

# 直接链接网络(II)

---

华中科技大学电子信息与通信学院  
通信工程系  
陈京文

Email: [jwchen@hust.edu.cn](mailto:jwchen@hust.edu.cn)

2020.10.7



# 内容提要

---

- 多路接入网络
  - 基本问题, MAC协议类型
- 以太网
  - 简介, 以太网MAC
- 无线局域网
  - 简介, 802.11 MAC, 组网模式

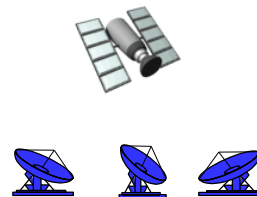
# 多路接入网络



shared wire (e.g.,  
cabled Ethernet)



shared RF  
(e.g., 802.11 WiFi)



shared RF  
(satellite)

- 实例
  - 共享式以太网，令牌环，无线局域网，...
- 涉及物理层、数据链路层
- 标准多为IEEE制定
  - 物理接口，电接口，媒体接入控制(MAC)，帧结构，...

# 多路接入网络(续)

- 多路接入：所有主机通过一条**共享链路**发送和接收帧
  - 一台主机发出的帧，会被同一网络中的所有主机收到，但只有指定主机接受
- 基本问题：**两台主机同时发送数据，会导致帧损坏**
  - 因此需要协调对共享链路的接入使用 —— 媒体接入控制(Media Access Control, MAC)，即一台主机何时可以传输帧
- **MAC: 确定多台主机如何共享链路的分布式算法**
  - 技术挑战：**没有专用信道用于主机之间的控制信息传输**
  - 主要考虑因素
    - 链路使用的**效率**
    - 竞争使用链路的**公平性**

# MAC协议分类

## ● 信道分割

- 将信道分为较小的资源片，如时隙，频带，码址
- 将资源片分配给一台主机使用
- 例子：TDMA, FDMA

## ● 随机接入

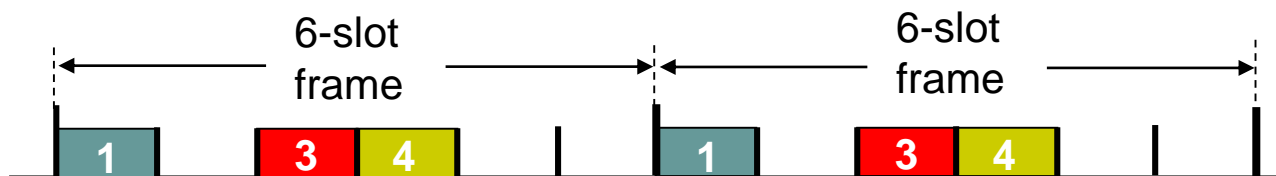
- 并不划分信道，允许冲突
- 能够从冲突中恢复
- 例子：ALOHA, CSMA, CSMA/CD

## ● 轮转

- 节点轮流使用，有较多数据发送的节点可以获得更多使用权
- 例子：令牌环，FDDI，蓝牙

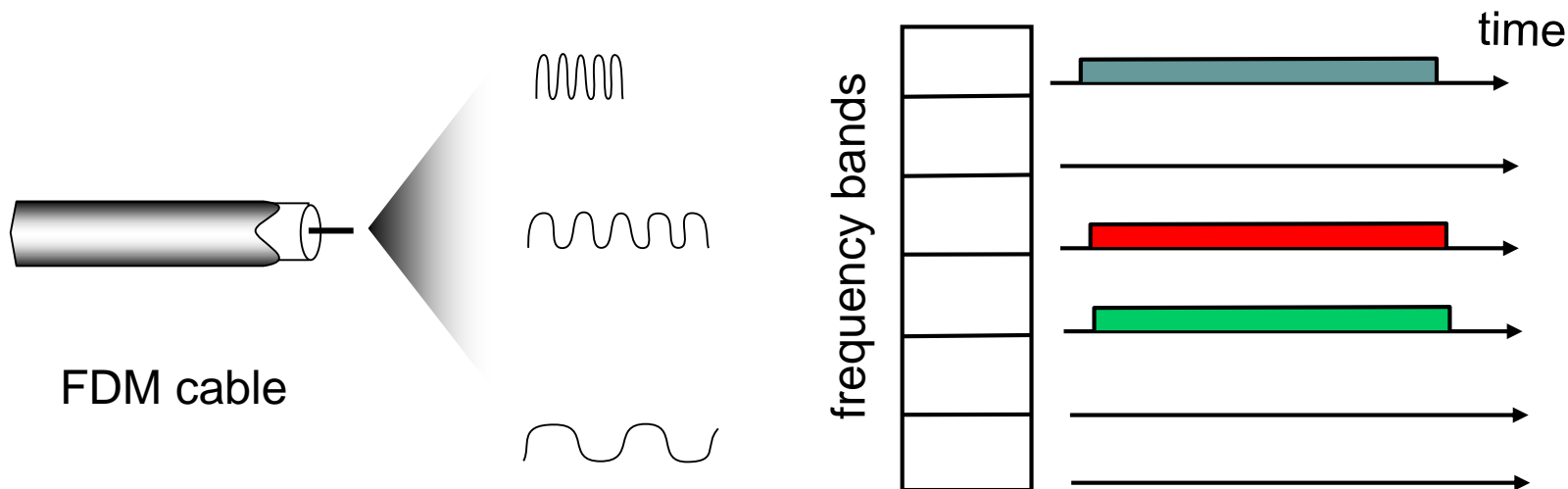
# 信道分割：TDMA

- TDMA (Time Division Multiple Access)
  - 信道使用按照时间周期组织，每个周期包括多个时隙
  - 每台主机在一个周期中占有一个固定长度的时隙(长度通常为单个分组传输时间)
  - 未使用的时隙闲置
- 例：6台主机的局域网中，时隙1、3、4有分组传输，时隙2、5、6闲置



# 信道分割：FDMA

- **FDMA (Frequency Division Multiple Access)**
  - 可用频谱划分为多个频带
  - 给每台主机分配一个固定的频带
  - 未使用的频带闲置
- 例：6台主机的局域网中，频带1、3、4有分组传输，频带2、5、6闲置



# 随机接入

- 每当节点有分组发送时，即以链路全速率发送
  - 节点之间并无事前的协调
- 多个节点同时发送分组 → 冲突
- 随机接入算法决定
  - 如何检测/避免冲突
  - 如何从冲突中恢复(即重新传输)
- 实例
  - 分时ALOHA
  - ALOHA
  - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA





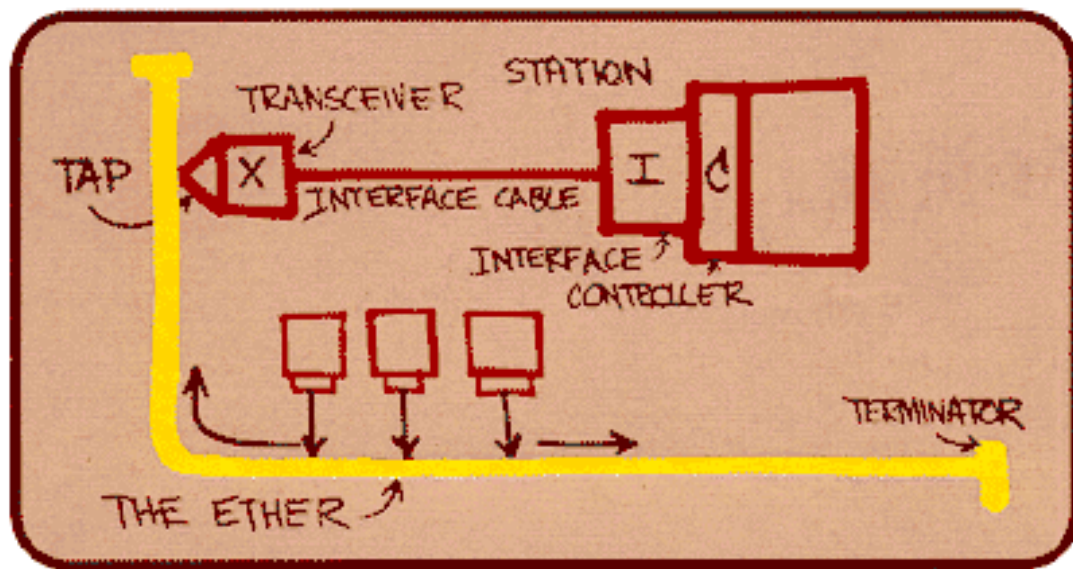
# 内容提要

---

- 多路接入网络
  - 基本问题, MAC协议类型
- 以太网
  - 简介, 以太网MAC
- 无线局域网
  - 简介, 802.11 MAC, 组网模式

# 以太网(Ethernet)

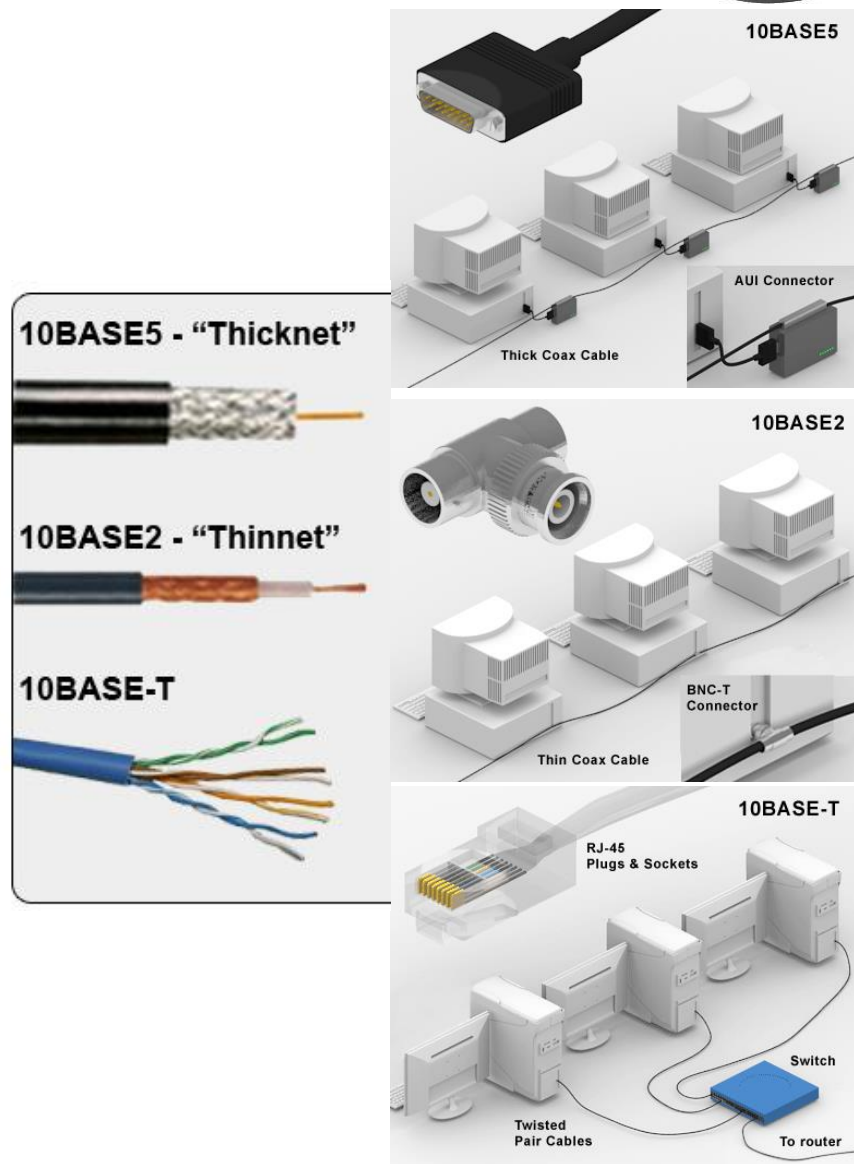
- Xerox PARC (Palo Alto Research Center)的Metcalfe于1970年代中期提出
- Xerox、DEC、Intel于1978年标准化
- IEEE进一步标准化, 即802.3标准
  - 与原始以太网标准有细微不同



Metcalfe's Ethernet sketch

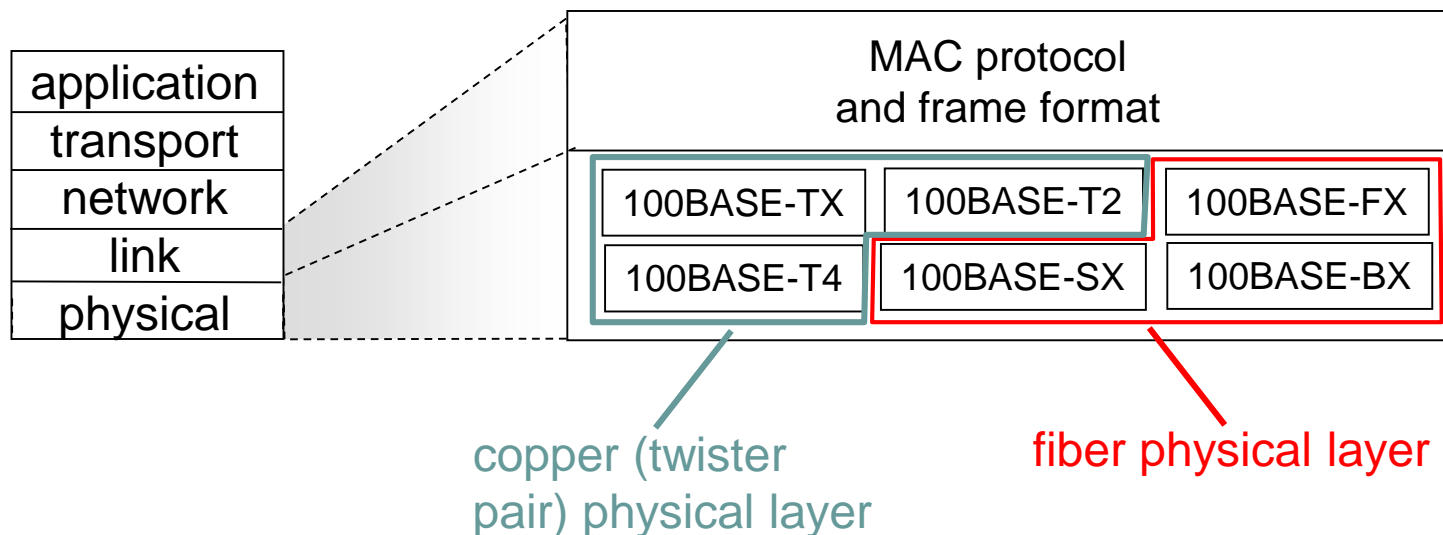
# 以太网物理特性

- 编码
  - 早期：Manchester
  - 现在：4B/5B, 8B/10B
- 带宽
  - 10 Mbps：共享式，或采用集线器或交换机
  - 100 Mbps：采用集线器或交换机
  - 1 Gbps：采用交换机
  - ...
- 线缆
  - 10Base2 (细同轴电缆)
  - 10Base5 (粗同轴电缆)
  - 10BaseT/100BaseT (双绞线)
  - ...

