

高性能网络 新技术研究

——非合作 QoS 分配策略及应用

陶 军 · 著

未选择的路

黄色的树林里分出两条路，
可惜我不能同时去涉足，
我在那路口久久伫立，
我向着一条路极目望去，
直到它消失在丛林深处。

但我却选择了另外一条路，
它荒草萋萋，十分幽寂，
显得更诱人、更美丽；
虽然在这两条小路上，
都很少留下旅人的足迹；



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

013061382

TP393
1303

高性能网络新技术研究

——非合作 QoS 分配策略及应用

陶 军 著



TP 393
1303

东南大学出版社

• 南京 •



北航

C1669760

内 容 提 要

长期以来,对支持网络 QoS 分配技术的研究与性能评价都是从纯粹工程技术的角度出发,着重去改进与提高技术的某项或几项性能指标,忽略了端用户的非合作行为,在具备较高的技术性能指标的同时,对端用户的行为缺乏合理的解释。在网络 QoS 分配技术的研究中,博弈理论提供了坚实的数学基础。本书使用博弈理论对贯穿整个 QoS 分配中的流速与拥塞控制、路由选择和资源分配等关键技术进行了深入的研究,全面地剖析了端用户的非合作行为本质。同时,本书细致而全面地展示了非合作博弈理论在 Internet 技术中的应用,以及非合作无线自组织网络技术(无线 Mesh 网和无线车载自组织网络)的研究进展、研究方法和最新成果,具有完整性、新颖性和学术性,并适当地给出了相关研究的前景分析、研究内容建议和规划。因此,本书非常适合从事计算机网络与通信领域相关教学、科研工作和工程应用的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

高性能网络新技术研究:非合作 QoS 分配策略及应用/陶军著. —南京:东南大学出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-5641-4353-4

I. ①高… II. ①陶… III. ①计算机网络—研究
IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 143262 号

高性能网络新技术研究——非合作 QoS 分配策略及应用

出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
责任编辑 张 煦
封面设计 王 玥
责任印制 张文礼
网 址 <http://www.seupress.com>
电子邮箱 press@seupress.com
社 址 南京市玄武区四牌楼 2 号
邮 编 210096
电 话 025-83793191(发行) 025-57711295(传真)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏兴化印刷有限公司
排 版 南京理工大学资产经营有限公司
开 本 700 mm×1000 mm 1/16
印 张 11.50
字 数 225 千字
版 次 2013 年 7 月第 1 版
印 次 2013 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-4353-4
定 价 36.80 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830。

未选择的路

黄色的树林里分出两条路，
可惜我不能同时去涉足，
我在那路口久久伫立，
我向着一条路极目望去，
直到它消失在丛林深处。

但我却选择了另外一条路，
它荒草萋萋，十分幽寂，
显得更诱人，更美丽；
虽然在这两条小路上，
都很少留下旅人的足迹。

虽然那天清晨落叶满地，
两条路都未经脚印污染。
呵，留下一条路等改日再见！
但我知道路径绵延无尽头，
恐怕我难以再回返。

也许多少年后在某个地方，
我将轻声叹息将往事回顾：
一片树林里分出两条路——
而我却选择了人迹更少的一条，
从此决定了我一生的道路。

前 言

当今的 Internet 中,用户为了各自的利益而相互“扭斗”,随着网络多媒体应用的广泛普及,“扭斗”现象日趋严重和激烈,这些多媒体传输应用对网络的 QoS 支持提出了更高的要求,迫切地需要网络能够进行动态的、高效的 QoS 分配。然而尽管网络带宽正以超摩尔定律的速度增长,传统的“尽力而为”(Best Effort)的转发服务机制、异构性和动态性仍将是 Internet 的一个长期特征,很难满足高质量的声音、图像等多媒体传输应用的需求,因此对支持网络 QoS 分配技术的研究引起了广泛的关注。

