

计算机网络

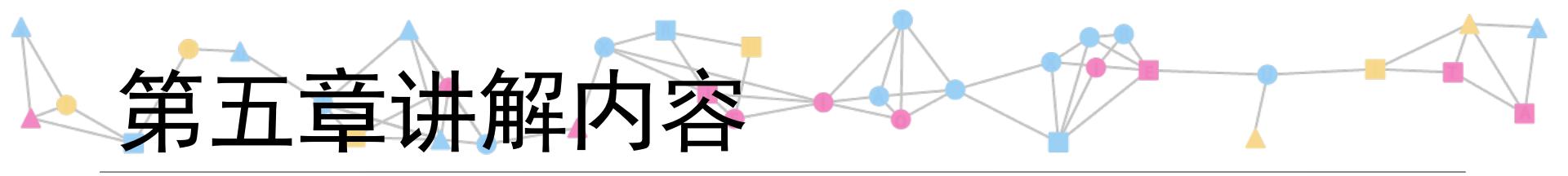
第五章 链路层

谢瑞桃

xie@szu.edu.cn
rtxie.github.io

计算机与软件学院
深圳大学





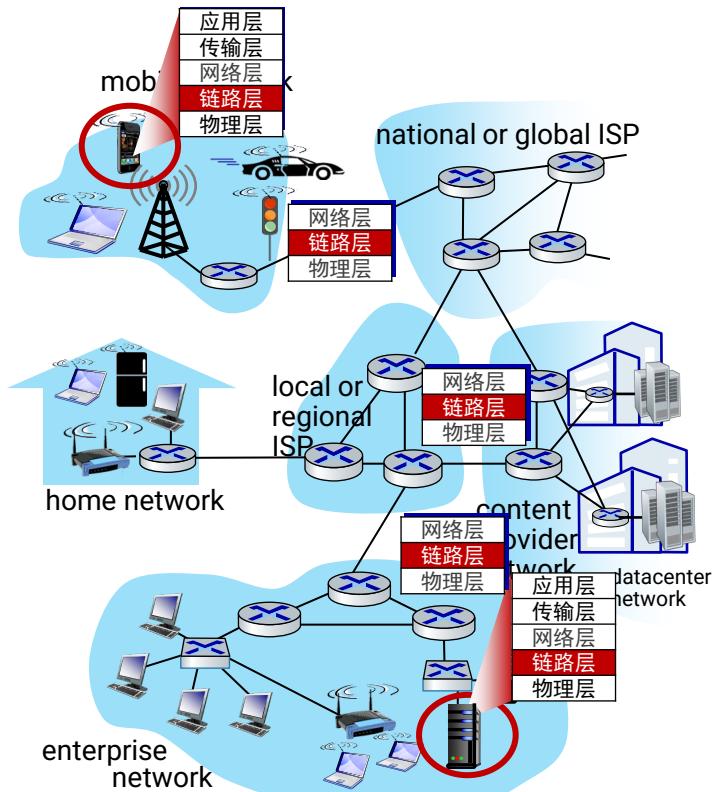
第五章讲解内容

1. 链路层概述/服务/实现
2. 差错检测
 - 奇偶校验、循环冗余校验
3. 多路访问
 - 信道划分、CSMA/CD、二进制指数退避
4. MAC地址与地址解析协议
5. 局域网技术
 - 交换机以太网、VLAN



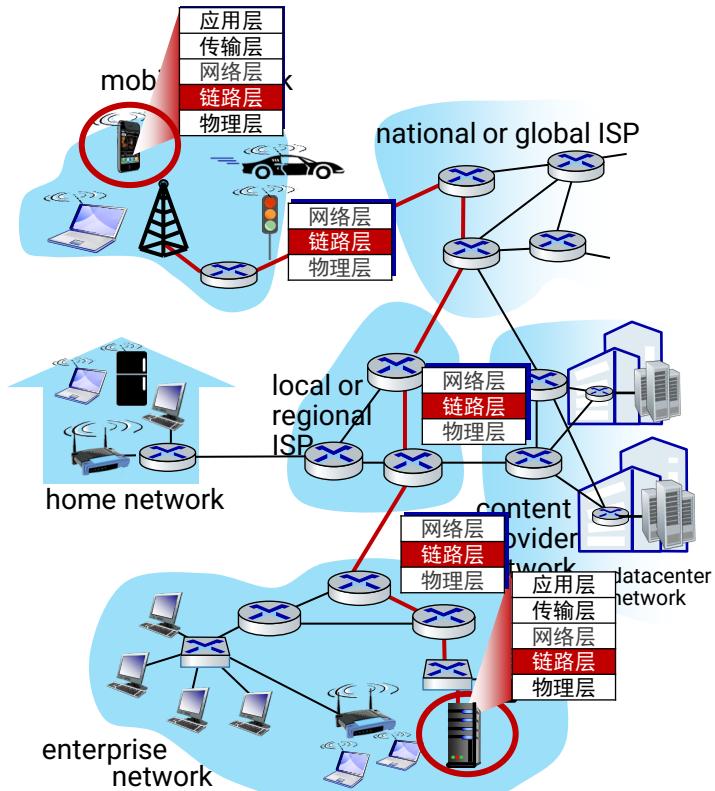
链路层概述

- 节点：主机、路由器、交换机、AP
- 链路：连接相邻节点的通信信道
 - 有线/无线链路
 - 广播/点对点链路
- 所有节点都有链路层协议



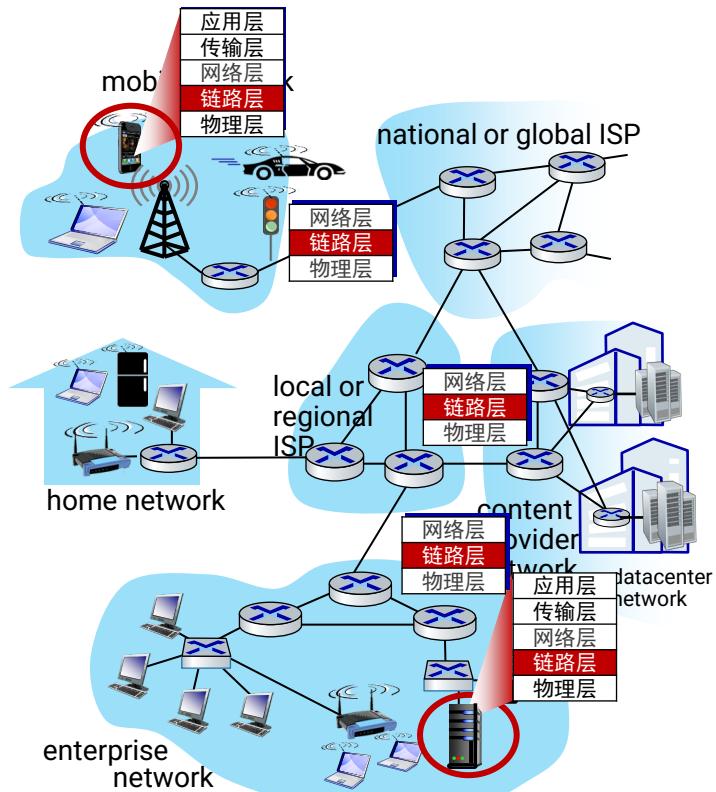
链路层概述

- 从源主机到目的主机，会经过一系列链路
- 不同的链路可能使用不同的链路层协议
 - 以太网协议
 - 点到点协议
 - 4G/5G的链路层协议
 - WiFi的链路层协议



