

Video Traffic Analysis
and QoS Management

视频流量分析 与QoS管理

黄天云 著



电子科技大学出版社

视频流量分析与 QoS 管理

Video Traffic Analysis and QoS Management

黄天云 著

电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

视频流量分析与 QoS 管理 / 黄天云著. —成都: 电子科技大学出版社, 2007. 3

ISBN 978-7-81114-444-4

I. 视… II. 黄… III. 通信系统—视频信号—数字技术
IV. TN919

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 041575 号

内容简介

如何对编码视频数据流进行有效传输并保证其服务质量 QoS, 是近年来宽带业务研究的热点。本书提供了对视频流量进行模拟和性能分析的一般化方法, 以及保证 IP 上视频流传输服务质量的关键技术。本书研究了常见的视频流量模型、典型的视频流量管制和整形算法, 以及速率-失真理论在流视频传输中的应用。在此基础上分析了 MPEG-2 的分层编码、MPEG-4 的基于对象体系结构, 以及 MPEG-4 精细粒度可扩展编码 FGS 的优化传输方案和调度策略。

本书可作为计算机、通信、电子、应用数学等专业的研究生教材, 也可作为相关领域的大学生和科技人员的参考书。

视频流量分析与 QoS 管理

黄天云 著

出版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 张 勋

责任编辑: 张 勋

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 12.5 字数 304 千字

版 次: 2007 年 5 月第一版

印 次: 2007 年 5 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-81114-444-4

定 价: 29.80 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83256027
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。
- ◆ 课件下载在我社主页“下载专区”。

前 言

流媒体技术的发展得益于 3 个方面的因素：网络技术、视频压缩编码标准、应用的实际需求。近 10 年来，随着应用的实际需求和终端业务的不断发展，引入新的媒体服务，如视频（流媒体）传输，这使得网络流量管理和服务质量 QoS（Quality of Service）变得越来越重要。为视频传输提供应用所需的 QoS 是一项具有挑战性的工作。

然而，传统的 Internet 并不能有效地提供并满足用户的需求，因为 Internet 是基于 IP 的尽力而为（Best Effort）服务，它无法提供多媒体通信所需的服务质量参数如带宽、时延和时延变化、差错和丢失率等。当前，众多的研究者致力于从多个方面来解决该问题，如：增加网络的传输带宽，研究新的网络传输和资源预留协议，构造新的 Internet 通信模型和体系结构，以及在有限的网络资源情况下发展可扩展的自适应媒体编码和表征机制。针对 IP 网络已经提出了一些业务模型，如综合业务模型 InteServ、区分业务模型 DiffServ、多协议标识交换 MPLS 等。在 ATM 网络中，更将业务质量 QoS 作为首要考虑的问题力图加以解决。

正因为意识到视频传输对终端用户和实际应用的重要性，它已经成为当今国际学术界的一个研究热点。在 IEEE 和国内的众多期刊上常见到这方面的研究成果发表。

在这个过程中，视频压缩编码标准和网络技术的进展起了至关重要的作用。视频编码的目的是以更低的码率压缩、存储和传输视频数据。从 1992 的 MPEG-1 和 1994 年的 MPEG-2 开始，视频压缩编码技术已经有了长足的进步，MPEG-2 的分级可扩展、MPEG-4 的面向对象编码和精细粒度可扩展 FGS，以及 H.264/AVC 的高级编码技术等，已经成为国际标准并得到广泛应用。我国也已建立相应的视频编码标准草案 AVS。同时，网络技术已经从传统的 IP 和 ATM 发展到 P2P 对等网络，并进一步扩展到无线环境，如无线 IP 和移动 Ad Hoc 网络。特别是移动 Ad Hoc 网络在最近几年内得到广泛的关注和研究。各种移动终端设备如 GPRS、CDMA 的推广和普及，也使得适合这些网络承载的流媒体传输如多媒体通信和视频会话业务的需求与日俱增。

因此，本书的出版目的是总结近年来 IP 视频传输应用的主要研究成果，讨论视频传输所需的关键技术和当前研究状况，这些研究反映了当前视频传输应用研究的主要进展及存在的问题。

本书第一章首先给出 QoS 参数定义，对 IP QoS 的几种主要体系结构进行对比。

第二章讨论视频数据模型和编码表征，对图像和视频内容的表示、基于内容的索引和检索、MPEG 系列视频数据的编码表征和位流语法描述等进行概述。

第三章介绍网络分析中用到的主要业务流量模型，如 Poisson 过程、Markov 调制过程、TES 过程等；同时，对近年的热点研究——自相似网络流量模型也进行详细的分析，介绍多种不同的自相似流量模型，讨论其参数估计问题；对随机网络流量的模型选择问题也进行分析。

第四章讨论视频流量模型和性能分析，给出基于 Markov 链和场景迁移的 VBR 视频流量的完整建模过程；同时对聚合视频流量的 α 平稳自相似模型以及基于 Markov 到达过

