

计算机网络

第五章 链路层

谢瑞桃

xie@szu.edu.cn

[rtxie.github.io](https://github.com/rtxie)

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

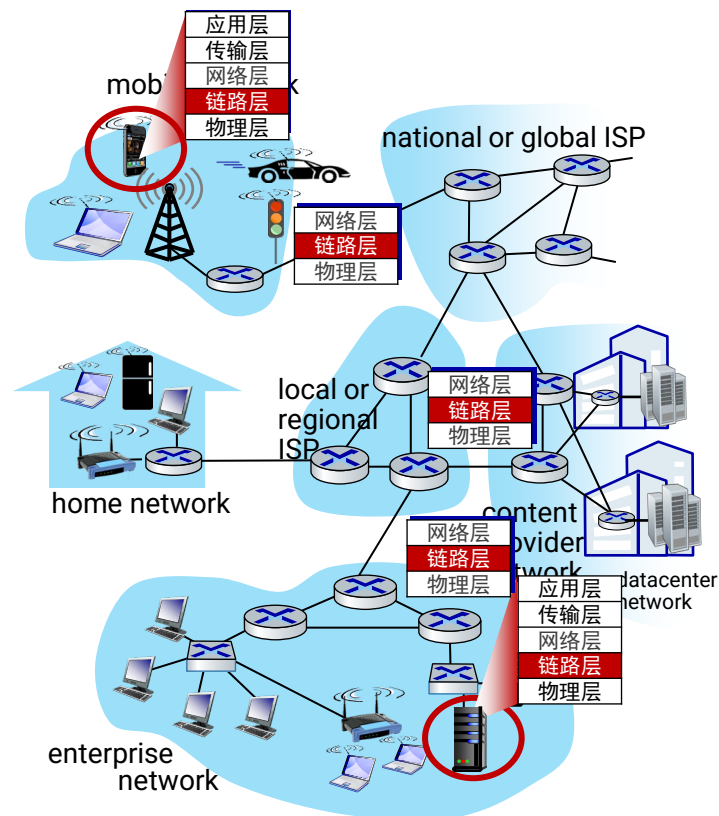
4. MAC地址与地址解析协议

5. 局域网技术

- 交换机以太网、VLAN

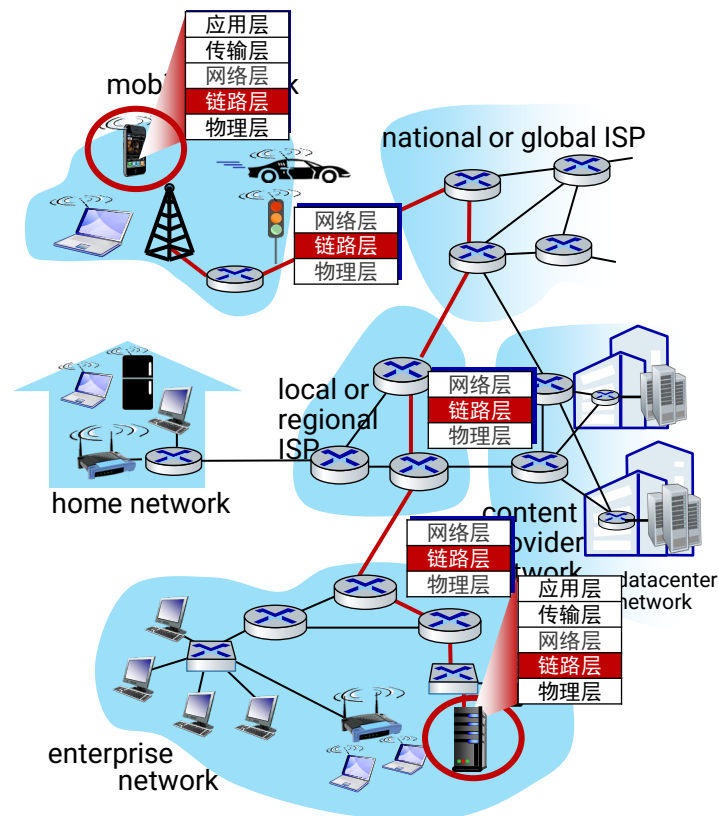
链路层概述

- 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



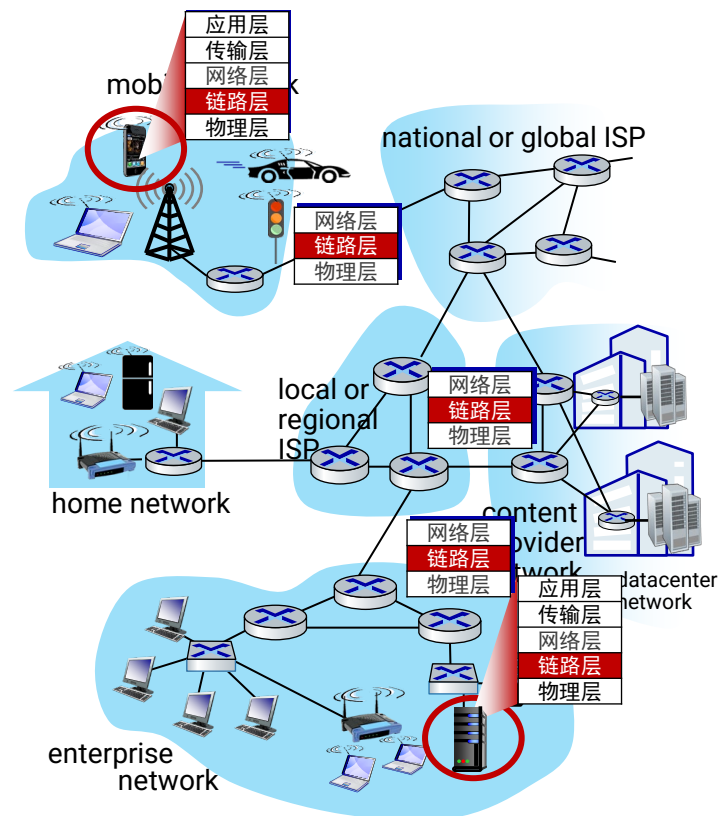
