

# 基于多约束 QoS 路由算法综述

韩 贺<sup>1,2</sup>, 秦 勇<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 计算机与信息工程学院, 江苏 镇江 212003;

2. 广东石油化工学院 信息与网络中心, 广东 茂名 525000)

**摘要:**随着网络技术的不断发展,实时多媒体技术不断涌现。如何根据不同的服务提供不同的 QoS 保证,并保证网络资源的有效利用,便成为当前互联网的一个重要任务。对该问题的解决方法称为多约束最优路径 (MCOP) 问题,MCOP 问题是一个 NPC 问题,求解 MCOP 问题的算法可分为精确、近似和启发式等算法。文章通过对目前所出现的算法按照精确算法和近似算法两大类进行分析,分析目前出现的算法的一些优缺点,并根据网络技术的发展趋势,对现行多约束路由算法在以后如何实现更加快速精确的路径计算提出几点展望。

**关键词:**多约束路由; QoS 路由; 精确算法; 近似算法

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2012)04-0133-04

## Overview of Multi-Constrained QoS Routing Algorithm

HAN He<sup>1,2</sup>, QIN Yong<sup>2</sup>

(1. Dept. of Computer & Info. Engineering, Jiangsu University of Science & Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Center of Information & Networks, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

**Abstract:** With the development of the network techniques, real-time multimedia applications appear continuously. How to provide QoS guarantees for different QoS request and ensure the resources of network to be used efficiently is an important task of the current network. The solution of this problem is called multi-constrained optimal path (MCOP). MCOP is a NPC problem. The algorithm for solving the problem can be classed such as exact, approximate and heuristic algorithms. It analyses the current algorithm as two classes: approximation algorithm and exact algorithm, and summarizes the advantages and disadvantages of these algorithms, then gives a prospect that how to make the existing multi-constrained routing algorithm to be more fast and more exact in future.

**Key words:** multi-constrained routing; QoS routing; exact algorithm; approximate algorithm

## 0 引言

随着分布式应用的快速发展,当前互联网所面临的一个重要问题就是根据不同的服务请求提供不同的服务质量。而 QoS 路由又是这个问题的核心问题。QoS 路由的目的为接入的业务选择满足其对 QoS 请求的路径,并保证整个网络资源的有效利用。在大量实时多媒体应用的出现和刺激下,实现网络资源的有效利用是一个非常重要的任务,也就是最优化问题,它是找到一条能够最大可能的资源利用的路由。这就需要优化一个或多个度量,简单的说就是找到一条最小化(或最大化)这些度量值的路径。最优化问题和多约束相结合就是基于多约束的最优化路径问题

(MCOP),众所周知,MCOP 问题是一个 NPC 问题。求解 MCOP 问题的算法可分为精确、近似、启发式等算法类型。求解一个精确解可能需要大量的时间来处理 NPC 问题,所以用获得一个近似解来换取一个较短的搜索时间也是一个可以接受的方法。文中对精确算法和近似算法的研究现状做一下总结,并提出几点展望。

## 1 问题定义

将网络描述成一个图  $G$ ,在这个图  $G$  中,网络节点或路由就是图上点。网络节点或路由间的连接就是图上的边。

图  $G(V, E, c)$  表示网络,假定  $G(V, E, c)$  为连通图。其中  $V$  表示网络中的  $n$  节点的节点集(即图  $G$  中的顶点), $E$  表示网络中的  $m$  链接的集合(用无相边表示)。 $c$  表示花费向量  $c = \langle c_1, \dots, c_M \rangle$ 。 $p = \langle v_0, v_1, v_2, \dots, v_{h-1}, v_h \rangle$  表示一条路径,这里假定  $v_0$  和  $v_h$  之间不存在环路。 $f_j(p)$  是路径  $p$  在第  $j$  个度量中的花费函数。

下面继续对一些问题进行定义:

收稿日期:2011-08-27;修回日期:2011-11-29

基金项目:广东省自然科学基金(05011896)

