

基于动态规划的 QoS 多约束路由算法

张大陆¹, 胡治国², 匡增美¹

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804;

2. 山西大学 计算机与信息技术学院, 山西 太原 030006)

摘要: 基于动态规划的思想, 提出一种新的质量服务(QoS)多约束路由算法(QMCRA_DP). 对可行路径进行智能分段, 并自适应地调整求解各段的线性花费函数. 理论分析及实验验证表明: QMCRA_DP 算法在保持较低计算开销的同时, 极大地提高了求解可行路径的成功率.

关键词: 质量服务(QoS); 多约束; 动态规划; 自适应

中图分类号: TP393

文献标志码: A

QoS Multi-constraints Routing Algorithm Based on Dynamic Programming

ZHANG Dalu¹, HU Zhiguo², KUANG Zengmei¹

(1. School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Computer & Information Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In this paper, we propose a quality of service (QoS) multi-constraints routing algorithm based on dynamic programming(QMCRA_DP), which adjusts the linear cost function adaptively and segments the feasible path intelligently. The results show that the algorithm not only has a lower computational complexity, but also increases the success rate for finding a feasible path.

Key words: quality-of-service (QoS); multi-constraints; dynamic programming; self-adaptive

随着网络通信技术的飞速发展和计算机网络的日益完善, 因特网已从简单的信息传递向着支持多业务的综合服务方向发展. 传统“尽力而为”的网络机制虽然很适合 E-mail、文件传输协议(FTP)等信息传递业务, 但已无法满足新兴的如视频会议、网络游戏、视频点播、因物网协议(IP)电话等多媒体业务的通信要求^[1]. 根据上述实际情况, 相关研究人员对

Internet 的结构和服务方式进行了改进, 并提出了服务质量(QoS)约束路由算法, 尝试为网络应用提供一定级别的 QoS 保障, 在满足不同业务传输对 QoS 参数要求的前提下, 尽可能地提高网络传输效率, 充分利用网络资源. 网络运营商也可以通过 QoS 路由算法对不同需求的用户提供不同的服务质量.

QoS 多约束路由算法与传统路由算法目的不同, 它需要寻找满足多个 QoS 约束的可行路径, 与传统路由算法只求最“短”路径的方式不同. 根据各 QoS 指标的特性, 可将 QoS 各指标分为三类: 凹性参数、可加性参数、可乘性参数. 各参数性质如表 1 所示.

表 1 QoS 参数分类及计算公式

Tab.1 Classification of QoS parameters and its formulas

QoS 参数类别	典型代表	计算公式	备注
凹性参数	可用带宽	$w(p) = \min_{e \in p} (w(e))$	$w(p)$ 表示路径的某个 QoS 指标值, $w(e)$ 表示链路的相应某个 QoS 指标值
可加性参数	延迟、抖动、成本	$w(p) = \sum_{e \in p} w(e)$	
可乘性参数	丢包率	$w(p) = 1 - \prod_{e \in p} (1 - w(e))$	

QoS 多约束路由问题涉及到的 QoS 指标主要是可加性和可乘性, 以 2 个或 2 个以上的可加性参数或可乘性参数为约束的 QoS 约束路由问题是非决定性多项式时间(NPC)问题^[2]. 因此, 在研究 QoS 多约束路由算法时, 学者们提出了各种启发式算法, 试图在多项式时间内尽可能正确地求解 QoS 多约束路由问题. 本文提出的算法以线性花费函数拟合 QoS 参数, 对可行路径进行分段求解, 依次为各段构造不同的线性花费函数. 在搜索过程中, 根据已有信息对线性花费函数进行动态调整. 该算法考虑了计算开销和计算结果的正确性, 并通过理论分析和仿真实验验证了该算法具备较低的计算复杂度和较高

的成功率。

1 相关工作

QoS 多约束路由问题属于 NPC 问题,对其的研究具有一定难度。国内外对 QoS 约束路由算法的研究,大致可划分为以下四类:

(1)通过理论分析推导出 QoS 参数间的相互转化关系,进而以单 QoS 参数为约束条件来求解 QoS 多约束路由问题。如文献[3]将多个 QoS 参数表示成可用带宽的函数,进而求解 QoS 多约束路由问题。但该类算法只适用于特定网络条件下的路由问题,如特定的分组调度模型、特定的网络数据包流。文献[4]提出了一种多目标路由算法的模型和形式化表示,但没有给出算法的具体实现。

