

ОЦЕНКА АСИМПТОТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ГЕТЕРОГЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ

Modenov S.Yu. Estimation of asymptotic efficiency of the method of state management of heterogeneous computer network. We consider the problem of searching for optimal routes and to combat congestion in a heterogeneous network techniques control network status. Initial data for the mathematical model, constraints on resources and evaluation of computational complexity based on the measurement results, the probability estimates and subjective judgments about the state of the network. The algorithms of evaluation of the state of heterogeneous network are considered. The task of choice of class of networks topologies and proper by him bunches of routes are considered. The task of choice of optimum streams and determination of optimum routes decides in a network on the criterion of middle delay. Given the comparative assessment of the accuracy, stability and asymptotic convergence of the algorithms of search solutions.

Keywords: computer network, probability estimates, subjective judgments, congestion, computational complexity, reliability management, routing

Модэнов С.Ю. Оцінка асимптотичної ефективності методу управління станом гетерогенної комп'ютерної мережі. Розглянуто задачу пошуку оптимальних маршрутів і боротьби з перевантаженнями в гетерогенній мережі методами управління станом мережі. Вихідні дані для побудови математичної моделі, обмеження на ресурси і оцінки обчислювальної складності засновані на результатах вимірювань, імовірнісних оцінок і суб'єктивних суджень про стан мережі. Дано порівняльні оцінки точності, стійкості та асимптотичної збіжності алгоритмів пошуку рішення.

Ключові слова: комп'ютерна мережа, імовірнісна оцінка, суб'єктивне судження, перевантаження, обчислювальна складність, управління надійністю, маршрутизація

Модэнов С.Ю. Оценка асимптотической эффективности метода управления состоянием гетерогенной компьютерной сети. Рассмотрена задача поиска оптимальных маршрутов и борьбы с перегрузками в гетерогенной сети методами управления состоянием сети. Исходные данные для построения математической модели, ограничения на ресурсы и оценки вычислительной сложности основаны на результатах измерений, вероятностных оценок и субъективных суждений о состоянии сети. Даны сравнительные оценки точности, устойчивости и асимптотической сходимости алгоритмов поиска решения.

Ключевые слова: компьютерная сеть, вероятностная оценка, субъективное суждение, перегрузка, вычислительная сложность, управление надежностью, маршрутизация

I. Введение. Как известно, гетерогенность присуща любой сколько-нибудь крупной телекоммуникационной сети. На согласование разнородных аппаратных и программных компонентов затрачиваются большие усилия и время. Поэтому любая технология, направленная на уменьшение влияния неоднородности сети при использовании различных методов обработки и передачи разнородного сетевого трафика, привлекает интерес специалистов [1-3 и др.].

Из-за гетерогенности сетей возникают серьезные проблемы своевременной доставки данных без потерь и перегрузок сети. Наиболее эффективным средством управления производительностью внутри совокупности пакетных сетей является маршрутизатор [3].

На рис. 1 изображена модель типовой глобальной сети, состоящей из маршрутизаторов и других сетевых узлов, как стационарных, так и мобильных. Предполагается, что у всех сетевых узлов есть постоянные адреса. Задача управления потоком как часть общей задачи управления производительностью сводится к согласованию скорости передачи со скоростью, с которой канал передачи способен передавать, а получатель – принимать поток пакетов. Для управления потоком создаются каналы сигнализации и обратной связи между абонентами.

Задача управления нагрузкой на сеть и предотвращения перегрузкой является более общей, чем управление потоком между двумя абонентами. В процесс управления нагрузкой включены все сетевые узлы, коммутаторы и маршрутизаторы. В алгоритмах борьбы с перегрузкой также используют обратную связь в виде различных сообщений отправителям для регулирования скорости передачи данных при возникновении заторов в сети.

