

# 基于距离向量深度的多约束路径选择算法

齐小刚<sup>1,3</sup>, 刘立芳<sup>2</sup>, 刘三阳<sup>1,3</sup>

(1. 西安电子科技大学数学科学系, 陕西西安 710071; 2. 西安电子科技大学计算机学院, 陕西西安 710071;  
3. 综合业务网国家重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘要:** 为各种应用提供不同的服务质量(Quality of Service, QoS)保证是下一代高速网络面临的一个重要难题, 而服务质量路由(Quality of Service routing, QoSR)则是其中的一项核心技术. 本文针对不精确状态信息下的多约束 QoSR 问题, 建立了一种用于求解此类多约束 QoSR 问题的临界点模型. 提出了一种基于距离向量深度的多约束 QoS 路径选择算法(MCPSA), 该算法以已有的 QoS 路由预计算算法为基础, 设法选择一条能够最大程度适应不精确网络状态信息的路径, 理论分析表明该算法具有一定的优势. 最后, 结合已有的路由预计算算法进行了大量的仿真试验, 结果表明 MCPSA 具有很强的问题求解能力, 能够有效克服路由状态信息的不确定性.

**关键词:** 多约束路径选择; 服务质量; QoS 路由; 距离向量深度

**中图分类号:** TP393.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 01-0175-05

## Multi-Constrained Path Selection Algorithm Based on the Depth of the Distance Vector

QI Xiaogang<sup>1,3</sup>, LIU Lirfang<sup>2</sup>, LIU Sanyang<sup>1,3</sup>

(1. Department of Mathematics Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;  
2. School of Computer Science & Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;  
3. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** It is a challenging problem to provide quality-of-service (QoS) guarantees in next generation high speed network, and the QoS routing is one of the key issues of the problem. For the problem of multi constrained QoS routing with the inaccurate state information of networks, a critical point model is constructed, and an algorithm based on the depth of the distance vector, MCPSA, is proposed for the problem. The MCPSA aims to select the path with the minimal depth of distance vector from the paths computed by an existing algorithm for QoS routing pre-computation. Theoretical analysis indicates the performance of the algorithm is superior to that of the other algorithm. Finally, extensive simulations are used to demonstrate the efficiency of the proposed algorithm for the problem of multi constrained QoSR with the inaccurate state information.

**Key words:** multi constrained path selection; quality of service (QoS); QoS routing; the depth of the distance vector

### 1 引言

为各种应用提供不同的服务质量(Quality of Service, QoS)保证是互联网络面临的一大难题, 而服务质量路由(Quality of Service Routing, QoSR)则是其中的一项核心技术, 针对不同 QoS 需求的路由优化问题的研究越来越受到学术界的广泛关注, 同时也成为该领域的一个研究热点<sup>[1-6]</sup>. 目前, QoSR 问题涉及的度量参数包括: 带宽、延时、延时抖动、丢失率、可靠性和跳数等. 根据运算规则, 这些度量参数可以分为加性度量参数、乘性度量参数和凹性度量参数, 其中传输延时、跳数、代价、属于加性度量参数, 丢失率、可靠性属于乘性度量参数, 带宽属于凹性度量参数, 根据度量参数的组合方式可以将路

由选择算法分为单混合度量参数路由算法和多度量参数路由算法<sup>[2]</sup>. QoSR 问题研究可以分为两类, 一类是为 QoS 业务寻找能够同时满足多种 QoS 约束的可行路径, 另一类是为 QoS 业务寻找能够同时满足多种 QoS 约束的最优路径. 不论是带优化的 QoSR 问题还是不带优化的 QoSR 问题均为 NP complete 问题<sup>[3]</sup>.

