Lab3-3拥塞控制算法实现

许健2013018

之前两次实验中，我们实现了一个简单的基于UDP协议的可靠传输，主要使用rdt3.0协议，完成了差错检测和确认重传功能。流量控制方便，采用流水线机制的GBN算法代替停等机制，在确认未返回之前允许发送多个数据包，提高了性能。

GBN 的特点如下：

1）允许发送端发出 N 个未得到确认的分组

2）分组首部中增加 k 位的序列号，序列号空间为 [0, 2k-1]

3）采用累积确认，只确认连续正确接收分组的最大序列号

4）可能接收到重复的 ACK，所以需要在发送端设置定时器，定时器超时，重传所有未确认的分组

为了防止主机发送的数据过多或过快，造成网络中的路由器（或其他设备）无法及时处理，从而引入时延或丢弃。我们在发送消息时，还需要进行拥塞控制。TCP协议采用基于窗口的方法，通过拥塞窗口的增大或减小控制发送速率。我们也借鉴这样的做法，使用**New RENO**算法实现拥塞控制。

New RENO算法

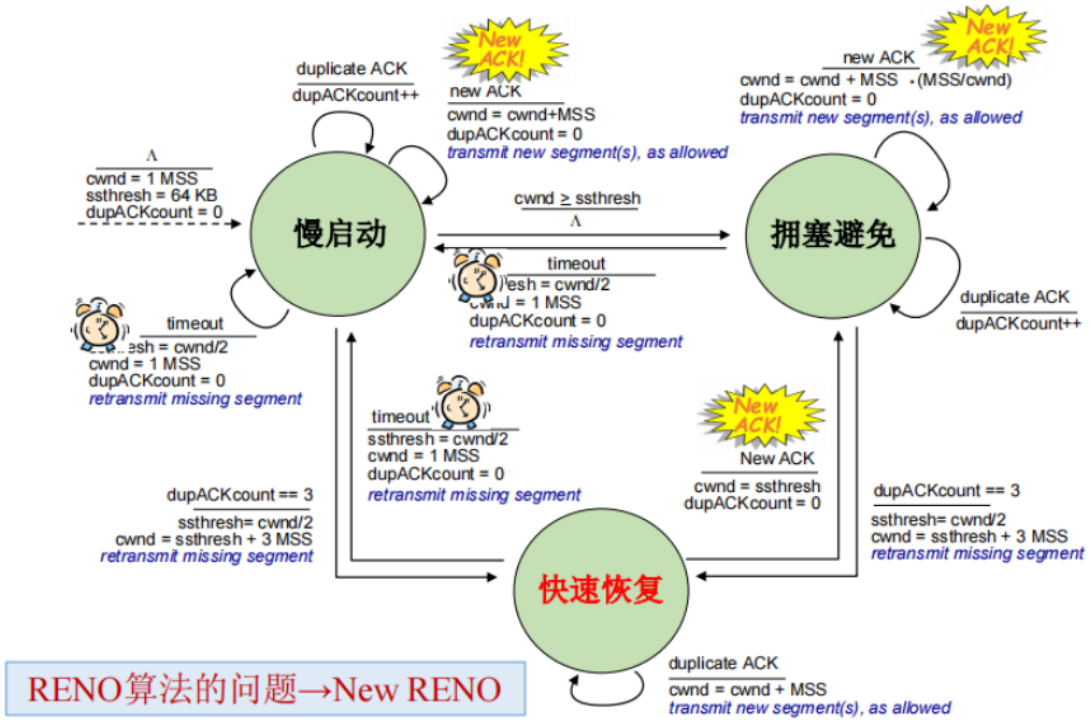
结合有限状态机，讲解RENO算法的原理：

RENO算法定义了三个阶段：

1. 慢启动阶段：初始拥塞窗口的大小\cwnd=1，每个RTT，cwnd翻倍（指数增长），但收到重复ACK消息时cwnd不变。
2. 拥塞避免阶段：每个RTT，cwnd增1（线性增长），但收到重复ACK消息时cwnd不变。
3. 快速恢复阶段：每个RTT，cwnd翻倍（指数增长）。

这三个阶段之间的关系如下：

- 连接建立时，进入慢启动阶段（可以理解为刚开始只发送一个报文，试探一下网络的情况）。
- 拥塞窗口达到阈值时，慢启动阶段结束，进入拥塞避免阶段。
- 收到三次重复ACK消息时，进入快速恢复阶段。
- 在快速恢复阶段，收到新的ACK消息时，进入拥塞避免阶段。
- 超时的情况下，进入慢启动阶段。



其中，在快速恢复阶段，收到新的ACK消息时，**New RENO算法和RENO算法的不同之处在于，它会检查这个New ACK是否为已经发送的最后一个数据包的序列号，也就是说是否所有发送的数据包都被确认，如果不是，将会继续保持快速恢复，而不会进入拥塞避免。**这样程序就不会频繁地在快速恢复和拥塞避免两个阶段反复横跳，造成阈值多次折半的问题。

