

## 第3章 数据链路层

- ❖ 本章内容
  - ❖ 停等协议
  - ❖ 连续ARQ协议（滑动窗口协议）
  - ❖ L2协议的性能分析
  - ❖ L2协议的范例：HDLC

数据通信与计算机网络  
面向专业：信通系  
授课教师：刘剑毅

1

## 基本概念

- ❖ 数据链路层的作用：  
在不太可靠的物理链路上实现可靠的数据传输。
- ❖ 术语的区别
  - ❖ 链路：物理链路。
  - ❖ 数据链路：逻辑链路。  
**物理链路+L1+L2**

2

## 链路层的服务

- ❖ 链路管理:
  - ❖ 链路的建立、维持、释放。
- ❖ 帧同步:
  - ❖ 即自动断帧（类比：断句）
- ❖ 区分数据帧和控制帧，数据字段和控制字段：
- ❖ 透明传输:
  - ❖ 0比特插入删除方法

3

## 链路层的服务(续)

- ❖ 流量控制:
  - ❖ 发方的发送能力不超过收方的接收能力。
- ❖ 错误检测:
  - ❖ 信号衰减和噪声会导致出错。
  - ❖ 纠错码：更适合恶劣信道，如无线。
  - ❖ 使用检错码：
    - ❖ 给发送端信号要求重发或丢弃出错帧

4

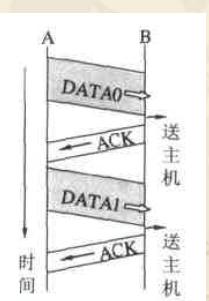
## 链路层的服务(续)

- ❖ 成帧，编址:
  - ❖ 将分组封装入帧，加上帧头，帧尾
  - ❖ ‘物理地址’放在帧首用来确定信源、信宿
- ❖ 物理地址≠IP地址

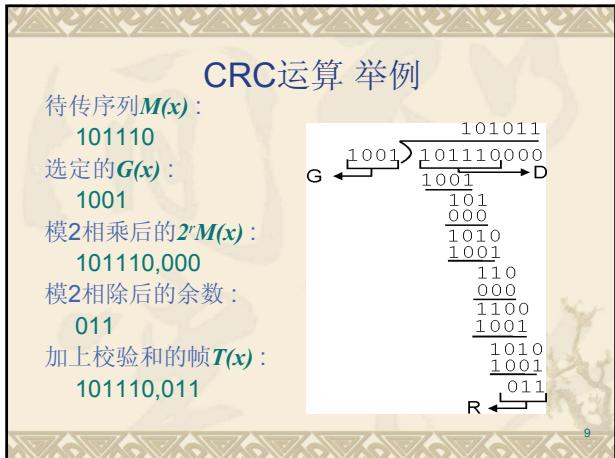
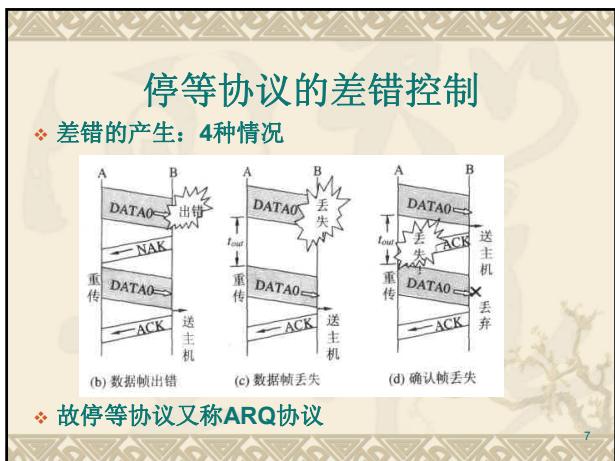
5