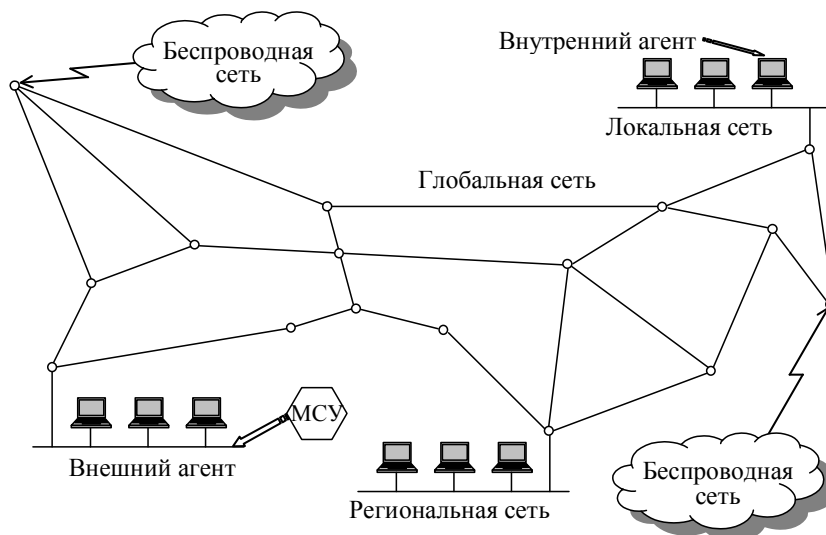


Рис. 1. Глобальная сеть, используемая локальными и региональными сетями

Поскольку ранее трафик, проходящий через порты маршрутизатора, был менее интенсивен, чем внутрисегментный, сравнительно низкая производительность маршрутизатора не делала его узким местом. Сегодня ситуация в корпоративных сетях быстро меняется. Количество пользователей стремительно растет. Пользователи избавляются от устаревающих текстовых приложений, отдавая предпочтение *Web*-интерфейсу и приложениям, основанным на новых технологиях распространения пакетов. Не работает и старое правило 80/20: сегодня большое количество информации берется из публичных серверов *Internet*, а также из *Web*-серверов других подразделений предприятия, создавая большой межсетевой трафик. Существующие сети не оптимизировались для таких непредсказуемых потоков трафика, когда каждый может общаться почти с каждым. А с проникновением в корпоративные сети технологии *Gigabit Ethernet* и *10 Gigabit Ethernet* эта проблема обострится еще больше.

Таким образом, сегодня образовался большой разрыв между производительностью типичного маршрутизатора и типичного коммутатора. В этой ситуации возможны два решения: либо отказаться вообще от маршрутизации, либо увеличить ее производительность. Этого можно добиться, применяя методы анализа текущего состояния сети, чему и посвящена данная работа.

II. Постановка задачи. Алгоритмы оценивания состояния сети. Рассматривается задача выбора класса топологий сетей и соответствующих им пучков маршрутов. В математическом смысле – задача многокритериальной оптимизации [4] на точечном множестве решений (номеров маршрутов). Особенностью задачи является дискретность целевой функции, т.е. качества того или иного маршрута.

Рассмотрим алгоритмы обработки результатов экспертизы объекта – состояния сегмента сети. Чтобы по адресу сети назначения можно было бы выбрать рациональный маршрут дальнейшего следования пакета, каждый конечный узел и маршрутизатор анализируют таблицу маршрутизации (ТМ). В ТМ представлены те элементы, типы и источники записей, которые играют принципиальную роль в решении поставленной задачи.

В современных реализациях сетевых протоколов допускается наличие в ТМ сразу нескольких строк, соответствующих одному и тому же адресу сети назначения. В этом случае при выборе маршрута принимается во внимание столбец “Метрика” – обобщенное расстояние до сети назначения. Под расстоянием понимается любая метрика, используемая в соответствии с заданным в сетевом пакете критерием (часто называемым классом сервиса). Метрика в маршрутизации как мера обобщенного расстояния может не обладать свойствами симметрии и транзитивности и не удовлетворять неравенству треугольника (хотя обладает свойством рефлексивности отношения равенства), в отличие от меры в теории множеств или функций вещественной переменной [5-7].

Одним из компонентов метрики V_{ki} является административное расстояние (АР) A_d , – параметр маршрута, с помощью которого определяется степень доверия к информации, полученной от соседних устройств [8]. Величина АР назначается, исходя из практических соображений, в пределах от 0 до 255, где нуль означает наибольшее доверие, а 255 – запрет передачи трафика по данному маршруту. Стандартные значения АР определены для источников, начиная от присоединенного интерфейса (0), статического маршрута (1), внутренних и внешних маршрутов стандартных протоколов маршрутизации (от 5 до 200) и вплоть до неизвестного источника (255).

Наличие нескольких маршрутов к одному узлу дает следующие преимущества:

- возможность передачи трафика к этому узлу параллельно по нескольким каналам связи, что повышает пропускную способность и надежность сети;
- возможность выбора оптимального маршрута по заданному критерию или группе критериев.

