

# 一种高效的分布式 QoS 路由算法的研究

史 琰 刘增基 盛 敏

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

**摘 要:** 该文提出了一种以带宽为度量标准,改进的分布式 QoS 路由算法,它不仅继承了分布式 QoS 路由算法简单、链路开销小的优点,而且可以减少网络处于重负荷时所产生的“资源碎片”,接纳更多的业务。同时,通过确定本算法的启动门限,可以在保证算法性能的同时,大大降低引入的路径建立时延。计算机仿真结果证明了这种算法的正确性和高效性。

**关键词:** 分布式 QoS 路由, 资源碎片, QoS 连接时延, 带宽接纳率

**中图分类号:** TN393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-5896(2005)04-0634-04

## Study of an Efficient Distributed QoS Routing Algorithm

Shi Yan    Liu Zeng-ji    Sheng Min

(ISN National Key Laboratory, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract** A novel distributed QoS routing algorithm, the metric of which is bandwidth, is presented in this paper. It not only keeps the merits of simplicity and low link overhead in traditional distributed QoS routing algorithm, but also can reduce resource fragments and admit more services into a network with heavy load. The high performance of this algorithm accompanies some delay during path setup. But the performance remains with great reduction in this delay when the start threshold of this algorithm is considered. The extensive simulation results also indicate its correctness and efficiency.

**Key words** Distributed QoS routing, Resource fragment, QoS routing delay, Bandwidth admission ratio (BAR)

### 1 引言

随着因特网的发展,接入因特网的用户业务也趋于多样化,并具有明确的 QoS 要求,如何充分地利用网络资源来满足多样化的 QoS 需求,这就引出了网络的 QoS 问题<sup>[1]</sup>。许多研究人员在这个领域内做了大量富有成效的工作,提出了许多对于解决 QoS 问题非常有帮助的模型、协议、策略、算法和调度机制,大量的文献对这些工作进行了描述<sup>[1-3]</sup>。QoS 路由的任务就是在网络中选择一条路径,这条路径可以满足某些度量标准(如带宽、时延、时延抖动和花费)的约束条件。大量研究表明:为了使网络更好地支持多媒体通信,QoS 路由是一种至关重要的机制<sup>[4]</sup>。本文提出了一种以带宽为度量标准的分布式 QoS 路由算法,它不仅继承了传统的分布式 QoS 路由算法的优点,而且在网络处于重负荷时允许接纳更多用户业务,其连接时延并没有显著的增加。

本文是按照以下的方式组织的。第 2 节对分布式 QoS 路由算法中存在的问题作简单的介绍。在第 3 节中,通过对

分布式 QoS 路由算法的理论分析,剖析资源碎片的原因,并提出可以克服资源碎片问题的改进算法。第 4 节描述算法的计算机仿真,并对仿真结果进行了分析,第 5 节对全文进行总结。

### 2 分布式 QoS 路由算法的特点与问题

相对源 QoS 路由算法而言,分布式 QoS 路由算法不需要每个网络结点维护全网的状态信息,而只需要掌握本结点及相邻链路的状态信息。它的路由过程不是在源结点完成,而是经过结点逐跳计算完成。可见,分布式 QoS 路由算法不仅回避了复杂的路径计算问题<sup>[5,6]</sup>,而且节省了维护全网状态的处理器时间<sup>[2]</sup>。

文献[4]提出了一种基于 flooding 的分布式 QoS 路由算法。在用户业务发送前,源结点发起 QoS 连接请求,在每个端口上进行 QoS 测试,找出既路径可达,又满足 QoS 指标的输出端口,并将此请求向通过测试的端口转发,直至该连接请求到达目的结点。

这种简单的分布式 QoS 路由算法有明显的缺点。如图 1 所示，结点  $S$  要与结点  $D$  建立带宽要求为 4 的连接，根据上述的算法，可能选择  $P_1$  为该连接的路径。如果这时结点  $S$  又要与结点  $D$  建立带宽需求为 5 的连接，虽然网络中仍有较多空闲的带宽，却无法找到满足 QoS 要求的路径。这就是“资源碎片”问题，网络中虽然有较多的可用资源，但是由于这些资源不恰当地分散在某些结点上，而无法为用户服务，最终导致服务质量下降。

