



УТВЕРЖДАЮ

Ректор Университета ИТМО

В.Н. Васильев

август 2015 г.

О Т З Ы В

ведущей организации – федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики»
на диссертацию **Чемерицкого Евгения Викторовича**
«Исследование методов контроля функционирования
программно-конфигурируемых сетей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 05.13.11 – математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

Актуальность темы

Проверка соответствия свойств компьютерных сетей тем требованиям, которые к ним предъявляются, является важной задачей сетевого администрирования. Один из наиболее перспективных подходов к решению этой задачи предлагает предсказывать поведение сети по её *конфигурации* – характеристикам производительности и настройкам отдельных линий связи и коммутационных устройств сети, а так же свойствам её топологии – и проверять корректность функционирования сети путём анализа этой конфигурации. Таким образом, допущенные при проектировании сети и настройке сетевого оборудования ошибки смогут быть выявлены заблаговременно, а не в результате обнаружения связанных с ними отказов.

Поскольку высокая структурная сложность и масштабы современных компьютерных сетей, как правило, не позволяют убедиться в корректности конфигурации сети вручную, то актуальность приобретает разработка формальных методов и построенных на их основе инструментальных средств, которые позволяли бы автоматизировать решение указанной задачи и существенно упростить работу сетевых администраторов. В работе ставится задача разработки подобных методов для верификации двух важных классов свойств компьютерных сетей: логических свойствах отношения маршрутизации пакетов и своевременности доставки передающихся через сеть данных.

Актуальность темы работы обусловлена так же рассмотрением Программно-Конфигурируемых Сетей (ПКС) – перспективным классом компьютерных сетей, предоставляющим беспрецедентные возможности для сбора и анализа конфигураций коммутационных устройств. В контексте ПКС разработанные формальные методы могут быть использованы для построения инструментальных средств *динамической верификации* сетей, проверяющих корректность конфигурации сети при каждой её модификации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

В диссертации Е.В. Чемерицкого рассматривается задача построения двух формальных методов, позволяющих проверить корректность поведения ПКС относительно произвольного набора требований к её поведению по конфигурации её оборудования. Первый из этих методов направлен на анализ логических свойств отношения маршрутизации пакетов, второй – на проверку своевременности доставки переданных через сеть данных.

Первая глава посвящена изложению формального метода, предназначенного для проверки логических свойств отношения маршрутизации. В начале главы даётся подробное описание специфики поставленной задачи. Приводятся основные положения OpenFlow – базового протокола ПКС, обеспечивающего низкоуровневое управление оборудованием сети из единого центра. Определяется общая структура конфигурации ПКС и семантика отдельных компонентов этой конфигурации. Приводится классификация требований к поведению ПКС. Требования подразделяются на локальные и глобальные, статические и динамические, требования дискретного и реального времени.

Далее приводятся обзоры языков спецификации и математических моделей, пригодных для формализации требований к поведению и правил функционирования ПКС. В качестве наиболее перспективного формального языка для спецификации требований к отношению маршрутизации ПКС выбрана логика транзитивного замыкания FO[TC]. В качестве наиболее подходящей модели ПКС – упорядоченные двоичные решающие диаграммы OBDD.

Автором предложена формальная модель ПКС, в которой каждый структурный компонент конфигурации сети описывается отношением на множестве состояний пакетов – множестве двоичных векторов, кодирующих заголовки и положение отдельных пакетов в сети. В рамках указанной модели поведение сети полностью определяется отношением одношаговой маршрутизации, определяющим правила изменения состояний пакетов при их передаче через одно коммутационное устройство.

В работе предложен оригинальный язык спецификации требований к поведению сети. В рамках указанного языка требования к поведению сети выражаются предикатами логики

транзитивного замыкания FO[TC]. Автором доказано, что задача верификации конфигурации ПКС относительно формул предложенного языка принадлежит к классу PSPACE-полных.

В главе приводится описание программной реализации предложенного метода, а так же экспериментальное исследование этой реализации как на синтетических, так и на реальных данных. В ходе исследования, в частности, показано, что разработанный формальный метод может успешно применяться для обнаружения ошибок конфигурации сети на практике.

Во второй главе рассматривается формальный метод для проверки своевременности доставки переданных через сеть пакетов. В начале главы приводится краткое описание современных подходов к управлению качеством сетевых соединений и возможностей по управлению задержкой передачи пакетов через сеть, которые эти подходы обеспечивают. В работе приводится оригинальная блочная модель, представляющая каждое коммутационное устройство в виде набора простых модулей, обслуживающих проходящие через них потоки трафика по предопределённым правилам.

В своей работе автор приводит основные положения теории сетевого исчисления (Network Calculus), отличительной особенностью которой является возможность построения интервальных оценок времени передачи данных через последовательности из обработчиков с высокой точностью. Предложенная ранее модульная модель коммутатора и теория сетевого исчисления используются для построения нескольких способов вычисления верхних оценок для времени передачи пакетов через сеть ПКС.

