

第五章 介质访问子层基础

授课教师：崔 勇

清华大学



计 算 机 网 络
教 案 社 区

致谢社区成员

袁华 华南理工大学

曹轶臻 中国传媒大学

赵婧如 西安邮电大学

徐敬东 南开大学



思考与展望



清华大学
Tsinghua University



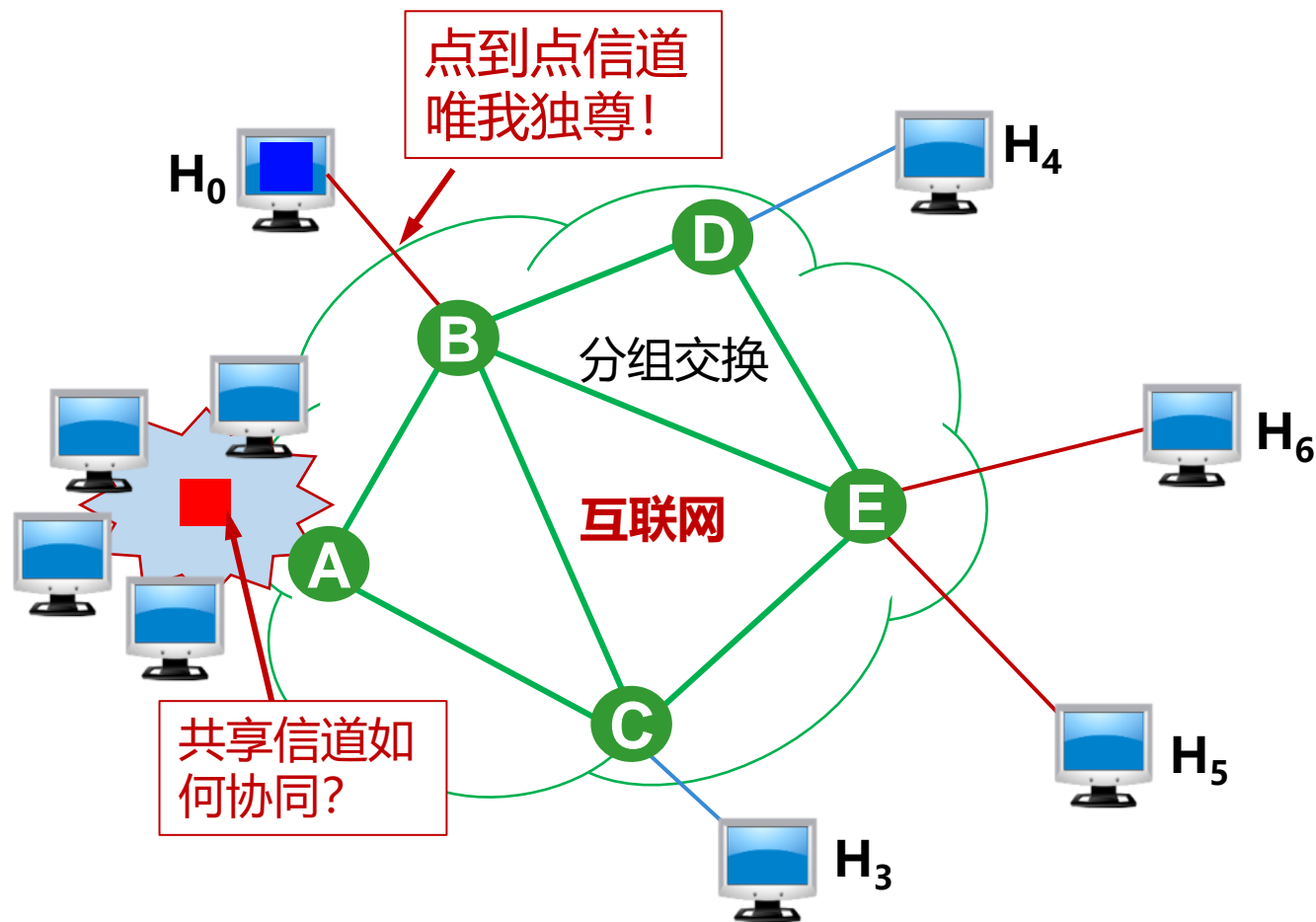
计算机网络教案社区

➤ 数据链路层

- 成帧、检错纠错编码
- P1-P6: 流水线协议, 流量控制、重传机制

➤ 共享信道访问

- 简化: 在一跳范围内
- 多设备发送, 互相冲突
- 多个设备难以协同
- 集中控制v.s.分布式?
- 发明: 以太网、交换机





本节目标



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

1. 了解MAC子层的位置和功能
2. 掌握两种ALOHA协议的原理和性能
3. 掌握CSMA的工作原理及性能区别
4. 掌握经典以太网的拓扑和帧结构
5. 掌握以太网CSMA/CD中最小帧长与相关参数的关系



MAC子层在哪里？

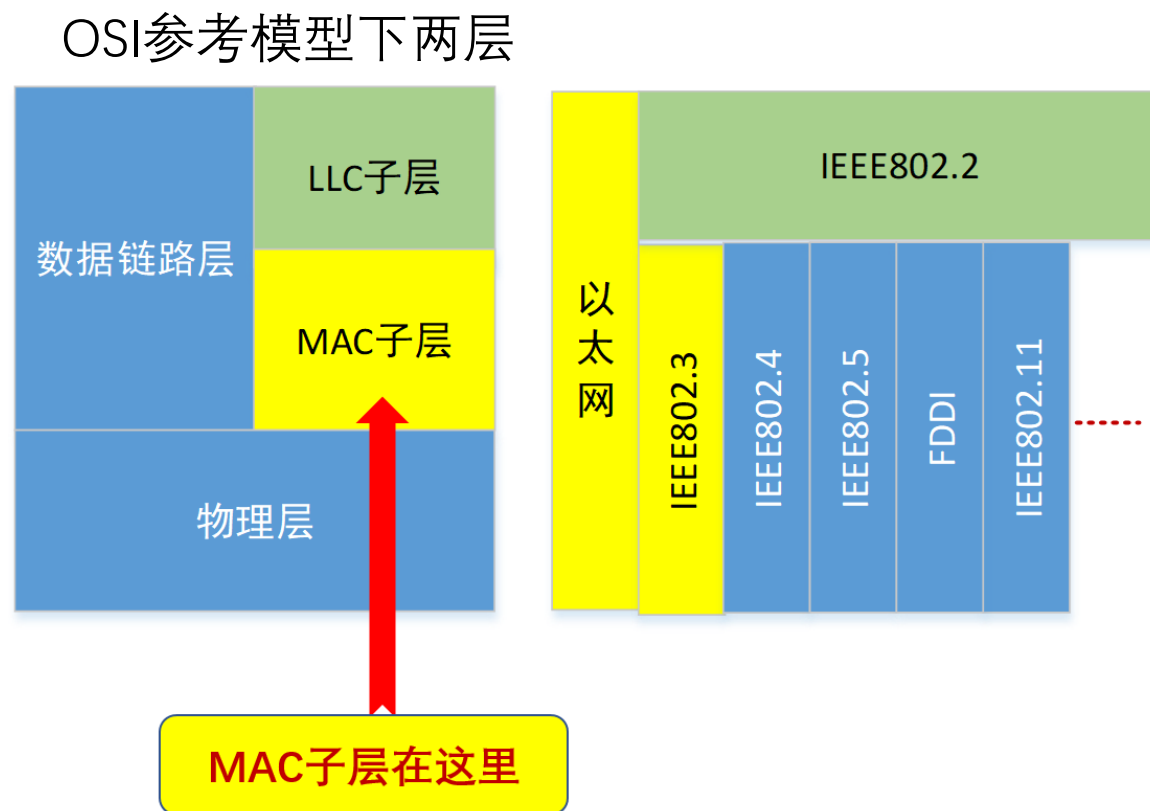


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 数据链路层分为两个子层：
 - MAC子层：介质访问控制
 - 逻辑链路控制LLC子层：承上启下（弱层）
- 以太网和IEEE802.3
 - 覆盖的层数不同（1.5层 vs 2层）
 - 帧的结构有细微不同
 - 以太网：事实标准，而802.3系列让接入有了无限的延展性
- 局域网
 - 以太网、无线局域网.....





思考与发明



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 站在巨人肩膀上：在课堂上发言（身边的信道分配）
 - 方案一：想说就说，但同时发言导致冲突（尤其是人多、激烈时）
 - 方案二：别人不说我才说，冲突后停停听听，别人停下后赶紧说？
 - 方案三：需要先举手再说：靠老师点名？靠座位序？





三大类多路访问协议及小分类



➤ 随机访问协议

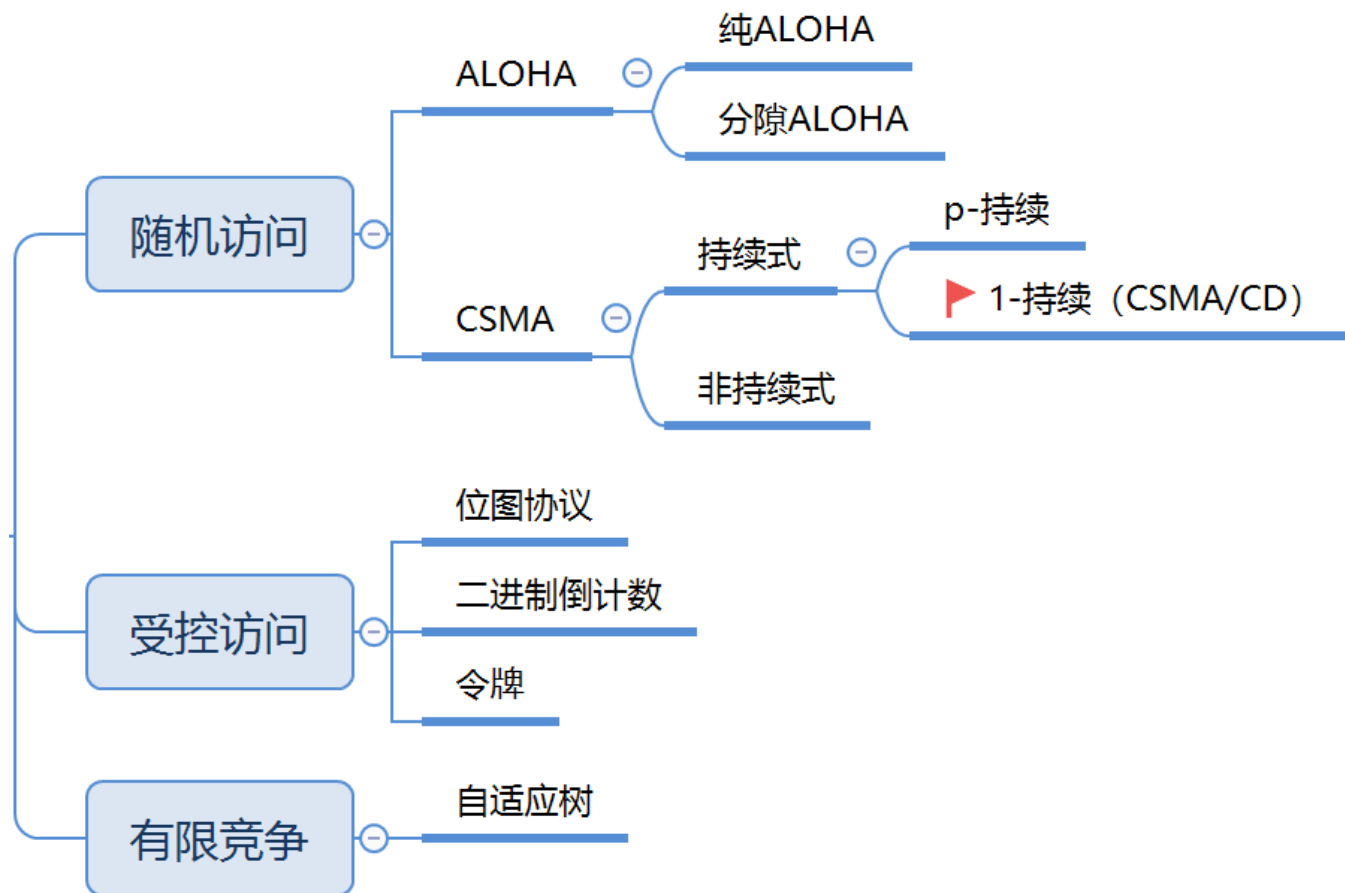
- 特点：冲突不可避免

➤ 受控访问协议

- 特点：克服了冲突

➤ 有限竞争协议

- 利用上述二者的优势





ALOHA协议的由来



清华大学
Tsinghua University

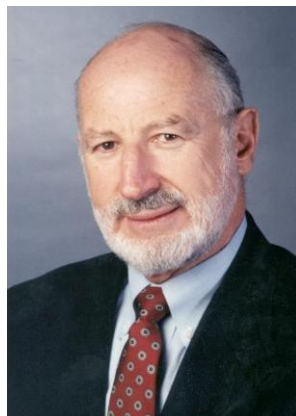


计算机网络教案社区

➤ ALOHA-Net

- 连接檀香山和其它岛屿
- 夏威夷大学Norman Abramson及同事设计

期待
NIHAO
协议





纯ALOHA协议工作原理：任性！



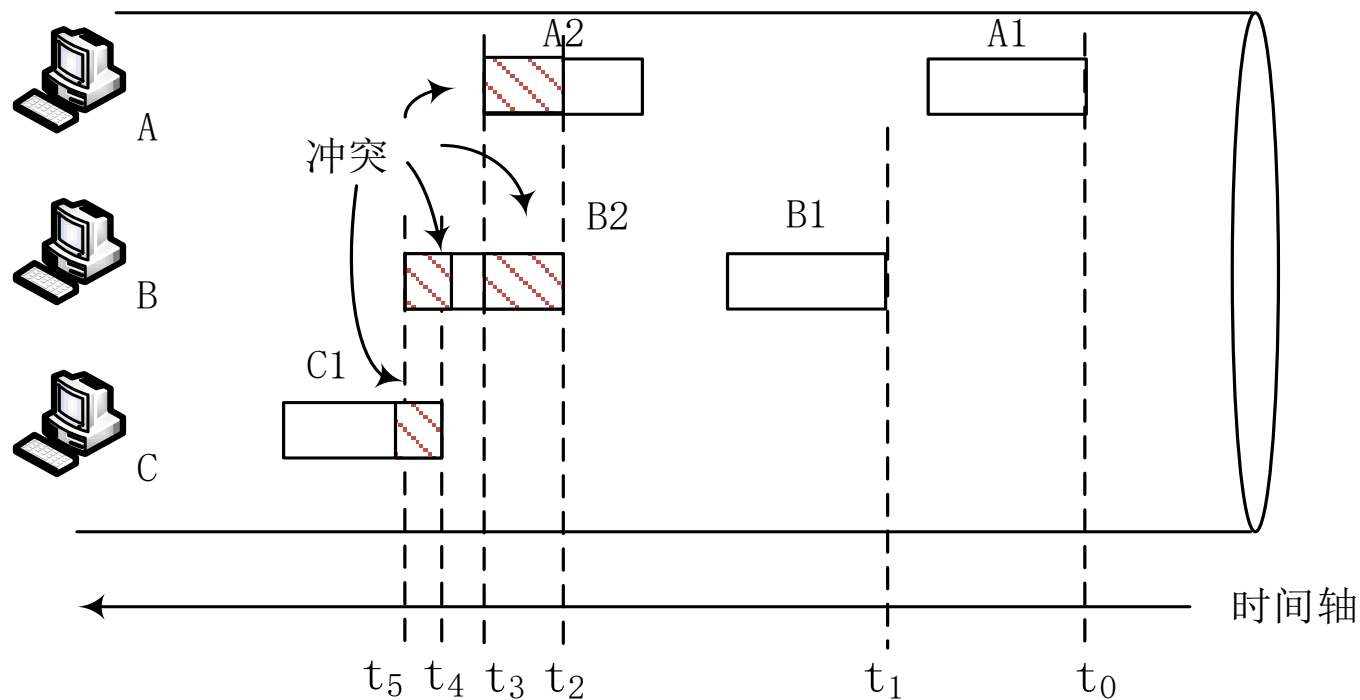
清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 原理：想发就发！
- 特点
 - 冲突：两个或以上的帧
 - 随时可能冲突
 - 冲突的帧完全破坏
 - 破坏了的帧要重传

