

# 计算机网络

## 第五章 接口层原理与协议

徐敬东 张建忠

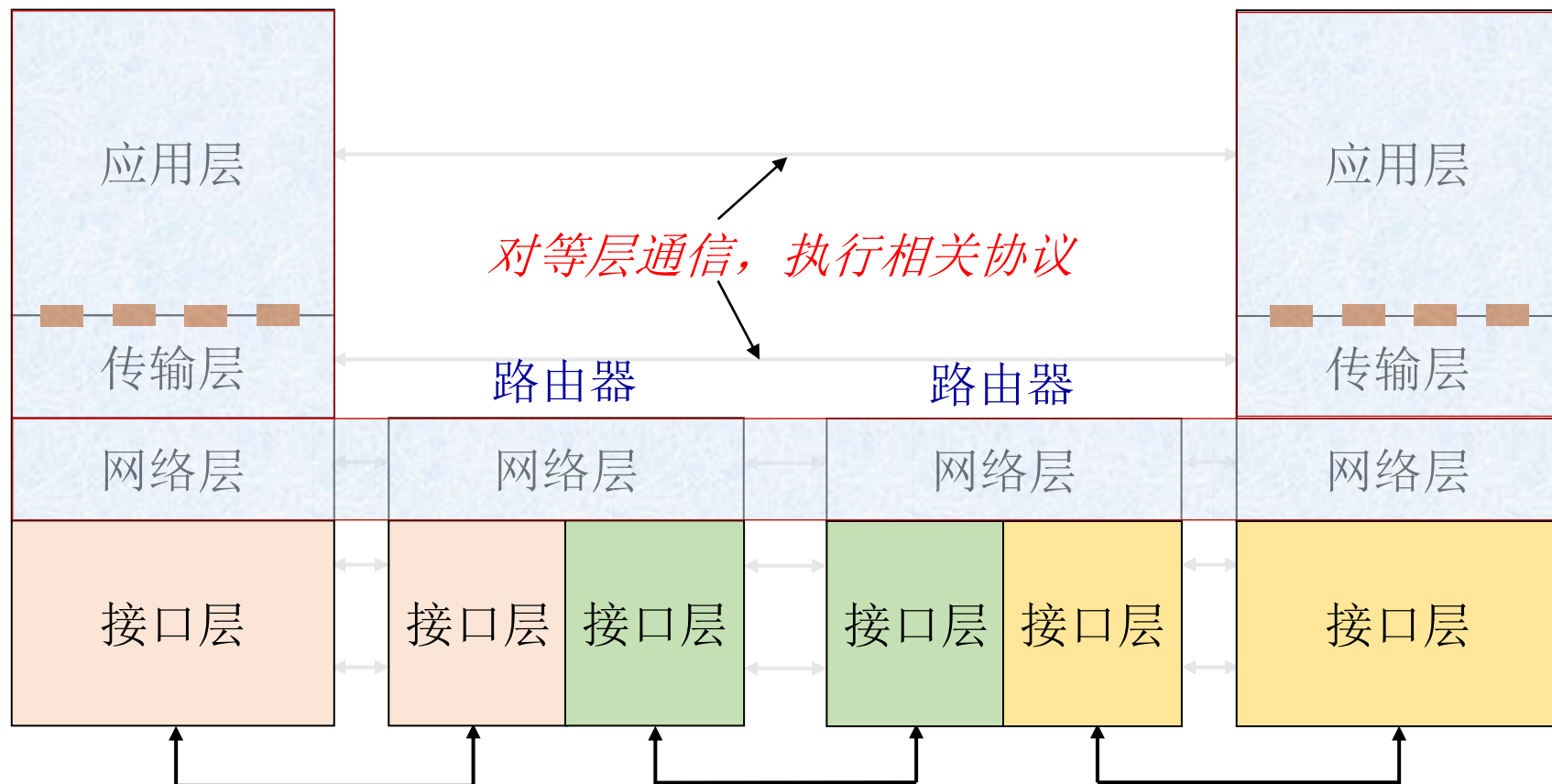
xujd@nankai.edu.cn

zhangjz@nankai.edu.cn

计算机网络与信息安全研究室  
计算机学院&网络空间安全学院

- 5.1 接口层基础
- 5.2 局域网体系结构与组网方法
- 5.3 局域网编址与ARP协议
- 5.4 链路层差错控制
- 5.5 共享式与交换式以太网
- 5.6 虚拟局域网
- 5.7 无线局域网

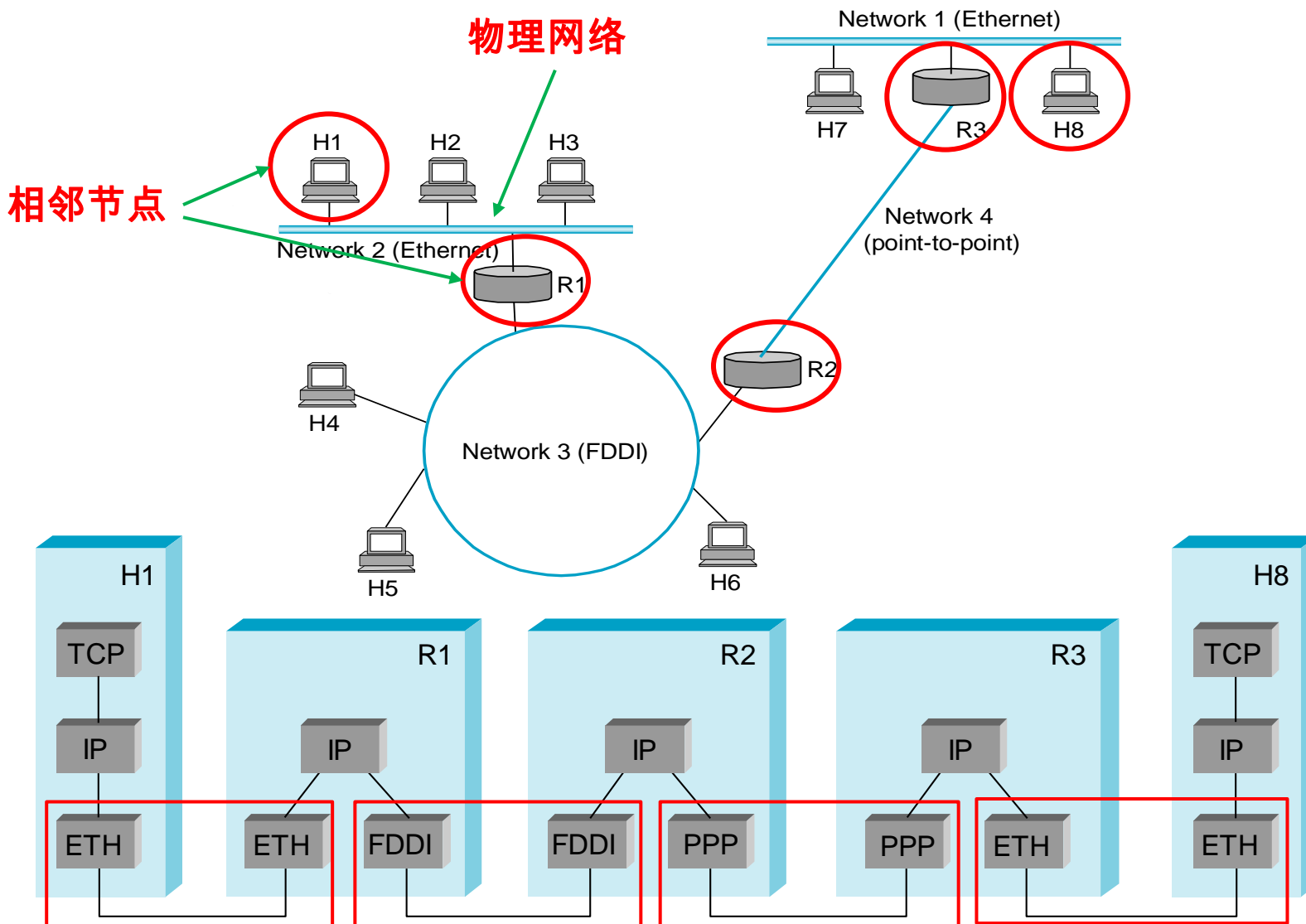
## TCP/IP体系结构



- 接口层提供同一**物理网络**中各节点之间的连接和通信
- 同一个**物理网络**必须执行相同的接口层协议
- 不同的**物理网络**接口层协议可以不同

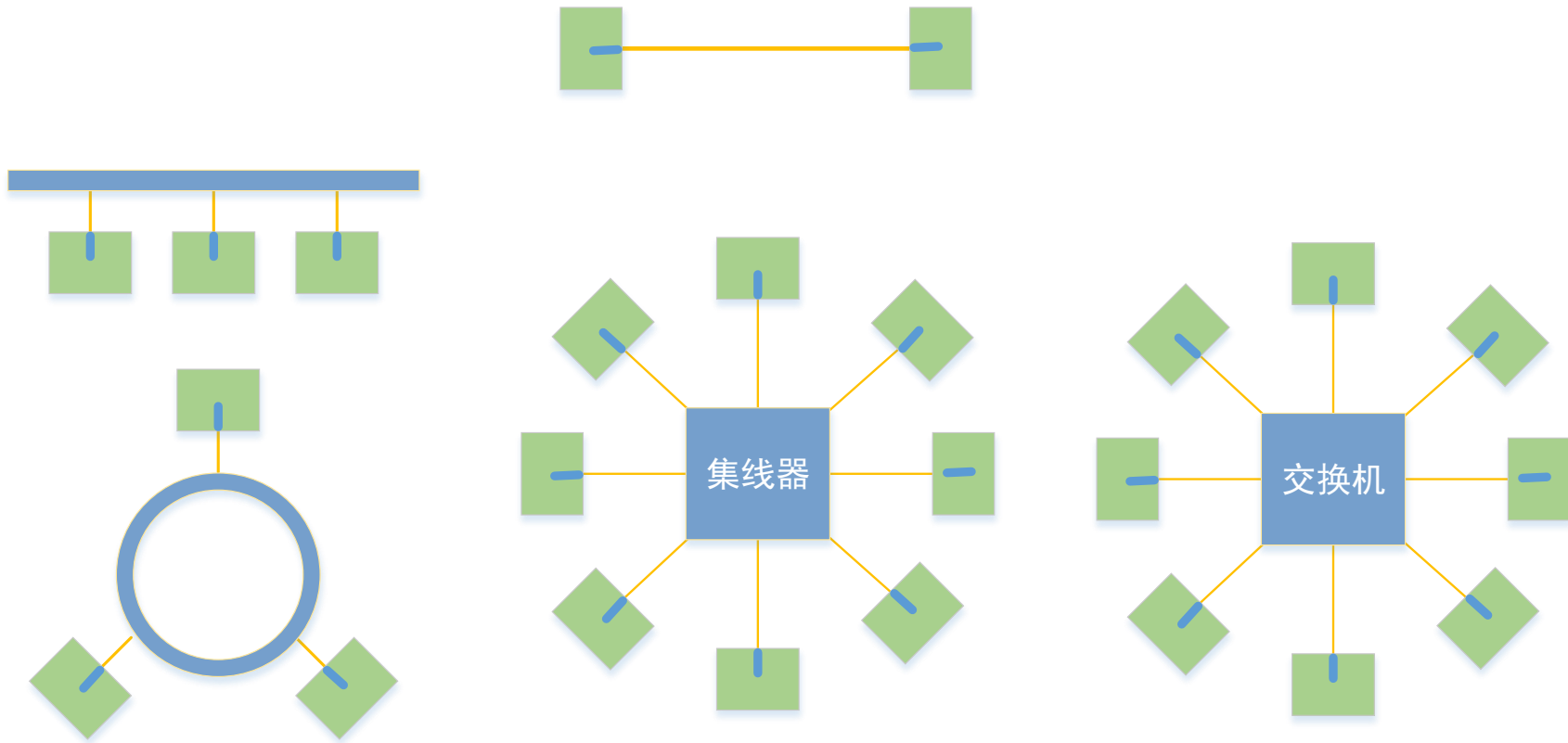
# 5.1 接口层基础

## 物理网络互联示例



# 5.1 接口层基础

## 物理网络连接方式（拓扑结构）



■ 节点到节点连接、共享式连接、交换式连接

# 5.1 接口层基础

## 接口层功能

- 物理层：提供位流服务
  - ▶ 传输介质和拓扑结构定义
  - ▶ 编码与解码（数据→信号）
  - ▶ 信号的发送与接收
  - ▶ 时钟同步
- 数据链路层：提供可靠或不可靠的传输服务
  - ▶ 数据单元及寻址方式定义
  - ▶ 链路层差错检测
  - ▶ 链路层的复用和分用
  - ▶ 可靠数据传输
  - ▶ 共享式连接：提供介质访问控制方法
  - ▶ 交换式连接：数据单元转发

接口层功能通常由网络接口卡 (NIC) 和驱动程序共同实现



## 接口层技术分类

### ■ 有多种接口层技术，传统上大致可以分成三类

#### ▶ 局域网技术（LAN, Local Area Network）

- 如：以太网（Ethernet）、无线局域网（WiFi）

#### ▶ 城域网技术（MAN, Metropolitan Area Network）

- 如：FDDI、交换式Ethernet

#### ▶ 广域网技术Wide Area Network (WAN)

- 如：ATM

### ■ 其他接口技术

#### ▶ 个人区域网

- 如：蓝牙技术（Bluetooth）

#### ▶ 无线传感网络

- 如：Zigbee技术

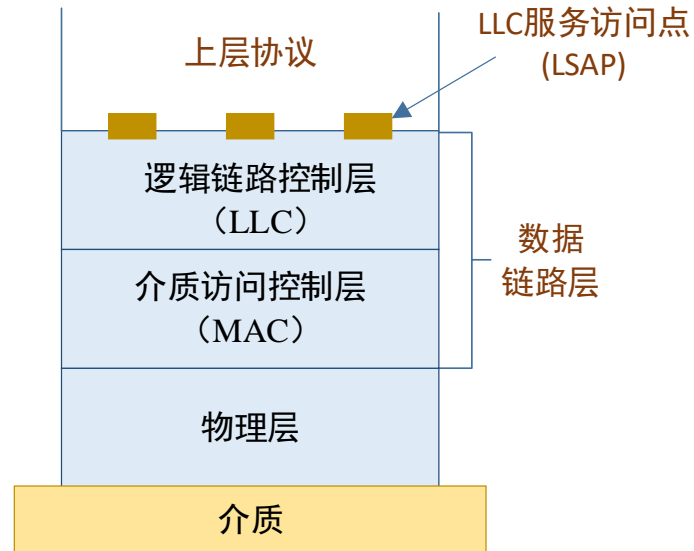
### 局域网体系结构与数据封装

#### 介质访问控制层 (Medium Access Control)

- 物理节点寻址
- 差错控制
- 介质访问控制（共享式连接）

#### 逻辑链路控制层 (Logical Link Control)

- 链路层的复用和分用
- 可靠数据传输



IEEE 802参考模型



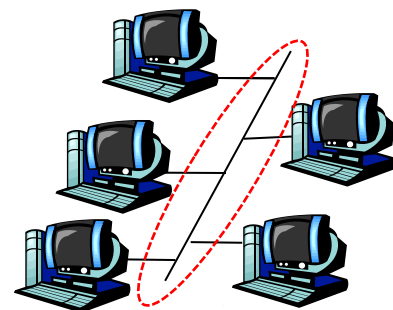


## 5.2 局域网体系结构与组网方法

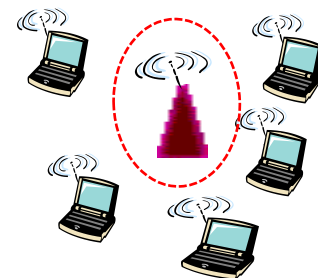


### ■ 共享式局域网

- ▶ 网络中任一节点发送的信息会被网络中所有节点收到（广播传输）
  - 例如，共享式以太网，无线局域网，FDDI等
- ▶ 需要协调节点对共享介质的访问
  - **介质访问控制方法**



