

# 单播和多播 QoS 路由问题研究及解决方法<sup>\*</sup>

张 静 汤红波 李 鸥 胡捍英  
(解放军信息工程大学 郑州450002)

**摘 要** 当前的互联网只能提供“尽力而为”的发送服务,使网络层无法控制传输质量,因此,为不同应用提供不同 QoS 的服务是网络用户的基本要求和互联网面临的重要研究课题。近几年,有关 IP QoS 的讨论焦点是 Intserv、Diff-serv、MPLS 等服务模型和框架,在资源受限的网络环境下,这些解决方案实现的基础是 QoS 路由。论文的目的是在明确 QoS 路由重要性的基础上,通过建立网络模型和度量合成规则,详细分析单播和多播可能遇到的单度量的基本路由问题和多度量的组合路由问题,并给出解决这些路由问题的方法和计算复杂度,这对于设计和实现可行的 QoS 路由协议或算法有一定参考价值。

**关键词** QoS 路由,度量,约束,剪枝,NP 完全问题

## Research and Solutions about Unicast&Multicast QoS Routing Problems

ZHANG Jing TANG Hong-Bo LI Ou HU Han-Ying  
(Information Engineering University,Zhengzhou 450002)

**Abstract** Since Internet can only provide “best-effort” services currently, network layer can not control the transmission quality. So it is network customers’ basic requirements and also an important research task faced by Internet to provide different QoS for different applications. In the past several years, much discussions focused on the QoS frameworks of Intserv, Diffserv and MPLS. Under the condition of limited network resources, those frameworks’ basis is QoS routing. After realizing the importance of QoS routing and setting up network model and composition rules of the metrics, the object of the paper is to analyse in detail the basic single metric routing problems and the composite multiple metrics routing problems faced probably by unicast or multicast. Then the solutions and their computational complexities of those routing problems are provided. That is significant for designing or realizing QoS routing protocols or algorithms.

**Keywords** QoS routing, Metric, Constraint, Pruning, NP-complete problem

## 1 引言

尽管由于网络技术的发展,极大提高了网络带宽及网络速度,但是随着 Internet 上实时多媒体应用的兴起和快速增长,不仅增加了网络流量,而且改变了以往互联网上的流量性质,使得网络带宽与网络速度依然是一个瓶颈问题,现有的“尽力而为”的服务显然已不能满足需要,因此,在目前有限的带宽资源条件下,研究如何满足应用的 QoS 要求(如:带宽、延时、延时抖动、丢包率、可靠性、安全性等)是现实而有意义的。

虽然 IETF 已经提出了几种基于 QoS 的服务模型和框架,如集成服务(Intserv)、区分服务(Diffserv)、MPLS 等。但是如果在 MPLS 域内使用 OSPF 建立路径时,最短路径可能没有足够的资源满足流的 QoS 要求,也就是说最短路径不一定是最佳的;IntServ 虽然提出为流预留资源,但是如果路径上没有充足的资源,也无法预留;对于 DiffServ 来说,也需要路径能为不同的流聚集提供相应 QoS 要求的服务。由此可见,只有找到(如果存在的话)一个能满足可用资源要求的路径,即 QoS 路由,才能有效地应用 IntServ、DiffServ、和 MPLS 技术,这也是提供 QoS 保证服务的关键。

## 2 QoS 路由

QoS 路由是一种考虑通信流的 QoS 要求的路由机制,根

据网络状态、每个链路的可用资源和其它相关信息,寻找满足用户约束和最优化请求的可行路径。QoS 路由的目标是:

- 动态决定可行路径:为流选择一条可行路径,能满足或至少有可能满足流的 QoS 要求。
- 优化资源利用:QoS 路由通过有效的资源利用,均衡网络负载和提高网络吞吐量。
- 优化路由性能:在过载情况下,QoS 路由要比尽力路由或任何对状态不敏感的路由机制提供更大的吞吐量,和更优的性能。