另外，需要注意的一点是，流量控制和拥塞控制都是基于窗口的机制，二者在窗口大小的计算上是独立的。流量控制的窗口大小取决于接收端的缓冲区，只是我们上面为了简单将其设置为固定大小；拥塞控制的窗口大小是基于网络的情况。而实际发送窗口取决于接收通告窗口和拥塞控制窗口中的较小值。

程序实现

New RENO会用到的全局变量如下，包括通告窗口rwnd（这里取固定值10）、拥塞窗口cwnd、阈值ssthresh、reno状态机的状态renostate等。再回顾以下我们的协议头部字段，window字段显示当前可发送窗口大小，取决于接收通告窗口和拥塞控制窗口中的较小值。

```
//GBN需要使用的全局变量
int resendCount = 0;          // 重传次数
int base = 2;                 // base之前序列号累计确认
bool resend = false;          // 是否超时重传
bool restart = false;         // 是否重新开始计时
bool wait = false;            // 是否因窗口不够而需等待
long long lenCopy = 0;        // 文件数据偏移量的拷贝，供重传时使用

//拥塞控制
const int rwnd = 10;          // 接收通告窗口大小，固定值
double cwnd = 1;              // 拥塞窗口大小
int ssthresh = 8;             // 阈值
unsigned char lastAck = 0;    // 上一个ACK序列号
int dupAck = 0;               // 重复收到的ACK次数
int renoState = 0;            // RENO状态机的状态，0为慢启动，1为拥塞控制，2为快速恢复

struct Head {
    u_char type;                        //数据包类型
```

```
    u_char window;                          //窗口大小
    u_char seq;                             //序列号
    u_short checksum;                       //校验和
    u_short length;                         //数据部分长度
};
```

计时线程

计时线程中，我们设置了restart标志位，只要在其他的线程中正确设置这个标志位，计时线程就可以正常运行。我们还设置了resend标志位，这是负责通知主线程超时重传，超时后阈值减半，窗口大小为1，回到慢启动阶段。

```
//标志位restart、resend
//timer线程函数，管理计时器
DWORD WINAPI timer(LPVOID lparam) {
    clock_t start = clock();
    while (true) {
        //是否重新开始计时
        if (restart) {
            start = clock();
            restart = false;
        }
        //是否超时重传
        if (clock() - start > MAX_WAIT_TIME) {
            resend = true;
            start = clock();

            // 超时后阈值减半，窗口大小为1
            //回到慢启动阶段
            ssthresh = cwnd / 2;
            cwnd = 1;
            dupAck = 0;
            renoState = 0;
        }
    }
    return 0;
}
```

接收ACK消息进程

接收到正确的ACK消息后，还需要处理RENO状态机的状态转换。在最后的程序演示中，我们观察到了因为发生超时重传，导致发送端从拥塞避免状态转变到慢开始状态，拥塞窗口的变化；以及三次ACK累计确认导致快速恢复的情况。

```
//接收ACK线程
DWORD WINAPI recvThread(LPVOID IpParameter) {
    //线程socket sockSender
    SOCKET sockSender = *(SOCKET*)IpParameter;
    int len = sizeof(SOCKADDR);

    //接收数据包recv
    Head recv;
    while (true) {
        //接收到数据包
        memset(&recv, 0, sizeof(recv));
```

```
        if (recvfrom(sockSender, (char*)&recv, sizeof(recv), 0,
(SOCKADDR*)&ServerAddr, &len) > 0) {
            // 验证校验和、类型字段
            if (recv.type == ACK && !CheckSum((u_short*)&recv, sizeof(recv))) {
                lenCopy += (recv.seq - base) * MAX_SEND_SIZE;
                base = recv.seq;
                //清除标志位
                restart = true;
                resendCount = 0;
                wait = false;

                //RENO算法状态处理
                // 慢启动
                if (renoState == 0) {
                    // 判断是否为new ACK，是的话更新窗口空间
                    if (recv.seq == lastAck) {
                        dupAck++;
                    }
                    else {
                        dupAck = 0;
                        lastAck = recv.seq;
                        cwnd++;
                    }
                    // 窗口大小超过阈值，进入拥塞避免阶段
                    if (cwnd >= ssthresh)
                        renoState = 1;
                    // 重复ACK超过3次，进入快速恢复阶段
                    if (dupAck == 3) {
                        cout << "快速恢复..." << endl;
                        resend = 1;
                        ssthresh = cwnd / 2;
                        cwnd = ssthresh + 3;
                        renoState = 2;
                    }
                }
                // 拥塞避免
                else if (renoState == 1) {
                    if (recv.seq == lastAck) {
                        dupAck++;
                    }
                    else {
                        dupAck = 0;
                        lastAck = recv.seq;
                        cwnd += 1.0 / cwnd;
                    }
                    // 重复ACK超过3次，进入快速恢复阶段
                    if (dupAck == 3) {
                        cout << "快速恢复..." << endl;
                        resend = 1;
                        ssthresh = cwnd / 2;
                        cwnd = ssthresh + 3;
                        renoState = 2;
                    }
                }
                // 快速恢复
                else {
                    if (recv.seq == lastAck) {
                        cwnd++;
```

```
                    }
                    //新RENO算法
                    // 接收到new ACK，需要判断是否发送的消息都被接收
                    // 如果不是，保持快速恢复；如果是，进入拥塞避免阶段
                    else {
                        if (recv.seq == Seq) {
                            renoState = 1;
                            lastAck = recv.seq;
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
    return 0;
}
```

