

Сети телекоммуникаций

УДК 519.17, 519.85

Задача маршрутизации трафика на графе сети MPLS с одноадресными соединениями

М. В. Лузгачёв, К. Е. Самуйлов

*Кафедра систем телекоммуникаций
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198*

Технология многопротокольной коммутации по меткам (MPLS, Multiprotocol Label Switching) является решением для построения транспортного уровня мультисервисных сетей связи. При эксплуатации таких сетей возникают задачи обеспечения требуемого качества обслуживания при оптимальном использовании сетевых ресурсов. В статье в терминах теории графов сформулирована задача маршрутизации на графе сети MPLS с одноадресными соединениями при заданной структуре сети, требованиях к пропускной способности, стоимости передачи потока по звеньям, функции балансировки трафика, задержках и вероятностях потерь пакетов, а также приводится численный пример для частного случая, рассчитанный с помощью метода взвешенных сумм.

Ключевые слова: сеть MPLS, маршрутизация, графовая модель, минимизация стоимости, балансировка нагрузки, управление доступом, многокритериальная оптимизация.

1. Введение

Одним из решений для обеспечения качества обслуживания в IP-сетях является технология многопротокольной коммутации по меткам MPLS [1]. Технология обеспечивает коммутацию пакетов на магистральных каналах, позволяя осуществлять безопасную и эффективную передачу данных. Эта технология может использоваться для сокращения задержек передачи по сети и обеспечения управления маршрутизацией трафика, а также позволяет использовать заданную маршрутизацию, классификацию и приоритизацию трафика.

Основным принципом технологии MPLS является механизм коммутации пакетов с использованием меток, что обеспечивают маршрутизаторы коммутации по меткам (LSR, Label Switch Router). Поступающие в сеть MPLS пакеты обрабатываются пограничными маршрутизаторами (LER, Label Edge Router), которые определяют классы эквивалентности пересылки пакетов (FEC, Forwarding Equivalence Class). Кроме того, пограничные маршрутизаторы присваивают пакетам метки фиксированной длины, которые отражают принадлежность пакетов соответствующим классам (рис. 1). Пакеты одного класса одинаково обрабатываются, т.е. фактически FEC определяет направление передачи пакетов по сети. Метка указывает на принадлежность пакета классу эквивалентности FEC, благодаря чему при пересылке пакета заголовок сетевого уровня не анализируется в других LSR. При достижении последнего LSR маршрута метка пакета удаляется, и далее пакет обрабатывается в соответствии с правилами, определёнными для IP-сетей. Обработка метки в LSR осуществляется быстрее, чем обработка IP-заголовка IP-маршрутизатором, в этом заключается основное преимущество технологии MPLS.

Детальное описание принципов функционирования MPLS не является предметом данной статьи, для постановки задачи существенно то, что между парами пограничных маршрутизаторов передаются потоки данных пользователей, для

Статья поступила в редакцию 15 июля 2008 г.

Статья подготовлена при поддержке национального приоритетного проекта «Образование».

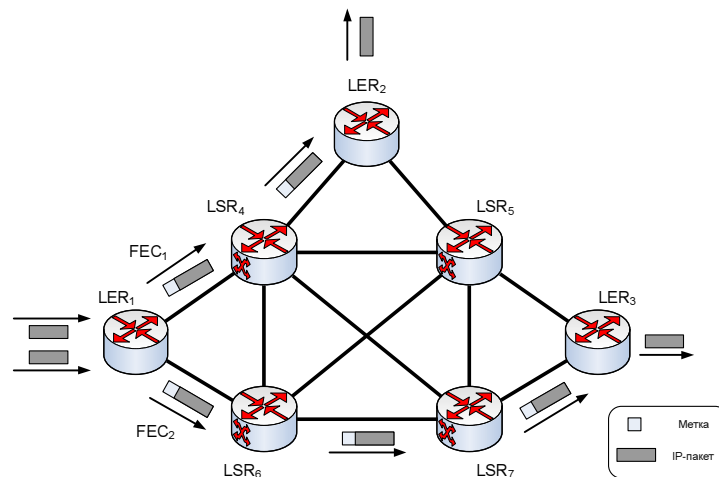


Рис. 1. Пример сети MPLS

которых необходимо определить оптимальные маршруты передачи. При нахождении оптимальных маршрутов необходимо одновременно учитывать множество параметров трафика, поэтому задачу нахождения маршрутов мы сформулируем в виде задачи многокритериальной оптимизации [2–5]. При этом критерии, направленные на обеспечение качества обслуживания, противоречат целям, направленным на повышение производительности сети.

