

基于受限广播搜索的分布式 QoS 组播路由协议^{*})

谭敏强 雷振明

(北京邮电大学 ATM 技术研究中心 北京100876)

摘要 根据像网络电视这样的宽带多媒体业务的需要,提出了一种简单有效的分布式 QoS 组播路由协议来支持动态成员组播。分析和仿真表明,本协议和其它同类协议比具有消息开销少、成功率高、路径建立时延短和性能稳定等优点。

关键词 QoS 路由,组播路由,受限广播,资源预留

A Distributed QoS Multicast Routing Protocol Based on Constrained-Flooding

TAN Min-Qiang LEI Zhen-Ming

(ATM R&D Center, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract A simple but effective distributed QoS multicast routing protocol has been proposed to meet the requirements of broadband multimedia service like ip-tv. Analyses and simulations have been done to show that our scheme has better performance than some other existing protocols in terms of message overhead, success rate, path set-up time and stability.

Keywords Quality of Service routing, Multicast routing, Constrained flooding, Resource reservation

1 背景

目前,日益重要的大规模多媒体数据分发业务如网络电视、电视会议和远程教育需要组播能够提供 QoS 支持和成员异构性支持,但传统的组播路由协议如 PIM^[2]并不能满足这些需求。现在,成员的异构性一般可以通过多层组播^[1]来解决,而 QoS 支持则需要研究 QoS 组播路由。QoS 组播路由目的是找到一棵有足够资源来满足应用的 QoS 需求的组播树,这已被证明是一 NP-完全难题。并且,网络电视这类业务还需要组播能有效支持大规模动态成员加入:加入组时延要短,成功率要高。

已有的许多 QoS 组播路由算法^[3]支持动态成员的效率并不高:有的需要节点了解整个网络的状态且计算复杂(RIMQOS^[4]、MQ^[5]),有的开销大且加入时延长(YAM^[6]),有的成功率低(SCR^[7])。QMRP^[8]和 QOSMIC^[9]是2个比较有代表性的分布式 QoS 组播路由协议。QMRP 通过将单路径搜索和多路径搜索结合起来寻找可行路径,并减少消息开销。QOSMIC 则把接收者发起的本地扩展环搜索^[6]和组播源发起树搜索^[9]结合起来提高效率。

根据网络电视这样的宽带多媒体业务的需要,本文提出一种简单有效的分布式 QoS 组播路由协议 CFQMRP (Constraint Flooding QoS Multicast Routing Protocol)。节点不需要了解整个网络的状态,甚至可以不需要任何单播路由协议的支持。其基本思想是采用 QoS 限制的广播来搜索满足 QoS 限制的加入路径,并采用多种措施来优化成功率、消息开销和加入时延等性能指标。

2 算法描述

考虑到当前网络和多媒体应用发展的实际情况,我们的目标是设计一个在高速网络(如100M 以太网)下使用的域内

组播路由协议,能够将高质量的宽带多媒体业务有效传送给成千上万的用户。为此,CFQMRP 采用“有限广播搜索”的思想来建立组播树,即通过在 QoS 测度、TTL 等诸多限制下广播成员节点的加入请求来搜索加入组播树的可行路径。因为这种分布式的搜索方法实现简单,对拓扑的适应性强,健壮性好,有利于在高速环境中实现路由和转发。其关键是如何有效抑制路由控制消息的扩散。其实,许多现有的域内路由协议都采用了广播机制,实践证明其开销是可以控制的。另外,这种基于广播搜索的路由协议,不但可以应用于有线网络,还可以应用于无线网络。

CFQMRP 是一个分布式的 QoS 组播路由协议,每个节点只需要响应图1中所列的4条消息。其基本过程如下:节点需要加入组播树时,就向其邻接的路由器广播请求消息,收到请求的路由器如果接纳了这个请求,就在收到请求消息的接口进行临时资源预留,并向其它接口扩散这个请求报文,如此直到某个在树上的节点接纳了这个请求报文,就回送一个确认报文,该报文沿着同请求报文相反的路径传送到待加入的成员节点,以确认加入路径和临时预留的资源。那些不能接纳请求的节点就回送拒绝报文,以取消先前临时预留的资源。节点离开组时,就向其上游节点发送剪枝消息,节点收到剪枝消息后,如果发现其下游再也没有组成员,就继续向上游发送剪枝消息。

