

基于惩罚因子的多约束剪枝 QoS 路由算法

赵季红^{1a,2}, 张 方^{1b}, 曲 桦^{1a}, 戴慧珺^{1a}

(1. 西安交通大学 a. 电子与信息工程学院; b. 软件学院, 西安 710049; 2. 西安邮电大学通信工程系, 西安 710061)

摘 要: 为满足新一代互联网上各业务的服务质量(QoS)要求,设计一种多约束剪枝 QoS 路由算法 PF-MCP,采用剪枝算法思想,综合考虑带宽、时延和抖动多重 QoS 约束,引入惩罚因子进行综合评价找出多条有效路径并从中选取最优路径。采用固定和随机网络层拓扑进行仿真实验,结果表明,与合成优先权值路由算法相比,PF-MCP 算法在 QoS 满意度、服务节点计算能力及时间复杂度方面性能较优,具有路由运算量小、网络恢复能力强及选取的最优路径可信性高的特点,并且在覆盖网 QoS 路由方面适用范围广。

关键词: 覆盖网;服务质量路由;多约束;剪枝算法;惩罚因子;网络拓扑

中文引用格式: 赵季红,张 方,曲 桦,等. 基于惩罚因子的多约束剪枝 QoS 路由算法[J]. 计算机工程,2015,41(4): 70-76.

英文引用格式: Zhao Jihong, Zhang Fang, Qu Hua, et al. Multiple Constraint Pruning QoS Routing Algorithm Based on Penalty Factor[J]. Computer Engineering, 2015, 41(4): 70-76.

Multiple Constraint Pruning QoS Routing Algorithm Based on Penalty Factor

ZHAO Jihong^{1a,2}, ZHANG Fang^{1b}, QU Hua^{1a}, DAI Huijun^{1a}

(1a. School of Electronic and Information Engineering; 1b. School of Software Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Telecommunications Engineering,

Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, China)

[Abstract] In order to fulfill the various Quality of Service (QoS) requirements of new services on the next generation Internet, this paper proposes a novel overlay QoS routing algorithm, which is named Penalty Factors-Multiple Constraint Pruning (PF-MCP) algorithm. The idea of pruning is applied by PF-MCP to handle multiple QoS constraint, such as bandwidth, delay and jitter. In order to select the optimal solution, penalty factor is introduced by PF-MCP to comprehensively evaluate the effective paths. Simulation experimental results by using fixed and random network layer topology shows that PF-MCP algorithm has higher QoS satisfaction rate, service node computation capability equilibrium and time complexity compared with Synthesize Priority Weight Routing (SPWR) algorithm, it has characteristics of small amount of routing calculation, strong network recovery capability and the optimal path selecting is credible. In summary, PF-MCP can effectively fulfill its overlay QoS routing.

[Key words] overlay network; Quality of Service (QoS) routing; multiple constraint; pruning algorithm; penalty factor; network topology

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2015.04.013

1 概述

随着宽带互联网的建设与用户规模的高速增长,新兴业务对新一代互联网提出了不同于数据应用的要求,需要提供更可靠的服务质量(Quality of Service, QoS)^[1-2]保障。

目前,国内外对覆盖网^[3]路由进行了大量研究。文献[4]研究覆盖网络的多播路由,提出一种启发式

路由算法来解决覆盖网络组播中的“最小直径、剩余均衡、度数受限”的生成树问题。文献[5]提出覆盖服务网络(Overlay Service Network, OSN)的路由方案,引入 OB(Overlay Brokers)的概念,并给出覆盖网中的 QoS 感知路由(QoS-aware Routing in Overlay Networks, QRON)算法,通过平衡 OB 之间的数据流量和覆盖链路来寻求一条覆盖路径,该路由算法采用分层机制,增强了可扩展性。文献[6]提出的最短最宽路

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61371087); 国家科技重大专项基金资助项目(2013ZX03002010-003, 2012ZX03001023-003)。

作者简介: 赵季红(1963-),女,教授、博士生导师,主研方向:宽带通信网;张 方,硕士研究生;曲 桦,教授;戴慧珺,博士研究生。

收稿日期: 2014-03-10 **修回日期:** 2014-05-29 **E-mail:** 1085475275@qq.com

径算法是基于 Bellman Ford 算法的改进,通过修改 Dijkstra 算法,增加路由跳数和带宽。RBLCP 算法^[7]主要考虑带宽、节点处理容量和路由跳数受限的情况。经典 QoS 算法有启发式路由算法和加权约束 QoS 路由算法。加权约束 QoS 路由算法是在处理多约束 QoS 路由问题^[8]方面使用率较高的算法。本文基于加权约束 QoS 路由算法^[9-10]的设计思想,提出一种基于惩罚因子的多约束剪枝 QoS 路由算法 PF-MCP (Penalty Factor-based Multiple Constraint Pruning)。

