

基于 K 最优路径的 QoS 路由预计算新算法

齐小刚, 刘三阳

(西安电子科技大学应用数学系, 陕西西安 710071)

摘要: 针对下一代高速网络中的多约束服务质量路由问题, 首先提出了一种精确链路状态信息条件下的路由预计算算法 MKPPA. 在此基础上根据网络状态信息的动态性, 通过引入“警戒点”对 MKPPA 进行了改进, 提出了一种基于警戒点的修正预计算算法 M-MKPPA, 该算法能够适应网络链路信息的不精确性. 最后通过理论分析表明 MKPPA 不仅能够解决加性度量参数受约束的 QoS 路由问题, 而且能够解决加性与非加性度量参数混合受约束 QoS 路由问题, 修正预计算算法 M-MKPPA 能够适应网络链路状态信息的动态特性. 计算机仿真结果显示 MKPPA 在求解 QoS 路由问题时, 当计算次数不超过已有算法的计算次数时, 不论是精确链路状态信息还是非精确链路状态信息条件下, 均具有更高的路由计算成功率.

关键词: 服务质量 (QoS); 多约束; QoS 路由; K 最优路径; 路由预计算

中图分类号: TP393.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 10-1751-06

Novel Precomputation Algorithms for QoS Routing Based on the K-optimal Paths

QI Xiao-gang, LIU San-yang

(Department of Applied Mathematics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: To solve the problem of Quality of Service (QoS) routing in next generation high speed network, firstly a novel pre-computation algorithm MKPPA for QoSR with accurate link state information based on the K-optimal paths is proposed. Secondly a modified MKPPA, M-MKPPA, is presented to adapt the inaccurate link state information of the network by introducing an "alert point". Finally the theoretical analysis indicates that the MKPPA is not only fit to the QoSR in which all constraint parameters are additive but also the QoSR in which some constraint parameters are additive and the others are non-additive, the M-MKPPA can adapt the dynamical character of link state information of the network. The extensive simulation results show that the proposed algorithms have the higher routing computation success ratio with either accurate link state information or inaccurate link state information of the network.

Key words: quality of service (QoS); multiple constraints; QoS routing; K optimal paths; precomputation

1 引言

服务质量保证是互连网络面临的一大难题, 也是下一代高速网络的一个具有挑战性的问题, 而服务质量路由 (QoS Routing, QoSR) 则是其中的一个核心技术, 针对不同 QoSR 问题的研究日益受到学术界的广泛关注, 也成为该领域的一个热点^[1~5]. 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混合度量参数路由算法^[2]. 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^[3].

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, 这使得该问题的求解变得更加困难^[2].

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 H-MCOP 算法. 崔勇等人在文献 [4] 中设计了一种基于模拟退火的服务质量路由算法. 崔勇等人在文献 [5] 中设计了一种基于链路状态的多约束路由预计算算法 MEFPA. 通常对于该问题的研究, 都只局限于加性约束度量参数的情形, 分别构造基于多个约束的能量函数, 然后以此能量函数作为路由计算的依据.

本文主要针对 QoSR 中的第一类问题, 提出了一种基于 K 最优路径算法的 QoS 路由预计算新算法 MKPPA, 该算法基于 k 最优路径算法^[6~8], 约束可以为带宽、延时、延时抖动、丢失率、可靠性和跳数等多种参数的组合, 不仅能够求解加性度量

参数受约束的 QoS 路由计算问题, 而且也能够求解加性、乘性、凹性等多种约束度量参数混合的 QoS 路由计算问题, 克服了已有算法^[3,5]要求度量参数为加性的限制。此外, 通过引入警戒点, 对 MKPPA 进行了改进, 使改进后的 MKPPA 算法能够适应网络链路信息的不精确性。

2 问题描述

假设 $G = (V, E)$ 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 均具有多种 QoS 度量参数, 其权值分别为 $w_1(e)$, $w_2(e)$, \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。假设给定一条路径 $p^s = (v_0^s, e_1, v_1^s, e_2, \dots, e_t, v_t^s)$, 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 , 分别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 问题就是求解满足所有约束的路径 p^s 。

