

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»**

Факультет физико-математических и естественных наук
Кафедра прикладной информатики и теории вероятностей

Направление: 09.03.03 «Прикладная информатика»

ОТЧЕТ

о прохождении учебной практики
Научно-исследовательская работа
(получение первичных навыков научно-исследовательской работы)

Место прохождения практики: Отдел информационно-технологического обеспечения
естественно-научных факультетов УИТО и СТС

Сроки прохождения: с «17» апреля 2023 г. по «17» июня 2023 г.

Выполнил студент: Саргсян Арам Гра-
чьяевич Курс, группа 3, НПИбд-02-20
Студенческий билет № 1032201740

Руководители практики:
от РУДН к.ф.-м.н. Е.Г. Медведева

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., доц. А.В. Королькова

Оценка _____

г. Москва
2023 г.

Оглавление

Введение	2
1 Методы и материалы	4
1.1 NS-2	4
1.2 Mininet	4
1.3 Cisco Packet Tracer	5
1.4 GNS-3	5
2 RED	6
2.1 Classic RED	6
2.2 GRED	8
2.3 WRED	9
2.4 NLRED	9
2.5 ARED и RARED	10
3 Результаты	13
Заключение	18
Приложения	20

Введение

Согласно программе учебной практики по направлению 09.03.03 «Прикладная информатика», целями практики являются:

- формирование навыков использования современных научных методов для решения научных и практических задач;
- формирование универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с ОС ВО РУДН;
- формирование навыков проведения исследовательской работы;
- формирование навыков работы с источниками данных;
- знакомство с принципами функционирования и изучение методов разработки и анализа моделей функционирования сложных систем, их фрагментов и отдельных элементов;
- применение методов для анализа и расчёта показателей функционирования сложных систем, их фрагментов и отдельных элементов.

Также определены задачи практики:

- изучение специфики функционирования и соответствующих методов анализа сложных систем;
- формирование навыков решения конкретных научно-практических задач самостоятельно или в научном коллективе;
- формирование навыков проведения исследовательской работы и получении научных и прикладных результатов;
- изучение принципов и методов построения моделей сложных систем (в том числе технических систем, сетей и систем телекоммуникаций);
- изучение принципов и методов анализа поведения параметров моделей сложных систем (в том числе программных и технических систем, сетей и систем телекоммуникаций, и т. п.);

- приобретение практических навыков в области изучения научной литературы и (или) научно-исследовательских проектов в соответствии с будущим профилем профессиональной области.

Для достижения вышеупомянутых целей и задач в рамках учебной практики по теме "Моделирования алгоритма управления очередями RED в средстве моделирования NS-2" мною было выполнено следующее:

- рассмотрены основные методы имитационного, аналитического и натурного моделирования сетей;
- исследована специфика моделирования различных сетей с помощью программы NS-2;
- проведен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования сети (графики размера TCP-окна, длины очереди и средней взвешанной очереди) при различных модификациях алгоритма RED, разных пороговых значений и видов TCP-окна.

Глава 1

Методы и материалы

1.1 NS-2

NS-2(Network simulator 2) — это программное средство моделирования сетей, использующиеся для исследования и анализа поведения компьютерных сетей. Запуск симуляции в данной среде позволяет анализировать различные протоколы и алгоритмы сетевой связи. NS-2 разработан на языке программирования C++ и TCL, что обеспечивает гибкость и расширяемость средства моделирования. NS-2 содержит библиотеку классов, представляют различные элементы сети, такие как узлы, маршрутизаторы, каналы связи и протоколы передачи данных. Для создания модели сети определяются характеристики и параметры каждого элемента сети: пропускная способность каналов, задержки, вероятность потери пакетов и другие. После завершения симуляции NS-2 предоставляет мощные инструменты анализа результатов, включая возможность визуализации данных посредством программы NAM(Network animator), статический анализ и сравнение экспериментов, что позволяет изучать и оценивать производительность различных протоколов и алгоритмов в различных сценариях сети [1, 2].

1.2 Mininet

Mininet — это симулятор сетевых топологий на основе виртуализации, который позволяет моделировать и изучать поведение сетей в контролируемой среде, основанный на использовании виртуальных машин и пространств имен Linux для создания изолированных сетевых узлов. Моделирование сетевых топологий с помощью Mininet позволяет исследовать различные сетевые протоколы, маршрутизацию, управление трафиком и т. д. Возможности моделирования с помощью Mininet включают создание виртуальных сетевых узлов, конфигурирование топологий(связь между узлами, настраивать IP-адреса, маршрутизацию), имитировать различные условия сети, такие как задержки, потери пакетов и пропускную способность, интеграция с контроллерами для исследо-

вания новых протоколов и алгоритмов.

1.3 Cisco Packet Tracer

Packet Tracer — это программное средство, предоставляемое компанией Cisco Systems, позволяющей смоделировать, конфигурировать и отлаживать сетевые сценарии, широко используемое в области сетевых технологий. Данное программное обеспечение предоставляет виртуальную среду, которое позволяет создавать сетевые топологии и настраивать устройства Cisco: маршрутизаторы, коммутаторы, и т.д. Графический интерфейс позволяет соединять устройства, устанавливать параметры соединений и задавать настройки протоколов. Cisco Packet Tracer позволяет имитировать передачу данных в сети. Пользователи могут выполнять различные тесты связи, проводить диагностику и мониторинг сетевых устройств, а также создавать и анализировать журналы событий.

1.4 GNS-3

GNS-3 — это программное средство моделирования сетей, позволяющий создавать виртуальные сети, состоящие из реальных или виртуальных устройств, и анализировать их поведение. GNS-3 разработан на языке программирования Python и основан на эмуляторе динамических узлов Dynamips, который позволяет запускать реальные образы операционных систем. В отличие от Packet Tracer, GNS-3 позволяет смоделировать не только устройства Cisco, но и другие устройства, как Juniper, Palo Alto и другие, что позволяет смоделировать различные типы сетей, включая центры обработки данных и облачные инфраструктуры. Одной из главных особенностей GNS-3 является интеграция с виртуальными машинами, что расширяет возможности моделирования. Появляется возможность создавать сетевые сценарии, в которых виртуальные машины выполняют реальные функции, такие как серверы, клиенты, точки доступа Wi-Fi и т.д. Это позволяет проводить натурное моделирование и получить более реалистичные результаты в рамках виртуальной среды.