2 一种新的覆盖网 QoS 路由算法

本文设计一种基于惩罚因子的多约束剪枝 QoS 路由算法 (PF-MCP),分为 3 个部分:凹性参量处理,多约束剪枝以及路径序列输出。

2.1 QoS 约束参数的处理

目前常见的 QoS 参数可以分为叠加型参数和限制型参数。叠加型参数又可再具体分为加性参数和乘性参数,限制型参数又可对应称为凹性参数。根据以上分类方式,不同类型的 QoS 参数的具体定义和计算主要有 3 种。其中, Q 表示路径代价; Q_i 表示链路代价。

(1) 凹性参数即限制型参数,是指路径参数仅受所有链路中某一参数所限制,如带宽, $Q = \min Q_i$ 。

(2) 加性参数属于叠加型参数,是指路径参数受所有链路上参数的和的限制,如时延、抖动等, $Q = \sum Q_i$ 。

(3) 乘性参数属于叠加型参数,和加性参数类似,是指路径参数受所有链路上参数的积的运算的限制,如丢包率, $Q = 1 - \prod (1 - Q_i)$ 。

PF-MCP 算法在进行覆盖网 QoS 路由时,选取的约束参数为带宽、时延和抖动。根据实际业务数据的路由结果表明,在应用层上所找到的路径丢包率很小,一般可满足用户的 QoS 需求,本文主要选取带宽、时延和抖动作为约束参数。所以,本文的 QoS 约束参数不涉及乘性参数。

2.2 多约束 QoS 剪枝策略

2.2.1 多目标约束优化

不同业务所要求的 QoS 参数不同。所以,在综合考虑 QoS 路由选择时,应该优先考虑该业务所侧重的 QoS 参数。

多目标约束优化问题^[11]的数学描述如下:

$$\min y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))$$

$$x \in R^m, y \in R^n$$

其中,决策向量为 x ;目标向量为 y 。

本文提出的 PF-MCP 算法根据不同业务对各 QoS 约束优先级的要求不同,对各约束参数进行排序,分别以每个 QoS 约束条件为代价在覆盖网中进行路由及剪枝,分步得出最终对该业务适用的有效

路径。

2.2.2 路由剪枝策略

剪枝算法常用于数学模型中通过减少分类冗余信息找到最简单决策树^[12]。PF-MCP 算法在路由时的剪枝策略体现在单约束路由内剪枝和多约束路由外剪枝两方面。

2.3 基于惩罚因子的输出路径综合排序

本文算法根据 IEEE 802.3 网络协议标准中对不同数据业务的 QoS 要求,采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)^[13]对惩罚因子进行设定,综合评价有效路径。

定义(惩罚因子) 多约束剪枝后,PF-MCP 算法输出有效路径序列。假设路径 1 的时延为 D_1 ,路径 2 的时延为 D_2 ,而 J_1 和 J_2 分别是路径 1 和路径 2 的抖动值。如果 $D_1 < D_2$,而 J_1 远大于 J_2 ,则并不能简单认为路径 1 优于路径 2,需要引入约束条件的权重比进行判定,此权重比即为路径输出部分的惩罚因子。本文采用层次分析法对惩罚因子进行设定,综合评价有效路径。

2.3.1 综合评价层次模型的构建

本文将综合评价所包含的因素分为 3 层:目标层,准则层,方案层。其中,目标层只包含一个元素,表示决策总目标;准则层包含多个约束;方案层包含实现决策目标的可行方案。

2.3.2 成对比较矩阵的构建

在构建的三级层次结构模型中,AHP 使用相对权重 a_{ij} 来描述比较准则层中的第 i 个元素 X_i 与第 j 个元素 X_j 相对目标层的重要性。假设该层中共有 m 个元素参与比较,则构造出一个 m 阶矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times m}$,称为成对比较矩阵。