根据以上假设, QoS 问题可以归结为以下数学模型:

对于给定图 $G = (V, E)$, 设源节点为 s , 目的节点为 t , 且图 G 中的任一边 e 具有 k 种 QoS 度量参数 $w_1(e)$, $w_2(e)$, \dots , $w_k(e)$, 相应的 QoS 路由请求的约束向量为 $c(s, t) = (c_1(s, t), c_2(s, t), \dots, c_k(s, t))$, 如果 s, t 之间存在路径 p_{st} , 其路由权值分别为 $w_1(p_{st})$, $w_2(p_{st})$, \dots , $w_k(p_{st})$, 并且 $w_l(p_{st})$ 分别优于相应的约束值 $c_l(s, t)$, 则路径 p_{st} 为该问题的解。

3 MKPPA 算法

3.1 算法思想

根据文献[5], 在 k 相同的条件下, MEFPA 算法的计算成功率主要取决于 b 值的大小(即 B 值的大小), b 值越大, 路由的成功率(success ratio, SR)越大。但是 MEFPA 算法在进行路由由预计算过程中存在以下不足:

(1) 不考虑约束向量 $c_l(s, t)$ 的作用, 即不论 $c_l(s, t)$ 中的每个元素的取值, 每次进行路由预计算时最短路算法都要无条件执行 B 次。

(2) 算法在进行路由计算时, 有效路由数占路由总数的比例很小。比如当节点数为 100, $k=3$, $b=7$ 即 $B=28$ 时, 建立的所有 28 条路径如图 1 所示。通过对图 1 中所有路径比较分析可知, 实际路径数仅为 6。在 $k=3$, $b=8$ (即 $B=28$) 时, 对节点数为 100 的网络中 1000 个随机节点对所建路径的统计分析结果显示, 实际路径的平均数仅为 5.5, 小于总数的 20%; 在 $k=4$, $b=10$ (即 $B=220$) 时, 对网络节点数为 200 的网络中的 1000 个随机节点对所建路径的统计分析结果显示, 实际路径的平均数仅为 9.5, 小于总数的 5%。

(3) 在 k 较大时, b 值增大导致 B 急剧增加, 因此很难选择适当的 B 值。比如当 $k=5$, $b=8$ 时, $B=330$; 当 $k=5$, $b=9$

时, $B=495$; $k=5$, $b=10$ 时, $B=715$, 如果认为选择 $B=330$ 时, 获得的 SR 较小, 欲提高 SR 时, 必须增加 B 的值, 那么此时可供选择的最小 B 值只能为 495, 这将可能导致计算时间太长或路由表空间过大, 可能没有合适的 B 值可供选择。

根据对 MEFPA 算法的分析, 本文提出了一种基于 K 最优路径算法的 QoS 路由预计算算法 MKPPA。

为了便于描述 MKPPA 算法, 现给出如下概念:

The path 0	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 0< - 24< - 41< - 37
The path 1	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 0< - 24< - 41< - 37
The path 2	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 64< - 41< - 37
The path 3	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 4	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 5	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 6	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 7	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 0< - 24< - 41< - 37
The path 8	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 0< - 24< - 41< - 37
The path 9	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 10	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 11	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 12	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 13	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 0< - 24< - 41< - 37
The path 14	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 0< - 24< - 41< - 37
The path 15	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 16	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 17	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 18	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 0< - 24< - 41< - 37
The path 19	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 0< - 24< - 41< - 37
The path 20	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 76< - 41< - 37
The path 21	from 37 to 73 is: 73< - 74< - 92< - 62< - 37
The path 22	from 37 to 73 is: 73< - 6< - 13< - 93< - 62< - 37
The path 23	from 37 to 73 is: 73< - 6< - 32< - 59< - 62< - 37
The path 24	from 37 to 73 is: 73< - 6< - 32< - 59< - 62< - 37
The path 25	from 37 to 73 is: 73< - 6< - 13< - 93< - 62< - 37
The path 26	from 37 to 73 is: 73< - 6< - 32< - 59< - 62< - 37
The path 27	from 37 to 73 is: 73< - 6< - 13< - 93< - 62< - 37