冲突如何描述？



充分理解各种冲突



纯ALOHA协议的数学背景



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 帧时：发送一个标准长的帧所需的时间
- 网络负载：某段时间内所有通信站点总共发送的**平均**帧数(包括原发和重发的帧)，即**平均负载** G
- 泊松分布下，**某个帧时内，到达帧数为 k 的概率 $P[k]$**
 - $P[k] = \frac{G^k}{k!} * e^{-G}$
 - $k = 0$ 时，表示该帧时内没有帧到达的概率 $P[0] = e^{-G}$



怎样才能成功传输一个帧？



清华大学
Tsinghua University

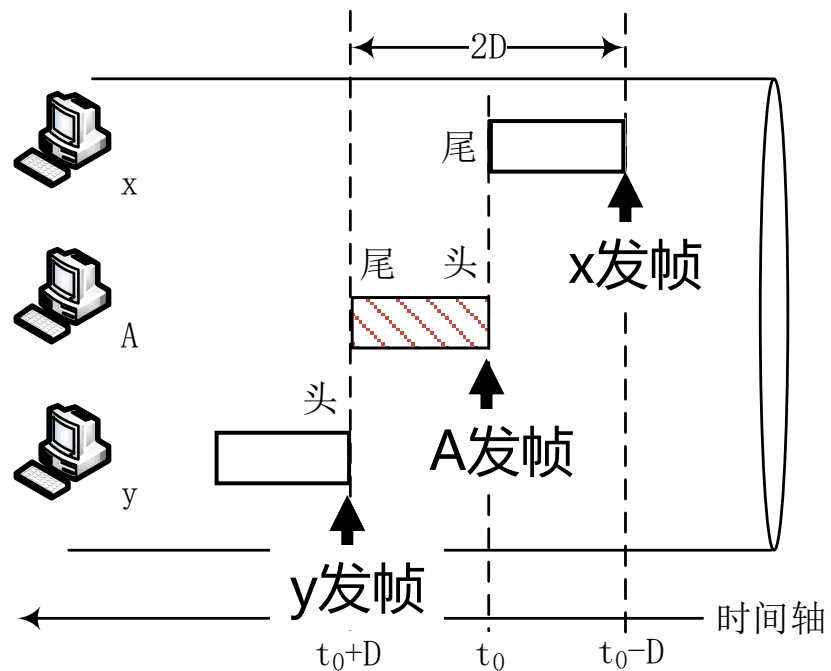


计算机网络教案社区

➤ 帧时：D

➤ 冲突危险期：

$$P[k] = \frac{G^k}{k!} * e^{-G} \quad P[0] = e^{-G}$$





怎样才能成功传输一个帧?



清华大学
Tsinghua University

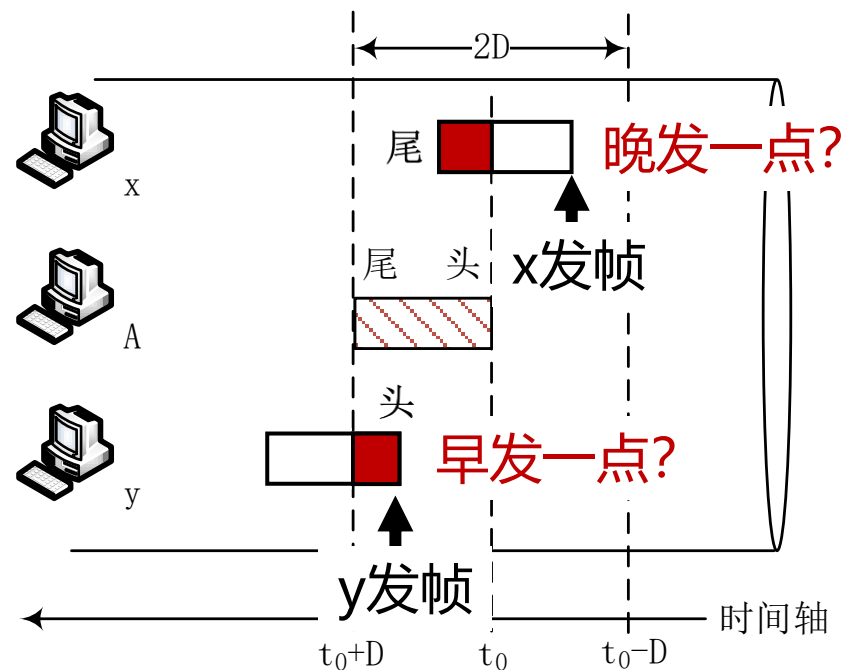


计算机网络教案社区

➤ 帧时: D

➤ 冲突危险期: $2D$

$$P[k] = \frac{G^k}{k!} * e^{-G} \quad P[0] = e^{-G}$$





怎样才能成功传输一个帧?



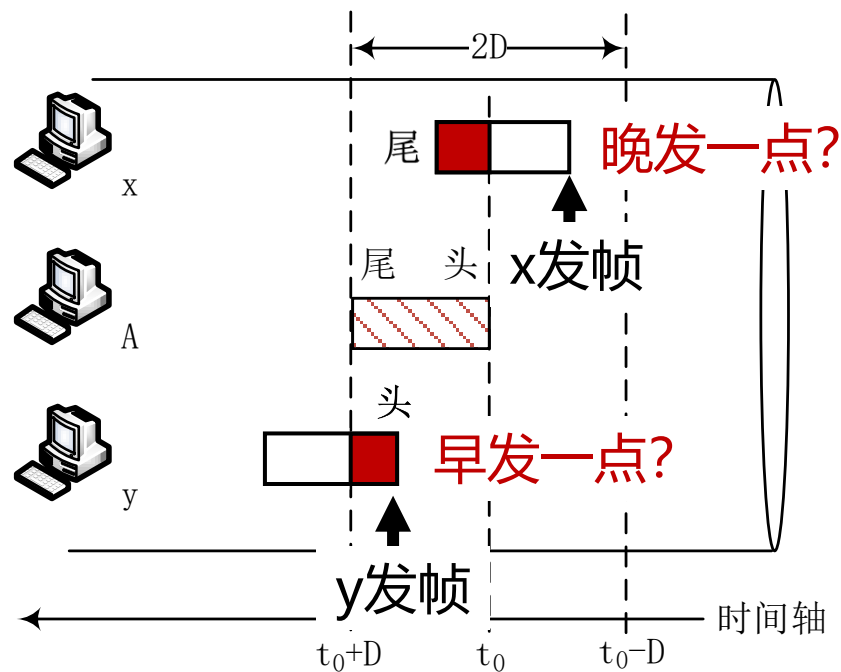
清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 帧时: D
- 冲突危险期: $2D$
- 该帧被成功传输的概率
 - 在冲突危险期内不得有其它帧
(即该帧邻近2个帧时)
 - $P[0] * P[0] = e^{-G} * e^{-G} = e^{-2G}$

$$P[k] = \frac{G^k}{k!} * e^{-G} \quad P[0] = e^{-G}$$





纯ALOHA协议的性能



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 网络吞吐量 S 的计算

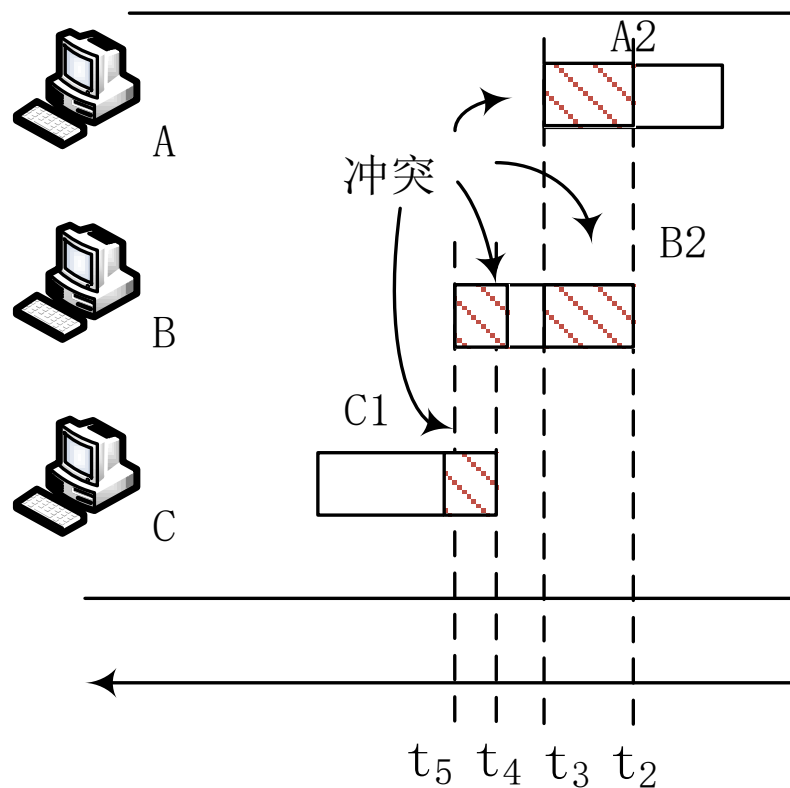
- **平均负载 G** : 一个帧时内平均到达 G 个帧
- **成功概率**: 某帧被成功传输的概率是 e^{-2G}
(邻近2个帧时无帧到达)
- 一个帧时内平均成功传输的帧数:

$$S = G * e^{-2G}$$

➤ 求吞吐量 S 的极大值: $S' = e^{-2G} - 2Ge^{-2G} = 0$

➤ 当 $G = 0.5$ 时, $S \cong 0.184$

➤ 即纯ALOHA信道的利用率最高为18.4%



人满为患的清芬园，利用率是多少？

如何提升利用率？



分隙ALOHA (Slotted ALOHA)工作原理



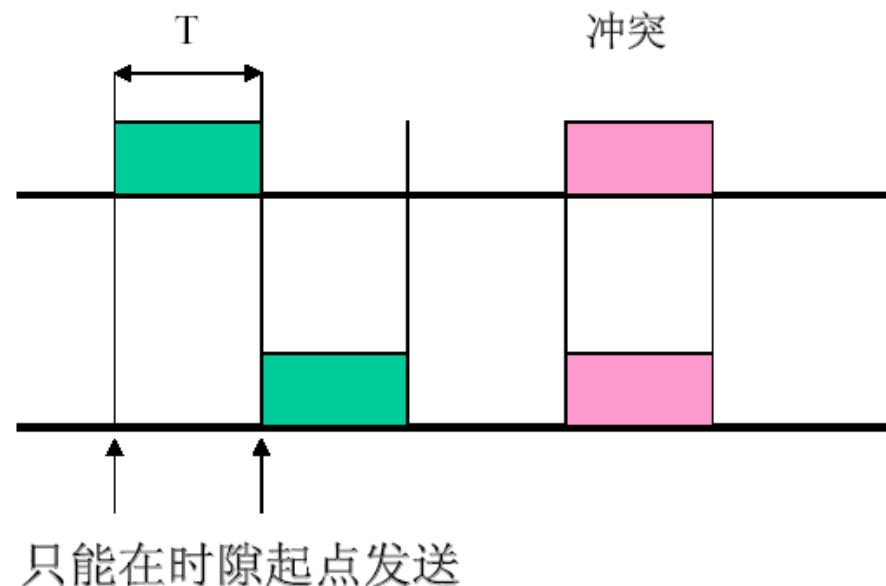
清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 分隙ALOHA是把时间分成时隙
(时隙/时槽: Slot)
- 时隙的长度对应一帧的传输时间
- 帧的发送必须在时隙的起点
- 冲突只发生在时隙的起点
- 会减少冲突还是增大冲突?

冲突危险期: D





分隙ALOHA的性能分析



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 网络吞吐 S 的计算

- **平均负载 G** : 一个帧时内平均到达 G 个帧
- 成功概率: 某帧被成功传输的概率是 e^{-G} (本帧时无帧到达)
- 一个帧时内平均成功传输的帧数:

$$S = G * e^{-G}$$

➤ 在 $G = 1$ 时得到最大吞吐率:

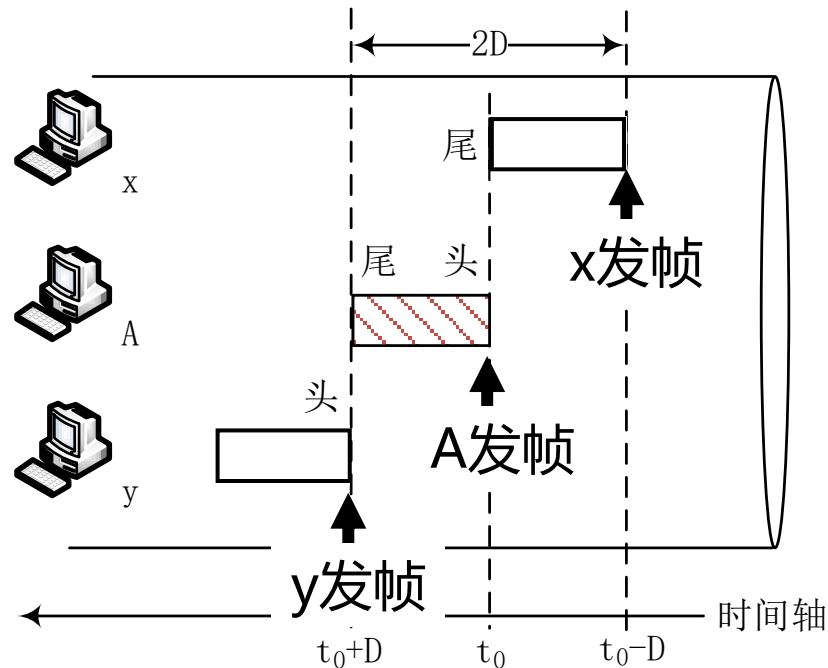
$$S_{\max} = 1/e \cong 0.368$$

神奇的分时隙

最大吞吐率是纯ALOHA的两倍

既然冲突就彻底冲突，要不就彻底别冲突！

$$P[k] = \frac{G^k}{k!} * e^{-G} \quad P[0] = e^{-G}$$





小结两种ALOHA协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ ALOHA

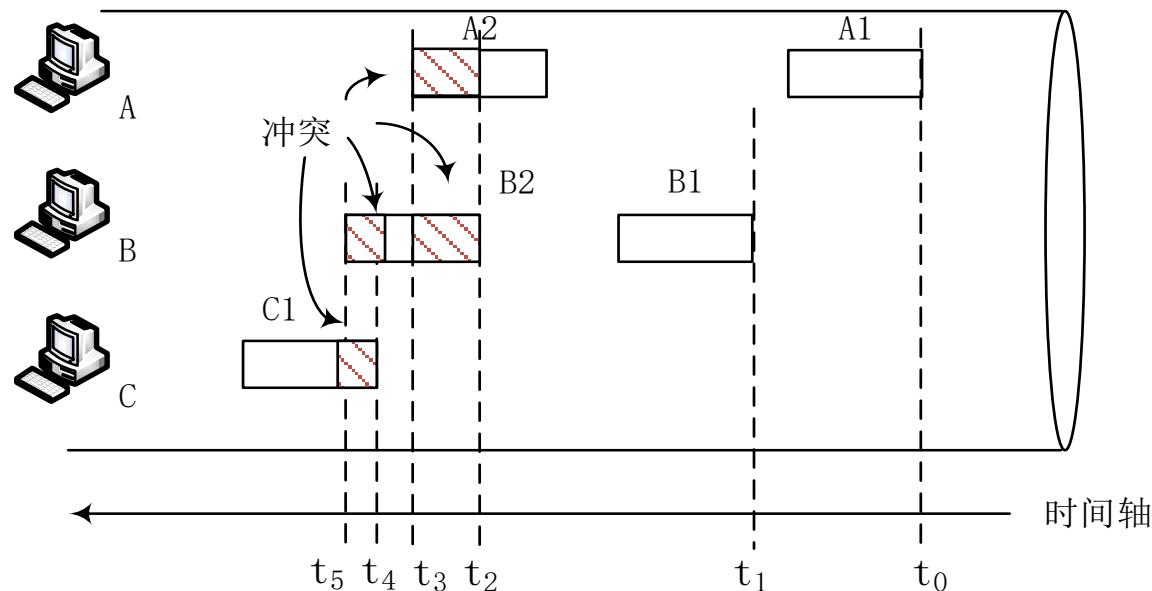
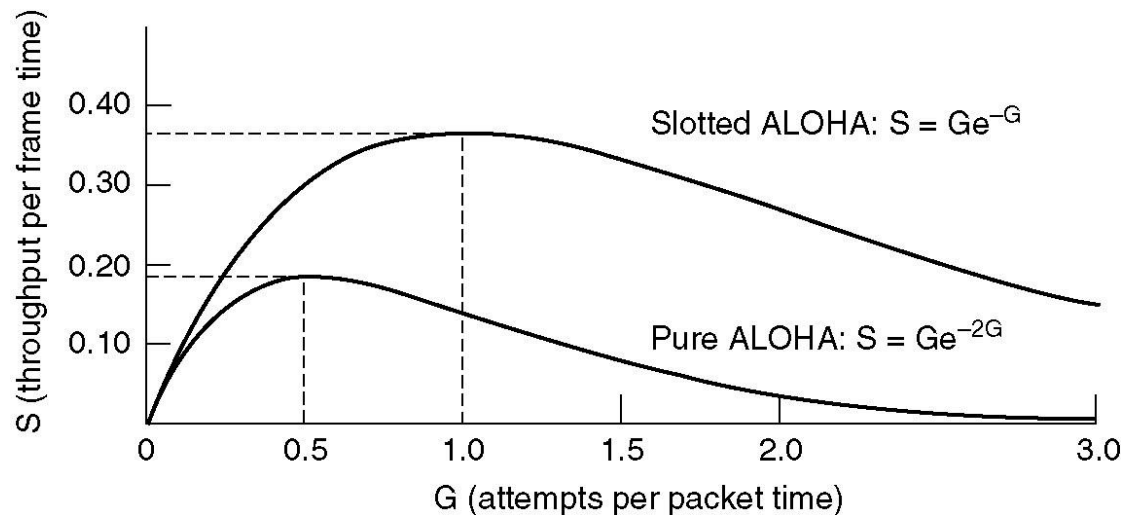
- 冲突危险期: $2D$
- 吞吐量: $S = G e^{-2G}$

➤ 分隙ALOHA

- 冲突危险期减半: D
- 吞吐量: $S = G e^{-G}$

如何改进?
更优雅、更谦让?

