

Оценка характеристик сетей Ethernet с помощью параметрических моделей Петри

Д.А. Зайцев, Т.Р. Шмелёва

Введение

Технология Ethernet доминирует в настоящее время в секторе локальных сетей. Кроме того, 1Gb и 10Gb стандарты позволяют позиционировать Ethernet как универсальную сетевую технологию, поскольку операторы связи широко применяют решения типа «Ethernet поверх DWDM» в магистральных сетях.

Проектирование эффективных локальных и магистральных сетей требует достоверных оценок пропускной способности и качества обслуживания. Перспективное в настоящее время управляемое моделью проектирование телекоммуникационных сетей и устройств основано на экспресс-оценках характеристик, получаемых в кратчайшие сроки для новых проектных решений, что обуславливает актуальность исследования.

Раскрашенные сети Петри [1] и система CPN Tools [2] успешно применяются для моделирования локальных сетей Ethernet [3], магистральных сетей TCP/IP и MPLS [4], беспроводных сетей Bluetooth [5]. Причём раскрашенная сеть Петри позволяет не только моделировать телекоммуникационную сеть, но также выполнить оценку её характеристик с помощью специальных измерительных фрагментов [6,7] в процессе имитационного моделирования.

В указанных работах в основу построения моделей телекоммуникационных сетей положен модульный подход: модель сети komponуется из ранее построенных подмоделей сетевых (коммутатор, маршрутизатор) и оконечных (рабочая станция, сервер) устройств. Существенными недостатками этого подхода является необходимость перекомпоновки модели для каждой новой структурной схемы сети, а также сравнительно большое общее количество используемых элементов сети Петри, что существенно замедляет процессы построения и исследования моделей.

Предложенная в [8] параметрическая модель коммутируемой Ethernet имеет фиксированную структуру для произвольной иерархической топологии, элементами которой являются коммутаторы, рабочие станции и серверы. Конкретная топология сети вводится в форме упакованных матриц как маркировка соответствующих позиций сети Петри. Однако, в [8] изучены лишь принципы построения параметрических моделей Петри и не исследованы вопросы оценки характеристик моделируемых сетей.

Целью настоящей работы является построение измерительных фрагментов параметрической модели коммутируемой Ethernet для оценки пропускной способности (трафика), качества обслуживания (времени доставки фрейма), а также размеров внутренних буферов коммутаторов. Кроме того, для подтверждения адекватности построенных моделей разработана методика измерения перечисленных характеристик на реальных сетях.

1. Измерение характеристик реальных сетей

Адекватность моделей реальным объектам является основным вопросом исследования. Поэтому, прежде чем приступить к описанию моделей, целесообразно рассмотреть методику измерения и оценки характеристик реальных сетей для того, чтобы затем применить её к построенным моделям и сравнить полученные результаты. Натурные измерения функциональных характеристик были выполнены на реальных локальных сетях; пример сети представлен на рис. 1.

Наиболее просто организовать измерения на терминальных устройствах сети с помощью анализатора пакетов WinDump для операционных систем семейства MS Windows (TCPDump для Unix). Результаты измерений были также подтверждены с помощью программного обеспечения SoftPerfect Network Protocol Analyzer.

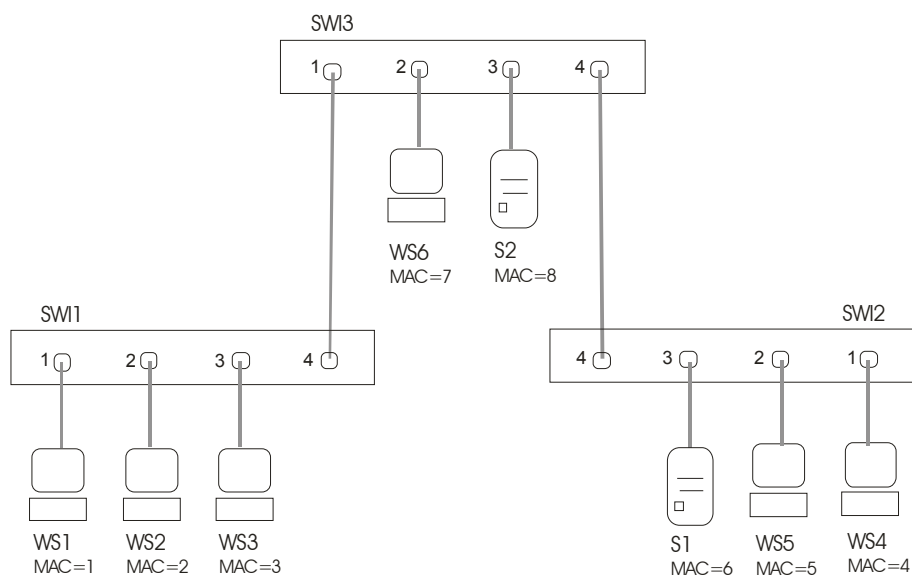


Рис. 1. Пример коммутируемой сети

WinDump представляет собой программное обеспечение с интерфейсом командной строки, которое обеспечивает запись передаваемых фреймов Ethernet, дополненных временными штампами, в файл. Затем содержимое файла можно просматривать и анализировать. Следует отметить, что WinDump оптимизирован по потребляемым ресурсам и может работать достаточно долго в фоновом режиме, практически не снижая производительность компьютера. Следующая командная строка обеспечивает запись фреймов в файл SavedFrames:

```
WinDump -w SavedFrames
```

Для анализа процессов передачи фреймов и вычисления времени доставки можно использовать следующую командную строку:

```
WinDump -ttt -r SavedFrames
```

Опция `-ttt` использована для автоматического вычисления временного интервала между поступлением фреймов; опция `-r` обеспечивает чтение ранее сохранённой информации из файла SavedFrames. Пример полученного листинга представлен на рис. 2.

```

000252 IP 192.168.0.158.1172 > 192.168.0.130.139: P 854:917(63) ack 840 win 64957
000854 IP 192.168.0.130.139 > 192.168.0.158.1172: . 840:2300(1460) ack 917 win 64502
000141 IP 192.168.0.130.139 > 192.168.0.158.1172: . 2300:3760(1460) ack 917 win 64502
000029 IP 192.168.0.158.1172 > 192.168.0.130.139: . ack 3760 win 65535
000107 IP 192.168.0.130.139 > 192.168.0.158.1172: . 3760:5220(1460) ack 917 win 64502
000138 IP 192.168.0.130.139 > 192.168.0.158.1172: . 5220:6680(1460) ack 917 win 64502
000024 IP 192.168.0.158.1172 > 192.168.0.130.139: . ack 6680 win 65535
000114 IP 192.168.0.130.139 > 192.168.0.158.1172: . 6680:8140(1460) ack 917 win 64502
000086 IP 192.168.0.130.139 > 192.168.0.158.1172: P 8140:9095(955) ack 917 win 64502
000287 IP 192.168.0.158.1172 > 192.168.0.130.139: . ack 9095 win 65535
000606 IP 192.168.0.158.1172 > 192.168.0.130.139: P 917:980(63) ack 9095 win 65535
000729 IP 192.168.0.130.139 > 192.168.0.158.1172: . 9095:10555(1460) ack 980 win 64439
  
```

Рис. 2. Листинг фреймов

Рассмотрим информацию листинга фреймов. Первая колонка содержит интервалы между временами поступления фреймов в миллисекундах, затем следуют IP-адрес и номера портов отправителя и получателя. Поле двоеточия указаны поля заголовка пакета, такие как начальный и конечный номера передаваемых байтов, длина пакета в скобках, номер подтверждённого байта и длина окна. В рассматриваемом примере 192.168.0.158 является IP-адресом рабочей станции, а 192.168.0.130 IP-адресом сервера. Номер порта 139 соответствует сервису MS NetBIOS TCP, номер порта 1172 является случайно выбранным номером порта клиентского программного обеспечения.

