

УДК 621.391

ПОТОВОКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ОЧЕРЕДЕЙ В MPLS-СЕТИ С ПОДДЕРЖКОЙ TRAFFIC ENGINEERING QUEUES



[Али С. Али](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники



[А.В. СИМОНЕНКО](#)

Харьковский университет
Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба

Запропоновано поточкову модель балансування черг на вузлах MPLS-мережі. Новизна моделі полягає в тому, що вона на відміну від раніше відомих моделей враховує особливості технології Traffic Engineering Queues, націленої на забезпечення збалансованої завантаженості буферного ресурсу мережного вузла.

The article proposes a flow-base model balancing queues at the nodes of MPLS-network. The novelty of the model is that it, in the contrast to the previously known models takes into account the features of the Traffic Engineering Queues technology, aimed at achieving a balanced buffer resource node load.

Предложена потоковая модель балансировки очередей на узлах MPLS-сети. Новизна модели состоит в том, что она в отличие от ранее известных моделей учитывает особенности технологии Traffic Engineering Queues, нацеленной на обеспечение сбалансированной загруженности буферного ресурса сетевого узла.

Введение

По причине стремительного развития телекоммуникационных технологий физического и канального уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) все большая ответственность за решение задач по обеспечению качества обслуживания (*Quality of Service, QoS*) в современных мультисервисных телекоммуникационных сетях (ТКС) перекладывается на средства (механизмы и протоколы) сетевого уровня этой модели. На сетевом уровне ЭМВОС решаются такие важные сетевые задачи системного характера, как маршрутизация, распределение и резервирование канального и буферного ресурса ТКС, которые условно объединены в комплекс задач по управлению трафиком.

При этом, численные значения таких ключевых для мультимедийных приложений показателей *QoS* как средняя задержка, джиттер, уровень потерь пакетов во многом определяются эффективностью управления очередями (буферным ресурсом) на маршрутизаторах ТКС [1, 2]. Именно задержки и потери пакетов в очередях оказывают наиболее критичное влияние на разборчивость речи, качество видеоизображения и т.д. Поэтому научно-практические разработки и исследования, связанные с оптимизацией процессов управления очередями на основе усовершенствования или разработки новых математических моделей и алгоритмов (методов), являются важными и актуальными.

I. Анализ известных решений по обслуживанию очередей в ТКС

В настоящее время в современных ТКС нашли свое применение достаточно большое число алгоритмов управления очередями [1, 2] с точки зрения их обслуживания и превентивного ограничения длины очереди (рис. 1).

