软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2014,25(4):896−912 [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004557]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

IPv6 过渡机制:研究综述、评价指标与部署考虑*

葛敬国, 弭 伟, 吴玉磊

(中国科学院 计算机网络信息中心,北京 100190)

通讯作者: 弭伟, E-mail: miwei@cstnet.cn, http://www.cnic.cn

摘 要: 随着 IPv4 地址资源逐渐耗尽,IPv4 向 IPv6 的全面过渡更加紧迫.现有过渡机制在大规模部署中仍面临着诸多问题需要解决,如缺少统一的评价指标,如何选择合适的过渡方案成为难题.研究并总结了 ISP 网络中潜在的 IPv6 过渡场景及典型的过渡机制;提出统一的评价指标,在功能、应用、性能、部署以及安全方面对 IPv6 过渡机制进行评价比较;依据评价指标,提出 ISP 网络中核心网和接入网 IPv6 过渡部署的策略.最后,结合软件定义网络,提出基于 SDN 架构的 IPv6 过渡部署考虑.

关键词: IPv6 过渡;评价指标;部署;软件定义网络

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

中文引用格式: 葛敬国,弭伟,吴玉磊.IPv6 过渡机制:研究综述、评价指标与部署考虑.软件学报,2014,25(4):896−912. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4557.htm

英文引用格式: Ge JG, Mi W, Wu YL. IPv6 transition mechanisms: Survey, evaluation criteria and deployment considerations. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014,25(4):896−912 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4557.htm

IPv6 Transition Mechanisms: Survey, Evaluation Criteria and Deployment Considerations

GE Jing-Guo, MI Wei, WU Yu-Lei

(Computer Network Information Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Corresponding author: MI Wei, E-mail: miwei@cstnet.cn, http://www.cnic.cn

Abstract: As IPv4 address resources being exhausted, the transition from IPv4 to IPv6 is inevitable and fairly urgent. The existing IPv6 transition techniques encountered several critical issues for large-scale deployment. For example, the lack of unified evaluation criterion makes it hard to select the appropriate transition strategy for a given scenario. This paper investigates and presents potential IPv6 transition scenarios and typical transition mechanisms in ISP networks, with emphasis on the provision of unified evaluation criteria in terms of functionality, applications, performance, deployment and security for IPv6 transition mechanisms and evaluation of these transition techniques based on the provided criteria. In addition, by virtue of the unified evaluation criteria, this study proposes a practical deployment of IPv6 transition strategy in the ISP's core and access networks. Finally, the consideration of IPv6 transition based on the emerging technology such as SDN to ease and accelerate its deployment is presented.

Key words: IPv6 transition; evaluation criteria; deployment; SDN

全球地址分配机构(IANA)于 2011 年 2 月 3 日正式宣布,将其最后的 468 万个 IPv4 地址平均分配到全球 5 个地区的互联网络信息中心;亚太互联网信息中心(APNIC)于 2011 年 4 月 15 日宣布,正常可分配的 IPv4 地址告罄[1].在当前 IPv4 地址逐渐枯竭的关键时期,IPv4 向 IPv6 的全面过渡更加紧迫.IPv6 作为 IPv4 下一代演进的网络协议,具有更大的地址空间、更有效、层次化的编址和路由结构、更好的端到端特性、安全性、移动性、

* 基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAH01B00); 国家重点基础研究发展计划(973)(2012CB315800); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA06010306)

收稿时间: 2013-09-29; 定稿时间: 2013-12-24; jos 在线出版时间: 2014-01-23

CNKI 网络优先出版: 2014-01-23 15:16, http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13328/j.cnki.jos.000014.html

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

QoS 支持等.但由于 IPv4 协议和 IPv6 协议本质上不兼容,在当前 IPv4 占主导的网络环境下,IPv4 向 IPv6 的平滑过渡是不可避免的.

IETF 已经成立 Behave[2],Softwire[3]等工作组,通过 IETF 草案和 RFC 来讨论 IPv6 过渡机制.另外,现有研究已提出很多机制来解决 IPv6 过渡过程中面临的挑战.其中,有些 IPv6 过渡技术已较为成熟,并已进行小范围商业化部署,但在大规模部署中,这些技术仍然面临着诸多问题需要解决.

在实际大规模部署时,如何选择合适的过渡机制以及如何为特定的应用场景制定可行的过渡方案是非常重要的.然而在过渡进程中,网络的实际结构非常复杂,不同的网络实体采取的过渡策略相对独立,处于不同过渡阶段、不同实体间的过渡进程不同步.网络特征和过渡需求的差异以及各种过渡技术的特点和适用场景的差异,都增加了过渡机制评价和选择的难度.

