

## QoS 多约束优化路径选择算法

陈立家,周建国,江 昊,晏蒲柳  
(武汉大学 电子信息学院,湖北 武汉 430079)  
(chenlijia\_just@sina.com)

**摘 要:**针对 H\_MCOP 算法在 QoS 多约束最优路径选择中存在产生累积误差,搜索范围不全面的缺点,提出了一种改进的算法 LMS,使用 BFS 算法双向搜索网络拓扑,在每个节点实时监测最优路径。最优路径成功率的仿真实验表明,该算法有更低的时间复杂度和更高的性能表现。

**关键词:**多约束;路径选择;QoS 路由;最小花费

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## Multi-constrained optimal path selection of QoS

CHEN Li-jia, ZHOU Jian-guo, JIANG Hao, YAN Pu-liu  
(School of Electronics Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of H\_MCOP algorithm that produces cumulate error and searches network only partly in multi-constrained optimal path selection of QoS, a improved heuristic algorithm LMS was put forward, which searches network from two directions using BFS algorithm and supervises the optimal path at each node. The simulation experiment of success rate of finding optimal path indicates that LMS has lower time complexity and upper performance than H\_MCOP.

**Key words:** multi-constrained; path selection; QoS route; the least cost

## 0 引言

QoS 路由是一种基于数据流 QoS 请求和网络可用资源进行路由的机制<sup>[1]</sup>。QoS 路径要能满足用户对某些度量参数的要求。QoS 路由的度量参数包括,带宽、代价、延迟、延迟抖动、丢失率和跳数等。根据运算规则,这些度量参数可分为加性度量参数、乘性度量参数和凹性度量参数。QoS 度量参数中,代价、延迟等属于加性度量参数,丢失率属于乘性参数,带宽属于凹性参数<sup>[2]</sup>。搜索 QoS 路径过程中,可以删除不满足凹性参数的链路,而乘性参数可通过取对数变为加性,所以 QoS 路由算法主要是搜索到满足一个或多个加性度量参数的路径。而最优路径选择要求在多个满足约束的路径中,找到花费最小的路径是 NP 难问题,目前还没有算法能够在多项式时间内解决这类问题。

## 1 QoS 单播路由算法

### 1.1 常见单播路由算法

当前的研究主要集中在搜索出满足多个约束的单播 QoS 路径<sup>[2]</sup>。主要有最短最宽路径算法<sup>[3]</sup>,包探测法<sup>[4,5]</sup>,扩展距离向量算法<sup>[6]</sup>,图论删减算法<sup>[7]</sup>和寻找优化函数的离散点方法<sup>[8]</sup>等。

当前大多数算法都不能使时间复杂度和性能同时达到最优。要么时间复杂度低,而性能不高;要么性能很高,而时间复杂度也很高。

### 1.2 H\_MCOP 算法

文献[9]提出的 H\_MCOP 保证找到满足多个约束且花费 cost 最小的路径,它在算法时间复杂度低的同时,也有很好的性能表现。

H\_MCOP 算法选择的综合度量函数为:

$$g_{\lambda}(p) = \left(\frac{w_1(p)}{c_1}\right)^{\lambda} + \left(\frac{w_2(p)}{c_2}\right)^{\lambda} + \dots + \left(\frac{w_K(p)}{c_K}\right)^{\lambda}$$

它给出了证明,在  $\lambda$  从 1 趋近正无穷的过程当中, H\_MCOP 算法的成功率逐渐上升,在  $\lambda = +\infty$  时,算法有最好的性能。H\_MCOP 保证找到满足多个约束且花费 cost 最小的路径。H\_MCOP 算法的过程是:首先从目的节点开始后向搜索拓扑,计算每个节点的综合度量,花费等量;然后从源节点前向搜索拓扑,利用已有的信息,最终在目的节点得到最优路径。

## 2 网络模型

为了研究问题方便,往往把网络中的交换机,路由器,集线器等网络设备抽象为节点,它们之间的链路抽象为边,链路上的带宽、延迟、队列长度等参数抽象为边上的权重,而用户或供应商所关心的费用抽象为花费函数。

