



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

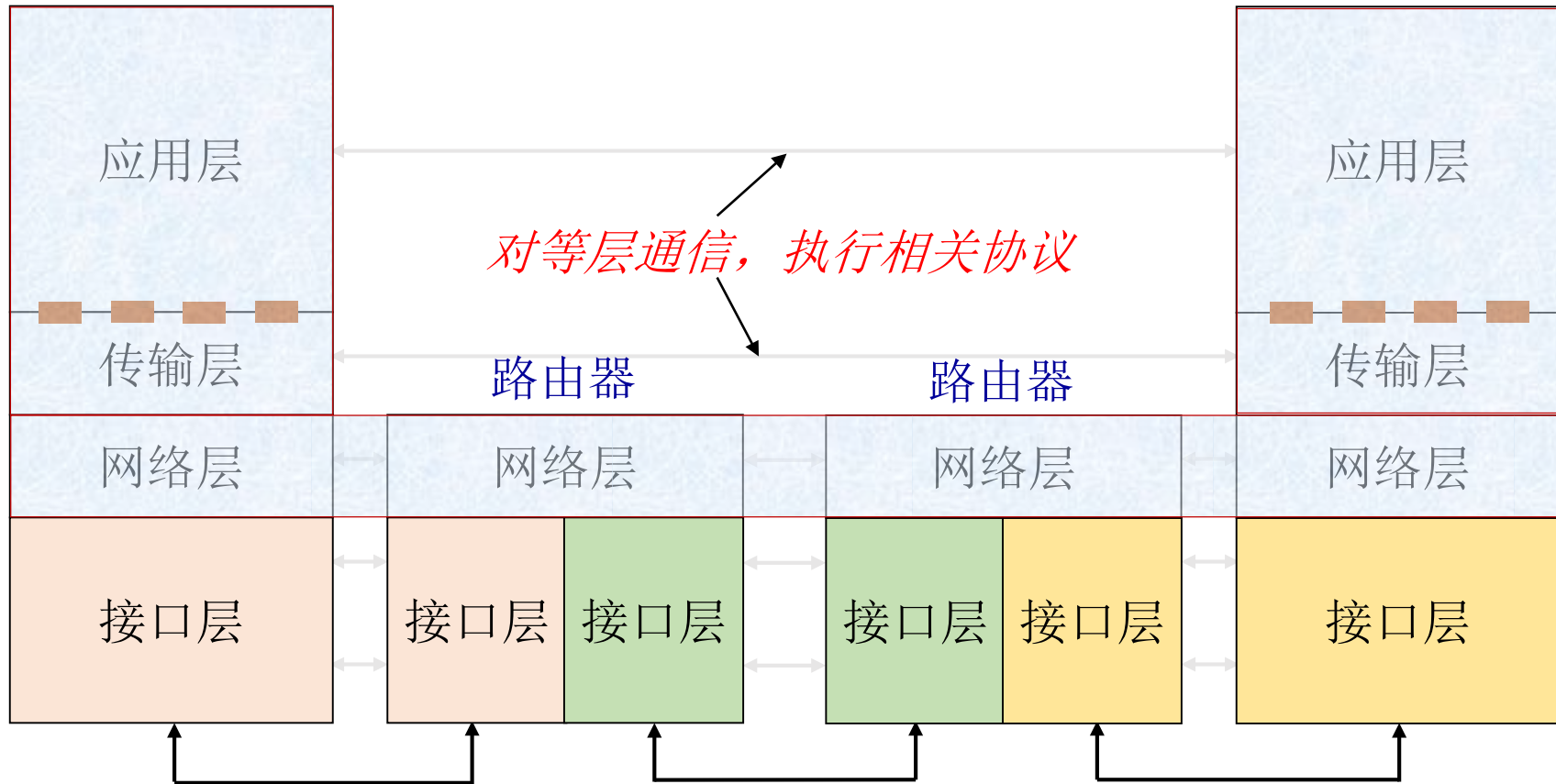
计算机网络与信息安全研究室
计算机学院&网络空间安全学院



- 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 不考
- 5.7 无线局域网

5.1 接口层基础

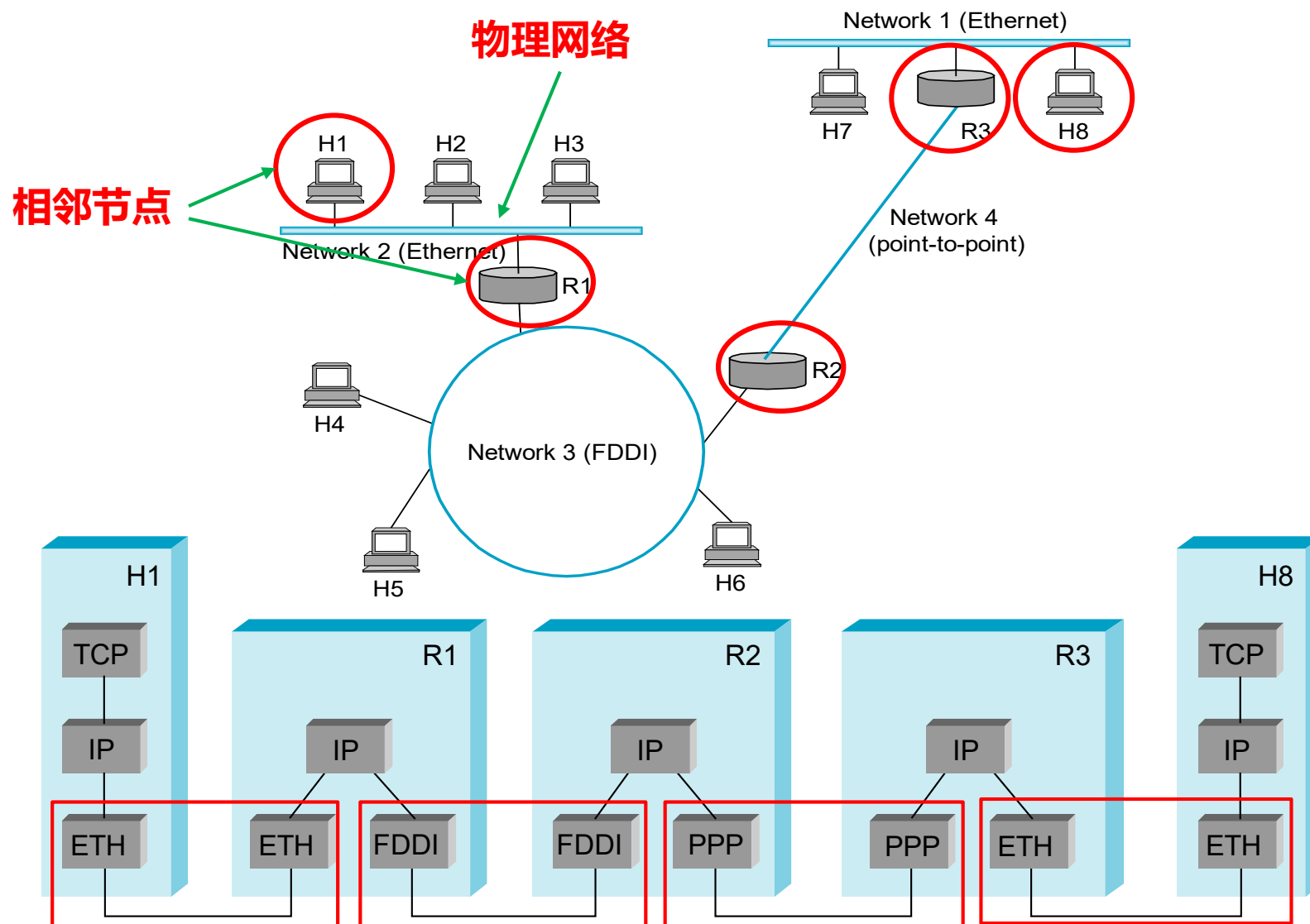
TCP/IP体系结构



- 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

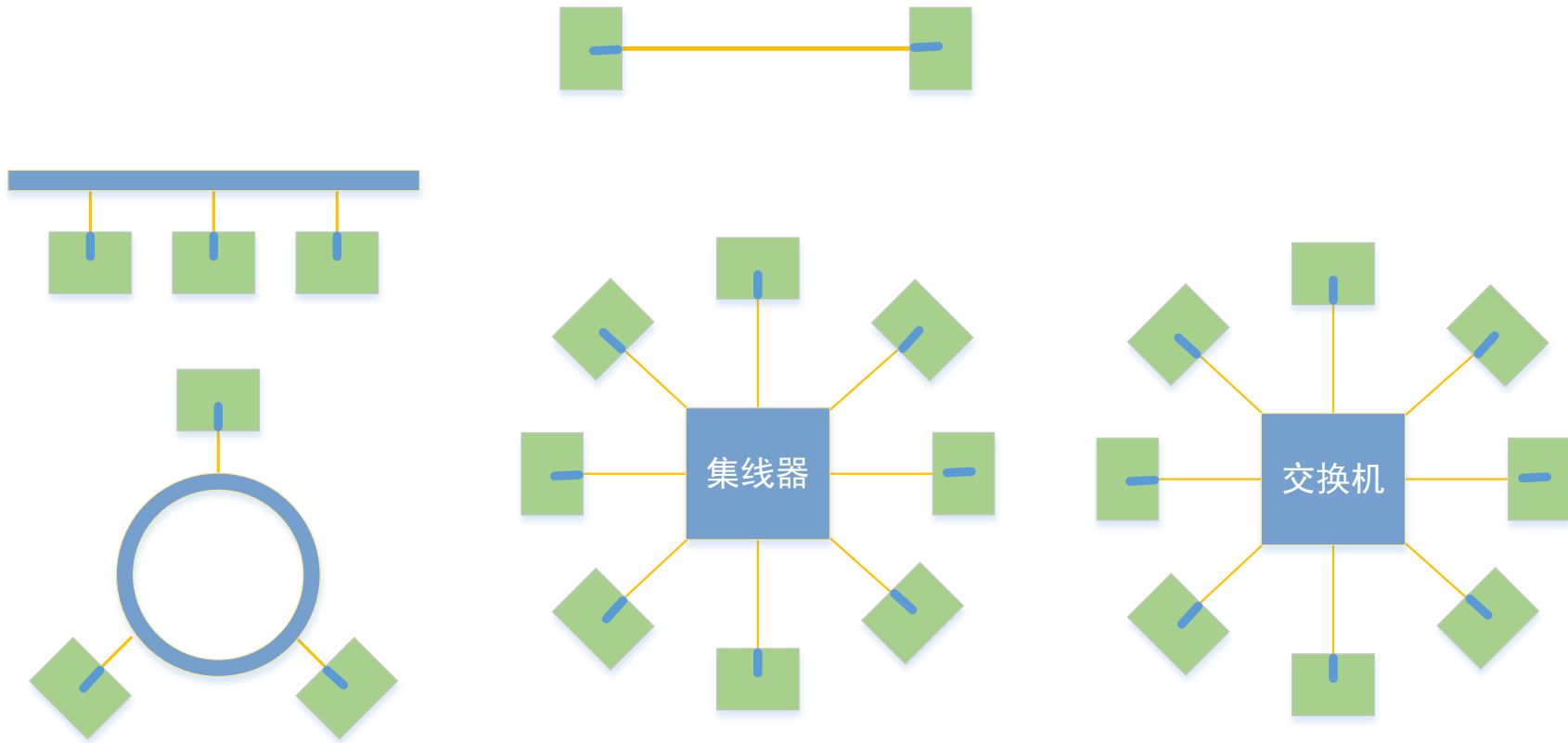
5.1 接口层基础

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

接口层功能

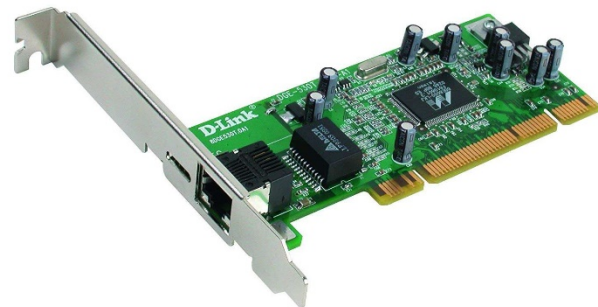