链路层概述

- 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



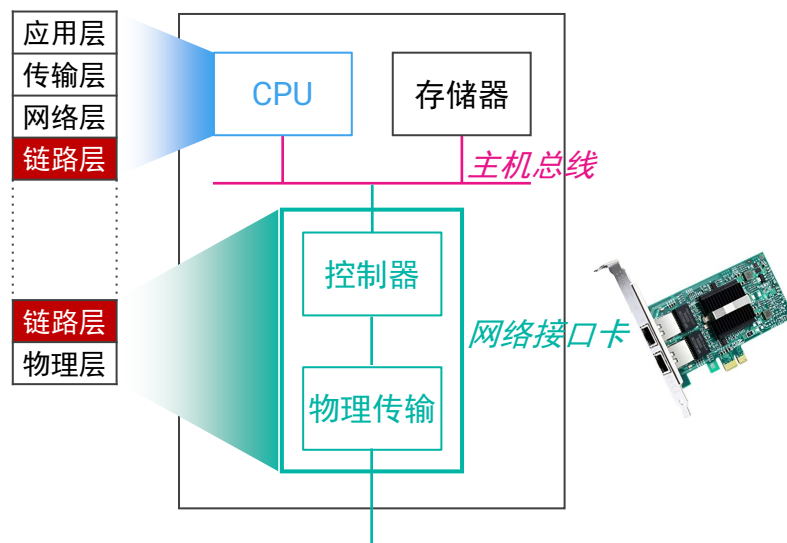


链路层服务

- 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

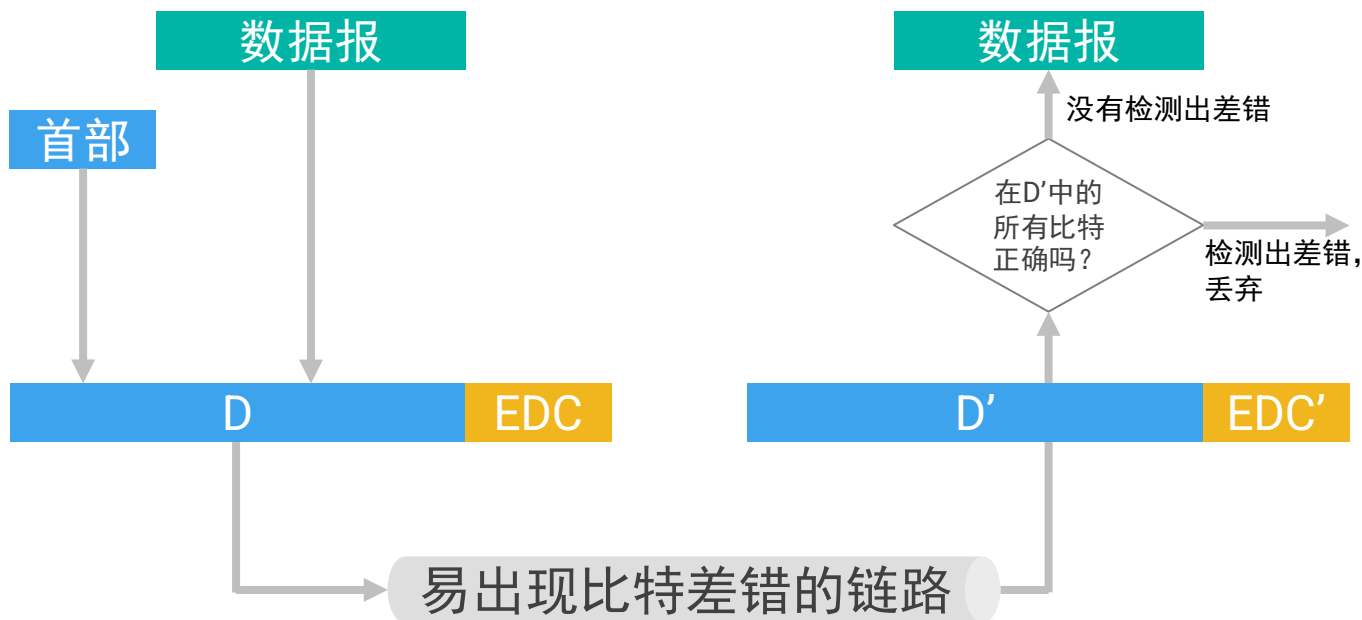
5. 局域网技术

- 交换机以太网、VLAN

差错检测

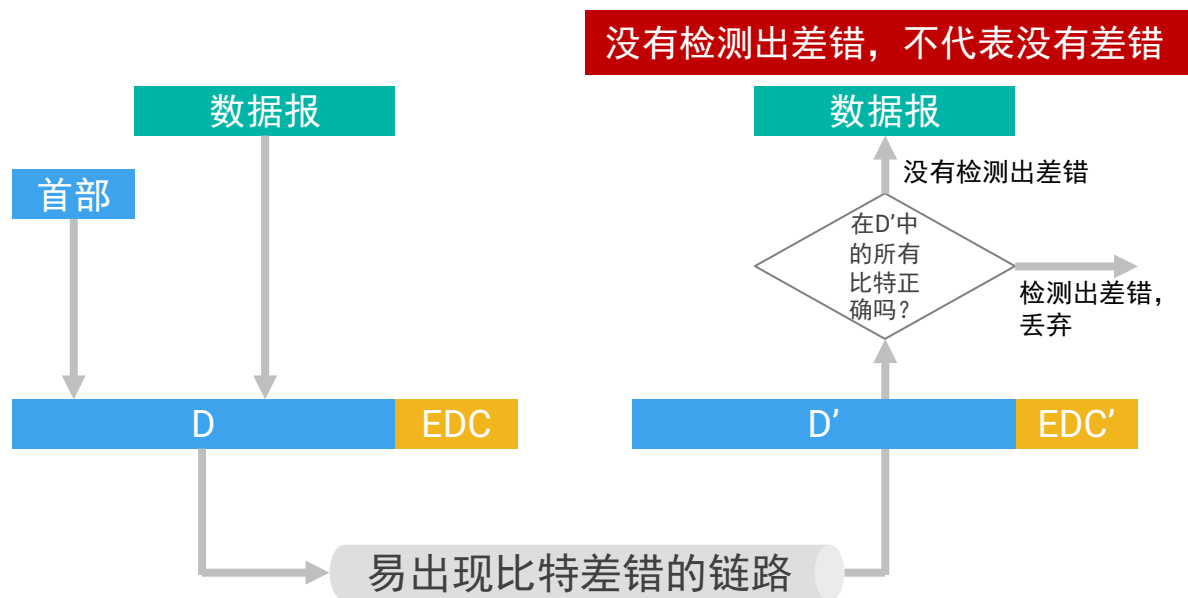
- D = 网络层数据报和链路层首部
- EDC = 差错检测和纠正比特Error Detection and Correction bits