作者简介:韩 贺(1984-),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为新一代互联网路由理论与分布式计算;秦 勇,博士,教授,CCF 高级会员,研究方向为网络并行路由优化。

MCOP:寻找服从 $M$ 个目标和 $M$ 个约束的最优路径。

MOOP:寻找服从 $M$ 个目标的最优路径。

Pareto:寻找一个和多个有效解,可能服从 $M$ 个约束。

RSP:寻找一条路径满足所有的约束并只有一个目标达到最优。

MCP:寻找一条路径满足所有的约束,但没有最优化。

具体的针对MCOP问题,认为在解决MCOP的方法上基本限于三类:精确、近似和启发式。精确方法是指出Pareto最优解的所有解集,或者是某一特定子集。例如支持高效的解决方法(supported efficient solution)。这种方法的时间复杂度通常是指数型的。近似技术也是找到所有的解集,但是它是在一个误差范围内的满意的解。实际上,它是权衡了精确性以使方法更简单。启发式算法是试图实现一个简单、快速的算法来完成好的解,通常它没有对性能和精确性的担保。

## 2 精确算法

为了求得精确解,大多数方法都是将算法归一为单准则算法。使用标量标记来表示当前取决于拥有该标记节点上的最好路径。或者用一组向量标记来代替标量标记。这种向量标记是指为每个节点 $v$ 分配一个 $m$ 维的向量。这种标记是节点 $s$ 到 $v$ 之间所有非受控路径的长度。这种方法叫做生成法或枚举法。它分为标记算法(labeling algorithms)和排名算法(ranking algorithms)两类。另外的一些精确算法还有两段法和并行分割法。

### 2.1 标记算法

标记算法又可分为标记设置算法(LS)和标记校正算法(LC)。LS(label setting)算法是设置一个在迭代过程中固定不变的标记。而LC(label correcting)算法是指所有标记仅仅在最后一次迭代中变成固定不变的标记。

最典型的LS算法是DSP(Dijkstra's Shortest Path)算法<sup>[1]</sup>,但DSP只考虑了带加性约束的单目标问题。Martins<sup>[2]</sup>将DSP算法推广到任意目标数目为 $M$ 的情况中。Martins的算法用两个不同的标记集来限定路径:一个是固定标记集,它对应非受控子路径;另一个是临时标记集,它管理在下次迭代中可能受控的路径。Martins的算法从临时标记集中按词典法选择最小标记的节点,并将它转变成固定标记,而且将这个信息传递给它的所有后继节点(临时标记集中的)。当不再有临时标记点时,算法停止并且每一个固定标记相当

于一个唯一的有效路径。最近,Gandibleux et al<sup>[3]</sup>对Martins的工作进行了扩展,用它来同时处理加性度量和凹形度量。

Vincke<sup>[4]</sup>设计了第一个LC方法来获得在双度量最短路径问题上的所有Pareto最优解。Skriver和Andersen<sup>[5]</sup>设计了一个用来解决有向网络中的双度量的最短路径问题( $M=2$ 的MOOP问题)的PCA算法。他们的出发点是通过尽快地丢弃受控的边的方式来得后续的搜索过程得到大大简化。

Raith and Ehrgott<sup>[6]</sup>在其文献中认为随着目标数量的增加,LC方法是可取的,这是因为LS对于目标数量的增加过于敏感。Paixão和Santos<sup>[7]</sup>分析了三种网络类型并通过计算证明了Raith and Ehrgott的结论。

### 2.2 排名算法

排名算法的核心在于连续决定偏差路径,这个路径是为了获得从节点 $s$ 到节点 $t$ 的一个最短路径的非递减的序列。Clímaco和Martins<sup>[8]</sup>设计了用于解决双准则问题的算法,算法中从 $s$ 到 $t$ 之间的路径是基于第一个目标函数进行枚举,直到根据第二个度量获得最短路径时枚举才结束。Martins et al<sup>[9]</sup>提出一种用于获得非受控路径的标记技术,这种技术依据 $\mathbb{R}^m$ 上的全序关系进行排名。Paixão and Santos<sup>[10]</sup>提出了一个进一步加强的算法。该算法设计了一个停止条件以至于在确定Pareto集时不必扫描从节点 $s$ 到其他所有节点的整个非受控路径树。