Задаче нахождения оптимальных маршрутов в сетях телекоммуникаций посвящено множество публикаций, можно считать, что начало этим исследованиям было положено в работах при создании сети ARPANET, известных, например, по книге Л. Клейнрока [6]. Ниже мы приводим краткий обзор современных публикаций, наиболее близких к постановке задачи данной статьи.

За основу при построении модели и постановке задачи в нашей статье были взяты результаты статьи [7], где потоки на графе сети MPLS определяются с целью минимизации стоимости маршрутизации, обеспечения равномерного распределения нагрузки, а также минимизации числа маршрутов и доли трафика, пропуск которого невозможен из-за отсутствия достаточной пропускной способности сети. Отметим, что для равномерного распределения нагрузки используется функция балансировки, определяющая штраф за загрузку звена сети.

Книга [2] посвящена задачам многокритериальной оптимизации в сетях связи, содержит основные понятия, критерии и ограничения для задачи маршрутизации, описание методов сведения многокритериальной задачи к задачам с одним критерием, а также метаэвристические алгоритмы для поиска решения этих задач. В [4] представлены эволюционные алгоритмы для решения задач многокритериальной оптимизации.

Работа [8] посвящена вопросам управления трафиком в Интернет с использованием протокола OSPF (Open Shortest Path First), авторы определяют веса звеньев исходя из требований к пропускной способности сети, что позволяет оптимизировать функционирование OSPF. В аналитическом виде проблема решается в виде задачи линейного программирования, в которой, как и в [7], используется функция балансировки. В [9] решается задача поиска маршрутов с целью минимизации максимальной загрузки звена при удовлетворении требованиям к пропускной способности, числу переключений, с возможностью исключать заданные узлы и звенья из маршрутов. Аналитически задача решается в несколько шагов, применяются методы линейного программирования и алгоритм для поиска кратчайшего увеличивающего пути для решения задачи о максимальном потоке. В этой работе также приводится алгоритм для поиска приближенного решения. Отдельно отметим [10], где описан подход (MATE), целью которого является балансировка нагрузки в сетях, таких как MPLS, с целью предотвращения

перегрузок. Отметим, что MATE работает в зависимости от состояния сети, используется информация о текущих состояниях маршрутов (например, задержка, вероятность потери пакета и др.) и принимается решение о распределении потоков по маршрутам. В [11] рассматривается многокритериальная задача маршрутизации с критериями, позволяющими минимизировать максимальную величину, на которую поток по ребру превосходит его пропускную способность, стоимость, отклонение от целевого значения коэффициента использования ребра.

На рис. 1 показан пример сети, состоящей из семи LSR, три из которых LER₁, LER₂ и LER₃ выполняют функции пограничных маршрутизаторов. Далее этот пример будет использован для иллюстрации задачи маршрутизации, которая состоит в обеспечении передачи заданных потоков между пограничными маршрутизаторами таким образом, чтобы минимизировать стоимость передачи потока и число используемых маршрутов, а также обеспечить сбалансированность нагрузки в сети, минимизировать задержки и вероятности потерь пакетов [1, 12, 13].

Стоимость передачи единицы потока может иметь различный физический смысл в зависимости от конкретной задачи, например, соответствовать задержке передачи пакета по сети или реальной стоимости использования звена в денежных единицах. Сбалансированность нагрузки означает, что ресурсы сети используются в равной степени, т.е. не допускается перегрузка одних рёбер, в то время как другие практически не используются. Минимизация числа маршрутов необходима для того, чтобы не допустить дробление потоков на мелкие части, т.е. предпочтительнее вариант маршрутизации, когда поток целиком передаётся по одному маршруту.

Итак, задача состоит в том, чтобы для каждой пары взаимодействующих LER построить множество маршрутов и найти такие потоки, для которых выполняются перечисленные ниже принципы маршрутизации в сети MPLS:

- длины маршрутов удовлетворяют заданным ограничениям на число предприятий в транзитных узлах;
- маршруты не содержат циклов и петель;
- общая стоимость передачи потоков по сети минимальна;
- нагрузка в сети сбалансирована, т.е. звенья сети равномерно загружены;
- число маршрутов, используемых для передачи потоков, минимально.
- доля трафика, которая не может быть передана в связи с нехваткой пропускной способности, минимальна;
- задержка передачи информации по сети минимальна;
- вероятность потери пакетов минимальна.

Целью данной статьи является формулировка задачи маршрутизации трафика в сети MPLS в терминах теории графов в виде задачи многокритериальной оптимизации.