• Req(g, Qr, Qa, i): 请求消息,用于搜索路径。g 是组地址, Qr 是请求的 QoS 容限, Qa 是收到当前节点到发送请求消息的成员之间的路径已经消耗的 QoS 测度, i 是由成员地址等组成的标识,用于识别重复消息。

• Cfm(g, Qm): 确认消息,用于确认路径。g 是组地址, Qm 是组播源数据沿着组播树到当前节点所消耗的 QoS 测度。

• Unack(g, i): 拒绝消息,用于拒绝请求的路径。g 是组地址, i 是一个本地标识,用于标识路由表目。

• Prune(g): 剪枝消息,是组地址。

图1 CFQMRP 控制消息

^{*}) 本文受国家重大自然科学基金项目资助(编号:69896240)。谭敏强 博士生,主要研究方向为 IP 组播和宽带通信网络。雷振明 教授,博士生导师,北邮宽频电信技术研究中心主任。

为了达到成功率高而消息开销又少,且建立时延短等目的,CFQMRP 采用了 QoS 接纳控制和资源预留、QoS 限制的有向搜索、并发请求预合并、有条件的扩散重复请求和重新路由等技术,下面予以说明。

2.1 QoS 接纳控制和资源预留

和第1节介绍的路由协议不同的是,CFQMRP 将路由搜索和资源接纳控制预留结合起来。其原因有以下几点:(1)在高速网络中,可用网络资源变化迅速,如果路由搜索和资源接纳预留分开,那么在前面搜索到的路由很有可能在资源接纳预留阶段不能满足要求,因而导致连接失败的机会大大提高;(2)这2个过程结合可以缩短连接建立时延,这对于实时通信非常重要;(3)在路由搜索时进行接纳控制,可以有效减少路由消息的开销。

CFQMRP 算法将软状态资源预留和硬状态资源预留相结合,过程如图2:当节点收到新的请求时,先判断本地链路上的资源(时延和带宽等)是否可以容忍请求的 QoS 限制,如果可以接纳该请求,就立即为其临时预留相应资源(软状态资源预留),等收到上游节点回送的确认消息后,就将资源预留由软状态变为硬状态,即资源预留直到连接结束。如果不能接纳该请求,就回送拒绝消息,收到拒绝消息的节点如果发现请求被所有上游节点拒绝后,立即释放先前为该请求临时预留的资源,并继续回送拒绝消息。当节点收到多余的确认消息时,就立即对其进行剪枝,这种快速剪枝措施可以减轻资源的过度预留程度。

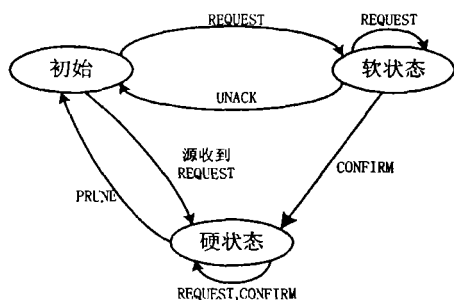


图2 状态转换

2.2 QoS 限制的有向搜索

为了进一步减少消息开销,CFQMRP 根据 QoS 限制的紧张程度以概率来拒绝继续扩散请求。节点收到了请求消息 $req(g, Q_r, Q_a, i)$ 后,执行图3所示算法(这里以加性 QoS 为例,其它类推),算法中的纵向拒绝概率限制了搜索的深度,横向拒绝概率限制了搜索的广度。为了提高紧时延限制下的成功率,仅当已经消耗的 QoS 测度 Q_a 大于一个较低的门限且小于一个较高的门限时执行以概率拒绝算法,因为在门限范围之外的请求不会显著增加消息开销,却可以提高找到可行路径的概率。当 Q_a 处于门限范围之内时,纵向拒绝概率随着 Q_a 的增加而增加,这样,加入请求在 QoS 紧张的链路方向上扩散的机会就小,这就是 QoS 限制的有向搜索的意思。同时,横向拒绝概率随着总的 QoS 需求容限的增加而增加,也就是说,当 QoS 限制比较宽松时,找到可行路径的机会大,可以减少分支搜索路径。

计算到本节点时已经消耗了的 QoS 测度 Q_a
 若 $Q_{min} < Q_a < Q_{max}$
 计算纵向拒绝概率 $P_a = Q_a / Q_r$
 以概率 P_a 拒绝请求
 若请求没有被拒绝
 计算横向拒绝概率 $P_b = (Q_r - Q_{min}) / Q_r$