(B2的行为损人不利己)





载波侦听多路访问协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ **CSMA**: Carrier Sense Multiple Access

➤ **载波监听** (Carrier Sense)

- 站点在为发送帧而访问传输信道之前，
首先监听信道有无载波
- 若有载波，说明已有用户在使用信道，
则**不发送帧**以避免冲突

➤ **特点**: “先听后发”

- 改进ALOHA的侦听/发送策略分类

不再任性！
变得礼貌了！



CSMA (持续式)



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 特点

- ①经侦听，如介质空闲，则发送
- ②若发送时发生冲突怎么办？
等待**随机时间**再重复步骤①
- ③如介质忙怎么办？
持续侦听，一旦空闲**立即发送**

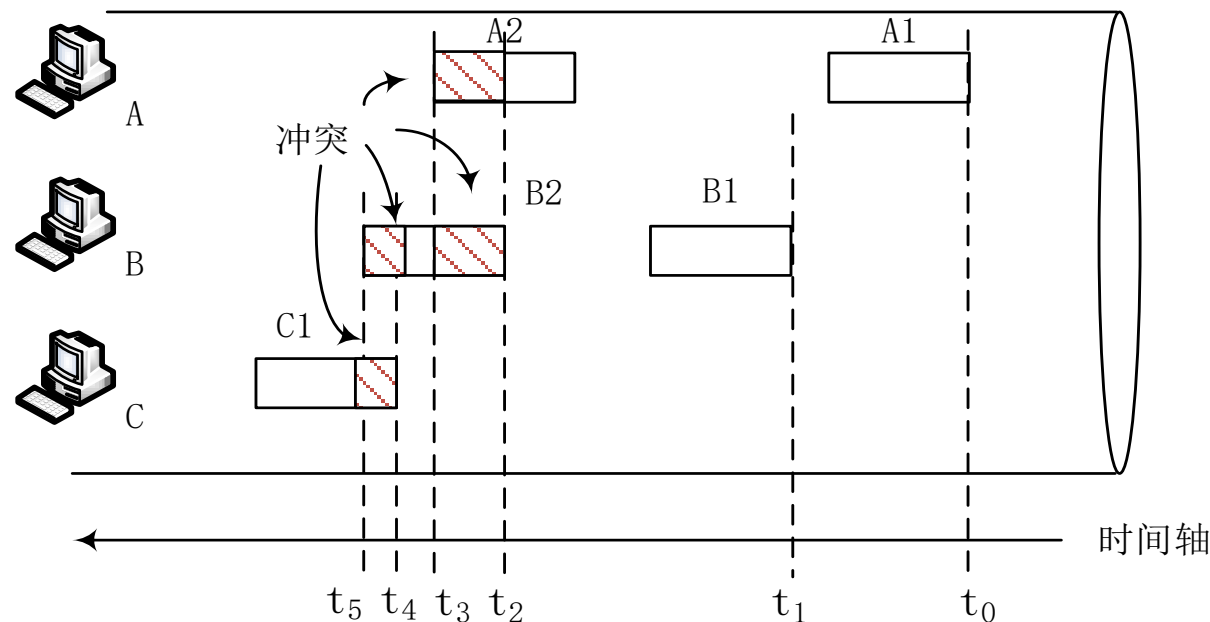
➤ 优点

- 持续**侦听**的等待延迟较小

➤ 主要问题

- 如果两个以上的站等待发送，一旦介质空闲就一定会发生冲突

怎么办？





非持续式CSMA



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 特点

- ①经侦听，如果介质空闲，开始发送
- ②如果介质忙，则等待随机时间，然后重复步骤①

➤ 好处

- 等待一个随机时间可以减少再次碰撞冲突的可能性

➤ 缺点

- 信道利用率下降，传输时延增加：等待时间内介质上如果没有数据传送，这段时间是浪费的
- 不巧：如果两个用户同时想发数据，它们都侦听到信道空闲，于是同时发送？



p-持续式CSMA



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 特点

- ①经侦听，如介质空闲，那么以 p 的概率发送，以 $(1-p)$ 的概率延迟一个时间单元发送
- ②如介质忙，持续侦听，一旦空闲重复①
- ③如果发送已推迟一个时间单元，再重复步骤①

➤ 注意

- 1-持续式是 p -持续式的特例



各种ALOHA/CSMA的性能比较



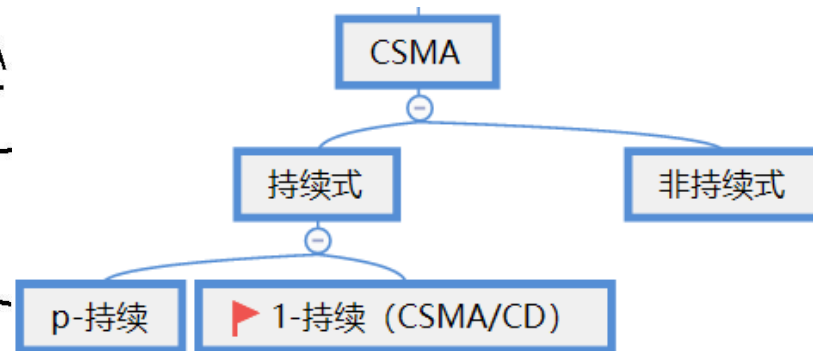
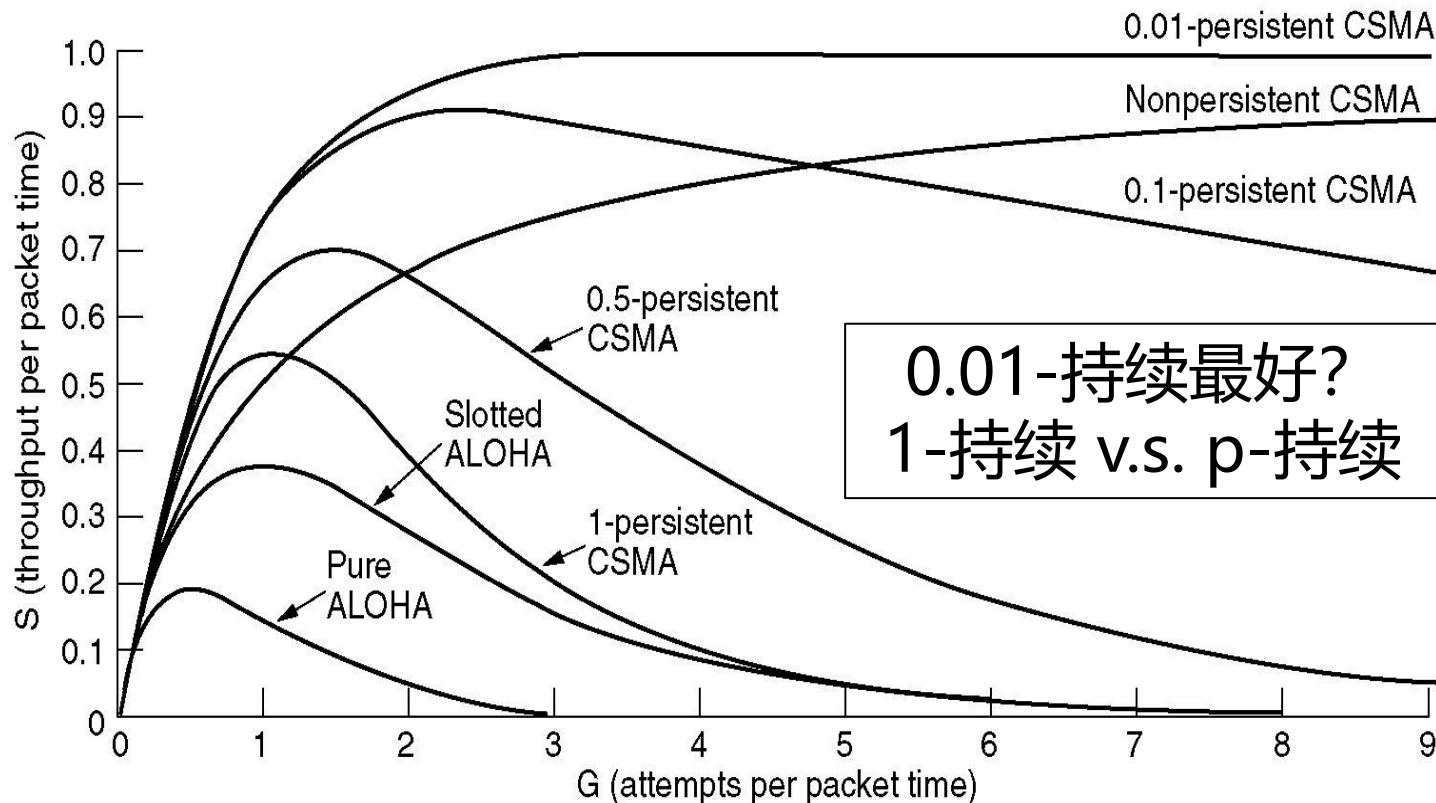
清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ CSMA的优势

- 对 ALOHA 进行了改进，确保了信道忙时，不再传送数据



能否不冲突
???



位图协议（预留协议） 图示



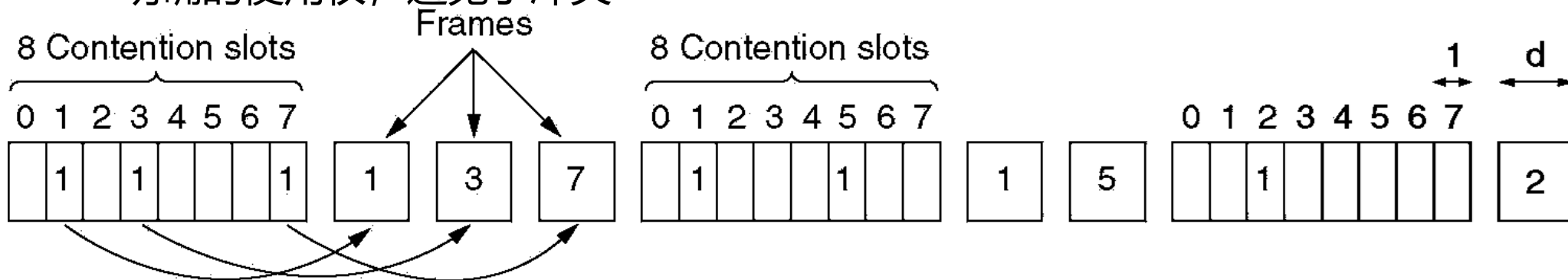
清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

天黑请闭眼
如何举手示意？

- 竞争期 (Contention slot)
 - 在自己的时槽内发送竞争比特
 - 举手示意，资源预留
- 传输期：按序发送
 - 明确的使用权，避免了冲突





位图协议的信道利用率分析



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 假设

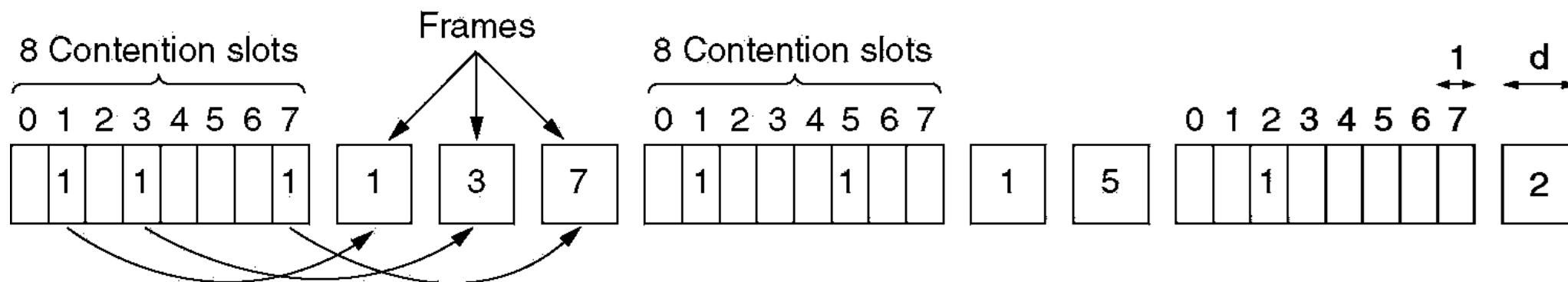
- 有N个用户，需N个时隙(比特)，每帧d比特

➤ 信道利用率

- 低负荷/非均衡时: $d/(d+N)$ (站点越多N越大，利用率越低)
- 在高负荷条件下: $d/(d+1)$ ，接近100%

➤ 缺点: 位图协议时延较大，没有考虑优先级

如何缩减位图?
 $2^8=256$ 个站点





二进制倒数计数协议

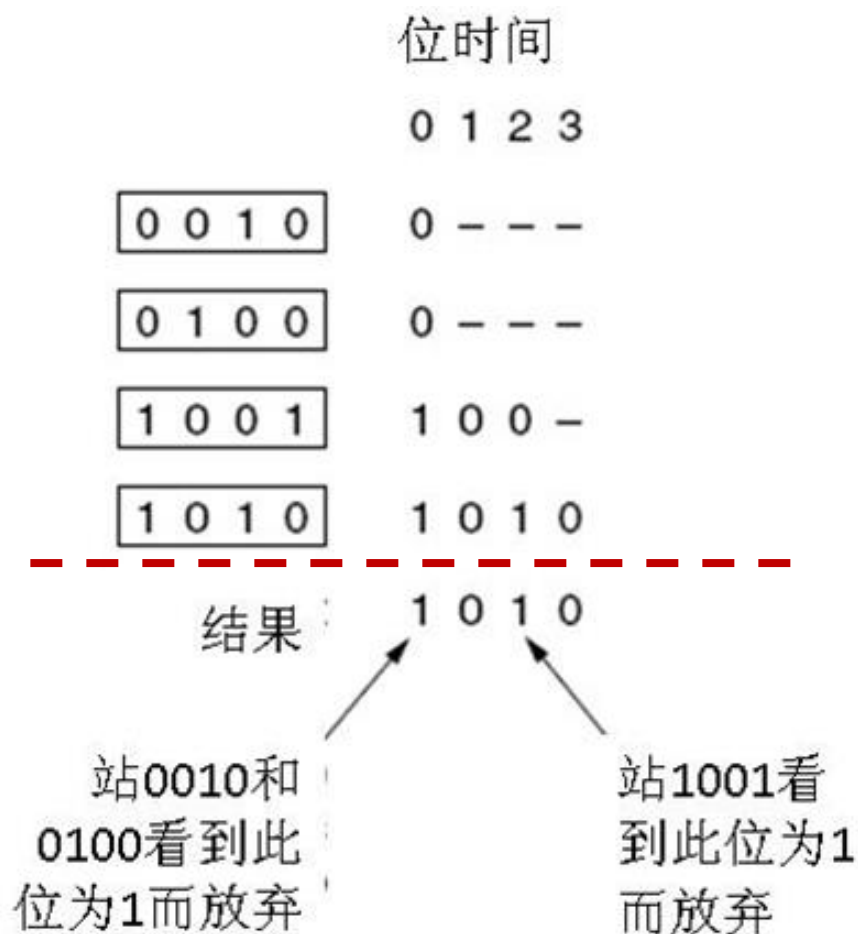


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 二进制倒数计数 (binary countdown)
 - 站点: **编序号**, 序号长度相同
- 工作原理
 - 若站点要占用信道, 则广播该序号
 - 不同站发的地址, 进行按位“或”操作
 - 一旦某站了解到比本站地址高位更高的位置被置为“1”, 便放弃发送请求
- 竞争期
 - 有数据发送的站点从高序号到低序号排队, 高者得到发送权





