浙江大学

课程名称： 计算机网络

实验名称： 基于Socket接口实现自定义协议通信

姓　名： 杨思行

学　院： 计算机科学与技术学院

系： 计算机科学与技术系

专　业： 计算机科学与技术

学　号： 3230104703

指导教师： 陆系群

报告日期: 2025年12月23日

浙江大学实验报告

课程名称： 计算机网络 实验类型: 综合

实验项目名称: Lab8:基于Socket接口实现自定义协议通信

学生姓名: 杨思行 专业: 计算机科学与技术 学号: 3230104703

同组学生姓名: 祝子豪 指导老师: 陆系群

实验地点: 曹光彪西-304 实验日期: 2025年12月20日

一 `实验目的

- 学习如何设计网络应用协议
- 掌握Socket编程接口编写基本的网络应用软件

二 `实验内容

根据自定义的协议规范 ’使用Socket编程接口编写基本的网络应用软件 。

- 掌握C语言形式的Socket编程接口用法 ’能够正确发送和接收网络数据包
- 开发一个客户端 ’实现人机交互界面和与服务器的通信
- 开发一个服务端 ’实现并发处理多个客户端的请求
- 程序界面不做要求 ’使用命令行或最简单的窗体即可
- 功能要求如下 ：

1. 运输层协议采用TCP
2. 客户端采用交互菜单形式 ’用户可以选择以下功能 ：
   a. 连接 ：请求连接到指定地址和端口的服务端
   b. 断开连接 ：断开与服务端的连接
   c. 获取时间: 请求服务端给出当前时间
   d. 获取名字 ：请求服务端给出其机器的名称

e. 活动连接列表 ：请求服务端给出当前连接的所有客户端信息（编号 `IP地址 `端口等）
f. 发消息 ：请求服务端把消息转发给对应编号的客户端 ’该客户端收到后显示在屏幕上
g. 退出 ：断开连接并退出客户端程序

3. 服务端接收到客户端请求后 ’根据客户端传过来的指令完成特定任务 ：
a. 向客户端传送服务端所在机器的当前时间
b. 向客户端传送服务端所在机器的名称
c. 向客户端传送当前连接的所有客户端信息
d. 将某客户端发送过来的内容转发给指定编号的其他客户端
e. 采用异步多线程编程模式 ’正确处理多个客户端同时连接 ’同时发送消息的情况

- 根据上述功能要求 ’设计一个客户端和服务端之间的应用通信协议
- 本实验涉及到网络数据包发送部分不能使用任何的Socket封装类 ’只能使用最底层的C语言形式的Socket API
- 本实验可组成小组 ’服务端和客户端可由不同人来完成

三 `主要仪器设备

- 联网的PC机 `Wireshark软件
- Visual Studio Code `gcc等C++集成开发环境 。

四 `操作方法与实验步骤

- 设计请求 `指示（服务器主动发给客户端的） `响应数据包的格式 ’至少要考虑如下问题 ：

a) 定义两个数据包的边界如何识别

b) 定义数据包的请求 `指示 `响应类型字段

c) 定义数据包的长度字段或者结尾标记

d) 定义数据包内数据字段的格式（特别是考虑客户端列表数据如何表达）

- 小组分工 ：1人负责编写服务端 ’1人负责编写客户端
- 客户端编写步骤（**需要采用多线程模式**）

a) 运行初始化 ’调用`socket()` ’向操作系统申请socket句柄

b) 编写一个菜单功能，列出7个选项

c) 等待用户选择

d) 根据用户选择，做出相应的动作（未连接时，只能选连接功能和退出功能）

1. 选择连接功能：请用户输入服务器IP和端口，然后调用`connect()`，等待返回结果并打印。连接成功后设置连接状态为已连接。**然后创建一个接收数据的子线程，循环调用`receive()`，如果收到了一个完整的响应数据包，就通过线程间通信（如消息队列）发送给主线程，然后继续调用`receive()`，直至收到主线程通知退出**。
2. 选择断开功能：调用`close()`，并设置连接状态为未连接。通知并等待子线程关闭。
3. 选择获取时间功能：组装请求数据包，类型设置为时间请求，然后调用`send()`将数据发送给服务器，**接着等待接收数据的子线程返回结果**，并根据响应数据包的内容，打印时间信息。
4. 选择获取名字功能：组装请求数据包，类型设置为名字请求，然后调用`send()`将数据发送给服务器，接着等待接收数据的子线程返回结果，并根据响应数据包的内容，打印名字信息。
5. 选择获取客户端列表功能：组装请求数据包，类型设置为列表请求，然后调用`send()`将数据发送给服务器，接着等待接收数据的子线程返回结果，并根据响应数据包的内容，打印客户端列表信息（编号、IP地址、端口等）。
6. 选择发送消息功能（选择前需要先获得客户端列表）：请用户输入客户端的列表编号和要发送的内容，然后组装请求数据包，类型设置为消息请求，然后调用`send()`将数据发送给服务器，接着等待接收数据的子线程返回结果，并根据响应数据包的内容，打印消息发送结果（是否成功送达另一个客户端）。
7. 选择退出功能：判断连接状态是否为已连接，是则先调用断开功能，然后再退出程序。否则，直接退出程序。
8. 主线程除了在等待用户的输入外，还在处理子线程的消息队列，如果有消息到达，则进行处理，如果是响应消息，则打印响应消息的数据内容（比如时间、名字、客户端列表等）；如果是指示消息，则打印指示消息的内容（比如服务器转发的别的客户端的消息内容、发送者编号、IP地址、端口等）。

- 服务端编写步骤（**需要采用多线程模式**）

a) 运行初始化，调用`socket()`，向操作系统申请socket句柄

b) 调用`bind()`，绑定监听端口（**请使用学号的后4位作为服务器的监听端口**），接着调用`listen()`，设置连接等待队列长度

c) 主线程循环调用`accept()`，直到返回一个有效的socket句柄，在客户端列表中增加一个新客户端的项目，并记录下该客户端句柄和连接状态、端口。然后创建一个子线程后继续调用`accept()`。该子线程的主要步骤是（**刚获得的句柄要传递给子线程，子线程内部要使用该句柄发送和接收数据**）：

- 调用`send()`，发送一个hello消息给客户端（可选）
- 循环调用`receive()`，如果收到了一个完整的请求数据包，根据请求类型做相应的动作：

1. 请求类型为获取时间：调用`time()`获取本地时间，然后将时间数据组装进响应数据包，调用`send()`发给客户端
2. 请求类型为获取名字：将服务器的名字组装进响应数据包，调用`send()`发给客户端
3. 请求类型为获取客户端列表：读取客户端列表数据，将编号、IP地址、端口等数据组装进响应数据包，调用`send()`发给客户端
4. 请求类型为发送消息：根据编号读取客户端列表数据，如果编号不存在，将错误代码和出错描述信息组装进响应数据包，调用`send()`发回源客户端；如果编号存在并且状态是已连接，则将要转发的消息组装进指示数据包。调用`send()`发给接收客户端（使用接收客户端的socket句柄），发送成功后组装转发成功的响应数据包，调用`send()`发回源客户端。

d) 主线程还负责检测退出指令（如用户按退出键或者收到退出信号），检测到后即通知并等待各子线程退出。最后关闭Socket，主程序退出。

- 编程结束后，双方程序运行，检查是否实现功能要求，如果有问题，查找原因，并修改，直至满足功能要求
- 使用多个客户端同时连接服务端，检查并发性
- 使用Wireshark抓取每个功能的交互数据包

五、实验数据记录和处理

> **Note**
>
> - 以下实验记录均需结合屏幕截图（截取源代码或运行结果），进行文字标注和描述。
> - 选择端口时，请使用学号后4位，如后四位中第一位为0，则在最前添加1
> - 请将以下内容和本实验报告一起打包成一个压缩文件上传：
>   - 源代码：需要说明编译环境和编译方法，如果不能编译成功，将影响评分
>   - 可执行文件：可运行的.exe文件或Linux可执行文件

- 描述请求数据包的格式（画图说明），请求类型的定义

  数据包格式：

```
+---------+---------+---------+---------+------------+----------+
| Type    | Length (MSB)    | Length (LSB)    | Sequence (4 bytes)   | Data      |
| 1 byte | 1 byte | 1 byte | 1 byte | 4 bytes    | Variable |
+---------+---------+---------+---------+------------+----------+
|<------- 固定头部 7 bytes -------->|<-- 变长数据体 -->|
```