## 3 网络模型和度量

在分析 QoS 路由问题之前,首先建立 QoS 路由的网络模型,了解度量的特性及其合成规则。

### 3.1 网络模型

网络可以用图  $G(N, A)$  表示,其中:

$N(G)$  是点的集合,表示网络节点,  $n$  是网络的节点数;

$A(G)$  是弧的集合,表示网络链路,  $m$  是链路数;

$(u, v)$  表示节点  $u$  到  $v$  的链路;

$W_i(a)$  表示链路  $a \in A$ , 对于度量  $i$ , 有一个相应的权值  $W_i(a)$ ;

$W(u, v)$  表示在路径  $P = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$  上的链路  $(u, v)$  的权值;

$W(P)$  表示整个路径  $P$  的权值。

<sup>\*</sup>总装预研基金支持(项目名称和基金编需要保密)。张 静 副教授,博士生。

### 3.2 度量

度量在 QoS 方面起重要作用,它不仅定义了网络可以支持的 QoS 类型和应用的 QoS 请求范围,而且必须能够反映网络的基本特征。通信流的 QoS 请求是通过单度量或组合度量来量化和提出的,如果流的 QoS 请求不能映射为单度量或组合度量,那么网络就不能支持该流的 QoS 请求。QoS 路由度量可分为如下三类:

• 加性度量 加性度量符合组合规则:

$$W(P) = W(u_1, u_2) + W(u_2, u_3) + \dots + W(u_{i-1}, u_i)$$

如:延时、延时抖动、开销、跳数等。也就是说,一个路径的加性度量状态是由其路径上所有链路的组合状态所决定。

• 乘性度量 乘性度量符合组合规则:

$$W(P) = W(u_1, u_2) \times W(u_2, u_3) \times \dots \times W(u_{i-1}, u_i)$$

如:可靠性(即成功传输率:1-丢包率)。

• 凹性度量 凹性度量符合组合规则:

$$W(P) = \min(W(u_1, u_2), W(u_2, u_3), \dots, W(u_{i-1}, u_i))$$

如:最常用的剩余带宽或剩余缓存空间。因此, $W(P)$ 就是路径  $P$  上所有链路剩余带宽的最小值或瓶颈带宽。也就是说,一个路径的凹性度量状态是由其瓶颈链路的状态所决定。

度量还可分为路径约束度量和链路约束度量。由于一条路径的凹性度量依赖于该路径上瓶颈链路的值,所以凹性度量是链路约束度量;由于一条路径的加性或乘性度量依赖于该路径上的所有链路的值,所以加性或乘性度量是路径约束度量。

## 4 路由问题

### 4.1 单播路由与多播路由

单播路由是指:已知源节点  $s$  和目的节点  $t$ ,以及 QoS 约束集合  $C$ ,可能还有一个最优化目标,找一条从源  $s$  到目的  $t$  的,满足约束  $C$  的最优可行路径。

多播路由是指:已知源节点  $s$  和目的节点集合  $R$ ,以及 QoS 约束集合  $C$ ,可能还有一个最优化目标,找一个覆盖  $s$  和  $R$  中所有节点的,满足约束  $C$  的最优树。

由此可见,多播路由可以看作是单播路由的更一般情况。无论是单播路由还是多播路由,都会遇到四个基本的路由问题以及由这四个基本路由问题派生而出的组合路由问题。它们的区别之处在于多播路由的最优化和约束是应用于整棵树,而不是单个路径。因此,下面主要针对常用的单播路由讨论其 QoS 路由问题及解决方法,并适时指出多播情况下解决问题的不同复杂度。

### 4.2 基本路由问题

QoS 路由最简单的情况是用单个度量来提出流的 QoS 要求(最优化或约束要求),四个基本的单度量路由问题包括:

• 链路最优路由问题 已知一个网络  $G(N, A)$ ,对于每个链路  $a \in A$ ,有一个凹性度量  $W(a)$ ,找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ ,使得  $W(P)$  最大。