近年来, 很多路由算法都假设网络的每个节点能够通过网络协议获取精确的网络状态信息, 然而在实际的动态网络环境中, 节点所能够获取的网络状态信息是不精确的, 在文献[5]中 Dean H. Lorenz 和 Ariel Orda 对造成网络状态信息不确定性进行了归纳, 包括以下四个方面: ①网络的动态本质, 即网络的状态是时刻变化的; ②大规模网络是由不同速率的子网络互连而成的, 各子网

络性能存在差异; ③为了保证子网的灵活性和自治性, 子网的内在属性、隶属关系以及运行机制等信息是隐藏的; ④由于状态参数取决于已有的数学模型, 并不代表网络设备真正的复杂性, 因此所谓“精确的”的节点和链路参数本身并不精确。

本文针对不精确链路状态信息条件下的第一类 QoS 问题, 建立了一种适用于该问题的临界点模型 (Critical Point Model), 在此基础上提出了一种基于距离向量深度的 QoS 路径选择算法, 该算法能够有效解决临界点靠近问题, 避免网络参数变化而导致路由等级的下降, 以“容忍”QoS 参数的变化。

## 2 相关工作

文献[1]中主要针对互连网络中 QoS 问题进行了广泛深入的研究, 详细分析了面向单播应用的 QoS 算法, 并按照所求解的问题类型和求解方法, 将这些算法分成以下几类: 多项式非启发类、伪多项式非启发类、探测类、限定 QoS 度量类、路径子空间搜索类、QoS 度量相关类、花费函数类和概率求解类, 在此基础上, 总结和对比了各类算法的特点和算法的有效性, 最后指出了该领域中需要进一步研究的热点问题。文献[2]对目前 QoS 路由选择问题与解决方法进行了综述, 将 QoS 路由算法涉及的参数分为加性度量参数、乘性度量参数以及凹性度量参数三种, 如时延、跳数、代价属于加性度量参数, 而丢失率、可靠性属于乘性度量参数, 带宽属于凹性度量参数。Korkmaz 等人在文献[3]中设计了一种通过逆向标号过程求解多约束的 HL-MCOP 算法, 该算法基于非线性能量函数

$$g(x, p) = \left[ \frac{w_1(p)}{c_1} \right]^\lambda + \dots + \left[ \frac{w_k(p)}{c_k} \right]^\lambda \quad (1)$$

进行问题求解。崔勇等人在文献[4]中设计了一种基于链路状态的多约束路由预计算算法 MEPPA, 该算法基于线性函数  $g_a(e) = \sum_{l=1}^k (a_l w_l(e))$  为链路  $e$  的能量函数, 其中  $a_l \in [0, 1]$  为与  $e$  无关的系数, 且  $\sum_{l=1}^k a_l = 1$ , 该系数向量  $a = (a_1, a_2, \dots, a_k)$  称为能量系数; 算法在实际求解时, 对向量的各个分量进行离散化处理, 在  $[0, 1]$  内均匀取出  $b$  个元素, 即  $D = \{0/(b-1), 1/(b-1), \dots, (b-1)/(b-1)\}$ , 这样向量  $a$  在  $W^k$  空间的取值为  $B = C_{b+1}^{k-1}$  种组合; 根据向量  $a$  的  $B$  种组合分别构造  $B$  种能量函数  $g_a(e) = \sum_{l=1}^k (a_l w_l(e))$ , 再利用文献[7]中的最短路算法进行  $B$  次路由选择; 在已建立的  $B$  条路由中根据相应的约束向量, 选择满足约束向量的 QoS 路由, 该算法在  $k$  值相同的条件下,  $b$  值越大 (即  $B$  越大), 能够建立满足约束向量路由的成功率越大, 与文献[3]中的 HL-MCOP 算法相比, MEPPA 算法具有更高的路由计算成功率。

文献[5]中 Dean H. Lorenz 和 Ariel Orda 针对不确定网络状态信息下端到端延迟保证的路由问题, 假设链路延迟服从某种已知的概率分布, 且网络中各链路上概率分布是独立的, 从而可以得到链路满足某个 QoS 延迟请求的概率, 以此作为路由选择的依据, 进而提出了一系列对于此问题的求解方法。文献[6]中 Roch A. Guerin 和 Ariel Orda 重点研究了不确定网络状态信息下的 QoS 路由问题, 通过概率模型来表示网络状态信息的不确定性, 并在此基础上建立一条能够最大可能满足 QoS 需求的路径, 文中以带宽和延迟作为网络的两种度量参数, 提出了一种启发式的问题解决方法。

