

基于动态规划的多链路出口路径选择算法

孙素云

(广东轻工职业技术学院计算机系, 广州 510300)

摘 要: 针对多链路接入问题, 选取链路成本及影响网络性能的路由跳数作为多链路出口路径选择的优化对象, 通过建立多目标优化模型, 将多链路出口路径选择转化为动态规划问题, 提出一个基于动态规划的多链路出口路径选择优化算法。模拟结果表明, 该算法能有效提高网络性能, 降低网络链路成本。

关键词: 多链路; 动态规划; 路径选择

Multi-link Egress Path Selection Algorithm Based on Dynamic Programming

SUN Su-yun

(Department of Computer, Guangdong Industry Technical College, Guangzhou 510300)

【Abstract】 Aiming at the multi-link switch-in problem, the link cost and routing hop which mainly affects network performance are chose as the optimal objects of multi-link egress path selection. A multi-objective optimization model is set up. The multi-link egress path selection is transformed into dynamic programming problem. Accordingly, a multi-link egress path selection algorithm based on dynamic programming is presented. Simulation results show the algorithm can promote network performance and cut down network link cost.

【Key words】 multi-link; dynamic programming; path selection

1 概述

多链路接入指一个企业或者校园网络通过多个网络服务提供商(Internet Service Provider, ISP)连接到 Internet。文献[1]通过对实际网络的观测,当残桩网络(stub networks)使用2个ISP链路连接到Internet时,网络的RTT(Round-Trip Times)性能将提高25%以上,网络的传输速率能提高20%以上。随着企业和校园越来越多地依赖互联网传送关键业务,网络的可靠性和可用性已成为人们对网络的重要需求。根据文献[2]的统计显示,有51%以上的残桩网络通过至少2个或2个以上的ISP链路连接到Internet。虽然现在已经有很多负载均衡的网络产品,如Radware的LinkProof因特网流量管理器以及F5 Networks的多出口链路负载均衡产品BIG-IP Link Controller等,但是这些产品均没有提供它们的技术细节以及确切的网络性能提高指标^[1]。

另外,针对实际的流量管理设备网络,虽然有许多类似文献[3]的研究阐述了如何将设备应用到实际网络中进行流量管理,但到目前为止,关于多链路接入中流量管理问题的研究较少,因此,在这样的背景下,面对日益增多的多链路的Internet接入方式,研究多链路接入的流量管理具有重大意义。

文献[4]针对多链路的Internet接入问题,综述了多链路接入技术当前的研究进展,并提出一些关于多链路接入中带宽资源利用率以及网络用户QoS保证等公开性问题。文献[2]针对如何在众多的ISP中选择合适本企业的ISP问题进行研究,并应用实际的网络定价模型,使用非协作博弈理论对多链路接入网络中的流量管理问题进行描述,提出一个提高网络可靠性和减少网络运营成本的流量分配算法。文献[5]将多

链路接入网络的出口路径选择问题分解为成本优化、路由跳步优化和路径多样性优化等问题,并分别提出降低网络运营成本启发式算法和出口路径选择的模拟退火等优化算法。文献[6]引入博弈理论模型对残桩网络中的用户与ISP之间以及ISP内部之间进行描述,应用微观经济学的理论分析了多链路接入网络的流量管理问题。文献[7]针对多链路Internet接入方式的自治网络系统之间路由抖动性问题,提出一个基于用户QoS保证的多链路接入网络的路由算法,解决多链路Internet接入网络中的全局优化问题。

文献[1]选定Akamai CDN服务器的网络节点作为研究对象,通过分析实际监测的网络相关数据,研究ISP个数对网络性能的影响,并通过具体的观测实验,研究了多链路接入网络的路由控制中链路监视策略(主动和被动、时间间隔等),从而提高网络性能。

2 问题描述

本文和文献[1]一样,旨在解决残桩网络的多链路出口路径选择问题,但和文献[1]不同的是,本文主要针对多链路接入网络中ISP已确定的情况下,选择网络流平均跳数和Internet接入的链路成本进行研究,以达到减少网络流平均跳数(一般来说,跳数越小,传输时延也越小)和降低多链路接入网络的运营成本的目的,因此,它是一个多链路出口路径选择的多目标优化问题。

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(05011896); 广东轻工职业技术学院基金资助项目(KY200807)

作者简介: 孙素云(1977—),女,讲师、硕士,主研方向:算法设计,分布式计算

收稿日期: 2009-12-03 **E-mail:** sunsy81@126.com

由于动态规划是把一个 n 阶过程问题转化为 n 个单阶问题, 用不变嵌入原理求解问题的最优策略, 因此在具体的研究方法中, 首先建立一个多目标的优化模型, 将多链路出口路径选择问题利用动态规划方式进行描述, 然后提出一个基于动态规划的多链路出口路径选择优化算法, 以达到提高网络性能, 降低网络接入成本的目的。

