

ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНЫХ СЕТЕЙ VPN С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ТЕХНОЛОГИИ MPLS

*Гаипов К.Э., Заленская М.К.*

Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ

В данной статье рассматривается алгоритм выбора минимально необходимого числа туннелей MPLS и балансировки нагрузки между ними с целью оптимального использования полосы пропускания.

**Ключевые слова:** безопасность, оптимизация, сеть IP/MPLS, потоки, телекоммуникации.

In this article the method of minimum necessary MPLS tunnel quantity choice is suggested. This method allows to balance the traffic between tunnels for optimal use of bandwidth.

**Key words:** security, optimization, IP/MPLS network, telecommunications.

Сегодня, благодаря широкому распространению интернет технологий, всё активнее применяются средства распределённой обработки информации. Одновременно с этим растёт объём данных, обрабатываемых в средах клиент/сервер и предназначенных для одновременного доступа большого числа абонентов. Разработано несколько протоколов прикладного уровня, обеспечивающих информационную безопасность таких приложений, как электронная почта, сетевое управление и другие. Наличие средств обеспечения безопасности IP Security в базовых протоколах семейства TCP/IP позволяет осуществлять информационный обмен между различными приложениями и сервисными службами. При этом первоочередной и наиболее важной защитной мерой является необходимость разработки основных механизмов обеспечения целостности и конфиденциальности потоков данных.

Таким образом, традиционные IP-сети строятся на базе протоколов IP Security, но при этом не решается задача оптимального использования сетевых ресурсов. Традиционные протоколы маршрутизации выбирают только один маршрут для передачи данных. Если некоторые приложения требуют

безопасной передачи информации и одновременно гарантированной полосы пропускания, например, зашифрованные голосовые соединения, видеоконференции, то средства протокола IP Security не позволяют решить данную задачу. Поэтому для обеспечения безопасности передачи информации наряду с выделением требуемой полосы в данной статье предлагается организация сетей VPN с использованием технологии MPLS.

На современном этапе развития технология MPLS занимает лидирующее место среди технологий, позволяющей реализовывать механизмы TE (traffic engineering - управления трафиком) благодаря возможности создания нескольких туннелей между сетью источником и сетью приемником, а также осуществлять балансировку нагрузки между группой туннелей, начинающихся и заканчивающихся в одинаковых точках. Для решения такой задачи телекоммуникационную сеть представим в виде ориентированного графа, удовлетворяющей теореме Джексона и аппроксимации Клейнрока. Общеизвестным методом анализа телекоммуникационных сетей является метод, предложенный в [1], в котором для глобальной оптимизации трафика предлагается в начале найти все маршруты от каждого источника до каждого получателя (все возможные беспетельные маршруты), обозначим каждый маршрут буквой  $\lambda_{n-m}^{i-j}$ , где  $i$  - номер ветви источника,  $j$  - номер ветви приемника,  $n$  - номер маршрута между сетью  $i$  и  $j$ ,  $m$  - номер ветви через который проходит маршрут  $n$ , тогда суммарный поток через ветвь  $m$  будет определяться, как сумма всех потоков, проходящая через ветвь с номером  $n$ :

$$\Lambda_m = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \lambda_{n-m}^{i-j} \quad (1)$$

В свою очередь целевая функция, минимум которой необходимо найти определяется как сумма всех времен задержек по всем ветвям или сумма средних значений.

$$F(\lambda_i) = \sum_{i=1}^m T(\lambda_i) \quad (2)$$

где  $\lambda_i$  элемент вектора  $\Lambda_m$ .

Решение задачи связано с рядом трудностей, таких как: решение графа комбинаторной задачи поиска всех беспетельных маршрутов между каждой парой источник-приемник, а также большим количеством переменных целевой функции. В случае определения всех маршрутов, при которых достигается минимум целевой функции, такой результат имеет мало практической ценности, так как количество маршрутов, которые необходимо сформировать, будет также очень большим. Если же использовать целевую функцию, в которой для каждой пары источник-приемник использовались только  $k$  из  $n$  маршрутов, то в таком случае не будет гарантии, что минимум такой функции даст самое лучшее распределение трафика по сети.