图 1 MEFPA 算法计算结果示例

定义 1 设计路由空间

根据给定的网络规模、约束数量、路由器计算能力、路由器存储空间大小、QoS 路由问题的总计算量等因素, 为每个节点对、以及每个节点对内部每个约束度量所分配的路由表空间的平均大小, 称为设计路由空间。

定义 2 路由空间裕度

对于某一节点对或者节点对的某一约束度量, 满足约束向量或约束值的实际路由空间小于设计路由空间, 则后者与前者的差值称为路由空间裕度。路由空间裕度包括不同节点对之间的路由空间裕度和同一节点对内部不同约束度量之间的路由空间裕度。

定义 3 路由空间再分配

由于路由空间裕度的存在, 因此在进行路由选择时, 如果不同节点对之间或同一节点对内部不同约束度量的设计路由空间不足, 可以根据路由空间裕度的大小及相应的分配原则

对路由空间自适应分配,称为路由空间再分配。

假设给定的源节点为 S , 目的节点为 t , MKPPA 算法的基本步骤如下:

(1) 针对不同约束度量, 根据 K 最优路径算法^[7,8] 分别计算 $m_l (1 \leq l \leq k)$ 条最优路径, 所有 k 种约束度量的最优路径总数记为 B , 则 $B = \sum_{l=1}^k m_l$, 其中 m_l 是根据该约束自适应变化的;

(2) 对于已建立的 B 条路径, 根据第 2 节中的计算方法分别计算其相应的 k 种 QoS 度量权值, 得到其相应的权值向量 $w(p)$;

(3) 根据各路径的权值向量以及相应的 QoS 路由约束向量, 选择满足该 QoS 约束向量的路径 p ;

(4) 算法结束。

3.1 MKPPA 算法描述

MKPPA 算法的伪代码表示如图 2、3 所示, 图 2 主要是根据参数的性质分别计算 K 最优路径, 图 3 是利用路由空间再分配技术自适应调节 K 值的大小。

```

SUB_MKPPA( Graph, Source, Terminal, Type_constraint, Value_constraint, K, * Surplus)
(1) IF(Type_constraint == ADDITIVE)
(2)   K_Shorestst_path_Algorithm( Graph, Source, Terminal, Value_constraint, K, * Surplus);
(3) IF(Type_constraint == MULTIPLY)
(4)   Conversion( Graph, Graph_ADD);
(5) K_Shorestst_path_Algorithm( Graph_ADD, Source, Terminal, Value_constraint, K, * Surplus);
(6) IF(Type_constraint == CONCAVE)
(7)   K_widest_path_Algorithm( Graph, Source, Terminal, Value_constraint, K, * Surplus);

```

图 2 SUB_MKPPA 算法

```

MKPPA( Graph, Source, Terminal, k, Vector_constraint, Vector_property, B)
(1) S0 = B/k;
(2) S = S0;
(3) ST_Surplus = 0;
(4) extend = 0.1;
(5) Optimal_path( Graph, Source, Terminal, k, Vector_property, Vector_optimal);
(6) IF(Vector_optimal >= Vector_constraint) // “>” 表示“优于”关系
(7)   FOR( num = 1; num <= k; num++ )
(8)     SUB_MKPPA( Graph, Source, Terminal, Vector_property[num], Vector_constraint[num], S, * Surplus);
(9)   ST_Surplus+ = Surplus;
(10)  S = MIN[ (S + ST_Surplus), S* (1 + extend) ];
(11)  ST_Surplus- = (S - S0);
(12) ELSE
(13)  PRINTF(“There are no required path.”);
(14) END

```

图 3 MKPPA 算法

该算法具有以下优点:

(1) 由于 MKPPA 算法基于 K 最优路径算法^[7,8], 因此该算法在进行路径选择时, 最多只进行 K 次路径选择, 如果第 j ($j < K$) 次路径的某个权值超过了该度量参数的约束值, 则停止计算; 如果对于某种度量参数, 如果其最优路径的权值都不满足相应的约束, 宣告该问题无解, 并停止路由计算。

