

下一代互联网体系结构基础研究及探索

吴建平 吴 茜 徐 恪

(清华大学计算机科学与技术系清华信息科学与技术国家实验室(筹) 北京 100084)

摘 要 随着人们对互联网的规模、功能和性能等方面的需求越来越高,以 IPv4 协议为核心技术的互联网面临着越来越严重的技术挑战.近年来,下一代互联网及其应用的研究引起了许多国家的特别关注,发达国家相继启动了下一代互联网研究计划,意图掌握未来互联网核心技术.国家“九七三”计划项目“新一代互联网体系结构理论研究”,经过近 5 年的研究,在探索新一代互联网体系结构所面临的基础问题上,取得了初步的研究结果:提炼出新一代互联网体系结构研究的 4 个基本科学问题;初步提出了一种多维可扩展的新一代互联网体系结构及其基本要素;从基于 IPv6 的规模可扩展、基于可扩展交换节点的性能可扩展、基于真实 IPv6 地址的安全可扩展、基于 4over6 机制的功能可扩展和基于端到端无连接服务质量控制的服务可扩展等 5 个方面对新一代互联网多维可扩展体系结构进行了深入研究.这 5 项基本要素将构成未来新一代互联网的基础.

关键词 下一代互联网;IPv6;互联网体系结构;多维可扩展;真实 IPv6 地址;4over6

中图法分类号 TP393

Research and Exploration of Next-Generation Internet Architecture

WU Jian-Ping WU Qian XU Ke

(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNList), Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract As the demands on the size, functionality, performance and other aspects of Internet keep increasing, current Internet which using IPv4 as the core technology is facing severe technical challenges. In recent years, next-generation Internet and its applications has gained the particular concerns of many countries, and the developed countries have launched the national next-generation Internet research projects intended to seize the core technology of future Internet. National Basic Research Program of China (973 Program) "Research of Future Internet Architecture", after nearly five years of research, made the preliminary findings in exploring the basic issues of new-generation Internet architecture; Refined four basic scientific questions of new-generation Internet architecture, preliminarily proposed multi-dimension scalable architecture of new-generation Internet and its basic elements, extended in-depth study of new-generation Internet architecture to the expansion of five multi-dimension aspects, such as the scale-scalability based on IPv6, performance-scalability based on scalable exchange node, security-scalability based on authentic IPv6 addressing, function-scalability based on 4over6 mechanism, and service-scalability based on end-to-end connectionless Quality-of-Service control. These five basic elements will form the basis of new-generation Internet.

Keywords next-generation Internet; IPv6; Internet architecture; multi-dimension scalability; authentic IPv6 addressing; 4over6

收稿日期:2008-07-14. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2003CB314800)与国家自然科学基金(90704001)资助. 吴建平,男,1953 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域包括互联网体系结构、新一代互联网、协议测试和形式化等. E-mail: jianping@cernet.edu.cn. 吴 茜,女,1978 年生,博士,助理研究员,主要研究方向包括新一代互联网体系结构、移动和无线网络、组播等. 徐 恪,男,1974 年生,博士,副教授,主要研究方向包括新一代互联网体系结构、高性能交换机和路由器体系结构、P2P 与 Overlay 网络、服务质量路由算法和拥塞控制算法.

1 引言

互联网已成为支撑现代社会经济发展、社会进步和科技创新的最重要信息基础设施,是衡量一个国家基本国力和经济竞争力的重要标志之一。随着互联网的日益普及,异构环境、普适计算、泛在联网、移动接入和海量流媒体的等新应用的不断涌现,互联网在扩展性、安全性、实时性、高性能、移动性和易管理等方面面临着前所未有的重大技术挑战。

为了应对这些技术挑战,美国等发达国家从 20 世纪 90 年代中期就先后开始下一代互联网研究^①。我国科技人员于 20 世纪 90 年代后期开始下一代互联网研究。经过十年时间,全球下一代互联网研究在核心技术和标准、大规模试验网以及基础理论研究等各方面都取得了长足的进步。同时,人们也越来越深刻地认识到下一代互联网研究的重要性、复杂性、艰巨性和长期性,发达国家纷纷把下一代互联网研究列入未来信息技术领域的重点发展方向。

2003 年,清华大学、国防科学技术大学、北京邮电大学、东南大学和中国科学院网络信息中心等 5 个单位共同承担了国家“九七三”计划项目“新一代互联网体系结构理论研究”。项目围绕新一代互联网体系结构中的关键科学问题,在探索新一代互联网体系结构所面临的基础问题上,取得了初步研究成果^[1]:提出多维可扩展的新一代互联网体系结构,其主要思想是从传统互联网针对网络互连互通的单一可扩展性发展为下一代互联网的多维度的可扩展性。多维可扩展的要素包括规模可扩展、性能可扩展、安全可扩展、功能可扩展和服务可扩展,其中规模可扩展和性能可扩展是其它 3 个要素的基础。规模可扩展采用 IPv6 技术来实现,性能可扩展采用可扩展交换节点来实现,安全可扩展采用真实 IPv6 地址来实现,功能可扩展采用 4over6 机制来实现,而服务可扩展采用端到端无连接服务质量控制来实现。

本文第 2 节分析下一代互联网需要解决的重要技术挑战和重大技术问题;第 3 节从技术标准、大规模试验网和基础理论研究 3 个方面,详细介绍下一代互联网的研究进展,概述我国互联网的发展历程和研究进展;第 4 节详细介绍多维可扩展网络体系结构的基本要素;第 5 节就未来互联网的研究与发展进行总结和展望。

2 下一代互联网及其主要技术挑战

2.1 下一代互联网及其主要技术挑战

尽管下一代互联网发展已有十余年,但始终没

有形成统一、确切的定义。但是,人们面对目前互联网存在的主要技术挑战,对下一代互联网的需求和基本特征有了比较一致的看法,即下一代互联网应该解决目前互联网在“扩展性、高性能、实时性、移动性、安全性、易管理和经济性”等方面存在的重大技术问题。其中,扩展性和安全性是目前互联网面临的首要技术挑战。

2.1.1 扩展性

可扩展性是目前互联网技术取得成功的最重要原因之一。无连接分组交换技术不要求网络交换节点记录数据传送的轨迹,成为互联网易于扩展的基础;分层的路由寻址结构使得全球属于不同管理域的网络相互寻址变得相对简单可行。但是,由于 IPv4 地址规划策略的局限性,目前全球互联网路由表已经超过 20 万条,并仍然保持快速增长的趋势。这不仅大大增加了路由计算的开销,也对互联网寻址路由技术的进一步扩展提出极大的挑战^[2]。尽管 IPv6 协议定义了海量的地址空间,但是如何对这些地址进行合理的规划和设计,以及如何在海量地址空间范围内实现高效的路由寻址,仍然是没有解决的技术难题。面对如此巨大的地址空间,理想的路由机制一定是可扩展的路由机制,可以随着规模的不断扩大能够自适应的路由机制。因此,国际互联网标准化组织 IETF 在其 68 届大会上,直接提出了研究目标:“解决 20 年内 100 亿 IP 地址、超过 1000 万 Multihoming 地址的互联网路由的技术问题”^[2-3]。

2.1.2 安全性

目前的互联网中存在着种种安全问题,例如:网络恶意攻击不断;网络病毒泛滥;路由系统无法验证数据包的来源是否可信;追查网络肇事者异常困难;用户担心网络敏感信息或个人隐私泄露;关键应用系统的开发者和所有者担心受到网络的攻击,影响应用系统的可用性。互联网出现的这些安全问题严重影响了越来越依靠互联网运行的国家经济、社会和军事系统的安全,使人们对互联网的信任性产生怀疑。

目前的互联网安全技术相对独立,系统性不强,基本处于被动应对状态。从互联网体系结构上找出其安全问题的根源,确保下一代互联网地址及其位置的真正可信,增强下一代互联网应用实体的真正可信,从下一代互联网体系结构上系统地解决互联网安全问题,是下一代互联网研究的另一个重要技术挑战。

2.1.3 高性能

随着流媒体数据在互联网流量中占有的比重不断增加,基于分组交换、点到点传送和闭环拥塞控制

① Next Generation Internet Initiative. <http://www.ngi.gov>

的互联网体系表现出越来越多的不适应性,越来越多的数据传送只能依靠层叠网技术实现. 由于不能感知和利用网络状态信息,无法利用路由器的数据复制和分发功能,P2P 等层叠网技术在实现海量信息传送的同时,降低了互联网本身的传送效率.