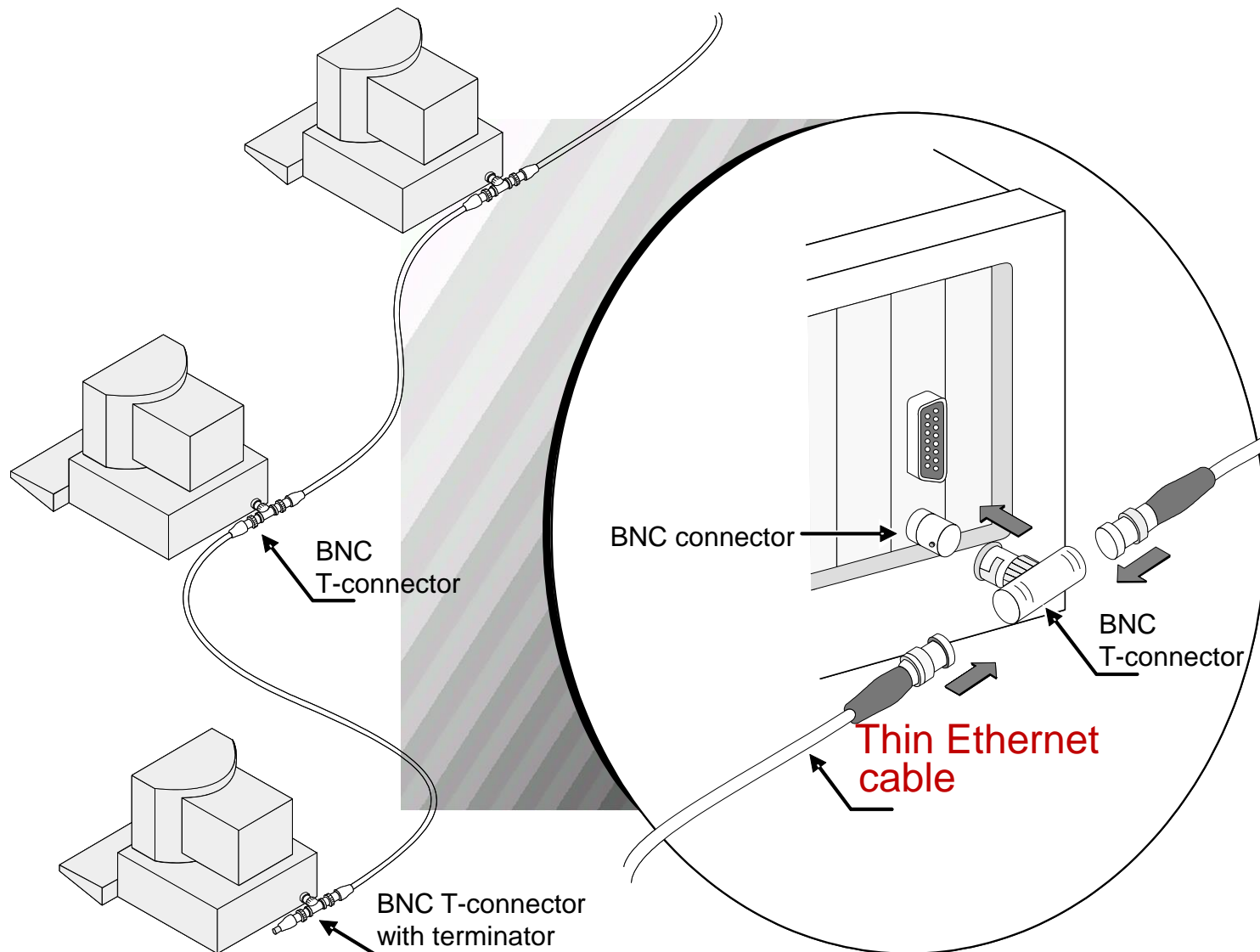


# 802.3系列标准

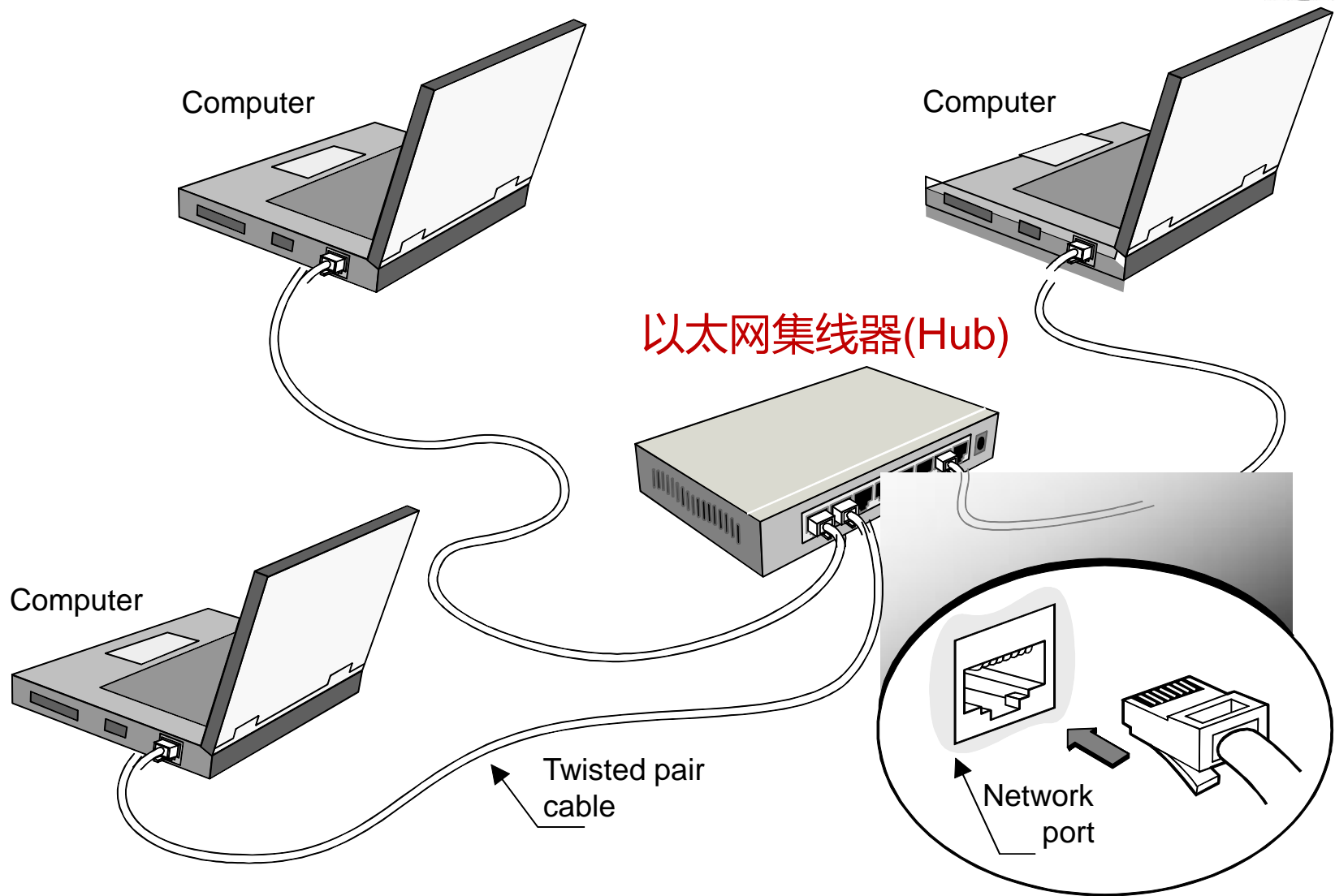
- 一系列以太网标准
  - 关于链路层和物理层
  - 相同的MAC协议和帧结构
  - 不同的速度：2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps, 10Gbps, 40Gbps, 100Gbps
  - 不同的物理媒质：双绞线，光纤，同轴电缆



# 共享式以太网：细缆链接

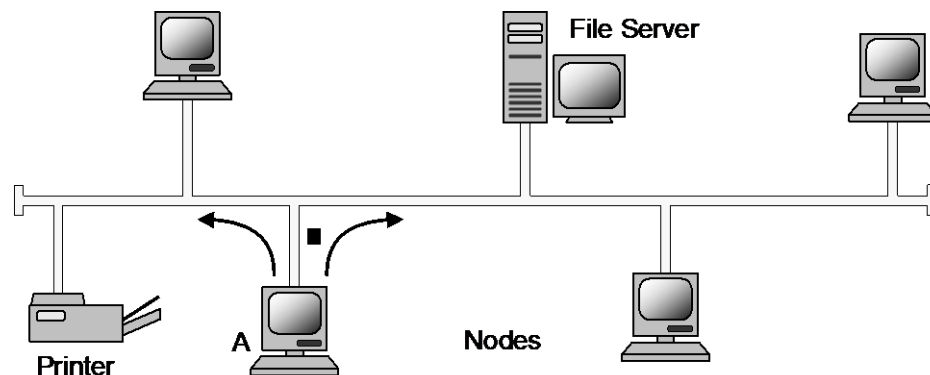


# 共享式以太网：集线器连接

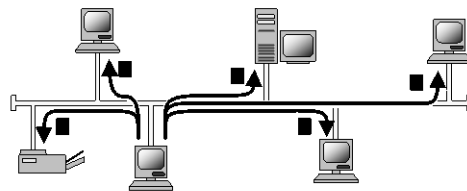


# 共享式以太网信号传输

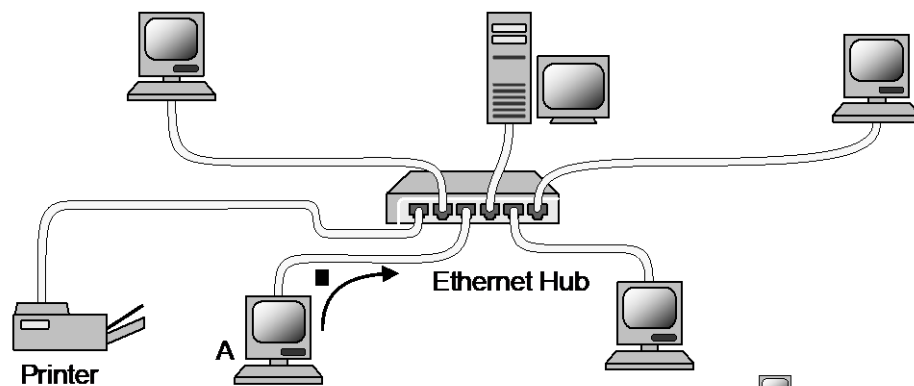
细缆链接



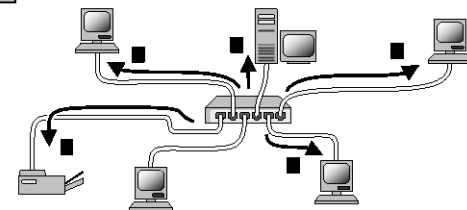
(a)



集线器连接

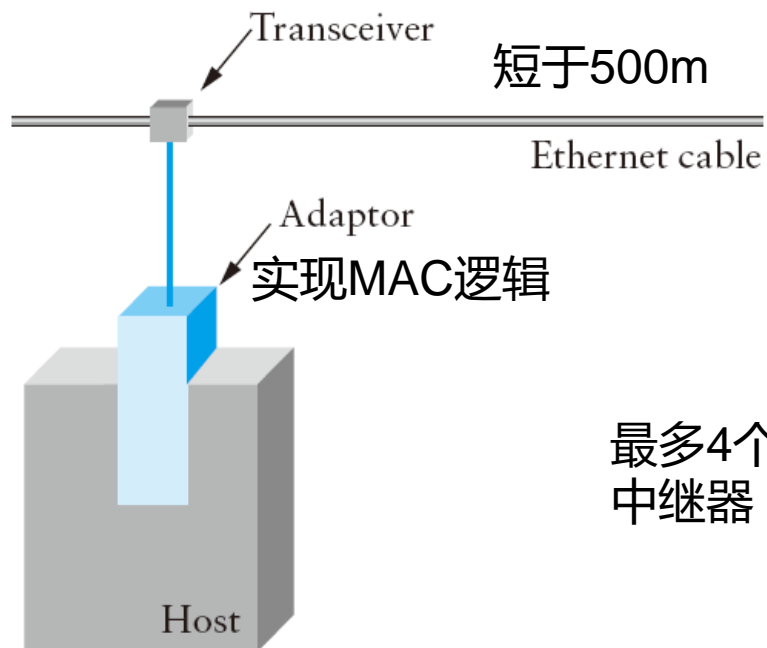


(b)



