

# 新一代网络 QoS 研究

林 闯 王元卓 任丰原

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘 要** 随着网络技术和应用的飞速发展,互联网的接入形式以及网络应用日益呈现出复杂、异构和泛在等特点,当前的网络已经暴露出诸多不足,在很多方面无法满足用户对服务质量(QoS)的要求.当前互联网的 QoS 体系结构及相关技术已经不能适应新一代网络应用的进一步发展.文章着眼于未来互联网的发展方向,从网络 QoS 体系结构、实时 QoS 保证、融合 QoP 的 QoS 控制以及 QoS 性能评价理论等几个方面论述新一代网络 QoS 面临的挑战和解决思路,探讨了新一代网络 QoS 的发展方向.

**关键词** 服务质量(QoS);网络 QoS 体系结构;实时 QoS;保护质量(QoP);性能评价

中图法分类号 TP393

## Research on QoS in Next Generation Network

LIN Chuang WANG Yuan-Zhuo REN Feng-Yuan

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** With rapid development of the network technology and application, Internet access and network application form become increasingly complex, heterogeneous and ubiquitous. The current network has revealed many inadequacies. And it is unable to satisfy Quality of Service (QoS) requirements. The current QoS architecture of Internet and related technologies can not adapt to the further development of the next generation of network applications. This paper focuses on the future direction of development of Internet, researches the challenges and the solving ideas of next generation network QoS from the network QoS architecture, real-time QoS, the integration Quality of Protection (QoP) and QoS, and the theory of QoS performance evaluation.

**Keywords** Quality of Service (QoS); network QoS architecture; real-time QoS; Quality of Protection (QoP); performance evaluation

## 1 引 言

随着高速网络技术和多媒体技术的飞速发展,人们越来越多地提出了包括多媒体通信在内的综合服务要求.传统的分组交换网络,如 Internet,是面向非实时的数据通信(如 FTP 和 E-mail 的传输)而

设计的,采用的 TCP/IP 协议主要是为了优化整个网络的数据吞吐量并保证数据通信的可靠性.而当今分布式多媒体应用(如视频会议、视频点播、IP 可视电话、远程教育)不仅包括文本数据信息,还包括语音、图形、图像、视频、动画这些类型的多媒体信息.分布式多媒体应用不仅对网络有很高的带宽要求,而且要求信息传输低延迟和低抖动等,同时,这

收稿日期:2008-05-23. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2006CB708301)、教育部科技创新培育重点项目(707005)、国家自然科学基金(60673187,60773138)、国家自然科学基金委员会与香港研究资助局合作基金(60218003)、微软清华联合实验室基金和诺基亚研究生科研创新基金资助. 林 闯,男,1948 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为系统性能评价、网络 QoS、网络安全计算、随机 Petri 网等. 王元卓,男,1978 年生,博士,助理研究员,主要研究方向为网络 QoS、可生存性分析、网络安全、网络计算等. 任丰原,男,1970 年生,博士,副教授,主要研究方向为 QoS、网络流量的控制与管理、测控网络、传感器网络等.

些应用大都能容忍一定程度的信息丢失和错误。由此可见,高速网络中的新兴媒体应用对新一代网络提出了不同于数据应用的服务质量(QoS)要求,需要提供更为有效的 QoS 控制和保证。

网络的 QoS 问题由来已久,但一直没有得到根本解决。对网络 QoS 的研究可以追溯到 20 世纪 80 年代初期。那时,尽管网络的性能还比较低,提供的服务种类也比较少,但一些的研究者已经认识到 QoS 的重要性。Seitz 和 Wortendyke 等人在研究 ARPANET 中的 X.25 通信时已提出基于用户的性能评价问题,这是关于 QoS 研究的比较早的文献。在早期的 OSI 协议制定中,也为服务质量的一些参数留有相应的表示手段,但一直空缺未用。很长的一段时间,由于计算机网络的性能所限,人们对 QoS 的关注只停留在数据流传输中的正确率、吞吐量和延迟等单一服务质量的评价与控制上。直到 20 世纪 80 年代末期,随着 B-ISDN 以及 ATM 交换网的出现和分布式多媒体应用的急剧增加,人们才开始对系统的 QoS 管理和控制进行较为深入的研究。

目前,随着流媒体应用的蓬勃发展,网络正在从当初单纯传送数据向可传送数据、语音、活动/静止图像的多媒体网络转变,因此在网上实现类似语音、传真、会议等实时多媒体应用问题的焦点便集中在了如何传输这些时延敏感的业务上。在网络中按照用户的要求提供 QoS 控制是一个普遍的要求,也是互联网发展的重要挑战。互联网体系结构中分组交换的“存储/寻址/转发”模式使网络层保持着非连接特性,这是它区别于电路交换或虚电路交换的面向连接网络的本质属性。后者在承载敏感延时的实时性业务时具有天然的技术优势。随着流媒体等应用的蓬勃发展,互联网中各种业务流量的比重正在悄然发生变化,实时多媒体业务已经替代敏感丢失的传统数据分组业务,成为主导性业务流量。随着 IPTV 等广播性业务的流行以及远程医疗、电子沉浸、网络环境下的遥操作和遥控制等交互式业务的兴起,实时性业务流量的比重会越来越高。贝尔试验的研究预测表明:2010 年,互联网骨干业务流量的 80% 以上将会是敏感延时的流媒体业务。非连接 IP 网络“尽力而为”的业务模式已不适应未来网络需求,为未来占统治地位的实时交互式流媒体业务提供良好支持将是新一代网络 QoS 研究面临的重要技术挑战之一。

同时,人们对灵活自由的通信方式的不断追求促使无线网络在过去的几年内得到了突飞猛进的发

展,各种异构无线网络技术如雨后春笋般涌现。不难预见,新一代互联网必将融合各种异构无线网络技术,使之成为信息社会最重要的基础化设施的有效组成部分。就功能而言,已经出现的多种异构无线网络可以大致分为两类,宽带无线接入网络和边缘无线业务网络。较之有线网络,异构无线信道多变的时空特性和共享信道中竞争性介质访问控制机制的普遍采用给实时性网络 QoS 保证增加了新的技术挑战;各种切换技术为终端提供了移动和漫游功能的同时也引入的不可忽略的切换延时,如何在异构的网络中支持未来将成为主流的实时性业务是目前学术界和工业界普遍关心的热点问题之一,也是推动整个互联网进一步发展的关键。