随着千兆/万兆位以太网技术、密集波分复用 DWDM 光通信技术的发展,下一代互联网主干网和接入网的超高速传输似乎大有发展潜力. 但是,应该与此相匹配的超高速分组处理技术和超高速路由寻址技术却受到目前微电子技术发展的限制,不是集成度不够就是电功耗太大. 要想突破这种限制,必须设计出新的超高速分组处理算法和大规模高效路由寻址体系结构. 此外,还要解决全网范围高性能端到端传送所面临的一系列技术挑战.

2.1.4 实时性

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. 如何在非连接 IP 网络“尽力而为”的业务模式下,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下一代互联网研究面临的重要技术挑战之一. 另外,对于其它大量非视频的实时性应用,例如:实时工业控制、自动指挥、测量监视等,互联网技术同样远远不能满足它们的实时性要求.

如何提供与互联网“尽力而为”设计理念完全不同的实时性处理能力?如何支持更多的实时性应用需求?成为下一代互联网最大的技术挑战之一.

2.1.5 移动性

目前发展最为迅速的手机无线移动通信主要采用电路交换蜂窝移动通信技术,例如 GSM 和 CDMA. 它们以低速语音无线移动通信为主要业务,与互联网完全属于两种不同的技术体制. 尽管人们现在也能通过手机系统访问互联网,但是因为受到语音通道容量的限制,一般速度较慢,无法满足互联网高速应用的访问需求. 近年来,互联网的无线接入技术发展迅速,例如:WiFi 和 WiMax,除了笔记本电脑可以方便地移动接入互联网外,各种无线移动终端也层出不穷,正在使互联网越来越具有移动性.

人们希望的下一代互联网实际上也是一个移动的互联网,一个无处不在的互联网. 如何基于现有的互联网技术体制,采用先进的互联网的无线接入技术,借鉴目前无线移动通信技术的成功经验,构造出真正的移动互联网,是下一代互联网面临的重大技术挑战之一.

2.1.6 可管理性

互联网之所以管理困难、安全问题严重,是因为互联网端到端的特性决定了网上的用户个人和端系

统、每个网络和运营商(ISP)都是独立的、自治的. 用户的通信的范围不局限在接入点所在的网络,但是对跨管理域的通信行为,目前在测量和控制方面缺乏基本支持. 而且互联网上独立、自治的实体之间,存在着合作、竞争和对抗关系,对网络管理和安全的目标有时很难达成一致;有限的网络资源在无序的竞争或是对抗中,很难达到最佳的利用效果,甚至被大量滥用或恶意破坏.

如何在由自治用户、自治网络构成的复杂系统中,实现有效的网络管理,使得各种网络功能可知、可控和可管,是下一代互联网研究的又一个重大技术挑战.

国际互联网标准化组织 IETF^① 及国外主要的下一代互联网研究计划如 GENI^②、FIND^③ 和 FIRE^④ 都对下一代互联网的功能需求进行了深入分析和总结,如表 1 所示.

表 1 国内外下一代互联网研究计划重大需求列表

IETF	GENI	FIND	FIRE	我们的分析
• 大规模路由扩展性			• 可扩展	• 扩展性
• 网络安全与可信	• 安全 • 高可靠	• 安全可信 • 普适感知、计算、内容、数据挖掘中的隐私保护	• 安全	• 安全性
• IPv6 协议应用及过渡问题	• 高可用 • 对无线通讯等新技术的支持	• 对未来新技术的适应性	• 对多跳自组网的适应性 • 移动性 • 透明性	• 移动性
• 复杂网络环境下的管理	• 易配置、易管理、易错误定位	• 可管理、易使用		• 管理性
• 实时性流量的控制和管理		• 对应用的支持		• 实时性 • 高性能
	• 经济增长持续性	• 经济增长持续性		

可以看出,国内外对下一代互联网的需求研究已基本达成共识,并且与我们的分析基本一致,即扩展性、高性能、实时性、移动性、安全性和易管理.

2.2 IPv6 和下一代互联网

根据亚太网络信息中心 APNIC 互联网研究科学家 Geoff Huston 在 2008 年 6 月的最新预测,按

① Internet Engineering Task Force (IETF). <http://www.ietf.org/>
② Global Environment for Network Innovations (GENI). <http://www.geni.net>
③ Future Internet Network Design (FIND). <http://find.isi.edu>
④ Future Internet Research and Experimentation (FIRE). <http://cordis.europa.eu/ist/fet/comms-fire.htm>

照最近 3 年 IPv4 地址分配速度,互联网地址分配机构 IANA 的 IPv4 地址将在 2011 年 1 月耗尽,如图 1 所示.

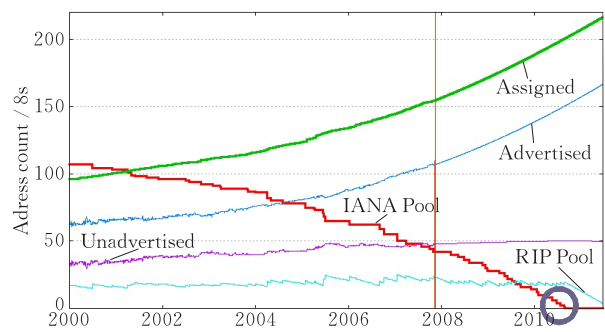


图 1 IPv4 地址使用现状和预测

采用 IPv6 地址的下一代互联网,拥有海量的地址空间,为大规模发展提供了可能,更为逐步解决目前互联网面临的重大技术挑战提供了崭新的技术试验平台. 目前,IPv6 是唯一能够代替 IPv4 的下一代互联网的核心协议,已经得到国际互联网技术领域的广泛认可.

3 下一代互联网研究进展

3.1 IPv6 及其相关技术标准发展迅速

十多年来,以 IPv6 协议为标志的下一代互联网技术及其标准得到了互联网研究者的极大关注. 国际标准化组织 IETF 自 1995 年发布 IPv6 协议标准以来,对 IPv6 及其相关技术的研究就非常活跃,以 IPv6 为标志的下一代互联网的技术标准正在快速发展和完善之中.

2007 年 3 月召开的第 68 届 IETF 大会主题是大规模路由和寻址,希望现在开始着手解决 20 年内 100 亿 IP 地址,1000 万多接入 IP 地址的互联网路由和寻址等技术问题. 针对目前路由体系结构存在的问题,国内外出现了众多的解决方案,而所有的方案几乎都指向了同一个方向,那就是把 IP 地址空间分成两部分:一部分是全局路由地址空间 GRA(Global Routable Address Space);另一部分是全局可交付地址空间 GDA(Global Deliverable Address)^[4]. 全球路由系统运行于 GRA 地址空间,所有的 ISP 将从 GRA 中接收分配的地址块. 这样,与终端相比,ISP 的数目显得很少,并且能够长期保持稳定. 所有的终端从 GDA 中分配地址,这些地址是全球唯一的. 但是由于 GDA 前缀不能全球路由,因此需要提供一种 GDA 前缀到它的提供商终端路由器的映射. 图 2 显示了在该路由体系结构中分组

如何在端到端之间传递.