Синхронизация времени и сравнение дампов фреймов на всех терминальных устройствах с помощью несложного программного обеспечения позволяет идентифицировать фреймы и вычислить времена их доставки. Полученная информация является первичной для вычисления характеристик качества обслуживания и пропускной способности сети. Следует отметить, что измерения на терминальных устройствах дают объективную информацию о фактически доставленных фреймах. Кроме того, измерения могут быть выполнены на сетевых устройствах.

Современные Ethernet коммутаторы предоставляют широкий спектр возможностей для измерения и анализа трафика. Коммутаторы фирмы CISCO, например, серий Catalyst 4000, 4900 (4948-10GE, ME 4924-10GE) реализуют такие сервисы мониторинга как: проверка состояния и возможностей порта, анализ данных портов Switch TopN, система сбора статистики RMON, анализатор портов SPAN (Switched Port Analyzer). Как правило, коммутатор имеет порт для непосредственного подключения консоли, кроме того, обеспечивается удалённый доступ с помощью Telnet, а также Web-интерфейс для ввода команд.

Проверка состояния порта коммутатора может быть выполнена командой:

```
show port [port_number]
```

проверка возможностей порта выполняется командой:

```
show port capabilities [port_number]
```

Сбор статистик портов TopN запускается командой:

```
show top [port_number]
```

отображение собранных статистик выполняется командой:

```
show top report [report_number]
```

Сервис TopN обеспечивает накопление такой информации как загрузка порта, количество переданных и принятых байтов, количество ошибок, количество переполнений буфера.

Запуск системы RMON выполняется командой:

```
set snmp rmon enable
```

Система RMON накапливают статистическую информацию о количестве переданных, принятых пакетов и ошибках для каждого порта. Кроме того, обеспечивается ряд дополнительных возможностей по генерации предупреждений в случае специально специфицированных событий.

Сервис SPAN даёт возможность перенаправить трафик выбранного порта на некоторый другой порт коммутатора для его последующего анализа. Например, команда

```
set span [nport1] [nport2]
```

перенаправляет трафик порта `nport1` в порт `nport2`. К порту назначения может быть подключено устройство, сохраняющее фреймы в некотором файле либо непосредственно анализирующее их. Таким образом, возможно получение информации аналогичной дампу фреймов с помощью программы `TCPDump`.

Для проверки адекватности моделей дампов фреймов был запущен на терминальных устройствах (рабочих станциях и серверах) локальной сети диспетчерского центра железной дороги (рис. 1), оснащённых системой ГИД Урал ВНИИЖТ [6]. Измерялось время доставки фреймов, аккумулированных в дампе за период работы равный одной рабочей смене (около 12 часов). Сравнение результатов с оценками, полученными далее с помощью моделей, позволяет сделать вывод, что ошибка оценки среднего времени доставки с помощью модели составляет не более 5%, что является достаточно хорошим результатом и подтверждает адекватность построенных моделей.

2. Параметрическая модель коммутируемой Ethernet

В настоящем разделе описана параметрическая модель коммутируемой Ethernet, ранее представленная на конференции «Моделирование и компьютерная графика-2005» [8]. Модель модифицирована: упрощены проверки в функциях запуска переходов за счёт совмещения переменных; добавлены ограничения на размер внутренних буферов коммутаторов; добавлены позиции, соответствующие дампу фреймов, для последующего вычисления характеристик.

Модель изображена на рис. 3; описания множеств цветов, переменных и функций, используемых в модели и далее в измерительных фрагментах приведены на рис. 4. Особенностью параметрической модели является то, что за счёт добавления специальных тегов, содержащих номер коммутатора и порта, к фреймам обеспечена реентерабельность. Модель имеет фиксированную структуру, содержащую 14 позиций и 8 переходов сети Петри для произвольной иерархической топологии, элементами которой являются коммутаторы, рабочие станции и серверы. Заметим, что левая часть сети Петри моделирует все коммутаторы Ethernet (названия элементов не содержат суффикс), правая верхняя часть – все рабочие станции (названия элементов имеют суффикс `WS`), левая нижняя часть – все серверы (названия элементов имеют суффикс `S`); пара позиций `inPorts`, `outPorts` моделирует все сегменты. Наименования `in/out` (входные/выходные) выбраны по отношению к коммутаторам и соответствуют каналам полнодуплексной линии связи. Дополнительные позиции `received`, `sent` моделируют дампы фреймов терминальными устройствами, а позиции `inSW`, `outSW` моделируют дампы фреймов коммутаторами. Они выделены синим цветом; дополнительные пометки совмещения позиций `rcvd`, `snd`, `inSWITCH`, `outSWITCH` служат для связи со страницами модели, вычисляющими характеристики, описанными в следующем разделе.

сервером и количество фреймов ответа сервера соответственно имеют равномерное распределение.

В модели временные задержки указаны в единицах модельного времени MTU (Model Time Unit), размеры – в фреймах максимальной длины. Вопросы масштабирования времён и размеров данных изучены в [6]. В модели, изображённой на рис. 1, временные задержки соответствуют 100 Mbps Ethernet, 1MTU=10 мкс, максимальный полный размер фрейма – 12304 бит. Задержки передающих переходов `sendWS`, `sendS`, `put` содержат время передачи фрейма в сегменте, а принимающие переходы `receiveWS`, `receiveS`, `get` имеют только задержки, выбранные в соответствии с производительностью оборудования (сетевых карт, коммутаторов). Периодичность запросов рабочих станций 10-20 мс, время обработки запроса сервером 1-2 мс, длина запроса 1 фрейм, длина ответа сервера 10-20 фреймов. Следует отметить, что модель, изображённая на рис. 1, описывает работу коммутаторов с обязательной буферизацией фреймов и имеющих одинаковую скорость передачи всех портов; кроме того, для буферов фреймов коммутаторов и серверов реализована дисциплина случайного выбора. В оценках характеристик реальных сетей применены более сложные варианты модели. Реализованы очереди с дисциплиной FIFO буферов. Для прямой ретрансляции принимаемого фрейма в выходной порт (в случае пустой очереди и свободного порта назначения) добавлен переход `direct` с задержкой, требуемой для обработки заголовка фрейма коммутатором. Используются матрицы задержек для моделирования различной скорости передачи портов.