  字段说明：

  - Type (1字节): 消息类型标识
  - Length (2字节): 数据部分长度，采用网络字节序(大端序)
  - Sequence (4字节): 序列号，用于调试和消息跟踪
  - Data (可变长): 实际承载的数据内容

  请求类型定义(0x0x系列)：

  - `0x01` : REQ_CONNECT - 连接请求
  - `0x02` : REQ_DISCONNECT - 断开连接请求
  - `0x03` : REQ_GET_TIME - 获取服务器时间请求
  - `0x04` : REQ_GET_NAME - 获取服务器名称请求
  - `0x05` : REQ_GET_CLIENTS - 获取客户端列表请求
  - `0x06` : REQ_SEND_MSG - 发送消息请求(用于消息转发)

- 描述响应数据包的格式（画图说明），响应类型的定义

  数据包格式：

  响应数据包采用与请求相同的格式结构：

```
+---------+---------+---------+---------+------------+----------+
| Type    | Length (MSB)    | Length (LSB)    | Sequence (4 bytes)   | Data      |
| 1 byte | 1 byte | 1 byte | 1 byte | 4 bytes    | Variable |
+---------+---------+---------+---------+------------+----------+
```

  响应类型定义(0x1x系列)：

  - `0x11` : RESP_CONNECT - 连接响应，Data字段包含欢迎消息
  - `0x12` : RESP_TIME - 时间响应，Data字段包含服务器当前时间字符串
  - `0x13` : RESP_NAME - 名称响应，Data字段包含服务器名称
  - `0x14` : RESP_CLIENTS - 客户端列表响应，Data字段包含格式化的客户端列表
  - `0x15` : RESP_SEND_RESULT - 消息发送结果响应，Data字段包含发送成功/失败的信息

- 描述指示数据包的格式﹏画图说明﹀ ’指示类型的定义

  数据包格式 ：

  指示数据包采用与请求 `响应相同的格式结构 ：

```
+--------+--------+--------+--------+-----------+----------+
| Type   | Length (MSB)    | Length (LSB)    | Sequence (4 bytes)   | Data     |
| 1 byte | 1 byte | 1 byte | 1 byte | 4 bytes    | Variable |
+--------+--------+--------+--------+-----------+----------+
```

  指示类型定义(0x2x系列) ：

  - `0x21` : NOTIFY_MSG - 消息通知 ’服务器主动推送转发的消息给目标客户端
  - `0x22` : NOTIFY_DISCONNECT - 断开通知 ’服务器主动通知客户端即将断开连接

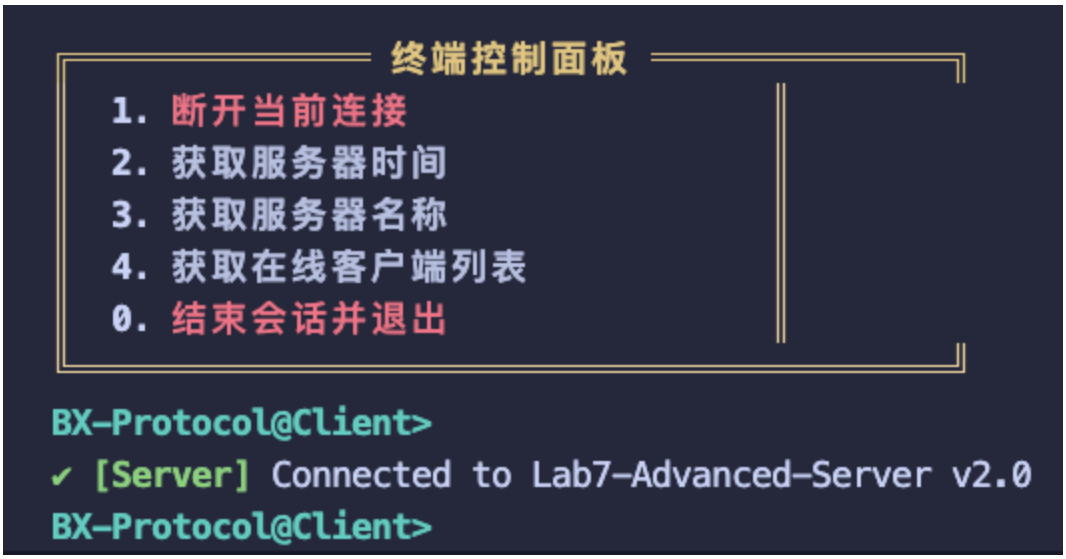
  注意 ：指示数据包是服务器主动发送给客户端的 ’不是对客户端请求的响应 。

- 客户端初始运行后显示的菜单选项

  客户端采用现代化终端界面设计 ’使用ANSI颜色增强用户体验 。

  未连接状态菜单 ：

  已连接状态菜单 ：



- 客户端的主线程循环关键代码截图（描述总体，省略细节部分）

```
int main(int argc, char* argv[]) {
    signal(SIGINT, exitHandler);  // 注册信号处理器
    signal(SIGTERM, exitHandler);

    showBanner();

    // 启动消息呈现线程（负责渲染接收到的消息）
    std::thread presenterThread(messagePresenter);
    std::thread* receiverThread = nullptr;
    SocketWrapper* clientSocket = nullptr;

    while (!shouldExit) {
        showMenu();  // 显示菜单

        // 读取用户输入
        std::string input;
        if (!std::getline(std::cin, input)) break;

        int choice = std::stoi(input);

        if (!isConnected) {
            // 未连接状态：处理连接请求
            if (choice == 1) {
                // 创建socket，连接服务器
                int sockfd = socket(AF_INET, SOCK_STREAM, 0);
                // ...设置服务器地址...
                connect(sockfd, ...);

                clientSocket = new SocketWrapper(sockfd);
                isConnected = true;

                // 启动接收线程
                receiverThread = new std::thread(receiveMessages, clientSocket);
            }
        } else {
            // 已连接状态：处理各种请求
            switch (choice) {
                case 1: // 断开连接
                    clientSocket->send(Packet(MessageType::REQ_DISCONNECT));
```

```
                    isConnected = false;
                    break;
                case 2: // 获取时间
                    clientSocket->send(Packet(MessageType::REQ_GET_TIME));
                    break;
                case 3: // 获取名称
                    clientSocket->send(Packet(MessageType::REQ_GET_NAME));
                    break;
                case 4: // 获取客户端列表
                    clientSocket->send(Packet(MessageType::REQ_GET_CLIENTS));
                    break;
            }
        }
    }

    // 退出清理
    if (receiverThread && receiverThread->joinable()) {
        receiverThread->join();
    }
    msgCondition.notify_all();
    if (presenterThread.joinable()) presenterThread.join();

    return 0;
}
```

  - 主线程负责用户交互和发送请求
  - 采用多线程架构：主线程 + 接收线程 + 消息呈现线程
  - 使用全局标志 `isConnected` 管理连接状态
  - 通过信号处理器实现优雅退出
- 客户端的接收数据子线程循环关键代码截图（描述总体，省略细节部分）

  接收线程核心逻辑

```
void receiveMessages(SocketWrapper* sock) {
    while (!shouldExit && isConnected) {
        Packet pkt;

        // 阻塞接收数据包
        if (!sock->recv(pkt)) {
            if (!shouldExit) {
                std::cout << "[!] 错误：与服务器的连接已意外中断" << std::endl;
                isConnected = false;
            }
            break;
        }

        // 将接收到的数据包放入消息队列
        {
            std::lock_guard<std::mutex> lock(msgMutex);
            msgQueue.push(pkt);
        }

        // 通知消息呈现线程处理
        msgCondition.notify_all();
    }
}
```

消息呈现线程核心逻辑

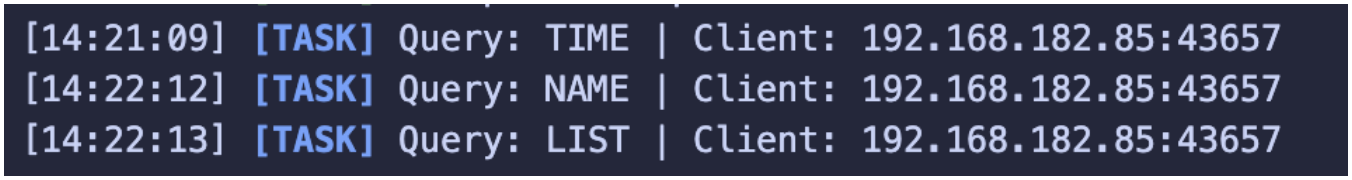
```
void messagePresenter() {
    while (!shouldExit) {
        std::unique_lock<std::mutex> lock(msgMutex);

        // 等待消息队列非空
        msgCondition.wait(lock, []{ return !msgQueue.empty() || shouldExit; });

        while (!msgQueue.empty()) {
            Packet pkt = msgQueue.front();
            msgQueue.pop();
            lock.unlock();

            // 根据消息类型着色输出
            switch (pkt.getType()) {
                case MessageType::RESP_CONNECT:
                    std::cout << "✔ [Server] " << pkt.data << std::endl;
                    break;
                case MessageType::RESP_TIME:
                    std::cout << "🕒 [Time] " << pkt.data << std::endl;
                    break;
                case MessageType::RESP_NAME:
                    std::cout << "   [Name] " << pkt.data << std::endl;
                    break;
                case MessageType::RESP_CLIENTS:
                    std::cout << "👥 [Client List]\n" << pkt.data << std::endl;
                    break;
                // ...其他消息类型...
            }

            lock.lock();
        }
    }
}
```