■ 物理层：提供位流服务

- ▶ 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

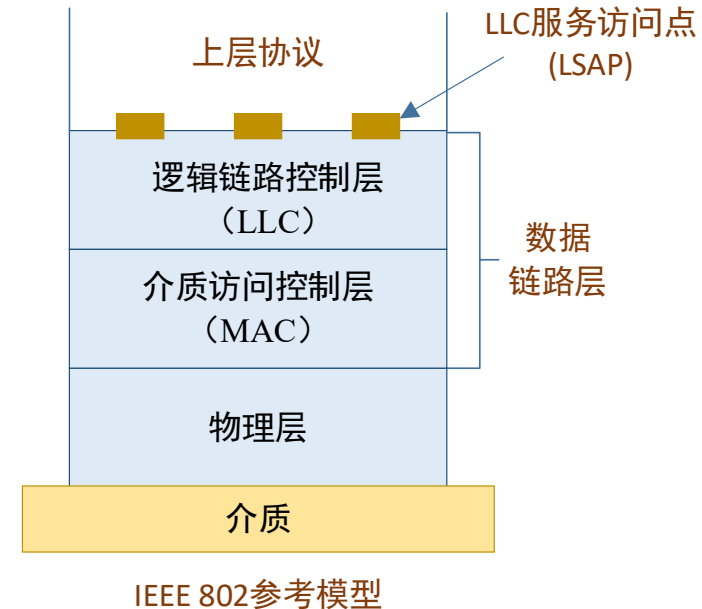
局域网体系结构与数据封装

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

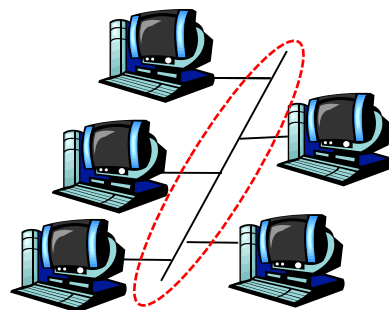


5.2 局域网体系结构与组网方法

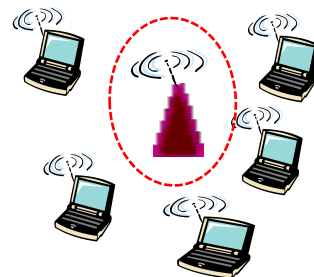


■ 共享式局域网

- ▶ 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**



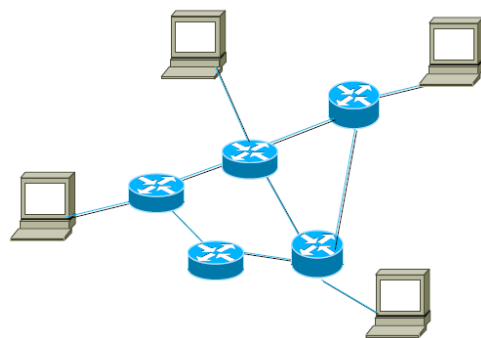
共享式以太网



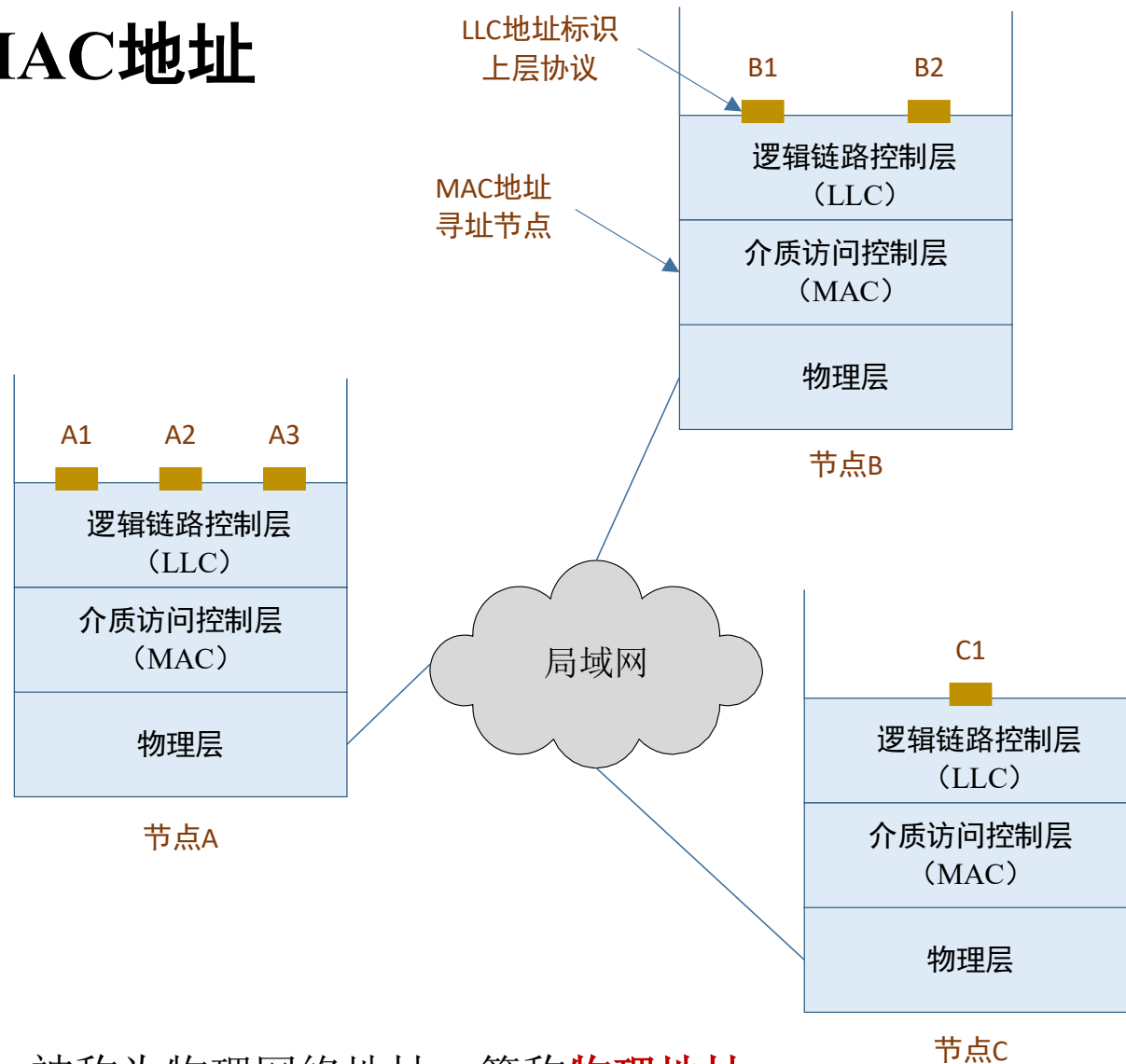
802.11无线局域网