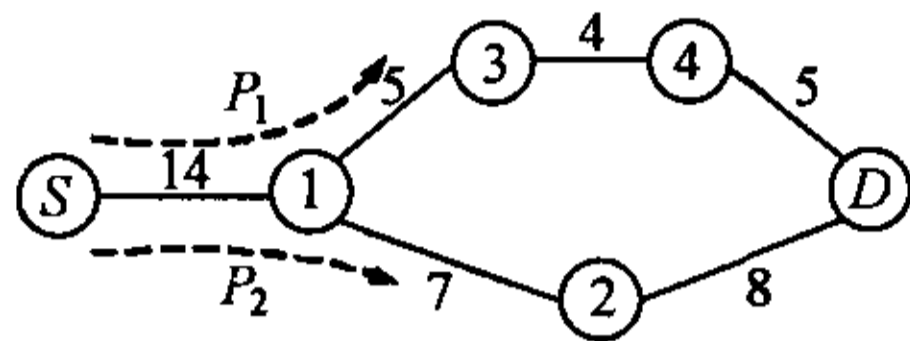


图 1 分布式 QoS 路由算法示意图

为了解决分布式 QoS 路由算法导致的资源碎片的问题，文献[7]提出了一种基于“延时”的改进算法，它根据各条链路的 QoS 测试结果，在转发 QoS 请求消息时作相应的延时。这种方法会引入相应的 QoS 连接时延，最多时甚至增加 50%。

### 3 改进的 QoS 路由算法分析

Ma 和 Steenkiste<sup>[8]</sup>证明了当网络结点使用 WFQ-like 的分组调度算法时，端到端时延、时延抖动和队列长度等都是带宽的函数，而不再彼此独立。因此，本章以带宽为度量标准，对分布式 QoS 路由算法进行了详细分析，并提出相应的改进算法。

#### 3.1 QoS 测试函数

在网络  $N = (V, E)$  中， $l \in E$  为网络  $N$  中一条链路， $a$  表明  $l$  上的可用带宽。对于一个带宽要求为  $r$  的 QoS 连接，此链路 QoS 测试函数值如式(1)所示。

$$Q(l, r) = \begin{cases} 1, & a \geq r \\ 0, & a < r \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)， $N$  中任意路径  $p$  的 QoS 测试函数值由式(2)表示，其中  $l$  为  $p$  上的链路。而且，根据带宽的凹性<sup>[6]</sup>，可以得到式(3)。

$$Q(p, r) = \min_{l \in p} (Q(l, r)) \quad (2)$$

$$Q(p, r) = 1 \Leftrightarrow Q(l, r) = 1, \quad \forall l \in p \quad (3)$$

在实际的网络中，满足某个带宽要求的路径不只一条，这些路径的 QoS 测试结果都是 1，但其中某些路径是较优的，而某些路径可能会造成资源碎片。因此，仅仅使用 QoS 测试函数值不足以区分路径的优劣，有必要引入新的参数。

#### 3.2 路径能力和链路能力的概念

首先假定：如果一条路径（或链路）满足用户带宽要求的概率越大，其能力就越强。可见，链路能力和路径能力是与带宽需求的分布有关。假设用户的带宽需求  $r$  服从概率密度函数为  $f(r), r \in [B_{\min}, B_{\max}]$  的分布。在实际的网络应用中，用户业务的带宽要求确实存在某种分布特性<sup>[9]</sup>，因而这种假设是合理的，则链路  $l$  和路径  $p$  的能力如式(4)所示。

$$\left. \begin{aligned} \underline{Pw}(l, r) &= P(Q(l, r) = 1) \\ \underline{Pw}(p, r) &= P(Q(p, r) = 1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)中，得到路径能力与链路能力的关系，如式(5)所示。

$$\underline{Pw}(p, r) = P(\min_{l \in p} (Q(l, r)) = 1) \quad (5)$$

不失一般性，假设该路径上各条链路的可用带宽分别为  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ，且满足  $a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n$ 。将式(3)代入式(5)，得到式(6)。

$$\begin{aligned} \underline{Pw}(p, r) &= P(Q(l, r) = 1, \forall l \in p) = P(a_1 \geq r, a_2 \geq r, \dots, a_n \geq r) \\ &= P(a_1 \geq r)P(a_2 \geq r, \dots, a_n \geq r | a_1 \geq r) = P(a_1 \geq r) \\ &= \min_{l \in p} (P(Q(l, r) = 1)) = \min_{l \in p} (\underline{Pw}(l, r)) \end{aligned} \quad (6)$$