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





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 $D * 2^r \oplus R$ 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?
- $D \cdot 2^r \oplus R = nG$
- $D \cdot 2^r \oplus R \oplus R = nG \oplus R$
- $D \cdot 2^r = nG \oplus R$
- $R = \text{remainder} \frac{D \cdot 2^r}{G}$

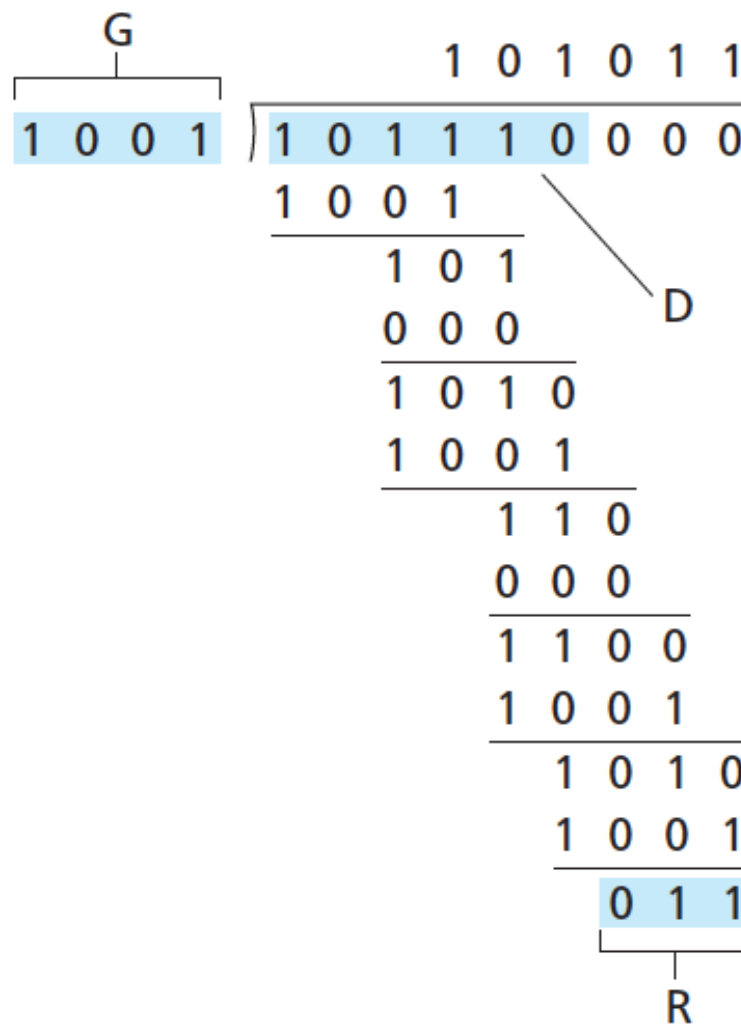
循环冗余校验

- $D = 101110$

- $r = 3$

- $G = 1001$

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





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

d位

r位

■ 101110011

D: 数据比特

R: CRC校验码

■ 连续两比特错误 110110011

除以G余011, 检测出错误

■ 连续四比特错误 110000011

除以G余101, 检测出错误

■ 连续六比特错误 110001111

被G整除, 没有检测出错误

■ 非连续错误 101111010

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

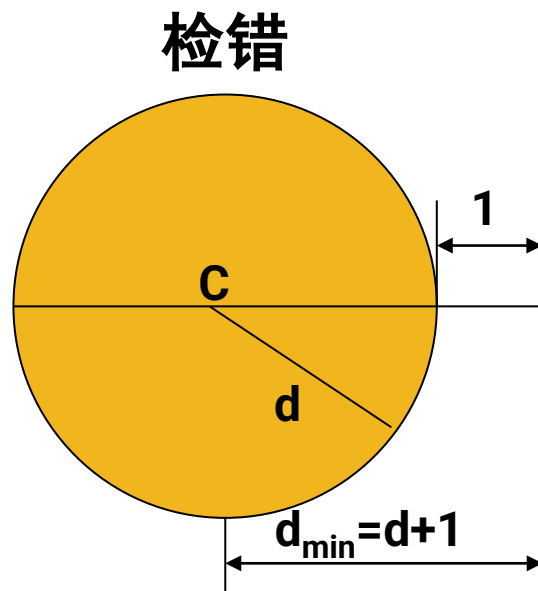


海明距离

- 两个码字不同的位的数目称为海明距离 (Hamming Distance)
- 例如, 10001001 与 10110001 它们的海明距离为 3

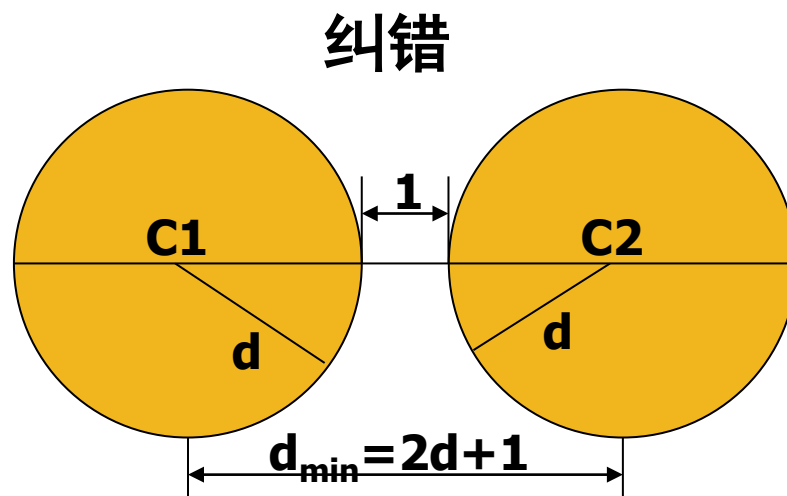
海明距离

- 一种编码的检错和纠错能力取决于编码后码字的海明距离的大小
- 为了检测出 d 位的错，需要使用距离为 $d+1$ 的编码
- 例如：数据后加奇偶校验位，编码后的海明距离为2，能检测1位错



海明距离

- 一种编码的检错和纠错能力取决于编码后码字的海明距离的大小
- 为了纠正 d 位的错，必须用距离为 $2d+1$ 的编码
- 例如有4个有效码字：
0000000000,
0000011111,
1111100000,
1111111111,
- 海明距离为5，能纠正2位错