程 MAP 的分层视频流量模型进行分析。

第五章分析 IP 和 ATM 网络常见的流量管制和流量整形算法;根据令牌桶和漏桶算法,实施一种在 InteServ 模型的可保证服务 GS 下,基于源端的 VBR 视频流令牌桶整形方案,以保证视频流传输的延迟和延迟变化在可控制的 QoS 参数范围内;同时讨论常见的开环控制和闭环流量控制算法,建立 VBR 视频流基于预测控制的流量控制算法及自适应的流量传输方案。

第六章讨论速率-失真(Rate Distortion)理论在流视频传输中的应用。首先分析基于发送端的 MPEG 流视频传输的 R-D 模型,这也是最早提出的 R-D 流传输方案;并推广到基于接收端流传输和自适应回放。利用逼近理论,讨论可扩展编码如 MPEG-2 分级可扩展、MPEG-4 FGS 和 PFGS 的 R-D 优化模型;同时给出两种低复杂度的 R-D 优化视频流传输方案。最后讨论基于 R-D 和有效带宽模型的 MPEG 视频的优化包调度算法,对 SRD、LRD、FARIMA 和多分形流量模型下算法的不同性能指标进行对比分析。

第七章分析 MPEG-2 的分层编码和 MPEG-4 的基于对象体系结构;讨论视频对象 VO 的优先级分配算法和传输数据单元的调度序。分析服务数据单元 SDUs 向 DiffServ PHB 的映射机制,以及视频对象 VO 在 DiffServ 上的传输体系结构;同时通过对 ATM 适配层 AAL5 的修改,建立了带优先级的 ALL-5-AAL-5p,以保证基于对象分层编码视频在 ATM 网络的有效传输。

考虑到 MPEG-4 的精细粒度可扩展编码 FGS 在 IP 流视频传输研究中的广泛应用,本书第八章详细分析 MPEG-4 FGS 流视频在 IP 的优化传输方案和调度算法。首先给出一般化情形下的 MPEG-4 FGS 包分配和调度方案;其次基于 PSNR (MSE) 建立 MPEG-4 FGS 流视频的相关客观质量和质量变化指标定义,提出视频分段场景基础上的质量最优化问题;通过状态迁移图和动态规划解决 FGS 流视频的最优传输策略问题。同时将 MPEG-4 FGS 的位率分配方案推广到更细粒度,如 GoV 或单帧的精细位率控制,对比不同分配方式的优缺点。最后,建立基于错误消除 EC 的 FGS 流视频 R-D 矩阵,分析基于 Markov 决策过程 MDP 的 FGS 流视频的优化传输模型及其求解。

本书每一章的参考文献在文中相应位置标注并在章末给出。并且,从第三章开始包含文献评述,不仅对该章内容的引用处进行注释,也对未阐述的内容和当前研究重点进行概括和推广。这也便于读者参考其他文献和进行扩展研究。本书没有专门讨论 P2P 对等网络和无线环境如无线 IP、移动 Ad Hoc 网络的流视频传输研究,这方面的内容作者将另行著书阐述。

本书是作者在博士学习期间以及后续研究工作的基础上,参考国内外相关研究成果(包括技术报告)概括和总结而成。本书的出版得到国家民委科研项目基金(05XN09)和西南民族大学博士创新基金(234138)的资助。感谢电子科技大学计算机学院 803 教研室全体同仁以及西南民族大学计算机科学与技术学院的领导对作者的研究工作提供的大力支持和帮助。

由于作者水平有限,加之时间仓促,对文献的理解可能不够透彻,书中的不足之处在所难免,敬请广大专家和读者批评指正。

作者
2006 年 10 月

目 录

第一章	QoS 参数定义和网络控制.....	1
1.1	QoS 参数定义和网络映射.....	1
1.1.1	QoS 参数定义的参考模型.....	1
1.1.2	网络特性向 QoS 参数的映射.....	1
1.2	IP 和 ATM 网络的 QoS 参数定义.....	2
1.2.1	ATM 网络的 QoS 参数定义.....	2
1.2.2	IP 网络的 QoS 参数定义.....	3
1.2.3	IP 和 ATM 网络的 QoS 参数规范对比.....	4
1.3	IP QoS 的几种主要体系结构对比.....	4
1.3.1	综合业务模型 InteServ.....	5
1.3.2	区分业务模型 DiffServ.....	7
1.3.3	多协议标识交换 MPLS.....	8
1.3.4	小结.....	9
	参考文献.....	10
第二章	视频数据模型与编码表征.....	11
2.1	图像和视频内容的表示.....	11
2.1.1	图像的分析与分类.....	11
2.1.2	视频数据的表示与索引.....	12
2.1.3	运动分析与视频分段.....	14
2.1.4	视频数据的组成模型.....	15
2.2	基于内容的索引和检索.....	15
2.2.1	基于内容的检索与相似匹配.....	15
2.2.2	查询公式化和表现.....	16
2.2.3	查询优化.....	17
2.2.4	查询结果及检索的重构.....	17
2.3	视频数据的编码表征.....	18
2.3.1	MPEG 系列标准概述.....	18
2.3.2	MPEG 视频数据的编码表征.....	19
2.3.3	编码视频数据的位流语法描述.....	30
2.3.4	小结.....	32
	参考文献.....	33
第三章	网络业务流量分析模型.....	36