从式(6)可知，一条路径的能力等于该路径上的最小链路能力，因此在以带宽为度量标准的 QoS 路由过程中，核心问题就是确保网络中的每条链路具有较好的链路能力。当  $\underline{Pw}(l, r) = 1$  时， $l$  的可用带宽可能远大于  $B_{\max}$ ，说明链路的带宽并没有被充分利用。因此，定义参数  $\beta(l, r)$  描述链路  $l$  的带宽浪费比率，如式(7)所示。

$$\beta(l, r) = \int_a^{B_{\max}} \frac{a}{r} f(r) dr \quad (7)$$

由式(7)可知： $a \geq B_{\max}$  或  $a = 0$  时， $\beta(l, r) = 0$ ； $B_{\min} < a < B_{\max}$  时， $\beta(l, r) > 0$ 。在定义了链路能力  $\underline{Pw}(l, r)$  和链路的带宽浪费比率  $\beta(l, r)$  后，我们构造参数  $K(l, r)$  来描述一条链路的优劣。

$$K(l, r) = \frac{1 + \underline{Pw}(l, r)}{\beta(l, r)} = \left( 1 + \int_{B_{\min}}^a f(r) dr \right) / \int_a^{B_{\max}} \frac{a}{r} f(r) dr \quad (8)$$

$K(l, r)$  的值分为 3 种情况：(1)  $B_{\max} \leq a$  时， $K(l, r)$  的值很大，表明链路可以接受任何带宽要求，而且不存在资源浪费；(2)  $B_{\min} \leq a < B_{\max}$  时， $K(l, r)$  的值小于  $B_{\max} \leq a$  时的情况，表明可以接受某些带宽要求，但也存在资源浪费；(3)  $a < B_{\min}$  时， $K(l, r)$  为一个较大的常数，这时虽不能接受任何带宽要求，但链路的带宽浪费比率非常小。所以，当链路可用带宽大于、等于最大带宽需求时，或可用带宽接近 0 时， $K(l, r)$  值都非常大，分别表明链路能力很强和链路带宽

的利用率都非常高,这是资源分配过程中希望达到的目标,因此  $K(l,r)$  可以用来衡量 QoS 路由过程中链路的优劣程度,作为路由选择的标准。

### 3.3 改进的 QoS 路由算法

在文献[7]中所描述的分布式 QoS 路由算法中,对 QoS 连接请求进行延时的目的是为了选择最优链路,如果链路在接受带宽请求后的可用带宽仍然大于  $B_{\max}$ ,即  $K(l,r)$  值不变,表明此链路是最优的,则不必对此请求进行延时。因此,  $B_{\max}$  可以作为改进算法的延时启动门限,只有当链路的可用带宽少于  $B_{\max}$  时,才对 QoS 连接请求进行延时。改进算法的 QoS 连接延时如式(9)所示。

$$D(l,r) = \begin{cases} 0, & a-r \geq B_{\max}, \text{或 } a-r = 0 \\ \frac{A\tau}{K(l,r)}, & 0 < a-r < B_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中的  $A$  为调节常数,取值范围为 0.02~0.05,其作用为:保证算法性能的同时又不对 QoS 连接请求作过多延时。 $\tau$  为 QoS 连接请求在一条链路上的最大传输时间。用  $B_{\max}$  作为 QoS 连接请求的启动门限,在大部分情况下 ( $a-r \geq B_{\max}$ ),不会对 QoS 连接请求进行延时,因此它在提升路由算法性能的前提下,还可以减少 QoS 连接的平均时延。

改进算法的流程如图 2 所示。本算法与传统的分布式 QoS 路由算法区别在于 QoS 连接请求的处理过程不同,因此图 2 只描述了改进算法中对 QoS 连接请求的处理过程。