■ 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

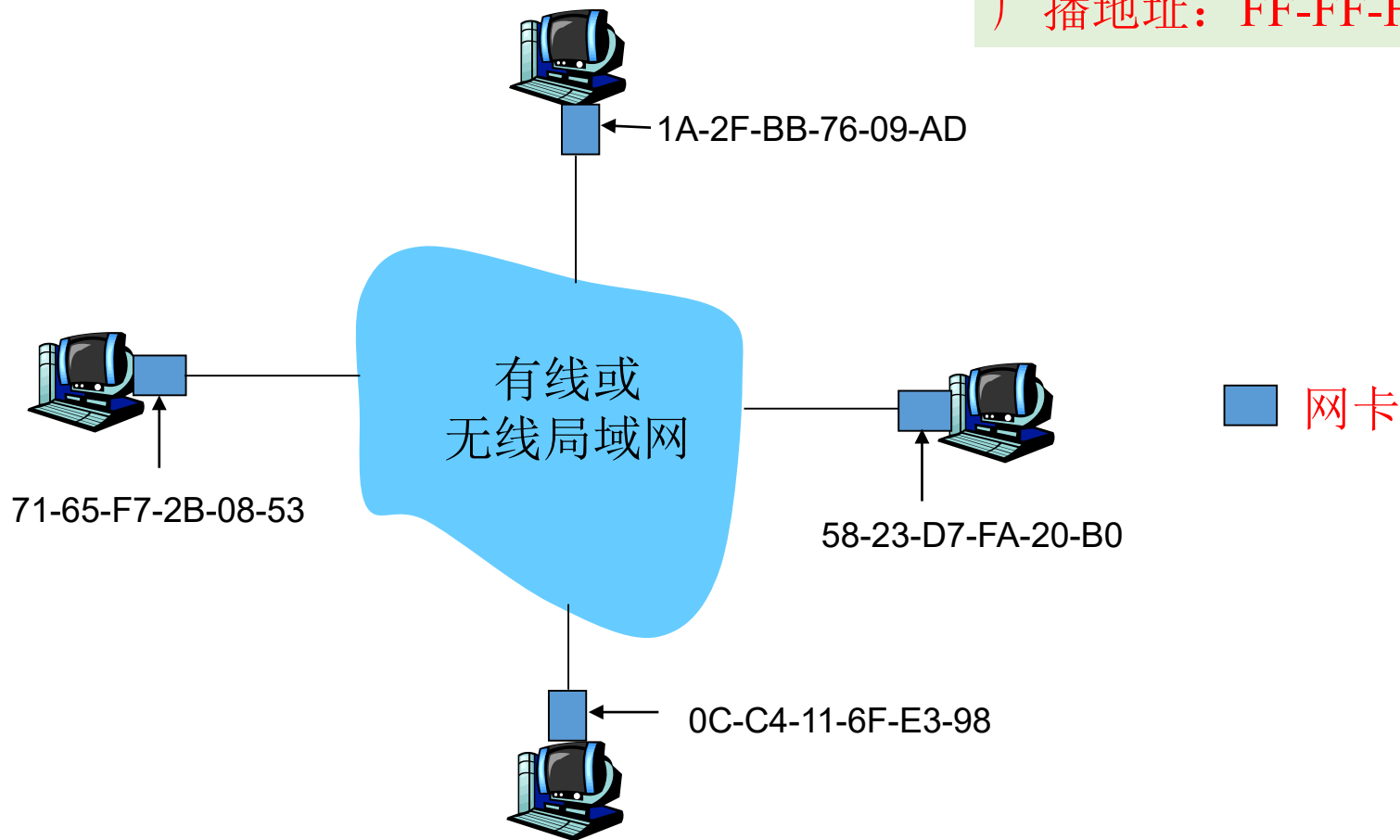
48位MAC地址（物理地址）：

- 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

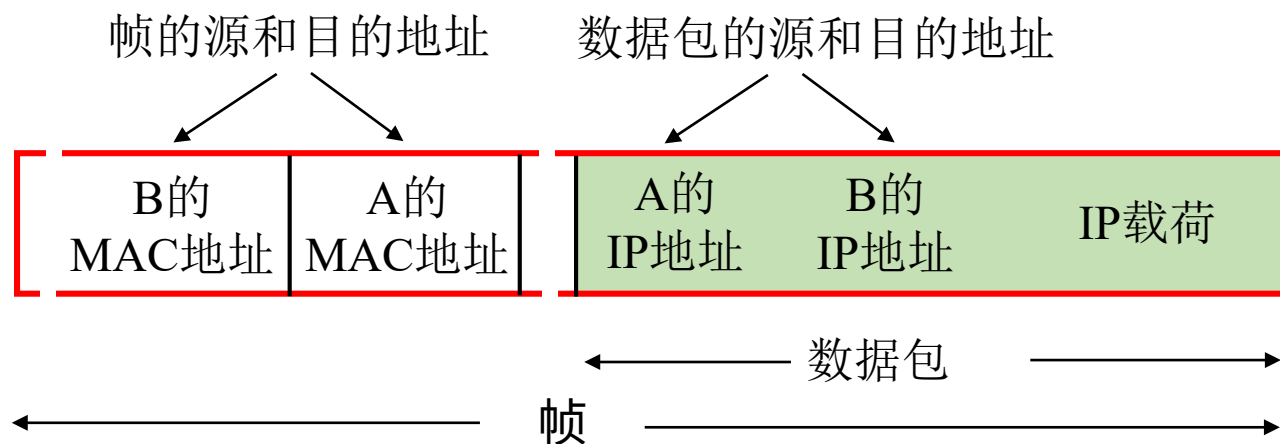
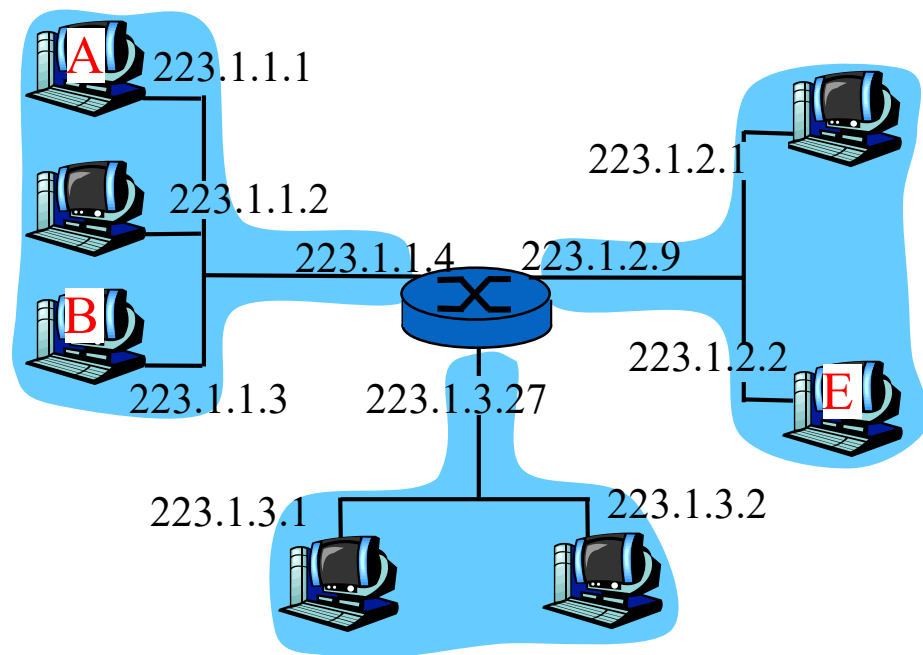
广播地址：FF-FF-FF-FF-FF-FF



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

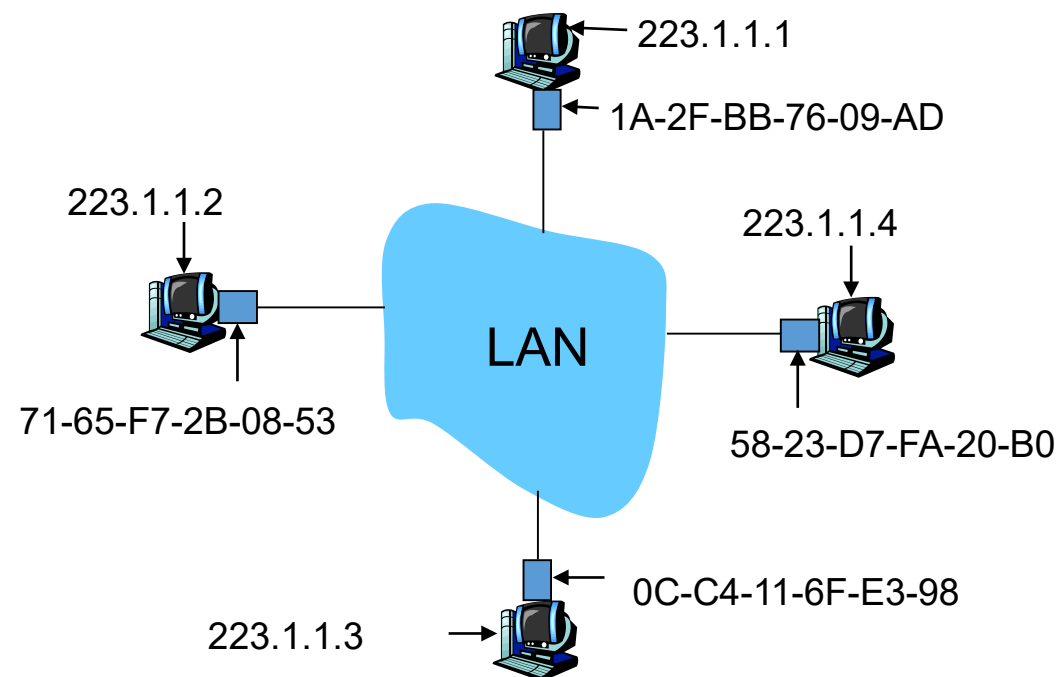


ARP 协议

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 |
|------|-------|-----|
| | | |
| | | |