因此,对新一代网络 QoS 的研究存在很多的挑战,网络 QoS 管理与控制问题已经成为当今国际网络研究领域公认的重要研究领域之一,是新一代网络研究与开发的热点问题,对未来网络技术的研究、应用和发展具有重要的意义。本文将针对新一代网络发展的需要,从 QoS 体系结构、实时 QoS 保证、融合 QoP 的 QoS 控制以及 QoS 性能评价理论等几个方面论述新一代网络 QoS 面临的挑战和解决思路。

## 2 网络 QoS 体系结构

IntServ 体系结构是 IETF 1994 年提出的 QoS 保证模式<sup>[1]</sup>。它是在传统 IP 网络尽力而为服务模式的基础上定义了一组服务扩充,通过 RSVP 提供端到端的 QoS 保障。IntServ 虽然能够提供较好 QoS 保证,但其基于面向连接模式,而 IP 网络本身是非连接的,因此高速网络核心路由器常常被迫去维护、调度数以千计的连接。随着连接数量的增加,连接建立和连接释放阶段的额外开销也会增大,每个连接的状态信息需要保存在路径通过的每个节点上,即需要保存每流状态,其可扩展性差。而且在具体实施中,如何与现有 IP 网络互连也是一个困难。

针对 IntServ 在发展中遇到的困难,IETF 在 RFC2475 中提出了 DiffServ 体系结构<sup>[2]</sup>。DiffServ 提出了核心路由器 QoS 区分服务的体系结构,它由 DS 域边缘和核心联合操作,针对网络流的不同 QoS 要求(如延迟、丢失率等)进行区分服务。DiffServ 面向 QoS 参数而不区分应用,相比 IntServ 简化了信令,将网络上传输的业务分成不同的业务流,每种业务类定义一组单向的分组传输特征,由区分服务码

(DSCP)标识 DiffServ 通过汇聚和逐点行为(PHB)方式提供一定程度上的 QoS 保证. DiffServ 最大的特点是实现简单、扩展性好,但由于 DiffServ 结构中网络和端系统之间缺乏信令通信,不能提供端到端的 QoS 保证,而端到端的 QoS 保证一直是 IP QoS 研究的基本目标.

多协议标签交换模型(MPLS)<sup>[3]</sup>是基于标签的交换方式,允许路由器在作转发决定的时候仅仅以简单的标签为基础,而不是基于目标 IP 地址作复杂的路由查找. MPLS 在网络中建立具有某种特性的传输通道,采用分类标记的方法确定数据报的传输路由,使用标记交换技术实现数据报的高速转发,因此提供了更快的包分类和转发速度. MPLS 将数据的转发与控制行为有效分开,因而对网络系统升级提供有效支持. 网络负载严重时,综合服务与区分服务的 QoS 模型提供的性能是平稳下降的. 而 MPLS 的最主要功能是流量工程,即在多条可能的转发路径中进行负载平衡. 目前已提出的网络流量工程方案 IPMPLS,只是解决了流量在整个网络中均匀分布的问题.

网络 QoS 难以保证在体系结构上存在深层次的原因,仅仅依靠更加先进的网络管理工具不能从根本上解决问题. 一方面,互联网“边缘论”和面向非连接的设计思想保障了高效的互通,但控制手段薄弱,难以满足解决 QoS 保证的需要. 另一方面,互联网发展至今,已成为一个庞大的非线性复杂系统,各种中间件的加入以及网络协议体系的庞杂导致互联网的“腰部”不断变粗,分布式控制平面中由于各种协议的决策逻辑交织在一起而产生的非线性作用使网络行为呈现出相当的复杂性并且难以预测. 如何构建能够提供 QoS 保证的新一代网络体系结构面临下列挑战:

(1)应该在网络的关键部分增加 QoS 控制结构使网络更可管;应该在网络中维护一定的状态信息,施加必要的控制,使网络具有某种程度面向连接的特性;应该在不同层次上可以对它进行监管.

(2)允许为每个网络配置对其性能、可靠性和策略的高层需求和目标;网络管理控制系统应该具有数据平面当前全局状态的准确信息;网络管理控制系统应该能够直接对数据平面进行控制,而将决策逻辑与分布式系统分离.

## 2.1 IP QoS 与过量配置

IntServ 与 DiffServ 作为 IP 网络的两种 QoS 标准目前并没有完全成功商用. 这除了两者自身存

在的局限性之外,一个重要的原因在于目前核心网由于高速传输和交换技术的发展而产生“带宽过剩”的现状. 在这种情况下,许多骨干网运营商都通过为“尽力而为”的互联网配置大量过剩容量以保证用户的 QoS,而不愿对已经大量部署的路由器等设备进行升级从而采用复杂的 QoS 控制机制<sup>[4]</sup>. 据统计,目前大部分骨干网的负载大约只占总容量的 5%~15%,而核心互联网运营商通常提前配置容量以满足 3~6 个月后增长的用户需求.

这种过量配置的方式虽然能够暂时满足目前部分用户的 QoS 需求,然而从历史发展的角度看,却存在着潜在的威胁. 在网络的发展历史上,由于新接入网和新核心网技术的交错出现,核心网的容量周期性地被人们认为从“带宽无穷大”到“几乎拥塞崩溃”<sup>[5]</sup>. QoS 控制机制似乎只有当接入网容量与核心网容量的比值较高时才具有研究价值. 然而, QoS 控制机制必须作为网络体系结构的一个有机组成部分才能最有效地实现目标. 如果只有当面临迫切需求时才向一个已经大量部署的网络中加入 QoS 机制只能达到事倍功半的效果. 因此,新一代互联网体系结构的设计应该充分考虑如何为用户有效地提供 QoS 保证.

## 2.2 新型 IP QoS 体系结构

IntServ 和 DiffServ 各有自己的长处和局限,但都不能彻底实现整个网络的端到端 QoS,而又兼顾网络的可扩展性. 为此,人们考虑将 IntServ 和 DiffServ 看作互相补充的技术,将其结合,互相协同,取长补短实现端到端的 QoS 提供机制. 最终达到既能提供类似状态相关网络的强有力的服务,又能实现与状态无关网络近似的可扩展性和鲁棒性.

