

互联网中服务质量与 多播路由技术

颜 昕 著



科学出版社

互联网中服务质量与 多播路由技术

颜 昕 著

“武汉理工大学研究生教育创新基金”资助出版

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

全书共 9 章,第 1、2 章介绍与服务质量和多播路由相关的概念和模型;第 3 章论述网络拓扑类型及其建模方法;第 4 章探讨研制动态路由仿真系统的方法和途径;第 5~8 章为本书主体内容,分别针对服务质量与多播路由领域中的非精确网络状态、蚁群优化的应用、路由的扩展性、路由选择的精确性等问题,围绕着 NP-完全问题的求解以及状态信息的非精确性这两个主题进行讨论和分析;第 9 章为总结与展望。

本书适合于信息与通信工程、计算机科学与技术等相关专业的教师和研究生阅读,也可供从事信息与通信、计算机、电信等相关专业的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

互联网中服务质量与多播路由技术/颜昕著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-031250-1

I. 互… II. 颜… III. 互联网络-路由选择 IV. TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 100879 号

责任编辑:张艳芬 / 责任校对:郑金红
责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张:10

印数:1—3 500 字数:189 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在目前的互联网中,随着实时数据和多媒体业务的应用领域不断扩大,如视频会议、远程教学、数据分发、网络游戏等,现有的“尽力而为”的网络结构已经不能适应当前网络应用的发展需要。因此,研究和发 展适合于传输实时多媒体数据的新一代网络技术已成为必然趋势。

服务质量和多播路由是在互联网中应用实时与多媒体业务的关键性技术。目前,服务质量与多播路由领域中还存在着许多亟待解决的问题,如多个服务质量的约束问题、状态信息的非精确性问题、路由的扩展性问题、智能优化的应用问题以及路由选择的精确性问题等。因此,本课题组在经过认真学习和积极准备之后,申报了以服务质量和多播路由为研究内容的国家自然科学基金项目一项及省部级项目两项,并得以批准。

本书的内容是这些项目研究成果的集中体现,从关键技术、理论模型、问题求解以及实验仿真等方面介绍了作者及其研究团队在服务质量路由领域所做的工作和取得的成果。本书分别针对服务质量与多播路由领域中状态信息的非精确性、蚁群优化的应用、层次路由以及精确服务质量路由等主题,围绕着 NP-完全问题的求解以及状态信息的不确定性这两条主线进行了分析和讨论。期望这些研究成果不仅能够解决服务质量与多播路由领域中的关键问题,而且能够丰富与服务质量路由和网络仿真相关的理论方法及实现技术。

本书中的许多研究成果是作者在武汉理工大学李腊元教授悉心指导下完成的。李腊元教授在素材收集、项目申报、课题开展、书稿审阅等方面付出了大量的心血,在此致以诚挚的谢意。书中有关精确服务质量路由的内容,作者借鉴了代尔夫特理工大学 Piet Van Mieghem 教授和 Kuipers 副教授的前期研究成果,在此表示衷心的感谢,同时感谢该校的 Kleiberg 博士在设计仿真器方面所提供的支持。另外,也要感谢挪威科技大学的 Wittner 博士在算法仿真过程中给予的帮助。

感谢国家自然科学基金项目(No. 60672137)、教育部博士点基金项目(No. 200804971030)和湖北省自然科学基金项目(No. 2008CDB347)的资助。

还要感谢我的朋友和家人,并以此书献给我的母亲!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2011 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 服务质量与多播	1
1.2 QoS 路由的关键技术	2
1.3 相关技术介绍	3
1.3.1 QoS 多播路由	3
1.3.2 层次多播路由	6
1.3.3 动态路由	7
1.3.4 网络仿真	8
1.4 本书的主要内容及结构	9
参考文献	11
第 2 章 路由模型	15
2.1 网络模型与度量	15
2.1.1 网络模型	15
2.1.2 QoS 度量及其特征	15
2.2 QoS 多播路由模型	16
2.2.1 模型与定义	16
2.2.2 模型的求解	18
2.3 动态路由模型	18
2.3.1 相关概念	18
2.3.2 Guérin 概率模型	19
2.3.3 Chen 概率模型	19
2.4 蚁群路由模型	20
2.4.1 蚁群路由的概念	20
2.4.2 ABC 模型	21
2.4.3 AntNet 模型	22
2.5 小结	22
参考文献	23