(2)以 QoS 参数为优化条件,应用智能算法不断优化或试探出 QoS 多约束路由问题的次优解。如文献[5]将蚁群算法用于求解 QoS 多约束路由问题,但该类算法在计算过程中容易造成大量无效搜索或陷入局部最优问题。Yussof 等^[6]根据多目标遗传算法的智能进化理论求解 QoS 多约束路由问题,并对算法的收敛特性和时间复杂度进行了分析,可遗传算法本身在执行效率方面不适合路由选择问题。另外,模拟退火算法^[7]也被引入到了 QoS 多约束路由算法的研究。文献[8]利用布隆过滤器将 IP 空间划分为独立的前缀空间,提高了神经网络的学习效率,有利于路由更新速度。但智能算法如何适应网络状态的快速变化和具体模型如何在实际网络上进行应用,还有很多方面值得进一步研究。

(3)通过限定 QoS 参数取值个数,在有限的取值范围内求解 QoS 多约束路由问题。当 QoS 参数取值的个数有限时,QoS 多约束路由也不再是 NPC 问题,目前通过限定 QoS 参数来降低算法复杂度的方法主要有以下两种:缩放和舍入算法^[9]、间隔划分算法^[10]。它们的主要思想是将每种网络参数限定到一组有限序列中,找出所有网络参数最佳组合对应的路径,即最佳路径。但该类算法将各参数归约到有限序列上时存在误差,路由受预先定义序列限制,且不能通过分布式方法来实现这类算法。

(4)通过花费函数将各独立的 QoS 参数拟合成一个函数值,再以此函数值为度量进行路由选择,求解 QoS 多约束路由问题。该类算法根据对花费函数的不同定义分为两类:基于线性花费函数的 QoS 多约束路由算法和基于非线性花费函数的 QoS 多约

束路由算法。前者的主要缺点是成功率相对较低,相关研究有文献[11-13];后者的缺陷是计算开销相对较高,典型的基于非线性花费函数的 QoS 多约束路由算法有 SMM^[14], TAMCRA^[15], SAMCRA^[16] 以及 H_MCOP^[17]。其中,Jaffe 算法^[11]和 H_MCOP 算法最具代表性。Jaffe 算法将 2 个可加性 QoS 参数通过线性花费函数拟合成单一函数值,以该花费函数值为度量调用 Dijkstra 算法寻找路径。Jaffe 算法虽然花费较小,但是算法成功率偏低。TAMCRA 算法借助了 K 最短路径算法^[18],降低了丢失最短路径的概率,从而进一步提升成功率。文献[19]改变了 TAMCRA 算法,将它与贪心搜索算法结合进行多约束的路径选择。H_MCOP^[17]与文献[15]采用相同花费函数,不同的是它包含两个搜索阶段:前向搜索和后向搜索,即依次从目的节点和源节点开始搜索可行路径,后一次搜索可利用前一次搜索的数据进行预先判断,加快了搜索速度,同时保证了较高的成功率。Jaffe 算法以线性花费函数求解 QoS 多约束路由问题,H_MCOP 算法的前向搜索和后向搜索及搜索前进行预先判断的思路对于本文算法的形成提供了重要借鉴作用。

2 算法设计

QMCRA_DP (QoS multi-constraints routing algorithm based on dynamic programming) 算法设计思路:鉴于基于线性花费函数求解 QoS 多约束路由问题,具备计算开销低和成功率提升空间大的特点,本算法选择了线性花费函数拟合 QoS 参数。考虑到线性花费函数很大程度上决定了搜索结果和搜索成功率,本算法在搜索过程中根据搜索所得的信息对线性花费函数进行动态调整;为能够动态调整线性花费函数,该算法对可行路径进行分段求解,根据之前搜索的数据,依次为各段构造不同的线性花费函数。

该算法由预处理模块、正向搜索模块、逆向搜索模块、自适应搜索模块四个模块组成,其流程如图 1 所示。

各个功能模块既相对独立又相互联系,除预处理模块外,其他模块都可能结束算法:预处理模块可以简化后续模块的计算;正向搜索模块所得的各节点信息和最“优”路径,可分别被逆向搜索模块和自适应搜索模块使用;自适应搜索模块需要逆向搜索模块所得的最“优”路径,才能正常运行。

