

# 一种考虑不确定信息的 QoS 单播路由改进算法<sup>\*</sup>

胡仲海 桂志波

(南京邮电学院计算机科学与技术系 南京210003)

**摘要** 考虑到IP网络中存在大量不确定信息及其对多媒体业务的QoS(Quality of Service)的影响,本文设计了一种基于多路径和延迟划分的QoS单播路由改进算法,该算法在保证一定的选径成功率的基础上,有效地降低了算法的时间复杂度;在网络仿真器NS上的仿真分析结果表明了该算法在丢包率和满足端到端延迟约束的概率等性能指标上,具有良好的性能特性。

**关键词** QoS,不确定信息,单播,路由算法

## An Improved QoS Unicast Routing Algorithm Considering Uncertain Information

HU Zhong-Hai GUI Zhi-Bo

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003)

**Abstract** In view of a large amount of uncertain information within IP network and its effects upon QoS (Quality of Service) of multimedia traffic, in this paper, we design an improved QoS unicast routing algorithm based on heuristic mechanism and delay allocation. This algorithm can effectively reduce the time complexity and guarantee definite success rate of path-selection. The simulation results from simulation tool NS show that this algorithm has good performance such as packet loss rate and probability which satisfies end-to-end delay constraint.

**Keywords** QoS, Uncertain information, Unicast, Routing algorithm

## 1 引言

QoS(Quality of Service)路由是网络管理者提高网络对具有QoS要求的业务流的适应能力的重要手段<sup>[1]</sup>,其主要目的是为那些对实时性要求很严格的业务,如语音或图像,找到一条或多条满足QoS参数约束,并对网络资源利用进行优化,以便使得网络性能影响最小的路径。

在现有的QoS路由算法中,大多数算法都依赖于确定的网络状态信息和网络可利用资源。但随着网络规模的日益增大和网络复杂性的日益增加,网络中节点获得的链路状态信息也变得不确定。造成这些不确定性的原因有很多,如不准确的测量和分层网络中的累计信息。在网络状态信息不确定的情况下,基于确定的网络状态信息的QoS路由算法性能会显著退化。因此,网络状态信息的不确定性不容忽视。目前,有关研究已经得到重视<sup>[1~7]</sup>,但总体上还处于起步阶段,国内外有关研究文献尚不多见。关于不确定信息的QoS路由问题的研究思路主要可归结为:通过对网络业务流模型的分析,并借助于相应的网络检测机制和数学统计分析方法,可以在一定程度上描述网络状态信息的概率分布,因此,可以在网络的节点或链路上附加有关状态信息的概率分布函数,然后对QoS路由算法进行改进,从而实现在不确定网络状态信息下的路径选择。本文在文[1]的基础上,研究了基于约束分离启发式算法S1<sup>[1]</sup>的单播改进算法,采用启发式的策略来优化算法性能,降低了算法的时间复杂度,仿真的实验结果表明了该算法的有效性。

本文第2节对问题模型进行概述,第3节对改进算法进行

描述,并对改进算法的复杂度进行讨论,第4节对仿真实验的结果进行讨论,最后作出总结。

## 2 问题模型

用一个有向图 $G=(V,E)$ 来表示网络,考虑一个源节点和目的节点之间单播(Unicast)的情况,其中 $V$ 表示网络中节点的集合, $E$ 表示网络中链路的集合,有 $N=|V|,M=|E|,|P|$ 表示路径 $P$ 上链路数,由于网络状态信息的不确定性,用 $f_l(d)$ 表示链路 $l$ 保证延迟绑定为 $d$ 的概率,这些概率分布可通过网络流量模型和基于测量的统计分析方法得到,本文对此不着重讨论,而是假设这些概率分布已存在,且这些概率分布服从 $(\alpha_l, \alpha_l + \beta_l)$ 上的均匀分布并且相互独立,其中 $\alpha_l$ 表示链路 $l$ 上的延迟下限, $\beta_l$ 表示链路 $l$ 上的延迟变化范围。

对于一个给定的QoS请求 $R=(s,t,D)$ ,其中 $s,t$ 和 $D$ 分别表示请求 $R$ 的源节点,目的节点和 $R$ 所要求的端到端延迟。我们用 $\pi_D(P)$ 表示从源节点 $s$ 到目的节点 $t$ 的路径 $P$ 上端到端延迟绑定为 $D$ 的概率。对于不确定信息下的QoS路由问题,其目标是找到一条路径 $P^*$ 和一个划分 $S_D^*(P) = \{D_i^*\}_{i \in P}$ ,且 $\sum_{i \in P} D_i^* \leq D$ ,使得对于任何路径 $P$ 而言都有: $\pi(S_D^*(P^*)) > \pi(S_D^*(P))$ 。由于该问题为NP难问题<sup>[2]</sup>,因此,本文中,改进算法(Improved Algorithm)的目标是求得对该问题的次优解。