基于此,我们提出了 Peer-Server-Peer(PSP)的新的 IP QoS 体系结构,它能够使网络自身对解决 QoS 保证问题提供支持,而不仅仅依赖于端系统. 网络可以根据业务属性和链路带宽的不同以及节点在提供各种功能时能力上的差异,在数据包的传输路径上选择或禁止某些节点,并在业务属性和网络状态发生变化时对传输路径进行迅速灵活的动态改变.

在新体系结构中,尽管监控信息(监测和分发)和业务数据的传输可能通过相同的物理链路,但控制信息路径和数据路径是相互独立的,如图 1 所示. 这就使得监控信息路径的管理不再依赖于数据平面对路径的配置管理,从而可以建立高可靠的控制路径. 与此形成强烈对比的是,现有网络的控制和管理

信息的传输则必须依赖由路由协议事先成功设置的传输路径。

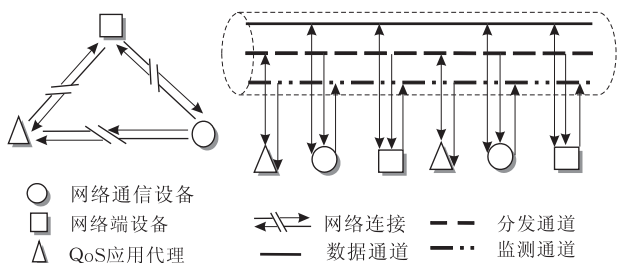


图1 数据、监测、分发信息通道的逻辑隔离

新体系结构对其 QoS 的支持还体现在它有利于通过简化网络控制的状态和逻辑,确保状态之间的内在连贯性,从而使新结构能够很好抵抗外部干扰,降低网络的脆弱性。同时,易于不断演化发展。将网络控制从复杂分散的协议中分离出来,这将有助于网络的变革和演化发展,易于配置新的业务,添加新机制。同时,并没有要求数据包形式或控制协议(监测和分发平面)发生改变。

在新体系结构中网络控制逻辑相对独立于分布式协议,但其没有也不可能消除所有的分布式协议,只是将一些共性的东西从分散的协议中集中起来,降低不必要的控制冗余,提高决策的一致性。由于将网络控制逻辑与数据转发功能进行分离,网络元件主要分为管理控制服务器和数据转发元件两种,如图2所示。

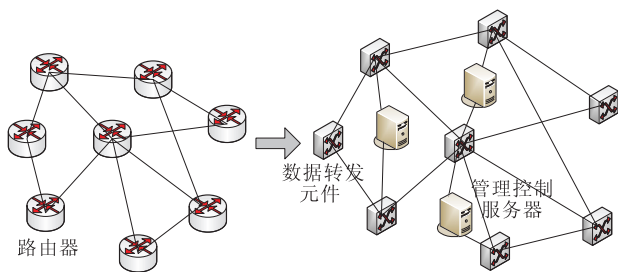


图2 分布与集中优化组合的管理与控制

其中,数据转发元件主要负责数据包的交换和转发功能以及各种与 QoS 相关的数据包处理功能,如数据包过滤、数据包缓存、网络地址转换以及转码等。每个网络管理控制服务器负责多个数据转发元件的管理控制功能。数据转发元件对数据包的所有交换和处理功能都根据其管理控制服务器下达的控制信息进行,这些控制信息包括转发表、包过滤规则、队列管理参数、隧道和网络地址转换等。

现有互联网基本采用全分布式的自适应路由策略。每个路由器既要实现分组转发的功能,又要实现选路控制的功能,要实时地掌握全网的状态(网络拓

扑和各链路的流量),建立和维护网络拓扑数据库,频繁地交换路由信息并达到同步;在此基础上,进行路由计算,选择最好路径,更新路由表。随着互联网规模的扩大,这种模式的脆弱性暴露得愈来愈明显,导致互联网称为“一个复杂的不稳定系统”,增加了“蝴蝶效应”事件的发生概率,即一个小的局部事件可能引起全网的瘫痪。

因此,采用集中式与分布式相结合的路由计算和选路控制模式,将复杂系统的共性功能进行抽象剥离。其基本思路是:将各个路由器中的路由计算和选路控制功能剥离出来,由选路控制平台在逻辑上集中实现;路由器只实现分组转发、向选路控制平台提供局部拓扑信息和接受其直接控制的功能。这种模式的优点主要有:

(1)提高效率。将原来转发和路由计算的串行处理结构转化为并行处理,大大减小路由信息收集、网络拓扑探寻和路由计算的复杂性,减小了路由器的工作负载,提高了报文转发的吞吐能力;

(2)直接控制。新模式充分体现了对网络进行直接控制而不是对路由器施加间接影响,大大减小了路由器的配置以及产生错误的可能性。

(3)可扩展性。由于服务的设计者能够直接表达他们的决定而不是通过间接的参数描述来调整和诱导路由器共同做出所希望的路由决定,因此新模式能快速适应新的 IP 服务,也为实时业务的服务质量保证提供强有力的保障基础。

新体系结构中决策平面实现集中式的路由选择,便于通过业务感知路由和多径路由技术,实现动态灵活的连接特性;通过决策平面对数据平面的直接控制,减少连接建立信令过程中的管理控制开销,实现可扩展的连接特性。

通过上面的分析可知,新体系结构能够支持集中式与分布式相结合的路由计算和选路控制模式的实现,而新的选路模式是一种为网络提供面向连接特性的重要手段。图3解释了在自治系统内这种选路新模式的实施方法。路由器不再需要计算各自的路由表,而是由监测平面形成包括结点的服务质量信息、网络可达性信息在内的网络子视图,通过分发平面汇聚到选路控制平台,完成选路控制的决策平面功能,生成相应的控制规则和指令,最后由分发平面部署到各个路由器,控制分组转发处理的动作。