## 停等协议

- ❖ 原理：  
不见不散
- ❖ 通信模式：  
半双工通信
- ❖ 流控：  
使用 Response primitive: ACK

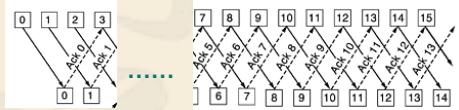


6



## 连续ARQ协议

- 工作原理：发端完成一帧发送后，并不停等，而在回应未收到的情况下即连续再发后续的若干帧。收端则连续返回响应帧。



所以又常称为流水线协议。

- 优点：减少了等待时间，两端同时工作，提高了整个通信的效率（吞吐量）。

13

### 信道利用模式：全双工

#### 适用的场合：

高延迟信道：（类比：火车的复线）

✓. 卫星信道    X. 局域网

停等协议的总传输时延=单程时延×帧数×2

连续ARQ的总传输时延=单程时延×2

（假定无错传输，且单程时延>>发帧时长）

高S/N信道：

✓. 光纤    X. 城市的户外无线信道

（恶劣的信道中，连续ARQ的传输性能甚至可能低于停等协议）

14

## 连续ARQ协议的差错控制

### 差错控制的分类与实现：（图解）

数据帧出错；

数据帧丢失；

应答帧丢失；

（应答帧出错）；

### 关于定时器的超时时间 $t_{out}$

too large  $t_{out}$  : 错误响应慢，错误恢复时间长

too small  $t_{out}$  : 虚警率(false alarm)高

本例中： 双程时延  $\approx 2.5 < t_{out} = 3$

15

## 滑动窗口(Sliding Window)的概念

### 发送窗口：

**Definition:** 没有收到确认的情况下允许发送的帧序号的范围，位于发端。

### 接收窗口：

**Definition:** 允许接收的帧序号的范围，位于收端。

### 用滑动窗口来解释流水线协议：（图解）

发送窗口的实现；

接收窗口的实现；

所以连续ARQ协议又常称为滑动窗口协议

16

## Discussion

### 关于发送窗口：

数据帧发送机制；

窗口滑动机制：当且仅当收到窗口最左端的确认

实现方式：FIFO

窗口的尺寸  $W_T$  :

下限：双程时延

上限： $2^n - 1$  ( $n$  为帧序号编码的bit数)

例：(pp 82)  $n=3$      $W_T = 8$                    $W_T = 7$

case1:              0~7                      7, 0~5

case2:              0~7                      0~6

17

## Discussion

### 关于接收窗口：

窗口滑动机制：当且仅当收到帧的序号落入接收窗口内  
收到当前窗口的future frame: 丢弃

收到当前窗口的historical frame: 丢弃 + ACK

$W_R > 1$  的情形：选择重传协议

窗口滑动机制：多步滑动，传输效率更高

仍旧向L3提供保序服务：空间换时间的思想

### 用滑动窗口来解释停等协议：

$W_T = 1$

$W_R = 1$

18

## L2协议的性能分析

### ♦ 停等协议

※ Case1: 无错情况

$$\text{发帧时延 } t_f = l_f / C$$

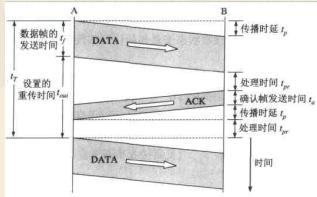
重发时间

$$t_{out} = t_p + t_{pr} + t_a + t_p + t_{pr}$$

当  $t_{pr}, t_a \ll t_p$

成功发一帧所需总时间

$$t_T = t_f + t_{out} = t_f + 2t_p$$



19

※ Case2: 出错情况。设出错概率为p

{重发次数   成功发一帧}	0	1	2	...	i
事件概率	$1-p$	$p(1-p)$	$p^2(1-p)$	...	$p^i(1-p)$

则  $E(I)$  表示成功发一帧所需的平均重发次数。

Theorem: 对于离散随机变量  $\xi$ , 若其取值为  $x_k$ , ( $k=1, 2, \dots$ )

$$\text{且 } P(\xi = x_k) = P_k, \text{ 则 } E(\xi) = \sum_k x_k P_k$$

$$\text{故 } E(I) = \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot p^i (1-p)$$

$$= (1-p)p \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot p^{i-1}$$

20

$$\because \sum_{i=0}^{\infty} x^i = \frac{1}{1-x}$$

$$\therefore \left( \sum_{i=0}^{\infty} x^i \right)' = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot x^{i-1} = \left( \frac{1}{1-x} \right)' = \frac{1}{(1-x)^2}$$

$$\text{故 } E(I) = \frac{(1-p)p}{(1-p)^2} = \frac{p}{1-p}$$

成功发一帧所需平均时间

$$t_{AV} = t_f + \frac{p}{1-p} \cdot t_T = \frac{t_f}{1-p}$$

21

♦ 最大吞吐量  $\lambda_{max}$ : 平均每秒能成功传送的最大帧数。

——反映链路的能力。

$$\text{无错情况 } \lambda_{max} = \frac{1}{t_f}$$

$$\text{出错情况 } \lambda_{max} = \frac{1}{t_{AV}}$$

♦ 吞吐量  $\lambda$ : 每秒成功传送了的帧数。——反映链路的运行状况。 $\lambda \leq \lambda_{max}$

♦ 归一化吞吐量  $\rho$ :

每秒中, 实际传送数据所花费时间。——反映链路的利用率

$$\begin{aligned} \rho &\equiv \lambda \cdot t_f \\ &\leq \lambda_{max} t_f \\ &= \frac{(1-p)t_f}{t_f} \\ &= 1-p \\ &< 1 \end{aligned}$$