在每个通过 QoS 接纳控制的接口以概率 P_b 发送请求否则
 在所有通过 QoS 接纳控制的接口发送请求

图3 以概率扩散算法

2.3 并发请求预合并

对于像网络电视这样的业务,某个频道的那些大众感兴趣的节目常常会吸引大量用户在短时间内聚集性地加入这个频道,网络节点会在一个很短的时间段内收到许多不同节点的并发请求,此时,CFQMRP 可以采用一种预合并技术来进一步减少路由消息的开销,而前面列出的几个协议都没有这方面的分析。

“预合并”的基本过程如下:假设节点已经接纳了来自某接口的成员1请求消息 $req1(g, Q_{r1}, Q_{a1}, i_1)$,为其建立了相应的软状态路由表目 $e1$,随后从另一接口收到了成员2的请求消息 $req2(g, Q_{r2}, Q_{a2}, i_2)$,就检查 $(Q_{r1} - Q_{a1}) - (Q_{r2} - Q_{a2}) > Q_d$ 是否成立(其中, Q_d 是一个本地节点需要设置的参数,代表剩余 QoS 容限的最小差异。),如果成立, $req2$ 就合并到 $e1$ 中,等待使用 $req1$ 的路由结果,而不需要继续扩散。当然,此时 req 还得向收到 $req1$ 的接口转发,因为没有在这个接口转发 $req1$ (图4 a)。此后如果收到 $req1$ 的拒绝消息,则也被当做 $req2$ 的拒绝消息。由于满足 $req1$ 的路径不一定满足 $req2$,因此如果收到 $req1$ 的确认消息 $cfm1(g, Q_{m1})$,得进一步检查 $Q_{m1} + Q_{a2} \leq Q_{r2}$ 是否成立,如此,则就向二者回送确认消息(图4b),否则,只向接口收到 $req1$ 的接口回送确认消息,而向另一接口回送拒绝消息(图4 c)。如果 $req2$ 不能合并到 $req1$ 的路由表目中, $req2$ 就照常向所有可能的接口扩散(图4 d),节点为其建立相应表目 $e2$ 。此后二者的拒绝消息互不影响,但收到其中一个的确认消息时,得检查是否也满足另外一个的需求。

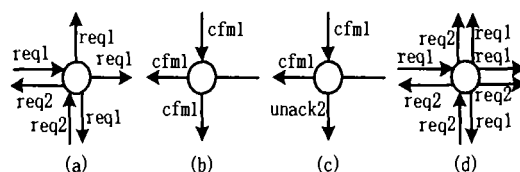


图4 并发请求预合并处理

2.4 QoS 测度控制的有条件扩散重复请求和重复路由

为了既能防止路由循环又能提高成功率,CFQMRP 采用“有条件的扩散重复请求和重复路由”策略。对于基于广播的路由协议,尤其要注意防止循环。一是要防止请求消息的循环扩散,二是要保证形成的组播转发路径(组播树)是无环的。

为防止请求消息的循环扩散,可以规定每个节点只接收每个加入成员的一个请求。但是在不对称链路上,这有可能降低成员加入组播树的成功率。如图5a,累积消耗 QoS 测度大的请求消息通过节点2先到达节点4,这样从节点3来的具有更优 QoS 测度的请求消息被节点4拒绝了,但当节点4的上游链路不能满足从节点2来的请求消息的 QoS 需求,而只能满足从节点3来的请求消息的 QoS 需求时,显然存在经过节点4的可行路径,但却没有找到。为此,CFQMRP 采用如下方法:设节点在收到某个成员的请求消息 $req1(g, i, Q_r, Q_{a1})$ 后又收到了该成员的一个请求消息 $req2(g, i, Q_r, Q_{a2})$,当且仅当 $Q_{a1} > \gamma \cdot Q_r$ 且 $Q_{a1} - Q_{a2} > \alpha \cdot Q_r$ ($0 < \gamma < 1, 0 < \alpha < 1$) 时,节点接纳后收到的请求消息。这种有条件的重复扩散 QoS 测度

显著优化的请求的机制可以增加找到可行路径的概率,且能尽量少增加消息开销。另一方面,如果 req2 是一个经过循环到达节点的请求,则 Qa2 必然会大于 Qa1,所以节点不会接纳 req2,也就防止了循环。