路由表集中计算提高网络拓扑信息的一致性,利于提高路由计算的准确性,避免了各路由器网络拓扑数据库的不同步带来的问题;通过路由计算中

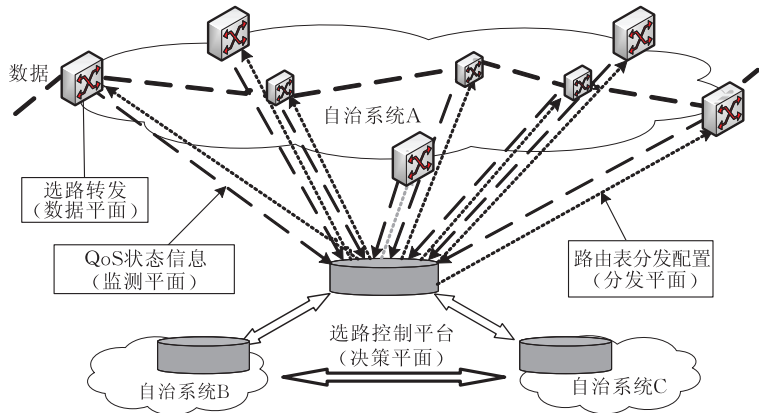


图 3 集中式路由计算提供面向连接的特性

心集中决策,在选路控制中能方便地统一考虑 QoS 要求,便于新应用需求的部署;集中计算的路由通过管理控制服务器向转发元件进行直接配置,减少了连接建立过程中的管理控制开销,提高了可扩展性并降低了连接建立时间.新体系结构为 IP 网络提供的面向连接特性是动态灵活的,通过借助动态路由和多径路由技术,为终端用户提供交换虚连接的功能,为实现多样的端到端 QoS 保障及解决其它在静态或准静态连接特性下无法达到的技术目标提供了有力的支持.

新体系结构在分组传输路径上增强 QoS 控制能力;QoS 控制决策逻辑由集中式管理控制服务器负责,且转发元件的 QoS 状态由管理控制服务器直接配置,降低了管理控制开销,提高了连接维护的灵活性和可扩展性.

网络 QoS 分析简单地分为 QoS 信息输入(监测平面)、QoS 信息的传播(分发平面)、QoS 分析与决策(决策平面)和 QoS 控制指令发布(分发平面)四个阶段,如图 4 所示. QoS 信息的采集是输入的具体方式,典型的有拓扑视图、链路负载、节点能力和网络故障.分发平面中的传递协议将监测平面所获的网络 QoS 信息提交给决策平面.决策平面执行服务质量性能优化,根据 QoS 信息形成驱动具体行为控制的逻辑,降低网络无法提供所需的 QoS 等级

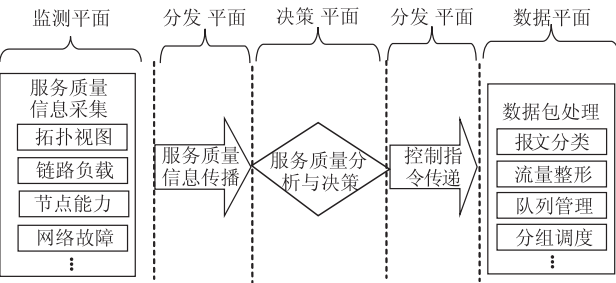


图 4 基于新体系结构的服务质量信息采集与处理

的几率.分发平面将控制指令传递给数据平面,数据平面执行具体的行为控制动作,即根据决策平面所配置的状态信息对网络行为进行操作.

新体系下的 QoS 保证模式不同于传统的 Diff-Serv 与 IntServ. 与 DiffServ 相比,其网络内部节点具有更丰富的数据包处理功能和更有效的 QoS 控制手段和机制,从而能够更有力地提供 QoS 保障. 与 IntServ 相比,它并不在分布于网络中的大量数据转发元件中维护流状态信息并进行控制决策,而是由少量的管理控制服务器根据收集的服务质量信息进行集中决策,并直接控制各个数据转发元件完成相关的数据包转发和处理功能.

2.3 无线网络:跨层的体系结构

随着无线通信与网络快速占据通信网络领域研发活动的重要位置,作为网络设计基本原则之一的分层协议体系结构开始受到质疑. 宽带接入网络和边缘业务网络是未来异构无线网络的主要生态模式,是新一代网络的有机组成部分. 异构无线信道的动态多变性,链路的高误码给异构无线网络的实时传输研究带来了不小的技术挑战. 纠错码和重传机制有利于增强高误码无线信道中的传输可靠性,但由此产生的处理延时对实时性带来的负面影响也是明显的;还有,无线共享信道中竞争型介质访问控制协议的普遍使用增加了分组发送的不确定性,二进制指数退避等碰撞避免机制的采用一方面加剧了延时的不确定性,同时引入了额外的介质访问时间;此外,为实现无缝访问采取的各种切换技术引入的延时也将给实时性传输带来不小的障碍. 我们认为应当尽可能地利用异构无线网络环境的时空多样性,针对性地改良网络体系结构,设计必要的增强机制与算法,避免或削弱上述随机不确定性因素对实时传输性能的影响. 跨层设计的方法在无线网络其



它问题的研究中表现出了令人臆想不到的效果. 传统协议层次设计的方法基本上是遵从严格的层次化结构, 各层在预定义的功能框架下孤立设计. 尽管生成的协议栈模块化程度高, 便于功能实现, 利于互操作, 然而由于只能与直接连接的层次交换信息, 缺少相关性分析和综合决策, 无法及时而充分地利用不相邻层中有价值的状态信息, 也就较难实现最佳的资源管理.

图 5 给出了跨层设计的基本理论模型<sup>[6]</sup>, 其主要目标是: 在一个统一的优化目标下, 将各层协议集成到一个综合的协议框架中, 建立一种灵活的网络状态信息的共享、分析和决策模式. 跨层协议设计提供的层间信息共享能力能够较好地适应无线网络状态的动态变化特性, 上层协议可以针对信道状态作出有利于实时传输的自适应调整, 是我们在设计和优化无线网络实时传输协议过程中值得深入探索的一个潜在的努力方向.

