

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАФИКА В IP СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕНЗОРНОГО ПОДХОДА**

**Д.Ю. Пономарев**

Сибирский федеральный университет, DPonomarev@sfu-kras.ru

В связи с развитием технологий пакетной коммутации (ATM, MPLS, IP, Ethernet) и устранением ряда ограничений данных технологий: поддержка качества обслуживания (QoS – quality of service), увеличение адресного пространства и др., основной базой для построения становится протокол IP (Internet Protocol), а концепция построения сетей следующего поколения (NGN – Next generation networks), обеспечивающая требуемую гибкость при внедрении новых услуг по обработке информационных потоков, получила название IMS (IP Multimedia Subsystem – система обработки мультимедийных потоков с использованием IP) [1]. В рамках данной концепции происходит переход от традиционной вертикальной схемы предоставления услуг сети к горизонтальной, что позволяет решать задачи по внедрению новых услуг и переходу на новые технологии транспортной сети на качественно новом уровне.

Следует отметить, что создание технологически новых сетей требует решения задач управления распределением информационных потоков в узлах сети, а также связанной с этим задачи поддержки заданного уровня качества обслуживания. Данные задачи являются наиболее актуальными в современных инфокоммуникационных сетях [2,3], но их решение связано со значительными сложностями как по конкретной постановке задачи и определении исходных данных, так и по вычислительным затратам. Трудность решения данной задачи для глобальных сетей повышается в связи с использованием различных технологий инфокоммуникационных сетей, наличием различного уровня сложности топологий сетей, присутствием неоднородности информационной нагрузки, необходимостью обеспечения различных уровней качества обслуживания для разных информационных потоков и т.д. Все это усложняет задачу распределения трафика, а в некоторых случаях приводит к невозможности решения поставленной задачи классическими методами теории систем и сетей массового обслуживания. Учитывая современный подход к построению моделей распределения трафика, связанный с определением уровней приложения и виртуальной сети, а также с выделением плоскостей управления, приложений и опорной сети; требуется обеспечить решение задачи распределения трафика на каждом уровне модели взаимодействия открытых систем (ВОС) [3,4].

В данной работе предлагается применить для распределения трафика в сети IP математический аппарат преобразования систем координат, рассматривая исследуемые сети, как геометрические объекты, проекции которых в различных системах координат различны, но физические

свойства самих объектов при этом не меняются. Основоположителем тензорной методологии анализа сетей является известный американский ученый и инженер Г. Крон, который впервые использовал тензорный анализ и топологию в приложении к теории электрических сетей. Дальнейшее развитие идеи тензорного анализа для информационных систем получили в работах Петрова А.Е., Арменского А.Е., Кузнецова О.Л., Петрова М.Н. и др.

Для инженерного анализа сетей IP в данной работе предлагается использовать в качестве инвариантного уравнения выражение для определения загрузки канала  $\rho$ , дающее связь между интенсивностью поступления информации от источника  $\lambda$ , выраженная в значениях скорости передачи информации (в Мб/с) и максимальной пропускной способностью канала ( $B$  - bandwidth), определяемая стандартными скоростями технологии Ethernet, как основной используемой для построения IP сетей на нижних уровнях модели ВОС:  $\rho = \lambda/B$ . С другой стороны, модернизируя данное выражение можно получить:

$$\lambda = \rho B \quad (1)$$

В данной работе метод распределения пропускной способности, основан на следующих предположениях. Во-первых, что поток вызовов с одной и той же интенсивностью ( $\lambda$ ) поступления вызовет при неизменной скорости интерфейса одну и ту же загрузку ( $\rho$ ) каналов при изменении структуры и можно считать, что будет выполняться соотношение (инвариант):

$$\rho\lambda = \rho'\lambda' \quad (2)$$

где переменные со штрихом для одной структуры сети, без штриха для другой. Во-вторых, объединение систем в единую сеть не вызывает никаких изменений процесса обслуживания информационного потока. В-третьих, изменение структуры сети не предполагает качественное изменение основных соотношений между физическими величинами, описывающими простейший элемент, а определяет только их численное изменение. Следовательно, для любой сети справедливо матричное уравнение:

$$\bar{\lambda} = \bar{B}\bar{\rho} \quad (3)$$

Определение компонент геометрических объектов примитивной сети состоит в нахождении векторов  $\bar{\lambda}'$ ;  $\bar{\rho}'$  и  $\bar{\mu}'$ . Находя соотношение между нагрузками ветвей примитивной сети и нагрузками в исходной сети, находим матрицу перехода из одной системы координат в другую  $\bar{A}$ .