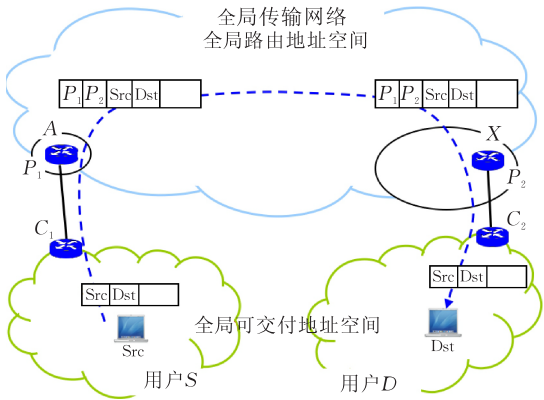


图 2 地址分离结构中的端到端分组传输

2007 年 7 月和 12 月召开的第 69 和 70 届 IETF 大会,大会主题则是 IPv6,希望能够解决 IPv6 大规模组网和运行管理、IPv4 向 IPv6 过渡等技术问题. 在 IPv6 标准化方面,中国科学家已发挥了越来越重要的作用. 例如,清华大学在国际上首次提出的“4 over 6 过渡技术”^[5-6],“真实 IPv6 源地址认证结构”^[7]已经推动 IETF 分别成立相应的工作组 Softwire 和 SAVI. 2007 年 7 月,Softwire 工作组的名“4over6 过渡技术问题描述”的 RFC4925^[8]发布,这是以我国科学家为主体提出的第一个非中文相关的 RFC 国际标准;2008 年 6 月,SAVI 工作组的名“真实 IPv6 源地址认证体系结构的试验和部署”的 RFC5210^[9]发布,这是在非中文相关的互联网核心技术领域以我国学者为主体署名的第一个非信息类 RFC. 可以看出,中国在国际互联网主流技术上已有了越来越多的发言权.

IPv6 及其相关技术标准日趋完善的最明显体现,是支持 IPv6 协议的网络设备和应用软件的不断出现和应用. 主流的互联网设备和软件厂商都已经支持 IPv6 协议. 例如,CISCO、Juniper 等网络厂商的路由器和交换机已全面支持 IPv6 及其相关技术标准,成为构建 IPv6 下一代互联网的主体设备;微软最新版本操作系统 Windows Vista 已经全面支持 IPv6 协议,并且以此为框架构造整个系统. 而在此之前的 Windows XP 版本中,IPv6 只是一个可选项.

另外,移动通信和家用电器对 IPv6 的需求也越来越迫切,很多家电厂商开始把目光集中在家电设备的 IPv6 网络接入上. 这些需求更进一步促进了 IPv6 下一代互联网的发展.

3.2 全球 IPv6 下一代互联网大规模试验网不断发展

互联网发展的历史证明,互联网技术和实验物

理学非常相似,其研究和技术的发展一定要有大规模实验环境的支持和验证。目前的互联网正是在 1986 年美国科学基金会 NSF 开始建设的第一个大规模采用 TCP/IP 技术的互联网主干网 NSFNET 基础上逐步发展起来的。

正是基于互联网研究的这一重要特点,世界发达国家下一代互联网研究计划的重要内容之一就是建设大规模的下一代互联网试验网。目前,世界上著名的下一代互联网组织及其试验网主要包括:

(1) 美国学术网 Internet2 及其主干网^①。成员包括美国 300 多所大学和科研机构、公司和国际学术网合作伙伴;主干网速率高达 100Gbps;采用 IPv4 和 IPv6 双栈协议;可支持高速的下一代互联网技术和应用。

(2) 第二代欧盟学术网的主干网 GÉANT2^②。它是面向下一代互联网研究的第二代泛欧洲学术主干网;已连接 34 个欧洲国家的学术网,进而连接了欧洲 3500 多所主要大学和科研机构;主干网速率为 10Gbps;采用 IPv4/IPv6 双栈技术;为欧洲各领域的前沿学术研究提供了最先进的网络基础设施。

(3) 亚太地区先进网络 APAN 及其主干网^③。它由亚太地区各国学术网共同合作,旨在规划、建设和运行连接亚太地区各国学术网,并推动亚太地区下一代互联网技术和应用的学术研究,以及与世界其它地区下一代互联网试验网及其应用研究广泛合作;已有 39 个成员;日本、韩国、中国、澳大利亚和新加坡等国家在 APAN 中发挥了重要作用。

(4) 跨欧亚高速网络 TEIN2 及其主干网^④。它在欧盟第六框架计划下,为促进亚欧学术网络之间的高速互联而启动的国际合作项目;主干网 2005 年 12 月开通,其核心节点包括北京、香港和新加坡,从北京和新加坡分别与欧洲的哥本哈根和法兰克福实现了高速互联,东京与北美实现了 10G 的互联;采用 IPv4 和 IPv6 双栈技术;提高了欧亚间和亚洲各国之间学术互联网的信息传递速度,促进了这些国家之间的科技合作,已成为亚太地区唯一统一运行和管理的下一代互联网主干网。

另外,中国的 CNGI 及其主干网,日本第二代学术网 SUPER SINET 和加拿大新一代学术网 CA*net4 等也是国际下一代互联网试验网的重要组成部分之一。经过十年的发展,全球各国学术网已实现了高速互联,形成了国际 IPv6 下一代互联网大规模试验网的主体。

3.3 互联网和下一代互联网的基础理论研究逐步受到重视

长期以来,互联网基础研究的薄弱,给人们了解

互联网的基本机理、解决它的技术难题带来了极大的困难。人们仅仅对其局部问题进行有限的数学描述,却无法从整体上进行全面、准确的数学描述。例如:传统的通信网络理论在处理互联网流量的高度突发性和自相似特性、大规模网络系统的复杂性和可控性、网络可信性等问题时已显得无能为力。

近年来,互联网和下一代互联网的基础研究逐步得到了人们的高度重视。各发达国家的科学基金和高技术研究计划纷纷资助互联网和下一代互联网基础理论的研究课题。不仅大量的计算机和通信领域的科学家开始研究互联网的基本理论问题,而且数学和物理领域的科学家也开始研究互联网基本行为的数学模型,并取得了一些有益的进展。

美国自然科学基金会 NSF 于 2005 年开始启动两大下一代互联网研究计划:“未来互联网设计 FIND(Future INternet Design)”和“全球网络创新环境 GENI(Global Environment for Networking Innovation)”。

FIND 计划的目的是让研究人员发挥自己的创新与能动性,设计一个全新的满足未来 15 年社会需求的网络。该项目最大的特点在于从草图设计开始,探讨所需的网络结构及其设计,而不是增量式地逐步改进现有网络。FIND 在网络体系结构各个方面的研究和设计都尽量做到不受到以往的研究思维的影响和束缚,即“Clean Slate Process”。从 FIND 已经资助的项目可以看出,博弈论和最优化理论已经成为未来互联网设计的基础理论,日益受到网络研究人员的重视。

GENI 计划的目的则是构建一个全新的、安全的、能够连接所有设备的互联网,以促进互联网的发展,并刺激创新促进经济增长。其目标是发现和评估可以作为 21 世纪互联网基础的新的革命性概念、示范和技术,建立一个用于研究未来互联网体系结构、服务和过渡的一个实验环境,提供更多数量和更好质量的研究平台,并能将研究成果迅速的转化为实际的产品和服务,使这些产品和服务能够提高国家未来的经济竞争力和国家安全,并且能够让当前的网络较快过渡到新的网络体系结构。