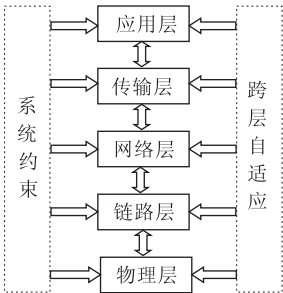


图 5 跨层设计的理论模型

3 实时 QoS 保证

实时传输是网络研究领域由来已久的问题之一. 它通常被定义为网络 QoS 研究领域的一个重要问题. 对新一代网络 QoS 保证的研究, 要根据未来互联网业务流量的分布特点和构成要素的演化特点, 从继承并改良网络体系结构角度出发, 通过资源的动态管理为新一代网络中敏感延时的实时性业务设计实时 QoS 保证解决方案. 目前, 出于系统性和一体化解决方案的考虑, 学术界和工业界提出了若干 QoS 保障的解决方案, 但问题一直没有得到根本解决, 因此很难真正部署实施. 依赖“带宽过量预约”提供 QoS 支持的观点曾经盛极一时, 但对流量增长过于保守的估计很快使其陷入了尴尬境地. 已有的 QoS 研究有一个默认的基本共识, 在隔离具体网络应用需求的前提下, 在非连接的 IP 网络中抽象出一种理想的 QoS 模型, 进而设计出一种包括延时、抖

动、带宽、丢失率等多参数多业务的完整 QoS 优化方案. 初衷固然理想, 但已有的 QoS 研究历史表明, 网络的非连接特性和 QoS 严格的多指标要求之间存在的矛盾是尖锐的, 通过一体化的 QoS 解决方案支持实时传输存在不小的技术障碍, 难以取得预期目标. 我们认为寻求 QoS 的解决方案应采取循序渐进, 迭代设计的方式展开. 结合网络流量分布的统计特征和对未来的预测结果, 为占统治地位的实时交互式流媒体业务定制 QoS 解决方案. 保持 IP 网络层的非连接特性, 以延时和抖动为主要研究对象, 从网络资源的动态管理和流量在线疏导为基本出发点, 结合端系统和网络中间节点上相应的策略、机制和算法, 为新一代互联网中敏感延时的实时性业务设计出可工程实践的实时 QoS 保障解决方案, 推动 IP 网络的技术发展和普及应用进入新的阶段. 多数传统的 QoS 方案依赖单路径网络节点上的组合控制策略给出了一个性能参数相对完备的解决方案, 不是未来主流实时性业务的最佳选择, 因为此类业务一般不敏感丢失, 这为优化实时传输性能带来了更大空间. 该方向上的研究将以上述基本认识作为出发点, 从资源动态管理和流量均衡疏导的宏观自适应调整和网络节点的微观控制两个方面为实时 QoS 保证设计简洁、可扩展、工程可实践的解决方案.

如图 6 所示, 依赖于动态路由、多径路由和基于延时与抖动约束的 QoS 路由的资源动态管理与配置策略为分组实时传输提供了多路径优化的技术手段, 突破了传统 QoS 在单路径上寻优的局限, 同时它又不同于以负载均衡为主要技术目标的流量工程 (Traffic Engineering) 研究. 动态资源配置的前提是实时而准确地了解网络的负载状态信息. 为此, 我们考虑在合适的位置恰当地引入少量的管理服务器 (如图 6 所示), 采取分布与集中优化组合的策略, 协助完成网络负载状态的观测.

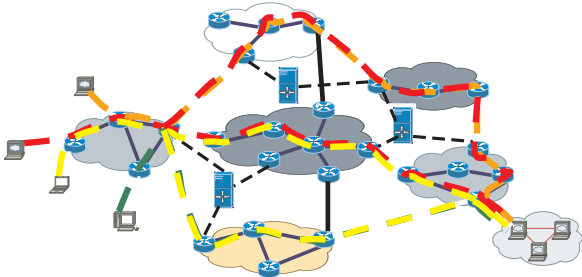


图 6 动态资源管理的 QoS 实现架构

在网管功能模块的支持与配合下, 继承和扩展



系统服务模型中,这是因为至少存在着如下 3 个原因:(1) QoP 和 QoS 都为用户提供端到端分级服务;(2) 提供 QoP 保障的安全机制和 QoS 保障机制都需要对网络资源进行控制和占用;(3) 提供 QoP 服务和 QoS 服务的机制必须相互配合才能满足用户的需求.然而由于安全机制的复杂性,目前大多数研究都是从一个方面来进行保障,因此网络 QoP 和 QoS 融合实现研究就显得势在必行.

在网络中 QoS 的保障需要 QoP 的支持,而 QoP 又会对 QoS 产生影响,因此需要将两者进行有机融合,才能满足用户和应用的 QoS 需求和安全需求,其融合模型描述如下.

在网络拓扑图  $G=(N,L)$  中,  $N$  表示节点,  $L$  表示路径,存在一个路径  $p^*$ ,使得  $\forall p$  都存在  $D(p)\geq D(p^*)$ ,  $B(p)\leq B(p^*)$ ,  $E(p)\geq E(p^*)$ ,  $V(p)\leq V(p^*)$ ,  $Au(p)\leq Au(p^*)$ ,  $C(p)\leq C(p^*)$ ,  $I(p)\leq I(p^*)$ ,  $N(p)\leq N(p^*)$ ,  $A(p)\leq A(p^*)$ , 其中

$$\begin{aligned} D(p) &= \sum_{i=1}^k D(l_i), \\ B(p) &= \min\{B(l_i), i=1,2,\cdots,k\}, \\ E(p) &= \prod_{i=1}^k E(l_i), \\ V(p) &= \min\{V(n_j), j=1,2,\cdots,m\}, \\ Au(p) &= \min\{Au(n_j), j=1,2,\cdots,m\}, \\ C(p) &= \min\{C(n_j), j=1,2,\cdots,m\}, \\ I(p) &= \min\{I(n_j), j=1,2,\cdots,m\}, \\ N(p) &= \min\{N(n_j), j=1,2,\cdots,m\}, \\ A(p) &= \min\{A(n_j), j=1,2,\cdots,m\}. \end{aligned}$$

上式中  $D(p)$  表示路径  $P$  的延迟,它定义为所有链路的延迟之和;  $B(p)$  表示为路径  $P$  的带宽,它定义为所有链路带宽的极小值;  $E(p)$  表示为路径  $P$  的分组丢失率或误码,它定义为所有链路组丢失率或误码率的乘积;  $V(p)$  表示为路径  $P$  的脆弱性评分,它定义为路径中所有节点脆弱性评分的极小值.  $Au(p)$  表示为路径  $P$  的认证性,它定义为所有节点认证性的极小值;  $C(p)$  表示为路径  $P$  的机密性,它定义为所有节点机密性能力的极小值;  $I(p)$  表示为路径  $P$  的完整性,它定义为所有节点完整性的极小值;  $N(p)$  表示为路径  $P$  的不可否认性,它定义为所有节点不可否认性的极小值;  $A(p)$  表示为路径  $P$  的可用性,它定义为所有节点可用性的极小值.

