班级： 2022211301　　**姓名：** 卢安来　　**学号：** 2022212720

1. An upper-layer packet is split into 10 frames, each of which has an 80% chance of arriving undamaged. If no error control is done by the data link protocol, how many times must the message be sent on average to get the entire thing through?

解答：

根据乘法公式，一次将 10 个帧发送成功的概率为 0.8^{10}。

设 X 为正确发送所有帧所需的发送次数，则服从参数为 $p = 0.8^{10}$ 的几何分布 $\mathrm{Ge}(p)$，故

$$E(X) = \frac{1}{p} = \frac{1}{0.8^{10}} = \frac{5^{10}}{4^{10}} \approx 9.31,$$

从而正确发送所有帧的平均发送次数约为 9.31 次。

---

2. The following data fragment occurs in the middle of a data stream for which the byte stuffing algorithm described in the text is used:

| A | B | ESC | C | ESC | FLAG | FLAG | D |

What is the output after stuffing?

解答：

序列

| A | B | ESC | C | ESC | FLAG | FLAG | D |

在经过 byte stuffing 后得到的序列为

| A | B | ESC | ESC | C | ESC | ESC | ESC | FLAG | ESC | FLAG | D |

3. What is the maximum overhead in byte-stuffing algorithm?

解答：

考虑字节串中非 $\boxed{\texttt{FLAG}}$ 且非 $\boxed{\texttt{ESC}}$ 的字节共 n 个，$\boxed{\texttt{FLAG}}$ 或 $\boxed{\texttt{ESC}}$ 共 m 个，则其总长度为 $n+m$。其经过 byte stuffing 后得到的字节串长为 $n+2m$，额外开销占比

$$\delta=\frac{\Delta l}{l}\times 100\%=\frac{(n+2m)-(n+m)}{n+m}\times 100\%=\frac{100}{\frac{n}{m}+1}\%.$$

由于 $n,m\geq 0$，故可知最大额外开销最大为 100%，在 $n=0$ 时取得，即全为 $\boxed{\texttt{FLAG}}$ 或 $\boxed{\texttt{ESC}}$ 的字节串将使得额外开销最大，达到 100%。

---

4. When bit stuffing is used, is it possible for the loss, insertion, or modification of a single bit to cause an error not detected by the checksum? If not, why not? If so, how? Does the checksum length play a role here?

解答：

存在这样的可能。

例如，如果数据是 01111110（bit stuffing 为 011111010），如果第二个 0 由于传输错误丢失，接收到的将是 01111110，这可以被解释为帧的结束。帧结束前的位将被解释为校验和，如果认为数据随机，那么出现这样的错误而不被发现的概率即为 $\frac{1}{2^n}$，其中 n 为校验位的长度。校验和越长，这种错误发生的可能性就越小。

---

6. To provide more reliability than a single parity bit can give, an error-detecting coding scheme uses one parity bit for checking all the odd-numbered bits and a second parity bit for all the even-numbered bits. What is the Hamming distance of this code?

解答：

设该编码为 C，则对于该编码中任一码 $c \in C$，对 c 的任何一位的修改 $\hat{c}$ 都将导致奇偶校验失败，即 $\hat{c} \notin C$，从而 C 的码距 $d(C) > 1$。

考虑奇偶校验无法识别偶数次错误，故对于偶数次奇数位的修改或者偶数次偶数位的修改将无法识别，从而有 $d(C) \leq 2$。

综上所述，有 $d(C) = 2$，即该编码的码距为 2。

---

7. An 8-bit byte with binary value 10101111 is to be encoded using an even-parity Hamming code. What is the binary value after encoding?

解答：

由题可知，$m = 8$，$r = \min\{r \in \mathbb{N} \mid m + r + 1 \leq 2^r\} = 4$，从而计算编码如下：

p_1	p_2	m_3	p_4	m_5	m_6	m_7	p_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}
1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1

故原字节编码为 `1010 0100 1111`。

---

9. One way of detecting errors is to transmit data as a block of n rows of k bits per row and add parity bits to each row and each column. The bit in the lower-right corner is a parity bit that checks its row and its column. Will this scheme detect all single errors? Double errors? Triple errors? Show that this scheme cannot detect some four-bit.