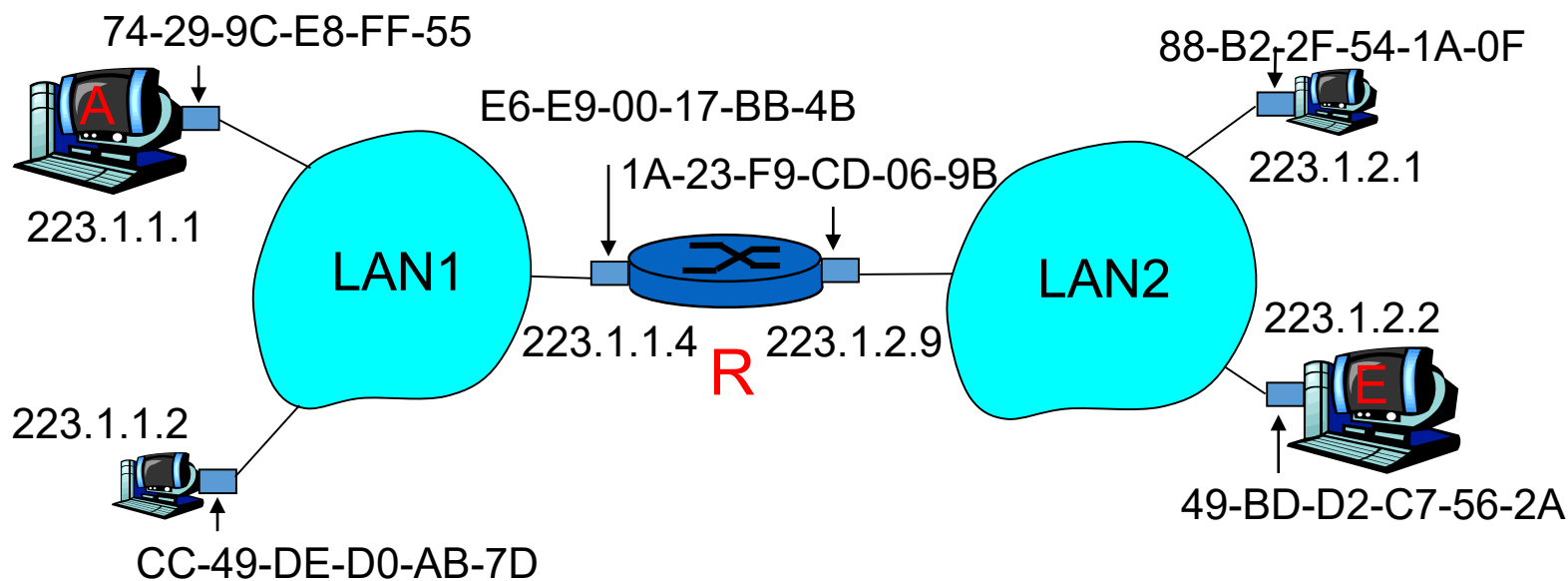
ARP 协议

- **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？

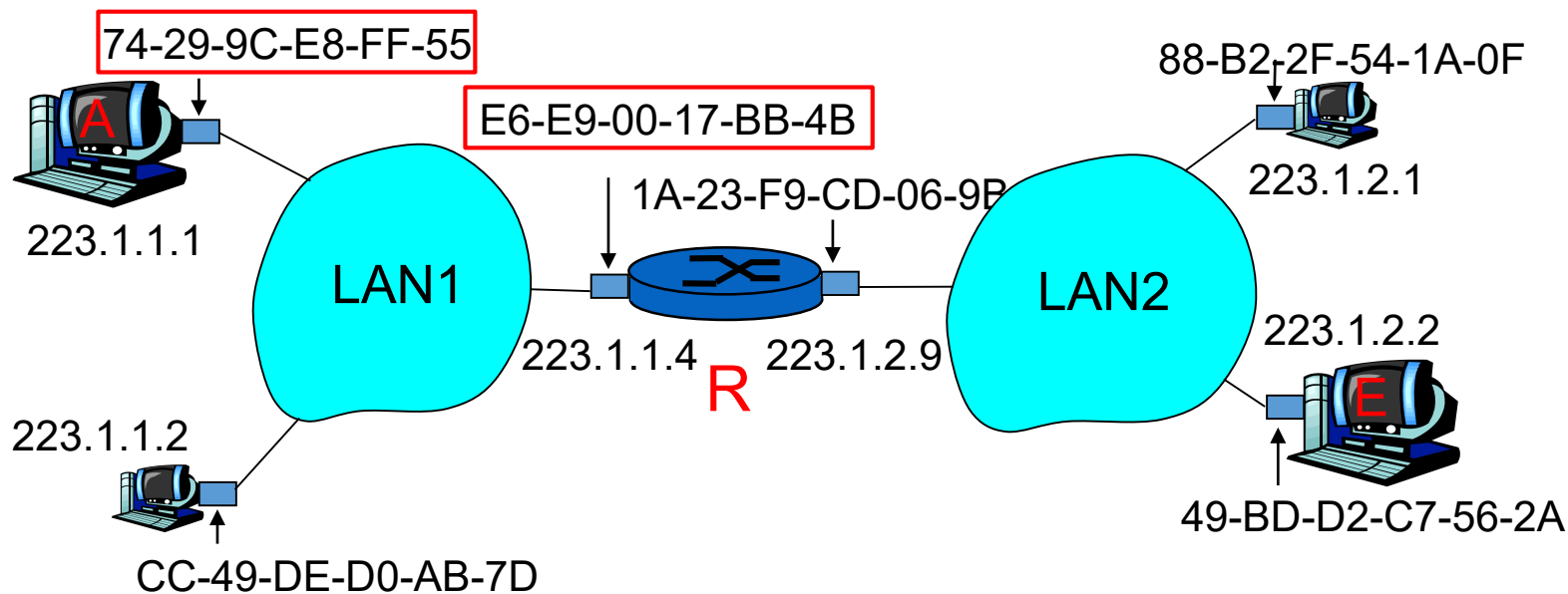
如何路由到另一个局域网

例如：从A经过R到E



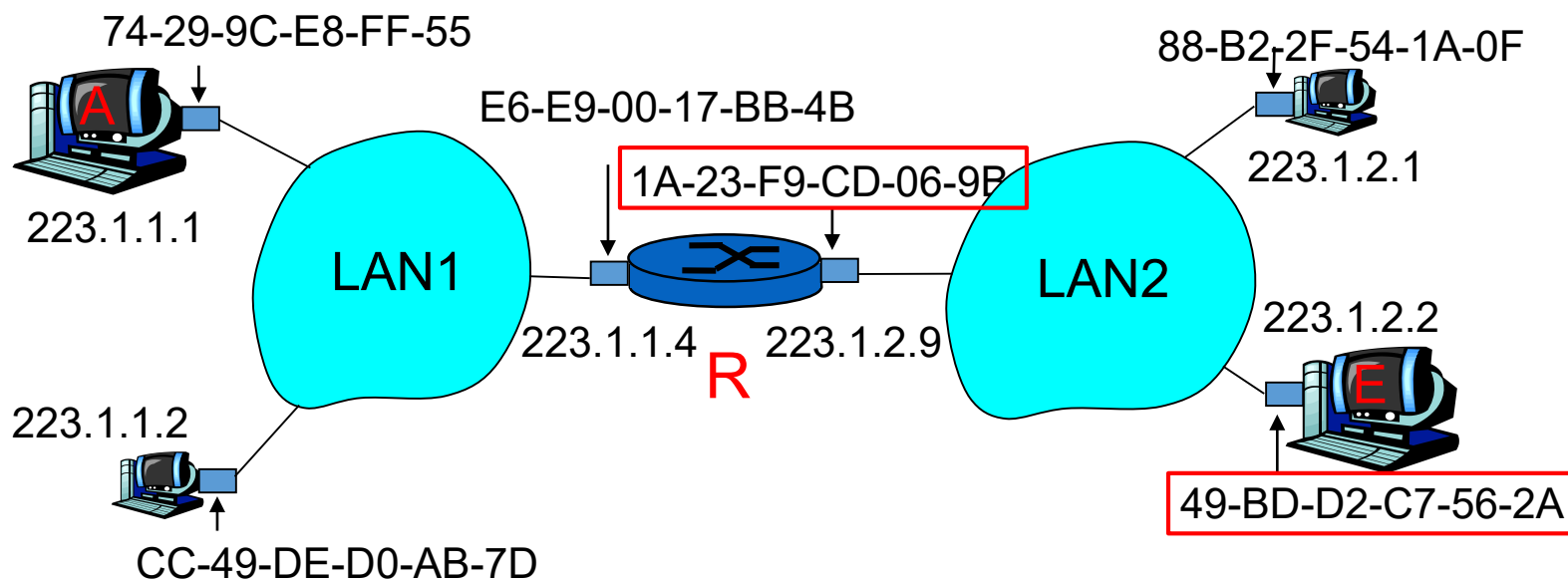
- A创建IP数据包（源为A、目的为E）
- 在源主机A的路由表中找到路由器R的IP地址223.1.1.4
- A根据R的IP地址223.1.1.4，使用ARP协议获得R的MAC地址

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）

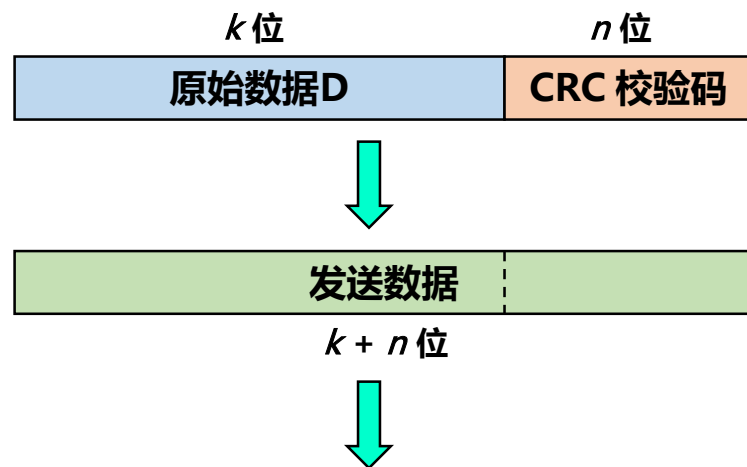
5.4 链路层差错控制

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？

5.4 链路层差错控制

CRC计算示例

$$D = 1010001101$$

$$n = 5, G = 110101$$

$$R = 01110$$

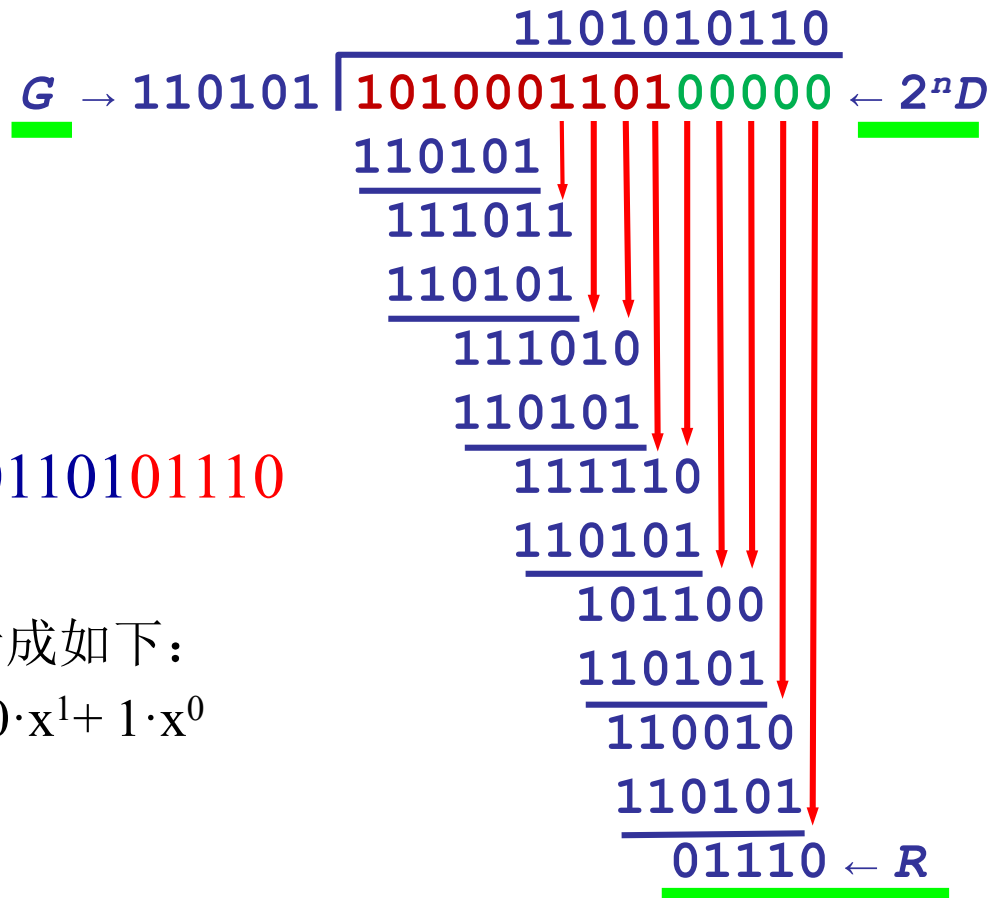
实际传输数据: 101000110101110

■ 生成多项式G也可以表示成如下:

$$\begin{aligned} G &= 1 \cdot x^5 + 1 \cdot x^4 + 0 \cdot x^3 + 1 \cdot x^2 + 0 \cdot x^1 + 1 \cdot x^0 \\ &= x^5 + x^4 + x^2 + x^0 \end{aligned}$$

