计网Lab3-1 基于 UDP 服务设计可靠传输协议

姓名：刘玉菡

学号：2213244

专业：物联网工程

一、实验内容

本实验在不可靠UDP通信基础上，实现了具有面向连接特性和可靠数据传输保障的自定义协议。该协议在设计上借鉴了TCP的基本思想，包括连接建立与释放的握手过程、在3_1的基础上增加了基于流水线的滑动窗口传输机制、累积确认的Go-Back-N策略，以及超时重传与日志监控等要素。

二、协议设计

本实验采用UDP作为传输层协议，利用自定义数据包格式、序列号管理、校验和和确认机制实现面向连接的可靠数据传输。具体协议设计如下：

1. 数据包格式（网络层的数据包结构）

1. **以太网头部 (14 字节)**：用于指定网络中的源和目标设备的MAC地址。
2. **IP 头部 (20 字节)**：在网络层用来路由数据包的 IP 地址和相关信息。
3. **UDP 头部 (8 字节)**：传输层的协议头，主要负责在 IP 层和应用层之间传递数据。
4. **消息结构 (Message Structure)**：发送的数据部分，是在 UDP 负载中传输的数据，包括：`Seq` (4 字节)、`Ack` (4 字节)、`Flag` (2 字节)、`Length` (2 字节)、`Checksum` (2 字节)、`Data` (1024 字节)

   消息结构的大小为：**14 字节** (头部) + **1024 字节** (数据部分) = **1038 字节**

   下表展示了数据包（Message消息结构）的字段分布及其含义：

字段名	类型	长度（位）	含义
Seq	uint32_t	32	序列号，标识数据包的序列顺序，用于定位数据在传输中的位置。
Ack	uint32_t	32	确认号，指示已正确接收的最后一个数据包的下一个期望序列号。
Flag	uint16_t	16	标志位，指示数据包类型（SYN、ACK、FIN、DATA、FILENAME、CLOSE）。
Length	uint16_t	16	有效数据长度（Data字段中的字节数）。
Checksum	uint16_t	16	校验和，用于检验数据包头部及数据区的完整性。
Data	char[]	可变（定长 BUFFER_SIZE）	数据载荷，可能是文件名或文件数据内容，根据Flag类型而定。

2. 基于滑动窗口的流量控制机制

本协议采用滑动窗口机制实现流量控制，结合Go-Back-N（GBN）累积确认策略，确保数据的可靠传输与高效利用网络带宽。

2.1 窗口大小（Window Size）

在本实验中，我把窗口大小（`WINDOW_SIZE`）设置为固定值20。窗口大小决定了发送端在未收到确认（ACK）之前，能够连续发送的数据包数量。具体控制方式如下：

- **发送条件**：发送端在任意时刻仅当 `nextSeq < base + WINDOW_SIZE` 时，才允许发送新的数据包。
  - `base`：当前窗口的基序列号，表示最早未被确认的数据包的序列号。
  - `nextSeq`：下一个待发送的数据包的序列号。
- **窗口滑动**：当接收端发送ACK确认后，发送端将 `base` 移动至新的序列号，从而释放窗口空间，允许发送更多的数据包。确保发送端不会以过快的速率发送数据，有效控制了数据流量。

2.2 支持累积确认的Go-Back-N协议

本协议采用Go-Back-N（GBN）机制来实现可靠的数据传输和错误恢复。当某个数据包或其ACK丢失时，接收端会持续发送相同的ACK，指示发送端重传从丢失点开始的所有未确认的数据包。具体特点如下：

- **累积确认**：
  - 接收端通过返回 `Ack = expectedSeq` 来累积确认所有序列号小于 `expectedSeq` 的分组已被正确接收。
  - 若中间有分组丢失，接收端不会对之后的分组单独确认，而是继续发送对同一 `expectedSeq` 的ACK，阻止ACK的前移，迫使发送端进行重传。
- **重传机制**：
  - 在主循环的每次迭代结束时，发送端会遍历`sendBuffer`，检查每个未确认的数据包是否超时，如果超时且未达到最大重传次数，则重传该数据包。
  - 当某个数据包的重传次数达到`MAX_RETRANSMISSIONS`时，表示该数据包仍未得到确认，并且多次尝试重传也没有成功。这时，程序会打印错误信息，表示传输失败，通过设置`connected = false`来中断文件传输过程，结束连接，并且清空发送缓冲区，以避免继续在不可靠的网络环境中尝试传输更多的数据。

2.3 工作流程示意

以下表格和示意图展示了在 `WINDOW_SIZE = 4` 的情况下，滑动窗口和GBN协议的工作流程（实际代码中窗口大小为20）。

时间点	发送的分组序号	窗口状态 (base - nextSeq)	接收端ACK情况	窗口滑动情况
初始	无	base=0, nextSeq=0 (空窗口)	无	无

时间点	发送的分组序号	窗口状态 (base - nextSeq)	接收端ACK情况	窗口滑动情况
发送	0,1,2,3	base=0, nextSeq=4 (窗口满)	等待确认	无
接收端ACK=4	无	base=0 → base=4 (已确认0~3)	累积确认至包序列号3 下一个期望=4	窗口向前滑动
再发送	4,5,6,7	base=4, nextSeq=8	等待确认	窗口内新数据

流水线协议及多序列号机制示意图

```
    发送端:                          接收端:
  +----------+                     +----------+
  | 序号0数据 | --->(发送)----> | (期望0)  | 收到0，ACK=1
  +----------+                     +----------+
  | 序号1数据 | --->(发送)----> | (期望1)  | 收到1，ACK=2
  +----------+                     +----------+
  | 序号2数据 | --->(发送)----> | (期望2)  | 假设丢失未收
  +----------+                     +----------+
  | 序号3数据 | --->(发送)----> | (期望2)  | 收到3但期望2未达，不提高ACK，仍ACK=2
  +----------+

发送端超时未收到对2的确认 → 发送端重传2,3...

       重传序号2数据---->          收到2，ACK=3
       重传序号3数据---->          收到3，ACK=4

窗口向前滑动，继续后续数据传输...
```

