

IP 网络的 QoS 多播路由问题与解决方法综述^{*}

吴小泉 冀鑫泉 桂志波

(南京邮电学院计算机科学与技术系 南京 210003)

摘要 本文在 IP 网络的 QoS 模型、加权图模型和 QoS 度量的基础上,讨论了 IP 网络 QoS 多播路由的主要问题及解决方法。文中进一步详细描述了在不同路由规则下相关的路由算法,并对该领域内需要进一步研究的热点问题进行了探索。

关键词 QoS, 多播路由, NPC

An Overview of Quality of Service Multicast Routing for IP-networks: Problems and Solutions

WU Xiao-Quan JI Xin-Quan GUI Zhi-Bo

(Department of Computer Science and Technology, NJUPT, Nanjing 210003)

Abstract This paper is intended to introduce the main problems and the relevant solutions to the QoS multicast routing for IP-networks on the basis of QoS model of IP networks, weighted graph model and QoS metric. Furthermore, the paper is trying to present the corresponding routing algorithms in detail under different routing policy and it probes into hot issues which require further study in this field.

Keywords QoS, Multicast routing, NPC

1 QoS 模型

网络服务质量(Quality of Service,简称 QoS)是网络与用户之间以及网络上互相通信的用户之间关于信息传输与共享的性能的约定。IETF 提出了多种服务模型和机制来满足对 QoS 的需求:综合业务模型、区分业务模型和多协议标签 MPLS 技术等。这些均用于解决 Internet 的 QoS 控制和管理。

(1)综合业务模型主要引入了一个重要的网络控制协议 RSVP(资源预留协议)。RSVP 的引入使得 IP 网络为应用提供所要求的端到端的 QoS 保证^[1]。综合业务模型的这种利用 RSVP 将无连接的 IP 网络改为面向连接的网的方法存在着许多致命的缺陷,使得原本欲提供的端到端全程 QoS 保证实际上是很难实现的!其原因是:综合业务模型下的预留状态信息是与业务流的个数成正比的,这使得路由器的负担会随着网络的扩大、业务流的增多而加重,网络的扩展性不好;此外,综合业务模型中的每个路由器都要支持 RSVP 控制协议,为业务流保持状态信息,这对路由器的实现要求太高。

(2)区分业务模型主要是重新利用了 IP 数据包头中的服务类型(ToS)字段(改为 DS 域),使得对 RSVP 网络控制协议的使用仅局限在用户网络一侧,而将骨干传送网从 RSVP 中解脱出来^[2]。骨干网中的核心路由器只需检查数据包中的 ToS 字段判断业务的类别,再为不同的业务提供相应的 QoS 保证策略,这种模型并不提供从信源到信宿的全程 QoS 保证,而将 QoS 限制在不同的域范围内加以实现。

(3)多协议标签交换将灵活的三层 IP 选路和高速的二层

交换技术完美地结合起来,从而弥补了传统 IP 网络的许多缺陷^[3]。它引入了新的标签结构,对 IP 网络的改变较大,引入了“显式路由”机制,对 QoS 提供了更为可靠的保证。

2 QoS 路由问题概述

2.1 网络模型

网络的拓扑结构和资源容量可以抽象为无向加权图 $G(V, E)$ 。其中节点集 V 代表网络中的路由设备,边集 E 代表传输线路。对于大多数实际的网络,其链路一般都非对称,在研究中为了方便起见,常使用对称网络模型以减少边的数量。

2.2 QoS 度量

QoS 度量主要包括可用带宽,端到端延迟,分组丢失率、延迟抖动和花费等。对于图 G 中路径 $P=(a, b, c, \dots, f, g)$,用 $D(a, b)$ 表示对应链路 (a, b) 的度量,则 QoS 度量可以按性质分为以下三类:(1)凸性 QoS 度量。如果 $D(a, g)=\text{Min}\{D(a, b), D(b, c), \dots, D(f, g)\}$,那么度量由传输链路中的瓶颈决定,即此度量仅与路径上的某个瓶颈链路的 QoS 度量有关,如剩余带宽,剩余缓存区和链路速率等。(2)加性 QoS 度量。如果 $D(a, g)=D(a, b)+D(b, c)+\dots+D(f, g)$,那么度量由传输通道中所有链路的特性共同决定,如时延、时延抖动和费用等。(3)乘性 QoS 度量。如果 $D(a, g)=D(a, b) \times D(b, c) \times \dots \times D(f, g)$,即度量为所有链路对应度量的乘积,如连接可靠性等。