第3章 网络拓扑建模与仿真	25
3.1 引言	25
3.2 网络拓扑建模	26
3.2.1 拓扑表征	26
3.2.2 随机拓扑建模	27
3.2.3 无标度拓扑建模	29
3.2.4 规则拓扑建模	30
3.2.5 Internet 拓扑建模	31
3.3 拓扑仿真器的设计	36
3.3.1 仿真器的体系结构	36
3.3.2 拓扑图的生成过程	37
3.3.3 仿真器的接口设计	38
3.4 小结	42
参考文献	42
第4章 动态路由仿真系统设计	44
4.1 引言	44
4.2 NS2 的体系结构	45
4.2.1 模拟引擎	46
4.2.2 网络元素	46
4.2.3 协议模型	48
4.2.4 流量模型	49
4.2.5 跟踪与监视模型	49
4.2.6 后续处理工具	49
4.3 DRS 设计过程	50
4.3.1 DRS 的模拟引擎	50
4.3.2 DRS 的协议模型	51
4.3.3 DRS 的流量模型	54
4.4 实现网络协议	54
4.4.1 DRS 的仿真过程	55
4.4.2 DRS 的对象空间	55
4.4.3 数据包的格式	56
4.4.4 开发协议的方法	56
4.4.5 评价协议性能	58

4.5 小结	59
参考文献	59
第5章 平面动态 QoS 多播路由	61
5.1 引言	61
5.2 网络模型	62
5.2.1 路由建模	62
5.2.2 非精确状态模型	64
5.3 算法描述	67
5.3.1 基本思想	67
5.3.2 算法工作过程	68
5.4 正确性与复杂性	71
5.4.1 正确性	71
5.4.2 复杂性	72
5.5 仿真实验	72
5.5.1 实验环境	72
5.5.2 实验结果	73
5.6 小结	76
参考文献	76
第6章 蚁群 QoS 多播路由	78
6.1 引言	78
6.2 系统模型	79
6.2.1 信息素表	79
6.2.2 路由建模	80
6.2.3 非精确的状态信息	80
6.3 算法描述	81
6.3.1 主要思想	81
6.3.2 算法工作过程	83
6.4 相关问题讨论	85
6.4.1 收敛规则与蚂蚁数	85
6.4.2 正确性和复杂性	85
6.5 仿真实验	86
6.5.1 实验环境	87
6.5.2 实验结果	87

6.6 小结	89
参考文献	89
第7章 层次 QoS 多播路由	91
7.1 引言	91
7.2 系统模型	93
7.2.1 层次网络模型	93
7.2.2 层次路由模型	93
7.3 拓扑聚集	93
7.3.1 构造全网状图	94
7.3.2 构造生成树	97
7.3.3 构造星型模型	99
7.4 路由算法	100
7.4.1 基本思想	100
7.4.2 状态信息	101
7.4.3 算法描述	102
7.5 复杂性分析	104
7.5.1 空间复杂度	104
7.5.2 计算复杂度	105
7.6 仿真实验	105
7.6.1 仿真环境	106
7.6.2 实验结果	106
7.7 小结	109
参考文献	110
第8章 精确 QoS 路由	112
8.1 引言	112
8.2 多约束路由	113
8.3 基础概念	115
8.3.1 路径长度定义	115
8.3.2 K -最短路径算法	118
8.3.3 受支配路径	119
8.3.4 向前看	121
8.4 双向搜索	123
8.4.1 Dijkstra 算法	123