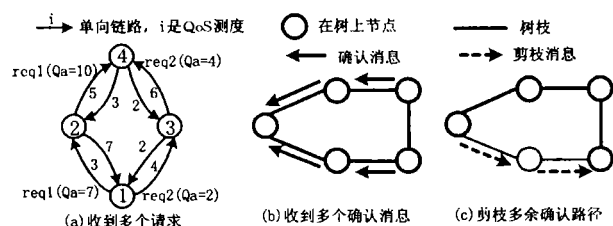


图5 防止路由循环

要保证形成的组播转发路径(组播树)是无环的,可以让每个节点只接收一个确认消息而剪枝其余的来解决(图5b-c)。但同样由于链路的不对称性,可能会导致节点接纳了具有较劣 QoS 测度的确认消息而剪枝了具有较优 QoS 测度的路径,而降低了以后的节点想通过它加入树的可能性。为了解决这个问题而又不延长路径建立时延,CFQMRP 采取有条件的重复路由技术,过程同“有条件的扩散重复请求”类似:设节点在收到确认消息 cfm1(g, Q₁)后又从其它节点收到了一个确认消息 cfm2(g, Q₂),当且仅当 $Q_{11}-Q_{12} > \beta \cdot Q_r$, ($0 < \beta < 1$)时,节点剪枝收到 cfm1 的路径,接纳后收到的确认消息,并重新向所有在树上的子接口发送确认消息以刷新加入路径的 QoS 测度。这样,既增加了后续节点加入树的可能性,又防止了过度频繁的重复路由而导致的消息开销增加。

至于其它一般用来减少消息开销的措施如 TTL 限制,这里就不细述了。

3 协议实现

CFQMRP 的实现比较简单,主要是每个节点根据图2状态机响应图1列出的4条消息以及软状态过期处理。完成接纳控制、资源预留和路由扩散和剪枝等功能。软件流程如图6所示,其中,收到消息的处理过程在第2节已有描述,其中 CFQMRP 采用的各种策略除“有条件的重复路由”在收到确定消息时处理外,其余的主要在收到请求消息的处理过程中实现。过期处理主要是清除过期的软状态路由表目,释放预留的资源。

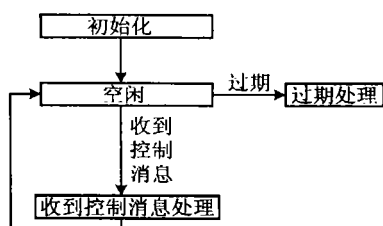


图6 协议软件流程

4 仿真

在相同的仿真环境下对 SPR、YAM、QoSMIC、QMRP 和我们的算法 CFQMRP 进行了仿真,对比了其在成功率和消息开销等方面的性能。仿真中使用文[10]的算法产生网络拓扑,节点数为100,平均度数为3.5,链路的代价和时延为1到50内均匀分布的一个随机整数。为模仿网络电视这样的大规模

组播情况,我们把时延和带宽作为 QoS 测度,随机取40个节点以负指数分布间隔动态加入组,每个节点的加入时延限制均为 δ ,然后统计加入成功率和消息开销。这个试验重复500次,然后取平均值作为结果。我们取加入间隔的平均值为2秒,时延限制 $\delta = d_0 + (i/8)d_0$, d_0 为固定值,通过改变 i 来测试不同时延限制下各算法的性能。CFQMRP 各参数设置如下: $Q_{min} = 40$, $Q_{max} = \delta - 20$, $Q_d = 0.2\delta$, $\gamma = 0.4$, $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.2$ 。