■ 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

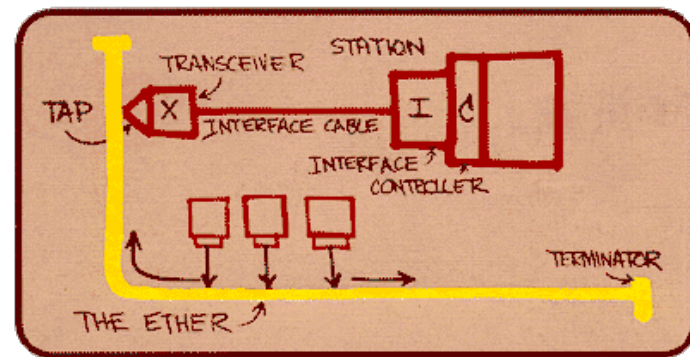
▶ 100M以太网：1995年-1998年，主要支持双绞线、光纤

▶ 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

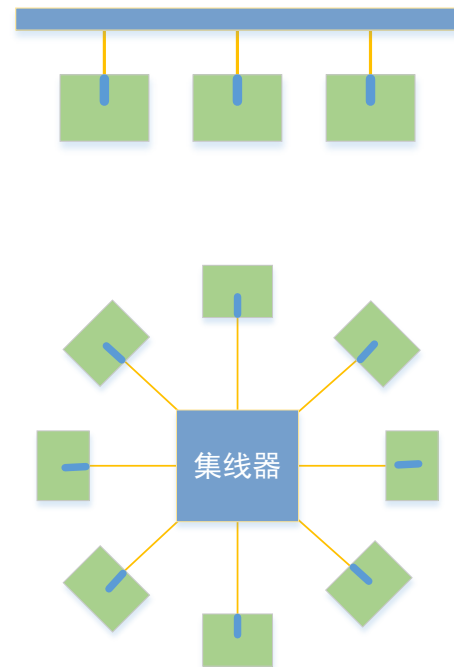
- 信号编码、时钟同步等，如差分曼彻斯特编码

▶ 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

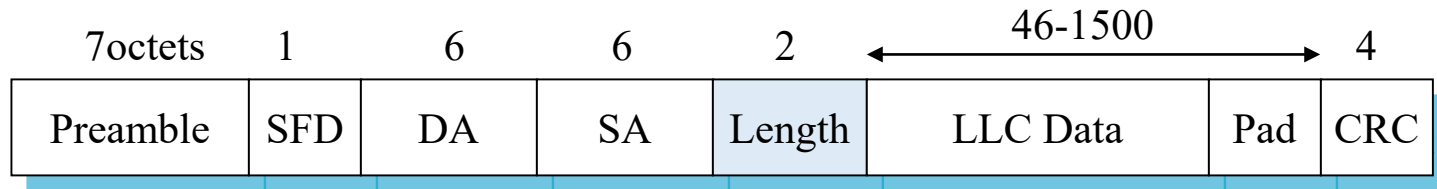
逻辑链路控制层

IEEE802.3标准

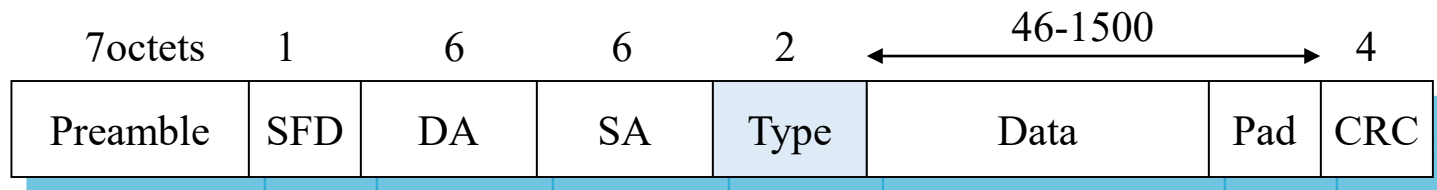
介质访问控制层

物理层

IEEE 802.3帧结构



DIX Ethernet V2帧结构

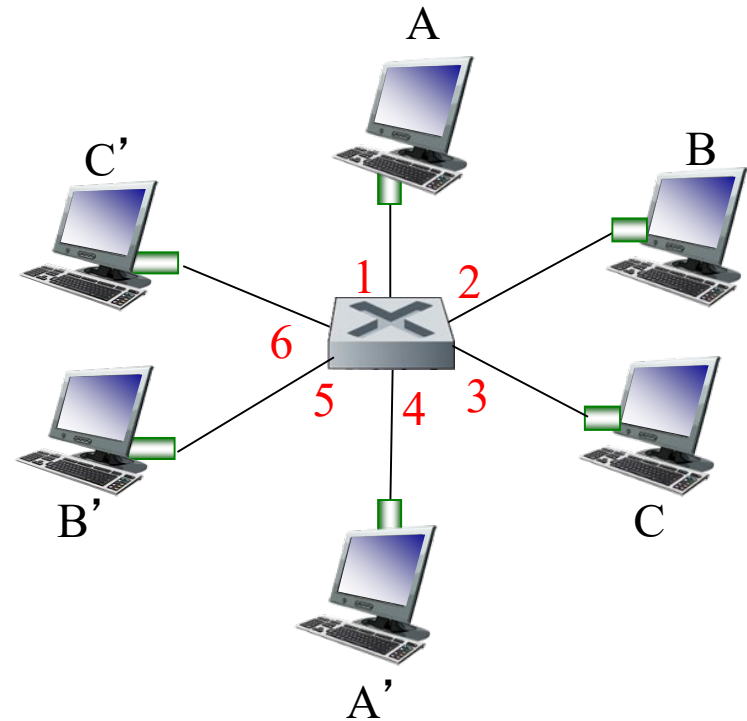


- 前导码: 位模式为10101010, 用于时钟同步
- 帧开始定界符 (SFD): 位模式为10101011, 指明帧的开始
- CRC校验: $G = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$
- 类型: 指明上层协议类型,
 - $\geq X0800$
 - X0800 IP
 - X0806 ARP

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)

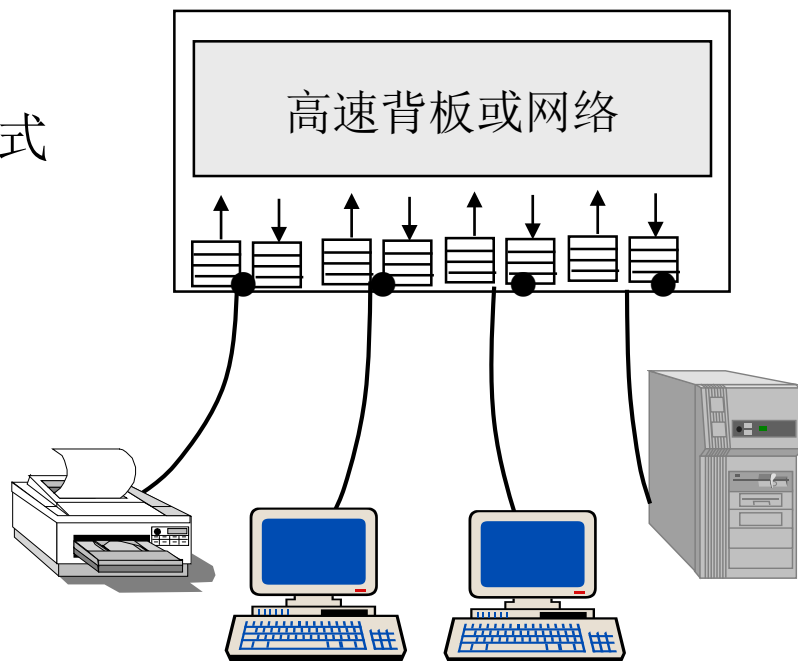
交换式以太网：交换机

■ 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



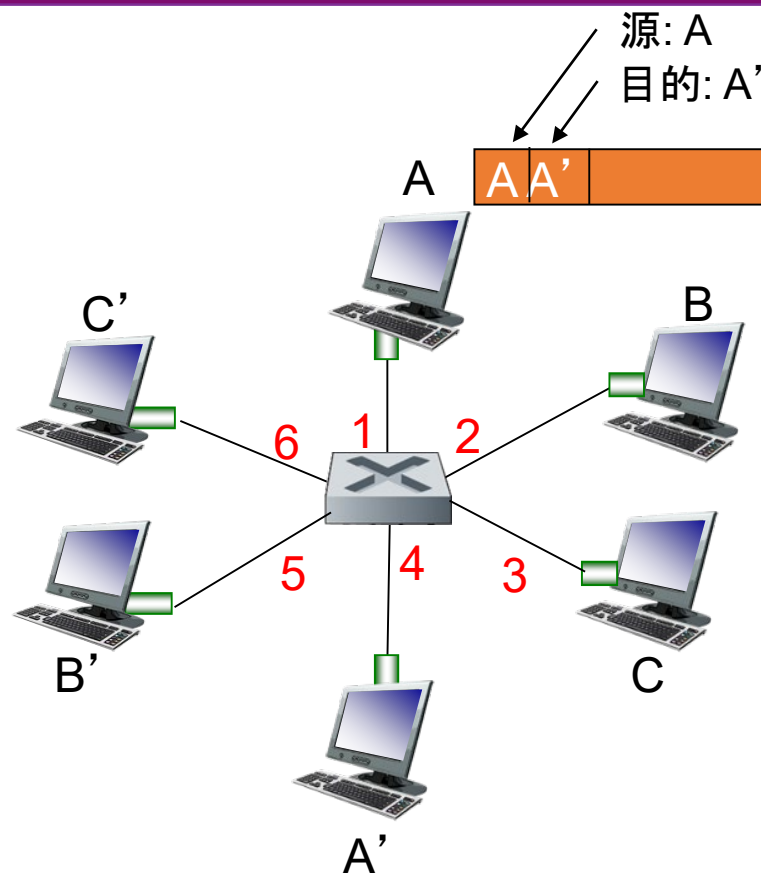
| MAC地址 | 接口 | TTL |
|-------|----|-----|
| | | |
| | | |



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

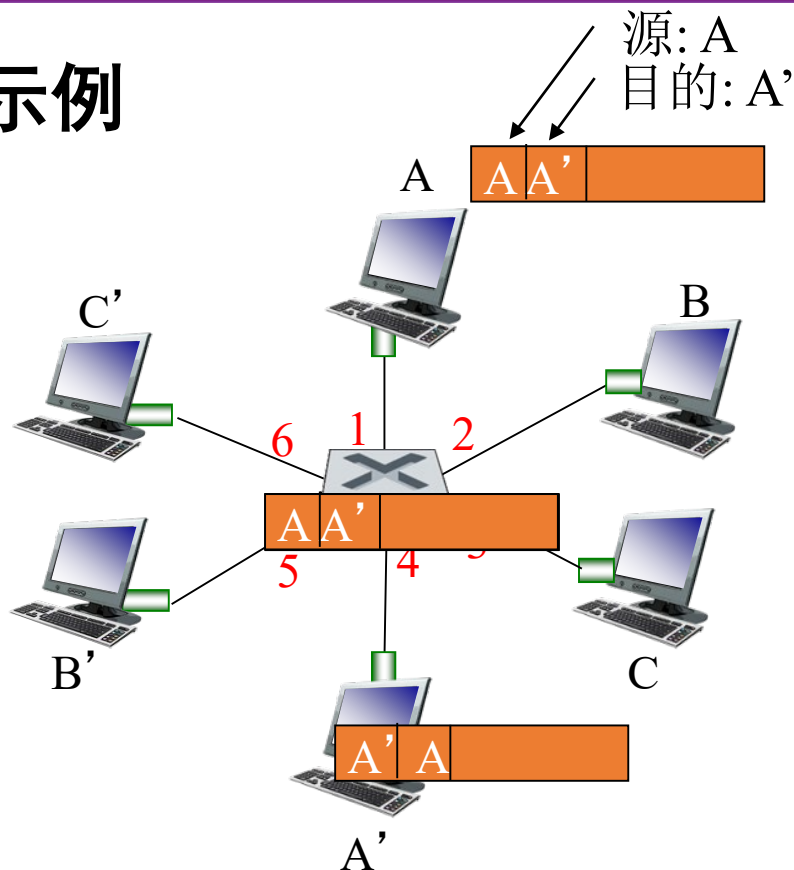
When frame received:

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



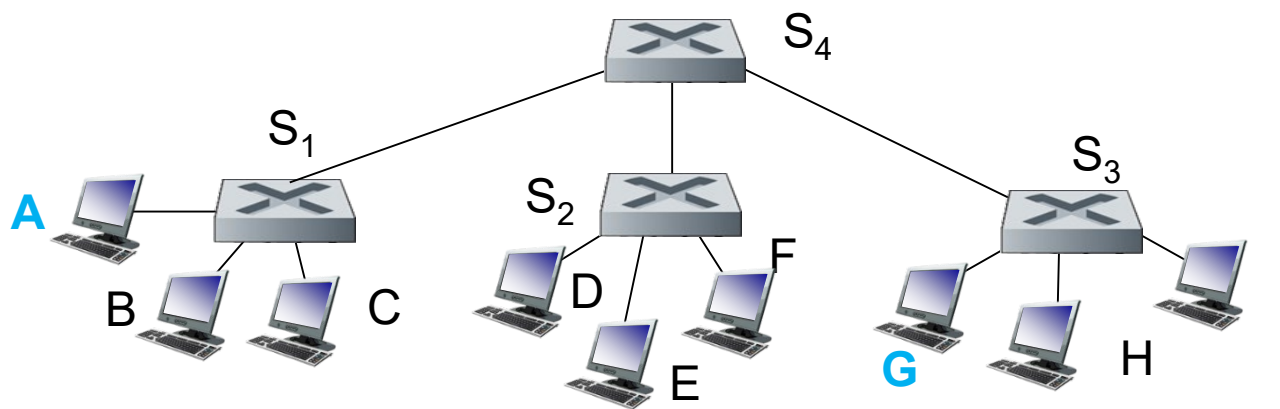
| MAC地址 | 接口 | TTL |
|-------|----|-----|
| A | 1 | 60 |
| A' | 4 | 60 |

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

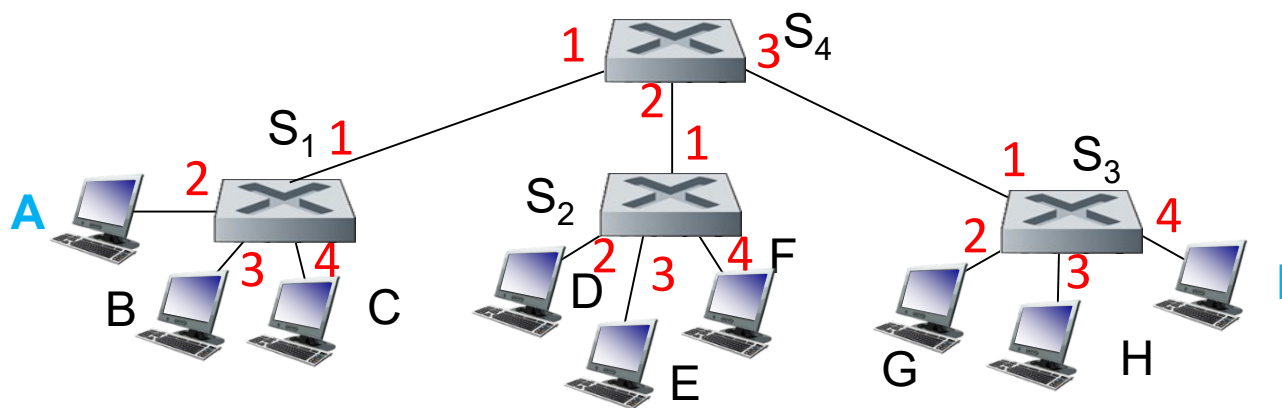
- 交换机能够相互连接



- **问题：**从A向G发送数据帧， S_1 如何知道转发到G的数据帧要经过 S_4 和 S_3 ？

互联的交换机：示例

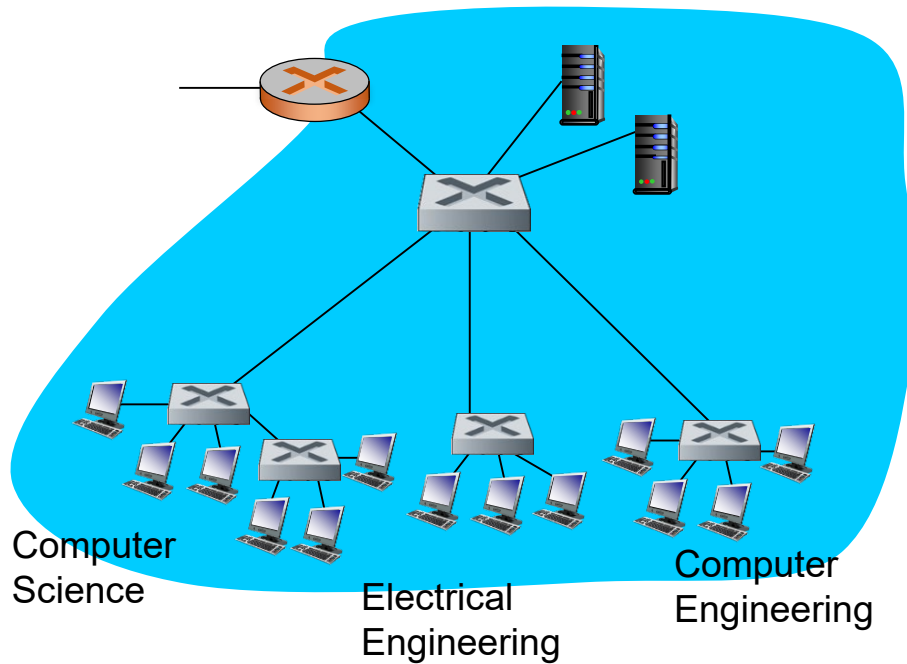
■ 例如：C发送帧到I，I给C返回响应帧



■ **问题：**给出S₁, S₂, S₃, S₄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:

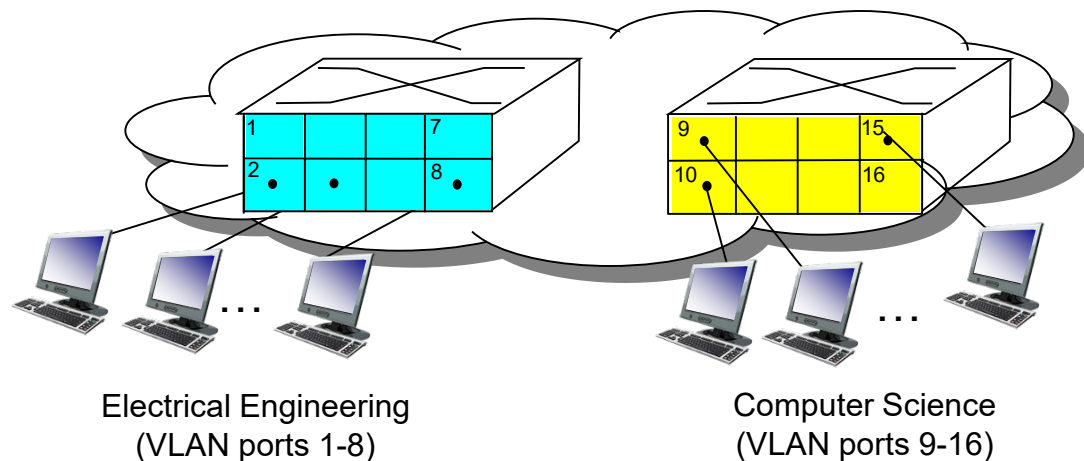
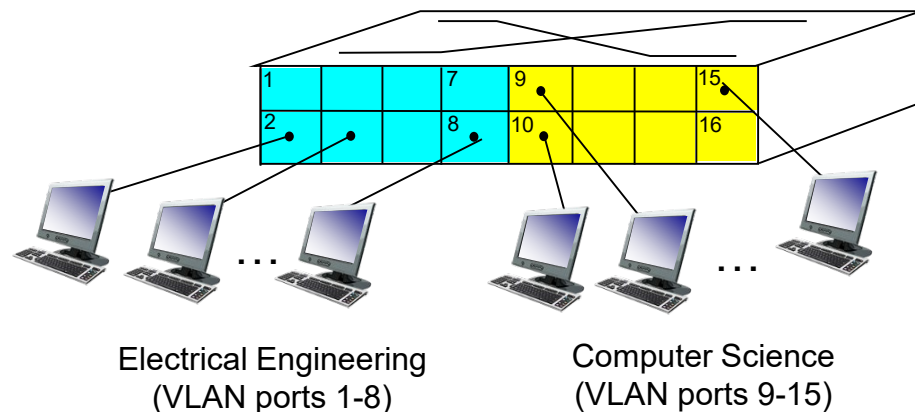
- CS的用户将办公室移到EE, 但仍希望能连接到CS的交换机
- 单一广播域:
 - 所有2层广播流量（如ARP, DHCP等, 及目的MAC地址不确定的数据帧）会传播到整个网络
 - 存在安全性、私密性、及效率问题

