

# QoS 组播路由算法分析

孙倩<sup>1</sup>, 王新华<sup>1</sup>, 刘丽<sup>2</sup>

(山东师范大学信息科学与工程学院, 山东济南 250014;

山东师范大学外国语学院, 山东济南 250014)

**摘要:**网络的迅速发展使“尽力而为服务”已经不能满足用户传输业务流时提出的要求,在组播路由中如何保证服务质量已经是当前网络研究领域的重要内容和热点问题。近期的研究已经表明,路由算法对实现服务质量起到了关键的作用。文中分别围绕以下几个方面,展开探讨和论述。首先对 QoS 组播基础知识做了简要的介绍,对组播路由算法做了简单的总结,然后分析了几个经典的 QoS 路由算法,最后提出了在组播路由研究中仍存在的问题和发展前景。

**关键词:** QoS; 组播路由; 算法;

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2009)08-0096-04

## An Analysis of QoS Multicast Routing Algorithms

SUN Qian<sup>1</sup>, WANG Xin-hua<sup>1</sup>, LIU Li<sup>2</sup>

(1. College of Information Science & Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

2. College of Foreign Language, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

**Abstract:** Along with the rapid developments of network, the “best-effort” services can not satisfy the users’ demands proposed in transferring business flow. How to guarantee the quality of service has already become the significant content and the hotspot in recent research domain of the network. People can know that routing algorithm is vital to complement QoS in network in recent years from study. On these several issues proposed, gives introductions and discussion. In the beginning, introduced the basic backgrounds of QoS multicast routing and summarized the multicast routing algorithms briefly, then analyzed several classical QoS routing algorithms in details, and proposed several issues existing in the study of QoS multicast routing and gave a prospect of its development in the end.

**Key words:** QoS; multicast routing; algorithms

## 0 引言

当今时代的网络发展迅速,计算机网络的通信容量迅速扩大,从早期的 Mbps 增长到现在的 Gbps;网络的功能也日益强大,网络业务从简单的信息传送发展到远程教学、视频会议等多媒体业务。这些多媒体业务要求网络不但能传送“尽力而为”服务的业务流,同时能满足服务质量 QoS(Quality of Service)要求,比如带宽、传输延迟、抖动及丢失率等。与单播方式相比,组播方式将源数据流的单一副本通过网络传送到一组接收者,它充分利用了网络资源,减少了网络不必要的带宽开销,有利于提高业务的服务质量。基于 QoS 约束的组播路由作为实现组播通信的关键技术,其算法

设计已成为网络研究领域的重要内容和热点问题。

## 1 QoS 组播基础

### 1.1 组播

网络中传统的通信模式主要有单播(点到点传播)和组播(一点到多点传播)两种形式。

组播是允许一个或多个发送者(源节点)同时发送单一数据包到多个接收者(目的节点)的网络技术,即网络中的源节点传输数据到多个目的节点。组播源把数据包发送到特定组播组,只有属于该组播组的地址才能接收到数据包。

与单播不同,组播技术根据网络结构及其它数据传输要求在成员间构建一棵组播路由树。由于组播路由树的使用,信息以并行的方式传输到不同的组成员,降低了网络传输时延;中间节点复制信息的工作只在树的分叉处进行,工作量大大减小,这样便节省了网络带宽资源,提高了资源利用率。

收稿日期: 2008-12-06; 修回日期: 2009-02-18

基金项目: 山东省自然科学基金项目(Y2006G19)

作者简介: 孙倩(1984-),女,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为 QoS 路由算法;王新华,教授,硕士生导师,主要研究方向为高性能网络技术和路由算法等。

组播路由<sup>[1]</sup>是实现组播通信的关键技术之一,随着人们对组播兴趣的增加,组播路由技术得到了深入的研究。在组播路由研究中,为了满足用户各种不同的需求,优化全局资源利用率,平衡网络负载等,引入了服务质量(QoS)的概念。