III. Алгоритм решения. Задачу оптимизации топологической структуры сети и оценки ее состояния поставим следующим образом. Имеются следующие векторы:

\vec{U} – вектор параметров сетевой нагрузки; \vec{Q} – вектор параметров качества сервиса QoS ;
 \vec{W} – вектор эксплуатационных характеристик сети.

Накладываются (векторные) ограничения на предельные характеристики сетевого оборудования, в том числе на общую стоимость и структуру сети:

$$C_i(\vec{U}, \vec{Q}, \vec{W}) \leq C_{i \max}, \quad i = \overline{1, N_c}, \quad (1)$$

где N_c – число элементов множеств C_i и $C_{i \max}$.

Наконец, накладываются ограничения на техническую архитектуру сети, вытекающие из условий физической и практической реализуемости: предельно достижимая скорость передачи данных, максимально допустимые расстояния между узлами, минимально достижимые задержки в коммутационном оборудовании, уровень взаимных помех и т.д. Обозначим множество этих ограничений через R_{\max} :

$$R(\vec{U}, \vec{Q}, \vec{W}) \in R_{\max}. \quad (2)$$

Требуется найти такой набор векторов $\{\vec{U}, \vec{Q}, \vec{W}\}$, который доставлял бы экстремум функционалу нормированной эффективности

$$\Psi_{en}(\vec{U}, \vec{Q}, \vec{W}) \Big|_{\vec{U}=\vec{U}_{opt}; \vec{Q}=\vec{Q}_{opt}; \vec{W}=\vec{W}_{opt}} \max \quad (3)$$

при ограничениях вида (1)-(2).

Сформулированная задача имеет весьма абстрактный вид. Чтобы конкретизировать её, необходимо задать все необходимые исходные данные и задать целевую функцию. Этот выбор довольно сложен и неоднозначен, поэтому будем руководствоваться общими постулатами теории больших систем [9]. По опыту практической эксплуатации таких систем известно, что потери (расходы), как правило, являются квадратичными функциями отклонений от оптимума. Поэтому для предварительного рассмотрения возьмём в качестве целевой функции квадратичную функцию потерь следующего вида:

$$\Psi(N_n, N_{cl} | S_i) = \Psi \left\{ a_i \left[1 - \left(\frac{|N_n - N_{cl}|}{N_n} \right) \right]^2 \mid S_i \right\}, \quad (4)$$

где N_n, N_{cl} – число байт полезных и служебных сообщений соответственно, передаваемые за единицу времени; S_i – i -я структура сети; a_i – масштабный коэффициент, выбираемый из практических соображений.

С учетом приведенных соображений запишем выражение для функционала качества выбора маршрута в следующем виде:

$$\Psi_{en} = \Psi \left(\sum_{i=1}^{N_c} v_i m_i \right), \quad (5)$$

где m_i – компоненты метрики V_{ki} i -го маршрута, $i = \overline{1, N_c}$; v_i – весовые коэффициенты, которые в общем случае удовлетворяют условию нормировки $\sum_{i=1}^{N_c} v_i = 1$.

Для выполнения условий нормировки функционала (5) введем функцию административного расстояния

$$\psi(A_d) = 1 + \log_2(1 + A_d) = 1/m_j, \quad (6)$$

где m_j – компонент метрики маршрута, связанный с AP; индекс j может иметь значение от 1 до N_c . Поскольку AP A_d лежит в пределах от 0 до 255, то значения $\psi(A_d)$, соответственно, будут изменяться от 1 до 9.

Как отмечено выше, информационная ценность параметра A_d зависит от его величины: при $A_d = 0$ информация о состоянии маршрута считается абсолютно достоверной; при $A_d = 255$ информация о состоянии маршрута считается абсолютно недостоверной и отбрасывается. Поэтому в качестве количественной оценки достоверности информации об AP можно выбрать энтропийную меру Шеннона [10] или сопоставить с достоверностью значение (в общем случае – выбранную некоторым образом функцию) весового коэффициента v_j . В качестве функции v_j можно взять функцию вида

$$\varphi(v_j) = c_j \{1 - [\Psi(A_d) - 1]/8\}, \quad n = 2k, \quad k \geq 1, \quad \text{где } c_j \text{ – коэффициент нормировки.}$$

Выбор функции AP $\psi(A_d)$ в виде (6) продиктован следующими соображениями.