3.1 传统网络业务流量模型.....	36
3.1.1 引言.....	36
3.1.2 网络业务流量模型.....	36
3.2 自相似网络流量模型.....	43
3.2.1 随机游动和布朗运动 (Random Walk & Brownian Motion)	43
3.2.2 二阶自相似过程 (Second-Order Self-Similar Processes)	45
3.2.3 自相似现象的随机模型.....	46
3.2.4 随机过程模型的选择——自相似或非自相似.....	48
3.3 文献评述.....	49
参考文献.....	49
第四章 视频流量模型与性能分析.....	52
4.1 MPEG VBR 视频流——统计特性及其模型.....	52
4.1.1 引言.....	52
4.1.2 主要的工作.....	52
4.1.3 视频分段.....	53
4.1.4 场景聚类.....	54
4.1.5 场景切换——四状态 Markov 调制链.....	55
4.1.6 场景建模.....	55
4.1.7 小结.....	58
4.2 聚合 VBR 视频流的 Alpha 平稳自相似随机模型分析.....	58
4.2.1 引言.....	58
4.2.2 定义和参数估计.....	59
4.2.3 Alpha 自相似随机变量的产生.....	62
4.2.4 聚合 VBR 视频流模型分析.....	65
4.2.5 试验仿真和定量比较.....	66
4.2.6 小结.....	67
附录 4.1 多聚合视频流收敛性分析.....	68
附录 4.2 α -平稳自相似输入排队系统的分析.....	69
4.3 基于 Markov 到达过程 MAP 的分层视频流量模型.....	70
4.3.1 Markov 到达过程 MAP.....	71
4.3.2 分层视频的 MAP 流量模型.....	72
4.3.3 试验对比和分析.....	73
4.3.4 小结.....	75
4.4 文献评述.....	77
参考文献.....	78
第五章 IP 和 ATM 网络的视频流量控制算法.....	82
5.1 流量管制和流量整形算法.....	82

5.1.1 令牌桶和漏桶流量控制算法.....	82
5.1.2 业务量参数控制——管制和整形.....	87
5.1.3 MPEG VBR 视频流流量整形.....	91
5.1.4 小结.....	99
5.2 MPEG 视频传输的流量控制算法.....	100
5.2.1 开环流量控制算法.....	100
5.2.2 闭环流量控制算法.....	103
5.2.3 基于预测控制的 VBR 流视频传输控制.....	106
5.2.4 小结.....	112
5.3 文献评述.....	112
参考文献.....	113
第六章 R-D 优化模型与 MPEG 流视频传输.....	117
6.1 基于发送端 (Sender-Driven) 的 R-D 优化模型.....	117
6.1.1 数据单元敏感度调整和 R-D 优化.....	118
6.1.2 数据单元优化传输策略.....	119
6.1.3 几种不同方案的 R-D 性能比较.....	119
6.2 基于接收端 (Receiver-Driven) 的 R-D 优化模型.....	120
6.2.1 固定回放速率的 R-D 优化.....	120
6.2.2 自适应回放 AMP 和优化流传输.....	121
6.2.3 试验和对比分析.....	122
6.2.4 小结.....	123
6.3 分级可扩展编码视频的 R-D 优化模型.....	124
6.3.1 R-D 曲线及其逼近模型.....	124
6.3.2 可扩展编码视频的 R-D 模型.....	125
6.3.3 与传统 R-D 模型和 Mallat 模型的试验对比.....	127
6.4 两种低复杂度的 R-D 优化流传输方案.....	128
6.4.1 信道特征描述.....	128
6.4.2 两种 LC RaDio 优化流方案.....	129
6.4.3 算法复杂度分析.....	130
6.4.4 试验结果分析.....	130
6.5 MPEG 流传输的 R-D 优化和有效带宽调度.....	131
6.5.1 视频序列 GoP 的 R-D 分析.....	131
6.5.2 基于有效带宽的优化包调度算法.....	133
6.5.3 试验分析和性能评价.....	137
6.5.4 小结.....	139
6.6 文献评述.....	139
参考文献.....	139
第七章 基于对象分级编码视频及多优先级传输.....	142

7.1	分层可扩展编码与 MPEG-4 对象描述	143
7.2	MPEG-4 视频对象 VO 的优先级分配算法	145
7.3	ATM 的视频对象 VO 多优先级实时传输	148
7.3.1	对 ATM 适配层 AAL-5 的修改——带优先级的 AAL-5 (AAL-5p)	149
7.3.2	多优先级缓冲访问控制算法 MP-BAC (Buffer Access Control)	150
7.3.3	实验仿真	151
7.3.4	小结	154
7.4	IP DiffServ 的视频对象 VO 多优先级实时传输	154
7.4.1	优先级向 DiffServ PHB 的映射	155
7.4.2	实验仿真	155
7.4.3	小结	157
7.5	文献评述	157
	参考文献	158
第八章	MPEG-4 FGS 视频传输质量定义及调度算法	160
8.1	一般化情形下的包分配与调度方案	160
8.1.1	MPEG-4 FGS 的优化包分配和调度算法	160
8.1.2	用户定义缓冲时间与视频表示质量的平衡	164
8.1.3	小结	165
8.2	一类 FGS 流视频的质量定义与 基于场景的优化调度算法	166
8.2.1	引言	166
8.2.2	定义及定理	167
8.2.3	问题求解及算法	170
8.2.4	试验分析	172
8.2.5	小结	175
8.3	推广到更细粒度如 GoV 和单帧的精细位率控制	175
8.3.1	TFRC 流量和 GoV 模式下的位率分配和调整方案	176
8.3.2	几种方案的试验仿真和对比分析	177
8.3.3	小结	180
8.4	MPEG-4 FGS 的 R-D 矩阵与 MDP 最优决策模型	180
8.4.1	假设及问题描述	181
8.4.2	失真度 R-D 矩阵	182
8.4.3	单约束条件 MDP $\{X_n, A_n\}$ 优化模型及其求解	183
8.4.4	推广到多约束条件 MDP $\{X_{n-1}, X_n, A_n\}$	185
8.4.5	部分可观察 POMDP $\{A_{n-1}, A_n\}$ 及其求解	185
8.4.6	小结	186
8.5	文献评述	186
	参考文献	187
附录	缩写词汇表	189