Тогда, исходя из инварианта  $\bar{\rho}\bar{\lambda} = \bar{\rho}'\bar{\lambda}'$ , определяем соотношение между нагрузками систем обработки информации в исходной и примитивной сетях, как:  $\bar{\rho}' = \bar{A}\bar{\rho}$ , где  $\bar{A}$  – матрица преобразования. Используя (1), можно записать инвариант (2), как:  $\bar{\rho}\bar{\lambda} = \bar{\rho}\bar{A}^T\bar{\lambda}'$ . Далее, находим соотношение между распределением интенсивностей потоков в примитивной и исходной сетях, как:  $\bar{\lambda} = \bar{A}^T\bar{\lambda}'$  или  $\bar{\lambda}' = (\bar{A}^T)^{-1}\bar{\lambda}$ . Следовательно, матричное уравнение  $\bar{\lambda}' = \bar{B}'\bar{\rho}'$  для примитивной сети можно представить в виде:  $(\bar{A}^T)^{-1}\bar{\lambda} = \bar{B}'\bar{A}\bar{\rho}$ . Откуда,  $\bar{\lambda} = \bar{A}^T\bar{B}'\bar{A}\bar{\rho}$ , а так как, для исходной сети справедливо (3), то правило преобразования пропускной способности определяется, как:  $\bar{B} = \bar{A}^T\bar{B}'\bar{A}$ . Тогда, матричное уравнение для исходной сети будет иметь вид:

$$(\bar{A}^T\bar{B}'\bar{A})\bar{\rho} = \bar{A}^T\bar{\lambda}', \quad (4)$$

в котором исходная сеть описана в символах примитивной. Далее, решая полученное уравнение относительно  $\bar{\rho}$ , находим нагрузку каждого интерфейса  $\bar{\rho}_{\text{interface}} = \bar{A}\bar{\rho}$  и определяем используемую пропускную способность каждого интерфейса  $\bar{\lambda}_{\text{interface}} = \bar{B}\bar{\rho}_{\text{interface}}$ . Данный подход позволяет при минимальных затратах оценить нагрузку сетей и произвести распределение пропускной способности сети в зависимости от заданных характеристик интерфейсов сети, обеспечив тем самым возможность оптимального использования ресурсов, систем в частности, и сети в целом.

При проектировании или эксплуатации телекоммуникационной сети, работающей на базе протокола IP согласно приведенным выше теоретическим предположениям можно учитывать, каким образом производить распределение трафика в сети. На рис. 1 представлен пример IP сети.

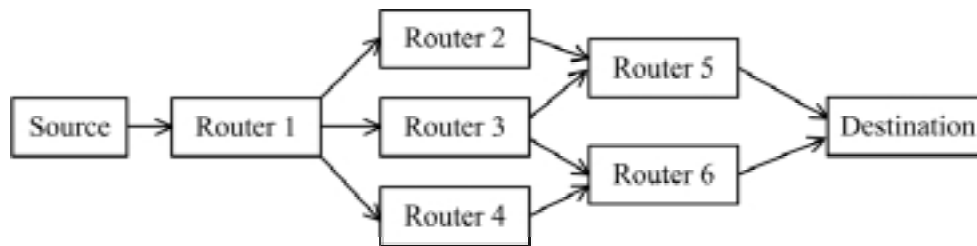


Рис. 1 - Исследуемая сеть

Модель распределения интенсивности информационных потоков по сети представляет собой набор интерфейсов с заданными параметрами по скорости передачи информации (рис. 2). Рассматривая интерфейсный

уровень взаимодействия, любому устройству IP сети можно сопоставить модель сети массового обслуживания, каждая система которой будет моделировать отдельный физический интерфейс устройства передачи информации (входной/выходной интерфейс).

