

РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ
Факультет физико-математических и естественных наук
Кафедра прикладной информатики и теории вероятностей

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
прикладной информатики и
теории вероятностей
д.т.н., профессор
_____ К. Е. Самуйлов
«__» _____ 20__ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА
на тему
«Моделирование модуля активного управления трафиком сети передачи
данных»

Выполнил
Студент группы НФИбд-01-18
_____ С. М. Наливайко
«__» _____ 20__ г.

Руководитель
доцент кафедры прикладной информа-
тики и теории вероятностей
к.ф.-м.н., доцент
_____ А. В. Королькова

Содержание

Список используемых сокращений	6
Англоязычные сокращения	6
Русскоязычные сокращения	6
Введение	7
1. Моделирование сетей в среде Mininet и анализ их производительности	10
1.1. Обзор исследований в области моделирования в среде Mininet . .	10
1.2. Обзор исследований в области анализа производительности сетей и сетевых компонентов в среде Mininet	11
2. Исследование возможностей моделирования сетей и измерения сетевых характеристик в Mininet	15
2.1. Mininet	15
2.1.1. Общие сведения	15
2.1.2. Создание простой сети с помощью Python и модуля Mininet	16
2.1.3. MiniEdit	17
2.2. Генерация и измерение сетевого трафика с помощью утилиты iPerf3	19
2.2.1. Общие сведения	19
2.2.2. Тестирование пропускной способности с помощью iPerf3 .	20
2.3. Использование утилиты iproute2 для настройки интерфейсов сетевых элементов	21
2.3.1. Общие сведения	21
2.3.2. Утилита tc	22
3. Практическая часть курсовой работы	25
Заключение	26
Список литературы	27

Список таблиц

Список иллюстраций

2.1. Запуск простой сети и проверка достижимости узлов	17
2.2. Редактирование конфигурации хостов сети	18
2.3. Соединение элементов сети	19
2.4. Проверка достижимости h2 для h1	19
2.5. Сеть с простой топологией в Mininet	20
2.6. Запуск iPerf-клиента	21
2.7. Вывод статистики iPerf3	21
2.8. Информация о дисциплине очереди на сетевом устройстве s1-eth0	24

Аннотация

Объектом исследования данной выпускной квалификационной работы является способ моделирования модуля активного управления трафиком сети передачи данных. На сегодняшний день существует множество различных методов моделирования, применяемых для исследований сетей передачи данных. Среда виртуального моделирования Mininet, используемая в работе, позволяет использовать реальные сетевые приложения, сетевые протоколы и ядро Unix/Linux для тестирования и анализа характеристик моделируемых в ней компьютерных сетей и сетевых протоколов. Использование Mininet позволяет производить моделирование сети с минимальными временными затратами и минимальными финансовыми издержками.

В процессе написания работы были рассмотрены способы построения сети передачи данных, исследованы сетевые характеристики, такие как пропускная способность сети, длина очереди пакетов на сетевом интерфейсе устройства, размер окна ТСР на компьютере отправителя, круговая задержка. Создан программный комплекс на языке программирования Python, который позволяет создавать сеть и рассматривать ее сетевые характеристики, не прибегая к изменению программного кода. В качестве примера работы с программой были рассмотрены способы создания и исследования сетей имеющие различные сетевые параметры и топологии.

Список используемых сокращений

Англоязычные сокращения

ONF — Open Networking Foundation

SDN — Software-defined Networking

RTT — Round Trip Time

API — Application Programming Interface — программный интерфейс приложения

CLI — Command line interface — интерфейс командной строки

HDN — Hardware Defined Network — аппаратно определяемая сеть

TCP — Transmission Control Protocol — протокол управления передачей

SCTP — Stream Control Transmission Protocol — протокол передачи с управлением потоком

UDP — User Datagram Protocol — протокол пользовательских датаграмм

QoS — quality of service — качество обслуживания

LLDP — Link Layer Discovery Protocol

TBF — Token bucket filter

CBF — Credit Base Fair Queue

HTB — Hierarchy Token Bucket

RED — Random Early Detection

SFQ — Stochastic Fairness Queueing

IP — Internet Protocol — межсетевой протокол

Русскоязычные сокращения

ПУСТО

Введение

Объектом исследования данной выпускной квалификационной работы является способ моделирования модуля активного управления трафиком сети передачи данных, а также иллюстрация применения данной модели для исследований работы реальных сетей и сетевых приложений.

Актуальность

Актуальность темы обусловлена потребностью организаций в грамотном проектировании и развертывании локальной сети предприятия. Создание сети не может обходиться без предварительного анализа и прототипирования. Для данных задач могут использоваться современные программы, которые позволяют создавать и испытывать сети без реальных сетевых компонентов. Такое решение дешево в построении, а сбор данных сетевых характеристик заметно ускоряется и упрощается.