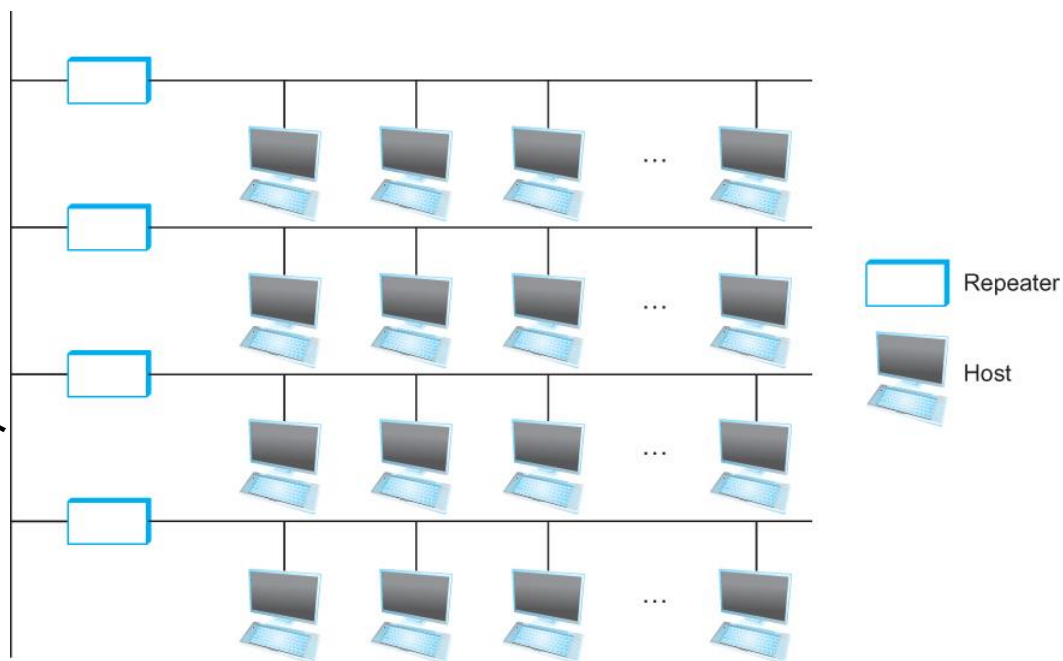
# 共享式以太网技术规范

检测链路是否闲置，  
驱动输出信号，  
接收输入信号



最多1024台主机

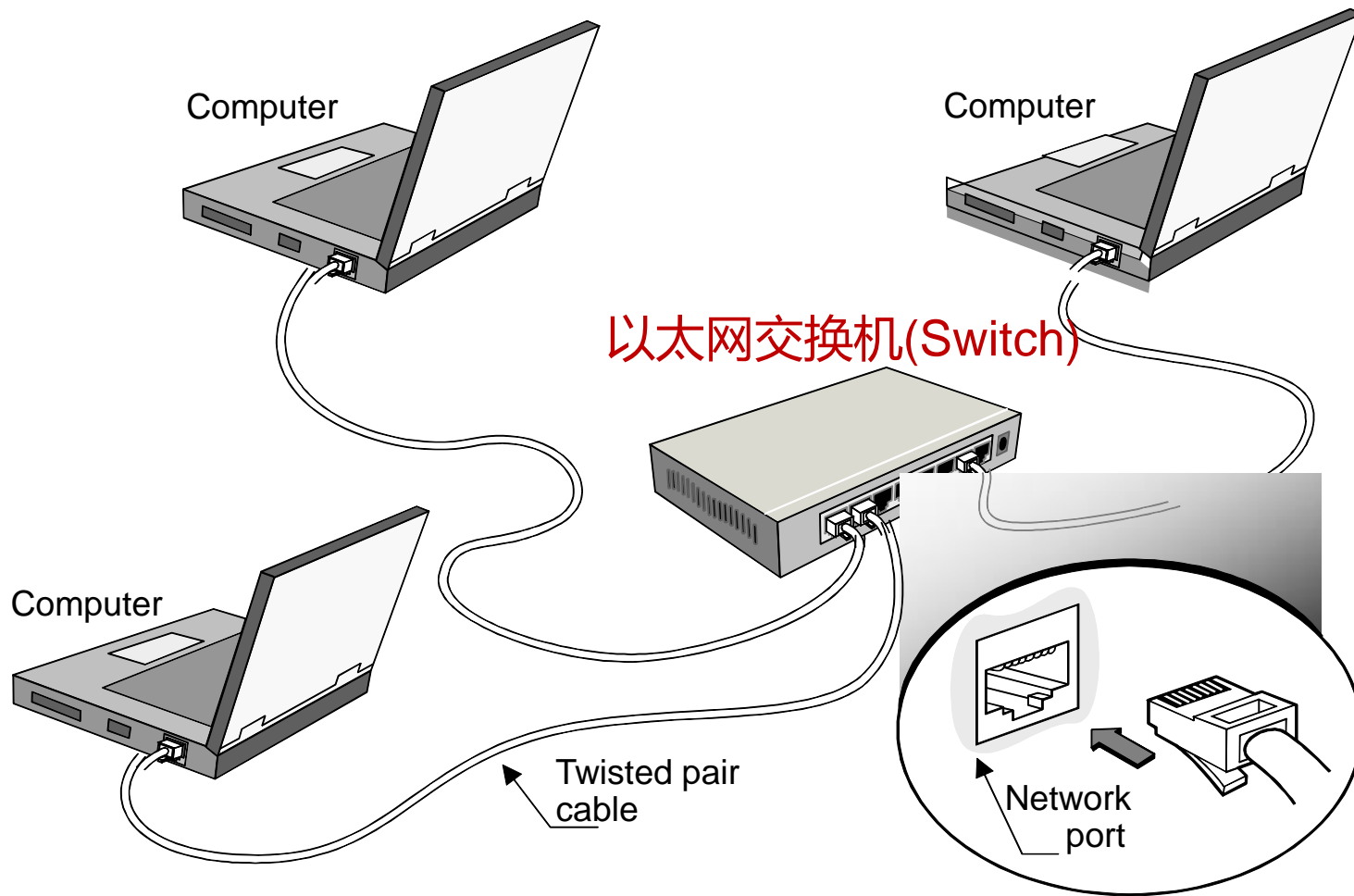
最多4个  
中继器



总长度不超过2500m

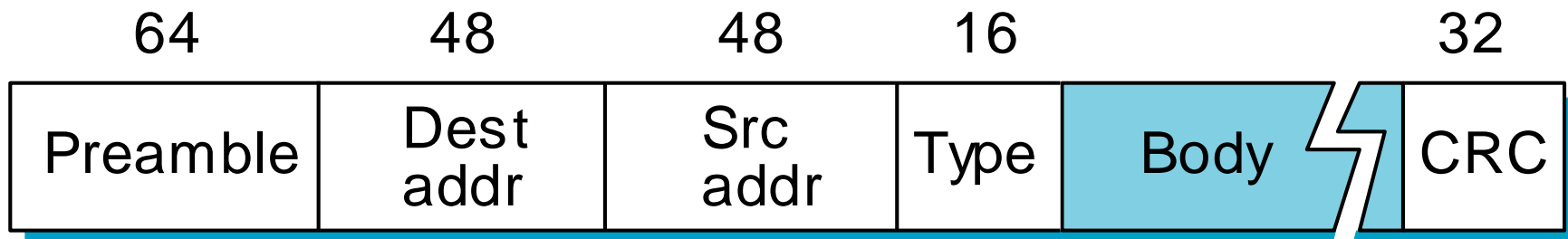


# 交换式以太网



注：交换式以太网涉及到数据报交换技术，后续讲义将会介绍

# 以太网帧结构和寻址



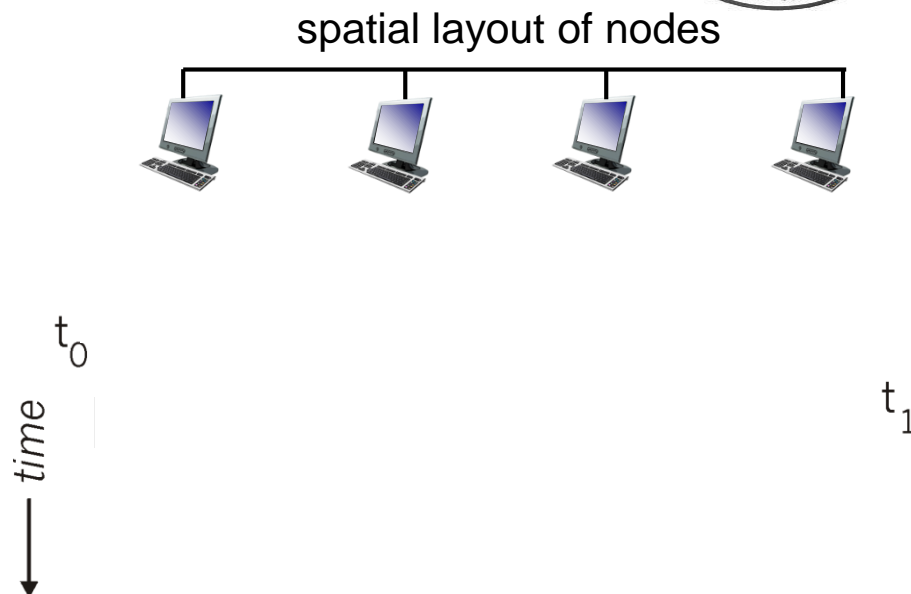
- **前导码(Preamble)字段**: 7个10101010模式的字节, 再加一个10101011模式字节 — 同步发送方和接收方的时钟
- **地址字段(Dest addr, Src addr)**: 48比特
  - **单播(unicast)**: 每个网卡被分配一个唯一、永久的地址(ROM存储), 如8:0:2B:E4:B1:2
  - **广播(broadcast)**: 48比特全为1, 仅用于目的地址
  - **多播(multicast)**: 首位为1, 动态配置(非永久), 仅用于目的地址
- **Type字段**: 指明封装分组为何种上层协议, 如IP, Novell IPX, ...
- **CRC字段**: 用于检错; 如果出错, 直接丢弃该帧
- **帧长度**: 46 ~ 1500字节

# 帧接收：选择性接受

- 共享式以太网中，网卡会接收到所有的帧，但只接受目的地为下列地址的帧
  - 该网卡单播地址
  - 广播地址(所有比特全为1)
  - 该网卡多播地址(如果支持多播且被配置相应多播地址)
  - 任何地址(如果被配置为混杂模式)
- “接受”的含义
  - 进行链路层的相关处理
  - 并传给上层协议实体

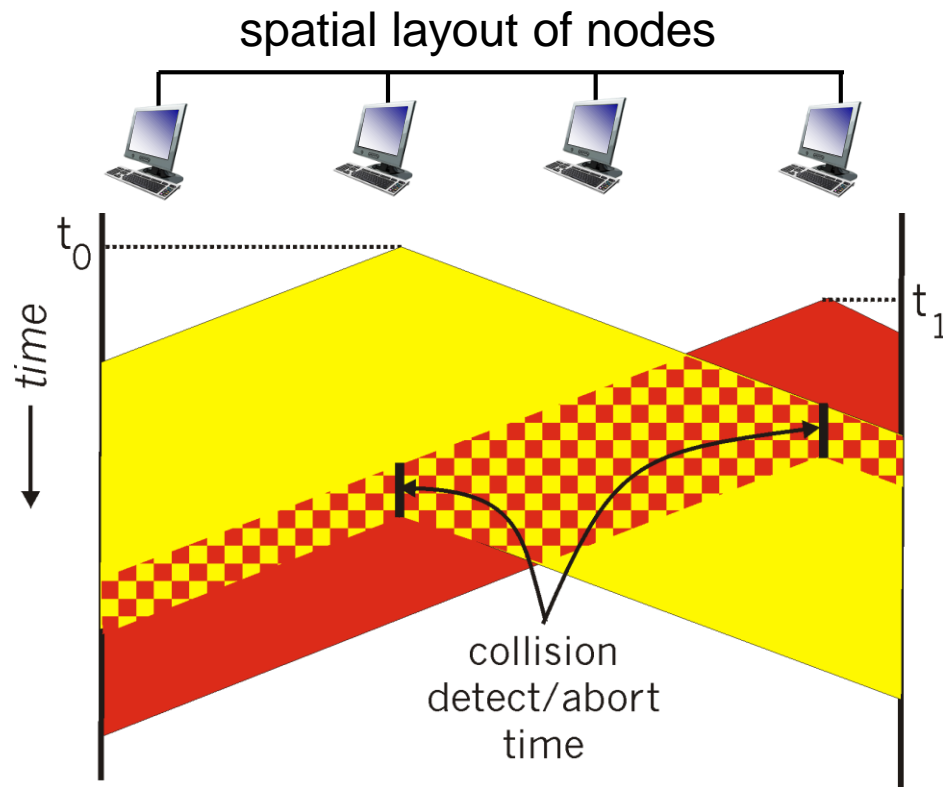
# 帧传输冲突

- **传播时延效应**：一台主机需要一定时间(传播时延)才能感知到其它主机的帧传输
  - 即使是侦听到链路空闲时才发送帧，也可能产生冲突
  - 显然传播时延(空间距离引起)对于冲突概率影响很大
- **传输冲突**致使整帧传输无效——资源及时间浪费