Автору удалось разработать эффективный алгоритм вычисления обратной min-plus свёртки для вогнутой и выпуклой кусочно-линейных кривых, доказать корректность этого алгоритма и использовать его, чтобы расширить область применения нескольких известных алгоритмов оценки задержки. Ранее указанные алгоритмы были применимы лишь к сетям, обработчики и потоки данных в которых могли быть заданы кусочно-линейными кривыми из одного или двух сегментов. Доказанная теорема позволила применить эти же алгоритмы и при использовании большего количества сегментов.

Автором так же была произведена доработка одного из существующих алгоритмов построения верхней оценки для сквозной задержки передачи данных, построенного на базе линейного программирования. Оригинальный алгоритм способен вычислить достижимую верхнюю оценку задержки передачи данных за полиномиальное время в том случае, если обработчики сети расположены тандемом. Предложенный в работе алгоритм позволяет ослабить ограничения и расширить результат на произвольные древовидные топологии. Корректность указанного алгоритма доказана соответствующей теоремой.

Построенные алгоритмы были реализованы в виде соответствующих программных прототипов и исследованы экспериментально. Теория сетевого исчисления позволила

получить более высокую точность оценок, по сравнению с распространённым на практике методом покомпонентного сложения задержек. Автором была проведена дополнительная валидация полученных результатов при помощи специально разработанной имитационной модели ПКС, построенной на базе среды моделирования NS3.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием формальных логик, теории графов, формальной верификации моделей и аппарата сетевого исчисления, приведёнными доказательствами разработанных алгоритмов построения задержек, а также достаточным объёмом проведенного экспериментального исследования.

Практическая ценность и научная новизна работы

Практическая ценность диссертации обеспечивается распространением компьютерных сетей и разнообразием требований, которые к этим сетям предъявляются. Разработанные формальные методы позволяют автоматизировать процесс выявления несоответствий между настройками сетевого оборудования и требованиями, которые предъявляются к поведению сети, и устранить допущенные ошибки заблаговременно. Разработанные формальные методы могут послужить базой для создания продвинутых программно-инструментальных средств контроля конфигурации сети. Подобные средства могут существенно упростить работу сетевых инженеров, выявляя ошибки конфигурации, предоставляя осмысленную диагностику и, быть может, даже рекомендации по устранению этих ошибок в режиме реального времени.

Работа содержит несколько новых научных результатов. Для спецификации политик маршрутизации впервые использовалась логика транзитивного замыкания $FO[TC]$. В работе предложена оригинальная реляционная модель программно-конфигурируемой сети. Доказано, что задача проверки конфигурации ПКС относительно формул логики $FO[TC]$ принадлежит классу PSPACE-полных. Предложен новый алгоритм вычисления обратной min-plus свёртки кусочно-линейных кривых. Разработан полиномиальный алгоритм построения достижимой верхней оценки задержки для сетей обработчиков с древовидной топологией.

Замечания по диссертационной работе

Вместе с тем, диссертация имеет и некоторые недостатки:

1. Поскольку изменения в сети имеют локальный характер, то при последовательной перепроверке конфигурации изменения в реляционной модели, по всей видимости, так же будут локальными. Используя это наблюдение, автор мог бы существенно ускорить своё средство, разработав алгоритмы быстрого обновления модели при незначительных изменениях конфигурации;

2. Разработанный автором метод проверки своевременности доставки пакетов мог бы иметь большую практическую ценность, если бы он использовался не для оценки задержки по заданной конфигурации, а, наоборот – для синтеза таких настроек оборудования, при которых время передачи пакета через сеть удовлетворяло бы заданным требованиям;
3. Предложенные автором алгоритмы вычисления задержки выполняют множество однотипных задач над кусочно-линейными кривыми, и, по всей вероятности, их реализация могла бы быть значительно ускорена за счёт распараллеливания и использования графических ускорителей.

Эти замечания не влияют на положительную оценку выполненной работы и не ставят под сомнение основные выводы диссертации.

Заключение

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертация в целом представляет собой законченный научный труд, в котором содержится решение задачи, имеющее существенное значение для теории и практики управления компьютерными сетями. Работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11, а Е.В. Чемерицкий достоин присуждения ему искомой степени.

к.ф.-м.н., декан факультета
инфокоммуникационных технологий
Университета ИТМО
к.т.н., зам. зав. кафедры
сетевых и облачных технологий
Университета ИТМО



Хоружников С.Э.

Грудинин В.А.

Отзыв рассмотрен на заседании Научно-технического совета Университета ИТМО 12 августа 2015 г., протокол № 12/1

Председатель Научно-технического совета

Проректор по научной
работе



Никифоров В.О.