### 2.3 两段法

典型的两段法把Pareto集的计算分为两个独立的步骤。第一阶段,是确定极限支持的有效解。通过利用这些解的可获得特性很容易计算出来,就像求解权重和的问题。第二阶段,剩下的非受控解使用枚举法计算得到,在第一阶段是为枚举算法限定搜索域,以便使它的执行更高效。

Mote et al<sup>[11]</sup>提出了第一个用以求解双目标最短路径问题的著名的分段法,他们用一个单纯型算法去找一个Pareto最优子集,并用一种LC方法去找所有剩余的最优途径。

对于所有的精确技术,时间和空间复杂性的关键参数是Pareto最优的总数 $\omega$ 。由于MCOP问题是NP完全问题,众所周知,在最坏事情下,这个数同输入规模呈指数增长。结果,即使用于网络的是一个中等大小的输入规模,精确方法也许需要一个相当可观的计算能力。

## 3 近似算法

鉴于寻找有效解全集的复杂性,可以通过牺牲精度以获得较快速的解决方法。这促使设计能近似代表

Pareto 集的算法,但要通过运行多项式个时间。Sahni<sup>[12]</sup>开发了3种技术,分别是缩放和舍入、区间分割法,还有分离法。Hansen<sup>[13]</sup>设计了第一个应用于 MCOP 问题的接近运算法,他设计了一个以词典编纂为基础的 LS 方法,解决了单个事件中的一系列 Pareto 最优模型。Warburton<sup>[14]</sup>设计了第一个针对任意  $M$  值的算法,他设计了一种简单实用的 PTAS 模型,融合了成本函数以直接解决无环图问题。其核心是通过缩放和舍入链接成本,但复杂度相当大。Hassin<sup>[15]</sup>借用 Warburton 设计的模型并在计算时间上做了改进,Has-sin 引进了两个边界(分别是  $B$  和  $b$ ,即上限和下限)以获得最优解和一个基于链接成本的缩放和舍入的多项式时间  $\varepsilon$ -近似的测试过程。Chen 和 Nahrstedt<sup>[16]</sup>提出了一个简单的 PTAS,通过两个阶段解决双目标的 MCP 问题,首先通过对这两个目标花费的缩放和舍入将 NP 完全问题转化为一个简单的问题,然后应用一个扩展的 DSP 算法。Lorenz 和 Raz<sup>[17]</sup>提出了一个 FPTAS 作为 Hassin 算法的改良算法。Yuan<sup>[18]</sup>用两个多项式时间方法来解决 MCP 问题,第一个是粒度受限的启发式(LGH)算法,它是通过把  $M-1$  个链接成本约束到由各自约束所确定的限定边上来获得近似解。第二个方法是路径受限的启发式(LPH),它是通过现在每个节点所保持有效路径的数量来降低时间复杂度,但是这种算法依然是一种受限的启发式算法。Song 和 Sahni<sup>[19]</sup>设计的算法结合了 EBFA 和完整的区间分割技术。Xue 等人针对 MCP 的设计问题,开发了两个 FPTAS 优化版本<sup>[20]</sup>。第一个 MCP 问题(SMCP)的目标在于找到一条路径  $p^{opt}$ ,就像  $f_j(p^{opt}) \leq \xi^{opt} L, \forall j$ ,其中  $\xi^{opt}$  是最小实数  $\xi \geq 0$ ,就相当于存在一个路径  $p$  使得  $f_j(p) \leq \xi L, \forall j$ ,  $L$  是正常化的约束;第二个优化的 MCP 问题(FMCP)和 SMCP 类似,FMCP 中  $\xi \geq 1$ 。FMCP 的目的是,寻找一条可行解,哪怕是以松弛初始化约束为代价。

