

一种 IP 与 ATM 网络基于多服务质量约束的路由算法

A Multi-QoS Constraints Based Routing Algorithm for IP and ATM Networks

邓亚平 吴慧莲

(重庆邮电学院 重庆400065)

Abstract In this paper we introduce a routing algorithm for communication networks with multiple QoS metrics. This algorithm can be used for QoS-based route computation for ATM PNNI and Internet protocols such as QoS OSPF. A communication network containing links with multiple QoS metrics is modeled as a graph with multiple weights associated with its edges. This method takes a metric (e. g. cost) as the optimization target and another metric (e. g. delay) as a constraint. This algorithm is guaranteed to find a nearly optimal path satisfying the given constraint if such a path exists. The algorithm is very efficient and its computational complexity is $O(n^2)$.

Keywords IP QoS Routing, Route computation, ATM PNNI, Multiple constraints

1 引言

随着多媒体技术的飞速发展,网络上诸如数字视频和音频的各种多媒体应用通常都有严格的服务质量(QoS)要求。网络为了提供性能保证,只有采用资源预留和实行网络控制。近年来在 ATM^[1]与 Internet^[2,3]上的 QoS 要求已受到人们的极大重视。

传统的数据传输网中路由选择主要与连通性有关,各种路由协议通常用诸如节点计数或延迟等单一的度量(metric)来表示网络的特性,并用最短路径算法来进行路由计算。为了支持广泛的 QoS 要求,这些路由协议需要有更复杂的模型,用诸如开销(cost)、延迟、延迟变量、丢失概率和带宽等多度量来表示网络的特性。QoS 路由寻址的基本问题是找一条满足一种或多种 QoS 约束条件、具有最小开销(或者最短距离)的路径。要达到这个目标是非常困难的,这个问题的计算复杂性是 NP-难度的^[4,5],因此实际上不可能设计出一种完全有效的算法来解决此问题。

近几年来人们尽力解决了满足信道带宽约束条件的寻找最短路径的问题^[6,7]。寻找满足两种或多种度量的这类问题的解仍然是开放的问题。目前各个厂商都仅用 Dijkstra 算法来实现 ATM PNNI 协议,在产生生成树时最优开销值是由其它约束度量来检验^[8]。如果找不出这样的路由,则忽略此最优开销另选一种其它约束度量为优化指标并以其它约束度量来检验从而得到生成树。这种方法的缺点是浪费网络资源。在算法设

计和分析领域中目前最佳结果是寻找到满足两个给定约束度量的路径^[6,7],但其算法的计算复杂性是伪多项式时间 $O(w \times n^5 \times \log(n \times w))$,这里 n 是节点数, w 是最大可能的权或长度。也有人将多约束度量先组合在一个函数中,然后再使用 Dijkstra 算法^[9]。这种方法的不足是由于该函数的动态重复定义和重复计算会出现选择的路由并不满足约束条件。

本文下面要介绍的是适用于数据通信网络、基于 QoS 的路由算法,该算法可寻找关于开销(或距离)几乎最佳的路径,而同时满足另一个附加的 QoS 约束条件。该算法非常有效,且其计算复杂性是 $O(n^2)$ 。我们称此算法为有界-贪婪算法。

2 有界-贪婪算法

本节我们详细描述有界-贪婪算法。该算法用来解决下述问题:

已知一个网络 $G=(N,L)$,每一个在 N 中节点对 i 和 k ,有一条在 L 中链路 (k,i) ,此链路的约束条件为 $d_k(d_k > 0)$ 和开销为 $c_k(c_k > 0)$ 。一条路径的约束条件 $D > 0$ 并连通源节点 s 和终节点 e 。要求找到一条简单路径,该路径上的链路约束条件之和不超过 D 并且路径开销(路径上链路开销和)最小,或者指出这样的路径根本不存在。

作为一个实际例子,可将 d_k 视为链路 (k,i) 的延迟而将 D 视为该路径允许的最大延迟。这个问题是 NP-难度的^[3,9],因此实际上不可能设计出求解此问题的有效