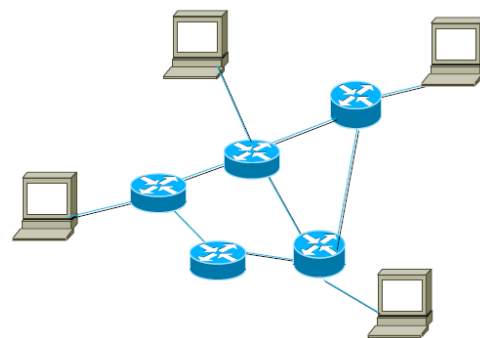
共享式以太网



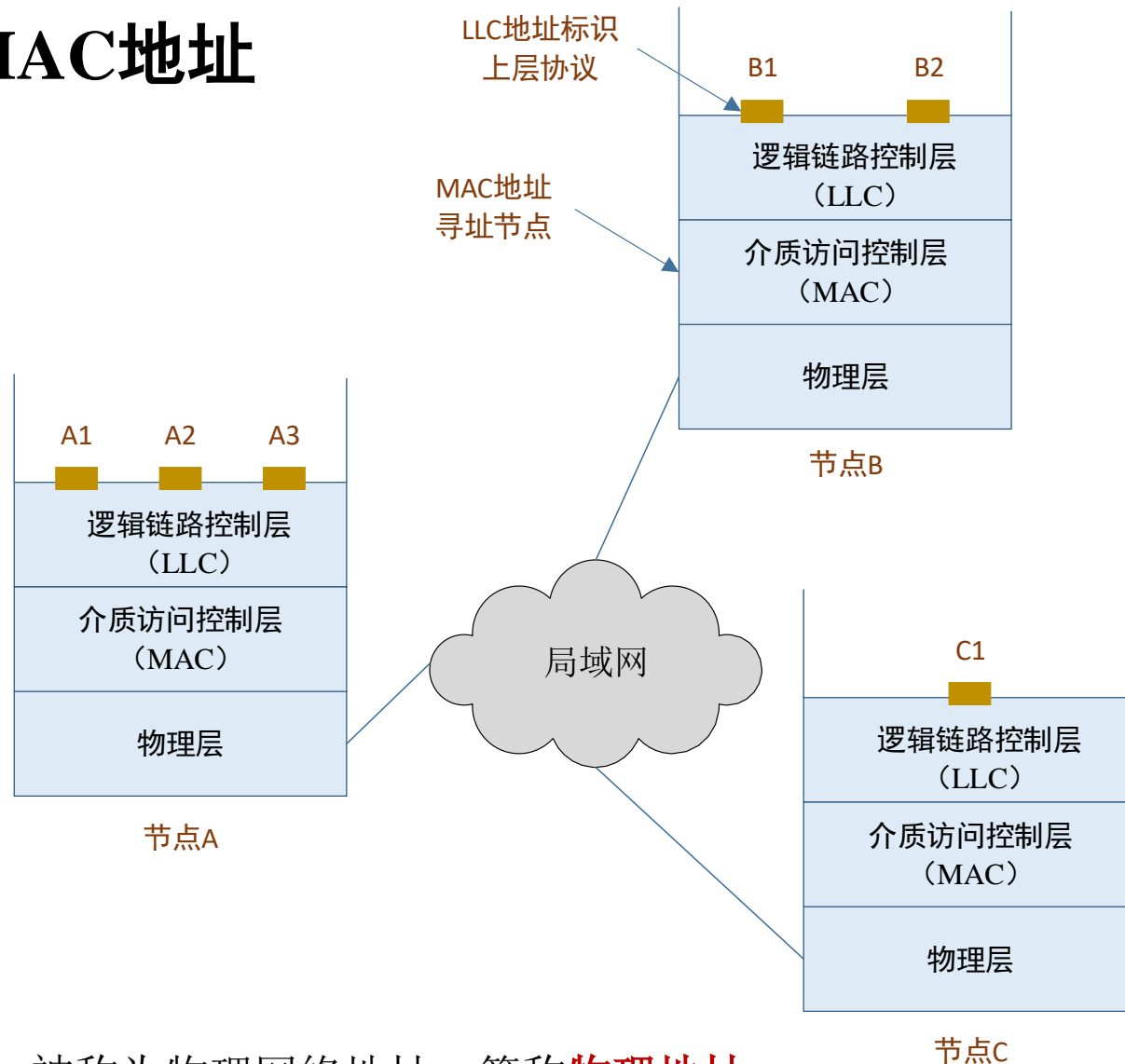
802.11无线局域网

### ■ 交换式局域网

- ▶ 链路采用点到点连接
  - 例如，交换式以太网
- ▶ 交换机成为网络连接的核心
  - **完成链路层数据单元的转发**
  - 通常采用统计多路复用



## LLC和MAC地址



- MAC地址：被称为物理网络地址，简称**物理地址**

### MAC地址—物理地址

#### 32位IP地址:

- 网络层地址（逻辑地址）：标识主机或路由器的一个接口
- 主要用于IP数据包的路由转发

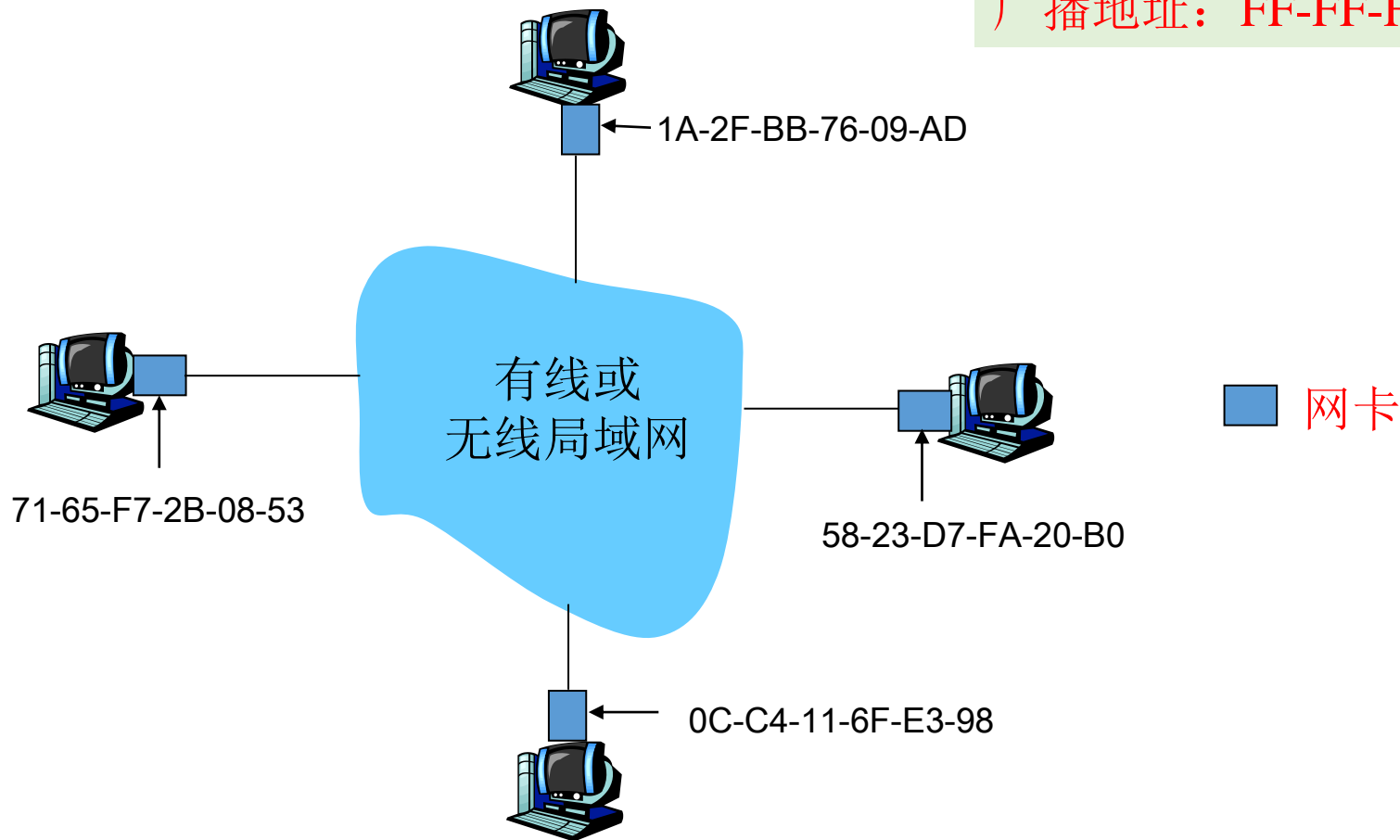
#### 48位MAC地址（物理地址）：

- 物理地址：在相同的物理网络中，标识一个节点
- 对于大多数局域网，采用48位MAC地址
  - ✓ 位于网卡的ROM或EPROM中
  - ✓ 扁平地址，无层次，需要唯一

### MAC地址—物理地址

每块网卡上有唯一的MAC地址

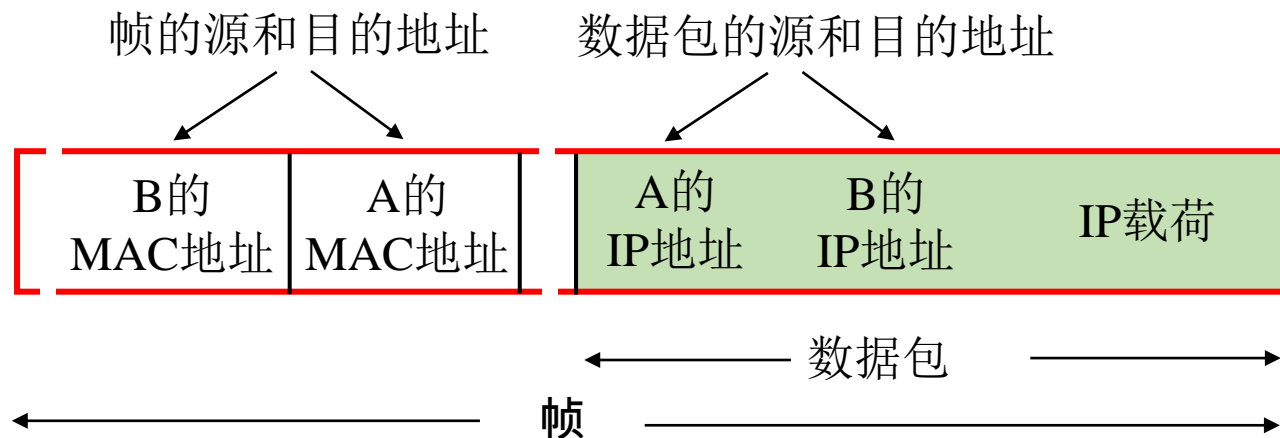
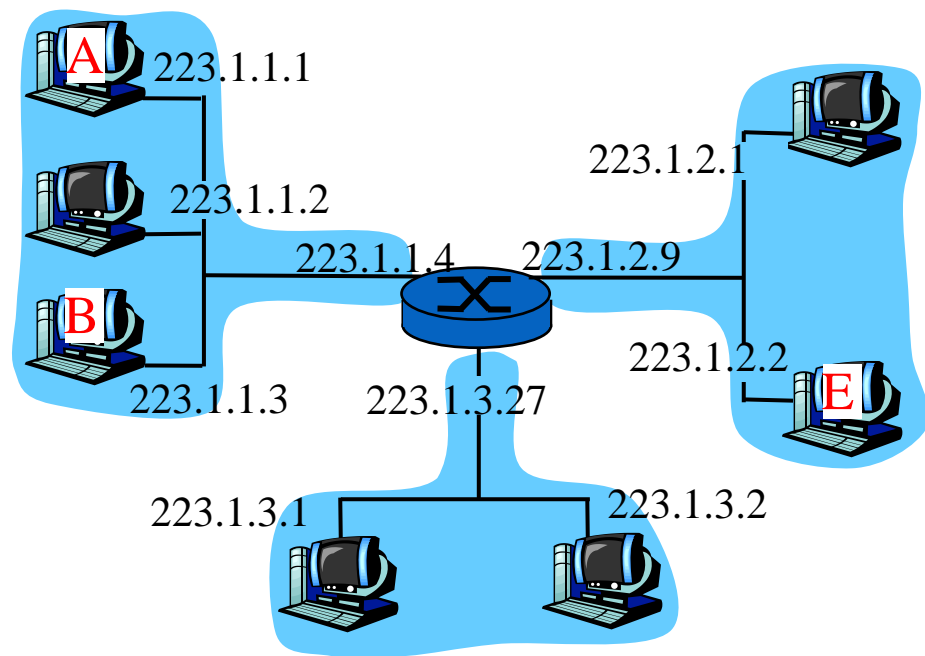
广播地址：FF-FF-FF-FF-FF-FF