2. Постановка задачи маршрутизации

Рассмотрим сеть MPLS и соответствующий этой сети неориентированный граф $G(\mathcal{V}, \mathcal{E})$, множество вершин \mathcal{V} которого соответствует маршрутизаторам, множество рёбер \mathcal{E} — звеньям сети, а множество $\mathcal{V}_1 \subseteq \mathcal{V}$ включает вершины, соответствующие пограничным маршрутизаторам. На рис. 2 показан граф сети MPLS, изображённый на рис. 1, где $\mathcal{V}_1 = \{v_1, v_2, v_3\}$.

Введём множество $\mathcal{R} \subseteq \mathcal{V}_1 \times \mathcal{V}_1$, содержащее пары вершин, которые соответствуют пограничным маршрутизаторам, между которыми передаются потоки данных. Если в примере трафик передаётся от LER₁ к LER₂, а также между LER₁ и LER₃ в обоих направлениях, то получаем множество пар взаимодействующих вершин вида $\mathcal{R} = \{(v_1, v_2), (v_1, v_3), (v_3, v_1)\}$.

Введём необходимые для дальнейших построений обозначения:

$w(x, y)$ — пропускная способность ребра (x, y) графа G ;

$l(s, t) = ((s, x_1), (x_1, x_2), \dots, (x_{\gamma(s,t)}, t))$ — маршрут из s в t , $\gamma(s, t)$ — длина маршрута $l(s, t)$;

\mathcal{L} — множество всех маршрутов на графе G для пар вершин из \mathcal{R} ;

$\Gamma(s, t)$ — максимально допустимая длина маршрута $l(s, t)$;

$\mathcal{L}(s, t) = \{l(s, t) \in \mathcal{L} \mid \gamma(s, t) \leq \Gamma(s, t)\}$ — множество маршрутов из s в t , длина которых не превышает $\Gamma(s, t)$;
 $l_i(s, t)$ — i -маршрут из s в t , $l_i(s, t) \in \mathcal{L}(s, t)$;
 $f(s, t)$ — поток из вершины s в t ;
 $f_i(s, t)$ — часть потока $f(s, t)$ по маршруту $l_i(s, t)$;
 $b(s, t)$ — требование к пропускной способности сети для пары (s, t) ;
 $\phi(x, y)$ — суммарный поток по ребру (x, y) , $0 \leq \phi(x, y) \leq w(x, y)$.

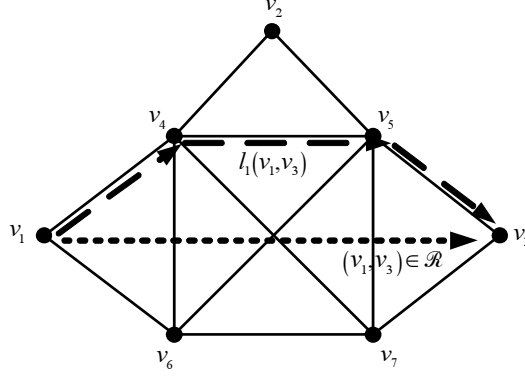


Рис. 2. Пример графа сети MPLS

Из перечисленных выше параметров исходными данными задачи маршрутизации трафика в сети MPLS является граф $G(\mathcal{V}, \mathcal{E})$, множество вершин \mathcal{V}_1 , множество \mathcal{R} взаимодействующих вершин, пропускные способности рёбер $w(\cdot, \cdot)$ графа G , требования к пропускной способности $b(\cdot, \cdot)$ и множества маршрутов $\mathcal{L}(\cdot, \cdot)$ между взаимодействующими вершинами. Заметим, что выполняются соотношения

$$f(s, t) = \sum_{i=1}^{L(s, t)} f_i(s, t), \quad \phi(x, y) = \sum_{(s, t) \in \mathcal{R}} \sum_{\substack{i=1 \\ (x, y) \in l_i(s, t)}}^{L(s, t)} f_i(s, t),$$

где $L(s, t) = |\mathcal{L}(s, t)|$.

Перейдём теперь к постановке задачи маршрутизации на графе G сети MPLS и будем формулировать её в виде задачи многокритериальной оптимизации. Построение начнём с формулировок однокритериальных задач в соответствии со сформулированными выше принципами функционирования сети MPLS.

Обозначим $c(x, y)$ стоимость передачи единицы потока по ребру, зная которую можно определить стоимость передачи потока по i -маршруту в виде

$$c(l_i(s, t)) = \sum_{(x, y): (x, y) \in l_i(s, t)} c(x, y), \quad (s, t) \in \mathcal{R}, \quad i = \overline{1, L(s, t)}.$$

Задача заключается в определении потоков $f_i(s, t)$, которые минимизируют функцию общей стоимости.