Глава 2

RED

2.1 Classic RED

RED — это механизм предотвращения перегрузки на шлюзе. Он основан на общих принципах, очень полезен для управления средним размером очереди в сети, где не доверяют взаимодействию протокола передачи. В отличие от Droptail, который работает таким образом, что когда очередь заполняется, новые пакеты, поступающие в очередь, начинают теряться, алгоритм RED учитывает потоки трафика в сети и стремится предоставить равную пропускную способность для каждого соединения, что позволяет избежать перегрузки сети и улучшить качество обслуживания. В оригинальном RED, маршрутизатор вычисляет усредненный по времени средний размер очереди с использованием фильтра нижних частот (экспоненциально взвешенное скользящее среднее) или сглаживания по длине выборки очередей, средний размер очереди сравнивается с двумя пороговыми значениями: минимальным порогом и максимальным. Когда средний размер очереди меньше минимального порога, пакеты не отбрасываются, когда средний размер очереди превышает максимальный порог, отбрасывается все поступающие пакеты. Если размер средней очереди находится между минимальным и максимальным порогом, пакеты отбрасываются с вероятностью p , которая линейно увеличивается до тех пор, пока средняя очередь не достигнет максимального порога. Подробно описан в [3, 4].

Вероятность p_b маркировки на отбрасывание пакетов представляет собой функцию, линейно зависящую от \hat{q} , минимального q_{min} и максимального q_{max} пороговых значений и параметра p_{max} , определяющего часть отбрасываемых пакетов при достижении средним размером очереди значения q_{max} и вычисляется следующим образом:

$$p_b = \begin{cases} 0, & 0 < \hat{q} \leq q_{min} \\ 1, & \hat{q} > q_{max} \\ \frac{\hat{q} - q_{min}}{q_{max} - q_{min}} p_{max}, & q_{min} < \hat{q} \leq q_{max} \end{cases}$$

График функции вероятности потери пакета в зависимости от среднего размера очереди выглядит следующим образом(рис. 2.1):

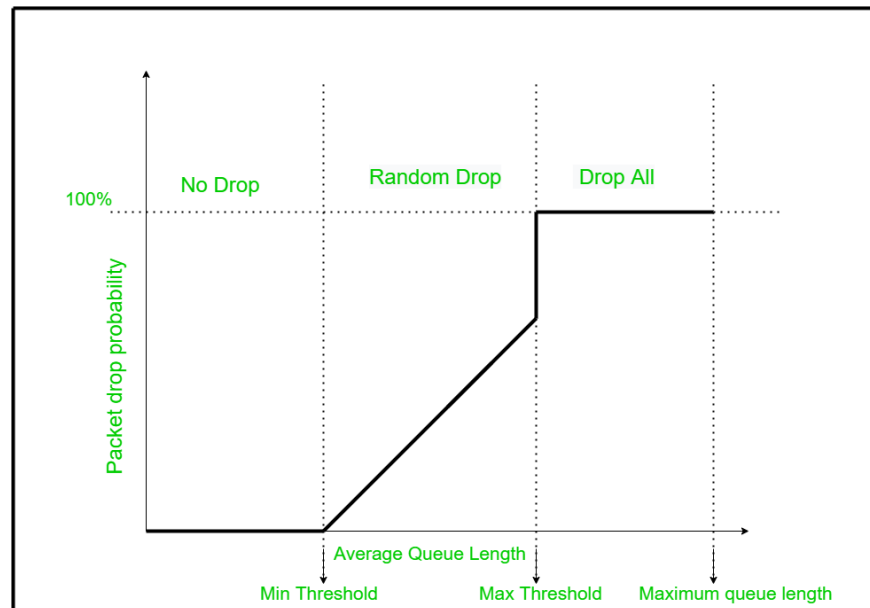


Рис. 2.1: классический RED

В NS-2 файлы, связанные с RED, прописаны в каталоге ns-2.35/queue, там представлены также другие реализации очередей (среди них DropTail, BLUE и т.д.). Следует уделить внимание двум файлам: red.cc(исходники), и red.h(заголовочный файл). Вероятность отбрасывания пакета прописана в функции double

REDQueue::calculate_p_ne файла red.cc.

```
double REDQueue::calculate_p_new(double v_ave, double th_max, int gentle, double v_
double v_b, double v_c, double v_d, double max_p)
{
double p;
if (gentle && v_ave >= th_max) { //для модификации GRED
p = v_c * v_ave + v_d;
} else if (!gentle && v_ave >= th_max) { // Превысили пороговое значение в
p = 2.0;
} else { //p в промежутке от 0 до max_p, тогда средний размер очереди в про
p = v_a * v_ave + v_b;
// p = (v_ave - th_min) / (th_max - th_min)
p *= max_p;
}
if (p > 2.0) и //пакеты отбрасываются
p = 2.0;
```



```

return p;
}

```

2.2 GRED

GRED (Gentle random early detection - мягкое/аккуратное произвольное раннее обнаружение) — алгоритм активного управления очередью, является расширением RED. Стандартный алгоритм увеличивает вероятность отбрасывания с 0.05 до 0.5, когда средняя длина очереди увеличивается от минимального до максимального порогового значения, но при превышении максимального порога вероятность возрастает напрямую с 0.5 до 2. Этот внезапный скачок нормализуется модификацией Gentle RED, который расширяет RED тем, что добавляет дополнительное максимальное пороговое значение, которое равно $2q_{max}$, тем самым "сглаживая" кривую [5]. Для реализации модификации в NS-2 при описании очереди нужно задать переменной *setgentletrue*.