欧盟于 2007 年初在其第七框架 FP7 中设立了“未来互联网计划 FIRE(Future Internet Research and Experimentation)”。FIRE 是一项长期的试验驱

① Internet2. <http://www.internet2.edu/>

② GÉANT2. <http://www.geant2.net/>

③ APAN. <http://www.apan.net>

④ TEIN2. <http://www.tein2.net/>

动的原创性研究,涉及了未来互联网的概念、协议和体系结构、相关的科技、工业和社会经济学等方面。其主要研究内容包括:网络体系结构和协议的新方法;管理未来互联网日益增长的规模、复杂性、移动性、安全性和通透性;在物理和虚拟结构的大规模测试环境中验证上述属性。

另外,韩国于 2006 年启动了“未来互联网论坛 FIF(Future Internet Forum)”^①,而日本也于 2007 年启动了“新一代网络 NWGN(NeW Generation Network)”^②国家重大项目。

可以看出,目前国内外对下一代互联网体系结构的研究有两种基本思路,一种思路是基于现有的互联网体系结构来解决面临的重大技术挑战;另一种思路是完全重新设计一种新的互联网体系结构来解决面临的重大技术挑战。

人们必须承认,互联网的技术精髓和成功经验,如分层分布式体系结构、无连接分组交换、可扩展的路由寻址、倡导简单实用技术等,是几十年来互联网迅速发展壮大的根源,是在互联网长期大规模技术试验的基础上逐步形成的.实践表明:互联网体系结构本身具有很好的多维扩展特性.因此,在下一代互联网研究中,要尽可能继承和发扬目前互联网体系结构的技术精髓,坚持扩展和演进,吸取创新,将体系结构研究作为下一代互联网基础研究的重点,使其继续在下一代互联网研究中发挥核心作用.

3.4 我国下一代互联网研究进展

回顾我国互联网发展历程,大致可以分为 3 个阶段:(1) 1994 年~1998 年,学习建设和使用互联网阶段. 中国教育和科研计算机网(CERNET)、中国科技网(CSTNET)和中国公用数据网(CHINANET)等学术互联网和公用互联网先后建成并投入使用.(2) 1999 年~2003 年,攻克互联网实现关键技术阶段. 在国家“八六三”计划的支持下,我国先后攻克了以 IPv4 和 IPv6 核心路由器为代表的互联网关键技术难题以及一批互联网及其应用的核心软件技术难题,初步掌握了互联网的实现技术.(3) 2004 年至今,下一代互联网技术创新阶段. 在国家自然科学基金、“九七三”计划和“八六三”计划的支持下,我国科技人员开始比较深入地研究下一代互联网技术.

特别是 2003 年由国务院批准、国家发展改革委等八部委联合组织的“中国下一代互联网示范工程(CNGI)”,更是把我国下一代互联网技术研究推到新的高度. 其中,在 CNGI 核心网建设项目中,由 CERNET 网络中心牵头、清华大学等 25 所大学联

合建设完成 CNGI 核心网中规模最大的学术性主干网 CNGI-CERNET2 以及位于北京的 CNGI 国际/国内互联中心 CNGI-6IX. CNGI-6IX 实现了 CNGI-CERNET2、中国电信、中国联通、中国网通/中国科学院、中国移动、中国铁通等 6 个 CNGI 主干网之间的纯 IPv6 跨域互联, 以及与美国 Internet2、欧洲 GEANT2 和亚太地区 APAN 等国际下一代互联网的高速互联. CNGI-CERNET2/6IX 拓扑结构如图 3 所示.

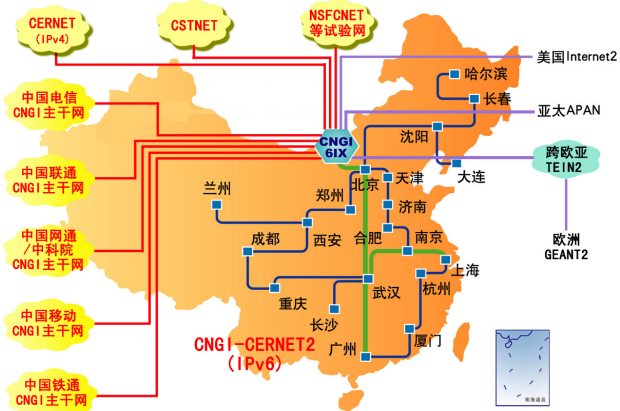


图 3 CNGI-CERNET2/6IX 拓扑结构

4 多维可扩展的新一代互联网体系结构

2003年,清华大学、国防科学技术大学、北京邮电大学、东南大学和中国科学院网络信息中心等5个单位共同承担了国家“九七三”计划项目“新一代互联网体系结构理论研究”.项目围绕新一代互联网体系结构中的关键科学问题,在探索新一代互联网体系结构所面临的基础问题上,取得了初步研究成果^[1].

4.1 新一代互联网体系结构研究的 4 个基本科学问题及其内在联系

人类社会对新一代互联网络的需求的不断增长和网络理论、技术本身发展的不充分性之间的矛盾是新一代互联网络发展中必须解决的基本矛盾。其中,又可以分为:解决现有网络体系结构的单一可扩展性和网络功能的复杂多样性之间的矛盾;未知的网络行为与确定的传输控制目标之间的矛盾;复杂巨系统与网络脆弱性和安全可信需求之间的矛盾;和网络体系结构的相对稳定性和网络服务需求的复

- ① Future Internet Forum (FIF). <http://fif.kr/>
- ② New Generation Network Promotion Forum (NWGN). <http://forum.nwgn.jp/>

杂多变之间的矛盾. 这些矛盾已经成为制约目前互联网络发展的重要障碍.

通过研究,我们从以上 4 个基本矛盾提炼出新一代互联网体系结构研究的 4 个基本科学问题,即新一代互联网体系结构的多维可扩展性问题;网络动态行为及其可控性问题;脆弱复杂巨系统的可信性问题和稳定网络体系结构的服务多样性问题. 研究解决这些基本科学问题,可以为新一代互联网络的发展和广泛应用奠定理论基础.

这 4 个基本科学问题的内在联系如图 4 所示. 互联网体系结构是从功能的角度来研究网络的. 描述互联网应该提供的功能、功能划分以及各功能模块之间的关系,是对互联网静态的描述. 多维可扩展的互联网体系结构,需要解决多个维度的可扩展性问题,包括如何在服务、安全、控制等维度都能提供扩展性良好的框架. 这个问题的解决将为后续几个科学问题的解决奠定良好的研究基础.

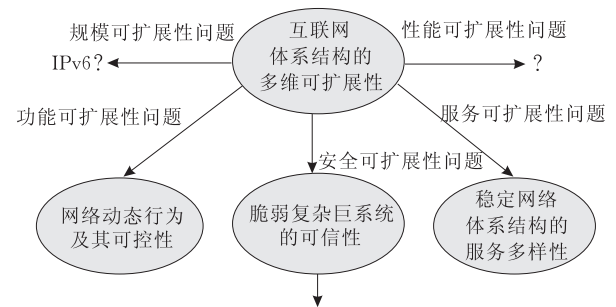


图 4 新一代互联网体系结构的基本科学问题和内在联系

互联网发展到今天,规模越来越大,协议越来越复杂,传输的信息越来越多,互联网行为与当初的设计思想已经有很大偏差. 因此还需要观察分析互联网的动态行为特性,即从互联网行为学的角度研究互联网. 而互联网的动态性和不确定性使得对互联网的控制越来越难,在新一代互联网基础研究中要重点解决网络的可控性问题,主要体现在传输控制和安全控制. 传输控制和安全控制基础理论的建立将有助于我们认识新一代互联网络的本质特征,更好地掌握其在动态发展变化中的本质规律,从而可以更充分的发挥互联网络对信息社会的巨大推动作用.

