



哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



《计算机网络》

第3章 传输层

主讲人：李金龙

主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

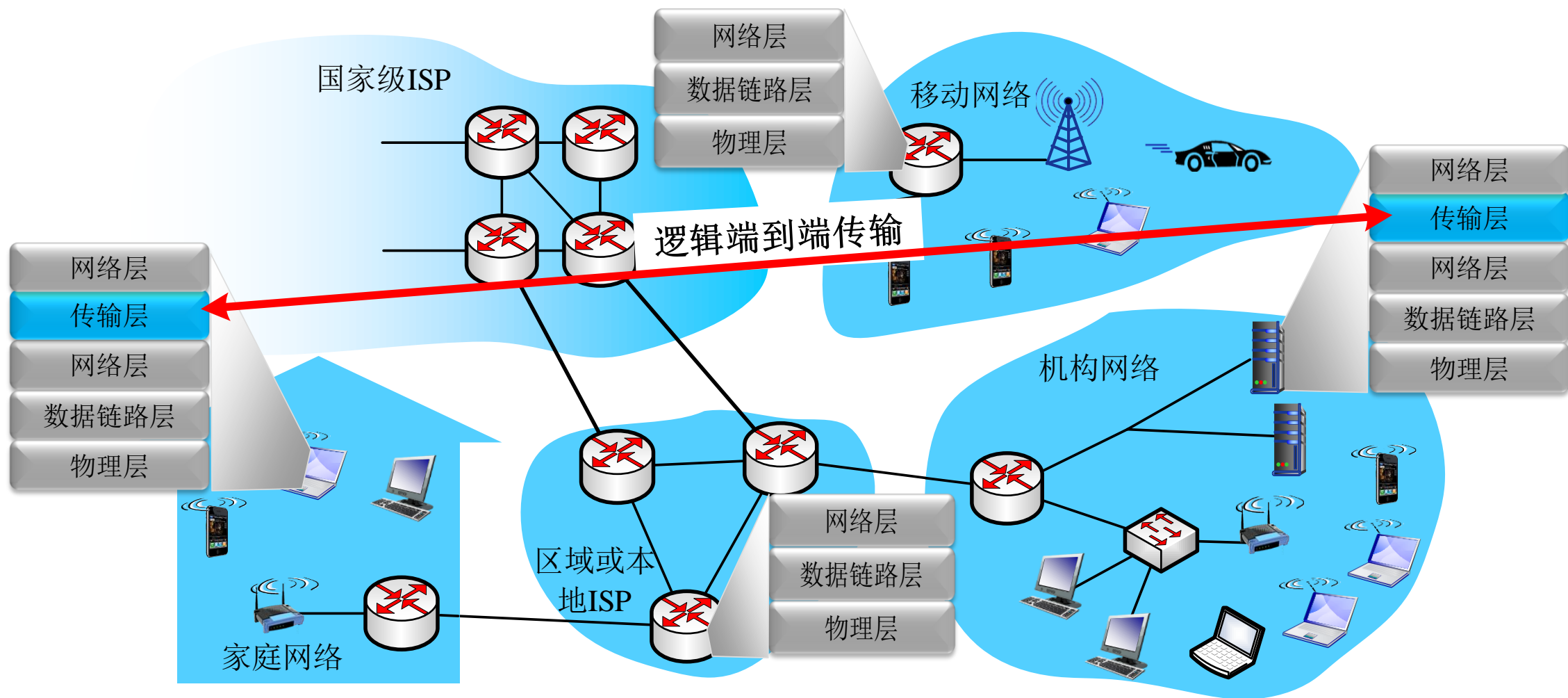
拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析

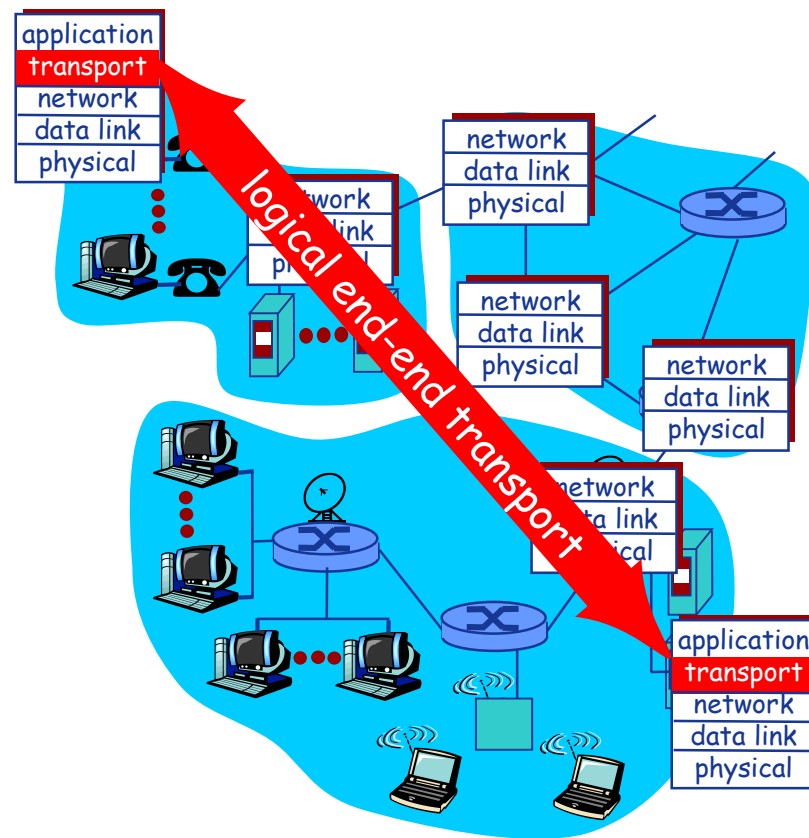


传输层？



传输层服务和协议

- ❖ 传输层协议为运行在不同Host上的进程提供了一种**逻辑通信机制**
- ❖ 端系统运行传输层协议
 - **发送方**：将应用递交的消息分成一个或多个的Segment，并向下传给网络层。
 - **接收方**：将接收到的segment组装成消息，并向上交给应用层。
- ❖ 传输层可以为应用提供多种协议
 - Internet上的TCP
 - Internet上的UDP



传输层 vs. 网络层

- ❖ 网络层：提供主机之间的逻辑通信机制
- ❖ 传输层：提供应用进程之间的逻辑通信机制
 - 位于网络层之上
 - 依赖于网络层服务
 - 对网络层服务进行（可能的）增强

家庭类比:

12个孩子给12个孩子发信

- ❖ 应用进程 = 孩子
- ❖ 应用消息 = 信封里的信
- ❖ 主机 = 房子
- ❖ 传输层协议 = 李雷和韩梅梅
- ❖ 网络层协议 = 邮政服务



Internet传输层协议

❖ 可靠、按序的交付服务(TCP)

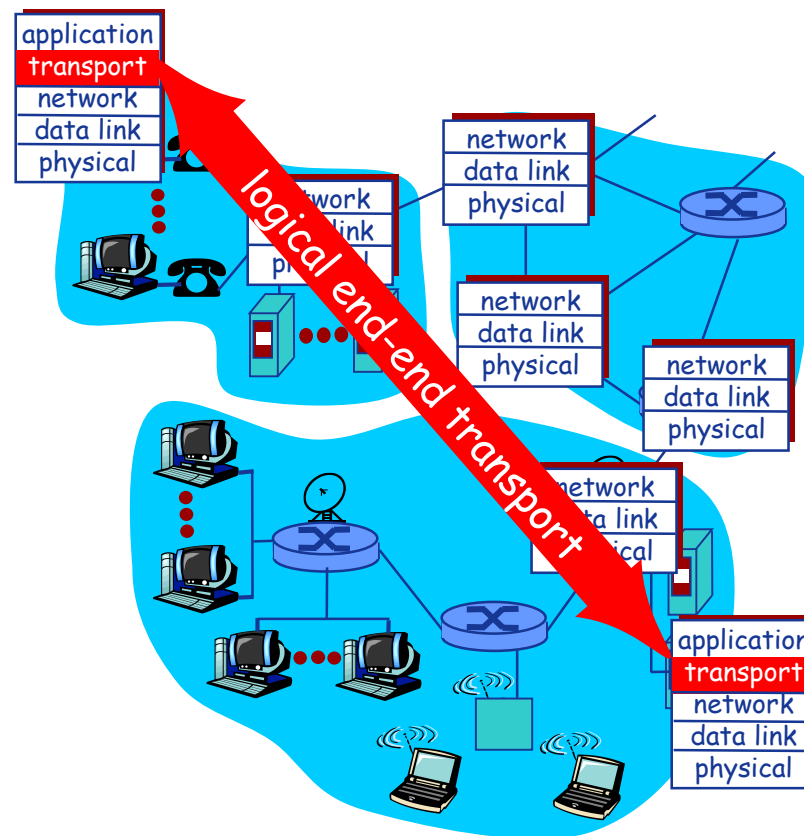
- 拥塞控制
- 流量控制
- 连接建立

❖ 不可靠的交付服务(UDP)

- 基于“**尽力而为 (Best-effort)**”的网络层，没有做（可靠性方面的）扩展

❖ 两种服务均不保证

- 延迟
- 带宽



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

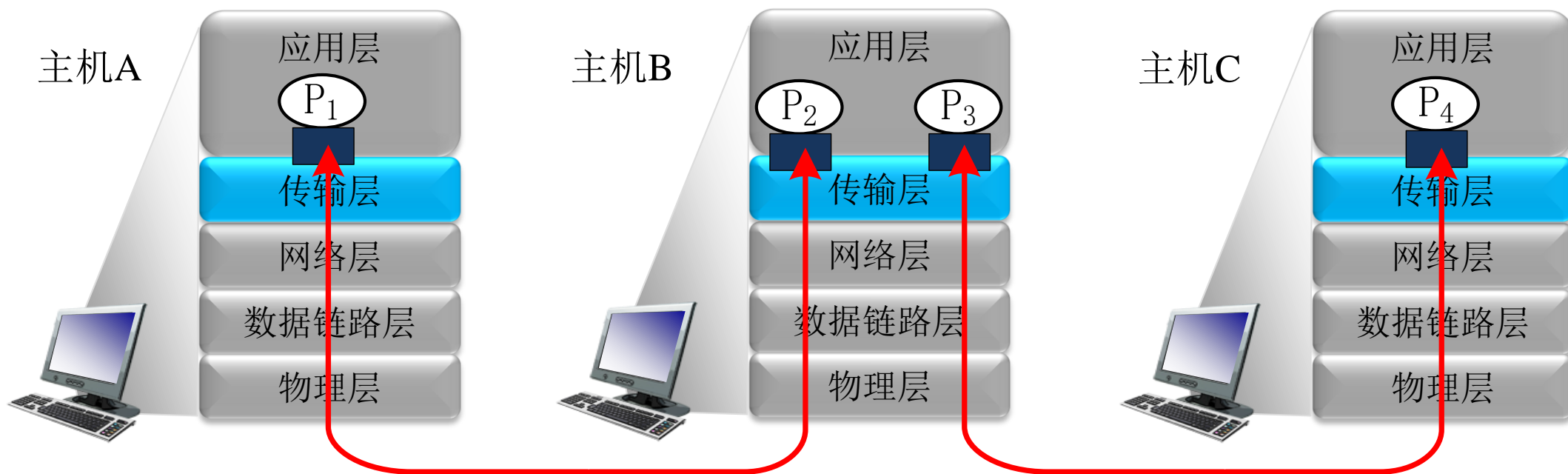
拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



多路复用/分用？



图例：○ 进程 ■ 套接字

多路复用/分用

❖ Why?

- ❖ 如果某层的一个协议对应直接上层的多个协议/实体，则需要复用/分用

接收端进行多路分用：

传输层依据头部信息将收到的 **Segment** 交给正确的 **Socket**，即不同的进程

发送端进行多路复用：

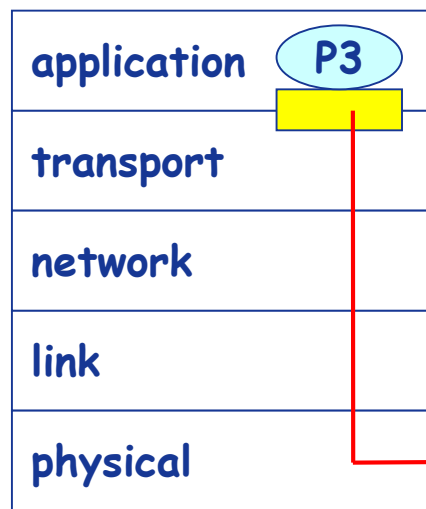
从多个 **Socket** 接收数据，为每块数据封装上头部信息，生成 **Segment**，交给网络层



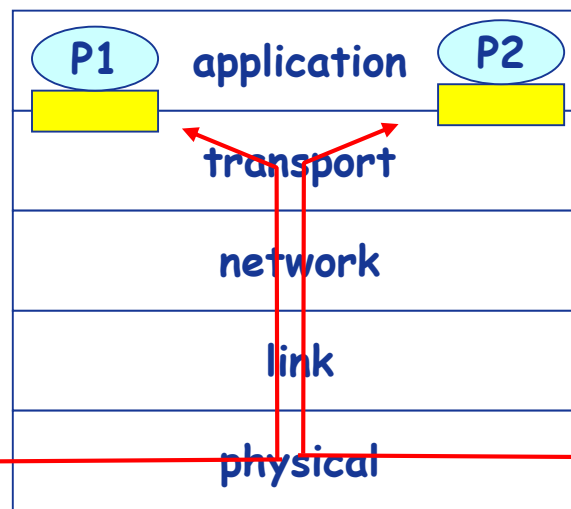
= socket



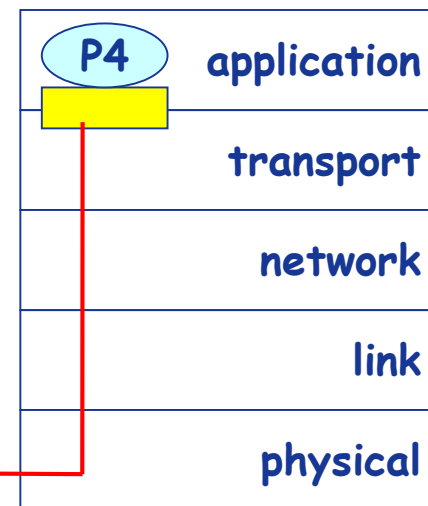
= process



host 1



host 2



host 3



分用如何工作？

❖ 主机接收到IP数据报(datagram)

- 每个数据报携带源IP地址、目的IP地址。
- 每个数据报携带一个传输层的段(Segment)。
- 每个段携带源端口号和目的端口号

❖ 主机收到Segment之后，传输层协议提取IP地址和端口号信息，将Segment导向相应的Socket

- TCP做更多处理



TCP/UDP 段格式



无连接分用

❖ 利用端口号创建Socket

```
DatagramSocket mySocket1 = new  
    DatagramSocket(9911);  
DatagramSocket mySocket2 = new  
    DatagramSocket(9922);
```

❖ UDP的Socket用二元组标识

- (目的IP地址, 目的端口号)

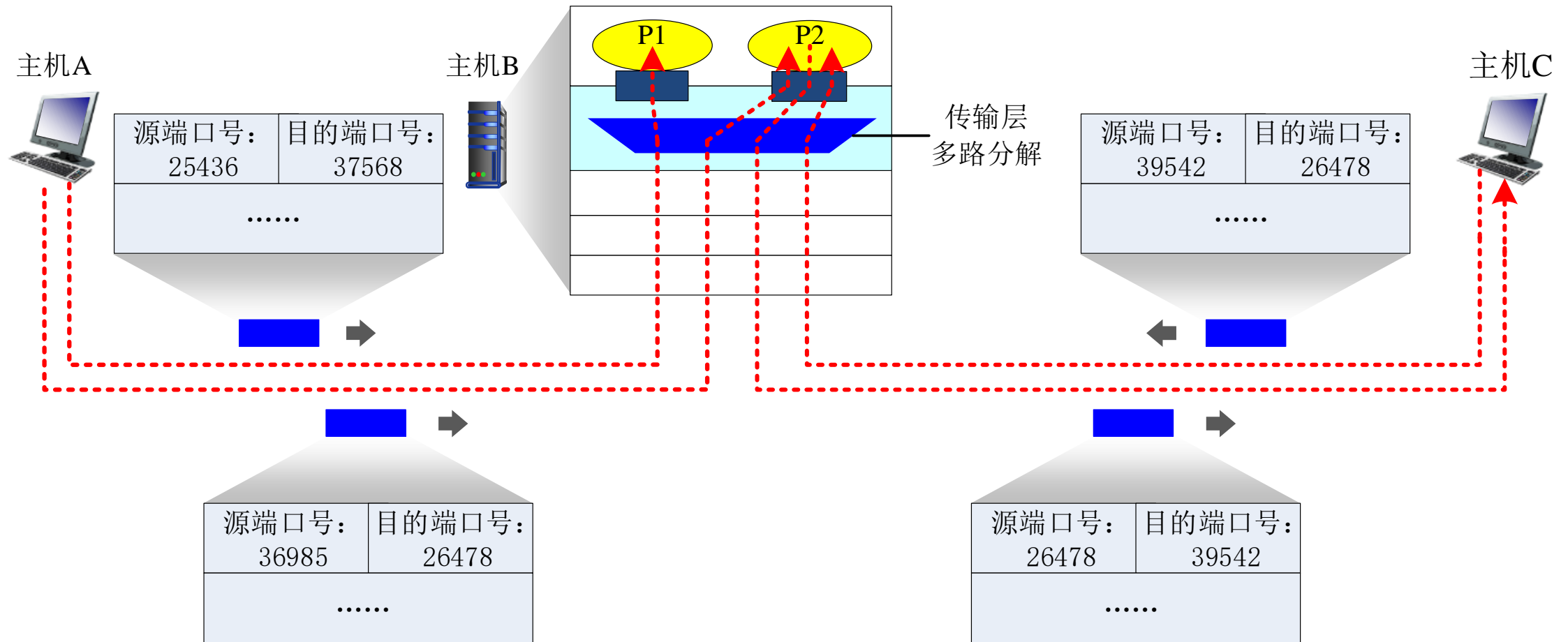
❖ 主机收到UDP段后

- 检查段中的目的端口号
- 将UDP段导向绑定在该端口号的Socket

❖ 来自不同源IP地址和/或源端口号的IP数据包被导向同一个Socket



无连接分用



面向连接的分用

❖ TCP的Socket用四元组标识

- 源IP地址
- 源端口号
- 目的IP地址
- 目的端口号

❖ 接收端利用所有的四个值将Segment导向合适的Socket

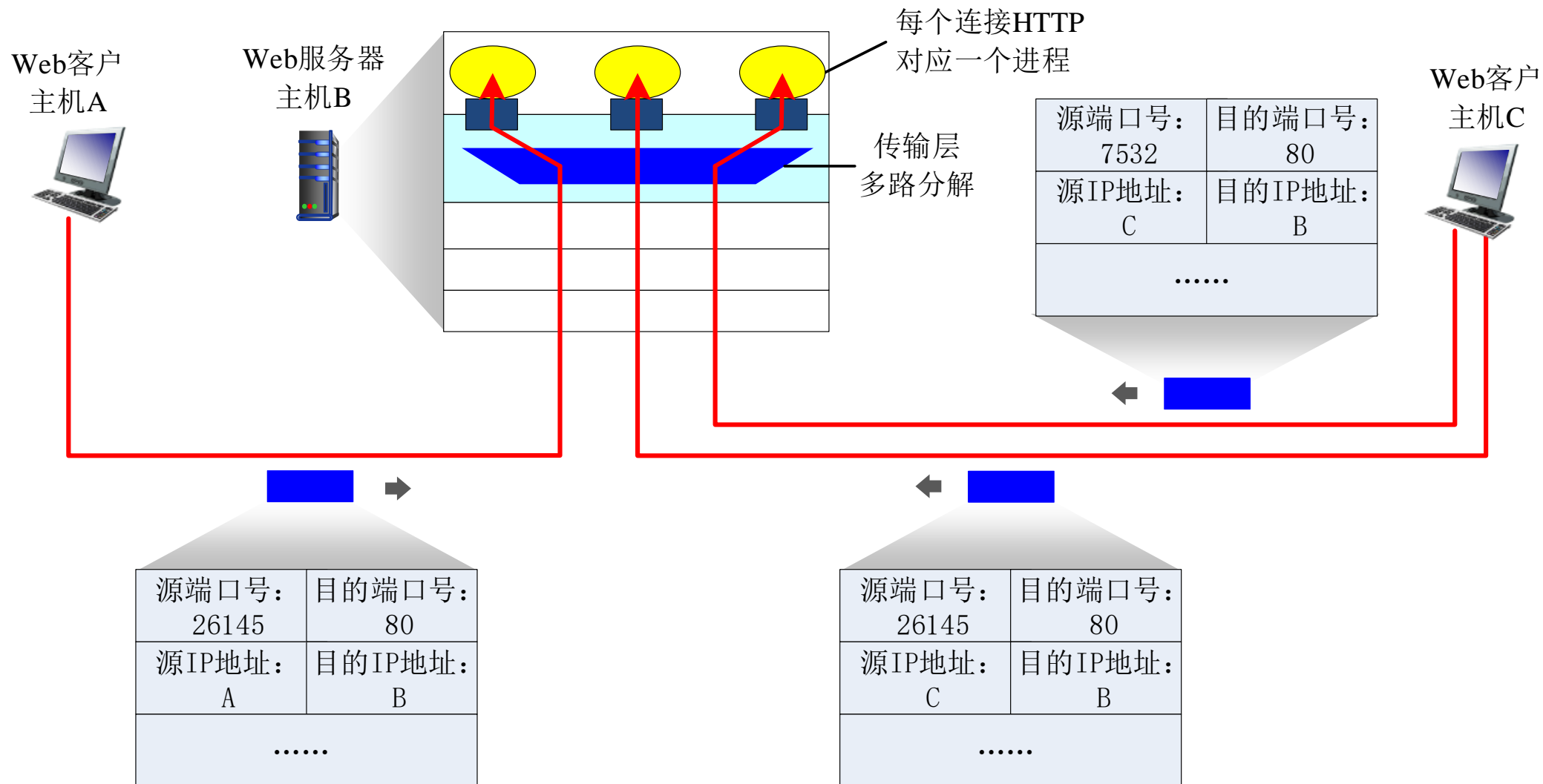
❖ 服务器可能同时支持多个TCP Socket

- 每个Socket用自己的四元组标识

❖ Web服务器为每个客户端开不同的Socket



面向连接的分用



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



UDP: User Datagram Protocol [RFC 768]

❖ 基于Internet IP协议

- 复用/分用
- 简单的错误校验

❖ “Best effort” 服务，UDP段可能

- 丢失
- 非按序到达

❖ 无连接

- UDP发送方和接收方之间不需要握手
- 每个UDP段的处理独立于其他段

UDP为什么存在?

- ❖ 无需建立连接 (减少延迟)
- ❖ 实现简单: 无需维护连接状态
- ❖ 头部开销少
- ❖ 没有拥塞控制: 应用可更好地控制发送时间和速率



UDP: User Datagram Protocol [RFC 768]

❖ 常用于流媒体应用

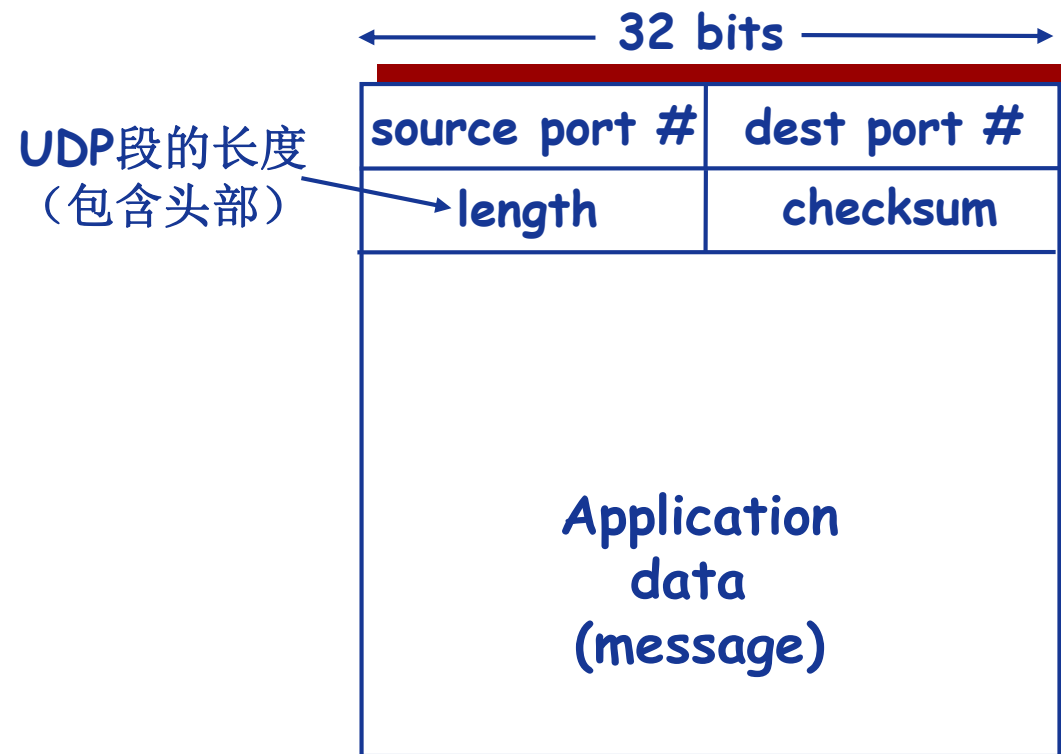
- 容忍丢失
- 速率敏感

❖ UDP还用于

- DNS
- SNMP

❖ 在UDP上实现可靠数据传输？

- 在应用层增加可靠性机制
- 应用特定的错误恢复机制



UDP segment format



UDP校验和(checksum)

目的：检测UDP段在传输中是否发生错误（如位翻转）

❖ 发送方

- 将段的内容视为**16-bit**整数
- 校验和计算：计算所有整数的和，进位加在和的后面，将得到的值按位求反，得到校验和
- 发送方将校验和放入校验和字段

❖ 接收方

- 计算所收到段的校验和
- 将其与校验和字段进行对比
 - 不相等：检测出错误
 - 相等：没有检测出错误（但可能有错误）

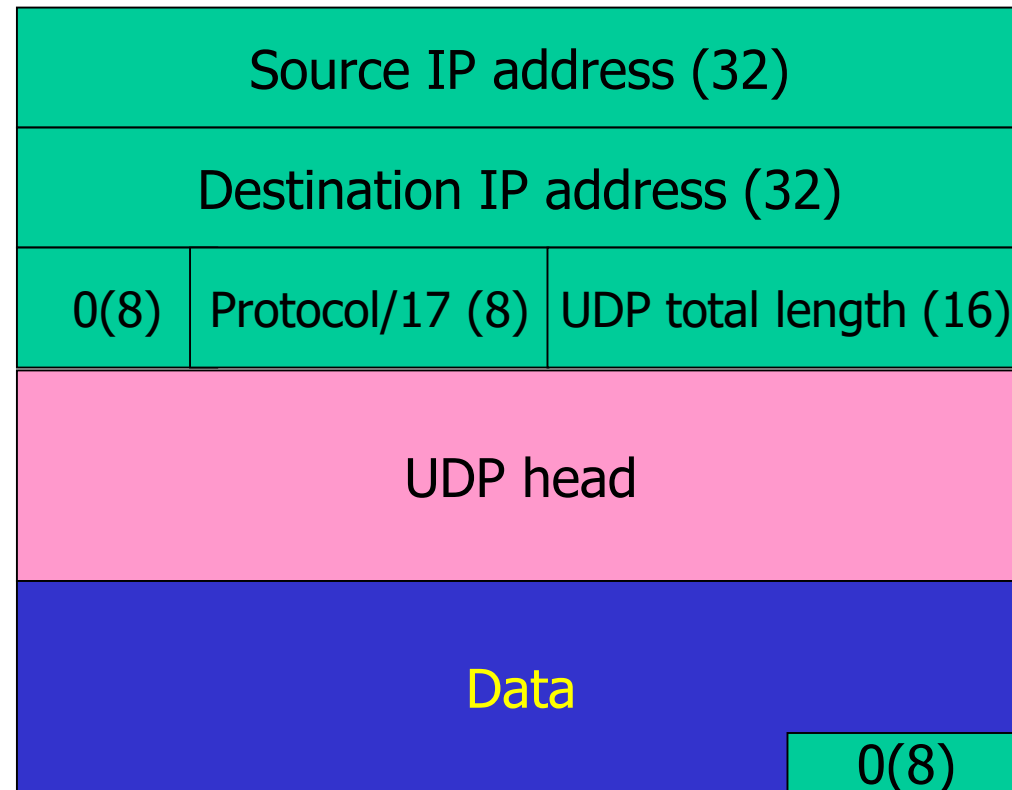


UDP校验和(checksum)

❖ Include 3 parts:

- Pseudo head
- UDP head
- Application data

Pseudo
head



校验和计算示例

❖ 注意:

- 最高位进位必须被加进去

❖ 示例:

		1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
		1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
<hr/>																	
wraparound	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
<hr/>																	
sum		1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0
checksum		0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



