управления» с использованием адаптивного электронного образовательного ресурса [1].

Все другие виды учебных занятий являются внелекционными, и им будут соответствовать другие математические модели.

Литература

1. Леонова Н.М., Марковский М.В. Формирование кластеров учащихся по результатам использования адаптивного электронного образовательного ресурса в учебном процессе // «Открытое образование», . – 2004. – №6.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1989.

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТЕЙ С МНОГОПРОТОКОЛЬНОЙ КОММУТАЦИЕЙ ПО МЕТКАМ (MPLS)

Н.В. Будылдина*, доц., каф. Автоматической электрической связи*
Тел.: (343)359-91-16, E-mail: Opdts@urtici.ru
Уральский технический институт связи и информатики ГУО ВПО СибГУТИ, Екатеринбург
http://www.urtici.ru

In article questions of optimization of networks with multiprotocol switching on labels, the basic methods of the solution of a problem of optimization are considered. The analytical method is in more detail considered on the basis of indefinite Lagrangian coefficients.

Экономический спад в сфере информационных технологий, наблюдаемый в последние годы, значительно повлиял на развитие сетевых технологий. Резкий рост числа провайдеров повлек за собой жесткую конкуренцию, что, в конечном итоге, привело к снижению доходов. Для выживания в сложившейся ситуации необходимо иметь возможность компенсации сокращения доходов за счет более эффективного использования сетевой инфраструктуры. С учетом этого появилась необходимость во внедрении дополнительных сервисных услуг с высоким качеством и более эффективных сетевых технологий, которые обеспечивают конвергирование сетей, поддерживают как новые, так и существующие услуги, создавая эффективный путь перехода к IP - инфраструктуре. Для увеличения пропускной способности необходимо упрощать требования к обработке пакетов и обеспечить соответствующий уровень безопасности. Решения, связанные с внедрением избыточных каналов связи для достижения качества предоставляемых услуг (QoS) не имеет больше шансов на выживание. Сети должны быть спроектированы с учетом необходимых методов оптимизации, которые позволят провайдерам максимально эффективно использовать имеющуюся инфраструктуру. Быстрый рост трафика и внедрение новых сервисных услуг ставит перед провайдерами задачу, быстро реагировать на изменения и адаптироваться к изменившейся ситуации. И хотя, на первый взгляд, IP-сети располагают необходимыми механизмами для поддержания сети в рабочем состоянии, такими как подстраивание скорости передачи данных к доступной полосе пропускания, реагирование маршрутизаторов на изменения сетевых топологий с последующим обновлением маршрутов, выбор наикратчайших маршрутов и т.д., – все они не гарантируют рационального использования сетевых ресурсов.

Поэтому при проектировании сети передачи данных важными являются задачи оптимизации выбора алгоритма маршрутизации обеспечивающего требуемую производительность сети и ее адаптацию к изменениям трафика без необходимости изменения структуры сети и повышения емкости каналов.

Процесс оптимизации любой сети, в том числе и сети с многопротокольной коммутацией по меткам (MPLS), включает в себя распределение ресурсов пропускной способности между набором заданных путей с коммутацией по меткам (LSP) и преобразование в физическую сеть трактов с ограничением производительности. Процесс оптимизации также определяет пороги производительности трактов, связанных с использованием некоторой схемы резервирования пропускной способности для защиты обслуживания. Защита обслуживания управляет качеством обслуживания (QoS), предложенным для конкретных типов обслуживания при помощи определения пропускной способности или предоставления приоритета доступа одного типа трафика над другим. Данные методы необходимы:

для предотвращения «подавления» низкоприоритетных потоков;

для гарантирования минимального объема ресурсов;

для непродолжительных потоков;

для увеличения вероятности обслуживания потоков с высокими требованиями к пропускной способности;

для управления сетевой стабильностью при помощи предотвращения ухудшения характеристик в случае локальной перегрузки и.д.

Кроме концепции управления трафиком (TE) другим важным достоинством использования MPLS представляется защита трафика и отказоустойчивость. В IP-сетях информация о неисправности передается при помощи протокола IGP через всю сеть. После сходимости IGP можно рассчитать новые более короткие пути и неисправность будет устранена. Ошибка в планировании трафика может привести сеть к перегрузке.

Выбор метода решения задачи оптимизации - один из важнейших этапов оптимизации. Можно выделить следующие группы методов [1]:

-аналитические методы;

-методы математического программирования.

Рассмотрим группы этих методов и более подробно некоторые из них.

Группа аналитических методов оптимизации объединяет аналитический поиск экстремума функции, метод множителей Лагранжа, вариационные методы и принцип максимума. *Метод максимального потока (минимального разреза)* определяет множество ребер, при удалении которых сеть делится на две несвязанные части. Пропускная способность этих ребер ограничивает объем трафика между двумя частями сети.