2.3 QoS 路由问题

QoS 路由选择意指从信源到信宿找到一条具有足够资源的路径来满足端到端服务质量,包括收集网络状态信息并

^{*} 项目资助:江苏省基础研究计划(自然科学基金)(项目编号: BK2001124),南京邮电学院科研启动经费(98 院(博)06),江苏省高校自然科学基金(项目批准号: 01KJB510001)。吴小泉 硕士研究生,其感兴趣的研究领域是:IP QoS 和移动计算。冀鑫泉 硕士研究生,主要研究方向为 IP QoS, QoS 路由,高性能网络。桂志波 博士后,副教授,信息网络技术(信息产业部)重点实验室副主任,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。

不断更新信息,以及根据已有信息来为新的连接请求选择一条合适的路径。一个路由算法的性能主要取决于信息收集的程度。QoS路由问题分为QoS单播路由和QoS多播路由。

2.4 QoS路由的最优化问题和性能界约束问题

最优化问题就是寻找对应QoS度量的最优路径,而性能界约束问题就是寻找大于对应QoS度量(如带宽)或小于对应QoS度量(如时延)的一条路径,即在满足性能界要求的集合中选择一个解。优化问题要求最优解,而约束问题求次优解即可。

对于上述凸性特征的QoS度量,可以定义两种基本的路由问题:链路优化路由,如带宽优化路由问题,即寻找一个路由使其瓶颈链路带宽最大;链路约束路由,如带宽约束路由,即寻找一条路由使其瓶颈带宽大于一个给定值。链路优化问题可由改进的Dijkstra算法或Bellman-Ford算法来实现,而链路约束问题可以比较容易地转化为链路优化路由问题。

对于上述加性特征的QoS度量,可以定义另外两种基本路由问题:路径优化路由,如最小费用路由,即寻找一条路由使其所通过的所有链路的费用的和为最小;路径约束路由,如时延约束路由,即寻找一条路由使其传输时延小于给定的值。这两类路由问题都可以直接使用Dijkstra或者Bellman-Ford算法来解决。

很多组合路由问题都可以从上面的四种基本问题演化而来。有关多播路由问题分类见图1。

3 不同路由策略下的算法

根据网络状态信息的保存方式和路由搜寻方式的不同,路由策略可分为源路由、分布式路由和层次路由:源路由策略的要点是每个节点保存全局的网络状态信息,根据此全局信息,源节点在本地计算出一条合适的路由。然后,在选择的路由上传送一个控制包,通知路由上的每个节点,说明其前继者和后继者是谁。每个节点的信息更新由链路信息协议完成;在分布式路由策略中,路由选择的计算是由分布计算完成的。其路径上的各节点通过交互控制消息,并结合各节点所存储的状态信息,来完成路由选择的计算;层次路由策略的原理是把物理节点聚合为一组,而各组又反复不断地进一步聚合为更高一层的组,从而形成一种多层次结构。每个物理节点保存经过聚合的全局信息,此信息包括此物理节点所在组的详细状态信息和其他组的聚合信息。使用源路由算法来进行路由选择。当代表逻辑组的物理节点收到建立连接的控制消息时,它把对应于其组的链路部分进行扩展,即用物理链路代替其对应的逻辑链路。

文[5]详细的介绍了多播问题。求解多播问题的数学模型是寻找网络中的Steiner树,是NPC问题^[6]。寻找一个延迟约束最小代价的多播树的问题被称为约束的Steiner树问题,是NPC问题。寻找一个Steiner树不是一个QoS路由问题,然而,建立一个Steiner树的启发式算法对如何建立一个约束的Steiner树有直接的影响。文[7]详细介绍了网络中的Steiner树问题,相关的近似算法和启发式算法。

3.1 源路由策略下的多播算法

文[8]提出最大带宽树算法。该算法利用Dijkstra算法来计算所有目的节点的最大单向带宽,其步骤如下:首先,计算从源节点到所有接收节点的最大可用带宽连接,由此构建一棵最大带宽树。然后根据接收节点的接收能力将接收节点分成不同的类别,一个质量值被赋予数据的每一层。通过相