8.4.2 一维双向搜索	124
8.4.3 多维双向搜索	127
8.5 算法描述	128
8.5.1 算法元代码	128
8.5.2 算法复杂度	131
8.5.3 算法举例	133
8.6 小结	136
参考文献	137
第 9 章 总结与展望	139
9.1 总结	139
9.2 展望	140
参考文献	141
附录	142
附录 A 相关路由算法的元代码	142
A.1 QMRI 算法	142
A.2 QMRA 算法	143
A.3 HMRAMQ 算法	145
附录 B 常用术语英汉对照表	147

第 1 章 概 论

1.1 服务质量与多播

在目前的互联网中,一个会话的数据分组通常以点对点的方式、以不同的传输路径到达目的节点,而且不同任务的分组公平地共享网络资源。这种网络结构可以满足普通数据信息的传输需要,但不能很好地支持实时多媒体数据的传输^[1]。随着移动 Internet、全光 Internet 和 3D Internet 等高性能网络技术的不断发展及其应用领域的不断扩大,特别是多媒体业务(如视频会议、远程教学、数据分发和网络游戏等)的快速增长,目前这种单一的、点对点的、“尽力而为”(best-effort)的网络结构越来越不能适应当前网络应用的发展需要,研究和发​​展适合于传输实时多媒体数据的新一代网络技术已成为必然趋势。

为了满足上述需要,服务质量(quality of service, QoS)和多播(multicast)的概念随之出现。服务质量用于定性或定量地描述服务的提供者与接收者之间所协商的服务性能(如最小带宽、端到端的延迟、延迟抖动和包丢失率等),即保证分组在传输过程中能够获得可预测、可分类和可管理的服务质量级别^[2]。多播则是指一个源节点将同一数据信息发送到多个目的节点的通信技术,实现多播通信的关键是确定多播路由,即找到满足某些条件的多播树^[3]。

服务质量所涉及的内容很广,包括流量整形、包调度算法、路由算法、资源预留和接入控制等。但在服务质量的早期研究中,主要的研究集中在网络节点的调度策略和接入控制策略上,而路由算法却一直被忽视。近年来的研究表明,路由算法对实现网络的服务质量保证起到了非常关键的作用,同时也是平衡网络负载、控制网络拥塞以及充分利用网络资源的重要保证^[4]。因此,实现服务质量的网络模型和机制有很多,其中较为著名的有集成服务/资源预留协议(RSVP)模型、区分服务(diffServ)模型^[5]、多协议标记交换(MPLS)^[6]、电信信息网络体系结构(TINA)^[7]、流量工程(traffic engineering)以及 QoS 路由,其中 QoS 路由是当前 QoS 研究领域的热点问题。

简单地讲,QoS 路由就是要寻找满足特定 QoS 要求的一条路由路径(QoS 单播路由)或一棵多播树(QoS 多播路由),其目的是在路由建立的过程中为网络应用提供 QoS 服务,并可以优化网络资源、提高网络资源的利用率。这里所说的 QoS 要求一般有两种:最优化和给定约束,这些要求的任意组合就形成了用户对

网络通信的各种 QoS 要求。

多播的主要目的就是要在源节点与目的节点之间构造一棵多播树,目前所构造的多播树主要有三种:Steiner 树、共享树和最短路径树。多播树中的节点(多播会话的成员节点)在加入/退出的过程中,对现有多播树的损伤程度不应超过某一门限值,即多播树应具有动态变化的能力。多播的实现方式主要有集中式和分布式两种,集中式的多播需要用到不及时、不精确的全局状态信息,而分布式的多播则只需要本地(或局部)的状态信息,路由计算也被分散在每个节点上进行。

