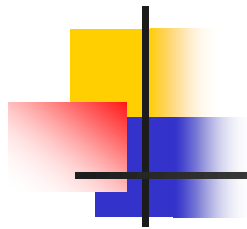


第4章 MAC：以太网与WLAN



刘志敏

liuzm@pku.edu.cn



提纲

- CSMA
- IEEE802.3 以太网: CSMA/CD
- IEEE802.11 WLAN: CSMA/CA



回顾：信道分配与MAC

■ 划分信道

- 将信道资源分割为更小的信道(时隙, 频率, 码字)
- 为需要使用信道的节点分配信道资源
- 增大了平均延迟, 降低了信道利用率

■ 随机接入或动态信道分配：适于节点数量动态变化、数据突发业务, 例如计算机上网业务

- ALOHA、时隙ALOHA
- CSMA：1坚持CSMA、P坚持CSMA、非坚持；信道利用率与何有关？
- 无冲突协议：预约协议、轮询
- 有限竞争协议

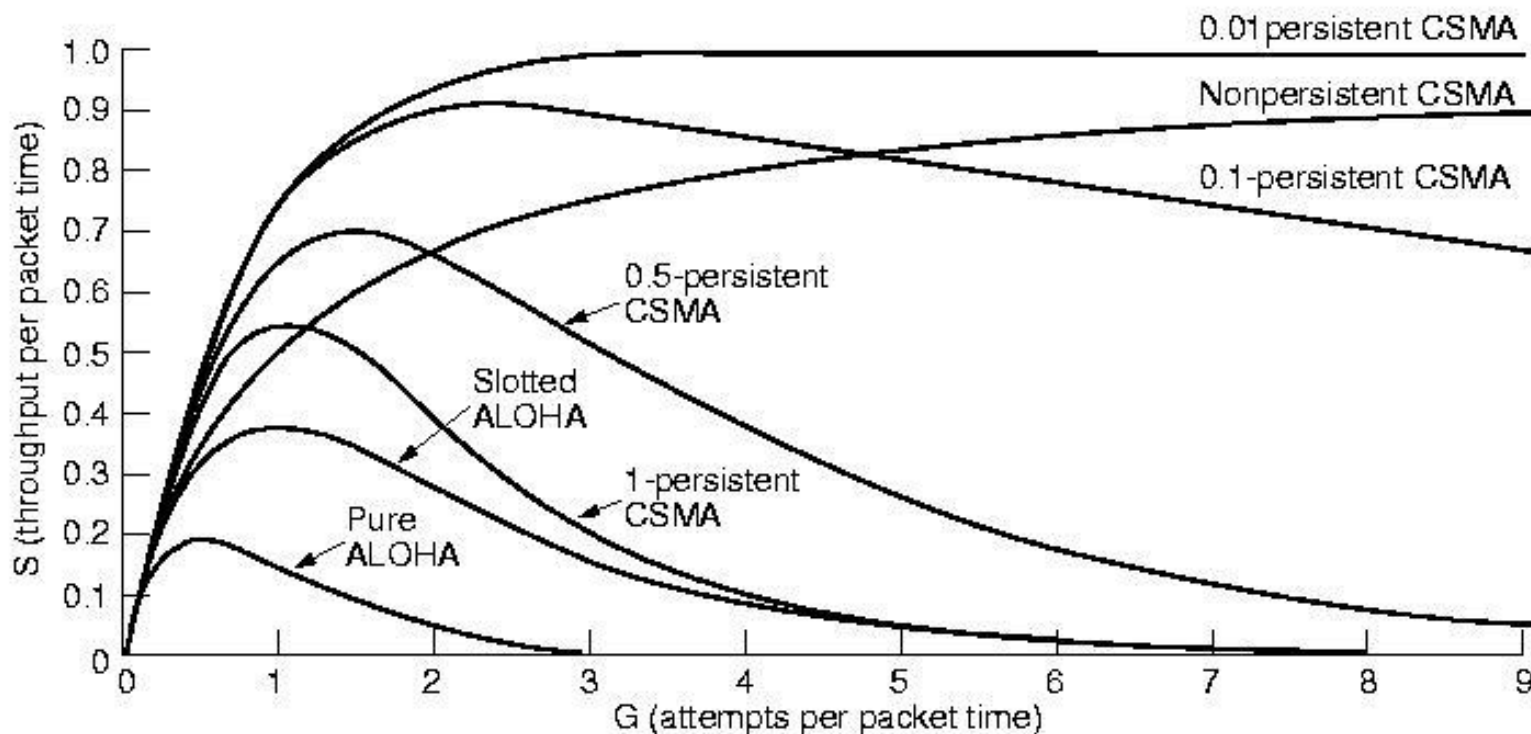


CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

- 在CSMA（载波侦听多路访问）系统中，终端在发射信号前测试信道状态，如果信道空闲（即没有检测到载波），则就按照特定算法来发送。
- CSMA技术分类
 - 1-坚持CSMA（1-persistent CSMA）
 - 当信道空闲时，以概率1发送分组
 - 非坚持CSMA（non-persistent CSMA）
 - 若信道忙，则等待一随机时间之后再进行载波侦听
 - p坚持CSMA（p-persistent CSMA）
 - 若信道空闲，则以概率P在当前时隙发送，而以概率（1-P）推迟到下一时隙发送

CSMA: 比较 (cont.)

- 当 $a=0.01$ ($a=\tau/T_p$) 时, 讨论吞吐量与负载之间的关系
- 1坚持的与非坚持, 有本质区别。
- 在低负载时, 采用1坚持CSMA, 吞吐率要高于ALOHA的; 在高负载时, 非坚持更好; 非坚持CSMA峰值吞吐率约比1-坚持CSMA高2倍。



CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

- 1、1-坚持CSMA：某站要发送数据时先监听信道，若信道忙就坚持监听直到信道空闲为止，当空闲时立即发送。若两个站同时监听到信道空闲立即发送必定冲突，即冲突概率为1，故称之为1-坚持型。假如有冲突发生，则等待一段时间后再监听信道。
- 2、非坚持CSMA：当某站监听到信道忙时，不再坚持监听而是随机延后一段时间再监听。这样，可能在再次监听之前信道已空闲而浪费时间
- 3、P坚持CSMA：适于时隙信道，当某站准备发送时先监听信道，若空闲便以概率P传送信息，而以概率 $(1-P)$ 推迟发送。如果监听到信道忙，就等到下一个时隙再重复上述过程。
- P坚持CSMA算是1-坚持CSMA和非坚持CSMA的折衷。对于P坚持CSMA，如何选择P值，需要考虑如何避免在重负载情况下系统处于不稳定状态。假如当信道忙时，有N个站有数据等待发送，则当前的发送完成时，有NP个站企图发送，如果选择P过大，使 $NP > 1$ ，则冲突不可避免。最坏的情况是，随着冲突概率的不断增大，吞吐率会降为0。所以选择P值使 $NP < 1$ 。如果P值选得过小，则信道利用率会大大降低。

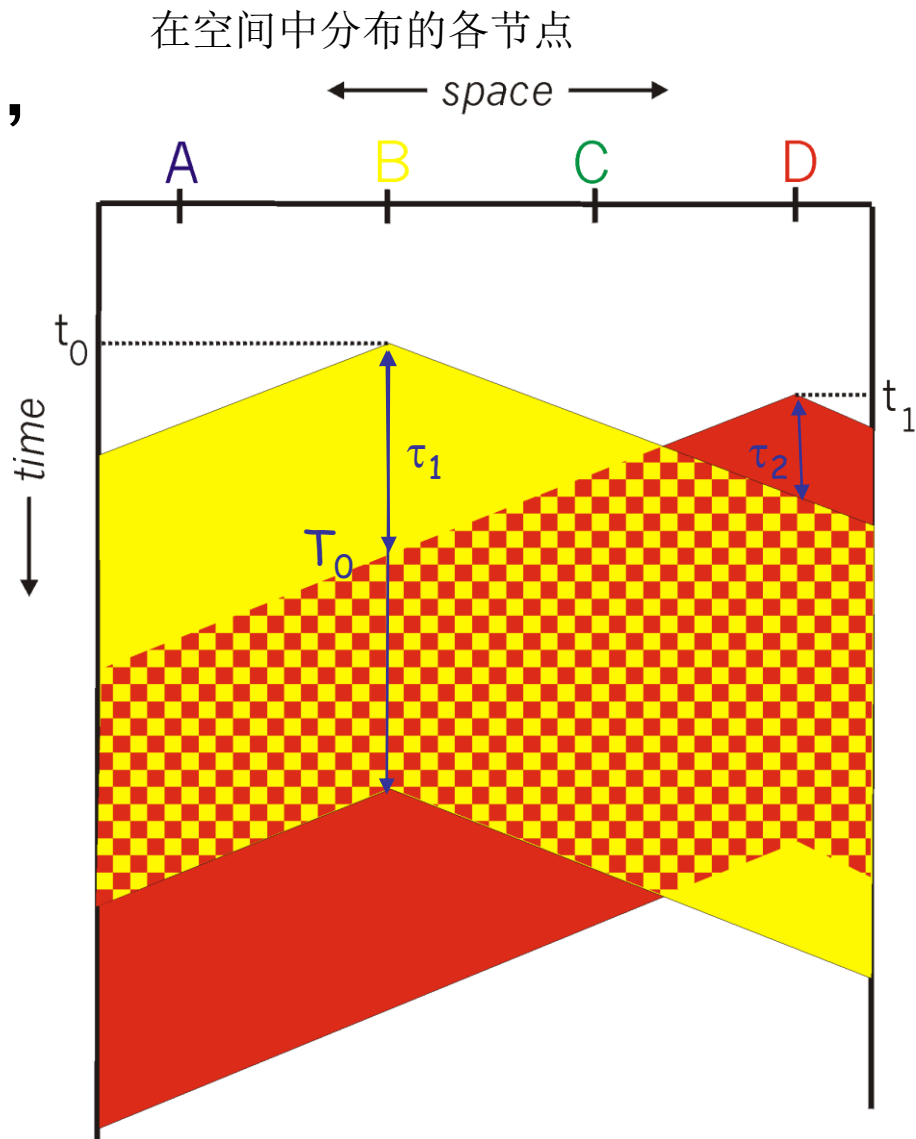
CSMA

- CSMA: 在发送之前侦听, 若空闲则发送; 若忙, 则推迟发送

- 仍然可能发送碰撞:
传播延迟致使B、D两节点无法听到对方发送的信号

T_0 为帧的发送时间

τ_1 、 τ_2 分别为B、C检测到碰撞所需时间, 与之间的距离有关



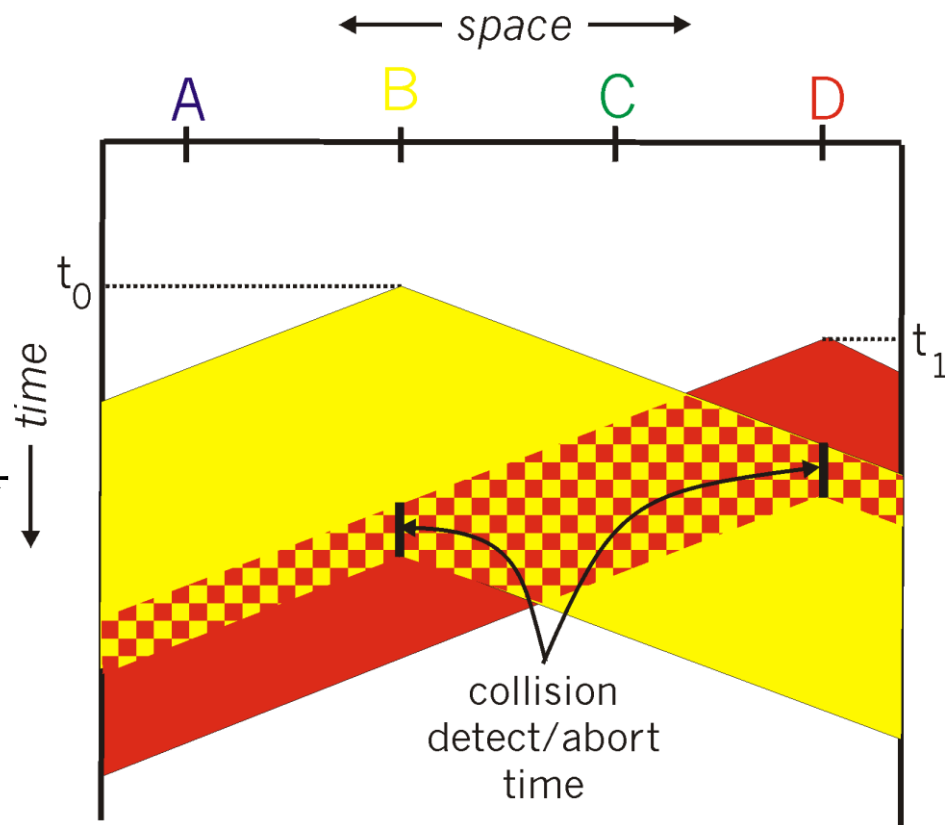
CSMA/CD (碰撞检测)