由于网络 QoP 能够为不同业务和用户提供不同等级的安全保障,因此可考虑在集成服务模型中

扩展 RSVP,使其支持多级 QoP 的方式,实现网络 QoS 和 QoP 融合.集成服务模型包括三个机制:资源预留、接入控制和队列管理.应用程序在使用确保服务或者可控负载服务传输数据之前必须使用 RSVP 预留机制建立路径和资源预留;接入控制机制决定资源的请求是否被接受;队列管理机制根据 QoS 请求对分组进行重新调度.可考虑在使用 RSVP 建立路径和资源预留时,将应用的 QoP 需求描述为参数嵌入在流的描述中,也即在资源预留协商过程中,除了进行 QoS 参数的协商外,还要进行 QoP 参数的协商.对 QoP 参数的描述可采用  $\langle M,C,K,S \rangle$  四元组的形式,  $M$ 、 $C$ 、 $K$  和  $S$  分别代表安全机制、密码算法、密钥长度和安全强度.在接入控制中考虑节点是否有足够的安全处理能力来支持协商请求,如果节点的 QoP 不能满足要求,则拒绝接入.在队列管理中可以根据 QoS 的监控结果,动态调整分组优先级,使其同时满足 QoS 请求和 QoP 请求.

### 5 网络 QoS 性能评价理论

网络 QoS 性能评价理论研究方面,目前用于研究 QoS 保证的基础理论,自身尚不够完善,而且它们大多是基于 IntServ 和 DiffServ 体系发展起来的,无法直接应用于研究新保证模式下的 QoS 问题.因此,必须基于随机模型等性能分析和评价理论进一步完善和发展现有的 QoS 理论,从而能够建立以动态资源管理为基本架构的 QoS 保证基础理论.

随机 Petri 网模型和随机网络演算模型是研究网络 QoS 问题的重要随机模型理论.随机 Petri 网是基于状态的随机模型分析方法中的一种行之有效的方法<sup>[8]</sup>.它对系统的并发性、异步性和不确定性具有很强的动态分析能力,同时具有建模原语少、符合直观的图形表示等优点,它既能描述系统状态,又能表现系统行为,且全局的状态和行为不是最基本的概念,而是由局部的状态和行为组合得到的,特别适合于对系统建模与分析.同时,又可以通过随机 Petri 网与马尔可夫过程同构的特性,求解网络系统的各种特性参数.而直接使用基于马尔可夫过程的随机模型,却很难实现对模型的扩展.例如在实际系统中,一旦系统的资源增加或减少,相应的马尔可夫链的结构就可能会发生很大的变化,而在随机 Petri 网模型中,只要通过增加相应位置中的标记数就可以建立相应的模型.并且随机 Petri 网可以在一个



系统模型的框架上采用图形化的方式完成系统的描述、性能分析以及系统的验证和测试. 这是其它的方法所不具备的功能.

实际上, 随机 Petri 网的分析方法已经广泛应用于各种系统的性能评价中<sup>[14-15]</sup>. 其中, 多服务器多队列模型<sup>[14]</sup>, 如图 8 所示, 可以描述多种实际分布、并行系统中的任务调度资源管理过程, 已被广泛的应用于网络系统的 QoS 性能评价当中. 通过该 Petri 模型可以分析各种 QoS 管理策略, 并计算响应时间、吞吐率等 QoS 参数.

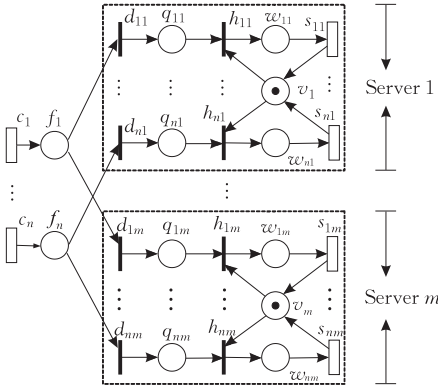


图 8 网络系统的多服务器多队列模型

当系统结构复杂, 模型状态空间较大时, 可采用文献<sup>[16]</sup>中提出的方法, 使每个子模型都成为仅包含一个进程就绪队列的独立结构. 然后, 对分解的子模型进行精化设计以获得紧凑的模型并且揭示各子模型在原模型中的独立性和相互关系. 图 8 中的模型经过精化和分解处理之后的模型如图 9 所示, 每个独立的结构都是一个子模型, 例如由时间变迁  $c_{ij}$ ,  $s_{ij}$  和位置  $q_{ij}$  组成的子模型  $A_{ij}$ . 这样, 原来图 8 中的模型就被  $m \times n$  个  $A_{ij}$  这样的子模型所等价地表示.

图 9 所示的精化后的多服务器多队列模型结构简单, 更易于分析和计算. 多服务器多队列模型及其精化方法, 可以适用于多种网络问题的模型描述, 是分析网络 QoS 性能的有力工具.

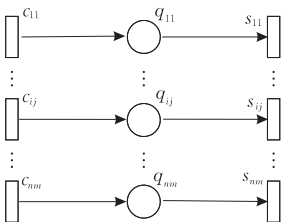


图 9 精化后的多服务器多队列模型

通过将随机 Petri 网模型等效后的马尔可夫链

和状态转移概率, 能构造状态转移矩阵并获得所有状态稳定状态概率, 从而可以讨论模型系统的 QoS 性能参数. 系统吞吐量和响应时间是重要的 QoS 性能参数, 图 9 中多服务器多队列模型的吞吐量  $T$  可以表示为

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{s_{ij}},$$

其中,  $T_{s_{ij}} = \sum_{M \in H} P[M] \lambda_{s_{ij}}$  表示稳定状态下子系统  $A_{ij}$  时间变迁  $s_{ij}$  的吞吐量,  $P[M]$  表示状态  $M$  的稳定状态概率,  $H$  是能使变迁  $s$  实施的所有标识集合,  $\lambda_{s_{ij}}$  是变迁  $s_{ij}$  在标识  $M$  下的实施速率.