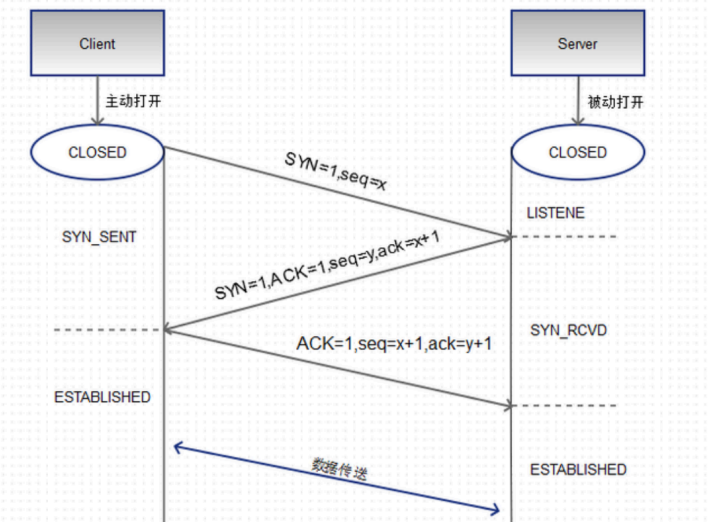
说明:

1. **初始状态**:
   - 发送端发送序号0、1、2、3的数据包，窗口状态为 `base=0, nextSeq=4`，窗口已满。
   - 接收端期望序列号为0。
2. **正常确认**:
   - 接收端按序收到序号0和1的数据包，分别发送 `ACK=1` 和 `ACK=2`。
   - 发送端收到ACK后，`base` 移动到相应的序列号，窗口滑动，允许发送新的数据包。
3. **数据包丢失**:
   - 假设序号2的数据包丢失，接收端无法收到序号2，仍然期望序列号为2，继续发送 `ACK=2`。
   - 发送端在超时后，检测到ACK未更新，重传序号2和3的数据包。
4. **重传成功**:
   - 接收端收到重传的序号2和3的数据包，依次发送 `ACK=3` 和 `ACK=4`，窗口再次滑动。

3. 连接管理

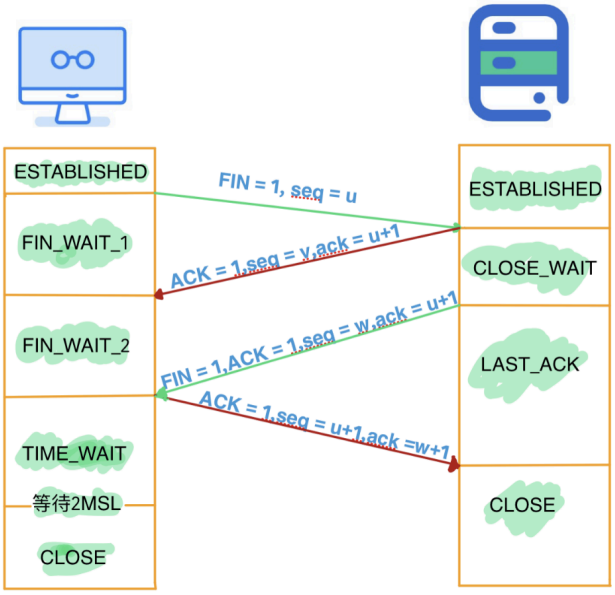
实验协议模拟TCP的三次握手和四次挥手过程：

- **三次握手**：



1. **SYN**：客户端向服务器发送SYN包，要求建立连接。
2. **SYN-ACK**：服务器收到SYN包后，返回SYN-ACK包，表示同意建立连接。
3. **ACK**：客户端收到SYN-ACK包后，返回ACK包，完成连接的建立。

- **四次挥手**：



1. **FIN**：发送端发送FIN包，表示连接断开。
2. **ACK**：接收方返回ACK包，确认断开请求。
3. **FIN**：另一方也发送FIN包，表明同意断开连接。
4. **ACK**：最后一方返回ACK包，连接断开。

4. 差错检验

通过校验和机制（Checksum）保证数据的完整性：

1. 发送端在数据包发送前计算数据包内容的校验和，并将其写入Checksum字段。
2. 接收端在接收到数据包后重新计算校验和，若匹配则继续处理，否则丢弃该数据包。

校验和使用16位的“补码和”算法，遍历数据包的所有字节，对其进行累加并保留16位结果。

5. 日志输出

包括但不限于以下内容：

- 接收端时间戳
- 数据包的序列号（Seq）
- 数据包的确认号（Ack）
- 校验和（Checksum）
- 发送端和接收端的窗口大小，接收端期望序列号
- 数据包的标志位（Flag）
- 数据包的传输时间
- 吞吐率：文件传输速度，单位为KB/s

6. 错误处理

程序包括基本的错误处理机制。若在传输过程中出现错误（如超时重传次数超过限制、校验和错误等），程序将输出相应的错误信息，并终止当前操作。

三、代码实现部分

由于发送端和接收端的结构相似，接收端的实现部分省略，以下内容主要聚焦于发送端的实现。

1. 初始化和套接字创建

在程序开始时，初始化 Winsock 库以便使用网络功能，并创建一个 UDP 套接字。

- `initWinsock` 函数通过调用 `WSAStartup` 初始化 Windows 套接字 API。
- `createSocket` 函数创建一个 UDP 套接字用于数据报传输。

```
void initWinsock() {
    WSADATA wsaData;
    int result = WSAStartup(MAKEWORD(2, 2), &wsaData);
    if (result != 0) {
        cerr << "WSAStartup failed: " << result << endl;
        exit(1);
    }
}

SOCKET createSocket() {
```

```
    SOCKET sock = socket(AF_INET, SOCK_DGRAM, IPPROTO_UDP);
    if (sock == INVALID_SOCKET) {
        cerr << "Failed to create socket: " << WSAGetLastError() << endl;
        WSACleanup();
        exit(1);
    }
    return sock;
}
```

2. 消息结构体定义

为了组织数据包的结构，我们定义了一个 `Message` 结构体，包含了序列号（`Seq`）、确认号（`Ack`）、标志位（`Flag`）、数据长度（`Length`）、校验和（`Checksum`）和数据（`Data`）。该结构体的定义如下：

```
struct Message {
    uint32_t Seq;
    uint32_t Ack;
    uint16_t Flag;
    uint16_t Length;
    uint16_t Checksum;
    char Data[BUFFER_SIZE];
};
enum Flag {
    SYN = 1,
    ACK = 2,
    FIN = 4,
    DATA = 8,
    FILENAME = 16,
    CLOSE = 32
};
```

3.校验和计算

计算校验和的算法：16 位补码和

1. 将整个数据包（包括头部和数据部分）按 16 位（2 字节）为一组进行加和。
2. 如果加和结果超出了 16 位（即和大于 65535），则将溢出的部分加回到和的低位部分。
3. 最后，取和的反码（即所有位反转），得到校验和。

