实验报告

网络传输机制实验三

一、实验内容

了解 TCP 的超时重传机制，了解有丢包情况下连接建立与断开的处理流程，设计实现发送队列和接收队列，实现 TCP 的可靠传输。

二、实验流程

1. 实现定时器相关功能。
2. 实现发送队列和接收队列。
3. 添加有丢包情况下的连接建立与断开处理和数据包的超时重传。
4. 在给定拓扑下验证可靠传输的正确性。

三、实验结果及分析

（一）TCP 功能实现思路

1、定时器相关功能

```
void tcp_set_retrans_timer(struct tcp_sock *tsk)
```

函数，开启重发定时器。注意如果已经置起，则更新超时时间。

```
void tcp_set_retrans_timer(struct tcp_sock *tsk)
{
    if (tsk->retrans_timer.enable) {
        tsk->retrans_timer.timeout = TCP_RETRANS_INTERVAL_INITIAL;
        return;
    }
    tsk->retrans_timer.type = 1;
    tsk->retrans_timer.enable = 1;
    tsk->retrans_timer.timeout = TCP_RETRANS_INTERVAL_INITIAL;
    tsk->retrans_timer.retrans_time = 0;
    init_list_head(&tsk->retrans_timer.list);
    list_add_tail(&tsk->retrans_timer.list, &retrans_timer_list);
}
```

```
void tcp_update_retrans_timer(struct tcp_sock *tsk)
```

函数，更新重发定时器。用于已建立连接后传输数据时，如果发送队列为空，则将定时器关闭，并唤醒发送数据进程。

```
void tcp_update_retrans_timer(struct tcp_sock *tsk)
{
    if (list_empty(&tsk->send_buf) && tsk->retrans_timer.enable) {
        tsk->retrans_timer.enable = 0;
        list_delete_entry(&tsk->retrans_timer.list);
        wake_up(tsk->wait_send);
    }
}
```

```
void tcp_unset_retrans_timer(struct tcp_sock *tsk)
```

函数，关闭重发定时器。用于建立连接和断开连接过程，每个 SYN 或 FIN 包确认收到后关闭定时器。

```
void tcp_unset_retrans_timer(struct tcp_sock *tsk)
{
    if (!list_empty(&tsk->retrans_timer.list)) {
        tsk->retrans_timer.enable = 0;
        list_delete_entry(&tsk->retrans_timer.list);
        wake_up(tsk->wait_send);
    }
    else {
        log(ERROR, "unset an empty retrans timer\n");
    }
}
```

```
void tcp_scan_retrans_timer_list(void)
```

函数，扫描重发定时器队列，对超时的定时器进行处理：重发次数不超过上限的进行重发，否则直接断开连接，回收资源。

```
void *tcp_retrans_timer_thread(void *arg)
```

线程函数，负责每 10ms 扫描一次重发定时器队列。

2、发送队列和接收队列函数

发送队列项的数据结构如下：

```
typedef struct send_buffer_entry {
    struct list_head list;
    char *packet;
    int len;
} send_buffer_entry_t;
```

`void tcp_add_send_buffer(struct tcp_sock *tsk, char *packet, int len)`

函数，将发送的数据包添加到发送队列。

`void tcp_delete_send_buffer(struct tcp_sock *tsk, u32 ack)`

函数，根据对方返回的 ACK，将已经接收的数据包从队列中移除。

```
void tcp_delete_send_buffer(struct tcp_sock *tsk, u32 ack)
{
    send_buffer_entry_t *sb_entry, *sb_entry_q;
    list_for_each_entry_safe(sb_entry, sb_entry_q, &tsk->send_buf, list) {
        struct tcphdr *tcp = packet_to_tcp_hdr(sb_entry->packet);
        u32 seq = ntohl(tcp->seq);
        if (less_than_32b(seq, ack)) {
            list_delete_entry(&sb_entry->list);
            free(sb_entry->packet);
            free(sb_entry);
        }
    }
}
```