  - 使用**生产者-消费者模式**：接收线程生产消息，呈现线程消费消息
  - 使用**mutex + condition_variable**实现线程同步
  - 接收线程专注于网络I/O，呈现线程专注于界面显示，分工明确
  - 通过消息队列解耦接收和显示逻辑
- 服务器初始运行后显示的界面

服务器监听在4703端口（使用学号后4位）”等待客户端连接“当客户端连接时会显示：

```
[HH:MM:SS] [CONN] Accepted new peer: 127.0.0.1:54321
```

当处理客户端请求时会显示相应的日志：



- 服务器的主线程循环关键代码截图（描述总体”省略细节部分）
  服务器主线程核心逻辑

```
int main(int argc, char* argv[]) {
    signal(SIGINT, exitHandler);   // 注册信号处理器
    signal(SIGTERM, exitHandler);

    showServerBanner();

    // 1. 创建socket
    int serverSocket = socket(AF_INET, SOCK_STREAM, 0);

    // 2. 设置地址重用选项
    int opt = 1;
    setsockopt(serverSocket, SOL_SOCKET, SO_REUSEADDR, &opt, sizeof(opt));

    // 3. 绑定地址和端口
    struct sockaddr_in serverAddress;
    memset(&serverAddress, 0, sizeof(serverAddress));
    serverAddress.sin_family = AF_INET;
    serverAddress.sin_addr.s_addr = INADDR_ANY;
    serverAddress.sin_port = htons(SERVER_PORT);  // 4703

    bind(serverSocket, (struct sockaddr*)&serverAddress, sizeof(serverAddress));

    // 4. 开始监听
    listen(serverSocket, MAX_CLIENT_QUEUE);  // 队列长度20

    log("INIT", CYAN, "Orchestrator online. Listening for incoming sockets...");

    std::vector<std::thread> threads;

    // 5. 主循环：接受客户端连接
    while (!shouldExit) {
        struct sockaddr_in clientAddress;
        socklen_t clientAddressLength = sizeof(clientAddress);

        // 阻塞等待客户端连接
        int clientSocket = accept(serverSocket,
                                  (struct sockaddr*)&clientAddress,
                                  &clientAddressLength);
```

```
        if (clientSocket < 0) {
            if (shouldExit) break;
            log("ERROR", RED, "Accept failed on kernel level.");
            continue;
        }

        // 获取客户端IP和端口
        char clientIP[INET_ADDRSTRLEN];
        inet_ntop(AF_INET, &clientAddress.sin_addr, clientIP, INET_ADDRSTRLEN);
        std::string clientAddr = std::string(clientIP) + ":" +
                                 std::to_string(ntohs(clientAddress.sin_port));

        // 为每个客户端创建处理线程
        threads.emplace_back(handleClient, clientSocket, clientAddr);

        // 分离线程，让其独立运行
        threads.back().detach();
    }

    log("EXIT", WHITE, "Finalizing kernel resources... Goodbye.");
    close(serverSocket);
    return 0;
}
```

- 使用标准的**socket -> bind -> listen -> accept**流程
- 主线程循环accept() ’每接受一个连接就创建新线程处理
- 使用**detach()**让子线程独立运行 ’避免主线程管理压力
- 通过全局标志 `shouldExit` 实现优雅退出
- 使用 `SO_REUSEADDR` 选项避免端口占用问题

- 服务器的客户端处理子线程循环关键代码截图（描述总体 ’省略细节部分）

客户端处理线程核心逻辑

```
void handleClient(int clientFd, std::string clientAddr) {
    SocketWrapper clientSock(clientFd);
    log("CONN", GREEN, "Accepted new peer: " + clientAddr);

    // 将客户端添加到全局列表（需要加锁）
    {
        std::lock_guard<std::mutex> lock(clientsMutex);
        connectedClients[clientFd] = clientAddr;
    }

    // 发送欢迎消息
    Packet welcomePkt(MessageType::RESP_CONNECT,
                      "Connected to Lab7-Advanced-Server v2.0");
    clientSock.send(welcomePkt);

    // 主循环：处理客户端请求
    while (!shouldExit) {
        Packet request;

        // 接收请求包
        if (!clientSock.recv(request)) break;

        Packet response;

        // 根据请求类型分发处理
        switch (request.getType()) {
            case MessageType::REQ_GET_TIME:
                log("TASK", BLUE, "Query: TIME | Client: " + clientAddr);
                response = Packet(MessageType::RESP_TIME, getCurrentTime());
                clientSock.send(response);
                break;

            case MessageType::REQ_GET_NAME:
                log("TASK", BLUE, "Query: NAME | Client: " + clientAddr);
                response = Packet(MessageType::RESP_NAME,
                                  "ZJU-BS-Experimental-Server-4703");
                clientSock.send(response);
                break;
```

```
            case MessageType::REQ_GET_CLIENTS:
                log("TASK", BLUE, "Query: LIST | Client: " + clientAddr);
                response = Packet(MessageType::RESP_CLIENTS, getClientList());
                clientSock.send(response);
                break;

            case MessageType::REQ_DISCONNECT:
                log("CONN", YELLOW, "Peer requested termination: " + clientAddr);
                goto cleanup;

            default:
                log("WARN", MAGENTA, "Unknown opcode from " + clientAddr);
                break;
        }
    }

cleanup:
    // 清理：从客户端列表中移除（需要加锁）
    {
        std::lock_guard<std::mutex> lock(clientsMutex);
        connectedClients.erase(clientFd);
    }
    log("CONN", RED, "Peer disconnected: " + clientAddr);
}
```

辅助函数：

```cpp
// 获取当前时间
std::string getCurrentTime() {
    time_t now = time(nullptr);
    char buf[64];
    strftime(buf, sizeof(buf), "%Y-%m-%d %H:%M:%S", localtime(&now));
    return std::string(buf);
}

// 获取客户端列表
std::string getClientList() {
    std::lock_guard<std::mutex> lock(clientsMutex);
    std::string result;
    int index = 1;
    for (const auto& [fd, addr] : connectedClients) {
        result += std::to_string(index++) + ". " + addr + " (Active)\n";
    }
    return result.empty() ? "No active connections." : result;
}
```

    - 每个客户端由独立线程处理 ’互不干扰
    - 使用**mutex**保护共享数据结构 `connectedClients`
    - 采用**SocketWrapper RAII封装** ’自动管理socket生命周期
    - 使用**switch-case**分发不同类型的请求
    - 通过goto实现优雅的清理流程
- 客户端选择连接功能时 ’客户端和服务端显示内容截图 °
    - 服务器

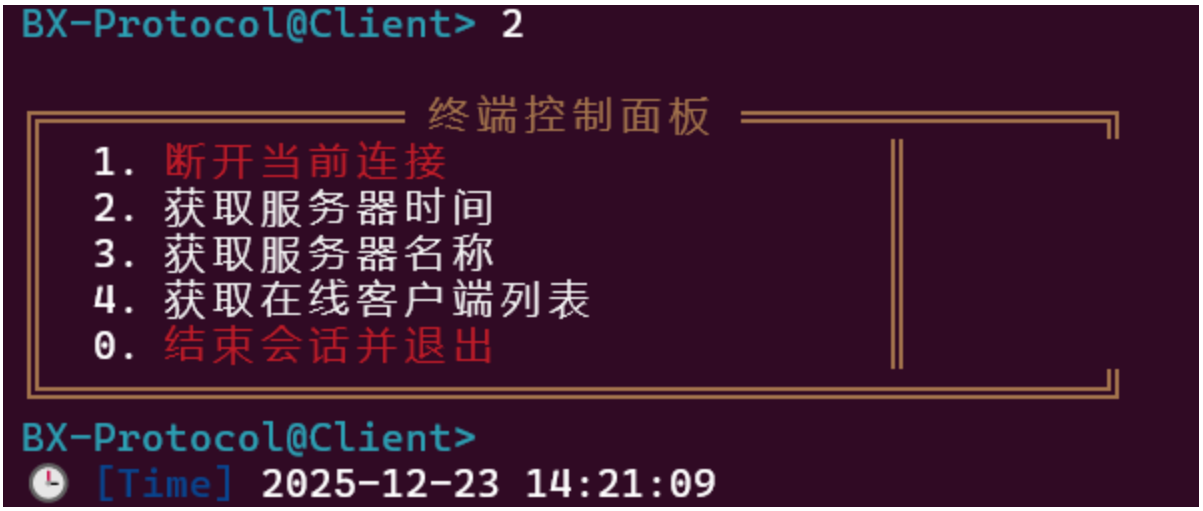
      ```
      [15:00:47] [CONN] Accepted new peer: 192.168.182.85:40921
      ```
    - 客户端

