

## Лабораторная работа № 5. Эмуляция и измерение потерь пакетов в глобальных сетях

### 5.1. Цель работы

Основной целью работы является получение навыков проведения интерактивных экспериментов в среде Mininet по исследованию параметров сети, связанных с потерей, дублированием, изменением порядка и повреждением пакетов при передаче данных. Эти параметры влияют на производительность протоколов и сетей.

### 5.2. Предварительные сведения

В дополнение к задержке многие глобальные и локальные сети подвержены потере, переупорядочению, повреждению и дублированию пакетов.

*Потеря пакета* — состояние, возникающее, когда пакет, проходящий через сеть, не достигает пункта назначения. Потеря пакетов может иметь большое влияние на сети с высокой пропускной способностью и высокой задержкой. Распространенной причиной потери пакетов является неспособность маршрутизаторов удерживать пакеты, поступающие со скоростью, превышающей скорость отправления. Даже в тех случаях, когда высокая скорость поступления пакетов носит временный характер (например, кратковременные всплески трафика), маршрутизатор ограничен объемом буферной памяти, используемой для мгновенного хранения пакетов. Когда происходит потеря пакетов, протокол TCP уменьшает окно перегрузки и, следовательно, пропускную способность вдвое.

*Переупорядочивание пакетов* — условие, возникающее, когда пакеты принимаются в порядке, отличном от того, в котором они были отправлены. Переупорядочивание пакетов (неупорядоченная доставка пакетов) обычно является результатом того, что пакеты следуют по разным маршрутам для достижения пункта назначения. Переупорядочивание пакетов может ухудшить пропускную способность TCP-соединений в сетях с высокой пропускной способностью и высокой задержкой. Для каждого сегмента, полученного не по порядку, получатель TCP отправляет подтверждение (ACK) для последнего правильно принятого сегмента. Как только отправитель TCP получает три подтверждения для одного и того же сегмента (тройной дубликат ACK), отправитель считает, что получатель неправильно принял пакет, следующий за пакетом, который подтверждается три раза. Затем он продолжает уменьшать окно перегрузки и пропускную способность наполовину.

*Повреждение пакета* — повреждение битов, составляющих пакет, может (в основном) происходить на физическом уровне. Два соседних устройства соединены физическим каналом (например, волокном, медной витой парой и т. д.). Физический уровень принимает необработанный битовый поток и доставляет его на канальный уровень. В случае повреждения некоторые биты

могут иметь значения, отличные от первоначально отправленных узлом-отправителем. Затем узел получателя просто отбрасывает пакет. В результате процесс-отправитель TCP не получит подтверждения для соответствующего сегмента и будет считать его потерянным сегментом. Процесс отправителя TCP впоследствии уменьшит окно перегрузки и пропускную способность наполовину.

*Дублирование пакетов* — состояние, при котором несколько копий пакета присутствуют в сети и принимаются пунктом назначения. Дублирование пакетов является результатом повторных передач, когда узел-отправитель повторно передает неподтвержденные (NACK) пакеты.

Проблемы, возникающие при потере пакетов:

- Устаревшая информация. Эффект замечен в приложениях с высокой чувствительностью к задержкам и требующих мгновенного принятия решений при определённых действиях пользователя, например, в видеоиграх.
- Медленная загрузка. Эффект замечен при просмотре мультимедийного онлайн-контента (социальные сети, прямые трансляции и т.п.).
- Прерывание загрузки. Эффект замечен при низкой скорости передачи данных и остановке приложения или работы ресурса при незавершении загрузки каких-то данных.
- Закрытие соединений. Многие веб-ресурсы при отсутствии успешного завершения соединения и при долгом простое закрывают соединение по истечении определённого времени.
- Неполная информация. На открываемых веб-страницах могут отображаться не все элементы, неполные изображения или даже формат веб-сайта может быть совершенно неправильным.

Некоторые распространенные причины потери пакетов:

- повреждённое оборудование (повреждение сетевой карты, портов или проводных соединений, неисправности маршрутизаторов или коммутаторов, плохая проводка);
- ограничение ресурсов оборудования (мощность оборудования);
- перегрузка сети (узкие места в сети по маршруту следования пакетов);
- помехи и шумы в беспроводных сетях;
- ошибки в программном обеспечении сетевых устройств.