比如找一条在瓶颈链路上有最大可用带宽的路径。链路最优路由问题可以通过改进 Dijkstra's 算法或 Bellman-Ford 算法来解决。在标准的 Dijkstra's 算法中,选择下一跳是根据累积的开销函数,把到集合  $M$  开销最小的节点加入到集合  $M$  中。如果要修改 Dijkstra's 算法标准以解决链路最优路由问题,就是要选择下一个节点加入到集合  $M$ ,使该节点连接到集合  $M$  的带宽最大。

• 链路约束路由问题 已知一个网络  $G(N, A)$ ,对于每

个链路  $a \in A$ ,有一个凹性度量  $W(a)$  和一个约束  $C$ ,找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ ,使得  $W(P) \geq C$ 。

比如找一条瓶颈带宽超过约束值的路径。解决该问题的一种方法是把链路约束路由问题简化为链路最优路由问题,即先寻找最优路径,再检查其是否能满足约束条件(如果网络中确实存在满足约束  $C$  的路径,那么最优路径一定满足约束  $C$ )。另一种方法是拓扑剪枝,即删除带宽小于  $C$  的链路,然后从剪枝后的拓扑中找最短路径,这样,就能找到一条满足链路约束度量 QoS 请求的,但不必是最优的链路约束路由。

• 路径最优路由问题 已知一个网络  $G(N, A)$ ,对于每个链路  $a \in A$  有一个加性度量  $W(a)$ ,找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ ,使得  $W(P)$  最小。

路径最优路由问题的一个典型的例子是最低开销路由,即找一条跳数最少或开销最小或延时最小的路径。路径最优路由问题可以用 Dijkstra's 算法或 Bellman-Ford 算法来解决,为路径约束度量的 QoS 请求找到一条最优路径。需特别指出的是,多播情况下的“树最优路由问题”即为有名的“Steiner 树问题”,有 NPC 复杂度。

• 路径约束路由问题 已知一个网络  $G(N, A)$ ,对于每个链路  $a \in A$  有一个加性度量  $W(a)$  和一个约束  $C$ ,找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ ,使得  $W(P) \leq C$ 。

路径约束路由问题的一个典型的例子是延时约束路由,即找一条延时被限定在一个要求值的路径。该问题也可以直接用 Dijkstra's 算法或 Bellman-Ford 算法来解决,为路径约束度量的 QoS 请求找到一条路径,使其延时或开销低于要求的水平。

上述四个基本路由问题都具有多项式复杂度,即在多项式时间内可以解决。

### 4.3 组合路由问题

单度量不能充分支持用户的 QoS 请求,网络应用所要求的 QoS 通常还需要用组合度量来描述。但是,有些组合度量的路由计算非常复杂,不能实际应用。1996年 Wang 和 Crowcroft 证明了<sup>[2]</sup>两个或多个加性或乘性度量的组和是一个 NPC 问题,唯一有多项式复杂度路由计算的组合度量,就是一个凹性度量(如带宽)与一个其它的度量(通常是延时或跳数)的组合。

目前有一些关于组合度量的研究,这些研究都试图简化其复杂性,如:

• 混合度量(mixed metric): Wang 和 Crowcroft 提出了简单的混合度量思想<sup>[2]</sup>,即定义一个函数,把多个度量作为参数,生成单个度量,作为路由的基础。如:由带宽  $B$ 、延时  $D$  和丢包率  $L$  生成的路径混合度量:

$$f(P) = \frac{B(P)}{D(P) \times L(P)}$$

从上式看出,如果一个路径的混合度量值大,说明在带宽、延时和丢包率方面有较好的选择。但是,混合度量不能包含充分的信息来评估路径是否能满足用户的 QoS 请求。而且混合度量不符合加性、乘性或凹性度量的组合规则。因此,混合度量方法最多只能是一个诱人的启发式方法,在路径选择中做参考。

