

项目一阶段三报告

蔡与望 2020010801024 程序的架构、编写与调试，报告的撰写

党一琨 2020140903010 网元与帧的设计

郭培琪 2020030701003 重要函数的设计

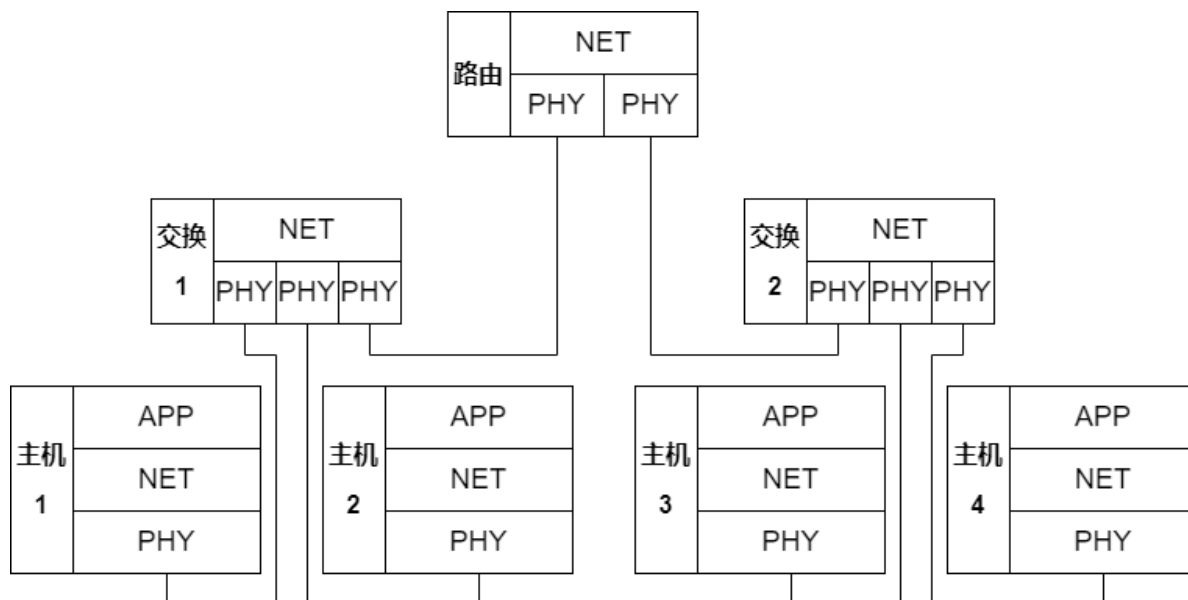
陶砚青 2020040401013 程序的调试与debug

- [项目一阶段三报告](#)
 - [一、整体架构](#)
 - [1.1 网络拓扑](#)
 - [1.2 帧结构](#)
 - [1.3 代码目录结构](#)
 - [二、应用层](#)
 - [2.1 决定网元模式](#)
 - [2.2 信息I/O](#)
 - [2.3 编解码](#)
 - [2.4 代码框架](#)
 - [2.5 阶段一调试](#)
 - [三、网络层（主机）](#)
 - [3.1 帧的结构](#)
 - [3.2 帧同步与定位](#)
 - [3.2.1 基本原理](#)
 - [3.2.2 代码实现](#)
 - [3.3 地址读写](#)
 - [3.3.1 取16位的原因](#)
 - [3.3.2 代码实现](#)
 - [3.4 序号读写](#)
 - [3.4.1 取8位的原因](#)
 - [3.4.2 代码实现](#)
 - [3.5 差错检测](#)
 - [3.5.1 基本原理](#)
 - [3.5.2 视每8位为一个整数的原因](#)
 - [3.5.3 代码实现](#)
 - [3.6 差错控制](#)
 - [3.6.1 基本原理](#)
 - [3.5.2 采用停等协议的原因](#)
 - [3.6.3 代码实现](#)
 - [3.7 流量控制](#)
 - [3.7.1 基本原理](#)
 - [3.7.2 代码实现](#)
 - [3.8 代码框架](#)
 - [3.9 阶段二调试](#)
 - [3.9.1 Unicode字符的I/O](#)
 - [3.9.2 差错的检测与重传](#)

- [四、网络层（交换机）](#)
 - [4.1 监听各端口消息](#)
 - [4.2 维护端口地址表](#)
 - [4.3 多主机信息交换](#)
 - [4.4 代码框架](#)
 - [4.5 阶段三调试](#)
 - [4.5.1 单播的支持](#)
 - [4.5.2 广播的支持](#)
 - [4.5.3 反向学习](#)
 - [4.6 反思、总结与心得](#)
- [五、网络层（路由器）](#)

一、整体架构

1.1 网络拓扑



我们的网络拓扑模型共设有7个网元：1台路由器、2台交换机、4台主机。各网元间形成**树形拓扑**，通过课程提供的物理层模拟软件进行互联。

主机的网元分为三层，分别是**应用层**、**网络层与物理层**；而路由器与交换机，由于不需要与用户进行I/O操作，不设应用层。各层间通过（手动或自动）设定的端口进行通信。

网元各层的主要功能如下：

- 应用层
 - 决定网元模式
 - 信息I/O
 - 编解码
- 网络层（主机）
 - 帧同步与定位
 - 地址读写
 - 序号读写
 - 差错检测
 - 差错控制
 - 流量控制

- 网络层（交换机）
 - 监听各端口消息
 - 维护端口地址表
 - 多主机信息交换
- 物理层
 - 连接起各网元
 - 模拟误码
 - 模拟MTU
 - 添加时钟信号等冗余位