### 5.3. Задание

1. Задайте простейшую топологию, состоящую из двух хостов и коммутатора с назначенной по умолчанию mininet сетью 10.0.0.0/8.
2. Проведите интерактивные эксперименты по исследованию параметров сети, связанных с потерей, дублированием, изменением порядка и повреждением пакетов при передаче данных.
3. Реализуйте воспроизводимый эксперимент по добавлению правила отбрасывания пакетов в эмулируемой глобальной сети. На экран выведите сводную информацию о потерянных пакетах.
4. Самостоятельно реализуйте воспроизводимые эксперименты по исследованию параметров сети, связанных с потерей, изменением порядка

и повреждением пакетов при передаче данных. На экран выведите сводную информацию о потерянных пакетах.

## 5.4. Последовательность выполнения работы

### 5.4.1. Запуск лабораторной топологии

1. Запустите виртуальную среду с mininet.
2. Из основной ОС подключитесь к виртуальной машине:

```
1  ssh -Y mininet@192.168.x.y
```

3. В виртуальной машине mininet при необходимости исправьте права запуска X-соединения. Скопируйте значение куки (MIT magic cookie)<sup>1</sup> своего пользователя mininet в файл для пользователя root:

```
1  mininet@mininet-vm:~$ xauth list $DISPLAY
2  mininet-vm/unix:10  MIT-MAGIC-COOKIE-1
   ↪  295acad8e35d17636924c5ab80e8462d
3
4  mininet@mininet-vm:~$ sudo -i
5  root@mininet-vm:~# xauth add mininet-vm/unix:10
   ↪  MIT-MAGIC-COOKIE-1  295acad8e35d17636924c5ab80e8462d
6  root@mininet-vm:~# logout
```

После выполнения этих действий графические приложения должны запускаться под пользователем mininet.

4. Задайте простейшую топологию, состоящую из двух хостов и коммутатора с назначенной по умолчанию mininet сеть 10.0.0.0/8:

```
1  sudo mn --topo=single,2 -x
```

После введения этой команды запустятся терминалы двух хостов, коммутатора и контроллера. Терминалы коммутатора и контроллера можно закрыть.

5. На хостах h1 и h2 введите команду `ifconfig`, чтобы отобразить информацию, относящуюся к их сетевым интерфейсам и назначенным им IP-адресам. В дальнейшем при работе с NETEM и командой `tc` будут использоваться интерфейсы `h1-eth0` и `h2-eth0`.
6. Проверьте подключение между хостами h1 и h2 с помощью команды `ping` с параметром `-c 6`.
7. Укажите в отчёте минимальное, среднее, максимальное и стандартное отклонение времени приёма-передачи (RTT), информацию о наличии или отсутствии потерь данных.

---

<sup>1</sup>Значение для *MIT-MAGIC-COOKIE* приведено условно.

## 5.4.2. Интерактивные эксперименты

### 5.4.2.1. Добавление потери пакетов на интерфейс, подключённый к эмулируемой глобальной сети

Пакеты могут быть потеряны в процессе передачи из-за таких факторов, как битовые ошибки и перегрузка сети. Скорость потери данных часто измеряется как процентная доля потерянных пакетов по отношению к количеству отправленных пакетов.

1. На хосте h1 добавьте 10% потерь пакетов к интерфейсу h1-eth0:

```
1 sudo tc qdisc add dev h1-eth0 root netem loss 10%
```

Здесь:

- sudo: выполнить команду с более высокими привилегиями;
  - tc: вызвать управление трафиком Linux;
  - qdisc: изменить дисциплину очередей сетевого планировщика;
  - add: создать новое правило;
  - dev h1-eth0: указать интерфейс, на котором будет применяться правило;
  - netem: использовать эмулятор сети;
  - loss 10%: 10% потерь пакетов.
2. Проверьте, что на соединении от хоста h1 к хосту h2 имеются потери пакетов, используя команду `ping` с параметром `-c 100` с хоста h1. Параметр `-c` указывает общее количество пакетов для отправки. Обратите внимание на значения `icmp_seq`. Некоторые номера последовательности отсутствуют из-за потери пакетов. В сводном отчёте `ping` сообщает о проценте потерянных пакетов после завершения передачи.
  3. Для эмуляции глобальной сети с потерей пакетов в обоих направлениях необходимо к соответствующему интерфейсу на хосте h2 также добавить 10% потерь пакетов:

```
1 sudo tc qdisc add dev h2-eth0 root netem loss 10%
```

4. Проверьте, что соединение между хостом h1 и хостом h2 имеет больший процент потерянных данных (10% от хоста h1 к хосту h2 и 10% от хоста h2 к хосту h1), повторив команду `ping` с параметром `-c 100` на терминале хоста h1. Укажите в отчёте отсутствующие из-за потери пакетов номера последовательности (значения `icmp_seq`), процент потерянных пакетов после завершения передачи.
5. Восстановите конфигурацию по умолчанию, удалив все правила, применённые к сетевому планировщику соответствующего интерфейса. Для отправителя h1:

```
1 sudo tc qdisc del dev h1-eth0 root netem
```

Для получателя h2:

```
1 sudo tc qdisc del dev h2-eth0 root netem
```

6. Убедитесь, что соединение от хоста h1 к хосту h2 не имеет явной потери пакетов, запустив команду `ping` с терминала хоста h1 и затем нажав `Ctrl` + `C`, чтобы остановить тест.