Задача минимизации стоимости передачи потоков

$$\min \left\{ \sum_{(s, t) \in \mathcal{R}} \sum_{i=1}^{L(s, t)} f_i(s, t) c(l_i(s, t)) \right\}, \quad (1)$$

при выполнении ограничений

$$f_i(s, t) \geq 0, \quad (s, t) \in \mathcal{R}, \quad i = \overline{1, L(s, t)}, \quad (i)$$

$$\phi(x, y) \leq w(x, y), \quad (x, y) \in \mathcal{E}, \quad (ii)$$

$$\sum_{i=1}^{L(s,t)} f_i(s,t) = b(s,t), \quad (s,t) \in \mathcal{R}. \quad (iii)$$

Рассмотрим задачу балансировки нагрузки, которая строится с помощью коэффициента $U(x,y) = \frac{\phi(x,y)}{w(x,y)}$ использования ребра (x,y) графа G . Очевидно, что $0 \leq U(x,y) \leq 1$. Для обеспечения равномерной загрузки рёбер воспользуемся функцией балансировки $\Phi(u)$, аргументом которой и является коэффициент использования ребра. Известно (см., например, [7]), что при решении задачи маршрутизации трафика на графе сети MPLS $\Phi(u)$ выбирают в виде кусочно-линейной, неотрицательной и возрастающей функции. Пример функции балансировки, которая используется при расчёте примера в заключительной части статьи, показан на рис. 3.

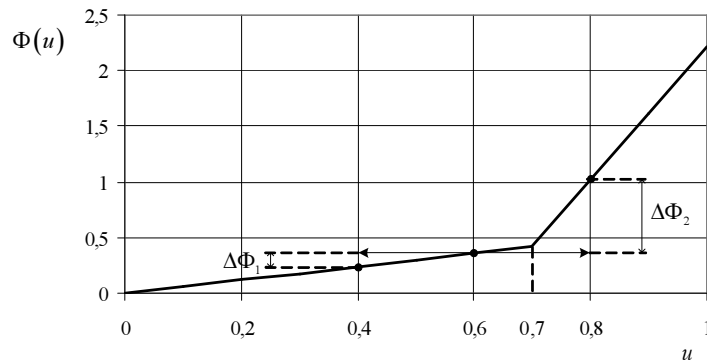


Рис. 3. Пример функции балансировки

Функцию балансировки интерпретируют как «штраф» за загрузку ребра, что мы проиллюстрируем следующим примером. Предположим, что между рёбрами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) поток распределён так, что каждое из них загружено на 60%. Тогда суммарный штраф за загрузку этих рёбер с функцией, заданной на рис. 3, определяется формулой $\Phi = \Phi(0,6) + \Phi(0,6)$. Теперь, предположим, что поток перераспределили так, что одно ребро загружено на 40%, а другое на 80%, тогда штраф вычисляется следующим образом $\Phi' = \Phi(0,4) + \Phi(0,8) = \Phi(0,6) - \Delta\Phi_1 + \Phi(0,6) + \Delta\Phi_1$. Поскольку в нашем примере функция штрафа обеспечивает выполнение неравенства $\Delta\Phi_1 < \Delta\Phi_2$, очевидно выполнение неравенства $\Phi < \Phi'$, т.е. в равномерном случае разделения потока (по 60%) суммарный «штраф» меньше, чем в неравномерном случае (40% и 80%). Теперь все готово к формулировке задачи балансировки нагрузки.

Задача балансировки нагрузки

$$\min \left\{ \sum_{(x,y) \in \mathcal{E}} \Phi(U(x,y)) \right\}, \quad (2)$$

при выполнении ограничений (i), (ii) и (iii).

Существуют и другие подходы к задаче балансировки. Обеспечить сбалансированность трафика можно за счёт минимизации максимального коэффициента использования ребра, т.е.

$$\min \max_{(x,y) \in \mathcal{E}} U(x,y), \quad (2')$$

при выполнении ограничений (i), (ii) и (iii).

Третья задача заключается в выборе такого распределения потоков, при котором минимально число маршрутов, используемых потоками. Такая постановка

позволяет минимизировать деление потоков на части в случае возможности использования для одного потока нескольких маршрутов. Разделение потоков в сети MPLS приводит к увеличению числа передаваемых сообщений, что вызывает необходимость упорядочивать пакеты в узле-адресате и, следовательно, увеличивает временную задержку доставки данных пользователю.