`void tcp_retrans_send_buffer(struct tcp_sock *tsk)`

函数，超时后重发当前队列中第一个数据包。

```
void tcp_retrans_send_buffer(struct tcp_sock *tsk)
{
    if (list_empty(&tsk->send_buf)) {
        log(ERROR, "no pakect to retrans\n");
        return;
    }
    send_buffer_entry_t *first_sb_entry = list_entry(tsk->send_buf.next, send_buffer_entry_t, list);
    char *packet = (char *)malloc(first_sb_entry->len);
    memcpy(packet, first_sb_entry->packet, first_sb_entry->len);
    struct iphdr *ip = packet_to_ip_hdr(packet);
    struct tcphdr *tcp = packet_to_tcp_hdr(packet);

    tcp->ack = htonl(tsk->rcv_nxt);
    tcp->checksum = tcp_checksum(ip, tcp);
    ip->checksum = ip_checksum(ip);
    int tcp_data_len = ntohs(ip->tot_len) - IP_BASE_HDR_SIZE - TCP_BASE_HDR_SIZE;

    tsk->snd_wnd -= tcp_data_len;
    log(DEBUG, "retrans seq: %u\n", ntohl(tcp->seq));

    ip_send_packet(packet, first_sb_entry->len);
}
```

接收队列项的数据结构如下：

```
typedef struct recv_ofo_buf_entry {
    struct list_head list;
    char *data;
    int len;
    int seq;
} recv_ofo_buf_entry_t;
```

```
void tcp_add_recv_ofo_buffer(struct tcp_sock *tsk, struct tcp_cb *cb)
```

函数，将接收到的数据包按 seq 序列号放入接收队列中。注意需要判断序列号相同的情况，相同的包丢弃。虽然在进入该函数前有判断数据包有效的步骤，但是如果重发多个包，前一个包还在接收队列而没被实际接收更新时，就可能将后发的相同数据包判定为有效。因此这里必须添加判断序列号相同的处理。

```
void tcp_add_recv_ofo_buffer(struct tcp_sock *tsk, struct tcp_cb *cb)
{
    recv_ofo_buf_entry_t *recv_entry = (recv_ofo_buf_entry_t *)malloc(sizeof(recv_ofo_buf_entry_t));
    recv_entry->seq = cb->seq;
    recv_entry->len = cb->pl_len;
    recv_entry->data = (char *)malloc(cb->pl_len);
    memcpy(recv_entry->data, cb->payload, cb->pl_len);
    init_list_head(&recv_entry->list);

    recv_ofo_buf_entry_t *entry, *entry_q;
    list_for_each_entry_safe (entry, entry_q, &tsk->rcv_ofo_buf, list) {
        if (recv_entry->seq == entry->seq) {
            return;
        }
        if (less_than_32b(recv_entry->seq, entry->seq)) {
            list_add_tail(&recv_entry->list, &entry->list);
            return;
        }
    }
    list_add_tail(&recv_entry->list, &tsk->rcv_ofo_buf);
}
```

```
int tcp_move_recv_ofo_buffer(struct tcp_sock *tsk)
```

函数，将接收队列中与当前 rcv_nxt 相邻的连续包放入环形缓冲区，更新窗口。实现与之前的 handle_recv_data 函数相同，不再赘述。

3、协议栈更新，连接建立、断开、数据的可靠传输

首先发送数据的函数需要进行修改，每次发送数据包时把数据包加入发送队列并设置定时器。

```
void tcp_send_packet(struct tcp_sock *tsk, char *packet, int len)
```

该函数发送实际有效的数据包，所有通过该函数的数据包都需要超时重发。

```
tsk->snd_nxt += tcp_data_len;
tsk->snd_wnd -= tcp_data_len;

tcp_add_send_buffer(tsk, packet, len);
tcp_set_retrans_timer(tsk);
```

```
void tcp_send_control_packet(struct tcp_sock *tsk, u8 flags)
```