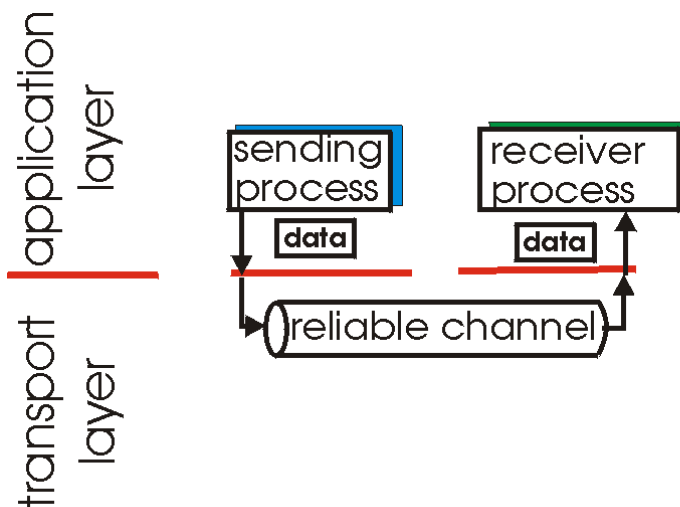
可靠数据传输原理

❖ 什么是可靠？

- 不错、不丢
不乱、不多

❖ 可靠数据传输协议

- 可靠数据传输对应用层、传输层、链路层都很重要
- 网络Top-10问题
- 信道的不可靠特性决定了可靠数据传输协议(rdt)的复杂性



(a) provided service

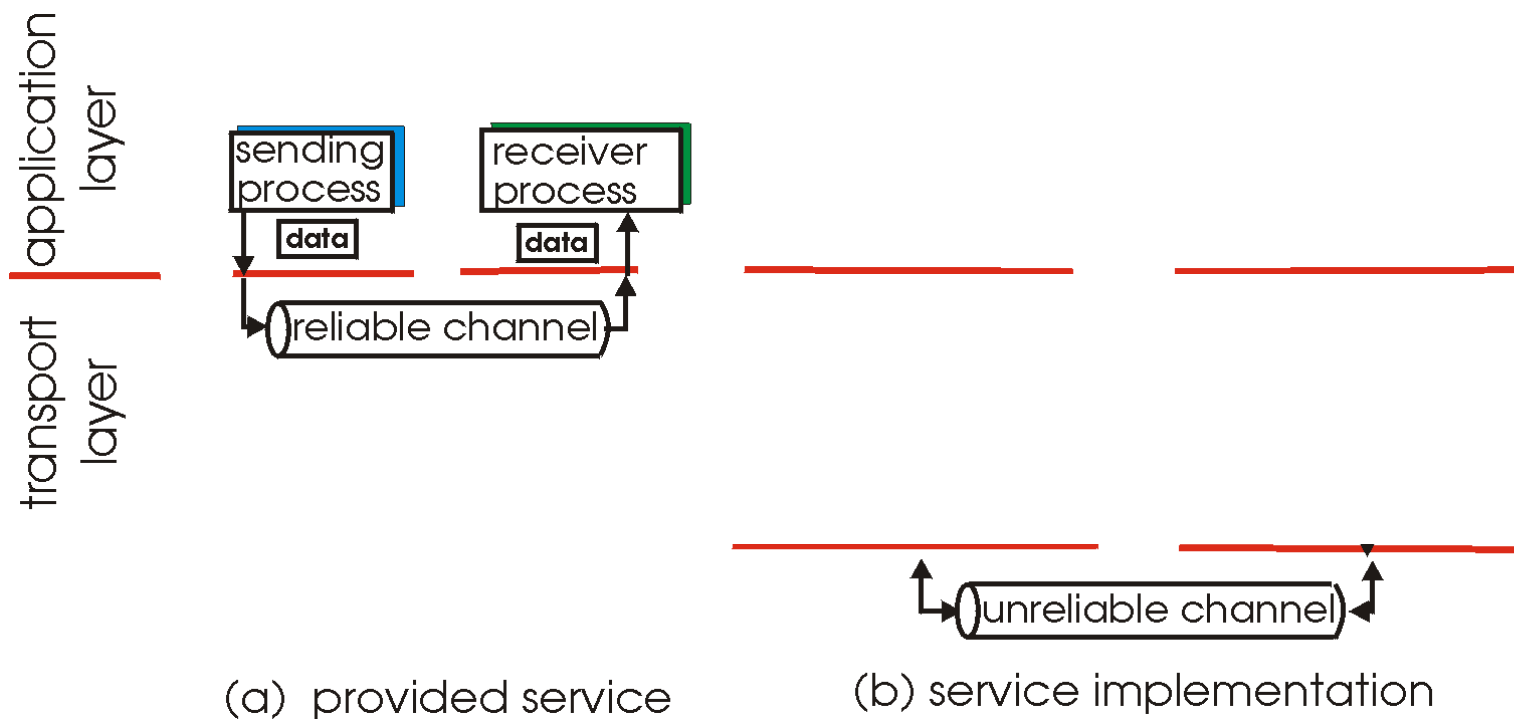
可靠数据传输原理

❖ 什么是可靠？

- 不错、不丢
不乱、不多

❖ 可靠数据传输协议

- 可靠数据传输对应用层、传输层、链路层都很重要
- 网络Top-10问题
- 信道的不可靠特性决定了可靠数据传输协议(rdt)的复杂性



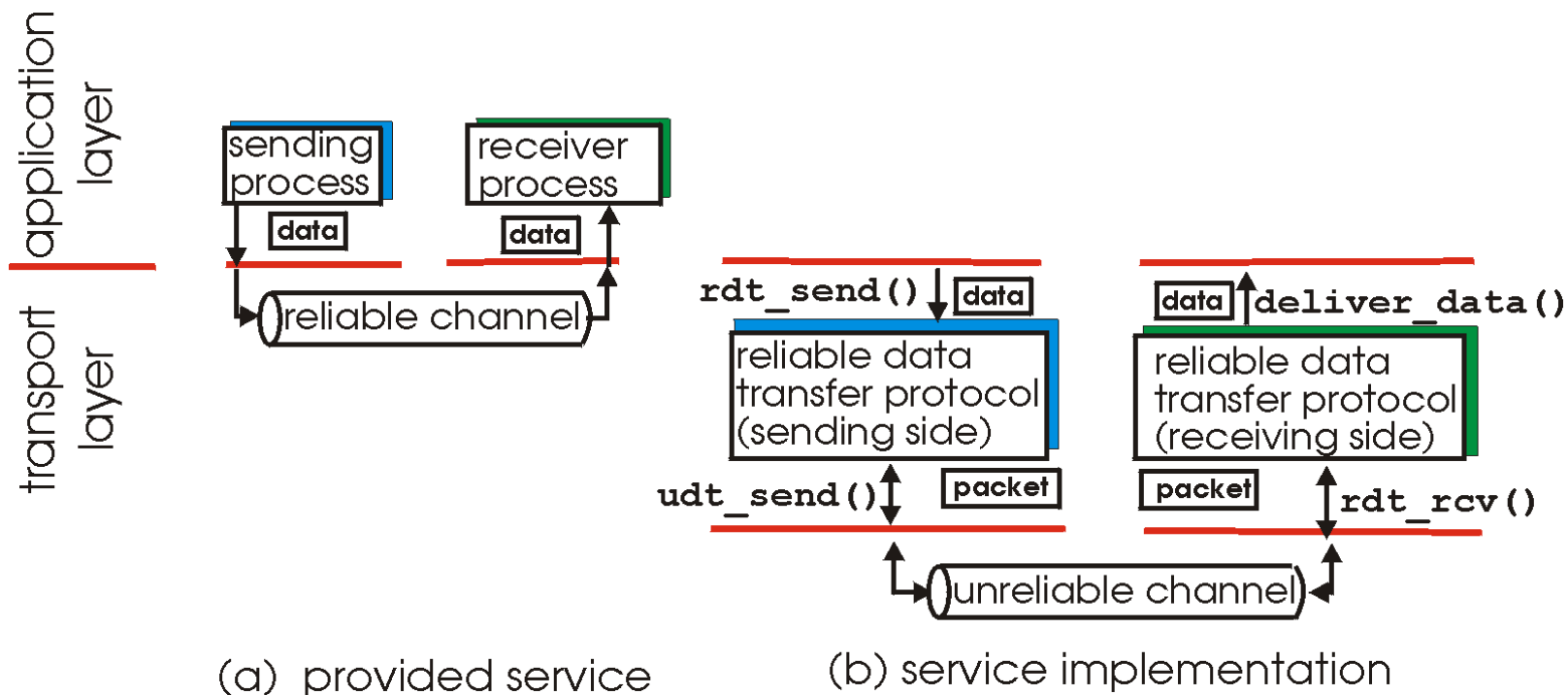
可靠数据传输原理

❖ 什么是可靠?

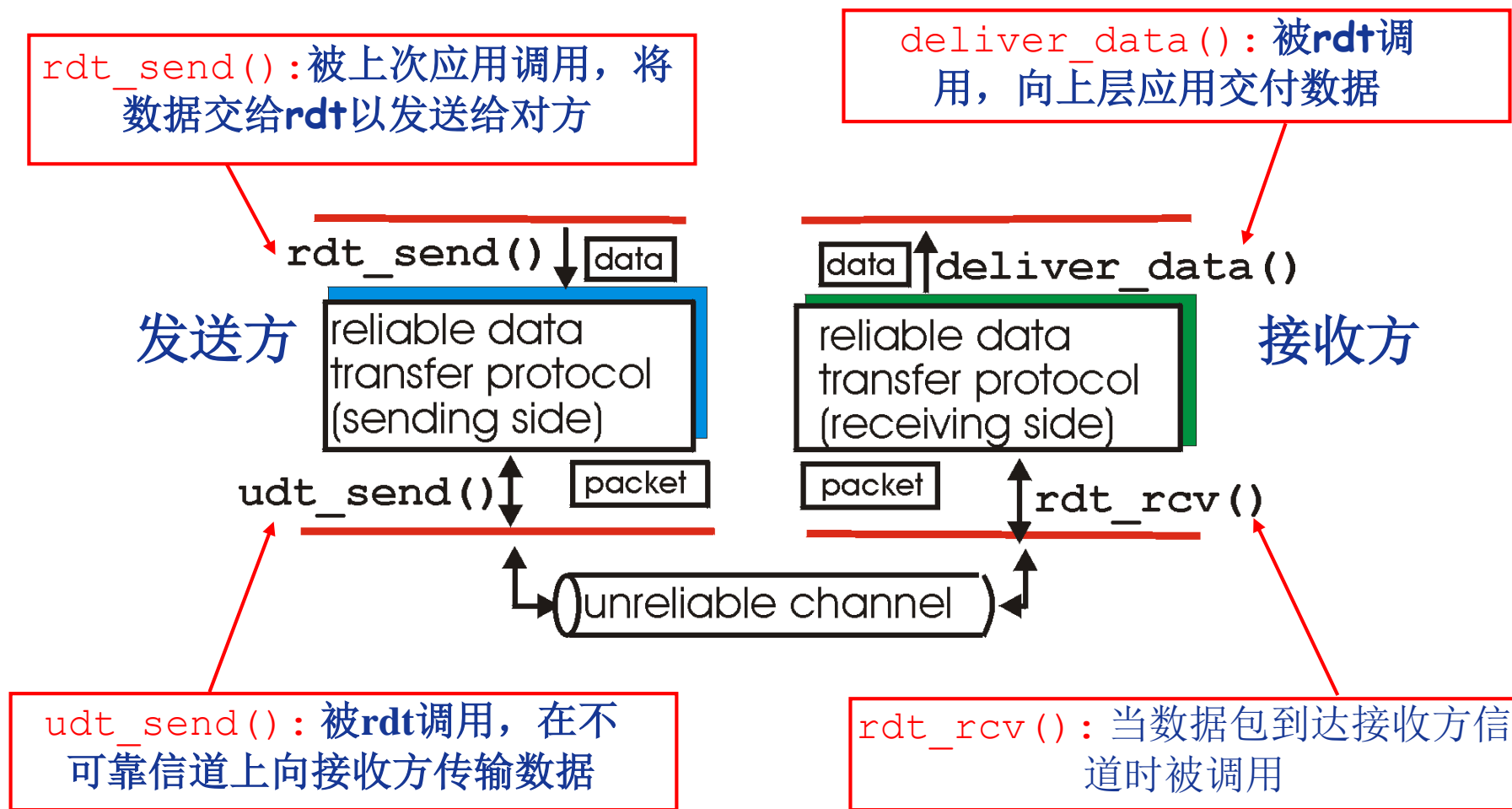
- 不错、不丢
不乱、不多

❖ 可靠数据传输协议

- 可靠数据传输对应用层、传输层、链路层都很重要
- 网络Top-10问题
- 信道的不可靠特性决定了可靠数据传输协议(rdt)的复杂性

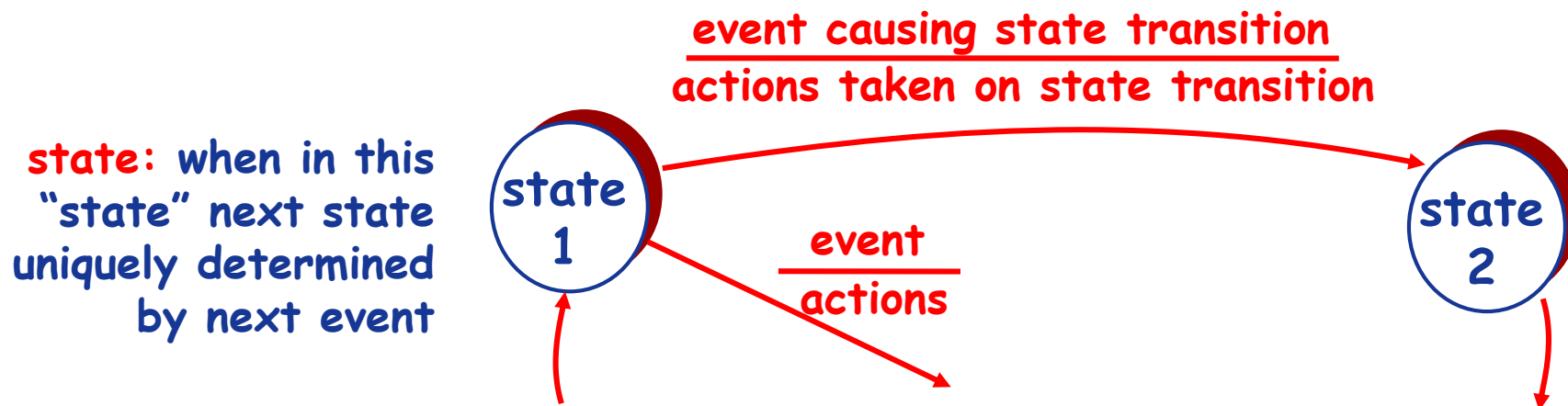


可靠数据传输协议基本结构:接口



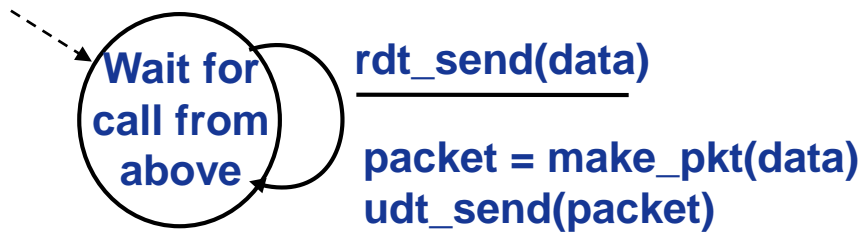
可靠数据传输协议

- ❖ 渐进地设计可靠数据传输协议的发送方和接收方
- ❖ 只考虑单向数据传输
 - 但控制信息双向流动
- ❖ 利用状态机(Finite State Machine, FSM)刻画传输协议



Rdt 1.0: 可靠信道上的可靠数据传输

- ❖ 底层信道完全可靠
 - 不会发生错误(bit error)
 - 不会丢弃分组
- ❖ 发送方和接收方的FSM独立



sender



receiver



Rdt 2.0: 产生位错误的信道



❖ 底层信道可能翻转分组中的位(bit)

- 利用**校验和**检测位错误

❖ 如何从错误中恢复？

- **确认机制(Acknowledgements, ACK)**: 接收方显式地告知发送方分组已正确接收
- **NAK**: 接收方显式地告知发送方分组有错误
- 发送方收到**NAK**后, **重传**分组

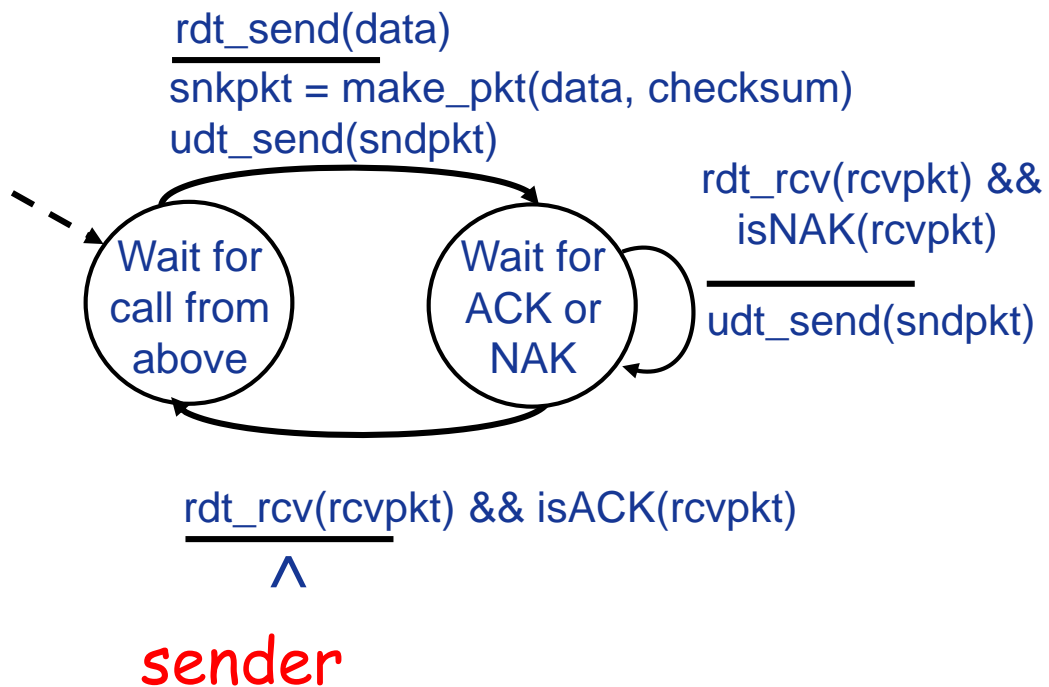
❖ 基于这种重传机制的rdt协议称为**ARQ(Automatic Repeat reQuest)**协议

❖ Rdt 2.0中引入的新机制

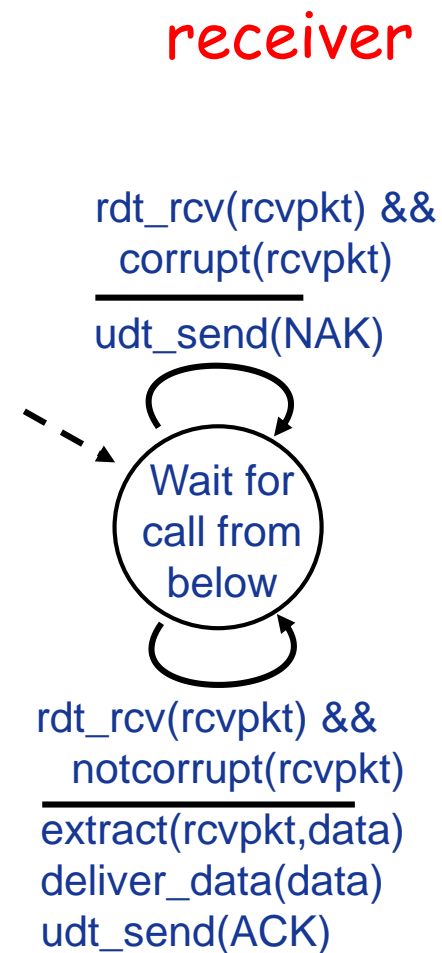
- 差错检测
- 接收方反馈控制消息: **ACK/NAK**
- 重传



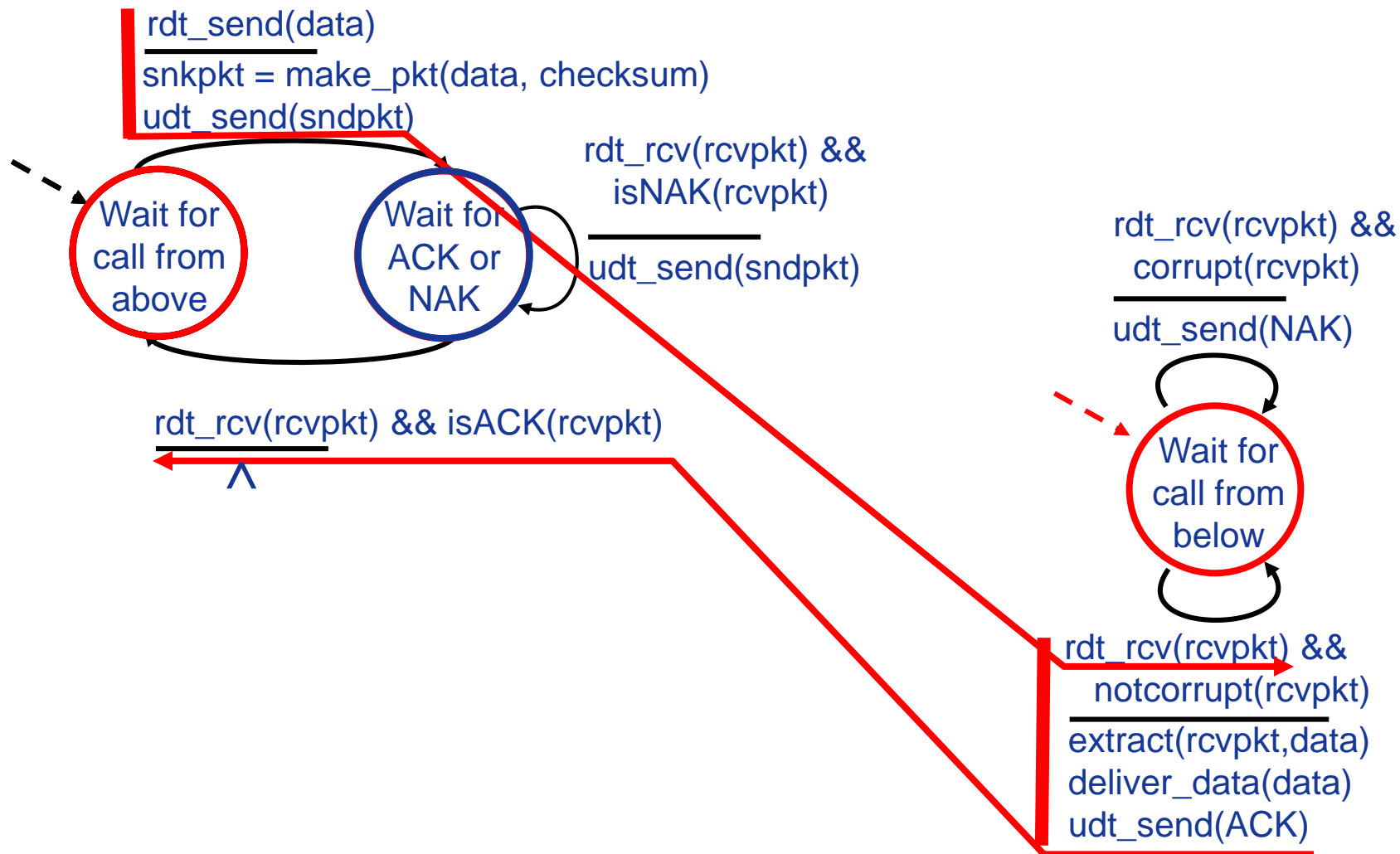
Rdt 2.0: FSM规约



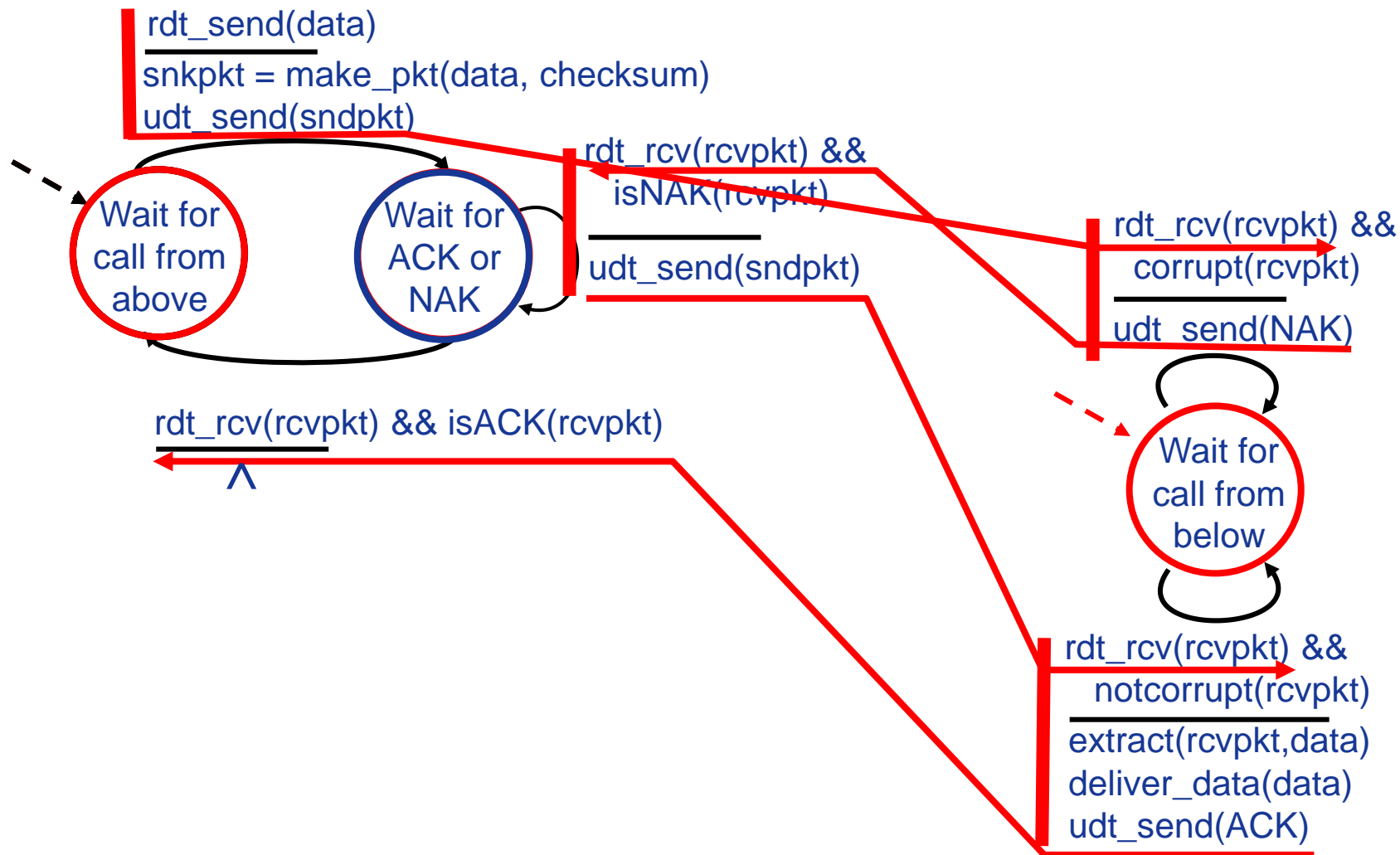
停一等协议



Rdt 2.0: 无错误场景



Rdt 2.0: 有错误场景



Rdt 2.0有什么缺陷？



❖ 如果ACK/NAK消息发生错误/被破坏(corrupted)会怎么样？

- 为ACK/NAK增加校验和，检错并纠错
- 发送方收到被破坏ACK/NAK时不知道接收方发生了什么，添加额外的控制消息
- 如果ACK/NAK坏掉，发送方重传
- 不能简单的重传：产生重复分组