(2) MKPPA 算法在进行路由计算时, 对于乘性度量参数可以通过数学运算, 将其转化为加性度量参数, 然后利用文献[7]中的 K 最短路算法进行计算; 对于凹性度量参数利用现有的 K 最大可用带宽路径算法^[8] 进行求解。根据文献[7, 8] K 最优路径互不相同, 因此 MKPPA 算法能够有效提高实际路径在总计算路由中的比例, 其理论值不低于 $1/k$ 。

(3) MKPPA 算法在进行路由选择时, 能够较容易地选择路径计算总次数 B , 不同 B 值的间隔仅为 k 。

(4) MKPPA 算法不仅能够求解加性度量参数受约束的 QoSR 问题, 而且也能够求解加性、乘性、凹性等多度量参数混合受约束的 QoSR 问题。

(5) MKPPA 算法中虽然每个约束度量参数的最优路径的计算次数是自适应变化的, 但总的计算路由数不会超过设计路由空间的大小 $\sqrt{}$ 见定理 1]。

定理 1 总的路由空间计算次数不会超过设计路由空间的大小。

证明 根据 MKPPA 算法, 路由空间的自适应变化量是根据空间裕度积累量 $ST_Surplus$ 的值进行调整的, 但 $ST_Surplus$ 的值直接取决于 $Surplus$ 。根据定义 2, 路由空间裕度 $Surplus$ 取决于各约束度量的路由选择数量及该约束度量的设计路由空间 B/k , 即 $Surplus$ 为实际选取的路由数量与设计路由空间 B/k 的差值, 因此路由空间的自适应变化量均与实际计算路由数和设计路由空间 B 的差值相关。在 MKPPA 算法中进行路由空间再分配时, 还引入一个参数 $extend$, 它直接体现路由空间再分配的范围。再分配后的路由空间值 $S = \min[(S + ST_Surplus), S * (1 + extend)]$, 即使参数 $extend$ 的值较大, 而路由空间值 S 仍受 $ST_Surplus$ 的限制, 因此, MKPPA 算法中总的路由空间计算量不会超过设计路由空间的大小。

证毕。

设网络的节点数为 n , 边数为 m , QoS 度量的个数为 k , K 最短路^[7] 和 K 最宽路径^[8] 的计算复杂度分别为 $O(K(m + n \log n))$ 和 $O(K(n-1)(n-2))$, MKPPA 算法的计算复杂度为 $O(Bn^2)$ 。因此在 n, m, k, B 相同的条件下, MKPPA 算法的计算次数不超过 MEPPA 算法的计算次数。

3.2 改进的 MKPPA 算法——M MKPPA

然而, 在实际的网络环境中网络的状态是时刻变化的, 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。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。同时, 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。因此, 网络节点所能够获取的网络状态信息是不精确的, 这将导致路由选择的失败, 甚至出现环路^[2]。

为了适应网络的动态本质, 本节通过引入警戒点, 对 MKPPA 算法进行了改进, 提出了一种基于警戒点的预计算算法 M_ MKPPA.

3.2.1 警戒点的建立 本文的警戒点为 p^{alert} , 其权值为 $w(p^{alert}) = (w_1(p^{alert}), w_2(p^{alert}), \dots, w_k(p^{alert}))$, 其中 $w_i(p^{alert})$ ($1 \leq i \leq k$) 为从源节点到目的节点第 i 个约束参数所对应的最低约束条件, $w(p^{alert})$ 称为警戒向量.