1.2 帧结构

在我们的设计中，网元间以帧为单位交换信息；帧内除了用户发送的数据，还有网络层添加的各种控制信息，用于实现差控、流控、判收等功能。

帧头 (8)		冗余
源地址 (16)	序号 (8)	
数据 (32)		
目的地址 (16)	校验和 (16)	
帧尾 (8)		

上图是我们组设计的帧结构。它包括以下这几部分：

- 帧头、帧尾（8位）
- 源地址、目的地址（16位）
- 帧序号（8位）
- 数据（32位，只能少不能多）
- 校验和（16位）
- 冗余（位数不等，帧同步的副产物）

具体每一部分的功能、原理与实现见[第3章](#)。

1.3 代码目录结构

程序使用 C++ 编写，网元的每一层是一个 .cpp 文件，交换机、路由器的网络层单独编写一个 .cpp 文件；另外编写有一些封装类、函数的头文件、源文件。



二、应用层

在整个网元中，应用层主要承担着三部分职责：

- 决定网元模式
 - 控制整个网元处于接收还是发送模式。
- 信息I/O
 - 发送端：读取用户想传输的消息；
 - 接收端：输出用户可辨识的消息。
- 编解码
 - 发送端：Unicode字符→01字符串；
 - 接收端：01字符串→Unicode字符。

下面将分别展示这三种功能。

2.1 决定网元模式

由于技术限制，本项目中的网元是半双工模式，即同时只能处于收/发状态中的一种。这一选择将通过用户手动输入来激活，然后应用层负责将用户的选择通知到整个网元。整体的逻辑如下。

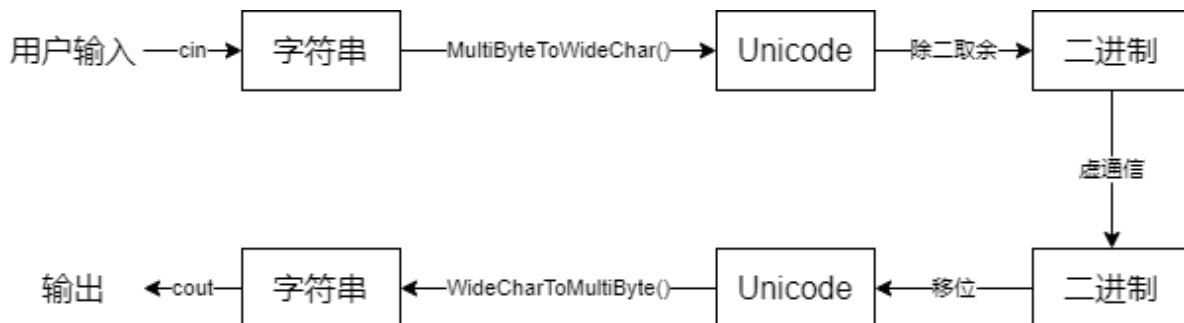
```
while (true) {  
    if (mode == RECV) {  
        // 网元成为接收端。  
    } else if (mode == UNICAST || mode == BROADCAST) {  
        // 网元成为发送端。  
    } else if (mode == QUIT) {  
        // 退出程序。  
    } else {  
        // 无效选项。  
    }  
}
```

2.2 信息I/O

为了操作的便利，本项目中将使用 `string` 类型，进行绝大部分字符操作。相应地，信息的I/O只需要调用 `cin` 和 `cout` 就能够实现。

2.3 编解码

由于项目需要提供对中文I/O的支持，所以显然ASCII码无法满足项目的需求，而是需要**针对Unicode字符设计编解码方案**。方案如下图所示：



其中，`MultiByteToWideChar()` 和 `WideCharToMultiByte()` 来自 `windows.h` 头文件。在实际中，一个Unicode字符可以占到三个字节，但本项目的需求没有那么多高，两个字节就能够实现需求，即**一个Unicode字符对应16位二进制数**。

具体代码可以在 `include/coding.cpp` 中找到，该头文件留下4个API供应用层（与其他层）调用：

- `decToBin()`：将十进制数转化为01字符串；
- `binToDec()`：将01字符串转化为十进制数；
- `encode()`：将可读字符串编码为01字符串；
- `decode()`：将01字符串解码为可读字符串。

2.4 代码框架

细化[2.1节](#)的逻辑后，我们很容易得出应用层的代码框架：

```
int main(int argc, char *argv[]) {
    // 变量、网络库与套接字的初始化。
    while (true) {
        // 选择当前模式。
        if (mode == RECV) {
            // 通知网络层正在接收。
            // 从网络层接收消息。
        } else if (mode == UNICAST || mode == BROADCAST) {
            // 通知网络层正在发送。
            if (mode == UNICAST) {
                // 如果是单播，还需要额外输入目标端口。
            }
            // 通知要发的消息。
        } else if (mode == QUIT) {
            // 通知下层退出。
            break;
        } else {
            // 无效选项，报错。
        }
    }
}
```