子系统  $A_{ij}$  的响应时间  $R_{ij}$  可以表示为

$$R_{ij} = D_{q_{ij}} / T_{s_{ij}},$$

其中,  $D_{q_{ij}} = \sum j \times P[M(q_{ij}) = j]$  是稳定状态下队列位置  $q_{ij}$  的平均标记数量. 则多服务器多队列系统  $i$  类任务的响应时间  $R_i$  可以表示为

$$R_i = \sum_{j=1}^m \frac{T_{s_{ij}} \times R_{ij}}{\sum_{k=1}^m T_{s_{ik}}}.$$

多服务器多队列系统的响应时间  $R$  可以表示为

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{R_i \times \sum_{k=1}^m T_{s_{ik}}}{T}.$$

近年来, 随机网络演算理论得到了广泛的研究. 在需要网络提供 QoS 保证的实时业务中, 大部分业务可以容忍一定量的服务质量损失, 如时延、丢包率等. 因此, 这些业务可以接受网络为其提供统计 QoS 保证, 即以一定的概率满足这些业务对 QoS 的要求<sup>[17]</sup>, 它可以用来定量求解网络性能的统计边界, 得出网络所能提供的统计 QoS 保证.

目前, 随机网络演算理论还处于不断的发展完善之中, 面临着来自三方面的挑战. 首先, 随机到达曲线和随机服务曲线的定义必须满足网络演算的原有属性; 其次, 提供易于使用的方法对业务或服务的参数或模型进行描述; 最后, 对业务流和服务进行独立事件分析. 对 QoS 理论的研究应立足于将随机模型引入网络演算, 解决上述挑战, 建立一种优化的统计 QoS 保证分析理论.

随机网络演算对随机到达曲线和随机服务曲线的定义必须保持网络演算的如下 5 个基本特征:

(1) 叠加属性: 多个业务的叠加可以与单个业务采用相同形式的业务模型表示.

(2) 级联属性: 多个服务器的级联可以与单个服务器采用相同的业务模型表示.

(3) 输出特性: 从服务器输出的业务能够用相

同的业务模型表示.

(4)单流服务:聚合业务中单个业务获得的服务可以用相同的业务模型表示.

(5)服务保障:可以得到统计积压业务和时延保障.

上述的基本特征在很多文献中分别进行了研究.如文献[12,18]对属性(1),(3),(5)进行了研究;文献[13,19]对属性(4)进行了研究;文献[17,20]对属性(2)进行了研究.在这些属性中,属性(1)只与业务模型有关,属性(2)只与服务模型有关,其余属性则与两者均有关系.在采用最小加代数的网络演算中这些属性全部成立.2006年,Jiang在世界级网络年会 Sigcomm 上发表文章<sup>[21]</sup>,通过定义最大(虚拟)积压业务中心(maximum-(virtual)-backlog-centric: m.b.c)随机到达曲线和随机服务曲线,使得随机网络演算在最小加代数下可以满足上述所有5个基本属性.该文献将在此之前提出的随机到达曲线大致分为业务量中心(traffic-amount-centric: t.a.c)和虚拟积压业务中心(virtual-backlog-centric: v.b.c)两种,将在此之前提出的随机服务曲线称为弱随机服务曲线.这些随机到达和服务曲线满足上述5个属性的情况如表1所示.

表 1 随机到达和服务曲线组合所满足的属性		
	弱随机服务曲线	随机服务曲线
t. a. c. 随机到达曲线	属性(1)	属性(1),(3)
v. b. c. 随机到达曲线	属性(1),(4),(5)	属性(1)~(3),(5)
m. b. c. 随机到达曲线	属性(1),(4),(5)	属性(1)~(5)

在随机网络演算的发展中,一种基于矩母函数(Moment Generating Function, MGF)的随机网络演算占有非常重要的地位.它不属于上述各类随机到达和服务曲线,与同样基于 MGF 的有效带宽具有一定的联系<sup>[22]</sup>.同样在2006年,Fidler在QoS领域年度峰会 IWQoS 上提出了一种基于 MGF 的随机网络演算<sup>[23]</sup>,解决了该类随机网络演算难以满足级联属性的问题.文献[21]证明了该类随机网络演算与 m. b. c. 随机到达曲线和随机服务曲线具有一定的联系.

令  $A(t)$  代表到达过程,  $S(t)$  代表服务过程,如果当且仅当对于所有  $t \geq 0$  和所有  $x \geq 0$ , 以下公式成立:

$$P\{\sup_{0 \leq s \leq t} \sup_{0 \leq u \leq s} [A(u, s) - \alpha(s - u)] > x\} \leq f(x),$$
则业务流  $A$  具有最大(虚拟)积压业务中心随机到达曲线  $\alpha$  以及边界函数  $f$ , 记作  $A \sim_{mb} \langle f, \alpha \rangle$  如果当且仅当对于所有  $t \geq 0$  和所有  $x \geq 0$ , 以下公式成立:

$$P\{\sup_{0 \leq s \leq t} [A \otimes \beta(s) - A^*(s)] > x\} \leq g(x),$$
则服务器  $S$  具有随机服务曲线  $\beta$  以及边界函数  $g$ , 记作  $S \sim_{sc} \langle g, \beta \rangle$ .

进一步发展这些理论模型,发挥各自的特点,并结合 QoS 保证模式进行必要的完善和改进,以适应新一代网络 QoS 保证的理论分析与评价.

## 6 结 论

随着流媒体等应用的蓬勃发展,互联网中各种业务流量的比重正在悄然发生变化,实时多媒体业务已经替代敏感丢失的传统数据分组业务,成为主导性业务流量.如何突破面向非连接 IP 网络“尽力而为”的业务模式,为未来占统治地位的实时交互式流媒体业务以及各种异构无线网络应用提供良好的 QoS 保证,是新一代网络发展需要解决的重要问题.当前,用户对网络 QoS 的要求,已不仅仅是传统网络传输数据流时要求的带宽、延迟、延迟抖动、丢失率、吞吐量等性能指标,随着安全问题的不断发生,融合保护质量(Quality of Protection, QoP)的 QoS 控制研究,被越来越多的研究者所重视.同时,结合未来互联网中可能出现的新属性,基于动态资源分配和管理建立的非连接网络中可扩展实时服务质量保证的基本架构,研究非连接网络中实时 QoS 保证的性能评价基础理论.希望通过本文对新一代网络 QoS 所面临的挑战和解决思路的分析讨论以及对国际上与此相关研究工作的介绍,进一步探讨新一代网络 QoS 的发展方向.