# 帧传输：CSMA/CD

- 带有冲突检测的载波侦听多路接入(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect, CSMA/CD)
  - 载波侦听：侦听链路是否被占用
  - 冲突检测：检测帧传输在共享链路上是否被其它帧传输信号干扰
    - 测量信号强度，比较传送和接收的信号差异
  - 检测到冲突后，发送方应中止传输，减少信道的浪费

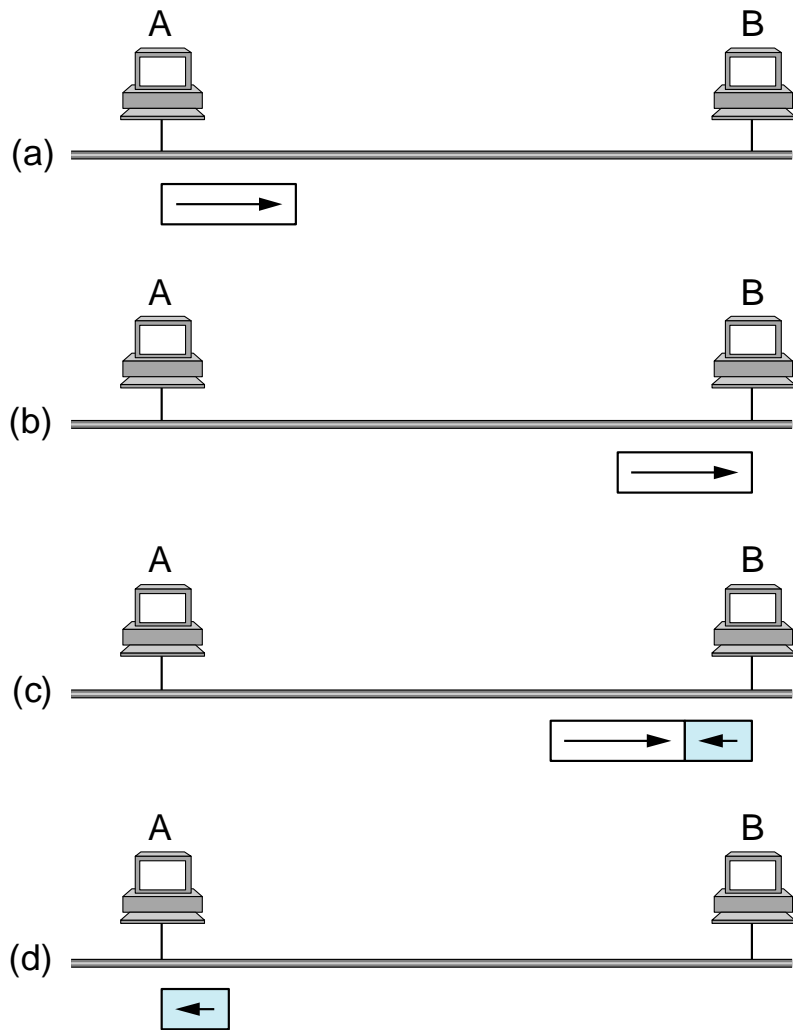


# CSMA/CD算法

- 侦听到链路空闲：立即发送帧
- 侦听到线路忙：等候直至线路空闲，然后立即发送帧
  - 即以概率1坚持发送，称为1-坚持(1-persistent)，相当于 $p$ -坚持( $p$ -persistent)的特例
- 帧发送后，如果检测到冲突
  - 发送32比特的干扰信号，加上64比特先导码共计96比特，然后停止传送帧
  - 传输等待和重试：指数回退(exponential backoff)
    - 第 $k$ 次冲突后重试等候时间：从 $(0, 1, \dots, 2^k-1) \times 512$ 比特时间(对于10Mbps链路，为51.2  $\mu$ s)中等概率随机选择
    - 例如，第1次冲突后重试等候时间随机选择 $(0, 512)$  比特时间之一，第2次随机选择 $(0, 512, 1024, 1536)$ 比特时间之一，...
    - 经过一定数目(通常取16)回合尝试均失败，则放弃
  - 指数回退的作用？

# 最小帧长度

- 以太网最小帧长度为64字节
  - 在允许的最长距离情况下，**传输最短帧必须持续至少1个RTT**，才能保证发送该帧的主机检测到任何可能的冲突
  - 2500m线缆长度以太网最大RTT: 51.2 ms
  - 对于10 Mbps以太网而言，上述要求给出最小帧长度为 10 Mbps x 51.2 ms = **512 bits (64 bytes)**



最坏情况：两台主机位于线缆两端

# Ethernet技术特点

- 媒体接入控制(MAC)采用带有冲突检测的载波侦听多路接入(CSMA/CD)
- 无连接(Connectionless): 传送和接收网卡之间无握手协商(即建立连接关系)
- 不可靠: 没有滑动窗口类似的可靠传输机制, 即收到帧后无确认
  - 交给网络层协议的分组流, 可能存在缺口(丢失的分组)
  - 相应的缺口分组, 上层协议可能会加以弥补, 如TCP; 如无补救, 网络应用会感知, 亦可根据需要采取相应措施





# 内容提要

---

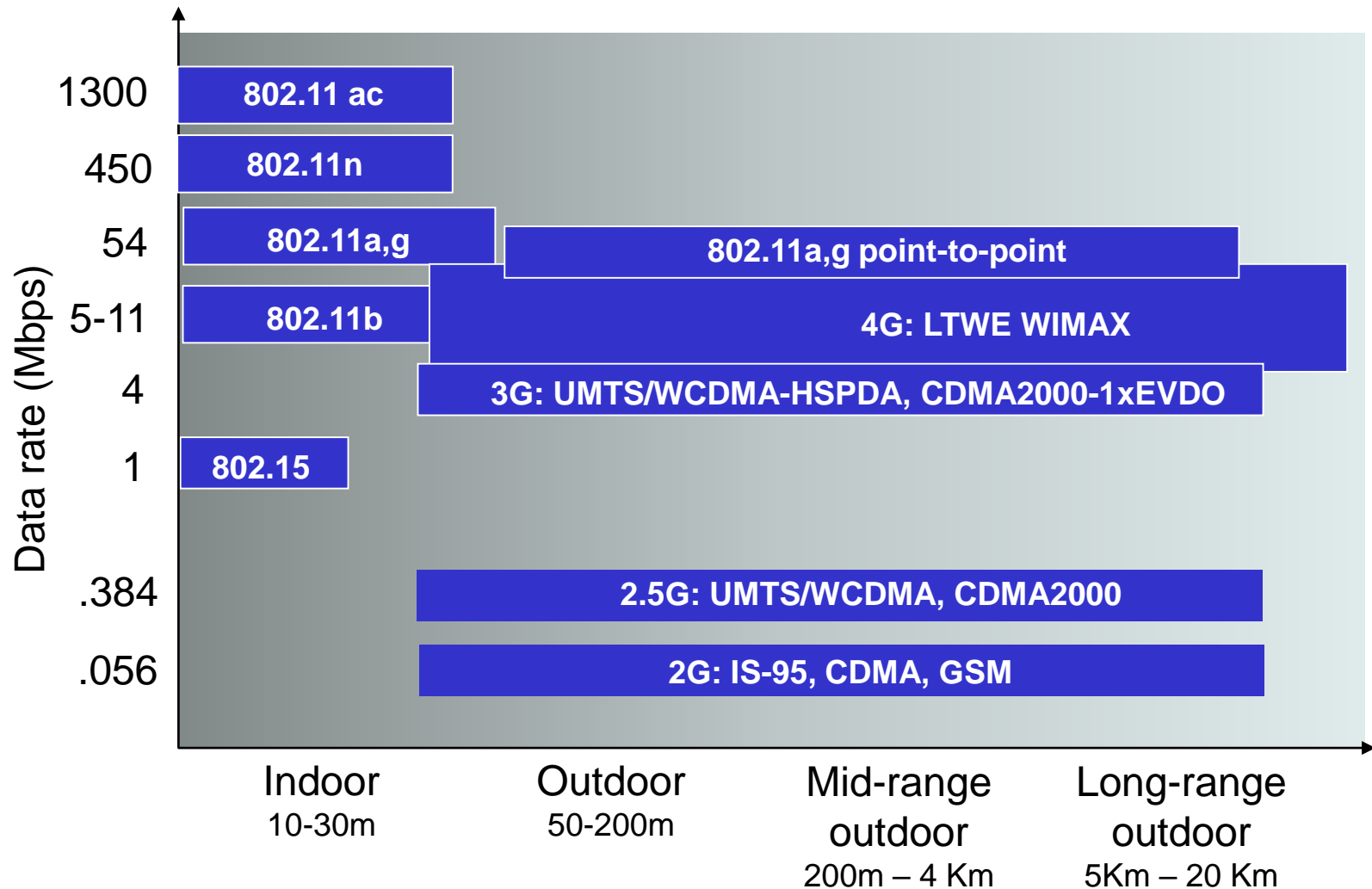
- 多路接入网络
  - 基本问题, MAC协议类型
- 以太网
  - 简介, 以太网MAC
- 无线局域网
  - 简介, 802.11 MAC, 组网模式

# (分组)无线网络

- 区分无线网络技术的维度
  - 可提供的带宽
  - 通信节点之间的最大距离
  - 支持的移动速度
- 三类常见的无线网络技术
  - 蓝牙(Bluetooth), Wi-Fi (802.11), 3G/4G蜂窝网络

	Bluetooth (802.15.1)	Wi-Fi (802.11)	3G Cellular
Typical link length	10 m	100 m	Tens of kilometers
Typical data rate	2 Mbps (shared)	54 Mbps (shared)	Hundreds of kbps (per connection)
Typical use	Link a peripheral to a computer	Link a computer to a wired base	Link a mobile phone to a wired tower
Wired technology analogy	USB	Ethernet	DSL

# 无线网络标准



# 无线网络的一种分类方法

	单跳(Single hop)	多跳(Multiple hops)
有基础设施 (infrastructure)	主机链接至基站(如无线接入点), 进而连接至 Internet, 如WiFi、蜂窝网	需要多个无线节点中继以连接至更大网络——网状网(mesh network)
无基础设施	无基站, 通常并不连接至 Internet, 如蓝牙, 自组织网络(ad hoc networks)	无基站, 无线节点之间互相中继以到达其他节点, 如MANET, VANET

注:

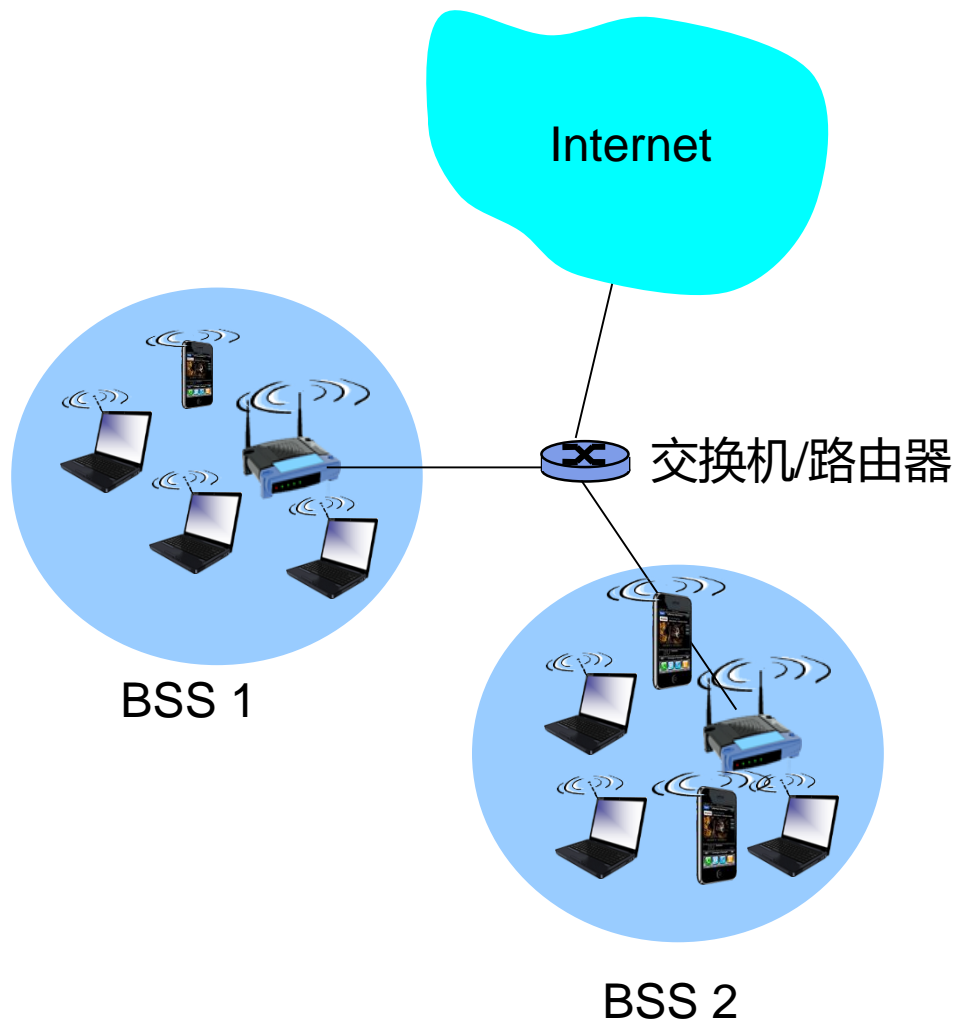
MANET —— Mobile Ad hoc Network, 移动自组织网络

VANET —— Vehicle Ad hoc Network, 车载自组织网络

# 无线局域网基础

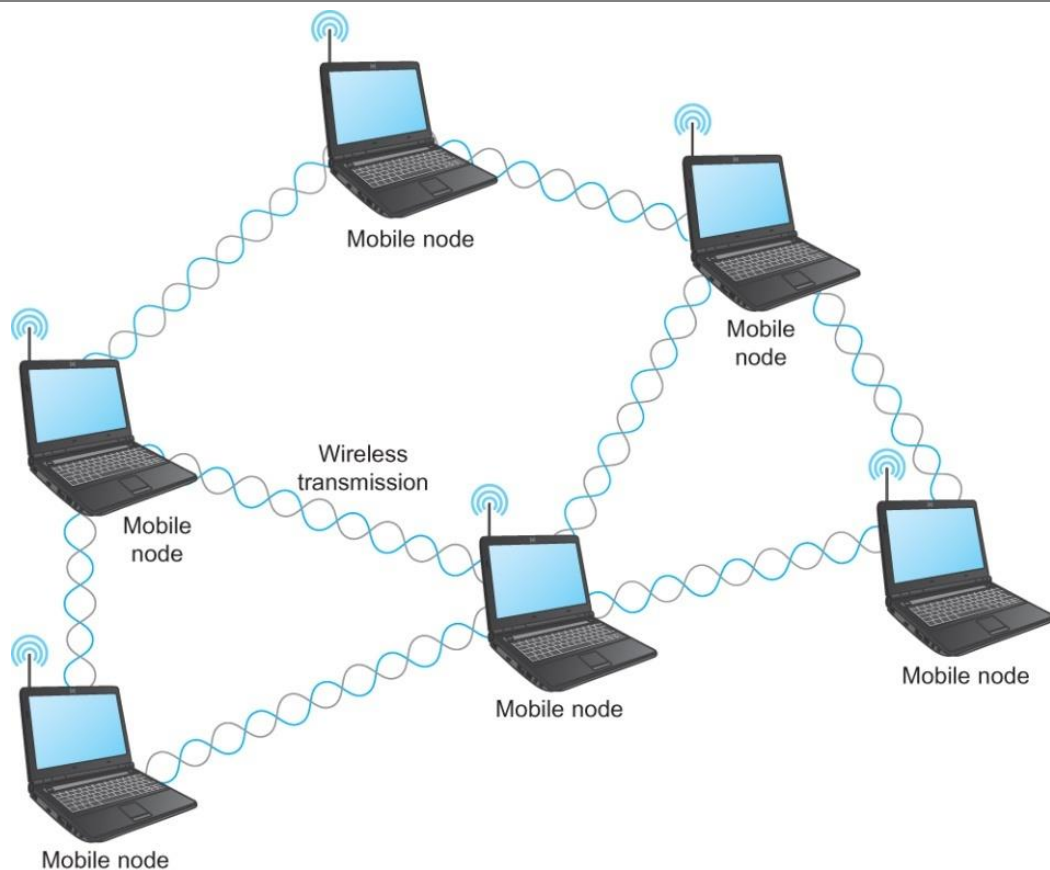
- 物理层
  - 扩频通信：直扩或跳频
  - 正交频分多路复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)
- 节点只能接收一路传输信号
- 半双工：发送、接收分时进行
- 冲突检测难以实施：发送信号强度远远超过接收信号
- 传输覆盖范围有限
  - 不能进行载波侦听
  - 导致隐藏/暴露节点问题
- 两种工作模式
  - 基础设施、自组织

# 基础设施(Infrastructure)模式



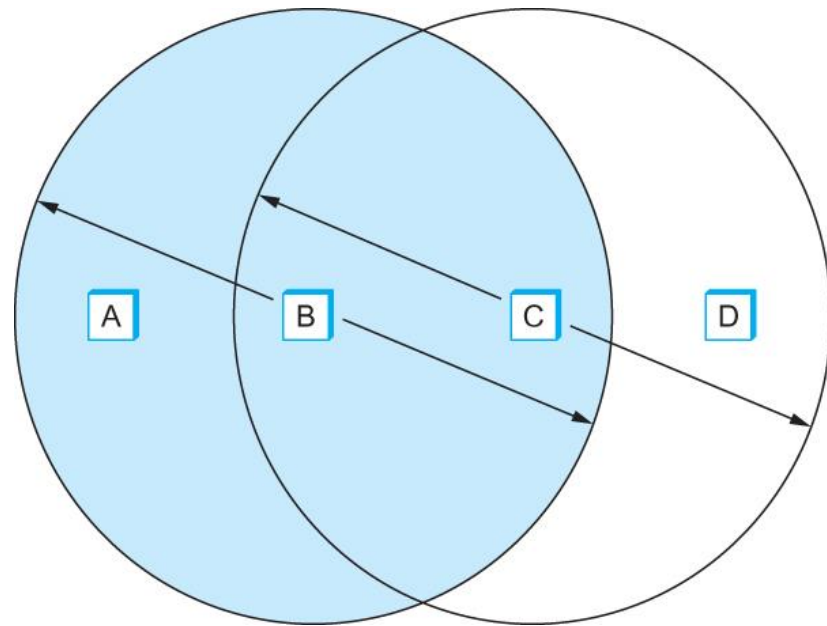
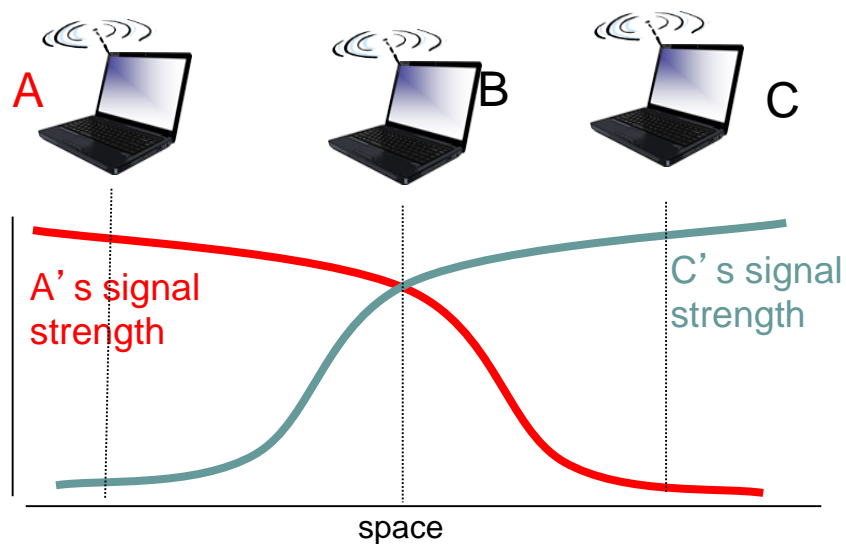
- 所有帧传输都通过接入点(Access Points, APs)中继
- 一个AP及其链接的无线节点构成一个基本业务组(Basic Service Sets, BSS)
- 多个BSS之间通过一个分布式系统(通常为有线网络)连接

# 自组织(Ad hoc)模式



- 每个节点能够转发并非发往自己的帧，即充当中间节点
- 节点集合构成一个独立基本业务组(Independent Basic Service Set, IBBS)

# 隐藏/暴露节点问题



- **隐藏节点(Hidden node)问题**: 当A和C同时向B发送数据时, A和C互不知晓, 因此两方信号在B处冲突
- **暴露节点(Exposed node)问题**: 当B向A发送数据时, C会认为其不能向D发送数据, 而事实上可以



# 802.11

- 无线局域网主要技术标准，常常简称为WiFi (Wireless Fidelity)
  - 局域网 —— 覆盖有限地理范围的网络链接
  - IEEE制定
- 支持基础设施和自组织两种工作模式
- 存在多个变种
  - 802.11: 1或2 Mbps, 2.4 GHz, 100m
  - 802.11a: 最高54 Mbps, 5 GHz, 10-30m
  - 802.11b: 1、2、5.5、或11 Mbps, 2.4 GHz, 50-150m
  - 802.11g: 最高54 Mbps, 2.4 GHz, 50-150m
  - 802.11n: 最高200 Mbps, 2.4-5 GHz, 50-100m
  - ...

