

Отчёт по практической работе

Саргсян Арам Грачьевич

Содержание

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Введение | 5 |
| 2 | Основные методы моделирования сетей | 7 |
| 2.1 | NS-2 | 7 |
| 2.2 | Mininet | 8 |
| 2.3 | Cisco Packet Tracer | 8 |
| 2.4 | GNS-3 | 9 |
| 3 | RED | 10 |
| 3.1 | Classic RED | 10 |
| 3.2 | GRED | 12 |
| 3.3 | WRED | 13 |
| 3.4 | NLRED | 14 |
| 3.5 | ARED и RARED | 16 |
| 4 | Результаты | 18 |
| 5 | Заключение | 25 |
| | Список литературы | 27 |
| | Приложения | 29 |
| | \$\$ | |

**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)

на тему «Имитационное моделирование NS-2»

Место прохождения практики: Российский университет дружбы народов

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

Выполнил студент: Саргсян Арам

Грачьевич Группа 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

г. Москва

2023 г.

\$\$

1 Введение

Согласно программе научной практики направления подготовки 09.03.03 “Прикладная информатика” программы “Прикладная информатика” целями научно-исследовательской работы (получении первичных навыков научно-исследовательской работы) являются:

- формирование навыков использования современных научных методов для решения научных и практических задач;
- формирование универсальных и профессиональных компетенций в соответствии с ОС ВО РУДН;
- формирование навыков проведения исследовательской работы и 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.

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 натурального 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.

2 Основные методы моделирования сетей

2.1 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[2].

2.2 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 исследования новых протоколов и алгоритмов.

2.3 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.

2.4 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.

3 RED

3.1 Classic RED

RED(Random early detection) — 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 [4].

Вероятность p_b маркировки на отбрасывание пакетов представляет собой функцию, линейно зависящую от \hat{q} , минимального q_{min} и максимального q_{max} поро-

говых 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(3.1):