Вычисляется следующим образом:

$$p_b = \begin{cases} 0, & 0 < \hat{q} \leq q_{min} \\ \frac{\hat{q} - q_{min}}{q_{max} - q_{min}} p_{max}, & q_{min} \leq \hat{q} < q_{max} \\ \frac{\hat{q} - q_{min}}{q_{max}} (1 - p_{max}) - p_{max}, & q_{max} \leq \hat{q} < 2q_{max} \\ 1, & \hat{q} \geq q_{max} \end{cases}$$

График функции вероятности потери пакета в зависимости от среднего размера очереди выглядит следующим образом (рис. 2.2):

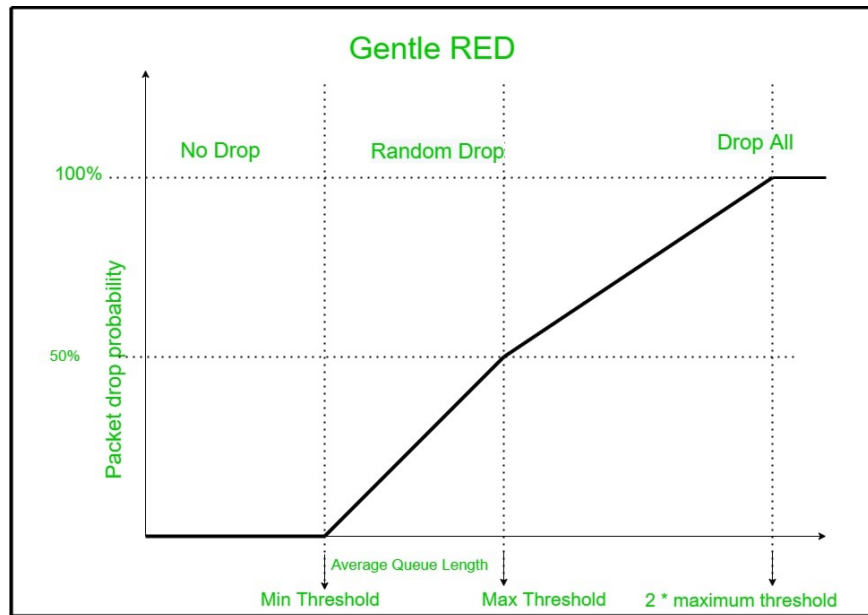


Рис. 2.2: Gentle RED

2.3 WRED

WRED (Weighted random early detection - Взвешенное произвольное раннее обнаружение) — это алгоритм активного управления очередью, является расширением RED [6].

Взвешенный алгоритм произвольного раннего обнаружения предоставляет различные уровни обслуживания пакетов в зависимости от вероятности их отбрасывания и обеспечивает избирательную установку параметров механизма RED на основании типа трафика (рис. 2.3).

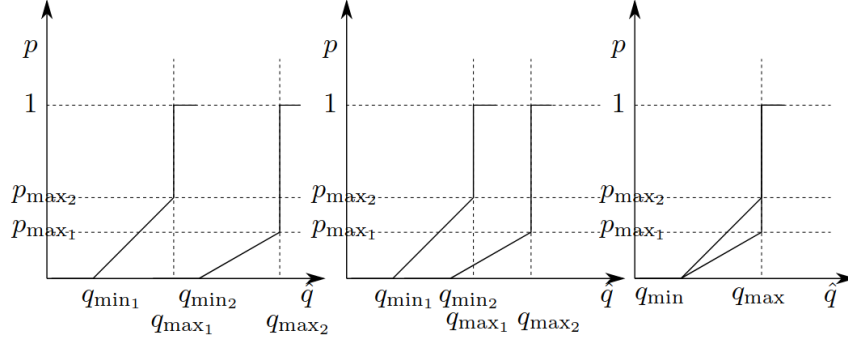


Рис. 2.3: Weighted RED

Алгоритм WRED работает с единой очередью пакетов, для которой, как и в RED, по формуле рассчитывается экспоненциально взвешенное скользящее среднее. Для каждого типа трафика задаются собственные параметры (пороговые значения, максимальный уровень сброса) и вычисляется вероятность сброса.

Например, очереди могут иметь более низкие пороговые значения для более низких приоритетов пакета. Это приведет к отбрасыванию пакетов с низким приоритетом, а следовательно, к защите пакетов с более высоким приоритетом в той же очереди.

2.4 NLRED

Nonlinear RED — это модификация классического алгоритма RED, в отличие от которого использует нелинейную функцию для определения вероятности отбрасывания пакетов, что позволяет более гибко регулировать процесс управления перегрузками, учитывая различные характеристики трафика и динамику сети [7, 8]. Вероятность p_b маркировки на отбрасывание пакетов вычисляется следующим способом: а

$$p_b = \begin{cases} 0, & 0 < \hat{q} \leq q_{min} \\ 1, & \hat{q} > q_{max} \\ \frac{\hat{q} - q_{min}}{q_{max} - q_{min}} 2.5 p_{max}^2, & q_{min} < \hat{q} \leq q_{max} \end{cases}$$

График функции вероятности потери пакета в зависимости от среднего размера очереди выглядит следующим образом (рис. 2.4):