Так же, исследователям в области сетевых технологий требуется проверять качество работы сетевых протоколов или приложений в определенных условиях. В данной ситуации применение программного комплекса, который поможет автоматически получить приближенные данные эффективности работы сетевого компонента, поможет сократить временные затраты на развертывание и исследование поведения сети.

Цель работы

Целью работы является создание программного компонента, который позволяет моделировать и измерять сетевые характеристики передачи данных без использования реальных сетевых компонентов.

Задачи

1. Построить модуль активного управления трафиком в Mininet.
2. Измерить и визуализировать характеристики моделируемой сети передачи данных для качественной оценки производительности сети.
3. Оценить влияние различных комбинаций протоколов и сетевых топологий на общую производительность моделируемой сети.
4. Исследовать результат моделирования.

Методы исследования

Методами исследования предметной области являются эксперимент, наблюдение, сравнение и измерение. Каждый из этих методов полезен на практике при построении сетей.

Апробация

Результаты, полученные в ходе выполнения работы, были представлены на конференции “Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологических систем” (ИТТММ 2022) (Москва, РУДН, 18–22 Апреля 2022 г.).

Публикации

По теме выпускной квалификационной работы были опубликованы в [XXX публикация, пока ее нет].

Структура работы

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы из [XXX] наименований. Работа содержит [XXX] страниц текста и [XXX] рисунка и [XXX] приложения, содержащих код написанных программ.

Во введении сформулированы цели и задачи, описана актуальность работы и методы, используемые в работе.

В первой главе приводятся основные сведения о методах моделирования модуля активного управления трафиков сети передачи данных. [Дополнение будет как появится часть 1].

Во второй главе описаны программные средства, с помощью которых создается программный комплекс для моделирования модуля активного управления трафиком и исследования сетевых характеристик элементов сети. [Дополнение будет как появится часть 2].

Третья глава посвящена способу взаимодействия с программным модулем и исследованию сетевых характеристик сетей, имеющих различные топологии и сетевые параметры. [Дополнение будет как появится часть 3].

В заключении представлены результаты и выводы по проделанной работе.

1. Моделирование сетей в среде Mininet и анализ их производительности

1.1. Обзор исследований в области моделирования в среде Mininet

Качество работы сетевого приложения определяется, в значительной степени, качествами линии передачи данных, сетевых устройств и работающих в них алгоритмах обработки потока данных. Современные сети передачи данных не могут обеспечить нужный уровень качества обслуживания по ряду причин. Одна из них – слабая взаимосвязь физических сетевых элементов разных уровней. Контроль передачи данных лежит на каждом устройстве отдельно, что, в некоторых случаях, ведет к многочисленным потерям данных и задержкам. Консорциум Open Networking Foundation (ONF) [14] предложил решение данной проблемы: отделить уровень контроля передачи данных от сетевого устройства и перенести все эти заботы на некоторый контроллер. Управление данным контроллером ведется централизованно с помощью протокола OpenFlow [15], что помогает установить нужный уровень предоставления услуг для конкретного приложения. Такое устройство сети консорциум ONF назвал Software-defined Networking (SDN) [20]. Для изучения производительности сетей SDN методом моделирования организация ONF разработала эмулятор сети Mininet.

В работе [17] речь идет об имитационном моделировании сети SDN с помощью средств Mininet и измерении производительности сети. Были затронуты следующие показатели производительности: RTT [18] для каждого направления связи, пропускная способность ветвей и направлений связи, величина задержки на сетевых элементах, загрузка портов OpenFlow Switch, элементы сети с наибольшей задержкой, число обслуженных и потерянных пакетов. Mininet хорошо подходит для задач имитационного моделирования и исследований общей эф-

фективности работы сети, однако, для создания сети требуется умение писать программы и знание Mininet API.

Работа [10] представляет собой подробное руководство по взаимодействию с Mininet, как с помощью CLI [2], так и с помощью написания программ на языке программирования Python. Авторы показывают простоту создания сетевых топологий различной сложности, такие как Minimal, Single, Linear, Tree, Reversed. Также, в работе представлена программа, которая создает собственную сеть внутри Mininet и проводит простой анализ ее производительности. Созданная сеть детерминирована и состоит всего из 3 узлов, соединенных коммутатором. Анализ работы сети не имеет смысла, так как сеть создана, скорее, для демонстрации принципов работы с Mininet, а не для исследований. Из данной работы видно, что Mininet отлично подходит для исследований производительности сети и сетевых компонентов, благодаря своей простоте и настройке.

Идея автоматизации процесса создания топологий сети возникает сама собой, после написания двух-трех программ. Авторы работы [5] описывают способ такой автоматизации. Способ основан на создании конфигурационного файла, в котором описаны основные правила адресации, создания сетевых устройств и соединений между ними. Чтение конфигурационного файла происходит в программе, написанной на языке программирования Python. Данный способ заметно ускоряет развертывание сети, избавляя исследователя от постоянных модификаций программного кода.