发送端会计算数据包的校验和，并将其写入消息结构体的 `Checksum` 字段。

```
uint16_t calculateChecksum(const char* data, int length) {
    uint32_t sum = 0;
    const uint16_t* ptr = reinterpret_cast<const uint16_t*>(data);

    while (length > 1) {
        sum += *ptr++;
        length -= 2;
    }
```

```
    if (length > 0) {
        uint16_t last_byte = 0;
        *reinterpret_cast<uint8_t*>(&last_byte) = *reinterpret_cast<const
uint8_t*>(ptr);
        sum += last_byte;
    }

    // 将 32 位的 sum 转换为 16 位
    while (sum >> 16) {
        sum = (sum & 0xFFFF) + (sum >> 16);
    }

    return static_cast<uint16_t>(~sum);
}
```

4. 发送消息

`sendMessage` 函数首先计算消息的校验和，将校验和字段置零，然后填充完整数据包，通过 `sendto` 函数将数据包发送给目标地址。发送完后，它会在控制台输出当前发送的数据包的信息。

```
void sendMessage(SOCKET sock, const sockaddr_in& destAddr, Message& msg) {
    msg.Checksum = 0;
    msg.Checksum = calculateChecksum(reinterpret_cast<char*>(&msg), sizeof(msg));

    int sendResult = sendto(sock, reinterpret_cast<char*>(&msg), sizeof(msg), 0,
        reinterpret_cast<const sockaddr*>(&destAddr), sizeof(destAddr));
    if (sendResult == SOCKET_ERROR) {
        cerr << "消息发送失败，错误码: " << WSAGetLastError() << endl;
        closesocket(sock);
        WSACleanup();
        exit(1);
    }

    cout << "发送数据包 - Seq:" << msg.Seq << " ,Ack: " << msg.Ack
        << " ,Checksum: " << msg.Checksum << " ,Flags: " << msg.Flag << endl;
}
```

窗口滑动部分代码:

```
            while (!transmissionComplete || !sendBuffer.empty()) {
                // 填充滑动窗口
                while ((nextSeq < base + WINDOW_SIZE) && !fileStream.eof() &&
!transmissionComplete) {
                    Message dataMsg = {};
                    fileStream.read(dataMsg.Data, BUFFER_SIZE);
                    size_t bytesRead = fileStream.gcount();

                    if (bytesRead > 0) {
                        dataMsg.Seq = nextSeq;
                        dataMsg.Ack = 0;
                        dataMsg.Flag = DATA;
                        dataMsg.Length = static_cast<uint16_t>(bytesRead);
```

```
                        Packet dataPkt;
                        dataPkt.msg = dataMsg;
                        dataPkt.sentTime = chrono::steady_clock::now();
                        dataPkt.retransmissions = 0;

                        sendBuffer[nextSeq] = dataPkt;
                        sendMessage(clientSocket, destAddr,
sendBuffer[nextSeq].msg);
                        nextSeq++;
                        totalBytesSent += bytesRead;
                    }

                    if (fileStream.eof()) {
                        transmissionComplete = true;
                    }
                }

                // 设置超时时间
                fd_set readfds;
                FD_ZERO(&readfds);
                FD_SET(clientSocket, &readfds);
                timeval timeout;
                timeout.tv_sec = 0;
                timeout.tv_usec = 100 * 1000; // 100ms

                int selectResult = select(0, &readfds, NULL, NULL, &timeout);
                if (selectResult > 0 && FD_ISSET(clientSocket, &readfds)) {
                    // 接收ACK
                    Message ackMsg = {};
                    int ackBytes = recvfrom(clientSocket, reinterpret_cast<char*>
(&ackMsg), sizeof(ackMsg), 0,
                        reinterpret_cast<sockaddr*>(&from), &fromSize);
                    if (ackBytes > 0) {
                        uint16_t recvChecksum = ackMsg.Checksum;
                        ackMsg.Checksum = 0;
                        uint16_t calcChecksum =
calculateChecksum(reinterpret_cast<char*>(&ackMsg), sizeof(ackMsg));
                        if (recvChecksum != calcChecksum) {
                            cerr << "收到的ACK校验和不匹配，丢弃数据包" << endl;
                            continue;
                        }

                        if (ackMsg.Flag & ACK) {
                            cout << "Ack: " << ackMsg.Ack << endl;
                            if (ackMsg.Ack > base) {
                                // 移除已确认的包
                                for (uint32_t seq = base; seq < ackMsg.Ack;
++seq) {

                                    sendBuffer.erase(seq);
                                }
                                base = ackMsg.Ack;
                            }
                        }
                    }
                }
```

累计确认部分代码：通过接收方发送的ACK消息，实现对多个数据包的累计确认。即一个ACK值代表接收方已经成功接收了所有序列号小于该ACK值的数据包。

```
if (ackMsg.Flag & ACK) {
    cout << "Ack: " << ackMsg.Ack << endl;
    if (ackMsg.Ack > base) {
        // 移除已确认的包
        for (uint32_t seq = base; seq < ackMsg.Ack; ++seq) {
            sendBuffer.erase(seq);
        }
        base = ackMsg.Ack;
    }
}
```

5.超时重传

遍历发送缓冲区`sendBuffer`中的所有未确认数据包，检查每个数据包是否已经超时。如果某个数据包的发送时间超过了预设的超时时间`TIMEOUT_MS`（1000毫秒），且其重传次数未达到最大限制`MAX_RETRANSMISSIONS`（5次），则触发重传。

```
// 检查超时并重传
auto currentTime = chrono::steady_clock::now();
for (auto& [seq, pkt] : sendBuffer) {
    auto duration = chrono::duration_cast<chrono::milliseconds>(currentTime -
pkt.sentTime).count();
    if (duration > TIMEOUT_MS) {
        if (pkt.retransmissions < MAX_RETRANSMISSIONS) {
            cout << "序列 " << seq << " 超时，正在重传..." << endl;
            sendMessage(clientSocket, destAddr, pkt.msg);
            pkt.sentTime = chrono::steady_clock::now();
            pkt.retransmissions++;
        }
        else {
            cerr << "序列 " << seq << " 达到最大重传次数，传输失败。" << endl;
            fileStream.close();
            // 清空发送缓冲区并关闭连接
            sendBuffer.clear();
            connected = false;
            break;
        }
    }
}
```

6. 建立连接（三次握手）

（1）**发送 SYN 请求**：客户端发送带有 `SYN` 标志的数据包，表示请求建立连接。此时 `Seq` 设置为 1，`Flag` 设置为 `SYN`。

（2）**接收 SYN-ACK 响应**：服务器收到请求后，返回一个带有 `SYN` 和 `ACK` 标志的数据包，`Seq` 和 `Ack` 分别为 1 和 2。

（3）**发送 ACK 确认**：客户端收到 `SYN-ACK` 后，发送带有 `ACK` 标志的数据包，确认连接已建立。此时 `Seq` 和 `Ack` 分别为 2 和 2。