CSMA/CD

- 在短时间内做碰撞检测
- 终止有碰撞的发送，降低对信道的浪费

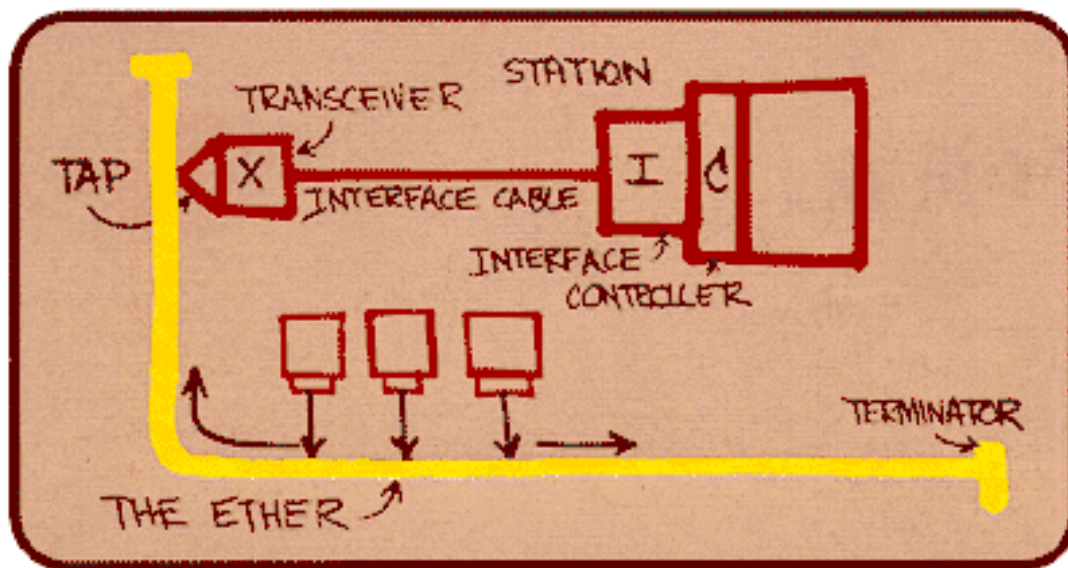
■ 碰撞检测

- 易于在LAN中实现：测量信号强度，比较发送、接收信号
- 难于在WLAN中实现：接收信号很小，而发送信号很大



Ethernet以太网

- 廉价：每个网卡\$20
- 广泛用于LAN的技术
- 比令牌环LAN和ATM便宜
- 速率不断提高：10Mbps – –10Gbps

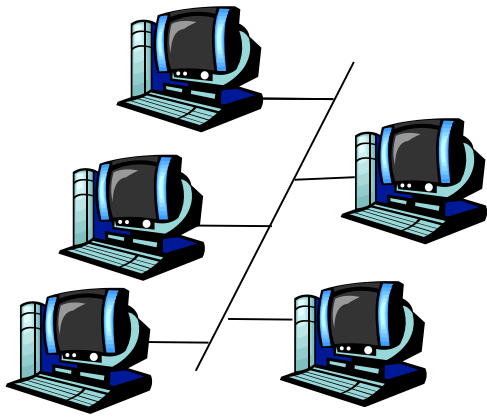


Metcalfe's Ethernet Sketch

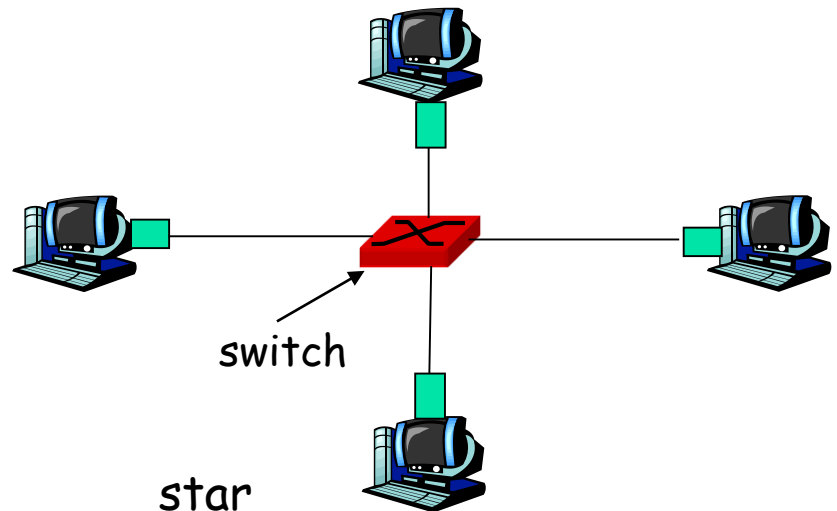
1973年施乐公司的鲍勃·梅特卡夫发明以太网，1976年发表“以太网：局域计算机网络的分布式分组交换技术”

星型拓扑

- 总线型：用同轴电缆连接，或用双绞线通过集线器连接
 - 所有的节点在同一碰撞域，节点之间相互碰撞
- 星型拓扑
 - 交换机：位于中心
 - 每个链路执行以太网协议，节点之间不再相互碰撞

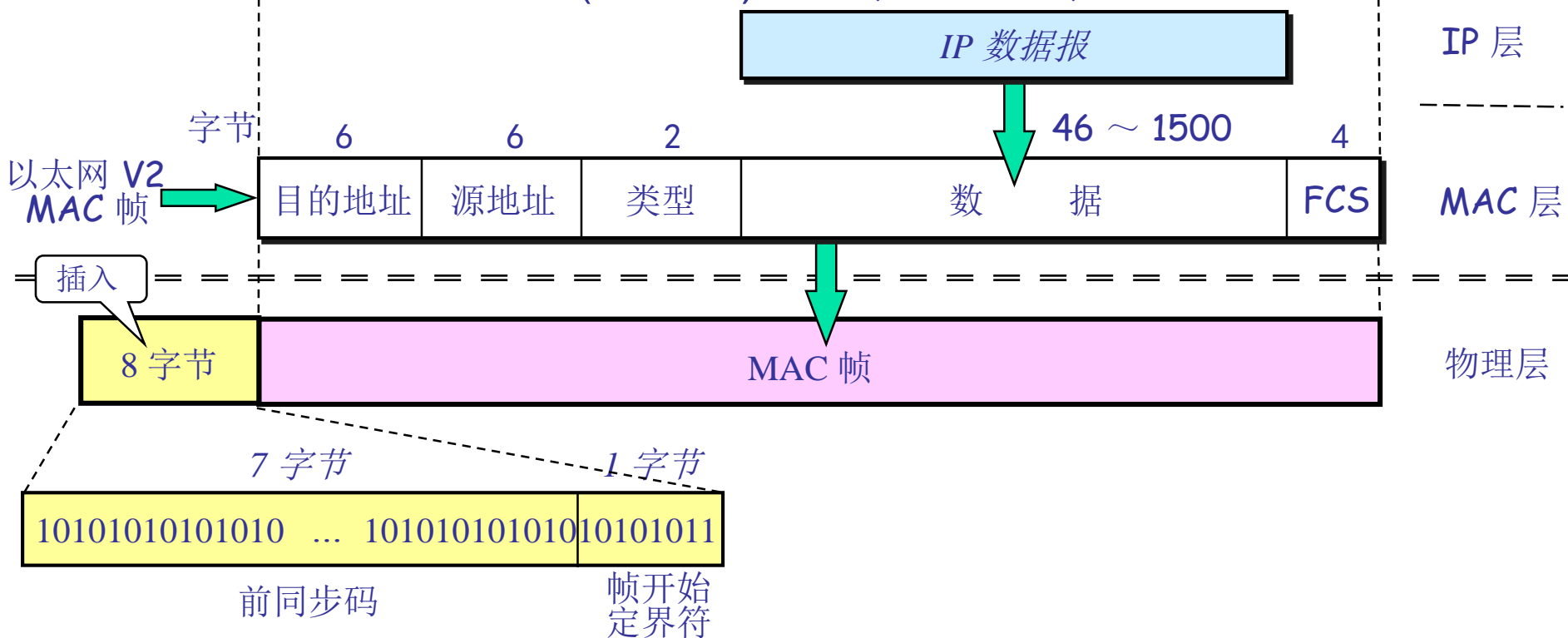


bus: coaxial cable



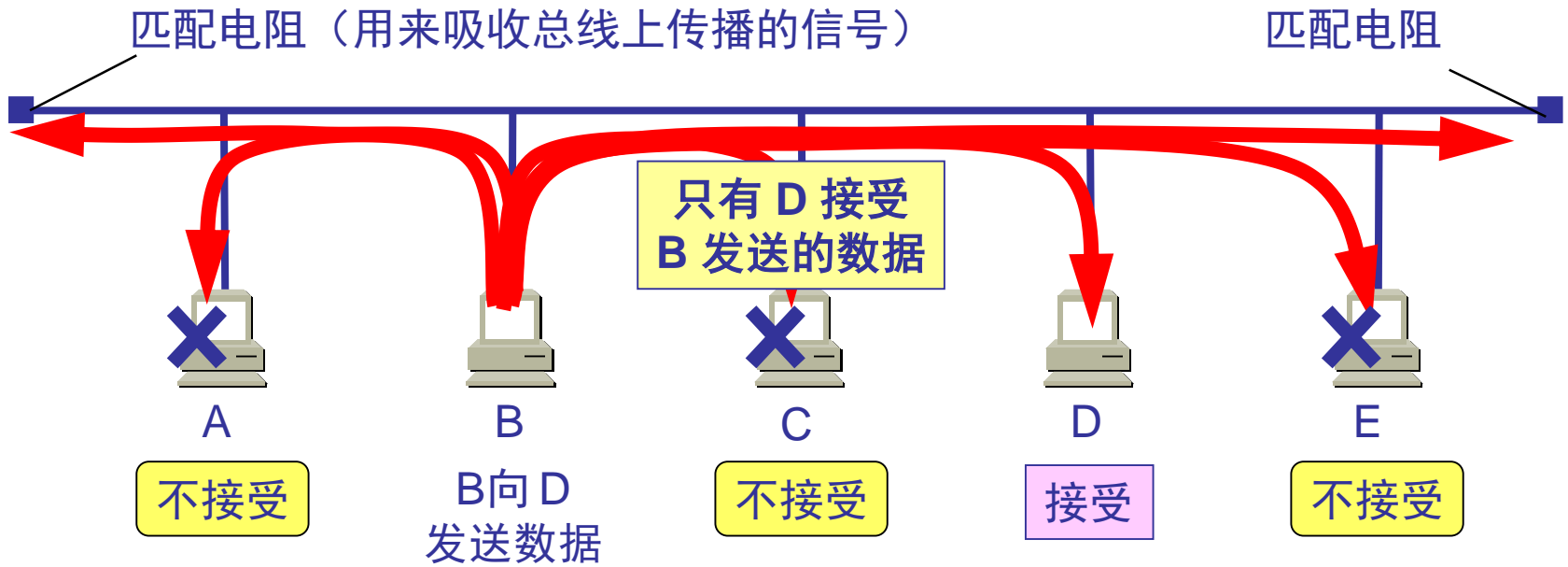
Ethernet MAC 帧格式

- 8个字节前导码：前7字节是同步码，实现帧的位同步，最后1个字节是帧开始定界符，表示后面的信息是MAC 帧
- 地址字段：目的地址首位为0的为普通地址，为1的为组播地址；全1的为广播地址；源地址前3字节为组织标识符，分配给网络制造商
- 类型字段：通知接收方帧内包含的协议类型
- 数据字段：最小长度 (64 - 18) 字节，不足时，插入填充字段

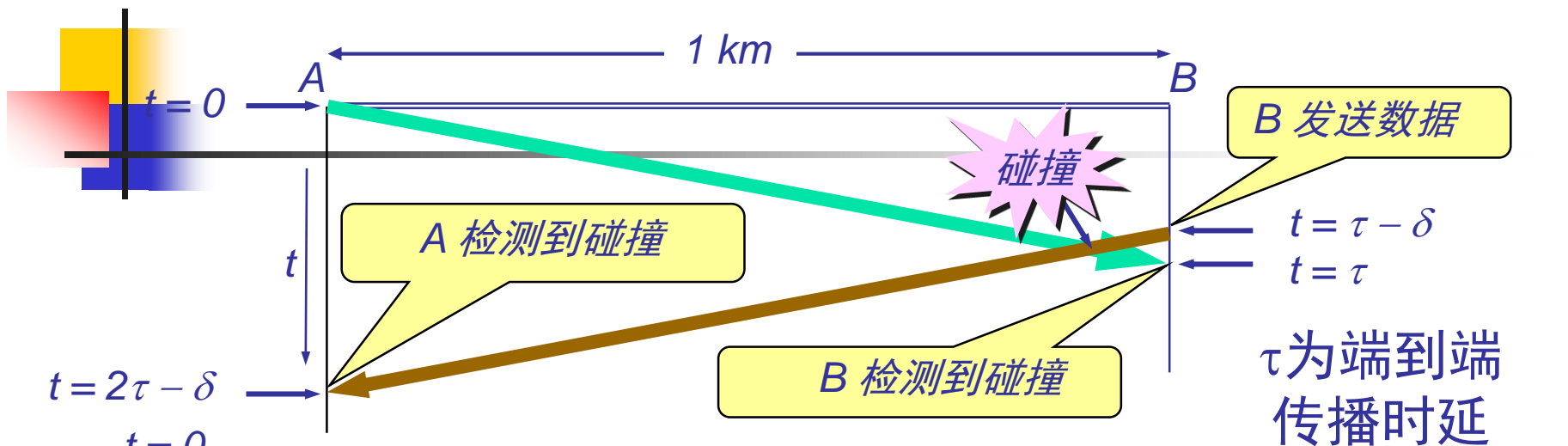


CSMA/CD

- CSMA/CD: **Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection**, 载波监听多点接入/碰撞检测
- 以太网以多点接入方式共享总线资源



CSMA降低了碰撞的概率但不能完全避免碰撞!