1.2. Обзор исследований в области анализа производительности сетей и сетевых компонентов в среде Mininet

Простое моделирование сети не дает информации об ее производительности. Нужно провести качественный анализ работы сетевых компонентов, рассчитать пропускную способность соединения, количество потерянных и доставленных

пакетов и т. д. Работа [19] является хорошим началом для изучения методов анализа производительности сети. Авторы исследуют задержки в сети при передаче данных и сравнивают показатели в HDN и SDN. Hardware Defined Network (HDN) — привычные нам сети, где управление передачи данных лежит на устройствах сетевого и канального уровней. Работа показала, что SDN справляется с работой лучше и средняя задержка передачи данных в ней ниже (3.891 мс против 8.277 мс). Однако, стоит заметить, что здесь речь идет о передаче простого ICMP пакета, а не потока TCP/UDP трафика.

Работа [16] является более интересным примером анализа производительности сети в Mininet. В ней рассматриваются вопросы оценки производительности механизмов для эффективной работы с перегрузки в SDN. Авторы оценивают общую производительность сети, сравнивая ее с производительностью сети, которая использует Link Layer Discovery Protocol (LLDP) [11]. Данный протокол канального уровня позволяет сетевому оборудованию оповещать оборудование, работающее в локальной сети, о своём существовании и передавать ему свои характеристики. Протокол отлично подходит для новой концепции построения сетей SDN, которую мы рассматривали ранее, так как позволяет SDN-контроллеру знать характеристики элементов сети и в зависимости от этого управлять потоками трафика. Оценка производительности основывается на трех пунктах:

- Уровень потери пакетов;
- Уровень доставки пакетов;
- Общая пропускная способность.

Данные оценки определяются для каждой итерации исследования. Всего таких итераций 4, и они имеют следующие сетевые топологии:

1. 1 SDN-контроллер, 4 коммутатора, 1 хост, 4 соединения;
2. 1 SDN-контроллер, 15 коммутаторов, 16 хостов, 30 соединений;
3. 1 SDN-контроллер, 40 коммутаторов, 81 хост, 120 соединений;
4. 1 SDN-контроллер, 85 коммутаторов, 256 хостов, 340 соединений.

В ходе работы были построен график, которые отображают зависимость се-

тевой характеристики от сетевой топологии для обычной сети и сети, которая использует LLDP. На графиках видно, что сеть второго типа показывает лучший уровень производительности для каждой сетевой характеристики передачи данных: ниже уровень потерь пакетов, выше уровень доставки пакетов, выше общая пропускная способность.

Mininet отлично подходит для проведения исследований поведенческих особенностей сетевых компонентов. Однако, можно также провести исследование работоспособности и производительности сетевых протоколов и приложений. Авторы статьи [1] исследуют производительность алгоритма для эффективной работы с перегрузками BBRv2. Анализ работы алгоритма, презентацию и исходный код можно найти в [26]. BBRv1 – нестандартный алгоритм управления перегрузками разработанный в Google, который не использует потерю пакетов как маркер для снижения скорости отправки. Алгоритм BBRv1 [25], в сравнении с предшествующими алгоритмами, выдает большую пропускную способность для потоков данных при равных условиях. Одним из минусов алгоритма является его слабая совместимость с более старыми алгоритмами, используемыми в сети, и алгоритм BBRv2 создан как раз для исправления данной брешы. В исследовании средствами Mininet создается сеть, имеющая 100 узлов отправителей и 100 узлов получателей. Отправители и получатели связаны между собой сетью из 3-х коммутаторов, каждый из которых имеет свою задачу: - коммутатор 1: является точкой входа для узлов-отправителей, эмулирует потери и задержки данных с помощью средств NetEm [22], соединен с коммутатором 2; - коммутатор 2: эмулирует «узкое горлышко» между отправителями и получателями, ограничивая скорость передачи данных до 1 Гбит/с. Ограничивание передачи осуществляется с помощью дисциплины очередей TBF [23]. - коммутатор 3: соединяет коммутатор 2 и хосты получатели.

В ходе работы были исследованы и сравнены алгоритмы CUBIC [3], BBRv1, BBRv2 на такие сетевые характеристики: пропускная способность, индекс справедливости [4], сосуществование. Результаты показывают, что BBRv2 обеспечи-

вает лучшее сосуществование с потоками, использующие алгоритм CUBIC, по сравнению со своим предшественником. Кроме того, VBRv2 способен обеспечить более справедливую долю пропускной способности по сравнению с VBRv1, когда сетевые условия, такие как пропускная способность и задержка, динамически изменяются.