二进制倒数计数协议



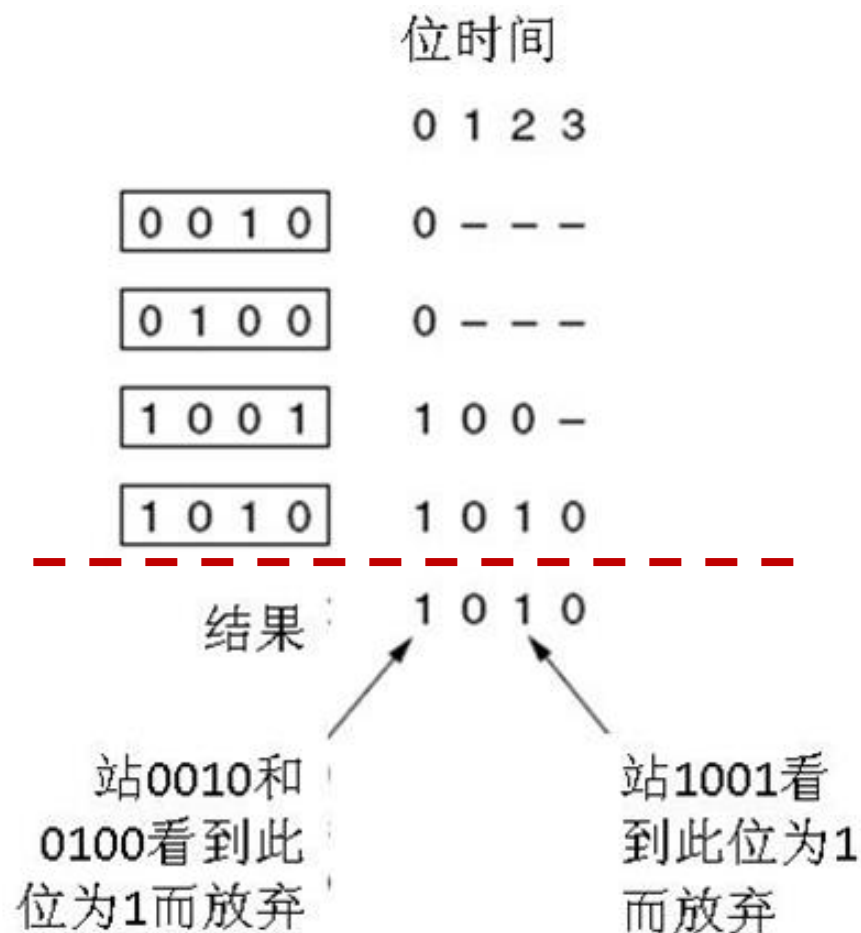
清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 二进制倒数计数协议的信道效率分析
 - N个站的二进制编码所需位数是 $\log_2 N$ 位
 - 每帧d比特
 - 信道的利用率为： $d/(d+\log_2 N)$
- 如何实现100%的利用率？
 - 如果规定每个帧的帧头为发送地址
 - 竞争时也在发源地址，则效率为100%
- 特点分析：高序号站点优先
 - 好事还是坏事？
 - 低优先级节点饥饿乃至饿死？

如何避免饿死？轮流来？





IEEE 802.5 令牌环 (续)



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ **令牌**：发送权限

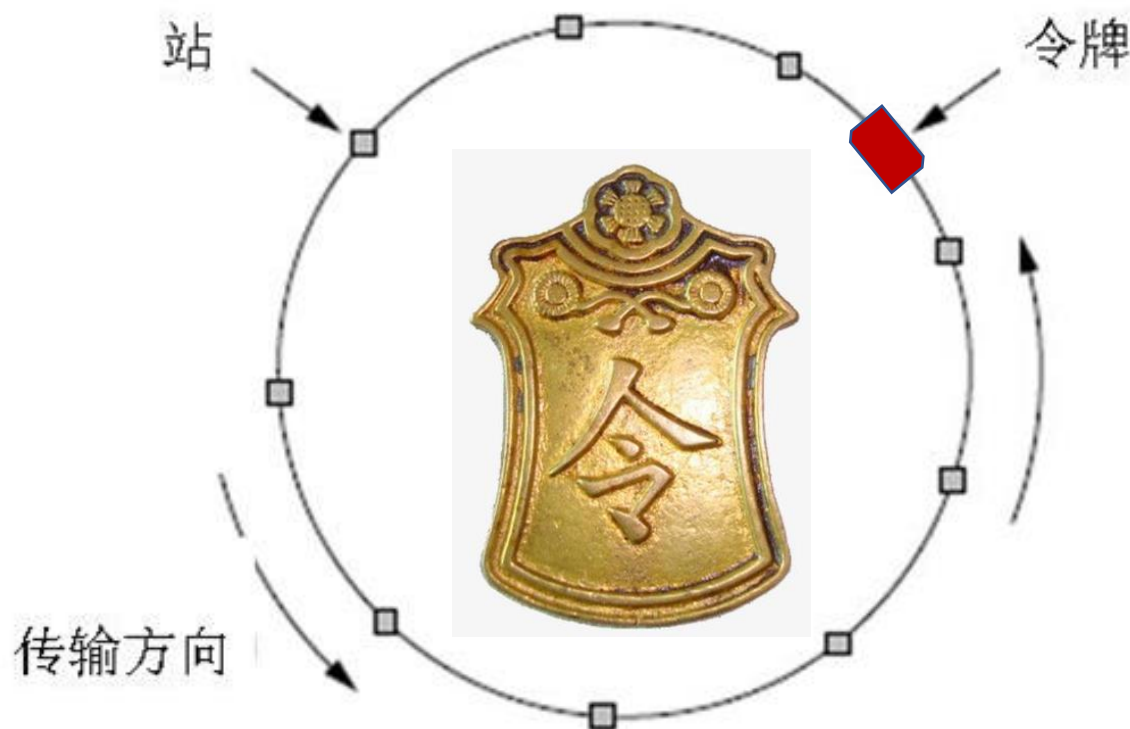
➤ **令牌环 (Token Ring)**

- 令牌在环中不断传递
- 发送站点**抓取**环中传输的令牌，获得发送权，从而向环中发送数据帧
- 防无限循环：环上的帧需要由**目的站**或**发送站**将其从环上去除
- 重新生成令牌，并转入监听模式

➤ **如何进行数据确认？**

- 帧内一个比特域，初值为0，目的站收到后，将其变为1

不饿死且彻底避免冲突？



令牌为王！



IEEE 802.5 令牌环 (续)



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

环被弄坏了？

➤ 环的维护需求

- 环上存在一个监控站，负责环的维护通过站的竞争产生

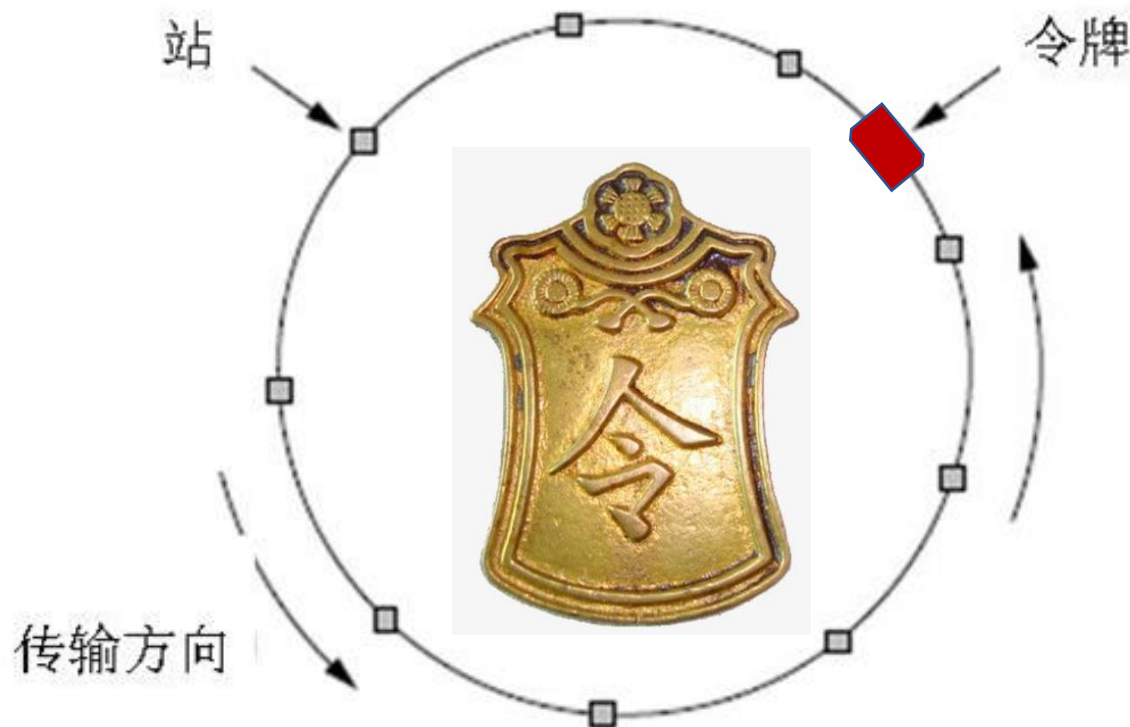
➤ 监控站的职责

- 保证令牌不丢失；处理环断开情况；清除坏帧，检查无主帧

➤ 优点

- 重负载下，效率接近100%
- 除了环，令牌也可以运行在其它拓扑上，如**令牌总线**

➤ **缺点**：令牌的维护代价





IEEE 802.5 令牌环



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 技术特点

- 环实际上并不是一个广播介质，而是不同的点到点链路组成的环，点到点链路有很多技术优势
- 各个站点是公平的，获得信道的时间有上限

➤ 令牌环的诞生与消亡

- 1980年代，IBM开发出令牌环作为它的LAN技术
- IEEE 802.5标准是主要基于IBM的令牌环网络的
- 令牌环技术提出时，声称理论上比Ethernet好
- 随着交换以太网的出现和以太网速率不断提高，令牌环技术最终落后于以太网





自适应树搜索协议



清华大学
Tsinghua University



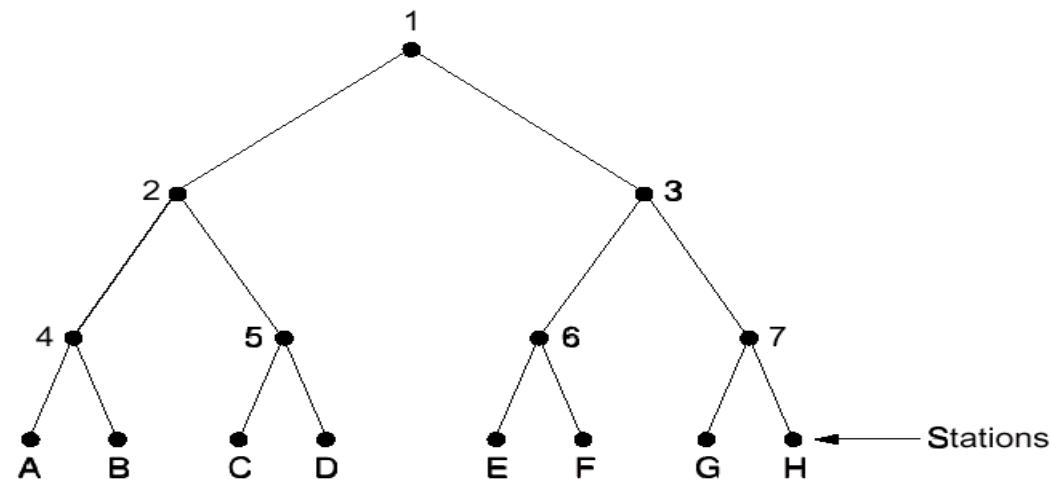
计算机网络教案社区

➤ 问题探讨

- 多个站点发生冲突时，如何尽快疏导？
- 随机退避？避免随机性？谁来退避？
- 减少竞争站点数目，可减小冲突概率
- 思路：折半查找，将站分组，组内竞争？

➤ 工作原理

- 将所有站点组织成二叉树结构
- 初始：全部站可竞争信道，只有一个站要使用信道则发送
- 有冲突：在第1槽内半数站（2以下站）参与竞争，如其中之一获得信道，本帧后的时槽留给3以下的站
- 如还冲突则继续折半搜索：如AE、AD



Adaptive Tree Walk Protocol

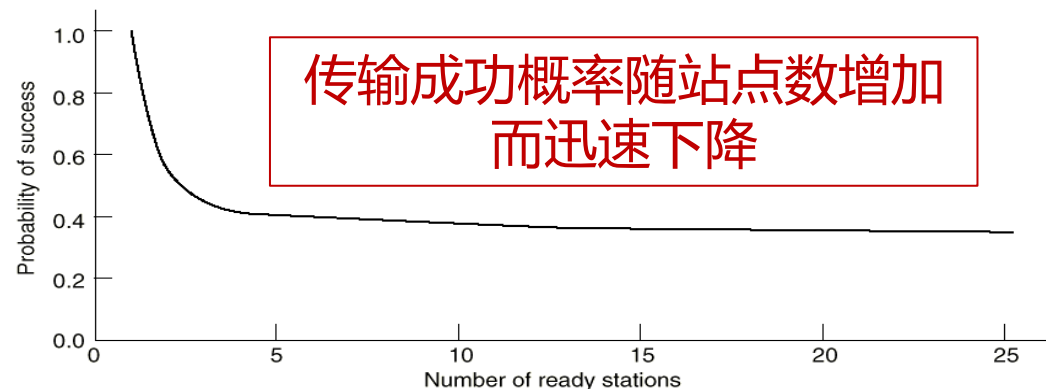


Fig. 4-8. Acquisition probability for a symmetric contention channel.