互联网发展的历史表明,相比于网络本身,网络应用的发展和变化是非常快的. 为了适应不断变化的应用需求和相对稳定的基础网络,需要提供一种可扩展的、可管理的服务框架来解决这一矛盾. 这一问题的解决将弥补相对稳定的网络体系结构和不断变化的服务需求之间的矛盾,使新一代互联网络可以提供更快,更好、更方便、更令人满意的服务.

4.2 新一代互联网体系结构的多维可扩展性和基本要素

从互联网存在的 4 大基本矛盾的分析中,我们不难发现,新一代互联网要解决的第一个基本问题就是现有互联网体系结构的单一可扩展性和互联网功能的复杂多样性之间的矛盾. 我们定义了新一代互联网的多维可扩展性,初步提出了一种多维可扩展的新一代互联网体系结构并定义了其 5 项基本要素.

新一代互联网体系结构的多维可扩展性可以定义为:

(1) 规模可扩展

规模可扩展指的是随着网络节点和链路数量的增长,网络的性能(如带宽利用率、网络核心设备资源利用率)和端到端性能能够继续得到相应增长的性质. 对于针对该问题的具体实例,可以通过求解在相应约束条件下的网络效用函数最大化问题来评价.

(2) 性能可扩展

性能可扩展指的是在网络资源,如:链路、节点等能力增长以后,网络的性能和端到端性能是否能够继续得到相应增长的性质. 对于针对该问题的具体实例,可以通过求解在相应约束条件下的网络效用函数最大化问题来评价.

(3) 服务可扩展

服务可扩展性指的是网络中服务的可部署性是否能够随着总体服务规模的增长得到相应增长的性质. 对于针对该问题的具体实例,可以根据服务总量和各类服务所占比重建立约束条件下的网络效用函数,并通过求解最大值来评价.

(4) 安全可扩展

安全可扩展指的是网络中安全机制的性能和效用是否能够随着该机制部署规模的扩大而得到相应增长的性质. 对于针对该问题的具体实例,可以根据在不同体系结构下针对安全机制效用函数的比较来进行评价.

(5) 功能可扩展

功能可扩展指的是网络中的各种功能可以在一个统一的体系结构框架下进行扩展的性质. 例如:网络的单播、组播、隧道等.

新一代互联网体系结构的多维可扩展性也可以提供更高层次的概括:网络体系结构的可扩展性指的是网络的特性(如性能、部署代价等)随着网络相关约束条件(如发送速率、规模、服务类型)的变化能够继续得到相应改善的性质.

也就是说,可扩展性指的是总体效用 K 与网络

特性(如源速率 x_s 、网络规模 $|V| + |E|$)的变化关系, 可以表示为

$$K = \alpha U + (1 - \alpha)Q,$$

其中, $U = \sum_{s \in V_u} k_{1s} \sum_{w \in W} k_{1w} U(x_s, w)$ 代表具有不用权重的网络中用户的效用之和而 $Q = \sum_{l \in E} Q_1(\mu_l) + \sum_{s \in V_c} Q_2(\eta_s) = \sum_{l \in E} k_{2l} \sum_{w \in W} k_{2w} Q'_1(\mu_l, w) + \sum_{s \in V_c} k_{3s} \sum_{w \in W} k_{3w} U_c(\eta_s, w)$ 代

表网络中与链路利用率相关的链路效用和以及系统资源相关的网络中间设备的总体效用之和. 在上式中 α 为平滑参数, 用来调节该效用函数中网络效用与用户效用所占的比例.

在定义可扩展性的基础上, 我们进一步提出了多维可扩展的新一代互联网体系结构必须包含的五项基本要素, 如图 5 所示.

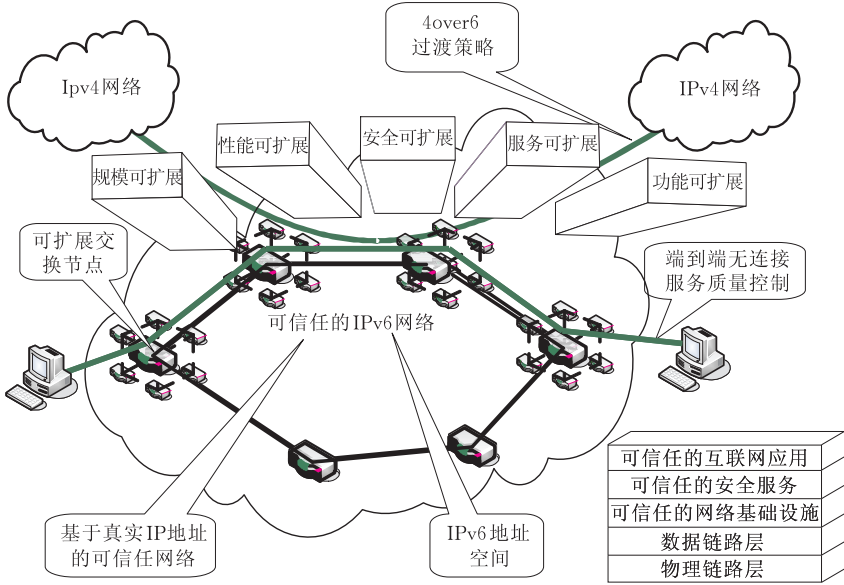


图 5 多维可扩展的新一代互联网体系结构

(1) IPv6 协议. IPv6 已经成为新一代互联网网络层的事实标准, IPv6 可以解决 IPv4 地址空间不足的问题, 并有助于解决安全可扩展和性能可扩展问题.

(2) 真实地址访问. 现有互联网存在的大量安全问题均是由于互联网对用户的源地址不验证而带来的, 我们认为, 在新一代互联网中必须解决用户的真实地址访问的问题, 这将有助于解决安全可扩展和服务可扩展问题^[7].

(3) 可扩展的网络节点能力. 随着用户需求的不断增长, 新一代互联网的核心交换节点必须具备可扩展的处理能力, 这将有助于解决规模可扩展和性能可扩展问题^[10-11].

(4) 无连接的网络服务质量控制. 互联网的服务质量控制能力一直是研究人员关注的热点问题. 我们认为, 如何在保持现有互联网逐跳路由的无连接特性的基础上实现服务质量控制是新一代互联网的研究目标之一, 这将有助于解决性能可扩展和服务可扩展问题^[12].

(5) IPv4 over IPv6 的网络过渡策略. 新一代互联网必须能够和现有的互联网协调工作并为用户提供服务, 而目前的网络过渡策略均只能用于小规模

的 IPv6 网络, 不适应新一代互联网的发展要求. 因此, 需要进一步研究现有 IPv4 网络过渡到未来以 IPv6 为核心的新一代网络的过渡策略, 这将有助于解决规模可扩展和服务可扩展问题^[5-6].

以上 5 个要素可以支撑新一代互联网在规模、功能、性能、安全和服务方面的可扩展性.

4.3 基于 IPv6 地址空间的规模可扩展

互联网发展到今天, 已经成为社会生产和人们生活的重要工具. 互联网的使用者从最初的一小部分研究者扩展到了广大的人民群众, 互联网主机数量也飞速地增长. 为了支持越来越多的互联网使用者, 必须解决互联网在空间规模上的可扩展性. 同时, 规模可扩展也是多维可扩展的新一代互联网体系结构的一个基础性要素.

当前互联网的网络层采用 IPv4 协议. 虽然引入了 NAT、地址聚类等技术, 但 IPv4 协议在本质上已经无法满足互联网规模的扩展. IPv6 将成为新一代的互联网网络层协议. IPv6 协议把地址空间从 IPv4 协议中的 32 位扩展到 128 位, 成功地解决了 IPv4 地址空间不足的问题, 可以实现互联网在空间规模上的可扩展. IPv6 的报文头部格式如图 6 所示.