## 3 算法概述

针对以最大概率满足延迟约束的QoS路由问题,我们按

<sup>\*</sup>基金项目:江苏省高校自然科学基金资助项目(01KJB510001);江苏省基础研究计划自然科学基金资助项目(BK2001124)。胡仲海 硕士研究生,目前研究方向为不确定信息下的QoS路由研究;桂志波 博士后,副教授,研究方向为高速业务流的建模与性能分析、高性能通信网络的QoS实现方法与技术研究。

照顺序筛选法的思路,首先寻找一个路径集合,其中的路径为不同跳数下延迟最小的路径和  $K(K \geq 2)$  条延迟最小的路径,再对集合中的路径逐一进行  $\pi_D(P)$  的计算,最后选出具最大  $\pi_D(P)$  的路径。

本文所设计的改进算法首先利用 Bellman-ford 算法找出不同跳数下延迟最小的路径放入备选路径的集合中,再找出  $K(K \geq 2)$  条延迟最小的路径放入备选路径的集合中,然后对这些备选路径逐一进行延迟划分,从中找出  $\pi_D(P)$  最大的路径。对于一条路径而言,  $\pi_D(P)$  定义如式(1)所示,其中  $D_l$  为分配给链路  $l$  的延迟值。

$$\pi_D(P) = \prod_{l \in P} \left( \frac{D_l - \alpha_l}{\beta_l} \right)^{|P|} \quad (1)$$

### 3.1 算法描述

输入:网络拓扑图及网络状态信息  $G=(V, E)$  和一个 QoS 请求  $R=(s, t, D)$ 。

输出:在备选路径集合中,以最大  $\pi_D(P)$  满足 QoS 请求  $R=(s, t, D)$  的路径。

Step 1:以链路上的延迟下限为计算参数,利用 Bellman-ford 算法找出不同跳数下延迟最小,且无环路的路径,并放入备选路径集合中。在该步骤中用到的数据结构如下,weight[k][j]记录从源节点  $s$  至节点  $j$  的路径延迟下限;path[k][j]记录从源节点  $s$  至节点  $j$  的路径;morg[i][j]记录相邻节点  $i$  和  $j$  之间的链路延迟下限。

```

Initialize-sin gle-source(G, t)
for(k=1; k<N; k++)
do for each edge (i, j) ∈ E
if(weight[k][j]<weight[k-1][i]+morg[i][j])
if(there is no loop in paths→i→j)then{
weight[k][j]=weight[k-1][i]+MORG[i][j]
path[k][j]=i
    
```

Step 2:以链路上的延迟下限为计算参数,利用 Eppstein 算法<sup>[3]</sup>来确定  $K$  条备选路径放入已有的备选路径集合中,并去除重复的路径。

Step 3:对集合中的备选路径逐一进行延迟划分<sup>[2]</sup>,得出各路径上的  $\pi_D(P)$ 。其中  $\max\_pr$  表示当前最大  $\pi_D(P)$ ,  $\max\_pr\_hops$  表示具最大  $\pi_D(P)$  路径的跳数。

```

max_pr=0; max_pr_hops=0;
do for each path ∈ {candidate paths}
if(∑_{l ∈ P} α_l > D) then fails
1/P (D - ∑_{l ∈ P} α_l) → δ
D_l ← α_l + min(δ, β_l)
Repeat until ∑_{l ∈ P} D_l = D {
{l ∈ P; δ ≤ β_l} → R
δ + 1/|R| (D - ∑_{l ∈ P} D_l) → δ
α_l + min(δ, β_l) → D_l}
π_D(p) = ∏_{l ∈ P} (D_l - α_l / β_l)^{|P|}
f(π_D(P) > max_pr)
{max_pr = π_D(P);
max_pr_hops = hops(P)}
else if (π_D(P) == max_pr) then
{if(hops(P) < max_pr_hops
then
{max_pr = π_D(P); max_pr_hops = hops(P)}}
    
```

Step 4:从备选路径的集合中,输出具有最大  $\pi_D(P)$  的路径。

### 3.2 复杂度分析

该算法的第一步用 Bellman-ford 算法实现,其复杂度为  $O(N \cdot M)$ ,第二步采用 Eppstein 算法,其复杂度为  $O(M + N \log N + K \log K)$ ,第三步为延迟划分,其时间复杂度为  $O(|P|)$ ,最后一步的时间复杂度为  $O(1)$ ,可知,由于  $|P| < M$ ,因此该算法的时间复杂度为  $O(N(M + \log N) + K \cdot \log K)$ 。