当成对比较矩阵构建完成后,通过 AHP 来求解准则层中各元素相对目标层的权重。

2.3.3 权向量计算与一致性检验

在得出某单一准则下各元素的成对比较矩阵 A 后,计算各元素权重的方法称为本征向量法。

利用 $AW = \lambda W$ 求出矩阵 A 的所有 λ 值,求出 λ_{\max} (λ_{\max} 为矩阵 A 的最大特征值)对应的特征向量 W^* ,然后把该特征向量 W^* 归一化为向量 W ,则 $W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ 是各约束条件的权重。

由于 AHP 得出的权向量是以主观评价的成对比较矩阵为基础,进而需要计算权向量的可信度。设 $A = (a_{ij})_{m \times m}$, $A > 0$,如果满足条件 $a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}$ ($i, j, k = 1, 2, \dots, m$),则称矩阵 A 为一致性矩阵。

基于三级层次结构模型,检验成对比较矩阵 A 的一致性步骤具体如下:

(1) 用不一致程度指标 CI 衡量一个成对比较矩阵 A ($m > 1$ 阶的方阵):

$$CI = \frac{\lambda_{\max}(A) - m}{m - 1}$$

其中, m 是矩阵 A 的阶数。

(2) 检验成对比较矩阵 A 随机一致性指标 RI 。 RI 只与矩阵 A 的阶数 m 有关, 当 $m = 1, 2, \dots, 10$ 时的取值如表 1 所示。

表 1 随机一致性指标 RI

m	RI
1	0.00
2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

(3) 按以下公式计算成对比较矩阵 A 的随机一致性比率 CR 。

$$CR = 1 - \frac{D_i}{\max D_k}, k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, 3$$

(4) 进行如下判断: 当 $CR < 0.1$ 时, 规定成对比较矩阵 A 的一致程度在可接受范围内; 否则需要依次调整成对比较矩阵 A 中 CR 的比值, 使 CR 在可接受的阈值范围内。

2.3.4 数据模糊归一化

数据模糊归一化步骤具体如下:

(1) 对于正向指标带宽, 假设网络中链路各段的带宽数据为 (b_1, b_2, \dots, b_m) , 路径带宽为 B_i , 模糊归一化后该路径的带宽 B_i' 为:

$$B_i' = 1 - \frac{\min b}{B_i}, i = 1, 2, 3$$

其中, i 表示路径序号, 层次模型的方案层路径数目为 3; $\min b$ 表示系统要求的最小带宽值。

(2) 对于逆向指标时延和抖动, 假设网络中各时延数据为 (d_1, d_2, \dots, d_m) , 抖动数据为 (j_1, j_2, \dots, j_m) , 路径总时延和总抖动分别为 D_i 和 J_i , 模糊归一化后该路径的总时延和总抖动为:

$$D_i' = 1 - \frac{D_i}{\max D}, i = 1, 2, 3$$

$$J_i' = 1 - \frac{J_i}{\max J}, i = 1, 2, 3$$

其中, $\max D, \max J$ 分别表示路径总时延和总抖动的上限。

将得到的 B_i', D_i' 和 J_i' 代入综合评价公式中:

$$Y_i = (B_i', D_i', J_i') \cdot W, i = 1, 2, 3$$

最终方案层的路径序列按 Y_i 的大小来排序。

3 仿真实验与性能分析

3.1 性能分析参数的选取

本文主要选取 QoS 满意度、负载均衡的逻辑链路可用带宽和负载均衡的服务节点计算能力作为覆盖网 QoS 路由仿真实验的性能分析参数。

(1) 网络输入负载

在数据概率与统计中, 输入负载为排队论范畴内的概念, 用以衡量队列中的流量, 是一个无量纲的测量参数。网络输入负载与服务节点平均请求到达的分布率、链路可用带宽以及拓扑结构相关。本文对于覆盖网 QoS 路由请求的网络输入负载定义如下:

$$\rho = \frac{\lambda \cdot N \cdot h}{b \cdot L}$$

其中, ρ 为网络输入负载; λ 为泊松分布到达率, 每个节点的请求连接数以泊松分布, 相应的目的节点为均匀随机变量; N 为节点个数; h 为覆盖网逻辑链路平均物理跳数; b 为逻辑链路平均可用带宽; L 为逻辑链路个数。