第五章知识点汇总

- 理解海明距离对检错、纠错能力的关系



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



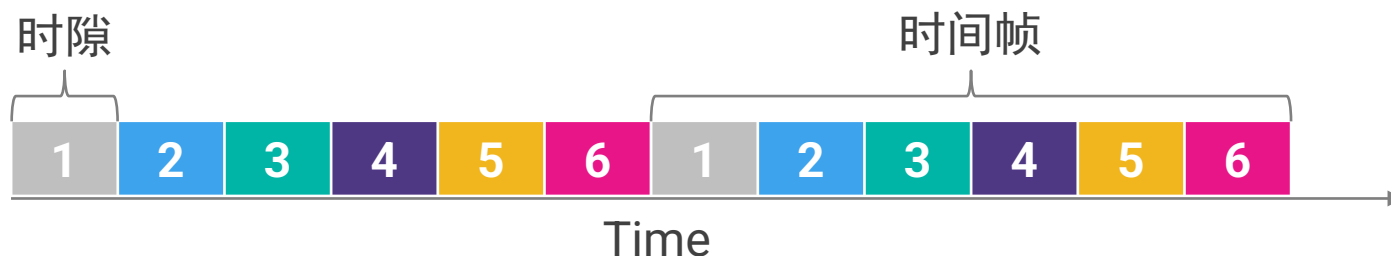
第五章知识点汇总

- 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



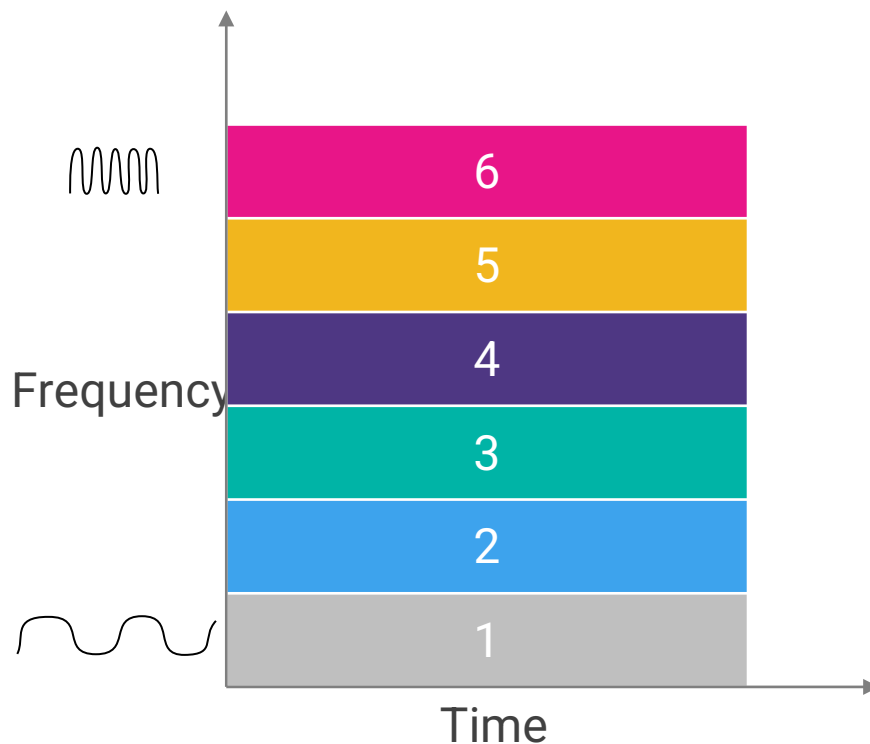
信道划分协议

- 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

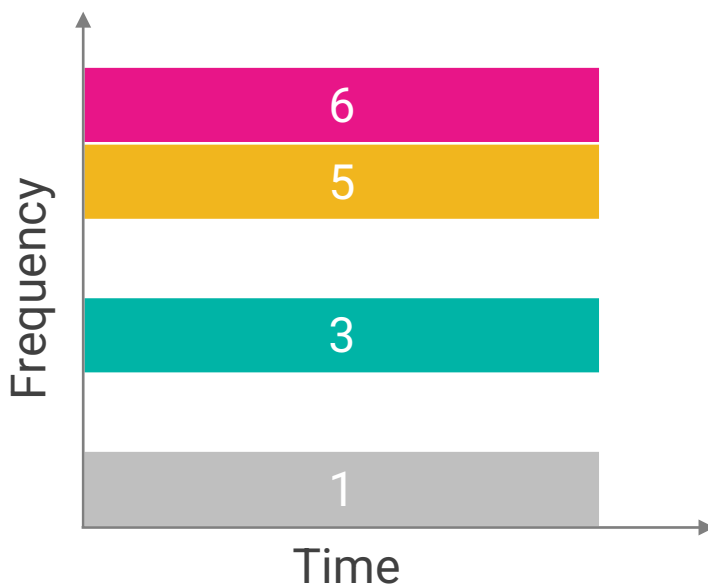
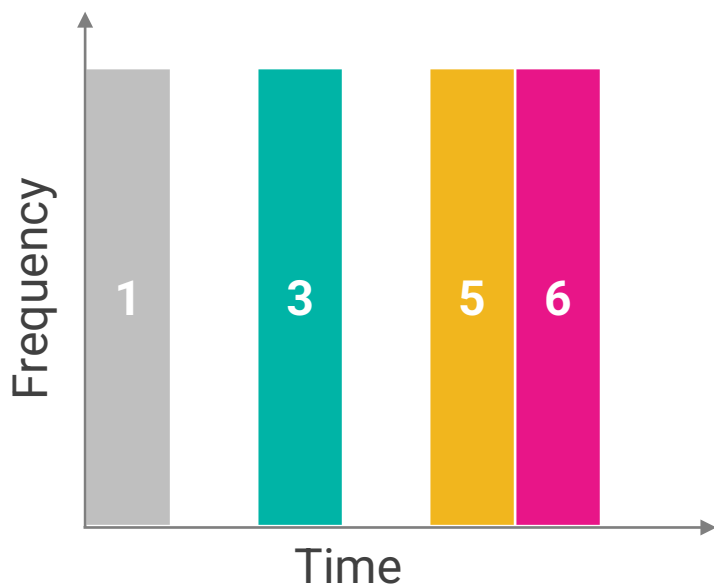
- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
 - 将 R bps信道划分成不同的频段，每个信道的带宽为 R/N
 - 将频段分配给 N 个节点