2. Исследование возможностей моделирования сетей и измерения сетевых характеристик в Mininet

2.1. Mininet

2.1.1. Общие сведения

Mininet [12] — это виртуальная среда, которая позволяет разрабатывать и тестировать сетевые инструменты и протоколы. В сетях Mininet работают реальные сетевые приложения Unix/Linux, а также реальное ядро Linux и сетевой стек. С помощью одной команды Mininet может создать виртуальную сеть на любом типе машины, будь то виртуальная машина, размещенная в облаке или же собственный персональный компьютер. Это дает значительные плюсы при тестировании работоспособности протоколов или сетевых программ:

- позволяет быстро создавать прототипы программно-определяемых сетей;
- тестирование не требует экспериментов в реальной сетевой среде, вследствие чего разработка ведется быстрее;
- тестирование в сложных сетевых топологиях обходится без необходимости покупать дорогое оборудование;
- виртуальный эксперимент приближен к реальному, так как Mininet запускает код на реальном ядре Linux;
- позволяет работать нескольким разработчикам в одной топологией независимо.

Машины (хосты) в сети создаются по образу машины, которая запускает Mininet, со всеми вытекающими обстоятельствами. Например, если количество памяти, допустимое для буфера передачи сокета TCP, на рабочей машине равно, например, значению 4096MB, то и на виртуальной машине это значение будет

таким же. Изменение конфигурации на машине в виртуальной сети не вносит изменений в конфигурацию рабочей машины.

2.1.2. Создание простой сети с помощью Python и модуля Mininet

Mininet предоставляет гибкий API [13] в виде модуля для программ на языке программирования Python. С его помощью можно строить сети различных топологий и производить с ними требуемые манипуляции. Приведем пример построения сети простой топологии. Пусть, у нас имеется 10 хостов, соединенных между собой с помощью 1 коммутатора. Нам требуется присвоить каждому ip-адрес и проверить достижимость к каждому узлу.

Код такой программы на языке программирования Python представлен ниже:

```
1 from mininet.link import TCLink
2 from mininet.net import Mininet
3 from mininet.node import CPULimitedHost
4 from mininet.topo import Topo
5
6 '''
7 Создание простой топологии:
8 10 хостов, 1 коммутатор, 10 соединений
9 '''
10 class CustomTopology(Topo):
11
12     def __init__(self, **opts):
13         super(CustomTopology, self).__init__(**opts)
14         s1 = self.addSwitch(name="s1")
15         for i in range(1, 11):
16             host = self.addHost(name="h%d" % i, ip="10.0.0.%d" % i)
17             self.addLink(host, s1)
18
19
20 '''
21 Запуск сети и проверка достижимости элементов
22 '''
23 if __name__ == "__main__":
24     topology = CustomTopology()
25     net = Mininet(topo=topology, host=CPULimitedHost, link=TCLink)
```



```

sergey@sergey:~/PycharmProjects/mininet_test$ sudo python3.8 main.py
Сеть заработала
*** Ping: testing ping reachability
h1 -> h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10
h2 -> h1 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10
h3 -> h1 h2 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10
h4 -> h1 h2 h3 h5 h6 h7 h8 h9 h10
h5 -> h1 h2 h3 h4 h6 h7 h8 h9 h10
h6 -> h1 h2 h3 h4 h5 h7 h8 h9 h10
h7 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h8 h9 h10
h8 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h9 h10
h9 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h10
h10 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9
*** Results: 0% dropped (90/90 received)
Сеть остановилась

```

Рис. 2.1. Запуск простой сети и проверка достижимости узлов

```

26 net.start()
27 print("Сеть заработала")
28 net.pingAll()
29 net.stop()
30 print("Сеть остановилась")

```

Для того, чтобы Mininet мог знать, какую сеть строить, создается класс топологии CustomTopology, являющийся наследником класс Торо, предоставляемого модулем Mininet. Далее все просто: к топологии добавляется коммутатор, через цикл добавляются хосты и соединяются с коммутатором. В основной части программы создается объект класса Mininet, в который мы через параметр конструктора добавляем нашу топологию, запускаем сеть, с помощью метода Mininet **pingAll** проверяем доступность узлов сети и, в конце концов, останавливаем сеть.

Запустим программу с помощью команды

```
sudo python3.8 main.py
```

На рис.2.1 видно, что все узлы достижимы.