(2) QoS 满意度

QoS 满意度的数学表达式如下:

$$QoS \text{ 满意度} = \frac{\text{找到的覆盖网路径满足 } QoS \text{ 次数}}{\text{覆盖网路由请求次数}}$$

(3) 负载均衡的逻辑链路可用带宽

$$Dev(B) = \sqrt{\frac{\sum_{l \in E} (B_l - \bar{B})^2}{N(E)}}$$

其中, $Dev(B)$ 为逻辑链路剩余带宽的偏移; l 为覆盖网逻辑链路; E 为覆盖网逻辑链路集合; B_l 为逻辑链路的剩余带宽; \bar{B} 为逻辑链路集合的平均剩余带宽; $N(E)$ 为覆盖网逻辑链路数目。

(4) 负载均衡的服务节点计算能力

$$C = \beta \cdot T$$

其中, C 代表服务节点计算能力; T 表示服务节点转发能力; β 为转发能力和计算能力之间的比率。

$$Dev(C) = \sqrt{\frac{\sum_{i \in V} (C_i - \bar{C})^2}{N(V)}}$$

其中, $Dev(C)$ 表示服务节点剩余处理能力的偏移; i 为覆盖网服务节点; V 为服务节点集合; C_i 为服务节点的计算能力; \bar{C} 为服务节点集合的平均剩余处理能力; $N(V)$ 为覆盖网服务节点数目。

3.2 在 ISP 固定拓扑下的性能分析

在互联网服务提供商 (Internet Service Provider, ISP) 固定拓扑下的性能分析具体如下:

(1) 寻路结果

1) 有效路径

利用基于最小生成树的拓扑感知节点度约束拓

算法找到的路径的可用带宽、时延以及时延抖动如表 5 所示。

表 4 音频媒体业务的 QoS 性能参数

应用业务	交互方向	典型速率 $/(Kb \cdot s^{-1})$	时延	时延抖动 $/ms$
交互式语音	双向	4 ~ 64	< 150 ms 推荐值 < 400 ms 限制值	< 1
语音信息	单向	4 ~ 32	< 1 s 播放 < 2 s 录音	< 1
高质量流音频	单向	16 ~ 128	< 10 s	< 1

表 5 路径 QoS 的约束参数

路径	可用带宽 $/(Mb \cdot s^{-1})$	时延/ms	时延抖动/ms
Path1	4.2	103	0.74
Path2	3.9	93	0.77
Path3	3.9	115	0.93

可以看出,PF-MCP 覆盖网 QoS 路由算法最终找出 3 条路径的可用带宽、时延和时延抖动均满足 ITU-T 的 QoS 标准,则 PF-MCP 算法对于交互式语音业务的路由结果达到客户 QoS 满意度。

2) 逻辑链路可用带宽的偏移

PF-MCP 算法找到的路径逻辑链路可用带宽的偏移如表 6 所示。

表 6 可用带宽的偏移值 $Dev(B)$

路径	$Dev(B)$
Path1	0.294 4
Path2	0.150 0
Path3	0.330 0

PF-MCP 覆盖网 QoS 路由算法最终找出的路径逻辑链路的剩余带宽偏移均保持在 $(0, 0.4)$ 范围内。由此可知,3 条路径的逻辑链路可用带宽的均衡度较好。

3) 服务节点计算能力的偏移

PF-MCP 算法找到的路径服务节点计算能力的偏移如表 7 所示。

表 7 服务节点计算能力的偏移值 $Dev(C)$

路径	$Dev(C)$
Path1	0.483 4
Path2	0.526 2
Path3	0.483 3

PF-MCP 覆盖网 QoS 路由算法最终找出路径服务节点剩余处理能力的偏移均保持在 $(0, 0.6)$ 范围内。根据文献[14]可知,3 条路径的服务节点计算能力处于均衡状态。

3.3 在 GT-ITM 随机拓扑下的性能分析

PF-MCP 算法与合成优先权值路由算法(Synthe-

size Priority Weight Routing, SPWR) 算法的 QoS 路由性能参数对比情况具体如下:

(1) QoS 满意度

PF-MCP 算法与 SPWR 算法关于 QoS 满意度的对比。经过实验可以得出,PF-MCP 算法 QoS 满意度为 85% 以上,而 SPWR 算法的满意度仅为 60% 以上。因此,PF-MCP 算法的满意 QoS 度高于 SPWR 算法。

为更好地对比 PF-MCP 算法与 SPWR 算法对应应用业务进行路由的 QoS 状况,本文还对 2 个算法仿真时所有满足 ITU-T QoS 标准的路由结果的具体 QoS 约束参数进行对比。