图 1 给出了本文研究的网络模型, 源网络 S , 通过 K 个 ISP 链路连接到 M 个汇聚目的节点。假设网络 S 是一个内容的提供者(如视频点播网站), 经过一段时间的运营后, 通过流量监视等手段已经知道网络 S 的出口流量分布情况, 特别是知道访问网络 S 前 M 个目的节点(按照汇聚节点的流量大小排序), 这 M 个主要节点假设分配在整个网络, 且记录了从源 S 到 M 个目的节点的流速分布。

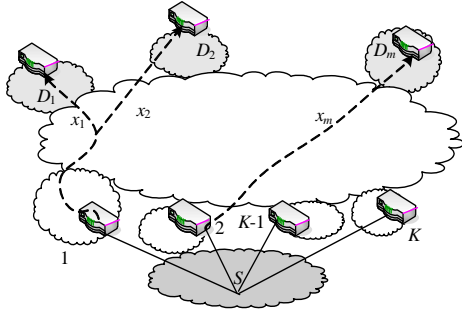


图 1 多链路 Internet 接入的网络模型

为了提高这 M 个节点中的用户访问网络 S 的网络性能以及降低网络 S 的链路成本, 有必要对网络 S 的多链路出口流量的路径选择进行优化。本文用 D 表示源网络 S 的 M 个主要目的节点集合, 即 $D = \{i | i = 1, 2, \dots, M\}$, S 有 K 条链路接入 Internet, 即网络 S 有 K 个 ISP 提供 Internet 出口, 用 C 表示 K 个 ISP 的集合, 即 $C = \{j | j = 1, 2, \dots, K\}$ 。

3 基于动态规划的多目标优化模型

假设有 K 个 ISP 的带宽容量分别为 $A_j, j \in C$, 每个 ISP 的计费函数 $f_j(x), j \in C$, 其中, x 表示通过第 j 个 ISP 的网络流量。假定使用 $R = \{r_i | i \in D\}$ 表示从网络 S 到各个目的节点的平均汇聚速率, 则第 i 个汇聚流通过第 j 个 ISP 的费用为 $f_j(r_i)$ 。假定第 i 个汇聚流经过第 j 个 ISP 进行出口时, 从源点 S 到第 i 个目的地节点的最小跳数为 $p_j(i)$ 。另外, 为了方便地表示第 i 个汇聚流是否经过第 j 个 ISP 进行出口, 引入二元变量:

$$x_j^i = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 通过 } ISP_j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

因此, 网络中 M 个汇聚流经 K 个 ISP 多链路出口的总跳数为

$$Hop_{total} = \sum_{i \in D} p_j(i) \times x_j^i, j \in C \quad (2)$$

而网络中 M 个汇聚流经 K 个 ISP 多链路出口的总费用为

$$Cost_{total} = \sum_{i \in D} f_j(r_i) \times x_j^i \quad (3)$$

为了优化多链路出口路径选择, 即最小化总跳数和总费用, 因此, 多链路出口路径选择问题的优化目标可以表示为

$$\min Hop_{total} = \sum_{i \in D} p_j(i) \times x_j^i \quad (4)$$

$$\min Cost_{total} = \sum_{i \in D} f_j(r_i) \times x_j^i \quad (5)$$

多链路出口路径选择的约束条件为

$$\sum_{i \in D} r_i \times x_j^i \leq A_j, j \in C \quad (6)$$

式(6)使通过各 ISP 的流量不大于 ISP 的带宽容量。

显然, 在进行多链路出口路径选择时, 有可能不存在同时满足式(4)和式(5)的最优解, 因此, 为了提高网络 S 的出口链路的网络性能, 使式(4)优先于式(5), 即在满足式(4)的前提下对式(5)进行优化。为便于求解多链路出口路径选择问题的最优解, 这里借鉴目标规划理论中的词典最小值(lexicographic minimum)^[8]对式(4)和式(5)进行求解。

定义 当网络 S 有 K 个 ISP 和 M 个目的节点, 则多链路出口路径可能的组合方式为 M^K 个, 使用长度为 M 的向量 $a = (a_1, a_2, \dots, a_M)$ 表示可能的一个出口方式。对于 2 个向量 $a^{(1)} = (a_1^{(1)}, a_2^{(1)}, \dots, a_M^{(1)})$ 和 $a^{(2)} = (a_1^{(2)}, a_2^{(2)}, \dots, a_M^{(2)})$, 如果在 $a^{(1)}$ 存在某一项 $a_k^{(1)} < a_k^{(2)}$, 其他项均不大于 $a^{(2)}$ 中对应的项, 那么称 $a^{(1)}$ 优于 $a^{(2)}$, 因此, 当网络中如果没有其他向量优于 a 时, 那么称 a 是词典最小值, 即多链路出口路径选择的最优解。因此, 多链路出口路径选择优化问题就可表示为

$$\text{lexmin } u = (\sum_{i \in D} p_j(i) \times x_j^i, \sum_{i \in D} f_j(r_i) \times x_j^i) \quad (7)$$