2.5 阶段一调试

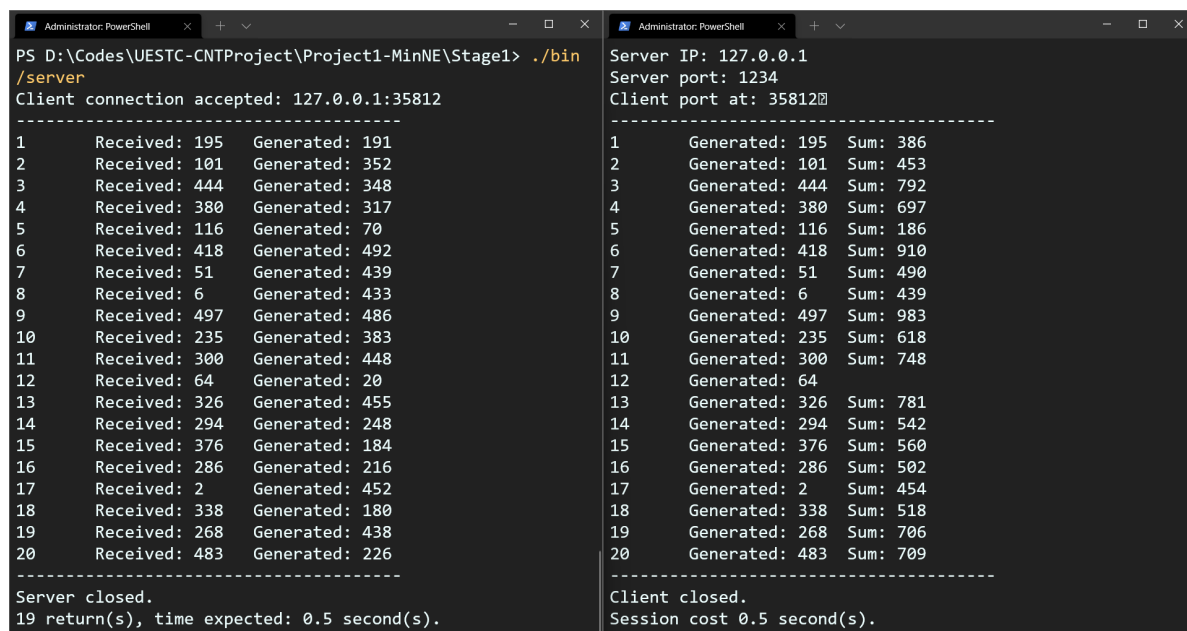
为了给接下来的阶段做铺垫，我们需要先写两个简单的应用层，对网元间通信的方式、网元工作的模式有一定的理解。对于项目指导书中的需求，下面是我们测试的结果。

项目需求：

客户端定时每500ms向服务器发送一个随机整数，范围在1~500之间；

服务器每收到一份数据也同时产生随机整数与收到的数据相加，只有在结果大于100时才会把计算结果返回给客户端，而客户端收到超出100的结果则立即产生一个新的数据，而不是在间隔500ms后。

客户机需要产生20份数据，如果有超过100的结果，总运行时间应接近 $10-N*0.5$ ，N为超过100的结果的数量。



```
PS D:\Codes\UESTC-CNTProject\Project1-MinNE\Stage1> ./bin
/server
Client connection accepted: 127.0.0.1:35812
-----
1 Received: 195 Generated: 191
2 Received: 101 Generated: 352
3 Received: 444 Generated: 348
4 Received: 380 Generated: 317
5 Received: 116 Generated: 70
6 Received: 418 Generated: 492
7 Received: 51 Generated: 439
8 Received: 6 Generated: 433
9 Received: 497 Generated: 486
10 Received: 235 Generated: 383
11 Received: 300 Generated: 448
12 Received: 64 Generated: 20
13 Received: 326 Generated: 455
14 Received: 294 Generated: 248
15 Received: 376 Generated: 184
16 Received: 286 Generated: 216
17 Received: 2 Generated: 452
18 Received: 338 Generated: 180
19 Received: 268 Generated: 438
20 Received: 483 Generated: 226
-----
Server closed.
19 return(s), time expected: 0.5 second(s).
```

```
Administrator: PowerShell
Server IP: 127.0.0.1
Server port: 1234
Client port at: 35812
-----
1 Generated: 195 Sum: 386
2 Generated: 101 Sum: 453
3 Generated: 444 Sum: 792
4 Generated: 380 Sum: 697
5 Generated: 116 Sum: 186
6 Generated: 418 Sum: 910
7 Generated: 51 Sum: 490
8 Generated: 6 Sum: 439
9 Generated: 497 Sum: 983
10 Generated: 235 Sum: 618
11 Generated: 300 Sum: 748
12 Generated: 64 Sum: 781
13 Generated: 326 Sum: 542
14 Generated: 294 Sum: 560
15 Generated: 376 Sum: 502
16 Generated: 286 Sum: 454
17 Generated: 2 Sum: 518
18 Generated: 338 Sum: 706
19 Generated: 268 Sum: 709
20 Generated: 483 Sum: 709
-----
Client closed.
Session cost 0.5 second(s).
```

可以看到，服务端与客户端之间能够进行稳定的通信，客户端通过 `select()` 实现了超时的判断，实际运行时间与预期时间（ $10-N*0.5$ ）相符。

通过这个程序，我们了解了控制超时的两种方法：`setsockopt()` 和 `select()`，同时也知道如何基于不同事件做出不同的响应，对网元间通信的形式、时序等有了进一步了解。

三、网络层（主机）

在整个网元中，网络层（主机）的功能最多、最重要，主要分为六部分：

- 帧同步与定位
 - 发送端：让接收端在杂乱的01序列中，找到有用的信息。
- 地址读写
 - 发送端：写入源、目的地址，用于交换、路由的实现；
 - 接收端：读取源、目的地址，知道信息从哪来、是不是给自己的。
- 序号读写
 - 双端：防止传送时的帧间乱序，也用于差错控制协议的实现；
- 差错检测
 - 接收端：检查信息有没有传错，如果出错就要求重传。
- 差错控制
 - 发送端：如何实现某一帧的重传；
 - 接收端：如何让发送端知道要不要重传。
- 流量控制