通过对以上分析可以看出, 文献[3, 4]主要针对精确状态信息下的多约束 QoS 问题, 分别提出了一种基于某种能量函数的 QoS 路由预计算算法, 文献[5, 6]主要针对不精确状态信息下的多约束 QoS 问题, 分别假设网络参数服从某种概率分布模型, 以此作为问题求解的基础, 提出了相应的问题求解方法, 并进行了大量的理论分析, 证明了其算法对于服从此类概率分布的网络参数进行求解的有效性。然而这些算法都具有明显的缺点和不足, 在进行问题求解时, 都将实际的网络路由问题理想化。文献[3, 4]将一个高度动态化的网络简单地假设为一个相对静态的网络; 文献[5, 6]虽然考虑到了网络的动态本质, 但将网络的动态本质简单地假设为某种已知的概率分布模型。与文献[3, 4]相比, 文献[5, 6]虽然体现了网络状态变化的动态性, 但这两种假设无疑简单化和理想化了 QoS 路由问题。

## 3 问题描述与数学模型

### 3.1 问题描述

假设图  $G = (V, E)$  表示一个网络, 其中  $V$  表示节点集合,  $E$  表示边的集合,  $V$  中的任一元素  $v$  表示网络中的一个路由器,  $E$  中的任一元素  $e$  表示网络中的一条通信链路。图  $G$  中的每条边  $e$  均具有  $k$  种 QoS 度量参数, 分别为  $w_1(e), w_2(e), \dots, w_k(e)$ , 令  $w(e) = (w_1(e), w_2(e), \dots, w_k(e))$ , 其中  $w_l(e) (1 \leq l \leq k)$  表示第  $l$  种 QoS 度量参数, 其值在某一范围内动态变化。假设给定一条路径  $p^s = v_0^s, e_1^s, v_1^s, e_2^s, \dots, e_t^s, v_t^s$ , 如果  $w_l(e)$  为加性度量参数, 则有  $w_l(p^s) = \sum_{i=1}^t w_l(e_i)$ ; 如果  $w_l(e)$  为乘性度量参数, 则有  $w_l(p^s) = \prod_{i=1}^t w_l(e_i)$ ; 如果  $w_l(e)$  为凹性度量参数, 则有  $w_l(p^s) = \min_{i=1}^t w_l(e_i)$ 。因此对于给定的路径  $p^s$ , 需要计算该路径所对应的  $k$  种约束度量权值  $w_1(p^s), w_2(p^s), \dots, w_k(p^s)$ , 令  $w(p^s) = (w_1(p^s), w_2(p^s), \dots, w_k(p^s))$ , 相应的 QoS 问题就是根据已有的网络状态信息建立满足所有 QoS 约束的网络路由。

### 3.2 数学模型

根据 3.1 中对问题的描述, 设该问题中有  $k$  个约

束, 约束值分别为  $c(s, t) = (c_1(s, t), c_2(s, t), \dots, c_k(s, t))$ , 则不精确链路状态信息条件下的 QoS 问题可以归结为以下数学模型:

$$\text{在条件} \begin{cases} w_h(p_s) \leq c_h(s, t), \\ w_l(p_s) \geq c_l(s, t), \end{cases} \quad (2)$$

下寻找  $G$  中的一条路径  $p_s$ , 其中  $0 \leq h \leq k, 0 \leq l \leq k, c_l(s, t) (1 \leq l \leq k)$  为第  $l$  个约束允许的最大值或最小值.

#### 4 基于距离向量深度的 QoS 路径选择算法

为了叙述方便, 引入以下定义:

**定义 1** UP 性约束: 如果约束的允许上限是给定的, 则该约束为 UP 性约束.

**定义 2** LOW 性约束: 如果约束的允许下限是给定的, 则该约束为 LOW 性约束.

**定义 3** 临界点: 对于给定的第  $l$  个 QoS 约束, 其所允许的最大值或最小值  $c_l(s, t) (1 \leq l \leq k)$ , 称为该约束的临界点.

**定义 4** 临界向量: 对于给定的请求  $(s, t)$ , 其所有 QoS 约束的临界点共同构成的向量, 即  $c(s, t) = (c_1(s, t), c_2(s, t), \dots, c_k(s, t))$  称临界向量.