1.2 QoS 路由的关键技术

对于具有单一约束(如带宽约束)的 QoS 路由(包括单播和多播)问题,通常可以通过对传统的路由算法或协议(如 Dijkstra 算法、PIM(protocol independent multicast)等)进行修改来求解^[8]。但是,存在多个约束的 QoS 路由问题就复杂得多,特别是存在多个可加性 QoS 度量(包括网络代价)的情况。这里的可加性 QoS 度量主要是指链路的延迟、延迟抖动和网络代价,而凹性 QoS 度量主要是指链路带宽。已经证明,存在两个或两个以上不相关、可加性度量的 QoS 路由问题属于 NP-完全问题^[9]。需要特别说明的是,网络代价也是 QoS 度量的一种,但通常作为路由计算所优化的目标,不作为 QoS 约束条件。NP-完全问题是数学界至今尚未得到很好解决的问题。因此,如何化解此类 NP-完全问题,找到满足 QoS 约束的最优(或次优)路径(单播)或多播树(多播)是解决 QoS 路由问题的一个技术关键。

网络路由包括两个基本任务:①收集当前的网络状态信息;②利用所收集的状态信息计算满足某些条件的路由路径或多播树。由此可见,网络节点在路由计算的过程中必然要用到相关的网络状态信息,QoS 路由与多播路由也不例外。这些状态信息主要包括网络拓扑的连接性、链路的可用带宽、传输延迟以及节点中的排队延迟、剩余缓冲区大小等。在这些状态信息中,有些状态信息的变化频率并不高,如拓扑的连接性、链路的传输延迟,但另有一些状态信息却频繁地、快速地波动,如链路的剩余带宽、节点中的排队延迟和剩余缓冲区大小,在大型网络中,这种动态变化更是如此。

在动态网络中,网络节点不可能拥有整个网络的瞬时和详细的状态信息,即节点所知道的网络状态信息往往是过时的、非精确的,路由算法只能依靠部分或近似的网络状态信息进行路由计算。造成网络状态信息过时、不精确的原因主要有^[10~14]如下三方面。

1) 网络状态信息的传输延迟

状态信息的改变需要通过网络中的链路传播到其他的节点上,链路的传输延迟是网络系统所固有的、客观存在的,不能消除。因此,在一个状态信息快速变化

的网络中,节点所维护的状态信息往往是过时的,这种过时的程度跟链路传输延迟的大小有关。另一方面,由于状态信息到每个网络节点的传输距离是不同的,因此每个节点不可能同步获得网络的状态信息,这样也导致了状态信息的不精确性。随着网络规模的扩大,状态信息过时、不精确的程度将加大。

2) 网络状态的更新策略

状态更新越频繁,状态信息就越及时、越精确,但网络开销也就越大。对于大型网络而言,及时更新状态信息将导致庞大的额外开销,造成网络整体性能的降低,因此靠简单地增加状态更新的频率来提高状态信息的精确性是不现实的。不同的状态更新策略将直接影响状态信息的精确程度和网络负载,如何选择适当的状态更新策略是人们所关注的问题。

3) 网络拓扑的聚集方案

为了解决网络路由的扩展性问题,大型网络通常被划分成若干个不同的域,这些域被抽象成为逻辑节点,形成层次化网络的上层,这一处理过程称为拓扑聚集。拓扑聚集过程不可避免地忽略了网络下层的某些状态信息,从而导致了网络高层在计算路由时所使用的状态信息是不精确的。这种状态信息的不精确程度由拓扑聚集算法决定。

由此可见,NP-完全问题的求解和状态信息非精确性的处理是解决 QoS 路由问题的两项关键性技术。

1.3 相关技术介绍

本书中和 QoS 与多播路由技术相关的内容主要包括 QoS 路由、多播路由、动态路由以及网络仿真四部分,本节将对这几方面的技术现状分别予以介绍。其中,对于 QoS 路由,主要介绍 QoS 多播路由,因为绝大多数 QoS 多播路由技术实际上也涵盖了其相应的单播技术。同理,对于多播路由,也仅介绍层次多播路由,因为该技术是最全面、最具有代表性的多播路由技术。