解答：

设 (i,j) 表示第 i 行第 j 列 bit 的坐标。

该编码可以识别单个错误，设该错误发生在 (i,j)，则第 i 行的奇偶校验和第 j 行的奇偶校验失败，可以识别到错误。

该编码可以识别两个错误，设错误发生在 $(i_1,j_1),(i_2,j_2)$，若 $i_1 \neq i_2$ 且 $j_1 \neq j_2$，则第 i_1,i_2 行奇偶校验失败，第 j_1,j_2 列奇偶校验失败，可以识别到错误；若 $i_1 = i_2$，则有 $j_1 \neq j_2$，从而第 j_1,j_2 列奇偶校验失败，可以识别到错误；若 $j_1 = j_2$，则有 $i_1 \neq i_2$，从而第 i_1,i_2 行奇偶校验失败，可以识别到错误。综上所述，该编码可以识别两个错误。

该编码可以识别三个错误，类比上述分类讨论可知，存在一个错误与其他错误的行（或列）不同，则该行（或列）奇偶校验失败，可以识别到错误。

该编码无法识别四个错误，理由如下：考虑 $i_1 \neq i_2, j_1 \neq j_2$，则当 $(i_1,j_1),(i_1,j_2),(i_2,j_1),(i_2,j_2)$ 同时错误时，第 i_1,i_2 行和第 j_1,j_2 列奇偶校验成功，均无法识别到错误。

11. Suppose that data are transmitted in blocks of sizes 1000 bits. What is the maximum error rate under which error detection and retransmission mechanism (1 parity bit per block) is better than using Hamming code? Assume that bit errors are independent of one another and no bit error occurs during retransmission.

解答：

若使用 Hamming 码，由题可知，$m = 1000$，$r = \min\{r \in \mathbb{N} \mid m + r + 1 \leq 2^r\} = 10$。故可知采用检错重传方案的代价为 1001 bit 每帧，采用 Hamming 码方案的代价为 1010 bit 每帧。

为简化，考虑每帧（n bit）最多只出现一处错误，设误码率为 ber，即假设 $1 - \left(\binom{n}{0}\mathrm{ber}^0(1-\mathrm{ber})^n + \binom{n}{1}\mathrm{ber}(1-\mathrm{ber})^{n-1}\right) \ll 1$，则检错重传方案的平均花费

$$E(C_{n,1}) \approx n \times \binom{n}{0}\mathrm{ber}^0(1-\mathrm{ber})^n + 2 \times n \times \binom{n}{1}\mathrm{ber}(1-\mathrm{ber})^{n-1},$$

Hamming 码方案的平均花费

$$E(C_{n,2}) \approx n \times \binom{n}{0}\mathrm{ber}^0(1-\mathrm{ber})^n + n \times \binom{n}{1}\mathrm{ber}(1-\mathrm{ber})^{n-1} \approx n.$$

令 $E(C_{1001,1}) < E(C_{1010,2})$，则解得 $\mathrm{ber} < 9 \times 10^{-6}$（另一非法解已经舍去），检验得 $\frac{1-\left(\binom{n}{0}\mathrm{ber}^0(1-\mathrm{ber})^n+\binom{n}{1}\mathrm{ber}(1-\mathrm{ber})^{n-1}\right)}{1} \approx 4 \times 10^{-5}$，符合简化假设，上述推理有效。

故可知，在本题情形下，使得检错重传方案优于 Hamming 码方案的误码率最大为约 9×10^{-6}。

14. What is the remainder obtained by dividing x^7+x^5+1 by the generator polynomial x^3+1?

解答：

$$(x^7+x^5+1)-x^4(x^3+1)=x^5-x^4+1,$$
$$(x^5-x^4+1)-x^2(x^3+1)=-x^4-x^2+1,$$
$$(-x^4-x^2+1)+x(x^3+1)=-x^2+x+1$$

由上述计算可知，$x^7+x^5+1=(x^4+x^2-x)(x^3+1)+(-x^2+x+1)$，故 x^7+x^5+1 除以 x^3+1 的余式为 $-x^2+x+1$。（若在 $\mathbb{Z}_2$ 中考虑则余式为 x^2+x+1）

---

15. A bit stream `10011101` is transmitted using the standard CRC method described in the text. The generator polynomial is x^3+1. Show the actual bit string transmitted. Suppose that the third bit from the left is inverted during transmission. Show that this error is detected at the receiver's end. Give an example of bit errors in the bit string transmitted that will not be detected by the receiver.