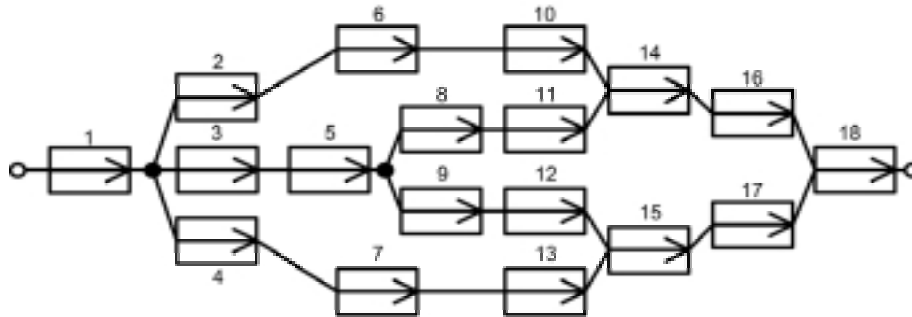


Рис. 2 - Модель исследуемой сети

Источник Source направляет информационный поток в маршрутизатор Router 1, и так как это единственный источник нагрузки в сети, то нет необходимости представлять его в модели распределения трафика по сети в виде отдельной системы. Маршрутизатор Router 1 в модели представлен системами 1-4, т.к. имеет один входной и три выходных интерфейса, скорость передачи в которых может быть различна. Аналогично, маршрутизатор Router 3 представлен набором из систем 5,8 и 9. Маршрутизаторы Router 2 и Router 4 в модели отображены в виде систем 6 и 7 соответственно, так как имеют по одному входному и выходному интерфейсах. Модель распределения потоков в маршрутизаторах Router 5 и Router 6 состоит из систем 10,11,14 и 12,13,15 соответственно. Далее по двум интерфейсам (системы 16 и 17) информация от источника поступает получателю (Destination), где в системе 18 осуществляется окончательная обработка информации. В связи с тем, что рассматривается сеть с бесконечно малыми потерями, то весь трафик сгенерированный источником поступает к получателю.

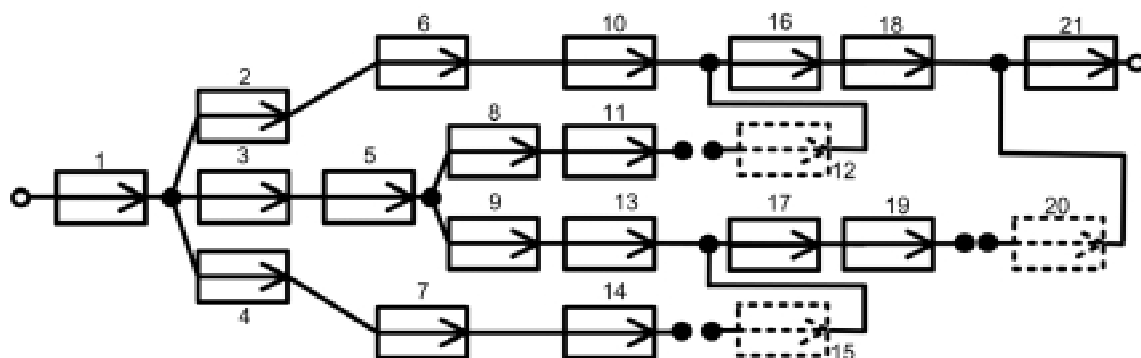


Рис. 3 - Узловая модель исследуемой сети

Для применения тензорного анализа формируется узловая модель сети, представленная на рис. 3. Мнимые ветви формируются в связи с применением узлового метода тензорного анализа, т.е. все контуры преобразуются в узловые пары, в связи с чем, появляются мнимые ветви с теми же интенсивностями поступления и обслуживания, что и для истинных. На рис. 3 показано преобразование схемы с появлением мнимых ветвей 12, 15 и 20; для которых соблюдается:  $\lambda_{11} = \lambda_{12}$ ,  $\mu_{11} = \mu_{12}$ ,  $\lambda_{15} = \lambda_{14}$ ,  $\mu_{15} = \mu_{14}$ ,  $\lambda_{20} = \lambda_{19}$  и  $\mu_{20} = \mu_{19}$ . Введение мнимых ветвей позволяет сохранить соотношения (рис. 3):  $\lambda_{16} = \lambda_{10} + \lambda_{11}$ ,  $\lambda_{17} = \lambda_{13} + \lambda_{14}$  и  $\lambda_{21} = \lambda_{18} + \lambda_{19}$ , которые могут быть нарушены при замене контура на «узловую» пару.