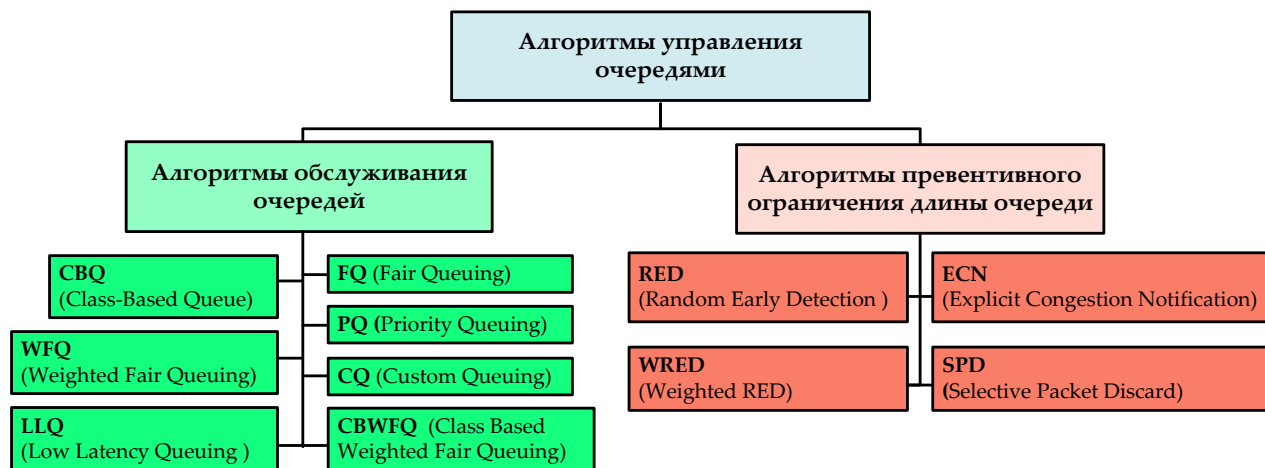


Рис. 1. Классификация алгоритмов управления очередями в ТКС

К первой группе относятся такие алгоритмы, как *FQ*, *PQ*, *WFQ*, *LLQ* и др., которые обеспечивают формирование очередей, их обслуживание и в явном или неявном виде распределяют пропускную способность (ПС) исходящего канала связи (интерфейса) между потоками пакетов различных очередей. Если же алгоритмы этой группы не справляются с поступающей нагрузкой, то для борьбы с перегрузкой очередей используются алгоритмы второй группы – *RED*, *WRED*, *ECN*, *SPD* и др., к задачам которых относится ограничение длины очереди путем выборочного отбрасывания пакетов различных потоков (*RED*, *WRED*, *SPD*) или явного уведомления узла-источника о перегрузке (*ECN*).

Таким образом, дабы избежать возможных потерь пакетов алгоритмы обслуживания очередей должны отвечать следующему перечню требований:

- ✓ поддержка функций дифференцированного обслуживания пакетов;
- ✓ обеспечение гарантий по качеству обслуживания пакетов различных потоков (классов);
- ✓ обеспечение справедливого обслуживания пакетов различных очередей, недопущение перегрузки каждой отдельной очереди и сетевого узла в целом;
- ✓ обеспечение динамического перерасчета порядка использования очередей в зависимости от загруженности сети, изменения характеристик трафика и т.д.;
- ✓ реализация равномерной обработки всех пакетов трафика с одинаковым приоритетом;
- ✓ обеспечение высокого уровня согласованности функционирования с другими средствами управления ресурсами сети;
- ✓ простота практической реализации.

Однако не все из перечисленных требований в должной мере учтены в существующих алгоритмах обслуживания очередей. Это проявляется, например, в том, что обслуживание очередей практически не согласуется с решениями других задач по управлению трафиком (маршрутизации, ограничение длины очереди и др.). Кроме того, остается автоматизированным лишь процесс опроса очередей (*round robin*), а вот решения задачи по их формированию и определению порядка следования пакетов из очереди в канал связи (КС) все еще носят преимущественно статический характер, т.е. решаются административно. Так в алгоритме CQ порядок обслуживания пакетов и распределения пропускной способности исходящего КС определяется значением задаваемого вручную счетчиком байт (*byte count*) для каждой очереди. В алгоритмах CBQ, CBWFQ и LLQ порядок распределения ПС задается также административно, но уже в явном виде командами *bandwidth* и *priority* [2].

Недостатки технологических решений определили актуальность проведения дополнительных научных исследований в области обслуживания очередей на узлах сети. Например, с целью учета характеристик обслуживаемого трафика необходимо использовать именно потоковые модели (*flow-based model*), в рамках которых учитывается также интенсивность трафика наряду с другими важными параметрами – длины пакета, его приоритета и т.д. Это особенно актуально ввиду того, что многие средства управления трафиком в настоящее время становятся потокоориентированными – *Flow-Based WFQ*, *Flow-Based Routing* или *Flow-Based Weighted RED*.