Wireshark抓取的数据包截图 ：

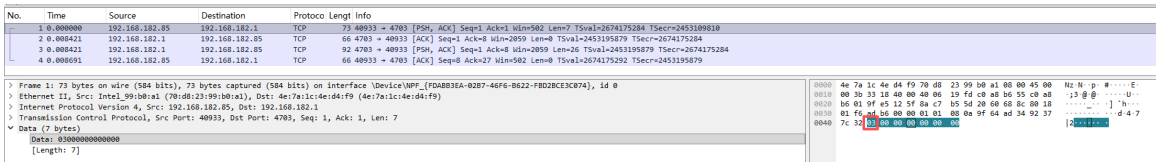
No.	Time	Source	Destination	Protoco	Lengt	Info
1	0.000000	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	74	43181 → 4703 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=2044687975 TSecr=0 WS=128
2	0.076107	4e:7a:1c:4e:d4:f9	Intel_99:b0:a1	ARP	42	Who has 192.168.182.85? Tell 192.168.182.1
3	0.076156	Intel_99:b0:a1	4e:7a:1c:4e:d4:f9	ARP	42	192.168.182.85 is at 70:d8:23:99:b0:a1
4	0.077708	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	78	4703 → 43181 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65535 Len=0 MSS=1460 WS=64 TSval=107732593 TSecr=2044687975 SACK_PERM
5	0.078222	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	66	43181 → 4703 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=0 TSval=2044688054 TSecr=107732593
6	0.090250	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	66	[TCP Window Update] 4703 → 43181 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=131776 Len=0 TSval=107732610 TSecr=2044688054
7	0.090250	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	111	4703 → 43181 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=131776 Len=45 TSval=107732610 TSecr=2044688054
8	0.090915	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	66	43181 → 4703 [ACK] Seq=1 Ack=46 Win=64256 Len=0 TSval=2044688066 TSecr=107732610

- 客户端选择获取时间功能时 ’客户端和服务端显示内容截图 °
  - 服务器 ：

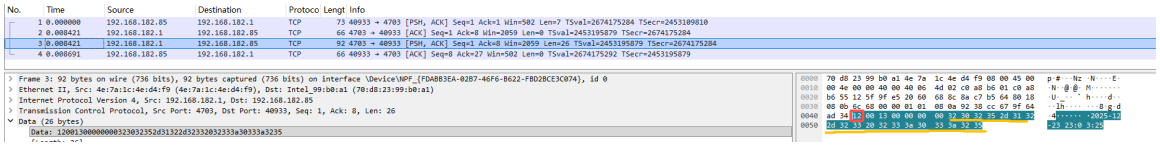
  - 客户端 ：



- Wireshark抓取的数据包截图（展开应用层数据包，标记请求、响应类型、返回的时间数据对应的位置）：
  - 请求数据包：

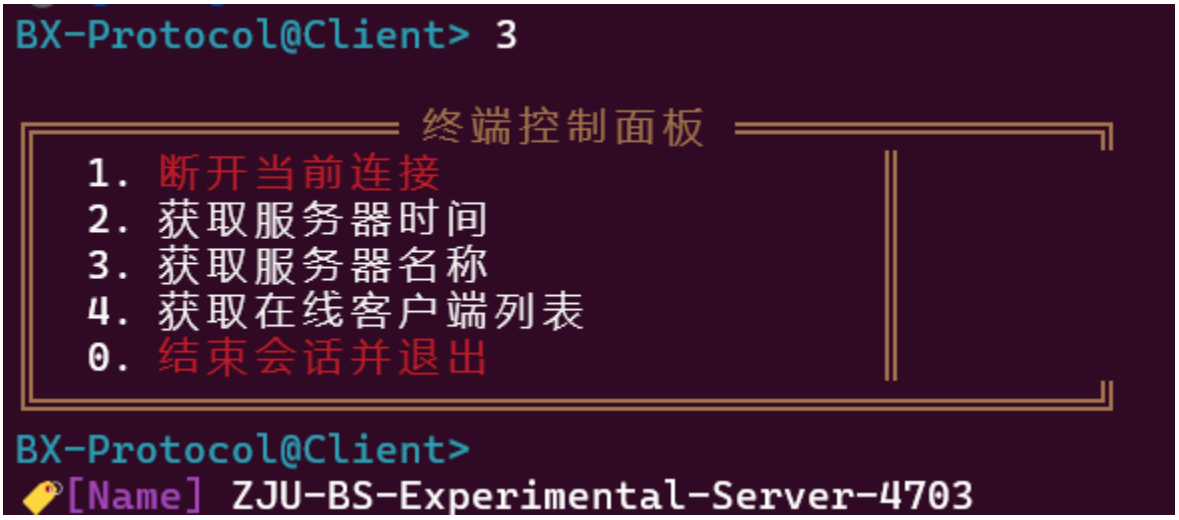


  - 响应数据包：



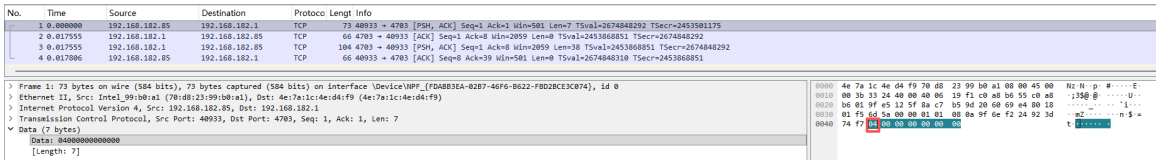
- 客户端选择获取名字功能时，客户端和服务端显示内容截图。
  - 服务器：

  - 客户端：

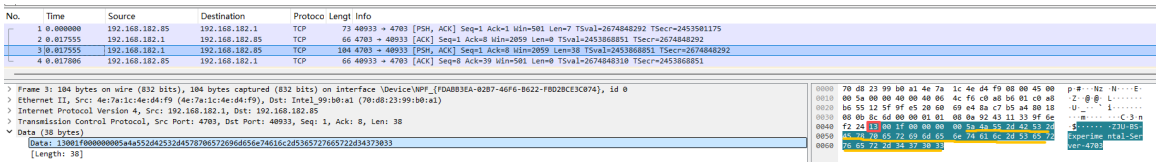


  - Wireshark抓取的数据包截图（展开应用层数据包，标记请求、响应类型、返回的名字数据对应的位置）：

- 请求数据包 ：



- 响应数据包 ：



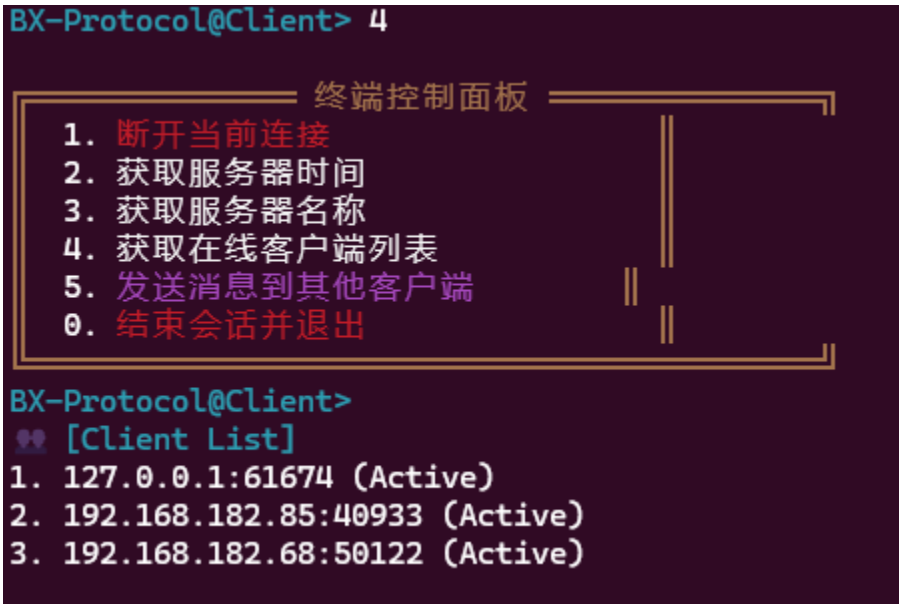
相关的服务器的处理代码片段 ：

```
case MessageType::REQ_GET_NAME:
  log("TASK", BLUE, "Query: NAME | Client: " + clientAddr);
  response = Packet(MessageType::RESP_NAME, "ZJU-BS-Experimental-Server-4703");
  clientSock.send(response);
  break;
```