В данной статье предлагается метод определения целевой функции (2) и ограничений, минуя стадию поиска всех маршрутов, то есть в данном методе не используются никакие комбинаторные задачи на графах. Пусть сеть MPLS описывается ориентированным графом, для которого задана матрица инцидентности. Согласно теореме из [2] матрица инцидентности связана линейными преобразованиями с матрицей линейно-независимых разрезов, если обозначит матрицу разрезов как  $C$ , а матрицу инцидентности за  $I$ , то связь между ними определяется как:

$$C = I' \quad (3)$$

В выражении матрица  $I'$  получается из матрицы  $I$  путем удаления произвольной строки. То есть, матрица инцидентности является матрицей разрезов с одним линейно-зависимым разрезом. Особенность такой матрицы является то, что каждый разрез делит граф на несколько несвязных компонент, и одной из компонент является всего лишь один узел этого графа. Введем вектор потоков  $\Lambda_i$ , где  $i$  номер источника, а элементы этого вектора  $\lambda_i^j$  показывают интенсивность поступления от  $i$ -го источника в  $j$ -й ветви графа.

Произведение же матрицы  $I$  на вектор  $\Lambda_i$  дает вектор  $\Lambda'_i$ , элементы, которого показывают сумму потоков входящих и исходящих в разрез, поскольку

все разрезы матрицы  $I$  проходят через ребра инцидентные одной вершине. Для тех разрезов, которые проходят более чем через одну ветвь сумма потоков входящих в разрез и исходящих из него равна нулю. Для разреза, который включает в себя только одну ветвь поток, входящий или исходящий из разреза, равен потоку, проходящему по соответствующей ветви, как правило, такой разрез проходит через ребро источника или ребро приемника значение интенсивности поступления в такие ветви всегда являются известными величинами для телекоммуникационных сетей. Таким образом, можно сказать, что численные значения каждого элемента матрицы  $\Lambda'_i$  являются известными и могут служить ограничениями для целевой функции (2), еще одним ограничением является неотрицательность потоков проходящей по каждой ветви.

Из сказанного следует, что для решения оптимизационной задачи необходимо проделать следующие вычислительные этапы:

1. определить целевую функцию как  $F = \sum_{j=1}^m N_j (\sum_{i=1}^k \lambda_j^i)$ ;
2. определить матрицу инцидентности  $I$ ;
3. определить ограничения к целевой функции как  $I \Lambda_i$ ;
4. найти минимум целевой функции  $\Lambda_{\min}$ ;

5. Если число туннелей между каждой парой источник – приемник будет неприемлемо большим необходимо решить систему неравенств, если (4), обеспечив как можно больше число нулевых значений среди переменных  $\lambda_i^j$ .

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k \Lambda_i = \Lambda_{\min} \\ I'' \Lambda_i = 0 \\ \lambda_i^j \geq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

Где  $I''$  матрица инцидентности, без строк в которых содержатся только один не нулевой элемент, тем самым  $I''\Lambda_i = 0$  обеспечивается равенство 0 потоков в каждом узле.

Рассмотрим пример оптимального распределения потоков сети MPLS рисунок 1.

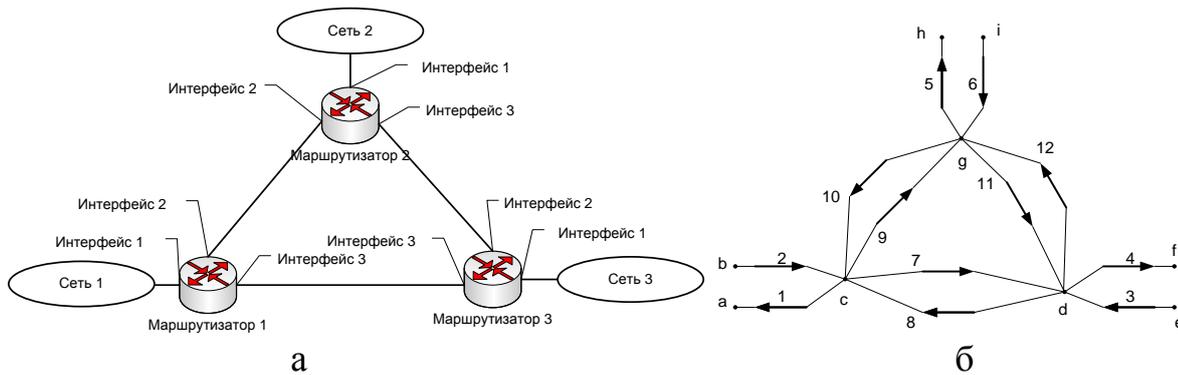


Рисунок 1 - Исследуемая сеть (а) и эквивалентный ей граф (б)