1) 多约束 QoS 综合评价对比

图 3 中有 50% 的结果为 PF-MCP 算法综合评价价值高于 SPWR 算法,有 50% 的结果为 SPWR 算法的综合评价价值较高。

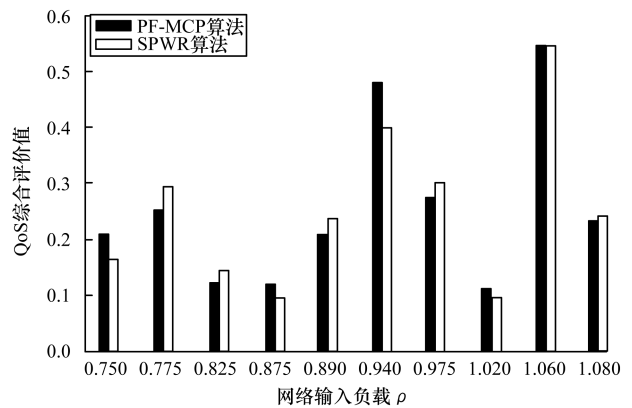


图 3 多 QoS 约束综合评价对比

2) 路径总可用带宽对比

图 4 中仅有 20% 的结果为 PF-MCP 算法路径总可用带宽值高于 SPWR 算法,而有 80% 的结果为 SPWR 算法的总可用带宽值更高。

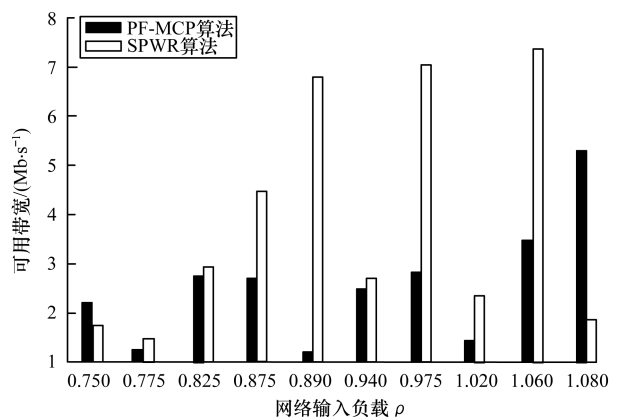


图 4 总可用带宽

3) 路径总时延对比

图 5 中有 70% 的结果为 PF-MCP 算法路径总时延值低于 SPWR 算法,有 30% 的结果为 SPWR 算法的总时延值更高。

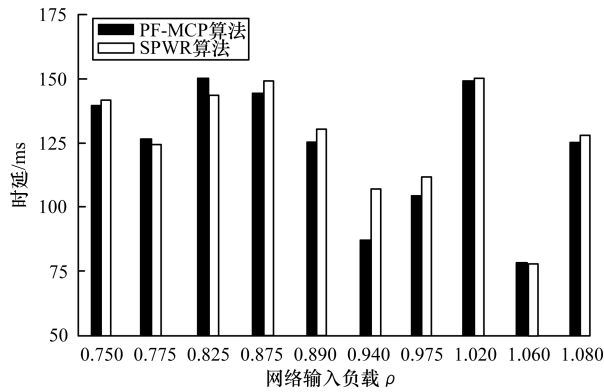


图5 总时延

4) 路径总时延抖动对比

图6中有70%的结果为PF-MCP算法路径总时延抖动值低于SPWR算法,有30%的结果为SPWR算法的总时延抖动值略高。

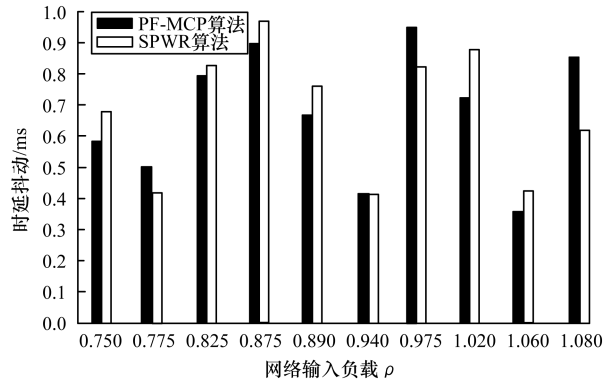


图6 总时延抖动

(2) 逻辑链路可用带宽的均衡性能

从图7可以看出,对2个算法仿真的对比分析中,整体而言PF-MCP算法有关逻辑链路可用带宽的均衡性能不及SPWR算法。但在仿真结果中,PF-MCP算法链路剩余带宽偏移没有超过4.5 Mb/s,PF-MCP算法有关逻辑链路可用带宽的偏移在可接受范围内。