3.2.2 相对距离计算 对于从源节点到目的节点的路径 p^s , 分别计算该路径所对应的 k 种约束度量权值 $w_1(p^s), w_2(p^s), \dots, w_k(p^s)$, 然后计算路径 p^s 到警戒点 p^{alert} 的, 根据下式计算相对距离 $dist(p^s)$.

$$dist(p^s) = \min_{1 \leq i \leq k} \frac{w_i(p^s) - w_i(p^{alert})}{w_i(p^s)}$$

3.2.3 选路原则 根据相对距离最大的原则, 从 B 条从源节点到目的节点的路径中按照相对距离最大的原则, 选择工作路径 p^{select} , 则有

$$dist(p^{select}) = \max_{1 \leq j \leq B} dist(p^j)$$

3.3 M_ MKPPA

M_ MKPPA 伪代码表示如下:

```

M_ MKPPA(Set_ paths, Source, Terminal, Vector_ constraint, B)
(1) T_ maximum = - ∞;
(2) FOR ( 1 ≤ i ≤ B)
(3)   Compute the dist(pi) for each pi in Set_ paths;
(4)   IF ( dist(pi) ≥ T_ maximum)
(5)     T_ maximum = dist(pi);
(6)     label = i;
(7) RETURN label;
(8) END
    
```

图 4 M_ MKPPA 算法

4 性能评价

4.1 精确链路状态信息下的 QoS 路由

本文计算机仿真所采用的方法与文献[3, 5]完全相同, 根据文献[11]随机产生具有 n 个节点的网络拓扑, 对于每个网络拓扑中的网络链路随机产生 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 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随机

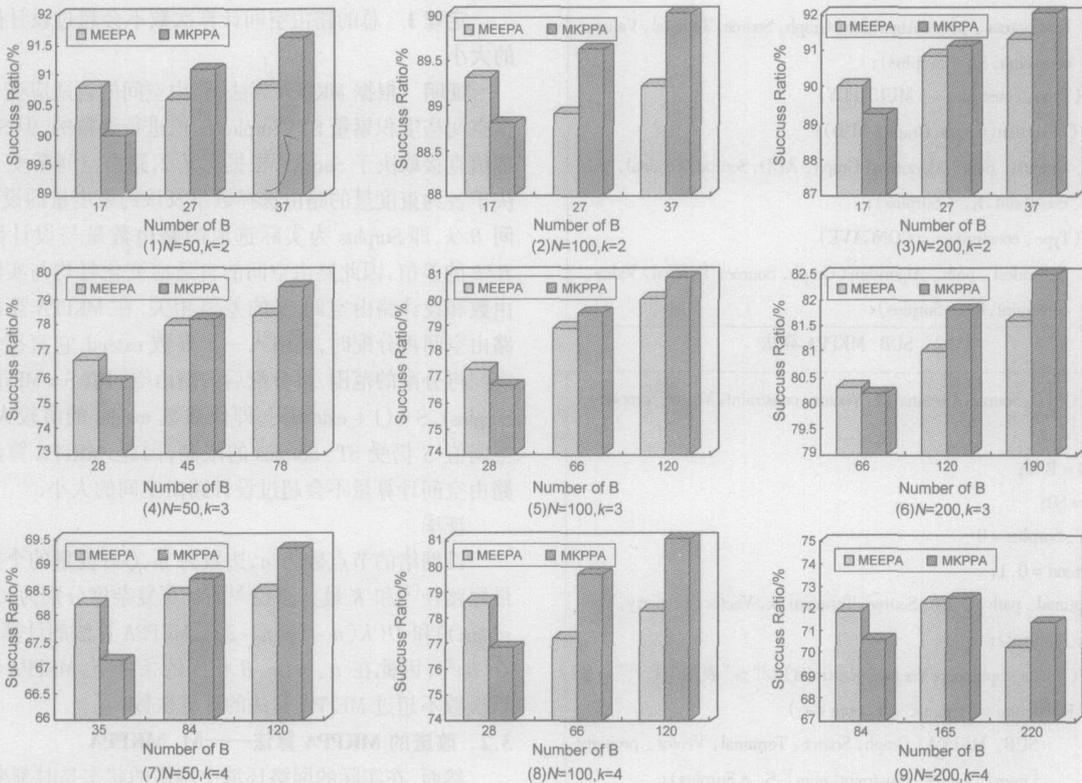


图 5 精确链路参数条件下的算法路由计算成功率

生成 10 个网络, 在每个网络上随机选取 1000 个源目节点对 (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_l , 然后令 s 到 t 的 QoS 请求的约束条件 $c_{l+1} \sim \text{uniform}(0.8 * w_{l+1}(p_l), 1.2 * w_{l+1}(p_l))$.