#### 5.4.2.2. Добавление значения корреляции для потери пакетов в эмулируемой глобальной сети

1. Добавьте на интерфейсе узла h1 коэффициент потери пакетов 50% (такой высокий уровень потери пакетов маловероятен), и каждая последующая вероятность зависит на 50% от последней:

```
1 sudo tc qdisc add dev h1-eth0 root netem loss 50% 50%
```

2. Проверьте, что на соединении от хоста h1 к хосту h2 имеются потери пакетов, используя команду `ping` с параметром `-c 50` с хоста h1. Укажите в отчёте отсутствующие из-за потери пакетов номера последовательности (значения `icmp_seq`), процент потерянных пакетов после завершения передачи.
3. Восстановите для узла h1 конфигурацию по умолчанию, удалив все правила, применённые к сетевому планировщику соответствующего интерфейса:

```
1 sudo tc qdisc del dev h1-eth0 root netem
```

#### 5.4.2.3. Добавление повреждения пакетов в эмулируемой глобальной сети

1. При необходимости восстановите конфигурацию интерфейсов по умолчанию на узлах h1 и h2.
2. Добавьте на интерфейсе узла h1 0,01% повреждения пакетов:

```
1 sudo tc qdisc add dev h1-eth0 root netem corrupt 0.01%
```

3. Проверьте конфигурацию с помощью инструмента `iPerf3` для проверки повторных передач. Для этого:
  - запустите `iPerf3` в режиме сервера в терминале хоста h2:

```
1 iperf3 -s
```

- запустите `iPerf3` в клиентском режиме в терминале хоста h1:

```
1 iperf3 -c 10.0.0.2
```

- В отчёте отразите значения повторной передачи на каждом временном интервале и общее количество повторно переданных пакетов.
  - Для остановки сервера iPerf3 нажмите `Ctrl` + `C` в терминале хоста h2.
4. Восстановите для узла h1 конфигурацию по умолчанию, удалив все правила, применённые к сетевому планировщику соответствующего интерфейса.

#### 5.4.2.4. Добавление переупорядочивания пакетов в интерфейс подключения к эмулируемой глобальной сети

1. При необходимости восстановите конфигурацию интерфейсов по умолчанию на узлах h1 и h2.
2. Добавьте на интерфейсе узла h1 следующее правило:

```
1  sudo tc qdisc add dev h1-eth0 root netem delay 10ms  
    ↪ reorder 25% 50%
```

Здесь 25% пакетов (со значением корреляции 50%) будут отправлены немедленно, а остальные 75% будут задержаны на 10 мс.

3. Проверьте, что на соединении от хоста h1 к хосту h2 имеются потери пакетов, используя команду `ring` с параметром `-c 20` с хоста h1. Убедитесь, что часть пакетов не будут иметь задержки (один из четырех, или 25%), а последующие несколько пакетов будут иметь задержку около 10 миллисекунд (три из четырех, или 75%). При необходимости повторите тест. Укажите в отчёте отсутствующие из-за потери пакетов номера последовательности (значения `ismp_seq`), процент потерянных пакетов после завершения передачи.
4. Восстановите конфигурацию интерфейса по умолчанию на узле h1.

#### 5.4.2.5. Добавление дублирования пакетов в интерфейс подключения к эмулируемой глобальной сети

1. При необходимости восстановите конфигурацию интерфейсов по умолчанию на узлах h1 и h2.
2. Для интерфейса узла h1 задайте правило с дублированием 50% пакетов (т.е. 50% пакетов должны быть получены дважды):

```
1  sudo tc qdisc add dev h1-eth0 root netem duplicate 50%
```

3. Проверьте, что на соединении от хоста h1 к хосту h2 имеются дублированные пакеты, используя команду `ring` с параметром `-c 20` с хоста h1. Дубликаты пакетов помечаются как `DUP!`. Измеренная скорость дублирования пакетов будет приближаться к настроенной скорости по мере выполнения большего количества попыток.
4. Восстановите конфигурацию интерфейса по умолчанию на узле h1.