加已收到的所有数据层值来确定满意程度。于是便可以确定每个接收者的接收率,以使全部接收者的满意程度最大。这种优化过程为每个接收者给出它从源节点收到数据的预期接收率,链路带宽便可在最大带宽树上进行相应地分配。

文[9]提出了同时满足端到端延时约束和延时抖动约束的多播路由算法。首先利用Dijkstra算法求源节点到 m 个目的节点各自的最短路径,若满足两个约束条件则返回。满足延时约束而不满足延时抖动约束则调用DVMA算法。DVMA算法以最短路径有最大时延的目的节点为初始目的节点,采用Dijkstra第 k 条最短路算法求出到它的前 k 条最短路径,依次以这 k 条最短路径为初始树构建路由树,满足两个约束时则返回,否则最后返回有最小延时抖动值的路由树。每次构建路由树时,对于每次要连接的目的节点,从已成树上的每一个非目的节点到此目的节点的前 k 条最短路径中选取最好的连接路径进行连接。此算法本身结构非常复杂。

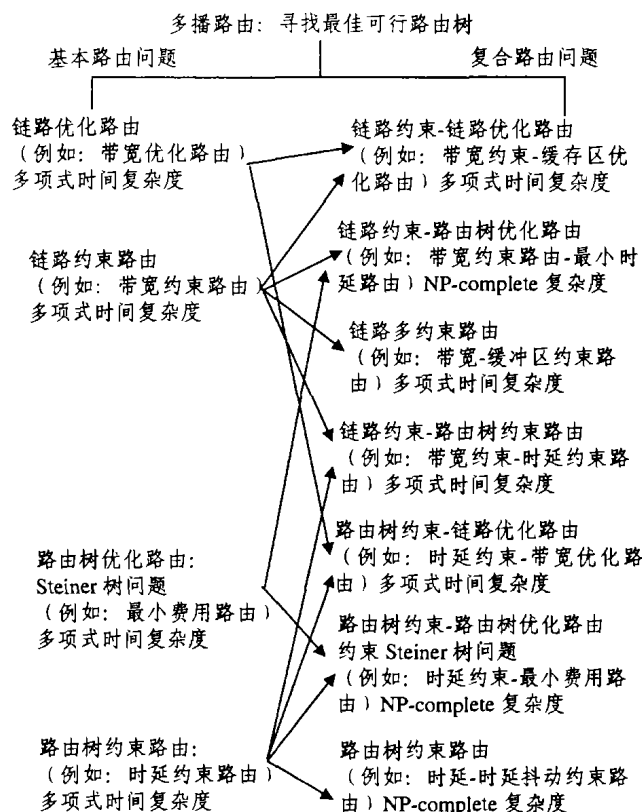


图1 多播路由问题分类图

文[10]等提出了一种多约束实时多播路由优化控制算法—破圈回滚多播路由算法。算法先将不满足带宽要求的网络链路删除掉,再用破圈回滚法获取最小生成树,最后调用Dijkstra算法递归回滚搜索以满足时延要求,若找不到则高层要重新协商。

Komplla提出了一种源路由启发式算法来构造一个约束的Steiner树^[11]。第一步是建立一个完全的图,图中结点代表了源和目的,边代表了结点间有延迟约束的最小代价路径,边上的延迟被假设为整数,延迟约束总是固定的,因此,这样一个完全图可以在多项式时间内建好;第二步是建立这个完全图的延迟约束的覆盖树,开始于源结点,每次加一条边直到所有的目的结点被加入,被选中的边应符合以下条件:连接一个树内和树外的结点,不违反延迟约束,最小化一个选择函数;第三步把这个完全图的延迟约束的覆盖树的边还原为它所代表的延迟约束的最小代价路径,再移走一些由还原引起的环。

文[12]给出了用 Dijkstra 算法建立的近似的约束的 Steiner 树。算法首先根据代价计算出最短路径树,然后修改树去满足延迟约束,如果树中有到任一目的的路径违反了延迟约束,就用最小延迟路径更换最小代价路径。该算法的优点是和 Dijkstra 算法有相同的时间复杂度 $O(n \log n)$ 。

文[13]提出了 constrained adaptive ordering heuristic 算法,算法中每一步用约束的 Bell-Ford 算法来寻找一个从源到还没有在树中的目的符合延迟约束的最小代价路径,找到的路径和结点一起被插入到树中去,直到树覆盖了所有的结点。