邓亚平 教授,主要研究方向为计算机网络。吴慧莲 副教授,主要研究方向为计算机复杂性理论和网络协议工程。

和最优的算法。我们把问题求最小改为几乎最小。我们找到了一种寻求几乎最佳的路由选择的方法。

2.1 有界-贪婪算法概述

有界-贪婪算法将 Dijkstra 算法的搜寻方法作为基本的搜寻策略。此外为了完成在多项式时间内的搜寻,我们研究出一种启发式规则来减少搜寻空间。该算法分为两个阶段,第二阶段描述了启发式规则。这种几乎最佳的路由选择算法概述如下:

已知一个网络 $G=(N,L)$, 每一个在 N 中节点对 i 和 k , 有一条在 L 中链路 (k,i) , 此链路的约束条件为 $d_k (d_k > 0)$ 和开销为 $c_k (c_k > 0)$ 。一条路径的约束条件 D (例如, 该路径的延迟, 且 $D > 0$) 并连通源节点 s 和终节点 e 。采用下述的两阶段方式寻找一条满足该路径上链路约束条件和不超过 D 的简单路径 $p(s,e)$ 。

I 阶段: 对每个节点 i , 寻找约束条件 D_i (用 Dijkstra 算法得到一棵以终节点 e 为根的生成树, 以链路的约束条件作为权)。

II 阶段: 用类似于 Dijkstra 算法的贪婪算法 (选择具有最小开销的链路) 生成一条满足约束条件 D_i (路径上的每个节点 i 到终节点 e) 从源节点 s 到终节点 e 的路径。

I 阶段是计算在 II 阶段的两个启发式规则将会用到的约束条件 D_i 。核查约束条件满足性可保证用此算法总会找到一条满足约束条件的路径, 只要该路径存在。选择具有最小开销的链路能保证所选择的路径有几乎最佳的路由开销。

2.2 有界-贪婪算法的细节

在本小节我们形式化描述有界-贪婪算法。

已知一个网络 $G=(N,L)$, 每一个在 N 中节点对 i 和 k , 有一条在 L 中链路 (k,i) , 此链路的约束条件为 $d_k (d_k > 0, \text{链路不存在时 } d_k = \infty)$ 和开销为 $c_k (c_k > 0)$ 。一条路径的约束条件 $D > 0$ (譬如, 延迟约束条件) 并连通源节点 s 和终节点 e 。采用如下算法寻找一条简单路径, 该路径上的链路约束条件和不超过 D 并且路径开销 (路径上链路开销和) 最小。

I 阶段 对每个节点 i , 寻找约束条件 D_i (用 Dijkstra 算法得到一棵以终节点 e 为根的生成树, 以链路的约束条件作为权)。

- (1) 假设终节点为 e , 设 $A = \{e\}$, 除 e 之外的所有节点, $D_i = d_e$ 。
- (2) 对所有不在 A 中的节点 i , 寻找满足 $D_k = \min D_i$ 不在 A 中的节点 k 。
 $A := A \cup \{k\}$ 。
 如果 A 含所有节点, 则 I 阶段终止。
- (3) 对所有不在 A 中的节点 i , 令 $D_i' = \min [D_i, D_k + d_k]$
- (4) 返回到 (2) 步。

II 阶段 用贪婪算法生成一条满足约束条件 D_i (路径上的每个节点 i 到终节点 e) 从源节点 s 到终节点 e 的路径。

- (1) 如果 $D_s > D$, 这里 s 是源节点, 算法终止; 否则, 假设每个节点 i 与二元组 (P_i, C_i) 关联, 这里 P_i 是暂定前节点而 C_i 是当前选择的从源节点 s 到节点 i 的路径的开销。设 $A = \{s\}$, $(P_s, C_s) = (-1, 0)$, 对所有节点 i (节点 s 除外)
 如果 $d_s + D_i \leq D$ 则令 $(P_i, C_i) = (s, c_s)$;
 否则 $(P_i, C_i) = (-1, \infty)$ 这里 -1 表示节点 i 的暂定前节点是不可确定的。
- (2) 对所有不在 A 中的节点 i , 寻找满足 $C_k = \min C_i$ 的不在 A 中的节点 k 。
 $A := A \cup \{k\}$ 。
 如果 A 含有终节点 e 则算法终止。
- (3) 对所有不在 A 中的节点 i ,
 当 $C_i > C_k + C_k$ 与 $S_k + d_k + D_i \leq D$ 时, 令 $(P_i, C_i) = (k, C_k + C_k)$
 这里 S_k 是当前得到的树中从源节点 s 到节点 k 路径的链路约束条件之和。
- (4) 返回到 (2) 步。