自适应树搜索协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

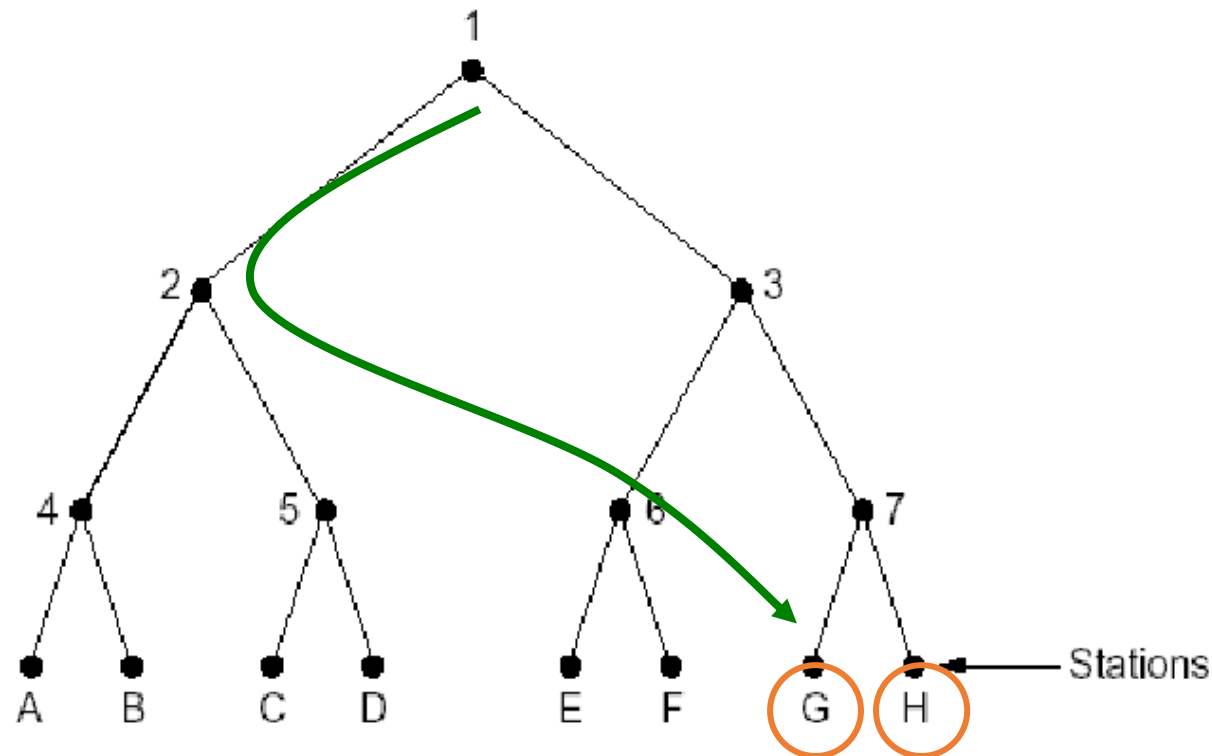
➤ 问题分析

- 如何优化：尽快避免冲突？
- 当系统负载很重时，冲突太多

➤ 效率分析与提升

- 重负载时，从根结点开始竞争，发生冲突的概率非常大
- 为提高效率，可以从中间结点开始竞争

最优冲突域划分方法





小结



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 随机访问协议：努力减少冲突

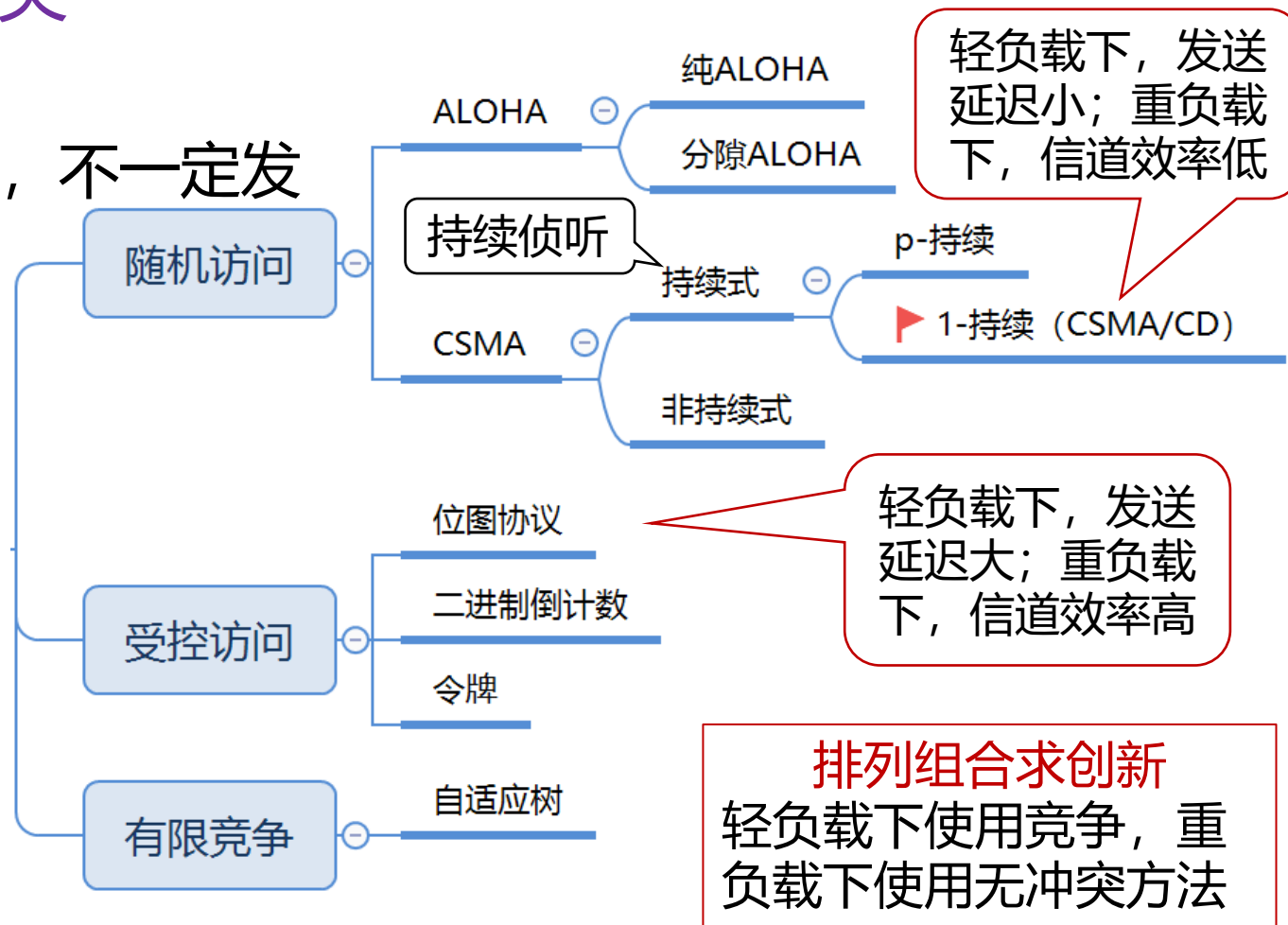
- Aloha：任性->时隙
- CSMA：先听后发；不坚持听，不一定发
- 各种CSMA的性能比较
- 时延增大，冲突不可避免

➤ 受控访问协议：避免冲突

- 天黑请闭眼，究竟谁要发？
- 令牌环：得令牌者发数据

➤ 有限竞争协议

- 结合上述二者的优势
- 自适应树搜索协议





本节内容



➤ 多路访问协议

➤ 以太网

1. 经典以太网
2. 以太网的性能
3. 以太网的发展与未来



以太网的前世今生



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 以太网与3Com

- 1973年，施乐公司（Xerox）的Robert Metcalfe等人发明了以太网（Ethernet）
- 1979年，Metcalfe离开施乐，成立了3Com（Computer, Communication, Compatibility）
- 3Com一度是Cisco的强大竞争对手

➤ Metcalfe

- 以太网发明人，创建3Com公司
- 提出Metcalfe's Law ($V \sim N^2$)
- Metcalfe发表论文奠定以太网技术基础
《以太网：本地计算机网络的**分布式**包交换方式》





经典以太网 - 经典以太网的物理层

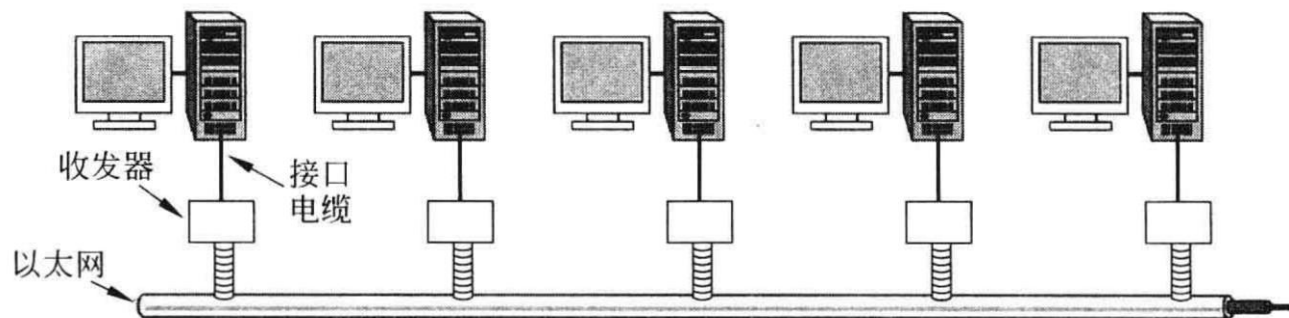


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 最高速率**10Mbps**
- 使用**曼彻斯特编码**
- 使用**同轴电缆**和**中继器**连接



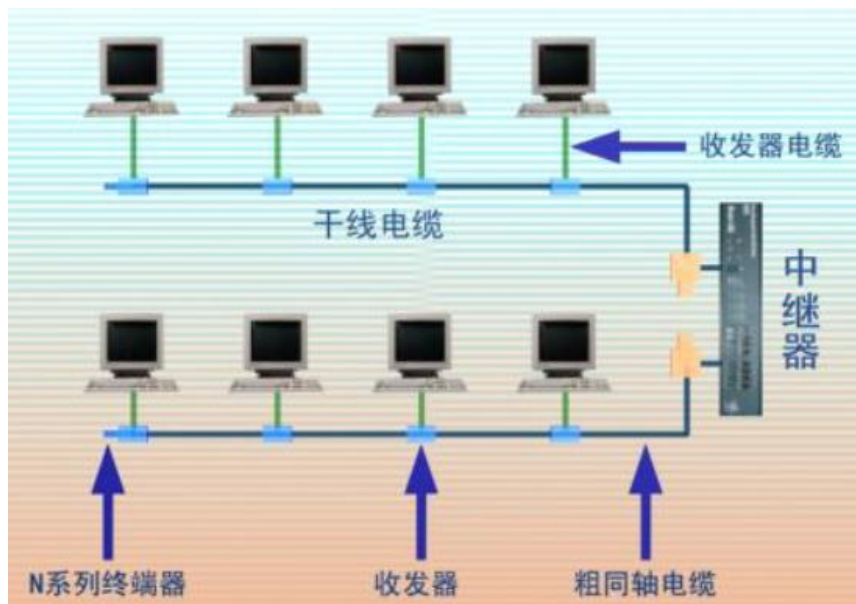
粗以太网 (thick Ethernet)



BNC T型
连接器

连接至以
太网卡

细以太网
(thin Ethernet)



中继器 (repeater)

任意两个收发器之间距离**不得超过2.5km**
且任意两个收发器之间经过的**中继器不能超过4个**
以保证MAC协议正常工作



经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ CSMA可能的问题

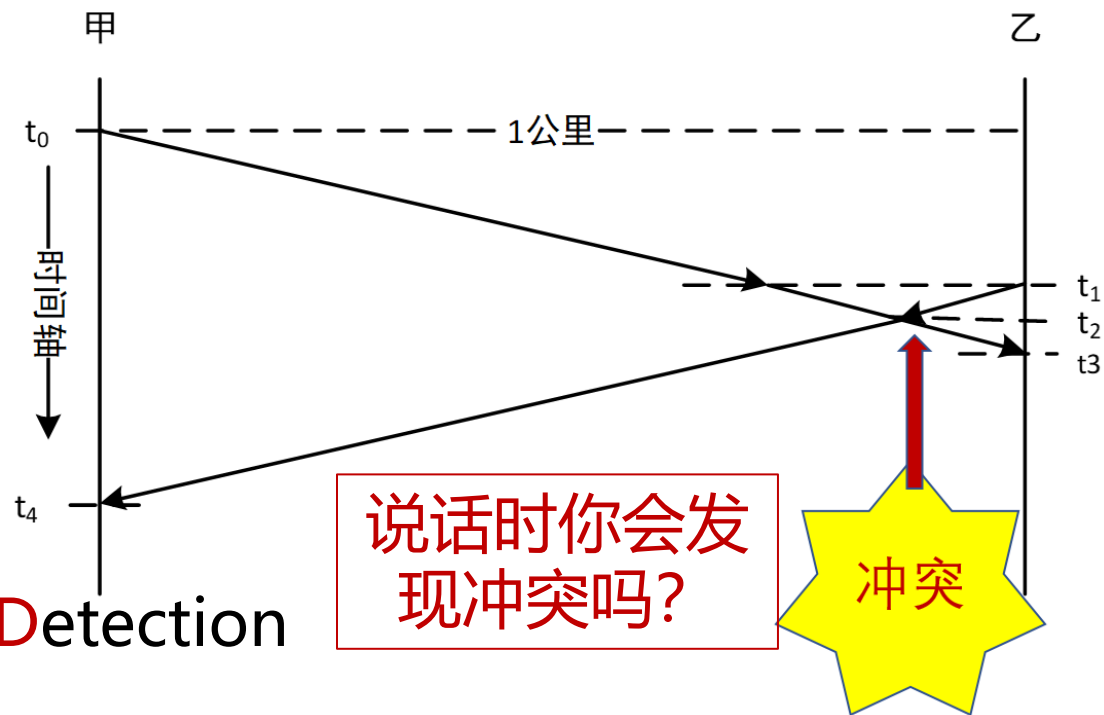
- 如侦听到介质上没有数据发送时才发送，发送后还会发生冲突吗？

➤ 冲突的两种情况

- (1) 同时传送
- (2) 传播延迟时间

➤ 有潜在的冲突怎么办？

- CSMA/CD: CSMA with Collision Detection
- CSMA/CD: 载波监听冲突检测
- 原理：“先听后发、边发边听”



说话时你会发现冲突吗？

检测到冲突后怎么办？



经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ Collision Detection (CD)的引入原因

- 当两个帧发生冲突时，两个被损坏帧继续传送毫无意义，而且信道无法被其他站点使用，浪费信道
- 如果站点边发送边监听，并在监听到冲突之后立即停止发送，可以提高信道的利用率，因此产生了CSMA/CD

➤ CSMA/CD过程

- ①经侦听，如介质空闲，则发送
- ②如介质忙，**持续侦听**，一旦空闲立即发送
- ③如果发生冲突，立即停止并发送**Jam (强化)** 信号，等待一个随机分布的时间再重复步骤①