虚拟局域网VLAN

VLAN

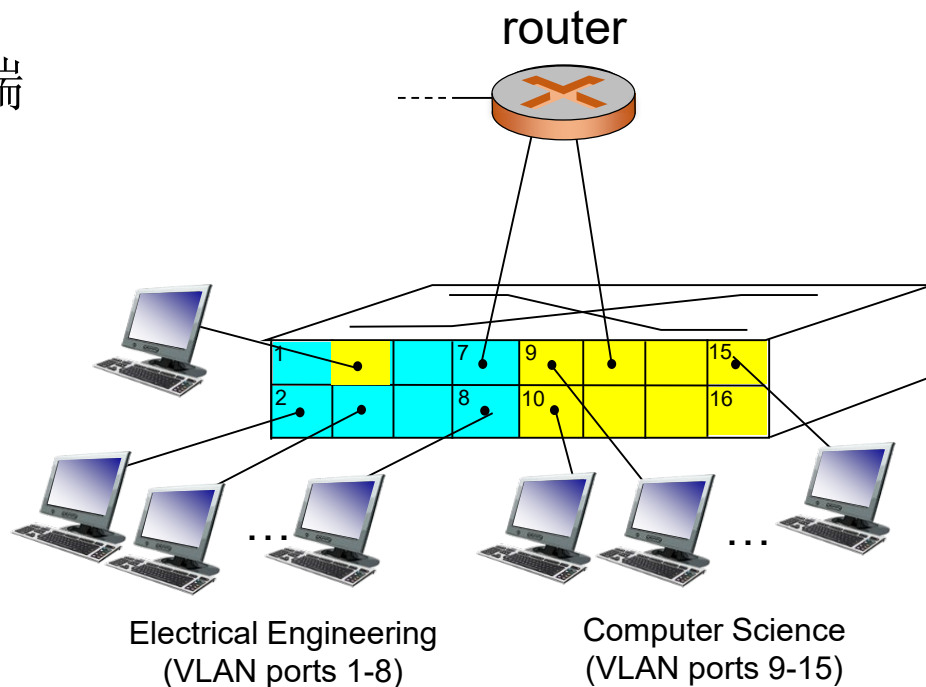
支持VLAN的交换机能够在单一物理LAN结构上配置定义多个虚拟LAN

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



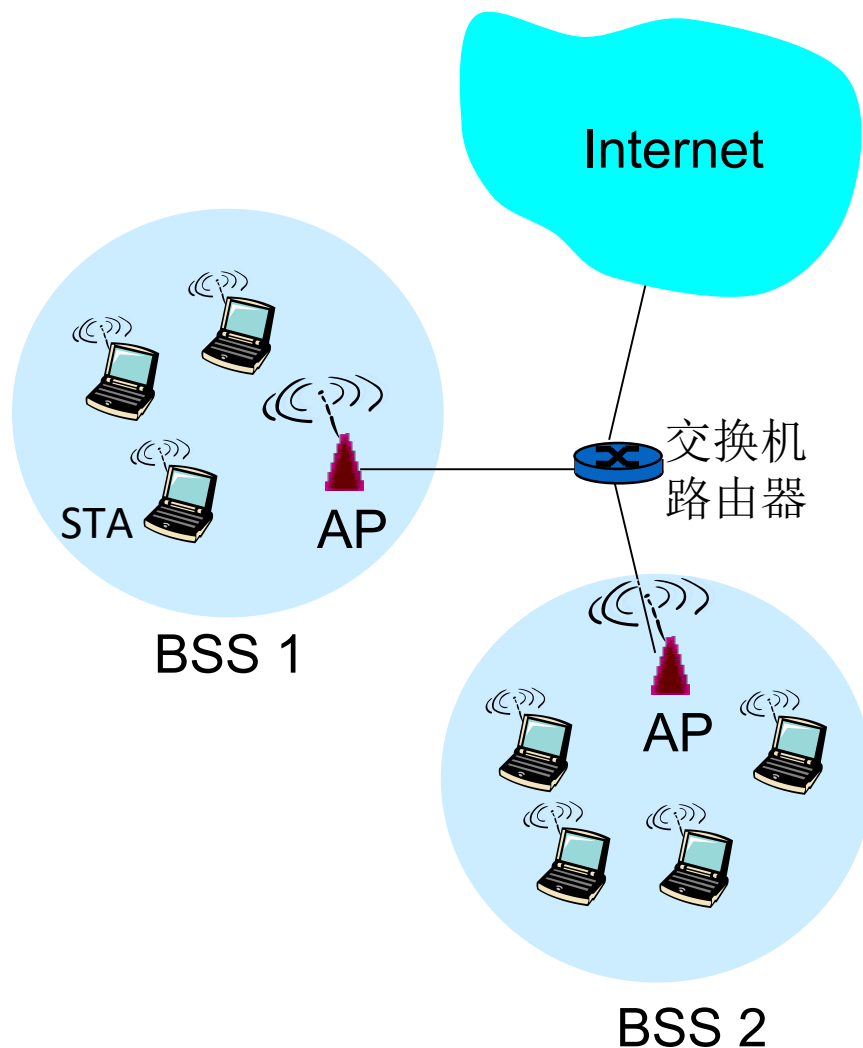
基于端口VLAN原理

- **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)

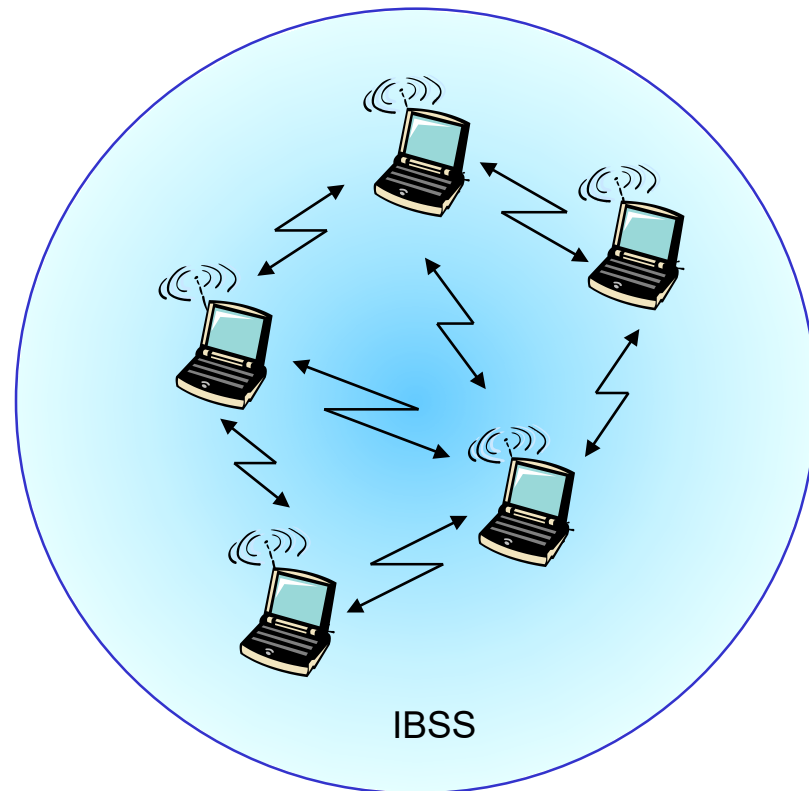
注：每个BSS中的站点和AP共享同一无线信道；
站点通过AP转发数据

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

1999

802.11b标准发布，工作频段2.4G，最大速率可达11Mbps

2003

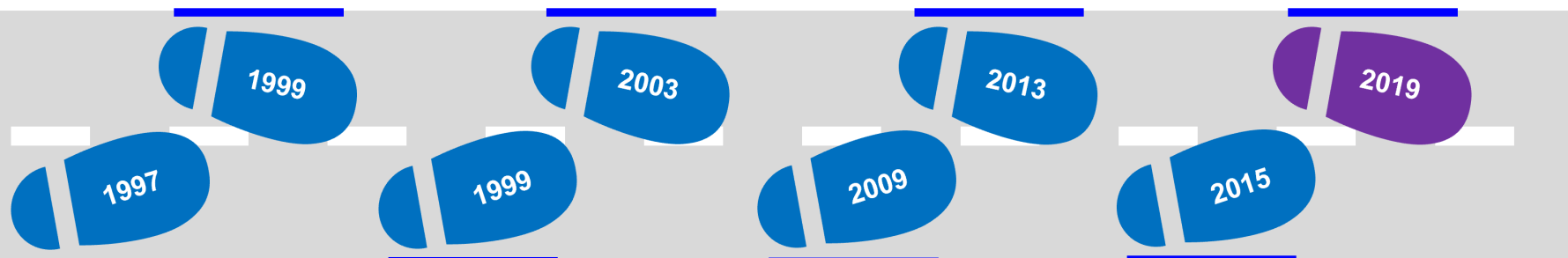
802.11g标准发布，工作频段2.4G，最大速率可达54Mbps

2013 (Wi-Fi 5)

802.11ac标准wave1版本，工作频段5G，最大速率可达1.73G

2019 (Wi-Fi 6)

802.11ax标准发布，工作频段2.4G和5G，支持OFDMA、MU-MIMO，最大速率可达9.6G



1997

802.11标准发布，工作频段2.4G，最大速率2Mbps

1999

801.11a标准发布，工作频段5G，最大速率可达54Mbps

2009 (Wi-Fi 4)

802.11n标准发布，工作频段2.4G和5G，支持MIMO，最大速率可达600Mbps

2015 (Wi-Fi 5)

802.11ac标准 wave2版本，工作频段在5G，支持MU-MIMO，最大速率可达3.47G

| 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）

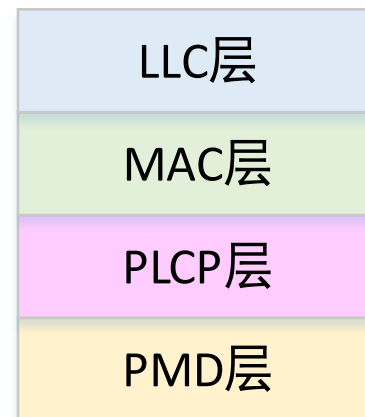
- 调制解调和编码/解码

■ 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

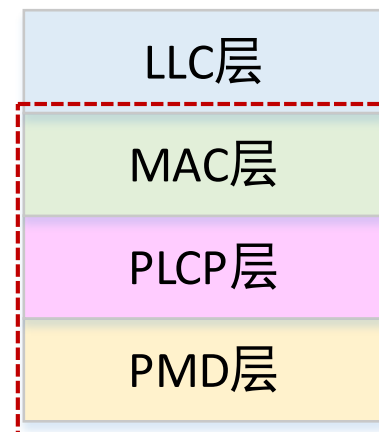
- 通道划分、空间重用
- 提高传输速率，解决传输问题
- 提高抗干扰能力和保密性