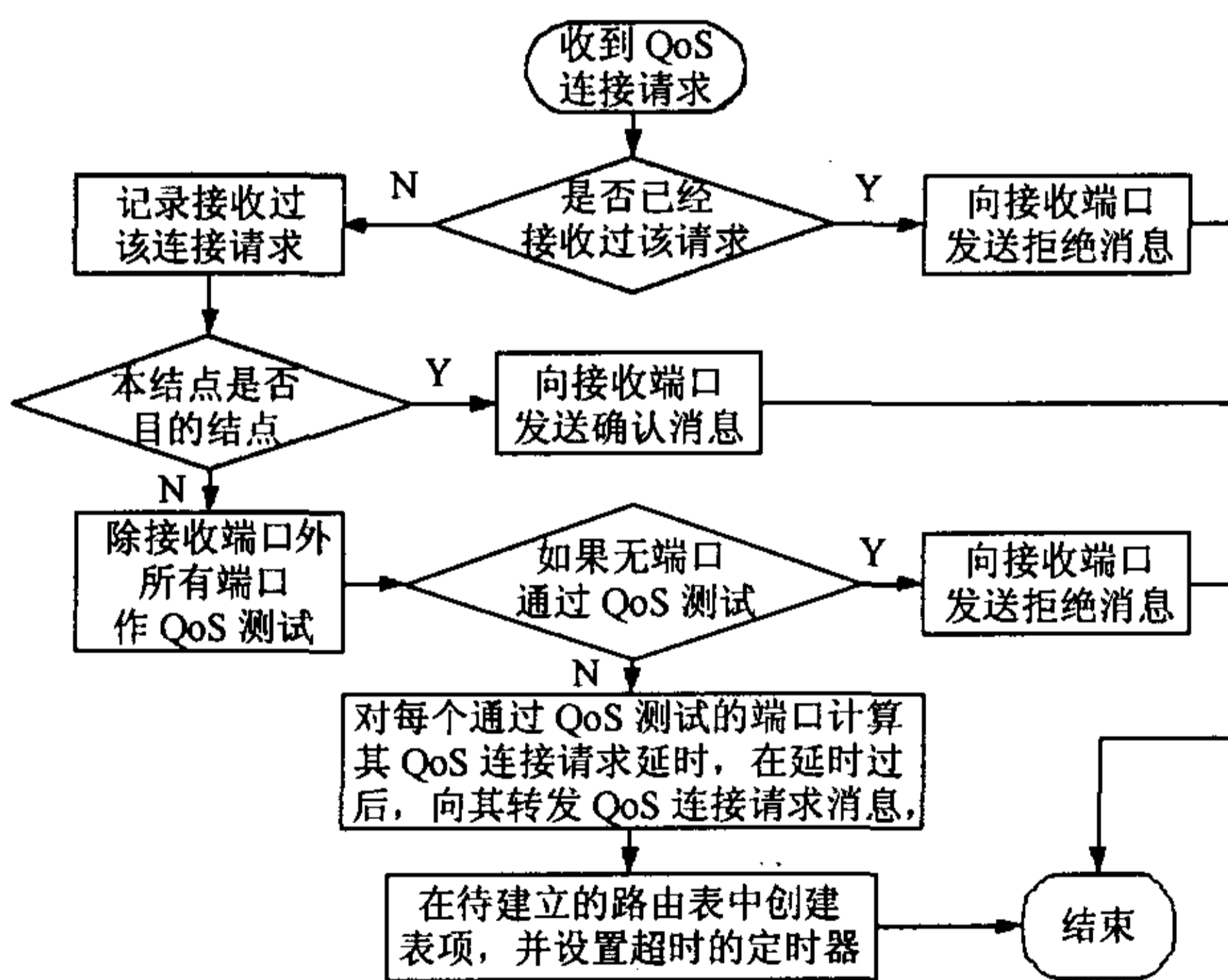


图 2 改进的分布式 QoS 路由算法流程图

## 4 计算机仿真及分析

### 4.1 评价指标

以带宽为度量标准的 QoS 路由算法的性能指标有:连接成功率,带宽接纳率 (BAR)<sup>[7]</sup>和连接建立时延。带宽接纳率是指网络所接纳的总带宽需求与用户向网络所提交的总

带宽需求之比。通过连接成功率和带宽接纳率两个参数,就可以比较全面地描述以带宽为度量标准的 QoS 路由算法的优劣程度。此外, QoS 的连接时延也是一个重要的指标,用户总是希望在提出 QoS 要求后立刻得到响应,因此 QoS 连接时延越小越好。