文[1]的启发式算法 S1 时间复杂度为  $O(N^2 \cdot M \cdot (\log(N \cdot D \cdot \max_{l \in E} \beta_l)))$ ,而文[2]的 Gen-U-OP-MP 算法时间复杂度为  $O(M^2 \cdot D)$ ,这两种算法的时间复杂度都与延迟约束  $D$  有关,在延迟约束非常大的情况下,算法的性能将急剧恶化。与这两种算法相比,改进算法的时间复杂度与延迟约束无关,只与网络拓扑结构和预选定的  $K$  值有关。对于实际的网络而言,网络拓扑结构的变化速度远小于延迟请求的变化速度,因此该改进算法的性能比上面两种算法更趋于稳定。

## 4 仿真实验

为了更好地评估改进算法的性能,本文分别在不同规模的网络环境下,基于网络仿真器 NS 测试和比较4种用于处理不确定信息的 QoS 单播路由算法,即:约束分离启发式算法 S1 (Split-Constraints Heuristics S1 Algorithm 以下简称为 S1 Algorithm)<sup>[1]</sup>、随选路由算法 (Randomized Routing Algorithm)<sup>[5]</sup>、Gen-U-OP-MP Algorithm<sup>[2]</sup>及本文所设计的改进算法 (Improved Algorithm)。

在本次仿真实验过程中,假设网络中的链路延迟服从均匀分布,并分别在不同的延迟请求下考察网络的性能,选用的性能指标分别为丢包率和满足端到端延迟约束的概率,其中丢包率 =  $1 - (\text{成功到达目的端包的数目} / \text{总发包数目})$ ,满足端到端延迟约束的概率为满足各链路延迟约束概率的乘积,我们用  $\pi_D(P)$  表示满足端到端延迟约束的概率。对于 Randomized Routing Algorithm 而言,由于其不存在概率计算问题,故不考虑其满足端到端延迟约束的概率。对于 Randomized Routing Algorithm 和 Improved Algorithm 而言,选取  $K = 5$ 。

图1给出了在节点数为20,分别采用四种算法 (Randomized Routing Algorithm、S1 Algorithm、Gen-U-OP-MP Algorithm 和 Improved Algorithm) 时网络运行的丢包率变化情况。从图1中可看出,随着端到端延迟约束的增大,Randomized Routing Algorithm 的丢包率下降速度弱于 S1 Algorithm、Gen-U-OP-MP Algorithm 和 Improved Algorithm,这是因为 Randomized Routing Algorithm 在  $K$  条满足约束条件的路径中,每次并不会选出最优的路径作为路由,而其他三种算法以满足端到端请求的概率为选径标准;同时可以看出,S1 Algorithm、Gen-U-OP-MP Algorithm 和 Improved Algorithm 在节点数为20的网络中,丢包率变化曲线非常接近,几乎重叠。

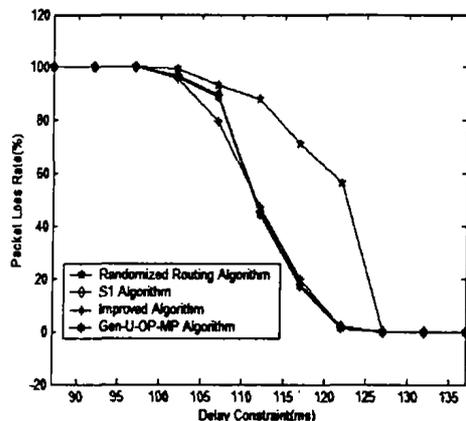


图1 四种算法在节点数为20的网络中的丢包率

图2给出了在节点数为20,S1 Algorithm、Gen-U-OP-MP Algorithm 和 Improved Algorithm 的  $\pi_D(P)$  变化情况。从图2

可以看出,这三种算法的  $\pi_D(P)$  随着端到端延迟约束的增大而增大,但 Improved Algorithm 的  $\pi_D(P)$  优于 S1 Algorithm 和 Gen-U-OP-MP Algorithm。