该函数发送控制包，所有通过该函数的 FIN 包和 SYN 包都需要超时重发。

```
if ((flags != TCP_ACK) && !(flags & TCP_RST)) {
    tcp_add_send_buffer(tsk, packet, pkt_size);
    tcp_set_retrans_timer(tsk);
}
```

然后是接收到数据包的处理，连接建立和断开过程的处理都差不多，都是上一个状态发出的包由下一状态负责验收，收到回应时清空发送队列，超时未收到回应则重发。纯 ACK 包不需要重发，也不添加到发送队列。以 SYN_SENT 状态为例，收到 server 的 ACK | FIN 回应时清空发送队列，关闭定时器，更新到下一状态。

```
case TCP_SYN_SENT: {
    if (tcp->flags & (TCP_ACK | TCP_SYN)) {
        tcp_set_state(tsk, TCP_ESTABLISHED);
        tsk->rcv_nxt = cb->seq + 1;
        tsk->snd_una = cb->ack;
        tcp_unset_retrans_timer(tsk);
        tcp_delete_send_buffer(tsk, cb->ack);

        tcp_set_state(tsk, TCP_ESTABLISHED);
        wake_up(tsk->wait_connect);
        tcp_send_control_packet(tsk, TCP_ACK);
    }
    return;
}
```

对于无效的数据包进行丢弃，回复 ACK，无效数据包的来源是重发多次或者超过接收窗口。

```
if (!is_tcp_seq_valid(tsk, cb)) {
    tcp_send_control_packet(tsk, TCP_ACK);
    return;
}
```

最后是 ESTABLISHED 状态收发数据的处理。如果是不带数据的 ACK 包，首先验证数据包序列号是否与希望收到的序列号相同，不同则丢弃。如果 ACK 更新，说明对方实际接收了数据包，将定时器重置。最后根据 ACK 更新发送队列和定时器。

```
else if (tcp->flags & TCP_ACK) {
    if (cb->pl_len == 0) {
        if (tsk->rcv_nxt != cb->seq) {
            return;
        }
        tsk->rcv_nxt = cb->seq;
        if (cb->ack > tsk->snd_una) {
            tsk->retrans_timer.retrans_time = 0;
            tsk->retrans_timer.timeout = TCP_RETRANS_INTERVAL_INITIAL;
        }
        tsk->snd_una = cb->ack;
        tcp_update_window_safe(tsk, cb);
        tcp_delete_send_buffer(tsk, cb->ack);
        tcp_update_retrans_timer(tsk);
    }
    else {
        if (!is_tcp_seq_valid(tsk, cb)) {
            return;
        }
        handle_recv_data(tsk, cb);
    }
}
```

如果收到带数据的包，则交由 handle_recv_data 函数处理。首先判断序列号，如果是希望收到的序列号之前的，说明已经收到过，将其丢弃。然后查看缓冲区是否已满，满了则先睡眠等待。未满则将数据包放入接收队列，然后检查接收队列，将连接收到的数据包放入环形缓冲区。最后更新接收窗口，更新发送队列和定时器。

```
void handle_recv_data(struct tcp_sock *tsk, struct tcp_cb *cb)
{
    if (less_than_32b(cb->seq, tsk->rcv_nxt)) {
        tcp_send_control_packet(tsk, TCP_ACK);
        return;
    }

    while (ring_buffer_full(tsk->rcv_buf)) {
        sleep_on(tsk->wait_recv);
    }

    tcp_add_recv_ofo_buffer(tsk, cb);
    tcp_move_recv_ofo_buffer(tsk);
    tsk->snd_una = greater_than_32b(cb->ack, tsk->snd_una) ? cb->ack : tsk->snd_una;

    tcp_delete_send_buffer(tsk, cb->ack);
    tcp_update_retrans_timer(tsk);

    tcp_send_control_packet(tsk, TCP_ACK);
}
```