MEEPA 算法在进行路由由预计算时, 其计算量主要取决于网络规模和计算次数 $B (B = C_{b+}^{k-1} k-2)$, 因此本文在进行算法评价时, 在相同的网络规模下, 令 MKPPA 算法中设计路由空间的值为 B , 以确保其计算量不超过 MEEPA 算法(根据定理 1), 在此基础上对两种算法的路由计算成功率进行了比较. 算

法的性能评价结果如图 5(1~9)所示。

根据文献[5], 在相同的网络和约束条件下, MEFPA 算法的路由计算成功率随 b 值的增大而增大; 本文所建立的 MKPPA 算法, 其路由计算成功率主要取决于设计路由空间的大小, 路由计算成功率随设计路由空间的增大而增大。

实验数据表明, 在平均计算量不超过 MEFPA 算法的情况下, 随着的增加, MKPPA 算法的路由计算成功率明显优于 MEFPA 算法。

此外, MKPPA 算法可以求解加性、乘性、凹性等多种度量参数混合的 QoS 问题, 其适用范围更大; 由于 MKPPA 算法中引入了对无可行解的判断和算法的停止条件, 因此该算法在

问题求解时, 能够及时停止运算, 降低路由计算的盲目性; 同时该算法对计算次数 B 的选择更为方便灵活. 因此, MKPPA 算法在解决 QoS 问题时具有明显的优势。

4.2 不精确链路状态信息下的 QoS 路由

为了验证 M_MKPPA 算法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 $w'_1(e)$, $w'_2(e)$, ..., $w'_k(e)$, 状态信息的更新基于标准的门限触发, 令 $w'_l(e) \in \text{uniform}[w_l(e) * (1 - \text{threshold}), w_l(e) * (1 + \text{threshold})]$ ($l = 1, 2, \dots, k$)

其中门限 (threshold) 值分别为 0.1, 0.2, ..., 0.8, 比较了 M_MKPPA 与 MEFPA 算法的路由成功率, 如图 6(1~9)所示。