以下是发送端的实现：

```
// 开始连接建立（三次握手）
Message msg = {};
msg.Seq = 1;  // 初始序列号
msg.Flag = SYN;

cout << "尝试连接服务器..." << endl;
sendMessage(clientSocket, destAddr, msg);

// 等待服务器的 SYN-ACK
sockaddr_in from;
int fromSize = sizeof(from);
int bytesReceived = recvfrom(clientSocket, reinterpret_cast<char*>(&msg),
sizeof(msg), 0,
    reinterpret_cast<sockaddr*>(&from), &fromSize);
if (bytesReceived > 0 && (msg.Flag & (SYN | ACK))) {
    // 验证校验和
    uint16_t receivedChecksum = msg.Checksum;
    msg.Checksum = 0;
    uint16_t calculatedChecksum = calculateChecksum(reinterpret_cast<char*>
(&msg), sizeof(msg));
    if (receivedChecksum != calculatedChecksum) {
        cerr << "收到的SYN-ACK校验和不匹配。" << endl;
        closesocket(clientSocket);
        WSACleanup();
        return 1;
    }

    cout << "收到 SYN-ACK，发送 ACK..." << endl;
    msg.Flag = ACK;
    sendMessage(clientSocket, destAddr, msg);
    cout << "三次握手成功。" << endl;
}
else {
    cerr << "连接建立过程中出错。" << endl;
    closesocket(clientSocket);
    WSACleanup();
    return 1;
}
```

7. 连接关闭（四次挥手）

（1）**发送 FIN 包**：客户端发送带有 `FIN` 标志的数据包，请求关闭连接。此时 `Seq` 设置为当前的序列号，`Flag` 设置为 `FIN`。

（2）**接收 FIN-ACK 包**：服务器接收到 `FIN` 包后，发送一个带有 `FIN` 和 `ACK` 标志的数据包，确认关闭连接。

（3）**服务器发送 FIN 包**：服务器发送带有 `FIN` 标志的数据包，表示服务器也希望关闭连接。

（4）**客户端接收并确认**：客户端收到服务器的 `FIN` 包后，发送一个带有 `ACK` 标志的数据包，确认连接关闭。

```
        else if (choice == 2) {
            // 发送断开连接的 CLOSE 消息
            cout << "正在关闭连接..." << endl;
            msg.Flag = CLOSE;
            msg.Seq = 0;
            msg.Ack = 0;
            msg.Length = 0;

            sendMessage(clientSocket, destAddr, msg);

            // 接收服务器的 ACK 确认
            int bytesReceived = recvfrom(clientSocket, reinterpret_cast<char*>
(&msg), sizeof(msg), 0,
                reinterpret_cast<sockaddr*>(&from), &fromSize);

            if (bytesReceived > 0) {
                // 验证校验和
                uint16_t receivedChecksum = msg.Checksum;
                msg.Checksum = 0;
                uint16_t calculatedChecksum =
calculateChecksum(reinterpret_cast<char*>(&msg), sizeof(msg));
                if (receivedChecksum != calculatedChecksum) {
                    cerr << "收到的消息校验和不匹配，丢弃数据。" << endl;
                }
                else if (msg.Flag & ACK) {
                    cout << "收到服务器的 ACK 确认。" << endl;

                    // 等待服务器发送 FIN
                    bytesReceived = recvfrom(clientSocket,
reinterpret_cast<char*>(&msg), sizeof(msg), 0,
                        reinterpret_cast<sockaddr*>(&from), &fromSize);

                    if (bytesReceived > 0) {
                        // 验证校验和
                        receivedChecksum = msg.Checksum;
                        msg.Checksum = 0;
                        calculatedChecksum =
calculateChecksum(reinterpret_cast<char*>(&msg), sizeof(msg));
                        if (receivedChecksum != calculatedChecksum) {
                            cerr << "收到的消息校验和不匹配，丢弃数据。" << endl;
                        }
                        else if (msg.Flag & FIN) {
                            cout << "收到服务器的 FIN，发送 ACK 确认..." << endl;
```

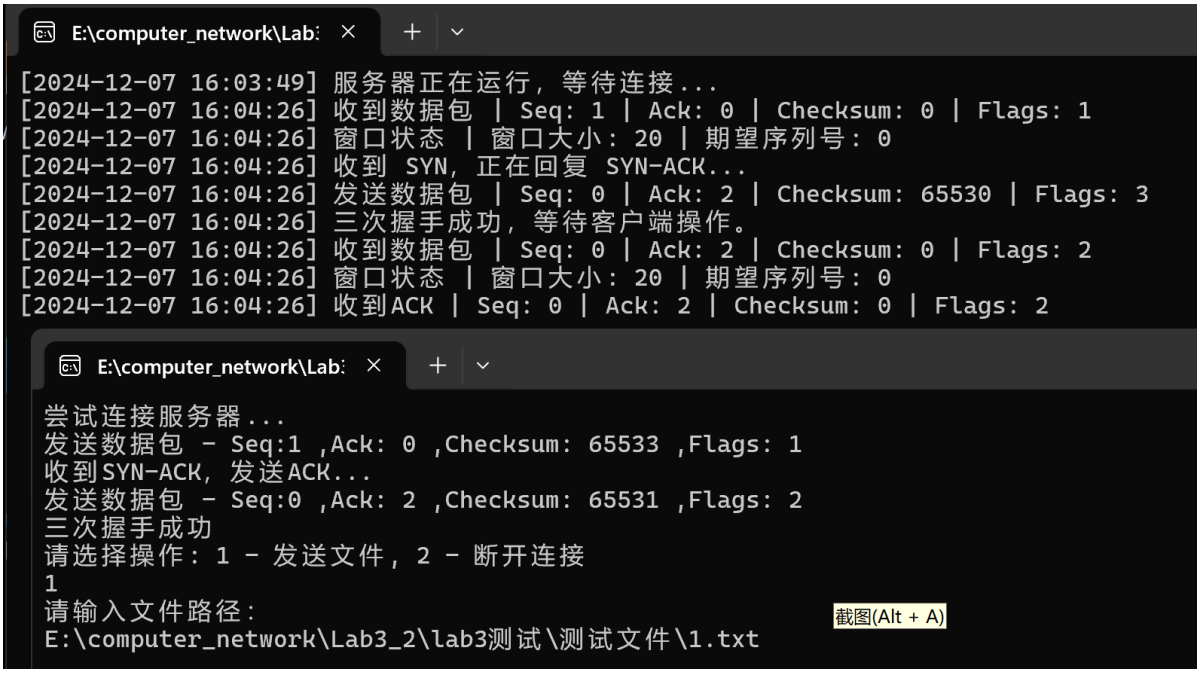
```
                    // 发送 ACK 确认
                    Message ackMsg = {};
                    ackMsg.Seq = 0;
                    ackMsg.Ack = msg.Seq + 1;
                    ackMsg.Flag = ACK;

                    sendMessage(clientSocket, serverAddr, ackMsg);

                    cout << "四次挥手完成，连接已关闭。" << endl;
                    connected = false;  // 退出循环，结束程序
                }
                else {
                    cerr << "未收到服务器的 FIN 消息。" << endl;
                }
            }
            else {
                cerr << "未收到服务器的 FIN 消息。" << endl;
            }
        }
        else {
            cerr << "未收到服务器的 ACK 确认。" << endl;
        }
    }
    else {
        cerr << "未收到服务器的响应。" << endl;
    }
}
```