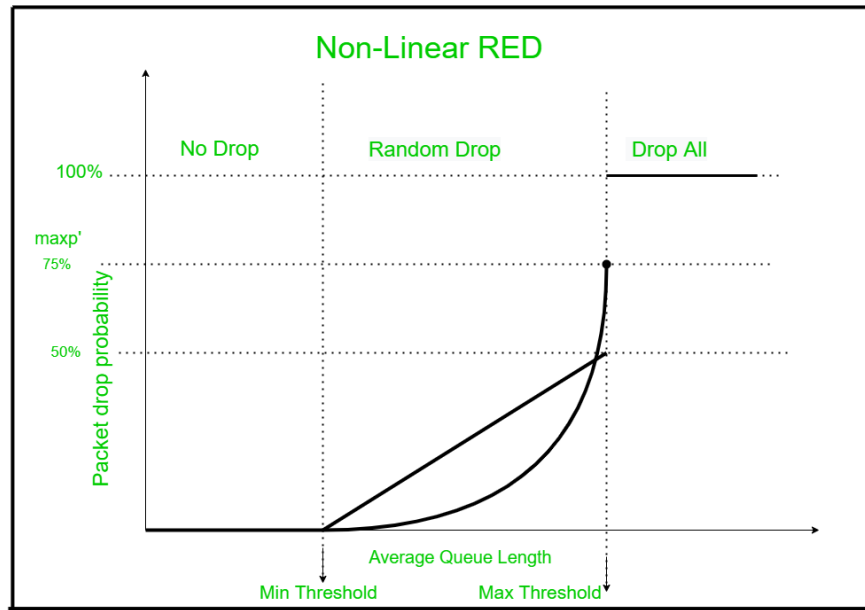


Рис. 2.4: NonLinear RED

По умолчанию NLRED не реализована в NS-2. Для её добавления я проделал следующие шаги:

1. Установил к себе на машину патч NLRED.patch от Mohit P. Tahiliani для версии 2.34, совместимой также для версии 2.35.
2. Отредактировал файл, заменив везде номер версии на 2.35 и переместил в каталог ns-allinone.
3. В терминале запустил команду `patch -p1 < NLRED.patch`, а затем запустил `./install`.
4. В настройке очереди сети указал значение переменной `nonlinear 2`.

2.5 ARED и RARED

В алгоритме Adaptive RED (ARED) функция сброса модифицируется посредством изменения по принципу AIMD, заключающейся в том, что увеличение некоторой величины производится путём сложения с некоторым параметром, а уменьшение — путём умножения на параметр.) [9]. Для её реализации в NS-2 необходимо указать в настройке очереди `set adaptive 2`.

Алгоритм ARED функционирует следующим образом. Для каждого интервала `interval` (параметр) в секундах, если \hat{q} больше целевой (желаемой) \hat{q}_t и $p_{max} \leq 0,5$, то p_{max} увеличивается на некоторую величину α ; в противном случае, если \hat{q} меньше целевой \hat{q}_t и $p_{max} \geq 0,01$, то p_{max} уменьшается в β раз:

$$p_{max} = \begin{cases} p_{max} + \alpha, & \hat{q} > \hat{q}_t, p_{max} \leq 0,5 \\ \beta * p_{max}, & \hat{q} < \hat{q}_t, p_{max} \geq 0,01 \end{cases}$$

где

$$q_{min} + 0,4(q_{max} - q_{min}) < \hat{q}_t < q_{min} + 0,6(q_{max} - q_{min})$$

Основные особенности:

- автоматическая установка минимального порога (q_{min}). Он устанавливается в зависимости от пропускной способности канала (C) и задержки целевой очереди;
- автоматическая установка максимального порога (q_{max}). Он устанавливается в зависимости от значения месяца;
- автоматическая настройка wq . Он устанавливается в зависимости от пропускной способности канала (C);
- адаптивная настройка p_{max} . Он адаптирован в соответствии с текущей средней длиной очереди.

Алгоритм Refined ARED (RARED) является модификацией ARED и предлагает более активно изменять вероятность сброса p_{max} , чтобы иметь возможность быстрой адаптации к изменяющейся экспоненциально взвешенной скользящей средней длине очереди \hat{q} :

$$p_b = \begin{cases} p_{max} + \alpha, & \hat{q} > \hat{q}_t, p_{max} \leq 0,5 \\ \beta p_{max}, & \hat{q} \leq \hat{q}_t, p_{max} \geq 0,5 \end{cases}$$

где

$$q_{min} + 0,48(q_{max} - q_{min}) < \hat{q}_t < q_{min} + 0,52(q_{max} - q_{min})$$

$$\alpha = (0,25 \frac{\hat{q} - \hat{q}_t}{\hat{q}_t}) p_{max}, \quad \beta = 1 - (0,17 \frac{\hat{q} - \hat{q}_t}{\hat{q}_t - q_{min}})$$

По умолчанию REARED не реализован в NS-2. Для его добавления я проделал следующие шаги:

1. Установил к себе на машину патч Re-ARED.patch от Mohit P. Tahiliani для версии 2.34, совместимой также для версии 2.35.
2. Отредактировал файл, заменим везде номер версии на 2.35 и переместил в каталог ns-allinone.

3. В терминале запустил команду `patch -p1 < ReARED.patch, ./install`.
4. В настройке очереди сети указал значение переменной `adaptive 1` и для RARED дополнительно `refined adaptive 2`.

Глава 3

Результаты

Мною был написана программа, реализующая имитационную модель сети со следующей топологией:

- $N = 20$ ТСП-источников, N ТСП-приёмников, двух маршрутизаторов R1 и R2 между источниками и приёмниками (N — не менее 20);
- между ТСП-источниками и первым маршрутизатором установлены дуплексные соединения с пропускной способностью 100 Мбит/с и задержкой 20 мс очередью типа DropTail;
- между ТСП-приёмниками и вторым маршрутизатором установлены дуплексные соединения с пропускной способностью 100 Мбит/с и задержкой 20 мс очередью типа DropTail;
- между маршрутизаторами установлено симплексное соединение (R1–R2) с пропускной способностью 20 Мбит/с и задержкой 15 мс очередью типа RED, размером буфера 300 пакетов; в обратную сторону — симплексное соединение (R2–R1) с пропускной способностью 15 Мбит/с и задержкой 20 мс очередью типа DropTail;
- данные передаются по протоколу FTP поверх TCP Reno;
- параметры алгоритма RED: $q_{min} = 75$, $q_{max} = 150$, $q_w = 0,002$, $p_{max} = 0.1$;
- максимальный размер ТСП-окна 32; размер передаваемого пакета 500 байт; время моделирования — не менее 20 единиц модельного времени.