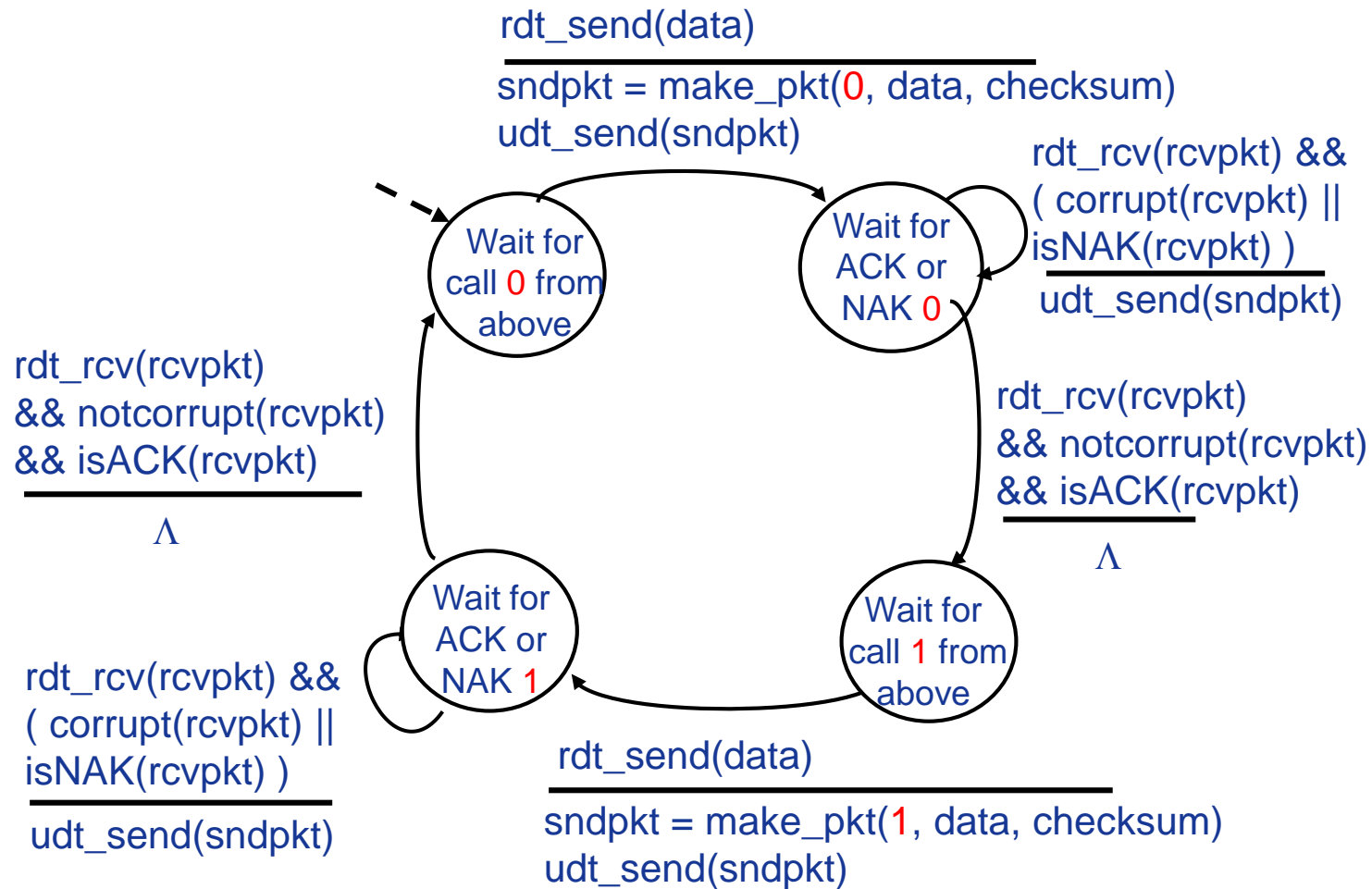
❖ 如何解决重复分组问题？

- 序列号(Sequence number): 发送方给每个分组增加序列号
- 接收方丢弃重复分组

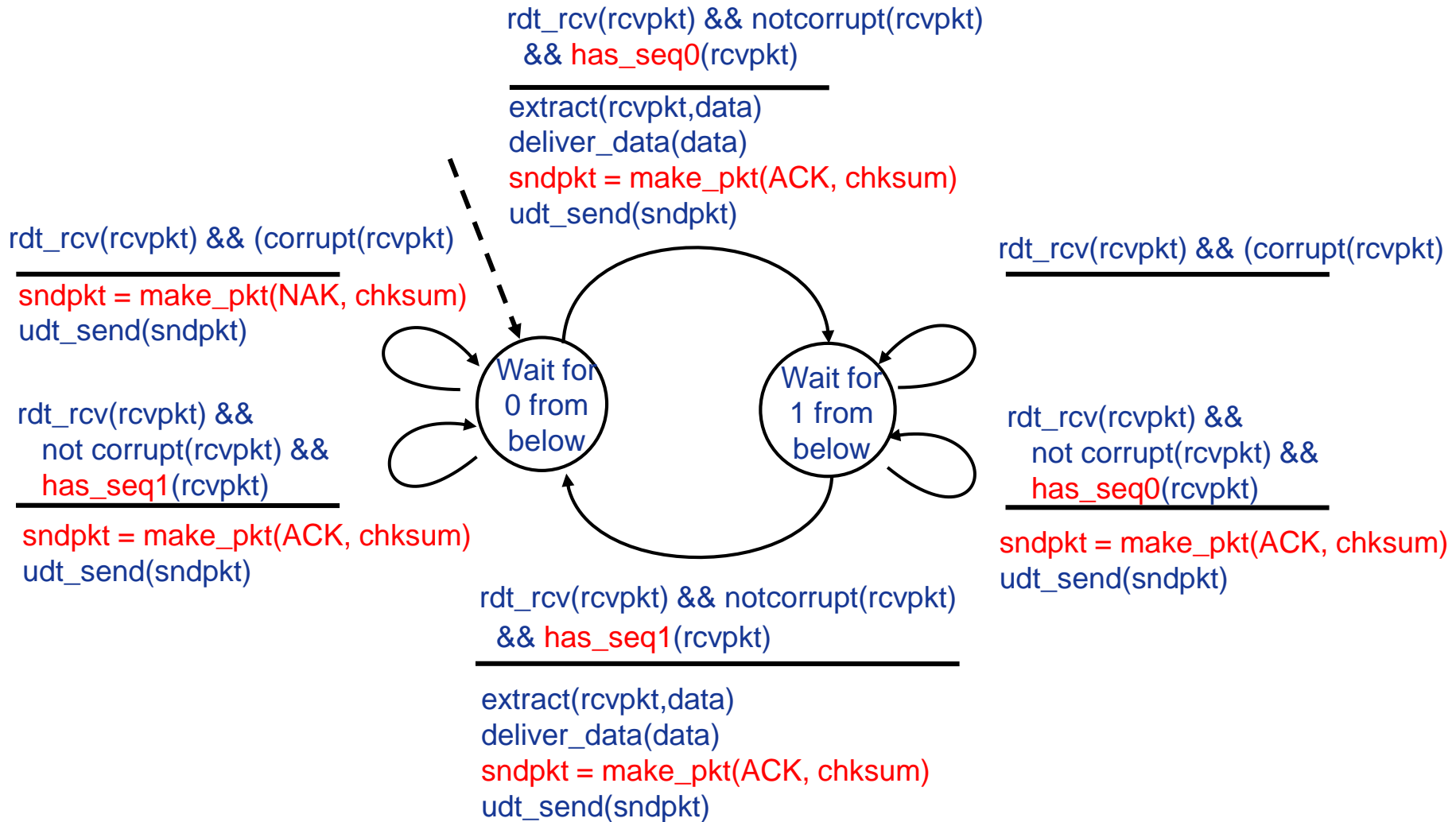
stop and wait
Sender sends one packet,
then waits for receiver
response



Rdt 2.1: 发送方, 应对ACK/NAK破坏



Rdt 2.1: 接收方, 应对ACK/NAK破坏



Rdt 2.1 vs. Rdt 2.0

❖ 发送方:

- ❑ 为每个分组增加了序列号
- ❑ 两个序列号(0, 1)就够用, 为什么?
- ❑ 需校验ACK/NAK消息是否发生错误
- ❑ 状态数量翻倍
 - ❑ 状态必须“记住”“当前”的分组序列号

❖ 接收方

- ❑ 需判断分组是否是重复
 - ❑ 当前所处状态提供了期望收到分组的序列号
- ❑ 注意: 接收方无法知道ACK/NAK是否被发送方正确收到

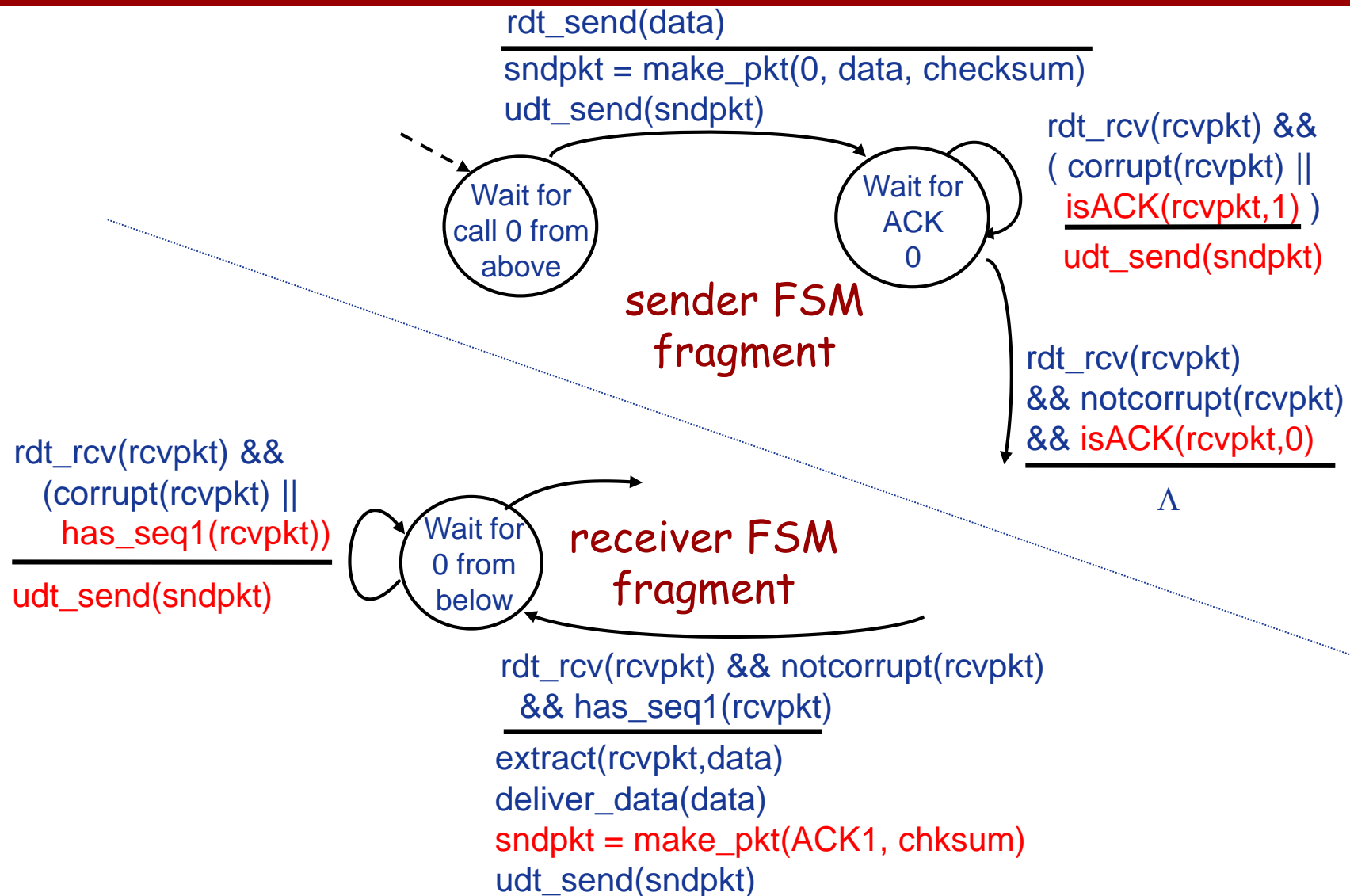


Rdt 2.2: 无NAK消息协议

- ❖ 我们真的需要两种确认消息(ACK + NAK)吗?
- ❖ 与rdt 2.1功能相同，但是只使用ACK
- ❖ 如何实现?
 - 接收方通过ACK告知最后一个被正确接收的分组
 - 在ACK消息中显式地加入被确认分组的序列号
- ❖ 发送方收到重复ACK之后，采取与收到NAK消息相同的动作
 - 重传当前分组



Rdt 2.2 FSM片段



Rdt 3.0

❖ 如果信道既可能发生错误，也可能丢失分组，怎么办？

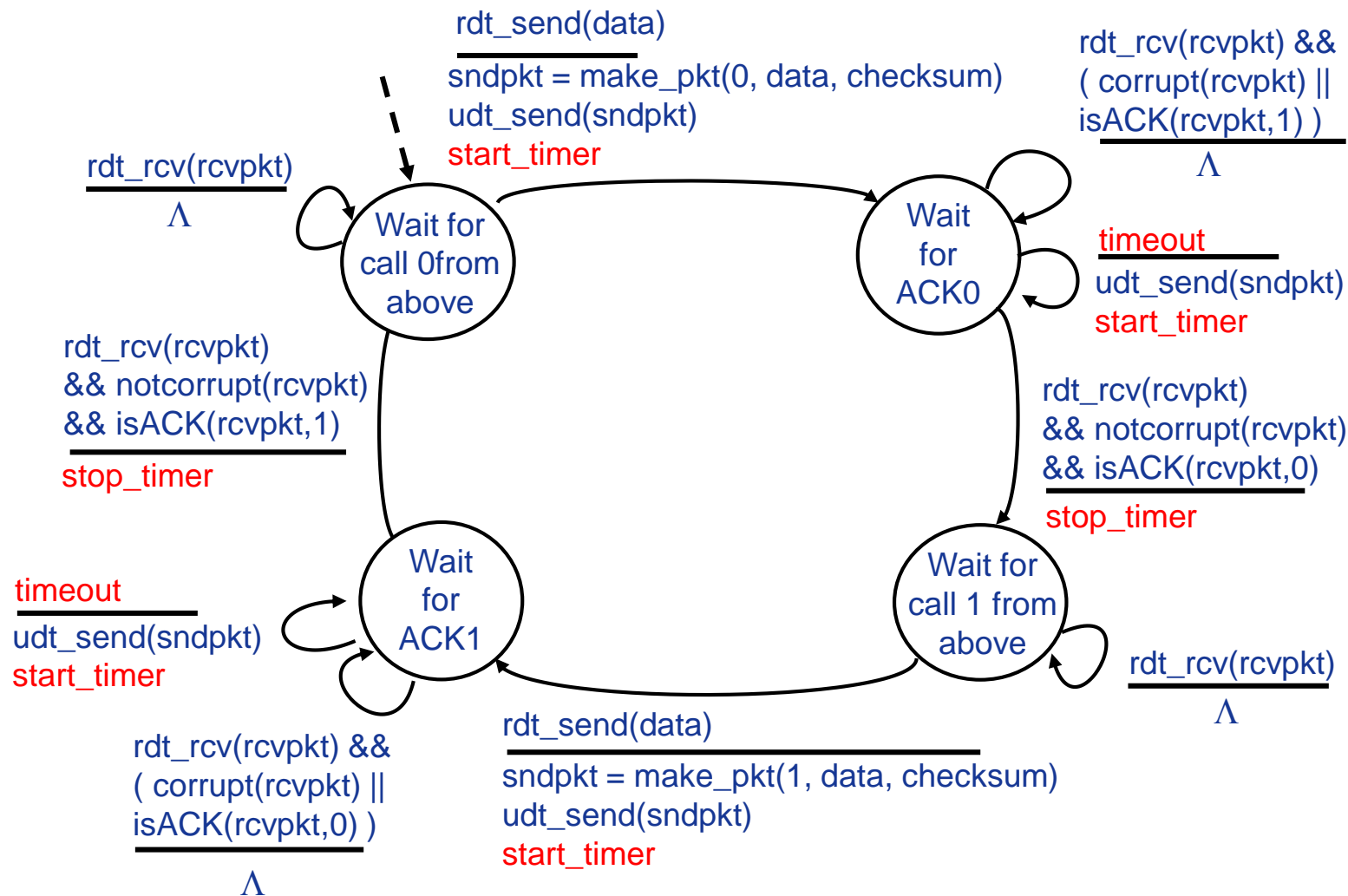
- “校验和 + 序列号 + ACK + 重传” 够用吗？

❖ 方法：发送方等待“合理”时间

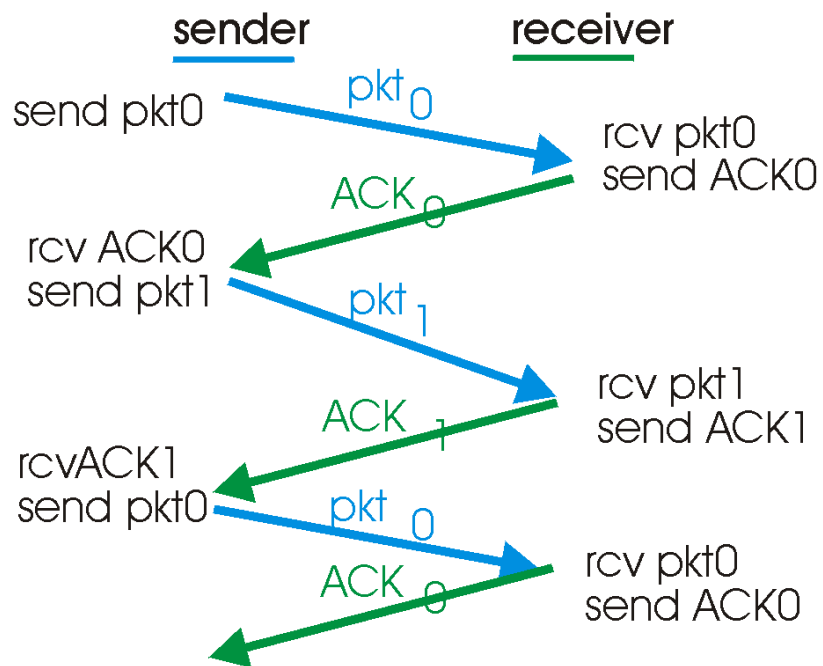
- 如果没收到ACK，重传
- 如果分组或ACK只是延迟而不是丢了
 - 重传会产生重复，序列号机制能够处理
 - 接收方需在ACK中显式告知所确认的分组
- 需要定时器



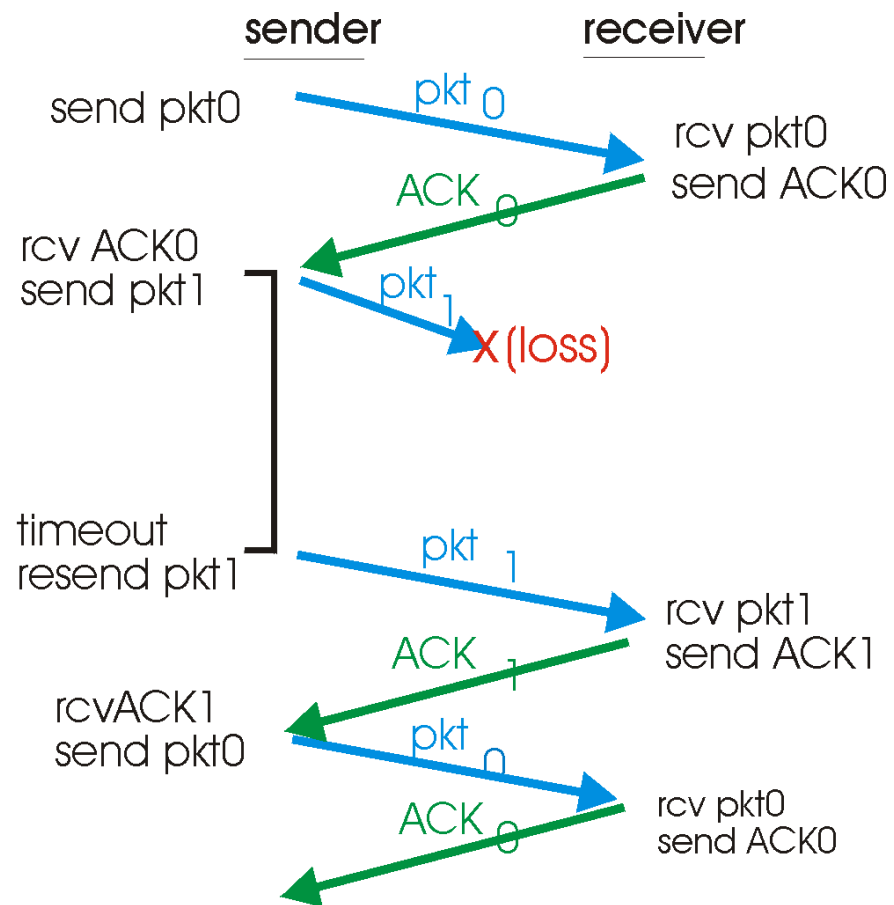
Rdt 3.0发送方FSM



Rdt 3.0示例(1)



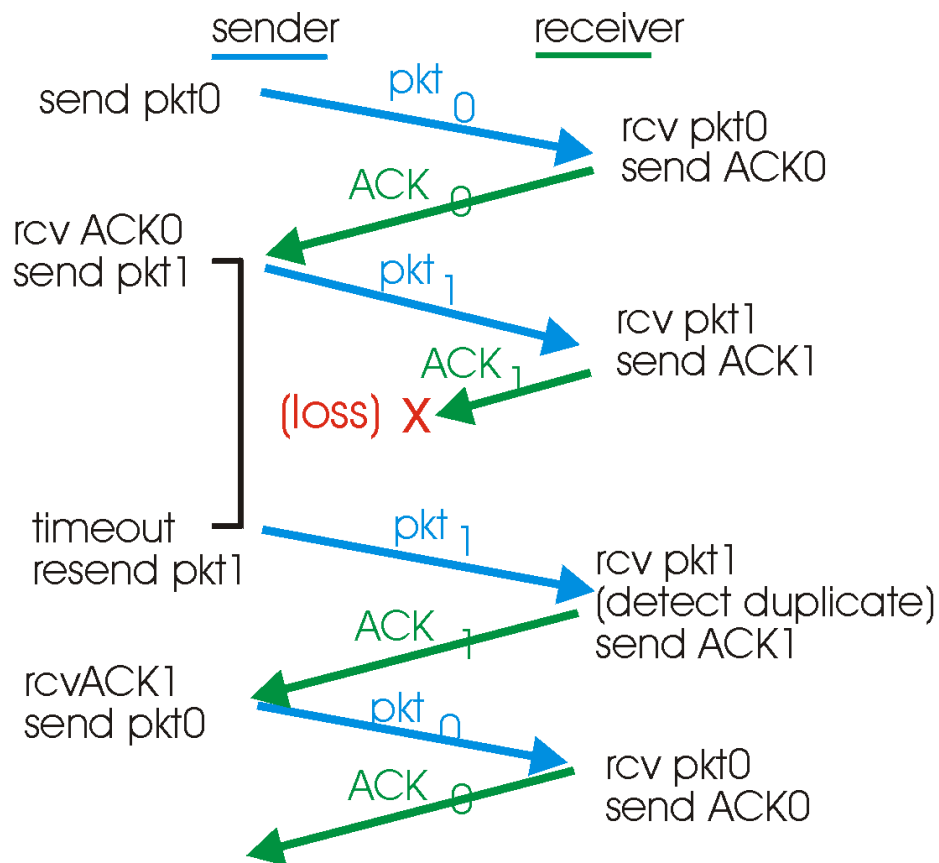
(a) operation with no loss



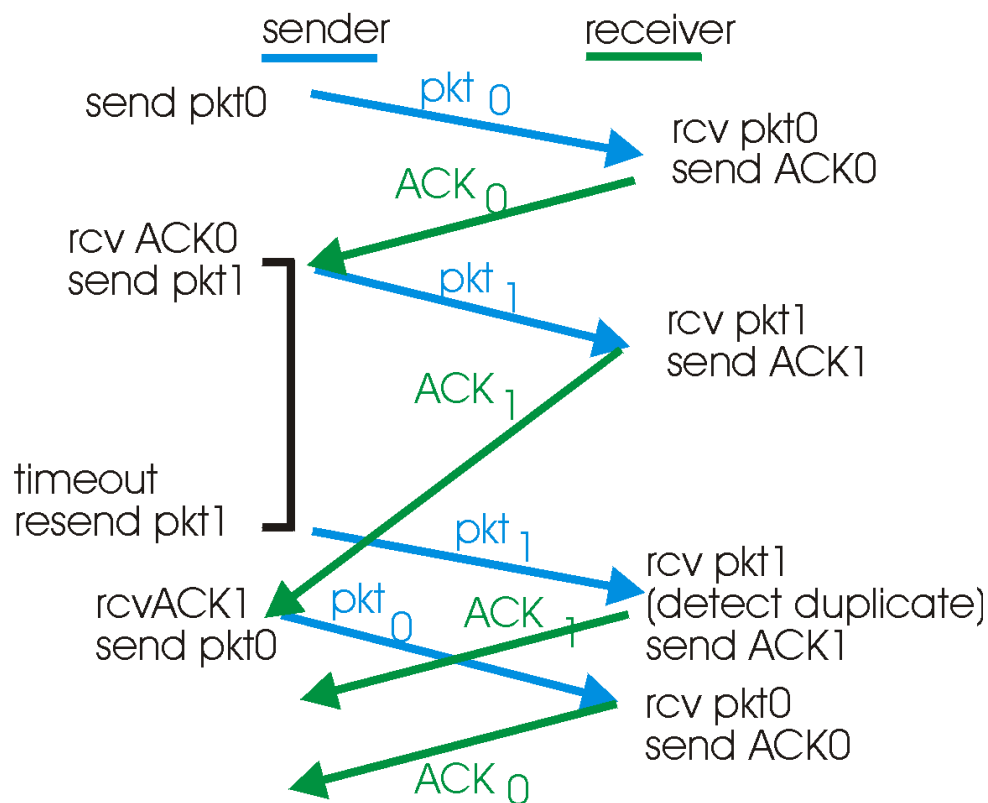
(b) lost packet



Rdt 3.0示例(2)



(c) lost ACK



(d) premature timeout



Rdt 3.0性能分析

- ❖ Rdt 3.0能够正确工作，但性能很差
- ❖ 示例：1Gbps链路，15ms端到端传播延迟，1KB分组

$$T_{\text{transmit}} = \frac{L \text{ (packet length in bits)}}{R \text{ (transmission rate, bps)}} = \frac{8\text{kb/pkt}}{10^9 \text{ b/sec}} = 8 \text{ microsec}$$

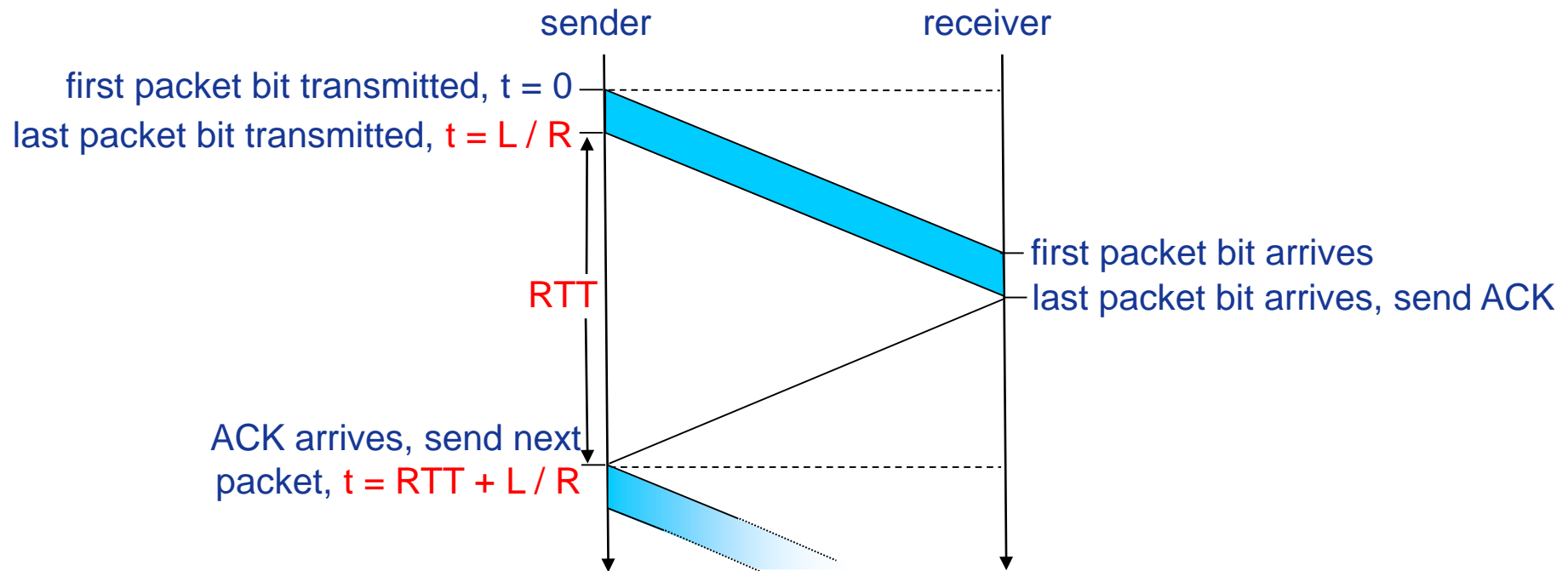
- 发送方利用率：发送方发送时间百分比

$$U_{\text{sender}} = \frac{L / R}{RTT + L / R} = \frac{.008}{30.008} = 0.00027$$

- 在1Gbps链路上每30毫秒才发送一个分组 → 33KB/sec
- 网络协议限制了物理资源的利用



Rdt 3.0: 停等操作

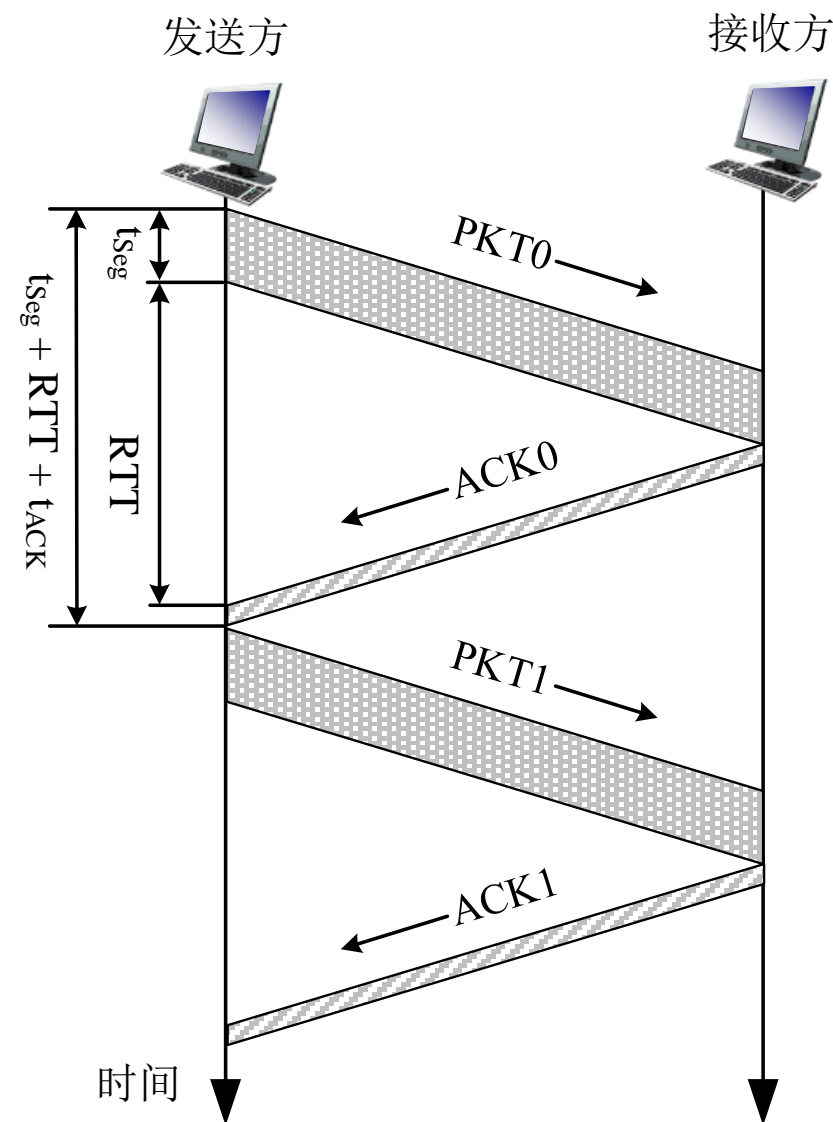


$$U_{\text{sender}} = \frac{L/R}{RTT + L/R} = \frac{.008}{30.008} = 0.00027$$



停等协议的信道利用率

$$U_{\text{Stop-Wait}} = \frac{t_{\text{seg}}}{t_{\text{seg}} + RTT + t_{\text{ACK}}}$$