Следует остановиться более подробно на описании элементов модели, добавленных для последующей оценки характеристик с помощью измерительных фрагментов. Дополнительные элементы моделируют процессы дампа фреймов реальных сетей некоторым анализатором пакетов, изученные в предыдущем разделе. В момент передачи фрейма терминальным устройством в сегмент с помощью переходов `sendWS`, `sendS` копия его заголовка, содержащая адрес отправителя `src`, адрес назначения `dst`, порядковый номер фрейма для устройства `pf`, а также временной штамп текущего модельного времени, полученный с помощью функции `CT()` сохраняется в позиции `sent`. Аналогично в момент получения фрейма терминальным устройством из сегмента с помощью переходов `receiveWS`, `receiveS` копия его заголовка сохраняется в позиции `received`. Кроме того, дампы выполняются при получении/передаче фреймов коммутаторами в позициях `inSW`, `outSW`, что моделирует работу средств статистики коммутатора либо внешних физических анализаторов пакетов, подключенных к соответствующим портам. В данном исследовании сохраняется только такая информация как номер коммутатора `sw` и текущий размер буфера коммутатора `bcur` для каждого входящего/исходящего фрейма.

3. Измерительные фрагменты

Метод измерительных фрагментов был ранее представлен и изучен в [6] для непараметрических моделей. Основная его идея заключается в том, что поскольку раскрашенная сеть Петри является универсальной алгоритмической системой, алгоритмы вычисления характеристик модели могут быть описаны дополнительными фрагментами сети Петри, названными измерительными фрагментами (ИФ). Модель с измерительными фрагментами выполняет вычисление характеристик телекоммуникационной сети непосредственно в процессе имитационного моделирования. Далее построены измерительные фрагменты параметрической модели для оценки трафика, времени доставки фреймов и размера внутренних буферов коммутаторов. Измерительные фрагменты изображены красным цветом.

3.1. Оценка пропускной способности (трафика)

Оценка трафика выполнена на основе дампа доставленных фреймов терминальных устройств. Следует отметить, что оценку можно выполнить также на основе дампа отправленных фреймов и найти процент потерянных фреймов. Поскольку в параметрической модели, изображённой на рис. 3, процессы потери фреймов не моделируются, то указанные оценки совпадают.

Измерительный фрагмент для оценки трафика изображён на рис. 5. Совмещённая позиция `newFrame` получает из модели Ethernet (рис. 3) дампы очередного полученного терминальным устройством фрейма. Переход `procFrame` сохраняет его копию в позиции `newDbl` для ИФ оценки времени доставки и запускает перевычисление характеристик, хранимых в позициях `nFrm`, `nFrmAll`, `trafficAll`, `traffic`. Заметим, что формулы перевычисления представлены надписями соответствующих дуг.

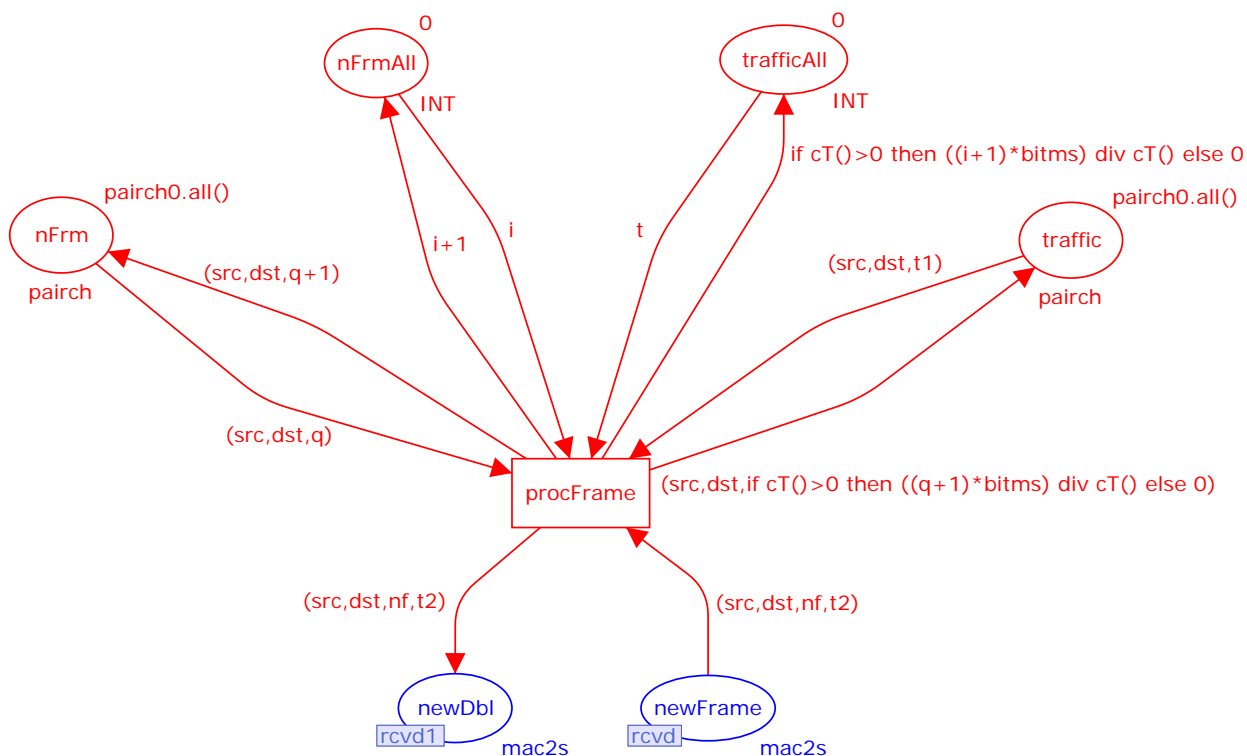


Рис. 5. ИФ для оценки трафика

Позиция `traffic` хранит матрицу трафика для каждой пары MAC-адресов, представленную кортежами `pairch` в форме (адрес1,адрес2,трафик). Это позволяет оценить асимметричный трафик, поскольку кортеж задаёт направление передачи. Для вычисления трафика используется позиция `nFrm`, хранящая матрицу количества переданных фреймов в форме (адрес1,адрес2,количество). Каждое срабатывание перехода `procFrame` увеличивает количество полученных фреймов для каждой пары адресов `(src,dst,q+1)`. Трафик вычисляется путём деления количества полученных фреймов на модельное время; константа `bitms` использована для приведения размерности к бит/мкс. Использована простейшая формула вычисления трафика:

$$traffic = n/dt,$$

где n – количество доставленной информации, dt – интервал времени измерения.