- 客户端选择获取客户端列表功能时 ’客户端和服务端显示内容截图 ‘

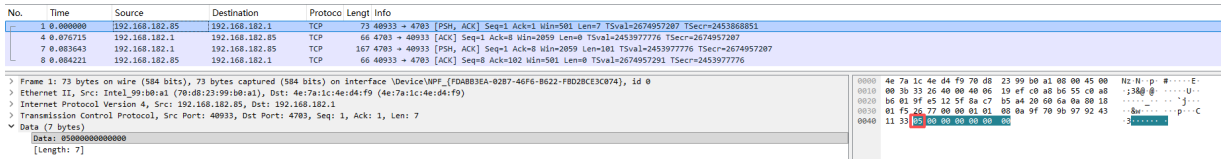
  - 服务器 ：

  - 客户端 ：

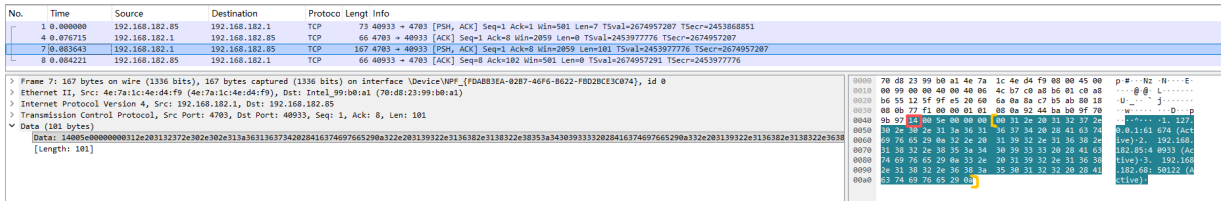


Wireshark抓取的数据包截图（展开应用层数据包 ’标记请求 `响应类型 `返回的客户端列表数据对应的位置） ：

  - 请求数据包 ：



- 响应数据包 ：



相关的服务器的处理代码片段 ：

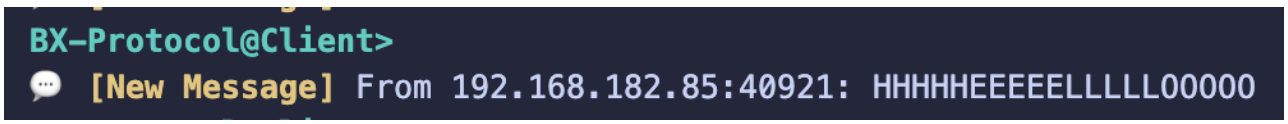
```
case MessageType::REQ_GET_CLIENTS:
  log("TASK", BLUE, "Query: LIST | Client: " + clientAddr);
  response = Packet(MessageType::RESP_CLIENTS, getClientList());
  clientSock.send(response);
  break;
```

- 客户端选择发送消息功能时 ’客户端和服务端显示内容截图 °

发送消息的客户端 ：

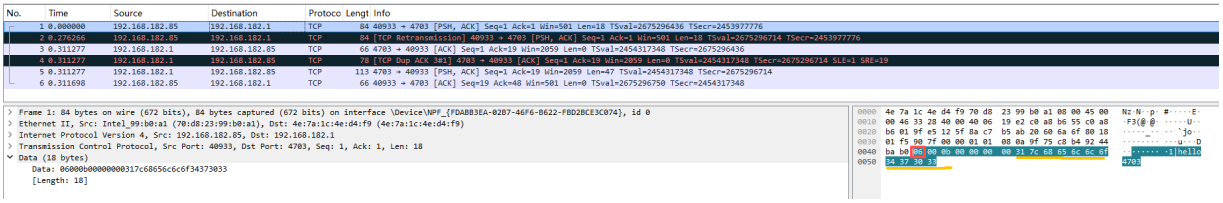
服务器 ：

接收消息的客户端 ：

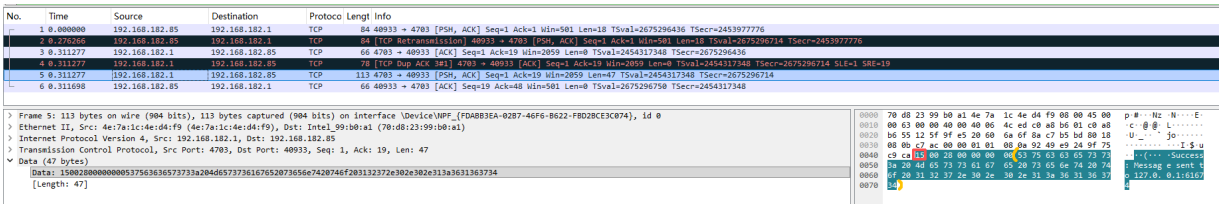


Wireshark抓取的数据包截图（发送和接收分别标记） ：

- 请求数据包 ：



- 响应数据包 ：



相关的服务器的处理代码片段 ：

```
case MessageType::REQ_SEND_MSG: {
    log("TASK", MAGENTA, "Message Forward Request | From: " + clientAddr);

    // 解析数据：编号|消息内容
    std::string data = request.data;
    size_t delimPos = data.find('|');

    if (delimPos == std::string::npos) {
        response = Packet(MessageType::RESP_SEND_RESULT, "Error: Invalid message forma
        clientSock.send(response);
        break;
    }

    std::string targetIdStr = data.substr(0, delimPos);
    std::string message = data.substr(delimPos + 1);

    int targetIndex = 0;
    try {
        targetIndex = std::stoi(targetIdStr);
    } catch (...) {
        response = Packet(MessageType::RESP_SEND_RESULT, "Error: Invalid target ID");
        clientSock.send(response);
        break;
    }

    // 查找目标客户端
    int targetFd = -1;
    std::string targetAddr;
    {
        std::lock_guard<std::mutex> lock(clientsMutex);
        if (targetIndex < 1 || targetIndex > (int)connectedClients.size()) {
            response = Packet(MessageType::RESP_SEND_RESULT,
                              "Error: Client #" + targetIdStr + " not found");
            clientSock.send(response);
            break;
        }

        // 根据编号找到对应的socket fd
        auto it = connectedClients.begin();
```

```
            std::advance(it, targetIndex - 1);
            targetFd = it->first;
            targetAddr = it->second;
        }

        // 向目标客户端发送消息通知
        std::string notifyData = "From " + clientAddr + ": " + message;
        Packet notifyPkt(MessageType::NOTIFY_MSG, notifyData);

        // 直接使用socket fd发送
        ssize_t sent = ::send(targetFd, notifyPkt.serialize().c_str(),
                              notifyPkt.serialize().length(), 0);

        if (sent > 0) {
            log("TASK", GREEN, "Message forwarded: " + clientAddr + " -> " + targetAddr);
            response = Packet(MessageType::RESP_SEND_RESULT,
                              "Success: Message sent to " + targetAddr);
        } else {
            log("TASK", RED, "Message forward failed: " + clientAddr + " -> " + targetAddr
            response = Packet(MessageType::RESP_SEND_RESULT,
                              "Error: Failed to send message to client #" + targetIdStr);
        }

        clientSock.send(response);
        break;
    }
```

相关的客户端﹀发送和接收消息﹀处理代码片段：

- 发送消息

```
case 5: { // 发送消息
            std::cout << BOLD << "请输入目标客户端编号: " << RESET;
            std::string targetIdStr;
            std::getline(std::cin, targetIdStr);

            if (targetIdStr.empty()) {
                std::cout << RED << " [!] 编号不能为空。" << RESET << std::endl;
                break;
            }

            std::cout << BOLD << "请输入要发送的消息: " << RESET;
            std::string message;
            std::getline(std::cin, message);

            if (message.empty()) {
                std::cout << RED << " [!] 消息不能为空。" << RESET << std::endl;
                break;
            }

            // 组装数据：编号|消息内容
            std::string payload = targetIdStr + "|" + message;
            clientSocket->send(Packet(MessageType::REQ_SEND_MSG, payload));
            std::cout << YELLOW << " [*] 消息已发送，等待确认..." << RESET << std::endl;
            break;
        }
```