$t = 0$
A 检测到
信道空闲
发送数据



$t = \tau - \delta$
B 检测到信道空闲
发送数据



$t = \tau - \delta / 2$
发生碰撞



$t = \tau$
B 检测到碰撞
停止发送



$t = 2\tau - \delta$
A 检测到
碰撞



二进制指数退避算法

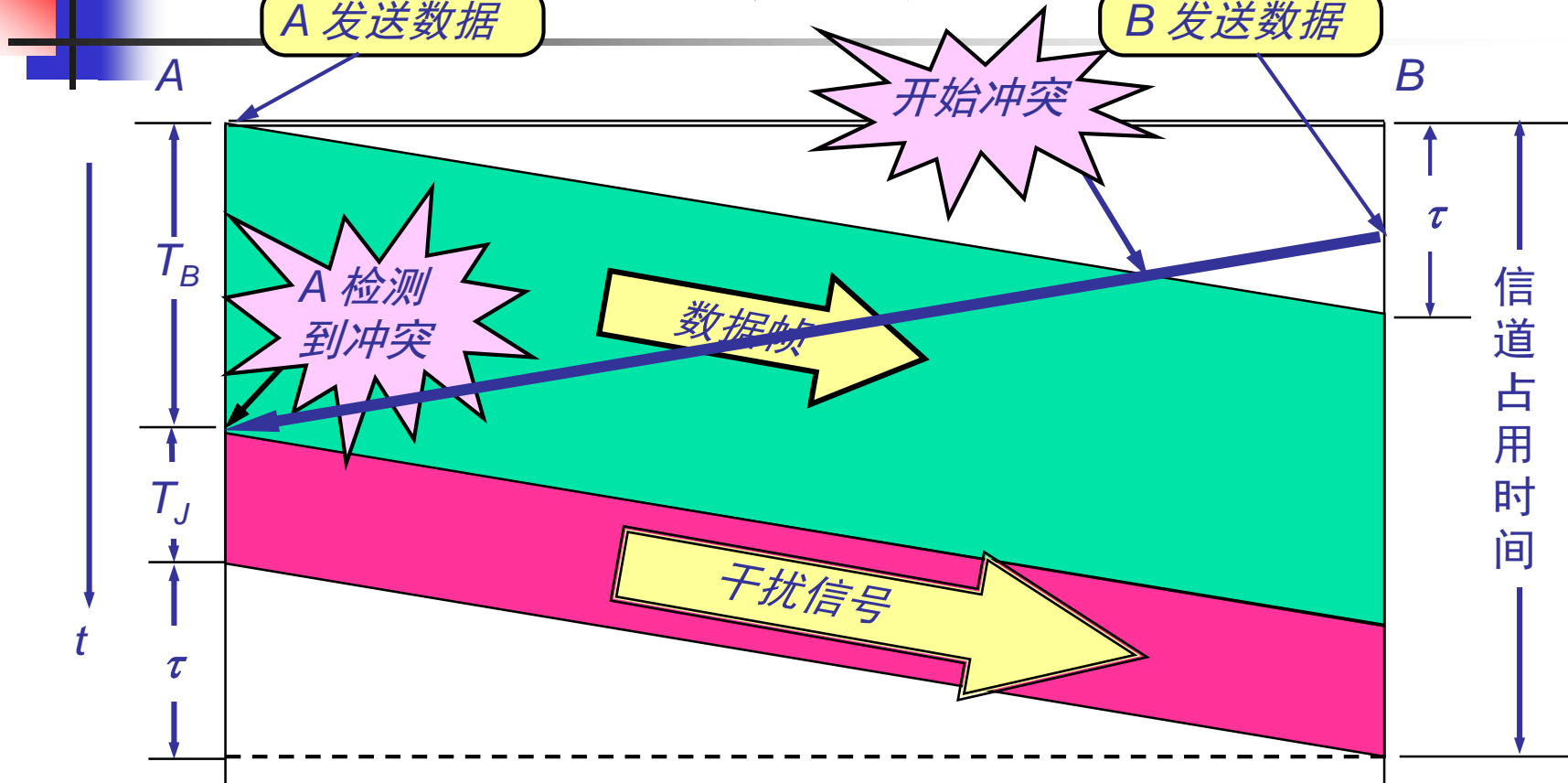
- τ 为端到端传播时延，发送数据帧后最多经过 2τ 后，可判决是否发生碰撞； 2τ 称为争用期
- 发生碰撞后，推迟一个随机时间再发送；退避时间由二进制指数退避算法决定
- 基本退避时间取 2τ
 - 重传次数为 k ，每次退避后， k 累加
$$k = \text{Min}[k+1, 10]$$
 - 随机选取一个数 r ， $r \in [0, 1, \dots, (2^k-1)]$
 - 重传时延为 $r \times 2\tau$
 - 当重传10次仍不成功，则丢弃该帧并通知上层



争用期及最短帧长

- 以太网的争用期为 $51.2\mu\text{s}$
($5120\text{m}=2*10^8*51.2*10^{-6}/2$) , 10Mb/s 可发送
512b, 即64B
- 最短有效帧长为64B, 长度小于64B的帧为**无效帧**。
因检测到冲突就中止发送, 此时的数据长度小于
64字节
- 强化碰撞: 当发送数据结点一旦检测到碰撞, 立即停止发送数据, 并要发送若干比特的**干扰信号**,
让所有站都检测到碰撞

人为干扰信号



B也能够检测到冲突，并立即停止发送数据，接着就发送干扰信号。为简单起见，只画出A发送干扰信号的情况。

CSMA/CD的信道利用率

- t_{prop} = LAN上两节点的最长传播延迟
- t_{trans} = 最长帧的发送时间

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

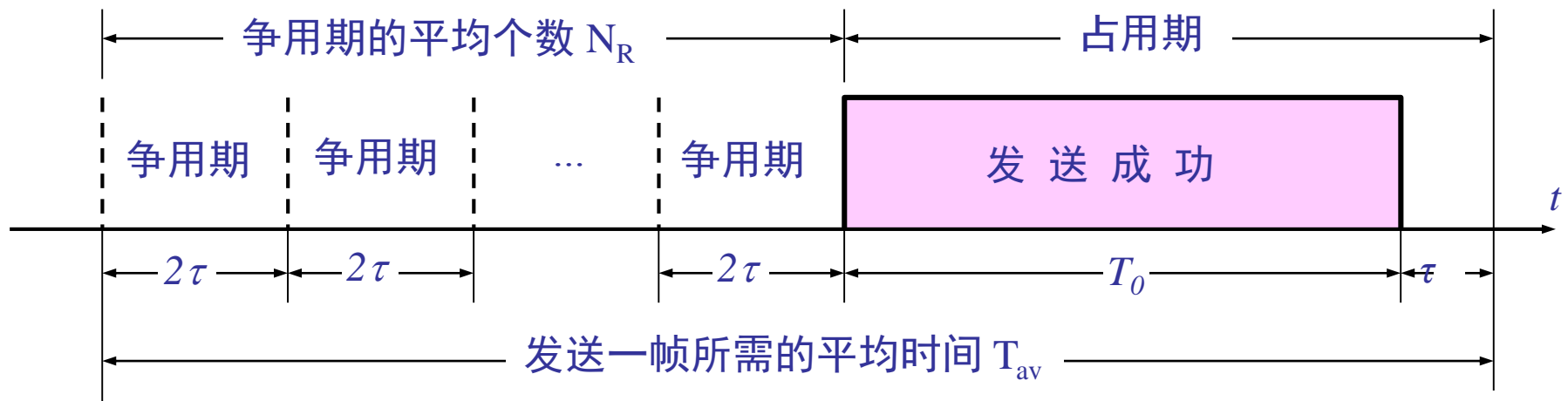
《高性能通信网络》 Jesn Walrand等著, 电子工业出版社
P66

- 效率趋于1
 - 当 t_{prop} 趋于0
 - 当 t_{trans} 趋于无穷
- 性能优于**ALOHA**: 简单、价廉、分布式!

以太网信道利用率

假定：

- 总线上共有 N 个站，每个站发送帧的概率是 p
- 帧长为 $L(b)$ ，数据速率为 $R(b/s)$ ，则帧的发送时间 $T_0 = L/R (s)$ 。
- 争用期为 2τ 。
- 检测到碰撞后不发送干扰信号
- 发送一帧的平均时间为 T_{av} 。





以太网信道利用率（续）

令 A 为一帧发送成功的概率，则

$$A = Np(1 - p)^{N-1} \quad (4-1)$$

一帧发送失败的概率为 $1-A$ 。

经过 j 个争用期成功发送的概率

$$\begin{aligned} P[j] &= P[\text{发送 } j \text{ 次失败但下一次成功}] \\ &= (1 - A)^j A \end{aligned} \quad (4-2)$$

则帧平均重发次数 N_R

$$N_R = \sum_{j=0}^{\infty} j(1 - A)^j A = (1 - A) / A \quad (4-3)$$

以太网信道利用率（续）

信道利用率 $S = \frac{T_0}{T_{av}} = \frac{T_0}{2\tau N_R + T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + a(2A^{-1} - 1)}$ (4-4)

其中, $a = \frac{\tau}{T_0}$ (4-5)

若使 A 最大, 则信道利用率最大。

将 (4-1) 式对 p 求极值, 当 $p=1/N$ 时, $A_{\max} = \left[1 - \frac{1}{N}\right]^{N-1}$

当 $N \rightarrow \infty$ 时, $A_{\max} = 1/e$

$$S_{\max} \approx \frac{1}{1 + 4.44a} \quad (4-6)$$

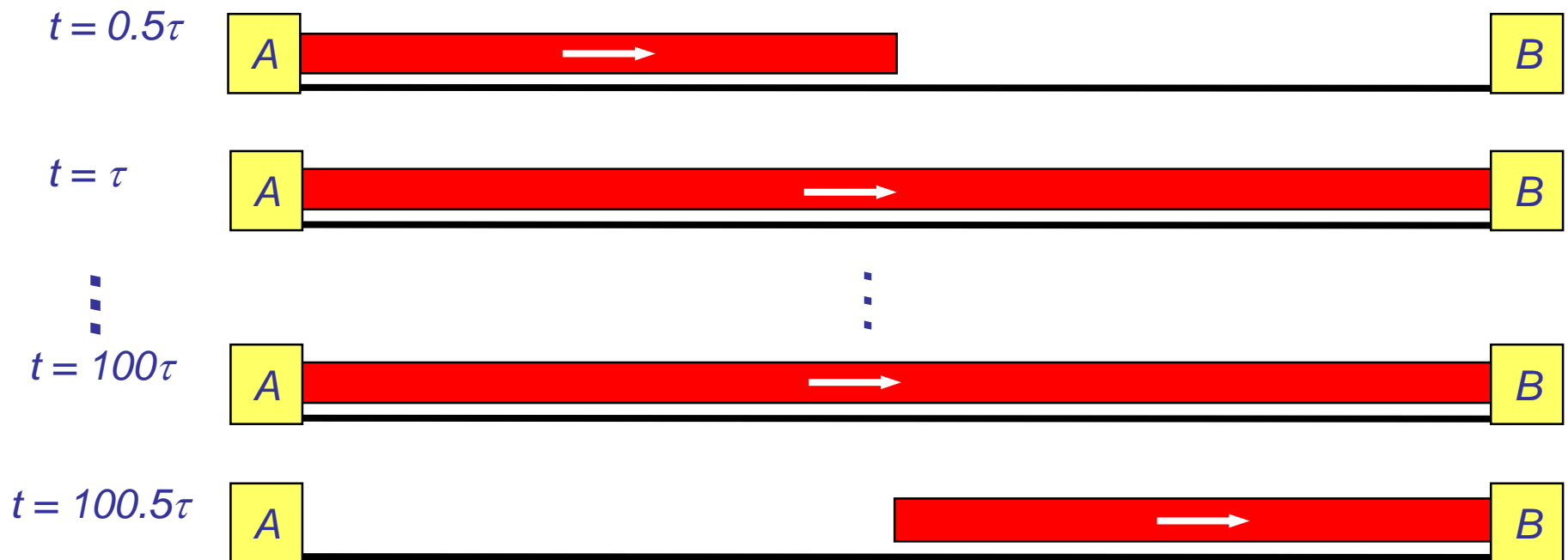
详见《计算机网络（第四版）》，谢希仁编著，电子工业出版社 P105

$\alpha > 1$ 时的信道利用情况 ($\alpha = 4$)