链路层服务

- 服务：通过一条链路，将分组从一个节点移动到相邻节点



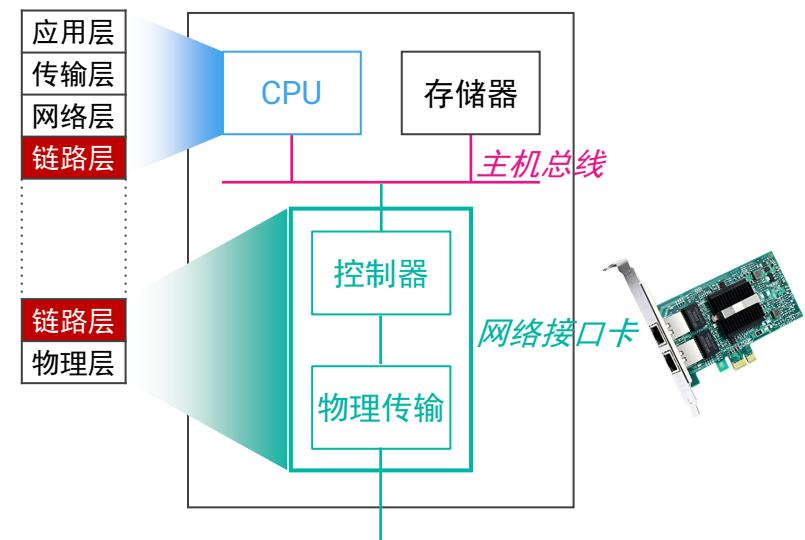
链路层服务

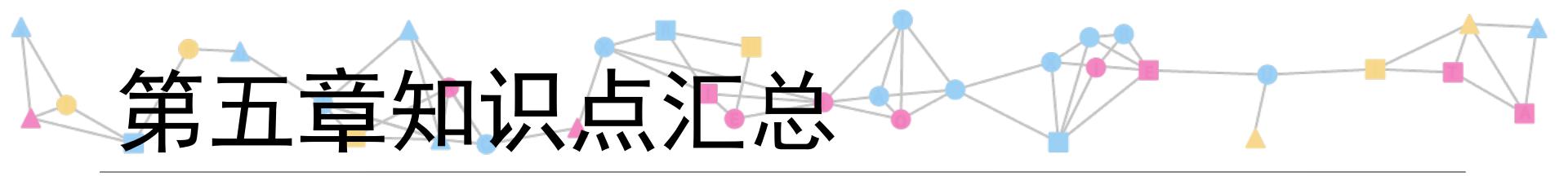
- 成帧：将网络层数据报封装成帧
- 链路接入：媒体访问控制(Medium Access Control MAC)为广播链路解决多路访问的问题
- 可靠交付：与传输层类似，使用确认重传，一般用于无线链路
- 差错检测：比传输层更加复杂的算法，硬件实现
- 差错纠正
- 流量控制



链路层实现

- 路由器和交换机的线路卡中
- 主机的网络适配器(adapter)/网络接口卡(Network Interface Card NIC)
 - 实现链路层和物理层
 - 与主机总线相连





第五章知识点汇总

- 了解链路层服务
- 了解链路层实现



第五章讲解内容

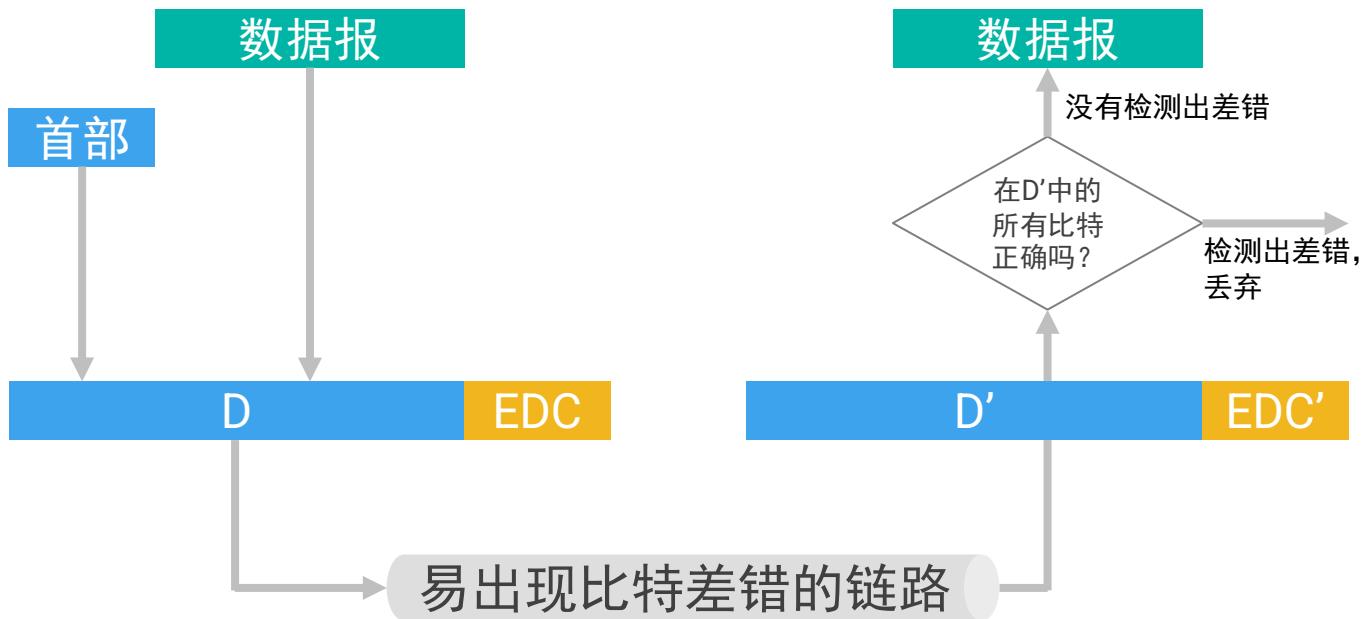
1. 链路层概述/服务/实现
2. 差错检测
 - 奇偶校验、循环冗余校验
3. 多路访问
 - 信道划分、CSMA/CD、二进制指数退避
4. MAC地址与地址解析协议
5. 局域网技术
 - 交换机以太网、VLAN



差错检测

- $D = \text{网络层数据报和链路层首部}$
- $\text{EDC} = \text{差错检测和纠正比特 Error Detection and Correction bits}$

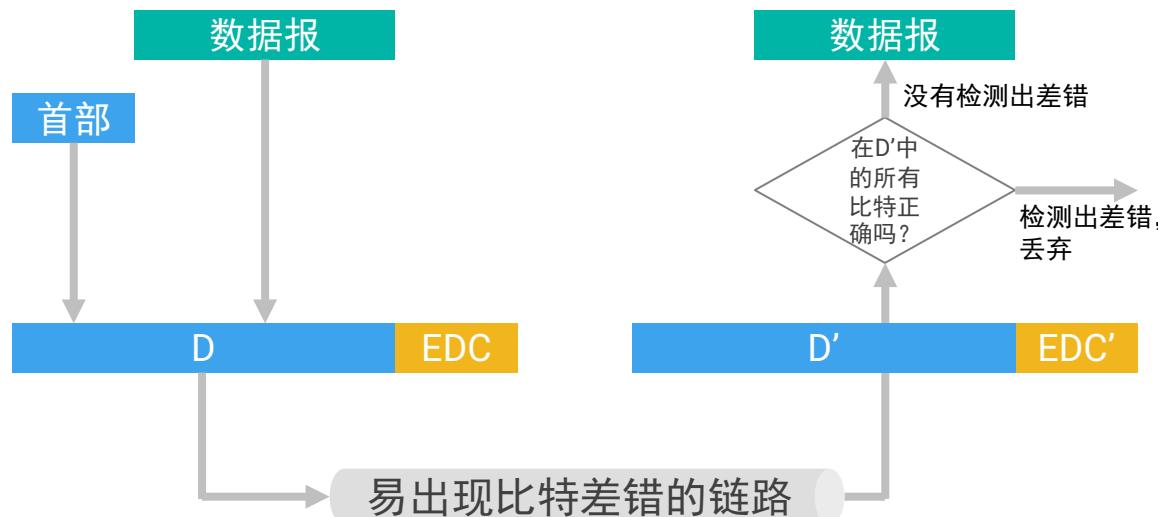
没有检测出差错，不代表没有差错



差错检测

- 差错检测算法**不是**100%可靠!
- 算法的设计目标：降低未检测出比特差错的概率
- 算法越复杂，需要越多的EDC，上述概率一般会越低

没有检测出差错，不代表没有差错



奇偶校验

- 奇校验：添加一个EDC位，使得D+EDC中总共出现奇数个1
- 偶校验：添加一个EDC位，使得D+EDC中总共出现偶数个1
 - 检测时如果出现了奇数个1，说明出现了奇数个比特差错
 - 如果出现偶数个1，说明没有出错吗？



奇偶校验

- 奇校验：添加一个EDC位，使得D+EDC中总共出现奇数个1
- 偶校验：添加一个EDC位，使得D+EDC中总共出现偶数个1
 - 检测时如果出现了奇数个1，说明发生了奇数个比特差错
 - 如果出现偶数个1，可能没错，**也可能发生了偶数个比特差错（检测不出）**
- 在连续差错的情况下，使用单比特奇偶校验时，未检测出差错的概率是50%