经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University

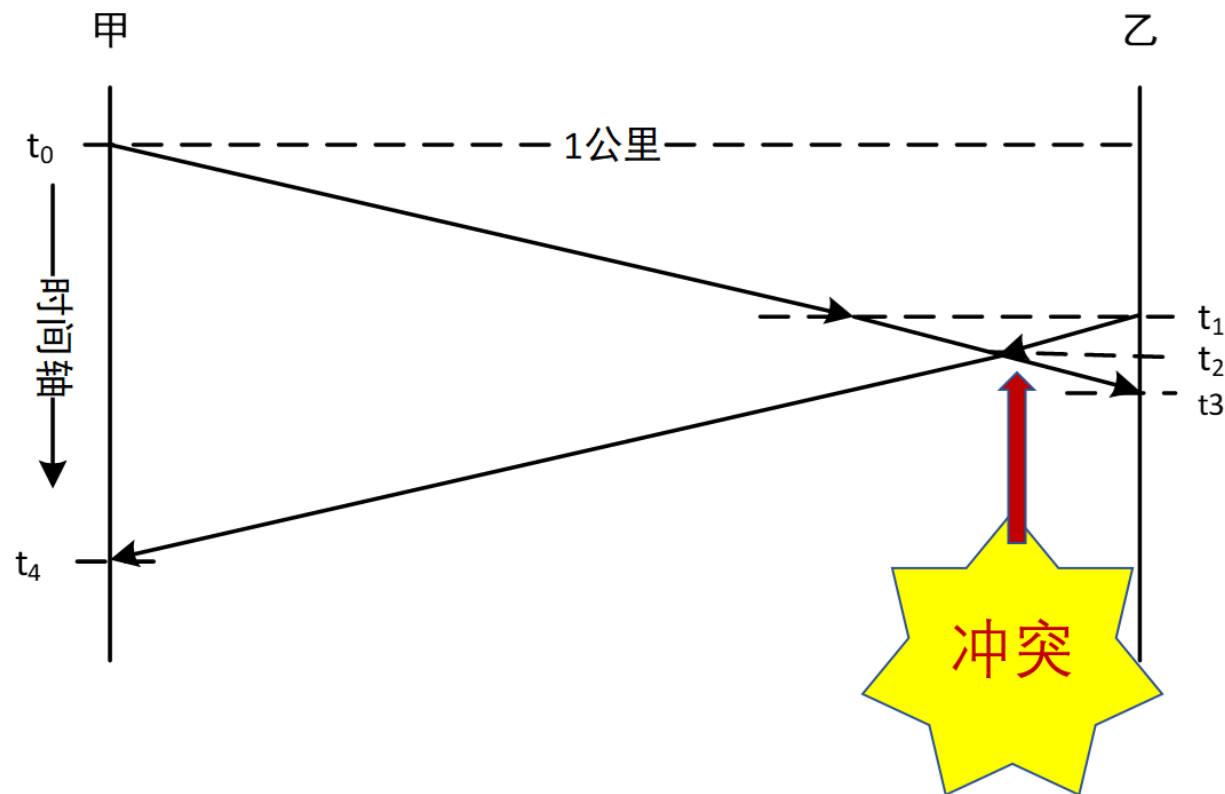


计算机网络教案社区

传播延迟对载波侦听的影响

- 信号传输速度: $0.65C$
- t_0 时刻: 甲侦听后发送, 到达乙约需5微妙
- t_1 时刻: 乙侦听后发送
- t_2 时刻: 冲突
- t_3 时刻: 乙检测到冲突, 发送Jam
- t_4 时刻: 甲检测到冲突

t_3 时刻: 乙检测到冲突, 是否可重新发送?
等待一段随机时间, 再重新开始发送





经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 冲突窗口

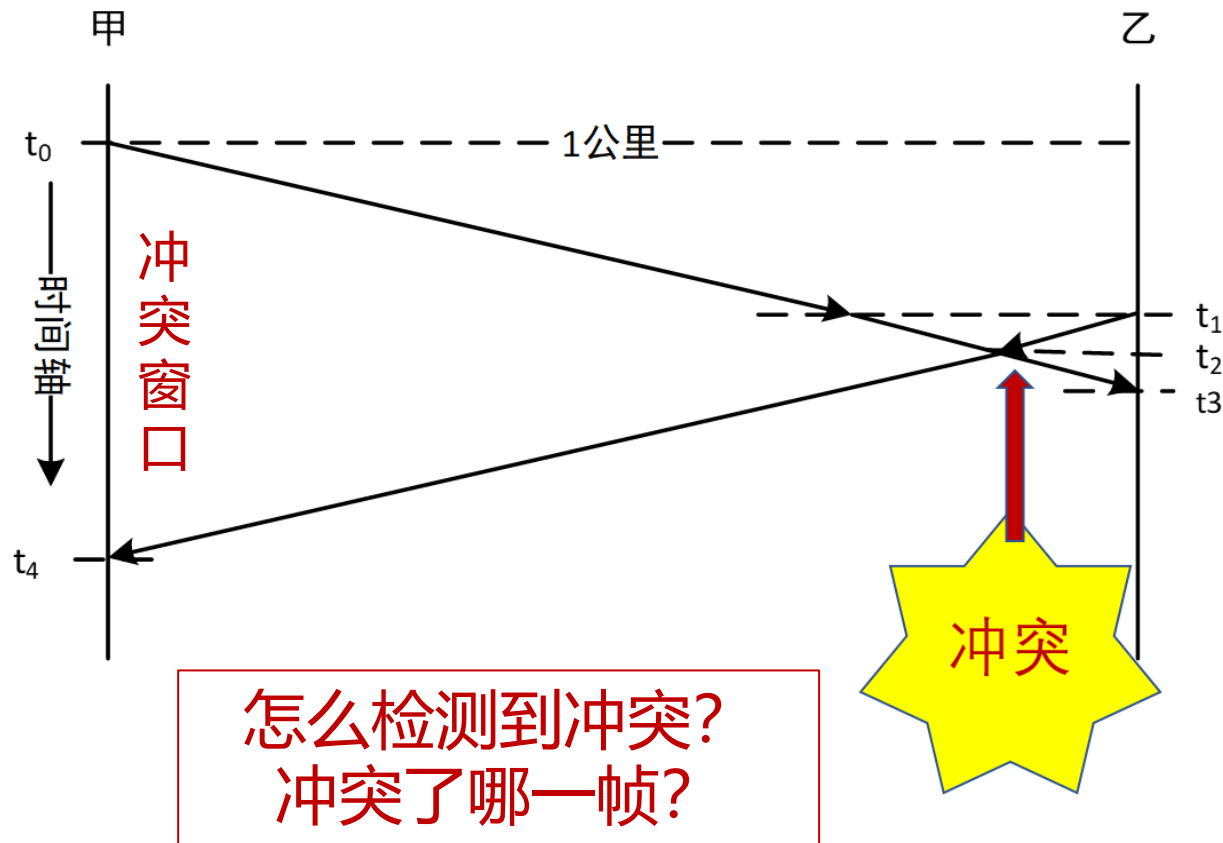
- 即发送站发出帧后能检测到冲突（碰撞）的**最长时间**

➤ 冲突窗口是一个时间区间

- 可能侦听到发出的帧遭到冲突（碰撞）
- 等于最远两站**传播时间的两倍**，即 $2D$ （ D 是单边延迟）
- 即**RTT**：Round Trip Time

➤ 发送方需求

- 在发送一帧的同时，完成该帧的冲突检测





经典以太网 - MAC子层协议

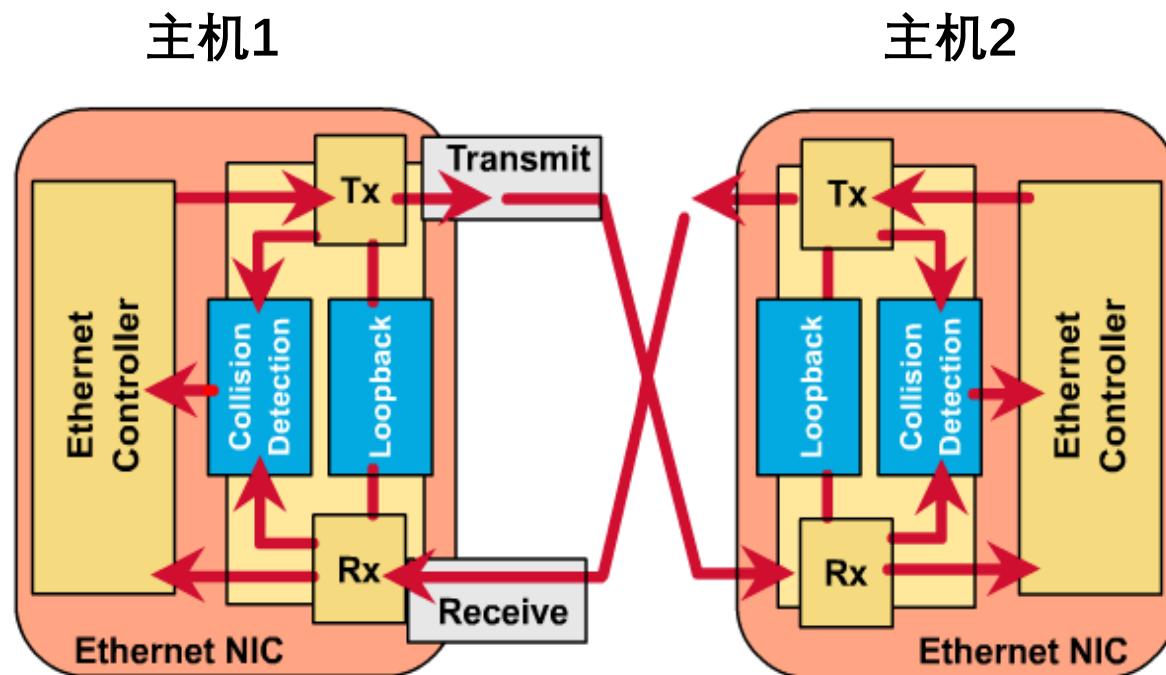


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 如何侦听到冲突?
- **Tx**: 发出信号, 分叉
- **Rx**: 收到两路信号
 - 发送的同时进行检测
 - (不同则有冲突)
 - 如有冲突, 则要求在一帧发送完成前检测到冲突
- 所以要求
 - 帧的发送时间**不能太短**
 - 至少一个**冲突窗口**时间: $2D$



最短帧长与谁相关?



经典以太网 - MAC子层协议



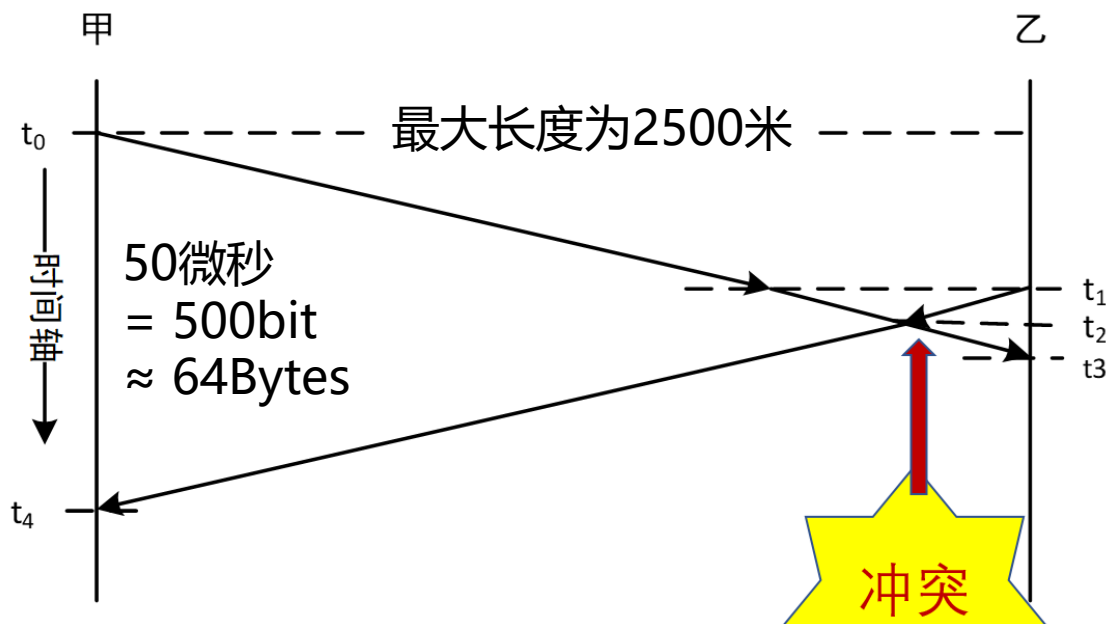
清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 最短帧长的计算

802.3规范中的10Mbps以太网，最大长度为2500米，具有4个中继器，在最差情况下往返一次时间大约是50微秒，在这个时间内能发送500bit，加上安全余量增加至512bit，即64Bytes



➤ 以太网的最短帧长

- 以太网规定最短有效帧长为 64 字节，凡长度小于 64 字节的帧都是由于冲突而异常中止的无效帧
- 如果发生冲突，就一定是在发送的前 64 字节之内
- 由于一检测到冲突就立即中止发送，这时已经发送出去的数据一定小于 64 字节

网络速度提高意味着什么？
最短帧长也应该增大或者站
点间的距离要减小



经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 使用CSMA/CD的经典以太网检测到冲突后，会立即中止传输，并发出一个短冲突加强信号，在等待一段~~时间~~后重发

怎么确定？

低负载时尽量高效&延时小，
又要避免高负载时的不断冲突

- 二进制指数后退(Binary exponential backoff)的CSMA/CD
 - 确定基本退避时间槽，其长度为以太介质上往返传播时间(2τ)，以太网中设为512比特时间
 - 定义重传次数 k ， $k \leq 10$ ，即 $k = \min[\text{重传次数}, 10]$
 - 从整数集合 $[0, 1, \dots, (2^k - 1)]$ 中随机地取出一个数，记为 r
 - 重传所需的时延就是 r 倍的时间槽 2τ
 - 当重传达 16 次仍不能成功时即丢弃该帧，并向高层报告



以太网性能



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

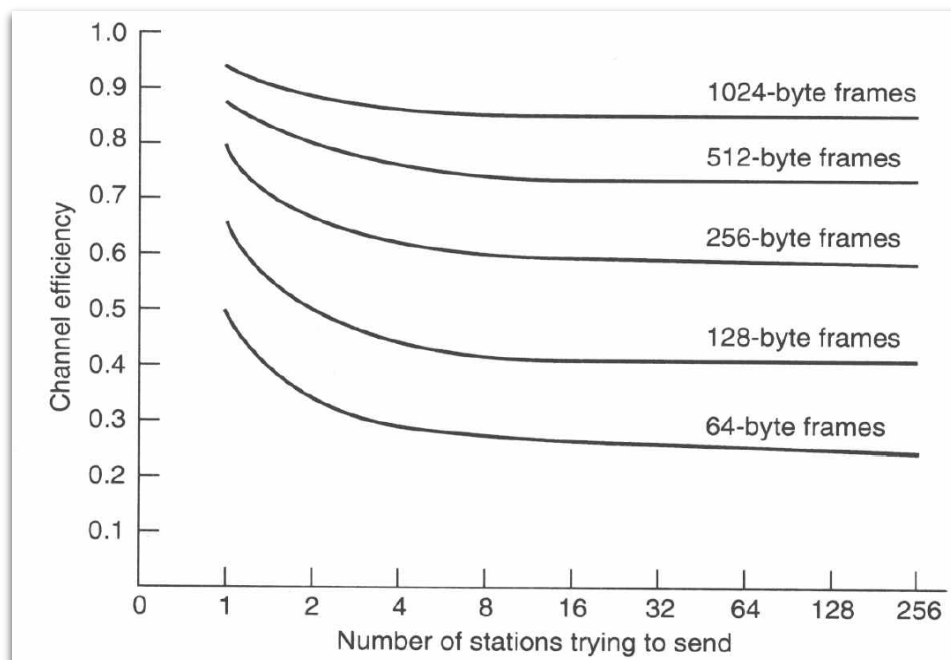
- 使用二进制指数后退算法的CSMA/CD方法，以太网的性能 (P221)

$P = F/B$, F 为帧长, B 为带宽;
 L 为电缆长度, c 为信号传播速度;
假设每帧 e 个竞争时间槽

$$\text{信道效率} = \frac{P}{P + 2\tau/A}$$

$$\text{信道效率} = \frac{1}{1 + 2BLE/cF}$$

- 传送一帧平均需要 P 秒,
某个站获得信道的概率为 A , 2τ 为时间槽
- 电缆越长, τ 越大, 任何两个站之间的最大电缆距离会影响性能



具有512bit时间槽的10Mbps以太网效率

- 在给定帧长的情况下, 增加带宽或距离会降低网络效率
- 然而网络发展的目标总是在长距离上拥有高带宽!