Аналитический поиск экстремума функций, заданных без ограничений на независимые переменные, применяется к задачам, у которых оптимизируемая функция имеет аналитическое выражение, дифференцируемое во всем диапазоне исследования, а число переменных невелико. Это один из наиболее простых методов[1].

Группа методов математического программирования включает динамическое программирование, линейное программирование и нелинейное программирование.

Динамическое программирование – эффективный метод решения задач оптимизации многостадийных процессов. Метод предполагает разбивку анализируемого процесса на стадии (во времени и пространстве). Рассмотрение задачи начинается с последней стадии процесса, и оптимальный режим определяется постадийно.

Методы нелинейного программирования – объединяют различные способы решения оптимальных задач: градиентные, безградиентные и случайного поиска. Общим для методов нелинейного программирования является то, что их используют при решении задач с нелинейными критериями оптимальности. Все методы нелинейного программирования – это численные методы поискового типа. Суть их – в определении набора независимых переменных, дающих наибольшее приращение оптимизируемой функции.

Линейное программирование – метод для решения задач оптимизации с линейными выражениями для критерия оптимальности и линейными ограничениями на область изменения переменных. Подобные задачи решаются итерационными способами. Одним из способов реализации линейного программирования является симплекс-алгоритм, который почти всегда, за исключением некоторых случаев, может найти оптимальное решение. В основе этого алгоритма лежит полный перебор возможных вариантов решения задачи.

Эвристический метод

Данный метод направлен на сокращение перебора. Решения, получаемые данным методом, не являются наилучшими, а относятся лишь к множеству допустимых.

Каждый метод имеет свои особенности, которые определяются их принципом работы и реализацией, и отличаются друг от друга как сложностью и граничными условиями, так и отклонением от оптимального значения.

Используя методы линейного программирования и эвристический, получаем дизайн LSP, в то время как метод максимального потока (минимального разреза), определяет максимальную нагрузку на ребра минимального разреза, а также сам разрез (ребра, из которых он состоит).

Точное решение проблемы оптимизации можно получить с помощью линейного программирования, однако сложность вычислений при линейном программировании быстро возрастает с увеличением числа узлов в сети и для больших сетей является критической, что приводит к необходимости использования эвристических методов.

Более подробно рассмотрим аналитический метод на основе неопределенных множителей Лагранжа. Метод Лагранжа является универсальным и может использоваться для оптимизации самых различных процессов. Например, ослабление Лагранжа используется для определения оптимального пути в IP -сети, с учетом необходимой задержки, полосы пропускания, вероятности потерь, числа переходов. Рассмотрим алгоритм, основанный на ослаблении Лагранжа, который позволяет определить оптимальный маршрут в IP - сети, с учетом требуемой задержки и стоимости передачи [2].

Предположим, что задана топология физической сети T(V,L), где V – совокупность узлов, L – совокупность каналов. Пусть на этой сети существует N классов трафика. Для упрощения, представим топологию T(V,L) в виде матрицы M размерностью VxV. Каждый элемент матрицы M(i,j) представляет собой физический канал $e_i \in E$ $e_i = 1,2,.......\xi$ (где ξ – это общее число каналов), соединяющий узлы $i, j \in V$. Заметим, что матрица M может быть симметричной, т.к. физический канал, соединяющий узлы (i,j), может совпадать с каналом, соединяющим узлы (j,i):

M(i,j)= e_i, если узлы i и j соединены каналом e_i, иначе

M(i,j)=0

Примем следующие обозначения:

- $e_i \in E$ означает физический канал e_i между узлами (i,j), представленный в матрице M.

$C_{ph}(e_i)$ общая пропускная способность канала e_i

$C_n(e_i)$ часть пропускной способности канала e_i, выделенная для наложенной сети MPLS, где $n = 0,......,N-1$ (сети MPLS для n-го класса трафика (CT_n)).

Пусть T_n матрица трафика размерности VxV для CT_n (с нулевыми диагональными элементами). Каждый элемент T_n может быть вычислен с помощью Гауссовской аппроксимации $T_n = \mu_n + \alpha\sigma_n$, где μ_n – математическое ожидание, σ_n – стандартная девиация, α – множитель, который контролирует границу, в пределах которой оцениваемое требование полосы будет удовлетворять изменчивости трафика. В Гауссовской аппроксимации для распределения скорости мы ожидаем, что значение скорости будет превышено с вероятностью $1 - L(\alpha)$, где L – интегральная функция распределения стандартного нормального распределения. В зависимости от того, с какой вероятностью допускается превышение трафиком пропускной способности, мы выбираем соответствующий множитель α.