四、传输测试

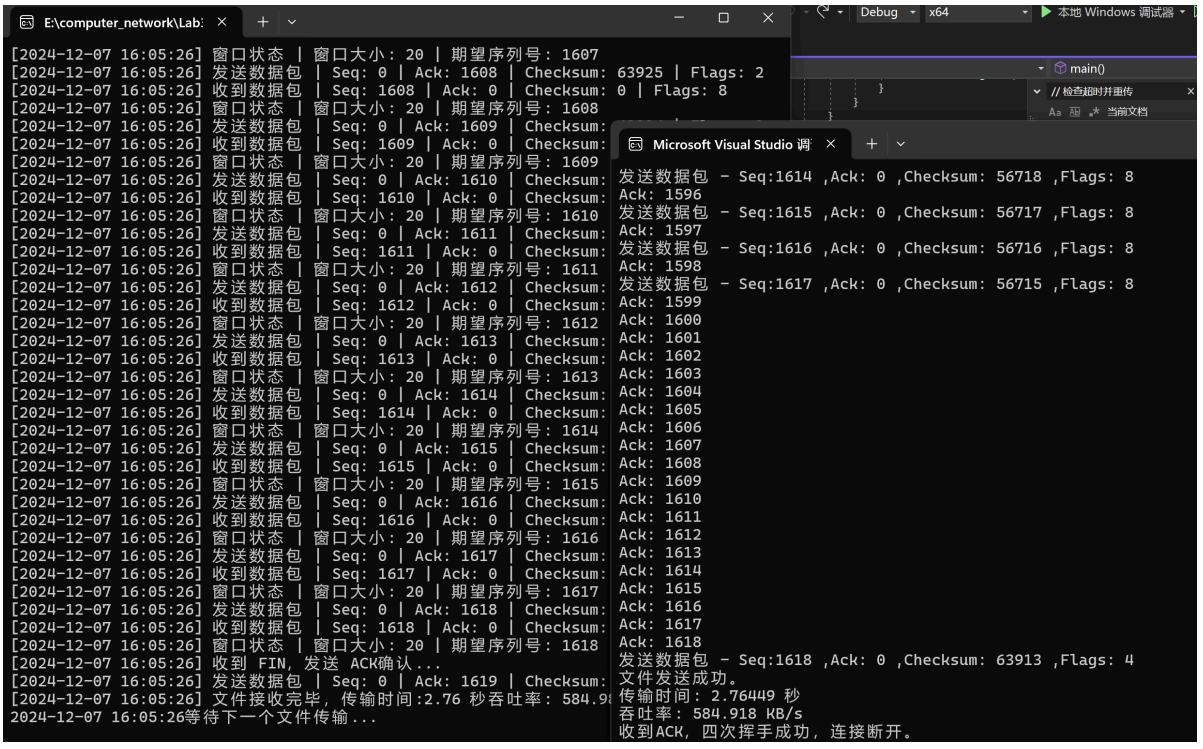
首先设置好路由器信息，设置好发送端与接收端信息，开始传输文件，此处为不丢包和不延时的正常传输。

然后打开接受端，在无发送端开机时，显示等待连接。

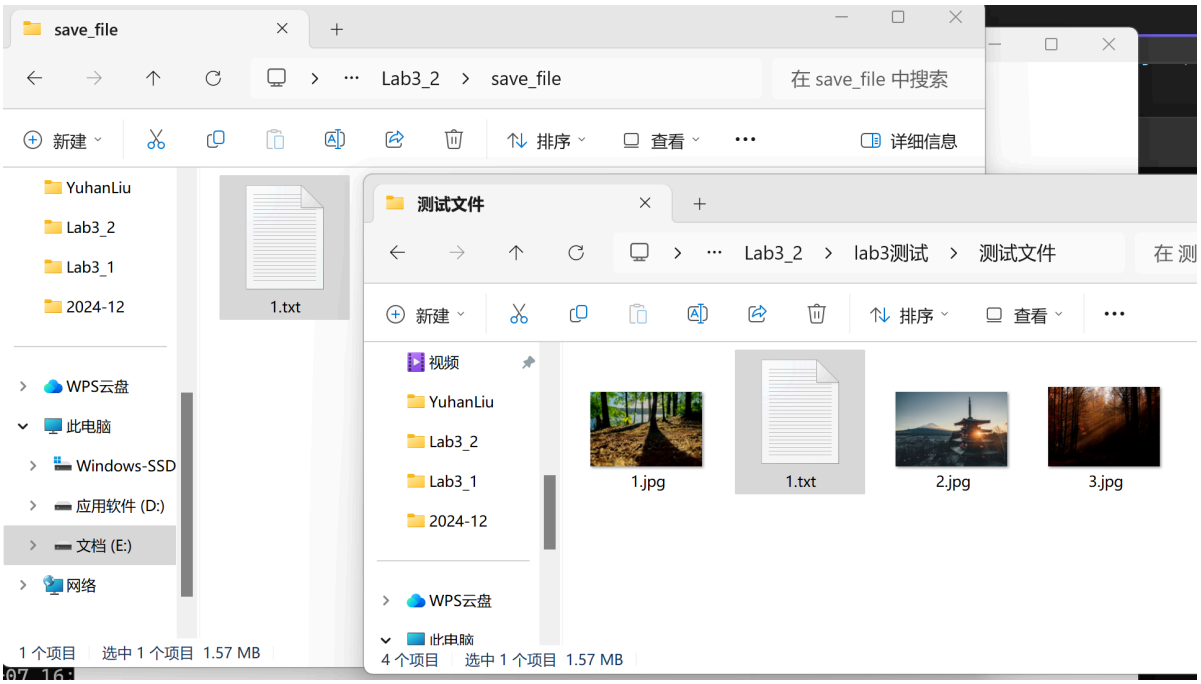
打开发送端，自动与接收端进行三次握手，然后输入1选择发送文件，接着按照发送端提示输入文件路径，以传输大小为1.57 MB (1,655,808 字节）的1.txt文本文件为例。