**定义 5** 路径权值向量: 是指路径  $P$  所对应的路由权值分别为  $w(P) = (w_1(P), w_2(P), \dots, w_k(P))$ , 则称  $w(P)$  为路由权值向量.

**定义 6** 绝对距离向量: 假设路径  $P_{st}$  是为给定请求  $(s, t)$  所建立的一条路径, 则路径  $P_{st}$  所对应的路由权值向量与请求  $(s, t)$  的临界向量中各分量的差称为绝对距离向量, 记为  $\Delta A(P_{st}) = (\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_k)$ .

**定义 7** 相对距离向量: 假设路径  $P_{st}$  是为给定请求  $(s, t)$  所建立的一条路径, 则路径  $P_{st}$  所对应的绝对距离向量分量与请求  $(s, t)$  的临界向量 (对于 UP 性参数) 或路由权值向量分量 (对于 LOW 性参数) 的相对值称为相对距离向量, 记为  $\Delta R(P_{st}) = (\Delta r_1, \Delta r_2, \dots, \Delta r_k)$ .

(1) 对于 UP 性参数,  $\Delta a_l = c_l(s, t) - w_l(P_{st}), \Delta r_l = \Delta a_l / c_l(s, t)$ , 即  $\Delta r_l = 1 - w_l(P_{st}) / c_l(s, t)$ ;

(2) 对于 LOW 性参数,  $\Delta a_l = w_l(P_{st}) - c_l(s, t), \Delta r_l = \Delta a_l / w_l(P_{st})$ , 即

$$\Delta r_l = 1 - c_l(s, t) / w_l(P_{st}).$$

**定义 8** 向量深度: 给定向量  $R = (r_1, r_2, \dots, r_k)$ , 则称  $\min_{1 \leq k \leq l} r_l$  为向量  $R$  的深度, 记为  $|D(R)|$ .

基于上节中描述的数学模型, 本文提出了一种基于距离向量深度的 QoS 路径选择算法 (Multi-Constrained Path Selection Algorithm based on the depth of the distance vector, MCPSA), 该算法以某种预计算路由算法为初始路径选择的基础, 以路径  $P_{st}$  所对应的距离向量深度  $\max_{P \in \text{Set}(P_{st})}$

$|D(\Delta R(P_{st}))|$  作为路径选择的依据.

MCPSA 可以描述如下:

MCPSA (Set( $P_{st}$ ),  $c(s, t)$ ,  $B, * P$ )

```

{
* P = Pst1;
compute w(Pst1), and let wopt = w(Pst1);
compute ΔR(Pst1) according to the c(s, t) and w(Pst1);
compute |D(ΔR(Pst1))|, and let DDmax = |D(ΔR(Pst1))|;
for (i = 2; i ≤ B; i++)
{
compute w(Psti);
compute ΔR(Psti) according to the c(s, t) and w(Psti);
compute |D(ΔR(Psti))|;
if (DDmax < |D(ΔR(Psti))|)
{
let DDmax = |D(ΔR(Psti))|;
* P = Psti;
} // end if
} // end for
} // end MCPSA
    
```

由于不精确链路状态下的多约束路径选择问题, 各链路上的 QoS 度量参数在某个范围内是动态变化的, 是服从某种分布的一个随机数, 所以基于已经过时的网络链路状态信息所建立的路径, 可能已经不能满足通信请求的 QoS 要求. 但是有一点需要明确的是, 路径权值向量各分量比约束向量各分量越优, 则该路径在链路参数变化时, 仍能满足 QoS 要求的可能性越大; 如果所选择的路径的权值向量中某个分量非常接近其约束值, 则该条路径很容易成为不可行路径, 因此所选路径的权值向量离约束向量越远, 该路径成为不可行路径的可能性越小. 基于距离向量深度的 QoS 路径选择算法就是一种基于该思想的路径选择方法, 要求所选路径的权值向量尽最大可能优于约束向量.