Поскольку трафик между каждой парой устройств является во многих случаях слишком детализированной характеристикой, обеспечено вычисление интегральной характеристики, такой как суммарный трафик сети, представленный в позиции `trafficAll`.

Для её вычисления добавлена позиция `nFrmAll`, хранящая общее число фреймов, полученных терминальными устройствами.

3.2. Оценка времени доставки

Оценка времени доставки фрейма выполнена на основе вычисления разности штампов времени получения и отправления фрейма для пары взаимодействующих терминальных устройств. Для идентификации фрейма использован его порядковый номер `pf`, уникальный для каждого передающего терминального устройства.

ИФ для оценки времени доставки фреймов изображён на рис. 6. Переход `culcDT` вычисляет время доставки фрейма `dt`. Переход `culcAVR` запускает перевычисления характеристик, хранимых в позициях `sumPair`, `sumAll`, `averPair`, `averAll`, `maxAll`, `maxPair`, `quantAll`, `quantPair`.

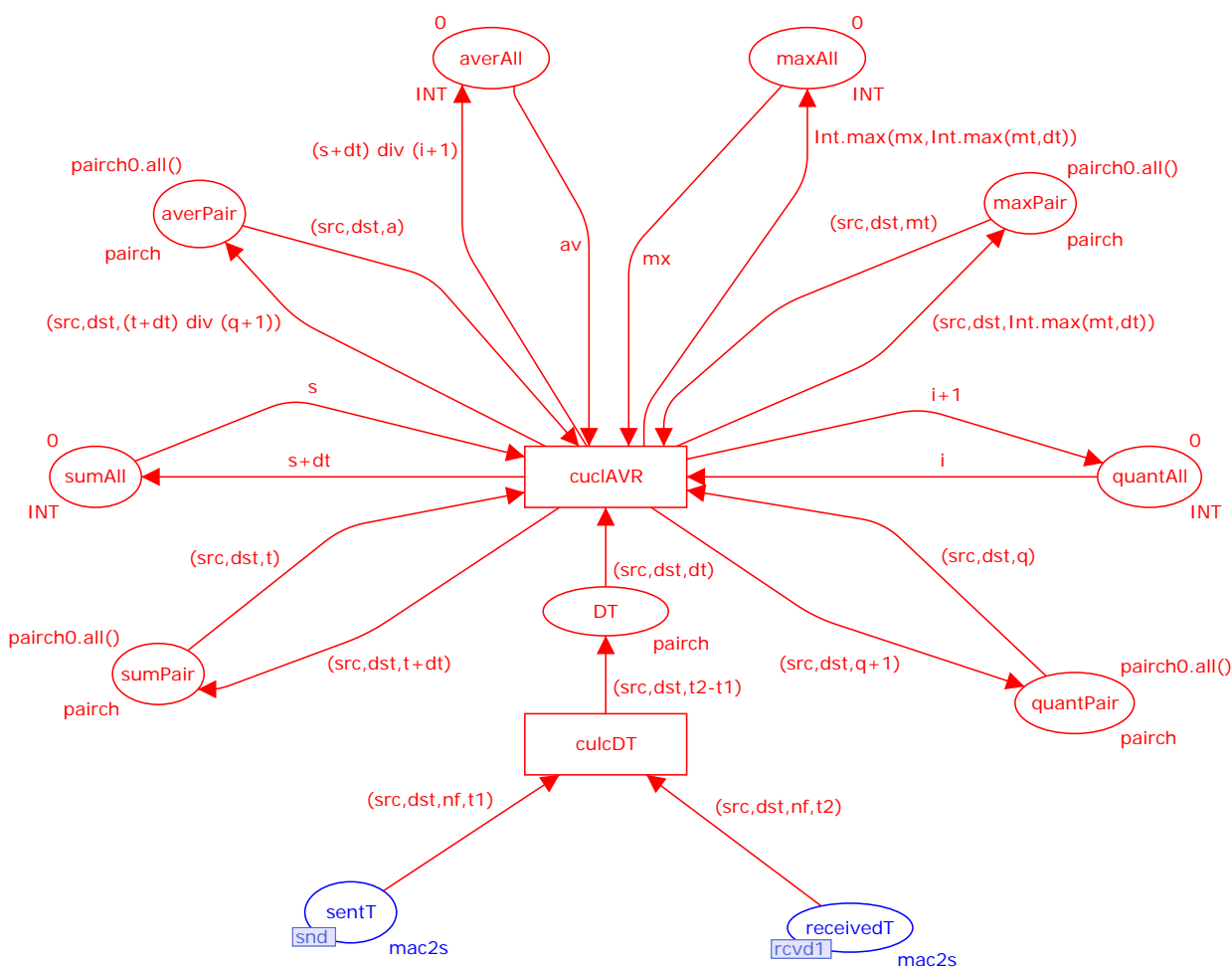


Рис. 6. ИФ для оценки времени доставки фрейма

Позиции `sumPair` и `quanPair` хранят сумму времён доставки и количество доставленных фреймов соответственно для каждой пары терминальных устройств. Они используются для вычисления среднего `averPair` и максимального `maxPair` времени доставки фрейма для каждой пары устройств. Заметим, что при вычислении среднего использована информация о новом доставленном фрейме ($(t+dt) \text{ div } (q+1)$). Применена следующая формула вычисления среднего времени доставки:

$$adt = \frac{(dt_1 + dt_2 + \dots + dt_q)}{q},$$

где dt_i – время доставки j -го фрейма, q – общее число доставленных фреймов.

Позиции **sumAll** и **quantAll** хранят сумму времён доставки и общее число соответственно всех доставленных фреймов. Они используются для вычисления среднего **averAll** и максимального **maxAll** времени доставки для всех фреймов переданных в сети.

3.3. Оценка размера буфера коммутатора

При выборе оборудования, а также при проектировании оборудования телекоммуникационных сетей решается задача определения оптимальных характеристик устройств. Для коммутаторов с заданной скоростью передачи на порте (например: 100Mbps, 1Gbps) такими характеристиками являются среднее время коммутации фрейма, которое может быть косвенно оценено на основании стандартной информации о количестве фреймов, коммутируемых в единицу времени [6], а также размер внутреннего буфера коммутатора.

На рис. 7 приведен измерительный фрагмент для оценки размера внутреннего буфера коммутатора. Параметрическая модель (рис. 3) позволяет задать ограничения размеров буфера в позиции **bufLim** и выполняет дамп полученных и отправленных коммутаторами фреймов.