1.3.1 QoS 多播路由

所谓的 QoS 多播路由就是要在满足 QoS 约束的前提下找到一棵整体代价最小的多播树(代价最小的多播树又称为 Steiner 树^[15]),当然这里的代价也可以代表其他的可加性 QoS 度量,如延迟、延迟抖动等。用户对多播通信的 QoS 要求一般有两种:最优化和给定约束。这些要求的任意组合就形成了各种不同的 QoS 多播路由问题。

1. QoS 多播路由算法

现有的 QoS 多播路由算法大致可以分为两类:源路由算法和分布式路由算

法。源路由算法是指路由计算在源节点上进行,并且需要全局状态信息的路由算法;分布式路由算法是指路由计算分散在中间节点上,一般只需要局部状态信息的路由算法。这些算法从本质上讲都是探讨如何化解有关 QoS 多播路由的 NP-完全问题。

1) 源路由算法

Kompella 算法^[16]:又称为 KPP 算法,它是一种求解满足延迟约束 Steiner 树的启发式算法。KPP 算法共分三步:①构造完全图,完全图的顶点为多播会话的源节点和目的节点,完全图的边为满足延迟约束的最小代价路径;②以此完全图为基础构造一棵最小代价生成树(Steiner 树);③将完全图的各边还原为原始物理路径,并移去还原操作中所形成的回路。该算法的时间计算复杂度为 $O(\Delta|V|^3)$,其中 $|V|$ 为网络中的节点数; Δ 为端到端延迟的上限。

CDKS 算法^[17]:由 Sun 等提出,它也是一种求解满足延迟约束 Steiner 树的算法。该算法首先利用 Dijkstra 算法找到最小代价树,然后检查各最小代价路径是否满足延迟约束,如不满足,就利用 Dijkstra 算法计算出另一棵最小延迟树,最后合并这两棵树,并移去可能存在的回路。CDKS 算法最后总能找到满足延迟约束且代价最小的多播树,其时间复杂度为 $O(|V|^3)$ 。

BSMA 算法^[18]:由 Zhu 等提出,它首先利用 Dijkstra 算法求出从多播源节点到各目的节点的最小延迟路径,以构成最小延迟树。在不违反延迟约束的前提下,用第 K 条最短路径算法精练该最小延迟树,即用代价更小的路径来代替原路径,使得最小延迟树的总体代价不断降低。文献[19]的实验表明,在目前所有求解满足延迟约束 Steiner 树的启发式算法中,BSMA 算法的代价精度最高。但 BSMA 算法也有其缺点,就是时间复杂度很高,为 $O(K|V|^3 \log |V|)$,因此不适用于大型网络。

这里需要说明的是,在算法复杂度的表达式中,常用 $\log$ 表示以 2 为底的对数。本书以后章节中若无特别说明,全部遵循这一约定。

2) 分布式路由算法

Chen-Nahrstedt 算法^[20]:由 Chen 和 Nahrstedt 提出,它是一个完全的分布式算法。首先,多播会话的源节点以扩散的方式发送探测报文,探测报文仅沿着能满足 QoS 约束、且至少能够到达一个目的节点的路径发送。探测报文在扩散时,能够探测出满足 QoS 约束且距离最短的路径,这些最短路径以渐进的方式生成多播树。对于准备加入多播组的新成员,也可以采用相同的方式(但方向相反)向多播树发送探测报文,从而找到满足 QoS 约束且距离多播树最短的路径。该算法的消息复杂度为 $O(|E|)$,其中 $|E|$ 为网络中的链路数。

QoS MIC 路由协议^[21]:它是一种比较成功的 QoS Internet 多播路由协议。可以大致将其归为分布式路由算法。QoS MIC 以接收方驱动的方式建立多播树,整

个过程包括三个阶段:

(1) 在搜索阶段,多播组的新成员(接收方)以本地搜索和多播树搜索的方式来选择一定数量的 Candidate 路由器;本地搜索以扩散的方式进行,目的是粗选 Candidate 路由器,多播树搜索则是新成员利用 Manager 路由器与粗选的 Candidate 路由器之间的投标会话来最终确定 Candidate 路由器。