### 1.2 服务质量

服务质量<sup>[2]</sup>(QoS)是网络在传输业务流时,业务流对网络服务的需求集合,其中业务流是指与特定 QoS 相关的从源到目的地的分组流。业务流对网络传输服务提出一组可度量的要求即 QoS,具体由带宽、跳数、抖动、时延、分组丢失率、端到端延迟、花费等性能指标量化。

服务质量路由<sup>[2]</sup>(QoS Routing, QoSR)指根据网络上可利用资源和流的 QoS 需求决定流的路由机制。在路由算法中,路径选择标准包含可用带宽、跳数、延迟、链路利用率及资源消费量等 QoS 度量参数<sup>[3]</sup>。

假设路径  $P$  包含  $n$  条链路  $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ ,  $f(l_i)$  是链路  $l_i$  的参数值,  $f(p)$  是路径  $p$  的参数值,各种度量参数特性定义<sup>[4]</sup>如下:

加性度量参数:  $f(p) = \sum_{i=1}^n f(l_i)$ , 即构成这条路径所有链路 QoS 值的和(如跳数、时延、成本、链路长度等);

乘性度量参数:  $f(p) = \prod_{i=1}^n f(l_i)$ , 即构成这条路径所有链路 QoS 值的积(如误差率、丢包率、链路利用率等);

凹性度量参数:  $f(p) = \min_{i=1,2,\dots,n} f(l_i)$ , 即构成这条路径所有链路 QoS 值中最小者(如时延等)。

### 1.3 QoS 组播路由

所谓 QoS 组播路由<sup>[5]</sup>指在寻找从源节点到多个目的节点的传输路径中,加入网络可用资源和网络业务等 QoS 需求。

一般路由选择包括两方面:根据已有信息为业务流选择合适的路径并发送,即选路过程;收集网络状态信息并不断更新消息,即路由信息的交互过程。

QoS 组播路由的主要目标是:对每个业务均满足用户的要求,寻求满足 QoS 需求的可行组播树;在满足 QoS 要求的前提下,使全局资源的利用率得以优化,使网络负载得以平衡,从而使网络接受其他业务请求的能力最大化。

## 2 组播路由算法

### 2.1 组播路由算法分类

组播路由算法可以从不同的角度和准则来分类。

按照业务流是否有 QoS 需求分为有约束算法和无约束算法。现有许多算法基于无约束的组播路由算法,它们往往只试图优化树的费用;但实际业务往往对服务质量提出要求,有约束的组播路由算法应运而生。

按照是否允许组成员随时加入或离开组播组可将算法分为静态路由算法和动态路由算法。在静态组播路由算法中,针对初始组播组成员构造组播树,路由计算一次性完成,并且在连接中组播成员和路由树都不发生变化。但现实网络中存在很多变化,如网络拓扑变化、组成员变化等,动态路由算法就显得尤为重要。动态路由允许组成员动态地加入或离开,组播树在一次连接中一般会发生改变。

按照是否有一个节点集中运算或分布式运算可以将算法分为集中式路由算法和分布式路由算法<sup>[6]</sup>。集中式路由算法,即源节点通过某个路由协议获得整个网络拓扑结构,然后计算出从源节点到目的节点的整个组播树,再确定组播路由。集中式算法往往相对简单、快速,但其缺点也是显而易见的,即完全由一个节点维护整个网络的状态,易造成网络拥塞,有一定时延;并且当网络较复杂时,对整个网络状态的搜集也变得非常困难。分布式路由(Distributed Routing)算法中组播树的计算由位于不同网络中的多个节点协作完成。网络的每个节点都参与运算,但这些节点都只掌握网络的部分信息,通过节点间信息的交互计算路由。分布式路由算法相对较复杂且速度慢,但它显著的优点即任何节点都不用保持整个网络的状态。按照其不同的分类方法和特点,做了以下比较,如表 1 所示。