循环冗余校验

- Cyclic Redundancy Check CRC /多项式编码
- 给定D
- 给定r， 和一个 $r+1$ 位的生成多项式G
- 求一个r位的校验码R， 使得加上校验位以后的数据 $D \times 2^r \oplus R$ 能被G整除



- 在接收方，如果收到的数据不能被G整除，即检测出了差错；否则，没有检测出差错



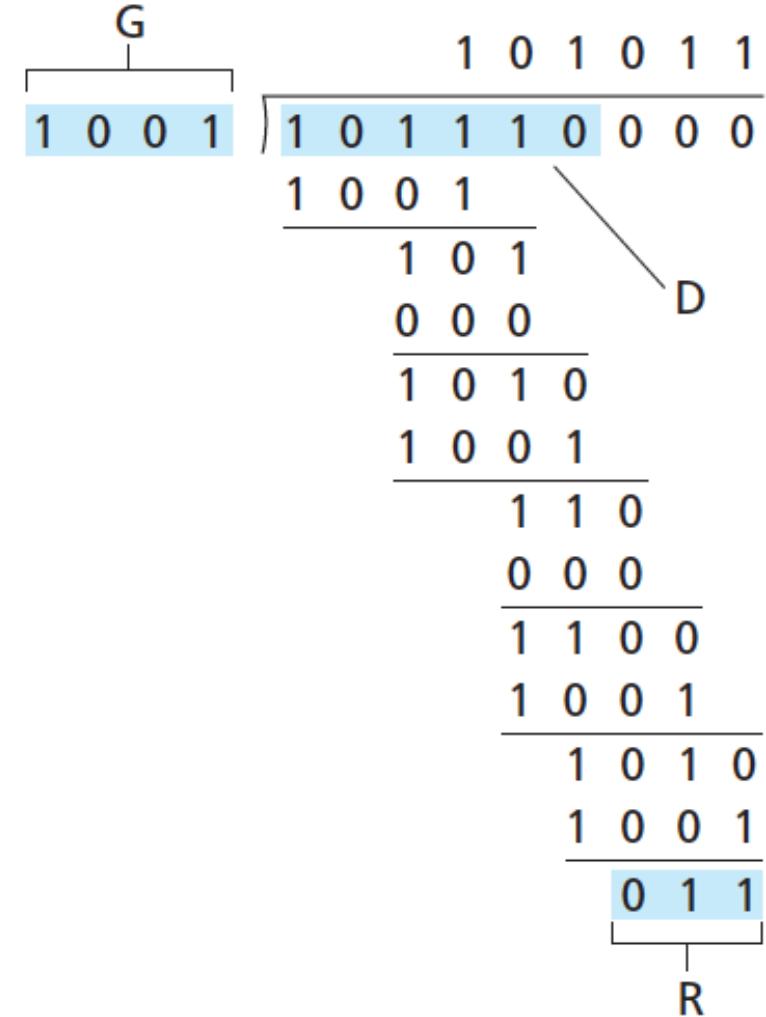
循环冗余校验

- 如何获得R呢？
- $D \cdot 2^r \oplus R = nG$
- $D \cdot 2^r \oplus R \oplus R = nG \oplus R$
- $D \cdot 2^r = nG \oplus R$
- $R = \text{remainder} \frac{D \cdot 2^r}{G}$



循环冗余校验

- $D = 101110$
- $r = 3$
- $G = 1001$
- $R = \text{remainder } \frac{D \cdot 2^r}{G}$



循环冗余校验

- 以太网、802.11 WiFi使用 $r=32$ 的CRC
- 每个CRC标准能检测出所有连续的 r 比特或者更少比特的差错
- 长度大于 $r+1$ 比特的突发差错以概率 $1-0.5^r$ 被检测出来
- 非连续错误，不一定能检测出来



循环冗余校验

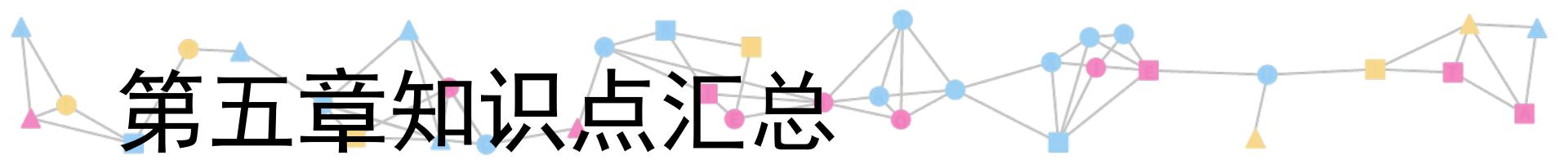
■ **|0111001|**

D: 数据比特

R: CRC校验码

- 连续两比特错误 **|1011001|**
除以G余011，检测出错误
- 连续四比特错误 **|1000001|**
除以G余101，检测出错误
- 连续六比特错误 **|1000111|**
被G整除，没有检测出错误
- 非连续错误 **|01111010|**
被G整除，没有检测出错误

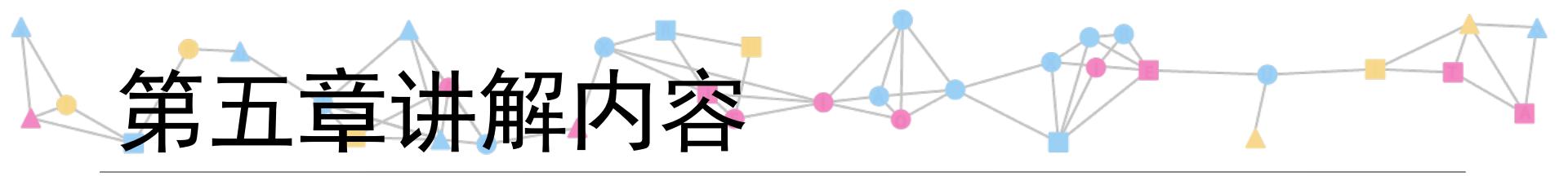




第五章知识点汇总

- 理解差错检测的原理
- 理解差错检测存在检测不出差错的情况
- 掌握奇偶校验码的计算方法
- 掌握CRC校验码的计算方法



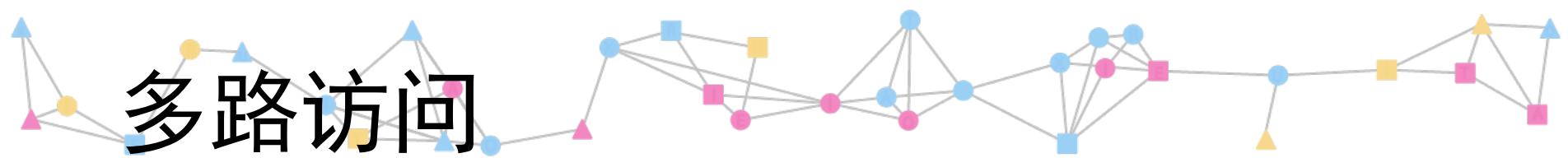


第五章讲解内容

1. 链路层概述/服务/实现
2. 差错检测
 - 奇偶校验、循环冗余校验
3. 多路访问
 - 信道划分、CSMA/CD、二进制指数退避
4. MAC地址与地址解析协议
5. 局域网技术
 - 交换机以太网、VLAN



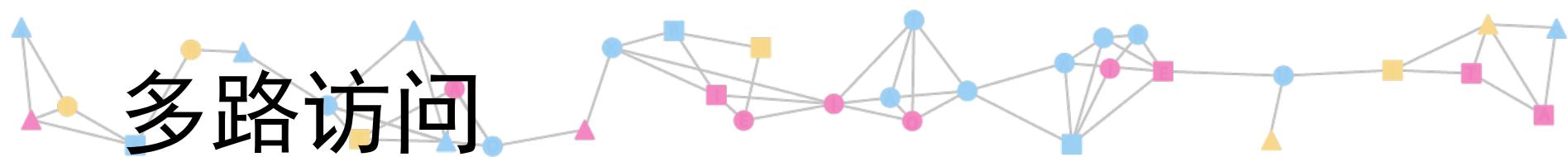
多路访问



- 点对点链路
 - 例如以太网交换机和主机之间的链路
- 广播链路
 - 多个节点共享信道
 - 最早的以太网
 - 卫星网
 - 同轴电缆接入网
 - WiFi



多路访问



- 如果多个节点在共享信道上同时传输帧，所有节点都会收到这些帧
- 多个帧在任意接收方处碰撞了，帧的信号纠缠在一起，无法解析，所有帧都无法正确传输
- 广播信道被浪费了