- 双端：防止自己发得太快，导致网络来不及处理、对方来不及读取.....等后果。

下面我们将先展示帧的结构，然后分别展示这六种功能。

3.1 帧的结构

为了方便对帧的各部分操作、解析01字符串为帧、转换帧为01字符串，我们利用 C++ “面向对象”的特点，将帧作为一个类。

帧各部分的数据，作为帧的私有属性存储；对帧的操作，作为帧的公共函数绑定。下面是这个类的结构：

```
class Frame {
private:
    unsigned short srcPort;
    unsigned short seq;
    string data;
    unsigned short dstPort;
    unsigned short checksum;

    bool verified;
    string checkTarget;

    string extractMessage(string raw);
    static string transform(string message);
    static unsigned short generateChecksum(string message);
    static string addLocator(string message);

public:
    Frame();
    Frame(string raw);
    Frame(unsigned short srcPort, unsigned short seq, string data,
          unsigned short dstPort);
    ~Frame();

    unsigned short getSrcPort();
    unsigned short getSeq();
    string getData();
    unsigned short getDstPort();
    bool isVerified();

    string stringify();

    static int calcTotal(int messageLen);
};
```

我们需要额外关注这两个函数：

- `Frame(string raw)`：直接把01字符串解析为帧。
- `stringify()`：直接把帧转换成01字符串。

它们高度的封装性与实用性，使得网络层代码的描述性、可读性变得更强，逻辑也更加清晰。具体的代码可以在 `include/frame.cpp` 中找到。

3.2 帧同步与定位

采用面向位的首尾定界法。

3.2.1 基本原理

- 发送端：变换，添加帧头帧尾。
 1. 在一帧的首尾加上 0111 1110，以标识帧的始末位置；
 2. 帧内的信息也有可能出现 0111 1110 的序列，所以为了防止接收端把帧内信息误当作帧尾，发送端还要在帧内的每个 1111 后面插一个 0，以免帧内出现 0111 1110 子序列。
- 接收端：找到帧头，反变换。
 1. 在物理层收到的乱码中，找到帧头 0111 1110，然后把帧头剥落；
 2. 对于接下来出现的每个 1111 子序列：
 1. 如果接下来出现的是 0，那这个 0 肯定是发送端插的，删掉还原。
 2. 如果接下来出现的是 1，那这就是帧尾 0111 1110。（因为发送方已经保证了帧内不可能出现连续6个 1。）

3.2.2 代码实现

我们主要基于 KMP 算法进行子串定位，然后封装了下面三个函数实现帧同步与定位功能：

- `addLocator()`：实现上述发送端的任务1；
- `transform()`：实现上述发送端的任务2；
- `extractMessage()`：实现上述接收端的任务1、2。

具体的代码可以在 `include/frame.cpp` 的 `Frame` 类中找到。

3.3 地址读写

采用16位二进制数标识地址。

3.3.1 取16位的原因

由于本项目的网元间通信只在本机（127.0.0.1）实现，所以只需要封装源与目的地的端口即可。又因为端口范围是0~65535，所以每个端口需要用16位二进制表示。

3.3.2 代码实现

发送端只需要使用简单的字符串拼接，即可把地址写入帧；接收端也只需要用 `string` 类的 `substr()` 方法，就可以提取地址信息。不再展开叙述。

3.4 序号读写

采用8位二进制数标识序号。

3.4.1 取8位的原因

项目需求提出，传输数据上限约50个字符；又根据2.3节得出的结论：一个字符为16位，所以一段消息最多有800位。

一帧最多传输32位数据，所以一段消息最多要用25帧，才能传输完毕。

又为了校验和的产生方便（见3.5节），序号位数需要是8的倍数——最少就是8位（范围0~255），已经有充裕的空间标识每一帧。综上，需为序号分配8位的空间。

3.4.2 代码实现

序号读写与地址读写相似，只需要简单的拼接和 `substr()` 即可实现。不再展开叙述。

3.5 差错检测

采用16位校验和，不纠错。

3.5.1 基本原理

- 发送端：产生校验和。
 1. 将前面的源地址、序号、数据、目的地址这四部分的01序列拼在一起，每8位视作一个整数；
 2. 全部加起来，得到一个整数；
 3. 再变成01序列，作为校验和。
- 接收端：检验校验和。
 1. 提取出源地址、序号、数据、目的地址这四部分信息；
 2. 使用与发送端同样的方法加和；
 3. 与校验和比较是否相同，相同即验证通过。

3.5.2 视每8位为一个整数的原因

1. 前四部分最多有 $16+8+32+16=72$ 位；
2. 如果使用经典的Checksum生成方法，即视16位为一个整数，首先72无法整除，带来额外麻烦；其次，得出的和有可能超过65535，校验和不止16位，占用更大空间；
3. 而如果视8位为一个整数，首先72能够整除，方便程序实现；其次，和最多只有 $(72 \div 8) \times 255 = 2295$ ，16位能够轻松表示。