#### 5 算法及复杂度分析

**定理 1** 对于不精确链路状态信息下的多约束路径选择问题, 该算法的路由成功率不低于其它随机的路由选择算法.

证明: 对于给定的链路请求  $(s, t)$ , 相应的临界向量为  $c(s, t)$ . 假设存在多条满足约束的路径, 设这些路径的集合为  $\text{Set}(P_{st})$ , 根据该算法所选路径为  $P'_{st}$ , 路径权值向量为  $w(P'_{st})$ , 距离向量  $\Delta R(P'_{st}) = (\Delta r_1, \Delta r_2, \dots, \Delta r_k)$ , 路径为  $P'_{st}$  所对应的  $|D(\Delta R(P'_{st}))| = \max_{P_{st} \in \text{Set}(P_{st})} |D(\Delta R(P_{st}))|$ , 即  $|D(\Delta R(P'_{st}))| \geq |D(\Delta R(P_{st}))| (P_{st} \in \text{Set}(P_{st}))$ .

对于  $|D(\Delta R(P'_{st}))|$  和  $|D(\Delta R(P_{st}))|$ , 其值的大小主要取决于各自的最小分量, 假设向量  $\Delta R(P'_{st})$  的最小分量为  $\Delta r'_m (1 \leq m \leq k)$ , 向量  $\Delta R(P'_{st})$  的最小分量  $\Delta r_l$

( $1 \leq l \leq k$ ), 则  $\Delta r'_m \geq \Delta r_l$ . 同时根据文献[4~6], 如果  $\Delta R(P'_st), \Delta R(P_{st})$  中的各个分量均服从均匀分布, 路径权值向量中的分量  $w_m(P'_st), w_l(P_{st})$  满足 QoS 约束的概率分别为  $pro(w_m(P'_st) \phi_{c_m}(s, t)), pro(w_l(P_{st}) \phi_{c_l}(s, t))$ , 则有\*

$$pro(w_m(P'_st) \phi_{c_m}(s, t)) = \Delta r'_m, pro(w_l(P_{st}) \phi_{c_l}(s, t)) = \Delta r_l$$

$$pro(w_m(P'_st) \phi_{c_m}(s, t)) \geq pro(w_l(P_{st}) \phi_{c_l}(s, t))$$

对于  $P'_st$  和  $P_{st}$  路径权值向量中的其它分量, 由于彼此相互独立、且均服从均匀分布, 则有

$$\prod_{\substack{1 \leq i \leq k \\ i \neq m}} pro(w_i(P'_st) \phi_{c_i}(s, t)) = \prod_{\substack{1 \leq j \leq k \\ j \neq l}} pro(w_j(P_{st}) \phi_{c_j}(s, t)) *$$

成立.

进而, 有

$$\prod_{1 \leq i \leq k} pro(w_i(P'_st) \phi_{c_i}(s, t)) \geq \prod_{1 \leq j \leq k} pro(w_j(P_{st}) \phi_{c_j}(s, t))$$

成立.

此命题得证.

**定理 2** 基于距离向量深度的 QoS 路径选择算法的计算复杂度为  $o(Bkn)$ , 其中  $B$  为待选路径的数量,  $k$  为约束的数量,  $n$  为网络的规模.

证明: 对于规模为  $n$  的网络, 则两个不同节点间的路径的长度最大为  $n$ , 计算待选路径权值向量分量的运算次数不超过  $n$  次, 计算路径权值向量的运算次数不超过  $kn$  次. 根据定义 5~8, 基于路径权值向量的计算结果, 计算距离向量深度的次数为  $2k$  次, 因此对于每条待选路径, 计算距离向量深度的次数不超过  $k(n+2)$  次.

对于  $B$  条待选路径, 总的计算量不超过  $Bk(n+2)$  次, 所以基于距离向量深度的 QoS 路径选择算法的计算复杂度为  $o(Bkn)$ . 命题得证.