近期,文献[4]介绍了中国下一代互联网(China’s next generation Internet,简称 CNGI)计划,并详细分析了在教育网(CERNET)上搭建的 CNGI-CERNET2(其核心网络采用纯 IPv6 协议)及其部署的过渡、安全、计费和漫游等服务.文献[5]重新考虑了 IPv4-IPv6 过渡中的基本问题和关键难点,介绍了主流隧道和翻译机制的技术原理,并针对不同的场景给予了过渡机制选择的建议.同时,中国科技网(CSTNET)在 CNGI 计划中也完成了对 IPv6 的一系列实际部署和过渡工作,采用双栈过渡机制为主、其他过渡机制为辅的策略,实现了从骨干网、驻地网、接入网、用户终端到网络管理与网络安全系统全面支持 IPv6 的网络环境,目前在中国科技网上,视频、邮件及科研领域的大数据传输等 IPv6 业务已得到广泛应用.此外,文献[5]的作者还调研了 ISP 网络的特征和过渡需求,并提出核心网和接入网过渡机制的选择和部署策略.然而,文献[4,5]的工作都缺乏统一的指标来评估这些过渡机制;特别是在实际部署时,缺少对新兴网络技术的考虑,以及如何利用这些技术缓解部署过程中的开销、加快实际部署的步伐.

为了推进 IPv6 过渡的进程,本文首先调研并总结 ISP 网络中潜在的 IPv6 过渡场景及典型的过渡机制;然后,为 IPv6 过渡机制(IPv4-IPv6 双栈、IPv4-IPv6 翻译、IPv6-over-IPv4/IPv4-over-IPv6 隧道以及 IPv4-IPv6-IPv4 双重翻译机制)提出统一的评价指标体系,在功能、应用、性能、部署以及安全等方面对典型的过渡机制进行评价比较.此外,利用该评价指标体系,本文提出 ISP 网络中核心网和接入网 IPv6 过渡部署的策略;最后,提出基于 SDN 架构的 IPv6 过渡部署方案.

1 ISP 网络中 IPv6 过渡场景及其过渡机制综述

按照组网的层次结构,通常将 ISP 网络划分为核心网(core network)和接入网(access network),其中,核心网是骨干网(backbone network)、城域网(metropolitan-area network,简称 MAN)/移动分组域网(mobile packet data network,简称 PDN)的统称.核心网为接入网提供 IP 传输服务,而接入网为终端用户提供 IP 接入服务.核心网和接入网在功能上的差异使得它们在物理和逻辑上均相互独立,因此在 IPv6 过渡部署时也相对独立.本节总结 ISP 核心网和接入网中潜在的过渡场景,包括 IPv4-IPv6 过渡、IPv6-over-IPv4 过渡和 IPv4-over-IPv6 过渡场景及其相应的过渡机制,包括 IPv4-IPv6 双栈、IPv4-IPv6 翻译、IPv6-over-IPv4/IPv4-over-IPv6 隧道和 IPv4-IPv6-IPv4 双重翻译机制.

1.1 ISP网络的IPv6过渡场景

考虑到互联网的规模及复杂结构,从传统的纯 IPv4 ISP 网络向纯 IPv6 ISP 网络过渡将持续较长时间.在过渡期间,为了满足 IPv4/IPv6 用户访问 IPv6/IPv4 应用的需求,需要探讨基于 IPv4 的 ISP 网络与基于 IPv6 的 ISP 网络的互连互通问题.

如图 1 所示,将 IPv6 过渡分为 4 个阶段:纯 IPv4(阶段 0),IPv4 为主、存在少量的 IPv6(阶段 1),IPv6 为主、存在少量的 IPv4(阶段 2)和纯 IPv6(阶段 3).