2.1.3. MiniEdit

Mininet предоставляет графический интерфейс управления виртуальной сетью — MiniEdit. MiniEdit — программа, написанная на языке программирова-

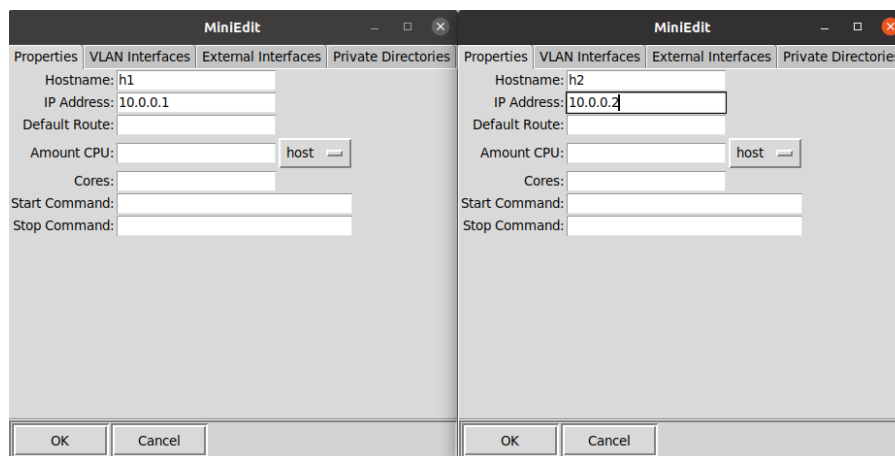


Рис. 2.2. Редактирование конфигурации хостов сети

ния Python, которая является надстройкой над mn и позволяет управлять сетью в удобном для пользователя виде. Данная программа расположена в директории examples исходных файлов mininet. В моем случае это директория `/usr/local/lib/python3.8/dist-packages/mininet/examples/miniedit.py`.

Создадим простую топологию из двух хостов и коммутатора в MiniEdit.

1. Запустим Miniedit из директории `/usr/local/lib/python3.8/dist-packages/mininet/ex`

```
sudo python3
```

```
↪ /usr/local/lib/python3.8/dist-packages/mininet/examples/miniedit.py
```

2. Создадим 2 хоста, выбрав иконку терминала и кликнув по рабочей области 2 раза. Имена для хостов присваиваются автоматически.
3. Кликнув правой кнопкой мыши по хосту и выбрав раздел Properties, зададим в поле IP Adress адреса 10.0.0.1 и 10.0.0.2 соответственно (рис. 2.2).
4. Добавим в рабочую область коммутатор, выбрав элемент LegacySwitch.
5. Выберем элемент NetLink и соединим элементы сети (рис. 2.3).
6. Запустим сеть нажав на кнопку Run.
7. Откроем терминал первого хоста, нажав правой кнопкой мыши по хосту и выбрав пункт Terminal. Отправим ping второму хосту (рис. 2.4).

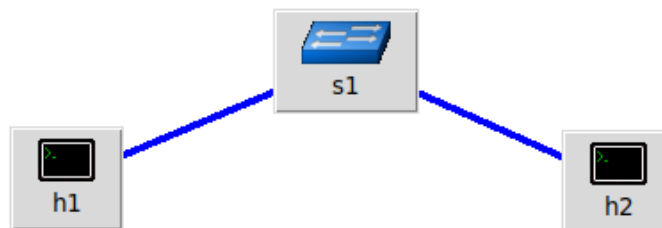


Рис. 2.3. Соединение элементов сети

```
"Host: h1"
root@sergey:/home/sergey# ping 10.0.0.2
PING 10.0.0.2 (10.0.0.2) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.0.0.2: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.446 ms
64 bytes from 10.0.0.2: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.067 ms
64 bytes from 10.0.0.2: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.067 ms
64 bytes from 10.0.0.2: icmp_seq=4 ttl=64 time=0.063 ms
^C
--- 10.0.0.2 ping statistics ---
4 packets transmitted, 4 received, 0% packet loss, time 3074ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.063/0.160/0.446/0.164 ms
root@sergey:/home/sergey#
```

Рис. 2.4. Проверка достижимости h2 для h1

2.2. Генерация и измерение сетевого трафика с помощью утилиты iPerf3

2.2.1. Общие сведения

iPerf3 [7] — кроссплатформенная консольная клиент-серверная программа-генератор TCP, UDP и SCTP трафика для тестирования пропускной способности сети. По умолчанию тест выполняется в направлении от клиента к серверу. Для выполнения тестирования программа должна быть запущена на двух устройствах (это могут быть как компьютеры, так и смартфоны, планшеты). Одно из них будет выполнять роль сервера, а другое роль клиента. Между ними и будет происходить передача данных для измерения пропускной способности соединения.