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)

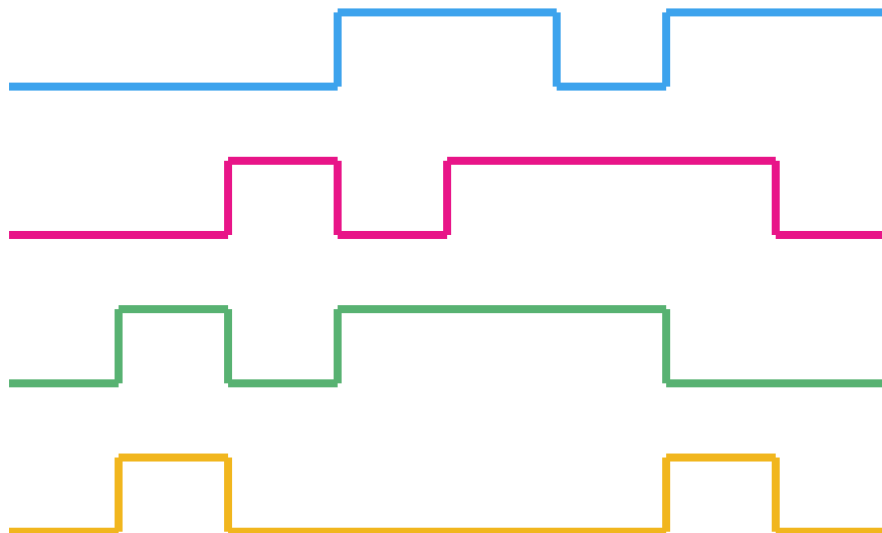
- 为每个节点分配一种不同的**编码**，编码之间**相互正交**
- 类似于每个人用一种不同的语言
- 举例：

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

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

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

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



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 :

$$A \cdot B = \frac{1}{8} \sum A_i B_i = \frac{1}{8} (1 + 1 - 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1) = 0$$

$$A \cdot A = \frac{1}{8} \sum A_i A_i = \frac{1}{8} \sum (\pm 1)^2 = 1$$

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发送1

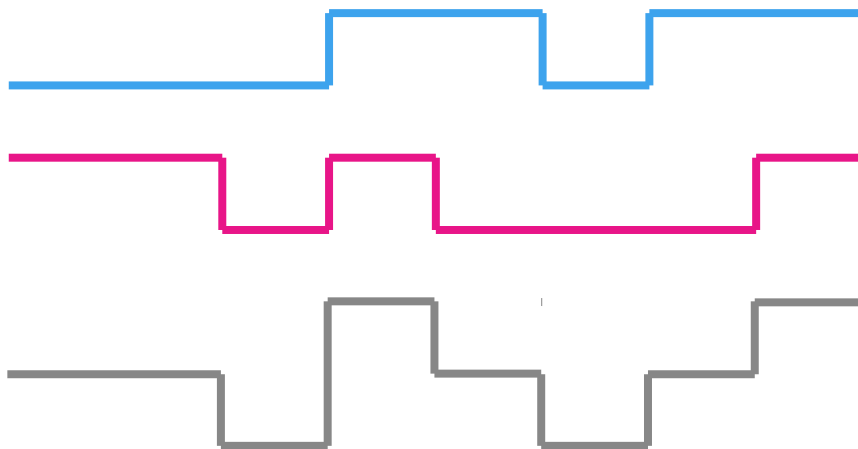
$$A = (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$$

B发送0

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

接收方收到 $S=A+(-B)$

$$S = (\ 0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2)$$



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发送1

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

B发送0

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

接收方收到 $S=A+(-B)$

$$S = (\ 0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2)$$

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

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：

A发送1

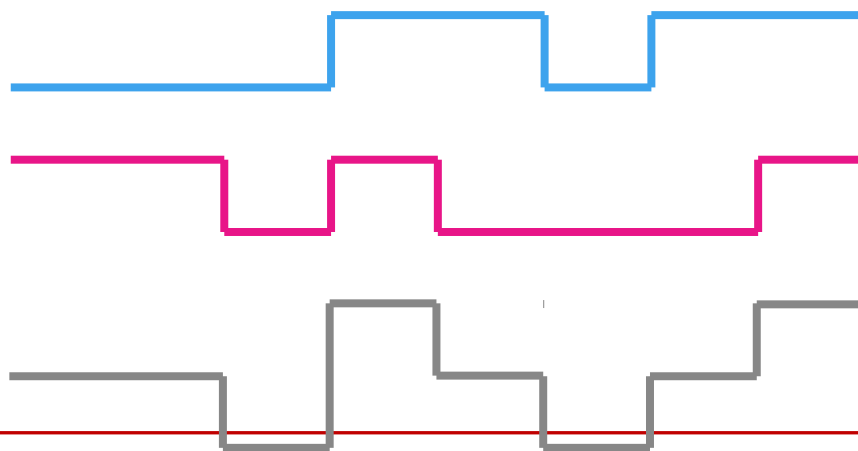
$$A = (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$$

B发送0

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

接收方收到 $S=A+(-B)$

$$S = (\ 0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2)$$



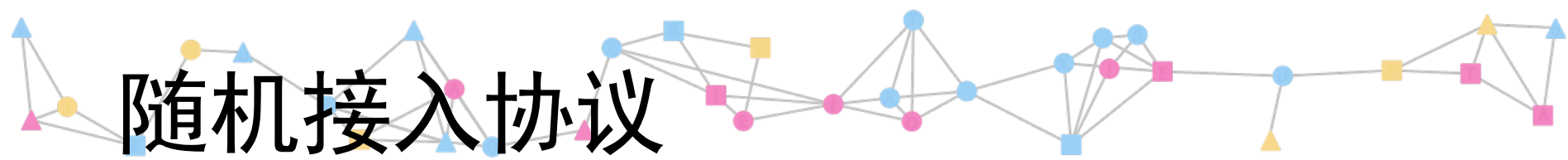
$$S \cdot B = \frac{1}{8} \sum S_i B_i = \frac{1}{8} (0, 0, -2, +2, 0, -2, 0, +2) \cdot (-1, -1, +1, -1, +1, +1, +1, -1) = -1$$