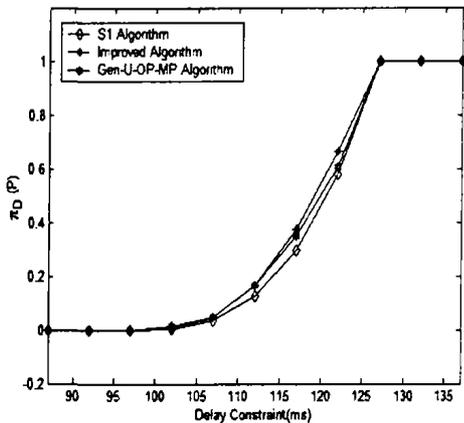


图2 三种算法在节点数为20的网络中的  $\pi_D(P)$

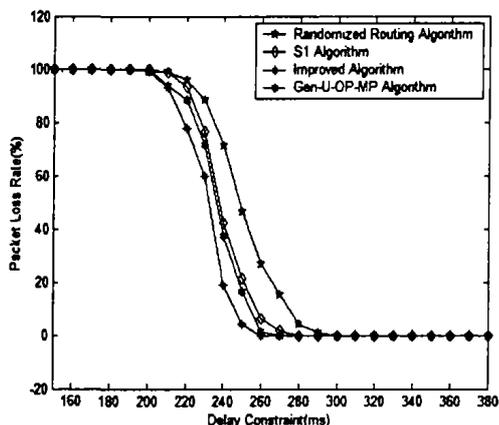


图3 四种算法在节点数为50的网络中的丢包率

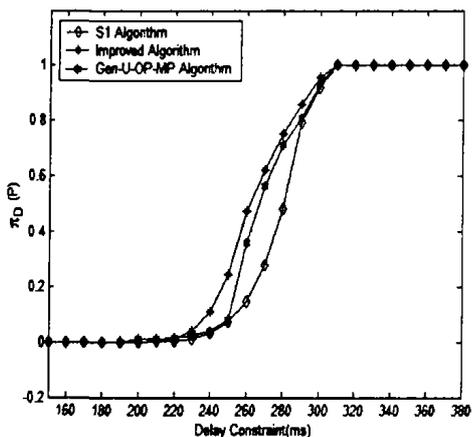


图4 三种算法在节点数为50的网络中的  $\pi_D(P)$

图3给出了在节点数为50,分别采用四种算法(Randomized Routing Algorithm,S1 Algorithm,Gen-U-OP-MP Algorithm 和 Improved Algorithm)时网络运行的丢包率变化情

况。而图4给出了在节点数为50,S1 Algorithm、Gen-U-OP-MP Algorithm 和 Improved Algorithm 的  $\pi_D(P)$  变化情况。从图3可以看出,Improved Algorithm 的丢包率的下降速度比其他三种算法更快,说明该算法在网络规模较大的情况下,可以保证获得较低的丢包率。结合图4,可以看出,在网络规模较大的情况下,Improved Algorithm 可以计算出具更大  $\pi_D(P)$  的路径,从而能保证选径的可靠性,这也是采用 Improved Algorithm 可以使网络获得较低丢包率的主要原因。

小结 具不确定信息的 QoS 路由算法在提高 QoS 路由选径的可靠性中起关键作用,因此对它进行研究具有重要意义。本文设计了一种启发式的有关 QoS 单播路由的改进算法,该算法以满足端到端延迟约束的概率作为选径的标准,采用启发式的策略来解决在链路延迟服从均匀分布的前提下,寻找以较大概率满足端到端延迟约束的 QoS 路由问题,算法的时间复杂度为  $O(N(M+\log N)+K \cdot \log K)$ 。建立了一个网络仿真环境,并与三种经典的处理不确定信息的 QoS 单播路由算法进行比较以评价本文所设计的改进算法的性能。在不同网络规模下的仿真结果表明,本文所设计的改进算法可以有效降低网络运行过程中的丢包率,更好地适应了实际动态变化的网络环境。

当前,具不确定信息的 QoS 路由算法研究是有关高性能 Internet QoS 实现的一个重要且活跃的研究方向,现阶段虽然已有一些重要成果,但仍然存在许多值得深入研究的问题。对单播情况下的不确定信息的 QoS 路由算法进行进一步优化,以及在多播条件下对具不确定性信息的 QoS 路由问题的研究将是下一阶段我们研究的重点。

### 参考文献

- 1 Gu'erin R,Orda A. Qos routing in networks with inaccurate information: theory and algorithms. IEEE INFOCOM, Kobe Japan. 1997. 75~83
- 2 Lorenz D H,Orda A. Qos routing in networks with uncertain parameters. IEEE/ACM Trans. Networking,1998,6:768~778
- 3 Eppstein D. Finding the k Shortest Paths. Foundations of Computer Science,1994 Proceedings. 1994. 154~165
- 4 Ergun F,Sinha R,Lisa Z. QoS routing with performance-dependent costs. The Conf. on Computer Communications, the 19th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, Tel Aviv, Israel, March, 2000, 1:137~146
- 5 Apostolopoulos G,Guerin R,Kamat S,Tripathi S. Improving QoS Routing Performance Under Inaccurate Link State Information. In:Proc. of the 16th Intl. Tele-traffic Congress, June, 1999. 7~11
- 6 冯径,顾冠群. 基于不确定参数的 QoS 路由研究. 计算机研究与发展,2002,39(5):533~539
- 7 Wang Jian-Xin,Chen Song-Qiao,Chen Jian-Er. An Effective Randomized QoS Routing Algorithm On Networks with Inaccurate Parameters [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2002,17(1): 38~46