解答：

计算 `10011101` 的校验码如下

```
10011101000
1001
    1101000
    1001
     100000
     1001
        100
```

故 `10011101` 的校验码为 `100`，即传输的 bit 串为 `10011101100`。

当从左测数第三位反转后，所得 bit 串为 `10111101100`，此时校验如下。

```
10111101100
1001
```

```
  101101100
  1001
    1001100
    1001
        100
```

计算结果不为全零，校验失败，说明存在错误。

下面考虑构造无法被接收方识别的错误，原 bit 串为 10011101100（同上），假设错误后为 00001101100，则校验过程过程如下：

```
00001101100
    1001
     100100
     1001
        000
```

计算结果全为零，校验成功，说明错误未被检出。

---

16. Data link protocols almost always put the CRC in a trailer rather than in a header. Why?

解答：

CRC编码的校验子一般按照从前到后依次进行 $\mathbb{Z}_2$ 下除法运算求余的方式计算，如果将校验子放在尾部，可以采取边发送边计算的设计方案。这将提高发送方的发送效率并降低设计的复杂程度。

---

17. In the discussion of ARQ protocol in Section 3.3.3, a scenario was outlined that resulted in the receiver accepting two copies of the same frame due to a loss of acknowledgement frame. Is it possible that a receiver may accept multiple copies of the same frame when none of the frames (message or acknowledgement) are lost?

解答：

有可能。如果出于某种原因，发送方的计时器在接收方的 ACK 到达之前到时，则发送方将会重发相同的帧，此时接收方将再次收到同一帧。

---

18. A channel has a bit rate of 4 kbps and a propagation delay of 20 msec. For what range of frame sizes does stop-and-wait give an efficiency of at least 50%?

解答：

设帧的大小为 n 个 bit，则传输时延 $t_{\text{trans}} = \frac{n\ \text{bit}}{4\ \text{kbps}} = \frac{n}{4}\ \text{ms}$。由题可知传播时延 $t_{\text{prop}} = 20\ \text{ms}$。

对于停等协议，$t_{\text{total}} = t_{\text{trans}} + 2t_{\text{prop}}$，故信道利用率

$$\eta = \frac{t_{\text{trans}}}{t_{\text{total}}} \times 100\% = \frac{\frac{n}{4}}{\frac{n}{4} + 40} \times 100\% \geq 50\%,$$

解得 $n \geq 160$，即帧的大小至少为 160 个 bit 每帧。

20. A 3000-km-long T1 trunk is used to transmit 64-byte frames using protocol 5. If the propagation speed is 6 μsec/km, how many bits should the sequence numbers be?

解答：

Protocol 5 即为回退 n 步协议，PCM T1 的数据传输速率为 1.544 Mbps。

根据题意，可知传播时延 $t_{\text{prop}} = 3000\ \text{km} \times 6\frac{\mu\text{s}}{\text{km}} = 18\ \text{ms}$，传输时延 $t_{\text{trans}} = \frac{64\times 8\ \text{bit}}{1.544\ \text{Mbps}} = \frac{64}{193}\ \text{ms}$。

对于回退 n 步协议，由于信道利用率

$$\eta = \min\left\{\frac{n\cdot t_{\text{trans}}}{t_{\text{trans}} + 2\cdot t_{\text{prop}}}, 1\right\} = \min\left\{\frac{n}{1 + 2\cdot\frac{t_{\text{prop}}}{t_{\text{trans}}}}, 1\right\}$$

故欲传输效率最大化，只需使得 $n \geq 1 + 2\cdot\frac{t_{\text{prop}}}{t_{\text{trans}}} = 109.5625$。

从而所需的 bit 数为 $\lceil\log_2(n+1)\rceil = 7$。

---

27. Consider the operation of protocol 6 over a 1-Mbps perfect (i.e., error-free) line. The maximum frame size is 1000 bits. New packets are generated 1 second apart. The timeout interval is 10 msec. If the special acknowledgement timer were eliminated, unnecessary timeouts would occur. How many times would the average message be transmitted?