3.5.3 代码实现

我们封装了函数 `generatechecksum()`，实现了对任意（长度为8的倍数的）01字符串的校验码生成。

具体的代码可以在 `include/frame.cpp` 的 `Frame` 类中找到。

3.6 差错控制

采用停等协议。

3.6.1 基本原理

1. 发送端：发送了一帧消息，等待接收端回复；
2. 接收端：
 1. 如果超时，则回复 `NAK`。
 2. 如果收到了，但是重复了，则丢弃并回复 `ACK`；
 3. 如果收到了，并且校验通过，则回复 `ACK`；
 4. 如果收到了，但是校验失败，则回复 `NAK`；
3. 发送端：
 1. 如果超时，则重传这一帧。
 2. 如果收到了 `ACK`，则继续发下一帧；
 3. 如果收到了 `NAK`，则重传这一帧；
 4. 如果收到的既不是 `ACK` 也不是 `NAK`，则重传这一帧；
4. 回到第1步，直到传完所有帧。

3.5.2 采用停等协议的原因

- 可以顺便控制流量：发送端需要等回复，所以不会发得太快；
- 编程难度大大降低：只需要实现简单时序逻辑。

3.6.3 代码实现

根据[3.6.1节](#)所展示的时序，我们可以搭建出双端代码差错控制协议的框架：

注：本处代码暂不考虑广播与单播判收。

- 发送端

```
for (int frame = 0; frame <= sendTotal;) {  
    // 发送一帧。  
    // 接收对方的回复。  
    if (timeout) {  
        // 重传。  
        continue;  
    }  
    if (response == ACK) {  
        // 可以发送下一帧。  
        ++frame;  
    } else if (response == NAK) {  
        // 重传。  
    } else {  
        // 重传。  
    }  
}
```

- 接收端

```
for (int frame = 0; frame <= recvTotal;) {  
    // 接收一帧。  
    if (timeout) {  
        // 回复NAK。  
        continue;  
    }  
    // 检查目标端口。  
    if (notForMe) {  
        // 既不回复也不接收。  
        continue;  
    }  
    // 检查序号。  
    if (isRepeat) {  
        // 回复ACK但不接收。  
        continue;  
    }  
    // 检查校验和。  
    if (!isVerified) {  
        // 回复NAK且不接收。  
        continue;  
    }  
    // 接收这一帧。  
    // 回复ACK。  
    ++frame;  
}
```

3.7 流量控制

采用 `sleep()` 函数。

3.7.1 基本原理

如果发送端发的速度过快，那么有可能导致：

- 发送端口来不及发；
- 网络来不及传；
- 接收端口来不及收；
- 接收端来不及处理。
-

所以，在调用 `sendto()` 函数前，让程序先睡眠适当的时间，就可以做到：等上一波信息完全发出去之后，再发这一波信息。

3.7.2 代码实现

只需要在 `sendto()` 的上一行调用 `sleep()` 即可。

这一操作被封装在了各层对应的 `socket` 类内，具体的代码可以在 `include/socket.cpp` 中找到。

3.8 代码框架

将以上所有的功能配合起来，再对广播模式做出一些适配，我们就可以得到网络层的代码框架：

```
int main(int argc, char *argv[]) {
    // 变量、网络库与套接字的初始化。
    while (true) {
        // 上层通知当前模式。
        if (mode == RECV) {
            for (int frame = 0; frame <= recvTotal;) {
                // 接收一帧。
                if (timeout) {
                    // 如果超时没收到消息，回复NAK。
                    continue;
                }
                // 检查目标端口。
                if (notForMe) {
                    // 如果发来的帧不是给自己的，既不回复也不接收。
                    continue;
                }
                // 检查序号。
                if (isRepeat) {
                    // 如果重复了，回复ACK但不接收。
                    continue;
                }
                // 检查校验和。
                if (!isVerified) {
                    // 如果校验失败，回复NAK且不接收。
                    continue;
                }
                // 接收这一帧。
                // 回复ACK。
                ++frame;
            }
        }
    }
}
```

```

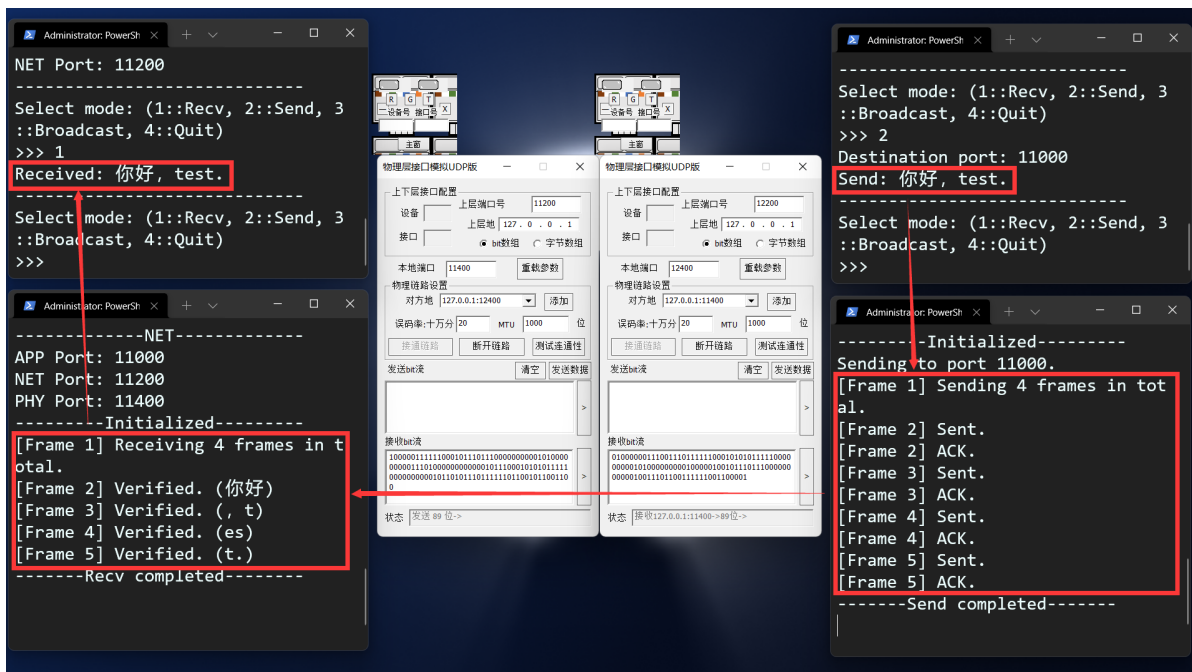
        // 把拼接完的消息交给应用层。
    } else if (mode == UNICAST || mode == BROADCAST) {
        // 确定目标端口。
        // 确定要发的消息。
        // 计算要分多少帧。
        // 逐帧封装。
        for (int frame = 0; frame <= sendTotal;) {
            // 发送一帧。
            // 接收对方的回复。
            // 确定要收几次回复。
            for (int i = 0; i < recvNum; i++) {
                if (timeout) {
                    // 如果超时没收到回复，重传。
                    continue;
                }
                if (response == ACK) {
                    // 如果收到了ACK，可以发送下一帧。
                    ++ackTimes;
                } else if (response == NAK) {
                    // 如果收到了NAK，重传。
                } else {
                    // 如果收到了其它信息，重传。
                }
            }
            // 如果每个接收端都ACK了，就可以发下一帧。
            if (ackTimes == recvNum) {
                ++frame;
            }
        }
        // 全部发完，封装的帧可以丢弃。
    } else if (mode == QUIT) {
        break;
    }
}
}
}