第一章 QoS 参数定义和网络控制

近年来，随着终端业务的不断发展，引入了多种新的媒体服务，这使得网络流量管理和服务质量 QoS（Quality of Service）变得越来越重要。因为对包括文本、图像、音频、视频在内的综合媒体服务，要提供这些业务所需的 QoS 是一项具有挑战性的工作。IP 和 ATM 都从不同角度对流量管理和服务质量进行研究，力图提供相应的解决方案以迎接新的用户业务的挑战。本章首先讨论 QoS 参数的一般定义和参考模型，在此基础上分析 IP 和 ATM 网络是如何提供不同业务的 QoS 保证的。目的是为以后章节研究 MPEG 视频流在 IP 和 ATM 网络的传输作一个铺垫。相关的参考文献和文档，读者可以从 IETF 的 RFC 或 ATM 的正式文档得到。

1.1 QoS 参数定义和网络映射

1.1.1 QoS 参数定义的参考模型

标准从终端用户的角度提出了基于端到端的 QoS 参数定义（End to End QoS）。这是从用户应用的交互性而言的。它可能包含多个网络，每个网络可能包含多个节点。而每个网络因交换、复用、传输等都会引入时延、丢失、差错，这些均会影响到端到端的 QoS。网络节点的输入/输出链路的拥塞、缓冲争用也会导致丢失和时延等，如图 1.1 所示。

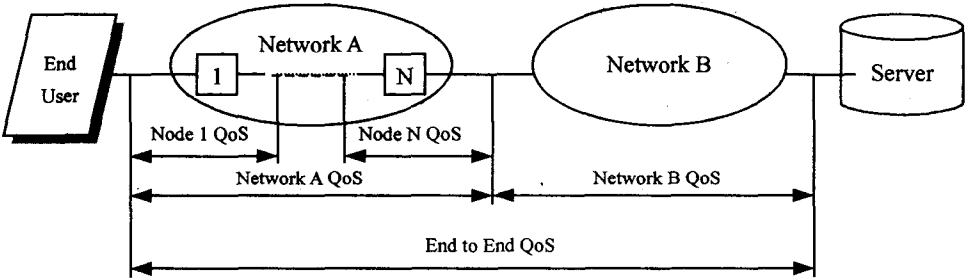


图 1.1 QoS 参数定义参考模型

因此，不论是网络还是节点，都可能需要实施一定程度的流量整形方案来最小化网络延迟变化或数据丢失。对终端用户而言，他们所能看到的只是端到端的 QoS，但也可能需要在入口级上进行流量管制，以保证输入的流量与预先协商的 QoS 参数相一致。

1.1.2 网络特性向 QoS 参数的映射

表 1.1 列出 IP 和 ATM 网络中相应的网络特性对 QoS 参数的影响^[1]。

可以看出，受 IP 路由器和 ATM 交换机影响最大的 QoS 参数可归结为：因缓冲溢出而

导致的时延 (Delay)、时延变化 (Delay Variation)、丢失率 (Loss)。而传输的数据包或信元的位差错和突发差错 (Bit and burst errors) 可能会导致随机差错 (Random Errors) 或信元误插 (Misinsertion), 从而引起差错倍增。数据包或信元穿越的网络节点越多, 越可能造成 QoS 质量的下降 (Degeneration)。所有的网络特性都会或多或少地影响到最终的端到端 QoS, 即终端表示质量 QoP (Quality of Presentation)。

表 1.1 网络特性向 QoS 参数的映射

Characteristic	Delay	Delay Variation	Loss	Random Errors	Misinsertion
Propagation Delay	✓				
Switch/router queuing architecture	✓	✓	✓		
Switch/router link rate	✓	✓			
Packet Size	✓	✓	✓		
Switch/router buffer capacity	✓	✓	✓		
Switch/router resource allocation	✓	✓	✓		
Variations in traffic load	✓	✓	✓		✓
Switch/router and link failures			✓		
Bit and burst errors			✓	✓	✓
Number of switches/routers traversed	✓	✓	✓	✓	✓