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

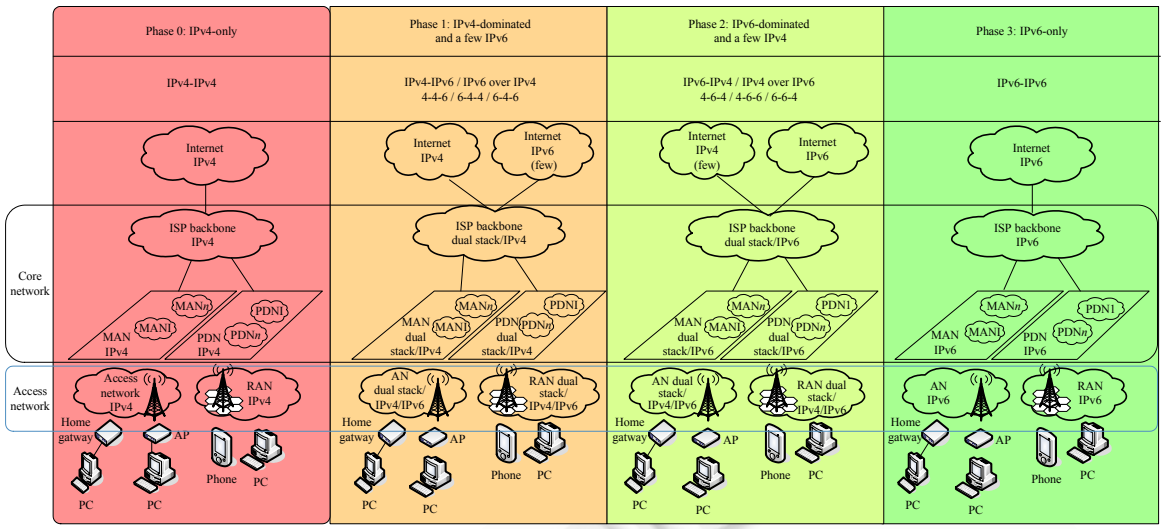


Fig.1 IPv6 transition phases of ISP networks

图 1 ISP 网络的 IPv6 过渡阶段图

- 在阶段 0 和阶段 3 中,通信需求只限于纯 IPv4 或纯 IPv6 的同协议终端用户/网络之间,因此不需要部署过渡机制;
- 而在阶段 1 和阶段 2 中,需要借助过渡技术来为 IPv4/IPv6 终端用户或网络提供 IPv6/IPv4 接入服务和传输服务:
  - 在阶段 1 中,ISP 网络以 IPv4 为主,存在少量孤立的 IPv6 ISP 网络.纯 IPv6 终端/应用需要与纯 IPv4 终端/应用进行通信,也需要穿过 IPv4 ISP 网络进行互相通信.因此,核心网主要提供 IPv4 传输服务和少量的双栈服务.该阶段的过渡技术主要是支持 IPv6-over-IPv4 和 IPv4-IPv6 的过渡场景;
  - 在阶段 2 中,IPv4 地址的耗尽促使大规模 IPv6 地址的使用,使得纯 IPv6 下一代网络逐渐出现,IPv4 ISP 网络不断减少.大多数的互联网应用来自 IPv6.因此,核心网主要提供 IPv6 传输服务和少量的双栈服务.该阶段主要以 IPv4-over-IPv6 和 IPv4-IPv6 过渡场景为主.