式(7)意味着首先对网络的跳数进行优化, 如果存在跳数相同的解, 则从中选择最小费用的解作为最优解。

4 多链路出口路径选择算法

为了求解上述的多目标优化问题, 利用基于动态规划的优化算法进行求解。首先将每个 ISP 的带宽容量按照最小的汇聚速率 r 将 A_j 划分为 N_j 等份, 其中, $r = \min\{r_i, i \in D\}$, 则 K 个 ISP 总划分个数为 $N = \sum_{j \in C} N_j$ 。用 $g(m)$ 表示第 m 个汇聚流的出口路径选择的跳数和费用, 则

$$g(m) = (\sum_{i \in D} p_j(m) \times x_j^m, \sum_{i \in D} f_j(r_i) \times x_j^m) \quad (8)$$

假设 $f(n, m)$ 表示将 n 份带宽分配给前 m 个汇聚流的优化解, 其中, $n \leq N, m \leq M$, 则 $f(n, m)$ 的递归公式为

$$f(n, m) = \text{lexmin}\{(f(n - r_m, m - 1) + g(m)), f(n, m - 1)\} \quad (9)$$

其中, r_m 表示第 m 个汇聚流的流速大小。式(9)使得当第 m 个汇聚流进行多链路出口路径选择时, 网络性能最优, 同时费用尽可能小。显然, $f(0, 0)$, $f(0, m)$ 和 $f(n, 0)$ 的值均为 $(0, 0)$ 。

如果用一个 $(N+1) \times (M+1)$ 的表格存储每一个 $f(n, m)$, 且 $f(n, m)$ 对应的跳数和费用保存在 n -th 行和 m -th 列对应的单元格中, 那么可以采用下列方法对多链路出口路径选择问题进行求解: 对于所有 n 和 m 都有 $f(0, m) = 0$ 和 $f(n, 0) = 0$, 因此, 表格第 0 行和第 0 列的值均为 $(0, 0)$, 然后利用递归式(9)以及第 0 行的值, 就可以计算出第 1 行的对应值, 同样, 利用递归式(9)以及第 1 行的值, 可以得到第 2 行的对应值, 以此类推, 最后就可以得到 $f(N, M)$ 。因此, 根据这个思想, PathSelection 算法描述如下:

输入 各个汇聚流的流速大小 r_1, r_2, \dots, r_M 以及 K 个 ISP 的带宽容量 A_j

输出 $f(N, M)$

PathSelection() {

For($i=1; i < N+1; i++$)

For($j=0; j < M+1; j++$)

$f(i, j) = (0, 0);$ //初始化使表格所有单元格均为 $(0, 0)$

For($j=1; j < M+1; j++$) {

```

For(i=1;i<N+1;i++){
    If (  $r_j \leq i$  ) //将第  $j$  个汇聚流的流速  $r_j$  和  $i$  进行比较
        If (  $\text{lexmin}\{f(i-r_j, j-1) + g(j)\} < f(i, j-1)$  )
             $f(i, j) = \text{lexmin}\{f(i-r_j, j-1) + g(j)\}$ ;
        else  $f(i, j) = f(i, j-1)$ ;
    } //end If
} //end For
} //end For
Return  $f(N, M)$ ;
} //end PathSelcion()

```

在 PathSelection 算法中, 由于计算每个 $f(i, j)$ 的时间复杂度为 $\Theta(N)$, 表中除一列不用计算外, 其他还有 $N \times M$ 项, 因此 PathSelection 算法总的时间复杂度为 $\Theta(N^2M)$ 。

5 仿真实验与分析

采用 Matlab 仿真工具验证本文算法, 在 100×100 区域内随机分布 100 个网络节点, 各节点以平均度为 4 随机与其他节点使用边进行连接。为了体现不同的汇聚流从不同 ISP 出口的路由跳数和链路费用的差异, 在 100 个节点中随机选择 3 个节点当作 ISP 节点, 并在其他 97 个节点中随机选择 M 个节点为目的节点。当 3 个 ISP 节点和 M 个目的节点确定好后, 使用最小跳步路由算法(Dijkstra 算法)分别求出每个汇聚流 i 分别通过第 j 个 ISP 的最小跳数 $p_j(i)$, 其中, $i \in D$, $j \in C$ 。假定每个数据包大小为 1024 Byte, 各目的节点每秒发送数据包的个数在[2, 20]中随机分布, 每个 ISP 的带宽容量均为 2 Mb/s, 各 ISP 均以实际通过流量进行计费, 且各 ISP 计费在[10, 19]中的 10 个整数单位内随机分布。