1.2 IP 和 ATM 网络的 QoS 参数定义

1.2.1 ATM 网络的 QoS 参数定义

ATM 论坛 UNI 4.0 流量管理规范定义如何在用户/网络接口 UNI 上协商特定的 QoS 性能参数。表 1.2 是 ATM 标准定义在 ATM 层 (ATM Layer) 的部分 QoS 参数。表 1.2 最后一列表明用户是否可以与网络就相应的 QoS 参数进行协商。不能协商的部分在网络交换节点中隐式 (Implicit) 地实施。读者可以参考 ITU-T 建议 I.356^[2]、I.610^[3] 以获得 QoS 参数更详细的定义。

表 1.2 ATM 网络的 QoS 参数定义

QoS Acronym	QoS Parameter Name	Negotiated?
Peak-to-peak CDV	Cell Delay Variation	Yes
Max CTD	Maximum CTD	Yes
CLR	Cell Lose Ratio	Yes
CER	Cell Error Ratio	No
SECBR	Severely Erred Cell Block Ratio	No
CMR	Cell Misinsertion Rate	No

ATM 允许应用以两种不同的方式来协商 QoS 参数。首先, PVC 或 SVC 应用可能需要某种服务类型 (如: CBR, rt-VBR, nrt-VBR, UBR 或 ABR 等)。另一种则在 UNI 4.0 中定义, 它允许应用通过信令 (Signaling) 传送来显式 (Explicit) 地定义表 1.1 中规定的某个或几个 QoS 参数。表 1.3 是 I.356 对三种不同的 QoS 等级的定义。

QoS 等级 1 是为满足具有严格要求的 CBR 业务需求而定义的; QoS 等级 2 的应用不对信元丢失优先级 CLP 进行区分; QoS 等级 3 的应用则对 CLP=0 (高优先级) 的信元提供可保证的服务 GS (Guaranteed Service), 对 CLP=1 (低优先级) 的信元则不作任何保证, 除非网络还有可用资源以传输优先级为 1 的信元。这特别适合于 MPEG-2 中的二级 VBR 编码技术。后面将根据此思想建立 MPEG 视频的面向对象的分层视频编码及多优先级传输方案。

表 1.3 I.356 的 QoS 分级及性能指标

QoS Parameter	Notes	QoS Class 1	QoS Class 2	QoS Class 3
CTD	Mean value	400 ms	Unspecified	Unspecified
CDV	10^{-8} quantile	3ms	Unspecified	Unspecified
CLR(0+1)	Applies to CLP=0+1	3×10^{-7}	10^{-5}	Unspecified
CLR(0)	Applies to CLP=0	N/A	Unspecified	10^{-5}
CER	Upper Bound	4×10^{-6}	4×10^{-6}	4×10^{-6}
CMR	Upper Bound	Once per day	Once per day	Once per day
SECBR	Upper Bound	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}

1.2.2 IP 网络的 QoS 参数定义

IETF RFC 2216 定义了 IP 网络的 QoS 参数规范。表 1.4 列出在 IETF 的 InteServ^[4]模型下的两种不同的服务: 可控负载 CL (Controlled Load) 和可保证服务 GS (Guaranteed Service) 下对应的 QoS 参数。这也在 RFC 2221、RFC2222 中进行总结。

表 1.4 IP 的 InteServ 模型下 QoS 参数规范和定义

QoS Parameter	Controlled Load	Guaranteed QoS
Maximum Delay Variation	Not specified	Automatically measured Using Adspec
Packet loss rate	Little or no congestion loss, Should be error-limited	Sufficient buffer required for zero congestion loss
Minimum delay	High percentage of packets Do not exceed minimum delay	Not specified
Average delay	Little or no queuing delay over Time frames greater than round-trip delay	Not specified

与 ATM 的预分配方式相比, IP 的 QoS 参数定义没有参考配置。在 IP 中, 应用无法动态地改变已经与网络协商好的 QoS 参数值, 除非重新进行协商。当然, 也可以实施相应

的流量控制算法,如闭环控制策略来进行反馈,以获得可接受的 QoS 性能。可保证服务 GS 定义了端到端的最大允许时延、时延变化和缓冲需求,因此所有网络节点都可以保证数据传输过程中零排队丢失率。实时应用可以利用 GS 的最大时延变化以保证可进行连续回放(Playback),避免造成接收缓冲的上溢和下溢。RFC 2005~2216 已经定义了 RSVP^[5],作为 IP 网络中资源预留和保证应用所需 QoS 的协议。

1.2.3 IP 和 ATM 网络的 QoS 参数规范对比

ATM 是基于源端初始化连接(硬状态——Hard State),因此可为应用提供所需的 QoS 和带宽保证,无法接入的应用在准入阶段就被拒绝。IP 通过 RSVP 进行资源预留,RSVP 是基于接收端进行初始化的(软状态——Soft State),网络中的交换节点或路由器不能都保证预留连接所需的所有资源,因而无法可靠保证用户应用的连接需求。相比而言,ATM 在提供音频/视频或对网络性能敏感的业务上更显优势。

RSVP 要求接收端周期性地刷新资源预留请求,而且资源预留和路由是独立进行的,不能保证预留资源都恰好被利用;ATM 则是在连接建立阶段同步进行的,因此可保证更有效地利用预留资源。