Кроме того, при оптимизации управления трафиком в сетях MPLS (*MultiProtocol Label Switching*), которые находят свое все большее использование по причине внедрения концепции сетей следующего поколения NGN (*Next Generation Network*), важную роль играет технология инжиниринга трафика (*Traffic Engineering, TE*). Реализация принципов, заложенных в *Traffic Engineering*, при управлении различными сетевыми ресурсами (трафиком, очередями, пропускной способностью каналов связи и т.д.) по мнению разработчиков данной технологии должно обеспечить рост качества обслуживания в сети в целом. Это основывается на том, что в основу технологии инжиниринга трафика положены идеи балансировки использования разнородных сетевых ресурсов – информационных, буферных и канальных.

Эффективность технологии *Traffic Engineering* подтверждается тем, что многие сетевые средства управления трафиком совершенствуются на ее принципах, подтверждением тому являются протоколы резервирования ресурсов *RSVP-TE* и *LDP-TE*, протоколы маршрутизации *IS-IS-TE*, *OSPF-TE*. В этой связи заслуживает внимания подход, основанный на балансировке очередей на принципах технологии инжиниринга трафика (*Traffic Engineering Queues*) [3, 4], предложенного для управления очередями в MPLS-сетях.

II. Потоковая модель балансировки очередей на принципах *Traffic Engineering Queues*

В процессе моделирования задач по обслуживанию очередей условимся, что число отдельных трафиков или агрегированных по классам или приоритетам пото-

ков известно и равно M , что соответствует принятым на практике решениям в рамках известных методов маркировки пакетов. Наряду с этим прием, что максимальное число очередей на сетевом узле также фиксировано (N). Например, в алгоритме приоритетного обслуживания PQ (рис. 1) может быть выделено до четырех очередей, в алгоритме взвешенного справедливого обслуживания WFQ по умолчанию число очередей равно 256, а в алгоритме $CBWFQ$ число очередей соответствует количеству классов обслуживаемых трафиков и равно 64 [1, 2].

Кроме того, обозначим через a_i ($i = \overline{1, M}$) – интенсивность трафика i -го класса, поступающего на обслуживание сетевым узлом. Кроме того, пусть b_j ($j = \overline{1, N}$) – часть пропускной способности исходящего КС, которая выделена j -й очереди ($j = \overline{1, N}$), что типично, например, для алгоритма $CBWFQ$. Одно из ключевых отличий предлагаемого решения будет состоять в том, что переменные b_j ($j = \overline{1, N}$) будут рассчитывать динамично, адаптируясь к изменению состояния сетевого узла, а не административно, как, например, в $CBWFQ$.

В ходе управления очередями необходимо выполнить условие отсутствия перегрузки канала связи:

$$\sum_{j=1}^N b_j \leq b, \quad (1)$$

где b – пропускная способность исходящего КС.

Кроме того, с целью предотвращения перегрузки сетевого узла необходимо обеспечить выполнение следующего условия:

$$\sum_{i=1}^M a_i \leq b. \quad (2)$$

Выполнение условия (2) определяет необходимость превентивного ограничения интенсивности суммарного (агрегированного) потока пакетов, поступающих на сетевой узел, чтобы она не превышала пропускную способность исходящего канала связи. Это функция, как правило, алгоритмов произвольного раннего обнаружения перегрузки и ограничения длины очереди RED и $WRED$ (рис. 1).

Придать динамический характер процессу обслуживания очередей в рамках предлагаемой модели можно путем введения управляющей переменной x_{ij} , под которой подразумевалась доля i -го трафика, поступающего для обслуживания в j -ю очередь. Согласно физическому смыслу x_{ij} имеют место следующие условия:

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}), \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \quad (i = \overline{1, M}), \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^M a_i x_{ij} \leq b_j \quad (j = \overline{1, N}). \quad (5)$$

Выполнение условия (4) гарантирует отсутствие потерь пакетов на рассматриваемом сетевом узле. Условия (5) вводятся для предотвращения перегрузки пропускной способности КС, выделяемой для передачи пакетов той или иной очереди сетевого узла в процессе управления. По аналогии с моделью, рассмотренной в работах [5, 6], в качестве искомого вектора выберем вектор

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_{ij} \\ - \\ b_j \end{bmatrix} \quad (i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N}), \quad (6)$$

в ходе расчета которого удастся обеспечить согласованность в решении задач обслуживания очередей и динамического распределения за ними пропускной способности исходящего канала связи.