多路访问

- 问题：如何协调多个发送节点和接收节点对一个共享广播信道的访问
- 方法：多路访问协议规范节点在共享广播信道上的传输行为



多路访问

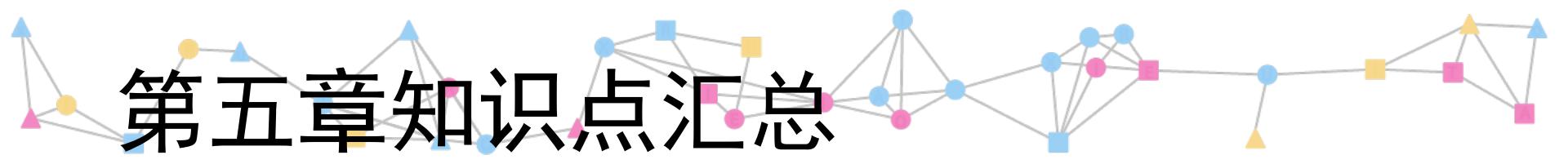
- 一个理想的多路访问协议（假设信道速率为 R bps）
 - 当只有一个节点发送数据时，具有 R bps 吞吐量
 - 当有 M 个节点发送数据时，每个节点的平均吞吐量为 R/M bps
 - 协议是分布式的
 - 协议是简单的



多路访问

- 信道划分协议
 - 将信道划分成小片
 - 将信道片分给节点独享
- 随机接入协议
 - 不划分信道，允许碰撞
 - 能从碰撞中恢复
- 轮流协议
 - 大家商量着轮流地单独使用信道





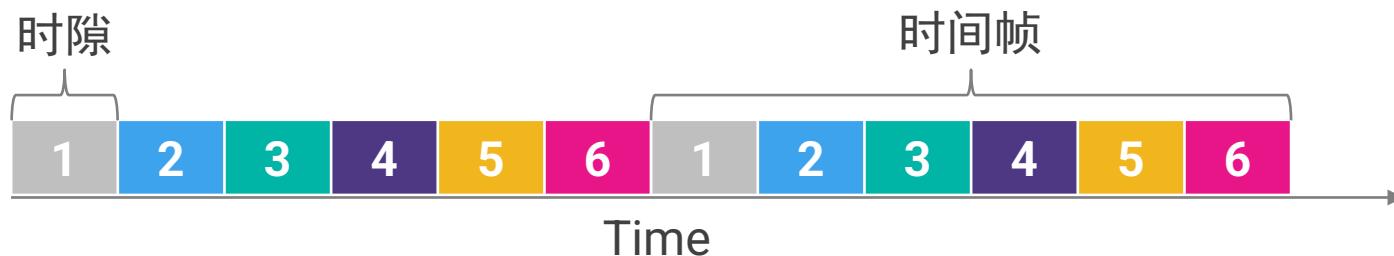
第五章知识点汇总

- 理解多路访问要解决的问题
- 了解多路访问的三类方法的思想



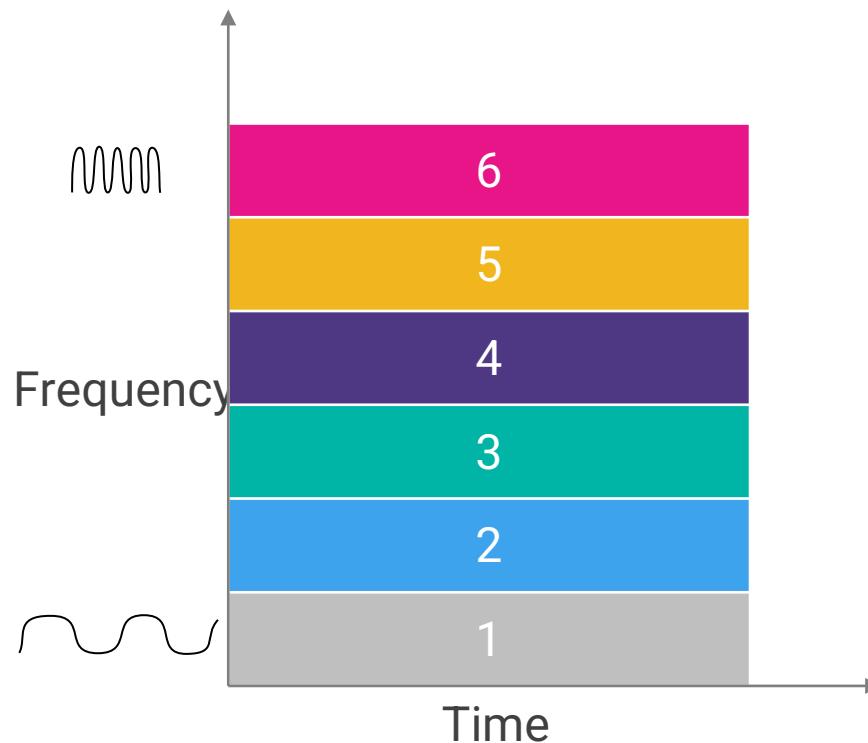
信道划分协议

- TDMA (Time Division Multiple Access)
 - 节点轮换着使用信道，每次使用的时间很短
 - 假如有N个节点共享信道，就将时间帧划分成N个时隙，分给N个节点
 - 每个节点只在分配给它的时隙内，独享信道



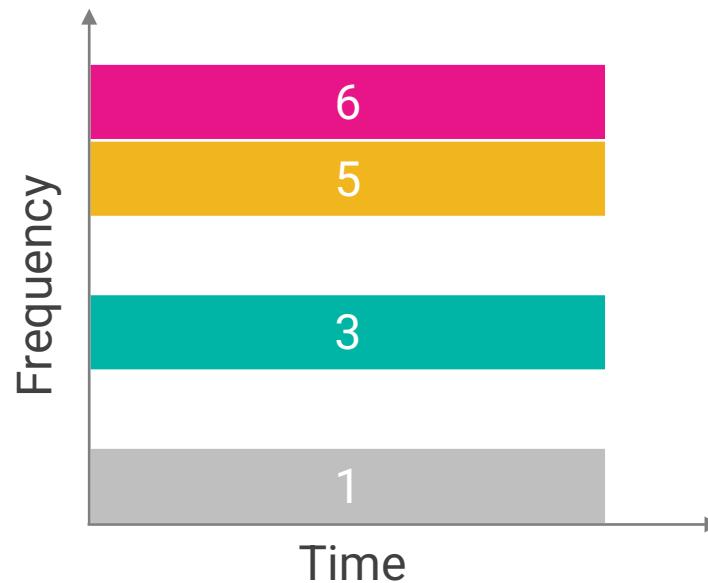
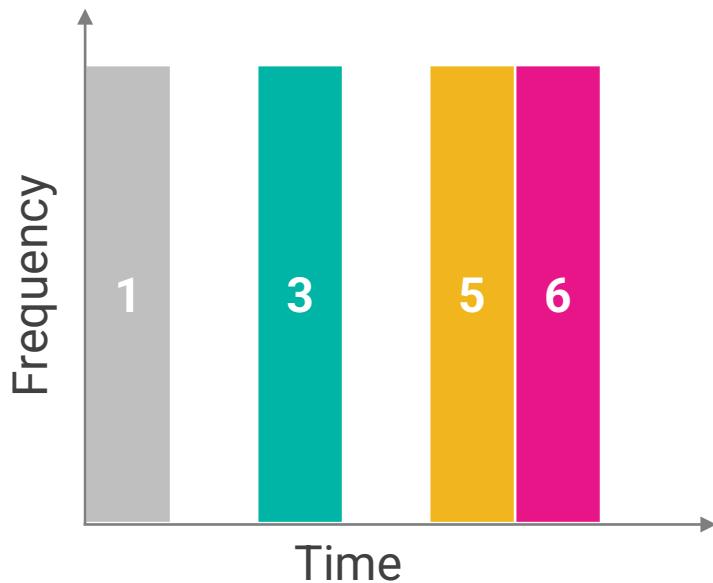
信道划分协议

- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
 - 将R bps信道划分成不同的频段，每个信道的带宽为R/N
 - 将频段分配给N个节点