文[14]提出了一种源路由启发式算法,算法允许对目的地的时延约束可变,首先用 Dijkstra 算法根据时延算出最短路径树,如果时延约束不能满足任一结点,源和目的结点必须重新谈判。否则算法反复地精炼以得到更小的代价。基本的思路是用另一个有较低代价的路径替换树中原来的边,除非找不到较低代价的路径。

3.2 分布式路由策略下的多播算法

Bauer 等人提出的 SPH 算法^[15]是目前求解 QoS 多播路由问题中性能较好的算法。其基本思想是:从只包括源节点的子图开始,寻找与之距离最近且不违反度约束的一个目的节点,用最短路径将两节点相连,同时将最短路径上的节点也加入图中,然后再找下一个与子图距离最近的不违反度约束的目的节点,将其加入,如此直到所有目的节点全部加入到树中。

文[16]提出了一种有效的分布式的组播路由算法。算法分两个阶段:建立和调整阶段。如果第一阶段不能覆盖所有的目的节点则要运行第二阶段。算法以并行的方式建立组播树,因此有较低的消息和时间复杂度,而且算法的成功率较高。

文[17]等提出了使用预计算的路径的动态的组播路由算法。算法预计算出最小代价树和以源节点为根的最短路径树,于是得到两条预计算路径。第一步,一个新加入的节点沿着到源的两条预计算路径发送查询消息;第二步,如果被查询的节点存在,它回送一个消息给新节点,查询消息不再传给下一个节点,否则,沿着预计算路径传下去。第三步,新加入节点收到应答消息后,选择最近的路径加入。该算法搜索的节点范围小,类似于贪心法使用查询和回复消息得到组成员关系的消息。该算法预计算时去掉带宽不符合要求的链路,则可适用于带宽受限最小时延动态加入组播树问题。

Kompella 给出了一种分布式的启发式算法来建立约束的 Steiner 树^[18]。算法要求每个结点保持一个距离矢量保存到其它任一结点的最小延迟。起于源结点,算法通过反复的一次加入一条边来建立多播树。算法的每一个步由三个阶段组成,第一阶段,源结点广播一个寻找消息给部分建立的树,当一个结点收到该消息,它在邻接的边中找这样一条边,该边邻接树外的结点,不违反延迟约束,有最小化的选择函数。第二阶段,有最小化选择函数的边被选中并被送往源结点。第三阶段,一个 ADD 消息被发送,增加选中的边进树,该过程不断进行下去,直到所有的目的结点被加入树中。但是该算法需要密集的消息交换。

Chen 和 Nahrstedt 扩展了他们的分布式的单播路由算法为分布式的多播路由算法^[19],探针从源向一个多播组的目的结点扩散。探针仅沿着至少会遇到一个目的结点,有足够的资源来保证端到端的 QoS 的路径前进。随着探针移向目的结点,多播树以分布式的方式建立起来。每一个结点仅保存本地的消息。该算法建立树的最坏情况下的消息复杂度为 $O(e)$,

仅适用于组成员固定,预先知道的情况下。

Carlberg-Crowcroft 提出了一种建立穿过不同域的多播树算法^[20]。一个多播组成员广播一个连接请求消息,当树中结点接到消息时,它发出一个单播返回消息给新成员,回复消息的路径有现有的单播路由算法确定,回复消息在它的传播路径上收集了 QoS 性质和资源的可利用性。新成员也许收到很多的回复消息,对应了多重的连入多播树的候选路径,根据回复消息它选中其中的最佳路径。但是该算法有过多的控制信令开销。

Faloutsos 等提出了 QoSMIC 算法^[21]。该算法中树搜索和本地搜索同时进行。一个多播组成员广播一个连接请求消息的同时向网络中的组播树管理点发送加入请求。算法把连接请求消息的 TTL 设为 2,把本地搜索限制在局部,减少了信令开销。但是当组播组规模增大后,树搜索会有很大的开销。

文[22]等提出了一种 QoSMIC 算法的改进算法 DSDM-R。搜索分两步进行,第一步用小 TTL 值的本地搜索,如果本地搜索的等待时间超时还没找到合适的响应点就执行算法的第二步,第二步再进行树搜索。由于大多数的接入路径是通过本地搜索得到的,算法大大提高了搜索效率,缩短了平均加入时延。