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

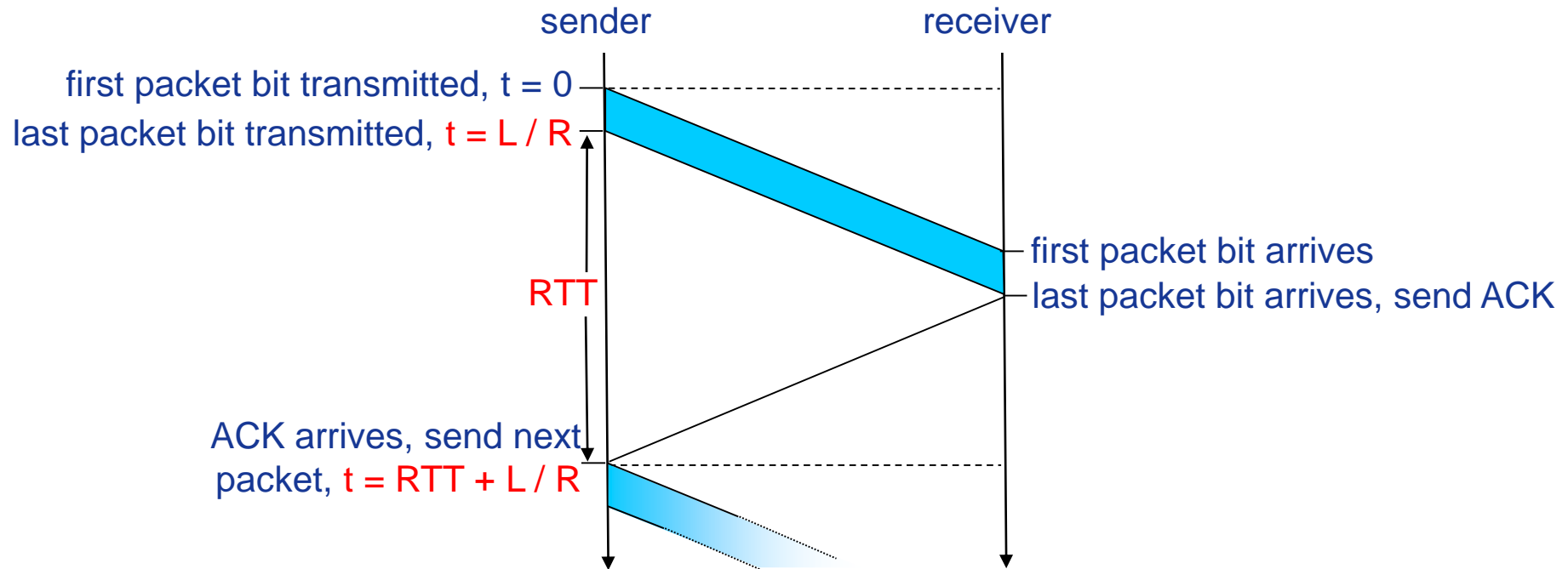
拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



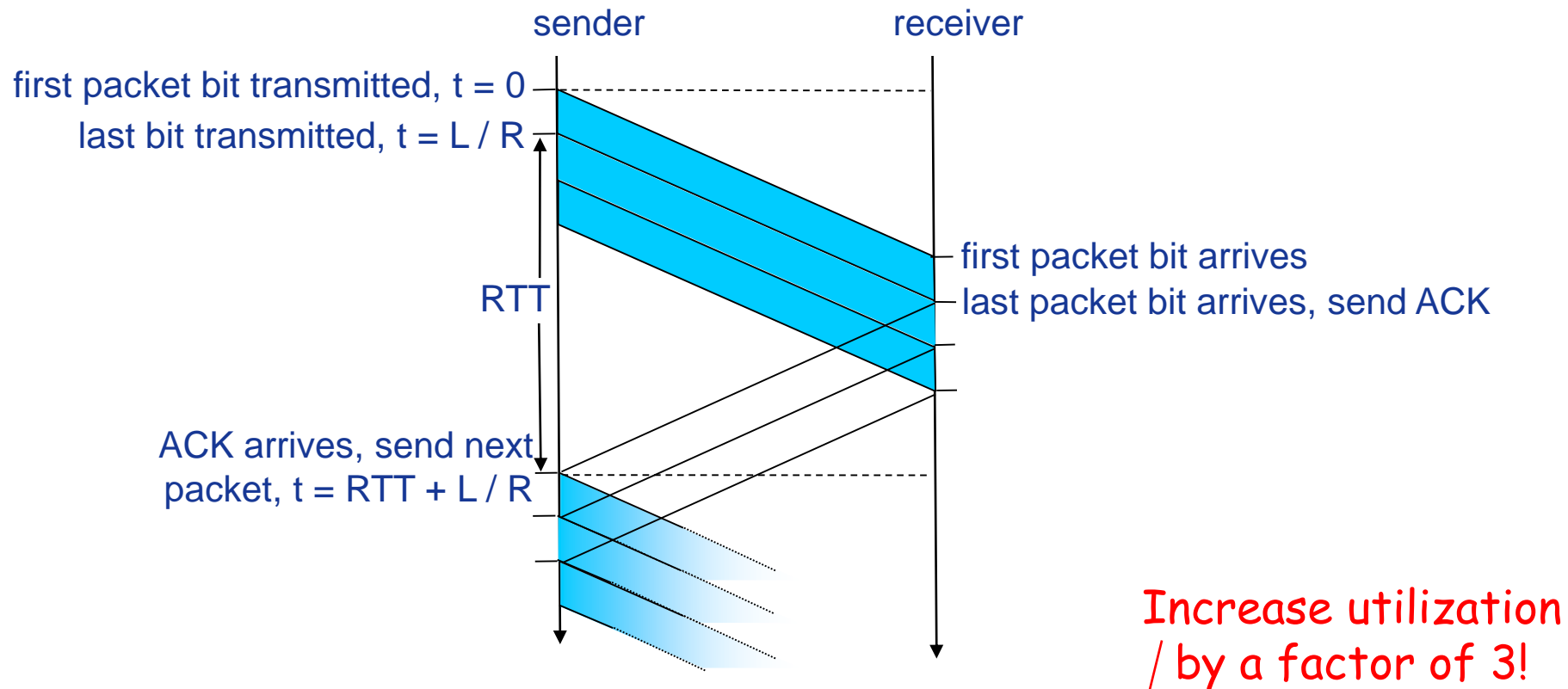
Rdt 3.0: 停等操作



$$U_{\text{sender}} = \frac{L / R}{RTT + L / R} = \frac{.008}{30.008} = 0.00027$$



流水线机制：提高资源利用率

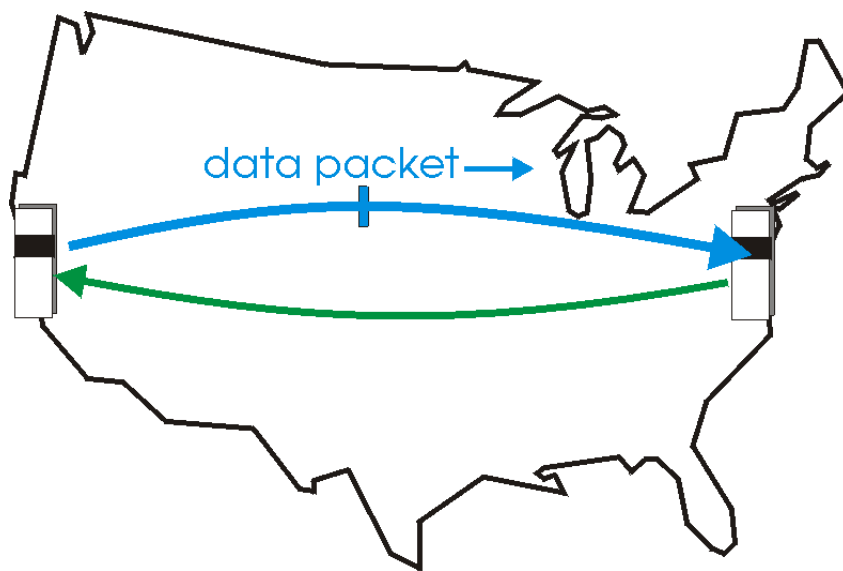


$$U_{\text{sender}} = \frac{3 * L / R}{RTT + L / R} = \frac{.024}{30.008} = 0.0008$$

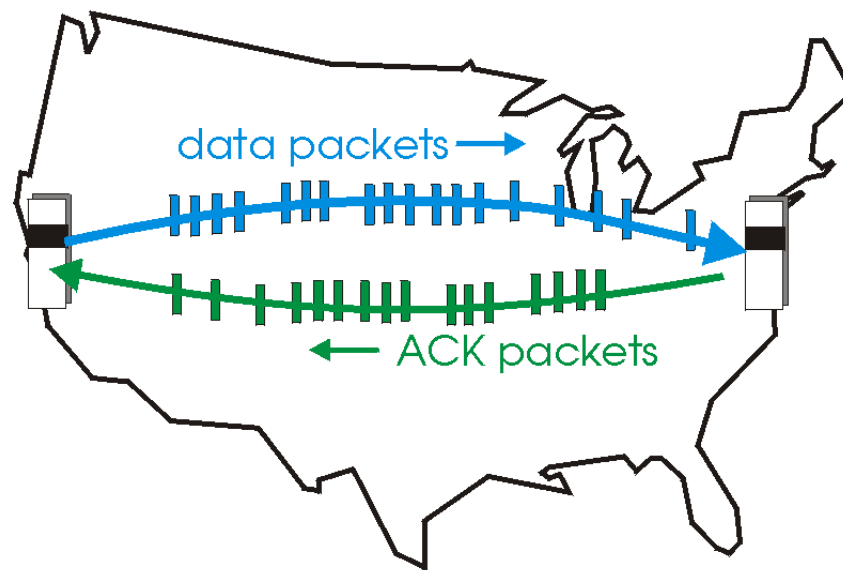


流水线协议

- ❖ 允许发送方在收到ACK之前连续发送多个分组
 - 更大的**序列号范围**
 - 发送方和/或接收方需要更大的存储空间以**缓存分组**

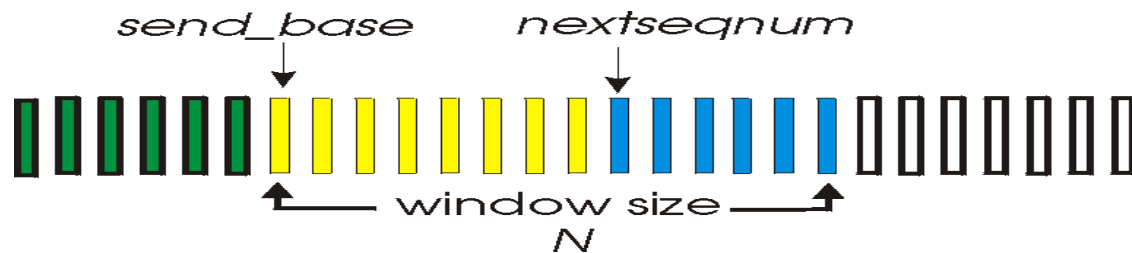


(a) a stop-and-wait protocol in operation



(b) a pipelined protocol in operation

滑动窗口协议



❖ 滑动窗口协议: Sliding-window protocol

❖ 窗口

- 允许使用的序列号范围
- 窗口尺寸为N: 最多有N个等待确认的消息

❖ 滑动窗口

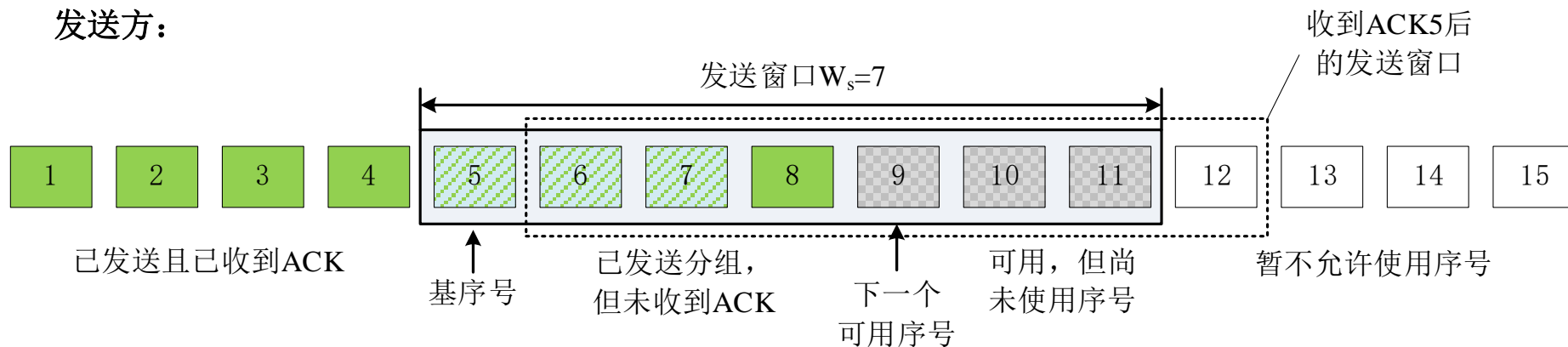
- 随着协议的运行, 窗口在序列号空间内向前滑动

❖ 滑动窗口协议: GBN, SR

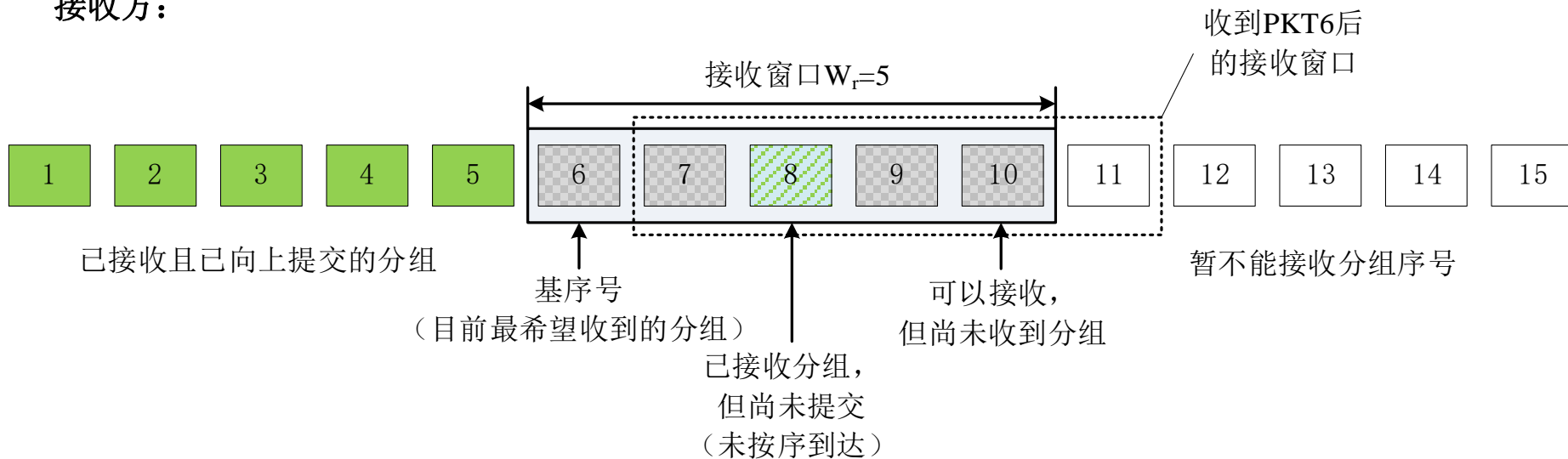


滑动窗口协议

发送方:



接收方:



滑动窗口协议的信道利用率

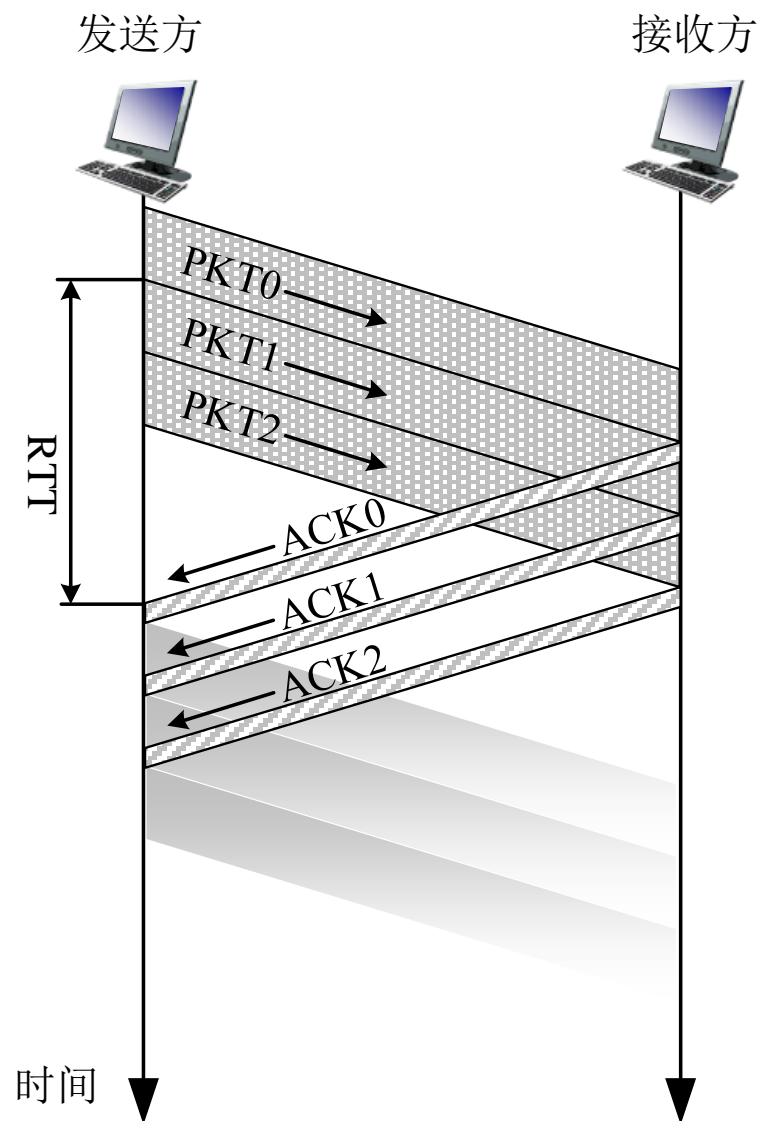
$$U = \frac{W_s \times t_{seg}}{t_{seg} + RTT + t_{ACK}}$$



$$U = \frac{W_s \times L/R}{L/R + 2dp + L'/R}$$



$$U = \frac{W_s \times L}{L + 2dpR + L'}$$



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- **GBN协议**
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

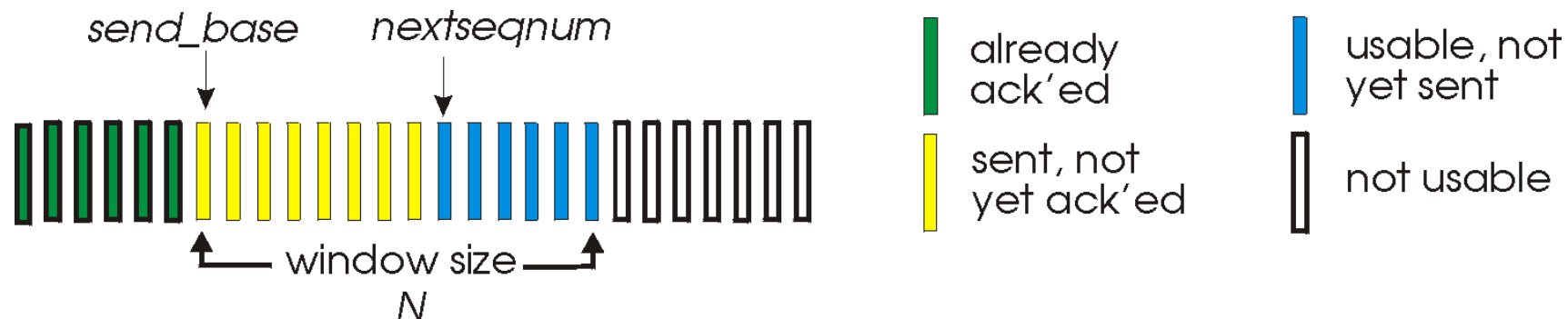
- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



Go-Back-N(GBN)协议：发送方

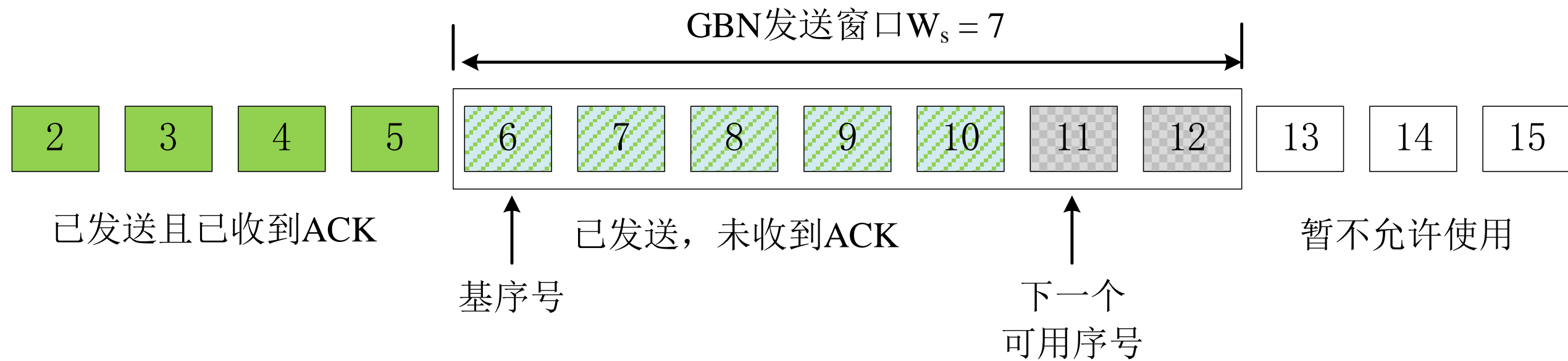
- ❖ 分组头部包含k-bit序列号
- ❖ 窗口尺寸为N，最多允许N个分组未确认



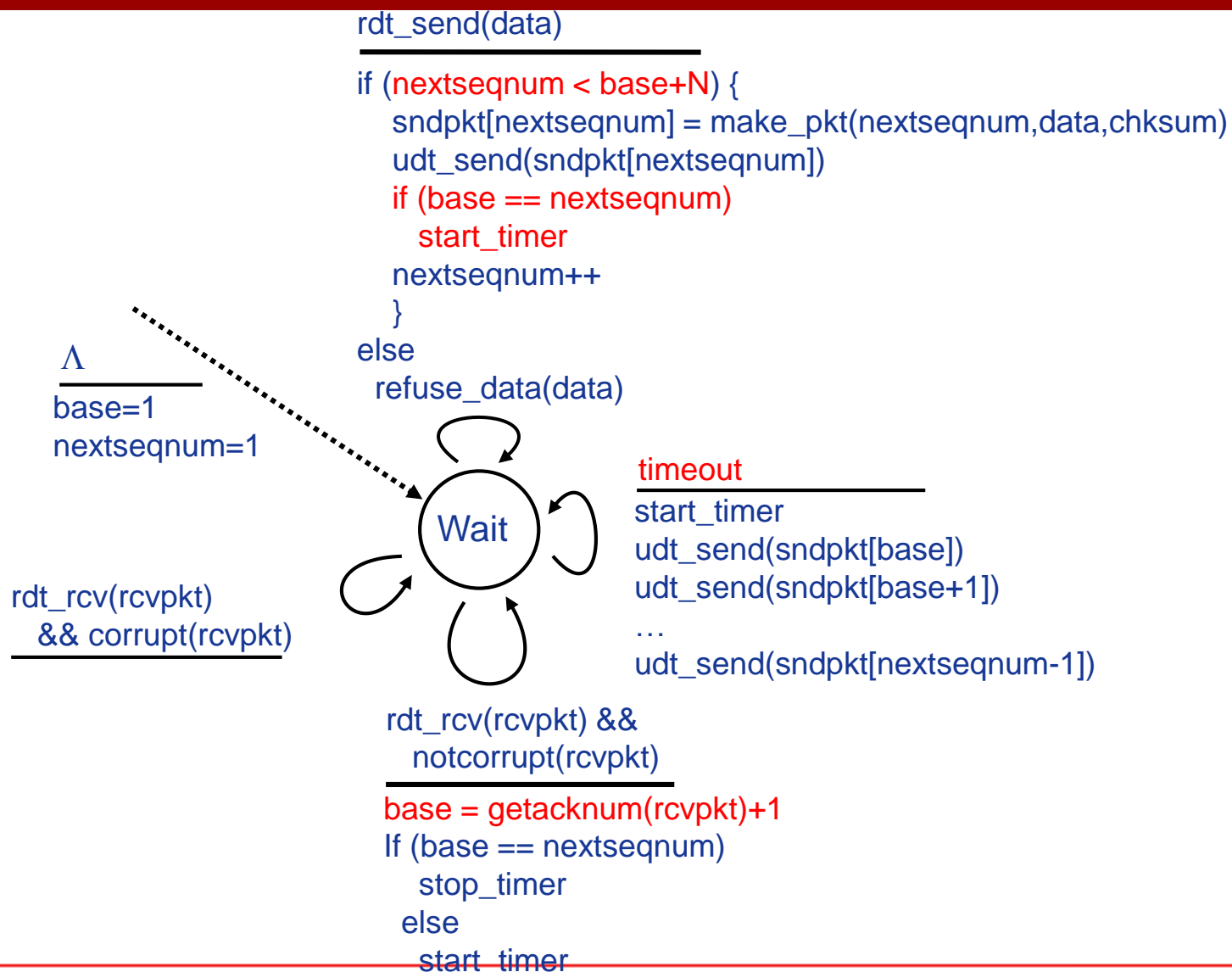
- ❖ ACK(n): 确认到序列号n(包含n)的分组均已被正确接收
 - 累计确认
 - 可能收到重复ACK
- ❖ 为空中的分组设置计时器(timer)
- ❖ 超时Timeout(n)事件: 重传序列号大于等于n, 还未收到ACK的所有分组



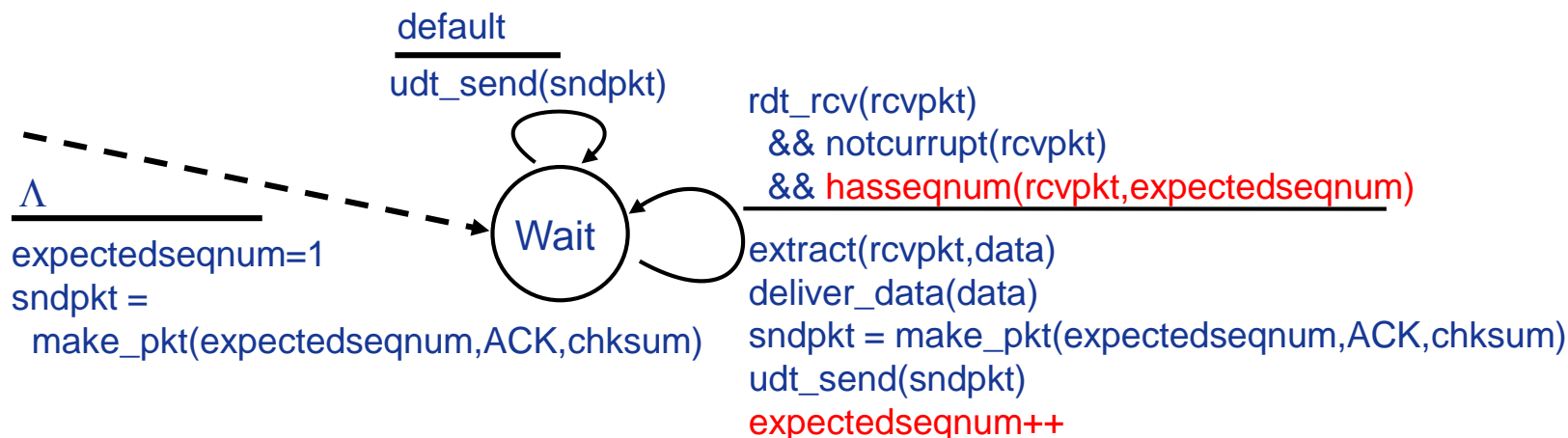
Go-Back-N(GBN)协议：发送方



GBN: 发送方扩展FSM



GBN: 接收方扩展FSM



❖ ACK机制: 发送拥有最高序列号的、已被正确接收的分组的ACK

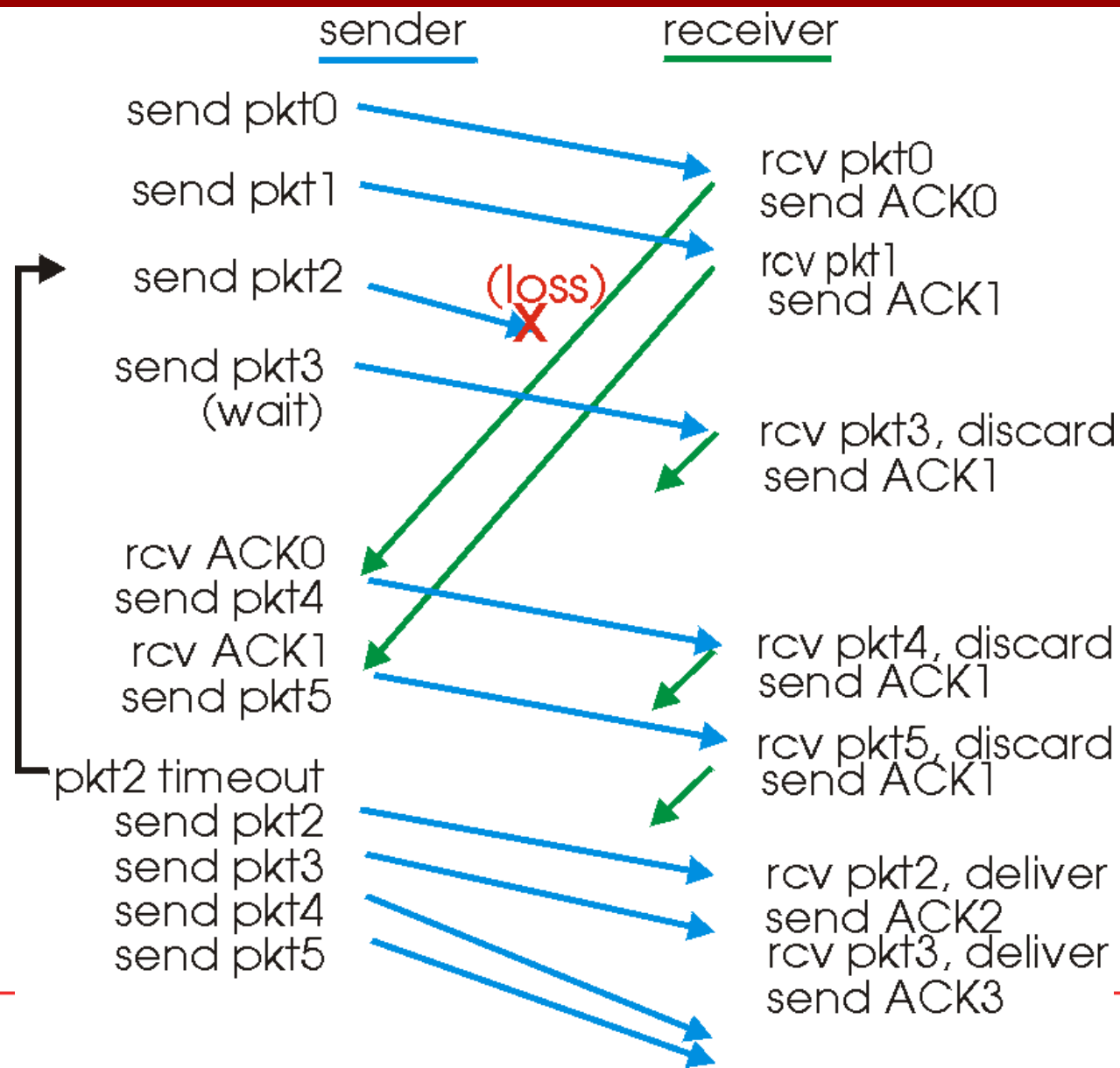
- 可能产生重复ACK
- 只需要记住唯一的**expectedseqnum**