本文从汇聚流的平均跳数和平均费用 2 个方面对算法进行模拟。为验证 PathSelection 算法的有效性, 利用文献[2]中的贪婪算法(Greedy algorithm)分别对汇聚流的平均费用和跳数进行优化, 并取其优化结果作为优化上界值, 并将其值与本文算法运行结果进行比较。同时, 为了便于比较算法的性能, 实现了文献[5]的 FFD 启发式算法(FFD-like heuristic)。在实验中, 通过改变目的节点数 M 对 3 个算法进行模拟, 实验结果如图 2、图 3 所示。

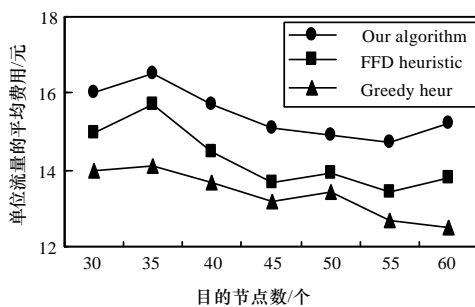


图 2 平均费用与目的节点数

从图 2 可以看出, 在 3 个算法中, 贪婪算法的平均费用最小, 本文算法在平均费用上较大, 一方面, 贪婪算法是在 M^K 个出口组合选择最优的链路出口, 所以, 平均费用较小, 但是其时间复杂度较大; 另一方面, FFD 启发式算法的平均费用之所以较优, 是因为该算法在优化过程中, 主要考虑网络成本优化, 没有考虑网络性能, 然而, 本文算法主要是在

保证网络性能的基础上对网络链路成本进行优化, 所以, 平均费用较大。

从图 3 可以看出, 本文算法在平均跳数上接近贪婪算法, 且明显优于 FFD 启发式算法, 说明该算法能达到提高网络性能, 同时降低网络链路成本的目的。

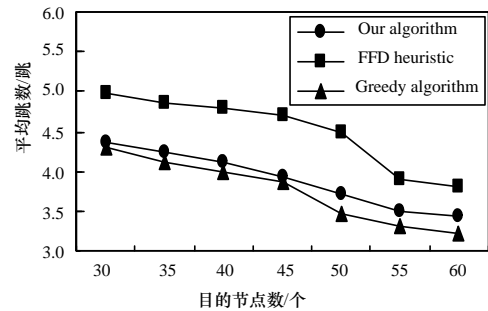


图 3 平均跳数与目的节点数

6 结束语

为了能充分利用多链路接入 Internet 方式的优势, 本文通过建立多目标优化模型, 将多链路出口路径选择转化为动态规划问题, 并提出一个基于动态规划的多链路出口路径选择优化算法。

模拟结果说明, 该算法能达到提高多链路的 Internet 接入网络的网络性能, 降低网络链路成本的目的。随着网络用户对网络的性能需求不断增加, 下一步的主要工作是通过扩展本文提出的优化模型, 对多链路接入 Internet 的网络用户提供更可靠的 QoS 保证, 从而满足网络用户需求。

参考文献

- [1] Akella A. On the Performance Benefits of Multihoming Route Control[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008, 16(1): 91-104.
- [2] Wang Hao, Xie Haiyong, Qiu Lili, et al. Optimal ISP Subscription for Internet Multihoming: Algorithm Design and Implication Analysis[C]//Proc. of INFOCOM'05. Miami, FL, USA: IEEE Press, 2005.
- [3] 沈琦. 多链路接入的流量管理及其在城域网中的应用[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2006, 26(4): 25-29.
- [4] Liu Xiaomei, Xiao Li. A Survey of Multihoming Technology in Stub Networks: Current Research and Open Issues[J]. IEEE Network, 2007, 21(3): 32-40.
- [5] Dhandhere A. ISP and Egress Path Selection for Multihomed Networks[C]//Proc. of INFOCOM'06. Barcelona, Spain: IEEE Press, 2006.
- [6] Shakkottai S. Economics of Network Pricing with Multiple ISPs[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2006, 14(6): 1233-1245.
- [7] Dovrolis C. Multihoming Route Control Among a Group of Multihomed Stub Networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(17): 3335-3345.
- [8] Ignizio J P. Linear Programming in Single-objective and Multiple-objective Systems[M]. [S. l.]: Prentice Hall, 1982.

编辑 陈文