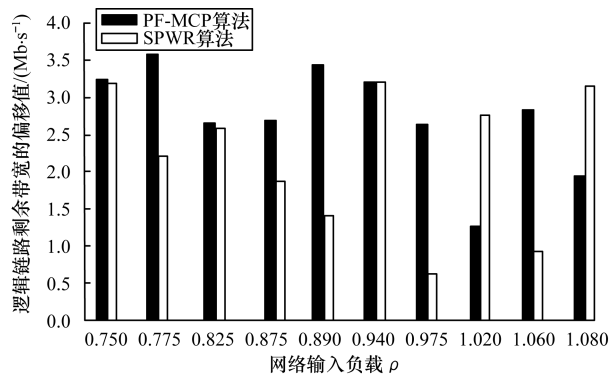


图7 逻辑链路可用带宽的偏移

(3) 服务节点计算能力的均衡性能

从图8可以看出,2个算法有关服务节点计算能力

的均衡性能相当,PF-MCP算法略优于SPWR算法。

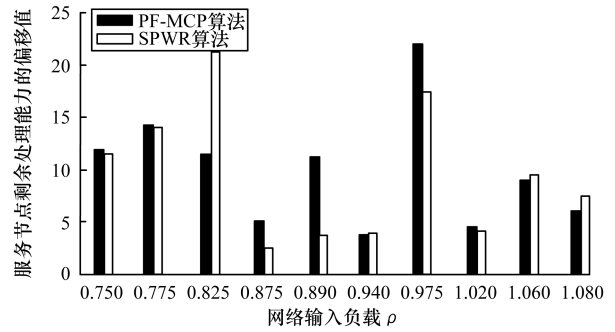


图8 服务节点计算能力的偏移

(4) 时间复杂度

时间复杂度指算法运行时间,具体包括算法各指令运行所需的时间。

假设PF-MCP算法与SPWR算法进行覆盖网QoS路由时均采用层次分析法计算QoS约束的权向量,并使用Dijkstra算法处理最短路径的计算。所以,PF-MCP算法的时间复杂度为:

$$\begin{aligned} \Theta(& |E| + |n| \cdot ((|V| + |E| - \\ & \frac{n-1}{2} \cdot |H| \cdot |Np|) \cdot \log(|E| - \\ & \frac{n-1}{2} \cdot |H| \cdot |Np|) + |H| \cdot |Np|) + \\ & |n|^2) \cdot |E| - \frac{n-1}{2} \end{aligned}$$

SPWR算法的时间复杂度为 $\Theta((|V| + |E|) \cdot \log|E| + t_l \cdot |E| + |n|^2)$ 。其中,给每条链路进行多QoS约束加权的时间代价 t_l 主要体现在 n 个QoS约束参量的权向量与其数据指标值进行相乘的时间代价。

图9为使用随机拓扑时不同网络层节点数下PF-MCP算法与SPWR算法时间复杂度比较,可以看出,PF-MCP算法的时间复杂度优于SPWR算法。

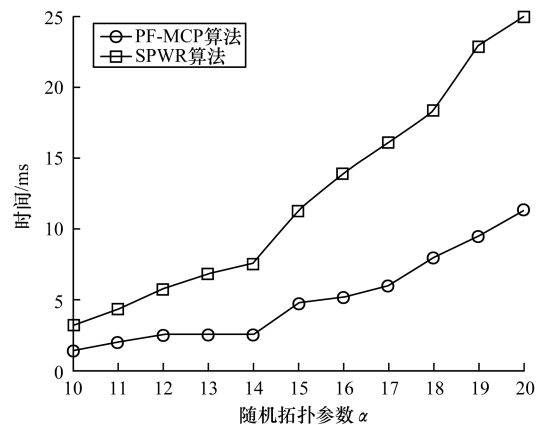


图9 算法时间复杂度比较

由于本文拓扑采用GT-ITM(Georgia Tech Inter-

network Topology Models) 算法生成的随机拓扑, GT-ITM 中生成的拓扑节点是在一个 $\alpha \cdot \alpha$ 的网格内随机选取的, 例如 $\alpha = 20$, 表示 20×20 的网格)。