各模块的具体描述如下:

(1) 预处理模块根据可用带宽约束, 对网络拓扑图进行剪枝处理, 将可用带宽值小于可用带宽约束请求的链路全部剪掉, 从而简化后续模块的计算. 如果存在可乘性 QoS 参数约束, 如丢包率, 通过取对数的方法将其转化为可加性约束, 以同样方式将网络拓扑图中各链路的丢包率转化为可加性参数, 便于后续模块计算.

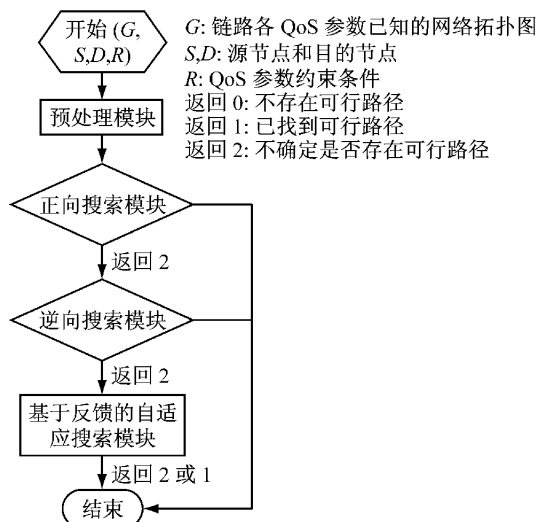


图1 基于动态规划的 QoS 多约束路由算法流程

Fig.1 QMCRA_DP algorithm procedure

(2) 正向搜索模块主要作用是初步寻找满足 QoS 约束的可行路径. 该模块的具体实现: 从 2 个 QoS 参数中任选 1 个 QoS 参数 w_1 作为度量, 调用 Dijkstra 算法, 寻找源节点 S 到目的节点 D 的最短路径 p_1 , 每个节点记录其前驱节点和 2 个 QoS 参数的值. 如果 $w(p_1)c_1 \leq C_1$ 且 $w(p_1)c_2 \leq C_2$ ($w(p_k)c_k$ 表示路径 p_k 的第 k 个可加性参数值, C_k 表示第 k 个可加性参数对应的约束值), 则返回路径 p_1 , 结束算法; 如果 $w(p_1)c_1 > C_1$, 则返回“不存在可行路径”, 结束算法; 其他情况, 记录 p_1 , 交由逆向搜索模块处理.

(3) 逆向搜索模块主要作用是进一步寻找满足 QoS 约束的可行路径. 该模块在正向搜索失败的情况下执行, 它并不是简单地改变正向搜索模块的搜索方向, 还结合了正向搜索模块所得路径信息, 使其搜索效率大幅度提升. 其具体实现: 以另一个 QoS 参数 w_2 为度量, 调用 Dijkstra 算法, 寻找目的节点 D 到源节点 S 的最“优”路径 p_2 . 在搜索过程中结合前一模块所得路径信息进行预判, 如果 $w(v)c_{11} + w(v)c_{21} \leq C_1$ 且 $w(v)c_{21} + w(v)c_{22} \leq C_2$, 则通过当前扩展节点 v 向节点 S 和 D 回溯产生路径 p_2 并返回,

结束算法; 如在正向搜索和逆向搜索时算法没有收敛, 则对最终搜索所得路径 p_2 进行判断: 如果 $w(p_2)c_1 \leq C_1$ 且 $w(p_2)c_2 \leq C_2$, 则返回路径 p_2 , 结束算法; 如果 $w(p_2)c_2 > C_2$, 则返回“不存在可行路径”, 结束算法; 其他情况, 记录 p_2 , 交由自适应搜索模块处理.

(4) 自适应搜索模块主要作用是依据正、逆搜索所得的路径信息, 对可行路径进行最终求解. 其主要步骤如下:

第1步 根据最短路径 p_1 和 p_2 将 S 到 D 的路径分成若干段, 每相邻两个公共节点为一段. 将 p_1 和 p_2 分别保存于 p'_1 和 p'_2 中.