Полная реализация программы приведена в разделе **Приложения**, для вывода графиков была использована программа GNUPLOT.

Смоделировав сеть с указанными параметрами и запустив gnuplot скрипт, я получил следующий график(рис. 3.1).

Как мы видим из первого графика, в момент времени $t = 1с$ достигается максимальные длины очереди 140000 пакетов и средней длины очереди 120000 пакетов, а

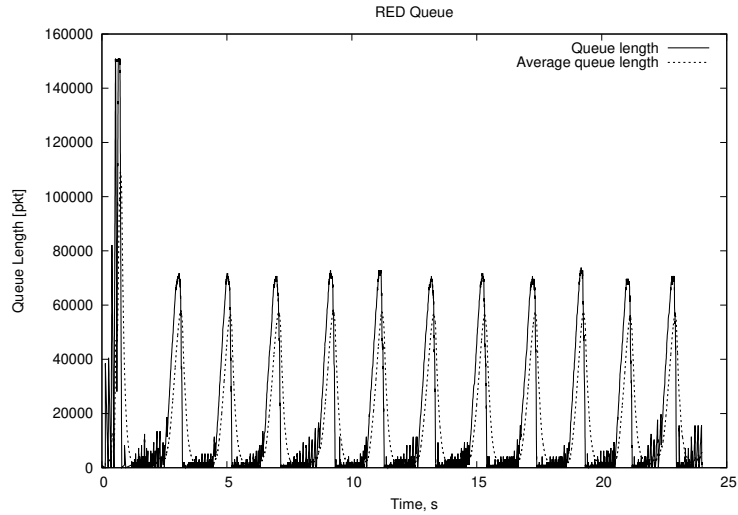


Рис. 3.1: График длины очередей на линке(R0-R1)($q_{min} = 75, q_{max} = 150, q_w = 0.002, p_{max} = 0.1$, TCP типа TCP/Reno)

при дальнейшем моделировании длина очереди варьируются от 0 до 70000 пакетов, а средняя очередь от 0 до 60000, наступает стационарное состояние.

Для выявления влияния пороговых значений на длину очереди смоделировал сеть и вывел в одном графике длины средней очереди при разных пороговых значений, и при одинаковых остальных параметров (рис. 3.2).

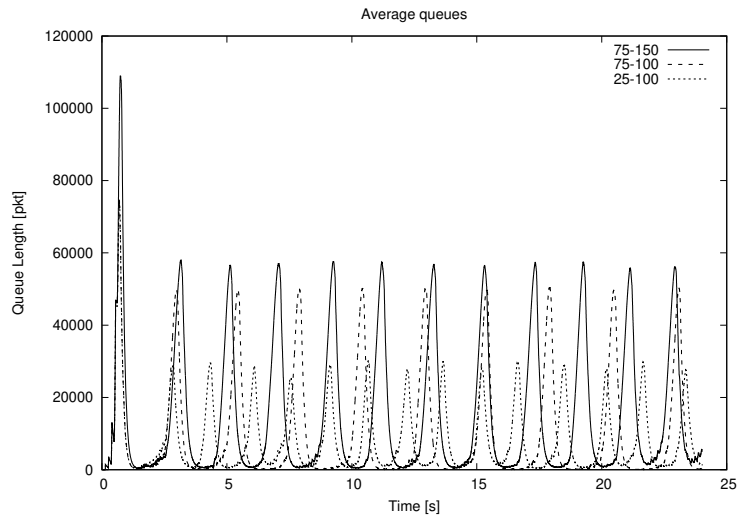


Рис. 3.2: График длины очередей при разных порогах

Как видно из графика, уменьшение увеличение диапазона между q_{min} и q_{max} способствует увеличению длины очереди на линке.

Для сравнений различных модификаций смоделировали сеть, задав в качестве очереди RED, GRED, NLRED, RARED(рис. 3.3, 3.4, 3.5, 3.6).

Различие между RARED с остальными модификациями легко объяснять его автоматическим выбором минимального и максимального пороговых величин. Средняя