信道划分协议

- TDMA 和 FDMA
 - 优点: 不会发生碰撞
 - 缺点: 分配给某个节点的时隙/频段, 别的节点不可以使用, 节点的传输速率被限制在 R/N bps



信道划分协议

- CDMA (Code Division Multiple Access)
 - 为每个节点分配一种不同的编码，编码之间相互正交
 - 类似于每个人用一种不同的语言
 - 举例：

$$A = (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$$



$$B = (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$$



$$C = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$$



$$D = (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)$$



信道划分协议

- CDMA (Code Division Multiple Access)
 - 为每个节点分配一种不同的编码，编码之间相互正交
 - 类似于每个人用一种不同的语言
 - 举例：

$$A = (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$$



$$B = (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$$



$$C = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$$

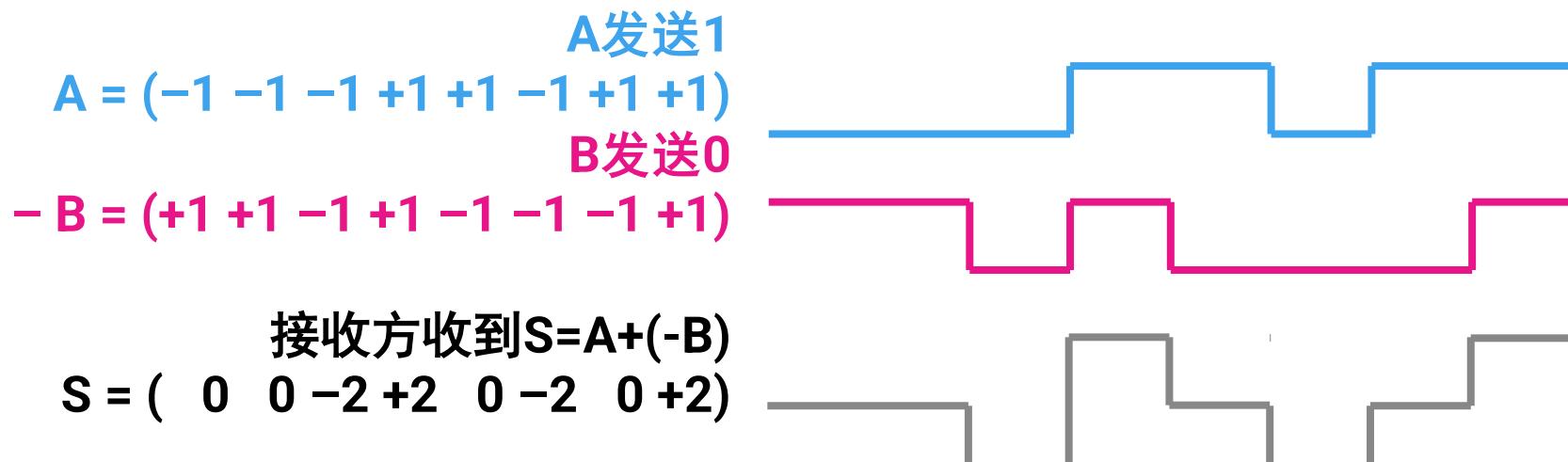


$$D: \begin{aligned} A \cdot B &= \frac{1}{8} \sum A_i B_i = \frac{1}{8} (1 + 1 - 1 - 1 + 1 - 1 - 1 + 1) = 0 \\ A \cdot A &= \frac{1}{8} \sum A_i A_i = \frac{1}{8} \sum (\pm 1)^2 = 1 \end{aligned}$$



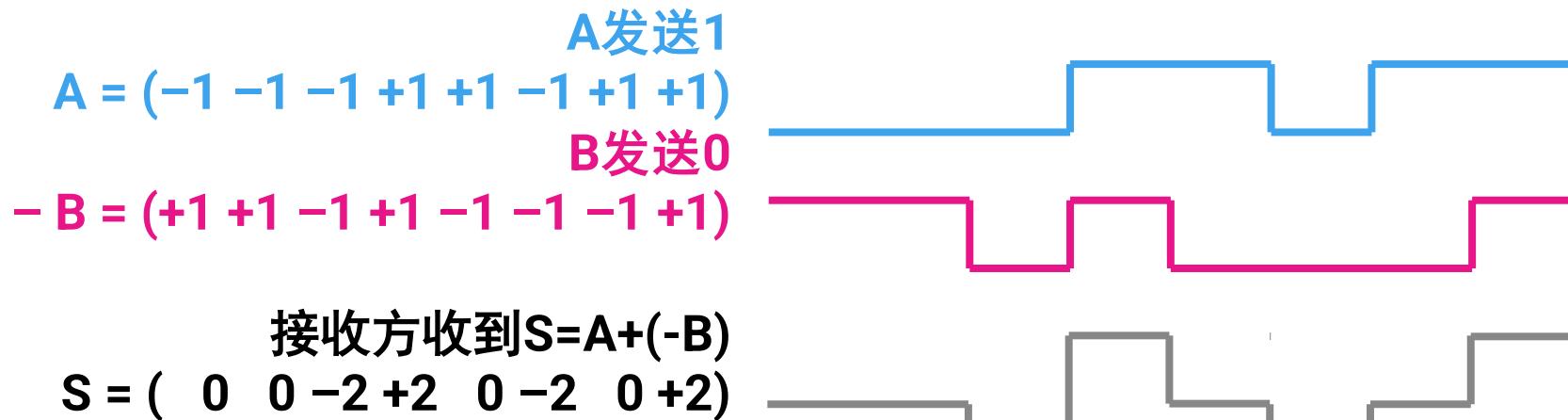
信道划分协议

- CDMA (Code Division Multiple Access)
 - 为每个节点分配一种不同的编码，编码之间相互正交
 - 类似于每个人用一种不同的语言
 - 举例：



信道划分协议

- CDMA (Code Division Multiple Access)
 - 为每个节点分配一种不同的编码，编码之间相互正交
 - 类似于每个人用一种不同的语言
 - 举例：



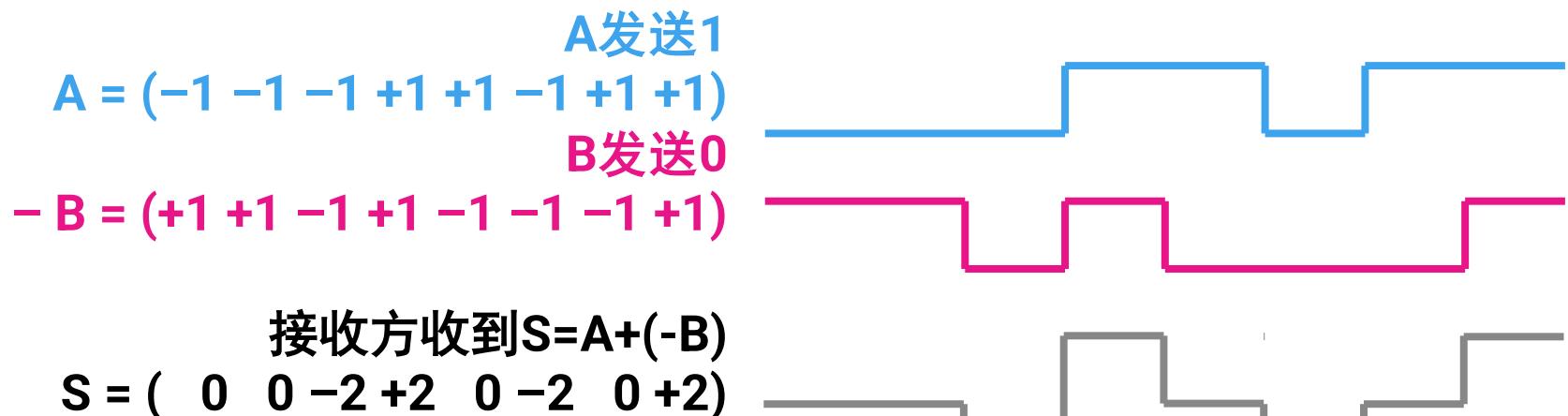
$$S \cdot A = \frac{1}{8} \sum S_i A_i = \frac{1}{8} (0, 0, -2, +2, 0, -2, 0, +2) \cdot (-1, -1, -1, +1, +1, -1, +1, +1) = 1$$