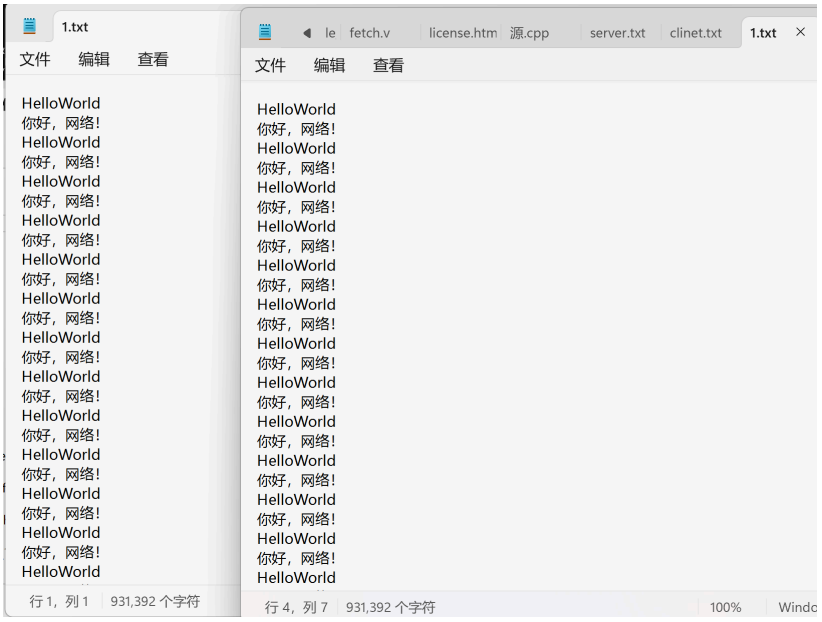
按回车，传输时可以看到具体的数据包传输信息，传输完成后显示文件发送成功，传输时间为2.76449秒，吞吐率为584.918KB/S。



在接收端保存的路径下，可以看到的确收到了大小完整、属性相同的文本文件。



检查文本内容可以正常输出中英文。



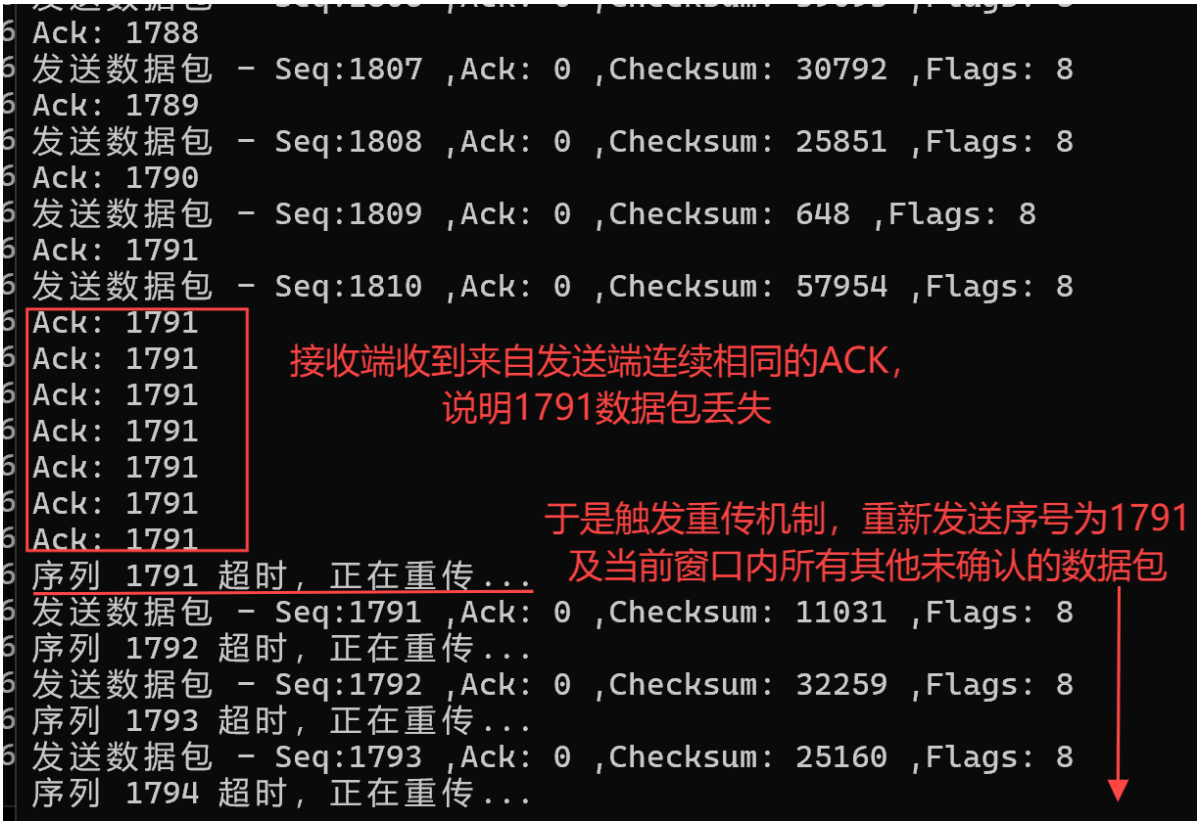
将路由器丢包率改为3%，延时改为3ms，重新进行测试。

以传输大小为1.77 MB的1.jpg文本文件为例。

```
收到数据包 | Seq: 0 | Ack: 2 | Checksum: 0 | Flags: 2
窗口状态 | 窗口大小: 20 | 期望序列号: 0
收到ACK | Seq: 0 | Ack: 2 | Checksum: 0 | Flags: 2
收到数据包 | Seq: 0 | Ack: 0 | Checksum: 0 | Flags: 16
窗口状态 | 窗口大小: 20 | 期望序列号: 0
接收到文件名: 1.jpg
发送数据包 | Seq: 0 | Ack: 1 | Checksum: 65532 | Flags: 2
收到数据包 | Seq: 1 | Ack: 0 | Checksum: 0 | Flags: 8
窗口状态 | 窗口大小: 20 | 期望序列号: 1
发送数据包 | Seq: 0 | Ack: 2 | Checksum: 65531 | Flags: 2
收到数据包 | Seq: 2 | Ack: 0 | Checksum: 0 | Flags: 8
窗口状态 | 窗口大小: 20 | 期望序列号: 2
发送数据包 | Seq: 0 | Ack: 3 | Checksum: 65530 | Flags: 2
收到数据包 | Seq: 3 | Ack: 0 | Checksum: 0 | Flags: 8
窗口状态 | 窗口大小: 20 | 期望序列号: 3
发送数据包 | Seq: 0 | Ack: 4 | Checksum: 65529 | Flags: 2
收到数据包 | Seq: 4 | Ack: 0 | Checksum: 0 | Flags: 8
窗口状态 | 窗口大小: 20 | 期望序列号: 4
发送数据包 | Seq: 0 | Ack: 5 | Checksum: 65528 | Flags: 2
收到数据包 | Seq: 5 | Ack: 0 | Checksum: 0 | Flags: 8
窗口状态 | 窗口大小: 20 | 期望序列号: 5
发送数据包 | Seq: 0 | Ack: 6 | Checksum: 65527 | Flags: 2
收到数据包 | Seq: 6 | Ack: 0 | Checksum: 0 | Flags: 8
窗口状态 | 窗口大小: 20 | 期望序列号: 6
```