❖ 乱序到达的分组:

- 直接丢弃→接收方没有缓存
- 重新确认序列号最大的、按序到达的分组



GBN示例



例题1

数据链路层采用后退N帧（GBN）协议，发送方已经发送了编号为0~7的帧。当计时器超时时，若发送方只收到0、2、3号帧的确认，则发送方需要重发的帧数是多少？分别是那几个帧？

【解】 根据GBN协议工作原理，GBN协议的确认是累积确认，所以此时发送端需要重发的帧数是4个，依次分别是4、5、6、7号帧。



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- **SR协议**

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



Selective Repeat协议

❖ GBN有什么缺陷？

❖ SR协议：

❖ 接收方对每个分组单独进行确认

- 设置缓存机制，缓存乱序到达的分组

❖ 发送方只重传那些没收到ACK的分组

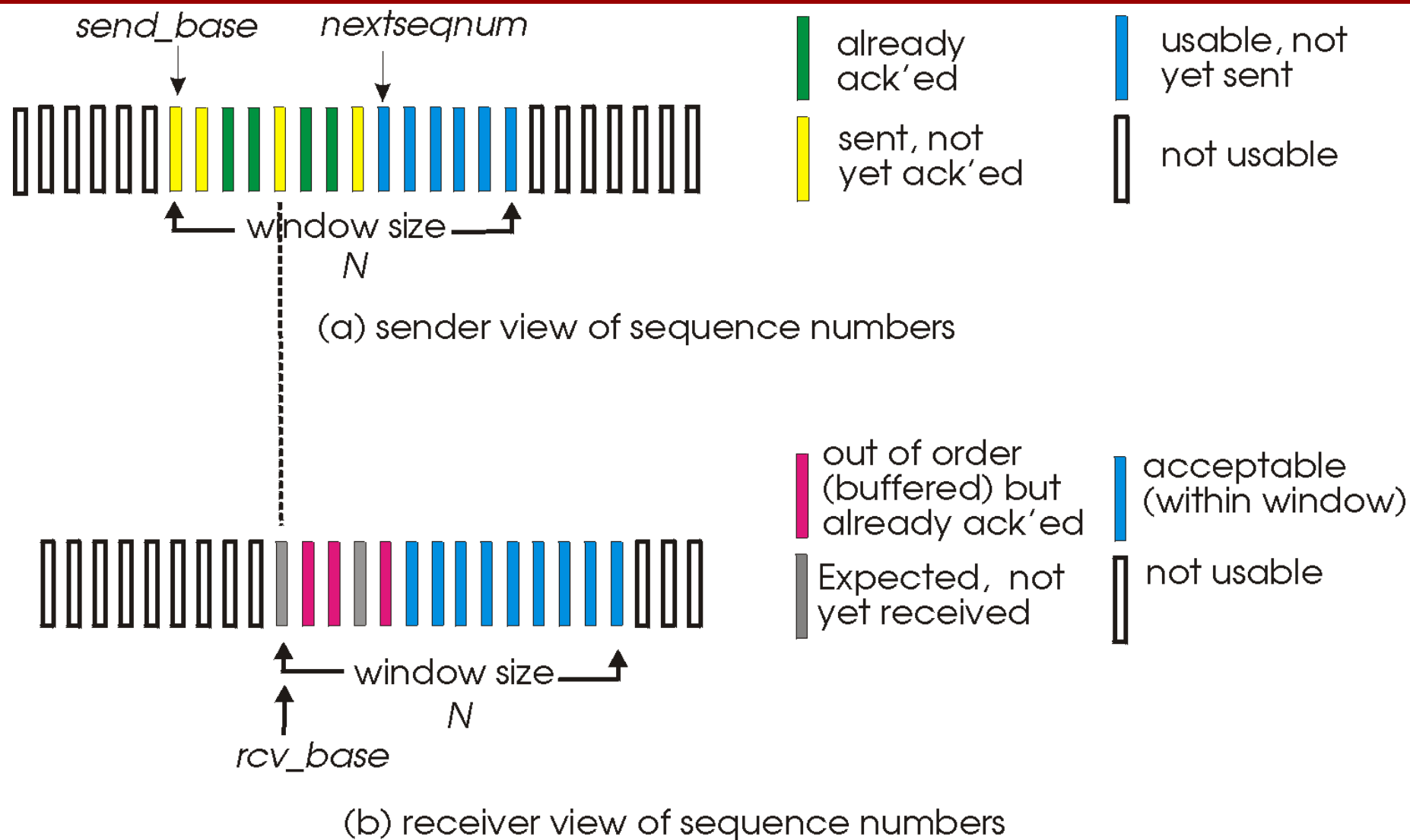
- 为每个分组设置定时器

❖ 发送方窗口


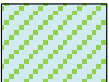


- N个连续的序列号
- 限制已发送且未确认的分组

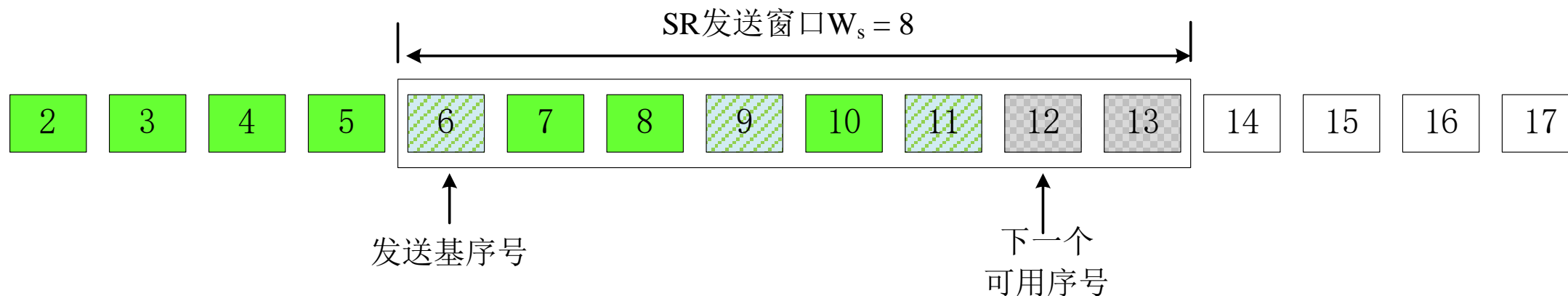





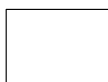
Selective Repeat: 发送方/接收方窗口

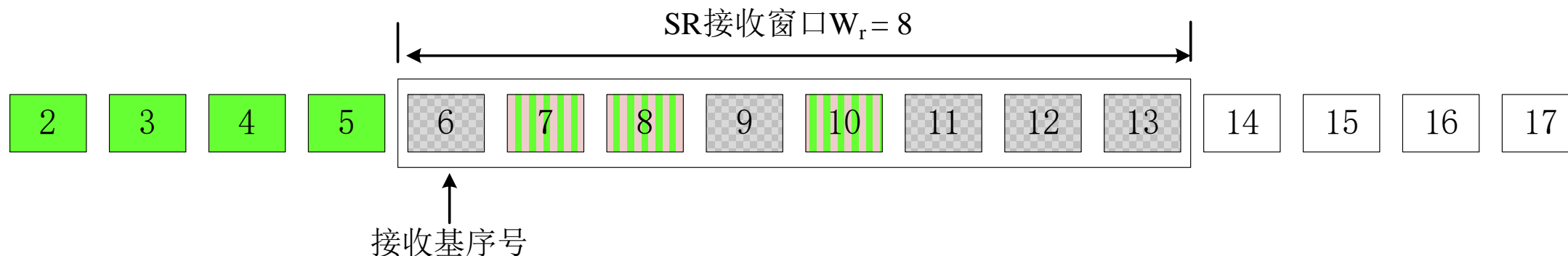


Selective Repeat: 发送方/接收方窗口

发送方:  已发送且已收到ACK  已发送, 未收到ACK  可用序号  不可用序号



接收方:  已经接收, 并已提交  已接收, 并已确认, 但暂不能提交  可以接收  暂不能接收



SR协议

—sender—

data from above :

- ❖ if next available seq # in window, send pkt

timeout(n):

- ❖ resend pkt n, restart timer

ACK(n) in [sendbase,sendbase+N]:

- ❖ mark pkt n as received
- ❖ if n smallest unACKed pkt, advance window base to next unACKed seq #

—receiver—

pkt n in [rcvbase, rcvbase+N-1]

- ❑ send ACK(n)
- ❑ out-of-order: buffer
- ❑ in-order: deliver (also deliver buffered, in-order pkts), advance window to next not-yet-received pkt

pkt n in [rcvbase-N,rcvbase-1]

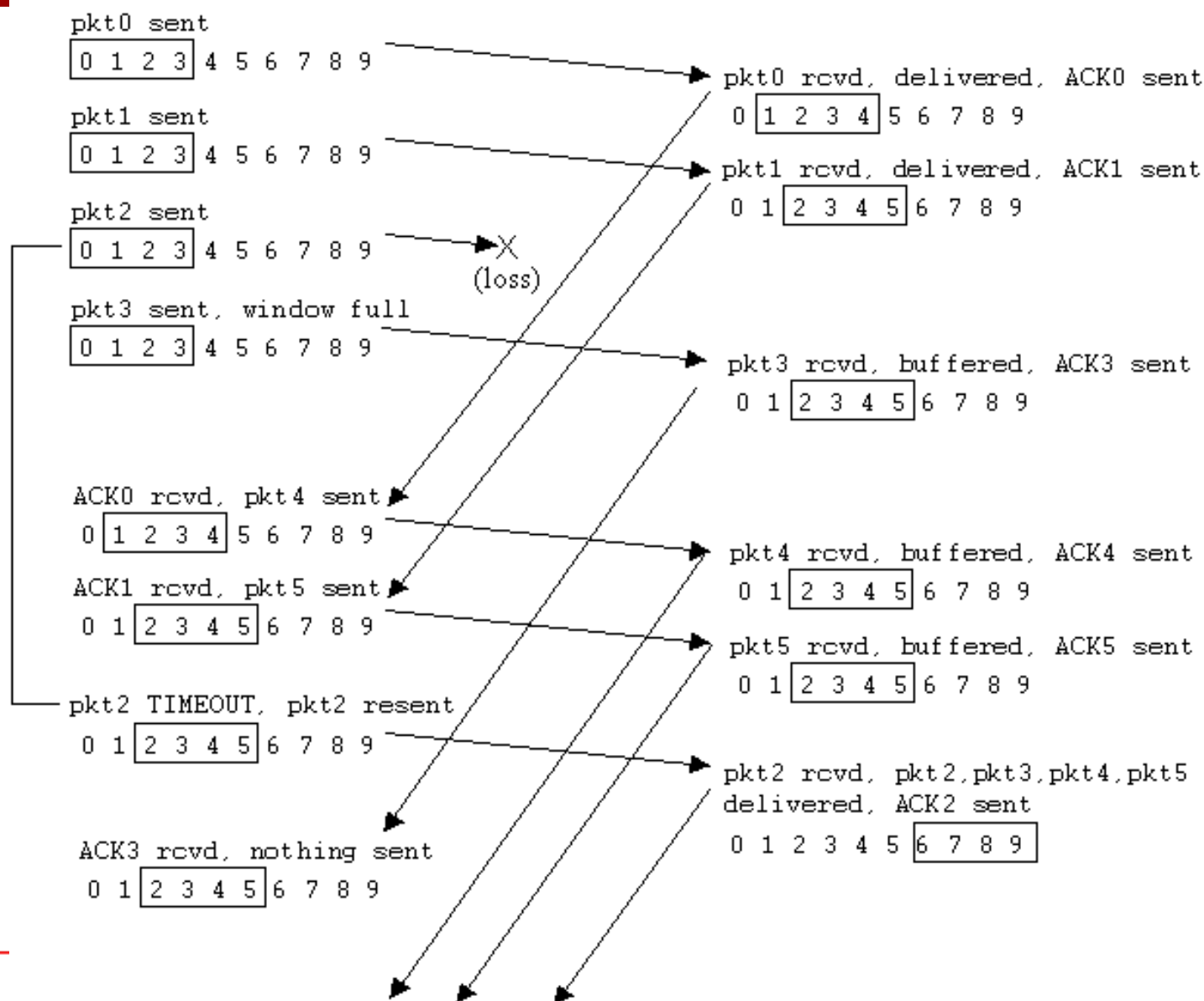
- ❑ ACK(n)

otherwise:

- ❑ ignore

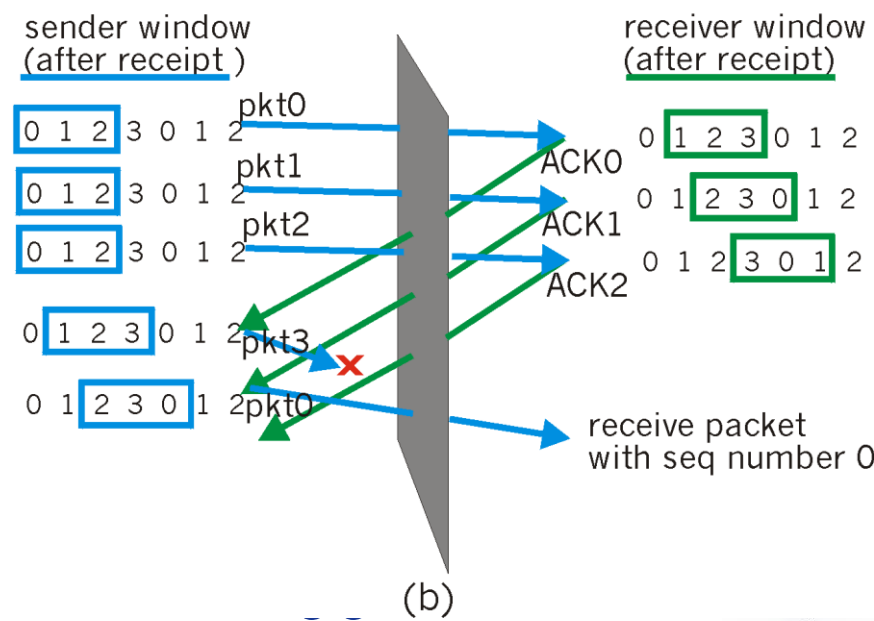
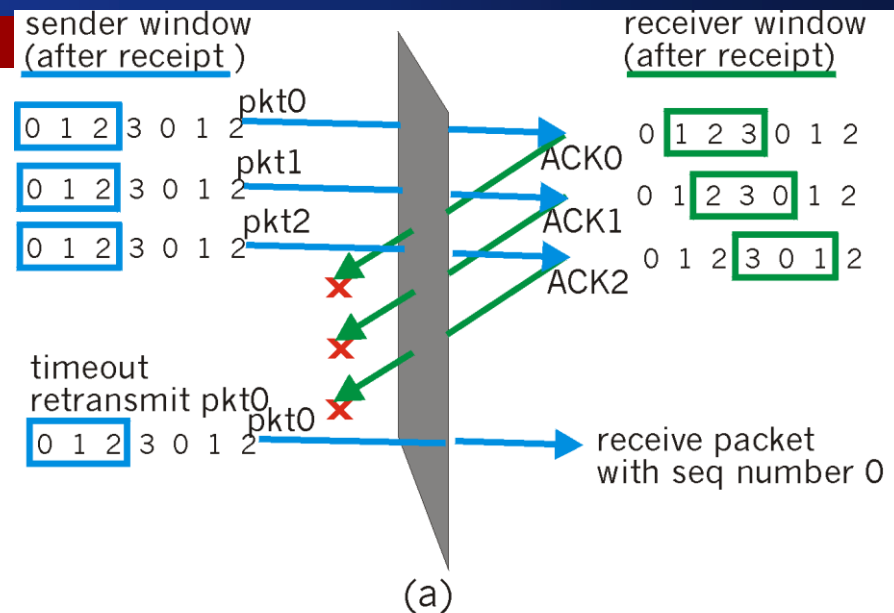


SR协议示例



SR协议：困境

- ❖ 序列号: 0, 1, 2, 3
- ❖ 窗口尺寸: 3
- ❖ 接收方能区分开右侧两种不同的场景吗?
- ❖ (a)中, 发送方重发分组0, 接收方收到后会如何处理?



窗口大小与序列号的约束条件?

❖ 问题：序列号空间大小与窗口尺寸需满足什么关系？

$$W_s + W_r \leq 2^k$$

■ W_s 发送窗口, W_r 接收窗口, k 序号位数

❖ 对于GBN协议: $W_r=1$

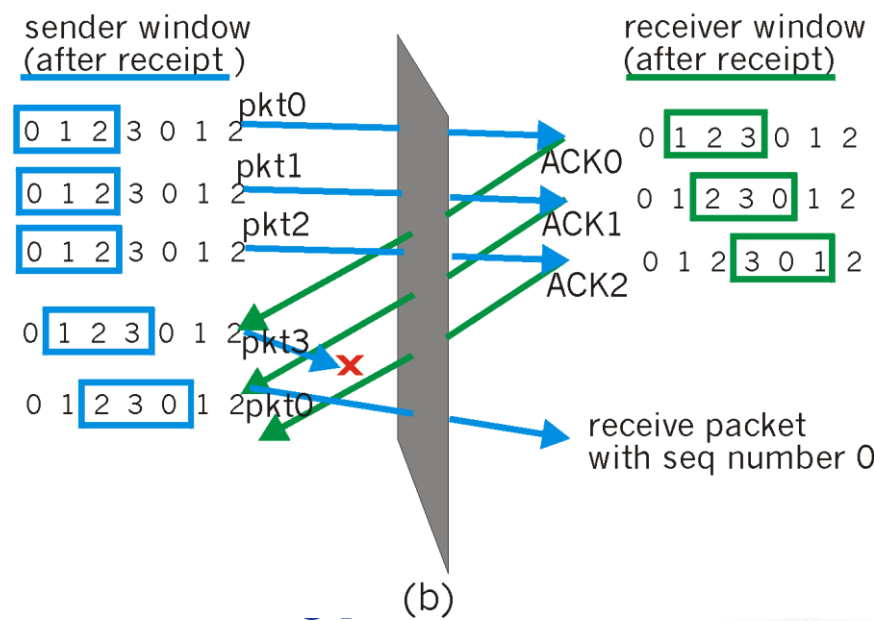
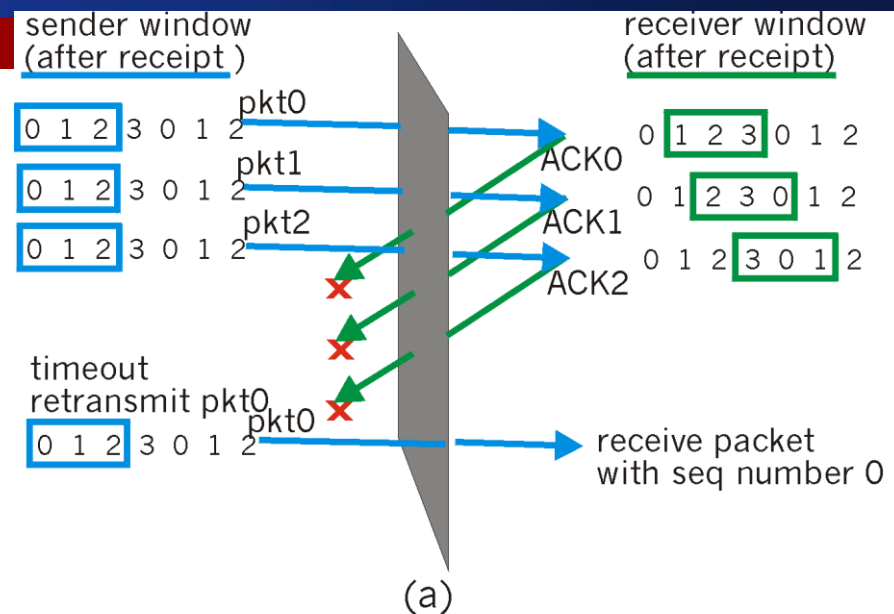
$$W_s \leq 2^k - 1$$

❖ 对于典型的 $W_s=W_r=W$ 的SR协议

$$W_s \leq 2^{k-1}$$

❖ 对于停-等协议, 即 $W_s=W_r=1$

$$k \geq 1$$



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



TCP概述: RFCs-793, 1122, 1323, 2018, 2581

❖ 点对点

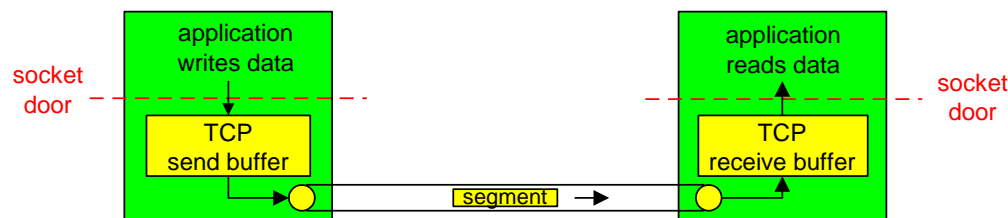
- 一个发送方，一个接收方

❖ 可靠的、按序的字节流

❖ 流水线机制

- TCP拥塞控制和流量控制机制
设置窗口尺寸

❖ 发送方/接收方缓存



❖ 全双工(full-duplex)

- 同一连接中能够传输双向数据流

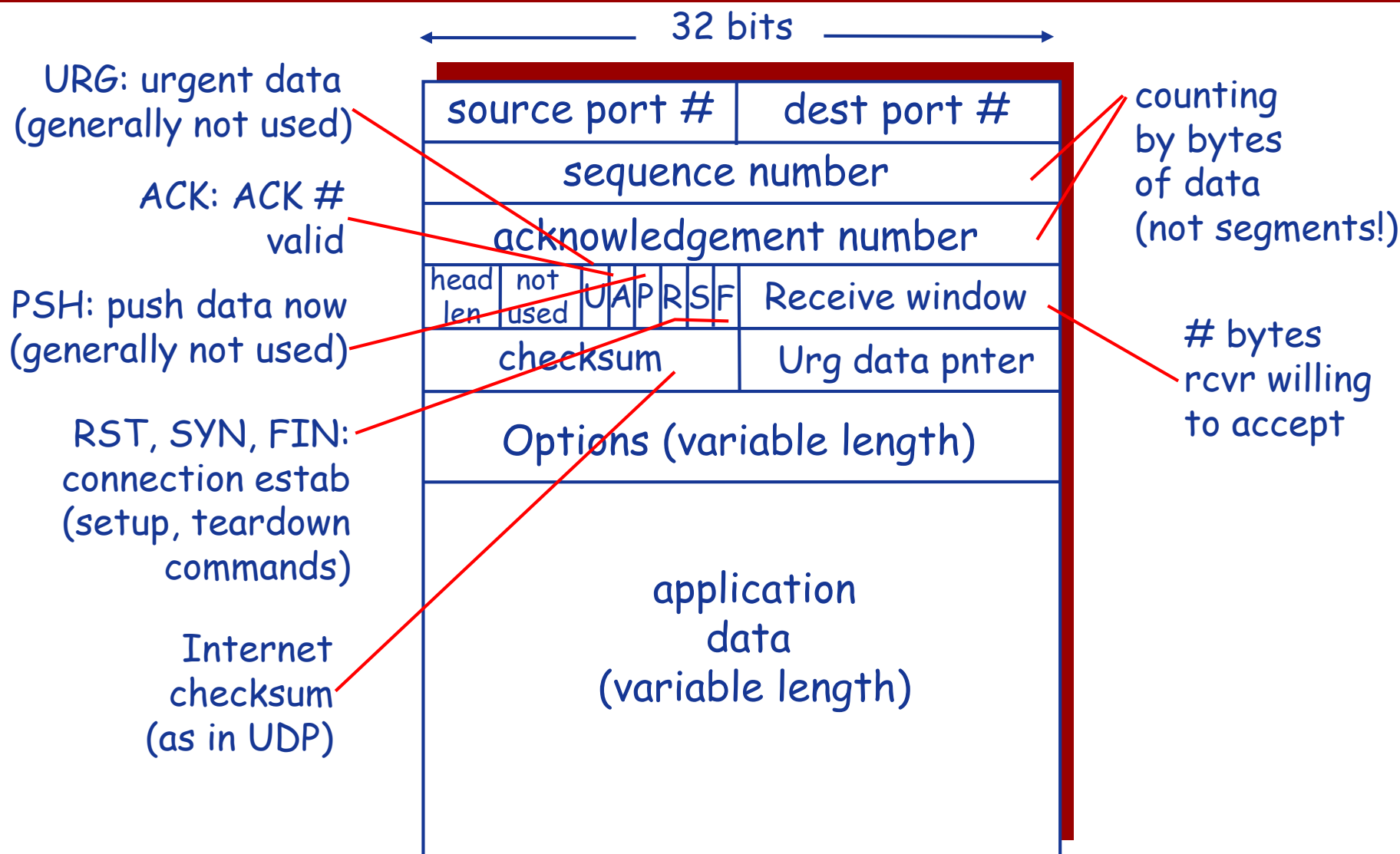
❖ 面向连接

- 通信双方在发送数据之前必须建立连接。
- 连接状态只在连接的两端中维护，在沿途节点中并不维护状态。
- TCP连接包括：两台主机上的缓存、连接状态变量、socket等

❖ 流量控制机制



TCP段结构



TCP: 序列号和ACK

序列号:

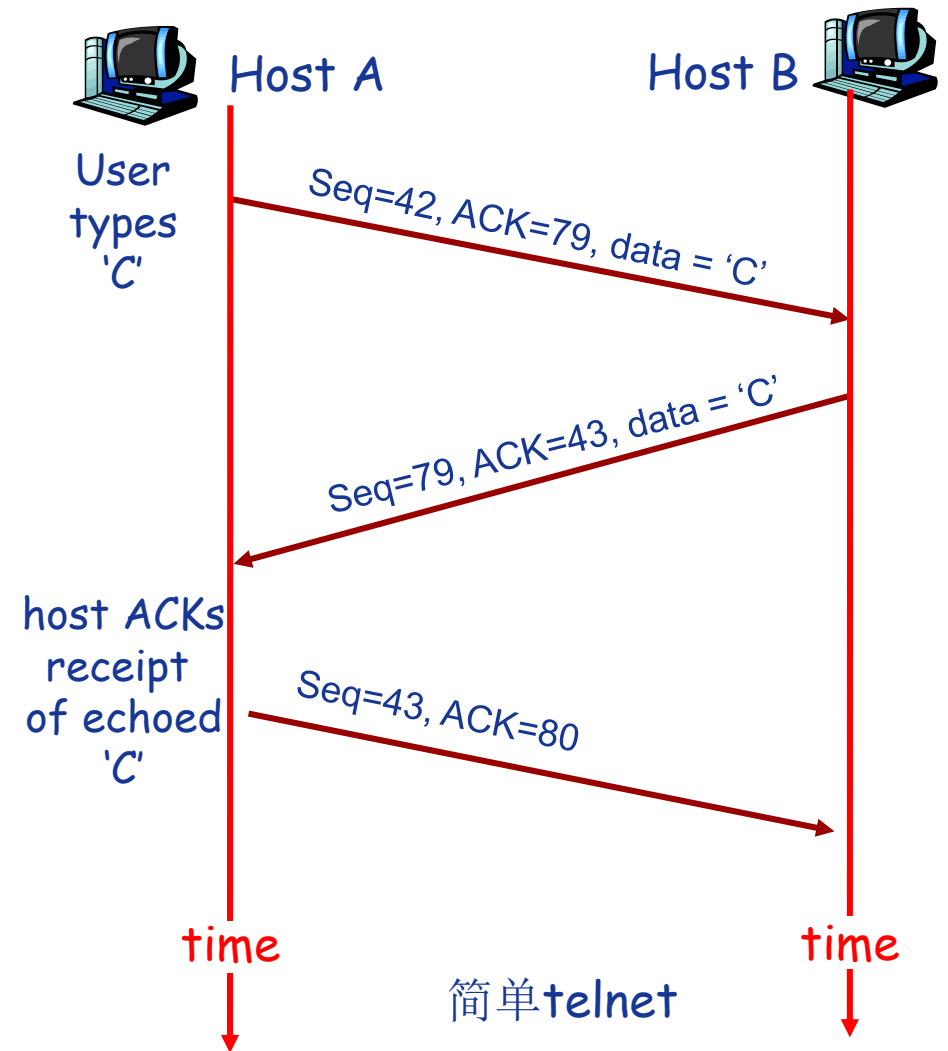
- 序列号指的是segment中第一个字节的编号，而不是segment的“连续”编号
- 建立TCP连接时，双方随机选择序列号

ACKs:

- 希望接收到的下一个字节的序列号
- 累计确认: 该序列号之前的所有字节均已被正确接收到

Q: 接收方如何处理乱序到达的Segment?