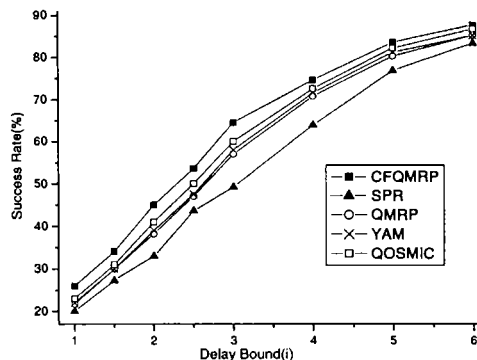


图7 成功率和时延限制的关系

图7和图8分别显示了不同时延限制下,各协议的组加入成功率和消息开销。从中可以看出,CFQMRP 具有最高的成功率,而其消息开销也低于 YAM 和 QoSMIC,和 QMRP 相当。虽然 SPR 算法的开销非常少,但这是以成功率低为代价的;在几种基于搜索的算法中,当 QoS 限制比较严格时,CFQMRP 的开销最少且成功率最高,而当 QoS 限制较松时,CFQMRP 的成功率高,消息开销也没有大幅度增加,且一直非常稳定。实际上往往是 QoS 限制严格时具有较优性能的 QoS 路由协议更具有实际意义,因为此时 QoS 路由的难度大,而当 QoS 限制松时,各种路由算法都能达到较好的性能。这证明了 CFQMRP 采取的多种提高成功率和降低消息开销的措施是有效且有实际意义的。

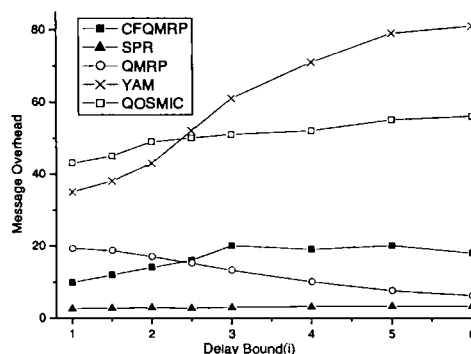


图8 路由消息开销和时延限制的关系

我们还测试了不同加入间隔下各算法的性能,结果发现成员加入时间间隔越小,CFQMRP 性能越优异,而其它的算法性能则没有什么变化,甚至有所下降。这是因为 CFQMRP 有专门的并发请求预合并处理措施,而其它的协议则没有优化并发请求处理的措施。对 CFQMRP 的加入时延测试也表明我们算法的加入时延和 SPR 的相当,比其它几个协议优化许多。

结语 本文根据像网络电视这样的宽带多媒体业务的需要,提出了一个简单有效的分布式 QoS 组播路由协议来支持

(下转第43页)

交互性、实时性、突发性和动态性的特点,解决高端应用 QoS 实现过程中的关键问题,对于 IP 网络层的传输控制机制和端

点系统层的 QoS 体系机构都是新的挑战。

表1 四种系统架构简单比较

系统架构	服务应用	结构	协同预留分配	提前预留	操作接口	安全认证
OMEGA	仅对多媒体服务	Broker	提供,但仅对网络	不提供	专用	无
QoS-A	主要对多媒体服务	分层结构	提供	不提供	专用	无
$2K^Q, 2K^{Q+}$	基于 CORBA 的应用服务	基于组件	提供且高效	不提供	通用	无
GARA	多种网路应用	分层结构	提供	提供	通用	提供

一方面,在 IP 网络层要建立一个保证传输、高效灵活的传输控制模型,本文详细分析了 Intserv 和 Diffserv 的优势和不足,基于这两种模型,又介绍了将 Intserv QoS 量化保证和 Diffserv 良好的扩展性相融合的 Diff-Intserv 综合模型。

另一方面,在端点系统结构层,需要一个能够通过资源预留、协同分配管理向应用提供 QoS 保证的系统架构,同时,能够对应用状态进行监控并根据状态信息进行决策。根据当前的研究现状,本文最后介绍了几种有一定代表性的端点 QoS 架构并分析了它们的特点。

实现高端应用的端到端 QoS 保证涉及到一系列复杂问题,本文只是对其中一些认为比较重要的方面结合现在的研究进展进行探讨,要在实际中真正实现完善的 QoS 保证,还有待进一步研究。

参考文献

- 1 Miras D, Teitelbaum B, Sadagic A, et al. A Survey on Network QoS needs of Advanced Internet Applications. Working Document of Internet 2, Dec. 2002
- 2 <http://www.globus.org>
- 3 Braden B, Clark D, Shanker S. Integrated Services in the Internet Architecture: An Overview. Internet RFC 1633, June 1994
- 4 Blake S, Black D, Carlson M, et al. An Architecture for Differentiated Services. Internet RFC 2475, Dec. 1998
- 5 Bernet Y, Ford P, Yavatkar R. A Framework for Integrated Services Operations Over Differv Networks, Internet RFC 2998, Nov. 2000
- 6 Nahrstedt K, Smith J. Design, Implementation and Experiences of the OMEGA End-Point Architecture. IEEE JSAC, Special Issue