III. Формализация условий предотвращения перегрузки очередей на узле MPLS-сети

В ходе выполнения условий (5) ввиду случайного и нестационарного характера сетевого трафика на узле возникают очереди и связанные с ними задержки пакетов. С целью введения верхней границы подобных задержек на узлах ТКС общую буферную емкость, как правило, ограничивают. Таким образом, для каждой очереди определим ее текущую загрузженность и максимальную емкость, обозначив их соответственно через $\bar{n}_j$ и $n_j^{\max}$ ($j = \overline{1, N}$). Кроме того, дополним условия предотвращения перегрузки отдельных очередей по их пропускной способности (5) условиями предотвращения перегрузки очередей по их длине. В общем виде искомые условия будут иметь вид:

$$\bar{n}_j \leq n_j^{\max} \quad (j = \overline{1, N}), \quad (7)$$

и задача теперь сводится лишь к выбору (обоснованию) аналитического выражения для расчета средней длины очереди в процессе обслуживания.

Для формулировки искомых условий необходимо задаться моделью трафика (его характеристиками – интенсивностью, длиной пакета и т.д.) и моделью обслуживания пакетов в рамках отдельно взятой очереди, в качестве которой на практике, как правило, реализуется схема *FIFO* (*First In – First Out*). Кроме того, выбирая гипотезу относительно характеристик обслуживаемого трафика, можно описать отдельную очередь известной системой массового обслуживания (СМО), в рамках которой обеспечивается корректность расчета ее вероятностно-временных характеристик, в том числе времени обслуживания и средней (текущей) длины очереди. Так, например, при моделировании процесса обслуживания в отдельной очереди различными типами систем массового обслуживания средняя длина очереди, опуская индекс очереди, будет выражаться следующими аналитическими зависимостями [7]:

$$\text{СМО М/М/1:} \quad \bar{n} = \frac{\rho}{1 - \rho} - \rho;$$

$$\text{СМО } M/M/1/n^{\max}: \quad \bar{n} = \frac{\rho^2 \left[1 - (n^{\max} + 1)\rho^{n^{\max}} + n^{\max}\rho^{n^{\max}+1} \right]}{(1 - \rho^{n^{\max}+2})(1 - \rho)} - \rho;$$

$$\text{СМО } M/D/1: \quad \bar{n} = \frac{\rho}{1 - \rho} - \frac{\rho^2}{2(1 - \rho)} - \rho;$$

$$\text{СМО } M/D/1/n^{\max}: \quad \bar{n} = \frac{\sum_{n=0}^{n^{\max}} n \left[\sum_{j=0}^n \frac{e^{j\rho} (-j\rho)^{n-j}}{(n-j)!} - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{e^{j\rho} (-j\rho)^{n-j-1}}{(n-j-1)!} \right]}{\sum_{j=0}^{n^{\max}+1} \frac{e^{j\rho} (-j\rho)^{n^{\max}-j+1}}{(n^{\max}-j+1)!}} - \rho;$$

$$\text{СМО } fBM/D/1: \quad \bar{n} = \frac{\rho^{1/2(1-H)}}{(1 - \rho)^{H/(1-H)}} - \rho,$$

где $\rho = \frac{\sum_{i=1}^M a_i x_{ij}}{b_j}$, $0.5 \leq H \leq 1$ – параметр самоподобия (Херста).