Записывая составляющие матричного уравнения (4), правую часть можно преобразовать к виду с учетом суммы интенсивностей в узлах равной нулю и интенсивностей мнимых ветвей равных соответствующим интенсивностям реальных ветвей (ввиду громоздкости матрицы  $\bar{A}$ ,  $\bar{\rho}$  и  $\bar{B}$  здесь не приводятся):

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4 \\ \lambda_2 - \lambda_6 \\ \lambda_3 - \lambda_5 \\ \lambda_4 - \lambda_7 \\ \lambda_5 - \lambda_8 - \lambda_9 \\ \lambda_6 - \lambda_{10} \\ \lambda_7 - \lambda_{14} \\ \lambda_8 - \lambda_{11} \\ \lambda_9 - \lambda_{13} \\ \lambda_{10} + \lambda_{12} - \lambda_{16} \\ \lambda_{11} \\ -\lambda_{12} \\ \lambda_{13} + \lambda_{15} - \lambda_{17} \\ \lambda_{14} \\ -\lambda_{15} \\ \lambda_{16} - \lambda_{18} \\ \lambda_{17} - \lambda_{19} \\ \lambda_{18} + \lambda_{20} - \lambda_{21} \\ \lambda_{19} \\ -\lambda_{20} \\ \lambda_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \lambda_{11} \\ -\lambda_{12} \\ 0 \\ \lambda_{14} \\ -\lambda_{15} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \lambda_{19} \\ -\lambda_{20} \\ \lambda_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \lambda_{11} \\ -\lambda_{11} \\ 0 \\ \lambda_{14} \\ -\lambda_{14} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \lambda_{19} \\ -\lambda_{19} \\ \lambda_{21} \end{pmatrix}$$

Естественно, в связи с тем, что в рассматриваемой сети присутствует один источник с интенсивностью  $\lambda_1$ , то все интенсивности могут быть выражены через  $\lambda_1$ .

Определяя  $p_i$ , как вероятность поступления нагрузки в  $i$ -ый узел, можно задать интенсивности:  $\lambda_{11}, \lambda_{14}, \lambda_{19}, \lambda_{21}$ , как (рис. 3):  $\lambda_{11} = p_8 p_3 \lambda_1$ ,  $\lambda_{14} = p_4 \lambda_1$ ,  $\lambda_{19} = (p_9 p_3 + p_4) \lambda_1$ ,  $\lambda_{21} = (p_2 + p_8 p_3 + p_9 p_3 + p_4) \lambda_1$ . При этом, учитывая, что потери в данной сети малые можно принять:  $\lambda_{21} = \lambda_1$ . Используя вектор управления, содержащий вероятности разделения нагрузки по узлам  $(p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_8 \ p_9)$  можно управлять распределением трафика по узлам сети с целью обеспечения определенного значения загрузки интерфейсов сети при установленном значении интенсивности информационных потоков. При этом, исходя из того, что  $p_2 + p_3 + p_4 = 1$  и  $p_8 + p_9 = 1$  (сумма интенсивностей в узле равна нулю), достаточно использовать вероятности  $p_3$ ,  $p_4$  и  $p_8$ .

Таким образом, переходя к численным результатам, задавая вектор  $(p_3 \ p_4 \ p_8) = (0.45 \ 0.25 \ 0.35)$ , определяя исходные данные для матрицы  $\bar{V}$ :  $b_{i,j} = 0$  для  $i \neq j$ ;  $b_{i,j} = 100$  (что подразумевает скорость интерфейса 100 Мб/с) для  $i = j$  и решая уравнение (4) относительно  $\bar{\rho}$ ; получаем следующее распределение трафика по сети (таблица 1).