然后还需要注意一点，接收到 FIN 包时的处理。原来是直接转为下一状态，这在我们的框架内没有问题，因为控制包和数据包是分开的。但是 python 的程序可能将最后一个数据包和 FIN 一起发送，如果不作处理会丢失最后一个数据包。因此我们要检查 FIN 包是否为空，如果有数据则调用 handle_recv_data 函数处理。

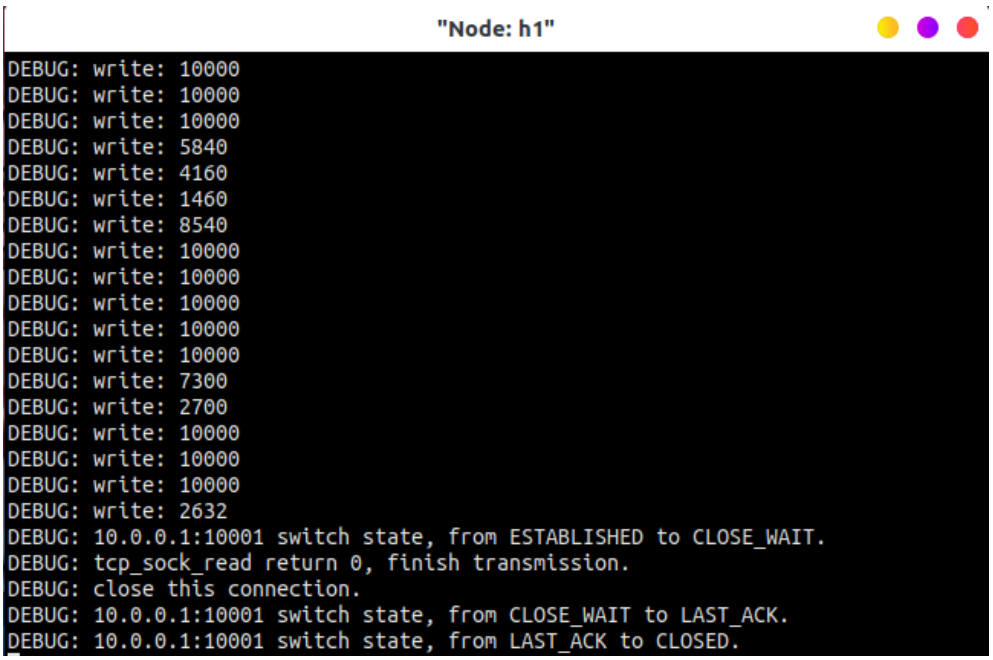
```
tcp_set_state(tsk, TCP_CLOSE_WAIT);
if (cb->pl_len == 0) {
    tsk->rcv_nxt = cb->seq + 1;
    tsk->snd_una = cb->ack;
}
else {
    handle_recv_data(tsk, cb);
    tsk->rcv_nxt += 1;
}
tcp_send_control_packet(tsk, TCP_ACK);
wake_up(tsk->wait_recv);
```