- on Distributed Multimedia Systems and Technology, 1996, 14(7): 1263~1279
- 7 Nahrstedt K, Smith J. The QoS Broker. IEEE Multimedia, 1995, (2): 53~67
- 8 Campbell A, Coulson G, Hutchison D. A Quality of Service Architecture. ACM/Springer Verlag Multimedia Systems Journal, 1998, 6(3): 138~151
- 9 Nahrstedt K, Wichadakul D, Xu D. Distributed QoS Compilation and Runtime Instantiation. In: Proc. of the IWQoS'2000, June 2000
- 10 Wichadakul D, Nahrstedt K, Gu X, Xu D. $2K^{Q+}$: An Integrated Approach of QoS Compilation and Rsconfigurable, Component-Based Run-Time Middleware for the Unified QoS Management Framework. In: Proc. of IFIP/ACM Intl. Conf. on Distributed systems Platforms (Middleware 2001), 2001
- 11 Foster I, Kesselman C, Lee C, et al. A Distributed Resource Management Architecture that Supports Advanced Reservations and Co-allocation. In: Proc. of IWQoS'99, 1999. 27~36
- 12 Roy A. End-to-End Quality of Service for High-End Applications: [PhD Dissertation]. The University of Chicago, Aug. 2001
- 13 Chakravorty R, Kar S, Farjami P. End-to-End Quality of Service: An Overview of Issues, Architectures and Frameworks. In: Proc. of ICIT 2000, Dec. 2000
- 14 Sander V, Adamson W, Foster I, et al. End-to-End Provision of Policy Information for Network QoS. In: Proc. of the Tenth IEEE Symposium on High Performance Distributed Computing (HPDC 10), Aug. 2001
- 15 Stallings W. High-Speed Networks and Internets Performance and Quality of Service (Second Edition). Prentice Hall, 2002
- 16 Srinivas V, 信达工作室译. IP 服务质量. 北京人民邮电出版社, 2001

(上接第39页)

动态成员组播。该协议通过 QoS 限制的有向搜索和本地决策来减少消息开销,通过将路由搜索和资源预留合并为一个过程来缩短成员加入时延,同时还采用了“QoS 测度控制的有条件扩散重复请求和重复路由”来防止循环和提高成功率。协议还通过“并发请求预合并”措施来适应短时间内大量成员加入的情况。分析和仿真表明,本算法和其它同类算法比,具有成功率高、消息开销少、路径建立时延短和性能稳定等优点。协议的这些优点使得它特别适合于域内宽带多媒体组播,以便 Internet 真正能够高效地实现网络电视这类宽带多媒体业务。

参考文献

- 1 McCanne S, Jacobson V, Vetterli M. Receiver-driven layered multicast. in ACM SIGCOMM '96, 1996. 117~130
- 2 draft-ietf-pim-sm-v2-new-03. ps-2001, PIM-SM: Protocol Specification (Revised)[S]
- 3 Wang B, Hou J C. Multicast Routing and Its Qos Extension:

- Problems, Algorithms, and Protocols. IEEE Network, 2000, 14 (1): 22~36
- 4 Fei A, Gerla M. Receiver-initiated multicasting with multiple qos constrains. IEEE INFOCOM, 2000
- 5 Yang D-N, Liao W, Lin Y-T. MQ: An Integrated Mechanism for Multimedia Multicasting. IEEE Trans. on Multimedia, 2001, 3 (1): 82~97
- 6 Carlberg, Crowcroft J. Building shared trees using a one-to-many joining mechanism. ACM Computer Communication Review, 1997, 27(1): 5~11
- 7 Tyan H-Y, Hou J, Wang B, Chen Y-M. Qos Extension to the Core Based Tree Protocol. In: Proc. Of NOSSDAV'99, 1999
- 8 Chen S, Nahrstedt K, Shavitt Y. A QoS-aware multicast routing protocol. IEEE JSAC, 2000, 18 (12): 2580~2592
- 9 Yan S, Faloutsos M, Banerjee A. Qos-aware multicast routing for the internet: the design and evaluation of QosMIC. IEEE/ACM. Trans. Networking, 2002, 10(1): 54~66
- 10 Waxman B M. Routing of multipoint connection. IEEE JSAC, 1988, 6(9): 980~986