Esbensen 给出了用遗传算法解决网络中的 Steiner 树问题^[22],其基本思想是仿真了一个生物的进化过程。它能自动的得到和积累关于研究空间的知识,以便相应的控制研究过程直到找到最优方案为止,但是该算法仅考虑了代价度量,而没有考虑其它的 QoS 约束。文[24]给出了一个基于过程的新的遗传算法来解决 QoS 路由问题。其基本过程为:1)编码和初始群体生成;2)个体适应的检测评估;3)选择;4)交叉;5)变异。

文[25]给出了一种蚂蚁算法来解决时延受限多播路由问题。研究表明,蚂蚁具有找到蚁巢与食物之间的最短路径的能力。它依靠在所经的路径上留下一一种挥发性分泌物(随时间的推移该物质会挥发)来实现,后来的蚂蚁选择分泌物浓度最大的路径,从而形成一种正反馈,最后找到最短路径。算法描述如下:(1)从蚁巢发出 M 个蚂蚁,每个蚂蚁都执行步骤 2;(2)蚂蚁随机选择一条路径,并相应增加分泌物浓度;(3)当所有的蚂蚁在单位时间内都完成路径选择后,对所有的路径降低分泌物浓度;(4)蚂蚁按原路返回,完成连接建立工作,并再次调整该路径上对应的分泌物强度;(5)跳到第二步,直到迭代次数完成为止。

总结与展望 随着网络和应用业务的快速发展,QoS 多播路由技术无疑是未来的核心技术,然而该领域在以下几个方面有待进一步的深入研究:

(1)需要建立统一的模型 目前我们所有的近似和启发式算法都不一定是最优解,是通过仿真来比较性能优劣的,而且不是在同一模型中进行比较,而不同的模型可能导致不同的算法评价,进而导致算法的改进等工作。所以在统一的模型下比较算法的优劣是下一步工作的重点,同时研究到目前为止还没有的,能真正代表互联网拓扑结构和业务流的网络模型更是重中之重!

(2)研究不精确信息的影响 绝大多数现有的路由算法假设工作在精确的状态信息下,然而在一个分布式的网络环境下,状态信息由于种种原因具有天生的不精确性,不精确性直接影响了路由算法的功能。故对大型网络设计路由算法应

考虑到信息的不精确性。

(3) 研究 QoS 路由和尽力型 (Best-effort) 路由的无缝结合。今后路由的目标有两个: QoS 流数目的最大化和尽力型路由的吞吐量和响应率的优化。两个目标相互矛盾, 其原因是: 第一个目标仅考虑了 QoS 路由而第二个目标仅仅考虑了尽力型路由。一般来说 QoS 路由因为有资源预留不会被尽力型路由影响, 然而尽力型路由的吞吐量会被 QoS 路由影响。例如, 有较轻的 QoS 传输的链路可能有较好的尽力型传输效果。这些链路被 QoS 路由算法认为是新的 QoS 流的可用路径, 这就有可能导致这些链路上的拥挤的尽力型传输更为拥挤。二者如何协调工作以实现无缝结合也是十分重要的。

(4) 制定统一的评估标准。当前 QoS 路由算法考虑的主要参数有: 可用带宽, 端到端延迟, 延迟抖动, 分组丢失率, 花费。评估 QoS 路由算法的参数主要有: 业务接入率, 带宽利用率, 信令开销等。各个算法解决的问题不同, 所以优化目标和评估标准也不一致, 不利于算法性能的比较。因此制定出统一的路由性能评估标准具有重要意义。

(5) 研究引入多路路由后的影响。在多条可能路径上同时探测路径时, 如何与资源预留结合尚无定论^[26]。而且当网络提供多路路由时, 主要问题是多路路径之间如何同步, 以及如何避免分组的延迟抖动、乱序等^[27]。

(6) 未来的网络发展变化的影响。当前, 全球的电信网、因特网都正处在一个发展的关键阶段。下一代 IP 网络对 QoS 路由研究工作的影响也是值得我们注意的一个方面^[28]。