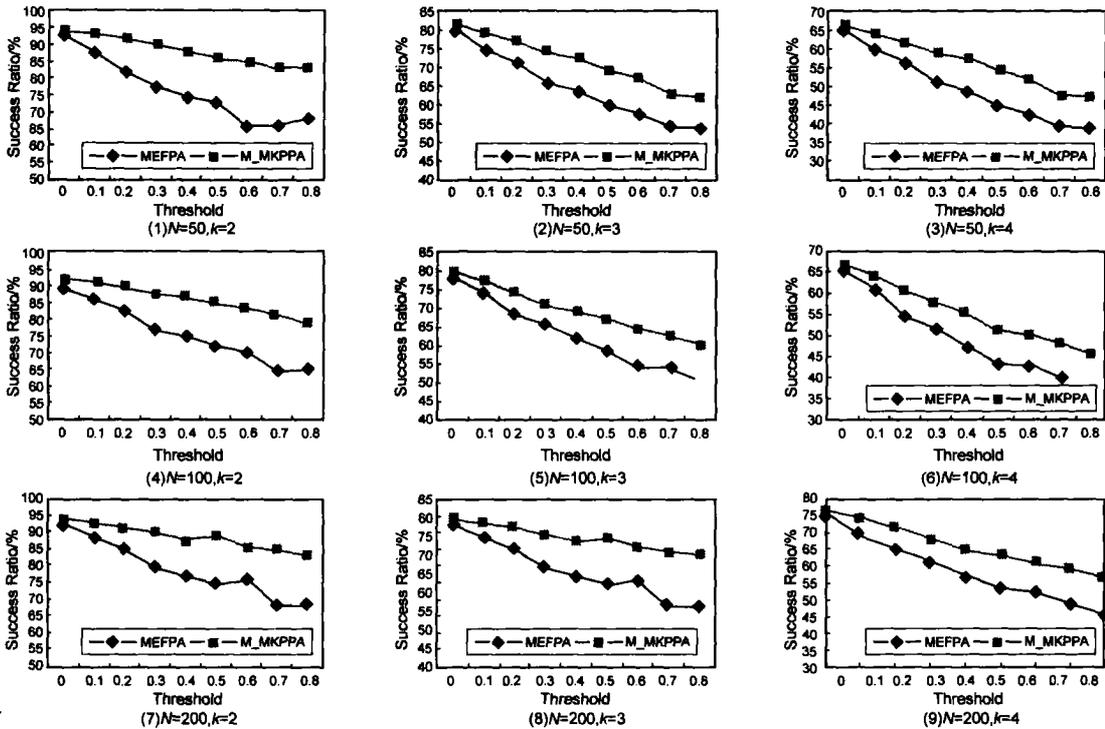


图 6 非精确链路参数条件下的算法路由计算成功率

通过观察图 6 可以看到, M_MKPPA 算法在非精确链路状态信息条件下, 其路由计算成功率显著优于 MEFPA 算法的路由成功率, 具有明显的优势。

5 结束语

本文在分析 QoS 问题及已有算法的基础上, 分别针对精确链路信息条件下和非精确链路条件信息下的 QoS 问题, 提出了一种基于 K 最优路径的 QoS 路由预计算新算法 MKPPA 和算法 M_MKPPA, 特别是 M_MKPPA 算法能够更好的适应网络信息动态变化的这一本质. 理论分析和大量的仿真实验结果表明本文所提出的预计算算法与已有的同类算法相比, 不论是在精确链路状态条件下还是在非精确链路条件下, 均具有更强的求解能力、更大的灵活性, 以及更广的适用范围, 能够较好地适应下一代高速网络对服务质量保证的要求。

参考文献:

[1] 崔勇, 吴建平, 徐恪, 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 Jianping, XU Ke, XU Mingwei. Research on internet network 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, 李安国. 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, Victor O K Li. Quality of service routing: problems and solutions [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(1): 1-8. (in Chinese)

[3] T Korkmaz, M Krunz. Multir Constrained Optimal Path Selection [OL]. <http://citeseer.ist.psu.edu/korkmaz01multiconstrained.html>

[4] 崔勇, 吴建平, 徐恪. 基于模拟退火的服务质量路由算法 [J]. 软件学报, 2003, 14(5): 877-884.

- simulated annealing[J]. Journal of Software. 2003, 14(5): 877- 884. (in Chinese)
- [5] 崔勇, 吴建平, 徐恪. 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 Jian ping, XU Ke. Link State based Pre-computation for multiconstrained routing[J]. Acta Electronica Sinica. 2003, 14(5): 877 - 884. (in Chinese)
- [6] Dijkstra E W. A note on two problems in connection with graphs[J]. Numer. Math, 1959, 1: 269- 271.
- [7] E Q V Martins, M M B Pascoal. A new implementation of Yen's ranking loopless paths algorithm[OL]. <http://www.mat.uc.pt/~martal/research.html>
- [8] 黄佳庆, 杨宗凯, 杜旭. 第 k 条最大可用带宽路径算法[J]. 计算机学报, 2004, 27(3): 1- 6.
Huang Jiaqing, Yang zongkai, Du Xu. Kth Widest Available Bandwidth path Algorithm[J]. Chinese Journal of computers. 2004, 27(3): 1- 6. (in Chinese)
- [9] Dean H Lorenz, Ariel Orda. QoS routing in networks with uncertain parameters[J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 1998, 6(6): 768 - 778.
- [10] Roch A Guerrin, Ariel Orda. QoS routing in networks with inaccurate information: theory and algorithms [J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 1999, 7(3): 350- 364.
- [11] 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, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为高性能计算机网络中的路由与性能优化。

E-mail: xgqi@mail.xidian.edu.cn.



刘三阳 男, 1959 年出生于陕西西安, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为最优化、网络算法和网络可靠性。E-mail: liusanyang@263.net.