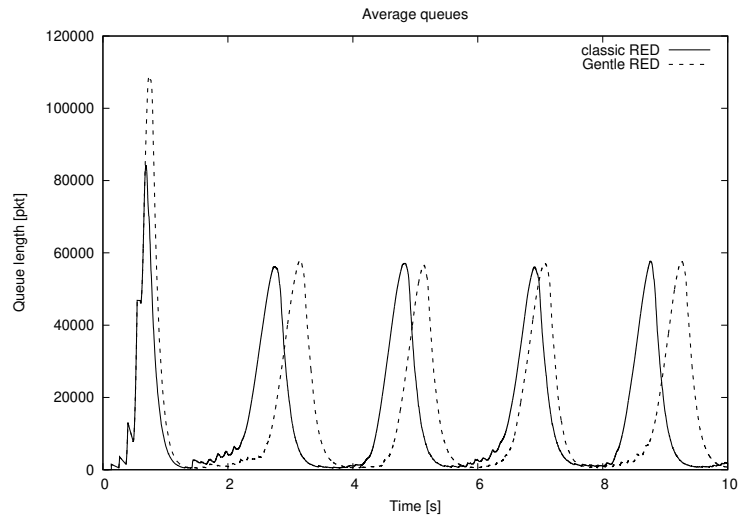


Рис. 3.3: Средняя очередь RED и GRED при одинаковых условиях

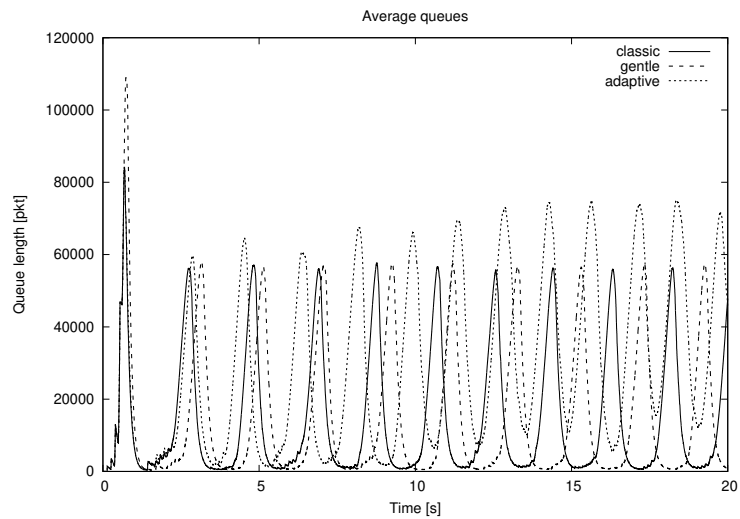


Рис. 3.4: Средние очереди RED, GRED, ARED при одинаковых условиях

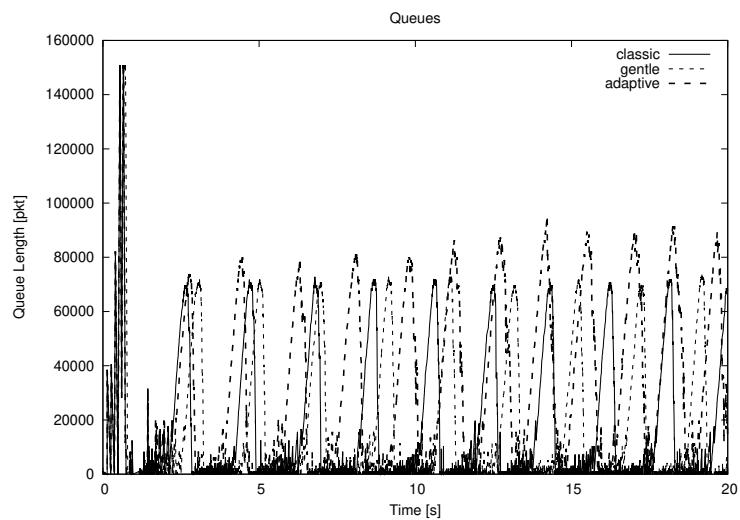


Рис. 3.5: Очереди RED, GRED, ARED при одинаковых условиях

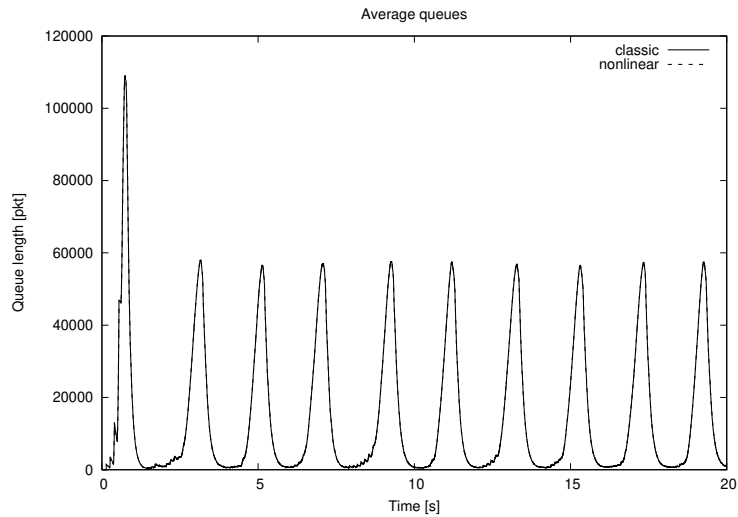


Рис. 3.6: Средние очереди RED, NLRED при одинаковых условиях

очередь при Gentle Red до стационарного состояния гораздо выше, что объясняется его более мягким алгоритмом. Моделирование NLRED не показало никаких различий с классическим RED, что указывает на неработоспособность патча.

Смоделировали сеть при разных TCP(Reno, Vegas и Newreno) (рис. 3.7, 3.8, 3.9).

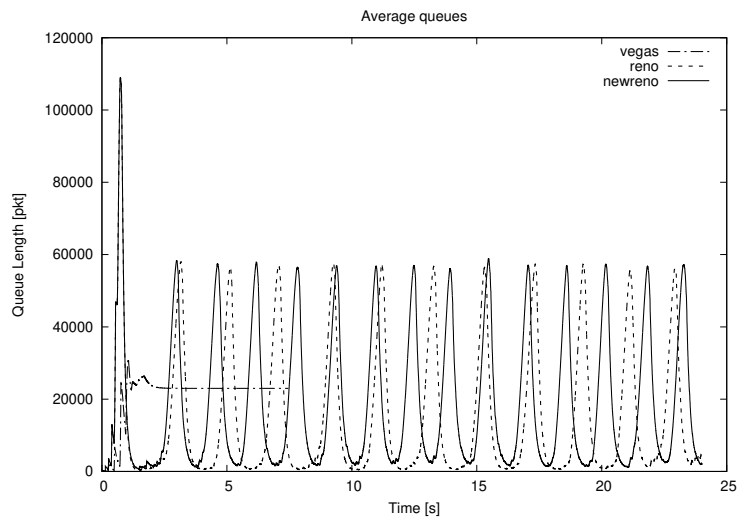


Рис. 3.7: График длины очередей на линке(R0-R1) при разных TCP

Такое заметное отличие TCP/Vegas от TCP/Reno и TCP/Newreno объясняется тем, что он использует альтернативный подход к управлению очередями. Вместо использования потери пакетов в качестве индикатора перегрузки сети, вместо этого он анализирует задержку пакетов в сети и использует данную информацию для определения, происходит ли перегрузка сети.

