

Internet QoS 控制机制综述^{*}

A Survey of Quality-of-Service Mechanisms for the Internet

张信明 陈国良 刘 峰

(中国科技大学计算机科学技术系 合肥230027)

Abstract The provision of Quality-of-Service(QoS) guarantees has become an increasingly important and challenging topic in the Internet. In this paper, we first describe the integrated services and differentiated services models. Then, we survey the basic mechanisms and state-of-art techniques which have been used to support Quality-of-Service in the Internet.

Keywords Quality-of-Service, Integrated services, Differentiated services, Admission control, Scheduling, Buffer management, Scalability, Internet

1 引言

Internet 自60年代出现以来发展迅猛,然而采用简单的尽力服务(best-effort)模型、FCFS 调度器的传统 Internet 虽具有最好的可扩展性并非常适用于异构型网络及诸如电子邮件、文件传输等弹性业务,但却不能保证实时多媒体等刚性业务的 QoS。面对以 IPtel(IP telephony)为代表的实时多媒体业务的巨大需求,人们从调整应用行为到对服务模型的扩充等多方面对 Internet 作出改进。因此在 Internet 环境下,以提高网络资源利用率,为用户提供更高 QoS 为目标的研究极具活力。这些研究归纳起来主要包括:①服务模型及其实现,如 IntServ (Integrated Services)、DiffServ (Differentiated Services)体系结构、相关协议及服务的研究;②QoS 控制技术,如接纳控制、整形、分类、聚集、资源预置与资源(带宽、缓冲区)调度及管理机制等;③QoS 控制性能,如可扩展性、公平性、互操作性(interoperability)等;④基于 QoS 的路由等问题。QoS 的主要参数有分组丢失率、时延、时延抖动、吞吐量、缓冲区需求等并有确定性与统计性、定性定量之分。QoS 控制机制可分为控制通路 with 数据通路机制两类^[1,2]。本文系统地综述了 Internet QoS 控制的基本模型、技术,以及最新研究进展。

2 基本模型

2.1 IntServ

为了给实时业务提供 QoS 保证,IETF(Internet Engineering Task Force)提出了 IntServ 模型^[3]。IntServ 并不是取代 Internet 原有的服务模型而是对之进行扩充。IntServ 的基本立论是资源(如带宽等)必须被显式地管理,即资源预置与接纳控制是 IntServ 的两个关键部件,也意味着路由器必须为业务流保存状态信息。IntServ 可分为服务类型与参考实现原型两大部分,参考实现原型包括分类器、资源预置协议、接纳控制及分组调度,接纳控制与分组调度将在第3节叙述,本节主要讨论流量规范、RSVP 及服务类型。

2.1.1 流量规范 用来描述业务流在网络入口处的流量特性,IntServ 的流量规范为 TSpec (Traffic Specification)

$n)^{[4]}$,TSPEC 是基于漏桶算法的,即 $A(t) \leq \min(M + pt, b + rt)$;其中 $A(t)$ 为流量包络(即在任何时间区间 t 内业务流产生的最大流量), b, r 分别为令牌桶的桶深与速率, p 为业务流的峰值速率, M 为最大分组长度。另外 TSPEC 还规定了最小监督单位 m ,将任何长度小于 m 的分组长度视为 M 。TSPEC 为用户与网络间提供了一个合约,网络可根据 TSPEC 对用户的分组进行是否有资格享受服务保证的符合度测试。

2.1.2 RSVP^[5] 是一个为应用预置资源的信令协议。RSVP 采用由接收者发起的预置方式。使用 RSVP 预置资源的过程如下:业务流的发送者向接收者发送指明流量特性的 PATH 消息,在 PATH 消息传送路径上的每个路由器均记录下诸如可用带宽的路径特性。接收者在收到 PATH 消息后,用 RESV 消息将 PATH 消息记录的资源需求沿 PATH 消息传送路径反向发回给发送者;路径上的路由器可以接受或拒绝 RESV 消息的请求;若路由器接受请求,则需为业务流分配链路带宽、缓冲区并保存该业务流的状态信息。RSVP 的状态为软状态,即路由器仅在一定的时间期限内为业务流保存状态信息,端系统必须定期更新状态信息。