• 转化为带宽度量:在某些情况下,带宽可以作为单度量来使用, A. Orda 和 A. Sprintson 证明了当一个连接有多个 QoS 要求时,可以把它们转换为带宽要求<sup>[7]</sup>。Guerin 等就提出一个等式把延时约束映射为带宽约束<sup>[8]</sup>。

· 两次最优化(double optimizations): 比如对于2个度量的组合问题, 可以按顺序做两次最优化来把组合问题简化为两个单度量问题, 但是只有当第一次最优化后存在不只一条优化路径时, 才能做第二次最优化。算法 WSP 和 SWP 都采用了此方法。

本文解决组合度量路由问题的主要思路是: 网络剪枝(Pruning)。在链路约束情况下, 路径的度量值往往与最小度量值的链路相同。因此, 如果一个链路没有要求的资源, 比如可用带宽, 那么它就是不可行的链路, 需要从拓扑中剪除。这样可以保证在剪枝后的拓扑中找到的任何路径都能满足链路约束。

#### 多项式复杂度组合路由问题

在下面五个组合问题中, 由于其中一个度量是链路约束度量, 所以可以通过网络剪枝, 去掉不能满足约束的所有链路, 从而把组合问题简化为子图中的单度量问题。

· 链路约束 & 链路最优路由: 已知网络  $G(N, A)$ , 对于每个链路  $a \in A$  有凹性度量  $W_i(a) (i=1, 2)$ , 和一个约束  $C_1$ , 找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ , 使得  $W_2(P)$  最大, 且  $W_1(P) \geq C_1$ 。

比如带宽约束-缓存最优路由。解决该问题首先要进行网络剪枝, 删除不能满足  $W_1(P) \geq C_1$  的链路, 然后在剪枝后的网络中按链路最优路由问题的解决方法, 找到一条使  $W_2(P)$  最大的路径  $P$ 。由于剪枝操作的复杂度与网络的链路数  $m$  成正比, 因此, 链路约束 & 链路最优路由问题是多项式复杂度。

· 多链路约束路由: 已知网络  $G(N, A)$ , 对于每个链路  $a \in A$  有  $k$  个凹性度量,  $W_i(a) (i=1, \dots, k)$ , 和  $k$  个约束  $C_i (i=1, \dots, k)$ , 找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ , 满足  $W_i(P) \geq C_i (i=1, \dots, k)$ 。

比如带宽-缓存约束路由。多链路约束路由问题同样可以简化为链路约束路由问题来解决。

· 链路约束 & 路径最优路由: 已知网络  $G(N, A)$ , 对于每个链路  $a \in A$  有度量  $W_i(a) (i=1, 2)$ , 其中  $W_1$  是凹性度量, 还有约束  $C_1$ , 找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ , 使得  $W_2(P)$  最小, 且  $W_1(P) \geq C_1$ 。

比如带宽约束-延时最小路由。链路约束 & 路径最优路由问题也可以通过网络剪枝简化为路径最优路由问题来解决。需特别指出的是, 多播情况下的“链路约束 & 树最优路由问题”有 NPC 复杂度。

· 链路约束 & 路径约束路由: 已知网络  $G(N, A)$ , 对于每个链路  $a \in A$  有度量  $W_i(a) (i=1, 2)$ , 其中  $W_1$  是凹性度量, 还有约束  $C_i (i=1, 2)$ , 找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ , 使得

$$W_1(P) \geq C_1, W_2(P) \leq C_2.$$

比如带宽-延时约束路由。链路约束 & 路径约束路由问题同样可以通过网络剪枝简化为路径约束路由问题来解决。

· 链路最优 & 路径约束路由: 已知网络  $G(N, A)$ , 对于每个链路  $a \in A$  有度量  $W_i(a) (i=1, 2)$ , 其中  $W_1$  是凹性度量, 还有一个约束  $C_2$ , 找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ , 使得  $W_1(P)$  最大, 且  $W_2(P) \leq C_2$ 。

