

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

**И.В. Алексеев, В.А. Соколов, Д.Ю. Чалый**

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОТОКОЛОВ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ**

Под редакцией В.А. Соколова

Ярославль 2004

ББК 3 973.2  
А 47  
УДК 004.7.057.4

**Рецензенты:**

кафедра прикладной математики и вычислительной техники  
Ярославского государственного технического университета;  
доктор технических наук, профессор В.А. Курчидис.

- А 47 **Алексеев И.В., Соколов В.А., Чалый Д.Ю.**  
Моделирование и анализ транспортных протоколов в информационных сетях: Монография / И.В. Алексеев, В.А. Соколов, Ю.Д. Чалый; Яросл. гос. ун-т. – Ярославль, 2004. – 262 с.  
ISBN 5-8397-0358-3

В монографии представлен новый вариант транспортного протокола TCP – протокол ARTCP, использующий темпоральные показатели потока в качестве входного параметра для алгоритма управления потоком и сочетающий оконный механизм контроля скорости с диспетчеризацией каждого сегмента. Описана имитационная модель, позволяющая моделировать все компоненты сети, влияющие на функционирование транспортного протокола. Построена формальная расширяемая модель протоколов TCP и ARTCP в терминах раскрашенных сетей Петри и предложены основные методы анализа и верификации этой модели. По данным модельных экспериментов определены важнейшие характеристики ARTCP, а также показано, что ARTCP превосходит TCP по основным показателям.

Книга предназначена для специалистов в области информатики, интересующихся вопросами моделирования, анализа и верификации протоколов в телекоммуникационных сетях, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

ББК 3 973.2  
А 47  
УДК 004.7.057.4

Работа поддержана грантом РФФИ № 03-01-00804.

ISBN 5-8397-0358-3

© Ярославский государственный университет, 2004  
© И.В. Алексеев, В.А. Соколов, Д.Ю. Чалый, 2004

## ***Предисловие***

Книга посвящена построению и исследованию математических моделей телекоммуникационных транспортных протоколов. В ней представлен новый алгоритм работы сетевых протоколов обмена – ARTCP, позволяющий повысить эффективность работы транспортного протокола в условиях большой загрузки сети с коммутацией пакетов. Это дает возможность проводить оптимизацию, в частности, традиционного Интернет-протокола TCP, которая существенно сглаживает его недостатки. Оригинальность предлагаемой модификации протокола TCP заключается в достижении логического разделения механизмов коррекции ошибок передачи и управления потоком. Поэтому ARTCP не интерпретирует потерю сегмента как признак перегруженности сети. При этом модифицированный протокол остается совместимым с исходным протоколом TCP. Для него дано теоретическое обоснование и проведена экспериментальная проверка. Разработанный алгоритм управления потоком характеризуется рядом существенных отличий от традиционных методов управления потоком протокола TCP, а именно:

- скорость отправки ARTCP сегментов в сеть управляется не размером окна передачи (как в TCP), а индивидуальной задержкой каждого сегмента, при этом изменение скорости отправки потока выражается в изменении его скважности (межсегментного временного интервала);
- индикатором текущего состояния сети и, соответственно, наступления перегрузки служит не потеря пакета, а изменение скважности потока сегментов, измеряемое получателем, а также изменение времени транзита сегментов, измеряемое отправителем;
- функционирование ARTCP не зависит от потока подтверждений для синхронизации отправки новых сегментов в сеть.

Таким образом, в ARTCP устранена логическая зависимость алгоритмов коррекции ошибок передачи и управления

потоком. Это дает существенные преимущества протоколу ARTCP, особенно в приложениях, где потеря пакета не является индикатором перегрузки – например, в беспроводных сетях. Кроме того, при работе в традиционных сетях алгоритм ARTCP оказывается более эффективным, так как он минимизирует среднюю длину очередей в маршрутизаторах и не доводит сеть до состояния перегрузки в процессе определения максимальной доступной соединению доли пропускной способности, что особенно важно для сосуществования потоков данных и мультимедиа. А отсутствие необходимости в синхронизации по подтверждениям дает также возможность эффективно применять ARTCP для систем с асимметричными каналами.