参数 $\alpha = 4$ 使信道利用率降低

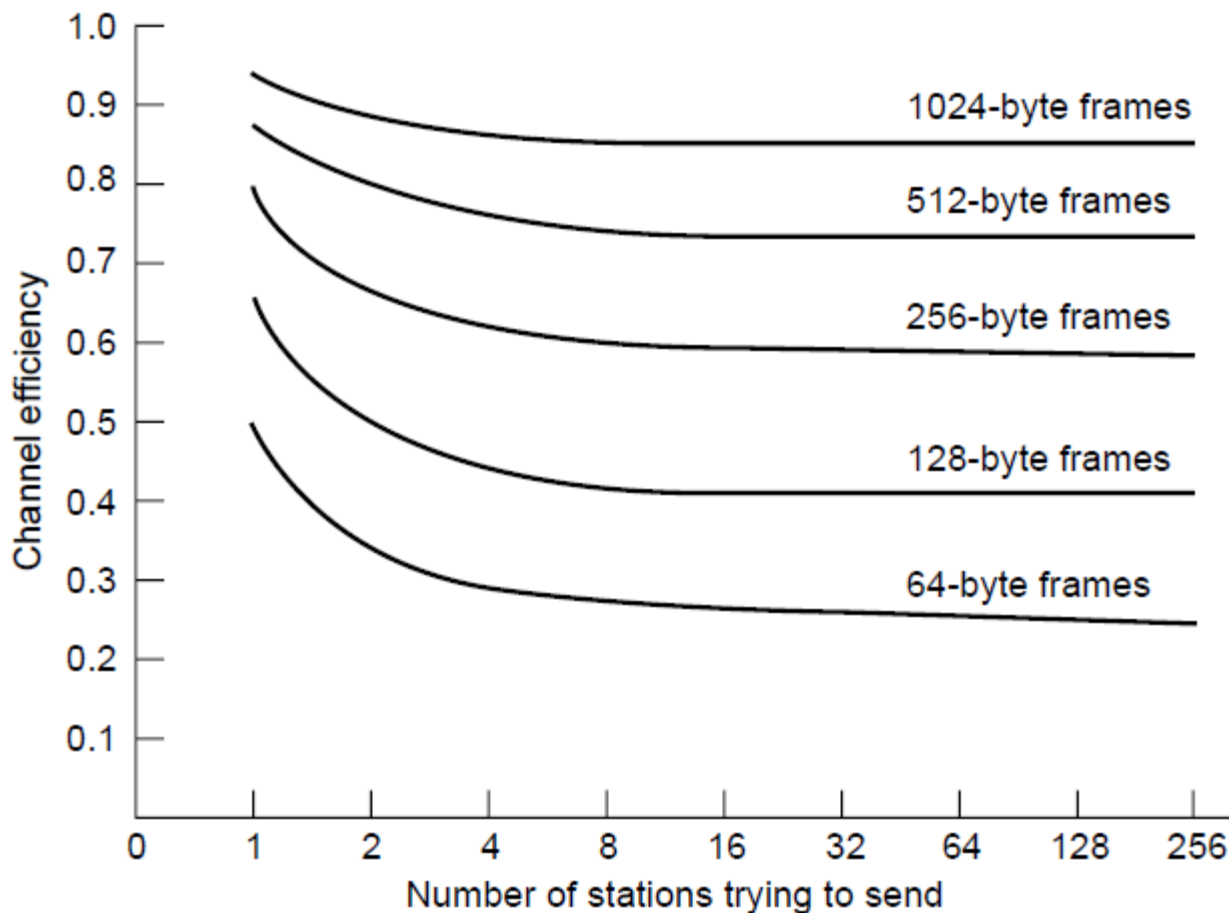
$\alpha = 0.01$ 时的信道利用情况



参数 $\alpha = 0.01$ 使信道利用率提高

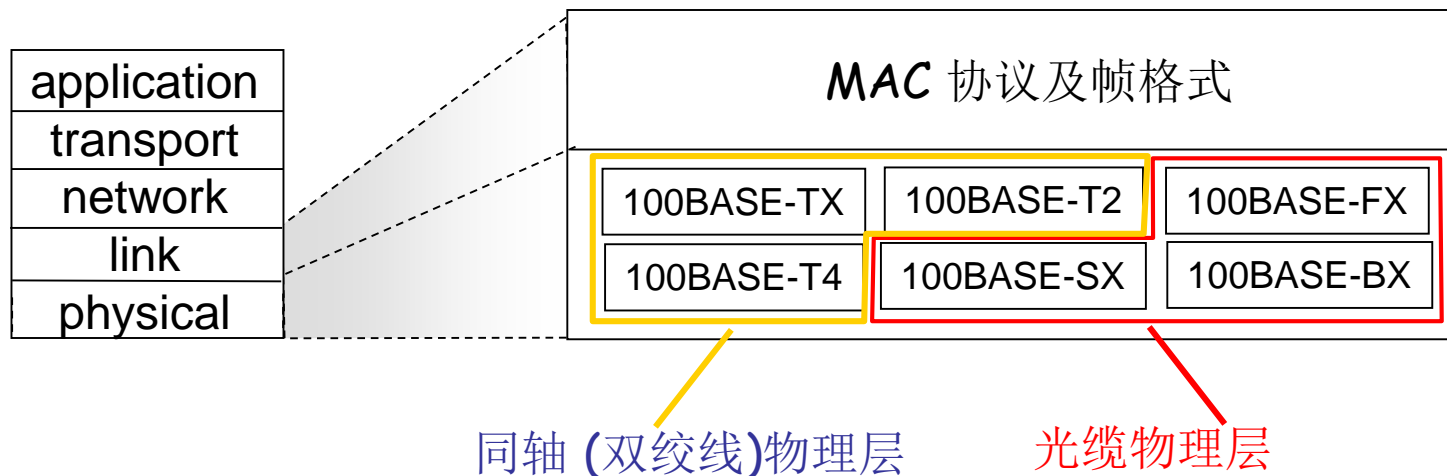
以太网的性能

10 Mbps, 512b争用期时, 节点数与利用率的关系
增加帧长, 则利用率更高

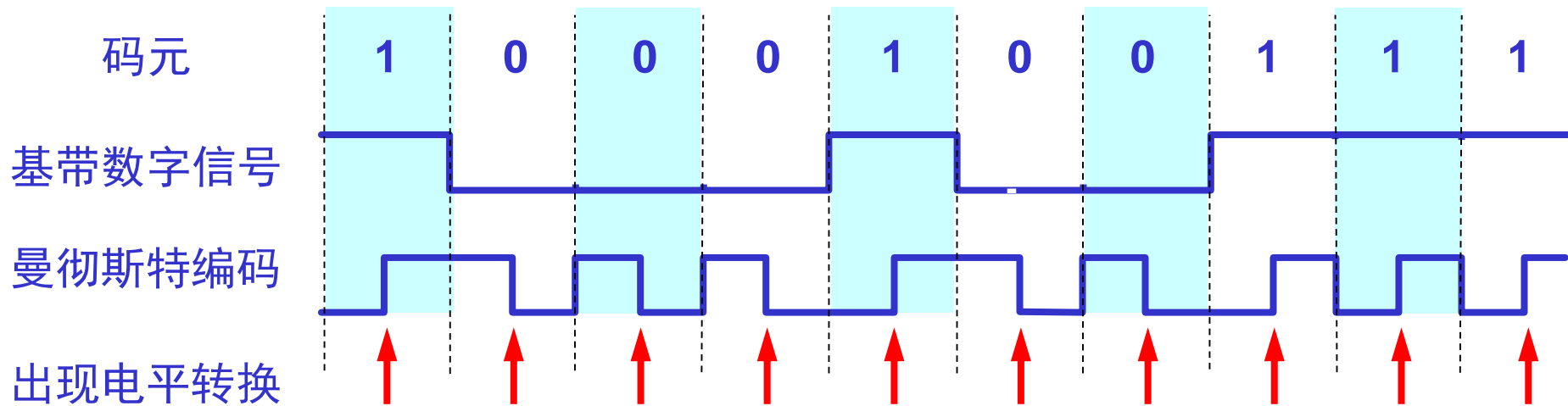


IEEE802.3以太网：链路层与物理层

- 多种不同的以太网标准
 - 相同的MAC和帧格式
 - 不同的速率：2Mbps, 10Mbps, 100Mbps, 1Gbps, 10Gbps
 - 不同的物理介质：光纤、电缆



曼彻斯特 (Manchester) 编码



发送的数据使用曼彻斯特编码

用于10BaseT

便于接收节点的时钟与发送的时钟同步



以太网技术

- MAC技术：CSMA/CD，信道利用率的最大值 S_{\max}

$$S_{\max} \approx \frac{1}{1 + 4.44a} \quad N \rightarrow \infty$$

- 以太网速率提高，对信道利用率有何影响？

$$a = \frac{\tau}{T_0} = \frac{\tau}{L/R} = \frac{\tau R}{L}$$

- 无线局域网也采用CSMA/CD吗？



提纲

- CSMA
 - MAC: 载波侦听降低碰撞, 前提 $T_p \gg \tau$
- IEEE802.3 以太网: CSMA/CD
 - 碰撞检测, 二进制指数随机退避
- IEEE802.11 WLAN: CSMA/CA

练习题

- 某局域网采用CSMA/CD协议实现介质访问控制，数据传输速率为10Mbps，主机甲和主机乙之间的距离为2Km，信号传播速度是 $2 \times 10^8 \text{m/s}$ 。若主机甲和主机乙发送数据时发生冲突，问：
（1）两台主机均检测到冲突的最短时间和最长时间分别是多少？（假设主机甲和主机乙发送数据过程中，局域网中其他主机不发送数据）
（2）若主机甲发送数据帧已经连续6次不成功，则它第7次发送检测到冲突后，将等待多长时间才能再次发送？
（参考答案（1） $10 \mu\text{s}$ ， $20 \mu\text{s}$ （2） $20 * r \mu\text{s}$, $0 \leq r \leq 127$ ）

同时发送，检测碰撞最快： $2\text{km} / 2 \times 10^8 \text{m/s} = 10 \mu\text{s}$

碰撞检测最长时间： $2\text{km} / 2 \times 10^8 \text{m/s} = 20 \mu\text{s}$

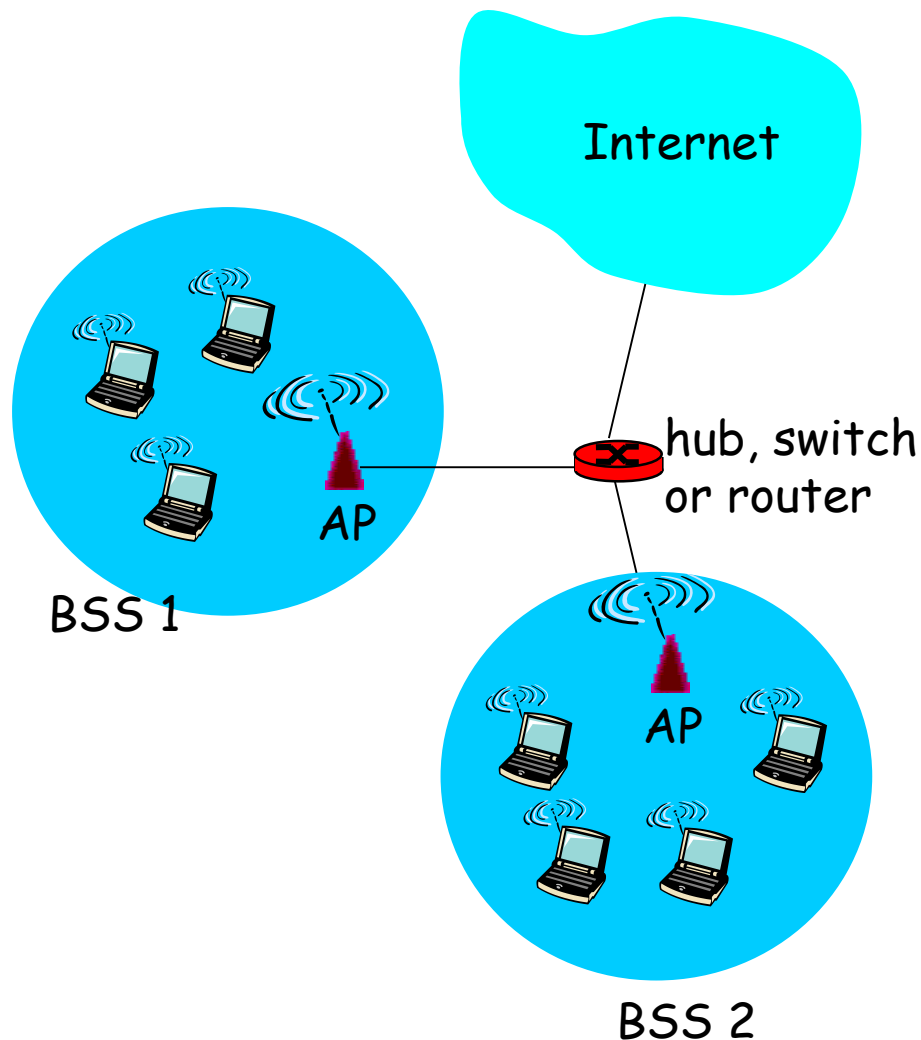
重传时间：二进制指数退避， $20 \mu\text{s} * [0, 2^8 - 1]$ 上的**随机数**



IEEE 802.11 无线局域网 WLAN

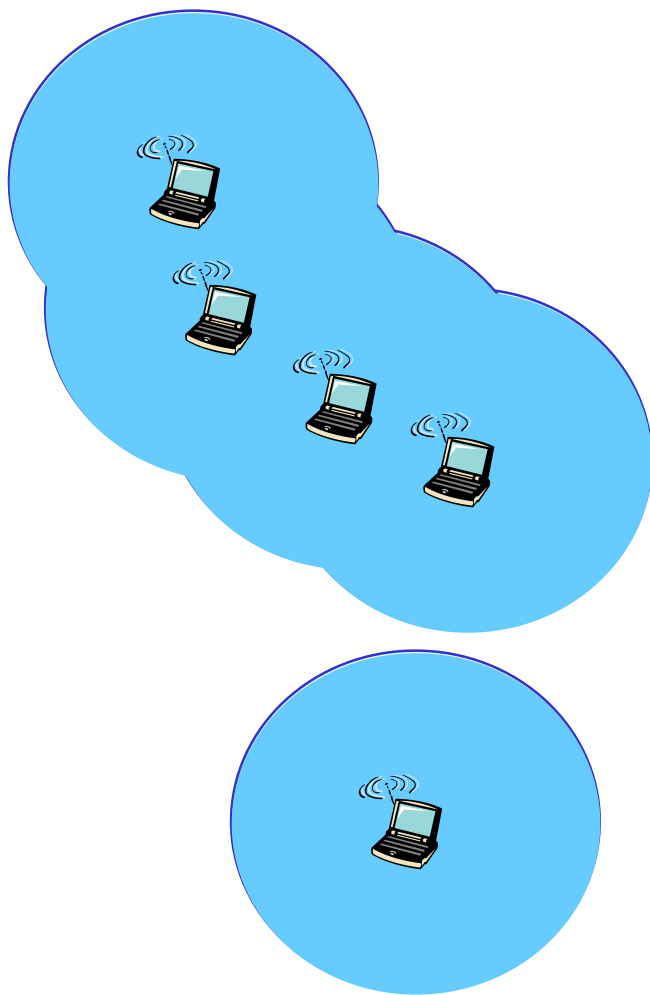
- 802.11b (1997)
 - 2.4GHz 免费频段
 - 速率达11 Mbps (CCK)
 - 直接序列扩频 (DSSS)
 - CCK (complementary code keying)
 - 802.11a (1999)
 - 5 GHz
 - 速率达54Mbps (OFDM)
 - 802.11g (2002)
 - 2.4 GHz
 - 速率达54 Mbps
 - 802.11n: (2009)
 - 2.4-5 GHz
 - 速率达200 Mbps
 - MIMO, SDM (spatial-division multiplexing), STBC (space-time block coding) TxBF (transmit beamforming)
-
- MAC协议为 CSMA/CA
 - 有基站 及 ad-hoc 两种模式