## 回顾：IP数据包转发

示例：从主机A到主机B

- 检查目的IP地址的网络号部分
- 确定主机B与主机A属相同IP网络
- 将IP数据包封装到链路层帧中，直接发送给主机B

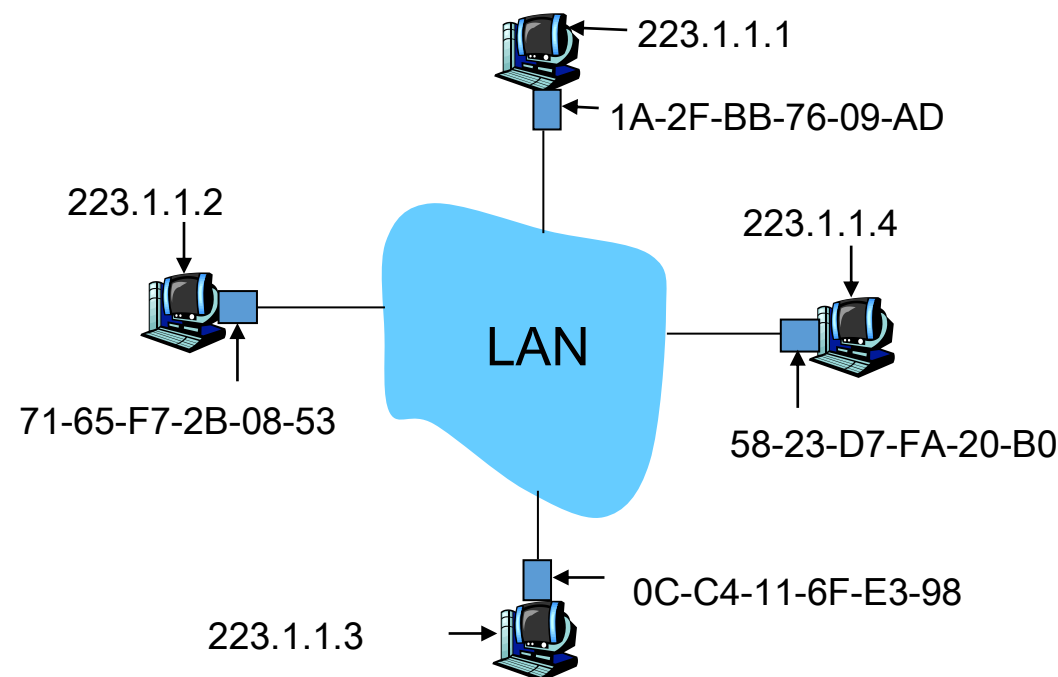


### ARP 协议

问题：给定B的IP地址，如何获取B的MAC地址

### ARP: Address Resolution Protocol

- 局域网上的每个IP节点（主机或路由器）都有ARP表
- ARP表缓存IP地址与MAC地址的映射关系



IP地址	MAC地址	TTL

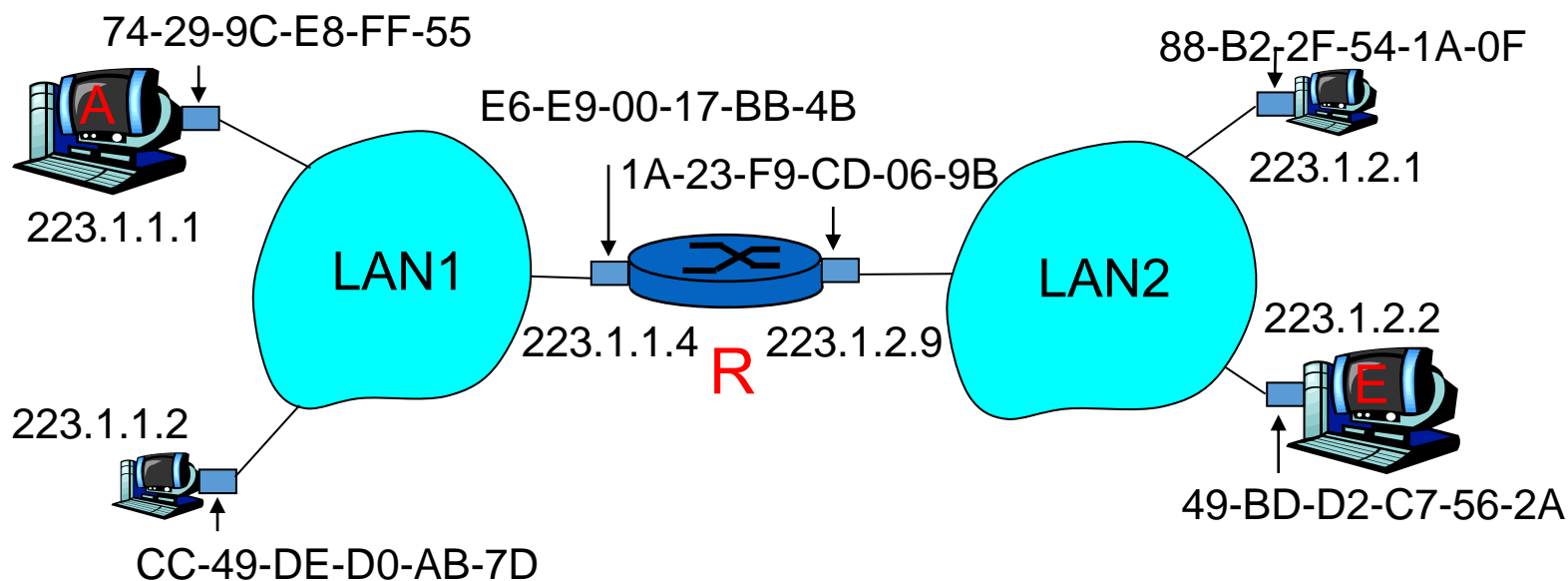
### ARP 协议

- **A**已知**B**的IP地址，需要获得**B**的MAC地址（物理地址）
- 如果**A**的ARP表中缓存有**B**的IP地址与MAC地址的映射关系，则直接从ARP表获取
- 如果**A**的ARP表中未缓存有**B**的IP地址与MAC地址的映射关系，则**A**广播包含**B**的IP地址的**ARP query**分组
  - 在局域网上的所有节点都可以接收到**ARP query**
- **B**接收到**ARP query**分组后，将自己的MAC地址发送给**A**
- **A**在ARP表中缓存**B**的IP地址和MAC地址的映射关系
  - 超时时删除

ARP的优化策略？

### 如何路由到另一个局域网

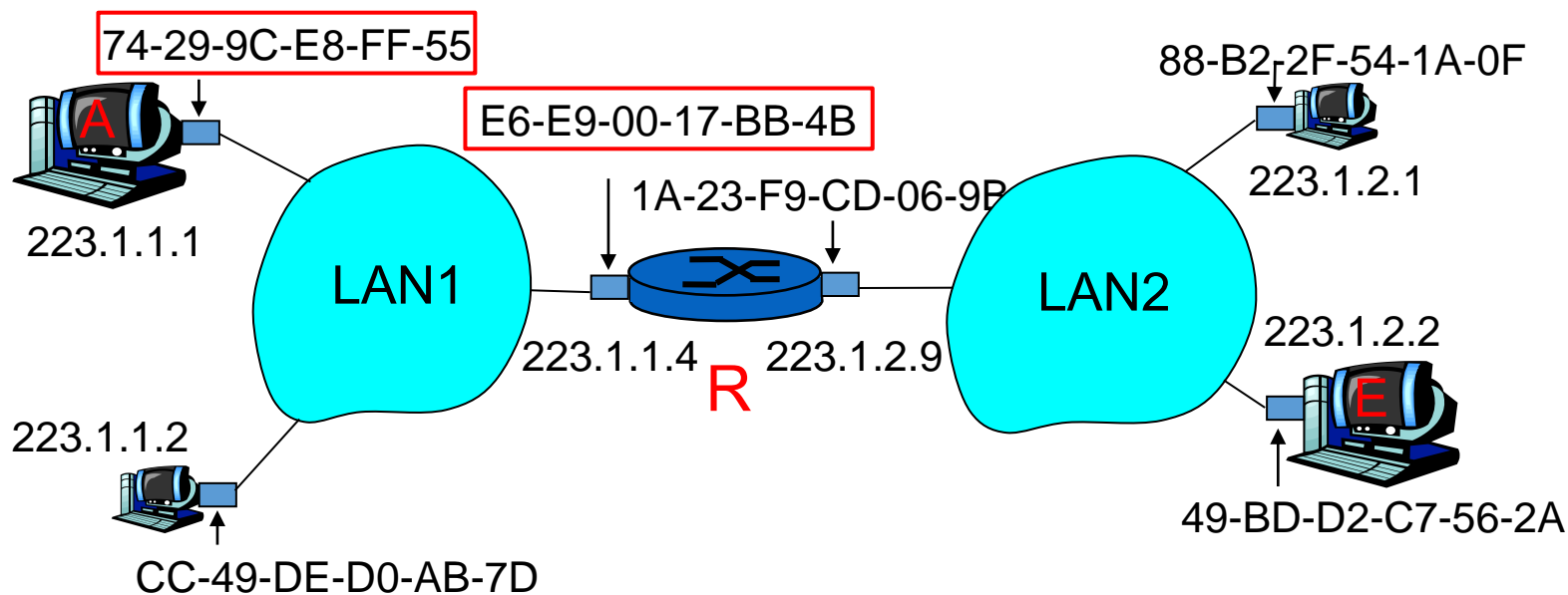
例如：从A经过R到E



- A创建IP数据包（源为A、目的为E）
- 在源主机A的路由表中找到路由器R的IP地址221.1.1.4
- A根据R的IP地址223.1.1.4，使用ARP协议获得R的MAC地址

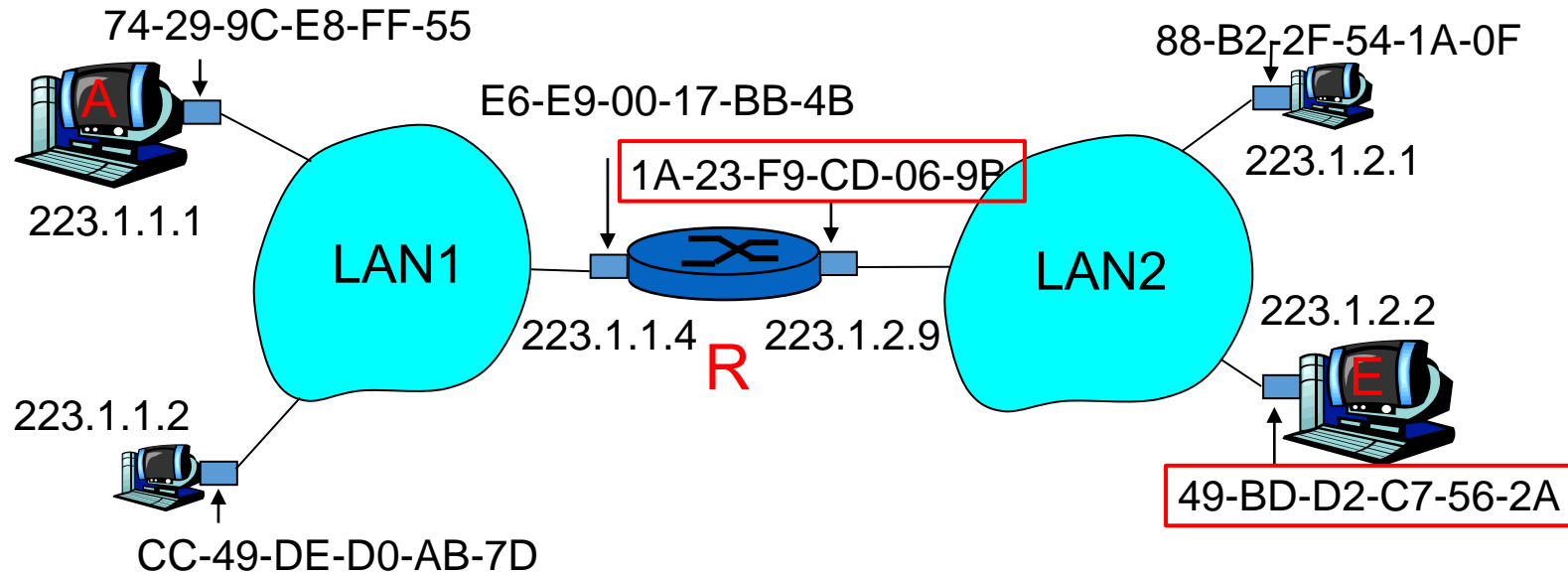


### 如何路由到另一个局域网（续）



- A创建数据帧（目的地址为R的MAC地址）
- 数据帧中封装A到E的IP数据包
- A的发送数据帧，R接收数据帧

### 如何路由到另一个局域网（续）



- R从数据帧中得到IP数据包，根据目的地址E进行路由转发
- R使用ARP协议获取E的MAC地址
- R创建以E的MAC地址为目的的数据帧（包含A到E的IP数据包）

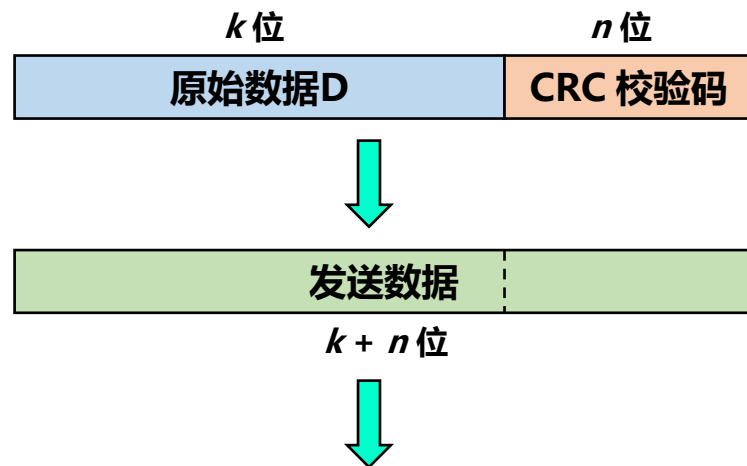
# 5.4 链路层差错控制

## 循环冗余校验（CRC）

■ 在数据链路层中，广泛使用**循环冗余校验**（Cyclic Redundancy Check）

■ CRC校验码计算方法

- ▶ 设原始数据D为 $k$ 位二进制位模式
- ▶ 如果要产生 $n$ 位CRC校验码，事先选定一个 $n+1$ 位二进制位模式G（称为生成多项式），G的最高位为1
- ▶ 将原始数据D乘以 $2^n$ （相当于在D后面添加  $n$  个 0），产生 $k+n$ 位二进制位模式，用G对该位模式做模2除，得到余数R（ $n$  位，不足 $n$ 位前面用0补齐）即为CRC校验码



CRC校验能力：能检测出少于 $n+1$ 位的突发错误

接收端如何计算？

## CRC计算示例

$D = 1010001101$

$n = 5, G = 110101$

$R = 01110$

实际传输数据：101000110101110

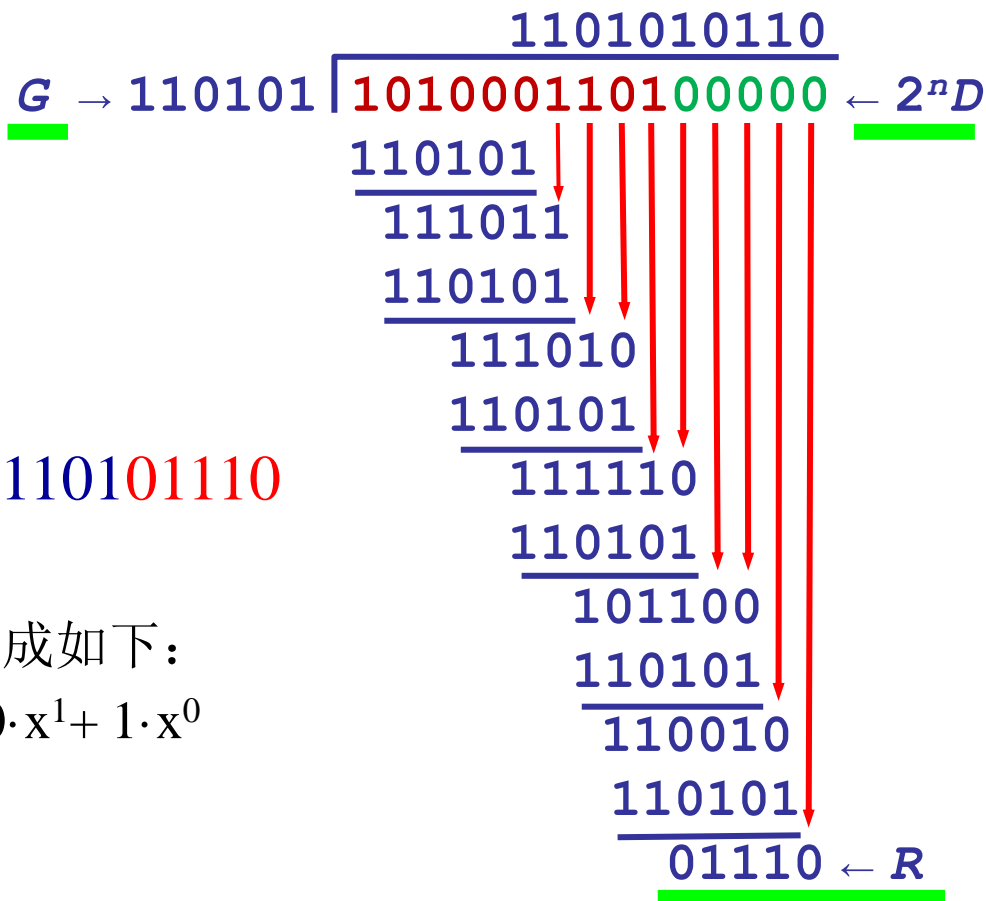
■ 生成多项式G也可以表示成如下：

$$G = 1 \cdot x^5 + 1 \cdot x^4 + 0 \cdot x^3 + 1 \cdot x^2 + 0 \cdot x^1 + 1 \cdot x^0$$