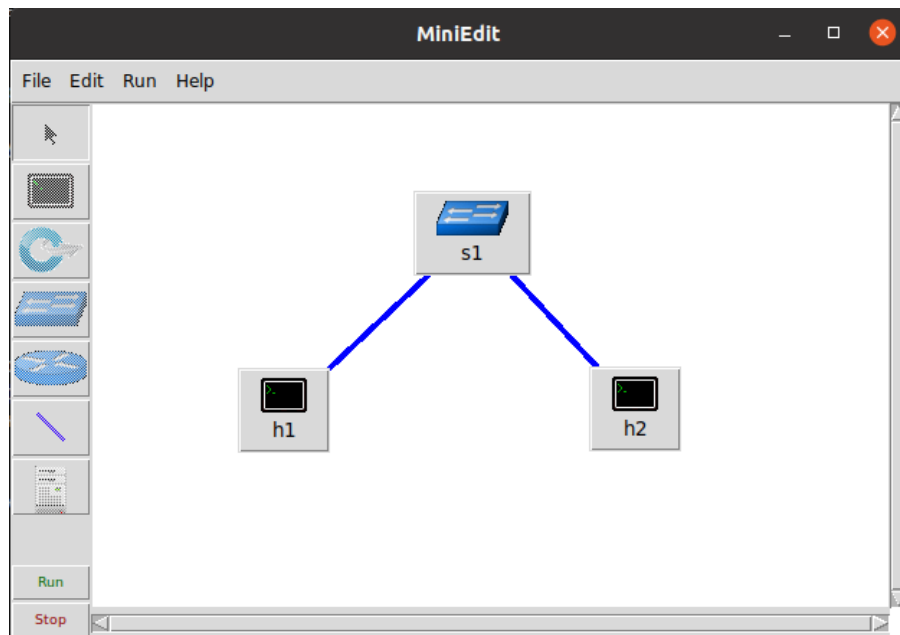


Рис. 2.5. Сеть с простой топологией в Mininet

2.2.2. Тестирование пропускной способности с помощью iPerf3

Для запуска сервера iPerf требуется выполнить следующую команду

```
iperf3 -s [параметры]
```

Для запуска iPerf-клиента требуется выполнить следующую команду

```
iperf3 -c server_ip [параметры]
```

Подробнее со списком параметров iPerf3 можно ознакомиться в [8]

Проведем тестирование сети в Mininet.

1. Запустим MiniEdit.
2. Создадим 2 хоста (h1 и h2) и коммутатор (s1).
3. Соединим элементы сети.
4. Запустим сеть (рис. 2.5).
5. Запустим iPerf-сервер на h2.

```
iper3 -s
```

"Host: h1"						
Connecting to host 10.0.0.2, port 5201						
[7]	local 10.0.0.1 port 47538 connected to 10.0.0.2 port 5201					
ID	Interval	Transfer	Bitrate	Retr	Cwnd	
[7]	0.00-1.00	sec 5.60 GBytes	48.1 Gbits/sec	0	310 KBytes	(omitted)
[7]	1.00-2.00	sec 5.74 GBytes	49.3 Gbits/sec	0	386 KBytes	(omitted)
[7]	2.00-3.00	sec 5.75 GBytes	49.4 Gbits/sec	0	386 KBytes	(omitted)
[7]	3.00-4.00	sec 5.73 GBytes	49.2 Gbits/sec	0	386 KBytes	(omitted)
[7]	4.00-5.00	sec 5.65 GBytes	48.6 Gbits/sec	0	525 KBytes	(omitted)
[7]	5.00-6.00	sec 5.44 GBytes	46.8 Gbits/sec	0	525 KBytes	(omitted)
[7]	6.00-7.00	sec 5.36 GBytes	46.1 Gbits/sec	0	583 KBytes	(omitted)
[7]	7.00-8.00	sec 5.74 GBytes	49.3 Gbits/sec	0	583 KBytes	(omitted)
[7]	8.00-9.00	sec 5.65 GBytes	48.5 Gbits/sec	0	583 KBytes	(omitted)
[7]	9.00-10.00	sec 5.47 GBytes	47.0 Gbits/sec	0	583 KBytes	(omitted)
[7]	0.00-1.00	sec 5.47 GBytes	47.0 Gbits/sec	0	1.01 MBytes	
[7]	1.00-2.00	sec 5.70 GBytes	48.9 Gbits/sec	0	1.01 MBytes	
[7]	2.00-3.00	sec 5.70 GBytes	49.0 Gbits/sec	0	1.01 MBytes	

Рис. 2.6. Запуск iPerf-клиента

"Host: h1"						
[7]	51.00-52.00	sec 5.67 GBytes	48.7 Gbits/sec	0	8.45 MBytes	
[7]	52.00-53.00	sec 5.62 GBytes	48.2 Gbits/sec	0	8.45 MBytes	
[7]	53.00-54.00	sec 5.60 GBytes	48.1 Gbits/sec	0	8.45 MBytes	
[7]	54.00-55.00	sec 5.66 GBytes	48.7 Gbits/sec	0	8.45 MBytes	
[7]	55.00-56.00	sec 5.74 GBytes	49.3 Gbits/sec	0	8.45 MBytes	
[7]	56.00-57.00	sec 5.74 GBytes	49.3 Gbits/sec	0	8.45 MBytes	
[7]	57.00-58.00	sec 5.70 GBytes	49.0 Gbits/sec	0	8.45 MBytes	
[7]	58.00-59.00	sec 5.77 GBytes	49.5 Gbits/sec	0	8.45 MBytes	
[7]	59.00-60.00	sec 5.47 GBytes	47.0 Gbits/sec	0	8.45 MBytes	