比如带宽最优-延时约束路由。该问题可以通过修改最短路径算法, 在多项式时间内解决。在网络中, 假设有  $m$  条链路, 且有  $K$  个不同值的链路约束度量, 显然  $K \leq m$  (因为一些链路可能有相同的度量值)。对于要最优化的链路约束度量, 如果把这  $K$  个不同的值  $C_1^1, C_1^2, \dots, C_1^K$  看作是最低限制, 就可

以把该问题简化为若干个链路约束 & 路径约束路由问题。从最大值  $C_1^K$  开始, 删除  $W_1(a) < C_1^K$  的所有链路  $a$ , 那么在剪枝后的拓扑中找到的满足  $W_2(P) \leq C_2$  的最优路径  $P$  就是  $W_1(P)$  最大的一条可行路径。如果不能找到该路径, 度量为  $C_1^{K-1}$  的链路就被加入到拓扑中, 并重复查找过程。如果还没有找到可行路径, 再把度量为  $C_1^{K-2}$  的链路加入到拓扑中, 并持续该过程, 直到找到一条可行路径。如果所有的链路都被加入到拓扑中, 但仍没有找到可行路径, 说明该可行路径不存在。

#### NPC 复杂度组合路由问题

还有一些组合路由问题, 其中的度量都不是凹性度量, 因此有 NPC 复杂度, 不能在多项式时间内解决。

· 多路径约束路由(简称 MPC): 已知网络  $G(N, A)$ , 对于每个链路  $a \in A$  有  $k$  个加性度量  $W_i(a) (i=1, \dots, k)$ , 和  $k$  个约束  $C_i (i=1, \dots, k)$ , 找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ , 使得

$$W_i(P) \leq C_i (i=1, \dots, k).$$

比如延时-延时抖动约束路由。由于 MPC 问题的所有度量都是路径约束的, 因此用简单的剪枝是不可能的, 也就是说, 该问题在多项式时间内不可解决。

· 路径约束 & 路径最优路由: 已知网络  $G(N, A)$ , 对于每个链路  $a \in A$  有加性度量  $W_i(a) (i=1, 2)$ , 并且对于度量  $W_1$  有约束  $C_1$ , 找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ , 使得  $W_2(P)$  最小, 且  $W_1(P) \leq C_1$ 。

比如延时约束-最低开销路由。该问题也是 NPC 问题。需特别指出的是, 多播情况下的“树约束 & 树最优路由问题”即为有名的“约束 Steiner 树问题”, 同样也是 NPC 复杂度。

· 多约束最优路径(简称 MCOP): 已知网络  $G(N, A)$ , 对于每个链路  $a \in A$  有  $k$  个加性度量  $W_i(a) (i=1, \dots, k)$ , 和  $k$  个约束  $C_i (i=1, \dots, k)$ , 找一条从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的路径  $P$ , 满足:

$$a) W_i(P) \leq C_i (i=1, \dots, k);$$

$$b) l(P) \leq l(P^*) (\forall P^*, P \text{ 满足 } a)$$

MCOP 路由问题其实可以被理解为带有一个路径长度(或开销)函数  $l(\cdot)$  的 MPC 问题。在 MPC 路由问题中, 可能存在多个不同的、满足所有  $k$  个约束的可行路径。如果是 MPC 增加条件 b), 即从可行路径集中找到最小长度  $l(P)$  的路径(长度函数最小的路径可有效地利用网络资源), 那么该 MPC 问题就变成 MCOP 问题。显然, MCOP 问题的解也是 MPC 问题的解, 反之不亦然。

由此可见, 寻找满足多约束的可行路径具有 NPC 的复杂度, 所以在大型网络中很难解决。但可以采用一些成熟的启发式近似方法来解决这些问题, 如: Jaffe's 算法、Iwata's 算法、Chen's 算法、SAMCRA、随机算法、H-MCOP 等(参见文[1])。目前最好的启发式 QoS 路由算法是 H-MCOP, 它的复杂度很低, 找到可行解的成功率很接近精确算法。