网络模型:给定一个赋权有向连通图  $G = (V, E)$ ,  $V$  表示节点的集合,  $E$  表示链路的集合,每条链路  $(i, j)$  关联一个花费函数  $cost(i, j)$  和  $K$  个 QoS 参数  $w_k(i, j)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , 所有参数为正数。源节点为  $s$ , 目的节点为  $t$ , 从  $s$  到  $t$  的路径为  $p$ , 若  $p$  通过链路  $(u, v)$ , 则  $p$  也可以表示成  $p(u, v)$ , 其花费为  $cost(p)$ , 权重为  $w_k(p)$ , 通过节点  $u$  发现的可行路径的花费表示为  $cost(u)$ 。通过节点  $u$  找到可行路径,则设定  $found(u) = true$ , 否则,  $found(u) = false$ 。QoS 路径约束为  $c_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ 。

## 3 对 H\_MCOP 算法的改进

### 3.1 LMS 算法描述

LMS 算法目标是找到满足  $K$  个 QoS 约束花费 cost 最小的

可行路径。采用的综合度量函数是:

$$e(v) = \left(\frac{w_1(v)}{c_1}\right)^2 + \left(\frac{w_2(v)}{c_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{w_K(v)}{c_K}\right)^2$$

其中  $v \in V$ ,  $w_i$  表示从源(目的)节点到  $v$  节点路径的约束,  $c_i$  表示路径的 QoS 约束,  $i = 1, 2, \dots, K$ 。算法首先前向宽度优先搜索, 以获得各节点的初步约束和花费的信息; 然后后向宽度优先搜索, 得到满足约束的各条路径, 并且获得花费最小的路径。LMS 算法的伪代码如下所示:

LMS( $G, s, t, c_k, k = 1, 2, \dots, K$ )

- (1) forward\_BFS( $G, s$ )
- (2) backward\_BFS( $G, t$ )
- (3) if succ then
- (4) return true;
- (5) return false;

LMS 算法从两个方向搜索拓扑。算法第(1)行从源点  $s$  出发, 前向宽度优先搜索拓扑, 预计算每个节点的最小综合度量。第(2)行从目的节点  $t$  出发, 后向宽度优先搜索, 找到满足约束且最小花费的路径。

**定理 1** 在 LMS 算法中, 如果前向搜索发现一条路径  $p$ , 满足  $w_k(p) < c_k, k = 1, 2, \dots, K$ , 那么后向搜索必然可以发现  $p$ , 并且可以发现前向搜索所没有发现的可行路径, 最后找到  $cost$  最小的可行路径  $p'$ 。

**证明:** 如果前向搜索发现一条路径  $p$ , 那么  $p$  必然通过一个与目标节点  $t$  相邻的节点  $v$ 。后向搜索算法首先搜索与  $t$  相邻的节点, 则必然可以发现, 从  $t$  到  $v$  是一条可行路径。后向搜索算法刷新每个节点  $u$  的信息集合  $S$  时, 都要判定是否有满足约束的路径存在和满足约束的路径是否有最小的  $cost$ 。这样前向搜索算法可能遗漏的路径, 就能够被后向搜索算法所发现, 最终找到  $cost$  最小的可行路径  $p'$ 。

定理 1 保证后向搜索至少发现比前向搜索更优的路径。

### 3.2 消除累积误差

H\_MCOP 算法在路径的查找过程当中, 因为采用的是启发式算法, 节点信息的刷新总会有偏差, 经过许多节点信息的刷新, 目标节点才能得到可行路径的信息, 则累积误差会较大。LMS 算法在中间节点就判定路径的有效性, 从而克服了累积误差。

LMS 后向拓扑搜索过程是: 探索当前节点通过与之相连的节点是否满足路径约束。如果满足, 则刷新那些还没有找到可行路径的节点和虽然已经找到了可行路径, 但路径的花费比当前路径花费大的节点; 如果不满足, 则刷新那些没有找到可行路径, 并且综合度量比当前路径综合度量大的那些节点。这样, 刷新过程当中, 已经判定了路径的约束是否满足条件,  $cost(p)$  是否最小, 通过设定最小的标志, 可以确定这条路径。伪代码如下所示:

BACKWARD\_BFS\_RELAX( $u, v$ )

- (1)  $temp\_e[u] = \sum_{k=1}^K (w_k(p)/c_k)^2$
- (2) if  $w_k(p) < c_k$  then
- (3) if  $cost(p) < cost(u)$  or  $!found(u)$  then
- (4)  $e[u] = temp\_e[u]$
- (5)  $wb[u] = wb[v] + w(u, v)$
- (6)  $fb[u] = v$
- (7) if  $cost(p) < savedpath\_cost$  then
- (8)  $path\_kkl = p$
- (9)  $savpath\_cost = cost(p)$
- (10) if  $w_k(p) > c_k$  then
- (11) if  $!found[u]$  and  $e[u] > temp\_e[u]$  then

$$(12) \quad e[u] = temp - e[u]$$

$$(13) \quad wb[u] = wb[v] + w(u, v)$$

$$(14) \quad fb[u] = v$$

在伪代码中,  $temp\_e[u]$  表示要刷新  $u$  节点信息时所计算的综合度量。  $wb[u]$  表示子路径  $u \rightarrow t$  的权重,  $fb[u]$  表示节点  $u$  的前驱,  $path\_kkl$  记录了满足约束最小花费路径,  $savpath\_cost$  记录了这条路径的花费。

后向宽度优先搜索松弛算法在松弛链路  $u \rightarrow v$  时刷新节点  $u$  的信息集合  $S$ 。算法第(1)行计算  $u \rightarrow v \rightarrow t$  子路径的综合度量。第(2)行到第(9)行表示通过链路  $(u, v)$  的路径  $p(u, v)$  满足  $w_k(p) < c_k$  时, 刷新节点  $u$  的信息集合  $S$ 。第(3)行判断在节点  $u$  没有找到可行路径或者虽然已经找到了可行路径, 但是路径的花费比当前路径花费大。第(4)行到第(6)行刷新节点  $u$  的信息集合  $S = \{e[u], wb[u], fb[u]\}$ , 即刷新综合度量, 子路径权重和节点  $u$  的前驱节点。第(7)行判定如果当前路径的花费  $cost(p)$  是最小的, 那么, 第(8)行到第(9)行记录最小的路径信息。算法第(10)行到第(14)行表示通过链路  $(u, v)$  的路径  $p(u, v)$  不满足  $w_k(p) < c_k$  时, 刷新节点  $u$  的信息集合  $S$ 。第(11)行判定在节点  $u$  没有找到可行路径, 并且综合度量  $e[u]$  比当前路径的综合度量  $temp\_e[u]$  大。第(12)行到第(14)行刷新节点  $u$  的信息集合  $S = \{e[u], wb[u], fb[u]\}$ 。

### 3.3 搜索范围全面

H\_MCOP 算法采用 Dijkstra<sup>[10]</sup> 算法搜索整个拓扑, 每个节点信息只刷新  $\bar{S}$  集合中节点的信息, 则必然有一些  $S$  集合中节点的信息没有被刷新, 而这些信息中有可能包含一些满足约束的路径信息, 这样就可能丢失一些满足约束的路径。LMS 算法采用宽度优先搜索算法 BFS 搜索并刷新整个拓扑。每个节点的信息被所有相邻的节点信息刷新, 这样就弥补了 Dijkstra 算法中的一些节点的信息只被少数几个相邻节点信息刷新的情况, 从而能够发现更多的满足约束的路径。

## 4 算法时间复杂度分析

宽度优先搜索算法的时间复杂度是  $O(V + E)$ , 故前向搜索算法和后向搜索算法的时间复杂度是  $O(V + E)$ , 所以 LMS 算法总的时间复杂度是  $O(V + E)$ , 比 H\_MCOP 算法的复杂度  $O(V \log(V) + E)$  要小。

## 5 仿真实验

在仿真实验中, 使用基于 Waxman 模式的 100 个节点的拓扑图和 transit-stub 模式 200 个节点的拓扑图。  $w_i(u, v)$ ,  $i = 1, 2, \dots, K$  均匀分布在  $[1, 10]$  之间, 链路花费函数  $cost$  均匀分布在  $[1, 10]$  之间。“\*”代表 H\_MCOP 算法发现最优路径的成功率。“△”代表 LMS 算法发现最优路径的成功率。横轴表示满足约束条件的平均路径数, 即拓扑中存在满足约束的路径平均个数。纵轴表示发现最优路径的成功率。