表 1 算法主要分类及特点

算法分类	主要特点	
1	有 QoS 约束	要求在给定 QoS 的条件下使树的费用最小
	无 QoS 约束	只优化树的费用,无 QoS 要求
2	静态路由算法	组播组成员固定,组播成员和路由树不发生改变
	动态路由算法	允许组成员动态加入或离开,组播树会发生改变
3	集中式路由算法	节点掌握整个网络拓扑结构,确定组播路由,简单,快速
	分布式路由算法	每个节点参与运算,节点间交换信息计算路由,复杂,慢

实际上,一种算法可以同时属于以上一种或几种分类方法。

### 2.2 QoS 组播路由典型算法

在组播路由算法的研究过程中,针对 QoS 约束组播路由问题,已提出许多相应的路由算法。

下面主要介绍几种经典的 QoS 组播路由算法:

(1) 最短路径树算法。

最短路径算法是求组播树上源节点和目的节点的链路权值最小的组播树,可用来解决树约束问题。如果所有的链路权值均为 1,叫这个组播树为最小跳树;

如果链路权值代表的是链路时延,叫这个组播树为最小时延树。在最短路径算法中,Dijkstra<sup>[7]</sup>和 Belman - Ford<sup>[8]</sup>算法是两个典型的算法,最坏的情况下讨论,两个算法的时间复杂度分别是  $O(n^2)$  和  $O(n^3)$ 。其中,  $n$  表示网络中的总节点数。

(2)最小生成树算法。

最小生成树算法指的是包括组播树中所有节点且树的所有链路权重和最小的一个组播树,可以用来解决树的最优化问题。最小生成树算法中最典型的算法是 Prim 算法<sup>[9]</sup>,在 Prim 算法中,从任一个根节点开始构建整棵树,一直扩展到网络中所有的节点。在每一步中,都把已选择节点与未选择节点连接以后,权重最小的那条边加入到树中。该算法采用贪婪策略,构建整棵树的过程中,每次加到树中的边都使树的权重增加了最小值。最坏的情况下,Prim 算法的时间复杂度是  $O(n^2)$ 。

(3)有关 Steiner 树算法。

Steiner 树问题是组播路由中的经典问题,使组播树的总代价最小是该问题解决的核心,但 Steiner 树问题是 NP 完全问题。在目前网络中,人们多采用启发式算法来求解这一问题。最短路径算法和最小生成树算法都是 Steiner 树问题的特例。Steiner 树问题和最小生成树问题的根本区别在于:最小生成树须包括网络中所有节点而 Steiner 树只需包括网络中部分节点且保证代价最小。而当 Steiner 树中只包含两个节点时,它便成了最短路径问题。

下面介绍一些典型的基于 QoS 约束的 Steiner 树算法,这些问题同样是 NP 完全的,在目前研究中也多是采用启发式算法和智能优化算法来解决。

① 基于最短路径思想的 Steiner 树启发式算法。

该算法直接运用最短路径算法,最后生成最短路径树 SPT。首先初始状态下,树中只包括一个源节点;然后将其他目的节点依照最短路径算法将最短路径加入树中。这个算法的时间复杂度是  $O(n^2)$ 。由于没有全面考虑树的总费用,一般费用较大,但保证两个节点间的费用最小,适用于通信网络。

② 基于最小生成树思想的 Steiner 树启发式算法。

这个算法实现起来相对简单,即利用最小生成树构造整个树,然后进行剪枝操作。算法首先求出一个最小生成树,然后检查树中所有叶子节点,找到不是目的节点的叶子,最后删除所有多余节点和与其邻接的边。其时间复杂度为  $O(n^2)$ 。

③基于时延约束的启发式源路由算法。

在启发式源路由算法中比较经典的是三种满足时延约束的启发式算法:最经典的 KMB 算法<sup>[10]</sup>,由

Kompella, Pasquale, Polyzos 提出的 KPP 算法<sup>[11]</sup>和由 Qing Zhu 等提出的 BSMA 算法<sup>[12]</sup>。

KMB 算法在有些文献中也被称作 DNH 算法,它是有关 Steiner 树中最著名的一个算法。该算法用到了距离完全图和最小生成树算法。算法首先构造距离完全图和最小生成树,再将最小生成树的边转换成最短路径并形成子图,在子图中生成最小生成树,删除其中非目的节点的叶子节点,最后得到的即是所求树。该算法的时间复杂度为  $O(Dn^2)$ ,其平均性能较好。