```

3.9 阶段二调试

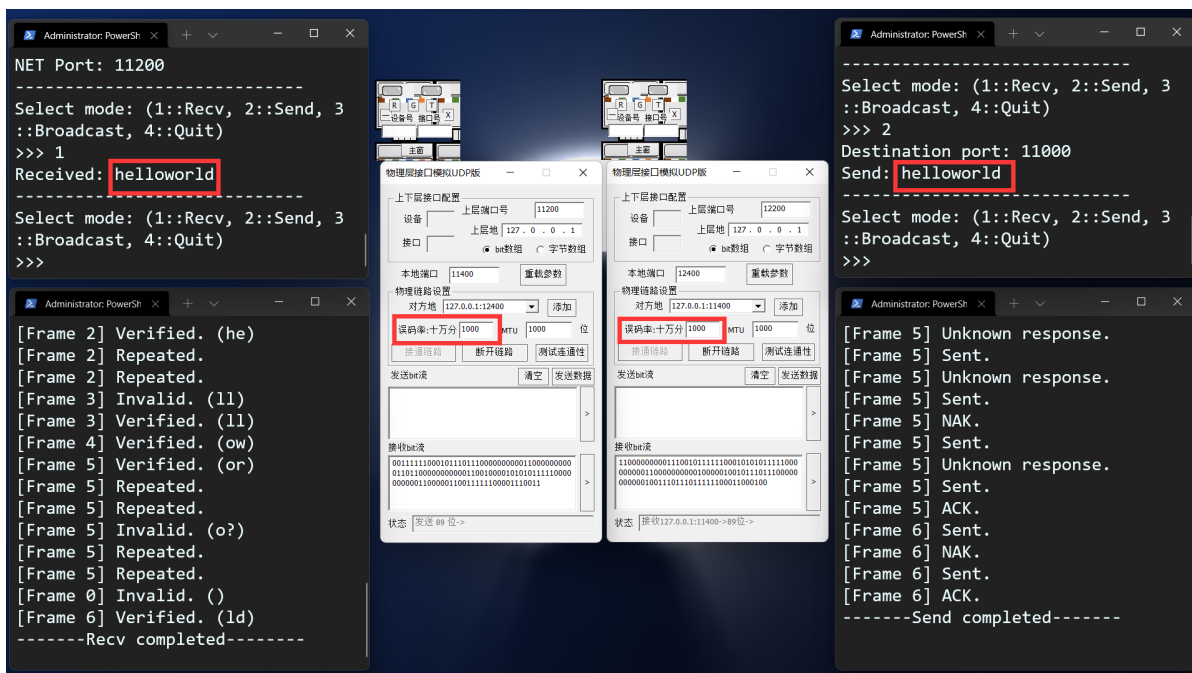
根据上面的代码框架，我们在阶段二写出了应用层与网络层，并使用物理层模拟软件模拟了信道，在两个网元间进行了测试，结果如下。

3.9.1 Unicode字符的I/O



在本测试中，用户发送的字符串“你好, test.”中同时包含了中文、英文、全半角符号。可以看到，双方可以完成正常的信息收发，应用层能够正确编解码，网络层也能够逐帧发送与确认。

3.9.2 差错的检测与重传



在本测试中，我们设置物理层误码率为十万分之1000，即1%。通过网络层多次的检验、回复、重传，应用层最终能够呈现出正确、完整的字符。并且误码率还能够进一步增大。

四、网络层（交换机）

在网络拓扑中，交换机负责在多个主机间交换信息，从而让广播成为可能，同时也减少了P2P通路的数量。它的功能主要分为以下三部分：

- 监听各端口消息
 - 时刻注意有没有端口发来消息。
- 维护端口地址表
 - 维护本地端口-远程端口的对照表，并通过收发信息时截获端口号进行学习。
- 多主机信息交换