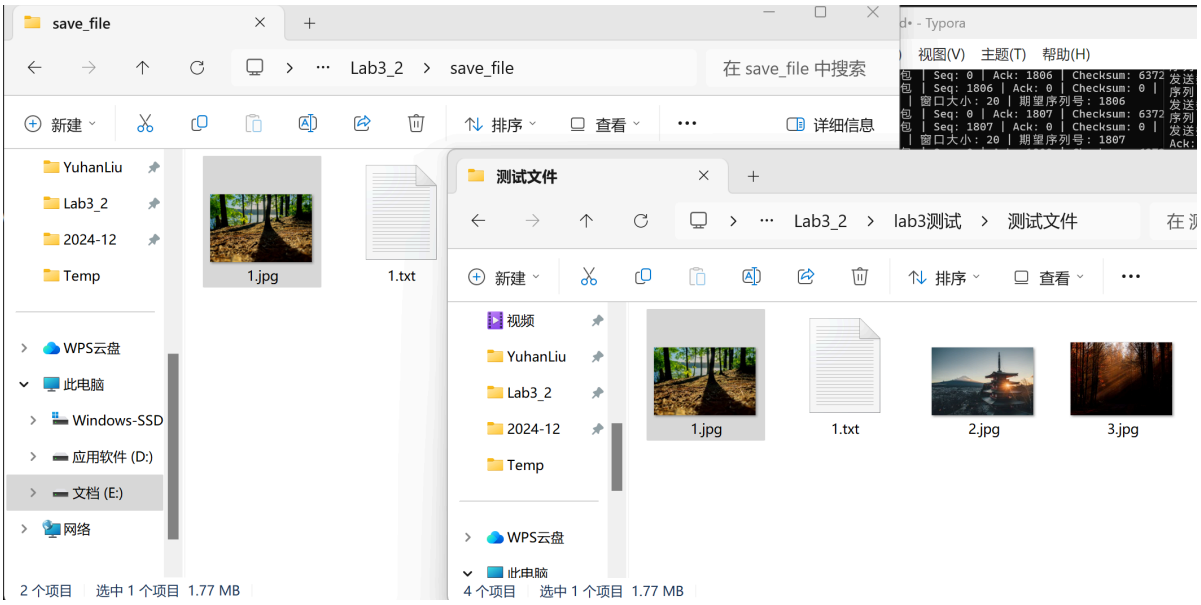
```
请输入文件路径:
E:\computer_network\Lab3_2\lab3测试\测试文件\1.jpg
发送数据包 - Seq:0 ,Ack: 0 ,Checksum: 24551 ,Flags: 16
发送数据包 - Seq:1 ,Ack: 0 ,Checksum: 42741 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:2 ,Ack: 0 ,Checksum: 4429 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:3 ,Ack: 0 ,Checksum: 55579 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:4 ,Ack: 0 ,Checksum: 20051 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:5 ,Ack: 0 ,Checksum: 1670 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:6 ,Ack: 0 ,Checksum: 46558 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:7 ,Ack: 0 ,Checksum: 33960 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:8 ,Ack: 0 ,Checksum: 45398 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:9 ,Ack: 0 ,Checksum: 28797 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:10 ,Ack: 0 ,Checksum: 30736 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:11 ,Ack: 0 ,Checksum: 58318 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:12 ,Ack: 0 ,Checksum: 37376 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:13 ,Ack: 0 ,Checksum: 18140 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:14 ,Ack: 0 ,Checksum: 26589 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:15 ,Ack: 0 ,Checksum: 29423 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:16 ,Ack: 0 ,Checksum: 32586 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:17 ,Ack: 0 ,Checksum: 40938 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:18 ,Ack: 0 ,Checksum: 63444 ,Flags: 8
发送数据包 - Seq:19 ,Ack: 0 ,Checksum: 21016 ,Flags: 8
Ack: 1
发送数据包 - Seq:20 ,Ack: 0 ,Checksum: 56841 ,Flags: 8
```