设路径 p_1 和 p_2 的 2 个可加性 QoS 参数 a 和 b 对应的值分别为 $R_{p_1a}, R_{p_1b}, R_{p_2a}, R_{p_2b}$, 相应的约束值分别为 C_1 和 C_2 , 则初始线性拟合系数 k_1 和 k_2 分别为

$$k_1 = (R_{p_1a}/C_1)/(R_{p_1a}/C_1 + R_{p_2b}/C_2) \quad (1)$$

$$k_2 = 1 - k_1 \quad (2)$$

第2步 使用拟合系数将 2 个可加性参数拟合成为 1 个度量值再调用 Dijkstra 算法搜索路径, 将搜索到的子路径替换 p_1 和 p_2 对应段的路径, 生成新的 p_1 和 p_2 .

第3步 判断 p_1 和 p_2 是否满足 QoS 约束, 如果满足则输出满足的那条路径, 结束程序; 否则执行下一步.

第4步 判断当前段终点是否为 D , 如果是, 则执行下一步; 否则根据式(1)和(2)重新产生拟合系数 k_1 和 k_2 , 跳至第 2 步执行.

第5步 此时 p_1 和 p_2 相同, 记为路径 P , 判断路径 P 的哪个参数不能满足约束. 假设是可加性约束 i , 则将 p'_i 各段按照 $R_{x_{i-2|+1}}/R_{x_i}$ 值排序, 其中 R_{x_i} 表示第 x 段路径第 i 个 QoS 参数值; 逐段替换 P 中对应的段, 生成新路径 P , 如果 $w(P) \leq C$ 则返回可行路径 P , 否则继续用 p'_i 中未替换的段替换 P 中对应的段, 如此直至所有的段都被替换. 最后返回不确定是否存在可行路径, 拒绝请求, 结束算法. 其流程如图 2 所示.

3 算法性能分析

3.1 计算复杂度

在拓扑图 $G(V, E)$ 网络中, 运行 QMCRA_DP 算法时, 要求每个节点保存自身编号、到源节点和目的节点的三种 QoS 度量值和其父节点, 空间复杂度