实际上, MPC、MCOP 路由问题并不是“强 NPC”的, 至少已发现在下面两种情况下可以在多项式时间内求解。

· QoS 度量是相对独立的, 如果除一个度量以外, 其余度量都取有界整数值, 则这类问题可用扩展的 Dijkstra's 或 Bellman-Ford 算法, 在多项式时间求解。

· 如果所有度量都与某种度量相关, 这类问题也可以在多项式时间求解。例如: 在采用 WFQ (Weighted Fair Queuing) 调度策略的网络中, 最坏情况下的延时和延时抖动

(下转第46页)

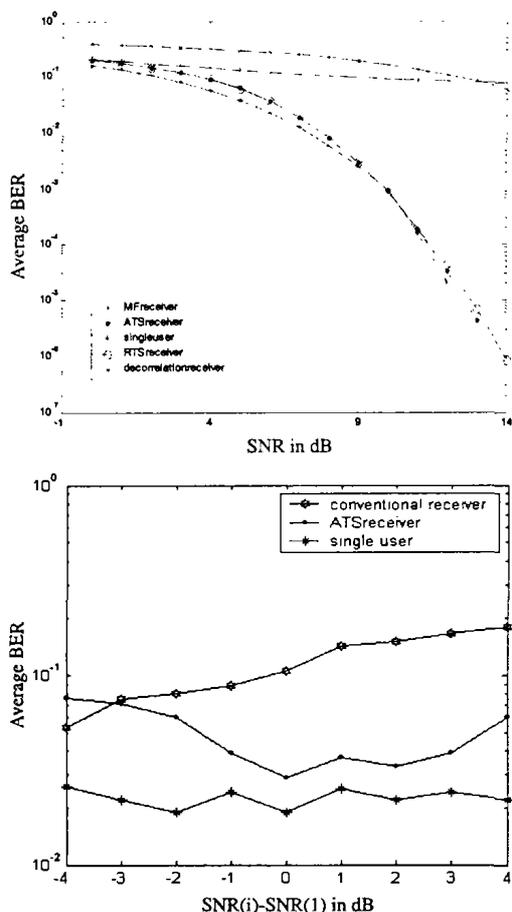


图2 BER性能比较

#### 4.2 抗远近效应能力

假使用户1为期望用户,  $SNR(1) = 6\text{dB}$ , 横轴表示期望用户与干扰用户发送功率比, 图3给出了三种多用户检测方法抗远近效应能力的比较, 从中可以看出, ATS对远近效应不敏感, 具有较好的抗远近效应的能力。

#### 4.3 计算复杂度

仿真所用的自适应禁忌搜索算法, 最大迭代步数为  $maxstep = 400 = \text{floor}(\alpha \times K)$ , 即不大于  $\alpha \times K$  的整数,  $\alpha$  是一

个正实数,  $K$  为系统中的用户数。判断是否进行多样性搜索时进行的评价函数值比较最多为  $\alpha \times K$  次。对邻域的排序最多需要  $K \times K$  次迭代, 因此算法复杂度为:

$$O(\alpha K(K^2 + K)) = O(K^3).$$

**结论** 本文介绍了一种基于自适应集中性和多样性搜索策略的多用户检测方法。根据评价函数值的比较, 算法自适应地选择集中性搜索或多样性搜索。由于禁忌长度取得很短, 集中性搜索可以对好解空间进行彻底搜索以寻找全局最优解; 多样性搜索选取最优解时是在多样性集中随机选取的, 这保证了搜索的广泛性, 并且搜索的广泛性还受多样性集大小的自适应变化的控制。这种集中性和多样性的自适应搜索策略, 既保证了算法的有效性, 又使搜索能高效率地进行。经仿真实验证明, 该方法所用的自适应集中性和多样性搜索策略可以大大增强基本禁忌搜索算法的全局寻优能力, 使这种多用户检测方法具有接近最佳检测的误比特性能和较好的抗远近效应能力, 并且具有多项式计算复杂度  $O(K^3)$ 。