При этом каждому типу трафика, а значит и каждой очереди, может соответствовать своя модель обслуживания, не обязательно отвечая перечню вариантов СМО, приведенных выше. Кроме того, нетрудно заметить, что условие (7) является более строгим, чем требование (5). С точки зрения обеспечения гарантий QoS по показателям межконцевой средней задержки в ряде случаев удобней неравенства (7) заменить на временные условия

$$\bar{\tau}_j \leq \tau_j^{\max} \quad (j = \overline{1, N}), \quad (8)$$

где средняя задержка обслуживания $\bar{\tau}$ в той или иной очереди может быть рассчитана по известной средней длине очереди на основе формулы Литтла. Это позволило в терминах предложенной выше модели получить условие (8) в более детальном виде

$$\frac{n_j + \rho}{\sum_{i=1}^M a_i x_{ij}} \leq \tau_j^{\max} \quad (j = \overline{1, N}). \quad (9)$$

Использование системы условий (9) особенно актуально в случае, если численные значения требуемой межконцевой средней задержки (как показателя QoS) нормированы по отдельным участкам сети. Тогда в процессе управления очередями важно не превысить эти нормированные (заданные) для отдельно взятой пары узел-канал значения средней задержки пакетов, что особенно характерно при решении задач по обеспечению гарантированного QoS в рамках архитектурной модели *Integrated Services (IntServ)*.

IV. Формулировка оптимизационной задачи по обслуживанию очередей на узле MPLS-сети с поддержкой Traffic Engineering Queues

В связи с тем, что, в общем случае, выбор управляющих переменных x_{ij} и b_j в рамках ограничений (1), (3), (4) и (7) или (9) можно произвести множеством случаев, то целесообразно задачу, связанную с расчетом вектора (6), сформулировать в виде оптимизационной. Основным требованием к целевой функции является учет физики протекающих на узле процессов обслуживания пакетов (1)–(7), (9), а также соответствие получаемых решений принципам концепции *Traffic Engineering Queues*, касающихся обеспечения сбалансированной загрузки буферных ресурсов. С этой целью выше изложенную модель важно дополнить следующими условиями

$$f(p_j, d_j) \cdot n_j \leq \alpha, \quad (j = \overline{1, N}), \quad (10)$$

где α – верхний динамически управляемый предел загруженности очередей на узле ТКС, $f(p_j)$ – некоторая функция от характеристик j -го потока, например, его приоритета p_j или длины пакета d_j . Именно эти характеристики на практике влияют на порядок обслуживания пакетов в очередях, например, в алгоритме *FQ* учитывается длина пакета, а в алгоритме *WFQ* – и длина пакета, и его приоритет.

Как правило, чем меньше длина пакета, тем «качественней» обслуживается поток, т.к. небольшими пакетами передается трафик реального времени, который очень чувствителен к задержкам. Стоит отметить, что поток с более высоким приоритетом должен традиционно [2] обслуживаться лучше, чем трафик с низким приоритетом. В результате, значение функции $f(p)$ должно быть тем больше, чем выше приоритет и чувствительность к задержке данного потока.

В этой связи, в выражении (10) в качестве функции характеристик потока можно использовать следующее выражение:

$$f(p_j, d_j) = \frac{p_j}{v \cdot d_j}, \quad (j = \overline{1, N}), \quad (11)$$

где v – некоторый нормировочный коэффициент, который должен сглаживать различие в порядке значений приоритета (0÷7) и длины пакета в байтах. По аналогии с алгоритмом *WFQ* значение этого коэффициента может варьироваться в зависимости от версии операционной системы (IOS) маршрутизатора. Например, в операционных системах IOS версии 12.0(4)T и ниже $v = 4096$, а в операционных системах IOS версии 12.0(5)T $v = 32768$ [1]. Если в одной очереди обслуживаются потоки с различными (но по определению близкими) значениями длины и (или) приоритета пакета, то в выражении (11) целесообразно использовать их усредненные значения.

Тогда задача обслуживания очередей может быть сведена к задаче балансировки их длины в ходе минимизации следующей целевой функции:

$$\min_{x, b, \alpha} \alpha, \quad (12)$$

что соответствует минимизации верхнего порога загруженности очередей на узле ТКС, взвешенного относительно таких характеристик потока, как длина пакета и его приоритет, что способствует сбалансированной загруженности всех очередей в соответствии с требованиями технологии *Traffic Engineering Queues*.