### 4.2 仿真环境介绍

仿真网络的结点数为 100,拓扑由计算机生成,网络的平均结点度为 4。结点间链路双向对称,且带宽均为 155Mbps (OC-3)。假设链路的可靠性很高,所有的 QoS 路由控制信息都不会丢失,而且具有最高的优先级。用户业务的带宽需求分别服从 64kbps 到 1500kbps 间的均匀分布、指数分布和爱尔兰分布 (其概率密度函数为  $(x/95)^{(7-1)} e^{-x/95} / (95 \times (7-1)!$ ),其中指数分布和爱尔兰分布在取值区间内的概率达到 99.9%。这种假定也是合理的,因为这个带宽范围可以满足从分组话音到实时视频等多媒体应用的带宽要求。

通过第 3 节的分析可知:只有当网络处于重负荷时,改进算法才起作用并能够提升 QoS 路由的性能。因此,设定每个结点进入网络的流量参数为:业务到达间隔服从均值为 2s 的指数分布,目的结点在网络中均匀地选取,连接的持续时间服从均值为 300s 的指数分布。

### 4.3 仿真结果与分析

图 3,图 4 和图 5 分别表示在相同到达率条件下,带宽接纳率、连接成功率和 QoS 连接时延随启动门限变化的曲线。

从图 3 可以看出,在不同的分布下,虽然 QoS 路由算法的性能有差异,但是当延时启动门限为 1500kbps 时,可以获得该分布下的最好性能,这个结果与第 3 章的结论吻合。我们还注意到,在相同的延时启动门限下,具有不同分布的带宽请求导致带宽接纳率和连接成功率的性能差异。这是由于:指数分布带宽请求的均值为 250kbps,在相同的网络状态下其带宽要求较容易被接纳。而爱尔兰分布的均值为 650kbps,均匀分布的均值为 782kbps,所以其连接成功率下