4 bit Version	4 bit Preference	24 bit Flow Label	
16 bit Payload Length		8 bit Next Header	8 bit Hop Limit
128 bit Source IP Address			
128 bit Destination IP Address			

图 6 IPv6 报文头部

与 IPv4 协议相比,IPv6 协议有如下一些显著的优势:

(1)地址容量大大扩展,由原来的 32 位扩充到 128 位,彻底解决 IPv4 地址不足的问题;支持分层地址结构,从而更易于寻址;扩展支持组播和任意播地址,这使得数据包可以发送给任何一个或一组节点;

(2)大容量的地址空间能够真正地实现无状态地址自动配置,使 IPv6 终端能够快速连接到网络上,无需人工配置,实现了真正的即插即用;

(3)报头格式大大简化,从而有效减少路由器或交换机对报头的处理开销,这对设计硬件报头处理的路由器或交换机十分有利;

(4)加强了对扩展报头和选项部分的支持,这除了让转发更为有效外,还对将来网络加载新的应用提供了充分的支持;

(5)流标签的使用让我们可以为数据包所属类型提供个性化的网络服务,并有效保障相关业务的服务质量;

(6)认证与私密性:IPv6 把 IPSec 作为必备协议,保证了网络层端到端通信的完整性和机密性;

(7)IPv6 在移动网络和实时通信方面有很多改进.特别地,不像 IPv4,IPv6 具备强大的自动配置能力从而简化了移动主机和局域网的系统管理.

因此,在我们提出的多维可扩展的新一代互联网体系结构中,把 IPv6 协议作为互联网规模可扩展的主要技术.

4.4 基于可扩展交换节点的性能可扩展

除了空间规模上的可扩展,互联网在处理时间即性能方面的可扩展是多维可扩展网络体系结构的另一个基础性要素.节点的处理时间是影响互联网性能的主要因素.我们提出基于蜂巢结构的可扩展交换节点来实现互联网性能的可扩展性.这里的节点主要指路由器.

一个好的可扩展的拓扑结构,应该具备以下特

征:(1)两个节点间的路径应该尽可能多;(2)所有的路径应该尽可能短;(3)直径应该尽可能小;(4)度值低花费小(但冗余度小),度值高花费高(冗余度也相应地高);(5)互连应该尽可能大,以保证整个网络尽可能可靠;(6)增量应该尽可能小,降低花费;(7)复杂度应该尽可能低以降低费用.

上面列出的这些特征,在实际设计中往往会出现冲突,应该根据具体的情况进行取舍.例如,线性网络中,每次增加一个节点,要维护网络的拓扑结构,只需要增加一条链路即可,符合上面列出的第 6 条,但是却不符合第 1、2、3、5 条的要求;反之,全连接网络,虽然满足了 1、2、3、5 条,但是要维护该拓扑,代价太大,而且具体实现也很困难.因此,如何在这些要求中寻找一个合适的结合点,就显得格外重要.

蜂巢结构的引入,主要基于下述几个观察:(1)在所有的正多边形中,要无缝覆盖整个平面只有 3 类:正三角形、正四边形和正六边形;(2)如果为每个正六边形增加一个中心点,则正六边形结构可以涵盖正三角形和正四边形(取消某些链路). (3)在具体实现路由器等网络交换节点时,线卡的代价远大于数据通道的代价,当通过背板布线实现高速数据通道时,这个差距会更大.

蜂巢结构的基本单元(basic element)是一个增加了中心点的正六边形,如图 7(a)所示. BE 中包含 7 个节点,对应路由器中的线卡,各个节点间的连线表示线卡间的数据通路.由于在实际系统中,线卡都是平行放置的,所以可以对 BE 进行“改造”,如图 7 的(b)~(j)所示.

对于蜂巢结构而言,多层结构属于垂直方向的扩展,这样蜂巢结构中的节点,除了水平方向上最多有 6 个邻居外,垂直方向上还可以增加两个邻居,使得节点的度达到 8.

在基于蜂巢结构的可扩展的交换节点上,我们还设计了可扩展的软件体系结构来实现控制节点之间的负载分担、软件系统的高可靠性以及控制平面的动态配置.

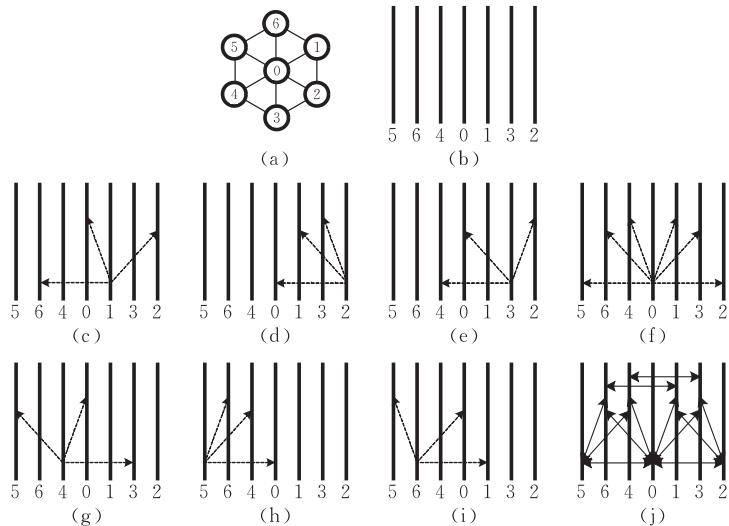


图 7 在可扩展路由器中实现基本单元

4.5 基于真实 IPv6 地址的安全可扩展

安全可扩展解决互联网在提供安全服务方面的扩展性问题. 现有的互联网在设计阶段没有充分考虑安全问题, 缺乏一个系统的安全体系结构的考虑, 在 TCP/IP 底层协议没有完善的内置安全机制, 现有的安全技术都是以修修补补的形式增加进来的, 难免会出现安全漏洞、功能重叠、实现复杂等各种问题. 现有互联网中的路由设备基于目的地址转发分组, 使网络中间节点对传输数据包的来源不做验证、不做审计, 导致地址假冒、垃圾信息泛滥, 大量的入侵和攻击行为无法跟踪.

我们提出采用真实 IPv6 地址来解决互联网的安全可扩展问题. 研究目标是每个网络终端都使用真实的 IP 地址访问网络, 网络基础设施能够识别伪

造 IP 源地址的分组, 禁止不真实 IP 地址分组在网络上传输.

我们可以把真实 IP 地址访问的整体设计方案划分为 3 个层次的研究内容(如图 8 所示): (1) 自治系统间的真实 IP 地址访问机制. 这一层次, 我们关注自治系统粒度的地址空间的真实性的验证. (2) 单连接末端自治系统 (Single-homed Stub AS) 和多连接非穿越自治系统 (Multihomed Nontransit AS) 内的真实 IP 地址访问机制. 至于多连接穿越自治系统 (Transit AS) 内部, 是 ISP 内部的网络, 它是可以信任的区域, 其内部的真实 IP 地址访问的验证, 会影响转发效率, 因此是没有必要的. (3) 子网内的真实 IP 地址访问机制. 这一层次主要关注于 IPv6 地址中后 64 位网络接口地址的验证.