Во-первых, в методе анализа иерархий выбран верхний предел шкалы, равный 9 [5]. Во-вторых, в соответствии с законом Вебера-Фехнера [11] реакции человека R на внешние раздражители s_e описываются линейной функцией логарифма интенсивности раздражителя:

$$R = a \log s_e + b, \quad a \neq 0, \quad (7)$$

где a и b – константы, выбираемые из практических соображений.

Легко заметить очевидное соответствие выбранной аппроксимации (6) психофизическому закону Вебера-Фехнера.

Остальные компоненты m_i , $i = \overline{1, N_c}$, $i \neq j$ метрики V_{ki} выбираются, исходя из сравнительных экспертных оценок преимуществ каждого из возможных маршрутов.

На рис. 2 изображена динамическая модель системы формирования и маршрутизации трафика по данным о текущем состоянии сети. В качестве алгоритма формирования трафика может использоваться, например, алгоритм дырявого или маркерного ведра [2].

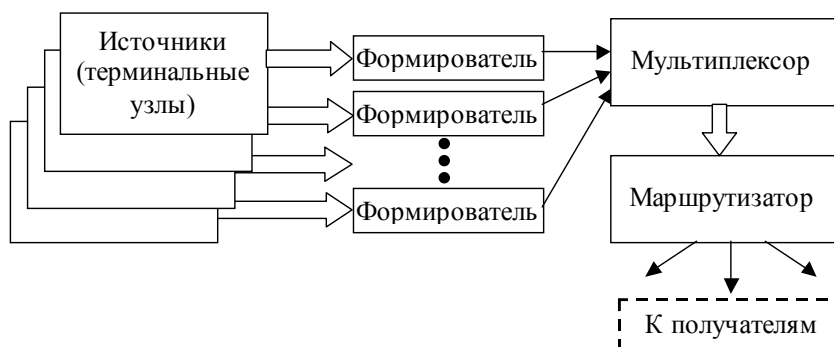


Рис. 2. Динамическая модель системы

Введем следующие обозначения:

$$[x_i \wedge y_i] \equiv \min_{x,y \in \mathbb{R}} [x_i, y_i]; \quad \max_{x,y \in \mathbb{R}} [x_i \vee y_i] \equiv [x_i, y_i], \quad i = \overline{1, N}; \quad \tau_p - \text{тактовый интервал};$$

V – объем буферной памяти формирователя; $\mathbb{R} - N$ -мерное Евклидово пространство; μ_k – общий размер вновь прибывающих пакетов; $L(U) = 1$ если U истинно, 0 если U ложно.

Состояние отдельного формирователя представляет собой функционал взаимодействия (алгебраическую сумму) таких составляющих: числа v_k свободных ячеек буферной памяти по окончании предыдущего тактового интервала, числа η_k освободившихся ячеек памяти в результате продвижения пакетов и числа μ_k вновь прибывших пакетов. Тогда уравнение динамики состояния системы формирования трафика будет иметь следующий вид:

$$v_{k+1} = v_k + [\eta_k \wedge (V - v_k)] - \mu_k L\{\mu_k \leq (v_k + \eta_k \wedge [V - v_k])\}. \quad (8)$$

Последнее слагаемое в выражении (8) представляет собой обслуженный трафик v_k :

$$v_k = \mu_k L\{\mu_k \leq (v_k + \eta_k \wedge [V - v_k])\}. \quad (9)$$

Соответственно, не обслуженный (отброшенный) трафик \bar{v}_k определяется как

$$\bar{v}_k = \mu_k - v_k. \quad (10)$$

Обслуженный трафик поступает на мультиплексор. Состояние мультиплексора определяется объемом трафика, ожидающего обработки в маршрутизаторе на k -м интервале. Уравнения динамики мультиплексора имеют вид, подобный уравнениям (8 – 10).

IV. Результаты исследований. Рассмотрим для данных задач функции чувствительности решений по выбору класса топологий и/или маршрутов доставки пакетов к ошибкам объективного или субъективного характера [10]. Рассмотрим следующую модель сети. Сеть состоит из N узлов коммутации и M линий связи. Без потери общности описания можно сделать следующие упрощающие предположения:

- трафик, поступающий в сеть, состоит из сообщений, имеющих одинаковый приоритет, и образует поток со средним значением γ_{ij} [сообщений/сек] для сообщений, возникающих в узле i и предназначенных узлу j ;

- каждая линия связи состоит из единственного дуплексного канала связи с пропускной способностью, равной d_{kl} [байт/с] ((k, l) – линия связи между узлами k и l); если линия связи между узлами k и l отсутствует, то $d_{kl} = 0$.