参 考 文 献

- 1 RFC1633. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview
- 2 RFC2475. An Architecture for Differentiated Service
- 3 RFC3564. Requirements for Support of Differentiated Services-aware MPLS Traffic Engineering
- 4 Chen C, Nahrstedt K. An Overview of Quality-of-service Routing for the next Generation High-Speed Networks: Problems and Solutions. IEEE Network, Special Issue on Transmission and Distribution of Digital of Video, Nov./Dec. 1998
- 5 RFC1112. Host extensions for ip multicasting
- 6 Hwang F K, Richard D S. Steiner Tree Problems. Networks, 1992, 22: 55~89
- 7 Brno University of Technology Faculty of Mechanical Engineering RNDr. Ing. Miloseda; [Ph.D]. Steiner Tree Problems and Approximation Methods for Their Solution Habilitation Thesis Brno, October 2001. 2
- 8 Shacham N. Multipoint Communication by Hierarchically Encoded Data[c]. In: Proc IEEE INFOCOM'92, 1992. 55~89
- 9 Markowsky K L, Berman L G. A fast algorithm for Steiner trees. Acta Informatic, 1981, 15: 141~145
- 10 赵建, 等. 一类基于源路由的多约束实时组播路由优化控制算法. 电子学报, 2001(4): 490~494
- 11 Kompella V P, Pasquale J C, Polyzos G C. Multicast Routing for Multimedia Communication. IEEE/ACM Trans. Networking, June 1993
- 12 Sun Q, Langendorfer H. A New Distributed Routing Algorithm with End-to-End Delay Guarantee. In: 2nd Wksp. Protocols Multimedia Sys., Oct 1995. 452~458
- 13 Widyono R. The Design and Evaluation of Routing Algorithms for Real-Time Channels. [Technical rep.]. ICSI TR-94-024, Univ. CA at Berkeley int'l. Comp. Sci. Inst., June 1994
- 14 Zhu Q, Parsa M, Garcia-luna-Aceves J J. A Source-Based Algorithm for Delay-Constrained Minimum-Cost Multicasting. IEEE INFOCOM'95, Boston, MA, Apr. 1995
- 15 Fred B, Anujan V. Degree-constrained multicasting in point-to-point networks. In: Proc. IEEE INFOCOM'95, Boston, Massachusetts, 1995. 369~376
- 16 Zhu K H. An efficient distributed QoS-based multicast routing algorithm. In: Proc. of IEEE IPCCC'02, Phoenix, Arizona, Apr. 2002. 27~36
- 17 Asaka T, Miyoshi T. Dynamic Multicast Routing Algorithm Using Predetermined Path Search. IEICE TRANS. COMMUNICATION 2000, E83-B(5)
- 18 Kompella V P, Pasquale J C, Polyzos G C. A Source-Based Algorithm for Delay-Constrained Minimum-Cost Multicasting. IEEE INFOCOM'95, Boston, MA, Apr. 1995
- 19 Chen S, Nahrstedt K. Distributed Quality-of-service Routing in High-Speed Networks Based on Selective Probing. [Tech. rep.]. Univ. of Il at Urbana-Champaign, Dept. Comp. Sci., 1998 the extended abstract was accepted by LCN'98
- 20 Carlberg K, Crowcroft J. Building Shared Trees Using a One-to-Marry Joining Mechanism. Comp. Commun. Rev., Jan. 1997. 5~11
- 21 Faloutsos M, et al. QoS MIC: Quality of Service Sensitive Multicast Internet Protocol[A]. In: Proc. SIGCOMM'98[C], 1998. 111~153
- 22 Tseng C-J, Chen C-H. The Performance of QoS-aware IP Multicast Routing Protocols[A]. In: IEEE Intl. Conf. on Performance, Computing and Communications[C], 2001: 9~16
- 23 Esbensen H. Computing near-optimal solutions to the Steiner problem in a graph using a genetic algorithm, Networks. 1995, 26: 173~185
- 24 Xiang F, Junzhou L, Jieyi W, Guanqun G. n QoS routing based on genetic algorithm. Computer Communications, 1999, 22 (15-16): 1392~1399
- 25 张素兵, 刘泽民. 基于蚂蚁算法的时延受限分布式多播路由研究. 通信学报, 2001(3): 70~74
- 26 Cidon I, Rom R, Shavitt Y. Multi-path routing combined with resource reservation. In: Hasegawa, T, Pickholtz, R. eds. Proc. of IEEE INFOCOM'97 Kobe, Japan: IEEE Communication Society, 1997. 92~100
- 27 Vutukury S, Garcia-Luna-Aceves J. J A simple approximation to minimum-delay routing. ACM. Computer Communication Review, 1999, 29(4): 227~238
- 28 冀鑫泉. 基于蚁群系统原理的 QoS 单播路由算法研究. [南京邮电学院硕士论文]. 2003