- A: TCP规范中没有规定，由TCP的实现者做出决策



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- **TCP可靠数据传输**
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



TCP可靠数据传输概述

❖ TCP在IP层提供的不可靠服务基础上实现可靠数据传输服务

❖ 流水线机制

❖ 累积确认

❖ TCP使用单一重传定时器

❖ 触发重传的事件

- 超时
- 收到重复ACK

❖ 渐进式

- 暂不考虑重复ACK
- 暂不考虑流量控制
- 暂不考虑拥塞控制



TCP RTT和超时

❖ **问题：**如何设置定时器的超时时间？

❖ 大于RTT

- 但是RTT是变化的

❖ 过短：

- 不必要的重传

❖ 过长：

- 对段丢失时间反应慢

❖ **问题：**如何估计RTT？

❖ SampleRTT: 测量从段发出去到收到ACK的时间

- 忽略重传

❖ SampleRTT变化

- 测量多个SampleRTT，求平均值，形成RTT的估计值EstimatedRTT

$$\text{EstimatedRTT} = (1 - \alpha) * \text{EstimatedRTT} + \alpha * \text{SampleRTT}$$

指数加权移动平均

α 典型值：0.125



TCP RTT和超时

定时器超时时间的设置:

- EstimatedRTT + “安全边界”
- EstimatedRTT变化大→较大的边界

测量RTT的变化值: SampleRTT与EstimatedRTT的差值

$$\text{DevRTT} = (1 - \beta) * \text{DevRTT} + \beta * |\text{SampleRTT} - \text{EstimatedRTT}|$$

(typically, $\beta = 0.25$)

定时器超时时间的设置:

$$\text{TimeoutInterval} = \text{EstimatedRTT} + 4 * \text{DevRTT}$$



TCP发送方事件

❖ 从应用层收到数据

- 创建Segment
- 序列号是Segment第一个字节的编号
- 开启计时器
- 设置超时时间:
TimeoutInterval

❖ 超时

- 重传引起超时的Segment
- 重启定时器

❖ 收到ACK

- 如果确认此前未确认的Segment
 - 更新SendBase
 - 如果窗口中还有未被确认的分组，重新启动定时器



```
NextSeqNum = InitialSeqNum  
SendBase = InitialSeqNum
```

```
loop (forever) {  
    switch(event)
```

```
    event: data received from application above  
        create TCP segment with sequence number NextSeqNum  
        if (timer currently not running)  
            start timer  
        pass segment to IP  
        NextSeqNum = NextSeqNum + length(data)
```

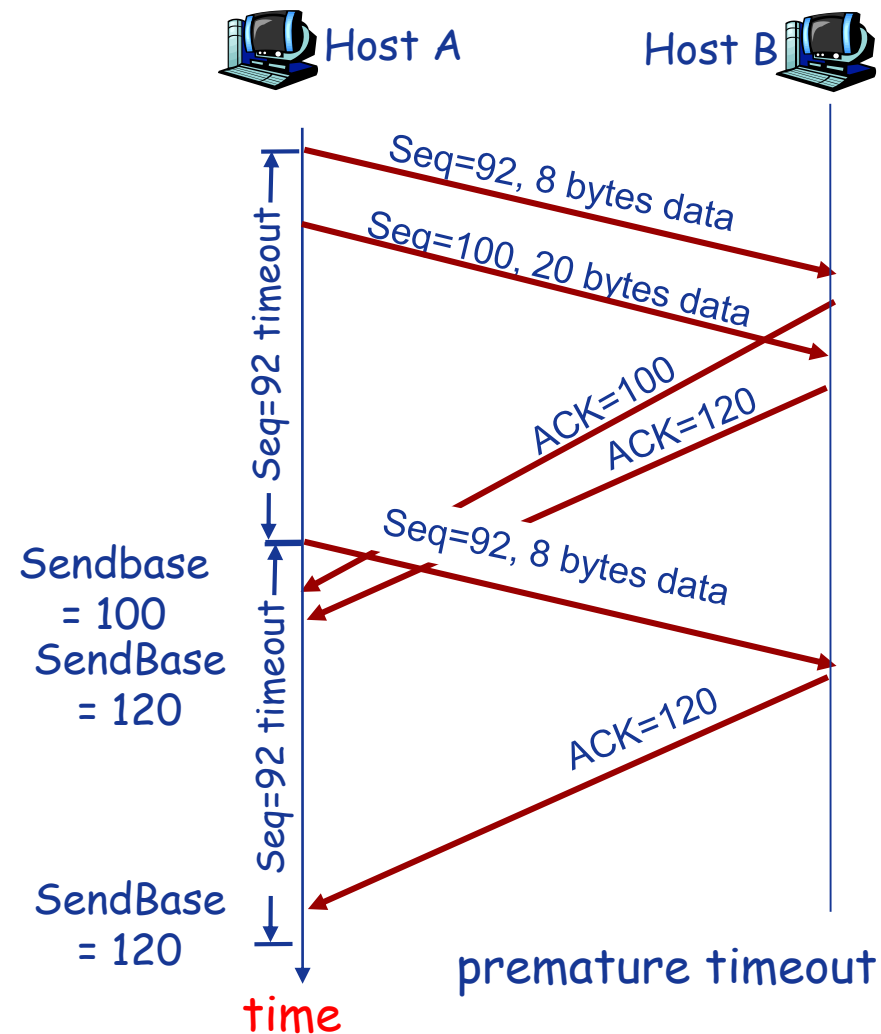
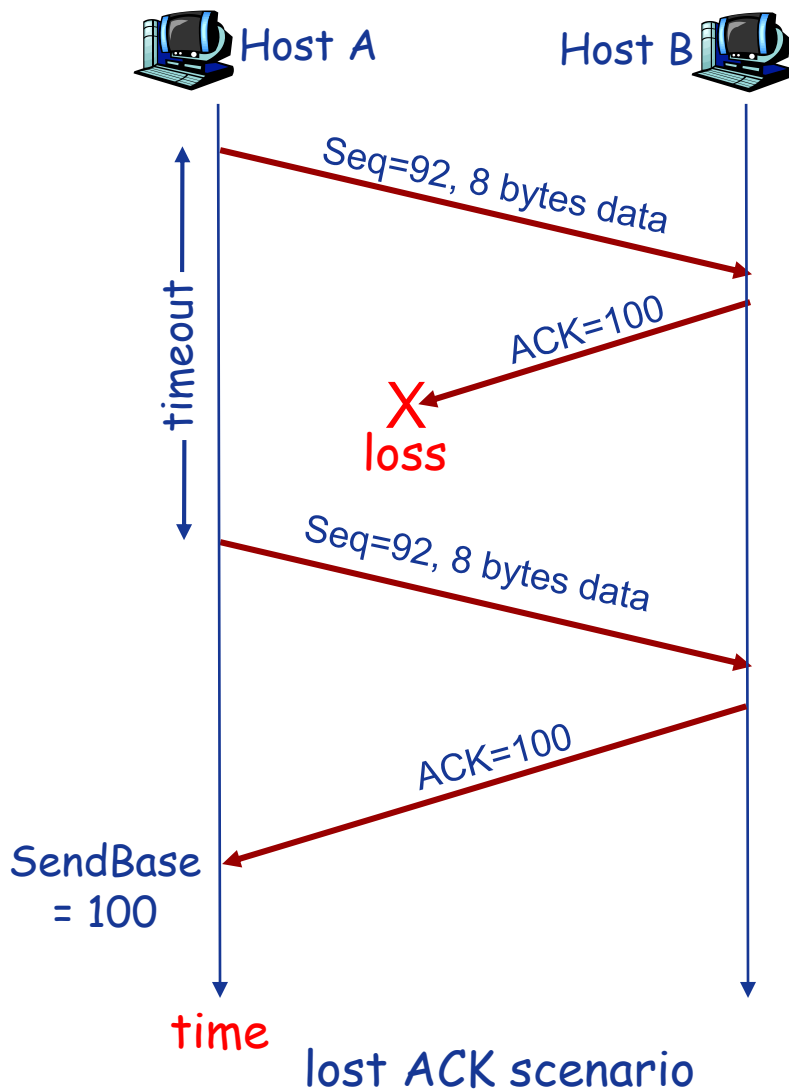
```
    event: timer timeout  
        retransmit not-yet-acknowledged segment with  
            smallest sequence number  
        start timer
```

```
    event: ACK received, with ACK field value of y  
        if (y > SendBase) {  
            SendBase = y  
            if (there are currently not-yet-acknowledged segments)  
                start timer  
        }
```

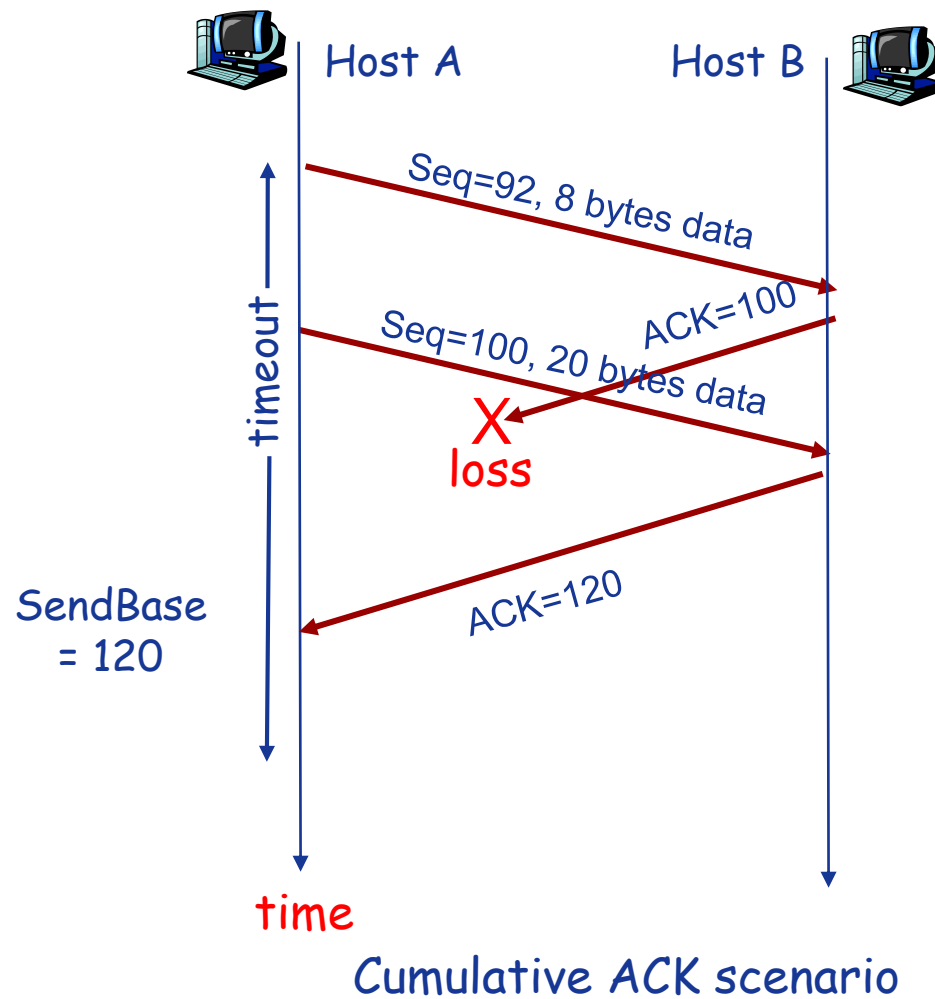
```
} /* end of loop forever */
```



TCP重传示例



TCP重传示例



TCP ACK生成: RFC 1122, RFC 2581

Event at Receiver	TCP Receiver action
Arrival of in-order segment with expected seq #. All data up to expected seq # already ACKed	Delayed ACK. Wait up to 500ms for next segment. If no next segment, send ACK
Arrival of in-order segment with expected seq #. One other segment has ACK pending	Immediately send single cumulative ACK, ACKing both in-order segments
Arrival of out-of-order segment higher-than-expect seq. # . Gap detected	Immediately send <i>duplicate ACK</i> , indicating seq. # of next expected byte
Arrival of segment that partially or completely fills gap	Immediate send ACK, provided that segment starts at lower end of gap



快速重传机制

❖ TCP的实现中，如果发生超时，超时时间间隔将重新设置，即将超时时间间隔加倍，导致其**很大**

- 重发丢失的分组之前要等待很长时间

❖ 通过重复ACK检测分组丢失

- Sender会背靠背地发送多个分组
- 如果某个分组丢失，可能会引发多个重复的ACK

❖ 如果sender收到对同一数据的3个ACK，则假定该数据之后的段已经丢失

- **快速重传**：在定时器超时之前即进行重传



快速重传算法

```
event: ACK received, with ACK field value of y
    if (y > SendBase) {
        SendBase = y
        if (there are currently not-yet-acknowledged segments)
            start timer
    }
    else {
        increment count of dup ACKs received for y
        if (count of dup ACKs received for y = 3) {
            resend segment with sequence number y
        }
    }
```

a duplicate ACK for
already ACKed segment

fast retransmit



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

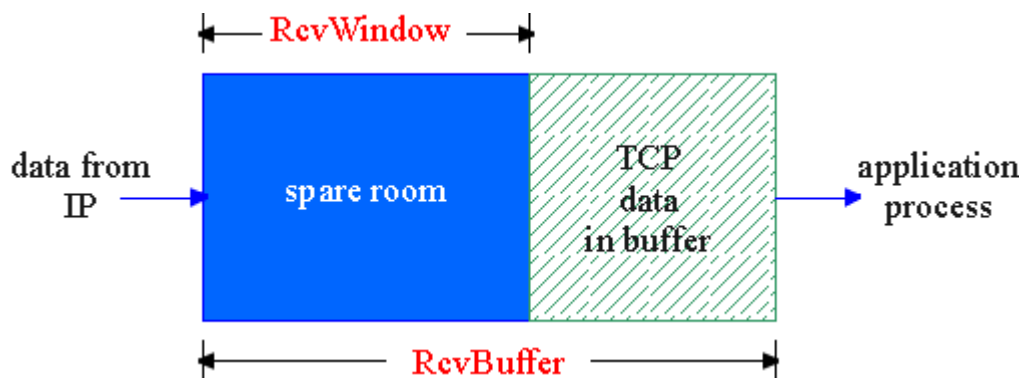
- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



TCP流量控制

❖ 接收方为TCP连接分配buffer



- ❑ 上层应用可能处理buffer中数据的速度较慢

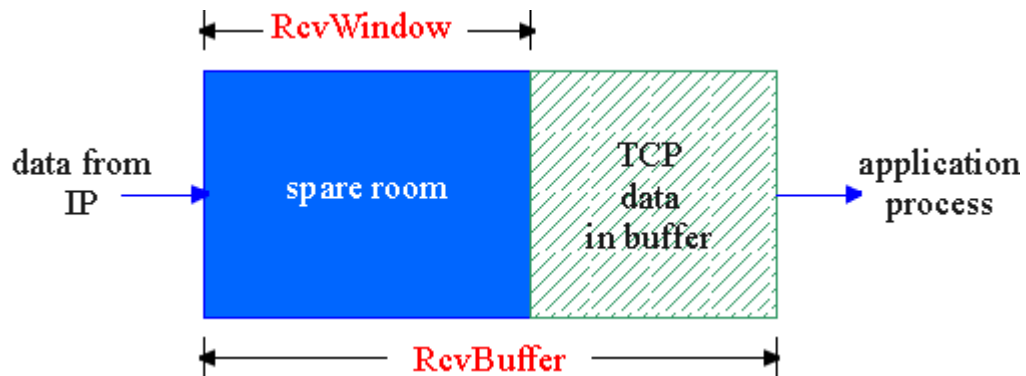
flow control

发送方不会传输的太多、
太快以至于淹没接收方
(buffer溢出)

❖ 速度匹配机制



TCP流量控制



(假定TCP receiver丢弃乱序的 segments)

❖ Buffer中的可用空间(spare room)

= RcvWindow

= $RcvBuffer - [LastByteRcvd - LastByteRead]$

❖ Receiver通过在Segment的头部字段将 **RcvWindow** 告诉Sender

❖ Sender限制自己已经发送的但还未收到ACK的数据不超过接收方的空闲 **RcvWindow** 尺寸

❖ Receiver告知Sender **RcvWindow=0**, 会出现什么情况?



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



TCP连接管理

❖ TCP sender和receiver在传输数据前需要建立连接

❖ 初始化TCP变量

- Seq. #
- Buffer和流量控制信息

❖ Client: 连接发起者

```
Socket clientSocket = new  
Socket("hostname", "port number");
```

❖ Server: 等待客户连接请求

```
Socket connectionSocket =  
welcomeSocket.accept();
```

Three way handshake:

Step 1: client host sends TCP SYN segment to server

- specifies initial seq #
- no data

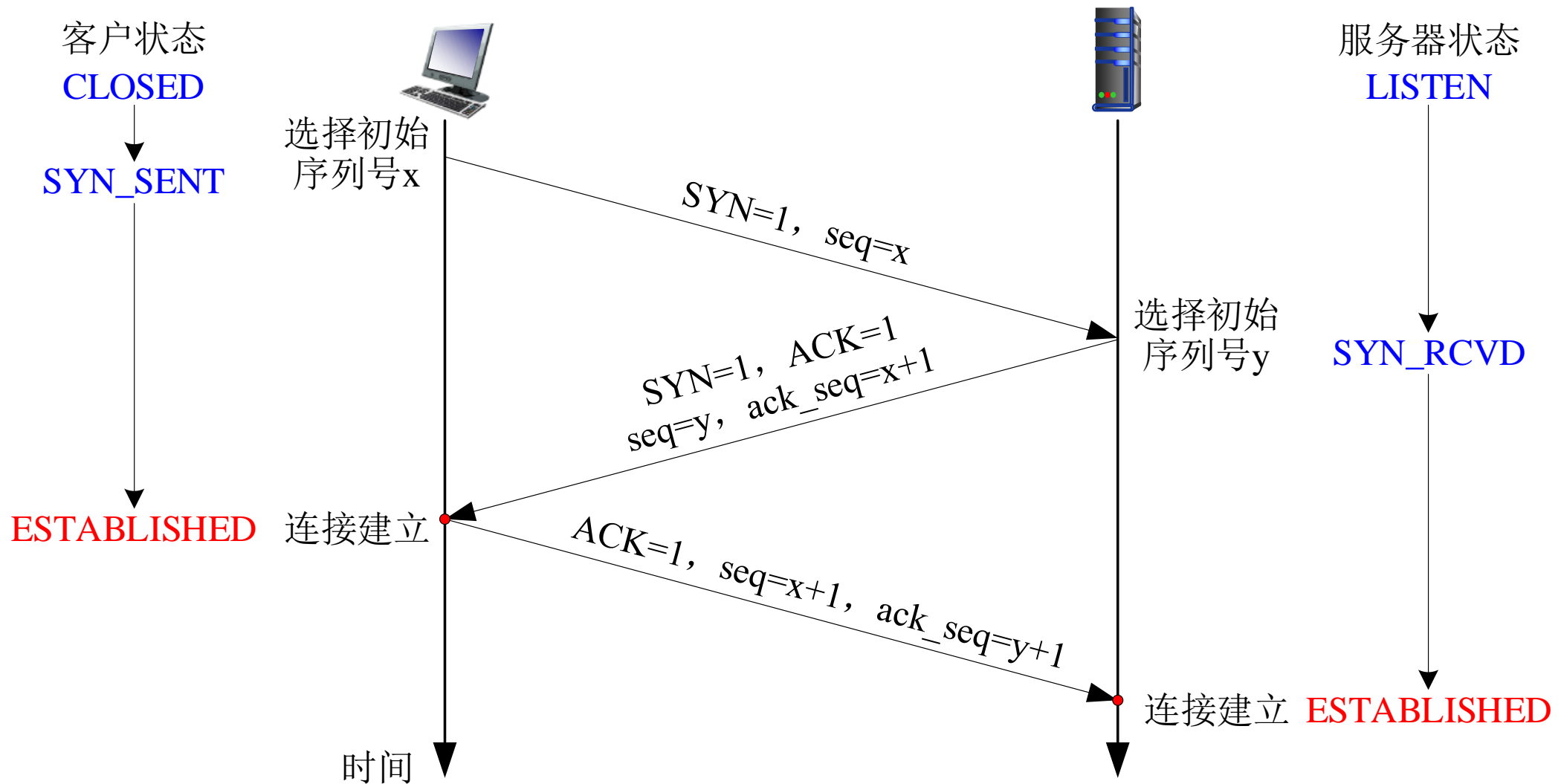
Step 2: server host receives SYN, replies with SYNACK segment

- server allocates buffers
- specifies server initial seq. #

Step 3: client receives SYNACK, replies with ACK segment, which may contain data



TCP连接管理：建立



TCP连接管理：关闭

Closing a connection:

client closes socket: `clientSocket.close()`;

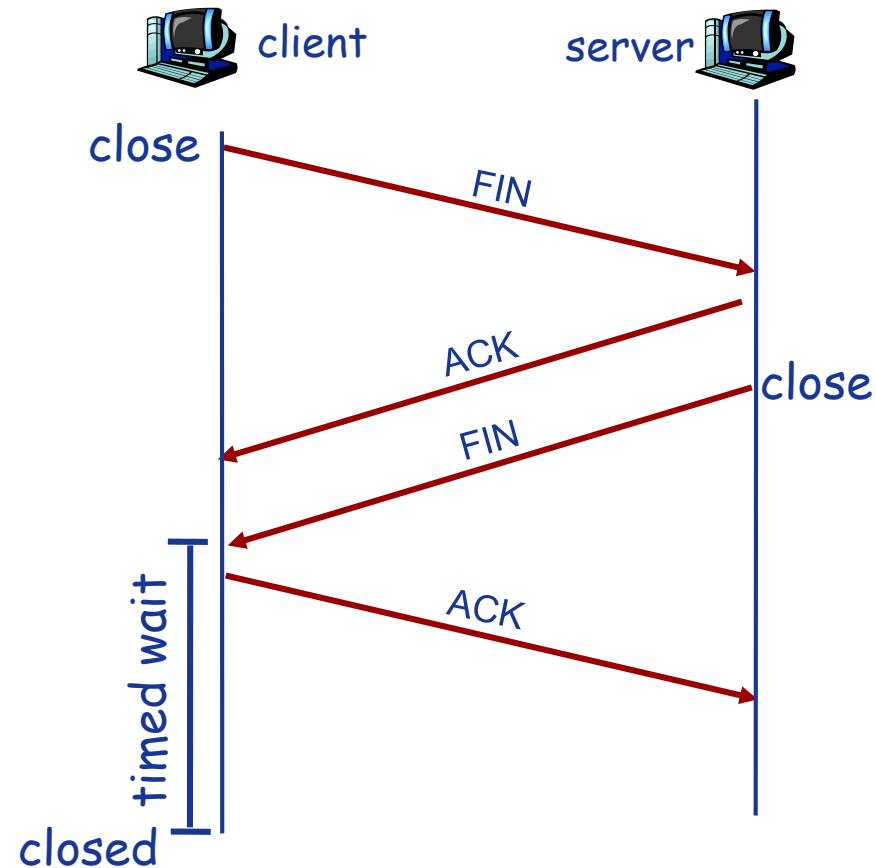
Step 1: client向server发送TCP FIN 控制segment

Step 2: server 收到FIN, 回复ACK. 关闭连接, 发送FIN.

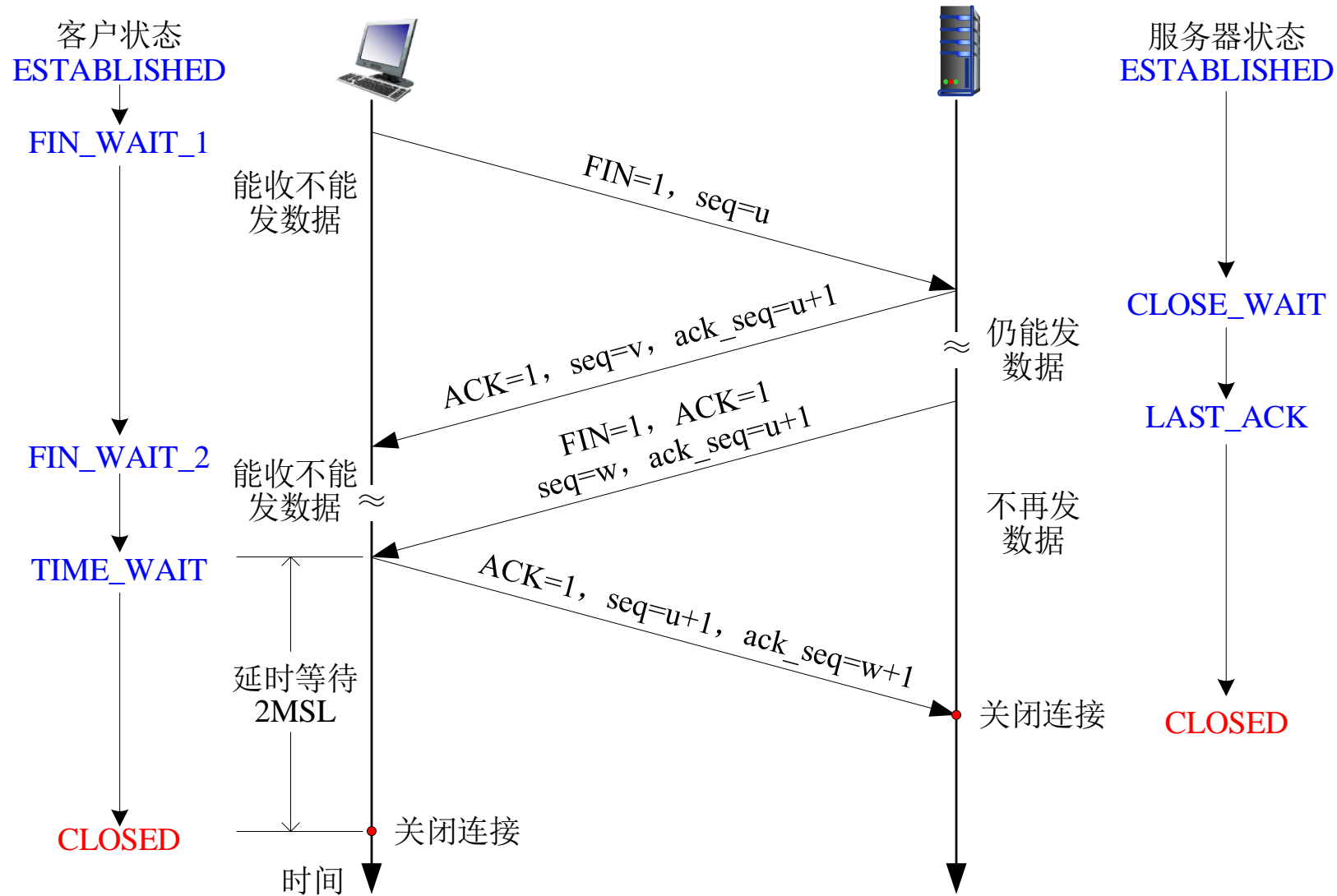
Step 3: client 收到FIN, 回复ACK.

- 进入“等待” –如果收到FIN, 会重新发送ACK

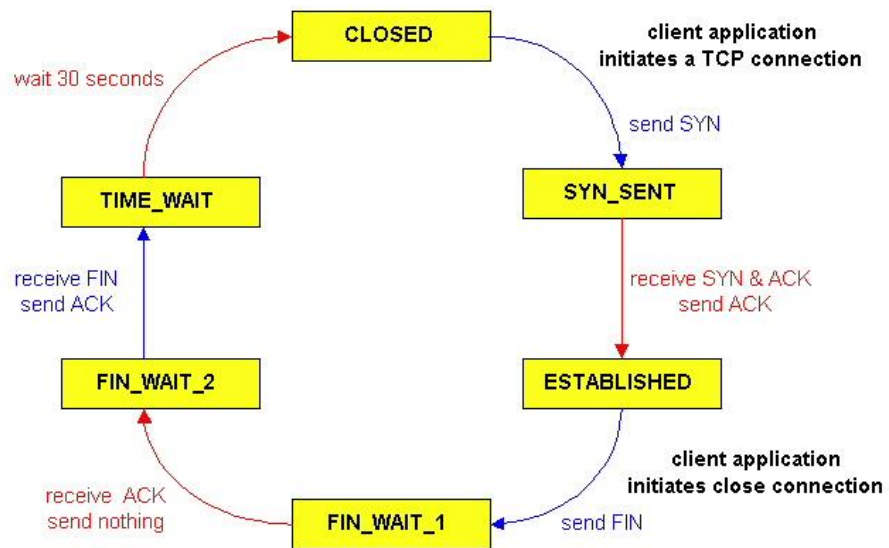
Step 4: server收到ACK. 连接关闭.