KPP 算法借鉴了 KMB 算法,是第一个满足端到端时延约束的组播路由启发式算法。算法首先求出任意两个网络节点间满足时延约束的最小代价路径,即满足时延约束的代价最小的路径,而后创建包含源点和目的节点的完全封闭图,边对应满足时延约束的路径;然后生成最小生成树,这里可以基于最小生成树的启发式算法。该算法时间复杂度是  $O(\Delta n^3)$ ,其中  $\Delta$  是端到端时延上限。

BSMA 算法思想是:先找到问题的可行解,然后改进这个可行解,使其性能更接近最优解。首先通过 Dijkstra 最短路径算法求出从源节点到各目的节点的最小时延树;然后通过前  $j$  条最短路径算法替换其中代价高的边,使树的总代价不断降低。该算法用于解决时延约束树的优化问题,求得组播树的代价较小,是当时所有时延约束启发式算法中代价值能最好的。但该算法的时间复杂度高,是  $O(jn^3 \log n)$ ,不适合求解大型网络。

④基于时延约束的启发式分布路由算法。

在启发式分布路由算法中,最有代表性的是由 Bauer 等人提出的 SPH 算法<sup>[13]</sup>和 K-SPH 算法<sup>[14]</sup>以及由 Kompella 等人提出的 DMCT<sub>C</sub> 算法和 DMCT<sub>OD</sub> 算法<sup>[15]</sup>。Kompella 等提出的路由算法是一种由分布式启发式算法来构建时延约束的 Steiner 树,算法要求网络中每个节点维护一个到其它节点的最小时延距离矢量。最初树中只包括源节点,然后每次向树中增加一个目的节点,直到该树包含所有目的节点。每次增加的目的节点按如下算法进行选择:源节点向树上的节点以组播形式发送 find 消息,树上节点收到 find 消息后,寻找不在树中的接收节点并使函数最小化。若找到这样的候选路径,向源节点回送一个 response 消息。当源节点收到所有的 response 消息后,将选择一条最优路径,即选择函数最小的路径,并把该路径加入树中,需要多次传送控制信息是该算法的缺点。

⑤智能优化算法。

近年来,研究者将智能优化算法应用到求解组播

路由问题中,取得了较好的结果。这些智能优化算法主要包括遗传算法<sup>[16]</sup>、模拟退火算法<sup>[17]</sup>、禁忌搜索算法<sup>[18]</sup>、蚁群算法<sup>[19]</sup>和人工神经网络<sup>[20]</sup>等。表 2 中给出了几个经典算法及其复杂性比较。

表 2 经典算法及时间复杂性比较

路由算法	算法关键字	典型算法	时间复杂度
最短路径算法	每个节点,最短路径	Dijkstra 算法 <sup>[7]</sup>	$O(n^2)$
		Behman - Ford 算法 <sup>[8]</sup>	$O(n^3)$
最小生成树算法	权重和最小	Prim 算法 <sup>[9]</sup>	$O(n^2)$
基于 QoS 的 Steiner 树算法	路径最短	基于最短路径的 Steiner 树算法	$O(n^2)$
	剪枝最小生成树	基于最小生成树的 Steiner 树算法	$O(n^2)$
	启发式源路由	KMB 算法 <sup>[10]</sup>	$O(D   n  ^2)$
		KPP 算法 <sup>[11]</sup>	$O(\Delta   n  ^3)$
		BSMA 算法 <sup>[12]</sup>	$O(j   n  ^3 \log   n  )$
	启发式分布路由	SPH 算法 <sup>[13]</sup> 、K - SPH 算法 <sup>[14]</sup> 、DMCTc 算法 <sup>[15]</sup> 、DMCTd 算法 <sup>[15]</sup>	-
智能优化算法	遗传算法 <sup>[16]</sup> 、模拟退火算法 <sup>[17]</sup> 、蚁群算法 <sup>[19]</sup> 等	-	