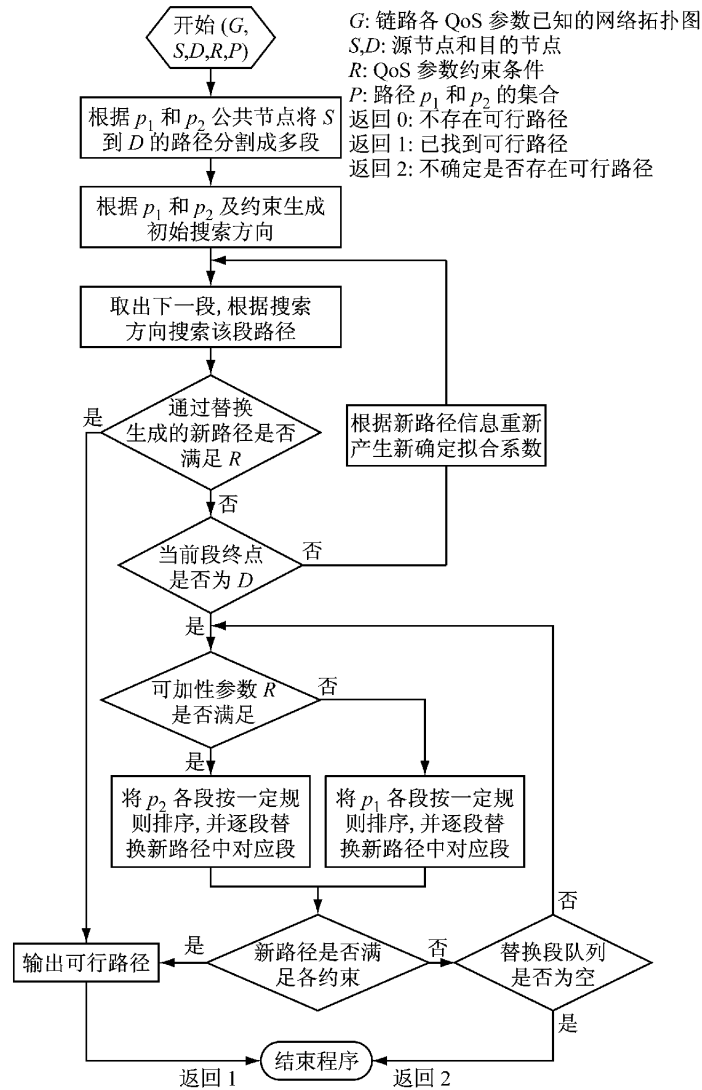


图2 自适应搜索模块

Fig.2 Adaptive search module

为 $O(8n)$, n 为 $G(V, E)$ 的节点数. 在搜索的过程中还需要创建一个优先级队列, 而队列中节点数始终小于等于 n 的, 所以该算法的空间复杂度为 $O(9n)$, 即 $O(n)$. 由此可知, 该算法的空间复杂度完全满足路由算法可扩展性的要求.

该算法的主要计算在第 2~4 个模块中, 第 1 个模块的剪枝处理和可乘性参数转化工作的计算复杂度仅为 $O(m)$, m 为网络拓扑图的边数. 其他三个模块中的算法都是基于 Dijkstra 算法改进得到: 正向搜索模块, 在原来的 Dijkstra 算法基础上增加了另一个约束条件的判断, 该判断的计算复杂度为 $O(1)$, 因此在采用二叉最小堆来实现最小优先级队列时, 第 1 个模块的计算复杂度为 $O((n+m)\log n)$; 逆向搜索模块, 在正向搜索模块基础之上又增加了预测功能, 而预测功能的主要目的就是提前结束程序, 减小该模块的计算复杂度, 因此最坏情况时的计

算复杂度和第 2 个模块一样, 为 $O((n+m)\log n)$. 自适应搜索模块根据正逆向搜索所得的两条路径, 将源节点和目的节点间的路径划分成若干段, 其计算复杂度为 $O(l) < O(n)$, l 为两条路径的总长度; 按照设定的拟合参数将 2 个可加性参数进行拟合, 并以拟合值作为度量搜索每段的子路径, 其计算复杂度为 $O(x(n+m)\log n)$, x 为分段数. 由下文对本算法各子过程的搜索空间分析可知, 经过分段处理后, 每段的子路径搜索的计算复杂度会远远减小, 通常总的复杂度小于 $O((n+m)\log n)$; 在自适应搜索阶段, 子路径替换操作的计算复杂度为 $O(x)$. 因此, 该算法的计算复杂度为 $O(3(n+m)\log n)$, 即为 $O((n+m)\log n)$.

3.2 搜索空间

搜索过程中访问的节点数(搜索空间)也是路由算法性能的重点考察对象. 通过 Dijkstra 算法进行

搜索,其计算开销与搜索空间的平方成正比.算法在最坏情况下需要搜索三次,即运行完所有模块才结束程序.对每次搜索空间分析如下:在节点及各链路 QoS 参数值分布均匀的情况下,正向搜索的搜索空间如图 3 所示;逆向搜索时,其搜索空间可能大大减小,如图 4 所示,因为在深色区域内,逆向搜索可能提前结束;自适应搜索的搜索空间如图 5 所示.由此可见,算法的计算开销是小于调用三次 Dijkstra 算法的计算开销.

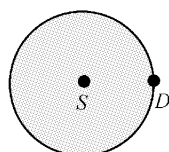


图 3 灰色区域为正向搜索的搜索空间

Fig.3 Gray area for search space of forward lookup

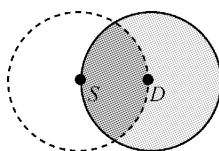


图 4 灰色和深色区域为逆向搜索的搜索空间

Fig.4 Grey and dark areas for search space of reverse lookup

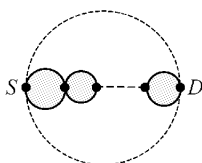


图 5 灰色区域为自适应搜索子程序的搜索空间

Fig.5 Grey area for search space of adaptive search procedures

3.3 成功率

成功率是指满足约束请求的次数与约束请求的总数之比,它是评估多约束路由算法性能的一个重要指标.通过下文对比分析表明,本算法相对以往的基于线性花费函数的多约束路由算法具备更高的成功率.