В дополнение, необходимо отметить, что используя вектор управления, содержащий вероятности разделения нагрузки по узлам  $(p_3 \ p_4 \ p_8)$  можно не только управлять распределением трафика по узлам сети, но и обеспечивать определенный уровень качества обслуживания, что определяется полученными при расчете значениями загрузки интерфейсов. Данные значения могут использоваться в дальнейшем для нахождения вероятностно-временных характеристик, как показателей QoS. Например, можно определить значение среднего времени задержки либо по заданному маршруту, либо по всей сети в целом при установленном значении интенсивности потоков. Таким образом, при заданном значении интенсивности источника  $\lambda_1$ , определенных значениях пропускной способности в каждом интерфейсе и использовании в качестве модели систему массового обслуживания вида M/M/1 можно изменяя значения коэффициентов  $p_3$ ,  $p_4$  и  $p_8$  определить изменение времени

задержки по сети как:  $T = \sum_{i=1}^{18} \frac{1/b_{i,i}}{1-\rho_i}$  (без учета мнимых ветвей), а  $\rho_i$

определяется как  $\bar{\rho}_{\text{interface}} = \bar{A}\bar{\rho}$ . Полученные при расчете значения вероятностно-временных показателей необходимо использовать для получения значений оценок качества обслуживания QoS на следующем

сетевом уровне, т.к. в конкретной реальной сети распределение потоков по узлам не случайное, а подчиняется таблице маршрутизации. На данном уровне также необходимо учитывать и распределение информационных и сигнальных потоков по сети. Для каждого маршрута можно записать следующие формулы:  $p_{потерь} = 1 - \sum_{i=1}^m (1 - p_{потерь,i})$  (рассматривается совокупность ветвей на маршруте, как последовательный граф);  $T_{задержки} = \sum_{i=1}^m T_{задержки,i}$ , где  $m$  определяется общим числом систем, составляющих маршрут передачи/обработки (при необходимости, можно учесть и наличие обходных маршрутов).

Таблица 1 – Распределение трафика по сети

Система	Интерфейс	Задействованная пропускная способность, Мб/с	Загрузка интерфейса	Скорость интерфейса, Мб/с
1	источник	95	0.95	100
2	1-2	28.5	0.285	
3	1-3	42.75	0.4275	
4	1-4	23.75	0.2375	
5	1-3 (вх.)	42.75	0.4275	
6	2-5	28.5	0.285	
7	4-6	23.75	0.2375	
8	3-5	14.9625	0.149625	
9	3-6	27.7875	0.277875	
10	2-5 (вх.)	28.5	0.285	
11	3-5 (вх.)	14.9625	0.149625	
12	3-6 (вх.)	27.7875	0.277875	
13	4-6 (вх.)	23.75	0.2375	
14	5-получатель	43.4625	0.434625	
15	6-получатель	51.5375	0.515375	
16	5-получатель (вх.)	43.4625	0.434625	
17	6-получатель (вх.)	51.5375	0.515375	
18	получатель	95	0.942	

В заключении, можно отметить следующее: протокол IP является наиболее распространенным и позволяет объединить практически все существующие на сегодняшний момент услуги сетей с обеспечением заданного уровня QoS; тензорный метод позволяет достаточно просто формализовать проектные процедуры для сетей такого типа; сложные топологии, необходимость учета особенностей передачи в различных

технологиях, динамическое управление маршрутами потоков: всё это приводит к сложностям в распределении трафика и определении показателей качества классическими методами; тензорный метод позволяет распределять нагрузку и оценивать требуемые показатели качества при приемлемых вычислительных затратах. Следует отметить также, что основными достоинствами предложенного метода являются: линейная зависимость сложности расчетов от масштаба сети, возможность оценки характеристик сетей при обслуживании разнородных информационных потоков, возможность решения мультикритериальной задачи при оценке параметров телекоммуникационных сетей, а также простота программной реализации [5].

### Литература

1. P.Agrawal, Jui-Hung Yeh, Jyh-Cheng Chen, Tao Zhang. IP Multimedia Subsystems in 3GPP and 3GPP2: Overview and Scalability Issues // IEEE Communications Magazine. – January, 2008. – P.138-145.
2. Y. Zhang, M. Roughan, N. Duffield, A. Greenberg. Fast Accurate Computation of Large-Scale IP Traffic Matrices from Link Loads. – ACM SIGMETRICS. – 2003. – pp. 206-217.
3. T. Braun, M. Diaz, J. Gabeiras, T. Staub. End-to-End Quality of Service Over Heterogeneous Networks. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
4. Росляков А.В. Виртуальные частные сети. Основы построения и применения. - М.: Эко-Трендз, 2006. - 304 с.
5. Пономарев Д.Ю. Исследование характеристик пакетных сетей узловым методом тензорного анализа // Программные продукты и системы. – 2009. – №4. – С. 65-69.