仿真实验从平均路径为 1~1.5 条开始, 逐渐放大路径约束各个分量, 放大增量为 0.01, 放大次数为 1000 次。每次循环执行 100 次 LMS 算法, 计算平均路径, 发现路径成功率和最优路径成功率。

图 1 是在 transit-stub 模式 200 个节点的拓扑下两种算法成功率的比较。其中(a), (b), (c), (d)分别表示约束个数为 10 个, 8 个, 6 个, 4 个。

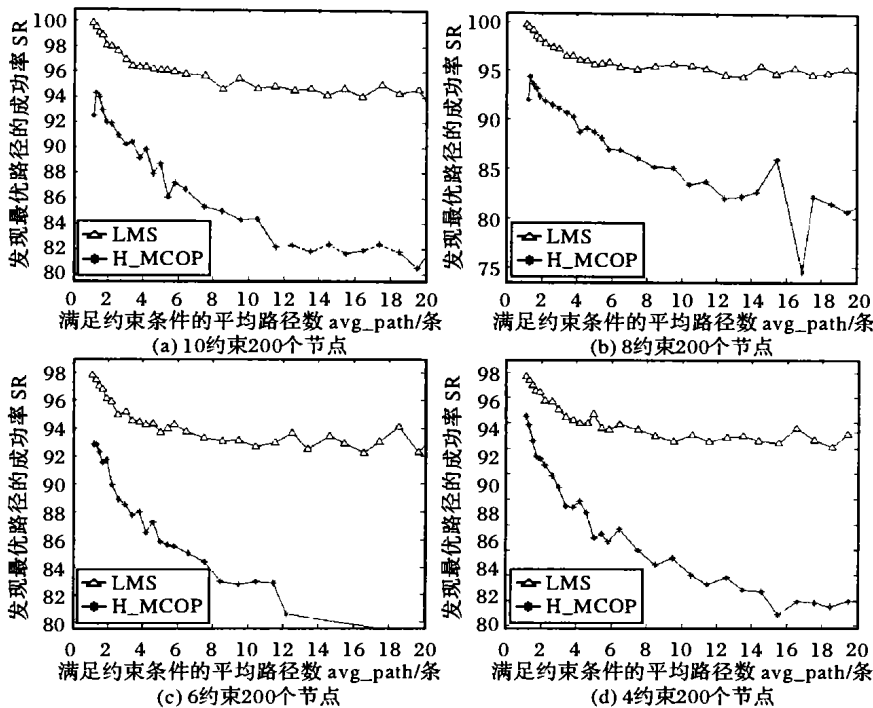


图1 LMS和H\_MCOP算法在ts200中成功率比较

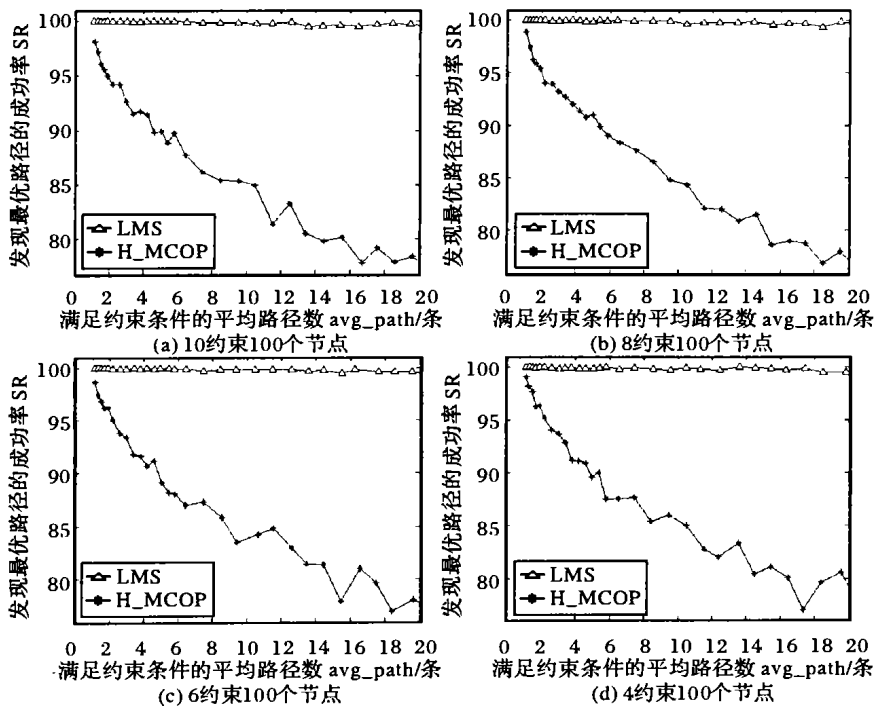


图2 LMS和H\_MCOP算法在ts200中成功率比较

LMS 相比较 H\_MCOP 的平均成功率有很大的优势。表 1 比较了二者的最高,最低和平均成功率,表明在 transit-stub 模式拓扑中,LMS 算法的成功率高于 H\_MCOP。

表1 LMS与H\_MCOP性能比较

路径约束	最高成功率		最低成功率		平均成功率	
	L	H	L	H	L	H
10 约束	99%	94%	94%	80%	96%	86%
8 约束	99%	95%	95%	75%	97%	87%
6 约束	99%	95%	95%	82%	97%	90%
4 约束	99%	97%	94%	80%	97%	88%

图2是在Waxman模式100个节点的拓扑下两种算法成功率的比较。其中(a),(b),(c),(d)分别表示约束个数为

10个,8个,6个,4个。

图2表明,在Waxman模式下,LMS算法的成功率远远高于H\_MCOP算法的成功率。

## 6 结语

在解决QoS路径问题的算法中,H\_MCOP是目前较好的一种,然而它也存在一些问题,本文提出的LMS算法,解决了这些问题,从而提升了算法的性能。相对于H\_MCOP算法而言,LMS算法在时间复杂度和最优路径成功率上有着更好的表现。但LMS算法在分布式路由计算中还有待于进一步研究。

## 参考文献:

- [1] CRAWLEY E, NAIR R, RAJAGOPALAN B, *et al.* A framework for QoS-based routing in the Internet, RFC 2386[S]. 1998.
- [2] WANG Z, CROWCROFT J. QoS routing for supporting resource reservation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1228 - 1234.
- [3] GUERIN R, ORDA A. Networks with advance reservations: the routing perspective[A]. Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000 [C]. IEEE Communication Society, 2000. 118 - 127.