■ 共享的无线信道

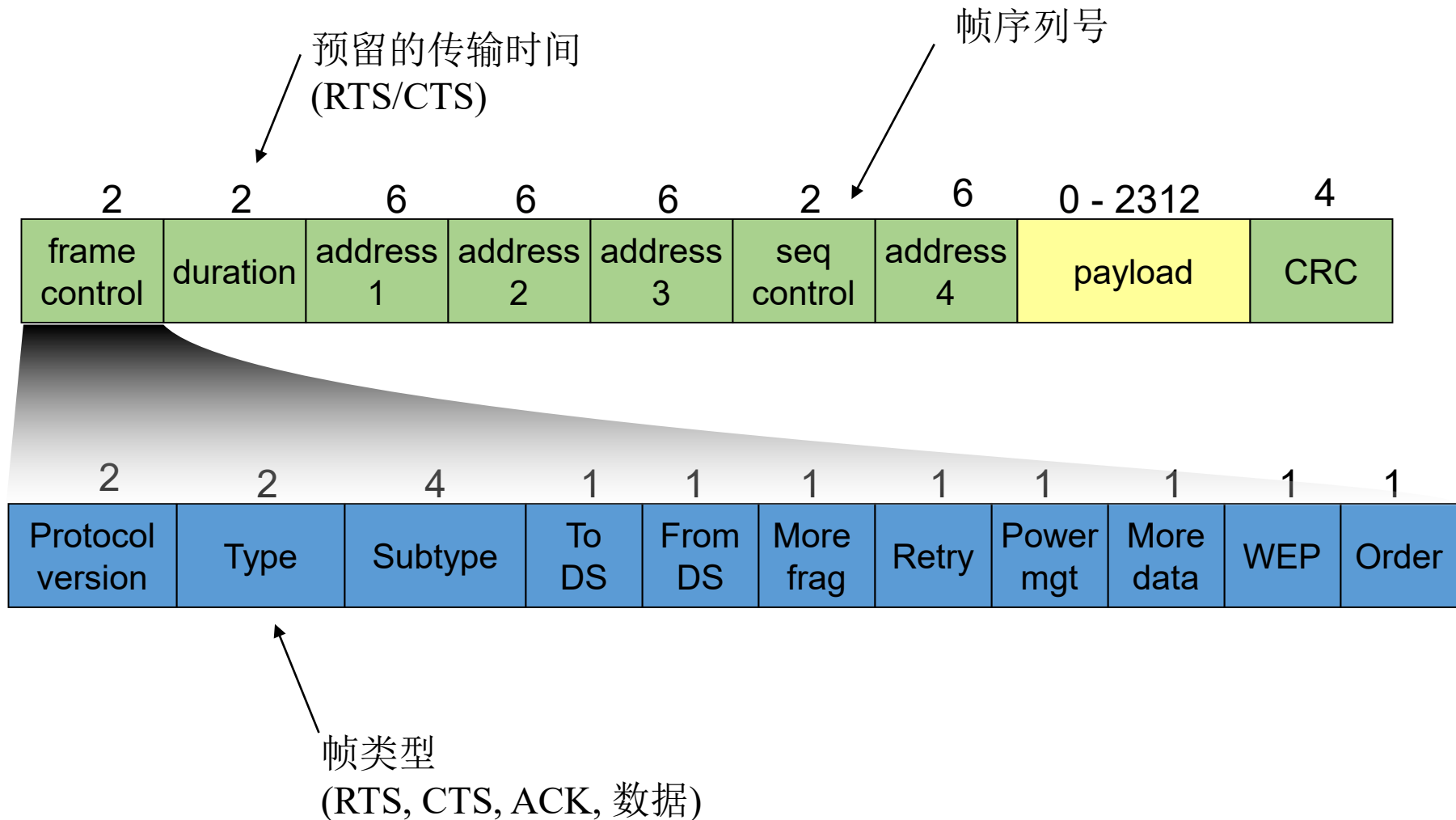
- 介质访问控制方法（CSMA/CA）
- 可靠性传输、安全性

■ 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



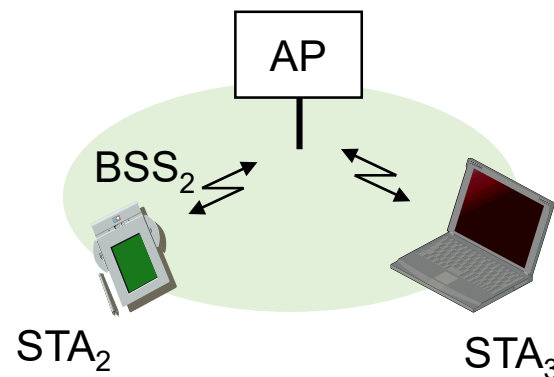
802.11无线局域网组网方法

■ 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）

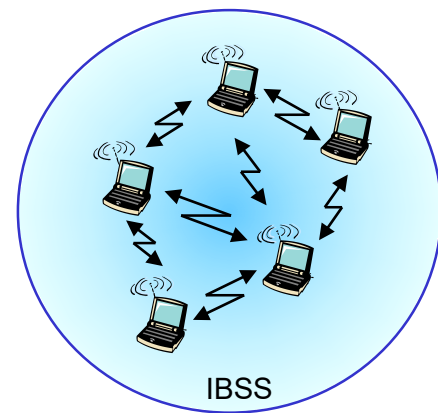
❑ 关联:

- 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）

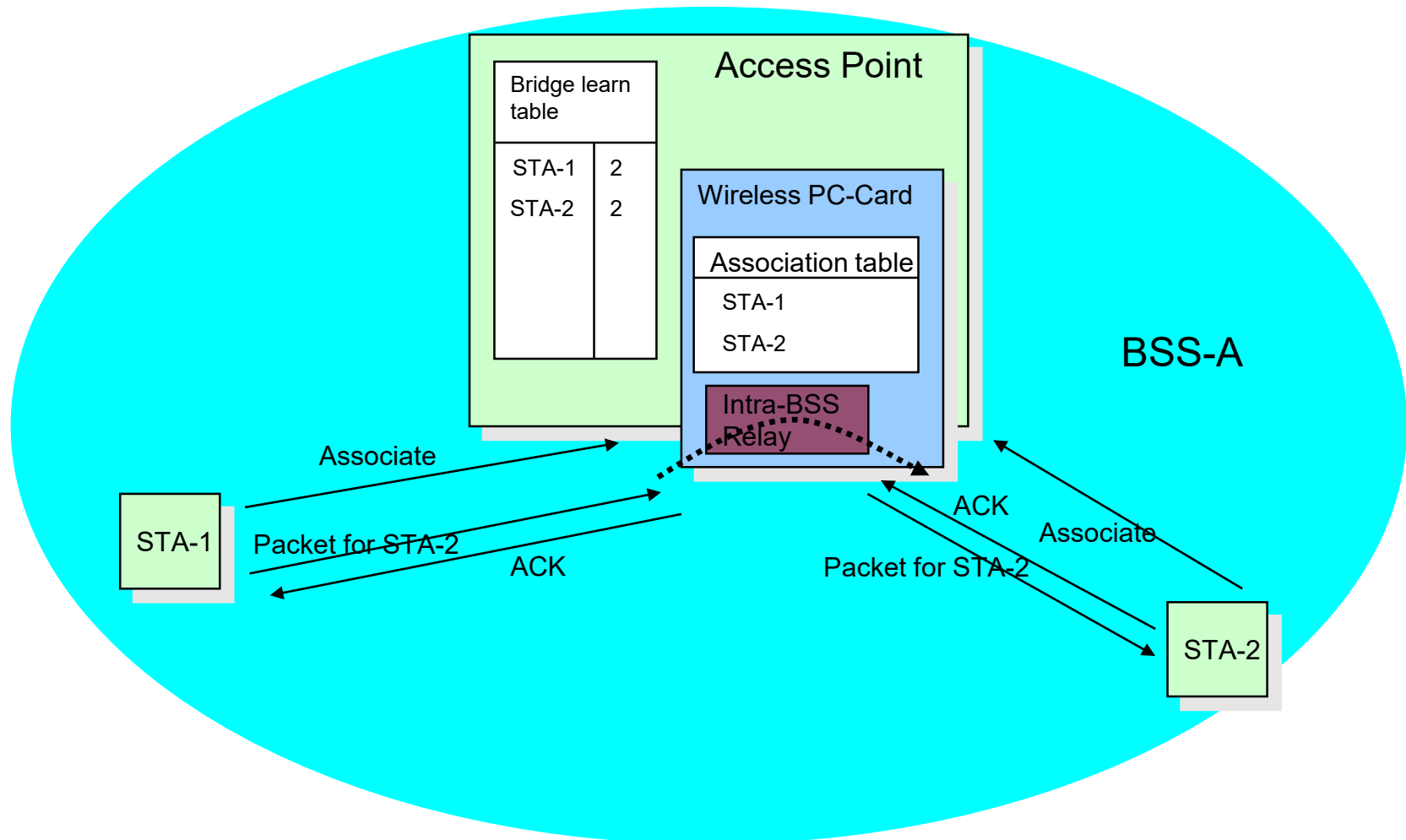
802.11无线局域网组网方法（续）

□ 自组织模式

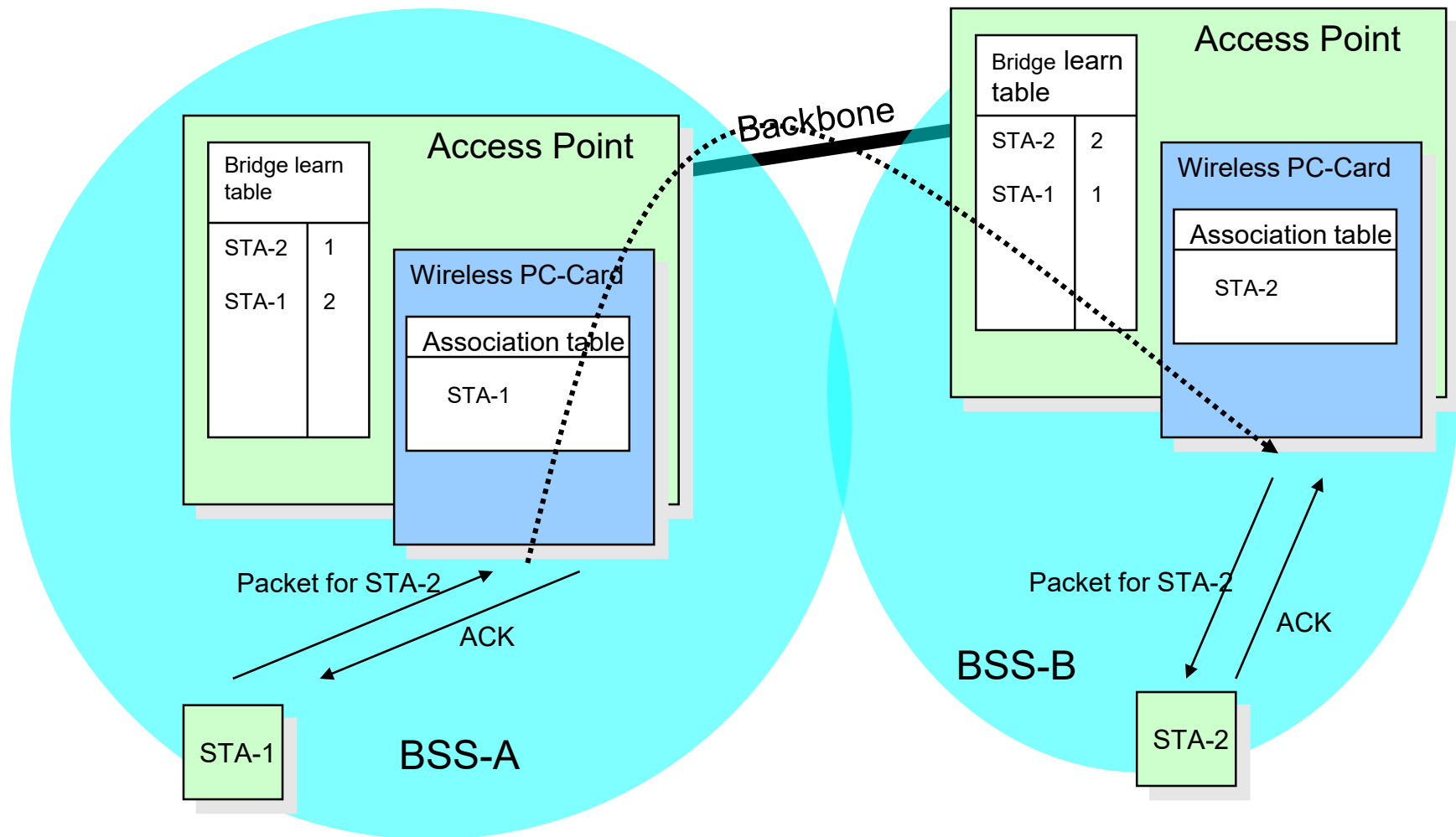
- 建立独立基本服务集（IBSS），站点之间直接通信
- 站点设成 Ad-hoc 模式
- 站点先寻找具有指定SSID的IBSS是否已存在。如果存在，则加入；若不存在，则自己创建一个IBSS，发出Beacon，等其他站来加入。
- IBSS中的所有站点参加发送Beacon，每个站点在Beacon窗口竞争Beacon的产生。对于每个站点：
 - 确定一个随机数 k
 - 等待 k 个时间槽
 - 如果没有其他站点发送Beacon，则开始发送Beacon



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