# 802.11 MAC (1)

- 冲突避免的载波侦听多路接入(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, **CSMA/CA**)
- **载波侦听多路接入(CSMA)**
  - 发送节点侦听信道空闲与否，确定是否发送数据以及等待时间
- **冲突避免(CA)**
  - 侦听到信道由忙转闲时，各发送节点采用随机回退以避免冲突
  - 传输数据之前交换控制帧，隐式告知邻近节点即将开始数据传输，这些节点因此等候以避免冲突
- 帧传输**采用停止等待算法**
  - 每发送一帧均需等待确认

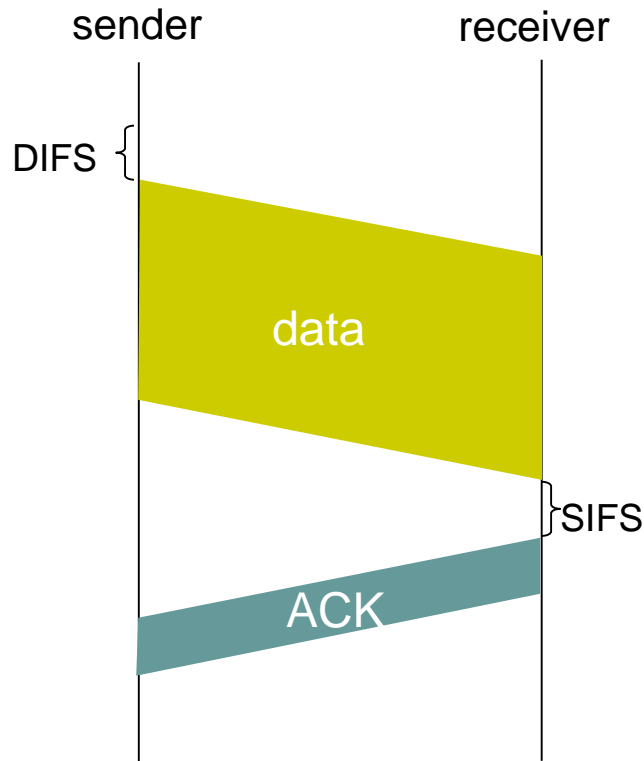
# 802.11 MAC (2)

## 发送方

1. 如果侦听到信道空闲DIFS时长
  - 传输整个帧(无冲突检测)
2. 如果侦听到信道忙
  - (a) 启动随机回退定时器(类似于CSMA/CD), 并等候
    - 只有信道空闲时, 定时器才计时
    - 信道忙时, 定时器冻结计时
  - (b) 回退定时期满时, 传输整个帧, 等候ACK
    - 如收到ACK, 若有后续帧待传, 返回(a)
    - 如未收到ACK, 则在更大范围内选择随机回退时间, 返回(a)

## 接收方

- 如果接收到的帧检查无错
  - 延迟SIFS, 然后回复ACK

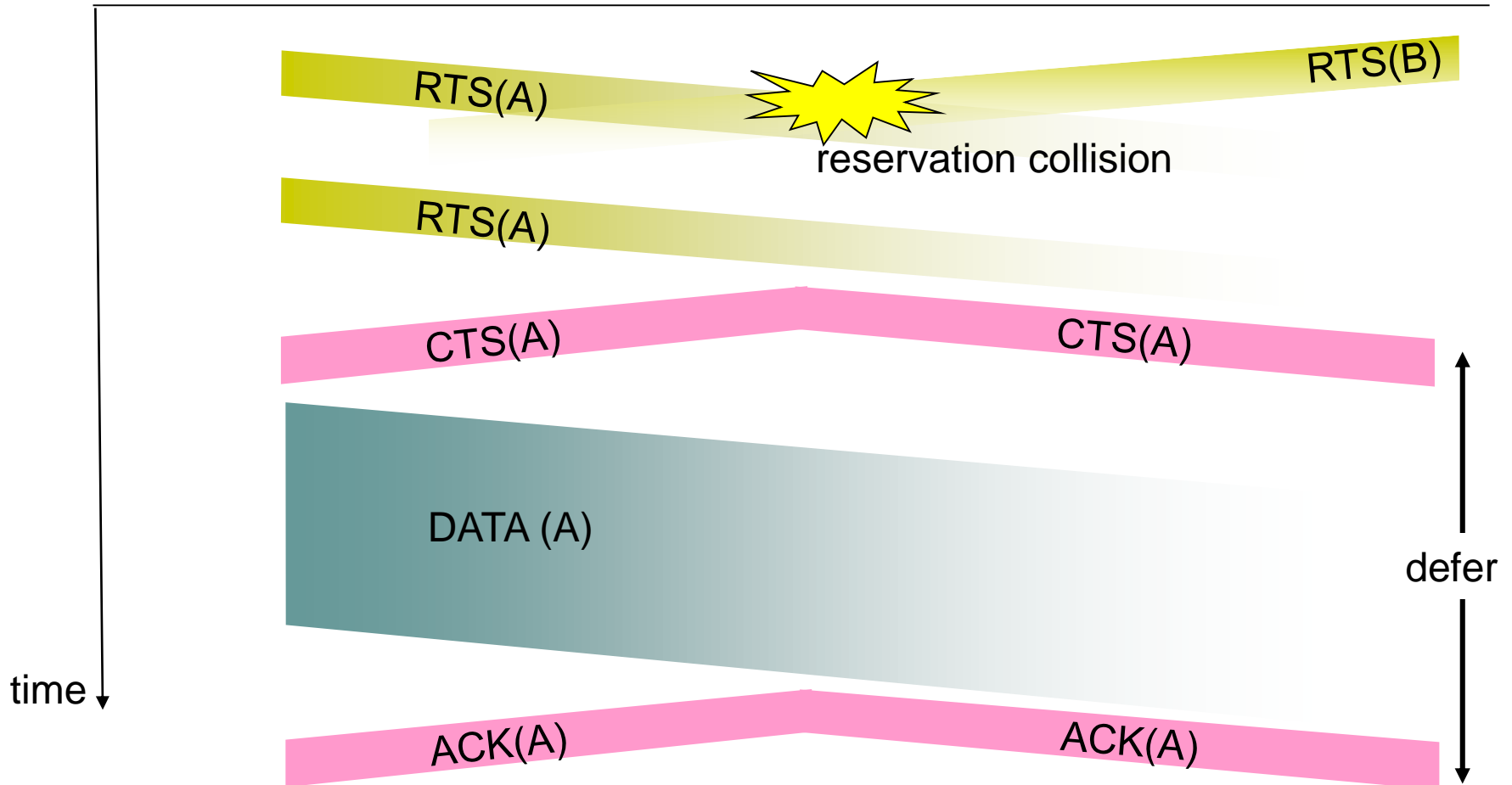


DIFS: Distributed Inter-Frame Space  
SIFS: Short Inter-Frame Space

# 802.11 MAC (3)

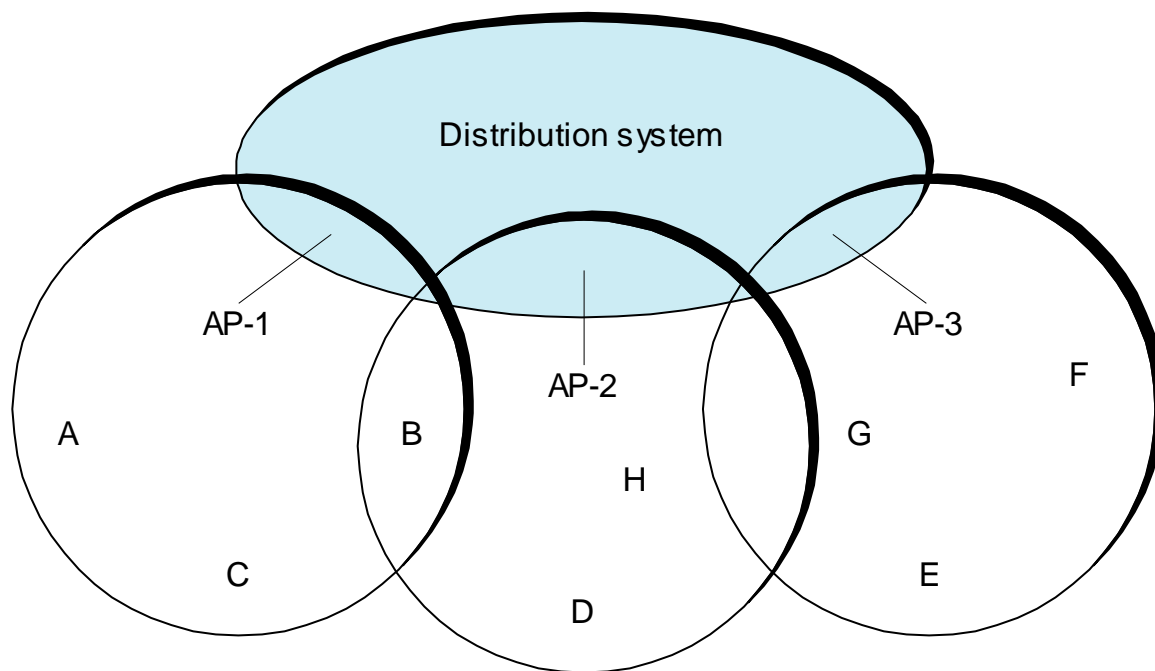
- 传输数据之前的控制帧交换
  - 发送方向接收方发送Request to Send (RTS)消息，其中给出需要占用信道的时间
  - 接收方回应以Clear to Send (CTS)消息
  - 属于可选项，通常用于长数据帧传输，以避免相应的资源消耗
- 如节点收到CTS
  - 说明该节点靠近接收方，从而知晓在指定时间内不能发送数据
- 如节点收到RTS，但收不到CTS
  - 说明该节点不靠近接收方，从而知晓能够发送数据
- 如果两个节点同时发送RTS至同一接收节点，即RTS在该接收节点处冲突
  - 显然该接收节点不会回应以CTS
  - 由于收不到CTS，这两个节点意识到自己发送的RTS丢失，继而采用指数回退 (类似于共享式以太网)