面向连接的 ATM 网络不能很好地支持已有的绝大多数 IP 应用,然而可以通过在主干网(Backbone)上实施 ATM 以获得更好的连接管理和资源预留。两者都存在一定程度的可扩展性问题,因为资源预留是针对每条连接进行的,必须要采取某种形式的聚合以获得可扩展性,如表 1.3 中的 QoS 分级或 ATM 中的 VP(虚通路)聚合。

ATM 从 1995 年起就致力于为不同类型的业务提供 QoS 保证,IP 的 RSVP 则直到 1999 年才正式成文。ATM 标准曾经提及采取相应的 QoS 协商和资源预留机制,如基于 ATM 承载的 IP 数据传输(IP over ATM)等。然而,随着近年来媒体业务传输的研究更多地集中到 IP 上,对 ATM 的 QoS 研究已经逐渐淡化。毕竟,实际应用已证明是成功并且日渐完善的 IP 技术,比采用虽然有更严格的 QoS 规范,但却更复杂、更难于实施的 ATM 网络,有更大的优势。

1.3 IP QoS 的几种主要体系结构对比

鉴于本书主要集中在对 IP 流媒体传输的研究,因此以下对 IETF 提出的几种主要的 QoS 体系结构进行对比分析;并且后面将讨论 InteServ 的可保证服务 GS 下的 VBR 视频流传输和 DiffServ 下的 MPEG-4 视频对象 VO 的优先级传输等。

可以从不同角度理解 IP QoS。ISO、ITU、IETF 分别给出不同的定义,其内涵不尽相同。由于 IP 技术最早应用于互联网,所以 IETF 的关于 IP QoS 的定义(即 IP QoS 是指 IP 层的 QoS)在 IP 技术研究领域得到了广泛的认可,其性能参数包括丢包率、吞吐量、传输时延、时延变化等。与 IETF 关于 IP QoS 的定义相比,ITU-T 的 IP QoS 不单指网络层 QoS,还包括应用层 QoS,它从网络运营的角度来定义 IP QoS,认为 IP QoS 存在于各个网络运营实体之间。而 ISO 的定义则更广泛,基于 7 层协议模型,ISO 认为各个网络层次之间、对等层次之间都存在服务和被服务关系,因此就存在服务质量 QoS 的概念。所以,

QoS 不只局限于网络层和应用层, 它存在于网络的各个协议层次之间 (ISO/IEC JTC1-SC21)。更进一步的研究则可以从用户、ISP 和网络营运商的角度进行分析。目前, 从网络分析的角度, 主要采用 IETF 定义的量化性能参数。为此, IETF 建议了 3 种不同的服务模型: 综合业务模型 InteServ^[4~7]、区分业务模型 DiffServ^[8~10]、多协议标识交换 MPLS^[11~14]。

1.3.1 综合业务模型 InteServ

InteServ^[4]强调为保证会话的 QoS, 所有的资源都必须预先保留。简化的 InteServ 通信模型如下: 应用向系统提交 QoS 请求; 系统决定是否有足够的资源以满足应用的请求。如果满足, 则接受并为其分配相应资源; 否则, 拒绝请求或建议一个较低的能够提供的 QoS 服务 (此时, 如果接受, 则该应用在较低的 QoS 级别上执行)。可见, 为保证 QoS, 系统必须提供以下几方面的机制: QoS 规范、准入控制、QoS 协商和再协商、资源分配和调度、流量管制。

1.3.1.1 QoS 规范

QoS 规范规定应用与系统在建立连接之前就相关参数如带宽、时延、时延变化等进行协商的方式。对突发流量, 可以定义均值速率、峰值速率、突发持续时间、突发容量等。规范要求会在会话建立之前业务量参数必须在所有的子系统中协商一致, 并且这些参数可以在不同的系统层次上进行映射。因此, QoS 规范通常也被称为业务量描述 (Traffic Characterization)。业务量描述定义网络可以发送的流量大小, 它决定了是否支持某种业务的网络流量, 网络可以据此对流量进行管制。好的业务量规范能够描述不同类型的流量, 并能有效实施准入控制和流量管制。业务量规范包括: 多参数描述和业务量整形 (Traffic Shaping)。

1. 多参数描述 (规范)

研究表明, 通过选择适当的参数, 如: 峰值速率、均值速率、位速率方差等, 可以有效地对源流量进行描述。然而, 很难用有限参数对输出排队的多个流量进行描述或性能分析, 特别是多个具有较大突发性的 VBR 业务流量。随机过程, 如 Poisson 过程或 Markov 链曾被用于描述声音、视频或 LAN 的业务量统计特性, 近年来亦提出了很多新的流量模型。其优点在于: 如果每个交换都可以被描述成独立的、无记忆的排队系统, 则输出流量也可以同样地描述, 系统性能就可以很容易地被精确度量。然而, 因为只使用有限个状态来描述一个源业务流量, 对包含多种类型的聚合流量, 其准确性会受到很大影响 (聚合流可能表现出与单流完全不同的流量特征)。

2. 流量整形方案 (Shaping)