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

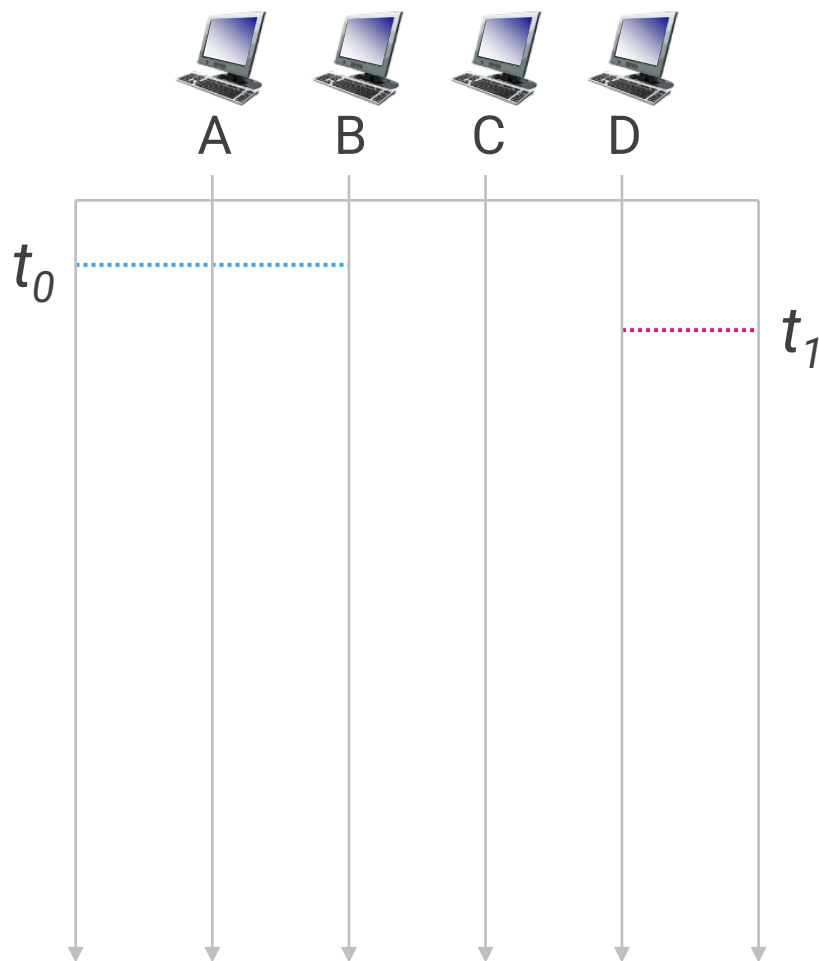


载波监听多路访问CSMA

- 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

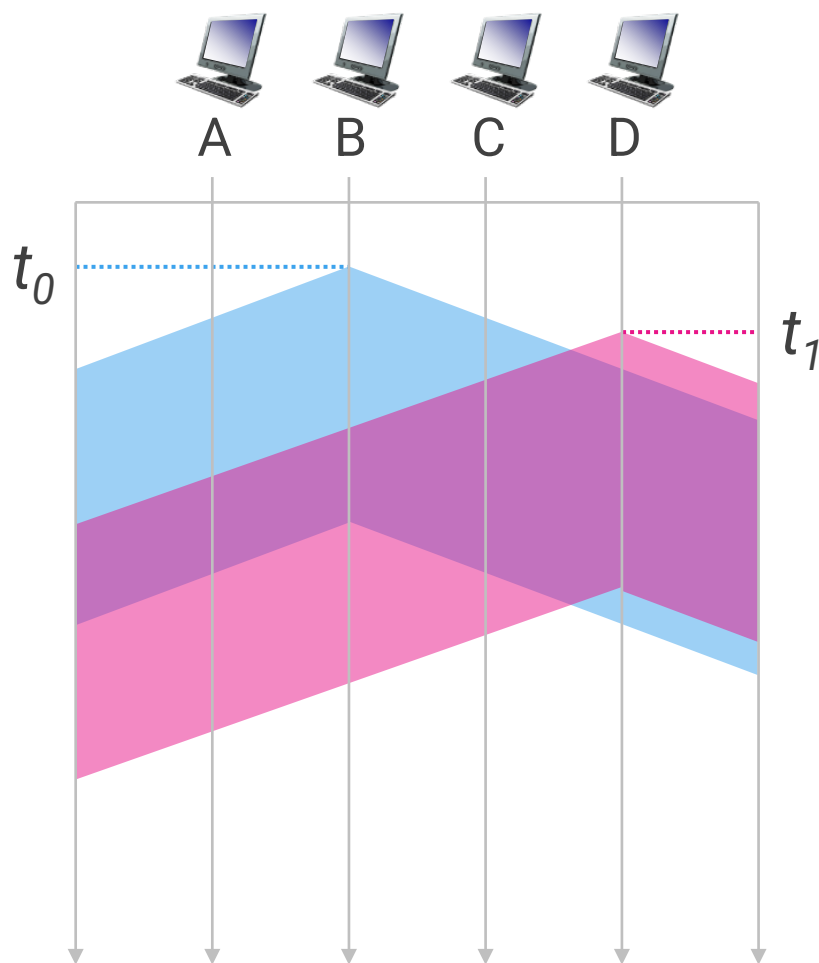
载波监听多路访问CSMA

- 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



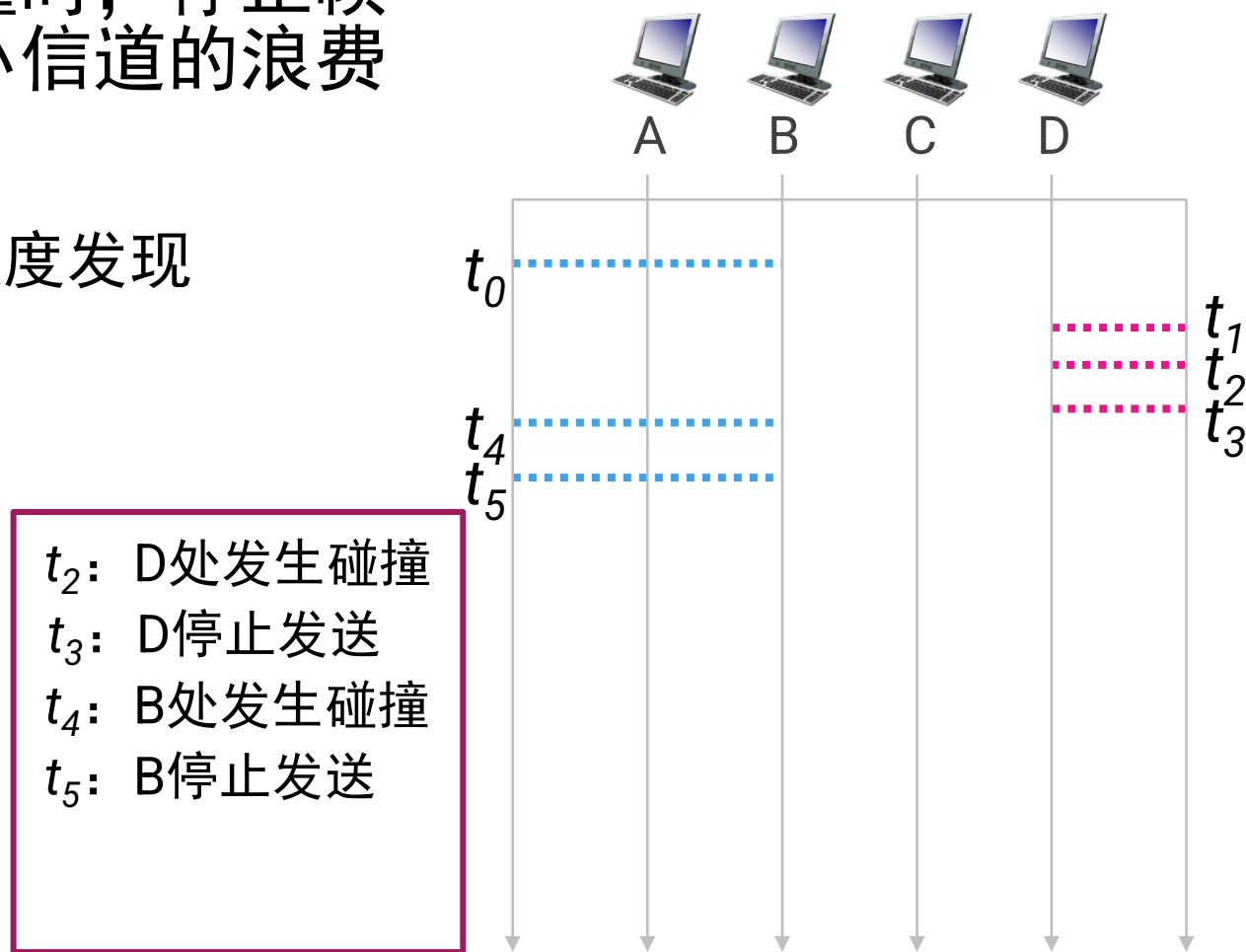