$$= x^5 + x^4 + x^2 + x^0$$

■ 例如，以太网的生成多项式为：

$$G = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$



## 以太网（Ethernet）的发展

■ 最初设计：1972年由施乐公司研制开发

■ Internet标准：

▶ 1980年：以太网（DIX v1.0）

▶ 1982年：以太网II（DIX v2.0）

■ IEEE 802.3标准（1982年-今）

▶ 10M以太网：1982年-1995年，主要支持同轴电缆、双绞线、光纤

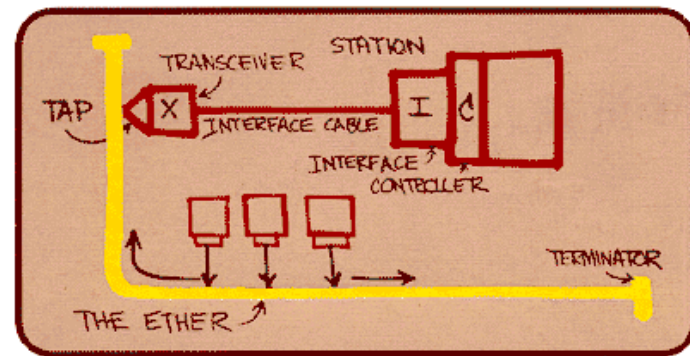
▶ 100M以太网：1995年-1998年，主要支持双绞线、光纤

▶ 1000M以太网：1998年-，主要支持双绞线、光纤

▶ 10G以太网：2002年-，主要支持双绞线、光纤

▶ 40G以上以太网：2010年-，主要支持光纤

■ 共享式和交换式以太网



## 共享式以太网：连接方式与功能

### ■ 连接方式

- ▶ 方式1：通过同轴电缆连接（10Mbps以太网）
- ▶ 方式2：通过双绞线、光纤与集线器连接

### ■ 服务：面向非连接的不可靠服务

### ■ 功能

#### ▶ 物理层

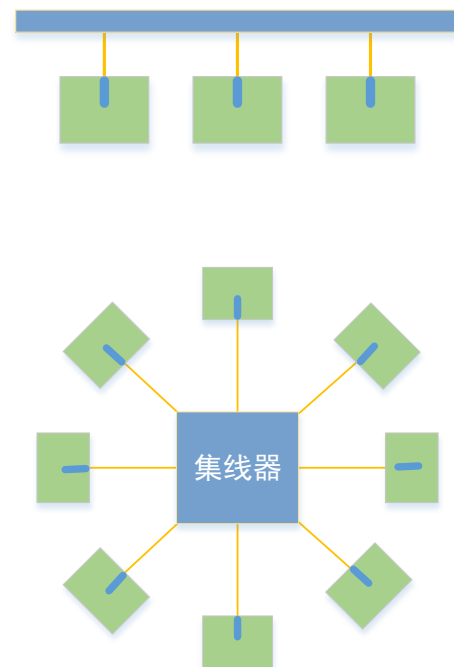
- 信号编码、时钟同步等，如差分曼彻斯特编码

#### ▶ 介质访问控制层

- 介质访问控制：**CSMA/CD**
- 差错检测

#### ▶ 逻辑链路控制层

- 复用与分用



IEEE802.2标准

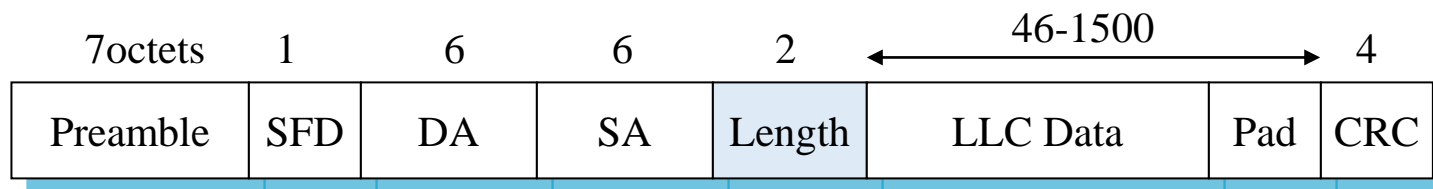
逻辑链路控制层

IEEE802.3标准

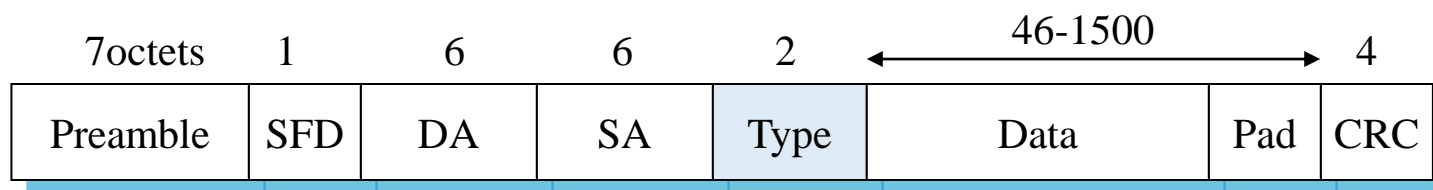
介质访问控制层

物理层

## IEEE 802.3帧结构



## DIX Ethernet V2帧结构

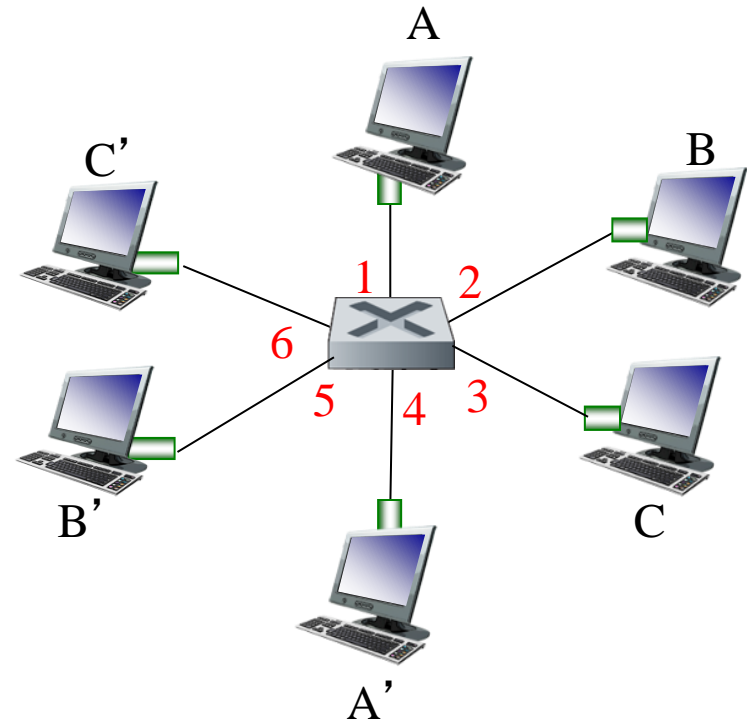


- 前导码: 位模式为10101010, 用于时钟同步
- 帧开始定界符 (SFD): 位模式为10101011, 指明帧的开始
- CRC校验:  $G = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$
- 类型: 指明上层协议类型,
  - $\geq X0800$
  - X0800 IP
  - X0806 ARP

## 交换式以太网：连接方式

### ■ 连接方式

- ▶ 节点通过双绞线或光纤连接到**交换机**
- ▶ 交换机负责数据帧的转发



A到A'、B到B' 可以同时进行传输

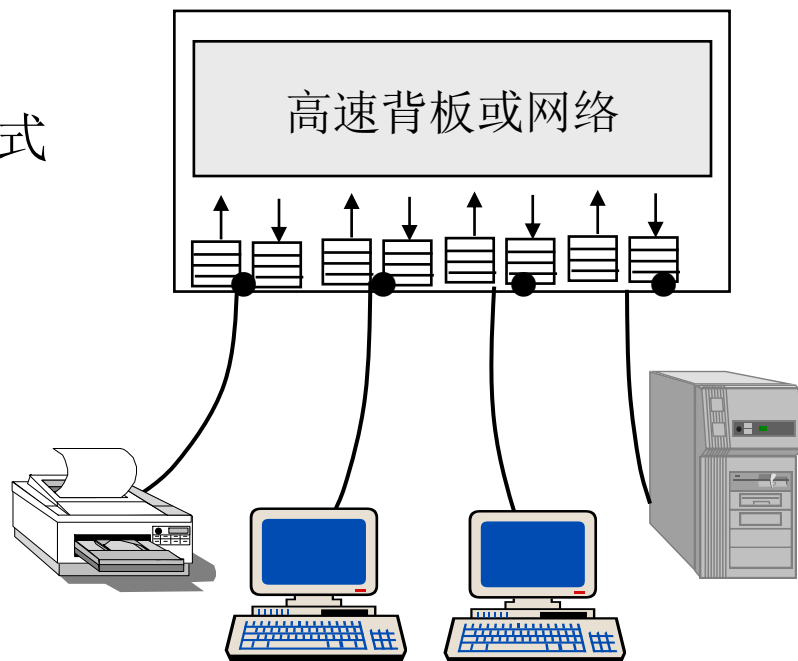
有六个接口的交换机 (1,2,3,4,5,6)



## 交换式以太网：交换机

### ■ 交换机为链路层设备

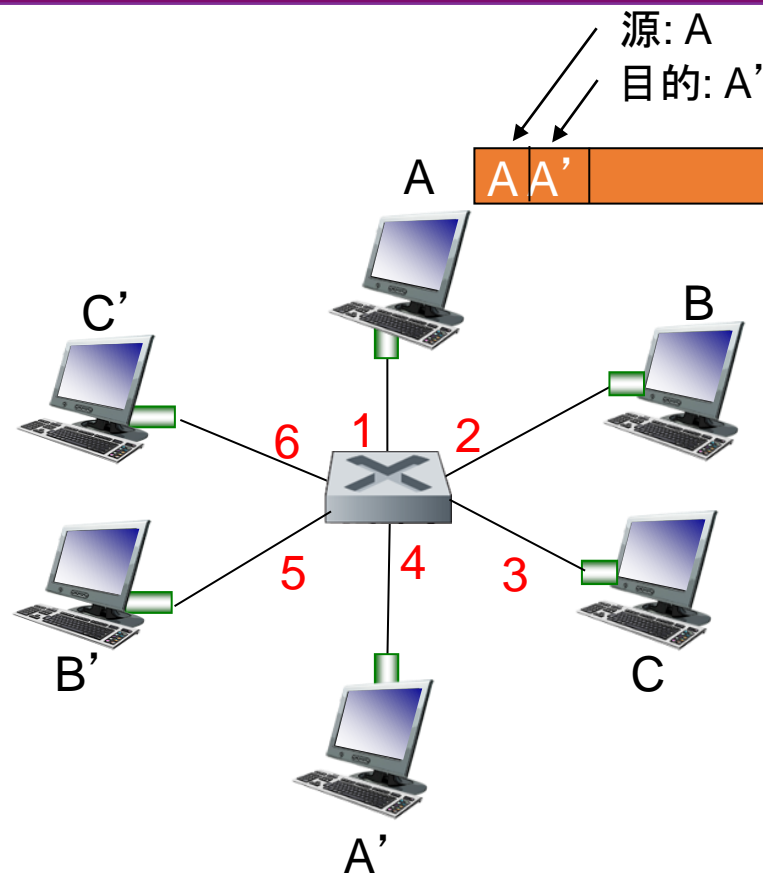
- ▶ 检查接收帧的MAC地址，基于**交换表**，将帧转发到一个或多个出口链路
- ▶ 当帧被转发时，可以采用全双工模式或半双工模式



交换表中的信息如何获取？（比较路由协议）

## 交换表的自学习

- 交换表不需要提前配置
- 交换机在转发数据帧的过程中学习哪个节点连接哪个接口
  - ▶ 当接收数据帧时，交换机基于数据帧的源地址和到达的接口记录MAC地址与接口的映射关系



MAC地址	接口	TTL
A	1	60

交换表（初始为空）

### 交换机：帧的过滤与转发

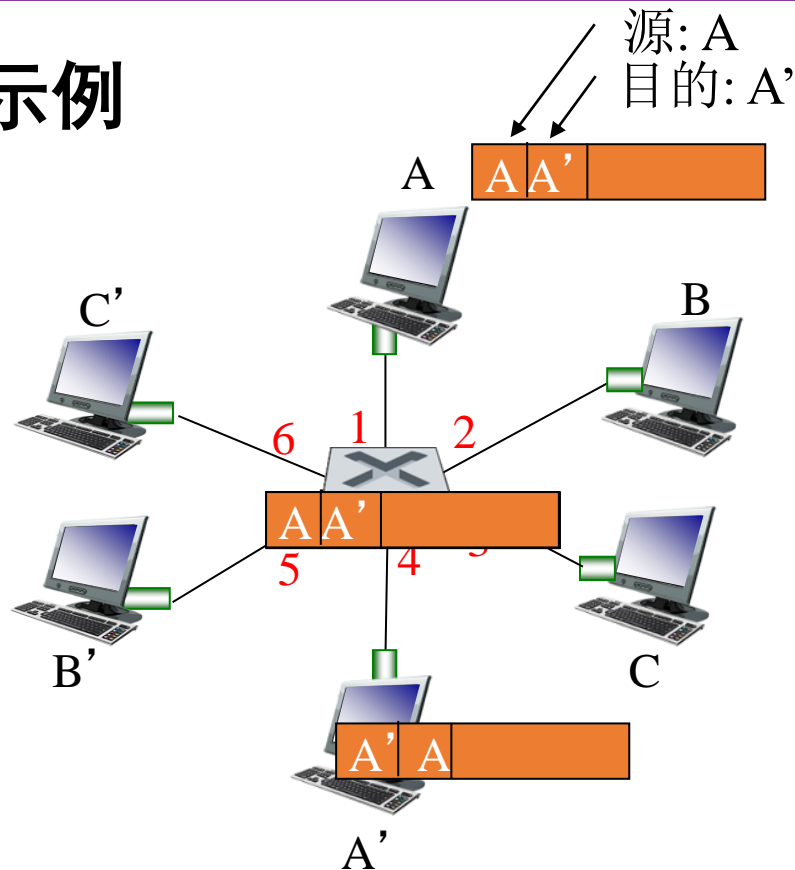
When frame received:

1. record link associated with sending host
2. index **switch table** using MAC dest. address
3. **if** entry found for destination  
  **then** {  
    **if** dest. on segment from which frame arrived  
      **then** drop the frame  
      **else** forward the frame on interface indicated  
    }  
  **else** flood



forward on all but the interface  
on which the frame arrived

## 自学习及转发示例



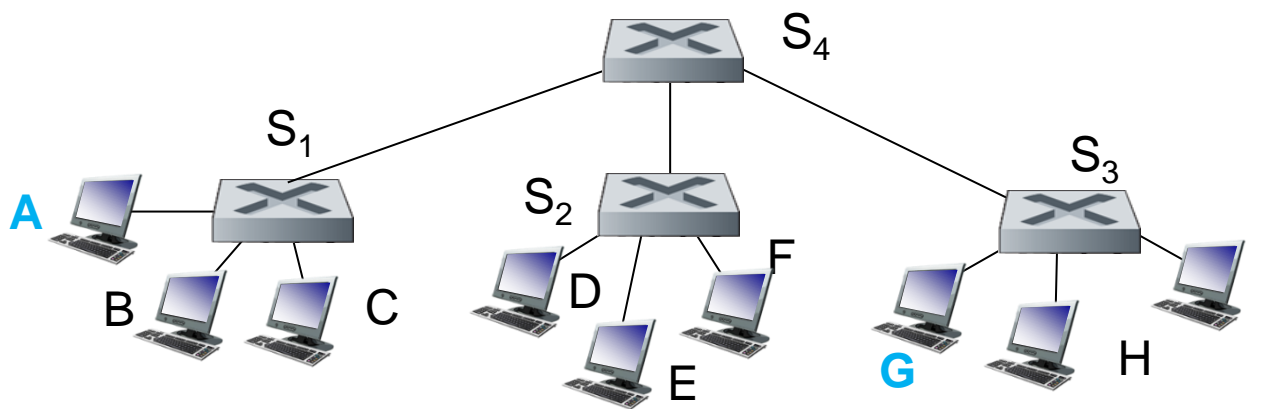
MAC地址	接口	TTL
A	1	60
A'	4	60

交换表（初始为空）

交换机中会有数据整帧丢失吗？

## 互联的交换机

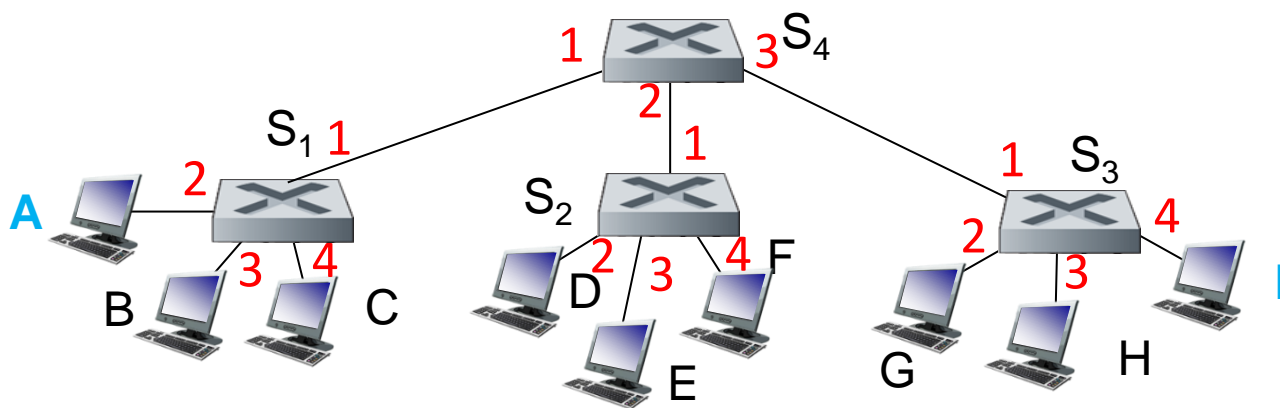
- 交换机能够相互连接



- **问题：**从A向G发送数据帧，S<sub>1</sub>如何知道转发到G的数据帧要经过S<sub>4</sub>和S<sub>3</sub>？

## 互联的交换机：示例

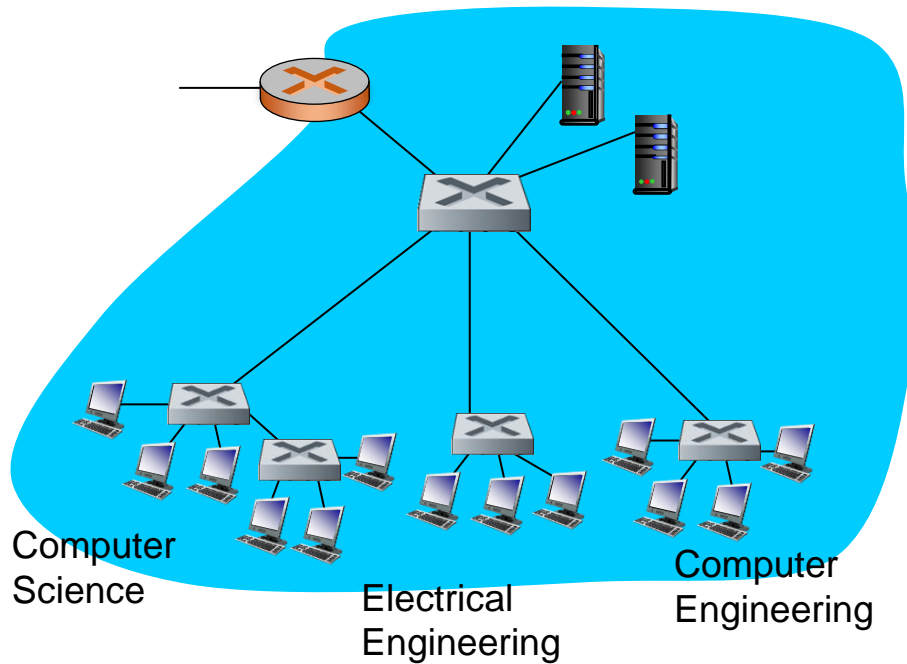
■ 例如：C发送帧到I，I给C返回响应帧



■ **问题：**给出S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>中的交换表，并说明数据帧的转发方法

思考：如果交换机之间连接存在环会如何？如何解决？

### 虚拟局域网VLAN: 动机



#### 考虑场景:

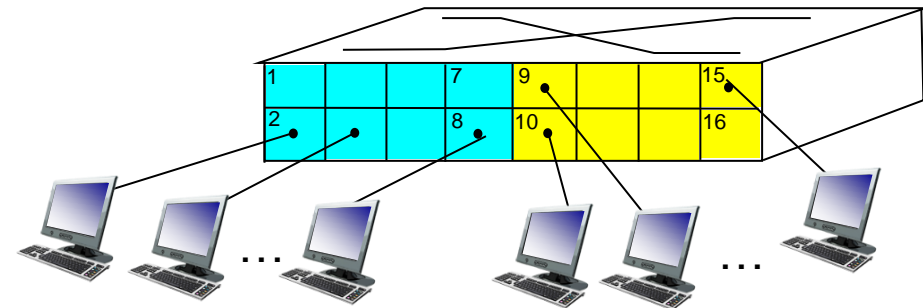
- CS的用户将办公室移到EE, 但仍希望能连接到CS的交换机
- 单一广播域:
  - 所有2层广播流量（如ARP, DHCP等, 及目的MAC地址不确定的数据帧）会传播到整个网络
  - 存在安全性、私密性、及效率问

## 虚拟局域网VLAN

### VLAN

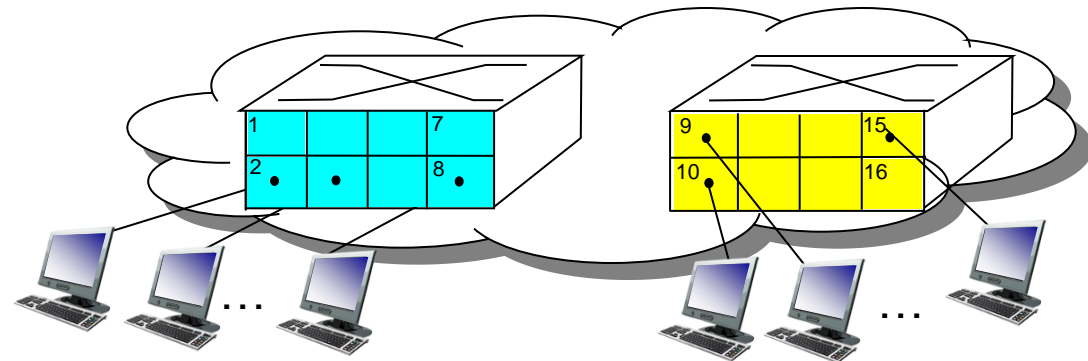
支持VLAN的交换机能够在单一物理LAN结构上配置定义多个虚拟LAN

**基于端口的VLAN:** 交换机的端口被分组，单个物理交换机能够作为多个虚拟交换机运行



Electrical Engineering  
(VLAN ports 1-8)

Computer Science  
(VLAN ports 9-15)



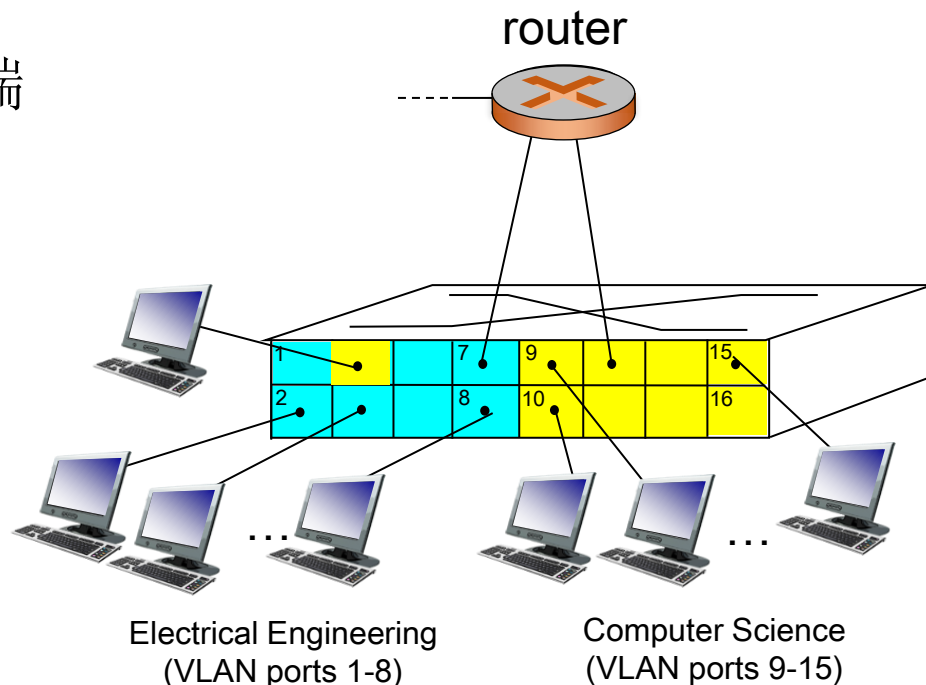
Electrical Engineering  
(VLAN ports 1-8)

Computer Science  
(VLAN ports 9-16)



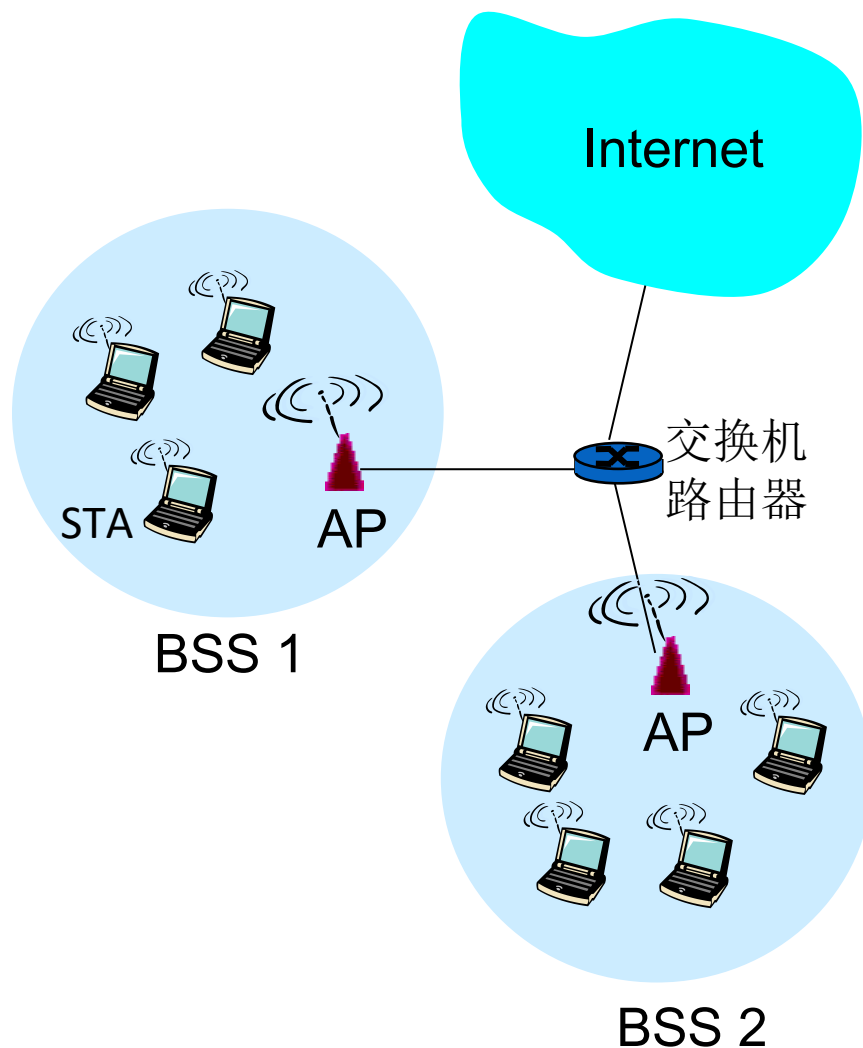
## 基于端口VLAN原理

- **隔离通信流量**: 来自于或到达端口1-8的流量只能到达1-8
  - 也可以基于MAC地址定义VLAN
- **动态配置**: 端口能够在VLAN之间动态配置
- **VLAN之间转发**: 类似独立的交换机, 通过路由进行转发



三层交换技术如何工作？

## 802.11无线局域网组网模式



### 基础架构模式：

- 站点 (STA)
- 访问点 (AP)
- 基本服务器 (BSS)
- 扩展服务器 (ESS)

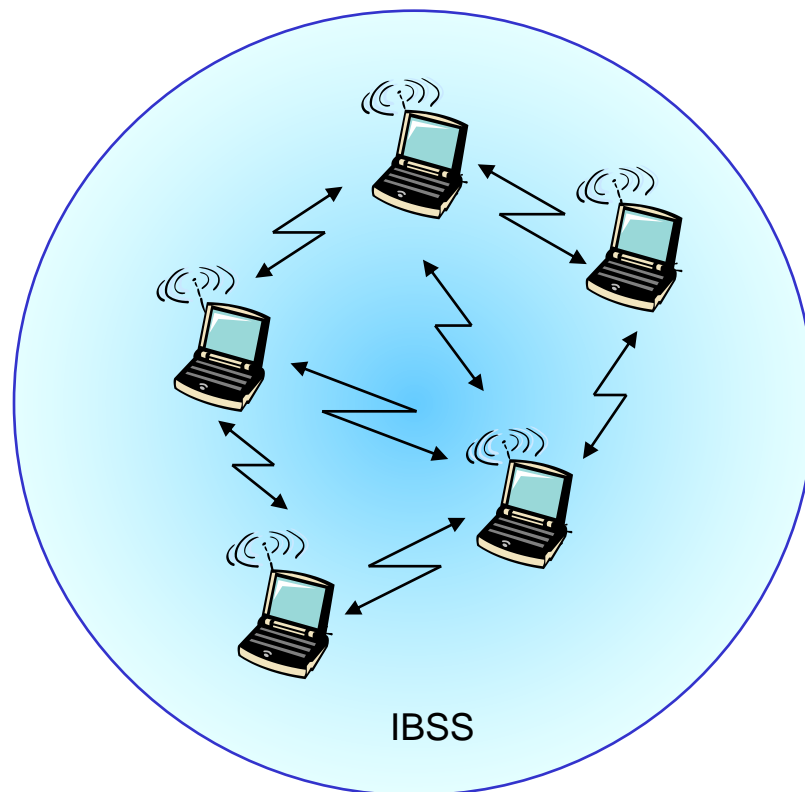
注：每个BSS中的站点和AP共享同一无线信道；  
站点通过AP转发数据

## 802.11无线局域网组网模式（续）

### □ 自组织模式：

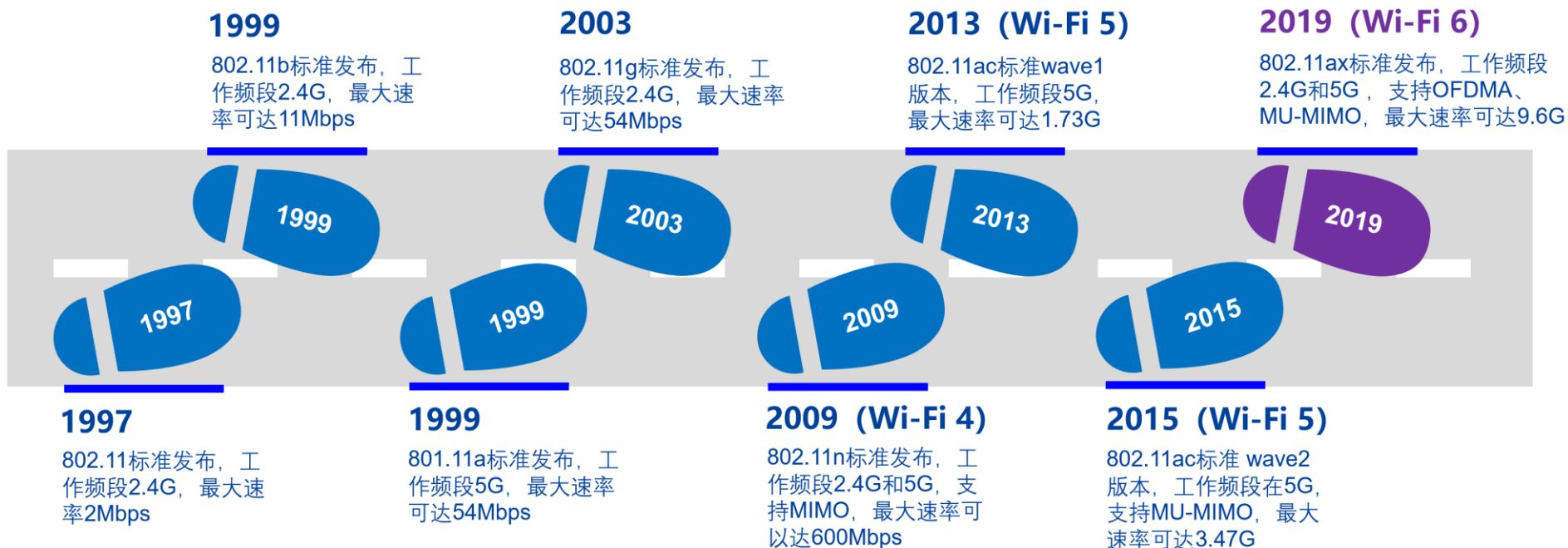
- 站点（STA）
- 独立基本服务器（IBSS）
- 站点之间直接通信
- 共享同一无线信道