- [4] CIDON I, ROM R. Multi-Path routing combined with resource reservation[A]. Proceedings of the IEEE INFOCOM'97 [C]. IEEE Communication Society, 1997. 92 - 100.
- [5] CHEN S, NAHRSTEDT K. Distributed quality-of-service routing in high-speed networks based on selective probing[A]. Proceedings of LCN'98 [C]. Boston, MA: IEEE Communication Society, 1998. 80 - 89.
- [6] YUAN X. On the extended Bellman-Ford algorithm to solve two-constrained quality of service routing problems[A]. Proceedings of the 8th International Conference on Computer Communications and Networks (IC3N'99) [C]. Boston, MA: IEEE Communication Society, 1999. 304 - 310.
- [7] CASETTI C, LO CIGNO R, MELLIA M, *et al.* A New Class of QoS Routing Strategies Based on Network Graph Reduction [A]. Proceeding of INFOCOM 2002 [C]. New York, MA: IEEE Communication Society, 2002. 715 - 722.
- [8] SIACHALOU S, GEORGIADIS L. Efficient QoS Routing[A]. Proceeding of INFOCOM 2003 [C]. San Francisco, MA: IEEE Communication Society, 2003. 938 - 947.
- [9] KORKMAZ T, KRUNZ M. Multi-Constrained Optimal Path Selection [A]. Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM'01) [C]. 2001.
- [10] KUIPERS F, MIEGHEM VAN P. An Overview of Constraint-Based Path Selection Algorithms for QoS Routing [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(12).