- 找到到达目的地的路径，依此在不同网元间转发信息。

下面我们将分别展示这两种功能。

4.1 监听各端口消息

由于交换机需要同时管辖多个物理层，而且需要同时完成收发，所以不能用主机网元的半双工模式。我们考虑采用 `select()` 方法，轮流监听各个端口是否有消息到达。整体的逻辑如下。

```
for (int i = 0;; i = (i + 1) % num) {
    // 使用select()检查端口i的可读性。
    if (!readable) {
        // 如果端口i不可读，则检查下一个。
        continue;
    }
    // 如果端口i可读，就读取信息并进行转发。
}
```

4.2 维护端口地址表

对于主机而言，它的信息只有一条路可走——就是发到自己的物理层，然后交给交换机。但对于交换机而言，它的信息有不止一条路可走。直接广播给所有端口然后让它们自行判收，显然是浪费信道资源的一种做法，我们更希望交换机自己能够记住，发给谁的信息要走哪个端口。

这就需要它内部维护一张对照表，将本地自己的物理层端口与远程其他主机的应用层端口联系起来。我们使用 `map<unsigned short, unsigned short>` 类型对此进行管理。整体的逻辑如下。

```
// 获取截获的帧的源与目的地址。
// 查表获取这个本地端口有没有注册过源地址。
if (srcPortNotInTable) {
    // 如果表里没有这个源地址，就将这个源地址和本地端口联系起来。
}
// 查表获取目的地址对应的本地端口。
if (dstPortNotInTable) {
    // 如果表里没有这个目的地址，就向所有端口广播。下一轮回复的时候就能学习了。
}
```

4.3 多主机信息交换

这是交换机最基础、最本质的功能。它需要判断消息发送的形式（单播或广播），然后据此采取相应的行动。整体的逻辑如下。

```
if (isBroadcast || portNotFound) {
    // 如果是广播，或者没找到目的地址对应的本地端口，就给所有端口发消息。
} else {
    // 如果是单播，就直接发送。
}
```

4.4 代码框架

将以上的三部分结合起来，就是网络层（交换机）的代码框架。

```
int main(int argc, char const *argv[]) {
    // 变量、网络库与套接字的初始化。
```

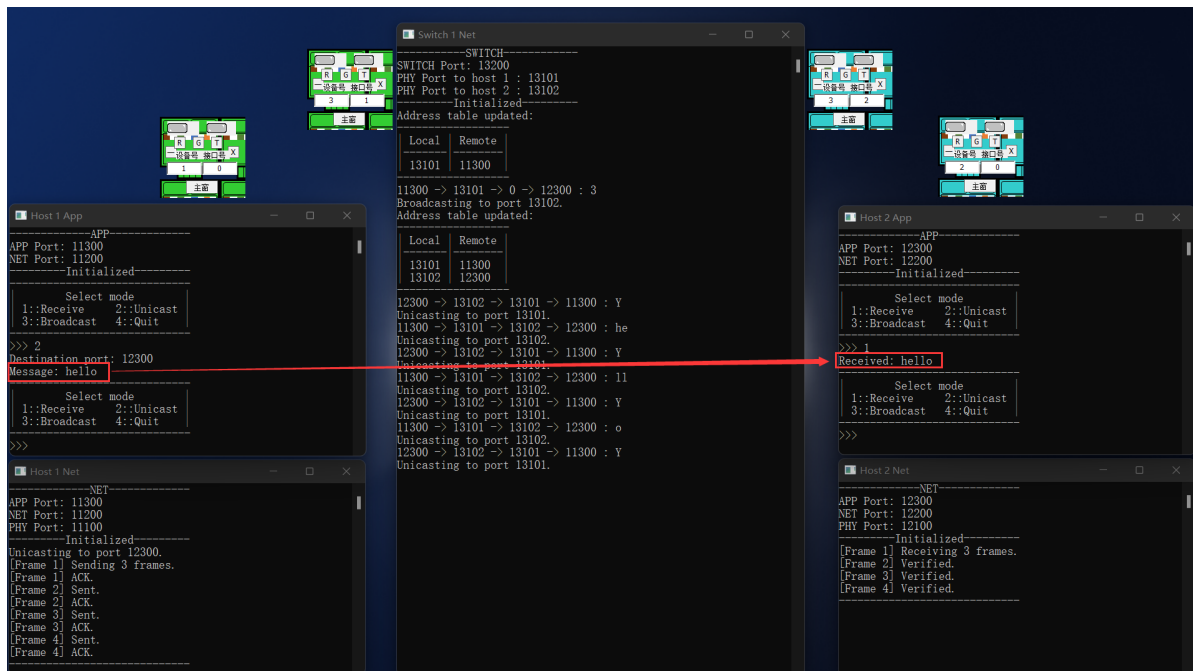
```

for (int i = 0;; i = (i + 1) % phyPortNum) {
    // 如果该端口不可读，则检查下一个。
    if (!readable) {
        continue;
    }
    // 如果可读，就读取消息。
    // 获取消息的源与目的端口。
    // 反向学习源端口。
    // 检索应该发到哪个端口。
    // 判断要单播还是广播。
    if (isBroadcast || portNotFound) {
        // 给所有端口发消息。
    } else {
        // 给对应端口发消息。
    }
}
}