### 6 算法仿真

本文计算机仿真所采用的方法与文献[3,4] 完全相同. 根据文献[9] 产生具有  $N$  个节点的网络拓扑, 对于网络拓扑中的每条链路随机产生  $k$  个相互无关的、在  $[1, 1000]$  区间内均匀分布的随机数, 分别表示链路上的  $k$  种约束度量参数  $w_1(e), w_2(e), \dots, w_k(e)$ , 其中网络节点数(网络规模)  $N$  的取值包括 50、100、200 三种情况. 对于不同的网络规模分别生成 10 个网络, 在每个网络上随机产生 1000 个连接请求(可能会多次重复出现), 并确保所选择的节点对不相邻(最小跳数不小于 2). 对于给定的源目节点对  $(s, t)$ , 使用最优路径算法分别基于  $w_l$  计算最优路径  $p_b$ , 然后令  $s$  到  $t$  的 QoS 请求的约束条件  $c_{l+1} \sim uniform(0.8 * w_{l+1}(p_l), 1.2 * w_{l+1}(p_l))$ . 为了验证 MCPSA 在求解不精确状态信息下 QoS 路由问题的有效性, 假设度量真实的度量参数为  $w'_1(e), w'_2(e), \dots, w'_k(e)$ , 并且

$$w'_l(e) \in uniform[w_l(e) * (1 - threshold), w_l(e) * (1 + threshold)] (l = 1, 2, \dots, k)$$

同时我们假设状态信息的更新基于标准的门限触发, 门限(threshold)值分别为 0.1, 0.2, ..., 0.8, 然后比较了将 MCPSA 用于 MEPPA 算法计算结果路径选择前后的路由成功率, 如图 1~3 所示.

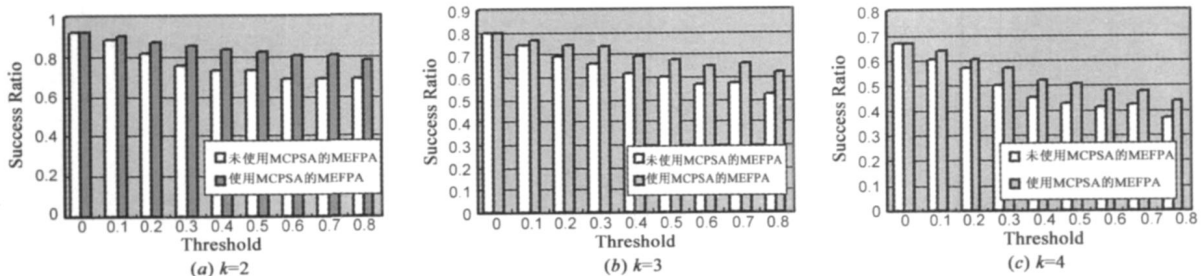


图1 应用MCPSA 前后的路由成功率(N=50)

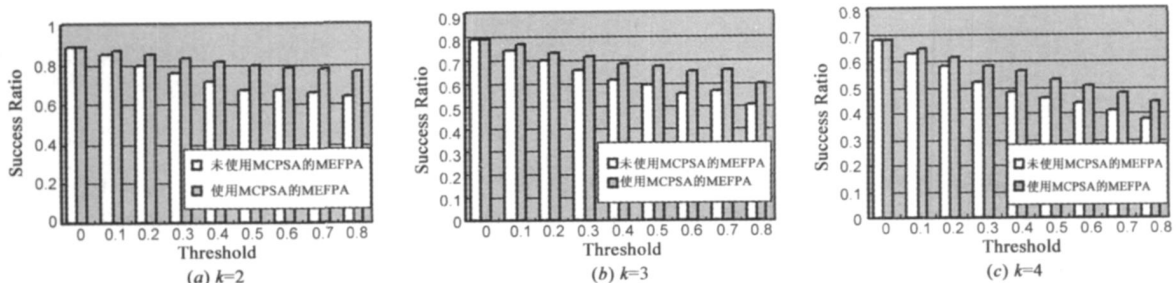


图2 应用MCPSA 前后的路由成功率(N=100)

\* 式中的符号  $\phi$  表示优于关系. 对于 UP 型约束,  $\phi$  表示  $\leq$ ; 对于 LOW 型约束,  $\phi$  表示  $\geq$ .