- 接收消息

```
void receiveMessages(SocketWrapper* sock) {
    while (!shouldExit && isConnected) {
        Packet pkt;
        if (!sock->recv(pkt)) {
            if (!shouldExit) {
                std::cout << RED << "\n[!] 错误：与服务器的连接已意外中断" << RESET << std:
                isConnected = false;
            }
            break;
        }

        {
            std::lock_guard<std::mutex> lock(msgMutex);
            msgQueue.push(pkt);
        }
        msgCondition.notify_all();
    }
}
```

- 拔掉客户端的网线，然后退出客户端程序。
  观察客户端的TCP连接状态，并使用Wireshark观察客户端是否发出了TCP连接释放的消息。同时观察服务端的TCP连接状态在较长时间内（10分钟以上）是否发生变化。

```
[Error] Failed to receive header
[00:18:44] [CONN] Peer disconnected: 192.168.182.85:42237
```

- 再次连上客户端的网线，重新运行客户端程序。

```
BX-Protocol@Client> 2
是否批量发送100次请求? (y/n) [n]: n

        终端控制面板
  1. 断开当前连接
  2. 获取服务器时间
  3. 获取服务器名称
  4. 获取在线客户端列表
  5. 发送消息到其他客户端
  0. 结束会话并退出
BX-Protocol@Client> [Error] Failed to receive header

[!] 错误：与服务器的连接已意外中断
```

选择连接功能 ’连上后选择获取客户端列表功能 ’查看之前异常退出的连接是否还在 °选择给这个之前异常退出的客户端连接发送消息 ’出现了什么情况 ？

实验现象 ：

i. **之前异常退出的连接仍然存在于客户端列表中**
   - 服务器的connectedClients映射中仍保留着断网客户端的记录
   - 客户端列表会显示该客户端﹏但实际上已经断开﹀

ii. **尝试发送消息时的情况 ：**
   - 客户端输入编号和消息内容后 ’消息会被发送到服务器
   - 服务器尝试向目标客户端转发消息时 ’调用`send()`
   - **第一次发送可能成功**﹏因为TCP发送缓冲区接受了数据﹀
   - 但实际上消息无法送达 ’因为连接已断开
   - 服务器可能在后续的发送操作中才会收到错误﹏EPIPE或ECONNRESET﹀
   - 此时服务器返回"Success"消息 ’但实际上目标客户端收不到

问题根源 ：

- TCP的半关闭特性 ：单方面断网不会立即通知对端
- 服务器没有实现连接健康检查机制﹏如Keep-Alive或心跳﹀
- `send()`调用成功只表示数据放入发送缓冲区 ’不代表对端收到

改进建议 ：

- 实现TCP Keep-Alive机制自动检测死连接
- 实现应用层心跳机制
- 在消息转发时检查send()的返回值 ’如果失败则从列表中移除该客户端

- 修改获取时间功能 ’改为用户选择1次 ’程序内自动发送100次请求 °
  服务器是否正常处理了100次请求 ’截取客户端收到的响应﹏通过程序计数一下是否有100个响应回来﹀ ’并使用Wireshark抓取数据包 ’观察实际发出的数据包个数 °

```
BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client>
 [Time #80] 2025-12-24 00:22:07
BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client>
BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client>
BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client> BX-Protocol@Client>
 [Time #96] 2025-12-24 00:22:07
BX-Protocol@Client>
 [Time #97] 2025-12-24 00:22:07
BX-Protocol@Client>
 [Time #98] 2025-12-24 00:22:07
BX-Protocol@Client>
 [Time #99] 2025-12-24 00:22:07
BX-Protocol@Client>
 [Time #100] 2025-12-24 00:22:07
BX-Protocol@Client>
========== 统计结果 ==========
 发送请求数: 100
 收到响应数: 100
 ✓ 所有响应均已收到!
==============================

          终端控制面板
  1. 断开当前连接
  2. 获取服务器时间
  3. 获取服务器名称
  4. 获取在线客户端列表
  5. 发送消息到其他客户端
  0. 结束会话并退出
```

No.	Time	Source	Destination	Protoco	Lengt	Info
1	0.000000	10.162.18.116	192.168.182.1	TCP	74	44007 → 4703 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=3111744674 TSecr=0 WS=128
2	1.015792	10.162.18.116	192.168.182.1	TCP	74	[TCP Retransmission] 44007 → 4703 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=3111745697 TSecr=0 WS=128
3	2.088092	10.162.18.116	192.168.182.1	TCP	74	[TCP Retransmission] 44007 → 4703 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=3111746720 TSecr=0 WS=128
4	3.110799	10.162.18.116	192.168.182.1	TCP	74	[TCP Retransmission] 44007 → 4703 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=3111747744 TSecr=0 WS=128
5	4.131349	10.162.18.116	192.168.182.1	TCP	74	[TCP Retransmission] 44007 → 4703 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=3111748769 TSecr=0 WS=128
6	5.150491	10.162.18.116	192.168.182.1	TCP	74	[TCP Retransmission] 44007 → 4703 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=3111749793 TSecr=0 WS=128
7	7.159258	10.162.18.116	192.168.182.1	TCP	74	[TCP Retransmission] 44007 → 4703 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=3111751809 TSecr=0 WS=128
14	45.791357	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	74	42237 → 4703 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM TSval=2678396220 TSecr=0 WS=128
15	45.814743	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	78	4703 → 42237 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65535 Len=0 MSS=1460 WS=64 TSval=120792353 TSecr=2678396220 SACK_PERM
16	45.815126	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	66	42237 → 4703 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=0 TSval=2678396396 TSecr=120792353
17	45.823025	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	66	[TCP Window Update] 4703 → 42237 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=131776 Len=0 TSval=120792366 TSecr=2678396396
18	45.823025	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	111	4703 → 42237 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=131776 Len=45 TSval=120792366 TSecr=2678396396
19	45.823416	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	66	42237 → 4703 [ACK] Seq=1 Ack=46 Win=64256 Len=0 TSval=2678396404 TSecr=120792366
20	74.840907	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	73	42237 → 4703 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=46 Win=64256 Len=7 TSval=2678425378 TSecr=120792366
21	74.959467	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	66	4703 → 42237 [ACK] Seq=46 Ack=8 Win=131776 Len=0 TSval=120821501 TSecr=2678425378
22	74.959467	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	92	4703 → 42237 [PSH, ACK] Seq=46 Ack=8 Win=131776 Len=26 TSval=120821505 TSecr=2678425378
23	74.959763	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	759	42237 → 4703 [PSH, ACK] Seq=8 Ack=46 Win=64256 Len=693 TSval=2678425500 TSecr=120821501
24	74.959819	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	66	42237 → 4703 [ACK] Seq=701 Ack=72 Win=64256 Len=0 TSval=2678425500 TSecr=120821505
25	74.970102	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	66	4703 → 42237 [ACK] Seq=72 Ack=701 Win=131136 Len=0 TSval=120821512 TSecr=2678425500
26	74.970102	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	92	4703 → 42237 [PSH, ACK] Seq=72 Ack=701 Win=131136 Len=26 TSval=120821512 TSecr=2678425500
27	74.970102	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	1514	4703 → 42237 [ACK] Seq=98 Ack=701 Win=131136 Len=1448 TSval=120821513 TSecr=2678425500
28	74.970102	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	74	4703 → 42237 [PSH, ACK] Seq=1546 Ack=701 Win=131136 Len=8 TSval=120821513 TSecr=2678425500
29	74.970426	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	66	42237 → 4703 [ACK] Seq=701 Ack=98 Win=64256 Len=0 TSval=2678425511 TSecr=120821512
30	74.970471	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	66	42237 → 4703 [ACK] Seq=701 Ack=1554 Win=62848 Len=0 TSval=2678425511 TSecr=120821513
31	74.980311	192.168.182.1	192.168.182.85	TCP	1158	4703 → 42237 [PSH, ACK] Seq=1554 Ack=701 Win=131136 Len=1092 TSval=120821521 TSecr=2678425511
32	74.980548	192.168.182.85	192.168.182.1	TCP	66	42237 → 4703 [ACK] Seq=701 Ack=2646 Win=61824 Len=0 TSval=2678425521 TSecr=120821521