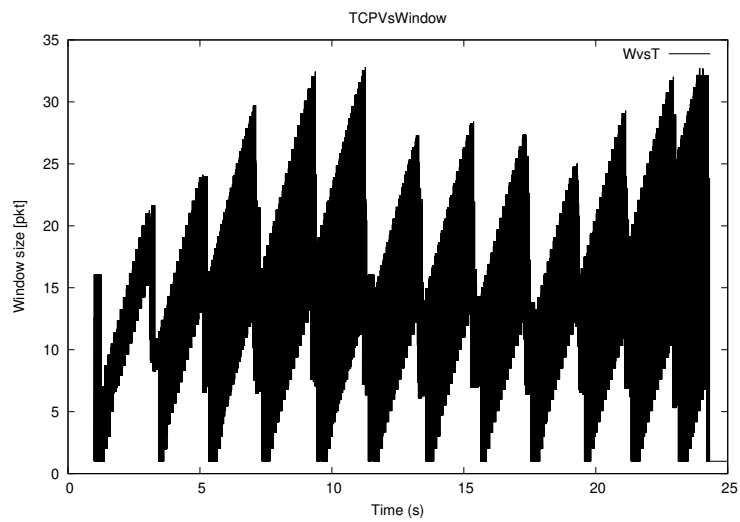


Рис. 3.8: График размера TCP окна для всех источников(TCP типа TCP/Reno)

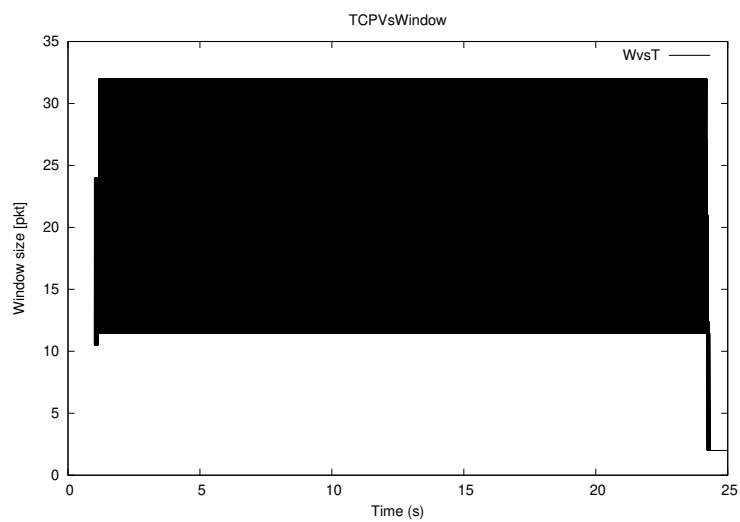


Рис. 3.9: График размера TCP окна для всех источников(TCP типа TCP/Vegas)

Заключение

За период практики в отделе информационно-технологического обеспечения естественно-научных факультетов УИТО и СТС, были достигнуты все цели и решены все задачи, определенные в программе научной практики направления подготовки 09.03.03 "Прикладная информатика" программы "Прикладная информатика" (см. введение отчёта по практике). В процессе прохождения практики я работал с научной терминологией области исследований; научился собирать и обрабатывать данные научных, необходимых для формирования соответствующих выводов исследований; осуществлять целенаправленный поиск информации на русском и английском языках о новейших научных достижений в Интернете и из других источников; строить и анализировать имитационные модели объекта исследований.

В результате прохождения данной практики я приобрел следующие практические навыки, умения, универсальные и профессиональные компетенции:

- способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла (постановка задачи, планирование, реализация);
- способность составлять естественно-научные отчеты с IMRAD структурой (Введение, Методы и материалы, Результаты и Дискуссия);
- способность разрабатывать имитационные модели и проводить их анализ при решении задач в области (составлена имитационная модель сети с алгоритмом управления очередью между маршрутизаторами типа RED);
- способность профессиональной деятельности способность проведения работ по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований (изучение необходимой литературы по теме исследования на русском и английском языках, подготовка литературного обзора по теме исследований);

Таким образом, в рамках практики я рассмотрел моделирование модуля RED с помощью программного средства NS-2 версии 2.35. Также представлена программная реализация имитационной модели сети модулем RED и проведен сравнительный анализ результатов при моделировании сети с разными входными параметрами, модификаций RED и типов TCP окна.

Литература

- [1] loyd, Sally and Fall, Kevin Ns Simulator Tests for Random Early Detection (RED) Queue Management — 1997. — April.
- [2] The VINT and Project The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation) — 2011. — November.
- [3] Floyd S., Jacobson V. Random Early Detection Gateways for Congestion // IEEE/ACM Transactions on Networking. — IEEE. — 1993. — November. — T. 1, № 4. — C. 397–413. — doi:10.1109/90.251892.
- [4] Abouzeid A., Roy S. Modeling random early detection in a differentiated services network q // Computer Networks ed. by Roberts J. — IEEE. — 2002. — November — T. 40, № 4. — C. 537–556. — doi:10.1016/S1389-1286(02)00295-5.
- [5] Hamadneh N. и др. Revisiting the Gentle Parameter of the Random Early Detection (RED) for TCP Congestion Control // Journal of Communications. Engineering — Engineering and Technology Publishing. — 2019. — T. 40, № 4. — C. 229–235 — doi:10.12720/jcm.14.3.
- [6] Hamadneh, Nabhan and Murray, David and Dixon, Michael and Cole, Peter Weighted RED (WTRED) Strategy for TCP Congestion Control // ICIEIS 2011 — Springer. — 2011. — T. 2. — C. 421–434 — doi:110.1007/978-3-642-25453-6-37.
- [7] Lingyun Lu and Yang Xiao and Seok Woo and Kiseon Kim Nonlinear AQM for Multiple RED Routers // 2008 Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology. — IEEE. — 2008. — November — doi:10.1109/iccit.2008.68.
- [8] Kaiyu Zhou and Kwan L. Yeung and Victor O.K. Li Nonlinear RED: A simple yet efficient active queue management scheme // Computer Networks ed. by Roberts J. — Elsevier BV. — 2006. — December. — T. 50, № 18. — C. 3784–3794. — doi:10.1016/j.comnet.2006.04.007.
- [9] Kim', Tae-Hoon and Lee', Kee-Hyun Refined Adaptive RED in TCP/IP Networks // SICE-ICASE International Joint Conference 2006 Oct. 18-21, 2006 in Bexco, Busan, Korea— IEEE. — 2006. — October. — doi:10.1109/SICE.2006.314633.