Запишем матрицу $R_n^{i,j}$, содержащую совокупность всех возможных маршрутов для $T_n(i,j)$. Предположим, что задано количество возможных маршрутов *r*. Значение *r* может быть различным для каждого класса трафика и для каждой пары узлов (i,j). Каждый элемент $R_n^{i,j}$ матрицы определяется следующим образом:

$R_n^{i,j}(h,e) = 1$, если канал e_i принадлежит маршруту h (h=1…r), иначе

$R_n^{i,j}(h,e) = 0$

Определим $x_n^r(i,j)$ как часть запроса $T_n(i,j)$, которая передается по маршруту r. Пусть, например, $T_0(a,b)$= 10 Мбит/с и $T_1(a,b)$ =20 Мбит/с. Следовательно, $x_0^1(a,b)$ можно сконфигурировать как 4 Мбит/с, в то время как $x_0^2(a,b)$ может быть 6 Мбит/с, это означает, что 4 Мбит/с для $T_0(a,b)$ передаются по маршруту 1 $e_1 - e_2 - e_3$, а 6 Мбит/с по маршруту 2 $e_4 - e_5$. $x_1^1(a,b)$ = 20 Мбит/с, т.к. есть только один маршрут для трафика $T_1(a,b)$.

Для учета резервирования полосы пропускания зададим вектор ограничений полосы BC: $\mathrm{BC} = [\mathrm{BC}_0, \mathrm{BC}_1, \cdots, \mathrm{BC}_7]$.

Определим целевую функцию:

$$F = \sum_{\forall \ell_i \in E} \gamma(e_i) \cdot C_{ph}(e_i),$$

где $\gamma(e_i)$ – стоимостный коэффициент, который определяет интенсивность использования данного канала в обходных маршрутах.

Мы должны убедиться, что:

переменные $x_n^r(i,j)$ – положительные;

после распределения запроса по нескольким маршрутам общее значение запроса полосы остается тем же;

общая полоса пропускания для класса трафика CT_n в канале e_i представляет собой сумму всех частей трафика, принадлежащих к CT_n, которые передаются через e_i.

общая пропускная способность физического канала $C_{ph}(e_i)$ состоит из суммы всех существующих в этом канале классов трафика CT_n;

ограничения по полосе заданы моделью русской матрешки (Russian cloll).

Кратко задачу можно сформулировать следующим образом:

Дано:

$$G(V, E), T_n, R_n(i,j), BC_n, \gamma(\ell_l) \quad и \quad N$$

Найти:

$C_{ph}(e_l)$,

Минимизировать:

$$F = \sum_{\forall \ell_l \in E} \gamma(e_l) \cdot C_{ph}(e_l),$$

Учитывая следующие условия:

{1} $\quad x_n^r(i,j) \geq 0, \forall n, r$

{2} $\quad \sum_r x_n^r(i,j) = T_n(i,j)$

{3} $\quad \sum_{\forall P_{i,j}(\ell_l)} x_n^r(i,j) = C_n(e_l)$

{4} $\quad \sum_{n=0}^{N-1} \gamma(e_l) \cdot C_n(e_l) = C_{ph}(e_l)$

{5} $\quad \sum_{n=y;y=0;\ldots,N-1}^{N-1} C_n(e_l) \leq BC_y \cdot C_{ph}(e_l)$

$\forall P_{i,j}(e_i)$ - все пути между (i, j), которые маршрутизируются через физический канал e_i.

Для решения поставленной задачи используется алгоритм, основанный на ослаблении Лагранжа. В формуле Лагранжа используются 2 набора коэффициентов Лагранжа, каждый набор содержит несколько коэффициентов по числу каналов, рассматриваемых при расчете сети. Сначала исключаем ограничения {4} и {5}, путем их включения в другие ограничения и целевую функцию. Затем мы ослабляем результирующие ограничивающие условия {2} и {3} путем включения их в новую целевую функцию. Если найденное решение не удовлетворяет ограничивающим условиям, то мы увеличиваем вес ограничивающих условий (путем увеличения значения соответствующего коэффициента) в модифицированной целевой функции, т.о. приближая решение к оптимальному. Для определения коэффициентов Лагранжа используется метод субградиентной оптимизации.

Пусть δ_{1b}^0 и δ_{1b}^0 будут первоначальными значениями. Используя субградиентную оптимизацию, мы определяем последующие значения δ_{1b} и δ_{2b}:

$$\delta_{1b}^{k+1} = [\delta_{1b}^k + \theta_{1b}^k (\sum_r x_n^r(i,j)^k - T_n(i,j))]^+ \qquad (1)$$

$$\delta_{2b}^{k+1} = [\delta_{2b}^k + \theta_{2b}^k (\sum_{n=y}^{N-1} \sum_{\forall P_{i,j}(e_i)} x_n^r(i,j) -$$

$$- BC_y \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{\forall P_{i,j}(e_i)} \gamma(e_i) \cdot x_n^r(i,j)]^+ \qquad (2)$$

В этих выражениях символ $[\beta]^+$ означает положительную часть β, которая равна max(β,0).