Показано, что трафик, генерируемый протоколом TCP, обладает свойством самоподобия, поэтому единственным способом его исследования является модельный эксперимент, поскольку развитого аналитического аппарата, примененного к самоподобному процессу, на данный момент не существует.

Для проведения модельных экспериментов разработана и реализована объектно-ориентированная программная модель сетевой архитектуры, которая моделирует основные свойства сети, определяющие функционирование транспортного протокола, а именно: задержку, мультиплексирование, потери и ошибки передачи. Построенная программная модель позволяет конструировать любую топологию сетевых соединений.

Целью модельного эксперимента, осуществленного в рамках данного исследования, было определить значения таких важнейших характеристик транспортного протокола, как вероятность потери сегментов, средняя длина очереди, эффективность использования пропускной способности канала, показатель равноправия разделения ресурсов, и в сравнении с имеющимися данными по стандартному TCP показать преимущества нового протокола ARTCP. Результаты модельного эксперимента позволяют сделать вывод о том, что превосходство ARTCP по отношению к TCP наиболее очевидно для беспроводных систем, однако и в обычных проводных сетях применение ARTCP имеет явные преимущества: меньшая по

сравнению с ТСП средняя длина очереди и полное отсутствие потерь сегментов.

Наряду с исследованием динамических характеристик важной задачей является обоснование корректности работы протоколов. Решение этой задачи предполагает разработку методов построения формальных моделей рассматриваемого класса систем. В данной книге исследуется проблема построения формальных моделей протоколов ТСП и ARTSP на основе раскрашенных сетей Петри и предлагается решение задачи верификации этих моделей.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Е.А. Тимофееву за постоянный интерес к данной теме, творческое сотрудничество и ценные советы. Мы благодарны нашим коллегам из Центра Интернет Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, в частности, директору Центра А.И. Русакову за внимание и поддержку, руководителю проекта "Региональный кластер научных вычислений" (грант РФФИ № 98-07-90171) М.Н. Захаровой за предоставление возможности осуществлять разработку программной модели и модельный эксперимент, а также всем, кто оказывал нам моральную и техническую помощь. Исследования, лежащие в основе этой книги, были выполнены в рамках проектов "Развитие высокоскоростного сегмента Ярославской региональной опорной сети на основе АТМ технологий" (грант РФФИ № 98-07-90307) и "Разработка новых методов и средств моделирования и анализа процессов обработки информации в распределенных системах" (грант РФФИ № 03-01-00804).

## **Введение**

Одним из важнейших направлений научно-технического прогресса в настоящее время являются коммуникационные системы, представляющие собой сети передачи информации. Координацию процессов передачи информации в распределенной системе, каковой является сеть, осуществляют коммуникационные протоколы.

Принято разделять коммуникационные протоколы по степени общности задач, решаемых ими, на несколько уровней, упорядоченный набор которых образует сетевую архитектуру. Самой распространенной и универсальной сетевой архитектурой является архитектура ТСР/ІР [1, 43]. В рамках ТСР/ІР все системы в сети делятся на конечные системы, между которыми происходит информационный обмен, и промежуточные системы, не являющиеся конечными или исходными точками обмена. Конечные системы называются узлами сети, а промежуточные – маршрутизаторами.

Двусторонний поток информации между парой смежных систем в сети обеспечивается каналом, связывающим две системы. Каналы характеризуются скоростью информационного потока (пропускной способностью), задержкой передачи и вероятностью битовых ошибок. В каждой точке подключения маршрутизатора к каналу имеется буфер, в котором организуется очередь данных, ожидающих отправки по этому каналу. Буферное пространство и пропускная способность (ПС) представляют собой разделяемые ресурсы сети. Если скорость прибытия информации в маршрутизатор превышает максимально возможную скорость ее отправки, то происходит перегрузка сети, выражающаяся в переполнении буферов и потерях информации.

Протокол транспортного уровня занимает важнейшее положение в любой сетевой архитектуре, в том числе и в ТСР/ІР, поскольку он обеспечивает надежную и эффективную передачу информации непосредственно между конечными системами сети. Для этого транспортный протокол задает со-