(2) 在投标阶段,所有的 Candidate 路由器以发送竞标(BID)消息的方式向新成员广告各自的路径状态。

(3) 在挑选阶段,新成员根据接收到的 BID 消息挑选出满足 QoS 要求的最佳路径及其 Candidate 路由器。在 QoS MIC 中,多播组成员能够动态地加入/退出多播树,也可以从共享树切换到更有 QoS 竞争力的有源树,而且 QoS 约束也容易被扩展,但是,Manager 路由器的引入增加了 QoS MIC 的消息复杂度,也降低了系统的鲁棒性。

以上所列举的 QoS 多播路由算法(包括源路由和分布式路由)都属于平面路由算法,不适用于大型网络。目前,有关 QoS 层次多播路由的研究十分少见,尽管陆慧梅等提出了一种支持 QoS 的层次多播路由算法框架^[22],Yan 等也提出了 QoS MIC 协议的域间路由方案^[23],但是这些算法要么只是考虑了一个 QoS 约束(带宽约束)的情况,要么不具备很好的可扩展性。

除此之外,在现有的 QoS 多播路由算法中,也出现了几种采用新型组合优化方法(如遗传算法^[24~27]、蚂蚁算法^[28~32]、模拟退火算法^[33]等)的路由算法。例如, Sun 和 Xiang 等分别提出了各自的基于遗传算法的 QoS 多播路由算法;吕国英和 Chu 分别提出了基于蚂蚁代理(动态蚁群优化)和基于旅行商问题(TSP)蚂蚁算法(静态蚁群优化)的 QoS 多播路由算法。但是,这些组合优化的方法普遍存在着一些缺点和不足,即易陷于局部最优,收敛速度慢,有时甚至无法收敛,明显缺少实用性。

2. 算法的评价

从以上列出的几种具有代表性的 QoS 多播路由算法中可以看出,现有的 QoS 多播路由算法存在着以下的问题与不足:

(1) 没有考虑到过时的、非精确的网络状态信息对 QoS 多播路由的影响,而状态信息的非精确性又是客观存在的,在大型网络中更是如此。需要说明的是,尽管有一些分布式的 QoS 多播路由算法在路由计算时只使用了较为精确的局部(或本地)的状态信息,但它们都是以单播源路由算法作为其路由计算的基础,因此,同样会不可避免地涉及状态信息的非精确性问题。

(2) 路由的扩展性(层次路由)问题仍然没能得到很好的解决。例如,如何实现有效的多 QoS 状态参数(特征值)的拓扑聚集,并尽可能地减小由此带来的状态信息的不精确性;如何表示这些聚集的网络状态信息;如何利用这些聚集的状态信

息找到满足多个 QoS 约束的路径或多播树。这些技术难题至今为止都没能得到很好地解决,现有的 QoS 多播路由算法也都未涉及这方面的内容。

(3) 在目前基于动态蚁群优化的 QoS 多播路由算法中,没有考虑到过时的、非精确的网络状态信息对蚂蚁选路的影响。实验证明,网络状态信息的不精确性直接影响到动态蚁群优化的收敛速度和路由成功率。

(4) 对 QoS 约束的考虑比较孤立,没有兼顾其他 QoS 度量的影响,也没有考虑到 QoS 路由与传统“尽力而为”路由的结合。总体来讲,源路由算法的计算复杂度偏大,分布式路由算法的消息复杂度偏大。另外,基于遗传算法(或蚂蚁算法、模拟退火算法等)的 QoS 多播算法也普遍存在着计算复杂度过高、收敛速度过慢的问题。