本算法与文献[12]设计思路相似,在正逆向搜索模块中分别以单个 QoS 参数为度量调用 Dijkstra 算法进行初步求解,又因有自适应搜索模块的存在,致使该算法的成功率必定高于文献[12].与文献[12]不一样的是本文所提算法是分别从源节点和目的节点进行搜索,由之前对搜索空间的分析可知,如此缩短了第 2 次搜索的时间.

Jaffe 论证了采用 2 个可加性 QoS 参数线性拟合时,成功率相对较高,其搜索过程如图 6 所示.图 6

中横、纵坐标为 QoS 约束指标值,由于各 QoS 值的单位不相同,因此本文以示意图的形式给出算法搜索过程,即横、纵坐标不标记具体单位, $w_k(p)$ 表示路径 p 的第 k 个可加性参数值, C_k 表示第 k 个可加性参数对应的约束值.本算法在自适应搜索时根据最优“优”路径信息以及 QoS 约束动态调整线性拟合方程,其搜索过程如图 7 所示.由此可见,本文所提算法的成功率略高,当两条最短路径除源节点和目的节点外没有其他交点时,本文所提算法的自适应搜索将回归到固定线性拟合算法,其成功率与 Jaffe 所提算法一样.与文献[13]算法最大的区别是,本文算法根据搜索过程所得网络状态信息进行动态调整线性花费函数,相对于文献[11]提前设定花费函数的方法,更能够适应实时变化的通信网络,更利于可行路径的搜索.

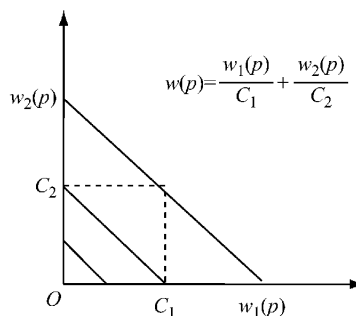


图 6 Jaffe 算法搜索过程

Fig.6 Search process of Jaffe algorithm

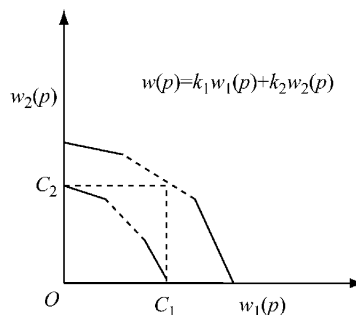


图 7 自适应搜索过程

Fig.7 Adaptive search procedure

在自适应搜索失败后,本文算法试图通过子路径替换的方法找出可行路径,从而进一步提高成功率.如图 8 所示,当请求 S 到 D 满足 $(100, 10)$ 约束时,文献[12]搜索得到路径 $S \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow D$ 和 $S \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow D$,两条路径的 QoS 值分别为 $(145, 8)$ 和 $(10, 15)$,不满足约束,搜索失败.文献[11]搜索的路径为 $S \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow D$,该路径 QoS 值为 $(10, 15)$,不能满足约束.而本文算法通过子路径替换,可找出可

行路径 $S \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow D$, 该路径 QoS 值为 (80, 9), 满足请求。

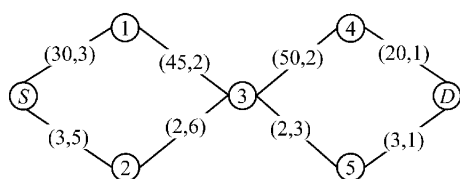


图8 实例拓扑图

Fig.8 Experiment topology

4 仿真实验

为进一步验证本算法的性能,在不同规模的网络拓扑图中将它与基于线性花费函数的 Jaffe 算法和基于非线性花费函数的 H_MCOP 进行对比.选择 Jaffe 算法和 H_MCOP 作为对比算法的原因:前者是基于线性化花费函数的 QoS 约束路由算法中计算速度较快的一个算法;后者是基于非线性花费函数的 QoS 多约束路由算法中成功率较高的一个算法.用于仿真实验的随机网络拓扑图是通过 Waxman 方法^[20]生成的,每条链路的 2 个加性参数平均分布在 (0, 1 024] 之间.至于源节点和目的节点以及约束请求的选取,本文借鉴了文献[17, 21]中所提方法:源节点 S 和目的节点 D 随机选取,且要求最少三跳距离,可加性 QoS 参数 a 的约束请求 C_1 在 $[0.8w_1(q), 1.2w_1(q)]$ 之间均匀分布;可加性参数 b 的约束请求 C_2 在 $[0.8w_2(p), 1.2w_2(p)]$ 之间均匀分布,其中路径 p 和 q 分别是源节点 S 到目的节点 D 可加性参数 a 和可加性参数 b 最小的路径.在每个随机生成的网络拓扑图中做 300 组实验,最终的仿真实验统计结果如图 9 所示。