长期以来,对支持网络 QoS 分配技术的研究与性能评价都是从纯粹工程技术角度出发,如链路利用率、吞吐量等。这些方法着重去改进与提高技术的某项或几项性能指标,而忽略了端用户的非合作行为。从根本上说,传统的 QoS 分配中关键技术的设计与优化,在具备较高的技术性能指标的同时,对端用户的行为缺乏合理的解释。在当今缺少约束的 Internet 中,端用户不能心甘情愿地被约束,很少有人积极地遵守和采用以上研究的协议与技术,他们会采取各种方式去冲破这种束缚,例如,采用不受 TCP 拥塞控制约束的方式发送数据(UDP 报文)。这将成为 Internet 进一步发展的障碍,埋下拥塞崩溃的隐患。

因此,在研究网络 QoS 分配技术时,有必要引入新的研究方法和理论,博弈理论是这项研究理所当然的数学工具之一,为该研究提供了坚实的数学基础。本书使用博弈理论对贯穿整个 QoS 分配中的流速与拥塞控制、路由选择和资源分配等关键技术进行了深入的研究,全面地剖析了端用户的非合作行为本质。

本书内容分为三篇,共 12 章:第 I 篇(第 1~2 章),侧重于 Internet 与网络 QoS 技术的介绍与分析,其内容包括研究背景、视角和意义,现有典型的网络 QoS 技术(解决方案和关键技术)等。第 II 篇(第 3~8 章),侧重于非合作博弈

论理论与 Internet 的结合,其内容包括非合作 QoS 分配技术、非合作流速与拥塞控制的单链路和多链路模型、流速与拥塞控制的 Stackelberg 博弈和重复博弈模型、自私性路由选择技术、非合作资源分配的竞价模型与算法、非合作流速控制在 P2P 系统中应用。本篇内容的参考文献统一编排在第 8 章文后。第Ⅲ篇(第 9~12 章),前 3 章侧重于非合作无线网络技术研究展望,其内容包括非合作传感器网络的路由和拓扑控制技术、非合作无线 Mesh 网络中可信资源分配技术、非合作无线车载自组织网络中数据分发技术等。最后 1 章,我们对全书的研究内容进行了展望。

本书细致而全面地展示了计算机网络支持 QoS 的资源分配领域、非合作博弈理论在 Internet 技术中的应用,以及非合作无线自组织网络技术的研究进展、研究方法和最新成果,具有完整性、新颖性和学术性,并适当地给出了相关研究的前景分析、研究内容建议和规划。本书非常适合我国计算机网络与通信领域的教学、科研工作和工程应用参考,既可以供计算机、通信、电子、信息、自动化等相关专业的科研人员、研究生和大学高年级学生作为教学参考书,也可以供计算机网络研究开发人员、网络运营商等网络工程技术人员参考。

本书的研究内容和方法得到了南京大学商学院刘春林教授的支持和林辉教授的指导,感谢他们在本人博士后期间给予的大力帮助!

编 者

2013 年 3 月 29 日

目 录

第 I 篇

第 1 章 绪论:研究的背景、视角和意义	3
1.1 研究背景	3
1.1.1 什么是网络 QoS 技术	3
1.1.2 非合作行为与网络 QoS 技术	4
1.2 研究视角	5
1.2.1 网络 QoS 分配视角	5
1.2.2 博弈论与信息经济学视角	6
1.3 研究意义	7
第 2 章 网络 QoS 技术:解决方案和关键技术	10
2.1 区分服务(DiffServ)和集成服务(IntServ)	10
2.2 流量工程(Traffic Engineering)与 MPLS	12
2.3 主动队列管理	16
2.4 网络 QoS 路由	17
2.5 光传输技术	18
2.6 QoS 分配中的关键技术	19
2.6.1 流速和拥塞控制	19
2.6.2 路由选择	20
2.6.3 资源分配	21

第 II 篇

第 3 章 非合作 QoS 分配:理论基础、研究现状和分配框架	25
3.1 非合作博弈理论基础	25
3.1.1 Nash 均衡	25
3.1.2 Stackelberg 均衡	26
3.1.3 重复博弈	27
3.2 非合作 QoS 分配的研究现状	27