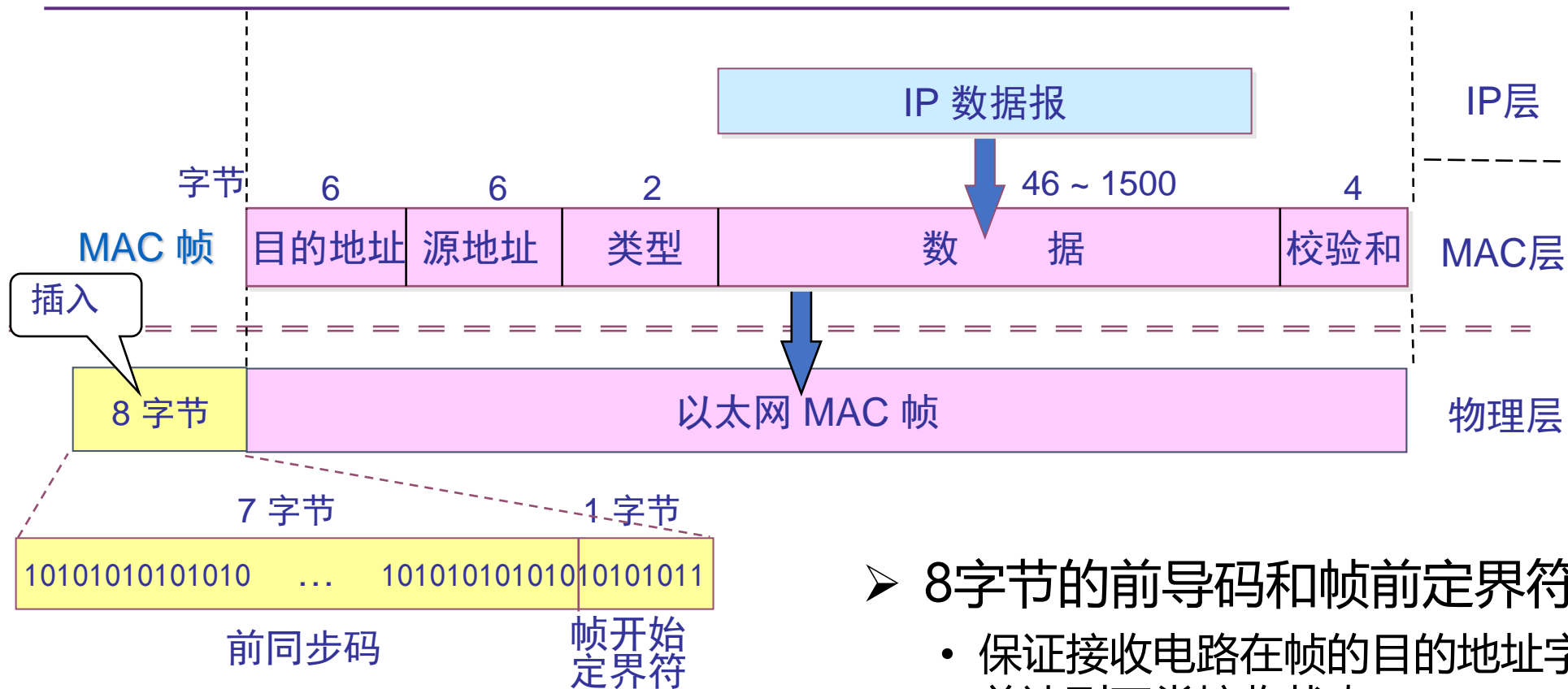


经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University

计算机网络教案社区



➤ 8字节的前导码和帧前定界符

- 保证接收电路在帧的目的地址字段到来之前达到正常接收状态
- 不需要保留提交上层，也不计入帧头长度



经典以太网 - MAC子层协议



- 硬件地址又称为物理地址，或 MAC 地址
- MAC帧中的源地址和目的地址长度均为6字节

6	6	2	46 ~ 1500	4
目的地址	源地址	类型	数 据	校验和

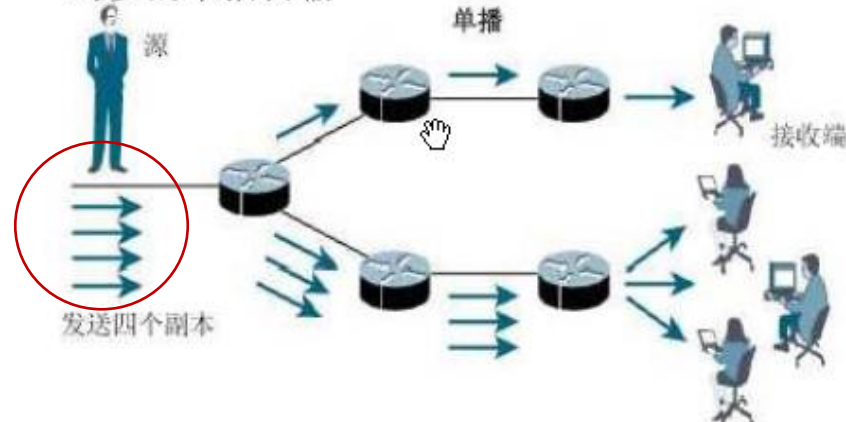
MAC层如何区分单播广播和组播?

单播 (unicast) : 5C-26-0A-7E-4E-4C

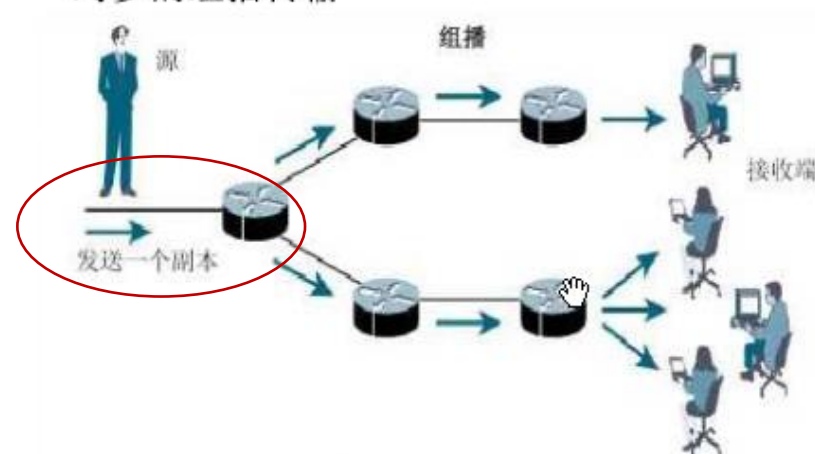
广播 (broadcast) : FF-FF-FF-FF-FF-FF

组播 (multicast) : 01-00-5E-00-00-00

一对多的单播传输



一对多的组播传输





经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University

 计算机网络教案社区

- 硬件地址又称为物理地址，或 MAC 地址
- MAC帧中的源地址和目的地址长度均为6字节

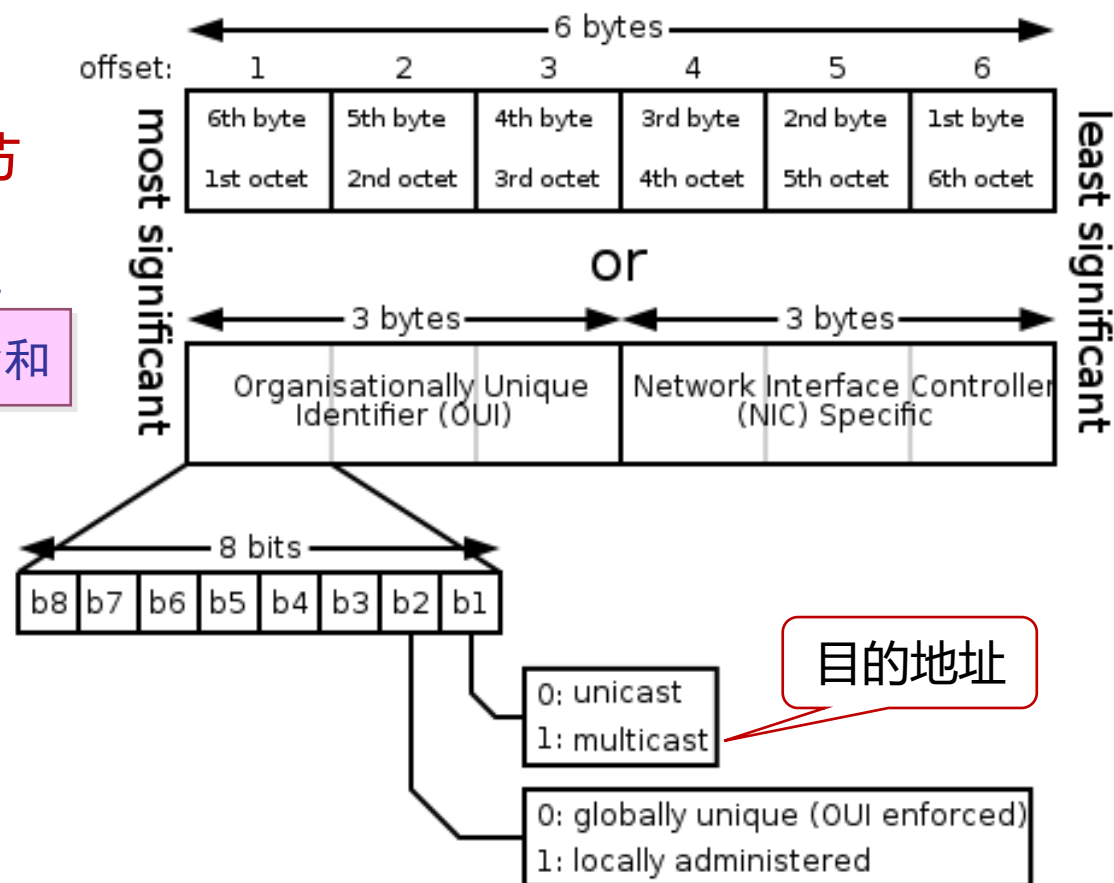


MAC层如何区分单播广播和组播?

单播 (unicast) : 5C-26-0A-7E-4E-4C

广播 (broadcast) : FF-FF-FF-FF-FF-FF

组播 (multicast) : 01-00-5E-00-00-00





经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- OUI (Organizationally Unique Identifier)
 - IEEE Registration Authority是负责注册和管理组织唯一标识符 (OUI) 的管理机构
- 在Windows上使用`ipconfig /all`命令查看MAC地址 (Linux: `ifconfig`)

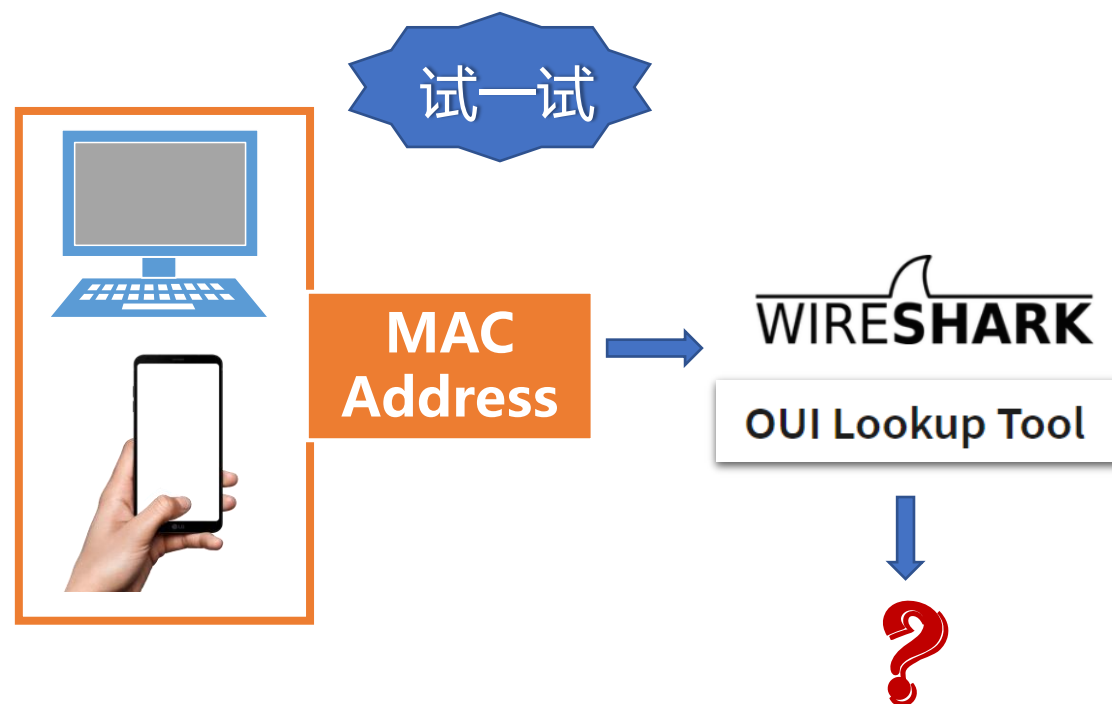
```
Administrator: 命令提示符
C:\>ipconfig /all

Windows IP Configuration

Host Name . . . . . : DESKTOP-HOME
Primary Dns Suffix . . . . . :
Node Type . . . . . : Hybrid
IP Routing Enabled. . . . . : No
WINS Proxy Enabled. . . . . : No

Ethernet adapter 以太网:

Connection-specific DNS Suffix . :
Description . . . . . : Total(R) Ethernet Connection (2) I218-V
Physical Address. . . . . : 1C-87-2C-72-86-BC
Dhcp Enabled. . . . . : Yes
Autoconfiguration Enabled . . . . . : Yes
Link-local IPv6 Address . . . . . : fe80::80b7:4e6a:7e36:9220%16(Preferred)
IPv4 Address. . . . . : 10.0.0.21(Preferred)
Subnet Mask . . . . . : 255.255.255.0
Lease Obtained. . . . . : 2021年2月11日 13:33:27
Lease Expires . . . . . : 2021年2月16日 10:27:57
Default Gateway . . . . . : 10.0.0.1
DHCP Server . . . . . : 10.0.0.1
DHCPv6 IAID . . . . . : 52201260
DHCPv6 Client DUID. . . . . : 00-01-00-01-10-DA-2A-02-1C-87-2C-72-86-BC
DNS Servers . . . . . : 10.0.0.1
NetBIOS over Tcpip. . . . . : Enabled
```





经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

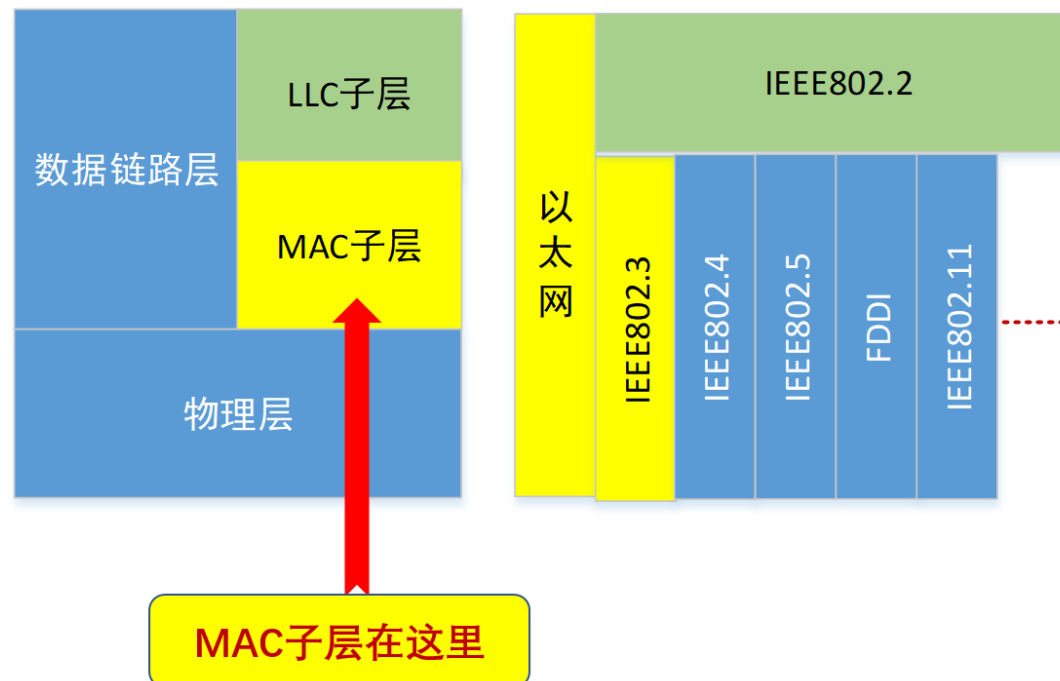
MAC
帧格式

6	6	2	46 ~ 1500	4
目的地址	源地址	类型	数 据	校验和

目的地址	源地址	Length	数 据	校验和
------	-----	--------	-----	-----

类型字段

IPv4: 0x0800
ARP: 0x0806
IPv6: 0x86DD
PPP: 0x880B
PPPoE: 0x8864
...

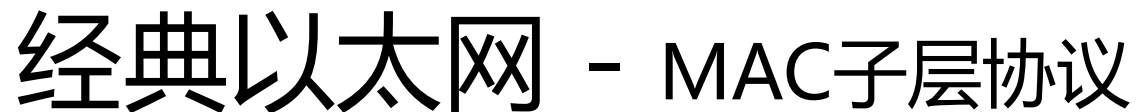


如何判定帧长度?

(a) DIX Ethernet V2

(b) IEEE 802.3

如何判定上层类型?