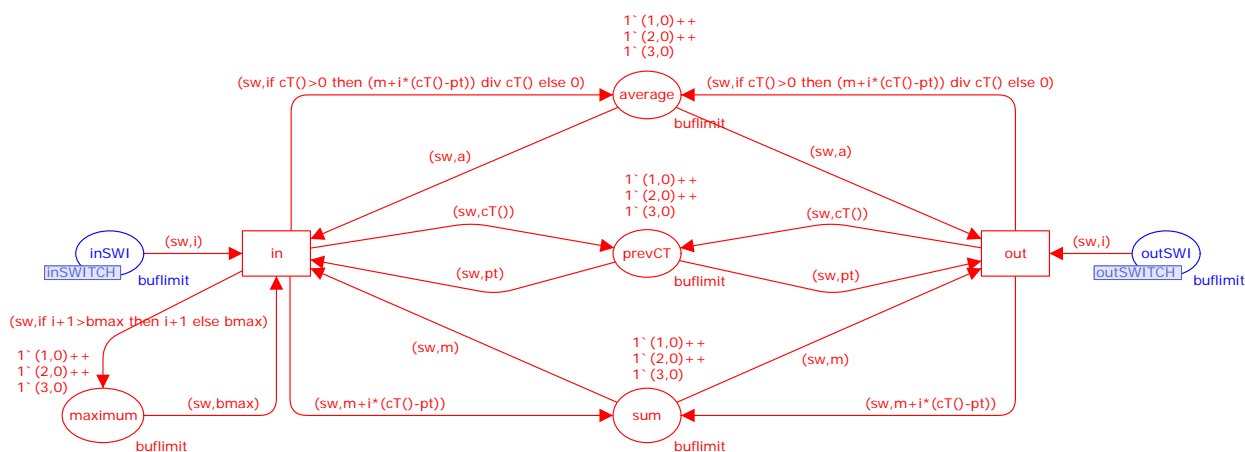


Рис. 7. ИФ для оценки размера буфера коммутаторов

При получении фрейма коммутатором в позицию **inSWI** записывается номер коммутатора и текущий размер его буфера. Аналогичная информация записывается в позицию **outSWI** при передаче фрейма коммутатором.

ИФ вычисляет максимальный фактический размер буфера в позиции **maximum** и также средний размер буфера в позиции **average**. Вспомогательные позиции **sum** и **prevCT** служат для хранения суммы произведений и значений предыдущего момента времени изменения размера для каждого коммутатора. Рассмотрим более подробно формулу вычисления среднего размера буфера:

$$a = \frac{(i_1 \cdot dt_1 + i_2 \cdot dt_2 + \dots + i_k \cdot dt_k)}{dt},$$

где i_j – размер буфера на интервале времени dt_j , dt – общий интервал времени измерения. Так как измерения начинаются с нулевого момента времени, длина общего

интервала времени измерения равна текущему модельному времени $cT()$. Для вычисления текущего интервала dt_j используются значения момента времени последнего изменения длины буфера pt , сохранённые в позиции $prevCT$ для каждого коммутатора: $dt_j = cT() - pt$. Сумма произведений, представленная в числителе, накапливается в позиции sum отдельно для каждого коммутатора.

Возможно построение других измерительных фрагментов, например, для оценки числа коллизий при использовании концентраторов, оценки времени отклика прикладных систем. В [6,8] представлены измерительные фрагменты непараметрических моделей Ethernet для вычисления времени отклика прикладной системы (ГИД Урал ВНИИЖТ), включающего времени доставки в сети и время обработки запроса в сервере. Такая интегральная характеристика является одной из основных, оцениваемых при проектировании систем реального времени.

4. Организация вычислительных экспериментов с моделью

Для получения достоверных оценок характеристик телекоммуникационной сети применена специальная организация вычислительных экспериментов с моделью. Поскольку процессы генерации и обработки запросов в системе клиент-сервер представлены случайными функциями, их взаимодействие с коммуникационным оборудованием задаёт некоторый стохастический процесс. Поэтому применён статистический подход, основанный на вычислении и сравнении математического ожидания и центральных статистических моментов. В большинстве случаев использованы две величины: математическое ожидание (среднее значение) и дисперсия.

Имитация динамики сети выполнялось на достаточно продолжительных интервалах модельного времени, соответствующих нескольким минутам реального времени. Вначале, исследовалось существование стационарного режима функционирования модели. Затем выполнялись измерения характеристик в стационарном режиме.

Для каждого интервала времени dt_i выполнялось не менее двадцати индивидуальных эксперимента. Затем для каждой характеристики вычислялись средние значения a_{dt_i} и дисперсия σ_{dt_i} на выбранном интервале. Измерения и вычисления повторялись для удвоенного интервала времени и так далее. Если средние и дисперсия для интервалов совпадают $a_{dt_i} = a_{dt_{i+1}}, \sigma_{dt_i} = \sigma_{dt_{i+1}}$, то принималось решение о существовании стационарного режима.

Следует отметить, что отсутствие стационарного режима можно легко наблюдать, например, при увеличении частоты запросов рабочих станций в 100 раз. Хотя указанное наблюдение связано не с коммуникационным оборудованием, а с увеличением средних длин очередей неотправленных фреймов в терминальном оборудовании. Телекоммуникационное оборудование нормально функционирует, обеспечивая доставку фреймов при пиковой загрузке, за счёт моделирования средств управления потоком jam , предусмотренных стандартами. Примеры таблиц, иллюстрирующих рост очередей в нестационарном режиме, приведены в [7].

Далее в стационарном режиме выполнялись оценки характеристик для различных комбинаций таких параметров оборудования и программного обеспечения как интенсивность запросов, продолжительность времени обработки, производительность и размер внутреннего буфера коммутатора и других. На рис. 8 представлена текущая маркировка ИФ вычисления времени доставки (рис. 6) полученная на интервале времени $168009MTU=1,68$ с.