Для формулировки задачи минимизации числа маршрутов нам понадобится функция-индикатор

$$I(f_i(s, t) > 0) = \begin{cases} 1, & \text{если } f_i(s, t) > 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Задача минимизации числа маршрутов

$$\min \left\{ \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \sum_{i=1}^{L(s,t)} I(f_i(s, t) > 0) \right\}, \quad (3)$$

при выполнении ограничений (i), (ii) и (iii).

Заметим, что первые три задачи решаются в условиях ограничения (iii), т.е. по сети пропускается поток, равный требованию к пропускной способности. Задача управления доступом состоит в минимизации той части $\Delta(s, t)$ потока $f(s, t)$, которая не может быть пропущена в случае нехватки сетевых ресурсов при заданных требованиях $b(s, t)$ к пропускной способности.

Задача управления доступом

$$\min \left\{ \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \Delta(s, t) \right\}, \quad (4)$$

при выполнении ограничений (i), (ii) и

$$f(s, t) + \Delta(s, t) = b(s, t), \quad (s, t) \in \mathcal{R}, \quad (iii')$$

$$\Delta(s, t) \geq 0, \quad (s, t) \in \mathcal{R}. \quad (iii'')$$

В случае, когда для каждого звена сети известна задержка передачи $d(x, y)$, $(x, y) \in \mathcal{E}$, вводится критерий, позволяющий минимизировать задержку передачи информации по сети «из конца в конец».

Задача минимизации задержек

$$\min \left\{ \sum_{\substack{(s,t) \in \mathcal{R} \\ i=1, L(s,t)}} \left(f_i(s, t) \sum_{(x,y) \in l_i(s,t)} d(x, y) \right) \right\}, \quad (5)$$

при выполнении ограничений (i), (ii) и (iii).

Если считать отличной от нуля вероятность потери пакета $p(x, y)$ на звене сети, соответствующему ребру $(x, y) \in \mathcal{E}$, то можно также минимизировать вероятность потерь пакетов на маршрутах.

Задача минимизации вероятностей потерь пакетов

$$\min \left\{ \sum_{\substack{(s,t) \in \mathcal{R} \\ i=1, L(s,t)}} \left(f_i(s, t) \left(1 - \prod_{(x,y) \in l_i(s,t)} (1 - p(x, y)) \right) \right) \right\}, \quad (6)$$

при выполнении ограничений (i), (ii) и (iii).

Рассмотрев по отдельности задачи маршрутизации с различными критериями, сформулируем многокритериальную задачу оптимального построения маршрутов.

Многокритериальная задача маршрутизации трафика

$$\min \left\{ \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \sum_{i=1}^{L(s,t)} f_i(s,t) c(l_i(s,t)), \sum_{(x,y) \in \mathcal{E}} \Phi(U(x,y)), \right. \\ \left. \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \sum_{i=1}^{L(s,t)} I(f_i(s,t) > 0), \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \Delta(s,t), \sum_{\substack{(s,t) \in \mathcal{R} \\ i=1, L(s,t)}} \left(f_i(s,t) \sum_{(x,y) \in l_i(s,t)} d(x,y) \right), \right. \\ \left. \sum_{\substack{(s,t) \in \mathcal{R} \\ i=1, L(s,t)}} \left(f_i(s,t) \left(1 - \prod_{(x,y) \in l_i(s,t)} (1 - p(x,y)) \right) \right) \right\}, \quad (7)$$

при выполнении ограничений (i), (ii), (iii') и (iii'').

Существуют различные подходы к поиску решений таких задач. Один из таких подходов — метод взвешенных сумм. Целевые функции поставленных выше задач могут быть объединены в одну путём их суммирования с весовыми коэффициентами $\zeta_i \in \mathcal{R}$, $i = \overline{1,4}$. Выбор значений этих весов позволяет указать, что наиболее важно при решении задачи — обеспечение минимальной стоимости маршрутов, сбалансированность нагрузки, минимизация числа маршрутов, величина потока, который не может быть передан, минимизация задержек или вероятностей потерь. Подбор этих коэффициентов является отдельной задачей, которую необходимо решать исходя из требований к маршрутизации на сети. Таким образом, получаем задачу маршрутизации с одним критерием

$$\min \left\{ \zeta_1 \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \sum_{i=1}^{L(s,t)} f_i(s,t) c(l_i(s,t)) + \zeta_2 \sum_{(x,y) \in \mathcal{E}} \Phi(U(x,y)) + \right. \\ \left. + \zeta_3 \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \sum_{i=1}^{L(s,t)} I(f_i(s,t) > 0) + \zeta_4 \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \Delta(s,t) + \right. \\ \left. + \zeta_5 \sum_{\substack{(s,t) \in \mathcal{R} \\ i=1, L(s,t)}} \left(f_i(s,t) \sum_{(x,y) \in l_i(s,t)} d(x,y) \right) + \right. \\ \left. + \zeta_6 \sum_{\substack{(s,t) \in \mathcal{R} \\ i=1, L(s,t)}} \left(f_i(s,t) \left(1 - \prod_{(x,y) \in l_i(s,t)} (1 - p(x,y)) \right) \right) \right\}, \quad (8)$$

при выполнении ограничений (i), (ii), (iii') и (iii'').