实验结果 ：

客户端统计显示 ：

```
========== 统计结果 ==========
 发送请求数: 100
 收到响应数: 100
 ✓ 所有响应均已收到!
==============================
```

服务器处理情况 ：

- 服务器正常处理了所有100次请求
- 服务器日志显示100次"Query: TIME"记录
- 每次请求都正确返回了当前时间

Wireshark抓包分析 ：

i. 应用层数据包数量 ：

- 客户端发送的应用层请求包：远少于100个（由于TCP合并）
- 服务器返回的应用层响应包：远少于100个（由于TCP合并）
- 实际TCP Segment数量：约10-20个（取决于网络状况和Nagle算法）

ii. **TCP合并现象**：
- 由于客户端快速连续发送100次请求，TCP的Nagle算法将多个小的应用层数据包合并
- 一个TCP Segment可能包含多个时间请求包
- 服务器的响应也被合并到少量的TCP Segment中

iii. **包大小分析**：
- 单个请求包大小：7字节（Header）+ 0字节（Data）= 7字节
- 100个请求总计：700字节
- 实际可能被合并成2-5个TCP Segment发送

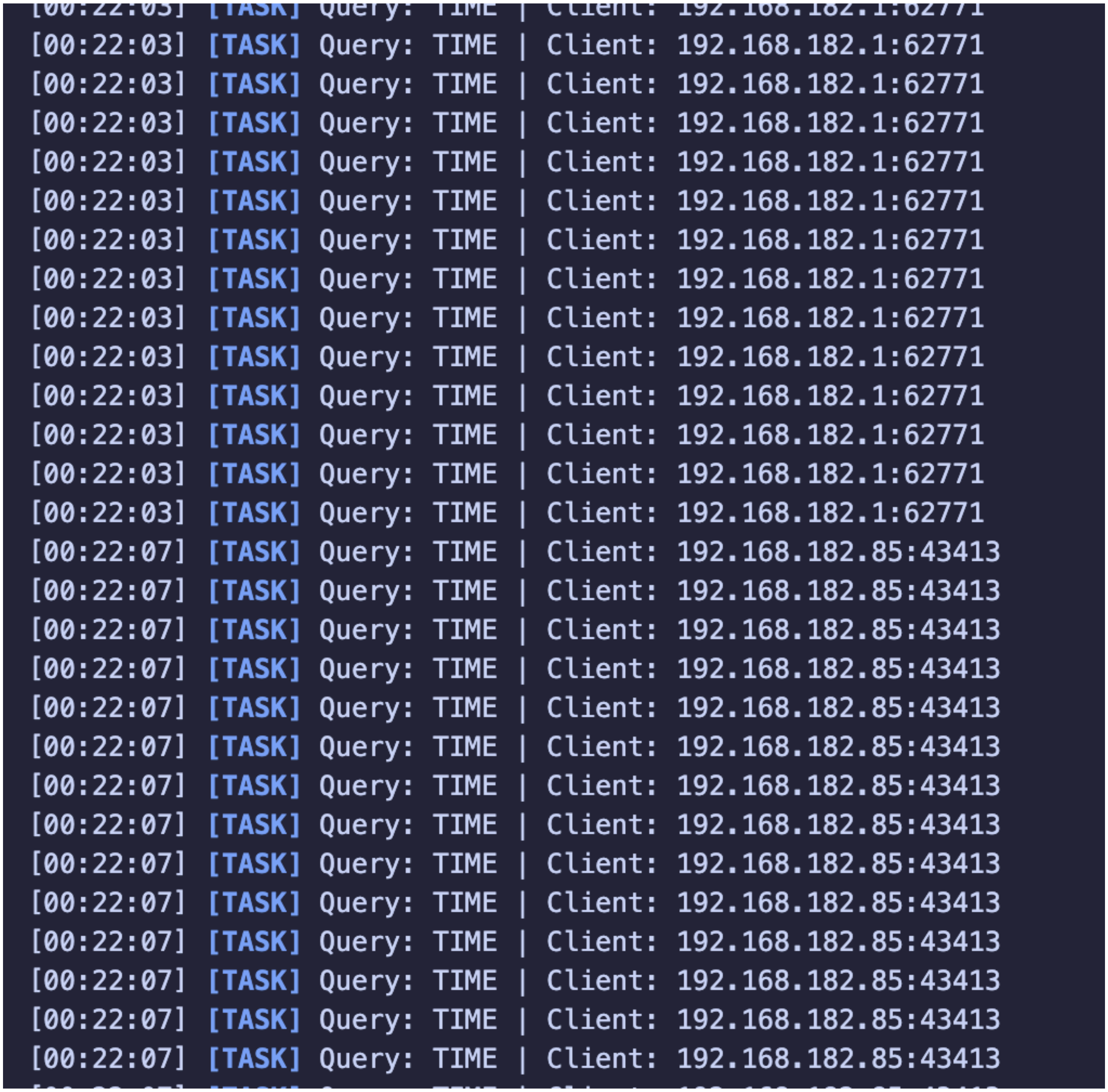
结论：
- **应用层**：客户端成功发送100次请求，收到100次响应，数据完整
- **传输层**：TCP将多个应用层包合并，实际TCP Segment数可能远小于100
- 这验证了之前关于send()次数与TCP Segment不一致的分析

```
case 2: { // 获取时间
    std::cout << "是否批量发送100次请求? (y/n) [n]: ";
    std::string batchInput;
    std::getline(std::cin, batchInput);

    if (batchInput == "y" || batchInput == "Y") {
        isBatchTimeRequest = true;
        timeResponseCount = 0;

        for (int i = 0; i < 100; i++) {
            clientSocket->send(Packet(MessageType::REQ_GET_TIME));
        }

        std::this_thread::sleep_for(std::chrono::seconds(5));

        std::cout << "发送请求数: 100" << std::endl;
        std::cout << "收到响应数: " << timeResponseCount << std::endl;
    }
}
```

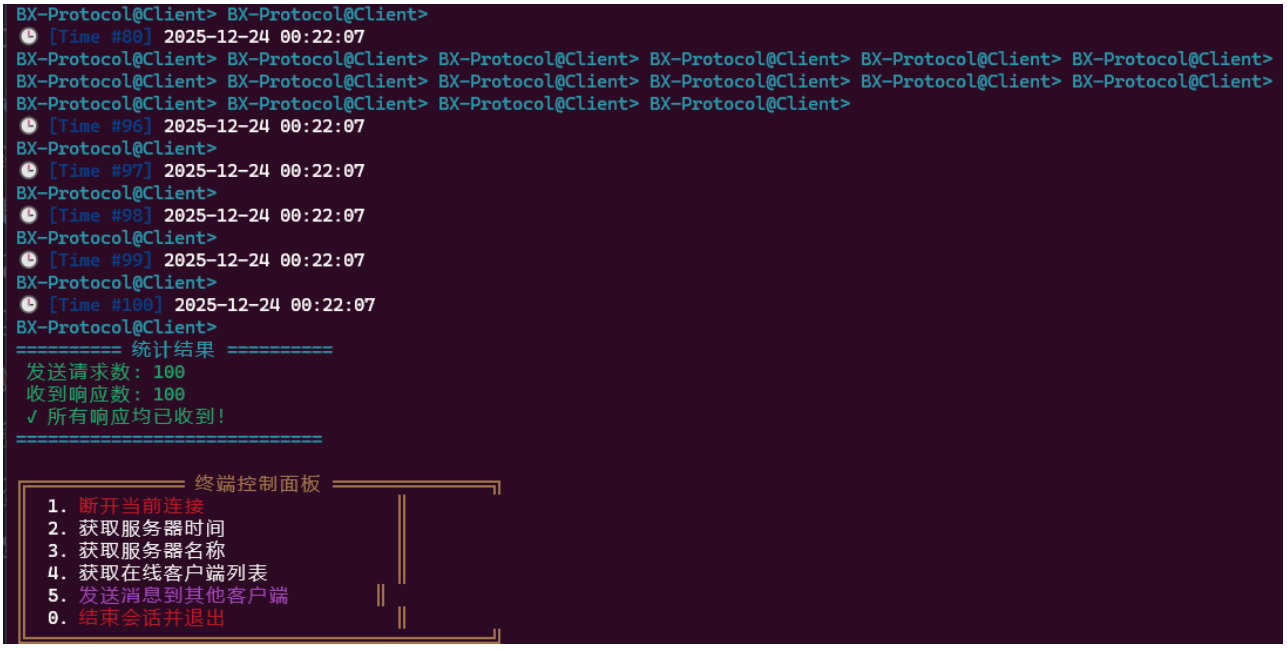
- 多个客户端同时连接服务器，同时发送时间请求（程序内自动连续调用100次send），服务