2.1.3 服务类型 保证服务(Guaranteed Service)^[6] 提供确定性的服务保证,保证包括分组遵守流量规范 TSPEC,传输没有损失及端到端时延存在上界。其目标是在分组交换网络上实现电路交换网络所能提供的时延保证。显然由于成本之故并非所有的应用均要求如此保证,但对实时过程控制、远程医疗等一些有明确实时需求的应用而言,保证服务是至关重要的。保证服务业务流的输入受到 TSPEC 的限制,其 QoS 协商协议为基于 RSVP 的 OPWA(One Pass With Advertisement),调度算法为 GR(Guaranteed Rate)或 LR 服务器(Latency-Rate Servers)^[2]。

可控负载服务(Controlled Load Service)^[7] 是一种在低负载网络环境下的尽力服务,其 QoS 是定性的,适用于对带宽有一个最低要求,但对时延要求较松并能通过反馈机制利用网络多余带宽的业务,可控负载服务业务的输入受到 TSPEC 的限制,即需要对业务流实施接纳控制以保证网络的低负载环境。

^{*} 本课题的研究得到国家高性能项目基金的资助。张信明 博士研究生,副教授,主要研究领域为计算机网络与网络计算。陈国良 教授,博士生导师,主要研究领域为并行分布计算,并行体系结构,并行算法与计算机网络。刘 峰 博士研究生,副教授,主要研究领域为计算机网络与网络计算。

2.2 DiffServ

DiffServ^[8]的目标在于简单有效,以满足实际应用对可扩展性的要求,实现途径是:将路由器分为核心与边界两类,边界路由器保存业务流状态信息并进行流量管制,核心路由器只进行简单的调度转发,核心路由器是状态无关的。边界路由器根据用户的流量限制(profile)和资源预置信息将进入网络的单流分类、整形、聚合为不同的流聚集,这种聚集信息存储在每个IP包头的DS(Differentiated Services)标记域(field)中,称为DSCP(Differentiated Services CodePoint);核心路由器在调度转发IP包时根据包头的DSCP选择提供特定质量的调度转发服务,其外特性称为PHB(Per-Hop Behavior)。PHB主要有:尽力服务、EF(Expedited Forwarding)^[9]、AF(Assured Forwarding)^[10]等。

3 基本控制技术

3.1 流量模型与特性

为流量特性建立适当的模型是QoS控制的基础。无论是流量规范的确定,还是接纳控制或分组调度均须知道流量特性。流量模型大致可分为估算模型与界限模型两类。估算模型试图使用数学工具(最常用的是随机过程)描述流量行为;如Poisson、SMP(semi-Markov process)、MMPP(Markov-modulated Poisson process)、流体流(fluid flow)、自相似性过程(self-similar process)等^[11]。与估算模型直接模型化流量的随机进入行为不同,界限模型试图给出信源在一时间区间内进入流量的上界。界限模型既可以是确定性的,也可以是随机性的。最常用的确定性界限模型是Cruz的 (σ, ρ) 模型^[11]。随机性界限模型有EBB(Exponentially Bounded Burstiness)、SBB(Stochastically Bounded Burstiness)^[12]等。

3.2 接纳控制

接纳控制研究的问题是一个具有一定QoS要求的连接,网络是否在不影响其它连接的前提下予以接纳。接纳控制与网络体系结构中许多部分有关。首先,必须明确新连接对服务类型、QoS的需求以及流量特性的影响,这些内容都必须包括在流量规范中;第二,一旦给定流量规范,网络就要决定它是否能够按照应用对QoS的需求在两个端系统间建立起连接;这包括选路,检查路由上各个节点是否拥有足够的资源,以及确定接纳新连接所要进行的资源分配或预置;这就是所谓的QoS协商,完成这些工作的协议有基于RSVP的OPWA,在IPtel中使用的基于RTCP(Real Time Control Protocol)的一个简单的方案^[13]等。

接纳控制技术可分为确定性、统计性与基于测量的三种。确定性与统计性接纳控制分别采用 (σ, ρ) 、有效带宽^[11]技术,但存在需要事先确定流量参数、需要在流量管制复杂性与模型准确性之间进行平衡等缺点。基于测量的接纳控制技术MBAC(Measurement-Based Admission Control)^[14]无需端系统为业务流指定流量规范,而是由网络对业务流的流量特性进行测量。确定性控制技术适用于IntServ的保证服务,而基于测量的控制技术则适用于可控负载服务。