Заметим, что задачи (1) и (4)–(8) решаются с помощью симплекс-метода [4, 14], а задача (2) может быть сведена к задаче линейного программирования путём введения дополнительных переменных. Таким образом, задача (8) является нелинейной только из-за вида целевой функции задачи (3). В следующем разделе статьи мы приводим пример, иллюстрирующий решение задачи маршрутизации трафика в сети MPLS в одном важном для приложений частном случае.

3. Пример решения задачи маршрутизации

Рассмотрим сеть MPLS, в которой необходимо минимизировать стоимость пропуска трафика и сбалансировать нагрузку при пропускной способности сети, достаточной для удовлетворения заданным требованиям. Нетрудно убедиться, что

при использовании метода взвешенных сумм в этом случае задача маршрутизации трафика формулируется следующим образом.

$$\min \left\{ \zeta_1 \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \sum_{i=1}^{\mathcal{L}(s,t)} f_i(s,t) c(l_i(s,t)) + \zeta_2 \sum_{(x,y) \in \mathcal{E}} \Phi(U(x,y)) \right\}, \quad (8')$$

при выполнении ограничений (i), (ii) и (iii).

Для балансировки трафика в рассматриваемом нами примере возьмём функцию, график которой изображён на рис. 3, т.е.

$$\Phi(u) = \begin{cases} \frac{6}{10}u; & 0 \leq u < 0,7; \\ 6u - \frac{189}{50}; & 0,7 \leq u \leq 1. \end{cases}$$

С учётом этой функции введём дополнительные переменные $\xi_{(x,y)}$, которые позволяют свести задачу (8') к следующей задаче линейного программирования

$$\min \left\{ \zeta_1 \sum_{(s,t) \in \mathcal{R}} \sum_{i=1}^{\mathcal{L}(s,t)} f_i(s,t) c(l_i(s,t)) + \zeta_2 \sum_{(x,y) \in \mathcal{E}} \xi_{(x,y)} \right\}, \quad (9)$$

при выполнении ограничений (i), (ii), (iii) и

$$\xi_{(x,y)} \geq \frac{6}{10}u(x,y), \quad (x,y) \in \mathcal{E}, \quad (iv')$$

$$\xi_{(x,y)} \geq 6u(x,y) - \frac{189}{50}, \quad (x,y) \in \mathcal{E}. \quad (iv'')$$

Для графа сети MPLS, изображённого на рис. 2, зададим необходимые исходные данные: $w(x,y) = 20$, $(x,y) \in \mathcal{E}$; $\Gamma(s,t) = 2$, $(s,t) \in \mathcal{R}$, $\mathcal{R} = \{(v_1, v_2), (v_1, v_3), (v_3, v_1)\}$; $b(v_1, v_2) = 16$, $b(v_1, v_3) = 12$, $b(v_3, v_1) = 10$; $c(x,y) = 1$, $(x,y) \in \mathcal{E}$. Предположим, что балансировка нагрузки важнее, чем минимизация стоимости, т.е., например, $\zeta_1 = 1$ и $\zeta_2 = 10$. Нетрудно убедиться, что на графе G для взаимодействующих вершин из множества \mathcal{R} имеется 12 маршрутов, которые перечислены в табл. 1.

Заметим, что при определённых выше исходных данных задача маршрутизации (9) имеет 24 переменных и 51 ограничение.

Рис. 4 иллюстрируют одно из множества решений задачи (9), полученных с помощью симплекс-метода. Для рассматриваемого нами примера на рис. 4 а)–с) показаны потоки на маршрутах, а на рис. 4 д) — суммарные потоки на рёбрах графа G . Поскольку функция «штрафов» была выбрана таким образом, что её график имеет излом в точке $u = 0,7$, то загрузка ребра до 70% пропускной способности является более предпочтительной. Как показано на рис. 4 а), по звену (v_2, v_4) пропускается поток со значением 14, а остальные 2 единицы потока пропущены по другим маршрутам, хотя маршрут $l_1(v_1, v_2)$ является наиболее предпочтительным для потока из вершины v_1 в вершину v_2 с точки зрения стоимости передачи.