Для сети на рисунке 2 составим матрицу инцидентности  $I$ .

$$I = \begin{bmatrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ a & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ d & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ e & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ h & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$I'' = \begin{bmatrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ c & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ d & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ g & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

В качестве исходных данных зададимся, что скорость всех каналов связи одинаковая и равна 100 Мбит/с, а также матрицей потоков  $D$ , элементы  $d_{ij}$  которой показывает интенсивность трафика следующего от каждого приемника  $ik$  к каждому источнику  $j$ .

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 30 & 60 \\ 35 & 0 & 25 \\ 10 & 30 & 0 \end{bmatrix}$$

В задачу можно решить в N этапов, на каждом этапе решается задача поиска оптимального распределения трафика от i-го источника ко всем приемникам. Данная задача решается в три этапа. Источниками являются ветви: 2, 6, 3; приемниками: 1, 5, 4.

**Этап 1. источник - узел b, приемники узлы a, h, f.**

Потоки в ветвях 1, 5, 4, создаваемые вузлом(a), равны соответственно 0, 30, 60 (первая строка матрицы D), потоки от всех остальных источников принимаем равными 0. Определим вектор  $\Lambda'_i$ , умножив матрицу I на вектор  $\Lambda_i$ , в качестве линейно-зависимой строки в матрице I примем вторую строку.

$$\Lambda'_1 = \begin{bmatrix} \lambda_1^1 \\ -\lambda_1^2 \\ -\lambda_1^1 + \lambda_1^2 - \lambda_1^7 + \lambda_1^8 - \lambda_1^9 + \lambda_1^{10} \\ \lambda_1^3 - \lambda_1^4 + \lambda_1^7 - \lambda_1^8 + \lambda_1^{11} - \lambda_1^{12} \\ -\lambda_1^3 \\ \lambda_1^4 \\ -\lambda_1^5 + \lambda_1^6 + \lambda_1^9 - \lambda_1^{10} - \lambda_1^{11} + \lambda_1^{12} \\ \lambda_1^5 \\ -\lambda_1^6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -90 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 60 \\ 0 \\ 30 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Как видно уравнение (4) имеет бесконечное число решений, и любое из них будет давать определенное распределение трафика по сети.

**Этап 2. источник - узел e, приемники узлы a, h, f.**

Аналогично этапу 1 определим матрицу  $\Lambda'_2$ :

$$\Lambda_2' = \begin{bmatrix} \lambda_2^1 \\ \lambda_2^2 \\ -\lambda_2^1 + \lambda_2^2 - \lambda_2^7 + \lambda_2^8 - \lambda_2^9 + \lambda_2^{10} \\ \lambda_2^3 - \lambda_2^4 + \lambda_2^7 - \lambda_2^8 + \lambda_2^{11} - \lambda_2^{12} \\ -\lambda_2^3 \\ \lambda_2^4 \\ -\lambda_2^5 + \lambda_2^6 + \lambda_2^9 - \lambda_2^{10} - \lambda_2^{11} + \lambda_2^{12} \\ \lambda_2^5 \\ \lambda_2^6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -40 \\ 0 \\ 0 \\ 30 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