注意到在算法中检测不在 A 中的节点 i 时对访问过的每个节点都进行了标记, 因此, 检测不在 A 中的节点 i 时仅需常数时间。该有界-贪婪算法的计算复杂性是 $O(n^2)$ 。

2.3 有界-贪婪算法的特点

本节描述的有界-贪婪算法有这样几个特点: (1) 在一种附加属性 (例如, 延迟) 上的约束条件总是可保证的。(2) 第二种附加属性 (例如, 开销) 是几乎最佳的。(3) 该算法保证找到一条满足给定约束条件的几乎最佳的路径, 只要这种路径存在; 否则它保证报告这种路径不存在。(4) 该算法非常有效并且其计算复杂性是 $O(n^2)$ 。特点 (1) 可直接从我们的算法中 I 阶段的 (1) 到 (3) 步推出。特点 (2) 是基于下一节里我们的模拟结果。特点 (3) 是由下述定理给出。

定理 2.2 节的有界-贪婪算法保证找到一条满足给定约束条件的几乎最佳的路径, 只要这种路径存在。

由于本文篇幅所限, 此定理的证明略去。

对于特点 (4), I 阶段使用 Dijkstra 算法并且其计算复杂性是 $O(n^2)$ 。I 阶段的 (1) 到 (3) 步应用了启发式规则, 使用修改的 Dijkstra 算法。人们不难明白它的计算复杂性仍然是 $O(n^2)$ 。因此, 整个有界-贪婪算法的计算复杂性是 $O(n^2)$ 。

在我们的算法中为了求解这个最优化问题, 此图的每一条链路至少访问一次。图的链路数目是与 $O(n^2)$ 成比例的。因此, 任何一种解决此最优化问题的计算复杂性至少是 $O(n^2)$ 。

3 模拟结果

为验证上述算法确实可找到几乎最佳路径, 我们用随机生成的网络进行了一系列的模拟实验。算法是通过将找到路径的开销与经过穷尽搜寻到的最佳开销路径的比较来判断。模拟的网络选用了 30 个节点的网络。链路的开销和延迟随机赋值, 并且所有链路的延迟都不同。所有链路的延迟都假设是对称的。

$n(n-1)/2$ 种源节点和终节点对 (1 到 2, 1 到 3, ...,

29到30)中的每对节点都要考查其间的的所有路由。在延迟约束条件D下,本文描述的算法才执行和允许确定其路径。对每一对源和终节点对(s,e),要考查所有路径的延迟,找到最大延迟(D_{MAX})和最小延迟(D_{MIN})后才能确定D,D等于 $(D_{MIN} + t(D_{MAX} - D_{MIN}))$ 的整数部分,其中 $t \in [0, 1]$ 。这样可确保满足约束条件的路由存在,并用t接近0表示约束条件是非常严格的。显然,如果 $t=1$ 说明所有路径都满足约束条件。

在不同的约束条件下,寻找几乎最佳路径的算法的性能如表1所示,表中使用的两种质量的度量是本算法找到最佳开销路由占总路径的百分比和最佳路径的开销与本算法找到的路径开销之比。从表1可看出该算法运行非常成功,我们多次用随机产生更强的连通性的方法改变网络的拓扑结构,该算法都可以找到最佳路径。