发送消息函数

在发送消息的函数中，window应该代表实际发送窗口的大小，而这取决于接收通告窗口和拥塞控制窗口中的较小值。实验时将rwnd设置为固定窗口大小，也可以将其设置为可变的，由接收端发送来的消息确定，可以用消息头中的window字段加上控制位来表示rwnd。

```
void sendData(char* Buffer, int FileSize) {
    // 实际发送窗口取决于接收通告窗口和拥塞控制窗口中的较小值
    int window = 0;
    HANDLE Thread1 = CreateThread(NULL, NULL, recvThread, LPVOID(&Client), 0,
NULL);
    HANDLE Thread2 = CreateThread(NULL, NULL, timer, LPVOID(NULL), 0, NULL);
    int sentLen = 0;                    //已经发送的长度
    u_int size = MAX_SEND_SIZE;         //发送数据包size
    bool last = 0;                      //判断是否是最后一个数据包
    base = Seq;

    while (1) {
        //更新窗口
        if (rwnd < cwnd)
            window = rwnd;
        else
            window = cwnd;

        //需要超时重传的情况，Seq回到base的位置
        if (resend == true) {
            sentLen = lenCopy;
            Seq = base;
            resend = false;
        }

        //当前window还可以发送
        if (((base + window) < 256 && (int)Seq < base + window) ||
            ((base + window) >= 256 && ((int)Seq >= base || (int)Seq < (base +
window) % 256))) {
            if (sentLen + MAX_SEND_SIZE > FileSize) {
                size = FileSize - sentLen;
                last = 1;
            }
            //发送数据包函数
```

```
            sendPackage(Buffer + sentLen, size, Seq, window, last);
            Seq++;
            sentLen += size;
            //针对最后一个数据包的处理，退出循环
            if (sentLen == FileSize) {
                CloseHandle(Thread1);
                CloseHandle(Thread2);
                break;
            }
        }
        // 若下一个序列号不在窗口内，等待ACK
        else {
            cout << "Waiting for window!" << endl;
            wait = true;
            while (wait & !resend) {
                //Sleep(100);
            }
        }
    }
}
```

程序演示

无丢包情况

在没有丢包的情况下，程序的接收发送速度很快，window大小取决于接收通告窗口和拥塞控制窗口中的较小值，保持为10不变。但是cwnd窗口的一直在增长，拥塞避免阶段1个RTT时间，cwnd大小增1。

```
[SEND]Client: Seq = 170  Window = 10  cwnd=19.6698  Length = 10000  CheckSum = 65457
[SEND]Client: Seq = 171  Window = 10  cwnd=19.7207  Length = 10000  CheckSum = 60451
[SEND]Client: Seq = 172  Window = 10  cwnd=19.7714  Length = 10000  CheckSum = 16089
[SEND]Client: Seq = 173  Window = 10  cwnd=19.822  Length = 10000  CheckSum = 38818
[SEND]Client: Seq = 174  Window = 10  cwnd=19.8724  Length = 10000  CheckSum = 6797
[SEND]Client: Seq = 175  Window = 10  cwnd=19.9227  Length = 10000  CheckSum = 56444
[SEND]Client: Seq = 176  Window = 10  cwnd=19.9729  Length = 10000  CheckSum = 46011
[SEND]Client: Seq = 177  Window = 10  cwnd=20.023  Length = 10000  CheckSum = 12612
[SEND]Client: Seq = 178  Window = 10  cwnd=20.0729  Length = 10000  CheckSum = 16876
[SEND]Client: Seq = 179  Window = 10  cwnd=20.1228  Length = 10000  CheckSum = 38424
[SEND]Client: Seq = 180  Window = 10  cwnd=20.1725  Length = 10000  CheckSum = 63434
[SEND]Client: Seq = 181  Window = 10  cwnd=20.222  Length = 10000  CheckSum = 18088
[SEND]Client: Seq = 182  Window = 10  cwnd=20.2715  Length = 10000  CheckSum = 40305
[SEND]Client: Seq = 183  Window = 10  cwnd=20.3208  Length = 10000  CheckSum = 1310
[SEND]Client: Seq = 184  Window = 10  cwnd=20.37  Length = 10000  CheckSum = 28651
[SEND]Client: Seq = 185  Window = 10  cwnd=20.4191  Length = 10000  CheckSum = 161
[SEND]Client: Seq = 186  Window = 10  cwnd=20.4681  Length = 10000  CheckSum = 30490
[SEND]Client: Seq = 187  Window = 10  cwnd=20.5169  Length = 7353  CheckSum = 22788
send over!
发送数据:1857353 Bytes
发送时间0.271s
吞吐率6853.7KB/s
Wave Hand...
[FIN,ACK]Client:                Seq=188 CheckSum=13120
挥手成功
program will close after 3 seconds
请按任意键继续. . .
```