一个应用对QoS的需求通常以端到端的形式描述,然而接纳控制却是在各个网络节点上进行的,这就需要将端到端的QoS需求分解到路由的各个节点(采用WFQ类调度算法除外),此项工作较为复杂,文[15]对此问题进行了深入的探究。

3.3 调度算法

网络链路使用的调度机制对QoS保证是至关重要的。调度器的基本功能是在链路上等待传输的分组间进行仲裁。根据调度算法及流量特性可以计算业务流的一些性能指标,而网络可以根据这些指标为业务流提供端到端的QoS保证。下面介绍一些典型的调度算法^[1,2,16]。

GPS(Generalized Processor Sharing)调度器要求业务流模型为流体模型并且业务流所穿越的链路均采用GPS调度器。GPS的基本思想是:为每个业务流赋予一个权重并根据权重在活动的业务流间分配链路容量。

基于GPS的WFQ(Weighted Fair Queueing)及其变种克服了FCFS的一些缺点,可对单个业务流所获得的服务实行细粒度控制,允许网络提供基于流的端到端的时延保证,并能以公平的方式分配剩余的服务能力。通过模拟GPS参考模型就可以定义一些能够近似实现GPS策略的调度算法,如PGPS(Packetized Generalized Processor Sharing)(即WFQ)。PGPS使用流体进入过程模拟GPS,即一个分组被模型化为参考系统的一定流体量,当GPS服务了与分组相对应的流体量时就视该分组被发送,PGPS选择参考系统中最早离开的分组进行发送。具体而言,PGPS总是选择具有最小完成时间的分组进行发送,实现时可采用一个基于分组完成时间的优先级队列。PGPS具有良好的隔离性。

SCFQ(Self-Clocked Fair Queueing)、SFQ(Start-time Fair Queueing)旨在减少PGPS计算虚时间复杂性。SCFQ未采用GPS参考模型来计算虚时间,而是基于正在接受服务的分组的虚开始时间来计算虚时间。此举极大地降低了需要记录虚时间的计算时间,然而也导致端到端时延上界的增加。与PGPS相比,SCFQ存在端到端时延上界与链路上业务流数有关的严重缺点。SFQ与SCFQ的区别在于SFQ选择具有最小虚开始时间的分组进行发送,而SCFQ选择的是具有最小完成时间的分组。SFQ的端到端时延上界比SCFQ稍小一些。

DRR(Deficit Round Robin)是另一类为克服WFQ复杂性、可扩展性问题的算法。DRR采用杂凑法将业务流的分组映射到某个队列中,这样可以通过限定队列数来克服可扩展性问题;为实现与WFQ相近的公平性,DRR首先为每个队列分配一个服务额度,当某个队列的一个分组因长度过大而未获得服务,则服务额度结转下次使用;这也是DRR名称的由来,即DRR记录服务赤字(deficit)并结转使用。

PGPS以分组在参考系统中的完成时间为依据选择分组进行发送,这就会造成某些并未在参考系统中得到服务的分组仅因其完成时间较小而被选择发送,所以PGPS的分组离开次序与参考系统的离开次序间可能会存在明显差异。WF²Q(Worst-case Fair Weighted Fair queueing)算法通过同时使用分组的开始、完成时间来更准确地模拟GPS。WF²Q选择分组进行发送的标准为在参考系统中具有最小虚完成时间且虚开始时间小于当前时间,这样可以避免分组离开WF²Q的时间过于偏离参考系统的离开时间。WF²Q的端到端时延上界与PGPS相同。

EDF(Earliest Deadline First)是一种动态优先级调度器,调度器为每一个进入的分组分配一个优先级。分组的期限为其进入时间与分组所属流相关的保证时延之和,EDF选择具有最小期限的分组进行发送。

由于调度器会改变业务流的流量特性,这就造成业务流在穿越网络时其流量特性处于不断的变化中。虽然可以计算

出链路输出流量特性的上界,但若以此上界计算业务流端到端时延上界就太过保守。RCSD(Rate Controlled Service Discipline)是在EDF的基础上增加流量整形器,即业务流在进入调度器之前由整形器按照事先指定的包络进行整形。此举可以减轻业务流对下游网络节点的缓冲区需求,并为下游网络节点的调度器提供满足一定流量规范的输入以简化调度。在提供端到端时延方面,RCSD是迄今为止最有效(调度空间最大)的调度器。如果恰当地选择整形器,RCSD不仅可以提供与PGPS相同的端到端时延,而且可以接纳更多的业务流。