流量整形是对源流量进行规范和约束, 以便对流量进行描述和管制。当业务量模式过于复杂而难以直接进行描述或源流量不适合承载网络直接传输时, 往往要进行流量整形。如: 突发性较大的 VBR 视频流, 网络的交换缓冲往往没有这么大的空间来处理其业务流量。为解决该问题, 流量整形被用来在流量被送到网络之前, 先被整形成某特定的模式。一个好的流量整形方案可以对多种流量进行整形, 并且其输出能很好地被描述和管制。为满足应用的 QoS, 交换/路由也必须对流量进行重新整形 (Reshape)。典型的流量整形方案

有：漏桶、令牌桶等。目前已提出很多 VBR 视频流整形方案。

1.3.1.2 准入控制、QoS 协商和再协商

当具有某特定 QoS 参数的连接建立时，QoS 参数必须在所有的子系统被协商；只有当所有的子系统都同意并保证特定的 QoS 参数时，端到端的 QoS 才能够被满足。QoS 协商包括：（1）参数映射——QoS 参数被从一个层次（或子系统）映射到另一个层次（或子系统）；（2）资源预留——每个层次（或子系统）必须决定是否支持请求的参数；如果可以，特定的资源为该会话保留，只有当所有的子系统都接受请求的参数时，该会话才建立。如果存在某层次或子系统不能满足请求的参数，则该会话被拒绝。一个较复杂的系统还可以向用户建议它可以支持的参数，而由用户决定是否建立相应会话。

而对动态变化的会话环境，有可能需要更改 QoS 参数。因此，需要提供 QoS 再协商机制以满足在多媒体通信中用户请求的动态改变。在网络拥塞的时候，用户对资源增加的请求或许并不能满足。这时对某些特定应用如视频会议、实时监控等，就需要进行资源预留（RSVP）^[5,6]。

1.3.1.3 资源分配和调度

资源预留^[5,6]主要用在具有强 QoS 要求的应用，用户通过事先规定会话的起始和持续时间，来预留所需的资源；请求是否成功与请求时系统资源是否可用相关。资源预留的关键问题是如何在预留请求和实时请求之间分配网络资源，并且在系统失败时如何告知用户。解决的方法是将网络资源划分为两部分，分别用于预留请求和实时请求。然而当会话持续时间的估计过少时，可能在会话成功完成之前，预留的资源就已经不再可用；而当会话持续时间估计过多时，又会造成网络资源的浪费。另外，对在资源使用过程中的动态再协商，如：视频会议的延长，可能会因网络资源的不可用而失败。在 InteServ 模型中，RSVP 被作为资源预留协议^[6,7]。

1.3.1.4 业务量管制（Policing）

只有当所有连接都按请求的 QoS 来向网络释放流量时，网络的整体 QoS 才能保证。因此，必须对所有进入网络的业务量实行管制。管制策略依赖于流量描述：如漏桶，管制策略相对简单；多参数描述则复杂得多。当检测到存在连接超出所请求的 QoS 规范时，网络丢弃额外的数据；或将额外的数据标记为低优先级，只有当网络拥塞时才丢弃这些数据，这样可以更好地利用网络资源。

准入的连接受交换/排队延迟和复用延迟的约束。只有当在交换中采取适当的服务规则和排队调度算法时，才能保证已有连接的 QoS。

1.3.1.5 排队调度规则

影响网络性能的最重要的因素是交换/路由。从不同连接到达的数据包将在此竞争交换机处理时间和输出链路。所有的交换系统都可称为排队系统：输入数据包在合适的链路上排队等待输出。每个交换可能有多个输入链路，而每条输入链路又可能有多条虚拟连接，每个虚拟连接上又可能有多多个数据包需要被服务。多个数据包将会竞争输出链路。排队调度规则决定数据包的服务顺序，影响着数据包的延迟和连接带宽，在提供连接的 QoS 方面起着非常重要的作用。排队调度规则依赖于流描述。准入控制在计算资源要求时，通常假

设采用某特定类型的调度规则。

有两种类型的排队规则：负载保留（Work Conserving）/非负载保留（Non-Work Conserving）。在负载保留的方案中，只要排队系统中还有数据，系统就不会空闲，如 FIFO；在非负载保留的系统中，每个数据包被分配一个固定的时间，当没有合适的数据包传输时，系统空闲。负载保留的规则可以保证较小的时延和缓冲，但却不能有效地约束时延变化；反之，非负载保留的规则要求较大的缓冲和延迟，但能有效约束时延变化。

1.3.1.6 InteServ 模型的优点和缺点

InteServ 模型的主要优点是一旦保留会话所需资源，该会话的 QoS 要求就可以被满足。然而，可不按峰值速率进行资源预留，通过统计复用来保证软 QoS（Soft QoS），或是对流量进行正确的描述，以保证真正的硬 QoS 约束（Hard QoS）。

通过预先对存储媒体特征进行分析，如均值速率、初始延迟、要求的最大缓冲等，存储媒体可以被平滑地播放，并且其 QoS 可以得到保证。该方法也能有效地利用网络资源。

InteServ 模型的主要缺点是必须在路由经历的所有路径保留相当数量的链路状态信息。这些信息用于标识流，跟踪资源利用情况，进行流量管制和调度。在同时存在上百万连接的 Internet 核心主干网上，保持这些链路状态信息是不切实际的。因此，InteServ 模型是不可扩展的。