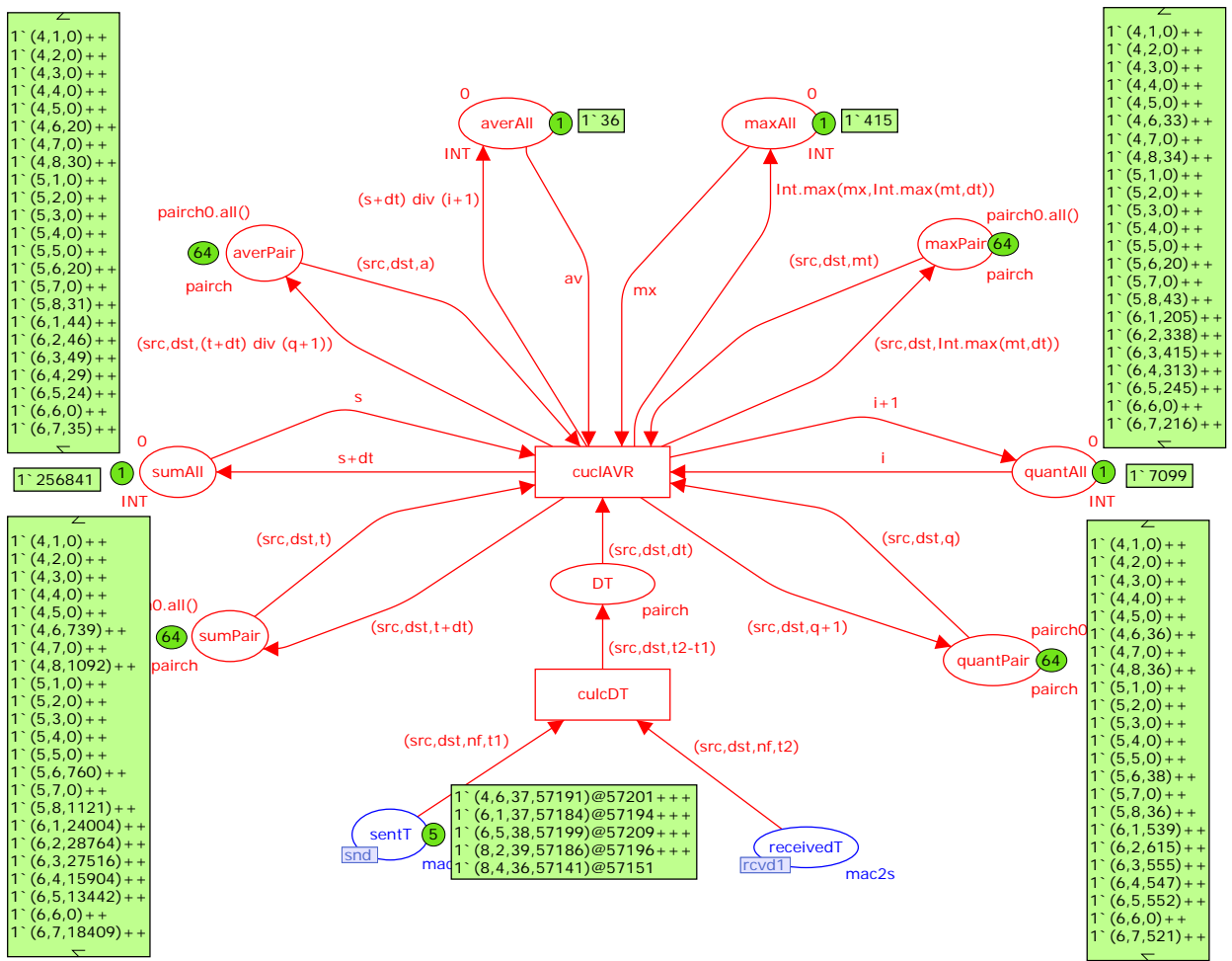


Рис. 8. Результаты оценки времени доставки

Таким образом, среднее время доставки фрейма равно $36 \text{ MTU}=0,36 \text{ мс}$; максимальное время доставки равно $415 \text{ MTU}=4,15 \text{ мс}$. Из матрицы времён доставки **maxPair** видно, что максимальное время достигается при доставке фреймов от сервера **S1** (MAC=6) к рабочей станции **WS3** (MAC=3). Представленные фрагменты матриц подтверждают, что передача фреймов между парами рабочих станций, также как и парами серверов не выполняется (соответствующие нулевые значения).

5. Анализ результатов моделирования

Простые оценки пропускной способности и времени доставки фреймов, исходя из максимальной скорости передачи информации выбранной технологии (100Mbps, 1, 10Gbps) не являются реалистичными даже при использовании единственного коммутатора, в силу асимметричности, пульсации и других особенностей реального трафика. Так, например, для коммутатора с n портами технологии 100Mbps максимальная пропускная способность, близкая к $n \cdot 100 \text{ Mbps}$ может быть обеспечена в полнодуплексном режиме и чётном n лишь при передаче потоков в 100Mbps между парами терминальных устройств.

При асимметричности трафика, порт назначения прибывшего в коммутатор фрейма может быть уже занят передачей некоторого другого фрейма, что приводит к сохранению фрейма в буфере коммутатора либо подавлению активности передающего порта с помощью jam-средств и повторной передаче; в результате время доставки увеличивается.

Кроме того, вынужденный простой других портов приводит к снижению реальной пропускной способности.

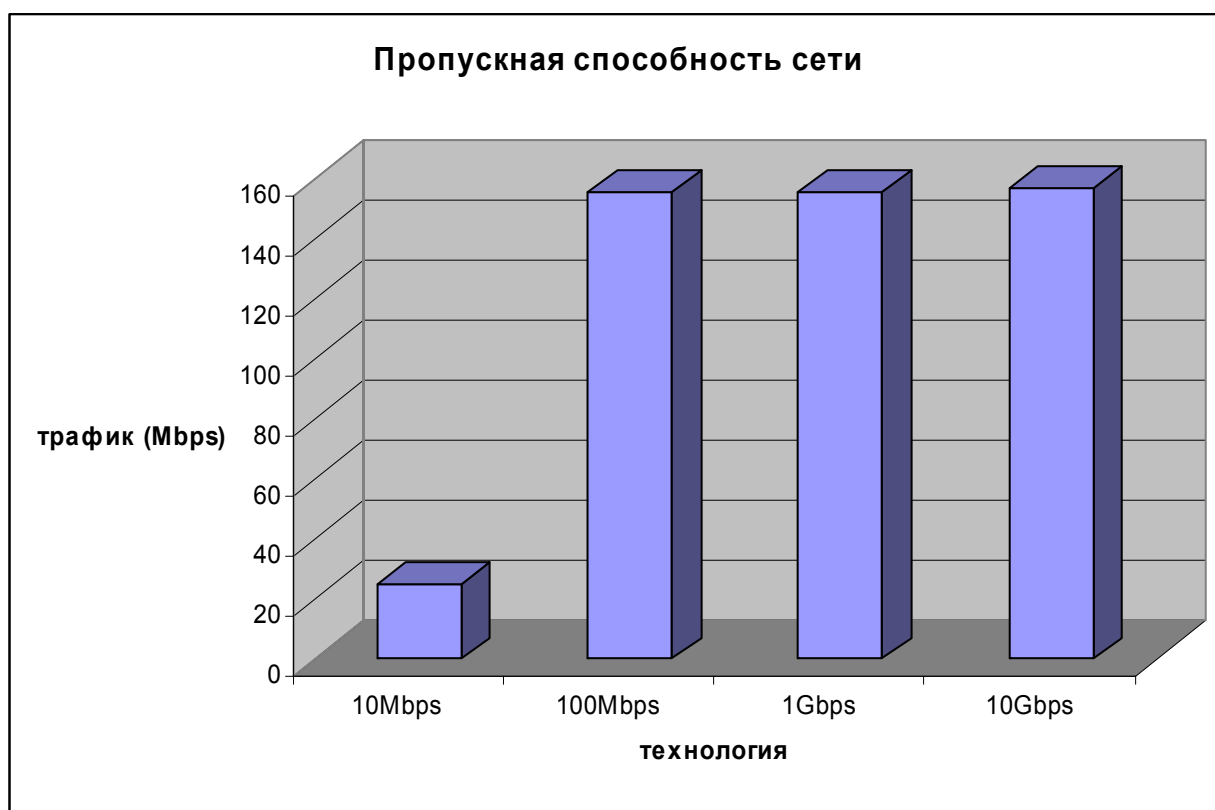
Использование иерархической структуры из нескольких коммутаторов (рис. 1) усложняет описанные процессы и затрудняет их аналитические оценки. Таким образом, использование имитационных моделей, адекватно описывающих процессы коммутации фреймов в соответствии со стандартами технологий и особенности генерации трафика, является перспективным направлением исследования. Традиционным инкрементным решением проблем телекоммуникационных сетей является простой переход на следующий уровень технологии, например от 100Mbps к 1Gbps. Однако такие решения в масштабах корпорации могут быть весьма дорогостоящими. Кроме того, новый уровень скорости передачи может оказаться недостаточным для узких мест в сетях.