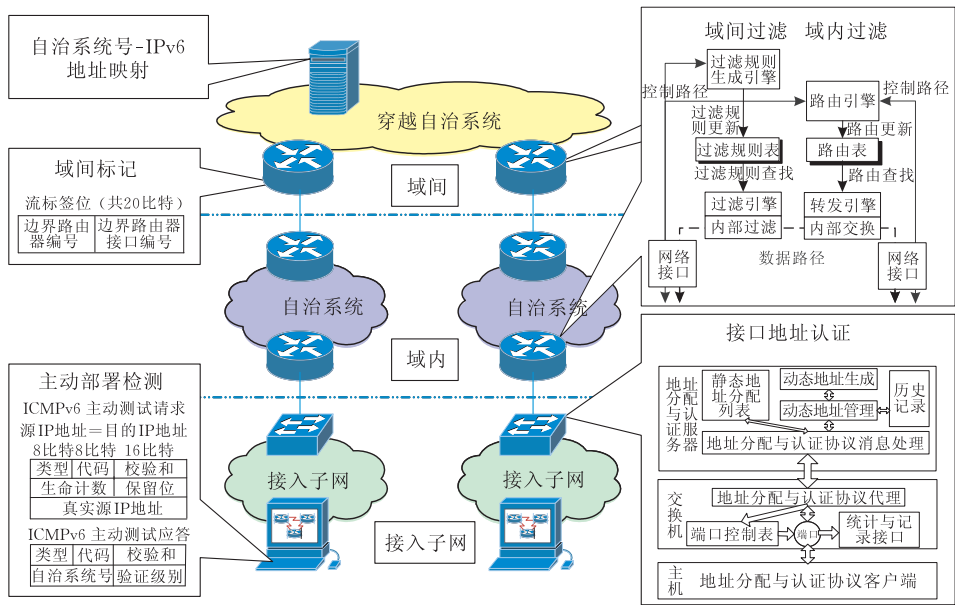


图 8 真实 IPv6 地址的系统结构

4.6 基于 4over6 机制的功能可扩展

IPv6 协议可以解决当前互联网的规模可扩展问题,必将成为新一代互联网的网络层协议.但从 IPv4 到 IPv6 的过渡还有一段相当长的过程.特别是当 IPv6 网络成为互联网的核心网络,如果解决 IPv4 网络之间的互联互通问题是一个技术难点.只有解决了这一问题,互联网才能实现功能上的可扩展,为 IPv4 网络用户和 IPv6 网络用户提供方便的网络接入和丰富的网络资源.

虽然目前已经有很多相关的过渡技术,但它们主要关注的是 IPv6 over IPv4 的问题,而没有关注当 IPv6 协议成为互联网的主流协议的情况.而且,当前关于分组封装主要采用手工配置隧道技术,在

大规模 IPv4 报文传输方面存在着可扩展性问题.因此需要新的机制来解决如何在 IPv6 骨干网上进行可扩展的 IPv4 报文传输的自动隧道机制.

我们提出 4over6 机制来解决这一问题,如图 9 所示.该机制的核心思想包括两部分:控制层面解决如何通过适当的隧道端点发现机制来建立 IPv4 over IPv6 隧道.我们通过对 MP-BGP 协议进行扩展来携带隧道端点信息,传播到 IPv6 骨干网的其它 PE(Provider Edge)路由器,并以此来建立隧道.在建立的 4over6 隧道的基础上,数据层面主要关注数据分组转发的封装和解封装问题.这里主要采用已有的分组封装和解封装技术.

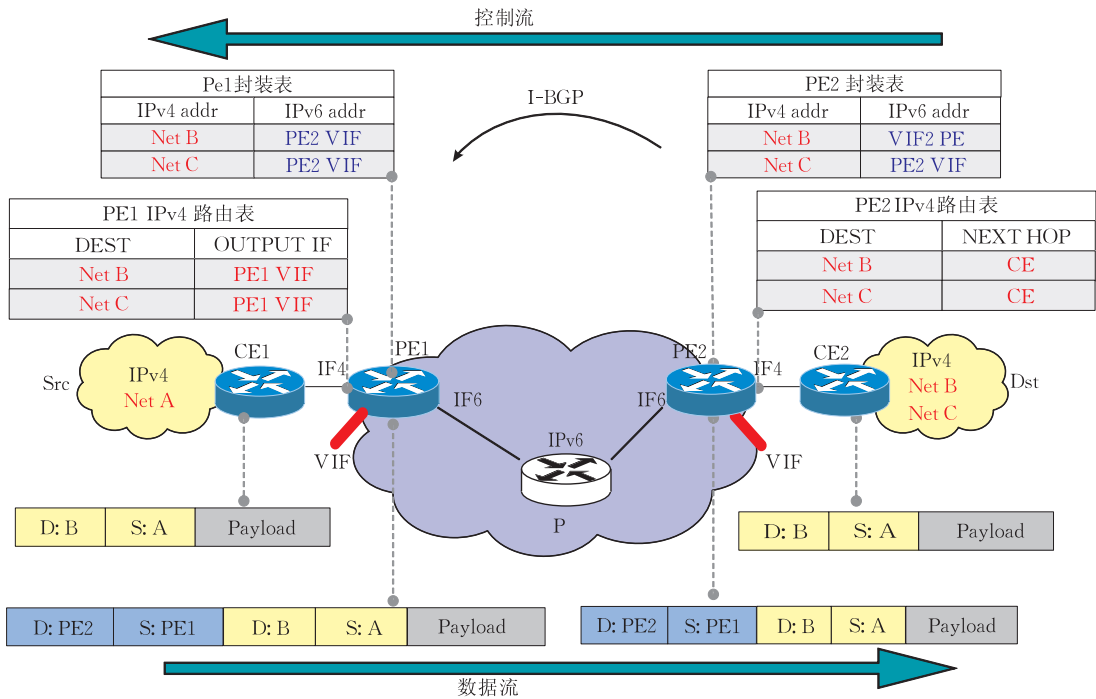


图 9 4over6 机制示例

4.7 基于端到端无连接服务质量控制的服务可扩展

目前的互联网仅能够提供单一的尽力发送服务,无法满足不断增长的多种异构业务需求,尤其是随着下一代网络和 IPv6 的发展,如何为应用提供不同的服务质量(QoS)控制成为互联网络进一步发展的制约条件和下一代互联网面临的一个重要难题. IntServ 框架能够为每个业务流提供服务质量保证,但由于其缺乏可扩展性而无法在大规模互联网中真正实施. DiffServ 虽然具有较好的可扩展性,然而它无法区分大量异构业务,不能实现对延迟、丢失率、带宽、花费等一系列 QoS 参数的独立控制,更无法

为不同 QoS 业务选择不同的路径,因此 DiffServ 无法从根本上实现对网络传输的 QoS 控制. 虽然分组调度机制能够在一定程度上提供服务质量控制,然而其缺乏对互联网整体特性的统筹考虑,有可能出现某条路径拥塞而其它路径空闲的情况.

我们提出能够跨越多个自治系统的分布式层次化服务质量路由框架(CLQoS R)来解决新一代互联网的服务可扩展问题,如图 10 所示. 该框架能够实现:(1)对网络规模的适应性;(2)支持多种 QoS 参数和约束条件;(3)支持多种路由协议;(4)对 QoS 请求和分组到达速率的适应性.