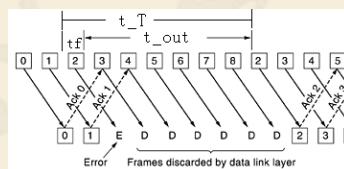
22

## L2协议的性能分析 (续)

### ♦ 连续ARQ协议

成功发一帧所需平均时间

$$\begin{aligned} t_{AV} &= t_f + \frac{p}{1-p} \cdot t_T \\ &= t_f \left[ 1 + \left( \frac{t_f}{t_f} - 1 \right) \cdot p \right] \\ &= \frac{t_f}{1-p} \end{aligned}$$



$$\text{这里 } t_T = t_f + t_{out}$$

23

## 信道利用率

♦ 误帧率: 设  $p_b$  为误比特率。  $t_f$  为帧长。

※ 卫星信道: 每比特出错概率独立。

$$P = 1 - (1 - p_b)^t_f$$

※ 陆地信道: 较多呈现突发性—连串比特的出错

$$P \approx t_f \cdot p_b$$

♦ 平均有效数据率  $D$ : 平均每秒正确传输的bit——协议相关

$$D = \lambda_{max} l_d$$

♦ 链路容量  $C$ : 链路的最大速率——设备相关

$$C = l_f / t_f$$

♦ 信道利用率:  $U = D/C$

24

## 最佳帧长

- Too short frame: 开销(overhead)字段比例较大;
- Too long frame: 1bit出错则整帧重传。
- 最佳帧长:  $\frac{\partial U}{\partial l_d} = 0 \Rightarrow l_{d-opt}$
- 采用连续ARQ协议的情况下:
  - 卫星信道: 2200bit
  - 陆地信道: 1000bit

25

## L2协议举例——HDLC

- 面向字符的协议——BSC
  - 特点: 数传的最小单位是字符, 它们必须来自约定的字符集(如ASCII)
- 缺点:
  - 基于停等协议, 链路利用率低;
  - 所有设备必须使用同一字符集, 兼容性可扩展性差;
  - 差控仅针对数据字段, 可靠性差;
  - 数传以8bit为最小单位, 不够灵活;
  - 数据帧、控制帧格式不统一, 判别复杂。
- 面向bit的协议——HDLC
  - 发展历程: IBM, ANSI, SNA (SDLC)
  - ISO: HDLC
  - CCITT, ITU: X.25 (LAP)

26

### 配置方式:

	节点的名称	允许发起数传的节点
非平衡方式	主站: command; 次站: response	NRM: 仅主站; ARM: 允许次站
平衡方式	复台站: Command/response	ABM: 所有复台站

### 帧格式 (语法)

Bits	8	8	8	>0	16	8
	01111110	Address	Control	Data	Checksum	01111110

Flag: 帧同步; FCS: 差控; A: 寻址(次站地址);  
 C: 控制、数据信息分离, 流控, 链路管理;  
 Data: SDU

27

## 0比特填充技术

- “数据透明传输”要求: 数据字段必须可以包括帧的flag字段的固定字节<01111110>
- Q: 如何判断比特流中的<01111110>到底是数据还是flag?
- 发送方: 在透传区间(帧中除去flag的其他字段), 每逢5个连1, 插入一个额外的0;
- 接收方:
  - 仍旧基于flag断帧;
  - 在透传区间内, 每逢5个连1, 删除其后1个bit;

28

### 控制字段的定义:

比特序号	1	2	3	4	5	6	7	8
标志F	A	地址A	控制C	可变信息Info	帧检验序列FCS	标志F		
信息帧I	0	N(S)	P/F	N(R)				
监督帧S	1	0	S	P/F	N(R)			
无编号帧U	1	1	M	P/F	N(M)			

### 信息帧I:

任务: 数传与应答  
 &N(S): 发送帧的序号;  
 &N(R): 确认N(R)-1及以前各帧的正确接收;  
 &Piggybacking方式: 减少帧的数量, 提高链路利用率;

29

### 监督帧S:

任务: 应答、流控

类别	功能	与ARQ协议的关系
RR	确认+继续	ACK
RNR	确认+暂停	ACK
REJ	否认帧序列	NAK
SREJ	否认个别帧	仅用于选择重传

& P/F位的含义:  
 发送方: P=1要求对方立即响应帧的接收情况;  
 接收方: P=1向发方立即做出回应。

### 无编号帧U:

任务: 链路控制  
 实现方式: 5bit的M字段定义了15种控制帧用于链路的控制与管理。

30