数据字段

- 46 ~ 1500字节
- 最小帧长 = $46 + 18 = 64\text{B}$
- 最大帧长 = $1500 + 18 = 1518\text{B}$ (最大传输单元MTU: 1500B)

- 数据字段不足46字节，需要填充整数字节（Padding）至46字节，以保证以太网MAC帧不小于64字节

6	6	2	46 ~ 1500	4
目的地址	源地址	类型	数 据	校验和

```
> Frame 25: 60 bytes on wire (480 bits), 60 bytes captured (480 bits) on interface 0  
✓ Ethernet II, Src: b0:7f:b9:ff:70:aa, Dst: 1c:87:2c:72:86:bc  
    > Destination: 1c:87:2c:72:86:bc  
    > Source: b0:7f:b9:ff:70:aa  
        Type: ARP (0x0806)  
        Padding: 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000  
> Address Resolution Protocol (reply)
```

0000	1c 87 2c 72 86 bc b0 7f b9 ff 70 aa 08 06 00 01	...,r.... ..p....
0010	08 00 06 04 00 02 b0 7f b9 ff 70 aa 0a 00 00 01p....
0020	1c 87 2c 72 86 bc 0a 00 00 16 00 00 00 00 00 00	...,r.... ..
0030	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00



经典以太网 - MAC子层协议



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区



➤ 校验和

- **FCS**, Frame Check Sequence
- 使用**CRC32**计算除了校验和以外的其他字段

➤ 对于检查出的**无效 MAC 帧**就简单地丢弃，以太网不负责重传丢弃的帧

- 数据字段的长度与长度字段的值不一致；
- 帧的长度不是整数个字节；
- 用收到的帧检验序列 FCS 查出有差错；
- 数据字段的长度不在 46 ~ 1500 字节之间



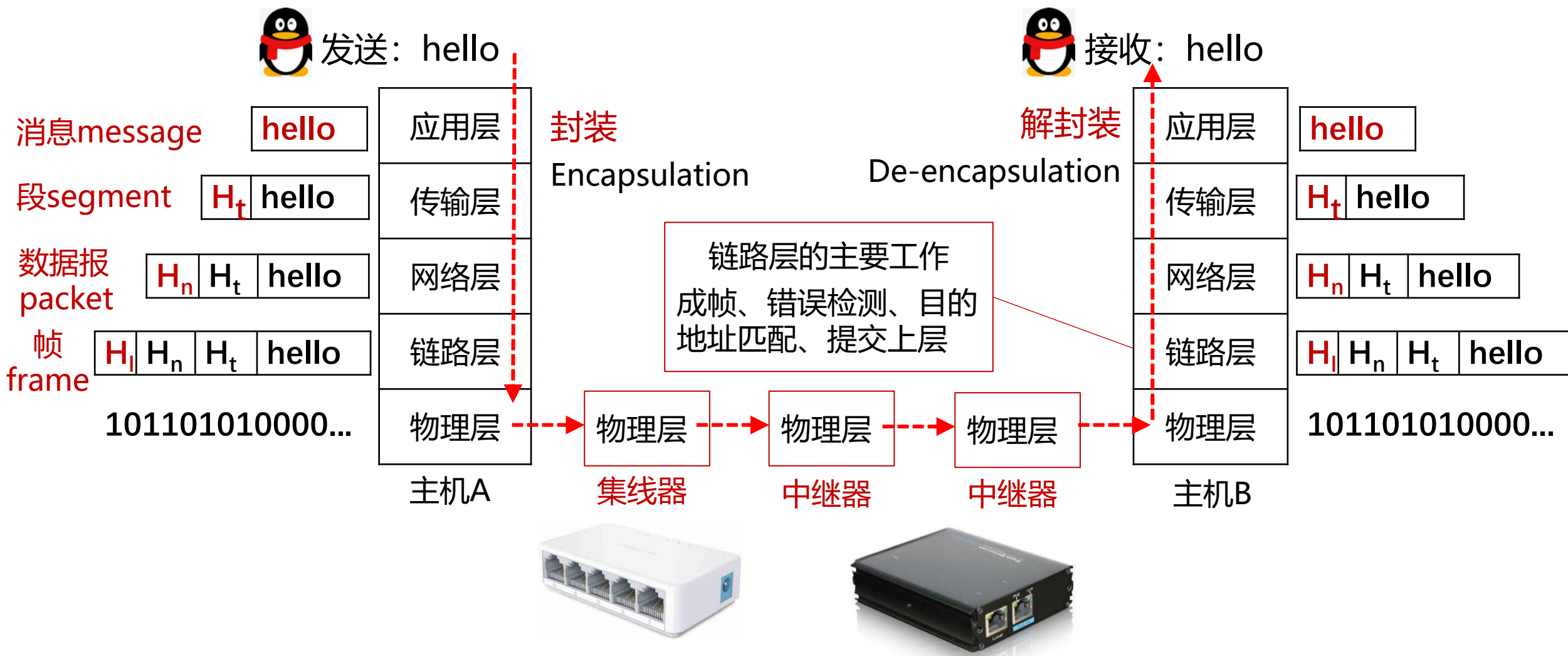
回顾：网络体系结构分层模型



清华大学
Tsinghua University



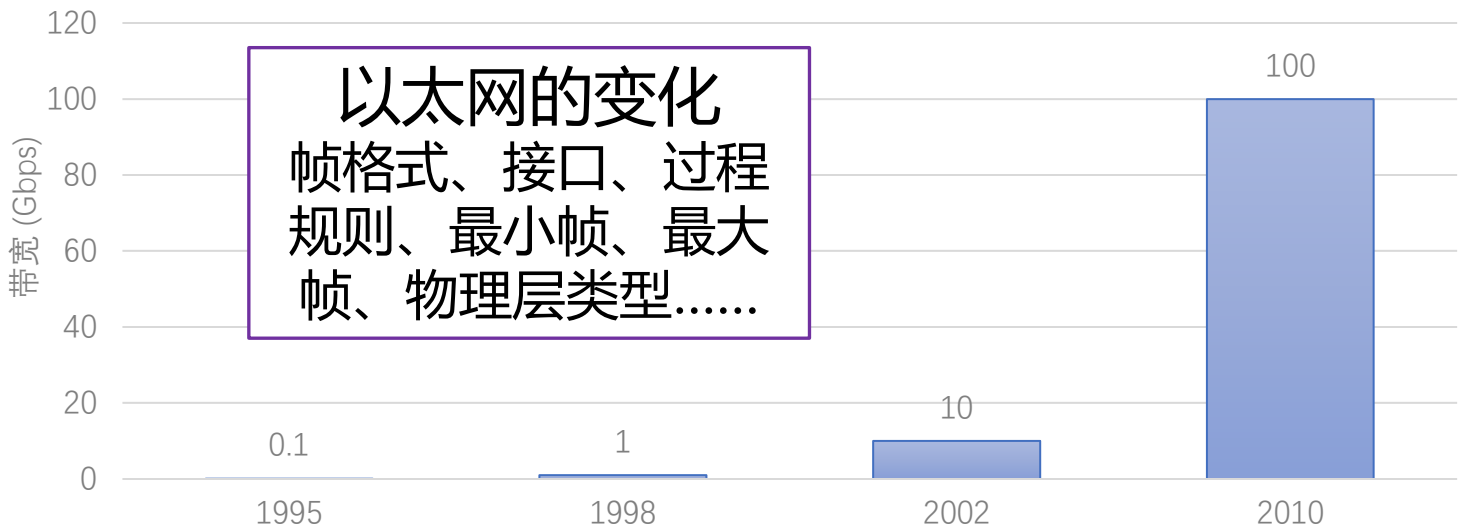
计算机网络教案社区





以太网的发展

快速以太网 IEEE 802.3u 100Mbps	千兆以太网 IEEE 802.3ab 1Gbps	万兆以太网 IEEE 802.3ae 10Gbps	百G以太网 802.3ba等 40-100Gbps
---------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------



灵活性
简单性
兼容性
易维护
廉价
易扩展
可靠性



以太网的主战场在哪里？



以太网的未来

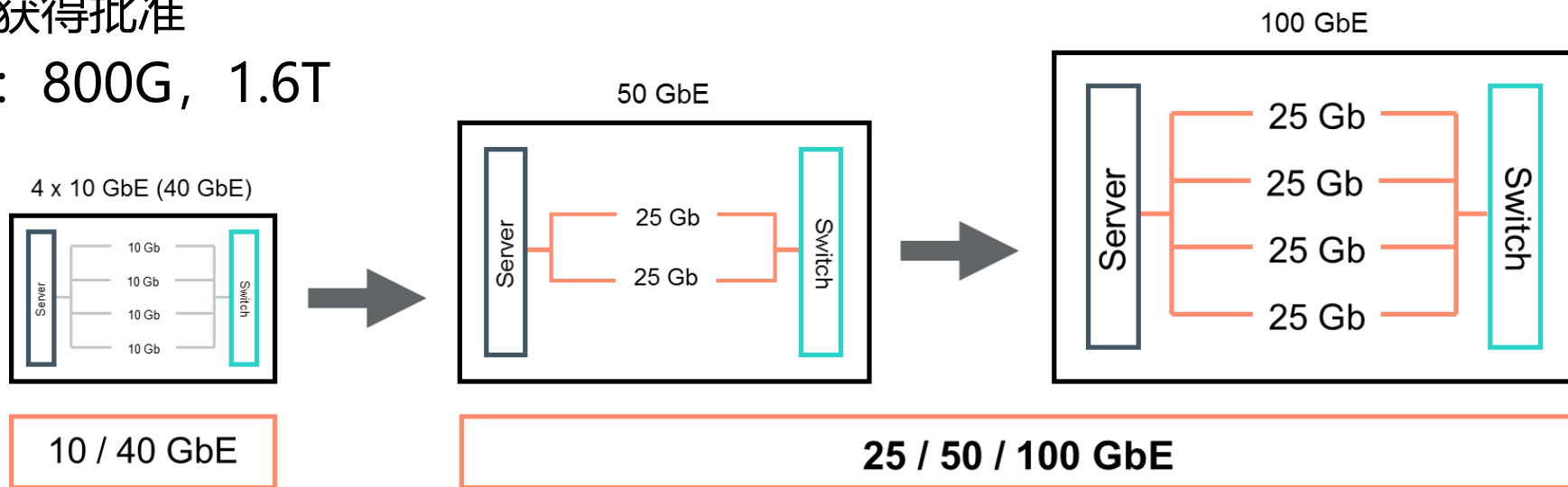


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 25/50G和第二代100G以太网
 - 2014年发布25G以太网标准IEEE 802.3by，弥补了10G以太网的低带宽和40G以太网的高成本缺陷
 - 25G以太网采用了25Gb/s单通道技术，可基于4个25Gbps光纤通道实现100G传输
- 400GbE和200GbE
 - 2017年，由IEEE P802.3bs使用与100GbE大致相似的技术开发的400GbE和200GbE标准获得批准
- 未来：800G，1.6T





总结：介质访问子层基础



➤ 信道分配问题

- 常见的局域网拓扑均共享信道：可能多个站点同时请求占用信道！
- 解决：介质的多路访问控制

➤ 随机访问协议：努力减少冲突

- Aloha：任性->时隙
- CSMA：先听后发；不坚持听，不一定发

➤ 受控访问协议：避免冲突

- 令牌环：得令牌者发数据

➤ 有限竞争协议

➤ 最成功的局域网：以太网

- 经典以太网：指数后退的CSMA/CD
- 以太帧与MAC地址、单播、广播与组播

减少冲突是关键

越来越优雅，越来越谦让！

(1-持续=>P-持续)

提前排位有限竞争



网络的可扩展性：大规模

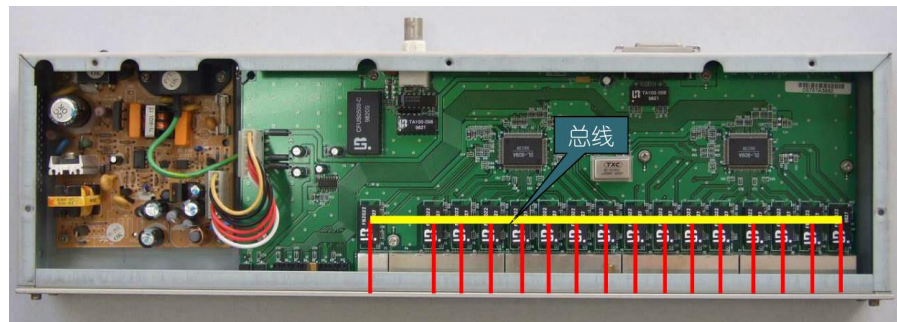


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

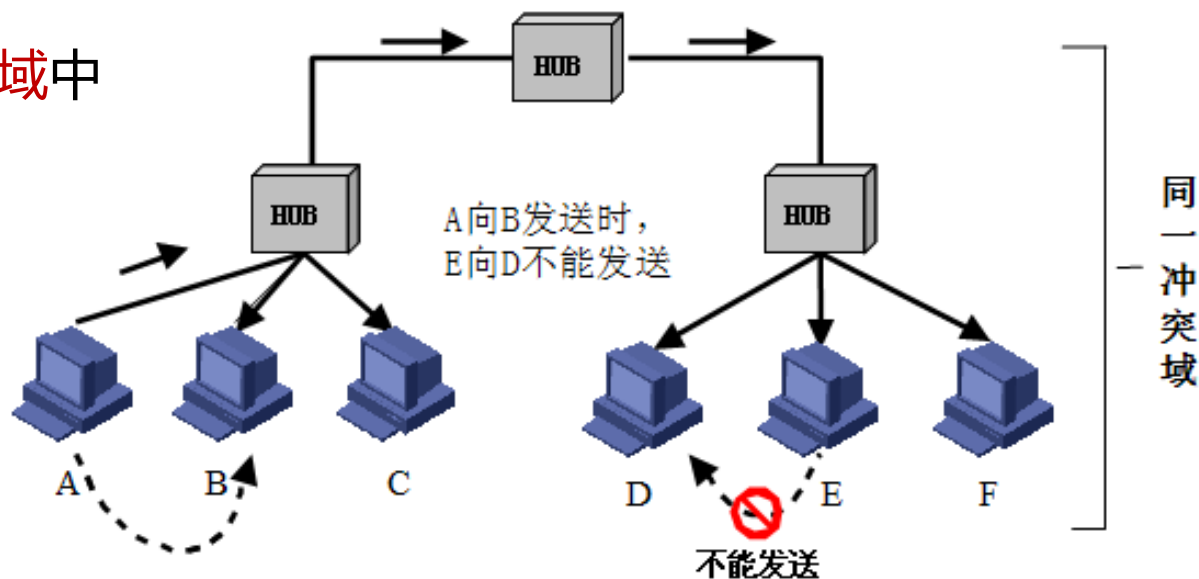
- 使用**集线器 (HUB)** 组建以太网
 - Hub所有端口内部都是连通的
 - 使同一根总线
 - 和Repeater一样，也是物理层设备
- 使用Hub扩展以太网
 - 集线器不能增加容量
 - 用集线器组成更大的局域网都在一个**冲突域**中
 - Hub级连：限制了网络的可扩展性



面对可扩展性，优雅和谦让无能为力，怎么办？

CD总是有效吗？失效怎么办？

期待大规模组网，期待无线局域网！





作业



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 《Computer Networks-5th Edition》 章节末习题
 - CHAPTER 4: 2 (ALOHA) , 14 (以太网) , 15 (CSMA/CD LAN) , 17 (以太网) , 18 (以太网)
- 截止时间: 下周三晚11:59, 提交网络学堂



致谢社区本章贡献者



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区



袁华

华南理工大学

- 1、信道分配问题
- 2、多路访问协议



曹轶臻

中国传媒大学

- 2、以太网



赵婧如

西安邮电大学

- 3、数据链路层交换



徐敬东

南开大学

- 4、无线网络

《计算机网络：自顶向下方法》(原书第7版), 库罗斯 罗斯, 机械工业出版社, 2018年06月

《计算机网络(第5版)》, Tanenbaum & Wetherall, 清华大学出版社, 2012年3月

《计算机网络(第7版)》, 谢希仁, 电子工业出版社, 2017年01月

《计算机网络(第4版)》, 吴功宜, 清华大学出版社, 2017年04月

《计算机网络技术与应用》, 张建忠, 徐敬东, 清华大学出版社, 2019年9月

《路由交换技术详解与实践:第1卷:下册》,新华三大学, 清华大学出版社, 2017年08月



特别鸣谢



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 本课程课件中的部分素材来自于：
 - (1) 库罗斯.罗斯、Tanenbaum & Wetherall、谢希仁、吴功宜、徐敬东等出版的《计算机网络》教材
 - (2) 思科网络技术学院教程
 - (3) H3C网络学院系列教程
 - (4) 网络上搜到的其他资料
- 在此，对清华大学出版社、思科网络技术学院、H3C网络学院、电子工业出版社、机械出版社以及其它提供本课程引用资料的个人表示衷心的感谢！
- 对于本课程引用的素材，仅用于教学，如有任何问题，请与我们联系！