# RTS和CTS消息交互示例



# 基于基础设施的无线局域网

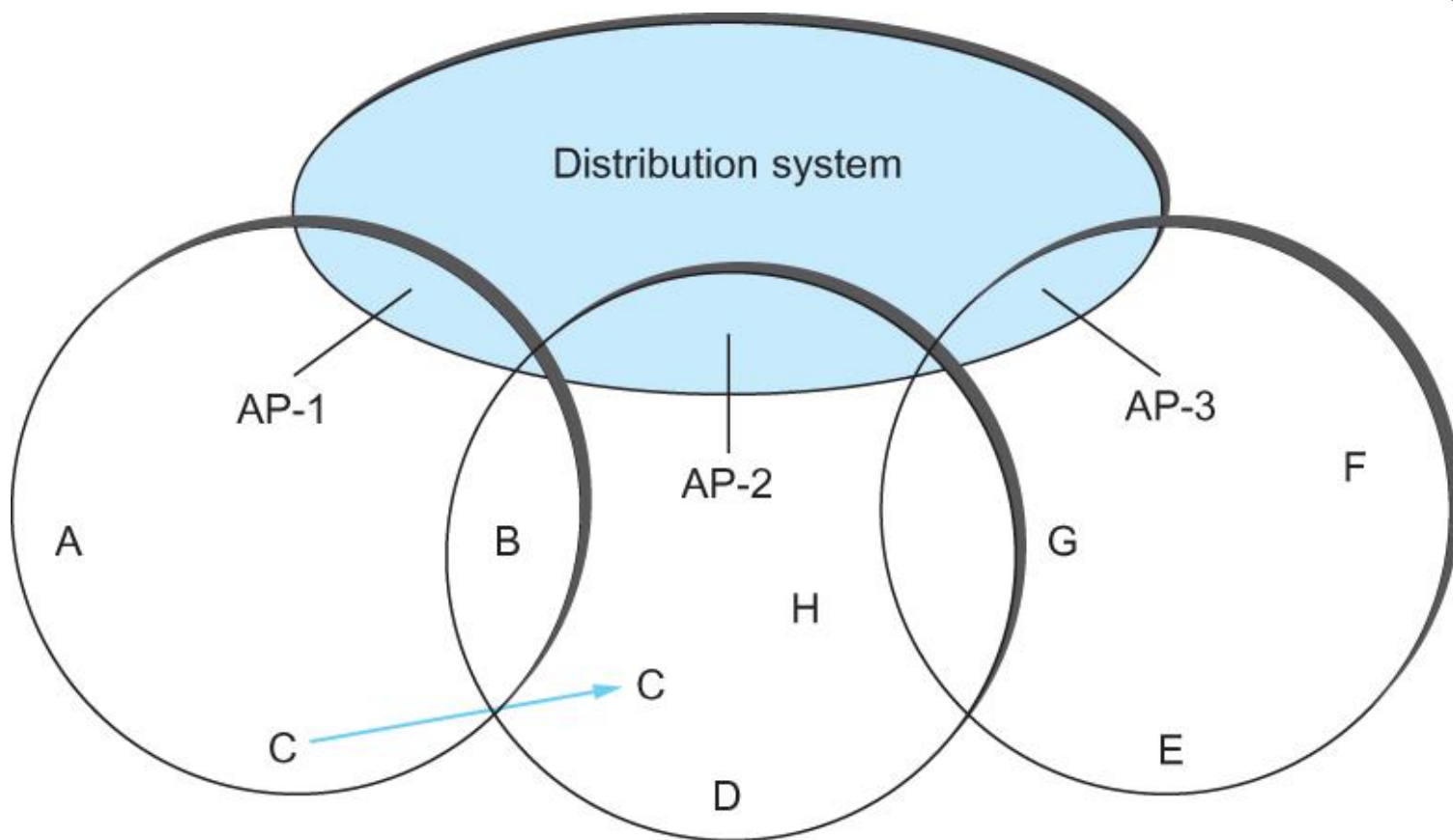
- 每个节点与一个接入点(Access Point, AP)关联
- 每个AP覆盖范围有限
  - 类似于蜂窝移动通信系统中的单元格(cell)
- 两台主机之间的通信
  - 同一单元格：诉诸于AP
  - 跨越单元格：借助一个分布式系统，通常为有线网络，如以太网



# 节点与AP之间的关联建立

- 关联(Association)建立过程
  1. 节点发出Probe帧
  2. 所有收到该Probe帧的AP回应以Probe Response帧
  3. 节点选择一个AP, 向其发送Association Request帧
  4. 被选定的AP回应以Association Response 帧
- 节点在下列情况下执行上述关联过程
  - 初始加入网络
  - 由于位置移动, 需要切换到新的AP

# 对于移动性的支持



- 主动探查(Active probing): 移动节点发送Probe帧搜寻AP
- 被动探查(Passive probing): 移动节点根据AP发出的Beacon帧, 发现AP

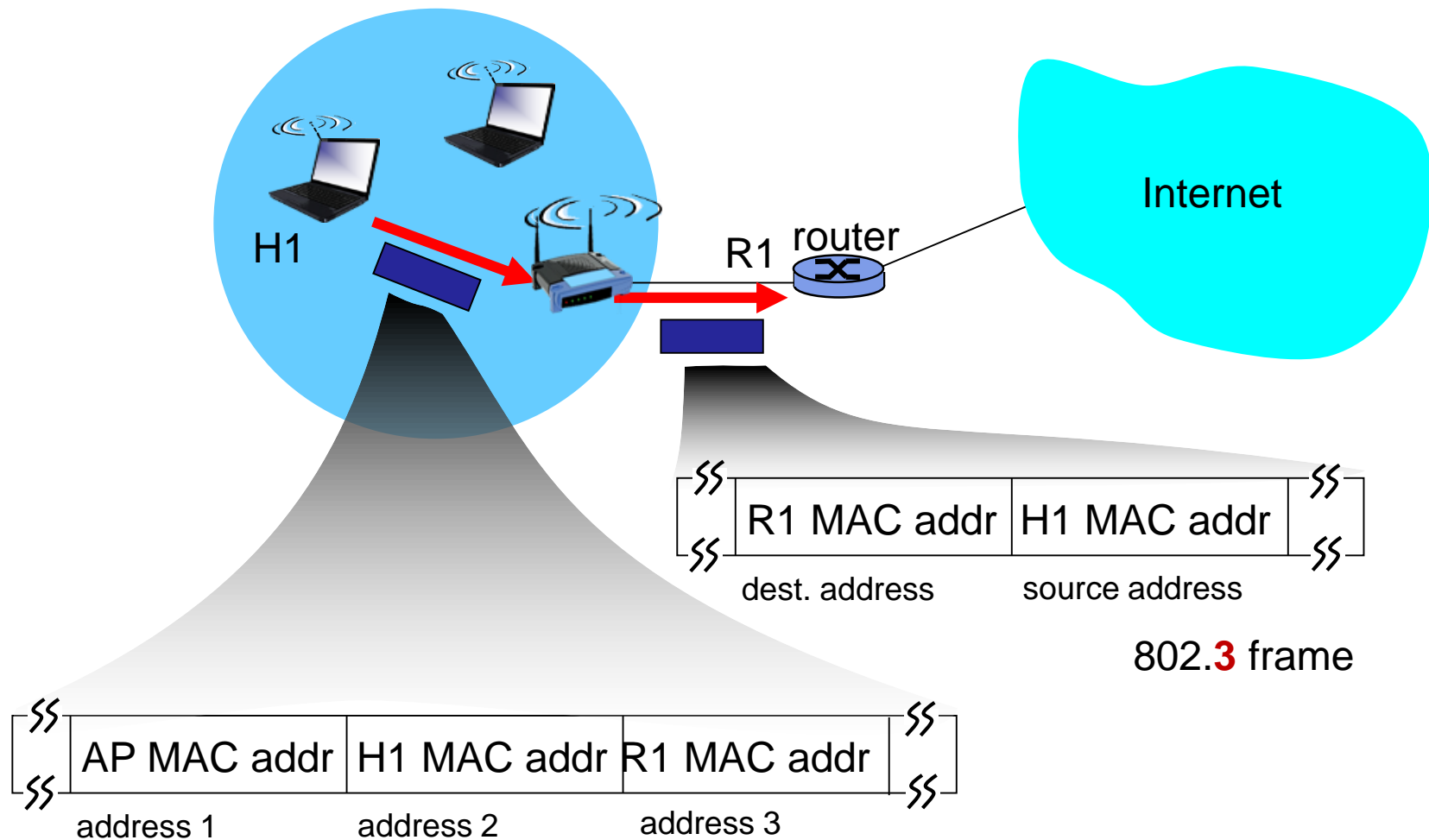


# 802.11帧结构



- **Control**字段
  - **Type**子域：指明帧类型，如数据, RTS, CTS, 扫描
  - **ToDS**、**FromDS**子域：与地址字段含义相关
  - ...
- 4个地址字段
  - 出于**BSS**之间通过分布式系统中继的考量
  - 具体含义取决于Control字段中的ToDS和FromDS子域
    - 例如，当ToDS和FromDS同时为1时，Addr1、Addr2、Addr3、Addr4分别对应于最终目的地(ultimate destination)、当前发送者(immediate sender)、中间目的地(intermediate destination)、原始来源(original source)

# 802.11寻址示例



# 小结

---

- 多路接入网络基础
  - 多路接入基本问题, MAC
- 两种多路接入网络
  - 以太网(802.3): 基本原理, CSMA/CD
  - 无线局域网(802.11): 基本原理, MACA, 基础设施、自组织工作模式
- 参考章节
  - 教材2.6, 2.7.1节
  - [KR12] 6.3节