802.11 WLAN的组成



- 无线主机与基站之间的通信
 - 基站 = AP
- 有固定基础设施下的基本业务集 (BSS: Basic Service Set)
 - 无线主机
 - AP (access point): 基站
 - ad hoc模式: 仅有主机

无线网络的组成



ad hoc 模式

- 没有基站
- 节点只能在其信号覆盖范围内将传输数据
- 节点构成网络：节点实现路由



无线链路特性 (1)

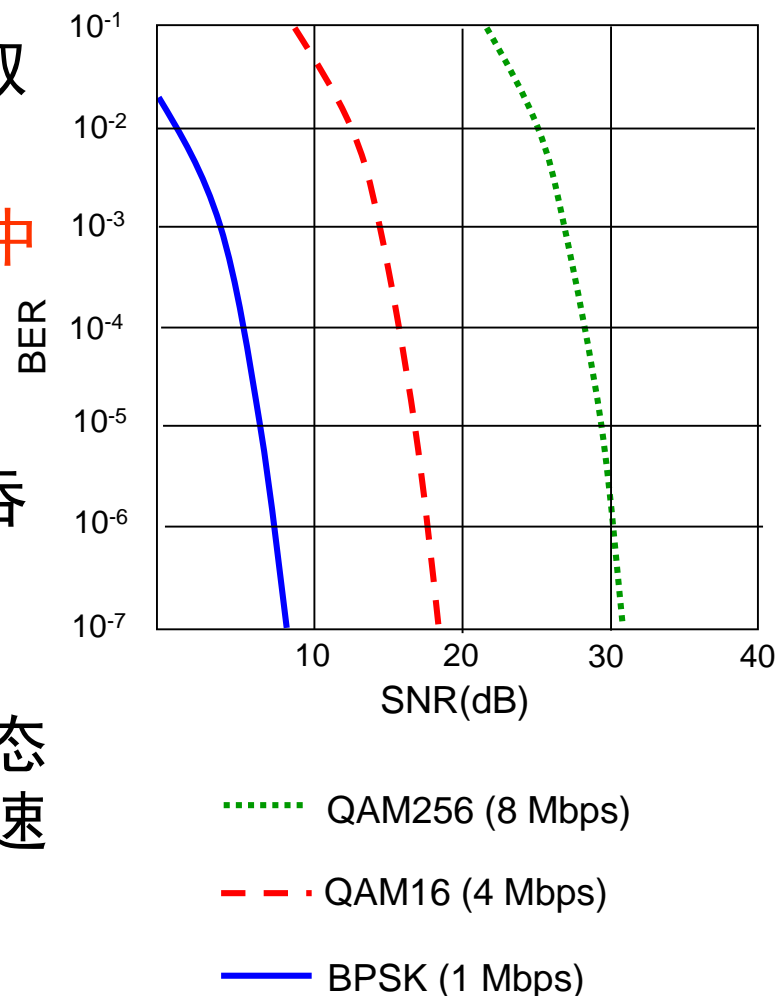
与有线链路的区别

- **信号强度的衰减：**无线信号强度与其传播路径有关（路径损耗）
- **各种信号间的干扰：**标准的无线网络频段（如 2.4GHz）为其它设备共享；设备之间也存在干扰
- **多径传播：**无线信号经地面及物体发射，使到达目的节点的信号有不同的延迟

.... 致使在无线链路上的数据通信更为复杂（即使是在点到点的链路上）

无线链路特性 (2)

- 信噪比SNR:
 - 更高的SNR - 易于从噪声中提取信号
- SNR与BER (Bit Error Rate) 的折中
 - 对给定的物理层
增加功率 → 增加SNR → 降低BER
 - 对给定的SNR: 为得到更高的吞吐量, 选择不同的物理层技术, 使之满足BER要求
 - SNR可以随移动而改变: 动态地调整物理层 (调制技术, 速率等)

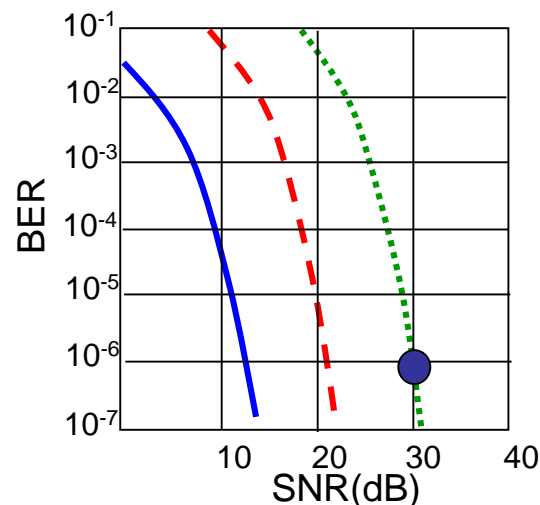


802.11: 特性

速率自适应

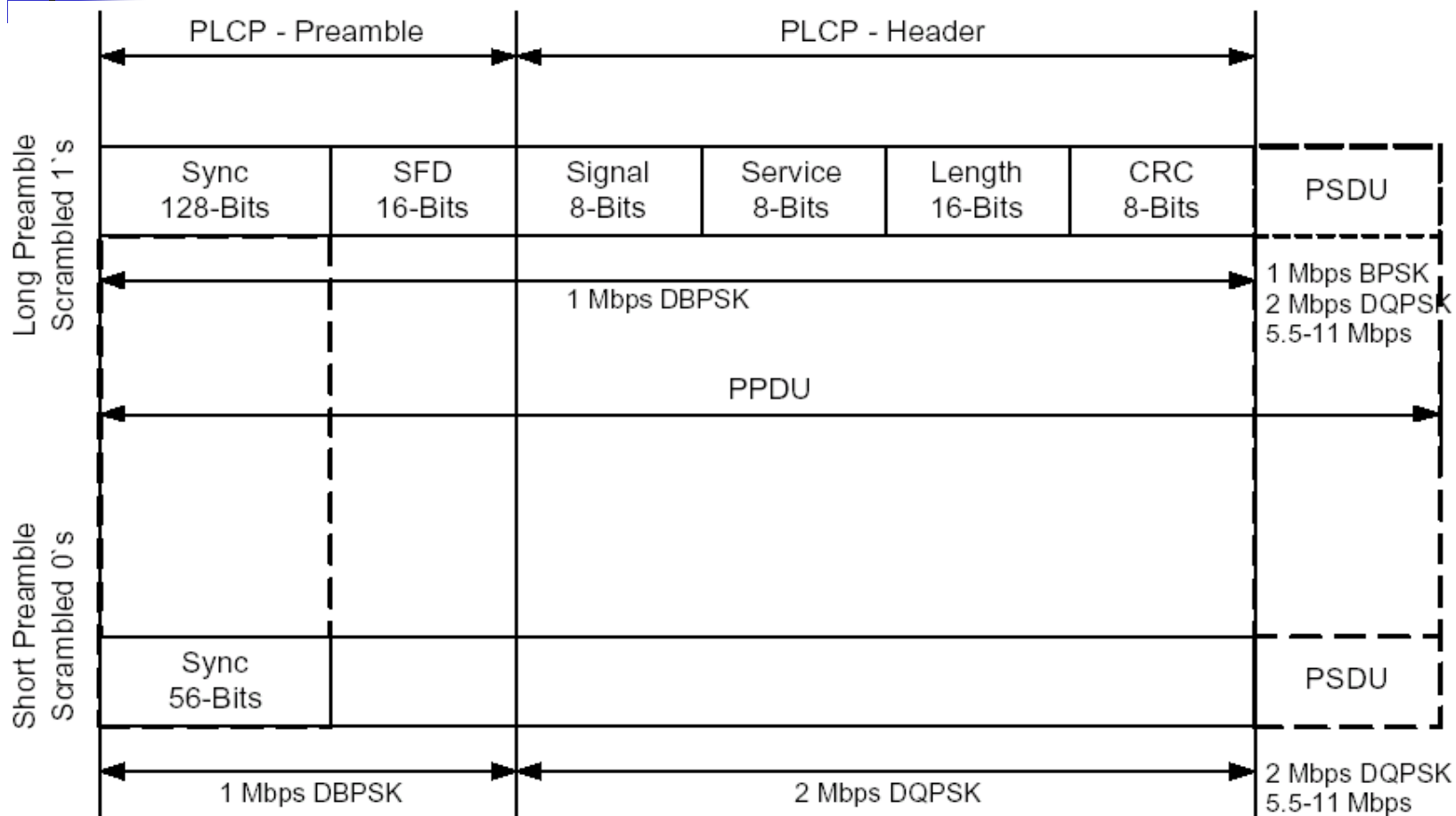
- 基站，移动节点根据节点的移动以及SNR的变化，动态地改变传输速率(物理层的调制技术)

1. 随着节点与BS距离的增加，SNR降低，BER增大
2. 当BER太高时，选择更低的传输速率，BER随之降低



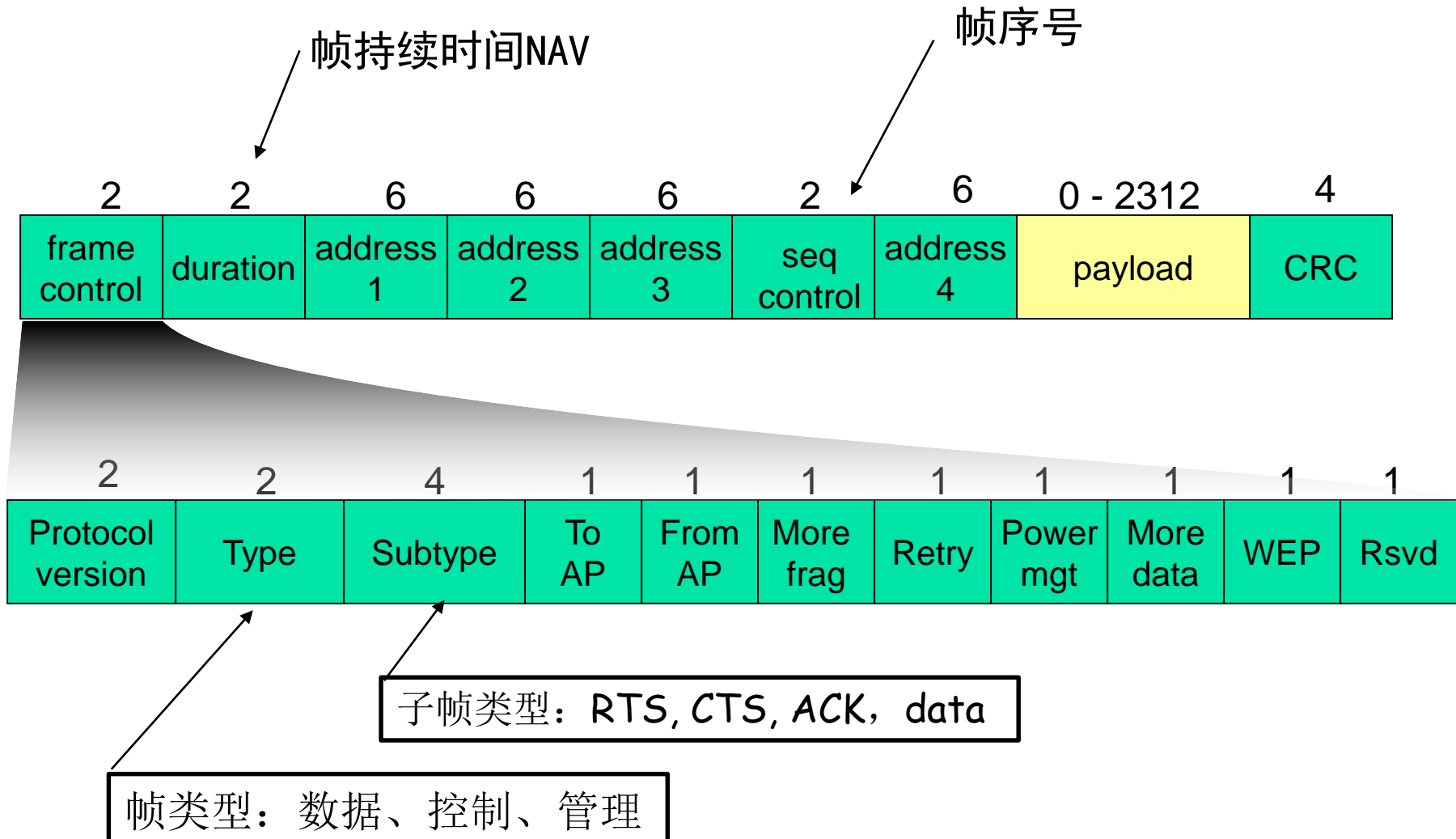
- QAM256 (8 Mbps)
- - - QAM16 (4 Mbps)
- BPSK (1 Mbps)
- operating point