1.3.2 层次多播路由

1.3.1 小节对 QoS 多播路由算法进行了归纳和评价,下面将对前面没有涉及的有关层次多播路由的内容进行扼要的介绍。

随着网络规模的迅速扩大,路由器中路由表的内容将成比例地增长,增大的路由表不仅占用了路由器的资源,而且网络链路也需要更多的带宽来传送网络状态信息,为此出现了层次路由机制。层次路由的基本思想是:将整个网络划分成多个不同的域,从而使得域内的节点只需要负责本域内的路由选择,而不必维护其他域的状态信息。层次路由也有其缺点:网络结构的层次化导致了状态信息的不精确性,从而无法为路由计算提供准确而及时的状态信息。目前,实现层次路由的方式有:①容错分层算法^[34];②基于区域的链路向量算法^[35,36];③基于状态信息聚集的算法。下面介绍几种常见的域间多播路由协议,对于带 QoS 约束的层次多播路由问题将在第 7 章中予以讨论。

多协议边界网关协议(MBGP):MBGP 是对 BGP v4 的多播扩展。MBGP 维护一个特定的多播路由信息库(M-RIB),可以在域间转发多播路由信息,但并不生成多播树,多播树由 PIM-SM(protocol independent multicast-sparse mode)协议来生成和维护。因此,必须将 PIM-SM 的汇聚点 RP 放在各个域的边界路由器上,RP 的存放位置不够灵活。但是,可以使用多播源发现协议(MSDP)来解决这个问题,只要本域的 RP 知道了其他域中活动的多播源,接收者就可以向多播源所在域的 RP 发送加入消息^[37]。

边界网关多播协议(BGMP)^[38]:BGMP 使用双向共享树来连接多个域,其中的一个域被指定为根域,其他的域向根域发送嫁接和剪枝消息,以此来生成并维护多播树。BGMP 利用多播地址设置声明(MASC)来实现多播地址的分配^[39],MASC 能够为各个域分配一个连续的多播地址空间。

另外,ATM 的网络体系结构在设计时就考虑到了对 QoS 和多播的支持。与

QoS路由有关的路由协议是 I-PNNI(integrated private network-network interface),该协议在 ATM 的第三层集成了 QoS 路由功能,使得 ATM 可以提供集成第二层和第三层的 QoS 服务。同时,ATM Forum 也给出了支持多播路由的三种建议模式:VC 网格模式、多播服务器模式和 SMART 模式^[40]。

1.3.3 动态路由

前面已经提到,网络状态信息主要包括网络拓扑的连接性、链路的可用带宽、传输延迟以及节点中的排队延迟、剩余缓冲区大小等。传统的路由协议(如 OSPF 和 PNNI)只需要广告拓扑连接性的状态信息,但在大型网络中,当研究 QoS 路由时,其他的状态信息,特别是快速波动的状态信息是不能被忽略的。状态信息的频繁波动造成了状态信息的非精确性,动态路由与非精确状态信息紧密相连。值得注意的是,这里动态路由的概念主要是指考虑状态信息动态的 QoS 路由。

在国外,Guérin 等于 1997 年首次提出了非精确状态信息的概念及其问题的研究模型。他们研究了状态信息的非精确性对路由选择的影响,提出了基于概率分布的状态信息描述模型,阐明了如何寻找最大可能地满足带宽约束或延迟约束的路由路径^[10,11]。Guérin 等的模型和算法都具有很好的可扩展性,可以较容易地扩展到层次化的网络之中,但同时也存在下列问题:①采用分段累计的方法来描述端到端延迟非精确性的数学模型较为复杂,难以求解;②所选用的 QoS 路由模型过于简单,没有考虑到存在多 QoS 约束及代价优化的情况。针对状态信息非精确的网络中延迟受限、代价最优的单播路由问题,Lorenz 等提出自己的状态信息描述模型和路由算法^[12]。尽管 Lorenz 也采用了分段累计法来建立基于概率分布的描述模型,但他所选用的概率分布模型有别于 Guérin 模型。Chen 和 Nahrstedt 针对上述问题提出了一种基于票据发放的 QoS 单播路由算法,他们假设端到端的延迟变化满足某种概率分布,并在此基础上提出了一种非精确状态信息的描述模型,这种描述比较粗略,但很简单^[13]。Jia 等则试图利用可替换路由来弥补由状态信息的不精确而造成的路由误差^[14]。除此之外,文献[41]、[42]对状态信息的非精确性、状态更新策略、链路代价分布、流量负载类型以及拓扑结构之间的关系和影响进行了实验与分析,得出了一些有价值的结论。