注：每个站点在某个时刻只能工作在一种模式



# 5.7 无线局域网

## 802.11标准化工作



发布年份	802.11 标准	频段	新命名
2009	802.11n	2.4 GHz 或 5 GHz	Wi-Fi 4
2013	802.11ac wave1	5 GHz	Wi-Fi 5
2015	802.11ac wave2	5 GHz	
2019	802.11ax	2.4 GHz 或 5 GHz	Wi-Fi 6

## 802.11无线局域网体系结构

### ■ 物理介质相关子层（PMD）

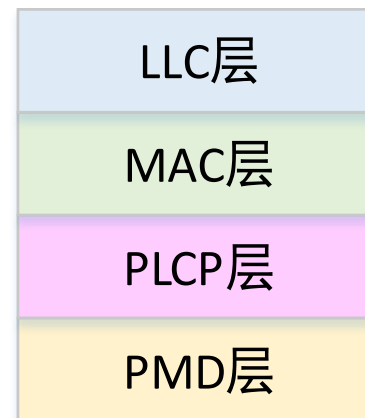
- 调制解调和编码/解码

### ■ 物理层汇聚协议（PLCP）

- 向上提供独立于传输技术的物理层访问点

### ■ 介质访问控制层

- 可靠数据传输
- 控制介质访问
- 安全机制
- .....



## 无线局域网需要解决的问题

### ■ 有限的无线频谱带宽资源

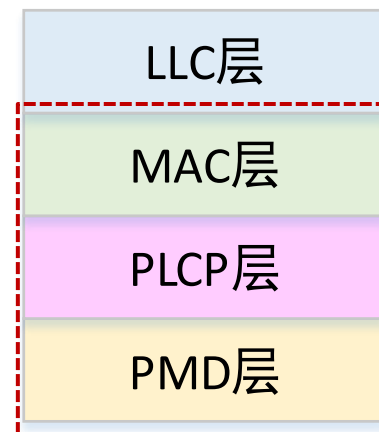
- 通道划分、空间重用
- 提高传输速率，解决传输问题
- 提高抗干扰能力和保密性

### ■ 共享的无线信道

- 介质访问控制方法（CSMA/CA）
- 可靠性传输、安全性

### ■ 组网模式管理

- BSS构建、关联、认证
- 移动性支持
- 睡眠管理



### 802.11介质访问控制方法

#### ❑ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoid)

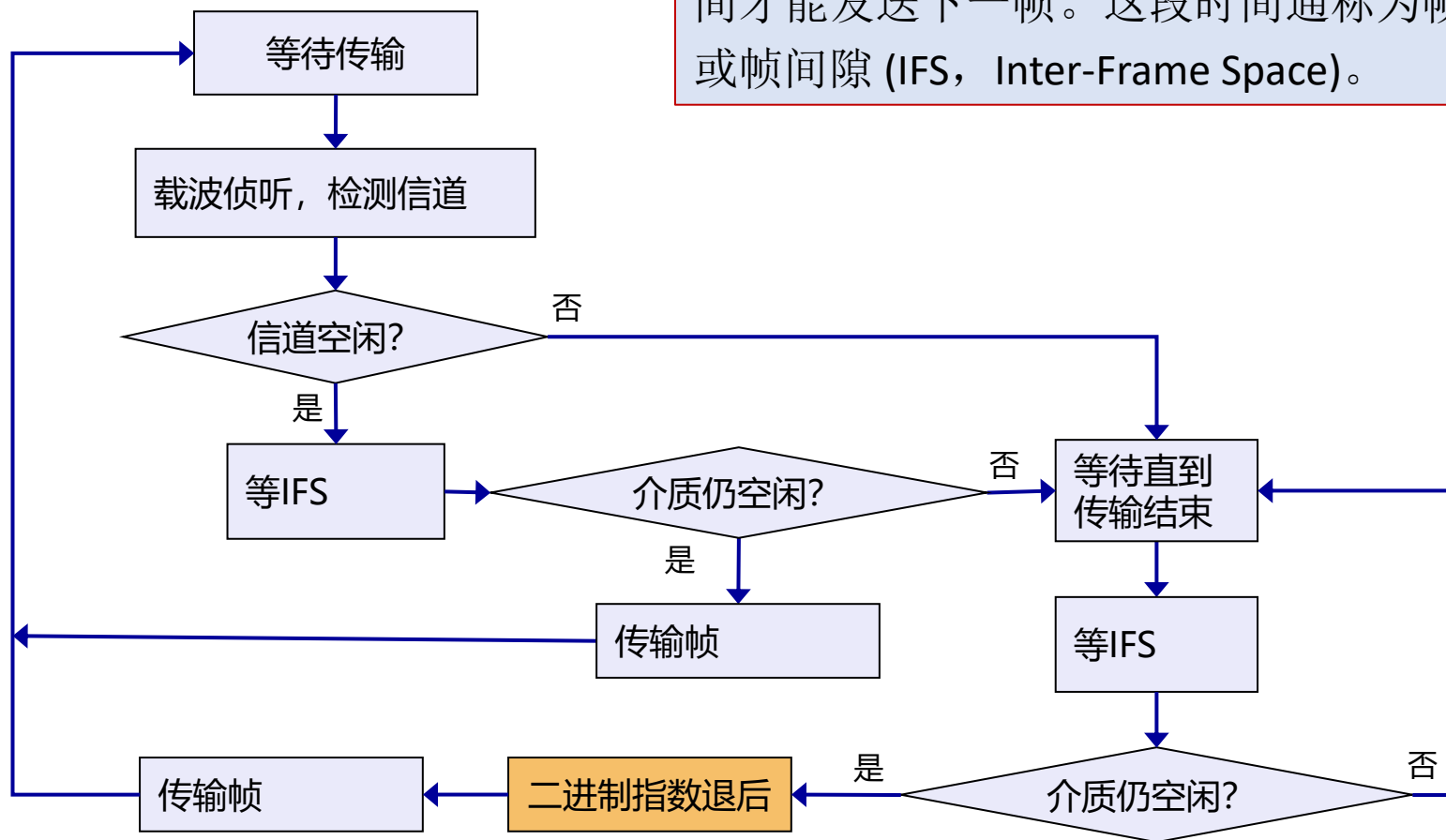
- 当信道空闲时间大于IFS（帧间隙），立即传输
- 当信道忙时，延迟直到当前传输结束+IFS时间
- 开始随机退后过程
  - 从(0, CWindow)中选择一个随机数作为退后计数器 (backoff counter)
  - 通过侦听确定每个时间槽是否活动
  - 如果没有活动，则减少退后时间
- 退后过程中如果信道忙，则挂起退后过程
- 在当前帧传输结束后恢复退后过程

使用退后过程延迟发送的目的在于避免多个站点同时传输引起的冲突

## 802.11介质访问控制方法（续）

### CSMA/CA发送流程

所有站点完成发送后，必须等待一段很短的时间才能发送下一帧。这段时间通称为帧间间隔或帧间隙 (IFS, Inter-Frame Space)。

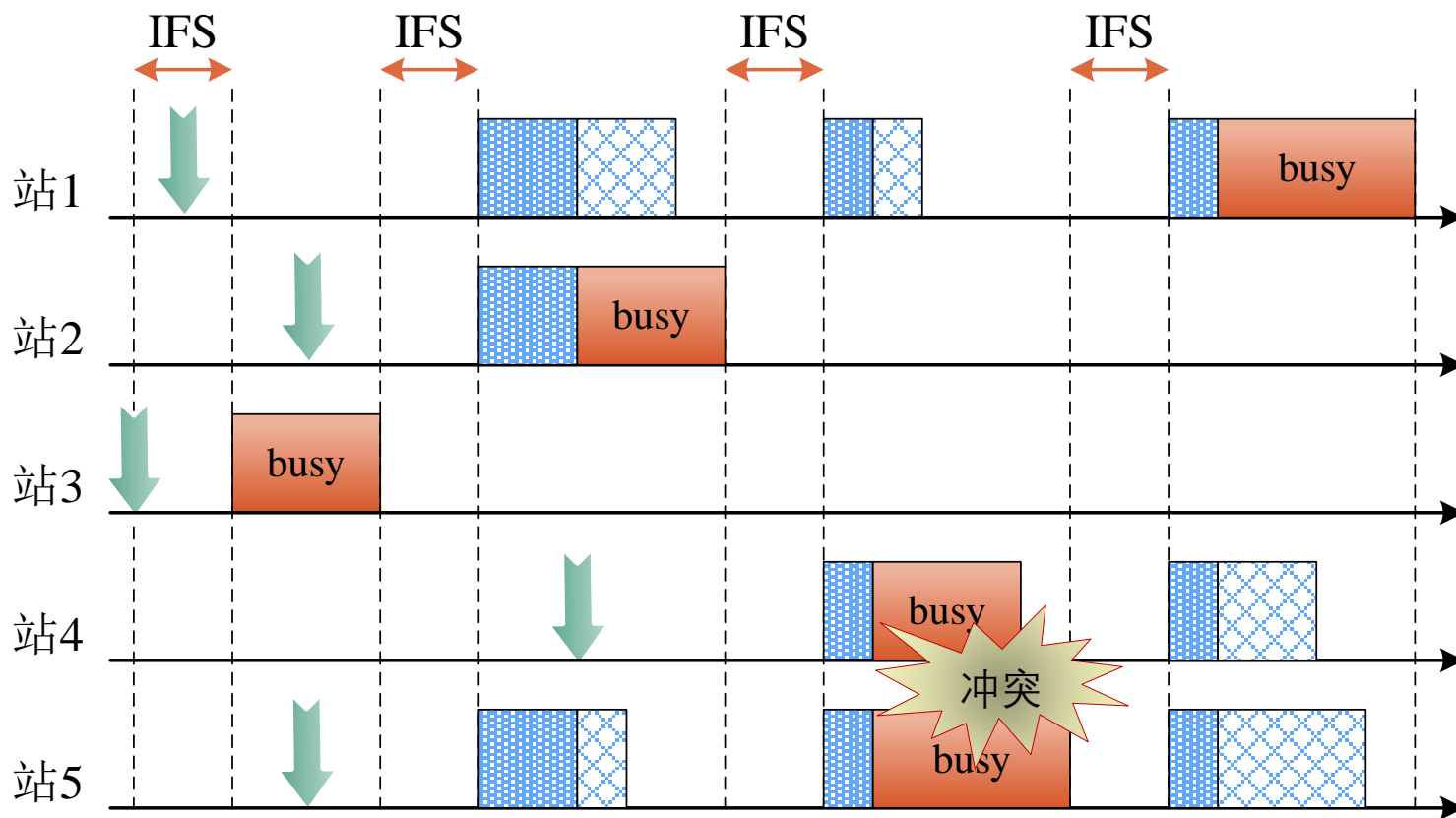




# 5.7 无线局域网

## 802.11介质访问控制方法（续）

### □ CSMA/CA示例



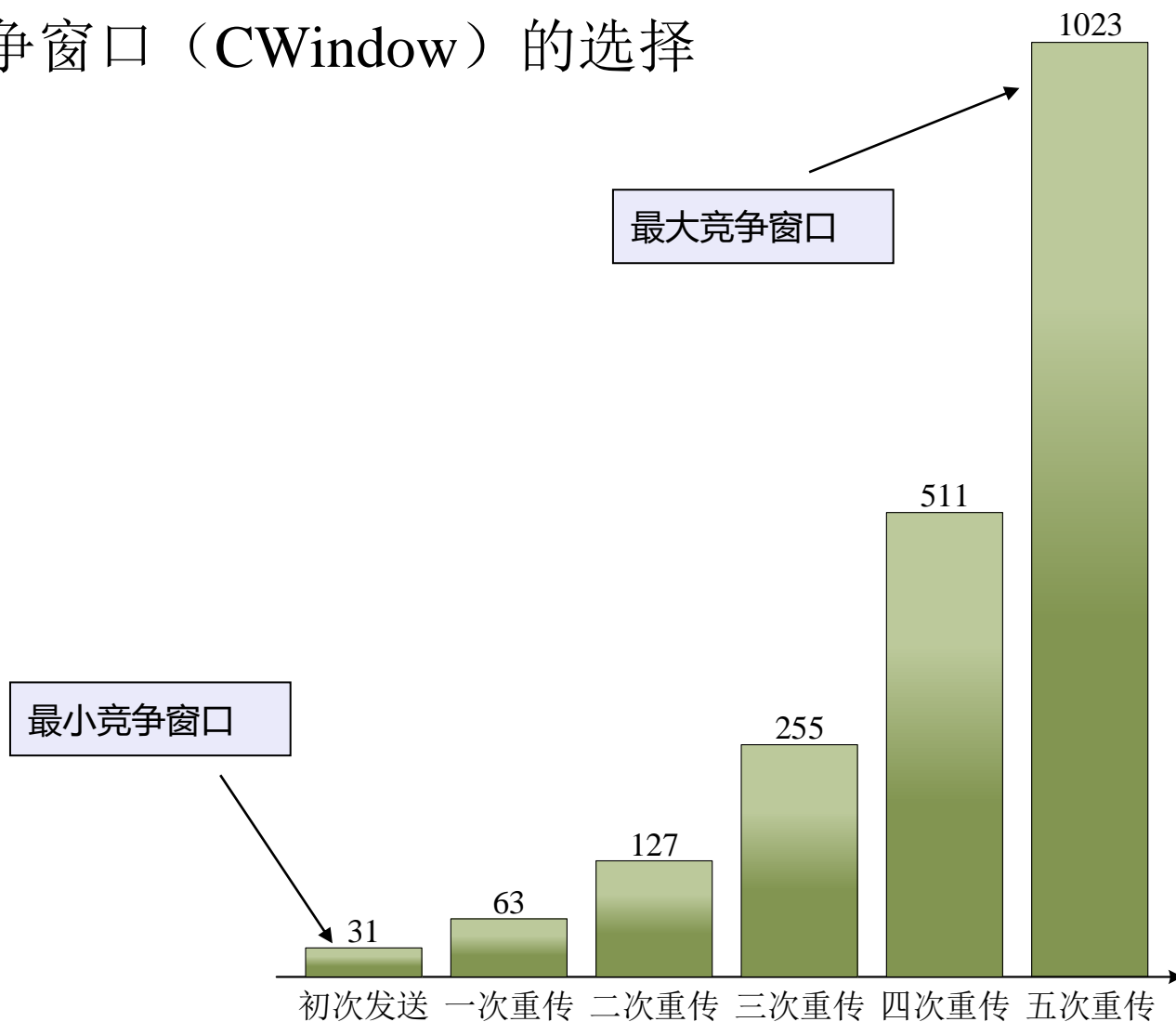
## 802.11介质访问控制方法（续）

### ❑ 竞争窗口（CWindow）的选择

- 竞争窗口的选择应于网络负载情况相适应
- 发生冲突的次数能间接反应网络的负载情况
  - 冲突次数越多，表明网络负载越重
- 二进制指数退后算法：
  - 竞争窗口的初始值为某个最小值，发生冲突时加大窗口，直到达到最大值。
- 二进制指数退后算法对网络负载情况的自适应性
  - 当网络负载轻时，冲突的机率较小，选择较小的竞争窗口，减小站点的等待时间
  - 当网络负载重时，冲突的机率较大，选择较大的竞争窗口，避免站点间选择的随机值过于接近，从而导致太多的冲突