IEEE 802.11 帧结构



- 从SYNC提取载波时钟，进行位同步，为128位，而LAN的为64位
- SFD：帧开始；
- Signal：速率从1Mbps开始，0.1Mbps步进
- PSDU：用多种调制技术对应多种速率

802.11 帧格式 (PSDU部分)

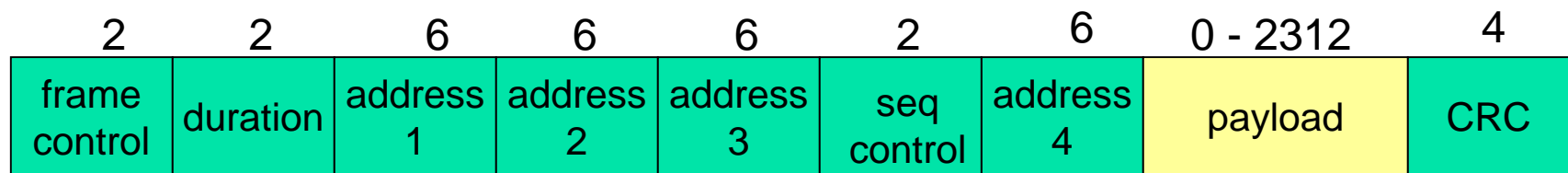




IEEE 802.11 Frames

- IEEE802.11 帧类型
 - Management, Control, Data frames
- Management frames
 - 节点与AP的关联 (association) 及去关联 (de-association)
 - 定时与同步
 - 认证 (authentication)
- Control frames
 - 竞争 (CP) 阶段的握手
 - 竞争阶段的确认ACK
 - 结束CFP (无竞争期)
- Data frames
 - 在CP及CFP阶段传输数据

802.11帧：地址



Address 1: 接收该帧的主机或AP的 **MAC** 地址

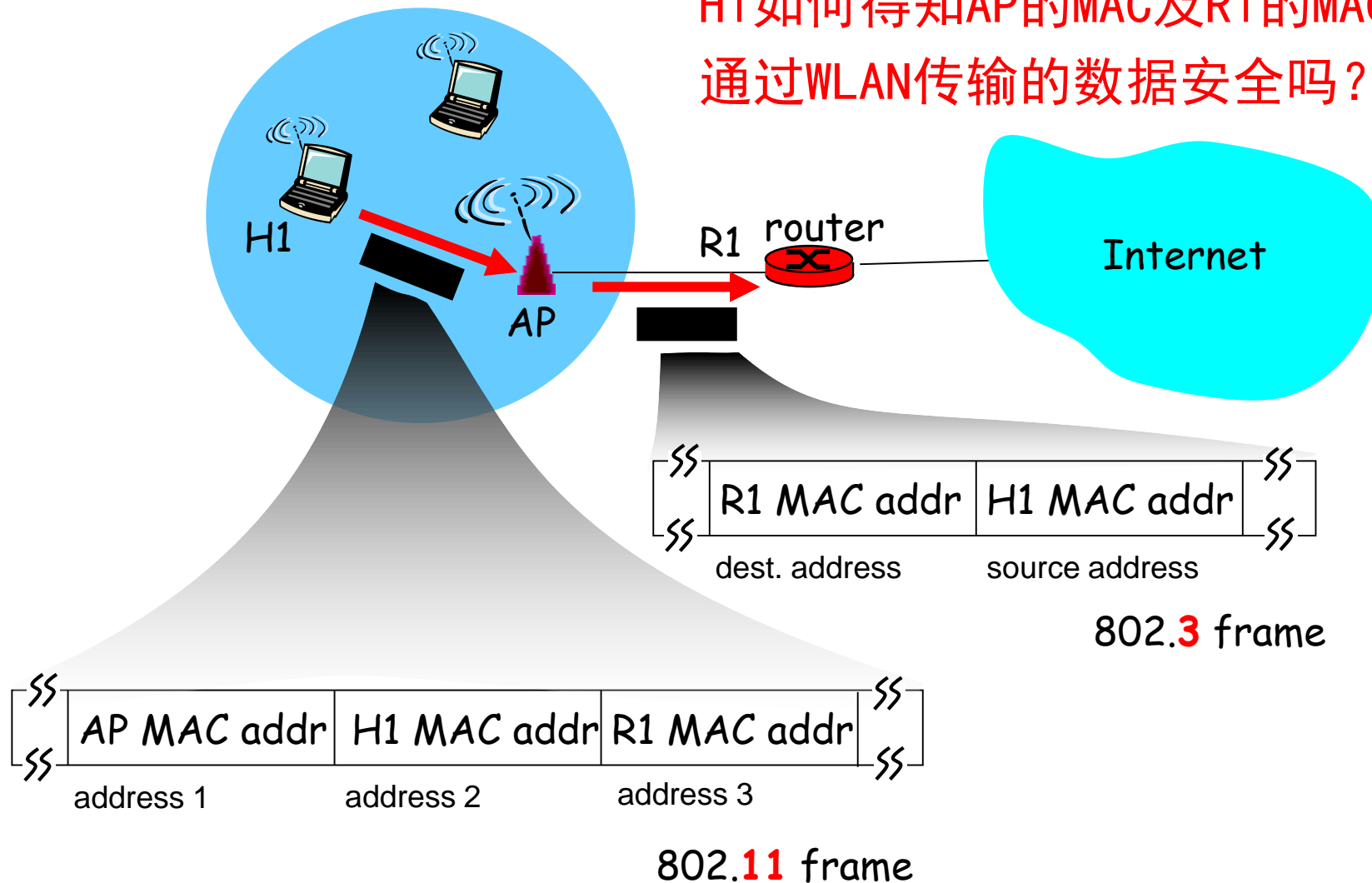
Address 2: 发送该帧的主机或AP的 **MAC** 地址

Address 3: AP连接的
路由器的接口的**MAC** 地址

Address 4: 仅在ad hoc
模式下使用

802.11 帧: 寻址

H1如何得知AP的MAC及R1的MAC?
通过WLAN传输的数据安全吗?





注册

- AP周期性地(如每100ms)发送信标(Beacons)广播帧, 建立同步, 维持连通性或关联
 - 信标中含有BSS-ID用于指示AP及网络
 - 业务指示(用于sleep mode)
 - 功率管理, 用于站点的节能
- 节点
 - 基于信标测量RSS
 - 与AP建立关联: 节点向AP注册, 节点发送请求, AP予以响应
 - 只有注册后, 节点才能发送接收数据DATA



802.11b: 信道, 关联

- 信道管理与分配
 - AP管理所选择的信道
 - 可能的干扰：工作信道可能被其他AP占用！
- 主机：必须与AP关联
 - 扫描信道，侦听信标帧，其中含有AP的名字（SSID）以及MAC地址
 - 选择AP并与之关联
 - 可以进行认证
 - 可以执行DHCP以得到AP所在子网的IP地址

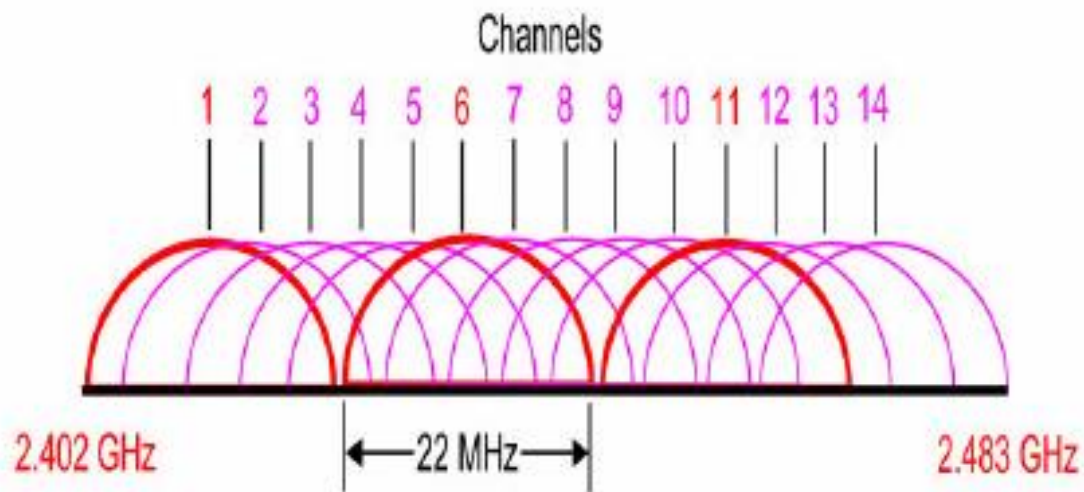


信道分配及注册

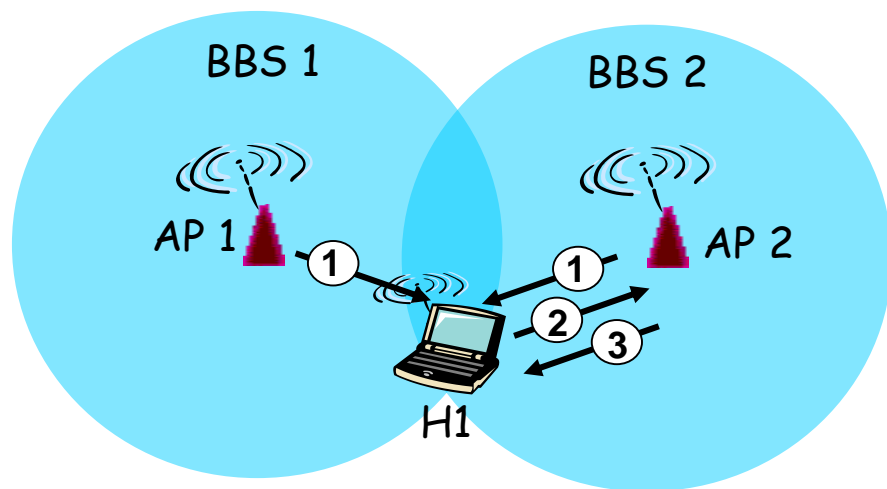
- 节点周期性地扫描所有信道，对信道的接收信号强度进行估计 (CCA Channel)
 - **关联**：由信道强度决定，选择一个 AP 并注册
 - **重关联**：与新的AP关联，出现在下述情况下
 - 节点离开当前AP覆盖区
 - 当信号条件改变时
 - 当有多个用户与当前的AP关联时

802.11b: 信道——重叠的频段

- 802.11b: 2.4GHz–2.485GHz
- 定义了11 (13/14) 信道，信道带宽22MHz，信道间隔5MHz
- 完全正交的信道是3个，如 1, 6, 11

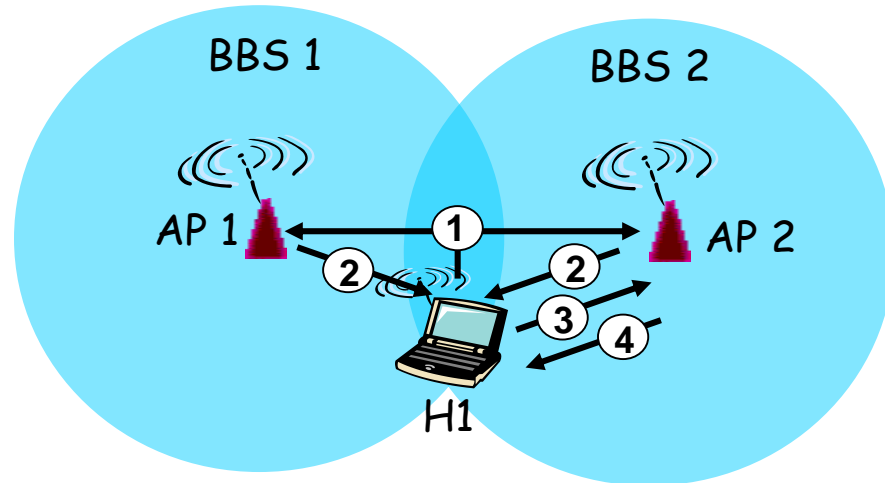


802.11: 被动扫描与主动扫描



被动扫描

- (1) AP 发送信标帧
- (2) H1 选择 AP 并向选择的 AP 发送关联请求帧
- (3) 选择的 AP 发送关联响应帧

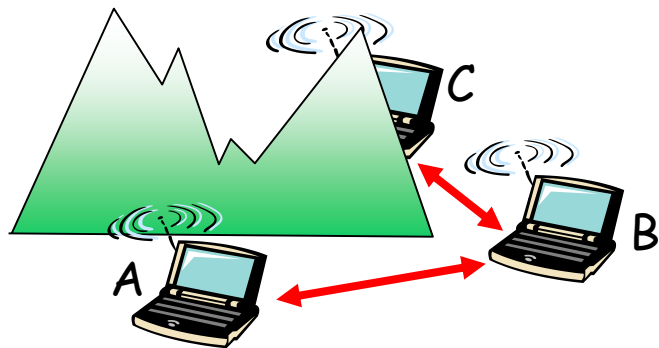


主动扫描:

- (1) H1 以广播方式发送信标帧
- (2) AP 发送探测响应帧
(Probes response frame)
- (3) H1 选择 AP 并向选择的 AP 发送关联请求帧
- (4) 选择的 AP 发送关联响应帧