表1 算法的模拟结果

t	满足约束条件的平均路径数	满足约束条件的最大路径数	找到最佳路径所占的百分比	最佳开销与实际开销的比值
0.01	3.4	17	100	1
0.02	6.8	35	100	1
0.03	8.2	40	100	1
0.04	9.7	56	100	1
0.05	11.2	64	100	1
0.06	13.5	87	99.6	0.976
0.07	15.3	90	100	1
0.08	18.9	121	100	1
0.09	24.5	172	99.6	0.976
0.10	28.8	181	99.6	0.976
0.12	42.3	238	100	1
0.14	59.7	310	100	1
0.16	79.6	412	100	1
0.18	106.3	531	100	1
0.20	135.4	735	100	1
0.30	385.8	2224	100	1
0.99	2878.5	5472	100	1

结论 本方法是设计来用于有服务质量要求的交换机和路由器,例如 ATM 交换机与 IP 交换机和路由器。使用本算法的数据通信网中的交换机和路由器,通过减少网络通信不必要的网络通信开销(overhead)能几乎最优地地使用网络资源。因此,使用本算法最终会降低数据通信网的运营成本。我们也将这种算法扩充到去寻找一条具有几乎最佳开销的路径,且满足多个附加的 QoS 约束条件。这个研究成果将在另一篇论文中发表。

参考文献

- 1 ATM Forum, Private Network-Network Interface Specification Version 1.0(PNNI 1.0), 1996
- 2 Crawley E, et al. A Framework for QoS-based Routing in the Internet, RFC 2386, August 1998
- 3 Data Connection, DC-PNNI specification, 1997
- 4 Guerin R, Kamat S, Orda A, Przygienda T. QoS routing mechanism and OSPF extensions, Jan. 1998 (IETF Internet Draft)
- 5 Iwata A, et al. PNNI Routing Algorithms for Multimedia ATM Internet. NEC Res. & develop., 1997, 38(1)
- 6 Jaffe J M. Algorithms for finding Paths with Multiple Constraints Networks, Networks and ISDN, 1984, 14: 95~116
- 7 Lee W C, et al. Rule-based Call-by-Call Source Routing for Integrated Communication Networks, Infocom 3, 1993, 987~993
- 8 Lee W C, et al. Multi-Criteria Routing Subject to Resource and Performance Constraints. ATM Forum, Mar. 1994 94~0280
- 9 Wang Zheng, Crowcroft J. Quality of Service Routing for Supporting Multimedia Applications. IEEE Journal on selected areas of communications, 1996, 14(17): 1228~1234
- 10 Zhang Zhaoxun, et al. Quality of Service Extensions to OSPF or Quality of Service Path First Routing QOSPF. IETF Internet Draft, Sep. 1998
- 11 Lin Chuang, et al. Differentiated Services in the Internet A Survey. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(4): 419~432
- 12 Savasere A, Omiecinski E, Navathe S. An efficient algorithm for mining association rules. In: Proc. of the 21st int conf. on very large databases, Zurich, Switzerland, Sept. 1995 432~444
- 13 Torvonen H. Sampling large databases for association rules. In: Proc. of the 22nd int conf. on very large databases, Bombay, India, 1996. 134~145
- 14 Han Jia-wei, Fu Yong-jian. Discovery of multiple-level association rules from large databases. Same to [5], 420~431
- 15 Agrawal R, et al. Parallel mining of association rules. IEEE Transactions on knowledge and data engineering, 1996, 8(6): 962~969
- 16 Cheung D W, et al. Efficient mining of association rules in distributed databases. IEEE Transactions on knowledge and data engineering, 1996, 8(6): 910~921
- 17 Agrawal R, Srikant R. Fast algorithms for mining association rules. In: Proc. 20th int'l conf. very large databases Santiago, Chile, Sept. 1994. 478~499
- 18 Srikant R, Agrawal R. Mining generalized association rules. In: Dayal U, Gray PMD, Nishio S, eds. Proc. of the int conf. on Very Large Databases. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Press, 1995. 406~419
- 19 Houtsma M, Swami A. Set-oriented mining for association rules in relational databases. In: YU P, Chen A, eds. Proc. of the Int Conf. on Data Engineering. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1995. 25~33
- 20 Park J S, et al. Using a hash-based method with transaction trimming for mining association rules. IEEE Transactions on knowledge and data engineering, 1997, 9(5): 813~825

(上接第86页)