```

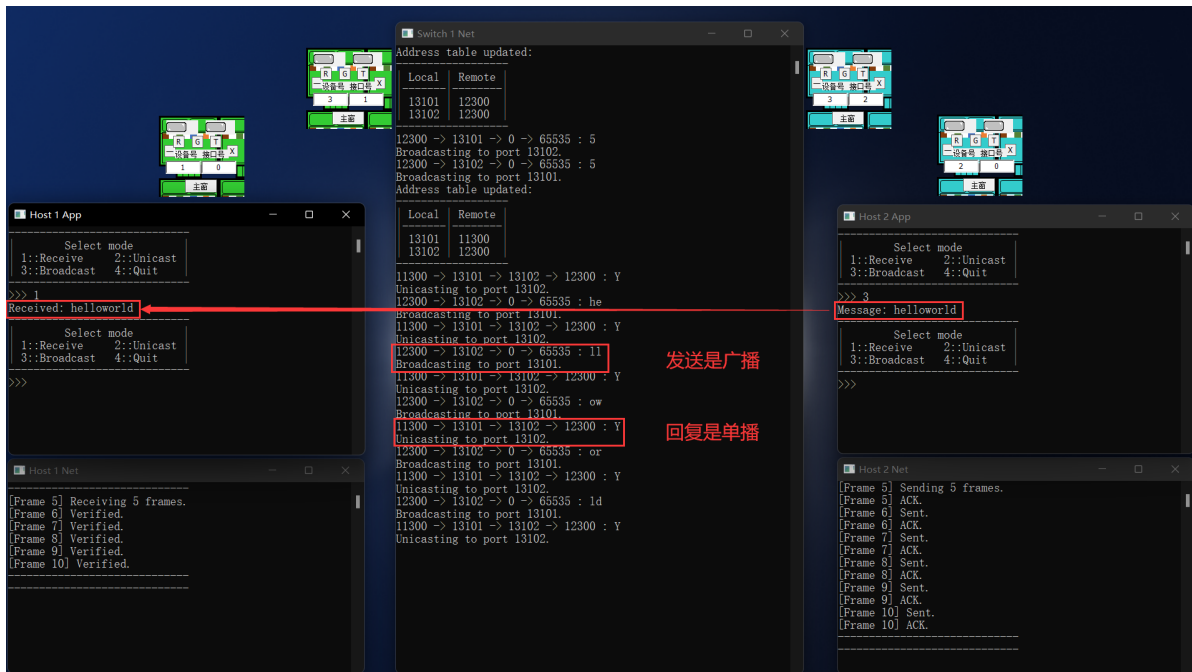
4.5 阶段三调试

4.5.1 单播的支持



在测试中，我们从11300端口向12300单播“hello”。可以看到，交换机能够正确的学习并更新端口地址表，并充当两主机发送、回复、重传的桥梁，消息最终完好地传递到了12300端口。

4.5.2 广播的支持



在测试中，我们从12300端口向所有端口广播“helloworld”。可以看到，在发送时，交换机能够正确识别出这是广播消息，并广播给所有剩余端口；在回复时，交换机也能够正确识别出这是单播消息，并单播给12300端口。最终，消息完好地传递到了所有端口。

4.5.3 反向学习


```
Switch 1 Net
-----SWITCH-----
SWITCH Port: 13200
PHY Port to host 1 : 13101
PHY Port to host 2 : 13102
-----Initialized-----
Address table updated:
-----
| Local | Remote |
|-----|-----|
| 13101 | 11300  |
|-----|-----|

11300 -> 13101 -> 0 -> 12300 : 3
Broadcasting to port 13102.
Address table updated:
-----
| Local | Remote |
|-----|-----|
| 13101 | 11300  |
| 13102 | 12300  |
|-----|-----|

12300 -> 13102 -> 13101 -> 11300 : Y
Unicasting to port 13101.
11300 -> 13101 -> 13102 -> 12300 : he
Unicasting to port 13102.
12300 -> 13102 -> 13101 -> 11300 : Y
Unicasting to port 13101.
11300 -> 13101 -> 13102 -> 12300 : 11
Unicasting to port 13102.
12300 -> 13102 -> 13101 -> 11300 : Y
Unicasting to port 13101.
11300 -> 13101 -> 13102 -> 12300 : o
Unicasting to port 13102.
12300 -> 13102 -> 13101 -> 11300 : Y
Unicasting to port 13101.
```

1. 当11300端口第一次向交换机的13101端口发消息，交换机的表里还没有13101-11300的对应关系，于是它自动学习了这组关系；
2. 当交换机第一次向12300端口发消息，它的表里还没有13102-12300的对应关系，于是它向所有端口广播了这条消息；
3. 当12300端口第一次向交换机的13102端口回复消息，交换机就学习到了13102-12300这组关系；
4. 当交换机向11300端口回复消息，此时它已经学会了13101-11300的关系，所以回复以单播形式发给11300端口。
5. 此后，所有信息交互都是单播，因为交换机已经把两边与自己的对应关系都学会了。

4.6 反思、总结与心得

我们的程序仍然存在一些问题，主要有：

1. 端口明明检出可读，但却提取不出消息。目前暂时通过“判断接收字节数是否大于0”进行过滤，但没有根除问题。
2. 发送端向交换机发第1帧时，交换机错误识别本地接收端口号，从而导致不必要的学习。目前暂时没有找到问题的原因。

五、网络层（路由器）

下一步，我们将研究交换与路由技术，编写路由器，并最终完成我们的网络拓扑结构。