## 参 考 文 献

[1] Braden R, Clark D, Shenker S. Integrated services in the Internet architecture: An overview. RFC1633, June 1994

[2] Blake S, Black D, Carlson M, Davies E, Wang Z, Weiss W. An architecture for differentiated services. RFC2475, December 1998

[3] Rosen E, Viswanathan A, Callon R. Multiprotocol label switching architecture. RFC 3031, January 2001

[4] Bell. Failure to thrive: QoS and the culture of operational networking//Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Revisiting IP QoS (RIPQoS'03). New York, NY, USA, 2003: 115-120

[5] Crowcroft et al. QoS's downfall: At the bottom or not at all//Proceedings of the ACM SIGCOMM. Germany, 2003: 109-114

[6] Srivastava V. Cross-layer design: A survey and the road ahead. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(12): 112-119

[7] Ong C S, Nahrstedt K, Yuan W. Quality of protection for

- mobile multimedia applications//Proceedings of the International Conference on Multimedia and Expo(ICME'03). Baltimore, Maryland, 2003, 2: 137-140
- [8] Lin Chuang, Wang Yuan-Zhuo, Yang Yang, Qu Yang. Research on network dependability analysis methods based on stochastic Petri net. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(2): 130-139(in Chinese)  
(林闯, 王元卓, 杨扬, 曲扬. 基于随机 Petri 网的网络可信赖性分析方法研究. *电子学报*, 2006, 34(2): 130-139)
- [9] Lin Chuang, Wang Yang, Li Quan-Lin. Stochastic modeling and evaluation for network security. *Chinese Journal of Computers*, 2005, 28(12): 1943-1956(in Chinese)  
(林闯, 汪洋, 李泉林. 网络安全的随机模型方法与评价技术. *计算机学报*, 2005, 28(12): 1943-1956)
- [10] ISO/IEC 17799:2005 Information technology-security techniques-Code of practice for information security management
- [11] ISO/IEC 27001:2005 Information technology-Security techniques-Information security management systems-Requirements
- [12] Chang C-S. Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(5): 913-931
- [13] Qiu J, Knightly E W. Inter-class resource sharing using statistical service envelopes//Proceedings of the IEEE INFOCOM'99. New York, USA, 1999: 1404-1411
- [14] Lin Chuang. Performance Evaluation of Computer Networks and Computer Systems. Beijing: Tsinghua University Press, 2001(in Chinese)  
(林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价. 北京:清华大学出版社, 2001)
- [15] Lin Chuang. Stochastic Petri Nets and Performance Evaluation. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese)  
(林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价. 第 2 版. 北京:清华大学出版社, 2005)
- [16] Lin Chuang. On refinement of model structure for stochastic Petri nets. *Journal of Software*, 2000, 11(1): 104-109 (in Chinese)  
(林闯. 随机 Petri 网模型的精化设计. *软件学报*, 2000, 11(1): 104-109)
- [17] Ciucu F, Burchard A, Liebeherr J. A network service curve approach for the stochastic analysis of networks//Proceedings of the ACM SIGMETRICS'05. New York, USA, 2005: 279-290
- [18] Yaron Q, Sidi M. Performance and stability of communication networks via robust exponential bounds. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1993, 1(3): 372-385
- [19] Liu Y, Tham C-K, Jiang Y. Conformance analysis in networks with service level agreements. *Computer Networks*, 2005, 47: 885-906
- [20] Jiang Y, Emstad P J. Analysis of stochastic service guarantees in communication networks: A server model//Proceedings of the 13th International Workshop on Quality of Service (IWQoS). Passau, Germany, 2005: 246-258
- [21] Jiang Y. A basic stochastic network calculus//Proceedings of the ACM SIGCOMM'06. Pisa, Italy, 2006: 123-134
- [22] Li C, Burchard A, Liebeherr J. A network calculus with effective bandwidth. University of Virginia: Technical Report CS-2003-20, 2003
- [23] Fidler M. An end-to-end probabilistic network calculus with moment generating functions//Proceedings of the IWQoS'06. New Haven, CT, USA, 2006: 261-270



**LIN Chuang**, born in 1948, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His current research interests include QoS, performance evaluation, trustworthy network, and Petri net theory together with its applications, etc.

**WANG Yuan-Zhuo**, born in 1978, Ph. D., assistant researcher. His current research interests include grid computing, QoS, survivability analysis, network security, performance evaluation and stochastic Petri nets, etc.

**REN Feng-Yuan**, born in 1970, Ph. D., associate professor. His research interests include network traffic management and control, measurement and control network, sensor network etc.

## Background

This research is partly supported by the National Basic Research Program (973 Program) of China under grant No. 2006CB708301, Scientific and Technological Innovation Nurture Funds Major Projects of MOE, P. R. C No. 707005, the National Natural Science Foundation of China under grant Nos. 60673187, 60773138, NSFC & RGC under grant No. 60218003, Microsoft-Tsinghua Collaborated Lab Funding, and Nokia Graduate Student Research and Innovation Funding.

The Internet has been a fantastic success, but in many ways it is not meeting the QoS requirements of its users. The Internet has had a profound effect on the Internet's ability in the past to evolve into possibly dominant networking technology today. The network is originally from the simple transmission of data to be transmitted data, voice, activities, still

images of multi-media. So the Internet will focus on how to transfer the delay-sensitive business, such as voice, conference and real-time multimedia applications. Both IntServ and DiffServ can not provide effective QoS guarantee for users. In non-connected IP network, however, "do my best" business model is no longer suitable to the QoS requirements of next generation network. There are many challenges for the QoS in next generation network. This paper tries to give a survey of the research status of all the above issues, researches the challenges and the solving ideas of next generation network QoS from the network QoS architecture, real-time QoS, the integration Quality of Protection (QoP) and QoS, and the theory of QoS performance evaluation, and analyzed the development prospect of future Internet.