由于设置了丢包和延时，所以会把丢失的数据包进行重新发送，对应丢包信息如上上图中所示，

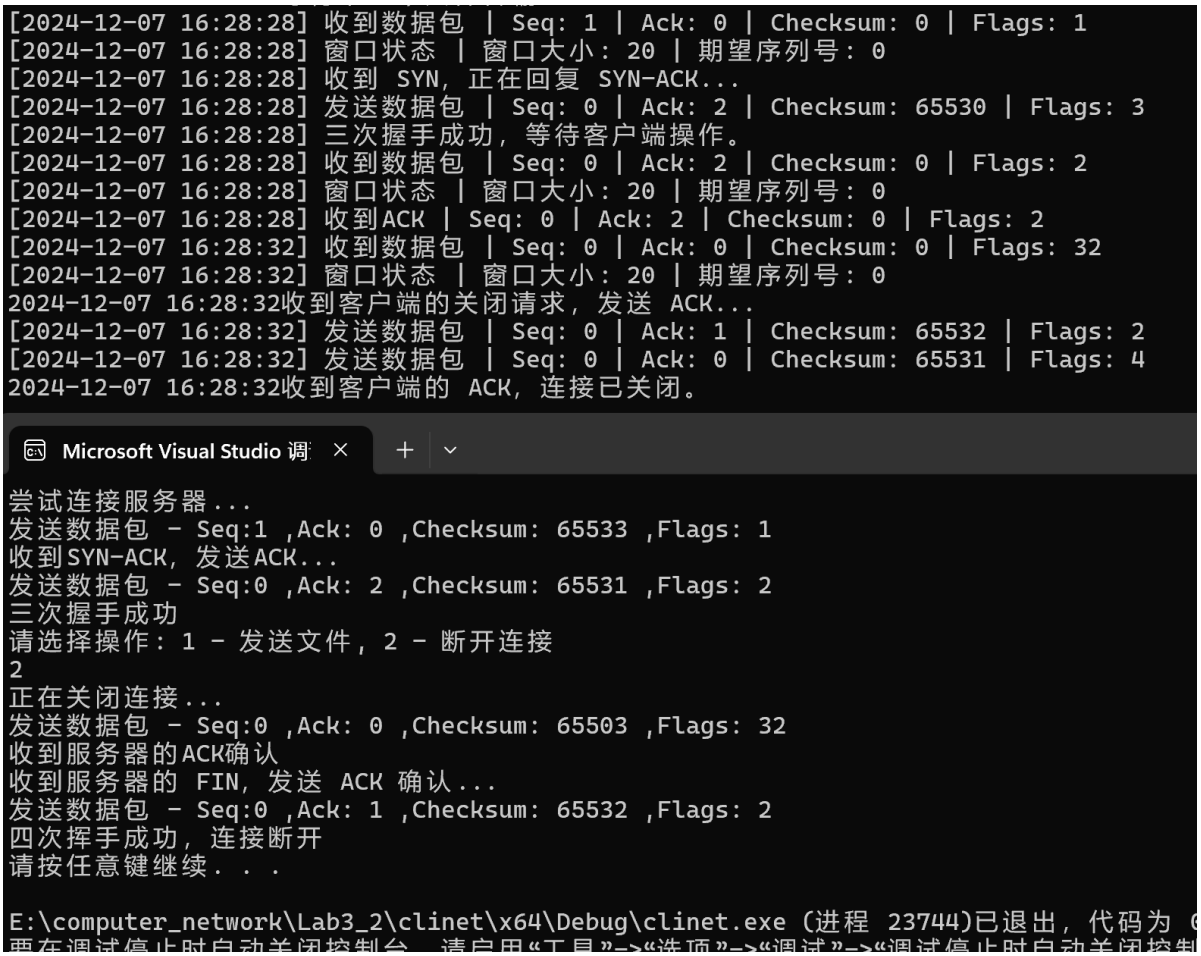


120.975s后该1.jpg文本文档传输完毕，吞吐率为14.9934kb/s.

检查图片传输正常清晰，且大小属性一致。



一般文件传输完之后自动触发四次挥手断开连接，也可以在发送端输入2请求断开连接，发送端向接收端发送fin关闭请求，然后经过四次挥手后成功关闭。



五、问题反思

1. 如果发送端收到了ack=2和ack=4，但是没有收到ack=3，应该怎么处理?

`Ack=4`的到来表示序列号0到3的数据包全部被成功接收。虽然没有显式地从接收端获得`Ack=3`，但累积确认确保了`Ack=4`即包含了对2号和3号包的确认。所以只要看到`Ack`大于`base`，就会移除对应范围内的已确认包。（答辩的时候我好像说的有些问题，在此进行更正，希望助教老师理解😢）

2. 超时重传的时间检测机制

每当发送一个数据包（包括文件名、数据包等），程序会将该数据包的相关信息（如序列号、发送时间、重传次数）存储在发送缓冲区`sendBuffer`中，同时记录下发送该数据包的时间点`sentTime`到packet结构体中。在主循环中，遍历发送缓冲区中的所有未确认数据包，计算自发送以来的时间差来判断是否超时来决定是否调用重传机制。

```
struct Packet {
    Message msg;
    chrono::steady_clock::time_point sentTime;
    int retransmissions;
};
```

3. 阻塞与非阻塞

阻塞模式（Blocking Mode）：在阻塞模式下，当程序执行一个I/O操作（如`recvfrom`）时，如果数据尚未准备好，程序会在该操作上等待，暂停执行，直到数据到达或操作完成。

- **优点**：实现简单，代码逻辑直观。
- **缺点**：如果等待时间过长，程序可能会无响应，特别是在需要同时处理多个I/O操作时。

非阻塞模式（Non-Blocking Mode）：在非阻塞模式下，I/O操作会立即返回，无论数据是否准备好。如果数据尚未到达，操作会返回一个错误或特定的状态，程序可以继续执行其他任务。

- **优点**：程序不会因为单个I/O操作而停滞，适合需要同时处理多个I/O操作的场景。
- **缺点**：实现复杂，需要额外的逻辑来管理I/O状态和数据处理

在我的原始代码中，通过 `select()` 函数，尽管套接字本身是阻塞的，但代码能够在短暂的时间内检查数据是否可用，从而实现类似非阻塞的行为，使程序在等待数据的同时能够执行其他任务（如检测超时并重传）。相比于将套接字设置为完全非阻塞模式，使用 `select()` 函数更容易管理多个I/O操作，同时保持代码的可读性和维护性。

后续为了体验非阻塞模式，我将套接字进行了如下修改，这样所有的I/O操作（如 `recvfrom`）不论数据是否可用都会立即返回了。

```
u_long mode = 1; // 1 为非阻塞模式
ioctlsocket(clientSocket, FIONBIO, &mode);
```

4. 滑动窗口的调整对吞吐率和传输速度的影响

窗口过小：当滑动窗口较小时，发送端只能发送有限数量的数据包，这会导致发送端频繁等待确认（ACK）。每次收到确认后，发送端才会继续发送新的数据包，造成频繁的停顿，降低了传输速度。吞吐率会受到严重影响，因为发送端的空闲时间较多，网络带宽没有被充分利用。

窗口过大：窗口过大会导致接收端的缓冲区可能出现溢出，增加了丢包的风险，并且发送端可能在某些情况下需要等待更多的ACK确认，浪费网络资源。由于接收端需要处理更多的数据包，处理能力可能成为瓶颈，导致系统延迟增大，吞吐率的提升反而有限。

反思

这次实验加深了我对可靠传输协议工作原理的理解，尤其是滑动窗口、超时重传和累积确认等机制的具体应用。实验的最终结果表明，协议能够在不同的网络条件下稳定工作，特别是在丢包和延迟较高的情况下，超时重传和滑动窗口的结合使得数据传输得以完成。通过实际测试，我还发现了一些细节上的问题，因此在实际应用中，可能需要根据具体的网络环境调整协议的各个参数，来平衡效率和稳定性。

未来，我打算进一步优化重传机制，减少因超时重传带来的性能下降。例如，可以通过引入更智能的拥塞控制算法，动态调整窗口大小，从而提高协议的适应性和吞吐率。此外，在面对高丢包率的网络环境时，可以考虑结合其他的错误恢复机制（如FEC、ARQ等），进一步提升数据传输的可靠性和效率。