载波监听多路访问CSMA

- 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

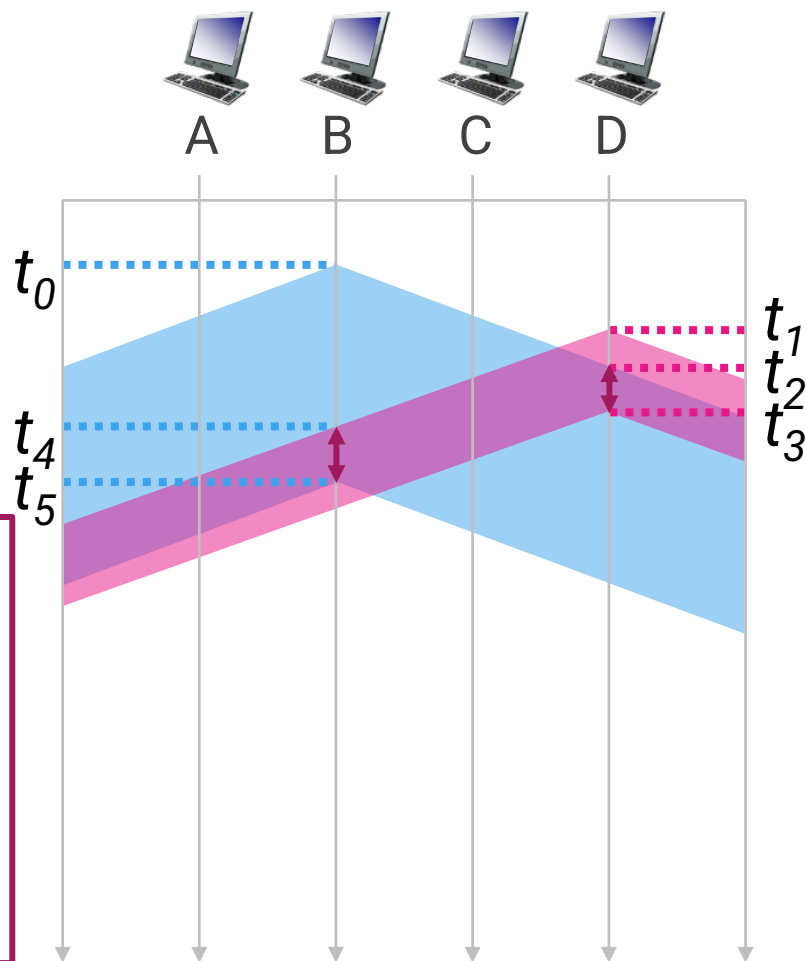


t_2 : D处发生碰撞
 t_3 : D停止发送
 t_4 : B处发生碰撞
 t_5 : B停止发送

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

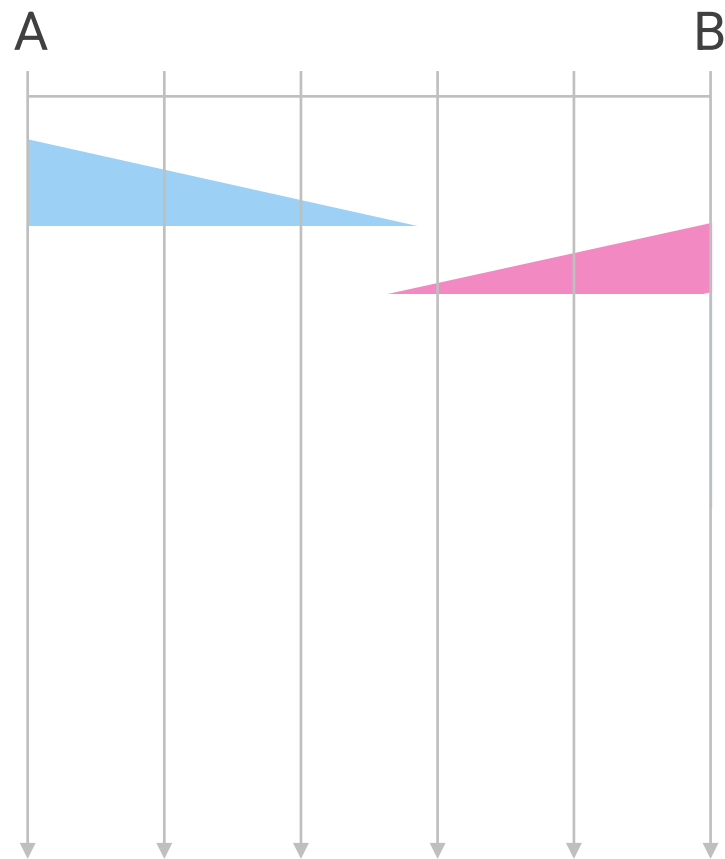
- t_{prop} = 两个节点之间传播时延的最大值
- t_{trans} = 最大长度帧的传输时间