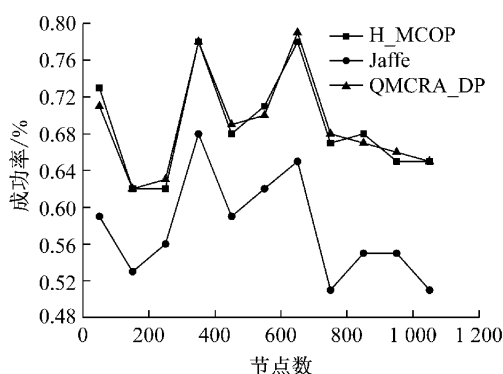


图9 各算法在不同规模随机图中的成功率

Fig.9 Success ratio in random topology

从图 9 可以看出,本文算法的成功率远高于基于线性花费函数的 Jaffe 算法,与具备较高成功率的

H_MCOP 算法相近.图 10 表明,在运行速度上,本文算法与 Jaffe 算法相近,比 H_MCOP 算法稍快.由此可见,仿真实验与理论分析一致,该算法在保持较快计算速度的同时,大幅度地提高了成功率。

5 结语

QMCRA_DP 算法以线性花费函数拟合 QoS 参数,对可行路径进行分段求解,依次为各段构造不同的线性花费函数.在搜索过程中根据已有信息对线性花费函数进行动态调整,算法考虑了计算开销和计算结果的正确性,通过理论分析和仿真实验验证了该算法具备较低的计算复杂度和较高的成功率。

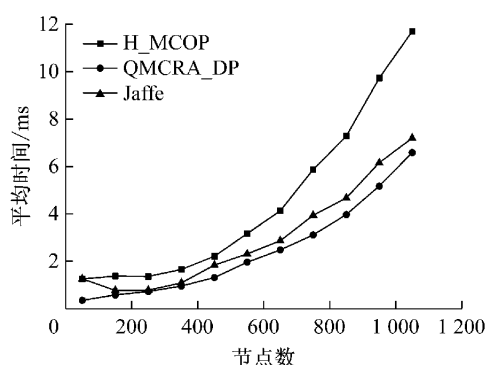


图10 不同规模随机图中的平均运行时间

Fig.10 Average time spent in random topology

然而,该算法目前只能求解以凹性参数和 2 个可加性或可乘性参数为约束条件的路由选择问题.因此,如何对其进一步改进使其适合若干可加性约束或可乘性约束的路由问题,是下一步研究的主要方向。

参考文献:

- [1] 王思兵. 因特网中的 QoS 路由算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
WANG Sibing. Studies on the algorithms for quality of service routing in the Internet [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2001.
- [2] Wang Z, Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 7(14): 148.
- [3] Pornavalai C, Chakraborty G. QoS based routing algorithm in integrated services packet networks[C]//Proceedings of 5th International Conference on Network Protocols, Atlanta, GA. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997: 167-174.
- [4] CHEN Meng, WANG Haiquan. A multi-objective routing decision-making model for opportunistic network [C]//2011 1st IEEE International Conference on Cloud Computing and