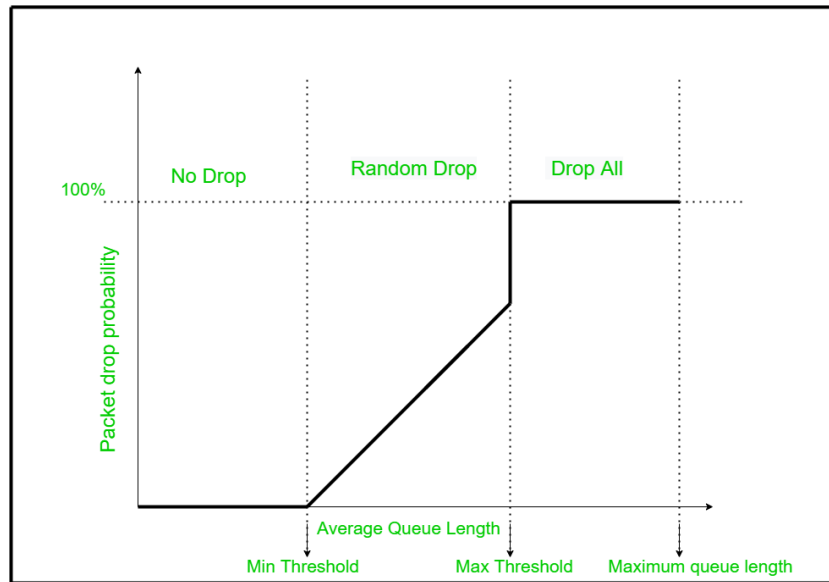


Рис. 3.1: классический RED

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_a,
    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
        p = 1.0;
    } else { //p в промежутке от 0 до max_p, тогда средний размер очереди в п
        p = v_a * v_ave + v_b;
        // p = (v_ave - th_min) / (th_max - th_min)
        p *= max_p;
    }
    if (p > 1.0)и //пакеты отбрасываются
        p = 1.0;
    return p;
}

```

3.2 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 1. 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 `gentle_true`.

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(3.2):

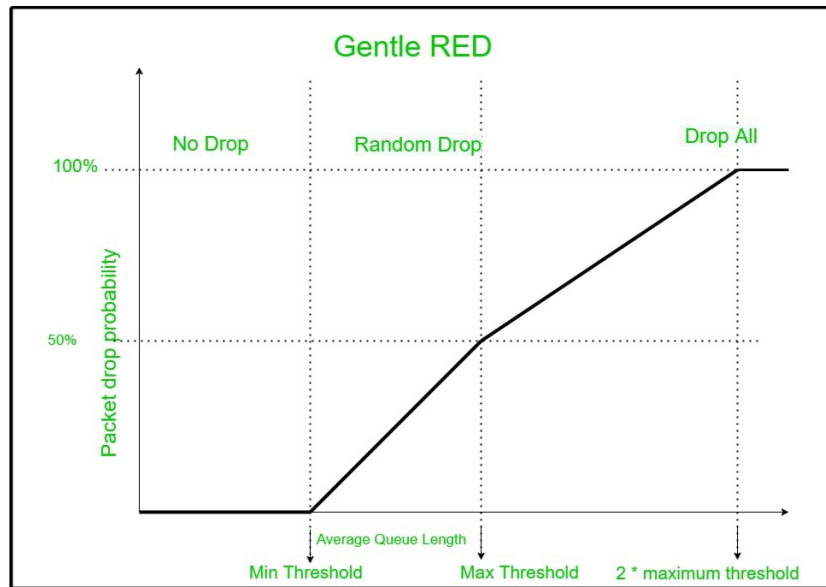


Рис. 3.2: Gentle RED

3.3 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(3.3).

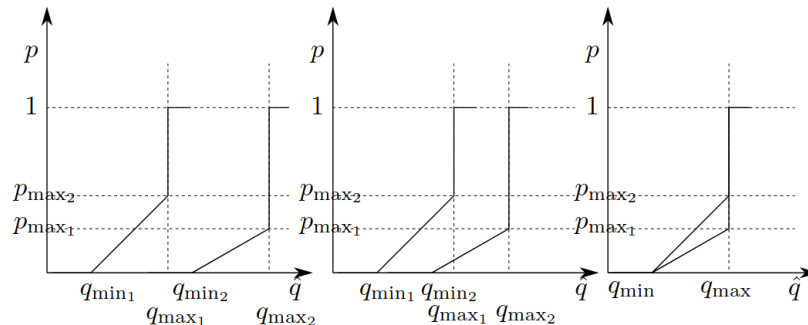


Рис. 3.3: Weigheed RED

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.

3.4 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[8]. Вероятность p_b маркировки на отбрасывание пакетов вычисляется следующим способом:

а