Заметим также, что ребра (v_1, v_4) и (v_1, v_6) загружены не равномерно, чего можно было бы избежать, выбрав функцию «штрафов» с большим числом изломов. Однако каждый излом этой функции увеличивает число ограничений в решаемой задаче. При загрузке меньше чем на 70% (менее 14 единиц потока из 20) равномерного разделения потоков не получается также вследствие выбора вида функции балансировки.

Таблица 1

Множества маршрутов для рассматриваемого на рис. 2 примера

$\mathcal{L}(v_1, v_2)$		$\mathcal{L}(v_1, v_3)$	
$l_1(v_1, v_2)$	$((v_1, v_4), (v_2, v_4))$	$l_1(v_1, v_3)$	$((v_1, v_4), (v_4, v_5), (v_3, v_5))$
$l_2(v_1, v_2)$	$((v_1, v_4), (v_4, v_5), (v_2, v_5))$	$l_2(v_1, v_3)$	$((v_1, v_4), (v_4, v_7), (v_3, v_7))$
$l_3(v_1, v_2)$	$((v_1, v_6), (v_4, v_6), (v_2, v_4))$	$l_3(v_1, v_3)$	$((v_1, v_6), (v_5, v_6), (v_3, v_5))$
$l_4(v_1, v_2)$	$((v_1, v_6), (v_5, v_6), (v_2, v_5))$	$l_4(v_1, v_3)$	$((v_1, v_6), (v_6, v_7), (v_3, v_7))$
<hr/>			
$\mathcal{L}(v_3, v_1)$			
$l_1(v_3, v_1)$	$((v_3, v_5), (v_4, v_5), (v_1, v_4))$		
$l_2(v_3, v_1)$	$((v_3, v_5), (v_5, v_6), (v_1, v_6))$		
$l_3(v_3, v_1)$	$((v_3, v_7), (v_4, v_7), (v_1, v_4))$		
$l_4(v_3, v_1)$	$((v_3, v_7), (v_6, v_7), (v_1, v_6))$		

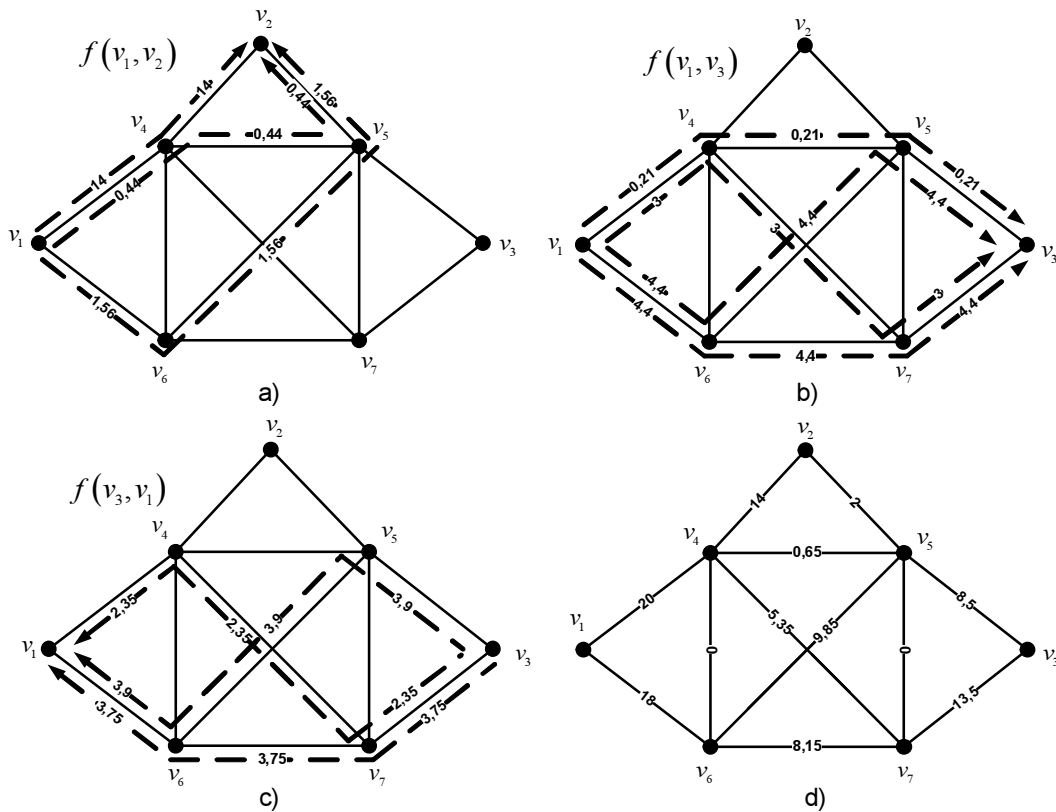


Рис. 4. Потоки на маршрутах и рёбрах графа G

4. Заключение

В статье сформулирована многокритериальная задача оптимальной маршрутизации трафика в сети MPLS с одноадресными соединениями. Для иллюстрации