3.2.1 流速与网络拥塞控制博弈	28
3.2.2 自私行为下的竞争路由博弈	29
3.2.3 资源分配博弈	30
3.2.4 存在的问题	32
3.3 非合作 QoS 分配框架	33
3.3.1 研究环境	33
3.3.2 分配框架	33
3.3.3 端系统状态的变迁	34
3.4 小结	35
第 4 章 非合作流速与拥塞控制:单链路和多链路模型	36
4.1 非合作拥塞问题的描述	36
4.2 单链路非合作拥塞博弈模型	37
4.2.1 单链路拥塞博弈模型	37
4.2.2 Nash 均衡点的存在性和唯一性	38
4.2.3 Pareto 最优	40
4.2.4 集中式最优化拥塞控制方案	40
4.2.5 集中式最优和基于博弈论的拥塞控制比较	41
4.3 基于博弈理论的瓶颈链路流速与拥塞控制算法	42
4.3.1 异步流速控制算法	42
4.3.2 同步流速控制算法	44
4.3.3 两种算法分析比较	45
4.3.4 合理的 Nash 均衡点	49
4.3.5 β 参数的选择	49
4.3.6 TCP 友好	49
4.4 非合作流速与拥塞博弈模型	50
4.4.1 数学模型	50
4.4.2 最低速率保证	51
4.4.3 有限缓冲区	52
4.4.4 关于时间的考虑	53
4.5 小结	53
第 5 章 流速与拥塞控制:Stackelberg 博弈和重复博弈	54
5.1 Stackelberg 博弈问题的描述	54

5.2 Stackelberg 拥塞博弈模型	55
5.2.1 单跟随者	55
5.2.2 多跟随者	57
5.2.3 多层次	58
5.3 Stackelberg 拥塞博弈算法	63
5.3.1 端系统状态转换	63
5.3.2 算法框架	64
5.3.3 实验与分析	65
5.4 算法的进一步讨论	67
5.4.1 速率更新的影响因素	67
5.4.2 层速率计算的改进	67
5.4.3 单跟随者和多跟随者模型	68
5.5 重复博弈问题的描述	68
5.6 重复拥塞博弈模型	70
5.6.1 数学模型	70
5.6.2 无限重复博弈	72
5.6.3 两个端系统间的无限重复博弈	73
5.6.4 N 个端系统的无限重复博弈	77
5.7 重复拥塞博弈模型的进一步讨论	79
5.7.1 贴现因子的意义	79
5.7.2 惩罚威胁策略	80
5.7.3 有限重复博弈	82
5.8 重复流速控制博弈算法	84
5.8.1 算法框架	84
5.8.2 实验与分析	85
5.8.3 关于 FCAR 算法的讨论	87
5.9 小结	88
第 6 章 自私性路由选择: 博弈模型和路由博弈	89
6.1 自私性路由博弈模型	89
6.1.1 数学模型	89
6.1.2 Stackelberg 路由博弈	95
6.1.3 无限重复自私性路由博弈	98
6.2 路由博弈模型的进一步讨论	101

6.2.1	链路与路径	101
6.2.2	“原子”路由与“非原子”路由	101
6.3	自私性路由博弈算法	102
6.3.1	算法框架	102
6.3.2	端系统的博弈过程	103
6.4	算法的进一步讨论	104
6.4.1	端系统速率是否可以调节	104
6.4.2	Stackelberg 和无限重复博弈的路由算法	105
6.5	实验与分析	105
6.6	小结	107
第 7 章	非合作资源分配:竞价模型和分配算法	108
7.1	资源分配问题的描述	108
7.2	资源分配博弈模型	109
7.2.1	网络资源的定价机制	109
7.2.2	资源分配博弈模型	111
7.2.3	模型的进一步讨论	115
7.3	基于博弈理论的资源分配算法	116
7.3.1	算法的框架	116
7.3.2	资源分配算法	117
7.3.3	分配全部的资源?	118
7.3.4	竞价周期(资源使用时间)	118
7.3.5	端系统的支付能力	119
7.4	实验与分析	119
7.5	小结	120
第 8 章	P2P 速率控制应用:博弈模型和带宽划分	121
8.1	P2P 速率控制问题描述	121
8.2	网络对 P2P 系统的限速	121
8.2.1	基于流量工程的限速	121
8.2.2	面向 QoS 技术的限速	122
8.3	P2P 用户间的速率控制	123
8.4	P2P 流速控制博弈模型	124
8.5	P2P 服务提供端的带宽划分	125
8.6	小结	126