Tsaggouris 和 Zaroliagis<sup>[21]</sup>推出了一个针对 MOOP 问题的 PTAS 模型,它运行  $O(m(\frac{n}{\varepsilon})\log(nC))^{M-1}$  个时间进行有向环图运算,其中  $C$  为链接成本的最大值与最小值的比率。

通过对上述的描述发现多数作者集中在 MCP 和 RSP 的问题,只有很少的致力于处理更复杂的 MOOP/MCOP 问题。其他常见的方面是  $M-1$  个度量的近似算法,缩放和舍入技术(SR)和区间分割技术(IP),这些工作中不会出现分离的技术,并且,经过广泛的研究多个双目标情况,近来对于任意  $M$  值的情况的研究兴趣开始增长。

表1是对文中算法的一个整理,由图表可以看出

精确算法在求解 MOOP 问题上很见成效,但是对于 MCOP 就需要花费大量的时间来获得精确解。在近似算法中,只有 Xue 等人的工作对求解 MCOP 问题获得一定的成就。MCOP 问题是一个 NPC 问题,为了保证精确解而试图降低它的复杂度,可以考虑把并行机制加入到算法研究中,对于近似算法虽然有着很低的复杂度(相对于精确算法),但是要想进一步提高算法精度,就应考虑网络状态行为的时变行,利用预计算来提高算法精度。

表1 算法整理

作者	求解程度	目标数量	解决问题	算法技术
Dijkstra	精确	1	MOOP	标记法
Vikncke	精确	2	MOOP	标记法
Clímaco	精确	2	MOOP	排名法
Martins	精确	M	MOOP	标记法
Mote	精确	2	MOOP	两段法
Paixão	精确	M	MOOP	排名法
Raith	精确	2	MOOP	两段法
Warburton	近似	M	MOOP	缩放与舍入
Hassin	近似	2	RSP/DCLC	区间分割
Lorenz	近似	2	RSP/DCLC	缩放与舍入
Chen	近似	2	MCP	缩放与舍入
Yuan	近似	M	RSP	缩放与舍入
Song	近似	M	MCP/RSP	区间分割
Xue	近似	M	MCOP	缩放与舍入
Tsaggouris	近似	M	MOOP	区间分割

## 4 结束语

文中对多约束最优路径(MCOP)问题作了一个概述,一个弱的 NP-complete 问题通常和通讯网络中 QoS 路由选择有关。描述并分析了一些代表目前解决 MCOP 问题的算法,总之,说一个技术总是较好的是很难的,因为这取决于一系列的性质和特定的实际问题。另外,应该明白即使一个近似技术可以得到一些严格的可行的解,但是对它们的最优性没有保证。同样,许多作者也已证明:当精确算法用于一个实际的网络时甚至也能表现为一个多项式形式,因此,可代表一个可行解。

互联网的迅速发展,规模的不断扩大,对多约束路由算法的研究工作应该考虑以下几点:

(1)将并行机制应用到多约束的路由计算过程中,为多个约束分配多个处理器,并行地处理数据,并实现处理器之间的通信以维护整个网络状态信息。并行机制可以有效降低算法的时间复杂度。

(2)建立更好的预计算策略。预计算一方面可以

在一定程度降低时间复杂度,但一个好的预计算策略更能很好地提高算法的精度。网络状态的时变性和控制信息的滞后性,决定着寻找一个好的预计算策略,再结合并行机制,能够很好地解决网络状态的时变性和控制信息的滞后性。