解答：

Protocol 6 即为稍待确认的选择重传协议。

根据题意，传输时延 $t_{\text{trans}} = \frac{1000\ \text{bit}}{1\ \text{Mbps}} = 1\ \text{ms}$。

当 $t = 0$ 时，发送方开始发送帧，当 $t_1 = t_{\text{prop}} + t_{\text{trans}}$ 时，接收方收到完整的帧。根据题意，可以假设接收方下一次发送数据的时刻服从 t' 均匀分布 $\text{U}(t_1, t_1 + 1000)$。

如果 $t' + t_{\text{prop}} + t_{\text{trans}} \leq t_{\text{trans}} + 10\ \text{ms}$，则该帧成功接收并捎

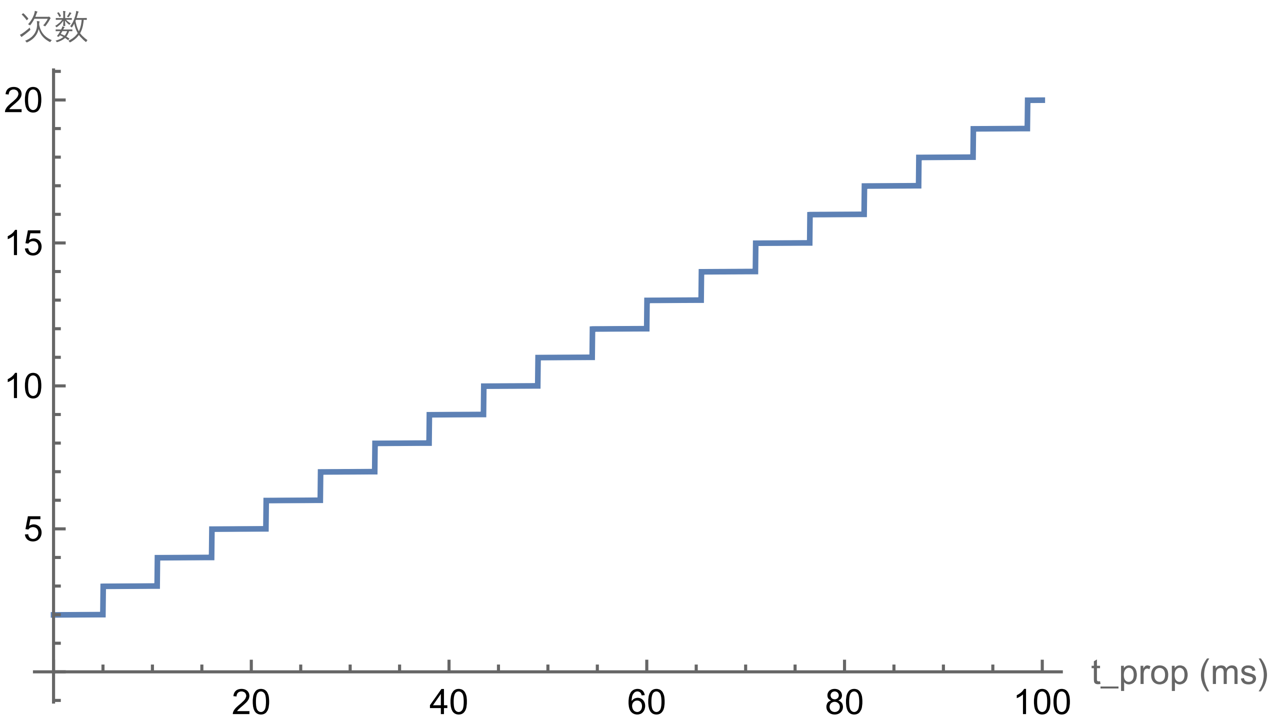
带确认，发送次数为 1。

如果 $t' + t_{\text{prop}} + t_{\text{trans}} > t_{\text{trans}} + 10\text{ ms}$，即发送方的计时器在反馈包到达前超时，发送方重发该帧，将在 $t_2 = 2 \cdot t_{\text{trans}} + 2 \cdot t_{\text{prop}} + 10\text{ ms}$ 时到达，此时根据协议规定，接收方必然发送反馈信息，或者，在等待反馈信息的期间，发送方仍可能反复进行超时重发，重发次数为 $\left\lceil \frac{\min\{t'+t_{\text{trans}}+t_{\text{prop}}, 2\cdot t_{\text{trans}}+2\cdot t_{\text{prop}}+10\text{ ms}\}}{t_{\text{trans}}+10\text{ ms}} \right\rceil = \left\lceil \frac{\min\{t'+t_{\text{prop}}+1\text{ ms}, 2\cdot t_{\text{prop}}+12\text{ ms}\}}{11\text{ ms}} \right\rceil$。

综上所述，每帧平均发送次数

$$E(\text{Trans}) = \int_{t_1}^{t_1+1000} f(t) \cdot \text{count}(t) \cdot \mathrm{d}t.$$

求解结果如下图所示（题中未给定 t_{prop}）。



28. In protocol 6, MAX_SEQ= $2^n - 1$. While this condition is obviously desirable to make efficient use of header bits, we have not demonstrated that it is essential. Does the protocol work correctly for MAX_SEQ=4, for example?

解答：

Protocol 6 即为选择重传协议。题中所给的条件下，该协议无法正常工作。

当最大序号数为 4 时，发送窗口和接收窗口大小为 2，这说明在接收方，序号为偶数的帧将被放入 `buf[0]`，序号为奇数的帧将被放入 `buf[1]`。