ID	Interval	Transfer	Bitrate	Retr		
[7]	0.00-60.00	sec 335 GBytes	48.0 Gbits/sec	0		sender
[7]	0.00-60.00	sec 335 GBytes	48.0 Gbits/sec	0		receiver
iperf Done.						
root@sergey:/home/sergey# █						

Рис. 2.7. Вывод статистики iPerf3

- Запустим iPerf-клиент на хосте h1 на 60 секунд, пропустив первые 10 секунд для статистики (рис. 2.6).

```
iperf3 -c 10.0.0.2 -t 60 -O 10
```

- Посмотрим статистику, которую сгенерировал iPerf (рис. 2.7).

2.3. Использование утилиты iproute2 для настройки интерфейсов сетевых элементов

2.3.1. Общие сведения

iproute2 [9] — это набор утилит для управления параметрами сетевых устройств в ядре Linux. Эти утилиты были разработаны в качестве унифицированного интерфейса к ядру Linux, которое непосредственно управляет сетевым трафиком.

iproute2 заменил полный набор классических сетевых утилит UNIX, которые ранее использовались для настройки сетевых интерфейсов, таблиц маршрутизации и управления arp-таблицами: ifconfig, route, arp, netstat и других, предназначенных для создания IP-туннелей. iproute2 предлагает унифицированный синтаксис для управления самыми разными аспектами сетевых интерфейсов.

Набор утилит включает в себя три основные программы:

- ip [6] — утилита для просмотра параметров и конфигурирования сетевых интерфейсов, сетевых адресов, таблиц маршрутизации, правил маршрутизации, arp-таблиц, IP-туннелей, адресов multicast рассылки, маршрутизацией multicast пакетов.
- tc [24] — утилита для просмотра и конфигурирования параметров управления трафиком. Позволяет управлять классификацией трафика, дисциплинами управления очередями для различных классов трафика либо целиком для сетевого интерфейса, что, в свою очередь, позволяет реализовать QoS в нужном для системы объёме:
 - разделение разных типов трафика по классам;
 - назначение разных дисциплин обработки очередей трафика с разным приоритетом, механизмами прохождения очереди, ограничениями по скорости и т. п.
- ss [21] — утилита для просмотра текущих соединений и открытых портов. Аналог утилиты netstat.

2.3.2. Утилита tc

Утилита tc [24] наиболее полезна для исследования, так как она позволяет гибко настроить поведение контроля исходящего трафика. Система контроля трафика состоит из:

- **Ограничения исходящего трафика.** Когда трафик сформирован, его полоса пропускания начинает контролироваться. Ограничение может дать больше, чем уменьшение полосы пропускания — оно также используется

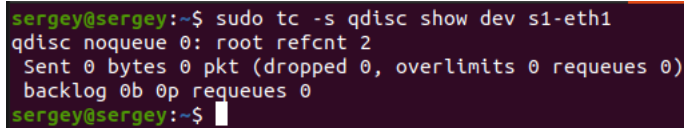
для сглаживания пиков для более прогнозируемого поведения сети.

- **Планирования передачи пакетов.** Механизм позволяет увеличить интерактивность исходящего трафика при гарантировании полосы пропускания для передачи данных большого объема. Такое упорядочение также называется приоритезацией и применяется для исходящего трафика.
- **Ограничения исходящего трафика.** Этот механизм позволяет ограничить количество пакетов или байт в потоке входящего трафика, соответствующих определенной классификации.
- **Отбрасывания.** Трафик, превышающий установленную полосу пропускания, может быть отброшен как для входящего, так и исходящего трафика. Обработка трафика контролируется тремя типами объектов: очередями, классами и фильтрами. Обработка трафика контролируется тремя типами объектов: очередями, классами и фильтрами.

Для информации о tc используйте команду

```
tc help
```

Дисциплина очереди — это алгоритм обработки очереди сетевых пакетов. Дисциплин на одном интерфейсе может быть задействовано несколько, а непосредственно к интерфейсу крепится корневая дисциплина (root qdisc). При этом каждый интерфейс имеет свою собственную корневую дисциплину. Каждой дисциплине и каждому классу назначается уникальный дескриптор, который может использоваться последующими инструкциями для ссылки на эти дисциплины и классы. Помимо исходящей дисциплины, интерфейс так же может иметь и входящую дисциплину, которая производит управление входящим трафиком. Дисциплины на интерфейсе образуют иерархию, где в верху иерархии находится корневая дисциплина. Сам интерфейс ничего не знает о дисциплинах, находящихся под корневой, а поэтому работает только с ней. Дисциплины делятся на классовые (CBF, HTB, PRIO) и бесклассовые (pfifo, pfifo_fast, RED, SFQ, TBF). Подробнее о видах дисциплин очередей можно прочесть в [24].



```
sergey@sergey:~$ sudo tc -s qdisc show dev s1-eth1
qdisc noqueue 0: root refcnt 2
Sent 0 bytes 0 pkt (dropped 0, overlimits 0 requeues 0)
backlog 0b 0p requeues 0
sergey@sergey:~$
```