方案框架包含以下几个部分:(1)本次状态测

量；(2) 域内和域间路由机制；(3) 基于链路状态的多约束 QoSR 核心算法；(4) 端到端的准入控制机制；(5) QoS 业务流分组转发机制。由其中的本地状态测量获取节点本地的状态信息，然后通过域内域间的路由协议交互使得每个节点维护经过聚集的网络状态信息，进而使用 QoSR 核心算法为业务流分组计算可行路径。业务流分组经过端到端的准入控制后进入网络内部，最终由各个节点完成分组的转发并实现业务流的传输。

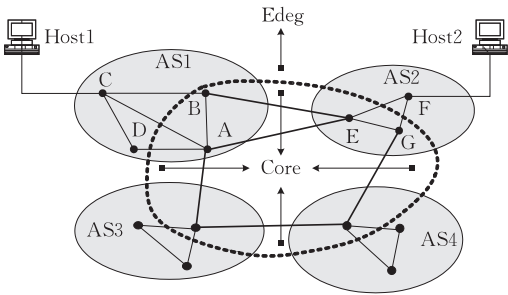


图 10 端到端无连接服务质量控制示例

5 总结与展望

(1) 纯 IPv6 试验网是发展下一代互联网的重要基础。

受到 IPv4 及其相关协议的限制，目前互联网上在解决重大技术挑战方面进展缓慢。由于采用了 IPv6 协议，下一代互联网将拥有海量地址空间，为逐步解决目前互联网面临的重大技术挑战提供了崭新的技术试验平台。

发展下一代互联网必须解决 3 个主要问题：① 如何采用 IPv6 技术建设下一代互联网；② 如何在 IPv6 互联网中解决重大技术挑战；③ 如何实现 IPv4 互联网及其应用向 IPv6 互联网的过渡。为此解决上述问题，建设纯 IPv6 大规模试验网将成为具有挑战性重大技术工程。

(2) 体系结构将在下一代互联网中继续发挥核心作用。

在计算机网络发展史上，许多计算机网络纷纷退出历史舞台，唯有采用了 TCP/IP 体系结构的互联网一支独秀。究其原因，其与众不同的体系结构发挥了核心作用。在发展下一代互联网过程中，我们要尽可能继承和发扬目前互联网体系结构的技术精髓，特别应该找出主要技术挑战在互联网体系结构中的根源，让互联网体系结构继续在下一代互联网中发挥核心作用。

(3) 基础理论将在下一代互联网中发挥重要指导作用。

相对于互联网的巨大成功而言，其基础理论还十分薄弱。面对目前互联网存在的重大技术难题，单靠一般的技术发明和工程实践很难找到理想的解决方案。为此，发展下一代互联网应该着重加强基础理论研究，并在下一代互联网建设中发挥重要指导作用。

2003 年立项的国家“九七三”计划项目“新一代互联网体系结构理论研究”在探索新一代互联网体系结构所面临的基础问题上，已取得了初步的理论研究结果。经过几年的研究与发展，国内外在新一代互联网体系结构研究方面有了新进展、新动向和新思路，我们认为，新一代互联网基础研究，不仅要注重体系结构的理论探索，同时还要注重体系结构和协议的基础研究，需要继续深入研究多维可扩展的网络体系结构及其基本要素，以及体系结构对规模可扩展、性能可扩展、安全可扩展、服务可扩展、功能可扩展、管理可扩展的支持，同时还要面向互联网开始大规模采用 IPv6 协议，异构环境、普适计算、泛在联网、移动接入和海量流媒体等新应用的涌现，重点解决急需的重大技术挑战。经过认真梳理和凝练，我们认为新形势下的新一代互联网体系结构和协议基础研究中的关键科学可以归纳为：① 互联网体系结构的扩展性和演进性问题；② 大规模路由的可信和收敛问题；③ 海量数据的高效网络传送问题；④ 非连接网络的实时传送问题；⑤ 用户跨域访问的复杂自治网络管理问题。

互联网基础理论研究需要瞄准新一代互联网及其应用面临的重大技术挑战和国家信息基础设施建设发展的重大战略需求，围绕新一代互联网体系结构中的关键科学问题开展研究；在继续和发展已有理论研究成果的基础上，重点研究新一代互联网络体系结构和协议的原理、机理和算法；依托已经建成的国家新一代互联网实验环境对研究成果进行较大规模的试验和验证；争取进入国际新一代互联网前沿科学技术研究的先进行列，部分成果达到或进入国际领先行列，逐步形成新一代互联网体系结构和协议的理论体系，为我国新一代互联网及其应用的技术创新提供科学基础理论支持，为未来国家信息化发展做出实质性贡献。

参 考 文 献

[1] Wu Jian-Ping, Xu Ke. Research on next-generation internet architecture. Journal of Computer Science and Technology, 2006, 21(5): 723-731

- [2] Huston G. More ROAP: Routing and addressing at IETF68. IETF Journal, 2007, 3(1): 15-20
- [3] Kuhne M. Plenary Report. IETF Journal, 2007, 3(1): 6-13
- [4] Massey D, Wang Lan, Zhang Bei-Chuan, Zhang Li-Xia. A scalable routing system design for future Internet//Proceedings of the ACM SIGCOMM IPv6 and the Future of the Internet Workshop, Kyoto, Japan, 2007: 43-48
- [5] Wu Jian-Ping, Cui Yong, Li Xing, Metz C. The transition to IPv6, Part 1: 4over6 for the China education and research network. Internet Computing, 2006, 10(3): 80-85
- [6] Cui Yong, Wu Jian-Ping, Li Xing, Xu Ming-Wei, Metz C. The transition to IPv6, Part II: The software mesh framework solution. Internet Computing, 2006, 10(5): 76-80
- [7] Wu Jian-Ping, Ren Gang, Li Xing. Source address validation: Architecture and protocol design//Proceedings of the IEEE International Conference on Network Protocol (ICNP). Beijing, China, 2007: 276-283
- [8] Li X, Dawkins S, Ward D, Durand A. Software Problem Statement. RFC 4925, 2007
- [9] Wu J, Bi J, Li X et al. A Source Address Validation Architecture (SAVA) Testbed and Deployment Experience. RFC 5210, 2008
- [10] Wu Kun, Wu Jian-Ping, Xu Ke. A tree-based distributed model for BGP route processing//Proceedings of the International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC), Munich, Germany, 2006: 119-128
- [11] Yue Zu-Hui, Wu Jian-Ping, Zhao You-Jian. CR: Scalable routers based on a new architecture. Journal of Software, 2007, 18(10): 2624-2634
- [12] Cui Yong, Wu Jian-Ping, Xu Ke. Precomputation for intra-domain QoS routing. Computer Networks, 2005, 47(6): 923-937



WU Jian-Ping, born in 1953, Ph.D., professor, Ph. D. supervisor. His current research interests include computer network architecture, next-generation Internet, protocol testing and formal methods.

WU Qian, born in 1978, Ph. D., assistant professor. Her research interests include next generation Internet, mobile and wireless networks and multicast.

XU Ke, born in 1974, Ph. D., associate professor. His research interests include next generation Internet, switch and router architecture, P2P and overlay network.

Background

Internet and its applications have become one of the important symbols for judging fundamental strength and economic competitiveness of a country. But Internet is facing unprecedented major technical challenges in areas of scalability, security, real-time, high-performance, mobility and ease of management.

In response to these technical challenges, global next-generation Internet research has made quiet great progress in areas of core technology and standard, large-scale testbed, and fundamental theoretical research. In the mean time, people become increasingly aware of the importance, complexity, difficulty as well as the long-term character of the next-generation Internet.

Although the outline of a new generation of the IPv6 based Internet has gradually clear, the fundamental theoretical issues faced by the Internet still cannot be resolved naturally. People need to make new thinking and research on the existing fundamental theoretical issues of the Internet archi-

ture.

In recent years, the fundamental research of Internet and the next-generation Internet has been gradually given serious attention. At present, the national 973 Project, "Research of Future Internet Architecture", has made some important theoretical research results; Defined four basic scientific questions of new-generation Internet architecture, preliminarily proposed multi-dimension scalable architecture of new-generation Internet and its basic elements, extended in-depth study of next-generation Internet architecture to the expansion of five multi-dimension aspects, such as the scalability based on IPv6, performance-scalability based on scalable exchange node, security-scalability based on authentic IPv6 addressing, function-scalability based on 4over6 mechanism, and service-scalability based on end-to-end connectionless Quality-of-Service control. These five basic elements will form the basis of new-generation Internet.