下面给出一种出错的情景。当 MAX_SEQ 为 4 的时候，可用的序号有 0, 1, 2, 3, 4，发送方依次发送 0, 1 帧和 2, 3 帧后（均成功接受并收到 ACK）将发送 4, 0 帧，此时接收方将依次接受 4, 0 帧，此时 buf[0] 中将先放入 4 帧，再放入 0 帧，此时 4 帧将被 0 帧覆盖，但此时协议无法检测出任何错误，因为 4, 0 均在接收窗口内。最终该协议会将错误的数据提交给网络层，这说明了它在此情景下无法正常工作。

---

29. Frames of 1000 bits are sent over a 1-Mbps channel using a geostationary satellite whose propagation time from the earth is 270 msec. Acknowledgements are always piggybacked onto data frames. The headers are very short. Three-bit sequence numbers are used. What is the maximum achievable channel utilization for

(a) Stop-and-wait?

(b) Protocol 5?

(c) Protocol 6?

解答：

根据题意，可知传播时延 $t_{\text{prop}} = 270\ \text{ms}$，传输时延 $t_{\text{trans}} = \frac{1000\ \text{bit}}{1\ \text{Mbps}} = 1\ \text{ms}$。

(a) 对于捎带确认的停等协议，信道利用率

$$\eta_a = \frac{t_{\text{trans}}}{2 \cdot t_{\text{trans}} + 2 \cdot t_{\text{prop}}} \times 100\% = 0.185\%.$$

(b)　Protocol 5 即为回退 n 步协议，最大窗口大小为 7，从而信道利用率

$$\eta_b = \frac{n \cdot t_{\text{trans}}}{2 \cdot t_{\text{trans}} + 2 \cdot t_{\text{prop}}} \times 100\% = 1.29\%.$$

(c)　Protocol 6 即为选择重传协议，发送方窗口大小为 4，从而信道利用率

$$\eta_b = \frac{n \cdot t_{\text{trans}}}{2 \cdot t_{\text{trans}} + 2 \cdot t_{\text{prop}}} \times 100\% \approx 0.735\%.$$

---

30. Consider an error-free 64-kbps satellite channel used to send 512-byte data frames in one direction, with very short acknowledgements coming back the other way. What is the maximum throughput for window sizes of 1, 7, 15, and 127? The earth-satellite propagation time is 270 msec.