设置丢包率为5%

当出现超时重传时，RENO回到慢开始阶段，ssthresh大小等于cwnd/2，cwnd变成1。从图中可以看到，经历了重传，ssthresh变成3，Window=cwnd=1。

```
[SEND]Client: Seq = 178  Window = 6  cwnd=6  ssthresh=2  Length = 10000  CheckSum = 17900
Waiting for window!
Waiting for window!
Waiting for window!
Waiting for window!
Waiting for window!
Waiting for window!
[SEND]Client: Seq = 173  Window = 1  cwnd=1  ssthresh=3  Length = 10000  CheckSum = 41122
```

当发送端连续接收到3个重复的ACK时，会进行快速恢复阶段，此时ssthresh变成cwnd/2，cwnd变成ssthresh+3。

由图中可以看出，ssthresh由7变成cwnd/2=6，cwnd由13.6261变成ssthresh+3=9。注意cwnd为double类型，ssthresh为int类型，因此会发生舍入。这是因为TCP中的reno算法增长以字节为单位，而我们这以数据包为单位，因此cwnd设置为了浮点型。

```
[SEND]Client: Seq = 165  Window = 10  cwnd=13.4781  ssthresh=7  Length = 10000  CheckSum = 55063
Waiting for window!
[SEND]Client: Seq = 166  Window = 10  cwnd=13.5523  ssthresh=7  Length = 10000  CheckSum = 14739
Waiting for window!
[SEND]Client: Seq = 167  Window = 10  cwnd=13.6261  ssthresh=7  Length = 10000  CheckSum = 60225
Waiting for window!
Waiting for window!
Waiting for window!
快速恢复...Waiting for window!

[SEND]Client: Seq = 158  Window = 9  cwnd=9  ssthresh=6  Length = 10000  CheckSum = 7141
[SEND]Client: Seq = 159  Window = 9  cwnd=9  ssthresh=6  Length = 10000  CheckSum = 34452
[SEND]Client: Seq = 160  Window = 9  cwnd=9  ssthresh=6  Length = 10000  CheckSum = 60097
[SEND]Client: Seq = 161  Window = 9  cwnd=9  ssthresh=6  Length = 10000  CheckSum = 45043
[SEND]Client: Seq = 162  Window = 9  cwnd=9  ssthresh=6  Length = 10000  CheckSum = 34829
[SEND]Client: Seq = 163  Window = 9  cwnd=9  ssthresh=6  Length = 10000  CheckSum = 30623
```

当出现丢包时，我们程序的吞吐率还是受到了影响，下降了不少，一方面是因为丢包，我们窗口的值一直保持5左右，缓冲区变小。另一方面则是重传时间设置的是固定值，无法根据网络拥塞程度动态变化。相比停等协议还是有很大的性能优势，但相比于GBN的优势则不明显，因为我们无法模拟出网络中复杂的情况，网络拥塞窗口的设置甚至阻碍了性能的提升。

```
[SEND]Client: Seq = 183  Window = 10  cwnd=11.4672  ssthresh=7  Length = 10000  CheckSum = 1310
Waiting for window!
[SEND]Client: Seq = 184  Window = 10  cwnd=11.5544  ssthresh=7  Length = 10000  CheckSum = 28651
Waiting for window!
[SEND]Client: Seq = 185  Window = 10  cwnd=11.641  ssthresh=7  Length = 10000  CheckSum = 161
Waiting for window!
[SEND]Client: Seq = 186  Window = 10  cwnd=11.7269  ssthresh=7  Length = 10000  CheckSum = 30490
[SEND]Client: Seq = 187  Window = 10  cwnd=11.8968  ssthresh=7  Length = 7353  CheckSum = 22788
send over!
发送数据:1857353 Bytes
发送时间3.072s
吞吐率604.607KB/s
Wave Hand...
[FIN,ACK]Client:                Seq=188 CheckSum=13120
挥手成功
program will close after 3 seconds
请按任意键继续. . .
```