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

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

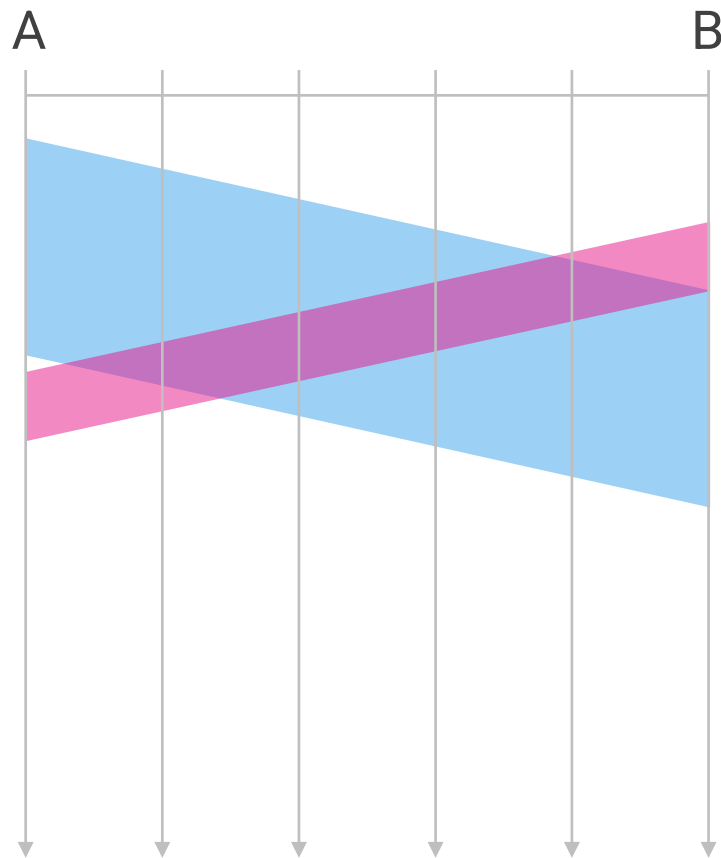
CSMA/CD

- 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



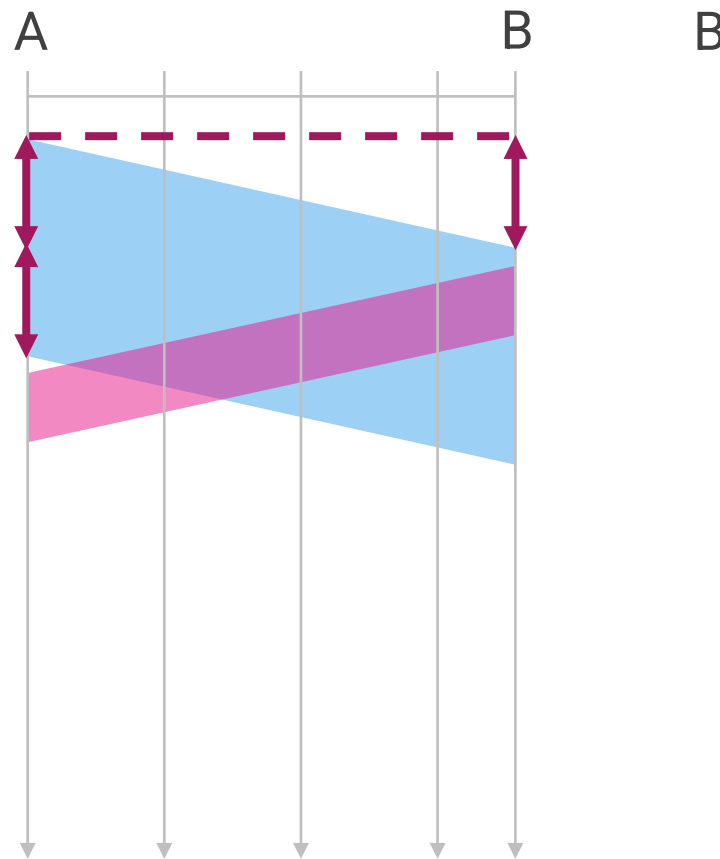
CSMA/CD

- 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



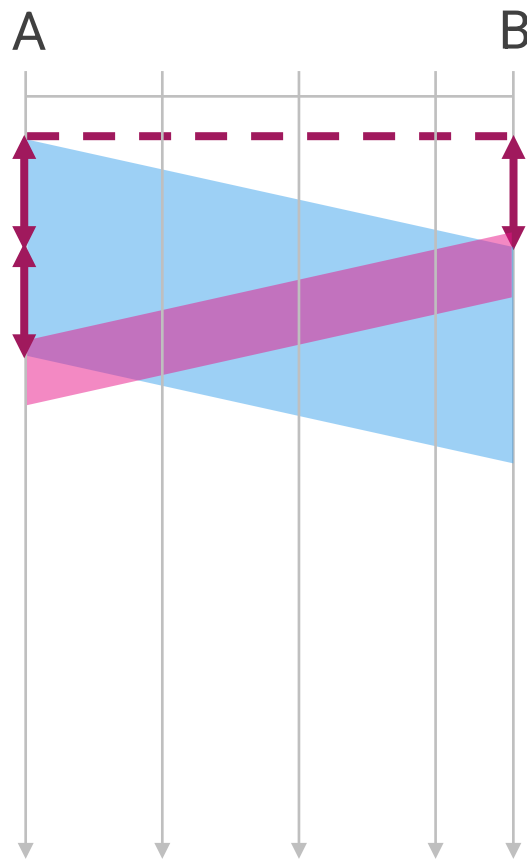
CSMA/CD

- 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*