TCP连接管理：断连过程

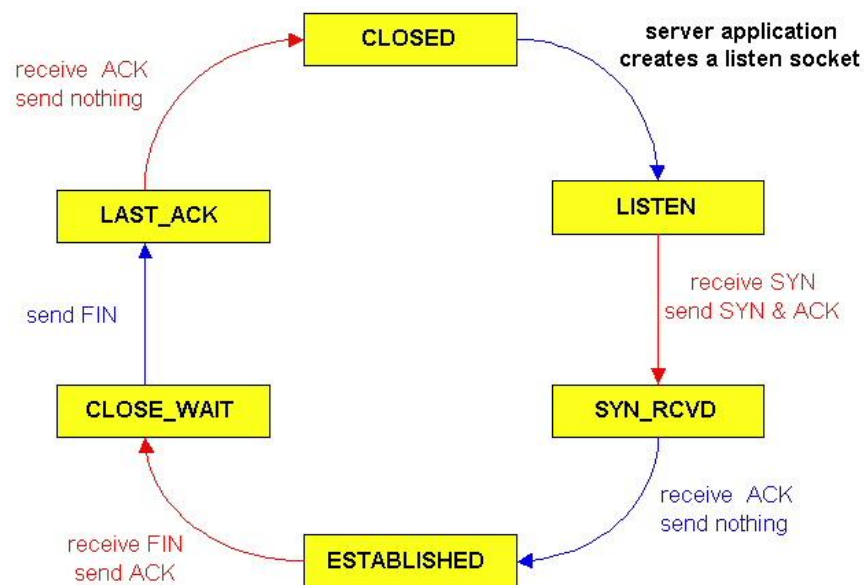


TCP连接管理



TCP client lifecycle

TCP server lifecycle



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



拥塞控制

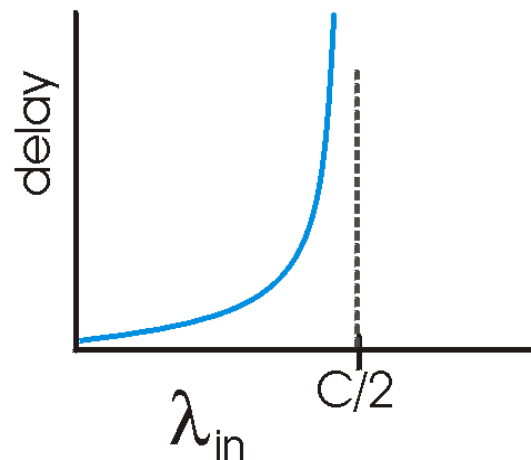
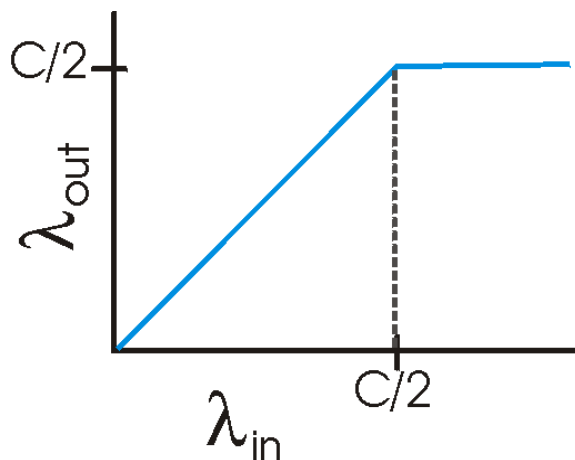
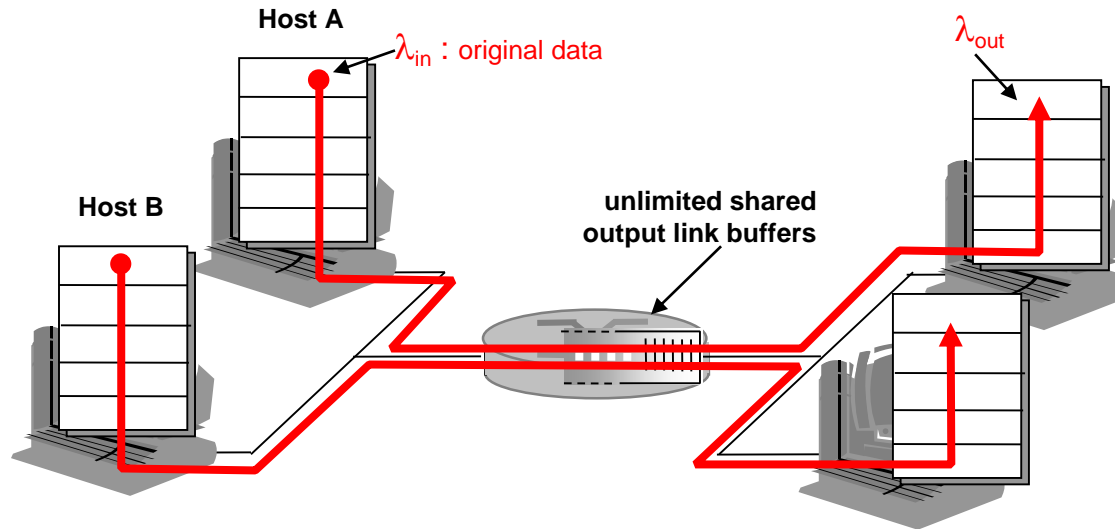
拥塞(Congestion)

- ❖ 非正式定义：“太多发送主机发送了太多数据或者发送速度太快，以至于网络无法处理”
- ❖ 表现：
 - 分组丢失（路由器缓存溢出）
 - 分组延迟过大（在路由器缓存中排队）
- ❖ 拥塞控制 vs. 流量控制
- ❖ A top-10 problem.



拥塞的成因和代价：场景1

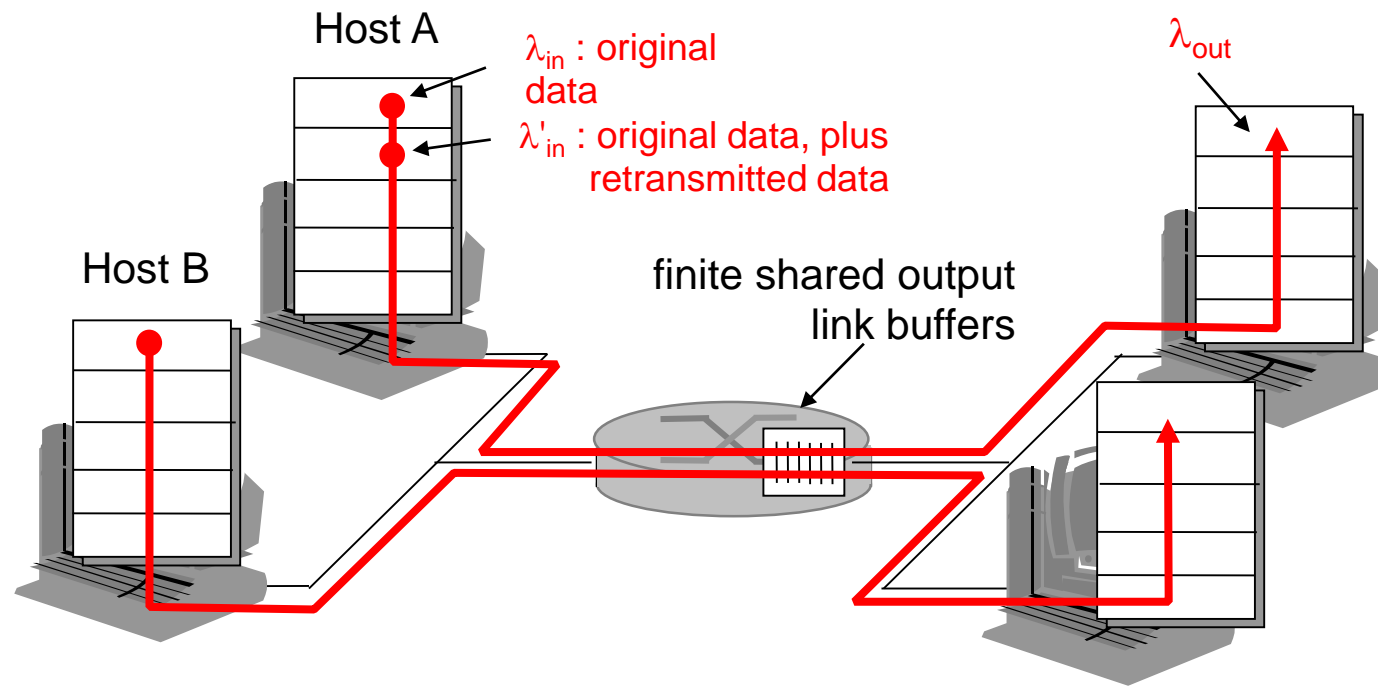
- ❖ 两个senders,两个receivers
- ❖ 一个路由器, 无限缓存
- ❖ 没有重传



- ❖ 拥塞时分组延迟太大
- ❖ 达到最大 throughput

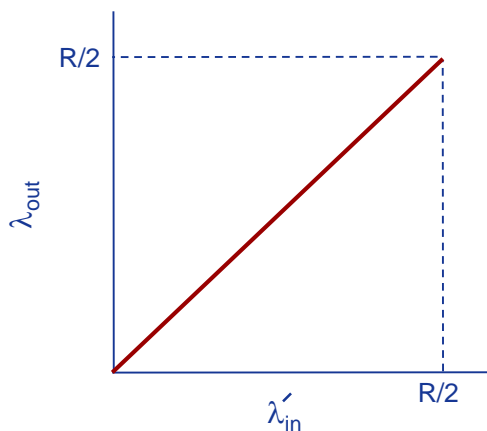
拥塞的成因和代价：场景2

- ❖ 一个路由器, 有限buffers
- ❖ Sender重传分组

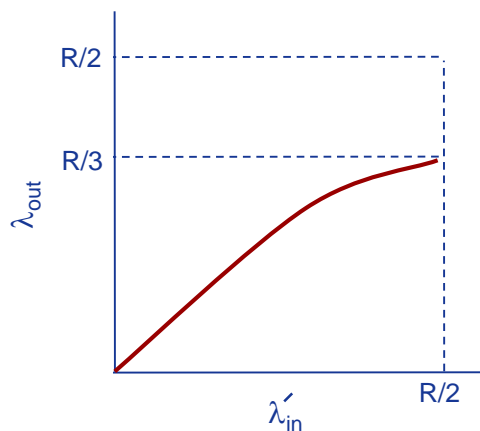


拥塞的成因和代价：场景2

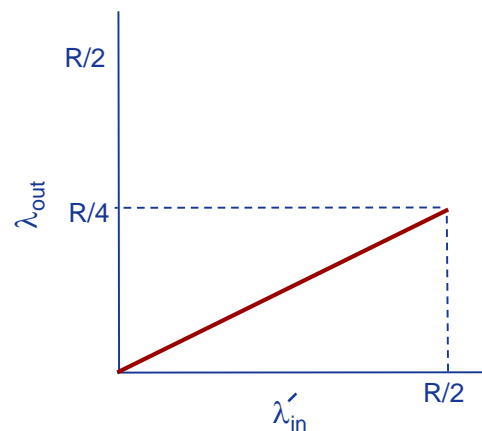
- ❖ 情况a: Sender能够通过某种机制获知路由器buffer信息, 有空间才发: $\lambda_{in} = \lambda_{out}$ (goodput)
- ❖ 情况b: 丢失后才重发: $\lambda'_{in} > \lambda_{out}$
- ❖ 情况c: 分组丢失和定时器超时后都重发, λ'_{in} 变得更大



a.



b.



c.

拥塞的代价:

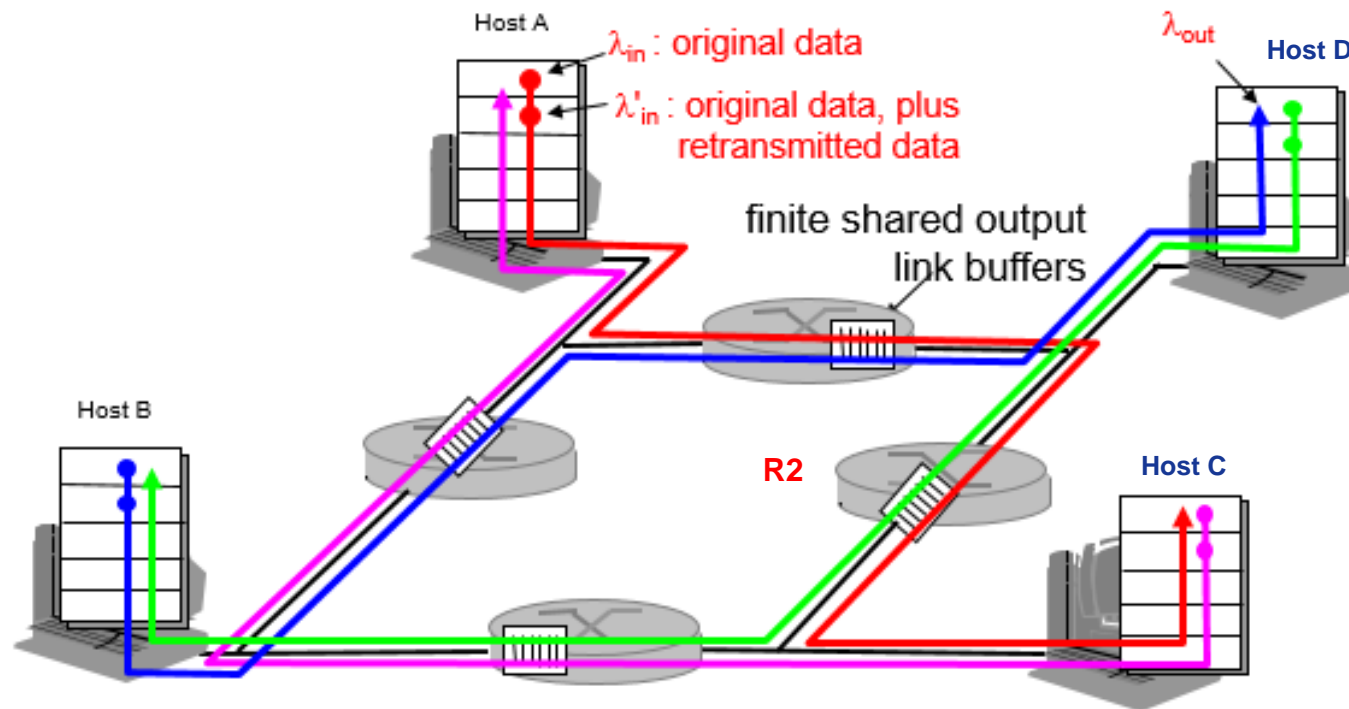
- ❑ 对给定的“goodput”, 要做更多的工作 (重传)
- ❑ 造成资源的浪费



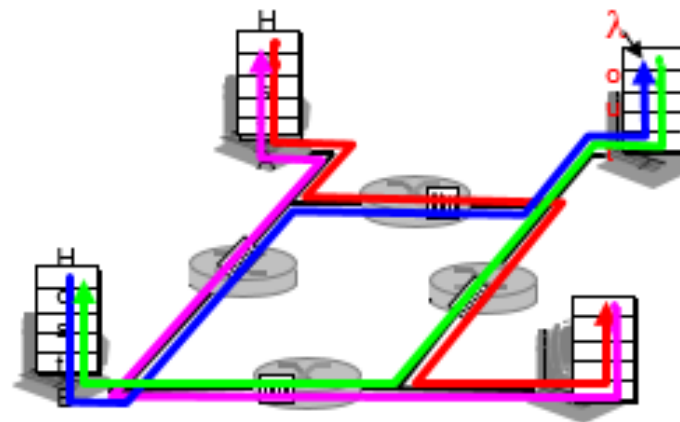
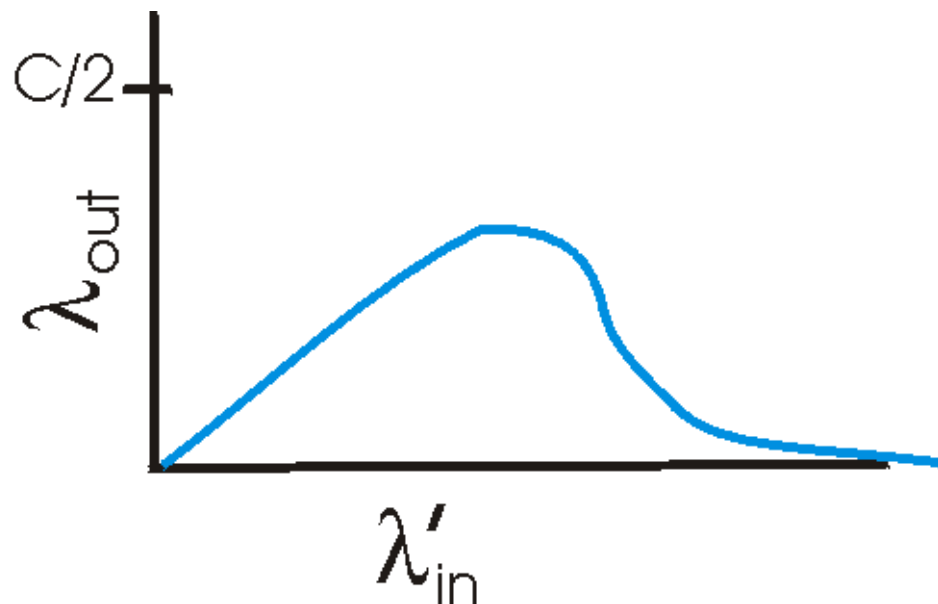
拥塞的成因和代价：场景3

- ❖ 四个发送方
- ❖ 多跳
- ❖ 超时/重传

Q: 随着 λ_{in} 和 λ'_{in} 不断增加, 会怎么样?



拥塞的成因和代价：场景3



拥塞的另一个代价:

- ❑ 当分组被丢弃时，任何用于该分组的“上游”传输能力全都被浪费掉



拥塞控制的方法

❖ 端到端拥塞控制:

- 网络层不需要显式的提供支持
- 端系统通过观察loss, delay等网络行为判断是否发生拥塞
- TCP采取这种方法

❖ 网络辅助的拥塞控制:

- 路由器向发送方显式地反馈网络拥塞信息
- 简单的拥塞指示(1bit): SNA, DECbit, TCP/IP ECN, ATM)
- 指示发送方应该采取何种速率



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- **ATM拥塞控制方法**
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



案例：ATM ABR拥塞控制

❖ ABR: available bit rate

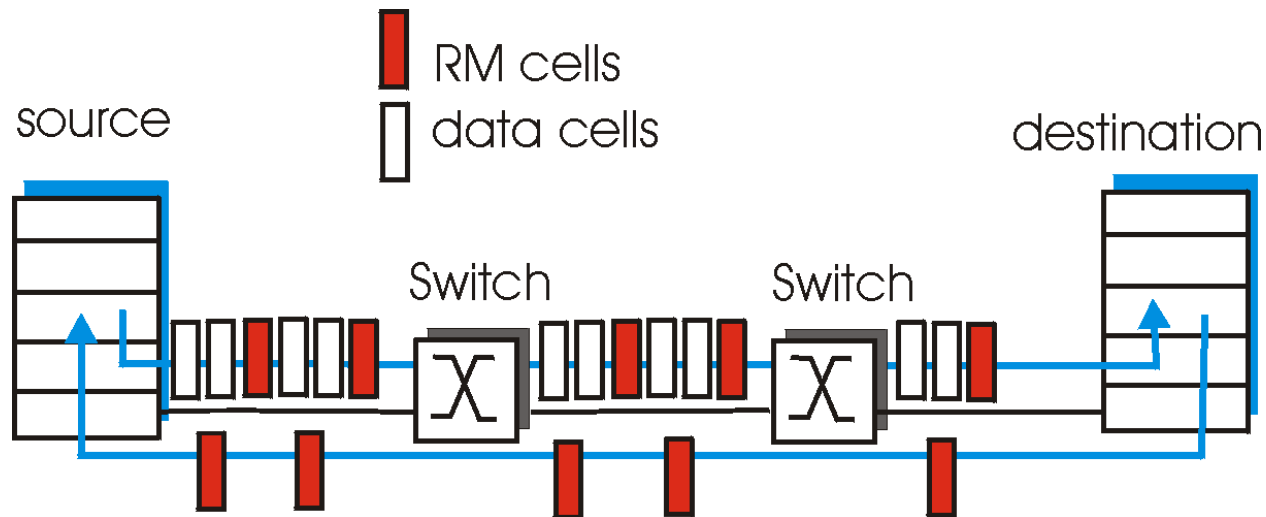
- “弹性服务”
- 如果发送方路径“underloaded”
 - 使用可用带宽
- 如果发送方路径拥塞
 - 将发送速率降到最低保障速率

❖ RM(resource management) cells

- 发送方发送
- 交换机设置RM cell位(网络辅助)
 - NI bit: 速率不许增长
 - CI bit: 拥塞指示
- RM cell由接收方返回给发送方



案例：ATM ABR拥塞控制



- ❖ 在RM cell中有显式的速率(ER)字段：两个字节
 - 拥塞的交换机可以将ER置为更低的值
 - 发送方获知路径所能支持的最小速率
- ❖ 数据cell中的EFCI位：拥塞的交换机将其设为1
 - 如果RM cell前面的data cell的EFCI位被设为1，那么接收方在返回的RM cell中置CI位

主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



TCP拥塞控制的基本原理

❖ Sender限制发送速率

$$\text{LastByteSent} - \text{LastByteAcked} \leq \text{CongWin}$$

$$\text{rate} \approx \frac{\text{CongWin}}{\text{RTT}} \text{ Bytes/sec}$$

❖ CongWin:

- 动态调整以改变发送速率
- 反映所感知到的网络拥塞

问题：如何感知网络拥塞？

❖ Loss事件=timeout或3个重复ACK

❖ 发生loss事件后，发送方降低速率

如何合理地调整发送速率？

❖ 加性增—乘性减: AIMD

❖ 慢启动: SS



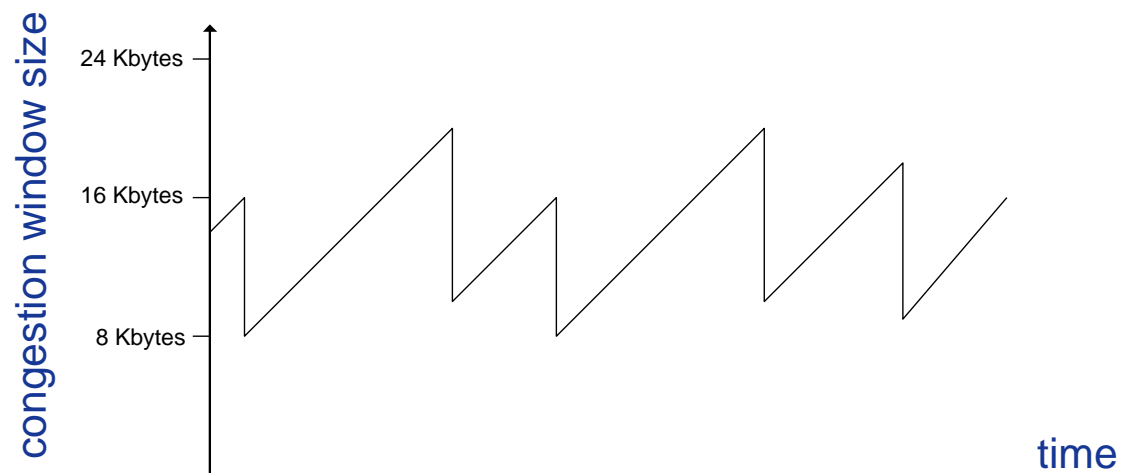
加性增—乘性减: AIMD

❖ **原理:** 逐渐增加发送速率, 谨慎探测可用带宽, 直到发生loss

❖ **方法:** AIMD

- Additive Increase: 每个RTT将CongWin增大一个MSS——拥塞避免
- Multiplicative Decrease: 发生loss后将CongWin减半

锯齿行为: 探测
可用带宽



TCP慢启动: SS

❖ TCP连接建立时,

CongWin=1

- 例: MSS=500 byte,
RTT=200msec
- 初始速率=20k bps

❖ 可用带宽可能远远高于初始速率:

- 希望快速增长

❖ 原理:

- 当连接开始时, 指数性增长

Slowstart algorithm

```
initialize: Congwin = 1
for (each segment ACKed)
    Congwin++
until (loss event OR
      CongWin > threshold)
```

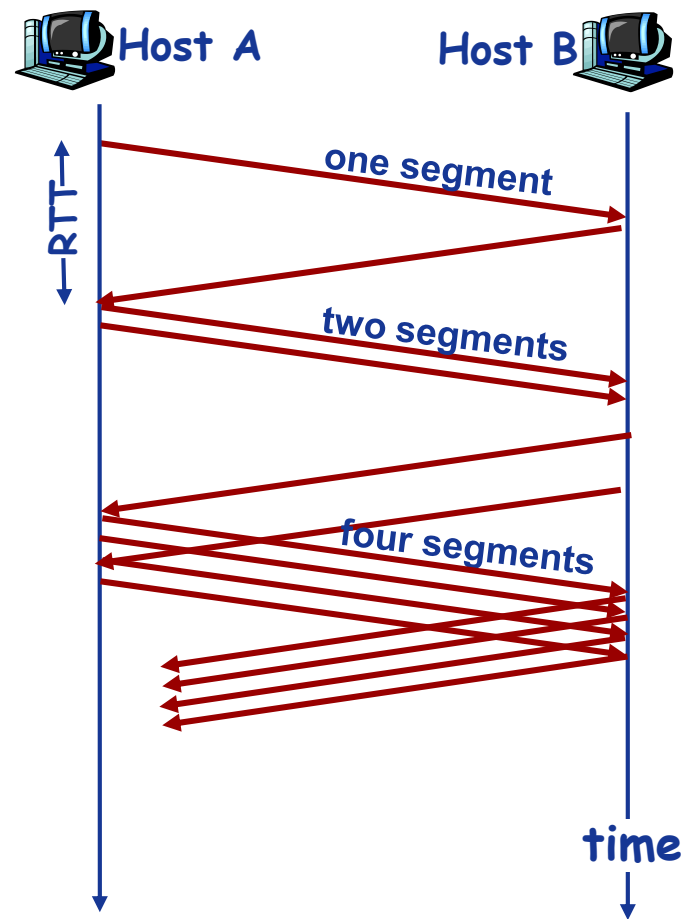


TCP慢启动: SS

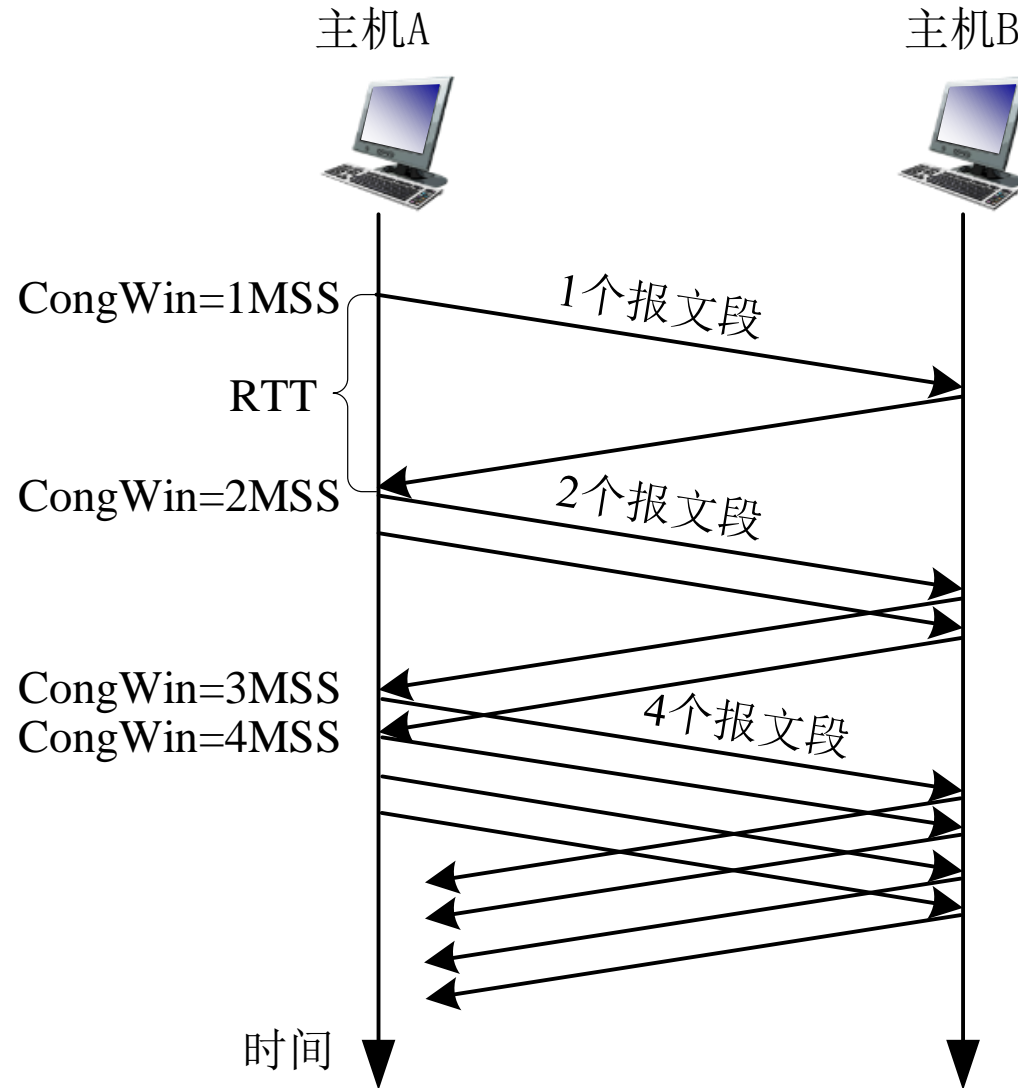
❖ 指数性增长

- 每个RTT将CongWin翻倍
- 收到每个ACK进行CongWin++操作

❖ 初始速率很慢，但是快速攀升



TCP慢启动: SS



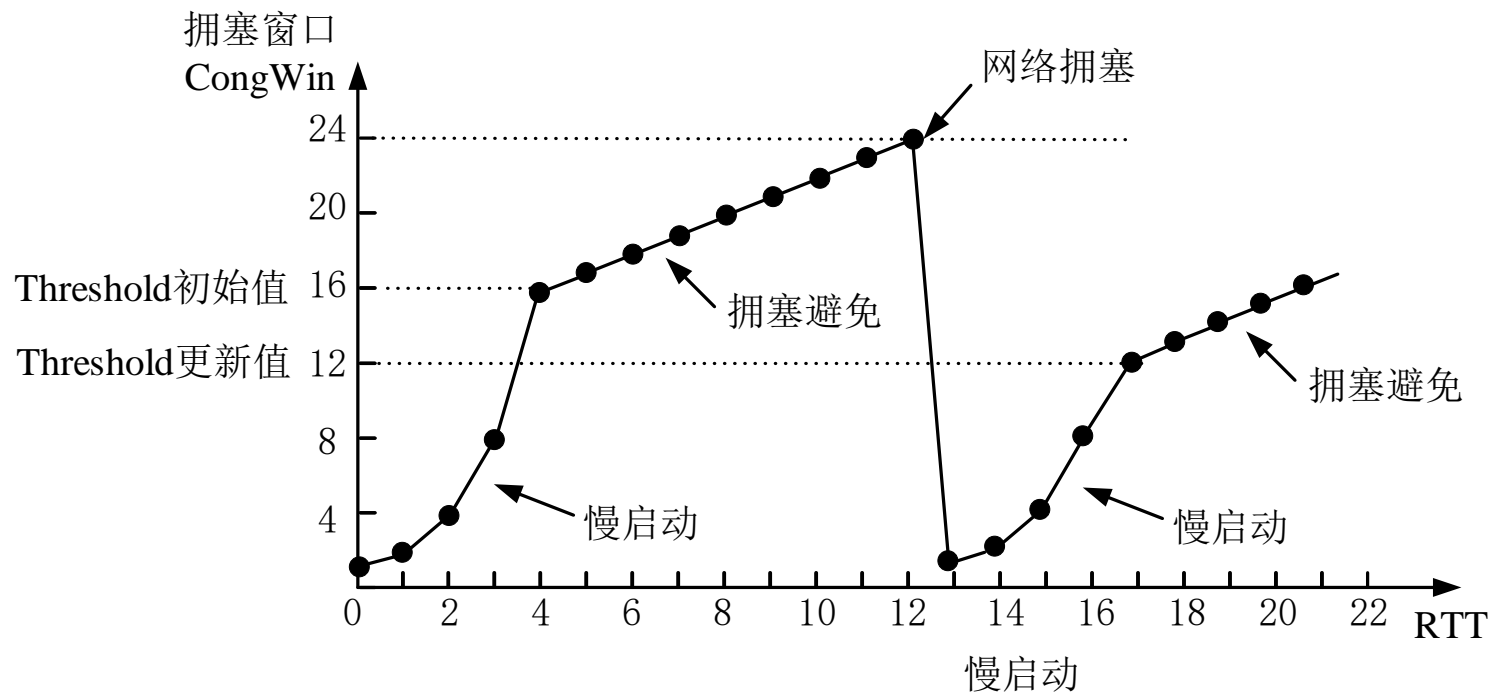
Threshold变量

Q:何时应该指数性增长切换为线性增长(拥塞避免)?