В настоящем разделе представлены результаты исследования параметрической модели (рис. 3) с помощью измерительных фрагментов (рис. 5, 6, 7) для локальной сети диспетчерского центра железной дороги (рис. 1) при выборе различных типов коммутаторов и сетевых карт. Вопросы вычисления параметров модели по характеристикам реального оборудования были изучены в [6,8]. На рис. 9 представлены зависимости характеристик сети от выбранной технологии оборудования.

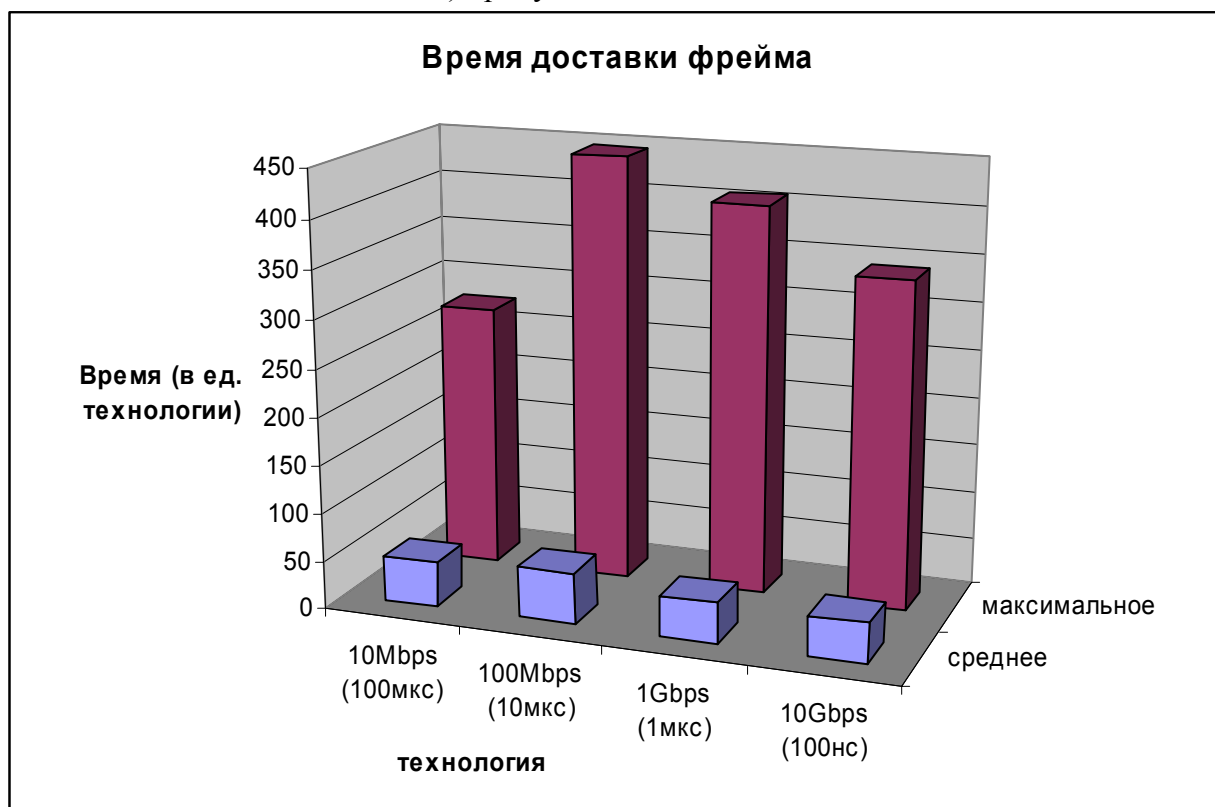
Следует отметить, что в штатном режиме функционирования сеть должна обеспечивать передачу всего трафика серверов и рабочих станций. В рассмотренном примере сети каждая рабочая станция генерирует два потока средней интенсивности 1 фрейм в 15 мс, в ответ на запросы каждый из серверов генерирует 12 потоков (2x6) из 15 фреймов каждые 15 мс. Таким образом, грубая оценка всего трафика сети может быть представлена как:

$$traffic = (12 \cdot 16 \cdot 12304) / 0,015 = 157491200bps \approx 157Mbps$$

Исходя из стандартной скорости передачи выбранной технологии и максимальной длины фрейма, минимально возможное (идеальное) время доставки фрейма равняется: 1,23 мс для 10Mbps, 123 мкс для 100Mbps, 12,3 мкс для 1Gbps и 1,23 мкс для 10Gbps. Даже при использовании единственного коммутатора, обеспечивающего прямую передачу без полной буферизации, минимальное время доставки возрастает. После приёма заголовка фрейма коммутатору требуется некоторое время для анализа заголовка и определения порта назначения по таблице коммутации. Это время может быть оценено, исходя из заявленной производительности коммутатора, измеряемой в фреймах в секунду, либо исходя из производительности внутренней магистрали коммутатора. Так, например, заявленная производительность коммутатора Intel SS101TX4EU составляет 10000 фреймов секунду, что соответствует времени обработки фрейма около 100 мкс; заметим, что реальная задержка может превышать указанную ввиду параллельной работы портов. Для коммутатора Cisco ME 4924 указана лишь производительность внутренней шины 49Gbps, что соответствует задержке в 251 нс. Кроме того, реальная производительность сетевых карт отличается от максимальной скорости передачи выбранной технологии. Так, например, сетевая карта Intel Ether Express PRO/100 обеспечивает максимальную скорость передачи 92,1Mbps, что соответствует задержке около 140 мкс при передаче фрейма.