解码得出A发送了数据1



信道划分协议

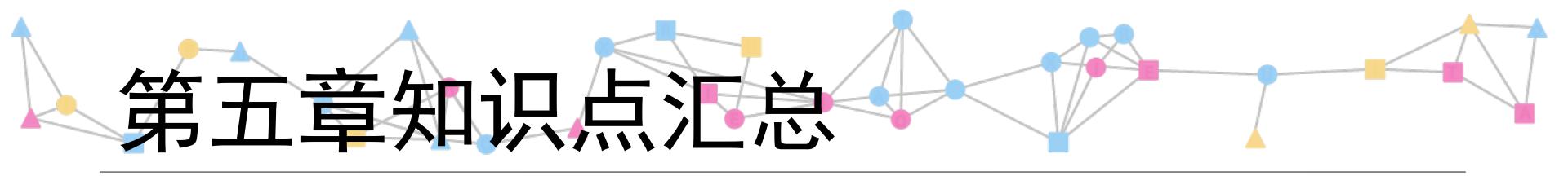
- CDMA (Code Division Multiple Access)
 - 为每个节点分配一种不同的编码，编码之间相互正交
 - 类似于每个人用一种不同的语言
 - 举例：



$$S \cdot B = \frac{1}{8} \sum S_i B_i = \frac{1}{8} (0, 0, -2, +2, 0, -2, 0, +2) \cdot (-1, -1, +1, -1, +1, +1, +1, -1) = -1$$

解码得出B发送了数据0





第五章知识点汇总

- 了解TDMA和FDMA的原理
- 了解CDMA的原理



随机接入协议

- 不划分信道，也不商量，谁要用谁就用
- 如果有多个节点发送帧，就会导致碰撞
- 随机接入协议
 - 如何检测碰撞
 - 如何从碰撞中恢复
 - 例如：ALOHA, CSMA, CSMA/CD





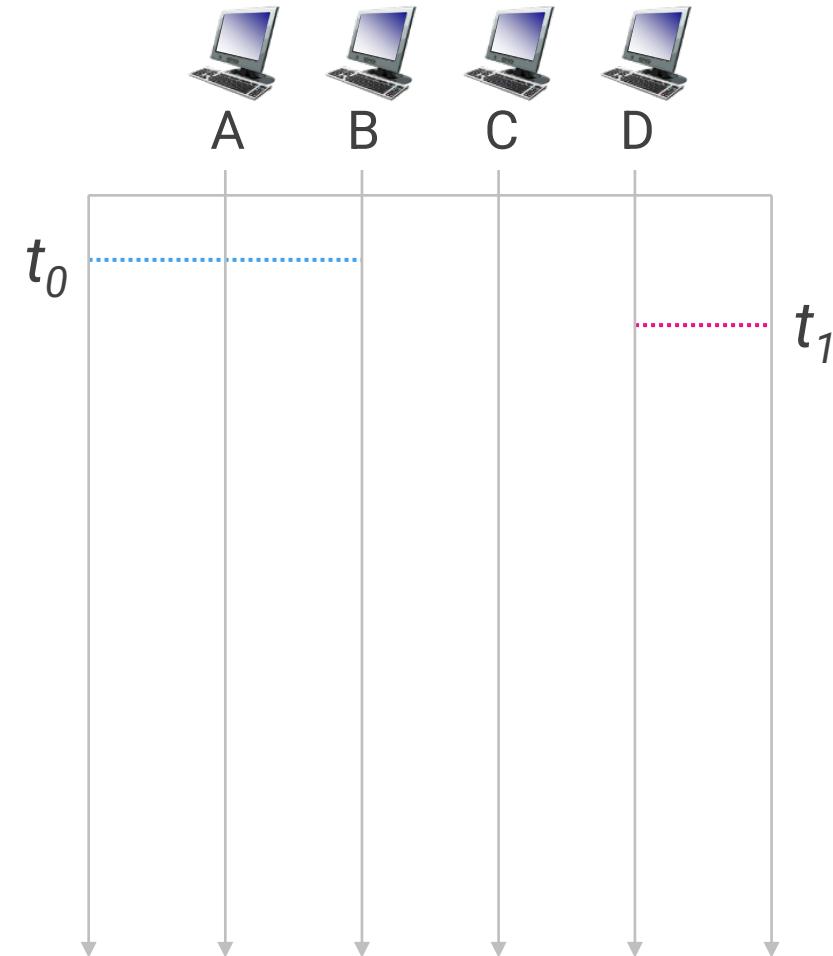
载波监听多路访问CSMA

- Carrier Sensing Multiple Access
- 节点在发送帧之前，先监听信道是否空闲
 - 如果空闲，立即发送
 - 否则，等信道空闲再发送



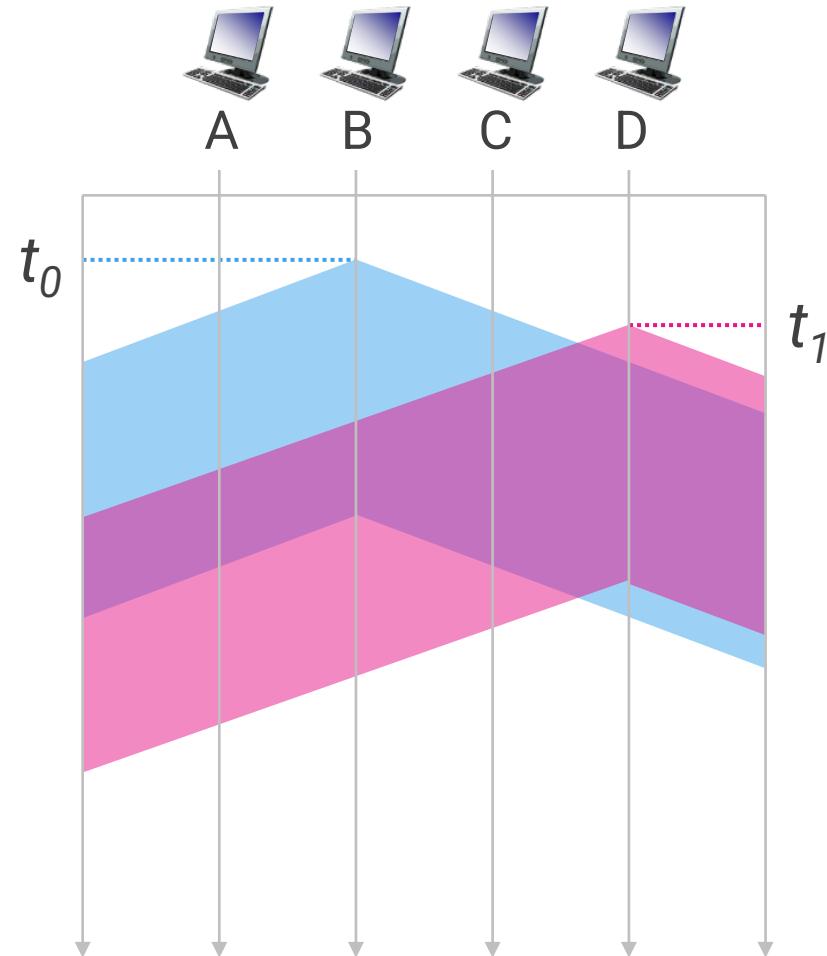
载波监听多路访问CSMA

- 为什么会发生碰撞呢？
- 因为信号即使以光速传播也需要时间，即传播时间



载波监听多路访问CSMA

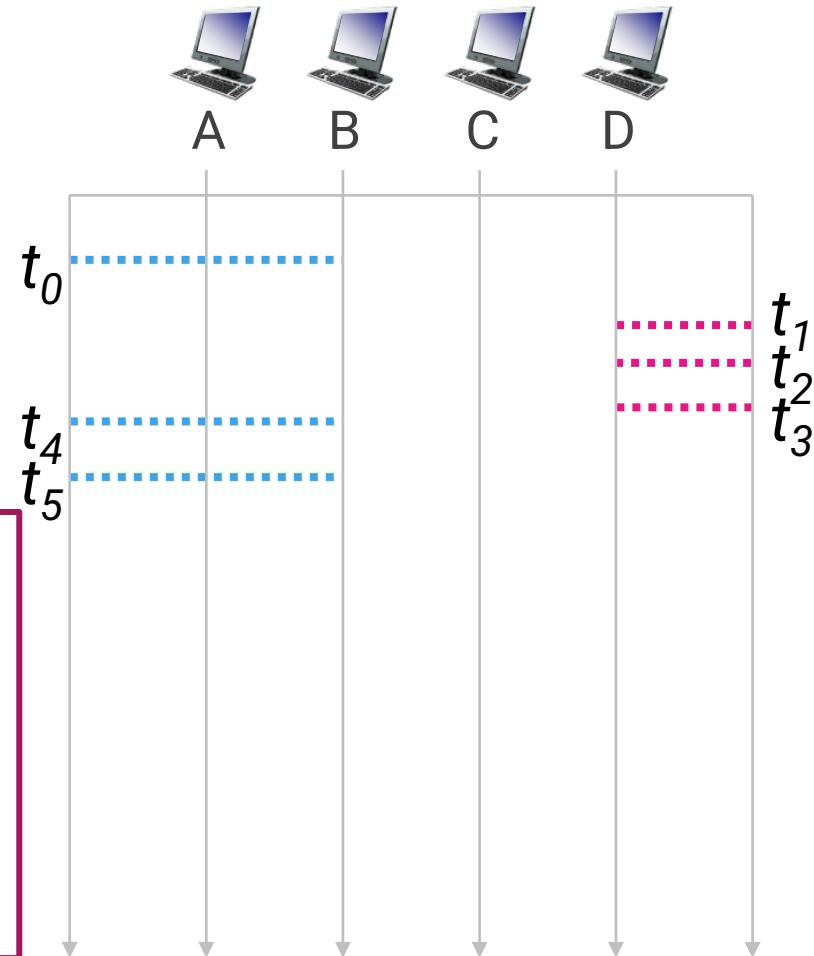
- 为什么会发生碰撞呢？
- 因为信号即使以光速传播也需要时间，即传播时间
- 碰撞：整个帧的传输时间都浪费了