#### 参考文献

- Verdu S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multi-access channels. IEEE Trans. Inform. Theory, 1986, 32: 85~96
- Verdu S. Optimum multi-user asymptotic efficiency. IEEE Trans. Commun., 1986, 34: 890~897
- 王焱滨, 李春光, 虞厥邦. 一种基于禁忌搜索的多用户检测方法. 信号处理, 2002, 18(3): 207~215
- Abedi S, Tafazolli R. Genetic multiuser receiver for code division multiple access communications. IEE Electron. Lett., 2000, 36: 1957~1958
- Tan P H. Multiuser Detection in CDMA - Combinatorial Optimization Methods. [Tech. Rep. 408L]. Department of Comp. Eng., Chalmers University of Technology, Sweden, 2001
- Tan P H, Rasmussen L K. Multiuser detection in CDMA—a comparison of relaxations, exact and heuristic search methods, to appear in IEEE Trans. Wireless Commun
- Battiti R, Tecchiolli G. The reactive tabu search. ORSA Jour. on Computing, 1994(2): 126~140
- 唐普英. 计算智能及其在多用户检测中的应用研究. [电子科技大学博士学位论文]. 2002
- Glover F, Laguna M. Tabu search. Kluwer Academic Publishers, Boston MA, 1997
- 贺一, 刘光远. Tabu Search 中集中性和多样性的自适应搜索策略. 计算机研究与发展, 2004, 41(1): 162~166

(上接第38页)

都是带宽的函数, 因此, 在这样的网络中, 延时-延时抖动约束路由问题就是多项式时间可解的。

**小结** 当前主要的 QoS 技术包括 IntServ、DiffServ 和 MPLS, 这些 QoS 机制都需要 QoS 路由来为其寻找(如果存在的话)能满足可用资源要求的路径。但是, 单播和多播的 QoS 路由都可能会遇到基本的单度量路由问题, 或由其派生的多度量组合路由问题。这些问题中, 有些是多项式可解的, 有些有 NPC 复杂度, 但可以用一些成熟的启发式方法来解决, 而且对于不是“强 NPC”的组合问题, 也存在多项式时间内求解的精确算法。此外, 在实际网络中人们很少遇到网络传输的 NPC 行为。

如果在 QoS 路由协议或算法的设计中, 有效地解决了上述多种可能面临的路由问题, 就能通过 QoS 路由的实现, 满足网络应用量化的 QoS 要求, 而且达到有效地利用资源, 均衡网络负载, 提高网络吞吐量的目的。

#### 参考文献

- Juva H. Analysis of Quality of Service Routing Approaches and

Algorithms. Master's thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology, 2003. 12~28

- Wang Z, Crowcroft J. QoS Routing for Supporting Multimedia Applications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 2~16
- Chen Shigang, Nahrstedt K. An overview of Quality of Service Routing for Next-Generation High-Speed Networks: Problems and Solutions. IEEE network, 1998, 67~68
- Kuipers F A, Van Mieghem P. MAMCRA: a constrained-based multicast routing algorithm. Computer Communications, 2002, 25(8): 801~810
- Wang B, Hou J C. Multicast routing and its qos extension: problems, algorithms, and protocols. IEEE Network, 2000, 14(1): 22~36
- Alkahtani A M S, Woodward M E, Al-Begain K. An Overview of Quality of Service (QoS) and QoS Routing in Communication Networks. ISBN: 1-9025-6009-4 (c) 2003 PGNet
- Orda A, Sprintson A. QoS Routing: The Precomputation Perspective. IEEE INFOCOM 2000 - The Conference on Computer Communications, 2000, 1: 128~136
- Guerin R, Orda A, Williams D. QoS Routing Mechanisms and OSPF Extensions. IETF Internet Draft, 1996, citeseer. nj. nec. com /guerin96qos.html