解答：

根据题意可知，传输时延 $t_{\text{trans}} = \frac{512\times 8\text{ bit}}{64\text{ kbps}} = 64\text{ ms}$，传播时延 $t_{\text{prop}} = 270\text{ ms}$。

发送窗口为 n 的 GBN 协议的信道利用率

$$\eta_n = \min\left\{\frac{n \cdot t_{\text{trans}}}{t_{\text{trans}} + 2 \cdot t_{\text{prop}}}, 1\right\} \times 100\%.$$

从而吞吐量

$$T_n = \eta_n \times B = \min\left\{\frac{64 \times n}{64 + 2 \times 270}, 1\right\} \times 64\text{ kbps}.$$

分别带入 $n = 1, 7, 15, 127$，计算可得

$$T_1 \approx 6.781\text{ kbps},$$
$$T_7 \approx 47.470\text{ kbps},$$
$$T_{15} = 64\text{ kbps},$$
$$T_{127} = 64\text{ kbps}.$$

---

31. A 100-km-long cable runs at the T1 data rate. The propagation speed in the cable is $\frac{2}{3}$ the speed of light in vacuum. How many bits fit in the cable?

解答：

T1 数据传输速率为 1.544 Mbps，真空中光速为 $c = 299792458\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$。

根据题意可知，传播时延 $t_{\text{prop}} = \frac{100\ \mathrm{km}}{\frac{2}{3} \times 299792458\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}}$，故可知某个时刻，在线缆中传输的 bit 数

$$n = B \times t_{\text{prop}} = 1.544\ \mathrm{Mbps} \times \frac{100\ \mathrm{km}}{\frac{2}{3} \times 299792458\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}} \approx 772.534$$

故可知某个时刻，在线缆中传输的 bit 数为约 772.534 个。

---

32. Give at least one reason why PPP uses byte stuffing instead of bit stuffing to prevent accidental flag bytes within the payload from causing confusion.

解答：

从上层协议来看，PPP 主要用于传输网络层数据包，而这些数据包通常以字节为单位，使用字节填充可以更好地与网络层数据包的处理方式相匹配。

从协议实现来看，PPP 主要由软件实现，因此以字节为单位进行处理更加自然，也简化了实现的复杂性。

从下层服务来看，PPP 的物理层一般是调制解调器，其以字节为单位对数据进行传输。PPP 采用字节填充方式避免了 PPP 使用下层服务前的额外处理。

---

33. What is the minimum overhead to send an IP packet using PPP? Count only the overhead introduced by PPP itself, not the IP header overhead. What is the maximum overhead?

解答：

为达到最小开销，可以构造帧，使得每帧有 2 个标志字节，（地址字节和控制字节由 LCP 省略），1 个协议字节，2 个校验和字节，共计额外开销为每帧 5 个字节。

为达到最大开销，可以构造帧，使得每帧有 2 个标志字节，1 个地址字节，1 个控制字节，2 个协议字节，4 个校验和字节，共计额外开销为每帧 10 个字节。

补充题 1、已知数据位流为 1101 0110，采用 CRC 校验，$G(x) = x^3 + 1$，计算出校验位。

解答：

$G(x) = x^3 + 1$ 对应的二进制串为 1001，从而计算如下：

```
11010110000
1001
 1000110000
 1001
    1110000
    1001
     111000
     1001
      11100
      1001
       1110
       1001
        111
```

故可知三位校验位为 111。

补充题 2、采用 3 比特序号的选择重传（SR）协议，若接收窗口为 5，则发送窗口的最大值是多少？

解答：

由于选择重传协议中，接受窗口不得与发送窗口重合，故发送窗口大小的最大值为 $2^3-5=3$。

讨论：

这题目真有意思，接收窗口的大小居然超过了序号空间的一半，并且用最松的限制计算下来发送窗口的大小都比接收窗口小。这样的配置既不现实也不效率，应该是题目里面的某个参数写错了。

补充题 3、50-kbps 的卫星信道，往返时延为 500ms，帧长为 1000 位，使用捎带确认（搭载 ACK）的 SR 协议，若使效率达到 50%，序号的比特数至少是多少？

解答：

根据题意，传播时延 $t_{\text{prop}}=250\text{ ms}$，传输时延 $t_{\text{trans}}=\frac{1000\text{ bit}}{50\text{ kbps}}=20\text{ ms}$。