- Intelligence Systems, Beijing, China. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011;316-320.
- [5] DING Genhong, SHI Lei, WU Xingliang, *et al.* Improved ant colony algorithm with multi-strategies for QoS routing problems [C]//2012 8th International Conference on Natural Computation (ICNC), Chongqing, China. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012;29-31.
- [6] Yussof S, See O H. Finding multi-constrained path using genetic algorithm [C]//Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications, Penang, Malaysia. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007;713-718.
- [7] SUN Xuemei, LÜ Xiaoyu, DUAN Xinming. Novel QoS routing algorithm based on cultural-simulated annealing algorithm [C]//2009 Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, Tianjian, China. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009;209-212.
- [8] 胥小波, 郑康峰, 李丹, 等. 基于并行 BP 神经网络的路由查找算法[J]. 通信学报, 2013, 33(2):61.
XU Xiaobo, ZHANG Kangfeng, LI Dan, *et al.* Routing lookup algorithm based on parallel BP neural network[J]. Journal on Communications. 2013, 33(2):61.
- [9] Chen S-G, Song M-C, Sahni S. Two techniques for fast computation of constrained shortest paths [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1):105.
- [10] Cui Y, Xu K, Wu J, Precomputation for multi-constrained QoS routing in high speed networks [J]. Journal of Computer Networks, 2005, 47(6):923.
- [11] Jaffe J M. Algorithms for finding paths with multiple constraints[J]. IEEE Networks, 1984, 14:95.
- [12] Iwata A, Izmailov R, Lee D-S, *et al.* ATM routing algorithms with multiple QoS requirements for multimedia inter networking [J]. IEICE Transactions and Communications, 1996, E79-B(8):999.
- [13] CUI Yong, XU Ke, WU Jianping, *et al.* Precomputation for finding paths with two additive weights [C]//IEEE International Conference on Communications, ICC '03, Anchorage, AK. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003, 1:636-640.
- [14] Costa L H M K, Fdida S, Duarte O C M B. A scalable algorithm for link-state QoS-based routing with three metrics[C]//IEEE International Conference on Communications, ICC '01, Helsinki. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001, 8:2603-2607.
- [15] De Neve H, Van Mieghem P. TAMCRA: a tunable accuracy multiple constraints routing algorithm [J]. Computer Communications, 2000, 23(7):667.
- [16] Van Mieghem P, Kuipers F A. Concepts of exact QoS routing algorithms[J]. IEEE/ACM Transactions Networking, 2004, 12(5):851.
- [17] Korkmaz T, Krunz M M. Routing multimedia traffic with QoS guarantees[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2003, 59(3):429.
- [18] Chong E I, Maddila S R, Morley S T. On finding single-source single destination k shortest paths [C]//The Seventh International Conference on Computing and Information, ICCI '95, Phoenix. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995;40-47.
- [19] DAI Fusheng, LIU Aijun. A multi-constrained quality of service routing algorithm based on vector converting[C]//The 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (2009), Beijing, China. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009;1-4.
- [20] Waxman B N. Routing of multipoint connections[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1988, 6(9):1617.
- [21] Khadivi P, Samavi S, Todd T D, *et al.* Multi-constraint QoS routing using a new single mixed metric [C]//IEEE International Conference on Communications, ICC'04, Paris, France. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004, 4:2042-2046.

~~~~~

(上接第 304 页)

- [8] Mucchi E, Dalpiaz G, Rivola A. Elastodynamic analysis of a gear pump. Part I. pressure distribution and gear eccentricity[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24:2160.
- [9] Erturk N, Vernet A, Castilla R, *et al.* Experimental analysis of the flow dynamics in the suction chamber of an external gear pump[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53:135.
- [10] Koc E, Hooke C J. An experimental investigation into the design and performance of hydrostatically loaded floating wear plates in gear pumps[J]. Wear, 1997, 209:184.
- [11] Frith R H, Scott W. Comparison of an external gear pump wear model with test data[J]. Wear, 1996, 196:64.
- [12] 王安麟, 张小路, 刘巍, 等. 齿轮泵轴向浮动侧板力矩平衡机制改进[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(10):1579.
- WANG Anlin, ZHANG, Xiaolu, LIU Wei, *et al.* Moment balance mechanism of gear pump's axial floating wear plate[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(10):1579.
- [13] 李玉龙, 许泽银, 徐强. 齿轮泵补偿面设计的参数化研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(8):70.  
LI Yulong, XU Zeyin, XU Qiang. Parameter design of balance area for external gear pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8):70.
- [14] 刘巍, 王安麟, 张小路, 等. 高压齿轮泵过渡区阻尼结构参数化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6):280.  
LIU Wei, WANG Anlin, ZHANG, Xiaolu, *et al.* Parametric on transition zone damping structure in high-pressure gear pumps [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6):280.