参考文献	127
------	-----

第 III 篇

第 9 章 非合作传感器网络:路由和拓扑控制技术	137
9.1 研究背景	137
9.2 研究现状与分析	138
9.2.1 无线传感器网络中路由技术	138
9.2.2 无线传感器网络中拓扑控制技术	139
9.2.3 非合作无线传感器网络	140
9.3 研究建议和规划	141
参考文献	142
第 10 章 非合作无线 Mesh 网络:可信资源分配中关键技术	144
10.1 研究背景	144
10.2 研究现状与分析	146
10.2.1 信道分配	146
10.2.2 路由选择	148
10.2.3 无线 Mesh 网络编码	150
10.3 研究建议和规划	151
参考文献	152
第 11 章 非合作无线车载自组织网络:数据分发技术	156
11.1 研究背景	156
11.2 研究现状及分析	158
11.2.1 车载网节点传输行为模型	158
11.2.2 车载网中数据分发技术	159
11.2.3 无线网络中非合作行为	161
11.3 研究建议和规划	162
参考文献	163
第 12 章 总结与展望	167
12.1 总结	167
12.2 有待解决的问题	169
12.3 进一步的研究工作	169

第 I 篇

Internet 与网络 QoS 技术

Internet 所提供的“尽力而为”服务方式,使得相关网络应用的 QoS 需求问题越发尖锐,而现有网络 QoS 技术的研究方法和手段都制约了其方案的部署与实施。为此,本篇将从网络 QoS 问题的背景入手,从多个不同的视角全面地分析网络用户自私的本质和网络 QoS 技术的研究现状。

第 1 章 绪论:研究的背景、视角和意义

作为 20 世纪后期的一场革命,Internet 的出现改变了人们的生活和工作方式,伴随着计算机网络技术的突飞猛进,WWW、电子邮件、文件传输等应用广泛普及,通信技术和多媒体技术也有了长足的进步,使得信息的索取、人与人之间的交流不再为时空所约束。各类技术的不断发展及相互交融,促使了计算机网络多媒体应用的萌生及兴起。

1.1 研究背景

随着高速网络技术的飞速发展,网络用户提出了多种多样的应用需求,如文件传输、网络会议和远程教育等,这些应用具有不同的数据流量特征,对应于不同类型的数据传输服务,所以对网络所能提供的服务质量(QoS)提出了不同的要求^[1]。

1.1.1 什么是网络 QoS 技术

目前建立在 Internet 设计理念上的 IP 网(包括电信级的 IP 网)所具有的 IP 地址无序、动态路由、网络设备之间不建立信任关系等特征,正是这些 IP 网络照搬 Internet 设计方法和理念的体现。由于 IP 网的设计方法和设计理念并没有改变,网络的管理者实际上无法了解网络资源的分配和使用情况,无法控制和调度网络资源,因而只能提供“尽力而为”的服务。要支持具有不同服务需求的音频、视频以及普通数据等业务,要求传输网络能够识别并区分网络中各类通信,进而为之提供相应的服务,这是传统的 IP 网络所无法实现的,所以也就无法为不同的通信提供不同的服务。因而 QoS 问题油然而生,QoS 问题说到底可以归纳为网络资源控制和调度问题,要使网络提供有 QoS 保证的服务,关键是要解决网络资源的按需控制和调度问题。

从上面的介绍可以看出,如果没有 QoS 的支持,音频、视频通讯,像 IP 电话和电视会议及关键任务数据等应用只能作为“尽力而为”服务(无保证的业务)传输,这将导致在网络拥塞时音频和视频很不稳定,从而最终导致这类应用的服务质量极差,甚至不可用。

同时,与网络 QoS 相关的支撑技术将是 IP 网络技术能否成为未来统一承载

网络技术的核心。这就迫切需要网络能够根据应用的要求进行动态的、高效的 QoS 分配,而传统的 Internet 只提供“尽力而为”的转发机制服务,无法满足用户高质量的声音、图像等多媒体传输服务需求,因此对 QoS 高效的支持变得越来越重要,从而对支持 QoS 分配中关键技术的研究引起了广泛的关注。