Обозначим символом Z_{ij} среднее время, затрачиваемое на передачу сообщения, которое возникло в узле i и предназначается узлу j (межконцевая задержка сообщения). Важной характеристикой качества функционирования сети передачи является средняя задержка сообщения в сети T , которая определяется как взвешенная сумма межконцевых задержек Z_{ij} .

Сделанные предположения позволяют сформулировать задачу поиска таких значений переменных $x_{kl}^{(i,j)}$, которые обеспечат оптимальное (наименьшее) значение величине T .

Требуется найти переменные $x_{kl}^{(i,j)}$ и, следовательно, потоки в линиях связи f_{kl} такие, что:

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \frac{f_{kl}}{d_{kl} - f_{kl}} \rightarrow \min \quad (11)$$

при выполнении ограничений:

$$f_{kl} = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} x_{kl}^{(i,j)}; \quad k, l = \overline{1, N} \quad (12); \quad f_{kl} < d_{kl}; \quad k, l = 1, 2, \dots, N, \quad (13);$$

$$\sum_{k=1}^N x_{kl}^{(i,j)} - \sum_{k=1}^N x_{lk}^{(i,j)} = \begin{cases} -1, & l = i \\ 0, & l \neq i, j \\ 1, & l = j \end{cases} \quad (14); \quad 0 \leq x_{kl}^{(i,j)} \leq 1; \quad i, j, k, l = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

Данная задача, по существу, представляет собой задачу выбора оптимальных потоков и определения оптимальных маршрутов в сети по критерию средней задержки.

Для передачи сообщений из узла i в узел j может быть использовано более одного маршрута, то есть задачей (11)-(15) описывается альтернативная процедура выбора маршрутов.

V. Выводы. Предложенный метод может применяться для решения широкого круга прикладных задач выбора топологий сети, наилучших маршрутов, программного обеспечения и пр. При использовании эффективных численных методов для точной оценки состояния сети чувствительность решения к ошибкам задания исходных данных оказывается достаточно низкой. Можно утверждать, что сбои процедуры выбора наилучшего решения будут весьма редкими событиями, а вероятность таких событий – величина второго порядка малости.

Литература

1. Вегешна Ш. Качество обслуживания в сетях IP / Ш. Вегешна. – Москва : Вильямс, 2003. – 368 с.
2. Tanenbaum A.S. Computer Networks ; 5th Ed. / Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall. – Cloth : Prentice Hall, 2011. – 960 p.
3. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud / W. Stallings. – New Jersey : Pearson Education, Inc., Old Tappan, 2016. – 538 p.
4. Толубко В.Б. Багатокритеріальна оптимізація параметрів програмно-конфігурованих мереж / В.Б. Толубко, Л.Н. Беркман, Л.О. Комарова, Є.В. Орлов // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №4. С. 5-11.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. – Москва : Радио и связь, 1993. – 278 с.
6. Бешелев С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Д. Гурвич. – Москва : Статистика, 1980. – 263 с.
7. Пугачев В.С. Лекции по функциональному анализу / В.С. Пугачев. – Москва : МАИ, 1996. – 744 с.
8. Baumann R. A Survey on Routing Metrics / Rainer Baumann, Simon Heimlicher, Mario Strasser, Andreas Weibel – TIK Report 262, Computer Engineering and Networks Laboratory. – ETH-Zentrum, Switzerland, February 10, 2007. 53 p.
9. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – Москва : Наука, 1981. – 488 с.
10. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации / В.И. Дмитриев. – Москва : Высшая школа. – 1989. – 320 с.
11. Шеридан Т.Б. Системы человек – машина: Модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором / Т.Б. Шеридан, У.Р. Феррел ; под ред. К.В. Фролова ; пер. с англ. – Москва : Машиностроение. – 1980. – 400 с.

Автор статті

Моденов Сергій Юрійович – аспірант, Національний авіаційний університет, Київ.
Тел. +380 (93) 600 85 39. E-mail: modenovs@mail.ru

Author of the article

Modenov Serhiy Yuriyovich – postgraduate student, National Aviation University, Kyiv.
Tel.: +380 (93) 600 85 39. E-mail: modenovs@mail.ru

Дата надходження
в редакцію: 13.07.2016 р.

Рецензент:
доктор технічних наук, професор К.С. Козелкова
Державний університет телекомунікацій