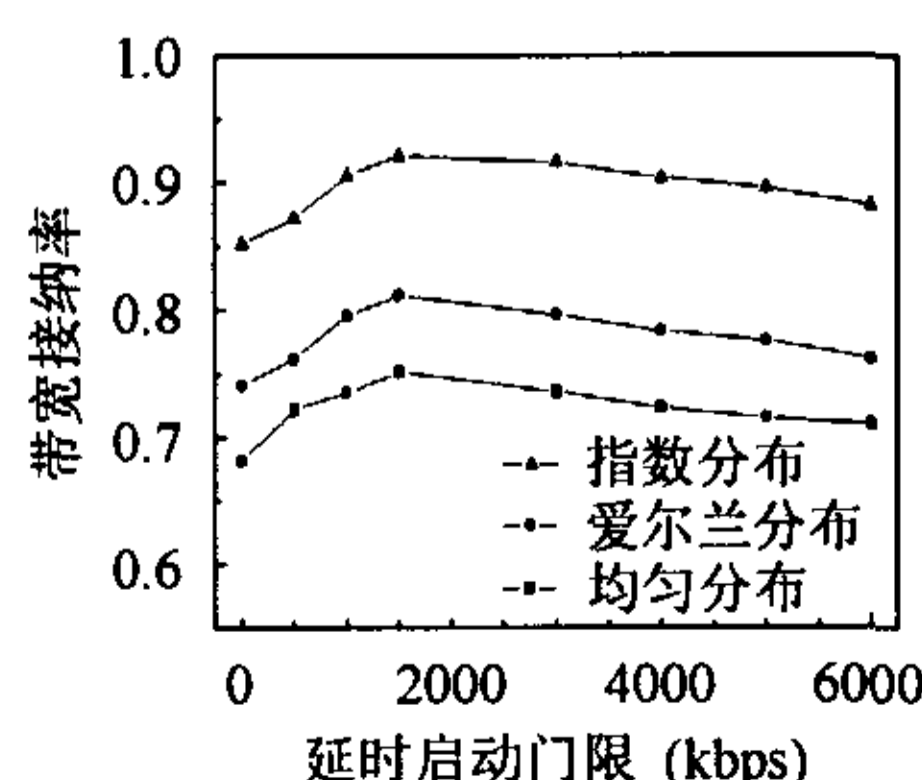


图 3 带宽接纳率随启动门限变化曲线

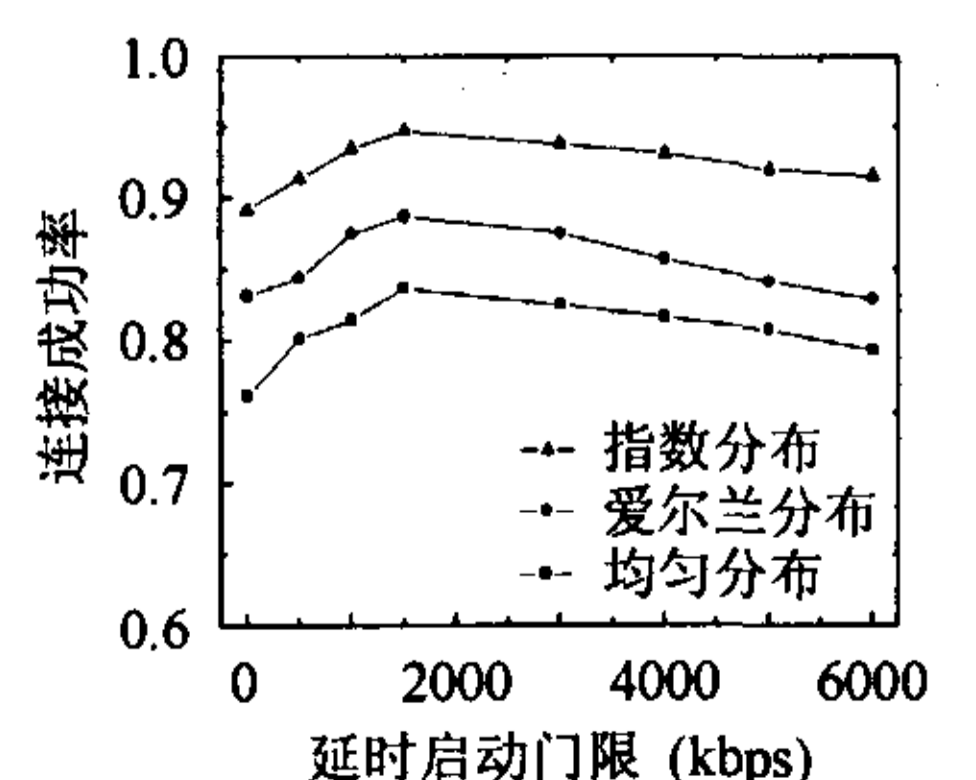


图 4 连接成功率随启动门限的变化曲线

降, 最终导致带宽接纳率下降。

从图 5 可以看出, 延时启动门限为 0 时, 其平均的 QoS 连接时延最小。随着延时启动门限增大, QoS 的连接时延呈上升的趋势, 但在上升至 1500kbps 时, QoS 连接时延并没有增加更多。另外, 随着启动门限的增加, 带宽接纳率和连接成功率并没有增加, 反而下降, 这于直观的想法相悖。经分析, 由于网络处于较重的负荷, 导致 QoS 连接的平均时延增加, 从而在这段时间内会有更多的连接请求产生, 是带宽的“竞争”加剧, 最终导致连接成功率和带宽接纳率的降低。