碰撞检测Collision Detection

- 检测到碰撞时，停止帧传输，减小信道的浪费
- 碰撞检测
 - 测量信号强度发现

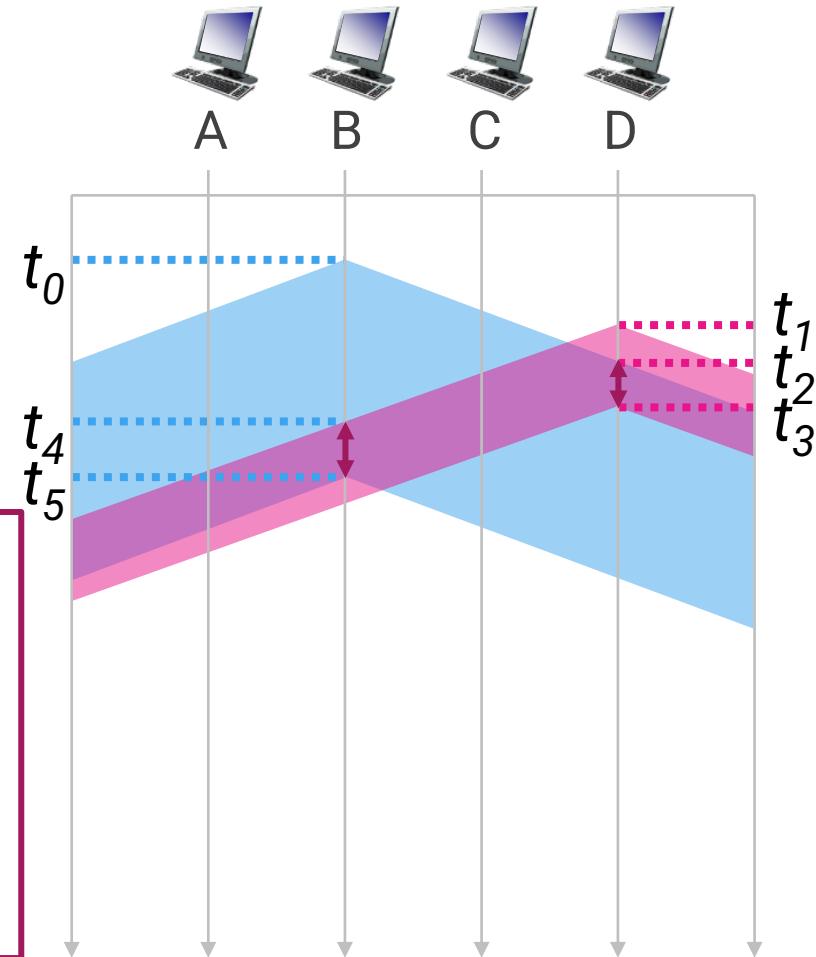
t_2 : D处发生碰撞
 t_3 : D停止发送
 t_4 : B处发生碰撞
 t_5 : B停止发送



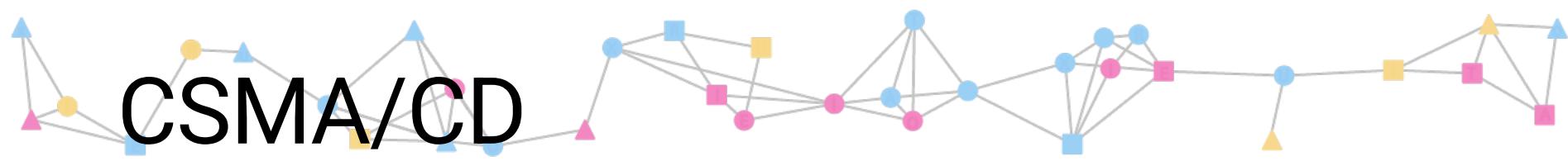
碰撞检测Collision Detection

- 检测到碰撞时，停止帧传输，减小信道的浪费
- 碰撞检测
 - 测量信号强度发现

t_2 : D处发生碰撞
 t_3 : D停止发送
 t_4 : B处发生碰撞
 t_5 : B停止发送
↑ : 碰撞检测 / 放弃发送的时间



CSMA/CD



- 碰撞中止传输以后，节点进入**二进制指数退避过程**
- 在该帧经历了一连串 m 次碰撞后，节点随机地从 $\{0,1,2, \dots, 2^m-1\}$ 中选择一个 K 值，节点等待 $K \cdot 512$ 比特时间之后，重新尝试传输
- 设计的原理是：碰撞少，间隔时间短；碰撞多，间隔时间长



CSMA/CD

1. NIC收到来自网络层的数据报，封装成帧
2. 如果NIC检测到信道空闲，则发送帧；否则，等待直到信道空闲，然后发送（载波监听CS）
3. 如果NIC在发送过程中没有检测到冲突，则传输成功；否则，停止传输（冲突检测CD）
4. 中止以后，NIC进入二进制指数退避过程
 - 在该帧经历了一连串 m 次碰撞后，节点随机地从 $\{0,1,2, \dots, 2^m-1\}$ 中选择一个K值，NIC等待 $K \cdot 512$ 比特时间之后，回到步骤2



CSMA/CD 效率

- t_{prop} = 两个节点之间传播时延的最大值
- t_{trans} = 最大长度帧的传输时间

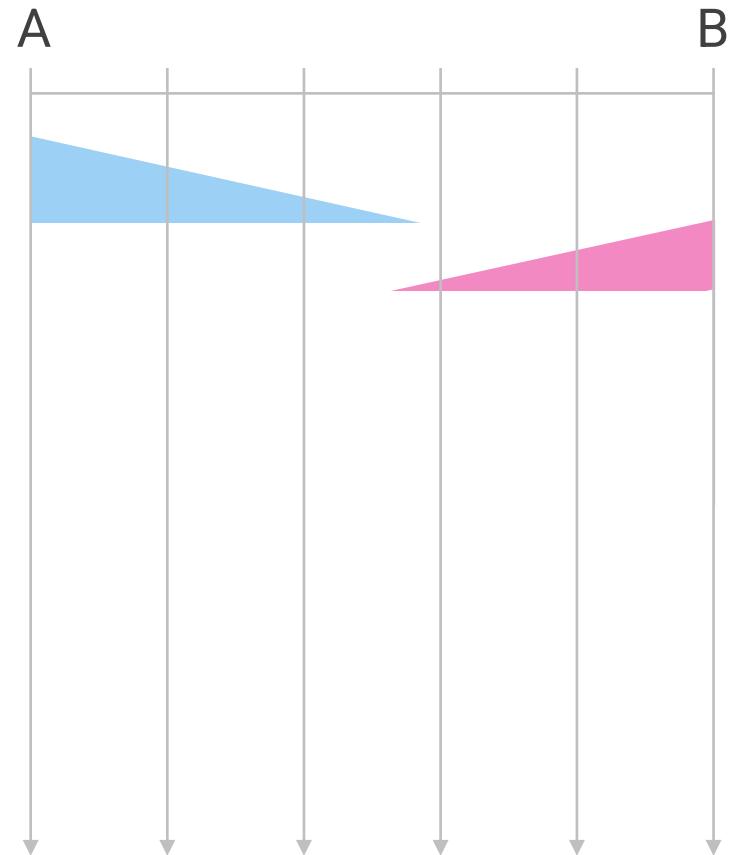
$$efficiency = \frac{1}{1 + 5t_{prop}/t_{trans}}$$