$x_n^r(i,j)^k$ – представляет любое решение проблемы Лагранжа, когда $\delta = \delta^k$.

Переменная θ^k – длина шага на k-й итерации, которая показывает, как далеко мы продвинулись в направлении градиента.

$$\theta_{1b}^k = \frac{\lambda_k [F_{UB} - \varsigma(\delta^k)]}{\left[\sum_r x_n^r(i,j)^k - T_n(i,j)\right]^2} \qquad (3)$$

$$\theta_{2b}^k = \frac{\lambda_k [F_{UB} - \varsigma(\delta^k)]}{\left[\sum_{n=y}^{N-1} \sum_{\forall P(e)} x_n^r(i,j) - BC_y \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{\forall P(e)} \gamma(e_i) \cdot x_n^r(i,j)\right]^2} \qquad (4)$$

В выражениях (3) и (4), F_{UB} – верхняя граница оптимального значения целевой функции, а λ_k – скаляр, выбранный строго между 0 и 2.

Первоначально верхняя граница F_{UB} является значением целевой функции для любого известного решения, подходящего для проблемы оптимизации. При дальнейшей работе алгоритм обновляет значение

F_{UB}, если генерируется более подходящее решение (с меньшей стоимостью). Мы запускаем алгоритм с λ_k = 2 и затем уменьшаем λ_k с помощью коэффициента 2 каждый раз, когда находится лучшее значение целевой функции Лагранжа, и так до тех пор, пока не будет превышено определенное число итераций, которое мы выбрали = 4 (на основе опыта). После того, как найдены оптимальные коэффициенты Лагранжа, вычисляется $C_n(e_i)$ для каждого физического канала, и затем вычисляется $C_{ph}(e_i)$.

Кратко, алгоритм оптимального поиска путей LSP на основе ослабления Лагранжа можно описать следующим образом (задано $(\delta^o_{1,2}, \lambda_k, k=1)$):

В соответствие с уравнениями 3 и 4 вычисляются $\theta^k_{a,b}$.

По уравнениям 1 и 2 вычисляются $\delta^{k+1}_{a,b}$.

Переход к шагу 6, при выполнении одного из следующих условий:

Если общее число итераций MAX=150

$$F_{UB} = \zeta(\delta^k)$$

$$\lambda_k < \varepsilon$$

Если F_{UB} не уменьшается в течение 4 итераций, то уменьшить λ_k в 2 раза.

k=k+1. Переход к шагу 1.

Используя найденные значения

$x^r_n(i,j)$,вычисляем $C_n(e_l)$ и $C_{ph}(e_l)$.

$$C_n(e_l) = \sum_{\forall P_{i,j}(\ell_l)} x^r_n(i,j),$$

$$C_{ph}(e_l) \geq \gamma(e_l) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} C_n(e_l).$$

MAX и ε – постоянные величины, которые задают максимальное число итераций, которые будут выполнены и, соответственно, насколько малым может быть λ_k. Оба значения являются критериями остановки оптимального поиска путей LSP и могут быть заданы пользователем. На основе опыта использования алгоритма поиска путей LSP в сетях MPLS , установлено MAX=150. Другим критерием остановки оптимального поиска путей LSP является вычисление того, насколько нижняя граница улучшилась по сравнению с предыдущим найденным значением. Алгоритм может остановиться, если улучшения становятся не значительными, что означает, что была найдена достаточно хорошая граница.

Использование субградиентной оптимизации для решения проблемы коэффициентов Лагранжа привлекательно по нескольким причинам: она позволяет нам использовать структуру потоков базовой (низлежащей) сети, кроме того, формулы для обновления коэффициентов Лагранжа $\delta_{a,b}$ просты для вычисления и легко программируются.

Литература

1. Краснов М.Л. и др. Вариационные исчисления. Избранные главы высшей математики для инженеров и студентов вузов .– М.: Наука,1973.

2. Hakim Badis, Khaldoun Al Agha. «A Distributed Algorithm for Multiple-Metric Link State QoS Routing Problem», Globecom2003.

3. Alpar Juttner, Balazs Szviatovszki, Ildiko Mecs, Zsolt Rajk. «Lagrange Relaxation Based Method for the QoS Routing Problem», IEEE INFOCOM 2001.

4. Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных// Информационные процессы .– Т. 1 .– 2001.– №2.– С. 103-125.

*   *

*