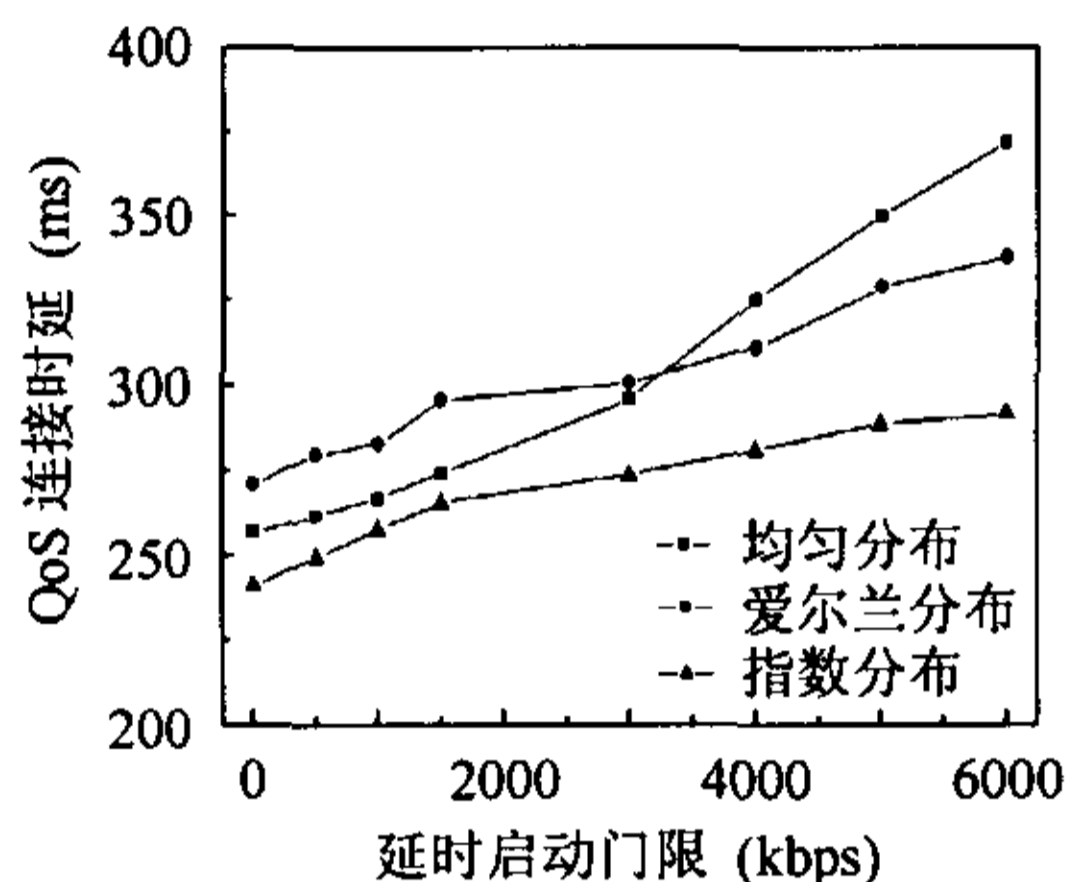


图 5 连接时延随启动门限的变化曲线

## 5 结束语

本文通过对以带宽为度量标准的分布式 QoS 路由算法进行理论分析, 提出了一种改进的分布式 QoS 路由算法, 这种算法不仅可以提高 QoS 路由算法的带宽接纳率和连接成功率, 而且相对于传统的分布式 QoS 路由算法, 其连接时延并没有增加很多。计算机仿真结果表明, 该分布式 QoS 路由算法具有较高的性能指标, 可以在网络处于重负荷时, 为用户提供更好的服务质量。

## 参 考 文 献

[1] Xiao X P, Ni L M. Internet QoS: a big picture. *IEEE Network*, 1999, 13(2): 8 - 18.

- [2] Hao F, Zegura E W. Scalability techniques in QoS routing. Tech. Rep. GIT-CC-99-04, College of Computing, Georgia Institute of Technology, 1999.
- [3] Apostolopoulos G, Guerin R, Kamat S. Implementation and performance measurements of QoS routing extensions to OSPF. *INFOCOM'99*, New York, 1999: 680 - 688.
- [4] Song J, Pung H K, Jacob L. A multi-constrained distributed QoS routing algorithm. *IEEE International Conference on Networks (ICON 2000)*, Singapore, 2000: 165 - 171.
- [5] Costa L H M K, Fdida S, Duarte O C M B. Distance-vector QoS-based routing with three metrics. *Lecture Notes in Computer Science 1815*, Paris, 2000: 847 - 858.
- [6] Wang Z, Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications. *IEEE J. on SAC.*, 1996, 14(7): 1228 - 1234.
- [7] Sarangan V, Ghosh D, Acharya R. Distributed QoS routing for multimedia traffic. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (III)*, San Francisco, 2000: 1631 - 1634.
- [8] Ma Q, Steenkiste P. Quality-of-service routing for traffic with performance guarantees. *Proc. IFIP Fifth International Workshop on Quality of Service*, New York, 1997: 115 - 126.
- [9] Tang X, Zhang F, Chanson S T. Streaming media caching algorithms for transcoding proxies. *Proc. of the 31st International Conference on Parallel Processing (ICPP)*, Vancouver, Canada, 2002: 287 - 295.

史 琰: 男, 1975 年生, 博士生, 当前主要的研究方向为下一代网络中路由算法、QoS 关键技术的研究。

刘增基: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 中国通信学会会士, 当前主要从事宽带通信网络技术的研究。

盛 敏: 女, 1975 年生, 博士, 研究方向为移动 Ad Hoc 网络中的路由算法和多址接入协议。