$$p_b = \begin{cases} 0, & 0 < \hat{q} \leq q_{min} \\ 1, & \hat{q} > q_{max} \\ \frac{\hat{q} - q_{min}}{q_{max} - q_{min}} 1.5 p_{max}^2, & q_{min} < \hat{q} \leq q_{max} \end{cases}$$

График функции вероятности потери пакета в зависимости от среднего размера очереди выглядит следующим образом(3.4):

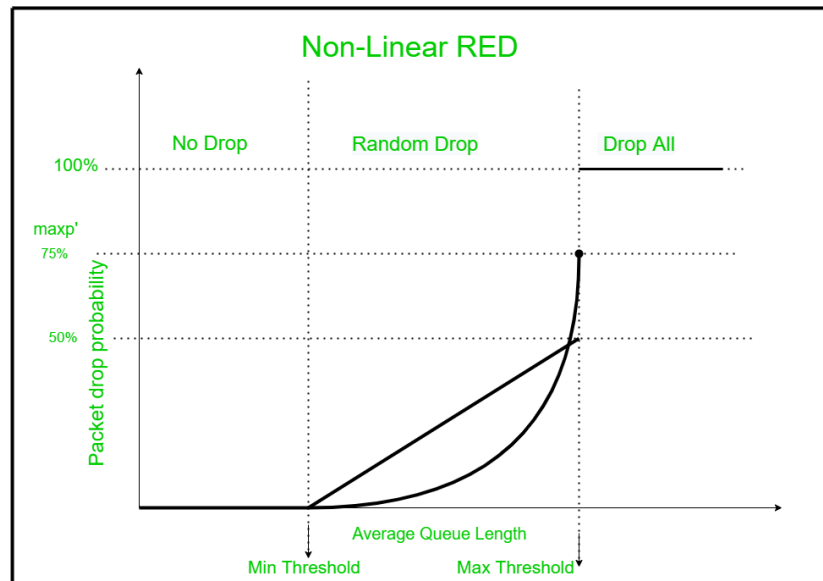


Рис. 3.4: NonLinear RED

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_1`.

3.5 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, у уменьшение — путём умножения на параметр.)[9]. Для её реализации в NS-2 необходимо указать в настройке очереди `set adaptive_1`.

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

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

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

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 < Re_ARED.patch`, а затем запустил `./install`.
4. В настройке очереди сети указал значение переменной `adaptive_1` и для RARED дополнительно `refined_adaptive_1`.

4 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(4.1).

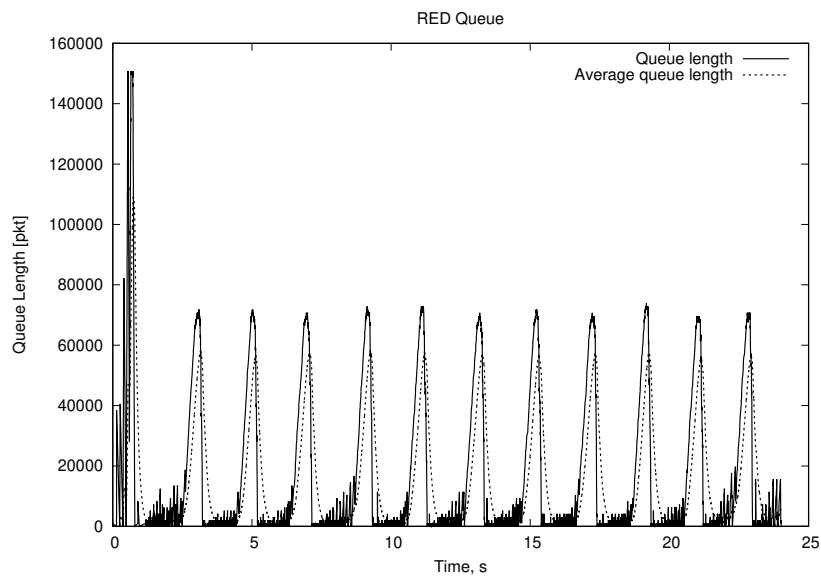


Рис. 4.1: График длины очередей на линке(R0-R1)($q_{min} = 75$, $q_{max} = 150$, $q_w = 0.002$, $p_{max} = 0.1$, TCP типа TCP/Reno)