а) пропускная способность



б) время доставки

Рис. 9. Оценки характеристик сети

Из рис. 9 а) видно, что технология 10Mbps не обеспечивает передачу всех генерируемых потоков фреймов; стационарный режим отсутствует в системе, содержащей сетевое и терминальное оборудование, что подтверждается ростом длин очередей

серверов в позиции **replyS**. Более скоростные технологии обеспечивают передачу всех потоков; пропускная способность отличается в пределах дисперсии. Однако времена доставки (рис. 9 б) отличаются существенно; заметим, что использованы разные единицы измерения времени доставки для различных технологий. Общая тенденция такова, что среднее время доставки больше максимального примерно в 10 раз. Снижение максимального времени доставки для 10Mbps технологии может быть объяснено значительным уменьшением пропускной способности. При исследовании указанных характеристик для различной производительности реальных сетевых карт и коммутаторов, а также длинах буферов выбранных коммутаторов выявлено незначительное изменение характеристик лишь в пределах дисперсии. Таким образом, для рассматриваемого трафика, создаваемого периодическими запросами рабочих станций к серверам, существенным является лишь выбор технологии; разница в производительности оборудования практически не влияет на характеристики сети.

Отметим, что максимальное время доставки (рис. 6, позиция **maxALL**) может быть использовано в качестве оценки гарантированного времени доставки для систем реального времени с жёсткими временными ограничениями. В системах с нежёсткими временными ограничениями для оценок можно использовать среднее время доставки (рис. 6, позиция **averALL**).

При исследовании модели при малых размерах внутреннего буфера фреймов коммутатора обнаружена аномалия, приводящая к взаимной блокировке работы всех коммутаторов сети. Указанная аномалия может также иметь место при произвольных размерах буфера и специфических особенностях трафика, однако с ростом размера буфера вероятность её возникновения значительно снижается. На рис. 10 изображён простейший вариант взаимной блокировки в сети, содержащей два коммутатора при размере буфера коммутатора равном 2 (значение 1 для модели).

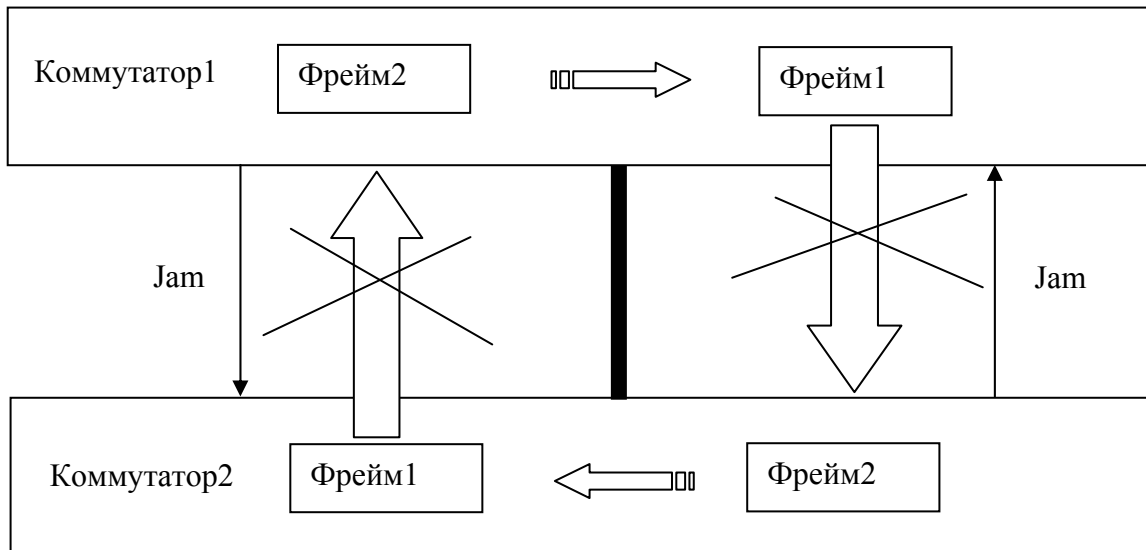


Рис. 10. Взаимная блокировка коммутаторов

Предположим, что в Коммутатор1 поступили два фрейма с адресом назначения терминальных устройств Коммутатора2, в то же самое время в Коммутатор2 поступили два фрейма с адресом назначения терминальных устройств Коммутатора1. Пусть каждый из коммутаторов начал передачу своего первого фрейма. Так как фрейм не может быть размещён в буфере, каждый из коммутаторов подавляет передачу фрейма с помощью jam-средств. Возникает взаимная блокировка коммутаторов. Указанный клинч не возможен при использовании коммутаторов, обеспечивающих передачу без обязательной буферизации. В этом случае Фрейм 1 Коммутатора 1 будет непосредственно направлен

Коммутатором 2 на порт соответствующего терминального устройства назначения. Кроме того, в реальных коммутаторах, как правило, реализована операция удаления фреймов, время хранения которых превышает некоторое предельное значение. Таким образом, клинч ликвидируется автоматически, но производительность коммутатора при этом резко снижается ввиду потери фреймов.

Выводы

Таким образом, в настоящей работе представлена модифицированная параметрическая модель коммутируемой Ethernet, инвариантная по отношению к топологии сети и количеству подключенных сетевых и терминальных устройств, а также измерительные фрагменты модели, обеспечивающие оценку пропускной способности, времени доставки фреймов и длин буферов коммутаторов в процессе имитационного моделирования.

Адекватность модели подтверждена измерениями характеристик реальных сетей, выполнен анализ результатов моделирования для различных типов используемого оборудования. Областью применения полученных результатов является проектирование телекоммуникационных сетей и устройств близких к оптимальным.

Литература

1. Jensen K. Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use.- Vol. 1-3, Springer-Verlag, 1997.
2. Beaudouin-Lafon M., Mackay W.E., Jensen M. et al. CPN Tools: A Tool for Editing and Simulating Coloured Petri Nets. LNCS 2031: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems, 2001, 574-580. (<http://www.daimi.au.dk/CPNTools>).
3. Зайцев Д.А., Шмелёва Т.Р. Моделирование коммутируемой локальной сети раскрашенными сетями Петри // Зв'язок, № 2(46), 2004, с. 56-60.
4. Зайцев Д.А., Сакун А.Л. Исследование эффективности технологии MPLS с помощью раскрашенных сетей Петри // Зв'язок. – 2006. – Т. 65, №5. – С. 49-55.
5. Зайцев Д.А., Березнюк М.В. Исследование эффективности использования адресного пространства протокола Bluetooth // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2006. – №1. – С. 57-63.
6. Зайцев Д.А. Измерительные фрагменты в моделях Петри телекоммуникационных сетей // Зв'язок, № 2(54), 2005, с. 65-71.
7. Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Switched Ethernet Response Time Evaluation via Colored Petri Net Model // Proc. of International Middle Eastern Multiconference on Simulation and Modelling, August 28-30, 2006. – Alexandria (Egypt). – 2006. – P. 68-77.
8. Зайцев Д.А., Шмелёва Т.Р. Основы построения параметрических моделей Петри коммутируемых сетей // Моделирование и компьютерная графика: Материалы 1-й международной научно-технической конференции, 4-7 октября 2005, Донецк, ДонНТУ, 2005, с.207-215.