另外，为保证端到端的 QoS，所有的路由都必须保留相应的资源。在一个运营商规模的网络中这些要求几乎不可能实现。因此，InteServ 不能在主干网上实施。

1.3.2 区分业务模型 DiffServ

鉴于 InteServ 模型存在的问题，区分业务模型 DiffServ^[8~10]（Differentiated Services）在尽力而为（Best Effort）和 InteServ 间取得折衷，仅定义固定数量的业务类型，所有的业务都被划分到这几种类型中，网络/路由仅对有限的类型提供服务和 QoS 保证。

1.3.2.1 服务规范

DiffServ 模型利用 IPV4 的 TOS 或 IPV6 的 COS 定义区分服务字段^[9]（DS Field）。其中，开始 6 位称为 DS 编码点。值为 0 的数据包相当于 IP 尽力而为服务，值 1~7 与 IP 优先级机制向后兼容，以便 DiffServ 模型能够被逐步实施。路由器根据 DS 字段决定如何对数据包进行操作。

DS 字段可以由发送者标定以指示需要的服务。接口路由器基于多域 MF（Multi-Fields）对 DS 字段进行分类。MF 字段则根据源/目的地址、源/目的端口、服务类型、协议 ID 来对数据包进行分类。当数据包从一个域（Domain）进入另一个域时，可能被重新划分^[7]。两类服务可用于 DiffServ 模型：加速/奖赏服务（Expedited or Premium Service）——提供虚拟租用链路的低延迟、稳定的应用；确保服务（Assured Service）——提供比尽力而为服务略好的应用。

1.3.2.2 服务等级协商、服务和资源分配

为使用 DiffServ，用户必须就服务等级（Service Level Agreement——SLA）与 ISP 进行协商。SLA 规定支持的服务类型及每一类型允许传输的数据量。有两种类型的 SLA：静

态的和动态的。静态 SLA 用于长期、固定的协商；而动态 SLA 则使用信令协议如 RSVP 等实时协商，包分类从 SLA 派生。因为 DiffServ 是带优先级的方案，高优先级的业务量必须在 SLA 中被规范和控制；否则，当高优先级的数据包超过网络容量时，就会形成对网络资源的相互竞争，此时 DiffServ 模型降为尽力而为服务。

通过对 DS 字段的适当设置，用户可以决定如何使用 SLA 规定的不同类型业务流量，这称为服务分配过程。该方法允许用户针对不同的业务流量采用不同的类型。接口路由也可以根据 SLA 和 MF 字段进行设置。同样，ISP 必须决定如何配置边界路由，并处理进入网络的流量，这个过程称为资源分配。

1.3.2.3 业务量管制和调度

边界路由必须对业务量进行管制以确定进入的业务量类型是否在其所声明的范围之内。超出规范的数据包将被标记并在网络资源匮乏时优先被丢弃。不同业务类型的流量被放入路由中不同的队列，高优先级队列优先被调度和传输。注意，业务量分类和管制仅在边界路由器进行，中央路由器仅根据 DS 字段规定的业务类型对数据包进行调度和发送。因此，当服务类型固定时，中央路由所需存储和处理的信息将简单得多，因而 DiffServ 是可扩展的。

1.3.2.4 DiffServ 的优点和缺点

DiffServ 是可扩展的，并且业务分类、整形、管制等都仅在边界路由器进行，因此易于实施。非 DiffServ 路由器可以提供尽力而为服务；而 DiffServ 路由器则可以提供确保服务。因此网络的整体性能将好于尽力而为服务。

然而，DiffServ 所使用的网络业务聚合模式使得引入一定的不可预测性。没有确切的资源预留机制和流量整形方案，网络流量将变得动态不可预测。在任意时间点，网络的某些部分可能会接收到比其他部分更多的流量。这些网络流量的变化和拥塞也可能在单个或聚合流量类型时发生。此时，保证特定的网络业务量服务等级将变得更困难。因此，DiffServ 不是保证某种程度的服务等级，而是保持某种程度的聚合，使得这些业务基于其服务类型，可以得到比其他业务更好的服务。

1.3.3 多协议标识交换 MPLS

在 IP 网络中，路由器要分析每个数据包的头部并运行网络层路由算法，为该数据包独立地选择下一跳。对下一跳的选择包括两个步骤：（1）将所有可能的数据包集合划分为一系列前向等价类 FEC（Forwarding Equivalence Classes）；（2）将这些前向等价类映射到下一跳。从前向决策的角度说，对所有映射到相同的 FEC 的数据包，都看成不可区分的，并且沿着同一路径传输。

多协议标识交换 MPLS（Multi-Protocol Label Switching）^[11~14]仅对 FEC 在接口路由器指定一次，并编码成短的固定长度的值，称为标识（Label）。标识被接口路由器插入数据包，在接下来的跳中，网络层将不再对数据包的头部进行分析。取而代之的是，该标识通过索引表被映射到下一跳和一个新的标识。这种方法类似于 ATM 的 VPI/VCI。数据包所经过的路径就是由一系列的标识序列组成，称为标识交换路径 LSP（Label Switched Path），而支持 MPLS 的路由器称为标识交换路由器 LSR。