Рис. 2.8. Информация о дисциплине очереди на сетевом устройстве s1-eth0

Воспользуемся сетью Mininet из прошлой главы и с помощью `tc` выведем информацию о дисциплине очереди на сетевом устройстве `s1-eth0` (интерфейс коммутатора, к которому подключен хост `h1`). Для этого воспользуемся командой

```
tc -s qdisc show dev s1-eth1
```

На рис. 2.8 видно, что корневой дисциплиной очереди назначена дисциплина `noqueue`. Данная дисциплина означает «отправляй мгновенно, не ставь в очередь».

В выводе `tc` можно увидеть полезные для исследования данные:

- *Sent 0 bytes 0 pkt (dropped 0, overlimits 0 requeues 0)* — означает, что было отправлено 0 байт (0 пакетов), из которых 0 пакетов отброшено и 0 пакетов вышли за пределы лимита.
- *backlog 0b 0p requeues 0* — размер очереди в байтах и пакетах.

Запомним параметр `backlog`: он будет полезен нам при сборе статистики.

3. Практическая часть курсовой работы

Заключение

Здесь могло бы быть ваше заключение

Список литературы

1. A Performance Evaluation of TCP BBRv2 Alpha / J. Gomez [и др.] // 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). — IEEE, 2020.
2. Command-line interface. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Command-line_interface.
3. CUBIC for Fast Long-Distance Networks : RFC / I. Rhee [и др.] ; RFC Editor. — 02.2018. — № 8312. — URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8312.txt>.
4. *Floyd S.* Metrics for the Evaluation of Congestion Control Mechanisms : RFC / RFC Editor. — 03.2008. — № 5166. — URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5166.txt>.
5. Implementation of simplified custom topology framework in Mininet / C. Pal [и др.] // 2014 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering (APCASE). — 2014.
6. ip(8) — Linux manual page. — URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man8/tc.8.html>.
7. iPerf - The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP. — URL: <https://iperf.fr/iperf-doc.php>.
8. iPerf 3 user documentation. — URL: <https://iperf.fr/iperf-doc.php>.
9. iproute2. — URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Iproute2>.
10. *Kaur K., Singh J., Ghumman N.* Mininet as Software Defined Networking Testing Platform // International Conference on COMMUNICATION, COMPUTING & SYSTEMS(ICCCS–2014). — EXCEL INDIA PUBLISHERS, 2014. — С. 139–142.
11. Link Layer Discovery Protocol. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Link_Layer_Discovery_Protocol.
12. Mininet. — URL: <http://mininet.org/>.

13. Mininet Python API Reference Manual. — URL: <http://mininet.org/api/annotated.html>.
14. Open Networking Foundation. — URL: <https://opennetworking.org>.
15. OpenFlow. — URL: <https://opennetworking.org/sdn-resources/customer-case-studies/openflow/>.
16. Performance Analysis of Congestion Control Mechanism in Software Defined Network (SDN) / M. Z. A. Rahman [и др.] // — 2017.
17. RESEARCH OF SDN NETWORK PERFORMANCE PARAMETERS USING MININET NETWORK EMULATOR / O. I. Romanov [и др.] // Information and Telecommunication Sciences. — 2021.
18. Round Trip Time. — URL: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/Round_Trip_Time_\(RTT\)](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/Round_Trip_Time_(RTT)).
19. *Shivayogimath C. N., Reddy N. V. U.* Performance Analysis of a Software Defined Network Using Mininet // Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems: Proceedings of ICAIECES 2015 / под ред. S. S. Dash [и др.]. — Springer, 2016. — С. 391—398.
20. Software-defined networking. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_networking.
21. ss(8) — Linux manual page. — URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man8/ss.8.html>.
22. tc-netem(8) — Linux manual page. — URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man8/tc-netem.8.html>.
23. tc-tbf(8) — Linux manual page. — URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man8/tc-tbf.8.html>.
24. tc(8) — Linux manual page. — URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man8/tc.8.html>.

25. TCP BBR Quick-Start: Building and Running TCP BBR on Google Compute Engine. — URL: <https://github.com/google/bbr/blob/master/Documentation/bbr-quick-start.md>.
26. TCP BBR v2 Alpha/Preview Release. — URL: <https://github.com/google/bbr/blob/v2alpha/README.md>.