В случае, если количество формируемых очередей превосходит число потоков трафика, то задача распределения потоков по очередям становится тривиальной, ввиду отсутствия дефицита очередей. Поэтому размерность искомого вектора (6) можно значительно снизить, т.к. переменные x_{ij} ($i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N}$) рассчитывать нет необходимости, а требуемую балансировку очередей можно будет обеспечивать за счет вычисления лишь переменных b_j ($j = \overline{1, N}$).

Выводы

Таким образом, в статье предложена потоковая модель балансировки очередей на узлах MPLS-сети. Новизна модели состоит в том, что она в отличие от ранее известных моделей учитывает особенности технологии *Traffic Engineering Queues*, нацеленной на обеспечение сбалансированной загруженности буферного ресурса – очередей сетевого узла. Важной особенностью предлагаемого решения является то, что балансировку в рамках предлагаемой модели планируется осуществлять с учетом приоритета и длины образующих ту или иную очередь пакетов.

Сама технологическая по своей сути задача обслуживания очередей в общем случае была сведена к оптимизационной задаче смешанного математического программирования, связанной с минимизацией линейной функции (12) при наличии в т.ч. нелинейных ограничений (7), (9) и (10), а также булевой природы некоторых рассчитываемых переменных (3). Решение данной задачи предполагает использование хорошо апробированных методов решения – округления (*Rounding-off*), ветвей и границ (*Branch-and-bound*), последовательной линеаризации (*SLP*), штрафных функций (*Penalty function*), множителей Лагранжа (*Lagrangian relaxation*), имитации отжига (*Simulated annealing*), а также генетического алгоритма (*Genetic algorithm*) и различных смешанных (гибридные) методов [8–10]. Если же недостатка в очередях нет, то размерность искомого вектора (6) существенно снижается, а сама задача может решаться классическими методами нелинейного программирования.

Список литературы:

1. Вегенша III. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
2. Справочник по телекоммуникационным технологиям: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 640 с.
3. Li Y. Panwar S. Liu C.J. On the Performance of MPLS TE Queues for QoS Routing // Simulation series. – 2004. – Vol. 36; part 3. – P. 170–174.

4. Huerta, M., Padilla, J. J., Hesselbach, X., Fabregat, Ramon, Ravelo O. Buffer Capacity Allocation: A method to QoS support on MPLS networks // Proc. EATIS2006 - Euro American Conference on Telematics and Information Systems, 2006. – P. 14–28.
5. Лемешко А.В., Симоненко А.В., Ватти Махмуд. Потокковая модель управления очередями с динамическим распределением пропускной способности исходящего канала связи // Наукові записки УНДІЗ. – 2008. – №3(5). – С. 34-39.
6. Симоненко А.В., Ахмад Хайлан, Али Али Модель динамического управления очередями и пропускной способностью канала связи на маршрутизаторах мультисервисной сети // Радиотехника: Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 155. – С. 164–168.
7. Петров М.Н. Вероятностно-временные характеристики в сетях и системах передачи интегральной информации: Научное издание КГТУ, Красноярск, 1997. – 220 с.
8. Tawarmalani M., Sahinidis N.V. Global optimization of mixed-integer nonlinear programs: A theoretical and computational study // Mathematical Programming. 2004. – Vol. 99(3). – P. 563–591.
9. Tawarmalani M., Sahinidis N.V. Convexification and global optimization in continuous and mixed-integer nonlinear programming: theory, algorithms, software, and applications, nonconvex optimization and its applications series, 65. Boston MA: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 499 p.
10. Kocis G.R., Grossmann I.E. Computation Experience with DICOPT: solving MILNP problems in process systems engineering // Computers Chem. Eng. 1989. – Vol. 13. – P. 307–315.