捎带确认的选择重传协议的信道利用率

$$\eta=\min\left\{\frac{n\cdot t_{\text{trans}}}{2\cdot t_{\text{trans}}+2\cdot t_{\text{prop}}},1\right\}\times 100\%.$$

令 $\eta\geq 50\%$，解得 $n\geq 13.5$，从而可知序号的最少 bit 数为 5。

补充题 4、数据链路层采用 GBN（回退 N 步）协议，发送方已经发送了编号为 0 到 7 的帧，当计时器超时时，若发送方只收到 0，4，5 号帧的确认，则发送方需要重发的帧数是多少？

解答：

根据回退 N 步协议的累计确认原则，发送方可以确认接收方已经收到了编号为 0, 1, 2, 3, 4, 5 的帧，故发送方需要重发编号为 6, 7 的帧，共计 2 帧。

补充题 5、两台计算机的数据链路层协议实体采取滑动窗口机制利用 16kbps 的卫星信道传输长度为 128 字节的数据帧，信道传播时延为 270ms。

1) 计算使用停等协议的信道利用率；

2) 计算使用发送窗口为 7 的 GBN 协议的信道利用率；

3) 计算使用发送窗口为 15 的 GBN 协议的信道利用率；

4) 为使信道利用率达到最高，使用 GBN 协议时序号的比特数最少为多少位？

解答：

根据题意可知，传输时延 $t_{\text{trans}} = \frac{128\times 8\ \text{bit}}{16\ \text{kbps}} = 64\ \text{ms}$，传播时延 $t_{\text{prop}} = 270\ \text{ms}$。

若不捎带确认，则：

1) 停等协议的信道利用率

$$\eta_1 = \frac{t_{\text{trans}}}{t_{\text{trans}} + 2\cdot t_{\text{prop}}} \times 100\% = 10.596026490066225165562913907285\%.$$

2) 发送窗口为 7 的 GBN 协议的信道利用率

$$\eta_2 = \min\left\{\frac{n\cdot t_{\text{trans}}}{t_{\text{trans}} + 2\cdot t_{\text{prop}}}, 1\right\} \times 100\% = \frac{112}{151} \times 100\% = 74.172185430463576158940397350993\%.$$

3) 发送窗口为 15 的 GBN 协议的信道利用率

$$\eta_3 = \min\left\{\frac{n\cdot t_{\text{trans}}}{t_{\text{trans}} + 2\cdot t_{\text{prop}}}, 1\right\} \times 100\% = 100\%.$$

4) 为使信道利用率达到最高，只需使得

$$n \geq 1 + 2 \cdot \frac{t_{\text{prop}}}{t_{\text{trans}}} = 9.4375.$$

最少比特数即为 $\lceil \log_2(n+1) \rceil = 4$。

若捎带确认，则：

1) 停等协议的信道利用率

$$\begin{aligned}\eta_1 \\ &= \frac{t_{\text{trans}}}{2 \cdot t_{\text{trans}} + 2 \cdot t_{\text{prop}}} \times 100\% \\ &= 9.580838323353293\%.\end{aligned}$$

2) 发送窗口为 7 的 GBN 协议的信道利用率

$$\begin{aligned}\eta_2 \\ &= \min\left\{\frac{n \cdot t_{\text{trans}}}{2 \cdot t_{\text{trans}} + 2 \cdot t_{\text{prop}}}, 1\right\} \times 100\% \\ &= 67.06586826347305\%.\end{aligned}$$

3) 发送窗口为 15 的 GBN 协议的信道利用率

$$\begin{aligned}\eta_3 \\ &= \min\left\{\frac{n \cdot t_{\text{trans}}}{2 \cdot t_{\text{trans}} + 2 \cdot t_{\text{prop}}}, 1\right\} \times 100\% \\ &= 100\%.\end{aligned}$$

4) 为使信道利用率达到最高，只需使得

$$n \geq 2 + 2 \cdot \frac{t_{\text{prop}}}{t_{\text{trans}}} = 10.4375.$$

最少比特数即为 $\lceil \log_2(n+1) \rceil = 4$。