### 802.11介质访问控制方法（续）

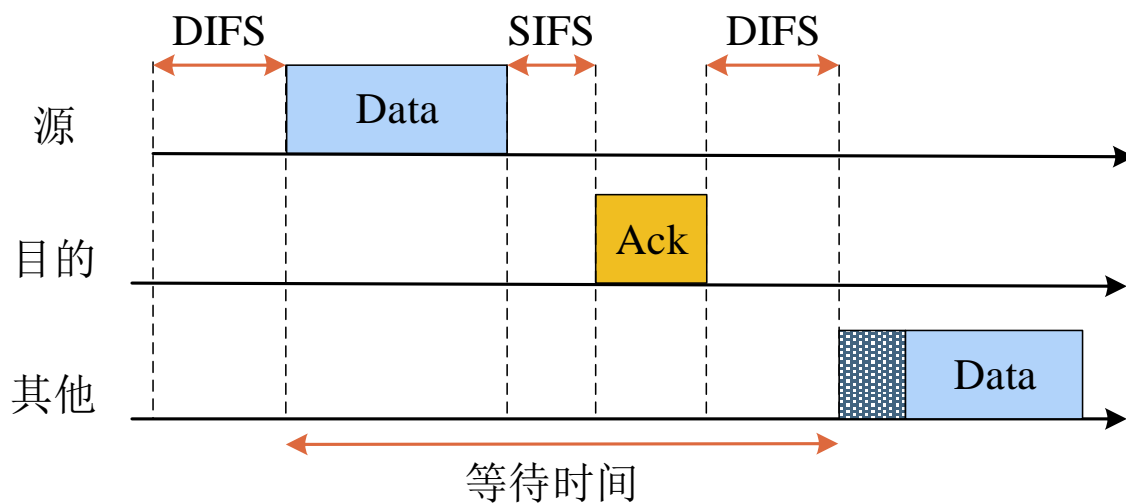
#### ❑ 竞争窗口（CWindow）的选择



## 802.11介质访问控制方法（续）

### ❑ 差错检测与确认重传

- 差错检测：32位CRC校验（与以太网相同）
- 采用停等机制：发送数据，等待确认，超时重传（重传定时器）
- 如果达到最大重传限制，该帧被丢弃，并告知上层协议

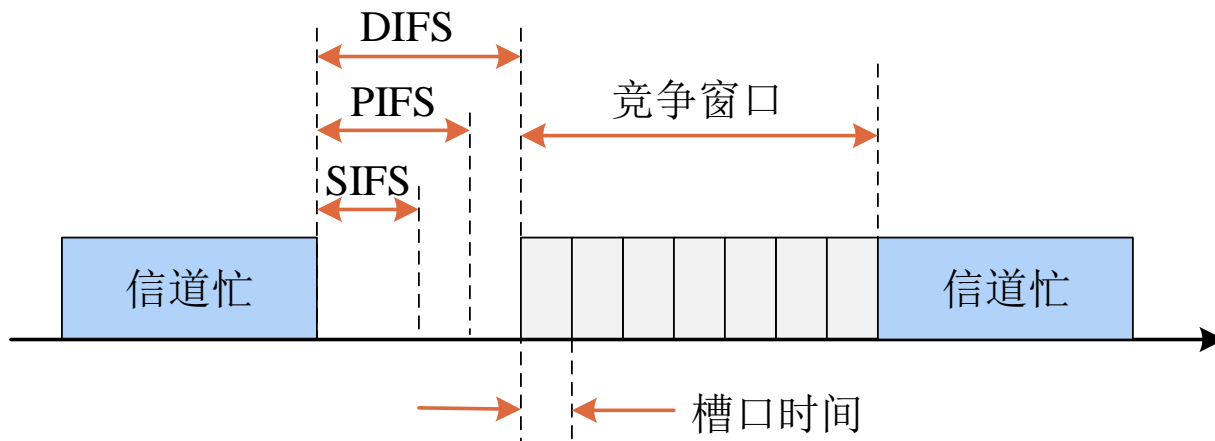


**思考：**采用停等机制的原因？为什么不采用流水线机制？

## 802.11介质访问控制方法（续）

### □ 不同帧间隙控制优先级

- SIFS（Short IFS）：最高优先级，用于Ack, CTS, 轮询响应等
- PIFS（PCF IFS）：中等优先级（SIFS+1），轮询服务
- DIFS（DCF IFS）：最低优先级（SIFS+2），异步数据服务



## 802.11介质访问控制方法（续）

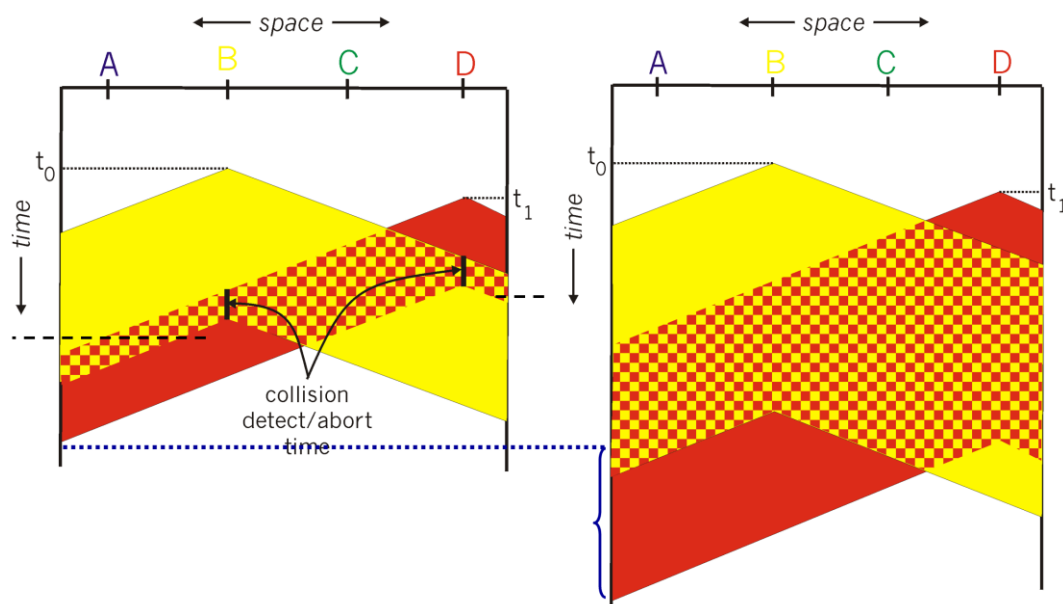
### ❑ 冲突会发生

- 几乎同时开始发送的节点之间
  - 由于传播延时，类似以太网
- 隐藏终端问题

### ❑ 超时重传解决传输错误

### ❑ 长帧冲突的代价更高

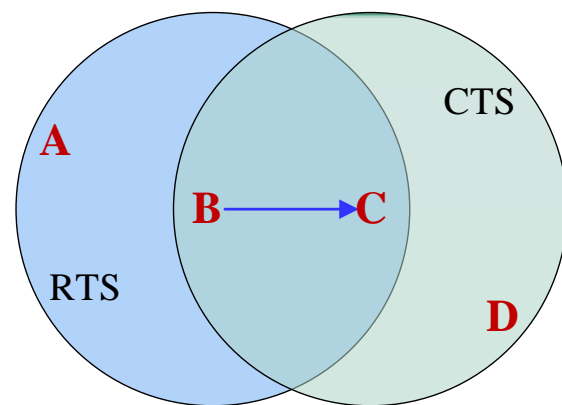
- 如何减少长帧冲突？



### 802.11介质访问控制方法（续）

#### □ 冲突避免之RTS-CTS机制

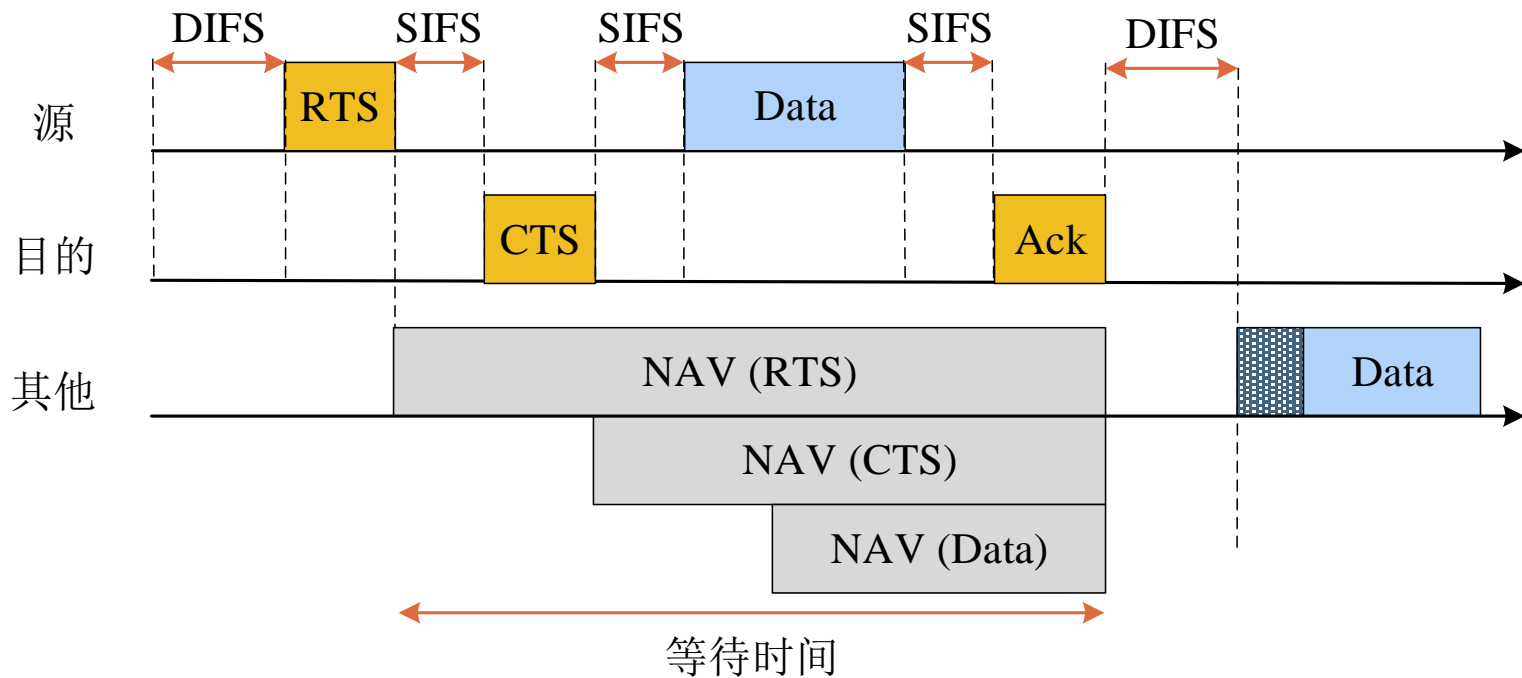
- **目的：通过信道预约，避免长帧冲突**
- 发送端发送RTS（request to send）
- 接收端回送CTS（clear to send）
- RTS和CTS中的Duration ID中指明传输所需时间（数据+控制）
- 其他相关站点能够收到RTS或（和）CTS，维护NAV（Network Allocation Vector）
  - 虚拟载波侦听（Virtual Carrier Sense）
- 通过RTS和CTS帧很短，冲突概率小，信道浪费少