在层次链路共享策略(Hierarchical Link Sharing)中由类构成层次链路共享结构,而类是由业务流聚集组成。每个类均与一定的带宽相联系,层次链路共享策略保证属于该类的业务流获得相应的带宽,剩余容量则以公平的方式在其他类间进行分配。层次链路共享策略能够实现不同类间隔离,且并不要求在所有的链路层次采用相同的调度策略。

3.4 缓冲区管理

调度策略在提供QoS保证上的确起到重要作用,然而这一切均是基于有足够的缓冲区来保存进入的分组。缓冲区管理机制的基本内容是当链路出现拥塞时丢弃分组的策略。分组丢弃策略主要涉及:①何时决定丢弃分组;决定通常发生在新分组的进入时刻,或者拥塞出现时需要丢弃缓冲区中低优先级的分组以接收高优先级的分组;②依据何种信息作出丢弃分组的决定;主要问题是信息的粒度,如是基于流的,还是基于全局的。传统Internet采取弃尾(Drop Tail)策略。

RED(Random Early Drop)^[17]是一种在拥塞出现前采取预防措施的缓冲区管理策略。当缓冲区内容(平均队列长度)小于 $\min_{th}$ (阈值)时RED就接收新进入的分组,当平均队列长度超过 $\max_{th}$ 时就丢弃新进入的分组,而当平均队列长度介于 $\min_{th}$ 与 $\max_{th}$ 时RED就对进入的分组以随机的方式进行丢弃,业务流被丢弃的分组数与其流量大小成正比,这样RED可以防止某个业务流过多地占用缓冲区,且不需要记录基于流的缓冲区状态信息。RED为TCP提供了一种将会出现拥塞的信号,使TCP实现业务流的流量控制;但RED也存在对低速TCP业务流不公平问题,这是由于RED依据缓冲区内容超过一定阈值的标准对新进入的分组进行随机丢弃,但被丢弃的分组所属业务流的流量可能并未达到其分配容量,又因分组被丢弃而导致TCP通过缩小拥塞窗口来进一步减小业务流流量。

FRED(Fair Random Early Drop)^[18]是一个对RED不公平性进行改进的缓冲区管理策略。FRED在保留RED阈值的同时为各个活动业务流(有分组在缓冲区的业务流)设置阈值并记录它们占用缓冲区的情况,这样可以检测到过多占用系统资源的业务流并根据业务流的资源分配额度及使用情况进行有选择的丢弃分组。FRED为活动业务流记录基于流的信息的开销仅与缓冲区大小有关,而与业务流数量无关。

4 控制性能

近年研究人员为提高QoS控制机制的性能进行了不懈的努力,如CSFQ(Core-Stateless Fair Queueing)、DPS(Dynamic Packet State)、SRP(Scalable Reservation Protocol)、两级资源分配体系(two-tier resource allocation architecture)等。

CSFQ^[19]是由Stoica等人提出的一种以提高缓冲区管理策略的公平性、可扩展性并降低复杂性为目的,以统计逼近

FQ(Fair Queueing)服务为目标,采用尽力服务模型、FCFS调度器(单队列)的随机传送分组算法。CSFQ具有如下特点:①将路由划分为边界与核心两大类,边界路由器保存业务流状态,核心路由器不保存业务流状态;业务流状态以标签(label)形式表示并由其IP包自行携带;标签初值是基于业务流的,即边界路由器根据每个业务流的情况设定标签初值;而标签值的更新却是基于路由中的聚集信息。②核心路由器采用FCFS队列与概率丢弃策略,包进入队列被丢弃的概率由路由器根据聚集信息所确定的公平共享速率及标签中的业务流速率共同决定。所以如何正确、高效地估算公平共享速率及业务流速率是CSFQ的核心。

DPS^[20]是由Stoica等人提出的,旨在实现近似于基于状态机制提供的QoS保证同时又兼具无状态机制的可扩展性。与CSFQ一样,DPS技术也将路由划分为边界与核心两大类,边界路由器保存业务流状态,核心路由器不保存业务流状态,业务流状态由入口路由器嵌入IP包,调度算法为Jitter-VC(Delay-Jitter-Controlled Virtual Clock)。