### 5.4.3. Воспроизведение экспериментов

#### 5.4.3.1. Предварительная подготовка

1. Для каждого воспроизводимого эксперимента expname создайте свой каталог, в котором будут размещаться файлы эксперимента:

```
1  mkdir -p ~/work/lab_netem_ii/expname
```

Здесь expname может принимать значения simple-drop, correlation-drop и т.п.

2. Для каждого случая создайте скрипт для проведения эксперимента lab\_netem\_ii.py.

#### 5.4.3.2. Добавление потери пакетов на интерфейс, подключённый к эмулируемой глобальной сети

С помощью API Mininet воспроизведите эксперимент по добавлению потери пакетов для интерфейса хоста, подключающегося к эмулируемой глобальной сети.

1. В виртуальной среде mininet в своём рабочем каталоге с проектами создайте каталог simple-drop и перейдите в него:

```
1  mkdir -p ~/work/lab_netem_ii/simple-drop
2  cd ~/work/lab_netem_ii/simple-drop
```

2. Создаёте скрипт для эксперимента lab\_netem\_ii.py:

```
1  #!/usr/bin/env python
2
3  """
4  Simple experiment.
5  Output: ping.dat
6  """
7
8  from mininet.net import Mininet
9  from mininet.node import Controller
10 from mininet.cli import CLI
11 from mininet.log import setLogLevel, info
12 import time
13
14 def emptyNet():
15
16     "Create an empty network and add nodes to it."
17
18     net = Mininet( controller=Controller,
19                   ↪ waitConnected=True )
```

```

19 info( '*** Adding controller\n' )
20 net.addController( 'c0' )
21
22 info( '*** Adding hosts\n' )
23 h1 = net.addHost( 'h1', ip='10.0.0.1' )
24 h2 = net.addHost( 'h2', ip='10.0.0.2' )
25
26 info( '*** Adding switch\n' )
27 s1 = net.addSwitch( 's1' )
28
29 info( '*** Creating links\n' )
30 net.addLink( h1, s1 )
31 net.addLink( h2, s1 )
32
33 info( '*** Starting network\n' )
34 net.start()
35
36 info( '*** Set delay\n' )
37 h1.cmdPrint( 'tc qdisc add dev h1-eth0 root netem loss
38 ↪ 10%' )
39 h2.cmdPrint( 'tc qdisc add dev h2-eth0 root netem loss
40 ↪ 10%' )
41
42 time.sleep(10) # Wait 10 seconds
43
44 info( '*** Ping\n' )
45 h1.cmdPrint( 'ping -c 100', h2.IP(), '| grep "time=" |
46 ↪ awk \'{print $5, $7}\'' | sed -e \'/s/time=//g\' -e
47 ↪ \'/s/icmp_seq=//g\' > ping.dat' )
48
49 info( '*** Stopping network' )
50 net.stop()
51
52 if __name__ == '__main__':
53     setLogLevel( 'info' )
54     emptyNet()

```

3. В отчёте поясните содержание скрипта lab\_netem\_ii.py. В каких строках скрипта задается значение потери пакетов для интерфейса хоста?
4. Скорректируйте скрипт так, чтобы на экран или в отдельный файл выводилась информация о потерях пакетов.
5. Создайте Makefile для управления процессом проведения эксперимента:

```

1 all: ping.dat
2

```



```
3 ping.dat:
4     sudo python lab_netem_ii.py
5     sudo chown mininet:mininet ping.dat
6
7 clean:
8     -rm -f *.dat
```

6. Выполните эксперимент:

```
1 make
```

7. Очистите каталог от результатов проведения экспериментов:

```
1 make clean
```

#### 5.4.3.3. Задание для самостоятельной работы

Самостоятельно реализуйте воспроизводимые эксперименты по исследованию параметров сети, связанных с потерей, изменением порядка и повреждением пакетов при передаче данных.

### 5.5. Содержание отчёта

1. Титульный лист с указанием номера лабораторной работы и ФИО студента.
2. Формулировка задания работы.
3. Описание результатов выполнения задания:
  - скриншоты (снимки экрана), фиксирующие выполнение работы;
  - подробное описание настроек служб в соответствии с заданием;
  - полные тексты конфигурационных файлов настраиваемых в работе служб;
  - результаты проверки корректности настроек служб в соответствии с заданием (подтверждённые скриншотами).
4. Выводы, согласованные с заданием работы.