Приложения

```
- main.tcl
...

#Создать новый экземпляр объекта Simulator
set ns [new Simulator]
#Открыть трейс файл для nam
set nf [open output/out.nam w]
$ns namtrace-all $nf
set N 20
source "nodes.tcl"
source "links.tcl"
source "queue.tcl"
source "connections.tcl"
source "timing.tcl"
source "nam.tcl"
source "finish.tcl"
#Запуск программы
$ns run
...

- nodes.tcl
...

set node_(r0) [$ns node]
set node_(r1) [$ns node]

for {set i 0} {$i < $N} {incr i} {
    set node_(s$i) [$ns node]
    set node_(s[expr $N + $i]) [$ns node]
}
...

- links.tcl
...
```

```

for {set i 0} {$i < $N} {incr i} {
    $ns duplex-link $node_(s$i) $node_(r0) 100Mb 20ms DropTail
    $ns duplex-link $node_(s[expr $N + $i]) $node_(r1) 100Mb 20ms DropTail
}

$ns simplex-link $node_(r0) $node_(r1) 20Mb 15ms RED
$ns simplex-link $node_(r1) $node_(r0) 15Mb 20ms DropTail
...

- nam.tcl
...

$node_(r0) color "red"
$node_(r1) color "red"
$node_(r0) label "RED"
$node_(r1) shape "square"
$node_(r0) label "square"

$ns simplex-link-op $node_(r0) $node_(r1) orient right
$ns simplex-link-op $node_(r1) $node_(r0) orient left
$ns simplex-link-op $node_(r0) $node_(r1) queuePos 0
$ns simplex-link-op $node_(r1) $node_(r0) queuePos 0

for {set m 0} {$m < $N} {incr m} {
    $ns duplex-link-op $node_(s$m) $node_(r0) orient right
    $ns duplex-link-op $node_(s[expr $N + $m]) $node_(r1) orient left
}

for {set i 0} {$i < $N} {incr i} {
    $node_(s$i) color "blue"
    $node_(s$i) label "ftp"
}
...

- connections.tcl
...

for {set t 0} {$t < $N} {incr t} {
    $ns color $t green
    set tcp($t) [$ns create-connection TCP/Reno $node_(s$t) TCPSink $node_(s[expr $N +
    $tcp($t) set window_ 32
    $tcp($t) set maxcwnd_ 32

```

```

set ftp($t) [$tcp($t) attach-source FTP]
}

proc plotWindow {tcpSource file} {
    global ns
    set time 0.01
    set now [$ns now]
    set cwnd [$tcpSource set cwnd_]
    puts $file "$now $cwnd"
    $ns at [expr $now+$time] "plotWindow $tcpSource $file"
}
...

- queue.tcl
...

$ns queue-limit $node_(r0) $node_(r1) 300
$ns queue-limit $node_(r1) $node_(r0) 300

set windowVsTime [open output/WvsT w]
set qmon [$ns monitor-queue $node_(r0) $node_(r1) [open output/qm.out w]]
[$ns link $node_(r0) $node_(r1)] queue-sample-timeout

set redq [[[$ns link $node_(r0) $node_(r1)] queue]
$redq set thresh_ 75 #q_min
$redq set maxthresh_ 150 #q_max
$redq set q_weight_ 0.002 # q_weight
$redq set linterm_ 10 # 1/p_max
$redq set gentle_ false #
$redq set drop-tail_ true
$redq set queue-in-bytes false #очередь в пакетах
$redq set mean_pktsize_ 500
set tchan_ [open output/all.q w]
$redq trace curq_
$redq trace ave_
$redq attach $tchan_
...

- timing.tcl
...

```

```

for {set r 0} {$r < $N} {incr r} {
    $ns at 0.0 "$ftp($r) start"
    $ns at 1.0 "plotWindow $tcp($r) $windowVsTime"
    $ns at 24.0 "$ftp($r) stop"
}

$ns at 25.0 "finish"
...

- finish.tcl
...

#Finish procedure
proc finish {} {
    global ns nf
    $ns flush-trace
    close $nf
    global tchan_
    set awkCode {
        {#запись данных в файлы очереди и средней очереди
if ($1 == "Q" && NF>2) {
    print $2, $3 >> "output/temp.q";
    set end $2
}
else if ($1 == "a" && NF>2)
print $2, $3 >> "output/temp.a";
    }
}

    set f [open output/temp.queue w]
    puts $f "TitleText: RED"
    puts $f "Device: Postscript"

    if { [info exists tchan_] } {
        close $tchan_
    }

    #обновление данных
    exec rm -f output/temp.q output/temp.a
    exec touch output/temp.a output/temp.q

```



```

exec awk $awkCode output/all.q

puts $f "\"queue
exec cat output/temp.q >@ $f
puts $f \"\\n\\\"ave_queue
exec cat output/temp.a >@ $f
close $f

# вывод в xgraph
exec xgraph -bb -tk -x time -t "TCPRenoCWND" output/WvsT &
exec xgraph -bb -tk -x time -y queue output/temp.queue &
exit 0
}
...

- out.gp
...

#!/usr/bin/gnuplot -persist

#вывод графиков
set terminal postscript eps
set output "images/queues.eps"
set xlabel "Time, s"
set ylabel "Queue Length [pkt]"
set title "RED Queue"
plot "output/temp.q" with lines linestyle 1 lt 1 lw 2 title "Queue length", "output

set terminal postscript eps
set output "images/TCP.eps"
set xlabel "Time (s)"
set ylabel "Window size [pkt]"
set title "TCPVsWindow"
plot "output/WvsT" with lines linestyle 1 lt 1 lw 2 title "WvsT"
...

```