- 效率接近1
 - 当 t_{prop} 接近0
 - 当 t_{trans} 接近无穷



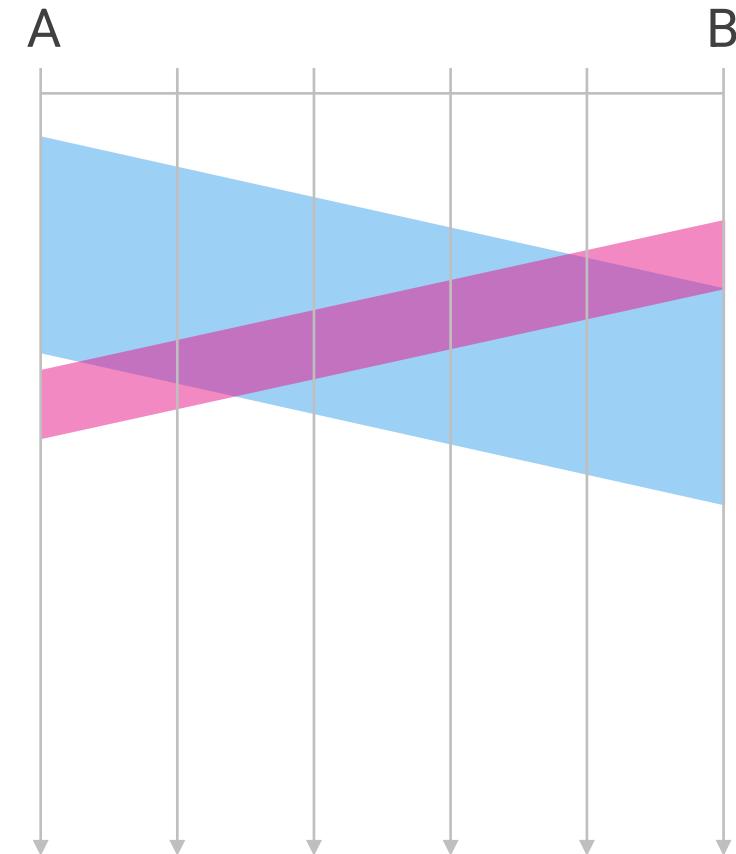
CSMA/CD

- 问题：如果两节点距离太远，会发生冲突但却检测不出的情况



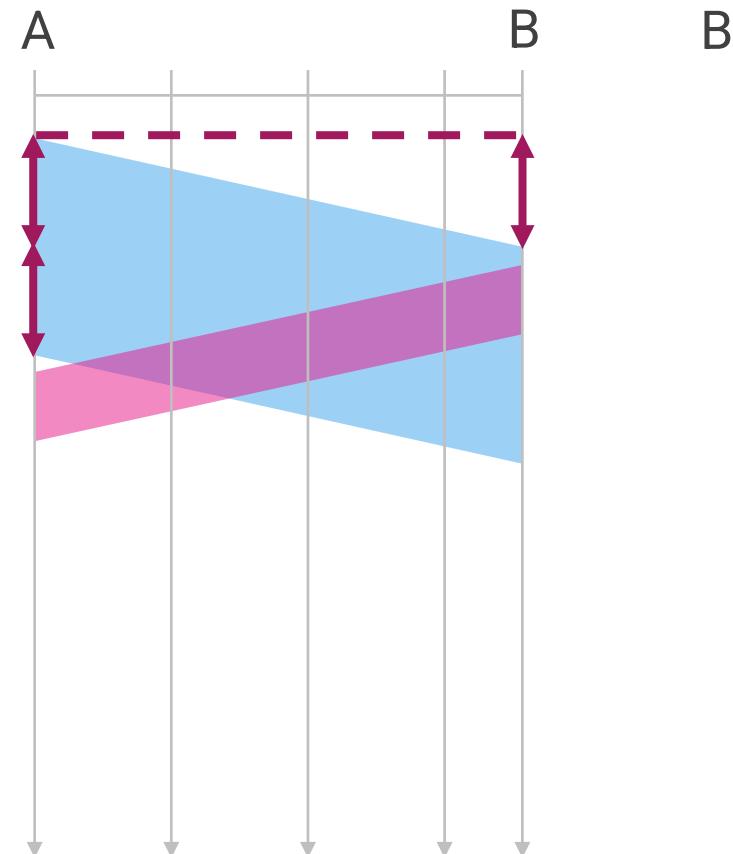
CSMA/CD

- 问题：如果两节点距离太远，会发生冲突但却检测不出的情况
- 因为A收到干扰信号时，已经发送完了



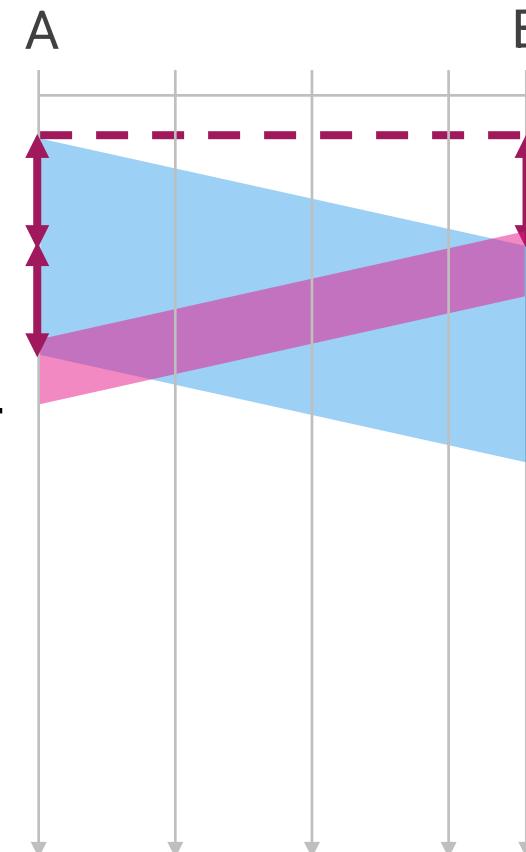
CSMA/CD

- 问题：如果两节点距离太远，会发生冲突但却检测不出的情况
- 解决方法：
- 传播时延 \leq 传输时延 / 2



CSMA/CD

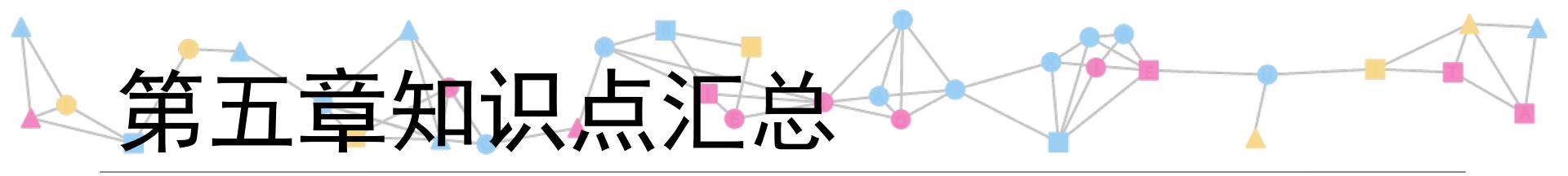
- 问题：如果两节点距离太远，会发生冲突但却检测不出的情况
- 解决方法：
- 传播时延 \leq 传输时延 / 2
- 使得B发送的信号到达A时落在其传输时间内，从而能检测到



冲突域

- **冲突域：**由共享介质或通过中继器连接的网段，其中同时传输的数据相互冲突





第五章知识点汇总

- 理解载波监听多路访问/冲突检测的原理
- 理解二进制指数退避方法的原理
- 理解冲突域的概念



习题

- 【2019年考研36题】假设一个采用CSMA/CD协议的100Mbps局域网，最小帧长是128 B，则在一个冲突域内两个站点之间的单向传播延时最多是
 - A. 2.56 us
 - B. 5.12 us
 - C. 10.24 us
 - D. 20.48 us



多路访问总结

- 信道划分协议
 - 将信道划分成小片，将信道片分给节点独享
 - **TDMA, FDMA**蜂窝通信使用
- 随机接入协议
 - 不划分信道，允许碰撞
 - 能从碰撞中恢复
 - **CSMA/CD** 在最早的以太网中使用
 - **CSMA/Collision Avoidance** 在**802.11**中使用
- 轮流协议
 - 大家商量着轮流地单独使用信道
 - **蓝牙协议**使用



If you shut your door to all errors truth will be shut out.

如果你把所有的错误都关在门外，
真理也要被关在门外了。

——Tagore