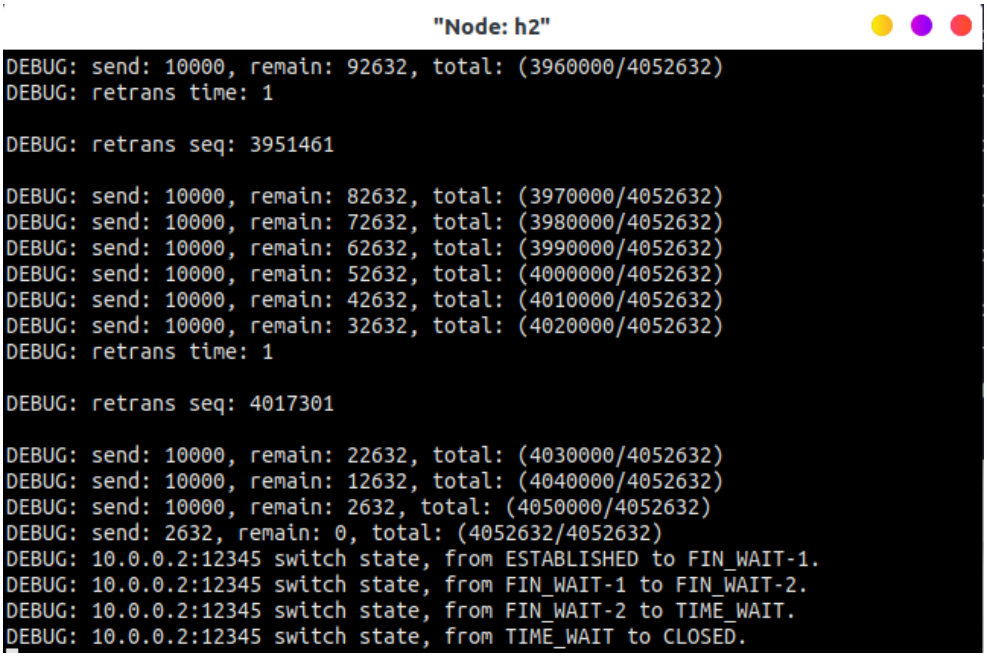
（二）实验功能验证

（1）本实验 server 和 client

H1：本实验 server

H2：本实验 client





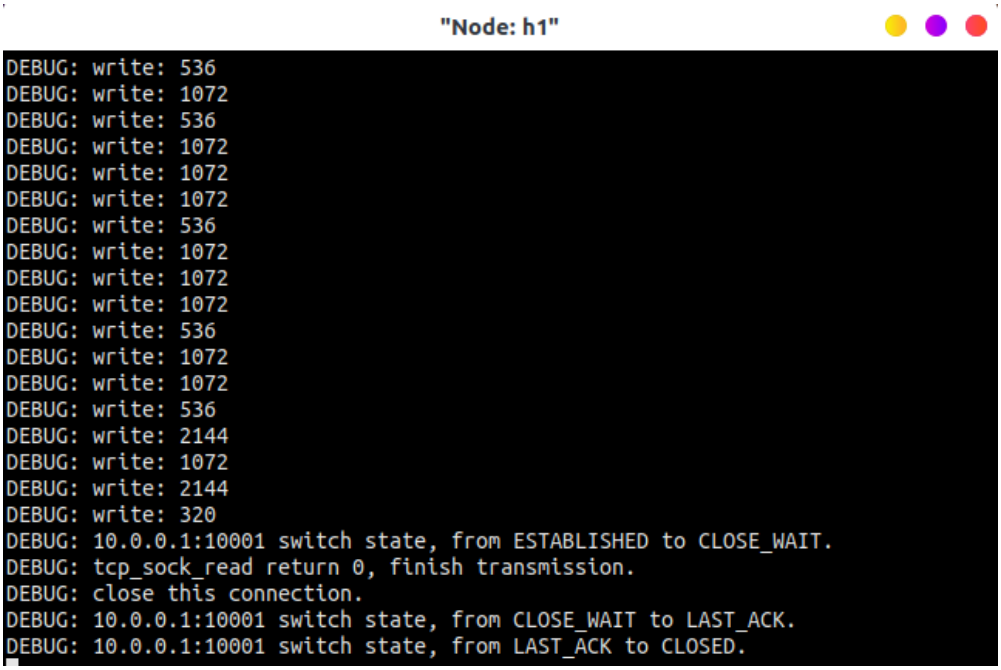
MD5 验证

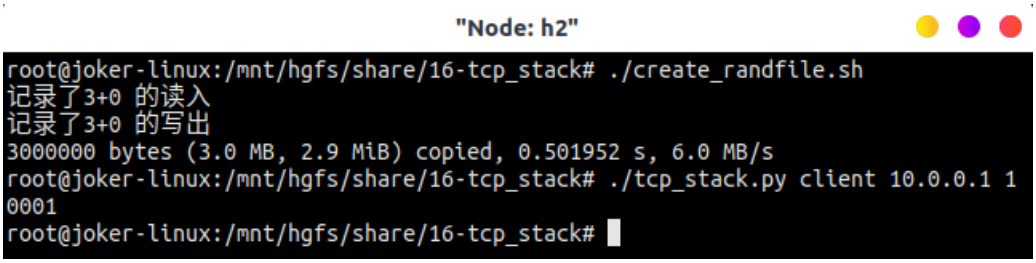
H1、H2 能正确传输文件。

（2）本实验 server 和标准 client

H1：本实验 server