无线网络特性

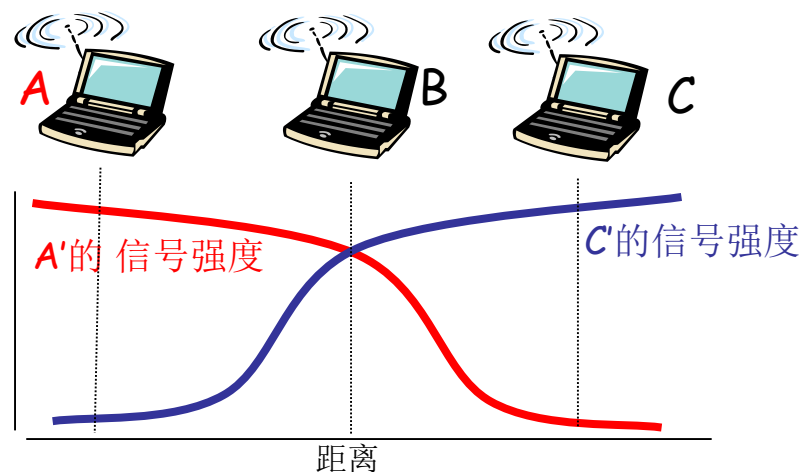
多个无线发射端与接收端之间的问题（除多址接入之外）：



隐蔽结点问题

- B, A 相互可侦听
- B, C 相互可侦听
- A, C 相互不可侦听

意味着，来自A, C的信号到达B处时将相互干扰

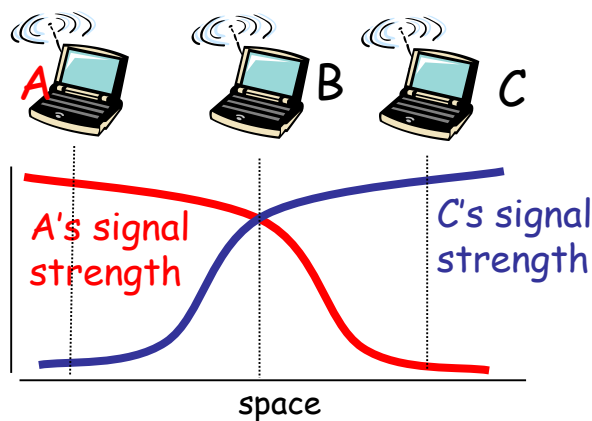
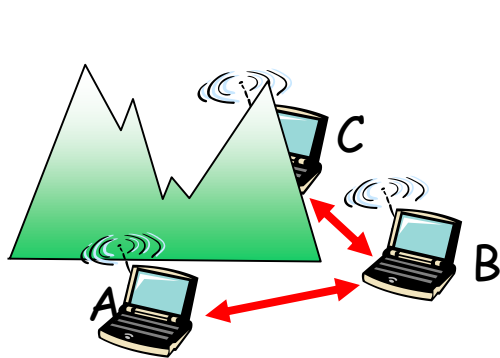


信号幅度：

- B, A 相互可被侦听到
- B, C相互可被侦听到
- A, C相互侦听不到，在 B 处干扰

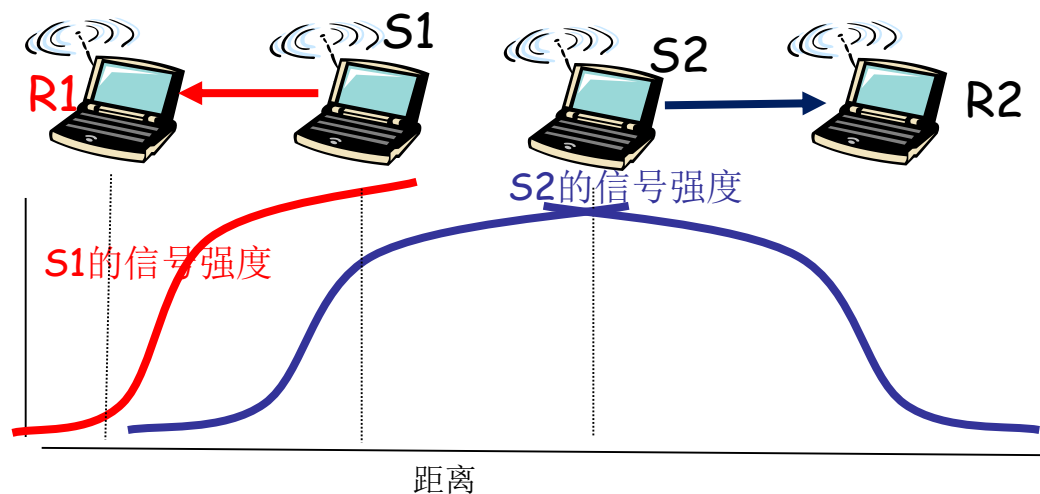
IEEE 802.11: 多点访问

- 碰撞避免：2个以上的节点同时发送
- 802.11: CSMA - 在发送之前侦听
 - 不与正在发送的节点发生碰撞
- 802.11: 没有碰撞检测!
 - 因信号衰落的原因，接收信号很弱，难以在发送的同时进行接收以检测碰撞
 - 因存在信号衰落以及隐蔽节点，不能检测到碰撞
 - 目的：避免碰撞CSMA/CA



无线网络特性

- **暴露节点**：当有一个节点要发送数据给另一个节点，但由于邻居节点正在发送数据而影响了本节点的数据传送。
- 如有4个节点R1，S1，S2，R2，但R1，R2不在彼此的信号范围内。当S2传数据给R2时，S1却不能传数据给R1，因S1检测到S2信号；实际上S1可以发数据到R1，因S2的信号对S1发给R1的信号无影响



802.11 发端

1) 若信道空闲**DIFS**，则发送一个帧(无CD)

2) 若信道占用，则：

启动随机退避定时器

若信道空闲，则计时；

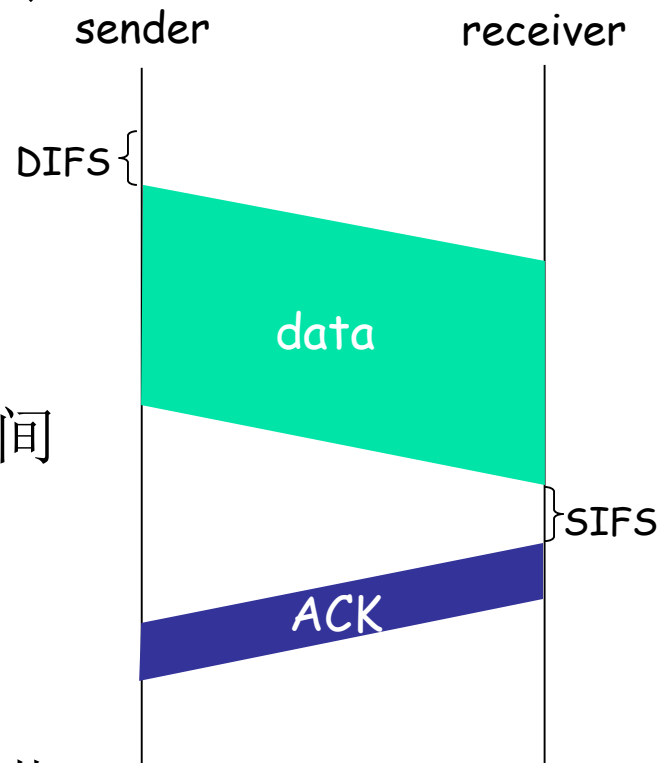
若定时时间到，则发送

若没有收到**ACK**，则增加随机退避时间间隔，返回到2)

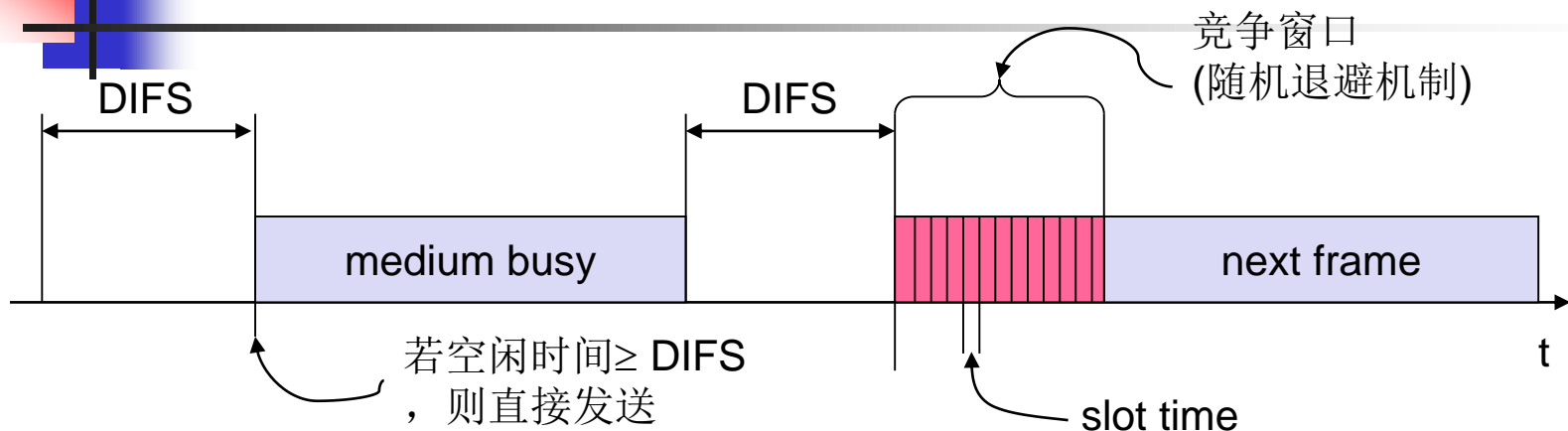
802.11收端

若收到一个帧，则：

等待**SIFS**时间之后，响应**ACK**（因隐蔽节点问题，需要**ACK**）



802.11 - CSMA/CA (1)



- 节点要发送，开始检测信道
- 若信道空闲时间超过IFS，则节点开始发送（IFS具体长度由发送帧类型决定）
- 若信道忙，则节点必须等待IFS空闲时间，然后再开始等待一段随机退避时间（碰撞退避窗口 \times 时隙数）
- 若在退避期间信道忙，则暂停退避计时器；当信道空闲时启动定时继续计数



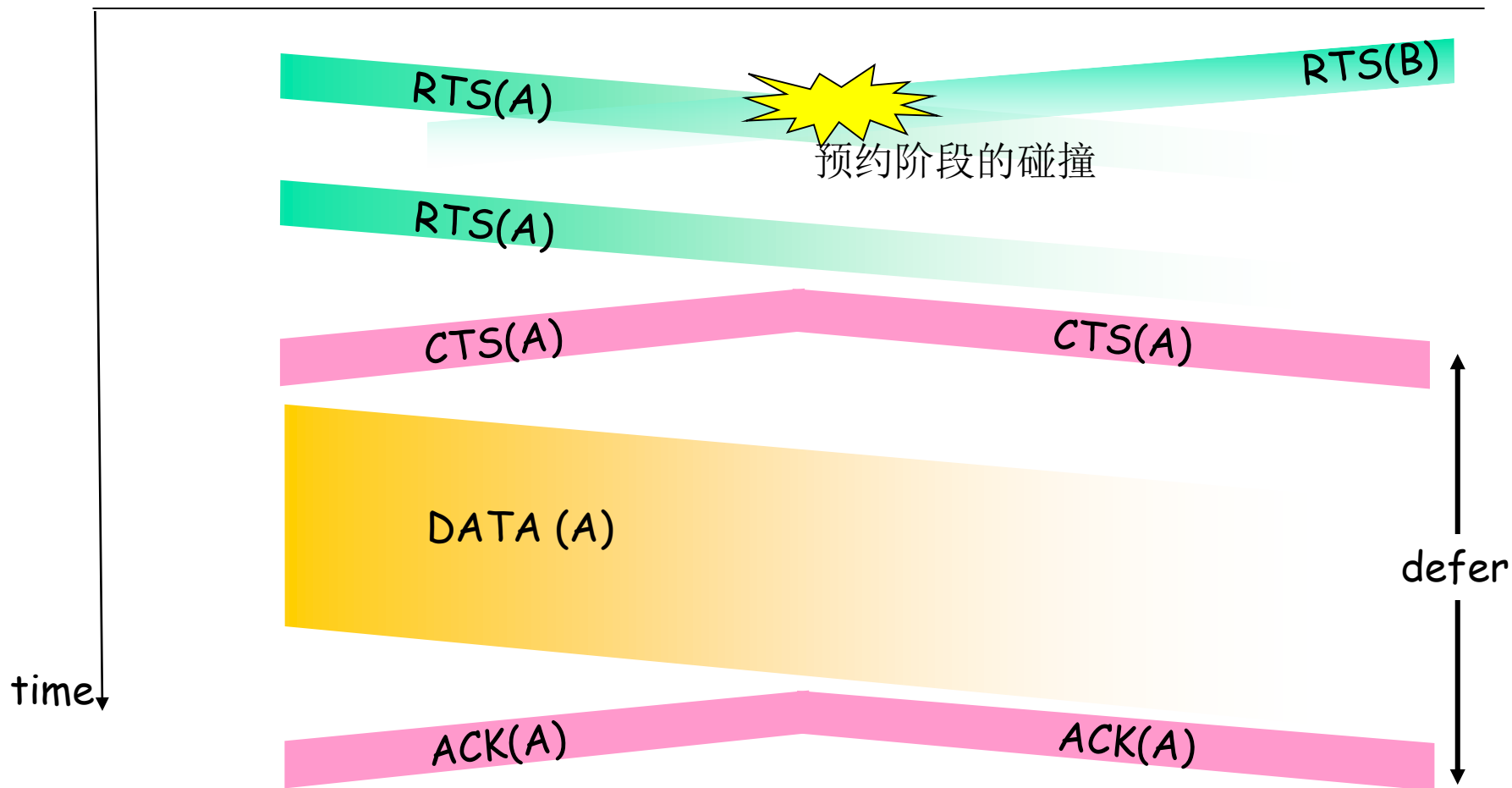
MACA: 碰撞避免多路访问

为解决WLAN中存在的隐蔽节点问题，采用MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)