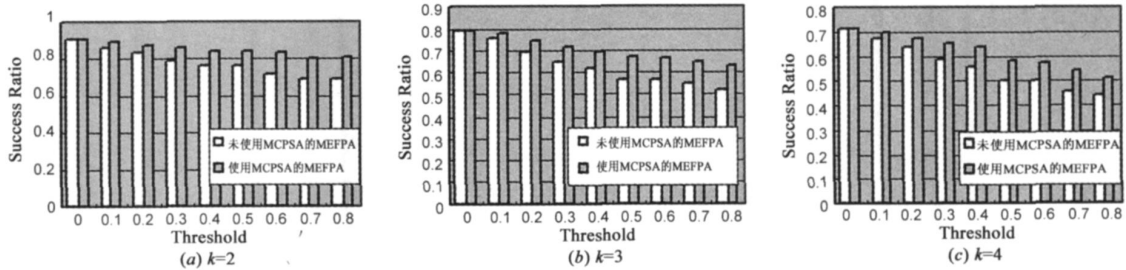


图3 应用MCPSA 前后的路由成功率(N=200)

由图 1~ 3 可知, MCPSA 能够显著改善已有的路由预计算算法的性能. 值得说明的是, 由于 MCPSA 在进行路径选择时, 以整条路径作为选择对象, 因此该算法同样适用于乘性和凹性 QoS 度量参数的 QoS 多约束路径选择问题. 本文为了与算法[ 4] 进行比较, 在仿真实验中所有的 QoS 度量参数均为加性的.

## 7 结束语

本文通过对不精确状态信息下的多约束 QoS 路由问题的研究, 建立了一种用于不精确状态信息下多约束 QoS 路径选择的临界点模型, 提出了一种基于距离向量深度的多约束 QoS 路径选择算法, 并以 MEFPA 算法为例, 通过大量的计算机仿真实验, 比较了不同网络规模 and 不同数量约束情况下路径选择的性能, 仿真结果表明 MCPSA 是一种有效的路径选择算法, 能够显著提高不精确网络状态信息下的路由成功率.

### 参考文献:

- [1] 崔勇, 吴建平, 徐格等. 互联网服务质量路由算法研究综述[J]. 软件学报, 2002, 13(11): 2065- 2076.  
CUI Yong, WU Jiann ping, XU Ke, et al. Research on internet work QoS routing algorithms: a survey[J]. Journal of Software, 2002, 13(11): 2065- 2075. (in Chinese)
- [2] 朱慧玲, 杭大明, 马正新等. QoS 路由选择: 问题与解决方法综述[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 1- 8.  
ZHU Hui ling, HANG Da ming, MA Zheng xin, et al. Quality of service routing: problems and solutions[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(1): 1- 8. (in Chinese)
- [3] T Korkmaz, M Krunz. Multi constrained optimal path selection [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2001[OL]. http://cite

seer. ist. psu. edu/korkmaz01multiconstrained. htm

- [4] 崔勇, 吴建平, 徐格. 基于链路状态的多约束路由预计算算法[J]. 电子学报, 2003, 31(8): 1173- 1177.  
CUI Yong, WU Jiann ping, XU Ke. Link state based precomputation for multi constrained routing[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(8): 1173- 1177. (in Chinese)
- [5] Dean H. Lorenz Ariel Orda. QoS routing in networks with uncertain parameters[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(6): 768- 778.
- [6] Roch A. Guerin Ariel Orda. QoS routing in networks with inaccurate information: theory and algorithms[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(3): 350- 364.
- [7] Dijkstra E W. A note on two problems in connection with graphs[J]. Numer. Math, 1959, 1: 269- 271
- [8] 《运筹学》教材编写组. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990. 1.
- [9] Zegura E W, Calvert K L, Donahoo M J. A quantitative comparison of graph based models for Internet topology[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(6): 770- 783.

### 作者简介:

齐小刚 男, 1973 年出生于陕西宝鸡, 西安电子科技大学数学科学系副教授、博士, 研究方向为高性能网络中的路由与性能优化.  
E mail: xgqi@mail.xidian. edu. cn

刘立芳 女, 1972 年出生于甘肃兰州, 西安电子科技大学计算机学院副教授、博士, 研究方向为智能计算、算法设计与分析.

刘三阳 男, 1959 年出生于陕西西安, 西安电子科技大学数学科学系教授、博士, 博士生导师, 研究方向为最优化、网络算法和网络可靠性.