H2：标准 client





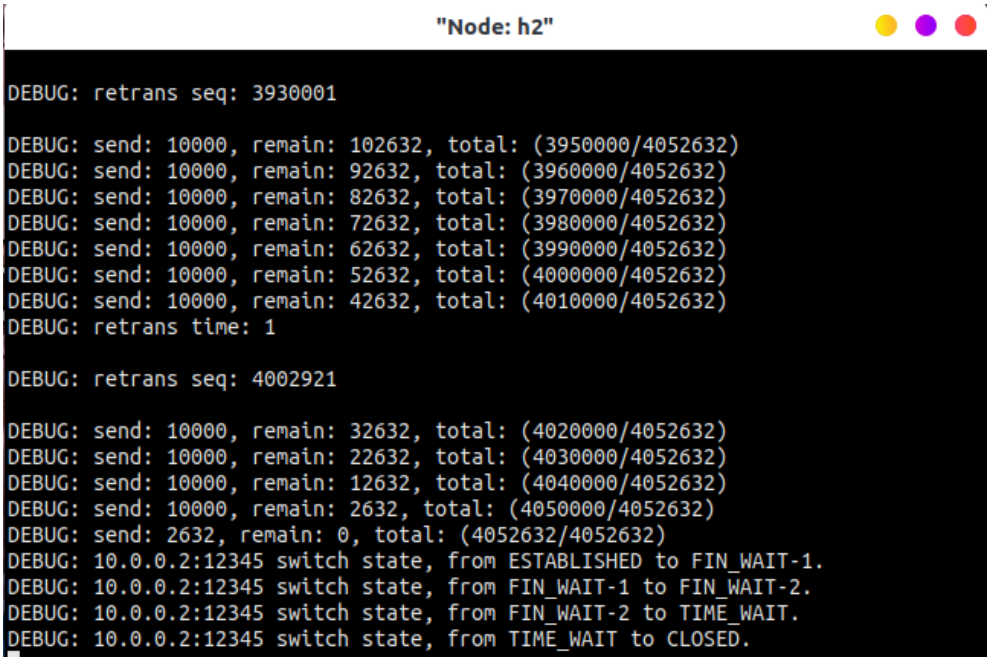
MD5 验证

H1、H2 能正确传输文件。

（3）标准 server 和本实验 client

H1：标准 server

H2：本实验 client



MD5 验证

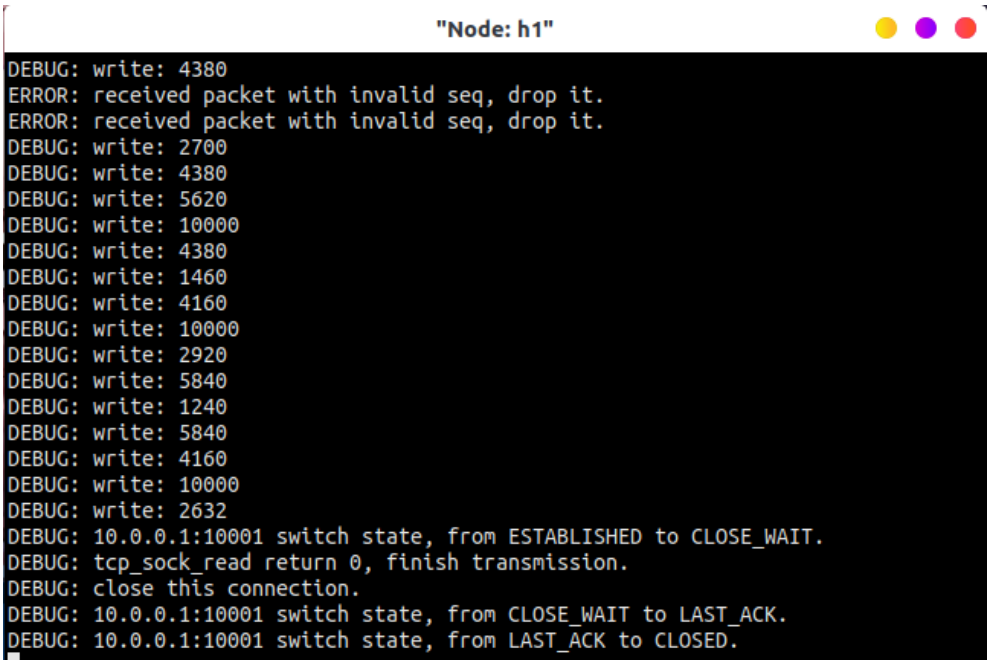
H1、H2 能正确传输文件。

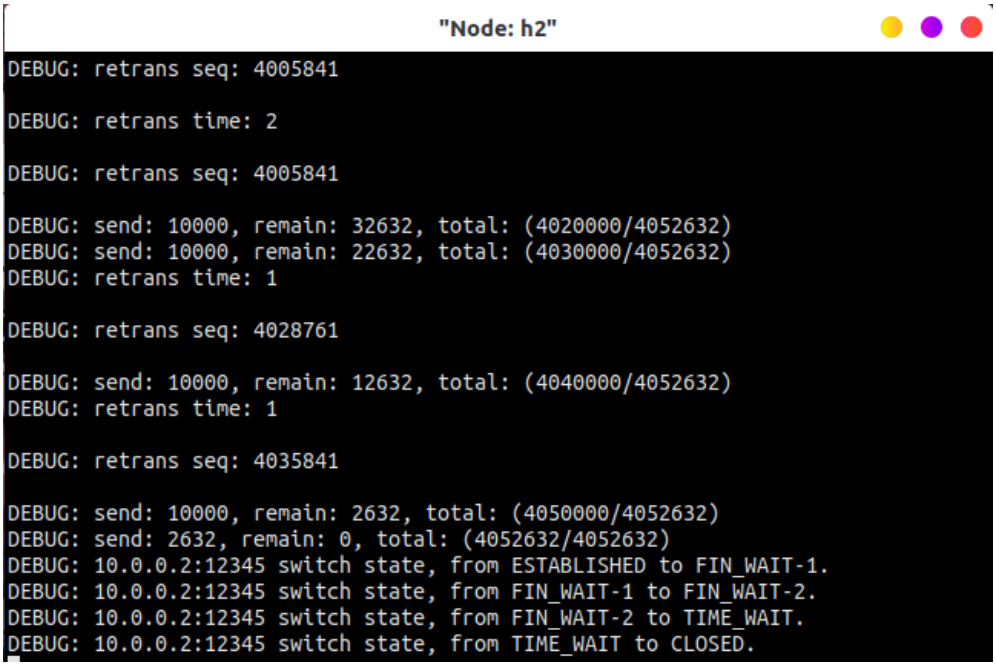
综上，本实验 server 和 client 能正确传输文件，可靠传输功能正确。

（4）将丢包率提升到 10%进行测试

H1：本实验 server

H2：本实验 client





MD5 验证

H1、H2 能正确传输文件。

综上可以看出，本实验可靠传输功能的健壮性也比较好，在较高丢包率下也能正常工作。

四、实验总结

通过本次实验，我了解了 TCP 协议栈的可靠传输功能，了解了如何在有丢包情况下进行连接的建立、断开，同时也掌握了实现超时重传的方法，这让我对 TCP 协议有了更多的认识。