- 发送端采用CSMA先发送短RTS帧
 - RTS之间也可能发送碰撞，但它很短
- 收端收到RTS后，发送CTS
- CTS可被附近节点检测到，从而避免隐蔽节点问题
 - 发端发送更长的数据帧
 - 其他节点延迟发送

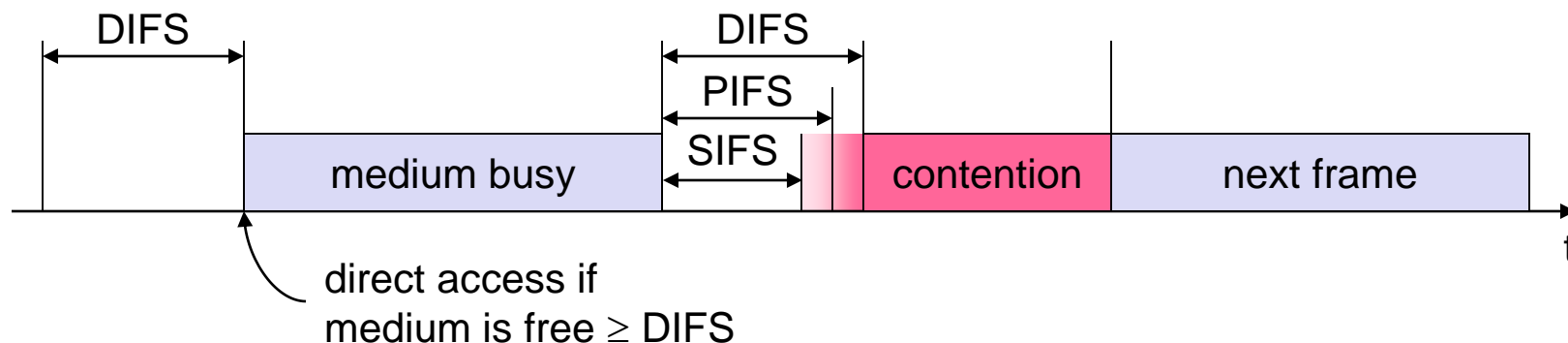
完全避免数据帧的碰撞，采用更短的预约帧！

碰撞避免：RTS-CTS 握手



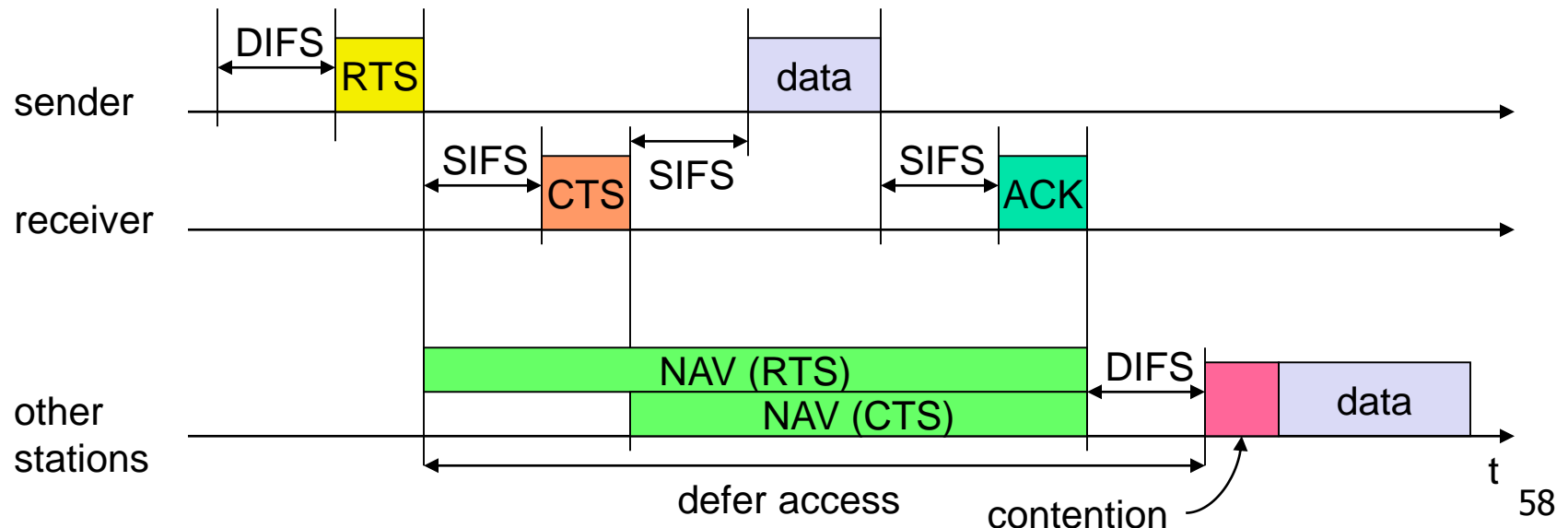
802.11 – MAC

- 载波侦听有两类，物理的和虚拟的
 - 物理的载波侦听：通过PLCP在空闲信道评估 (CCA: Clear Channel Assessment) 阶段，侦听相关比特或检查RSS (received signal strength) 是否高于门限
 - 虚拟的载波侦听：基于网络分配矢量 (NAV, Network allocation vector)，从RTS/CTS帧中提取NAV
- 优先级：定义不同的帧间隔
 - SIFS (Short Inter Frame Spacing)：高优先级，用于ACK, CTS, 轮询响应
 - PIFS (PCF IFS)：中等优先级，用于PCF方式的有时限限制的业务
 - DIFS (DCF IFS)：低优先级，用于异步数据业务



■ 发送数据帧

- 等待DIFS之后，可以发送RTS预约信道
- 若接收端准备接收，则等待SIFS之后，发送CTS
- 发送端可立刻发送数据帧，并等待ACK
- 其他站点通过RTS或CTS帧，获得信道的占用时间值NAV，实施虚拟的载波侦听



802.11 - CSMA/CA (示例)

如何避免碰撞？接入节点等待随机的退避时间以避免碰撞

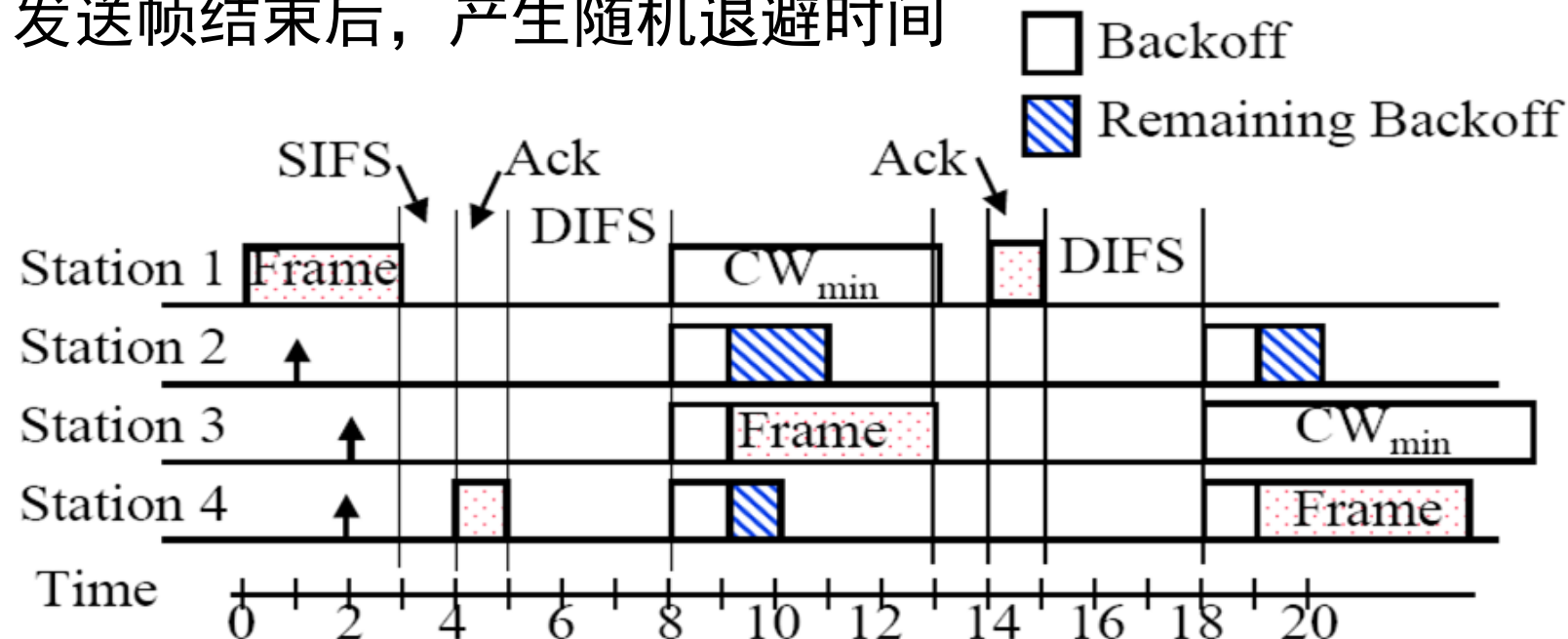
例如：SlotTime=1, CW=5, DIFS=3, PIFS=2, SIFS=1

站2：CW=3；

站3：CW=1；

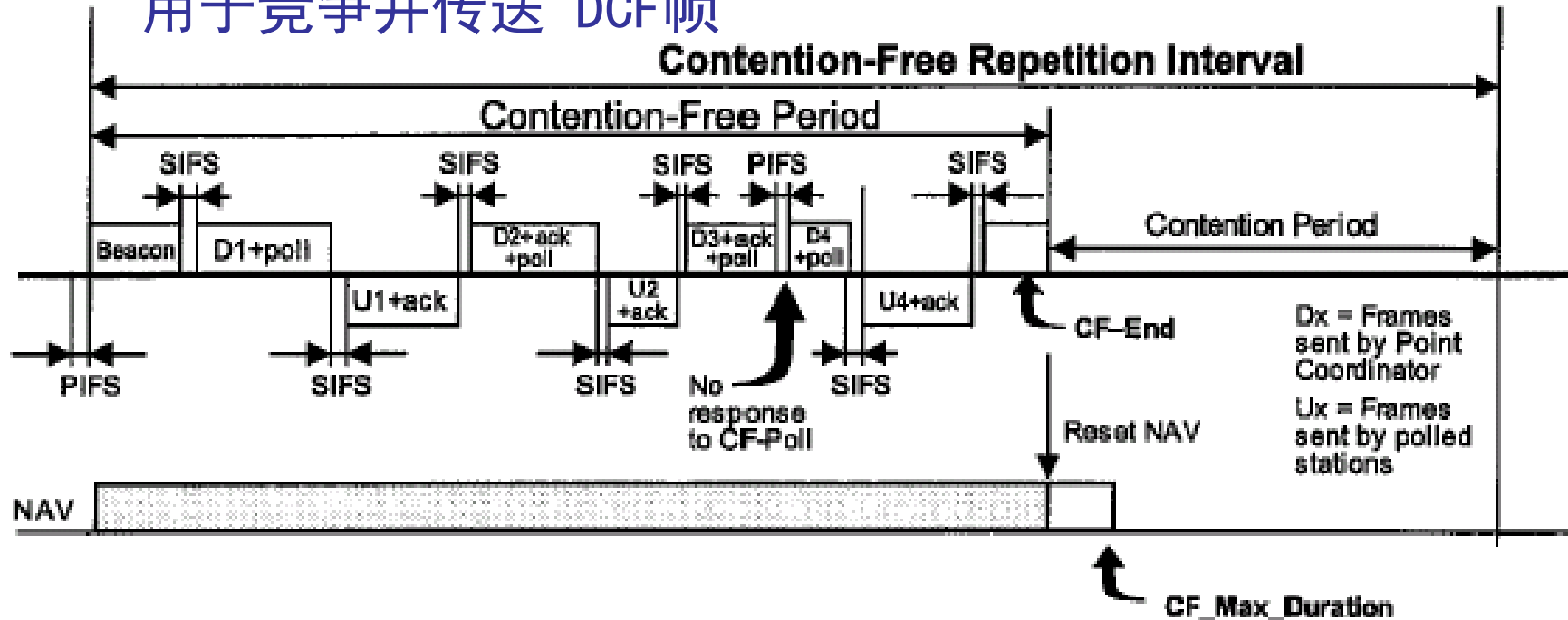
站4：CW=2；

发送帧结束后，产生随机退避时间



PCF

- 基于DCF之上，支持无竞争、有时限要求的传输方式
- 为可选的MAC功能 – 有些产品不支持
- 主要过程：
 - AP周期性地轮询所有设备，建立CFP；
 - 在PCF期间，设置设备的NAV为ON
 - PCF周期的长度可变，并占用CFP的固定位置；其他时段用于竞争并传送 DCF帧





练习题

- 为何在WLAN中不采用CSMA/CD?
- 什么是隐蔽节点问题? MACA如何解决这一问题的?
- 在802.11中如何实现碰撞避免的?
- 若IEEE802.11的RTS/CTS帧与标准DATA帧和ACK帧等长, 采用RTS/CTS还有好处吗?
- 设在一个咖啡馆中有两个ISP提供WiFi接入, 每个ISP的AP及IP子网地址不同。(a) 若两个AP均配置为第11信道, 问802.11协议可以工作吗? 讨论当有各自不同的关联站点要同时传输时, 将出现何种情况; (b) 设两个AP分别工作在信道1及11, 将发生哪些变化?