器和客户端的运行截图

- 服务端：两个一百次发送是分别完整运行的，说明我们给线程上的锁是有效的


```
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:03] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.1:62771
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
[00:22:07] [TASK] Query: TIME | Client: 192.168.182.85:43413
```

- 客户端



六、实验结果与分析

根据你编写的程序运行效果，分别解答以下问题：

- 客户端是否需要调用bind操作？它的源端口是如何产生的？每一次调用connect时客户端的端口是否都保持不变？

  答：

  客户端**不需要**显式调用`bind()`操作。

  源端口产生机制：

  - 当客户端调用`connect()`时，如果没有事先调用`bind()`绑定本地端口，操作系统会自动为该socket分配一个临时端口（ephemeral port）
  - 临时端口的范围通常在32768-60999之间（可通过`cat /proc/sys/net/ipv4/ip_local_port_range`查看）
  - 操作系统会从可用端口池中选择一个未被占用的端口

  每次connect的端口是否不变：

  - **不保持不变**。每次重新创建socket并调用`connect()`时，操作系统会分配新的临时端口
  - 只有当socket保持打开状态时，源端口才不会变化
  - 如果关闭socket后重新连接，端口号会改变（除非上一个端口还未完全释放，可能被重用）

  本实验中的体现：

  从client.cpp:190-211可以看到，每次连接时都创建新的socket，因此每次连接的源端口都

是由系统自动分配的新端口 。

- 假设在服务端调用listen和调用accept之间设了一个调试断点 ’暂停在此断点时 ’此时客户端调用connect后是否马上能连接成功 ？

  答 ：

  客户端调用`connect()`**可以立即成功** ’即使服务端暂停在listen和accept之间 。

  原理解释 ：

  i. `listen()`函数的作用是将socket设置为被动监听模式 ’并创建一个**连接等待队列**（本实验中队列长度为20）

  ii. 当客户端调用`connect()`发起TCP三次握手时 ：

  - 客户端发送SYN包
  - 服务端内核自动回复SYN+ACK包
  - 客户端发送ACK包完成握手

  iii. **三次握手由操作系统内核自动完成** ’不需要应用程序（服务端进程）参与

  iv. 握手完成后 ’已建立的连接会被放入**已完成连接队列**（accept队列）

  v. `accept()`的作用只是从已完成队列中取出一个连接 ’如果队列为空则阻塞等待

  结论 ：

  - 只要连接队列未满 ’客户端的`connect()`就能成功
  - 服务端进程可以稍后调用`accept()`来取出这个已建立的连接
  - 这种机制使得服务器即使暂时繁忙 ’也能缓冲一定数量的连接请求

- 连续快速send多次数据后 ’通过Wireshark抓包看到的发送的Tcp Segment次数是否和send的次数完全一致 ？

  答 ：

  不完全一致 ’实际的TCP Segment数量通常**少于**`send()`调用次数 。

  原因分析 ：

  i. **Nagle算法 ：**

  - TCP默认启用Nagle算法 ’该算法会将多个小的数据包合并成一个较大的TCP段发送
  - 目的是减少网络中的小包数量 ’提高网络利用率
  - 只有当累积数据达到MSS（最大报文段长度）或收到前一个包的ACK时才发送

  ii. **TCP缓冲区机制 ：**

  - `send()`只是将数据放入发送缓冲区 ’不一定立即发送
  - TCP协议栈会根据拥塞控制 `滑动窗口等机制决定何时发送以及发送多少数据

  iii. **可能的情况 ：**

  - 连续快速调用多次`send()`发送小数据包 → 被合并成一个TCP段
  - 发送大数据 → 可能被拆分成多个TCP段（根据MSS）

- 发送速度慢 → send次数和TCP段数可能接近

本实验验证：

可以通过修改获取时间功能，连续发送100次请求，观察Wireshark中实际的TCP段数量会明显少于100个。

如何强制一对一：

如果需要每次send对应一个TCP段，可以设置`TCP_NODELAY`选项禁用Nagle算法：

```
int flag = 1;
setsockopt(sockfd, IPPROTO_TCP, TCP_NODELAY, &flag, sizeof(flag));
```

- 服务器在同一个端口接收多个客户端的数据，如何能区分数据包是属于哪个客户端的？

答：

服务器通过**不同的socket文件描述符**来区分不同客户端的数据。

TCP连接的唯一标识：

每个TCP连接由**四元组**唯一标识：

- 客户端IP地址
- 客户端端口号
- 服务器IP地址
- 服务器端口号

Socket机制的处理：

i. **监听socket和连接socket：**
   - 服务器使用一个**监听socket**绑定在固定端口4703上，只负责接受连接请求
   - 每当`accept()`成功时，会返回一个**新的socket文件描述符**（server.cpp:180），这个新socket专门用于与该客户端通信
   - 虽然多个客户端都连接到服务器的4703端口，但每个客户端连接都有独立的socket描述符

ii. **操作系统内核的路由：**
   - 当数据包到达时，内核根据TCP四元组（源IP、源端口、目的IP、目的端口）来判断该数据属于哪个连接
   - 将数据投递到对应socket的接收缓冲区
   - 应用程序从不同的socket描述符读取数据，自然就区分了不同客户端

总结：虽然服务器端口只有一个（4703），但每个客户端连接对应不同的socket描述符，操作系统内核负责将数据包正确路由到对应的socket。

- 客户端主动断开连接后，当时的TCP连接状态是什么？这个状态保持了多久？（可以使用`netstat -an`查看）

答：

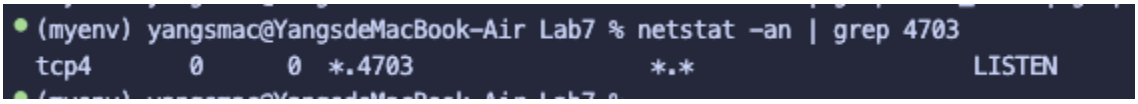
TCP连接状态：TIME_WAIT

TIME_WAIT状态的持续时间：

- 标准TCP实现中'TIME_WAIT状态持续**2MSL**（Maximum Segment Lifetime'最大报文段生存时间）
- macOS系统中'1MSL = 30秒'因此TIME_WAIT持续**60秒**
- 可以通过`netstat -an | grep 4703`查看连接状态
- 60秒后'连接记录完全消失

```
# 客户端断开连接后立即执行
netstat -an | grep 4703
```


```
# 60秒后再次执行，连接记录会消失
netstat -an | grep 4703
```



- 客户端断网后异常退出'服务器的TCP连接状态有什么变化吗？服务器该如何检测连接是否继续有效？

  答：

  服务器TCP连接状态变化：

  客户端断网后异常退出（如直接拔网线`kill -9进程`断电等）'服务器的TCP连接状态**不会立即改变**'会长时间保持在**ESTABLISHED状态**（可能10分钟以上甚至更久'直到TCP keepalive超时或应用层检测到）。

  检测连接有效性的方法：TCP Keep-Alive机制

  在创建socket后设置Keep-Alive选项：

```
int optval = 1;
// 启用TCP Keep-Alive
setsockopt(sockfd, SOL_SOCKET, SO_KEEPALIVE, &optval, sizeof(optval));

// 设置Keep-Alive参数（Linux/macOS）
int keepidle = 60;     // 60秒无数据后开始探测
int keepinterval = 5;  // 探测间隔5秒
int keepcount = 3;     // 探测3次失败后判定连接断开

#ifdef __linux__
setsockopt(sockfd, IPPROTO_TCP, TCP_KEEPIDLE, &keepidle, sizeof(keepidle));
setsockopt(sockfd, IPPROTO_TCP, TCP_KEEPINTVL, &keepinterval, sizeof(keepinterval));
setsockopt(sockfd, IPPROTO_TCP, TCP_KEEPCNT, &keepcount, sizeof(keepcount));
#elif defined(__APPLE__)
setsockopt(sockfd, IPPROTO_TCP, TCP_KEEPALIVE, &keepidle, sizeof(keepidle));
#endif
```

工作原理：

- 连接空闲60秒后，TCP自动发送探测包
- 每5秒发送一次，最多3次
- 如果3次都没有响应，内核自动关闭连接
- 应用程序的`recv()`会返回错误

七、讨论、心得

实验过程中遇到的困难，得到的经验教训，对本实验安排的更好建议