**Этап 3. источник - узел i, приемники узлы a, h, f.**

Определим матрицу  $\Lambda_3'$ :

$$\Lambda_3' = \begin{bmatrix} \lambda_3^1 \\ -\lambda_3^2 \\ -\lambda_3^1 + \lambda_3^2 - \lambda_3^7 + \lambda_3^8 - \lambda_3^9 + \lambda_3^{10} \\ \lambda_3^3 - \lambda_3^4 + \lambda_3^7 - \lambda_3^8 + \lambda_3^{11} - \lambda_3^{12} \\ -\lambda_3^3 \\ \lambda_3^4 \\ -\lambda_3^5 + \lambda_3^6 + \lambda_3^9 - \lambda_3^{10} - \lambda_3^{11} + \lambda_3^{12} \\ \lambda_3^5 \\ -\lambda_3^6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 35 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 25 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -60 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Для получения оптимального распределения необходимо учесть существующие потоки в сети, полученные на каждом этапе. В качестве целевой функции будем использовать суммарное среднее количество пакетов находящихся в СМО, согласно аппроксимации Клейнрока поток можно считать Пуассоновским тогда среднее число пакетов находящихся на обслуживании определяется из формулы:

$$F(\lambda_j^i) = \sum_j^n \sum_{i=1}^m \frac{\frac{\lambda_j^i}{\mu_i}}{1 - \frac{\lambda_j^i}{\mu_i}}, \quad (7)$$

где  $\lambda_j^i$  – поток в i-й, создаваемый j-м источником.

В качестве ограничений к функции (7) выступают системы уравнений (4-6), а также  $\lambda_j^i \geq 0$  для  $\forall i, \forall j$ . Используя метод сопряженного градиента для поиска минимума получаем:

Обозначим векторы оптимальных значений, как  $\Lambda_{\min_j}$ .

$$\Lambda_{\min_1} = [0 \ 90 \ 0 \ 60 \ 30 \ 0 \ 50.044 \ 0 \ 39.956 \ 0 \ 9.956 \ 0]$$

$$\Lambda_{\min_2} = [10 \ 0 \ 40 \ 0 \ 30 \ 0 \ 0 \ 9.829 \ 0 \ 0.171 \ 0 \ 30.171]$$

$$\Lambda_{\min_3} = [35 \ 0 \ 0 \ 25 \ 0 \ 60 \ 0 \ 0 \ 0 \ 35 \ 25 \ 0]$$

Если теперь просуммировать все три вектора оптимального распределения трафика, то получившийся вектор дает оптимальное распределение трафика по сети с учетом всех источников.

$$\Lambda_{\min} = \sum_{i=1}^3 \Lambda_{\min_i} = [45 \ 90 \ 40 \ 55 \ 90 \ 60 \ 50.044 \ 9.829 \ 39.956 \ 35.171 \ 34.956 \ 30.171]$$

Анализ полученных результатов показывает, что от сети 1 до сети 2 весь трафик пойдет только по одному маршруту, пролегающему через ветви 2-9-5, следовательно, необходимо организовать только один туннель между соответствующими сетями. В свою очередь, трафик от сети 1 до сети 3 пойдет двумя разными маршрутами, а следовательно, необходимо организация двух туннелей, проходящих по ветвям 2-9-11-4, по которому пойдет 9,956 Мбит/с, а по туннелю, проходящему по каналам 2-7-4, пойдет 50,044 Мбит/с.

Аналогично, трафик из сети 3 в сеть 1 пойдет по туннелям 3-8-1 и 3-12-10-1, по которым пойдет 9,829 Мбит/с и 0,171 Мбит/с соответственно. Из сети 3 в сеть 2 трафик пойдет одним туннелем 3-8-5, по которому пойдет весь трафик в 30 Мбит/с.

Из сети 2 в сеть 1 и сеть 3, как это видно из  $\Lambda_{\min_3}$ , необходимо организовать всего по одному туннелю 6-10-1 и 6-11-4, по каждому из которых пойдет трафик в 35 Мбит/с и 25 Мбит/с соответственно.

Таким образом, предложенный метод позволяет с меньшими затратами на вычисления определить целевую функцию и найти ее минимум, следует отметить, что сложность алгоритма получения целевой функции и количество независимых переменных в целевой функции растут линейно с ростом количества ветвей, в отличие от алгоритма предложенного в [1], где сложность вычислений показательная.

## **Вестник Восточно-Сибирской открытой академии**

### Список используемой литературы

1. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных: Пер. с англ. –М.: Мир, 1989. – 544с., ил.
2. Свами М. Тхуласираман К. Графы сети и алгоритмы: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984, - 455 с., ил.