_0** 时刻发送数据后只需监听 **$2t$** 时间，若 **$2t$** 时间内没有检测到冲突，则无需再监听
 - 最坏情况下节点**A**在 **$t_0 + 2t$** 时间后检测到冲突（即**A**信号即将到达**B**之前**B**发送数据）
 - 最短情况是节点**A**在 **t_0** 时刻检测到冲突（即**B**在 **$t_0 - t$** 时刻之前已发出数据）
 - **A**，**B**同时在 **t_0** 时刻发出数据，则在 **$t_0 + t$** 时刻都将检测到冲突

ARP协议

□ 链路层地址：**MAC地址，48bit，物理地址，平面结构**

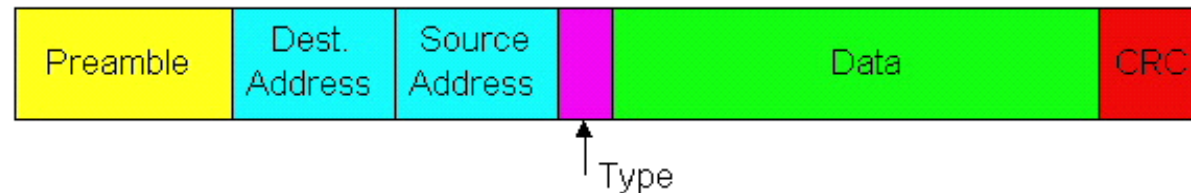
IP地址，32bit，逻辑地址，层次结构

□ **ARP协议：由IP地址获得MAC地址，主机维护ARP表**

- 主机**A**发送数据给同一网络主机**B**，若主机**A**的**ARP**表中没有主机**B**的**MAC**地址，则运行**ARP**协议由**B**的**IP**地址获得**B**的**MAC**地址，随后完成帧的封装并发送
- 主机**A**发送数据给不同网络主机**B**，则主机**A**应把数据发给网关路由器，若主机**A**的**ARP**表中没有网关路由器在**A**网络侧的**MAC**地址，则运行**ARP**协议由网关路由器**A**网络侧**IP**地址获得该侧接口的**MAC**地址，随后完成帧的封装并发送至网关路由器选路

以太网

- ❑ 组网拓扑：星型拓扑、总线拓扑
- ❑ 物理层设备：中继器、集线器
- ❑ 以太网帧结构



- 18字节首部，Data域40-1500字节
 - 最短帧长64字节，最大帧长1518字节，其中MTU=1500，与之对应的MSS=1500-IP首部（字节）-TCP首部（20字节）=1460字节
- MSS**：最大报文段长度，即TCP报文段能承载的应用层数据最大长度
- 不可靠的无连接服务
 - 使用CSMA/CD

交换机

□ 链路层设备

- 存储和转发以太网帧
- 检查帧头,并根据目的**MAC**地址**有选择的**转发帧
- 当**MAC**帧被转发到某一共享网段时,需要使用**CSMA/CD**访问该网段
- 即插即用, 自学习

	集线器	交换机	路由器
流量（冲突） 隔离	不能	能	能
即插即用	是	是	否
转发方式	扩散（广播）	过滤转发	选路
转发表	无	交换表（自学习）	路由表（选路算法）
直通交换	是	是	否
互联异构网络	不能	能	能
网络协议层次	物理层	数据链路层	网络层

应用层协议

协议	功能	使用服务	服务器端口号	有无状态	所在层次	体系结构
HTTP	与web服务器通信	TCP	80	无状态	应用层	C/S
FTP	完成文件传输	TCP	21(控制连接) 20(数据连接)	有状态	应用层	C/S
SMTP	电子邮件发送	TCP	25	无状态	应用层	C/S
POP3	接收电子邮件	TCP	110	无状态	应用层	C/S
IMAP	接收电子邮件	TCP	143	有状态	应用层	C/S
DNS	由域名获得相应IP地址	UDP	53	无状态	应用层	C/S
DHCP	自动获取IP地址	UDP	68	/	应用层	C/S
MIME	SMTP邮件服务扩展，使之能传送任何内容				应用层	

协议

协议	功能	所属层次	使用服务	服务器端口号	IP首部上层协议字段	
TCP	主机进程之间的报文段通信	传输层				
UDP	主机进程之间的用户数据报通信	传输层				
IP	主机之间的分组传输	网络层				
IPv6	解决IP地址短缺问题	网络层				
ICMP	网络层控制信息的传输	直接用IP传输	IP		1	
RIP	域内路由协议，距离向量算法实例	应用层，为网络层服务	UDP	520	17	
OSPF	域内路由协议，链路状态算法实例	直接用IP传输	IP		89	
BGP	边界网关协议，域间路由协议	应用层，为网络层服务	TCP	179	6	
ARP	完成IP地址到MAC地址的解析	/				

多点访问控制协议/MAC协议

类别	协议	原理	特点			
信道划分类	TDMA	子信道“时隙”	高负载效率高，低负载效率低，资源浪费大			
	FDMA	子信道“频段”				
	CDMA	子信道“编码”				
随机访问类	纯 ALOHA	有帧即发送	低负载效率高，能以满速率发送；高负载效率低，冲突开销大			
	时隙 ALOHA	时隙开始时刻才能发送				
	CSMA	发送前监听信道，闲才发送				
	CSMA/CD	同 CSMA ，发送过程中检测到冲突则停止发送				
轮转类	轮询	主节点询问	结合前两类优点。存在单点失效，时间延迟大问题			
	令牌	在环拓扑中，获得令牌才能发送				