SRP^[21]是由Almesberger等人提出的旨在克服RSVP存在比较复杂、可扩展性差等缺点的一个具有较好可扩展性的轻量级(light-weight)的资源预置协议。SRP要求端系统主动维护资源预置情况,但路由器却通过对业务流聚集、通过对聚集流监测以估算为支持原有及新预置所需的局部资源等措施来控制业务流遵守合约。所以,SRP既不需要明确的流量参数,也不要求路由保存基于流的状态。

两级资源分配体系^[22]是由Terzis等人提出的,该体系采用与选路相类似的概念,即将Internet划分为域内与域间两级。域内的资源分配策略及协议由各个域根据业务流需求自行决定,域间的控制机制用来协调各个域之间的资源请求与分配。域间主要根据相对稳定、生存期较长的双边服务合约对业务流进行聚集,而端对端QoS支持是通过不同域的串接及相邻域的域间双边合约来实现的。

5 QoS 控制分析工具:网络演算

网络演算(Network Calculus)^[23]是近年来为在综合服务网络中提供确定性QoS保证的研究成果的汇集。网络演算包括进入曲线(arrival curve)(即流量包络)、服务曲线(service curve)及最小代数下的卷积、反卷积等。其中进入曲线限制了进入过程,而服务曲线则限制了网络节点的输入、输出行为。网络时延的上界由进入曲线与服务曲线间的距离所决定。所以网络演算具备了从理论上分析QoS控制机制所必需的业务流的流量特性模型、路由器的调度策略及性能界限三个基本要素。由于使用排队论分析QoS控制机制时需要较精确的流量与服务特性,因而存在分析难度大、计算强度高、无法适应实时处理需要等缺点;而网络演算的优势在于流量特性模型的简单性,基于服务曲线调度策略的通用性、资源分配灵活性及可以简洁、明了地计算网络性能界限。

6 相关技术

6.1 策略控制

策略控制^[24]的目标是将网络作为一个整体来进行管理与控制。所谓策略是指根据一定管理标准对网络资源、服务访问控制的规范。用户、应用、主机是否有权访问网络资源、服务以及访问条件均由策略进行控制。一个策略控制体系结构的基本功能有:策略规则的定义与更新;规则的存储与检索;解

释规则是否满足一定条件下的标准;当规则满足一定条件下的标准时所应采取的行动。

6.2 MPLS

MPLS (Multiprotocol label switching)^[25]将标签交换与网络层选路融合在一起;其基本概念是在一个 MPLS 域的入口处为分组分配固定长度的标签,然后在整个 MPLS 域中使用标签进行分组的转发。LSR (Label switch router)、标签、标签交换及标签分发是 MPLS 的核心。

6.3 流量工程

流量工程 (Traffic engineering)^[26]是指在独立和缺省的路径上引导业务流量的能力。流量工程的主要目标是在提供有效、可靠网络运行的同时优化网络资源的利用及业务流性能。MPLS 被认为是有效解决流量工程的一个理想方案。

7 应用行为的自适应控制机制

上述的 QoS 控制机制需要对 Internet 的服务模型进行扩充,而根据网络性能对应用行为进行自适应控制是在尽力服务模型情形下保证实时多媒体业务 QoS 的有效方法。主要措施有:①接收者自适应控制机制。路由器的排队特性会造成业务的时延抖动,因此应用需要在接收端对实时数据进行缓冲以消除抖动并恢复媒体内及媒体间的同步关系。②基于发送者的速率控制机制^[27]。速率控制过程是:接收者用 RTCP 的 RR 向发送者报告网络性能状况,发送者根据收到的 RR 按照一定的算法增加或减少传送速率。③按比例缩小小传送 (scaling) 及网络异构性问题。Internet 的异构性使得基于发送者的速率调控机制拥塞阈值选择无法顾及各自拥有不同性能的网络分支的接收者。理想的方法是对具有不同性能的组播树分支分别选择不同的拥塞阈值。目前解决上述问题的方法有两个,其一采用以 Mbone (Multicast Backbone) 为代表的多媒体网关结构,其二是以 RLM (Receiver driven Layered Multicast)^[28]为代表的发送者对多媒体进行层次编码而接收者选择接收不同 QoS、不同媒体机制。