4 结束语

本文提出一种新的基于惩罚因子的多约束剪枝 QoS 路由算法。该路由算法在覆盖网 QoS 路由方面适用范围广, 同时具有路由运算量小、保障网络恢复能力以及可信最优路径选取的特点。在构建的覆盖网上进行 QoS 路由实验, 结果表明: (1) PF-MCP 算法能够保证其覆盖网 QoS 路由的可信度; (2) PF-MCP 算法与 SPWR 算法相比, 虽然其逻辑链路可用带宽略低, 但 QoS 满意度和服务节点计算能力均较优, 运算时间也较少。今后将通过选取更有效的数据结构 (如斐波那契堆实现的优先队列) 降低 PF-MCP 算法的计算复杂度。

参考文献

- [1] Shi Zhiyong, Liao Kui, Yin Shiping, et al. Design and Implementation of the Mobile Internet of Things Based on TD-SCDMA Network [C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Information Theory and Information Security. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 954-957.
- [2] Zhou Jusuo, Ning Anliang, Deng Rui, et al. Mobile Internet Application to Geographical Information Services [C]//Proceedings of International Conference on Multimedia Information Networking and Security. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2009: 295-299.
- [3] 蔡瑞青. 覆盖网络自组织结构及其 QoS 路由研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [4] Jin J, Nahrstedt K. QoS Service Routing in One-to-One and One-to-Many Scenarios in Next-generation Service-oriented Networks [C]//Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2004: 503-510.
- [5] Li Z, Mohapatra P. QRON: QoS-aware Routing in Overlay Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 22(1): 29-40.
- [6] Forchheimer R, Wosinska L, Monti P. An Optical Overlay Network Concept for Hard QoS Requirements [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Transparent Optical Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [7] 应必娣, 陈惠芳, 朱孙斌, 等. RBLCP: 一种覆盖网络的 QoS 路由改进算法 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(4): 646-649.
- [8] 华宇, 吴产乐, 王勇. GMPLS 网络中多约束 QoS 路由的预计算方法 [J]. 软件学报, 2006, 17(1): 167-174.
- [9] 林闯, 王元卓, 任丰原. 新一代网络 QoS 研究 [J]. 计算机学报, 2008, 31(9): 1525-1535.
- [10] 王旻旻, 毕军, 吴建平. 互联网覆盖路由技术研究 [J]. 软件学报, 2009, 20(11): 2988-3000.
- [11] 赵旅. 炮弹尾炮门结构的多目标优化及稳健设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [12] Quinlan J R. Simplifying Decision Trees [J]. International Journal of Man-machine Studies, 1987, (27): 221-234.
- [13] 廉立军. 层次分析法在学科馆员服务质量评价中的应用 [J]. 图书情报工作, 2007, 51(9): 87-91.
- [14] Li Z, Mohapaira P. The Impact of Topology on Overlay Routing Service [C]//Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2004.

编辑 陆燕菲

(上接第 64 页)

- [12] 黄健柏, 程慧, 郭尧琦, 等. 金属期货量价关系的多重分形特征研究——基于 MF-DCCA 方法 [J]. 管理评论, 2013, (4): 77-85.
- [13] Yin Y, Shan P J. Modified DFA and DCCA Approach for Quantifying the Multiscale Correlation Structure of Financial Markets [J]. Physica A, 2013, 392(24): 6442-6457.
- [14] 陈暮紫, 陈敏, 吴武清, 等. 中国 A 股市场行业板块间领滞关系的动态变化实证研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(6): 19-31.
- [15] 程希明, 蒋学雷, 陈敏, 等. 中国股市板块羊群效应的实证研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(12): 34-38, 48.
- [16] 李奇泽, 张铁刚, 丁焕强. 中国证券投资基金羊群行为——基于周期规律与板块效应的实证分析 [J]. 中央财经大学学报, 2013, (6): 37-43.
- [17] 彭艳, 张维. 我国股票市场的分板块投资策略及其应用 [J]. 数量经济技术经济研究, 2003, (12): 148-151.
- [18] 杨博, 刘大有, 金弟, 等. 复杂网络聚类方法 [J]. 软件学报, 2009, 20(1): 54-66.
- [19] Lancichinetti A, Fortunato S. Community Detection Algorithms: A Comparative Analysis [J]. Physics Review E, 2009, 80(5).

编辑 索书志