国内有关此类问题的研究很少。文献[43]仅指出了研究状态信息非精确性的重要性;文献[44]~[46]在 Guérin 模型的基础上,分别提出了能工作在状态信息非精确的网络中,各自的 QoS 路由算法。

由此可见,目前有关动态路由与状态信息非精确性的研究还存在着以下的问题与不足:

- (1) 描述状态信息非精确性的数学模型较为复杂。
- (2) 所选用的 QoS 路由模型过于简单,没有考虑到多 QoS 约束的情况,也没

有涉及多播路由的问题。

(3) 路由算法主要集中在寻找最大概率的路径,而忽略了网络代价的优化。

(4) 求解路由模型的算法大多为传统的启发式算法,没有考虑到仿生优化算法(如遗传算法、蚂蚁算法等)或其他组合优化算法(如模拟退火算法等)的应用。

1.3.4 网络仿真

任何一种新的网络协议、算法或策略在推广使用之前除了必要的理论分析与论证之外,还需要把它们应用到真实的网络环境中,以检验其正确性并测试其性能特征。然而,真实的网络环境庞大且复杂,往往难以控制,因而很少用于实验目的。建立实验测试网络是另一种可选的且行之有效的方案,但一般的机构和个人都难以担负其昂贵的造价与维护的费用。因此,网络建模和网络仿真以其高效性、灵活性、低费用等优点而成为网络研究的最重要手段。网络建模是对真实的网络元素进行抽象,保留其基本特征,并运用等效描述的方法来建立网络模型;网络仿真则是利用相关的软件技术,构造网络拓扑、生成流量负载、实现网络协议(或算法)、测评协议(或算法)性能的网络虚拟技术;建模是仿真的理论基础,仿真是建模的软件实现。网络建模和网络仿真不仅适用于网络模型的构造和设计、协议(或算法)性能的评价和分析,还适用于网络协议的开发与研究以及真实网络的故障诊断。

现有的网络仿真软件可分为两类:通用性仿真软件和专用性仿真软件。通用性仿真软件虽然能够对许多网络协议(或算法)进行模拟,但不是专门为某一领域的仿真而设计,因而存在一定的限制性。常见的通用性仿真软件有很多,既有昂贵的商业软件,如 OPNET^[47]、NetCracker^[48]等,也有免费的研究用软件,如 NS^[49]、OMNeT++^[50]等。

专用性仿真软件的功能单一,一般只为某一类协议(或算法)的仿真而设计,因此使用面很窄,多数只作为一些大学或研究机构自己专用的协议测试平台。例如,专用的路由仿真软件主要有 MaRS^[51]和 QRS(QoS routing simulator)^[52],MaRS是一种不支持 QoS 的路由仿真软件,QRS 也只为 RSVP 和 QOSPF 协议的仿真而设计。

由此可见,以上这些网络仿真软件的路由仿真功能都存在一定的局限性,不能很好地实现对真实的网络动态与非精确状态信息的模拟,而且大多数仿真软件也缺少对 QoS 路由的支持。因此,研制出一套不仅能模拟出真实的网络动态和非精确的状态信息,而且能支持 QoS 路由的动态路由仿真系统显得尤其重要。

另外,在拓扑仿真方面,现有的拓扑仿真软件(如 GT-ITM^[53]、Tiers^[54]和 Inet^[55])也存在一些需要改进的问题,如不能精确地描述 Internet 的拓扑结构,缺少一套通用的拓扑仿真软件(既能实现 Internet 拓扑的建模,又能构造实验性的网络拓扑)等。拓扑仿真软件通常作为网络路由仿真系统的子集。