结束语 本文不仅从完整性出发对 Internet QoS 控制机制的基本服务模型、基本控制技术进行了综述,而且对目前 Internet QoS 控制所面临的难点与热点问题的控制性能、QoS 控制的分析研究工具及相关控制技术进行了综述。需要指出的是由于 Internet 的异构性、非连接特性以及多数业务流的短暂性使得任何 QoS 控制机制均面对 QoS 保证、可扩展性、实现开销、资源需求等因素之间的艰难平衡。

参考文献

- 1 Zhao Weibin, Olshefski D, Schulzrinne H. Internet quality of service: an overview. In: Proc. of IEEE INFOCOM'2000, 2000
- 2 Guerin R, Peris V. Quality-of-Service in packet networks: basic mechanisms and directions. Computer Networks, 1999, 31(3): 169~189
- 3 Clark D, Shenker S. Integrated services in the Internet architecture: an overview. RFC1633, June 1994
- 4 Shenker S, Wroclawski J. General characterization parameters for integrated service elements. RFC2215, Sep. 1997
- 5 Braden R (Ed.), Zhang L, Berson S, et al. Resource reSerVation Protocol (RSVP)—Version 1 functional specification. RFC2205, Sep. 1997
- 6 Shenker S, Partridge C, Guerin R. Specification of guaranteed quality of service. RFC2212, Sep. 1997 *
- 7 Wroclawski J. Specification of the controlled-load network element service. RFC2211, Sep. 1997
- 8 Blake S, Black D, Carlson M, et al. An architecture for differentiated services. RFC2475, Dec. 1998
- 9 Jacobson V, Nichols K, Poduri K. An expedited forwarding PHB. RFC2598, June 1999
- 10 Heinanen J, Baker F, Weiss W, et al. Assured forwarding PHB. RFC2597, June 1999
- 11 Schwatz M. Broadband Integrated Networks. Beijing: Tsinghua University Press. Prentice Hall, 1998
- 12 Starobinski D, Sidi M. Stochastically bounded burstiness for communication networks. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(1): 206~212
- 13 Schulzrinne H, Rosenberg J. Internet Telephony: architecture and protocols—an IETF perspective. Computer Networks, 1999, 31(3): 237~255
- 14 Grossglauser M, Tse D. A framework for robust measurement-based admission control. In: Proc. of ACM SIGCOMM'97, 1997. 237~248
- 15 Nagarajan R. Quality-of-Service issues in high-speed networks: [Ph. D. thesis]. University of Massachusetts, Sep. 1993
- 16 Zhang H. Service disciplines for guaranteed performance service in packet-switching networks. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(10): 1374~1396
- 17 Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4): 397~413
- 18 Lin D, Morris R. Dynamics of random early detection. In: Proc. of ACM SIGCOMM'97, 1997. 127~137
- 19 Stoica I, Shenker S, Zhang H. Core-stateless fair queueing: achieving approximately fair bandwidth allocations in high speed networks. In: Proc. of ACM SIGCOMM'98, 1998. 118~130
- 20 Stoica I, Zhang H. Providing guaranteed services without per flow management. In: Proc. of ACM SIGCOMM'99, 1999. 81~94
- 21 Almesberger W. Scalable resource reservation for the Internet. [Ph. D. thesis]. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 1999
- 22 Terzis A. A two-tier resource allocation framework for the Internet. [Ph. D. thesis]. University of California, Los Angeles, 2000
- 23 Le Boudec J Y, Thiran P. Network calculus. Springer-Verlag, 2001
- 24 Gai S, Strassner J, Durham D, et al. QoS policy framework architecture. IETF Internet Draft <draft-sgai-policy-framework-00.txt>, Feb. 1999
- 25 Rosen E C, Viswanathan A, Callon R. Multiprotocol label switching architecture. RFC3031, Jan. 2001
- 26 Awduche D, Malcolm J, Agoghua J, et al. Requirements for traffic engineering over mpls. RFC2702, Sep. 1999
- 27 Bolot J C, Turetti T. Experience with control mechanisms for packet video in the Internet. ACM Computer Communication Review, 1998, 28(1): 4~15
- 28 McCanne S, Jacobson V, Vetterli M. Receiver-driven layered multicast. In: Proc. of ACM SIGCOMM'96, 1996. 117~130
- 29 Crawley E, Nair R, Rajagopalan B, et al. A framework for QoS-based routing in the Internet. RFC2386, Aug. 1998