Как мы видим из первого графика, в момент времени $t = 1c$ достигается максимальные длины очереди 140000 пакетов и средней длины очереди 120000 пакетов, а при дальнейшем моделировании длина очереди варьируются от 0 до 70000 пакетов, а средняя очередь от 0 до 60000.

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 (4.1).

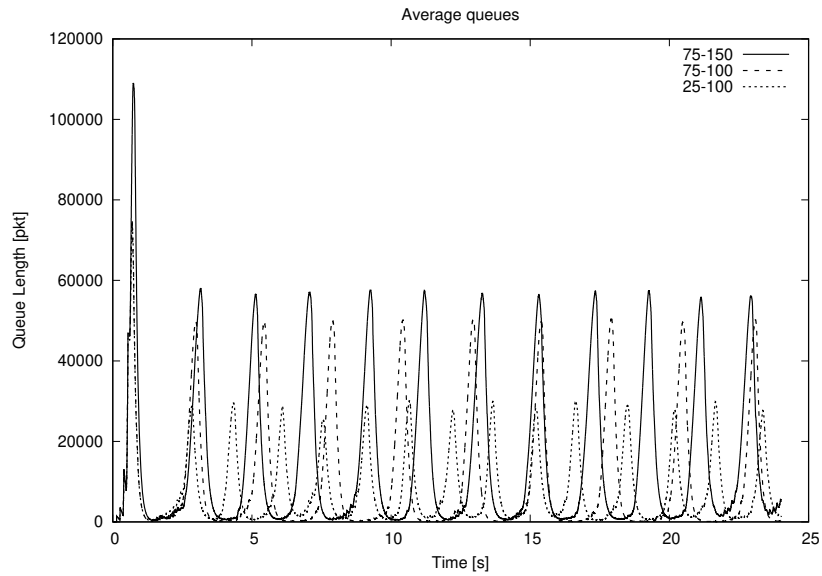


Рис. 4.2: График длины очередей на линке(R0-R1)(для всех случаев $q_w = 0.002, p_{max} = 0.1$, TCP типа TCP/Reno)

Как видно из графика, уменьшение увеличения 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 (4.5, 4.3, 4.4).

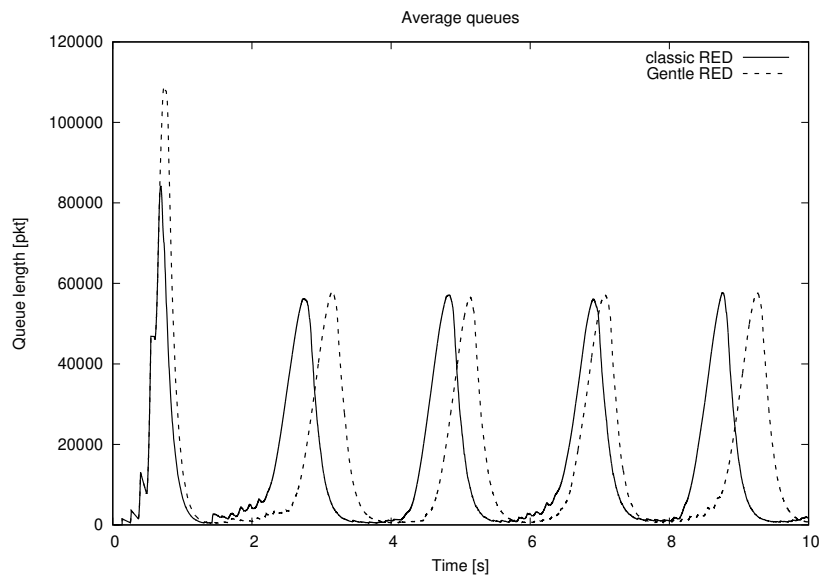


Рис. 4.3: Средняя очередь RED и GRED при одинаковых условиях

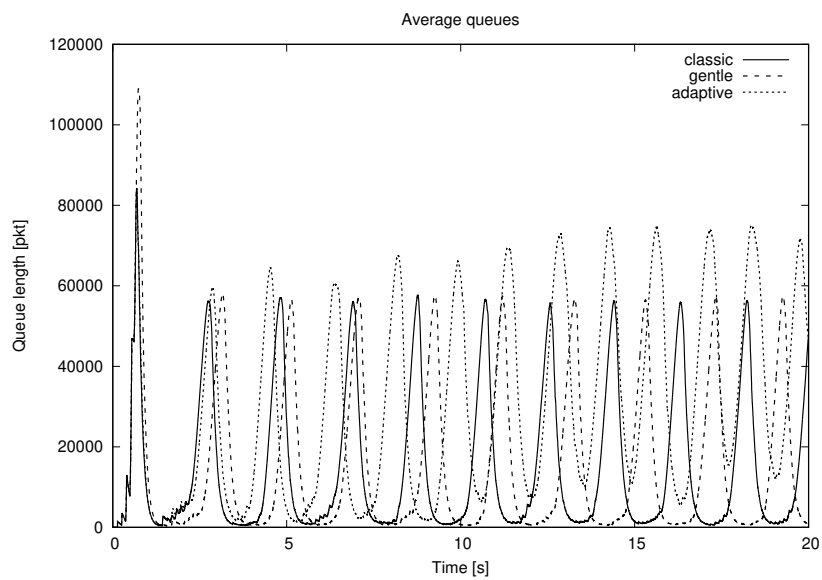


Рис. 4.4: Средние очереди RED, GRED, ARED при одинаковых условиях

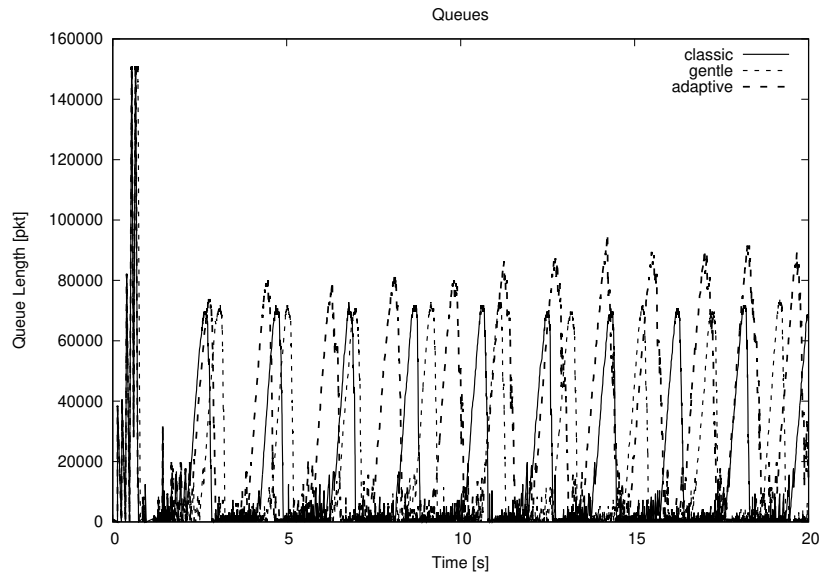


Рис. 4.5: Очереди RED, GRED, ARED при одинаковых условиях

Различие между RARED с остальными модификациями легко объяснять его автоматическим выбором минимального и максимального пороговых величин. Средняя очередь при Gentle Red до стационарного состояния гораздо выше, что объясняется его более мягким алгоритмом.