### 3 结束语

数据传输对服务质量的要求促进了 QoS 组播路由算法的研究,而 QoS 组播路由问题是服务质量和组播路由的融合。文中首先就这两个问题分别进行了简单的阐述,接着对典型的 QoS 组播路由算法进行了分析。

同时也看到,在现行研究中依然存在有待解决的问题:

第一,对于带有非精确状态信息的 QoS 约束的组播路由问题的研究;

第二,网络动态性的特点要求路由算法也应该具有动态性;

第三,已有算法中片面考虑 QoS 组播路由计算,没有兼顾同传统“尽力而为服务”的融合;

最后,路由算法的可扩展性和快速有效性有待提高。

#### 参考文献:

[1] Striegel A, Manimaran G. A survey of QoS multicasting issues [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(6): 82 - 87.  
 [2] 崔 勇, 吴建平, 徐 恪, 等. 互联网络服务质量路由算法研究综述[J]. 软件学报, 2002, 13(11): 2065 - 2075.  
 [3] Quality of service - glossary of terms. QoS Forum[EB/OL]. 1999. <http://www.qosforum.com>.  
 [4] Wang B, Hou J C. Multicast routing and its QoS extension:

problems, algorithms, and protocols [J]. IEEE Network, 2000, 14(1): 22 - 36.  
 [5] Charikar, Naor J, Schieber B. Resource optimization in QoS multicast routing of real - time multimedia [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2004, 12(2): 340 - 348.  
 [6] 朱慧玲, 杭大明, 马正新, 等. QoS 路由选择: 问题与解决方法综述[J]. 电子学报, 2003(1): 109 - 116.  
 [7] Wang Z, Crowcroft J. QoS routing for supporting resource reservation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1228 - 1234.  
 [8] Bellman R E. Dynamic Programming [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1957.  
 [9] Baase S, Van Gelder A. Computer Algorithms: Design and Analysis [M]. Beijing: High Education Press and Pearson Education Group, 2001: 388 - 390.  
 [10] Kou L. A fast algorithm for the Steiner trees [J]. Acta Inform, 1981, 15(2): 141 - 145.  
 [11] Kompella, Pasquale J, Polyzos G. Multicast routing for multimedia communication [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(3): 286 - 292.  
 [12] Kompella V P, Pasquale J C, Polyzos G C. Optimal Multicast Routing with Quality of Service Constraints [J]. Network and Systems Management, 1996, 4(2): 107 - 131.  
 [13] Salama H F, Reeves D S, Viniotis Y. Evaluation of Multicast Routing Algorithms for Real - Time Communication on High - Speed Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(3): 332 - 345.  
 [14] Bauer F, Varma A. Distributed Algorithms for Multicast Path Setup in Data Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1996, 4(2): 181 - 191.  
 [15] Sun Q, Langendorfer H. An Efficient Delay Constrained Multicast Routing Algorithm [J]. Journal of High Speed Network. 1998, 7(1): 28 - 37.  
 [16] 王征应, 石冰心. 基于启发式遗传算法的 QoS 组播路由问题求解 [J]. 计算机学报, 2001, 24(1): 55 - 61.  
 [17] 王兴伟, 程 晖. 一种基于模拟退火算法的 QoS 组播路由算法 [C] // 2003 年国际通讯技术学会 (ICCT' 03). 2003 年 4 月. 中国, 北京: IEEE, 2003: 469 - 473.  
 [18] George M W, Bill S X, Stevan Z. Using Tabu Search with Longer - term Memory and Relaxation to Create Examination Timetables [J]. European Journal of Operational Research, 2004, 153(1): 80 - 91.  
 [19] Zhang S, Liu Z. A QoS routing algorithm based on ant algorithm [J]. IEEE ICC, 2001(5): 1581 - 1585.  
 [20] Feng G. Neural network and algorithmic methods for solving routing problems in high speed networks [D]. Florida: University of Miami, 2001.