1.1.2 非合作行为与网络 QoS 技术

由流量的构成与数量、用户数量以及所支持网络应用的多样性带来的当今网络的复杂性迫切需要新型的网络技术支持,这些技术需要保持网络的简单性和控制机理的独立性^[2]。同时,在基本的 QoS 要求被满足的基础上,每个用户都贪婪地想得到更多的 QoS 服务,获得更多的资源。显然这种非合作的、贪婪的行为很容易导致网络的拥塞,网络的可用性得不到足够的保障,使得网络存在极大的隐患。

传统网络所面临的主要问题可以归纳为服务定制、资源控制和用户管理三大类,这三类问题的解决都受限于现有的求解方法。典型的传统网络优化求解方法,均在网络用户的行为彼此独立的假设下,研究达到特定目标的优化方法,并设计集中或非集中式的算法实现。然而,当今的 Internet 已经从一项单纯的技术发展成人类社会的重要组成部分,用户(网络活动的参与者)为了各自的利益而相互斗争,D. Clark 称这种现象为“扭斗”(Tussle)^[3]。

在支持网络 QoS 的技术的研究中,扭斗可以表现在如下层次上:

- (1) 网络(资源)提供者与用户之间;
- (2) 网络提供者之间;
- (3) 用户之间。

由此可见,“扭斗”将对互联网技术发展产生深远的影响,本书将对第(3)层的斗争展开研究。用户对网络资源的使用可以看成是非合作方式下的竞争行为,用户依据自己的标准寻求最优,同时,也要考虑其他用户的优化行为对其决策的影响,即不能忽略用户行为间的相互作用对优化结果的影响。正是因为这种相互作用,我们希望找到一个系统的均衡点(稳定工作点),在均衡点,网络中每个用户都无法通过改变策略来获得更大的收益。此外,由于 Internet 复杂的“社会性”,各种用户需求和应用(“合理的”与“不合理的”、“正义的”与“邪恶的”)交错存在,使得单纯地以“公平”为优化目标的解决网络问题的方法不再合理,本书也希望通过使用博弈理论研究用户非合作的行为本质以寻找约束用户不合理行为的方法。

博弈理论提供了一个研究用户行为的分析工具,我们可以使用博弈模型为系统寻求一个均衡点。博弈适合于解决那些端用户间无法协作,且不能简化为由单一的控制方通过集中方式解决的问题^[4]。博弈模型在交通运输网络中的应用研究

已有五十多年的历史,许多基于该模型的扩展和变化已相继运用到通信网络中。随着 Internet 的飞速发展,网络资源竞争日趋激烈,用户违规行为不断出现,网络博弈研究领域得到了显著的发展^[5, 6]。同时,博弈理论在数学、经济学、信息科学和交通工程等领域的研究成果极大地推动了博弈理论在通信网络中的应用。

综上所述,博弈在研究 QoS 分配技术中显示出广阔的应用前景,本书将对基于非合作博弈模型 QoS 分配中的关键技术(流速与拥塞控制、路由选择和资源分配)展开深入研究。

1.2 研究视角

本书将对博弈的 Nash 均衡、Stackelberg 均衡和重复博弈解在 QoS 分配中的应用进行了定性的和定量的推理,并在 P2P 系统中运用博弈论进行流速控制。