Смоделировали сеть при разных TCP(Reno, Vegas и Newreno)(4.6, 4.7, 4.8).

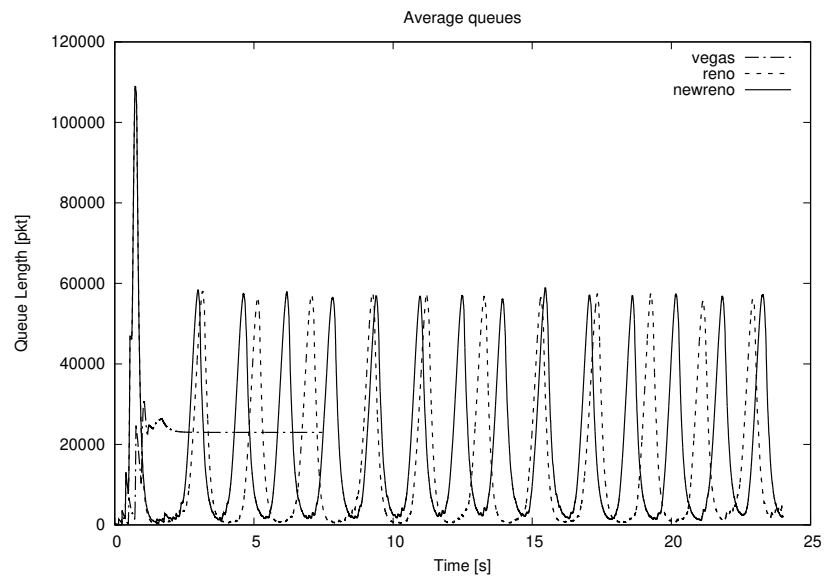


Рис. 4.6: График длины очередей на линке(R0-R1) при разных TCP

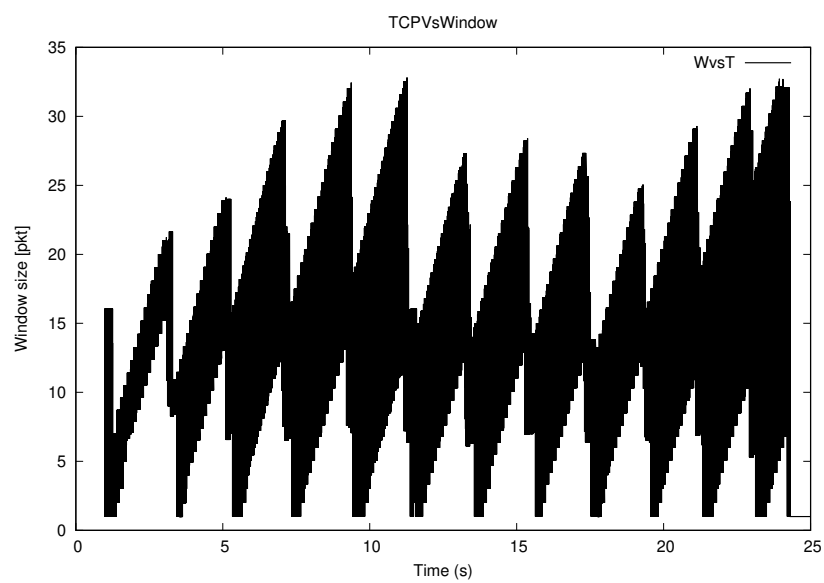


Рис. 4.7: График размера TCP окна для всех источников(TCP типа TCP/Reno)

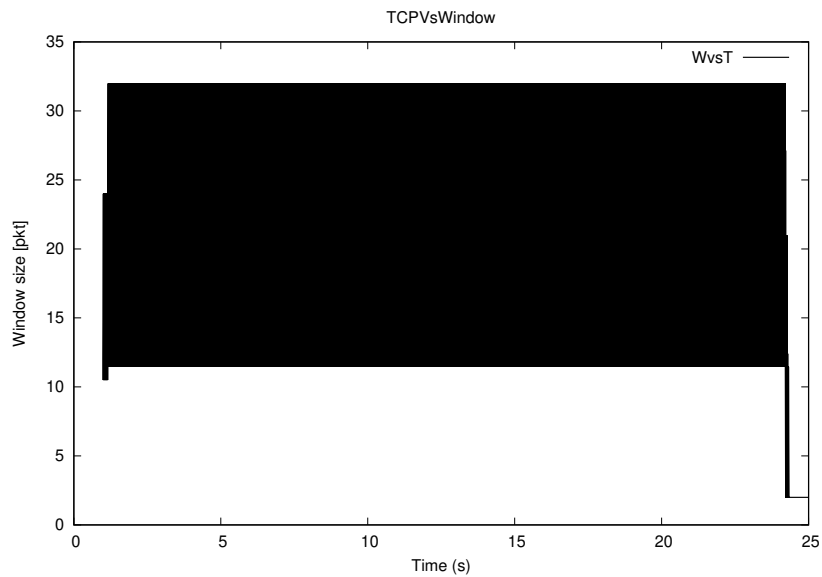


Рис. 4.8: График размера TCP окна для всех источников (TCP типа TCP/Vegas)

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.

5 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 достижениях 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.

Список литературы

1. VINT T., Project. The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation). 2011.
2. Floyd S., Fall K. Ns Simulator Tests for Random Early Detection (RED) Queue Management. 1997.
3. Floyd S., Jacobson V. Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance --- IEEE/ACM Transactions on Networking. IEEE, 1993. T. 1, № 4. С. 397–413.
4. Abouzeid A., Roy S. Modeling random early detection in a differentiated services network q --- Computer Networks / под ред. Roberts J. IEEE, 2002. T. 40. С. 537–556.
5. Hamadneh N. и др. Revisiting the Gentle Parameter of the Random Early Detection (RED) for TCP Congestion Control --- Journal of Communications. Engineering; Technology Publishing, 2019. С. 229–235.
6. Hamadneh N. и др. Weighted RED (WTRED) Strategy for TCP Congestion Control --- ICIEIS 2011 / под ред. Abd A., al. M. et. Springer, 2011. T. II. С. 421–434.
7. Lu L. и др. Nonlinear AQM for Multiple RED Routers --- 2008 Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology. IEEE, 2008.
8. Zhou K., Yeung K.L., Li V.O.K. Nonlinear RED: A simple yet efficient active queue management scheme --- Computer Networks / под ред. Lea C.-T. Elsevier BV, 2006. T. 50, № 18. С. 3784–3794.

9. Kim' T.-H., Lee' K.-H. Refined Adaptive RED in TCP/IP Networks --- SICE-ICASE International Joint Conference 2006 Oct. 18-21, 2006 in Bexco, Busan, Korea. IEEE, 2006.

Приложения

Имитационная модель сети

- 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
    $tcp($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 \"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
}
```