в рамках важного для приложений частного случая рассмотрен простейший пример, показывающий на качественном уровне лишь часть проблем, возникающих при решении такого рода задач.

Современные сети насчитывают тысячи узлов и десятки тысяч пользователей, маршрутизация осуществляется не только в режиме одноадресной (unicast), но и в режиме многоадресной (multicast) передачи, а критерии маршрутизации трафика не ограничиваются формулировками задач данной статьи. Поэтому с точки зрения вычислений задача является трудно решаемой (или NP-полной проблемой). Наконец, решение должно быть приведено к виду, приемлемому для применения в инженерных решениях при планировании конкретных сетей MPLS, например, как это сделано в [15, 16] при решении задачи расчёта маршрутных таблиц в сети системы сигнализации №7. Поэтому уточнение прикладных аспектов задачи маршрутизации на графе сети MPLS, разработка методов, алгоритмов и программных средств её решения являются предметом дальнейших исследований.

Литература

1. *Rosen E., Viswanathan A., Callon R.* Multiprotocol Label Switching Architecture, RFC-3031. — 2001.
2. *Donoso Y., Fabregat R.* Multi-Objective Optimization in Computer Networks Using Metaheuristics // Auerbach Publications. — 2007.
3. *Ченцов А. Г.* Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. — М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2008.
4. *A. Coello G. B. L., Veldhuizen D. A. V.* Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. — Springer, 2007.
5. *Грешилов А. А.* Математические методы принятия решений. Уч. пособие для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
6. *Клейнрок Л.* Коммуникационные сети. Стохастические потоки и задержки сообщений. — М.: Наука, 1970.
7. *Cerav S. K., Mathar R.* An Off-Line Traffic Engineering Model for MPLS Networks // Proceedings of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. — 2002.
8. *Fortz B., Thorup M.* Traffic Engineering by Optimizing OSPF Weights // INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. — 2000.
9. *Lee Y., Seok Y., Choi Y.* Traffic Engineering with Constrained Multipath Routing in MPLS Networks // IEICE TRANS. COMMUN. — 2002. — No 1.
10. MATE: MPLS Adaptive Traffic Engineering / A. Elwalid, C. Jin, S. Low, I. Widjaja // INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. — 2001.
11. *Knowles J., Oates M., Corne D.* Advanced Multi-Objective Evolutionary Algorithms Applied to two Problems in Telecommunications // BT Technology Journal. — 2000. — Vol. 18, issue 4.
12. *Awduche D., Malcolm J., Agogbua J. et al.* Requirements for Traffic Engineering over MPLS, RFC-2702. — 1999.
13. *Awduche D., Chiu A., Elwalid A. et al.* Overview and Principles of Internet Traffic Engineering, RFC-3272. — 2002.
14. *Luenberger D. G., Ye Y.* Linear and Nonlinear Programming. — Third edition edition. — Springer, 2008.
15. *Samouylov K., Chukarin A.* Tool for the Routing Planning in a Large-Scale Signaling Network // Proc. 7th International Conference on Telecommunications – ConTEL 2003. — Zagreb, Croatia: 2003. — Pp. 579–585.
16. *Chukarin A., Bobrikov N., Luzgachev M.* Signaling and Intelligent Large-scale Network Dimensioning and Planning // 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Melecon. — 2006.

UDC 519.17, 519.85

Traffic Routing Problem on MPLS Network with Unicast Connections**M. V. Luzgachev, K. E. Samouylov***Telecommunication Systems Department
Peoples' Friendship University of Russia
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russia, 117198*

The Multiprotocol Label Switching (MPLS) technology is a solution to the problem of building multiservice network transport layer. When such networks are operated quality provisioning with optimal usage of network resources problems appears. In this paper traffic routing problem on MPLS network with unicast connections is formulated when network parameters are given. The network parameters are structure, bandwidth requirements, routing costs, delays and packet loss probabilities. The problem is formulated in terms of graph theory and multiobjective optimization. Numerical example calculated using simplex and weighted sum methods is also shown.