1.2.1 网络 QoS 分配视角

QoS 在提出时被认为是一个广泛、抽象和深奥的概念。在网络中,特别是在高带宽、多媒体网络中,对于 QoS 还没有准确的定义^[7]。本书讨论的 QoS 是应用需求和数据传输过程中底层网络应满足的测度与约束的参数集合,包括带宽、时延、时延抖动、报文丢失率、跳数和音/视频质量等。这些参数已经成为描述一个服务的重要参数^[96],同时,这些参数也从数量上刻画了不同应用的 QoS 特性。QoS 分配是指从应用提出 QoS 需求到 QoS 最终被赋予应用的过程。通常对应用的特定 QoS 要求的分配涉及三维空间的参数保障,我们使用三元组 (q, z, t) 表示完整的 QoS 需求,其中, q 表示 QoS 要求(带宽、时延、时延抖动或若干项指标的综合)的大小; z 表示 QoS 分配的物理空间; t 表示需要支持 QoS 的时间。实际上, QoS 需求往往在可理解的范围内被简化处理。例如,一个需要带宽支持的会话连接将从源节点向下一跳节点发送需要确保的带宽数量,这个 QoS 分配过程中,带宽的数量为 q , z 隐含为源节点到目的节点间的整个链路, t 则默认为整个会话连接的持续时间。

不难看出, QoS 源于应用需求,端到端的 QoS 分配体现在:为新型的、时间敏感和高带宽需求的应用提供可靠的保证;阻止行为不端的应用破坏整个网络的性能。为了优化端到端 QoS 分配的性能,网络协议栈的每个层次都应对网络应用提供 QoS 支持。与 QoS 参数对应, QoS 分配也是一个三维的过程,参见图 1-1。

由图 1-1 可知,过程①表示 QoS 要求的时间范围内都需要 QoS 分配操作;过程②表示 QoS 分配是源端到目的端配合的过程;过程③从协议栈的角度看,微观的 QoS 分配是自顶向下的协议栈配合操作过程。因此, QoS 的分配和保证需要端

到端的各层网络协议栈在要求的 QoS 时间范围内的协同支持, 主要涉及分组分类与标记、通信速率测量与管理、拥塞避免与分组丢弃、信令协议、分组交换与路由、资源分配与调度等方面的内容。这使得 QoS 分配存在这样或那样的困难, 主要表现在:

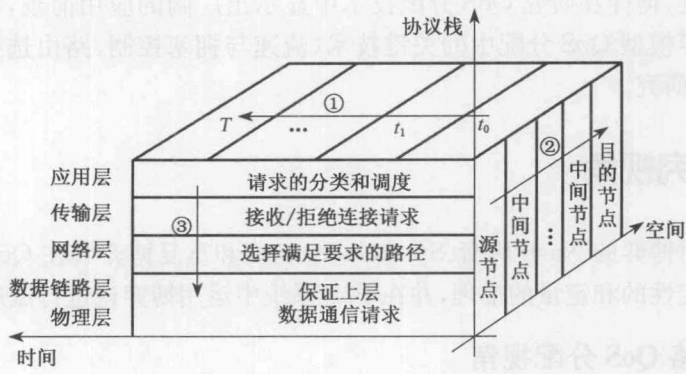


图 1-1 网络 QoS 分配框架

- (1) 这些对 QoS 要求的网络应用往往比传统应用需要更多的网络带宽和更大的缓存, 例如视频传输应用;
- (2) QoS 分配最终依赖于底层网络设施的支持;
- (3) QoS 的分配不仅需要中间节点的参与, 各用户合理的行为对分配的结果更为重要, 然而端用户之间并没有事先的约定, 他们的关系是一种非合作的竞争关系。

前两个问题不是本书的研究重点, 我们主要对支持 QoS 分配中的关键技术(流速和拥塞控制、路由选择和资源分配)中端系统的非合作行为展开研究。此外, QoS 分配问题发生在不同的层次, 本书主要研究网络层以上层次参与的 QoS 分配问题。

1.2.2 博弈论与信息经济学视角

博弈论是研究多个参与者决策的问题, 参与者是追求自己利益最大的理性个体, 其决策会潜在地影响其他参与者的利益。

典型的非合作博弈实例“囚徒困境”^[9, 10]讲述的是: 两个嫌疑犯(甲和乙)作案后被警察抓住, 隔离审讯, 警方的政策是坦白从宽, 抗拒从严, 如果两人都坦白则各判 8 年; 如果一人坦白另一人不坦白, 坦白的放出去, 不坦白的判 10 年; 如果都不坦白则因证据不足各判 1 年(支付矩阵如图 1-2 所示)。

不难看出: 对甲来说, 尽管他不知道乙是选择了“招”还是“不招”, 但他发现自