## 802.11介质访问控制方法（续）

### □ RTS-CTS机制示例：

- 源站点的隐藏站点可以接收到目的站点发送的CTS

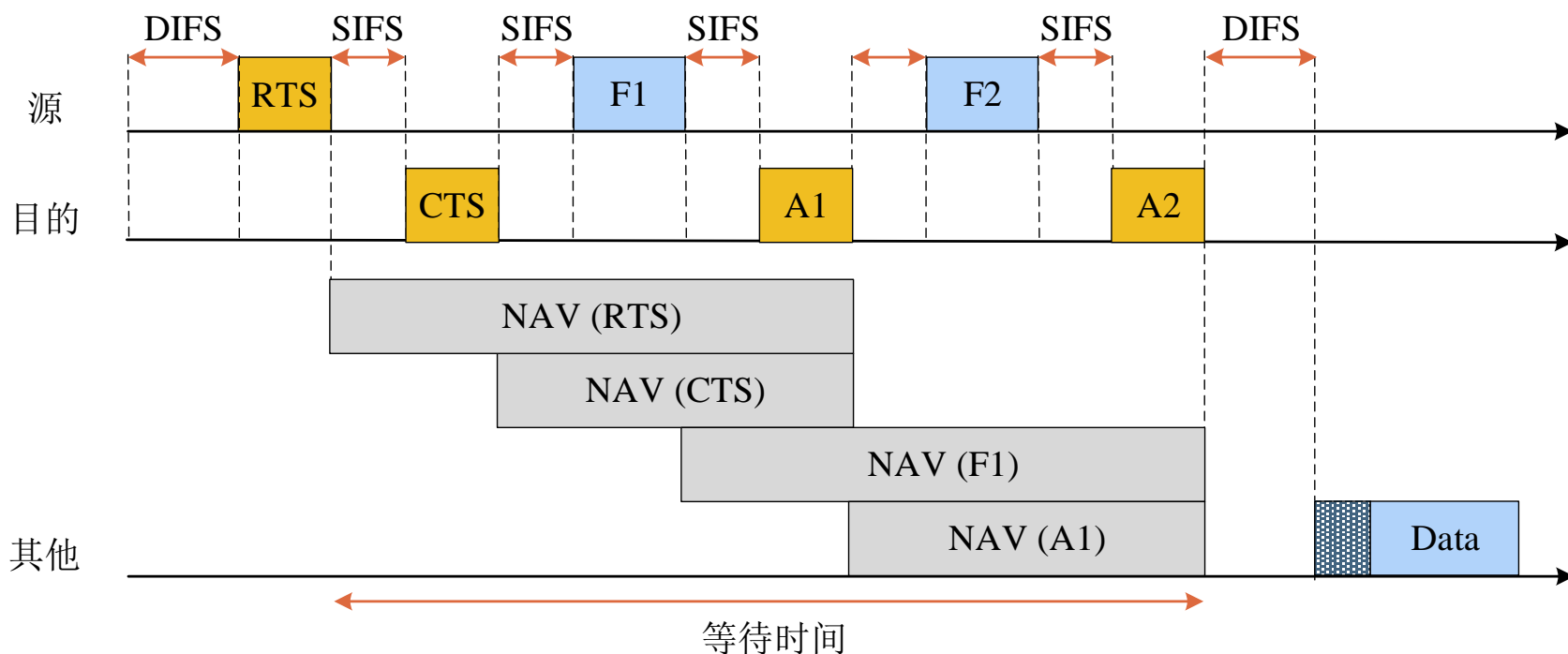




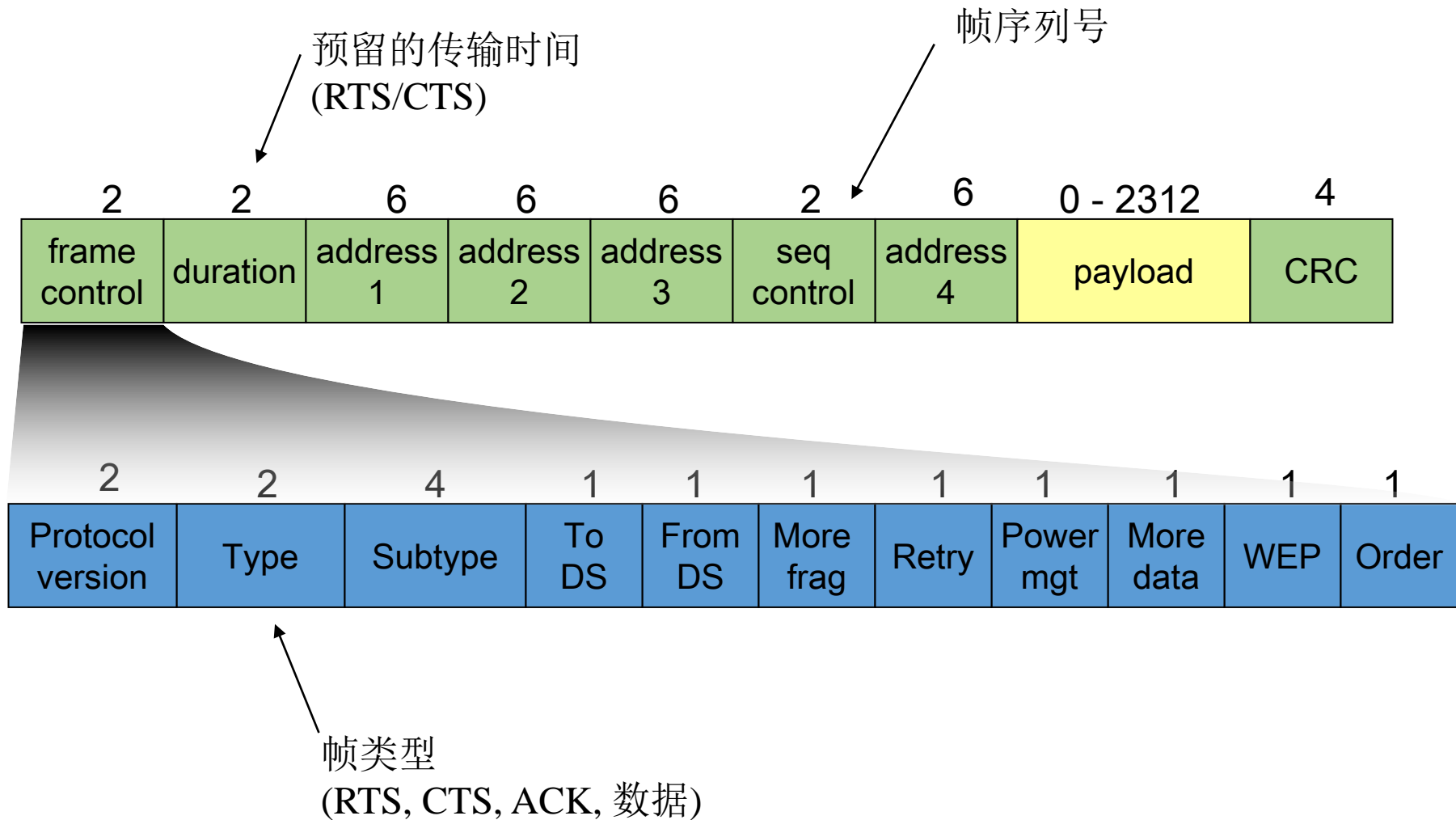
## 802.11介质访问控制方法（续）

### □ 如何应对无线链路较高的出错率？

- 解决方法：采用较小的帧（将用户数据帧分段的机制对用户透明）
- $F_i$  帧中携带  $F_{i+1}$  的传输时间



## 802.11帧结构



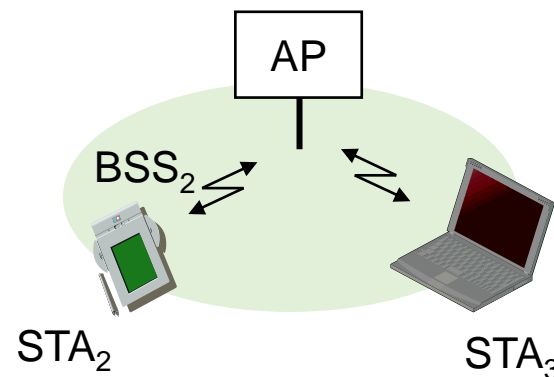
## 802.11无线局域网组网方法

### ■ 基础架构模式

✓ 通过AP接入有线网络（互联网络）

✓ **关键：如何关联到AP？**

- BSSID: Basic Service Set Identifier
  - AP的MAC地址，标识一个基本服务集
- SSID: Service Set Identifier
  - 32字节网名，标识一个扩展服务集，包含一个或多个基本服务集
- 关联到AP的三个阶段
  - 扫描（Scan）、认证（Authentication）、关联（Association）



## 802.11无线局域网组网方法（续）

### ❑ 被动扫描：

- AP周期性发送**Beacon**帧，站在11个通道上扫描Beacon帧
- Beacon帧提供的AP相关信息包括：
  - Timestamp, Beacon Interval  
(eg.100ms), Capabilities, SSID, Supported Rates, parameters
  - **Traffic Indication Map**

### ❑ 主动扫描：

- 站点依次在11个信道发出包含SSID的**Probe Request**帧，具有被请求SSID的AP返回**Probe Response**帧
- Probe Response帧包含AP相关信息：
  - Timestamp, Beacon Interval, Capabilities, SSID, Supported Rates, parameters

## 802.11无线局域网组网方法（续）

### □ 认证:

- 当站点找到与其有相同 SSID 的 AP，在 SSID 匹配的 AP 中，根据收到的 AP 信号强度，选择一个信号最强的 AP，然后进入认证阶段。只有身份认证通过的站点才能进行无线接入访问。802.11提供几种认证方法，有简单有复杂，如采用802.1x/EAP认证方法时大致过程如下：

- 站点向AP发送认证请求
- AP向认证服务器发送请求信息要求验证站点身份
- 认证服务器认证完毕后向AP返回相应信息
- 如果站点身份不符，AP向站点返回错误信息
- 如果站点身份相符，AP向站点返回认证响应信息

### 802.11无线局域网组网方法（续）

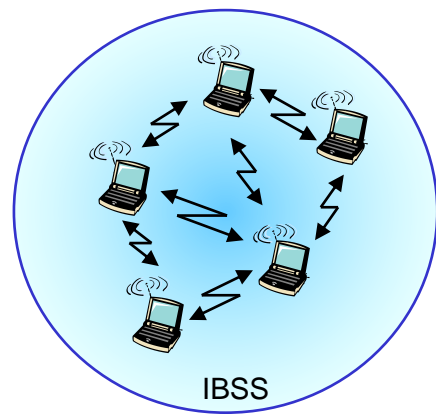
#### □ 关联:

- 当 AP 向站点返回认证响应信息。身份认证获得通过后，进入关联阶段
  - 站点向 AP 发送关联请求（**Association Request**）
    - Capability, Listen Interval, SSID, Supported Rates
  - AP 向站点返回关联响应（**Association Response**）
    - Capability, Status Code, **Station ID**, Supported Rates
  - AP维护**站点关联表**，并记录站点的能力（如能够支持的速率等）

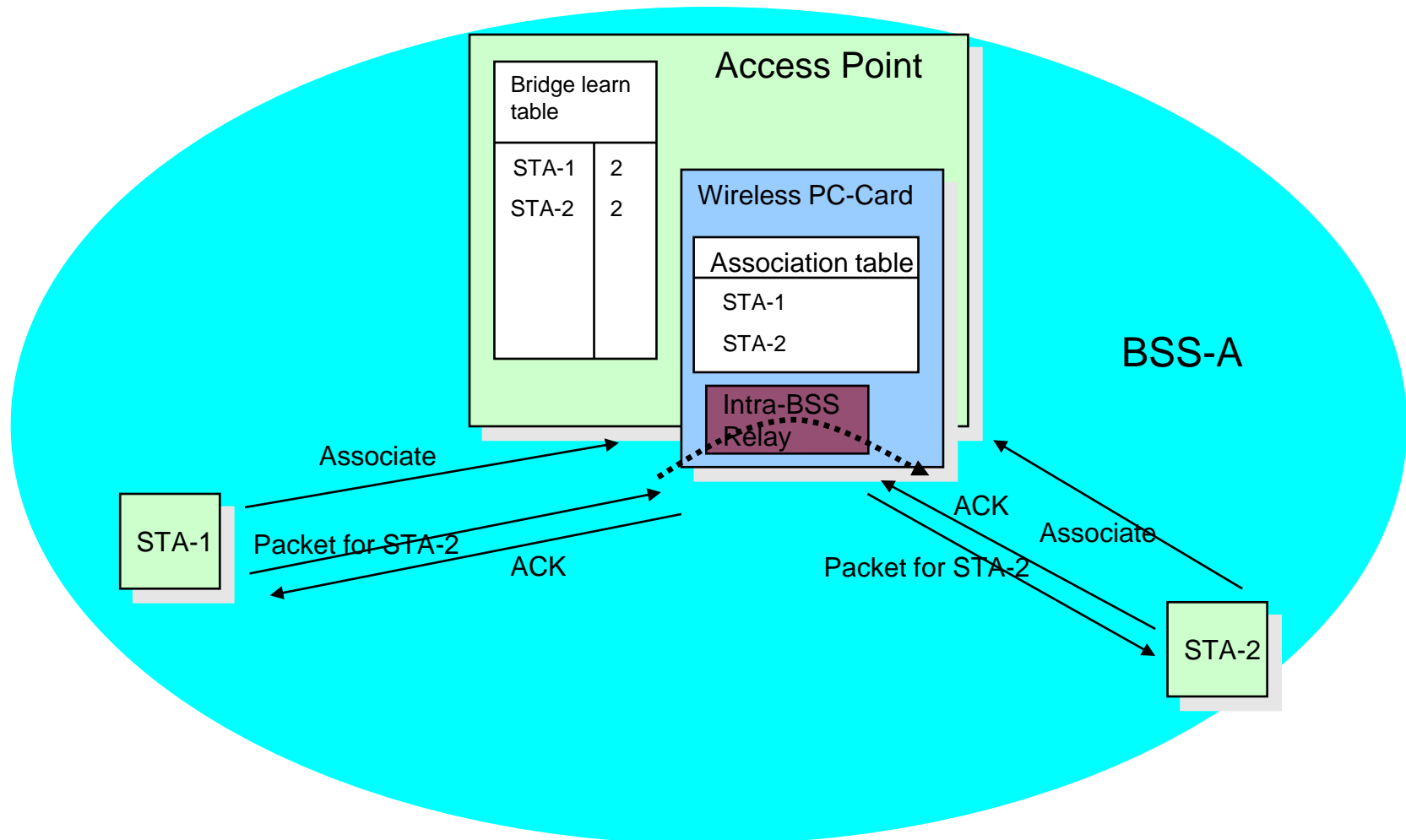
## 802.11无线局域网组网方法（续）

### □ 自组织模式

- 建立独立基本服务集（IBSS），站点之间直接通信
- 站点设成 Ad-hoc 模式
- 站点先寻找具有指定SSID的IBSS是否已存在。如果存在，则加入；若不存在，则自己创建一个IBSS，发出Beacon，等其他站来加入。
- IBSS中的所有站点参加发送Beacon，每个站点在Beacon窗口竞争Beacon的产生。对于每个站点：
  - 确定一个随机数 $k$
  - 等待 $k$ 个时间槽
  - 如果没有其他站点发送Beacon，则开始发送Beacon

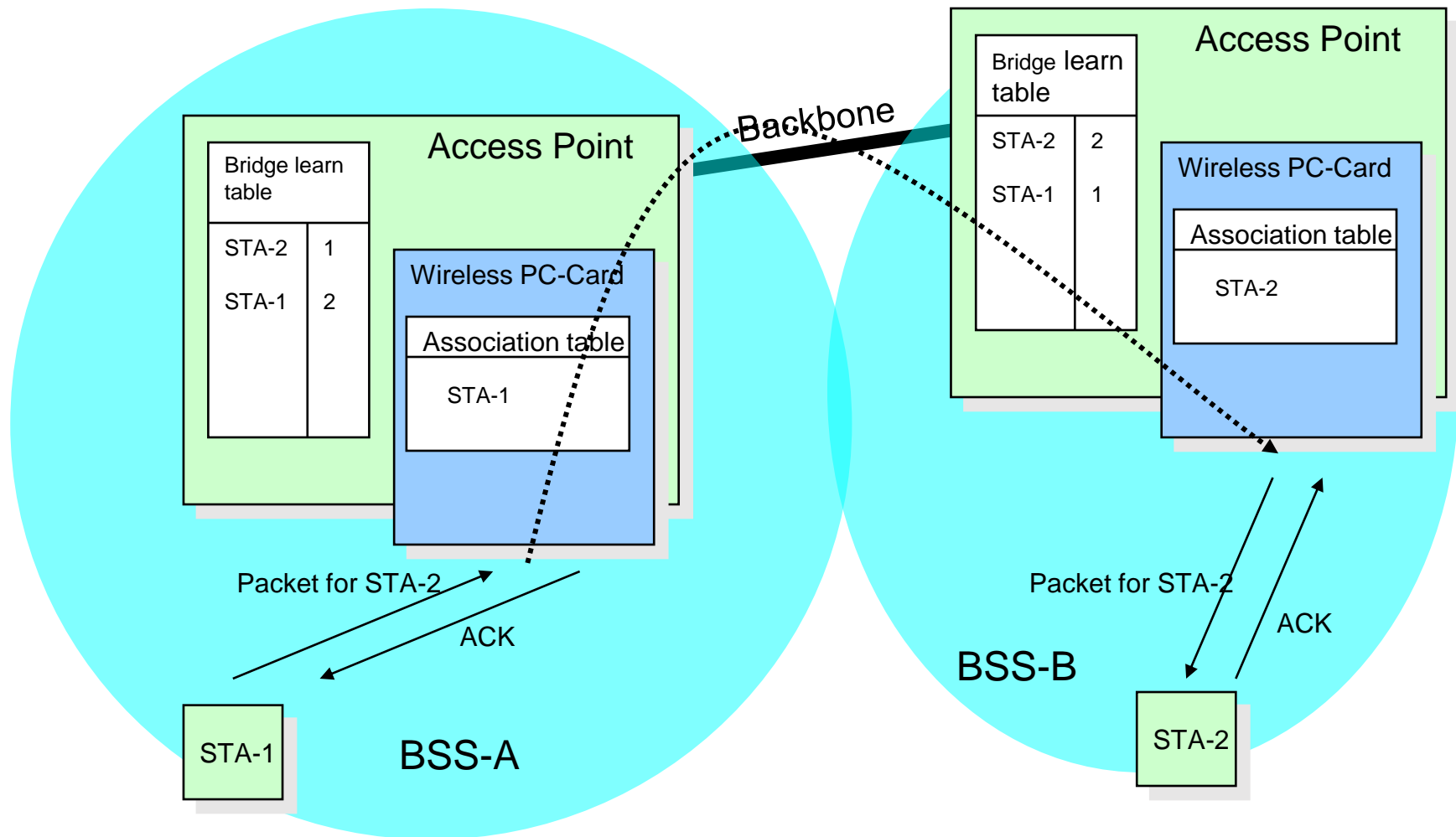


## BSS内部数据传输





## BSS之间数据传输



- 接口层基础
- 局域网体系结构与组网方法
- 局域网编址与ARP协议
- 链路层差错控制
- 共享式与交换式以太网
- 虚拟局域网
- 无线局域网