#### 参考文献:

- [1] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269-271.
- [2] Martins E. On a multicriteria shortest path problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 1984, 16: 236-245.
- [3] Gandibleux X, Beugnie F, Randriamasy S. Martins' algorithm revisited for multi-objective shortest path problems with a maxmin cost function[J]. *4OR-A Quarterly Journal of Operations Research*, 2006, 4(1): 47-59.
- [4] Vincke P. Problèmes multicritères[J]. *Cahiers du Centre d'Etudes de Recherche Opérationnelle*, 1974, 16: 425-439.
- [5] Skriver A, Andersen K. A label correcting approach for solving bicriterion shortest-path problems[J]. *Computers & Operations Research*, 2000, 27(6): 507-524.
- [6] Raith A, Ehrgott M. A comparison of solution strategies for biobjective shortest path problems[J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(4): 1299-1331.
- [7] Paixão J M, Santos J L. Labelling methods for the general case of the multi-objective shortest path problem - a computational study[D]. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2007.
- [8] Clímaco J C N, Martins E Q V. A bicriterion shortest path algorithm[J]. *European Journal of Operational Research*, 1982, 11(4): 399-404.
- [9] Martins E Q, Paixão J M, Rosa M S, et al. Ranking multiobjective shortest paths[D]. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2007.
- [10] Paixão J M, Santos J L. A new ranking path algorithm for the multi-objective shortest path problem[D]. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2008.
- [11] Mote J, Murthy I, Olson D L. A parametric approach to solving bicriterion shortest path problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 1991, 53(1): 81-92.
- [12] Sahni S. General techniques for combinatorial approximation[J]. *Operations Research*, 1977, 25(6): 920-936.
- [13] Hansen P. Multiple criteria decision making: theory and application[C]//*Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Berlin: Springer, 1980: 109-127.
- [14] Warburton A. Approximation of Pareto optima in multiple-objective, shortest-path problems[J]. *Operations Research*, 1987, 35(1): 70-79.
- [15] Hassin R. Approximation schemes for the restricted shortest path problem[J]. *Mathematics of Operations Research*, 1992, 17(1): 36-42.
- [16] Chen S, Nahrstedt K. On finding multi-constrained paths[C]//*IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [s. l.]: [s. n.], 1998: 874-879.
- [17] Lorenz D, Raz D. A simple efficient approximation scheme for the restricted shortest path problem[J]. *Operations Research Letters*, 2001, 28(5): 213-219.
- [18] Yuan X. Heuristic algorithms for multi-constrained quality of service routing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, 10(2): 244-256.
- [19] Song M, Sahni S. Approximation algorithms for multiconstrained quality-of-service routing[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2006, 55(5): 603-617.
- [20] Xue G, Sen A, Zhang W, et al. Finding a path subject to many additive QoS constraints[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, 15(1): 201-211.
- [21] Tsaggouris G, Zaroliagis C. Multiobjective optimization: improved FPTAS for shortest paths and non-linear objectives with applications[J]. *Theory of Computing Systems*, 2009(1): 162-186.

(上接第 132 页)

- 算机技术与发展, 2009, 19(4): 46-47.
- [2] 魏欣, 蒋华伟. 基于纹理和结构的图像修复算法研究[J]. *计算机技术与发展*, 2010, 20(9): 91-92.
- [3] 高飞, 侯瑞春, 周志明. Web 页面缓存技术在业务系统中的应用[J]. *计算机技术与发展*, 2010, 20(1): 210-211.
- [4] 蔡丽欢, 廖英豪, 郭东辉. 图像拼接方法及其关键技术研究[J]. *计算机技术与发展*, 2008, 18(3): 1-4.
- [5] 衣文文, 杨彬彬, 胡彦磊, 等. 一种基于外形区域的图像配准方法与实现[J]. *计算机技术与发展*, 2008, 18(4): 1-4.
- [6] Nagel C, Evjen B, Glynn J. C#高级编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [7] 杨建昌. GDI+高级编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [8] 埃斯波西托, 萨尔塔列洛. Microsoft .NET 企业级应用架构设计[M]. 陈黎夫译. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [9] 况旭, 刘波. XML 的面向对象语言特性[J]. *计算机技术与发展*, 2010, 20(1): 55-56.
- [10] Segaran T. Programming Collective Intelligence[M]. [s. l.]: O'Reilly, 2009.
- [11] Reeves W T. Particle systems—a technique for modeling a class of fuzzy objects[J]. *Computer Graphics*, 1983, 17(3): 359-376.
- [12] Luebke D, Reddy M, Cohen J D, et al. Level of Detail for 3D Graphics[M]. USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.