A: 当CongWin达到Loss事件前值的1/2时.

实现方法:

- ❖ 变量 Threshold
- ❖ Loss事件发生时, Threshold被设为Loss事件前CongWin值的1/2。



Loss事件的处理

❖ 3个重复ACKs:

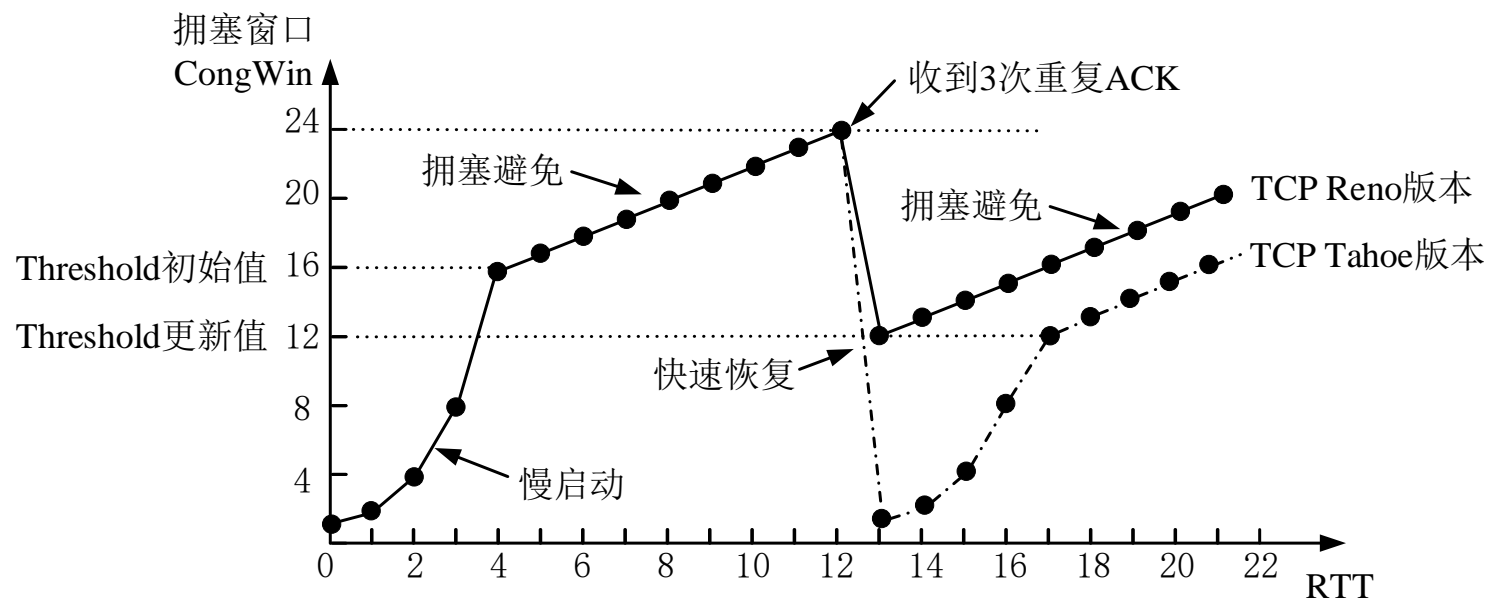
- CongWin切到一半
- 然后线性增长

❖ Timeout事件:

- CongWin直接设为1个MSS
- 然后指数增长
- 达到threshold后, 再线性增长

Philosophy:

- ❑ 3个重复ACKs表示网络还能够传输一些 segments
- ❑ timeout事件表明拥塞更为严重



TCP拥塞控制: 总结

- ❖ When CongWin is below Threshold, sender in **slow-start** phase, window grows exponentially.
- ❖ When CongWin is above Threshold, sender is in **congestion-avoidance** phase, window grows linearly.
- ❖ When a **triple duplicate ACK** occurs, Threshold set to CongWin/2 and CongWin set to Threshold.
- ❖ When **timeout** occurs, Threshold set to CongWin/2 and CongWin is set to 1 MSS.



TCP拥塞控制

State	Event	TCP Sender Action	Commentary
Slow Start (SS)	ACK receipt for previously unacked data	$CongWin = CongWin + MSS$, If ($CongWin > Threshold$) set state to “Congestion Avoidance”	Resulting in a doubling of CongWin every RTT
Congestion Avoidance (CA)	ACK receipt for previously unacked data	$CongWin = CongWin + MSS * (MSS / CongWin)$	Additive increase, resulting in increase of CongWin by 1 MSS every RTT
SS or CA	Loss event detected by triple duplicate ACK	$Threshold = CongWin / 2$, $CongWin = Threshold$, Set state to “Congestion Avoidance”	Fast recovery, implementing multiplicative decrease. CongWin will not drop below 1 MSS.
SS or CA	Timeout	$Threshold = CongWin / 2$, $CongWin = 1 MSS$, Set state to “Slow Start”	Enter slow start
SS or CA	Duplicate ACK	Increment duplicate ACK count for segment being acked	CongWin and Threshold not changed



TCP拥塞控制算法

Th = ?

CongWin = 1 MSS

/* slow start or exponential increase */

While (No Packet Loss and CongWin < Th) {

 send CongWin TCP segments

 for each ACK increase CongWin by 1

}

/* congestion avoidance or linear increase */

While (No Packet Loss) {

 send CongWin TCP segments

 for CongWin ACKs, increase CongWin by 1

}

Th = CongWin/2

If (3 Dup ACKs) CongWin = Th;

If (timeout) CongWin=1;



例题2

- ❖ 一个TCP连接总是以1 KB的最大段长发送TCP段，发送方有足够多的数据要发送。当拥塞窗口为16 KB时发生了超时，如果接下来的4个RTT（往返时间）时间内的TCP段的传输都是成功的，那么当第4个RTT时间内发送的所有TCP段都得到肯定应答时，拥塞窗口大小是多少？
- ❖ 【解】 $\text{threshold} = 16/2 = 8 \text{ KB}$, $\text{CongWin} = 1 \text{ KB}$, 1个RTT后, $\text{CongWin} = 2 \text{ KB}$, 2个RTT后, $\text{CongWin} = 4 \text{ KB}$, 3个RTT后, $\text{CongWin} = 8 \text{ KB}$, Slowstart is over; 4个RTT后, $\text{CongWin} = 9 \text{ KB}$



主要内容

传输层服务？

多路复用和多路分用？

UDP协议

- UDP段结构
- UDP校验和

可靠数据传输原理

- RDT协议
- 停等协议
- 滑动窗口协议
- GBN协议
- SR协议

TCP协议

- TCP协议特点
- TCP段结构
- TCP可靠数据传输
- TCP流量控制
- TCP连接控制

拥塞控制

- 拥塞概念与典型场景
- 拥塞控制策略
- ATM拥塞控制方法
- TCP拥塞控制方法

TCP性能分析



TCP throughput: 吞吐率

- ❖ 给定拥塞窗口大小和RTT，TCP的平均吞吐率是多少？
 - 忽略掉Slow start
- ❖ 假定发生超时时CongWin的大小为W，吞吐率是 W/RTT
- ❖ 超时后， $CongWin=W/2$ ，吞吐率是 $W/2RTT$
- ❖ 平均吞吐率为： $0.75W/RTT$



未来的TCP

❖ 举例：每个Segment有1500个byte, RTT是100ms, 希望获得10Gbps的吞吐率

- $\text{throughput} = W * \text{MSS} * 8 / \text{RTT}$, 则
- $W = \text{throughput} * \text{RTT} / (\text{MSS} * 8)$
- $\text{throughput} = 10\text{Gbps}$, 则 $W = 83,333$

❖ 窗口大小为83,333



未来的TCP

❖ 吞吐率与丢包率(loss rate, L)的关系

- CongWin从W/2增加至W时出现第一个丢包，那么一共发送的分组数为

$$W/2 + (W/2 + 1) + (W/2 + 2) + \dots + W = 3W^2/8 + 3W/4$$

- W很大时， $3W^2/8 \gg 3W/4$ ，因此 $L \approx 8/(3W^2)$

$$W = \sqrt{8/3L} \quad \text{Throughput} = \frac{0.75 \cdot MSS \cdot \sqrt{8/3L}}{RTT} \approx \frac{1.22 \cdot MSS}{RTT \sqrt{L}}$$

❖ $L = 2 \cdot 10^{-10}$ **Wow!!!**

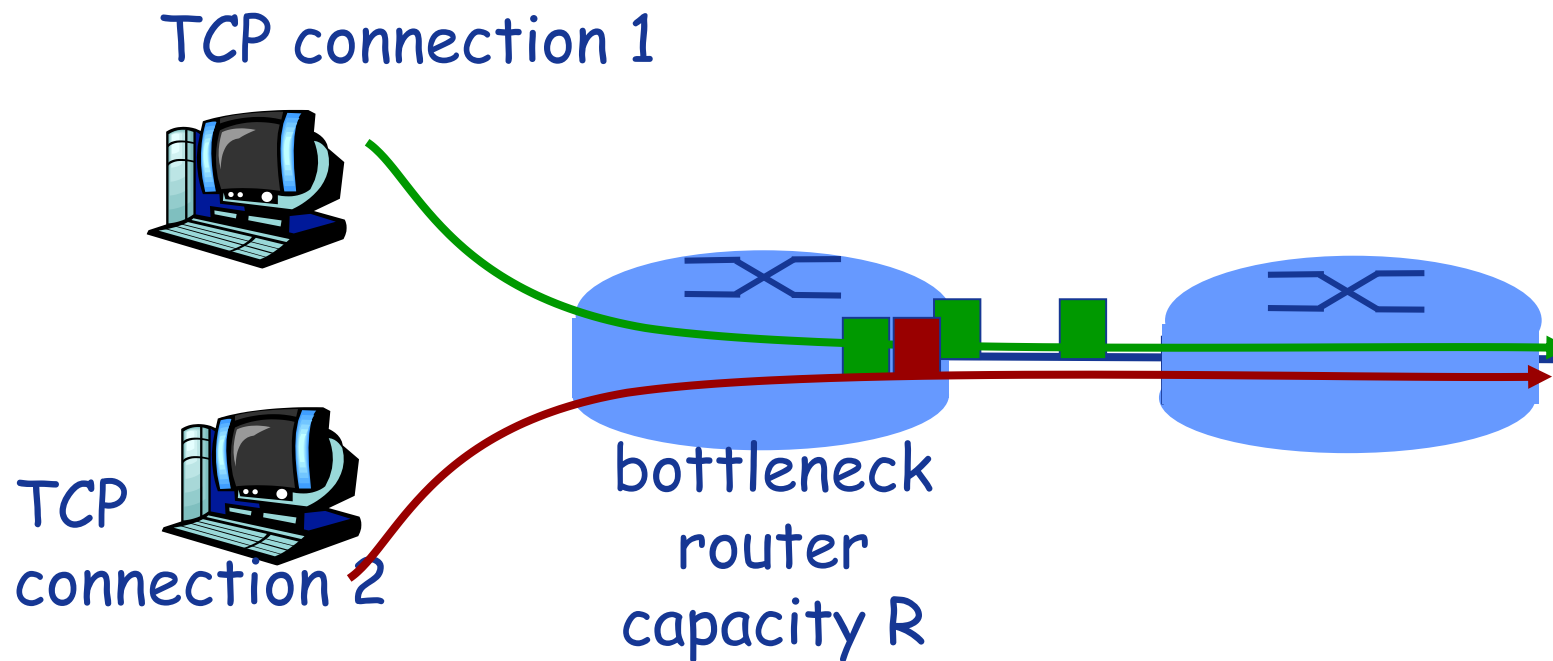
❖ 高速网络下需要设计新的TCP



TCP的公平性

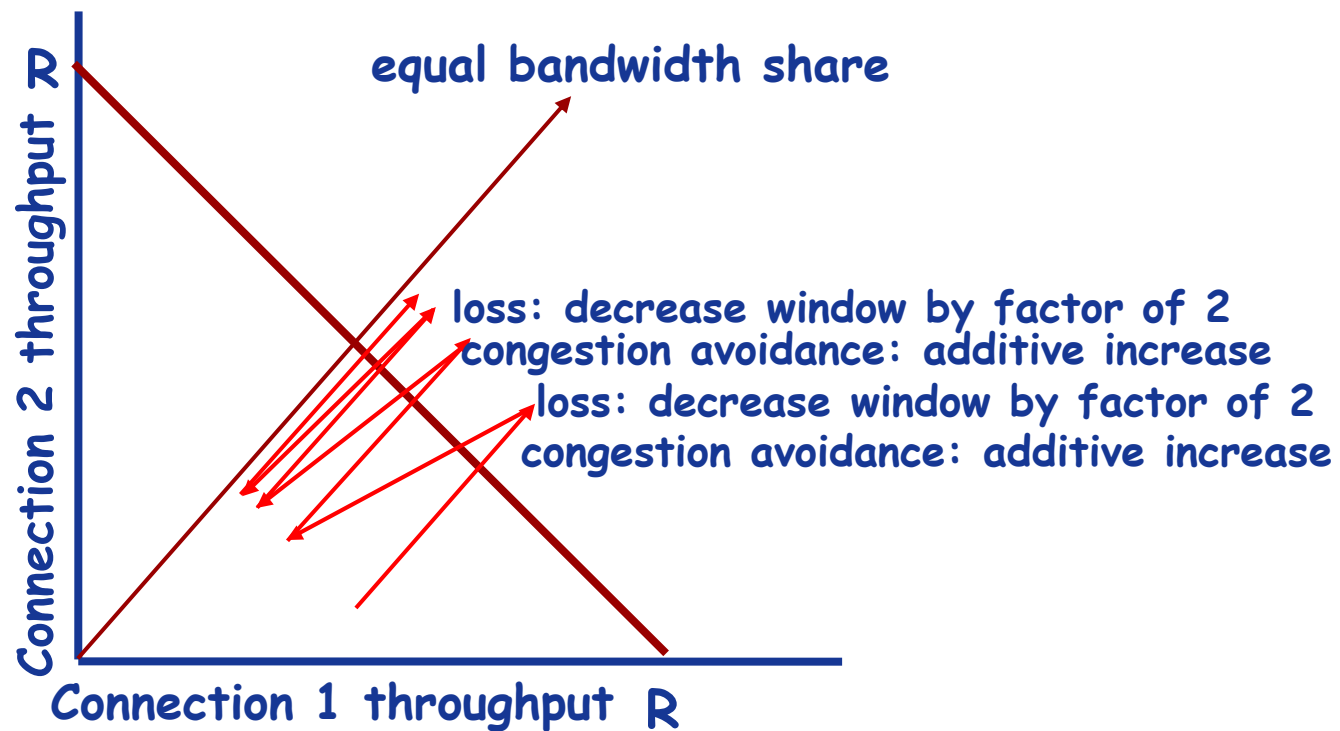
❖ 公平性?

- 如果K个TCP Session共享相同的瓶颈带宽R，那么每个Session的平均速率为 R/K



TCP具有公平性吗？

❖ 是的



TCP的公平性

❖ 公平性与UDP

- 多媒体应用通常不使用TCP，以免被拥塞控制机制限制速率
- 使用UDP：以恒定速率发送，能够容忍丢失
- 产生了不公平

❖ 研究：TCP friendly

❖ 公平性与并行TCP连接

- 某些应用会打开多个并行连接
- Web浏览器
- 产生公平性问题

❖ 例子：链路速率为 R ，已有9个连接

- 若新的应用请求建立1个TCP连接，则获得 $R/10$ 的速率
- 若新的应用请求建立11个TCP连接，则获得 $R/2$ 的速率



练一练

主机甲与主机乙间已建立一个TCP连接，主机甲向主机乙发送了两个连续的TCP段，分别包含300字节和500字节的有效载荷，第一个段的序列号为200，主机乙正确接收到两个段后，发送给主机甲的确认序列号是

A: 500

B: 700

C: 800



D: 1000



练一练

若主机甲主动发起一个与主机乙的**TCP**连接，甲、乙选择的初始序列号分别为**2018**和**2020**，则第三次握手**TCP**段的确认序列号是

A: 2018

B: 2019

C: 2020



D: 2021



练一练

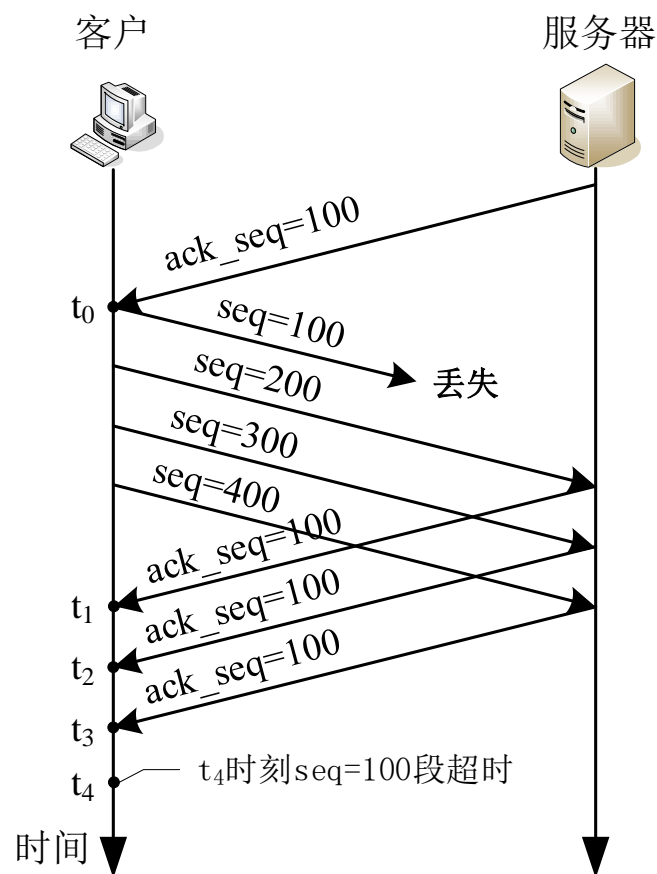
某客户通过一个TCP连接向服务器发送数据的部分过程如下图所示。客户在 t_0 时刻第一次收到确认序列号 $\text{ack_seq}=100$ 的段，并发送序列号 $\text{seq}=100$ 的段，但发生丢失。若TCP支持快速重传，则客户重新发送 $\text{seq}=100$ 段的时刻是

A: t_1

B: t_2

✓ C: t_3

D: t_4



练一练

主机甲和主机乙之间已建立了一个TCP连接，TCP最大段长度为1 000字节。若主机甲的当前拥塞窗口为4 000字节，在主机甲向主机乙连续发送两个最大段后，成功收到主机乙发送的对第一个段的确认段，确认段中通告的接收窗口大小为2 000字节，则此时主机甲还可以向主机乙发送的最大字节数是



A: 1000

B: 2000

C: 3000

D: 4000



练一练

主机甲向主机乙发送一个($\text{SYN} = 1, \text{seq} = 11220$)的TCP段, 期望与主机乙建立TCP连接, 若主机乙接受该连接请求, 则主机乙向主机甲发送的正确的TCP段可能是

A: ($\text{SYN}=0, \text{ACK}=0, \text{seq}=11221, \text{ack_seq}=11221$)

B: ($\text{SYN}=1, \text{ACK}=1, \text{seq}=11220, \text{ack_seq}=11220$)



C: ($\text{SYN}=1, \text{ACK}=1, \text{seq}=11221, \text{ack_seq}=11221$)

D: ($\text{SYN}=0, \text{ACK}=0, \text{seq}=11220, \text{ack_seq}=11220$)



练一练

两台主机之间的数据链路层采用后退N帧协议（GBN）传输数据，数据传输速率为16 kbps，单向传播时延为270 ms，数据帧长度范围是128~512字节，接收方总是以与数据帧等长的帧进行确认。为使信道利用率达到最高，帧序号的比特数至少为

A: 5



B: 4

C: 3

D: 2

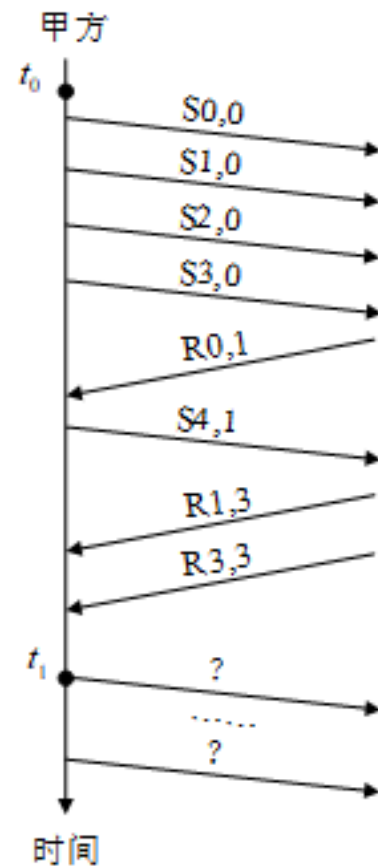


练一练

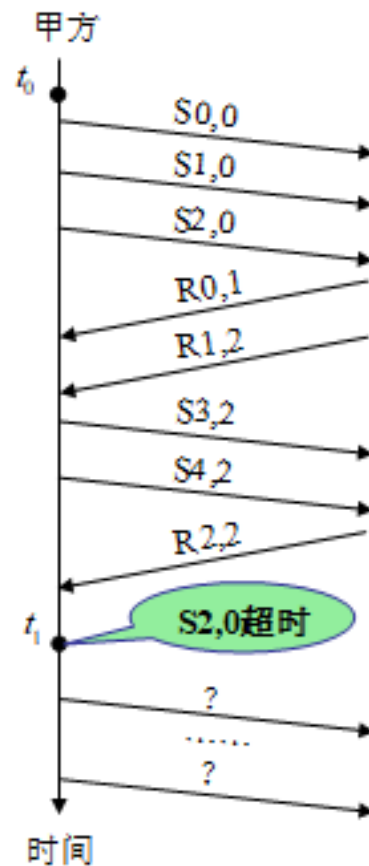
甲乙双方均采用后退N帧协议（GBN）进行持续的双向数据传输，且双方始终采用捎带确认，帧长均为1000 B。 $S_{x,y}$ 和 $R_{x,y}$ 分别表示甲方和乙方发送的数据帧，其中： x 是发送序号； y 是确认序号（表示希望接收对方的下一帧序号）；数据帧的发送序号和确认序号字段均为3比特。信道传输速率为100 Mbps， $RTT = 0.96ms$ 。下图给出了甲方发送数据帧和接收数据帧的两种场景，其中 t_0 为初始时刻，此时甲方的发送和确认序号均为0， t_1 时刻甲方有足够多的数据待发送。

请回答下列问题。

- （1）对于图(a)， t_0 时刻到 t_1 时刻期间，甲方可以断定乙方已正确接收的数据帧数是多少？正确接收的是哪几个帧（请用 $S_{x,y}$ 形式给出）？
- （2）对于图(a)，从 t_1 时刻起，甲方在不出现超时且未收到乙方新的数据帧之前，最多还可以发送多少个数据帧？其中第一个帧和最后一个帧分别是哪个（请用 $S_{x,y}$ 形式给出）？
- （3）对于图(b)，从 t_1 时刻起，甲方在不出现新的超时且未收到乙方新的数据帧之前，需要重发多少个数据帧？重发的第一个帧是哪个（请用 $S_{x,y}$ 形式给出）？
- （4）甲方可以达到的最大信道利用率是多少？



(a)



(b)

练一练

甲乙双方均采用后退N帧协议（GBN）进行持续的双向数据传输，且双方始终采用捎带确认，帧长均为1000 B。 $S_{x,y}$ 和 $R_{x,y}$ 分别表示甲方和乙方发送的数据帧，其中： x 是发送序号； y 是确认序号（表示希望接收对方的下一帧序号）；数据帧的发送序号和确认序号字段均为3比特。信道传输速率为100 Mbps， $RTT = 0.96\text{ms}$ 。下图给出了甲方发送数据帧和接收数据帧的两种场景，其中 t_0 为初始时刻，此时甲方的发送和确认序号均为0， t_1 时刻甲方有足够多的数据待发送。

(1) t_0 时刻到 t_1 时刻期间，甲方可以断定乙方已正确接收了 3 个数据帧，分别是

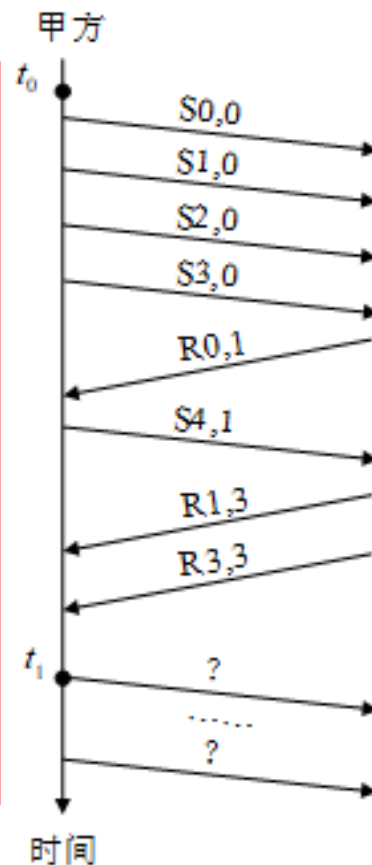
$S_{0,0}$ 、 $S_{1,0}$ 、 $S_{2,0}$ 。

(2) 从 t_1 时刻起，甲方最多还可以发送 5 个数据帧，其中第一个帧是 $S_{5,2}$ ，最后一个数据帧是 $S_{1,2}$ 。

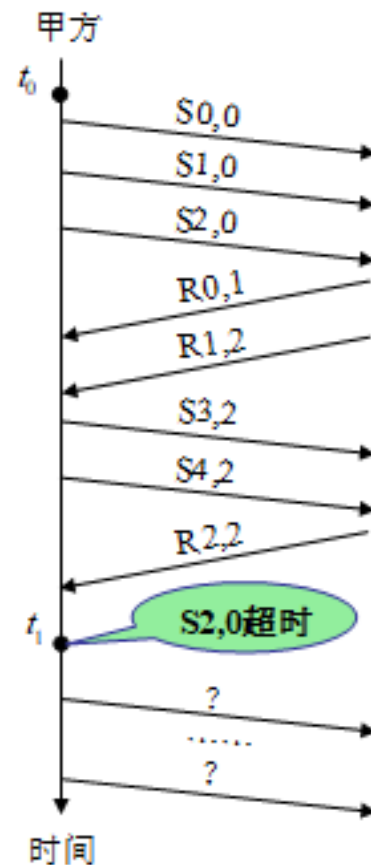
(3) 甲方需要重发 3 个数据帧，重发的第一个帧是 $S_{2,3}$ 。

(4) 甲方可以达到的最大信道利用率是：

$$\frac{7 \times \frac{8 \times 1000}{100 \times 10^6}}{0.96 \times 10^{-3} + 2 \times \frac{8 \times 1000}{100 \times 10^6}} \times 100\% = 50\%$$



(a)



(b)



哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



立足航天，服务国防，面向国民经济主战场

谢谢!