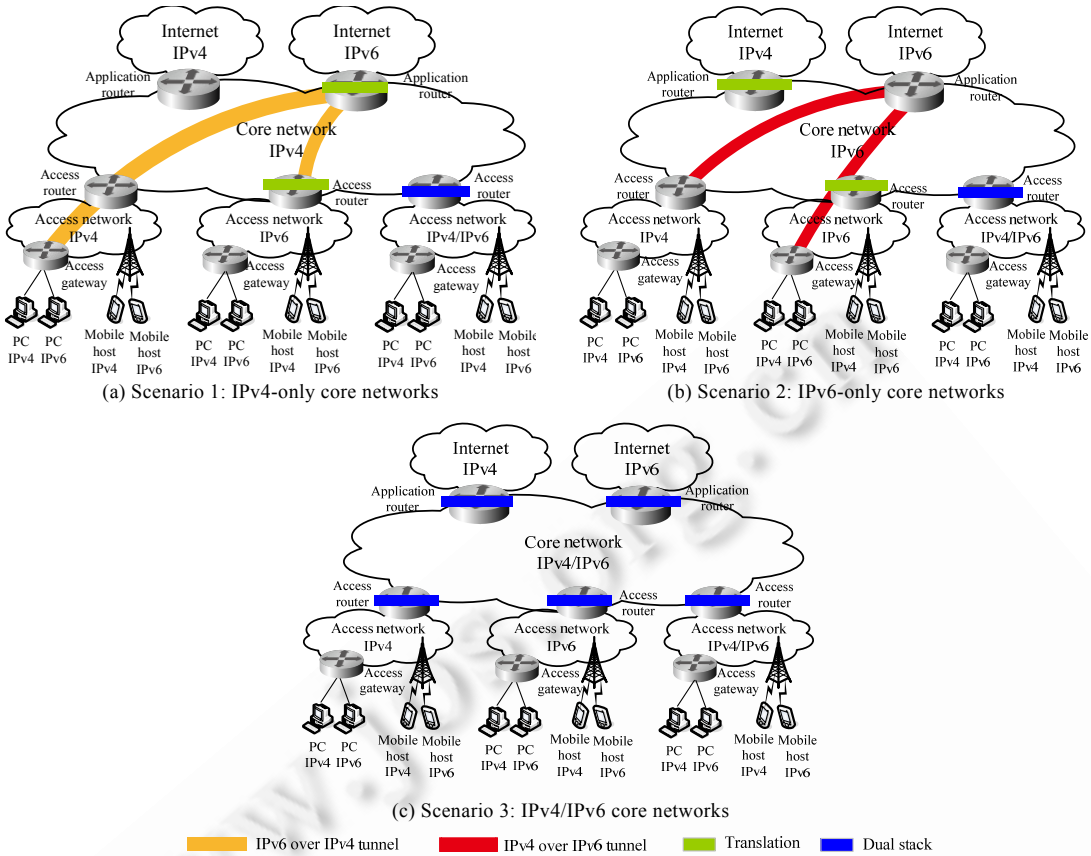
1.1.1 核心网 IPv6 过渡场景

核心网向上接入互联网的应用,向下为接入网提供传输服务.体现在过渡部署上,核心网需要为接入网提供 IPv4 和 IPv6 的传输服务.最简单的过渡方法是在纯 IPv4 核心网中部署过渡机制或将其路由器升级支持双栈,或是新建一个纯 IPv6 核心网.因此,核心网 IPv6 过渡场景可以分为纯 IPv4 核心网(IPv4-only core network)、纯 IPv6 核心网(IPv6-only core network)和 IPv4/IPv6 双栈核心网(IPv4/IPv6 core network)这 3 种.核心网的 IPv6 过渡场景及其对应的 IPv6 过渡机制如图 2 所示,过渡策略见表 1.

如图 2 和表 1 所示:

- 在 IPv4-only 核心网中:针对 IPv4 应用,核心网主要需要为接入网提供纯 IPv4 路由转发和 IPv6-IPv4 翻译的服务;针对 IPv6 应用,核心网主要需要为接入网提供 IPv4-IPv6 翻译和 IPv6-over-IPv4 隧道的服务;
- 在 IPv6-only 核心网中:针对 IPv4 应用,核心网主要需要为接入网提供 IPv6-IPv4 翻译和 IPv4-over- IPv6 隧道的服务;针对 IPv6 应用,核心网主要需要为接入网提供纯 IPv6 路由转发和 IPv4-IPv6 翻译的服务;
- 在 IPv4/IPv6 双栈核心网中,核心网主要需要为接入网提供双栈服务.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn



(a) Scenario 1: IPv4-only core networks

(b) Scenario 2: IPv6-only core networks

(c) Scenario 3: IPv4/IPv6 core networks

Fig.2 IPv6 transition scenarios of core networks

图 2 核心网的 IPv6 过渡场景图

Table 1 IPv6 translation strategies in the core network

表 1 核心网 IPv6 过渡策略

核心网	终端用户	接入网	应用	
			IPv4	IPv6
IPv4-only (phase 1)	IPv4	IPv4-only or IPv4/IPv6	纯 IPv4 路由转发	egress router 支持 IPv4-IPv6 翻译功能
		IPv6-only	纯 IPv4 路由转发	egress route 支持 IPv4-IPv6 翻译功能; egress route 和 access router 支持 IPv6-over-IPv4 隧道的功能
	IPv6	IPv4-only	纯 IPv4 路由转发	egress route 和 access router 支持 IPv6-over-IPv4 隧道的功能
		IPv6-only or IPv4/IPv6	边缘路由器支持 IPv4-IPv6 翻译功能	egress route 和 access router 支持 IPv6-over-IPv4 隧道的功能
IPv6-only (phase 2)	IPv4	IPv4-only or IPv4/IPv6	egress route 和 access router 支持 IPv4-over-IPv6 隧道的功能	access router 支持 IPv4-IPv6 翻译
		IPv6-only	egress route 和 access router 支持 IPv4-over-IPv6 隧道或双重翻译的功能	纯 IPv6 路由转发
	IPv6	IPv4-only	egress route 和 access router 支持 IPv4-over-IPv6 隧道的功能; egress router 支持 IPv6-IPv4 翻译功能	纯 IPv6 路由转发
		IPv6-only or IPv4/IPv6	egress router 支持 IPv6-IPv4 翻译功能	纯 IPv6 路由转发
IPv4/IPv6 (phase 1 or 2)	IPv4 和 IPv6 的流量可以通过核心网的双栈机制进行转发路由			

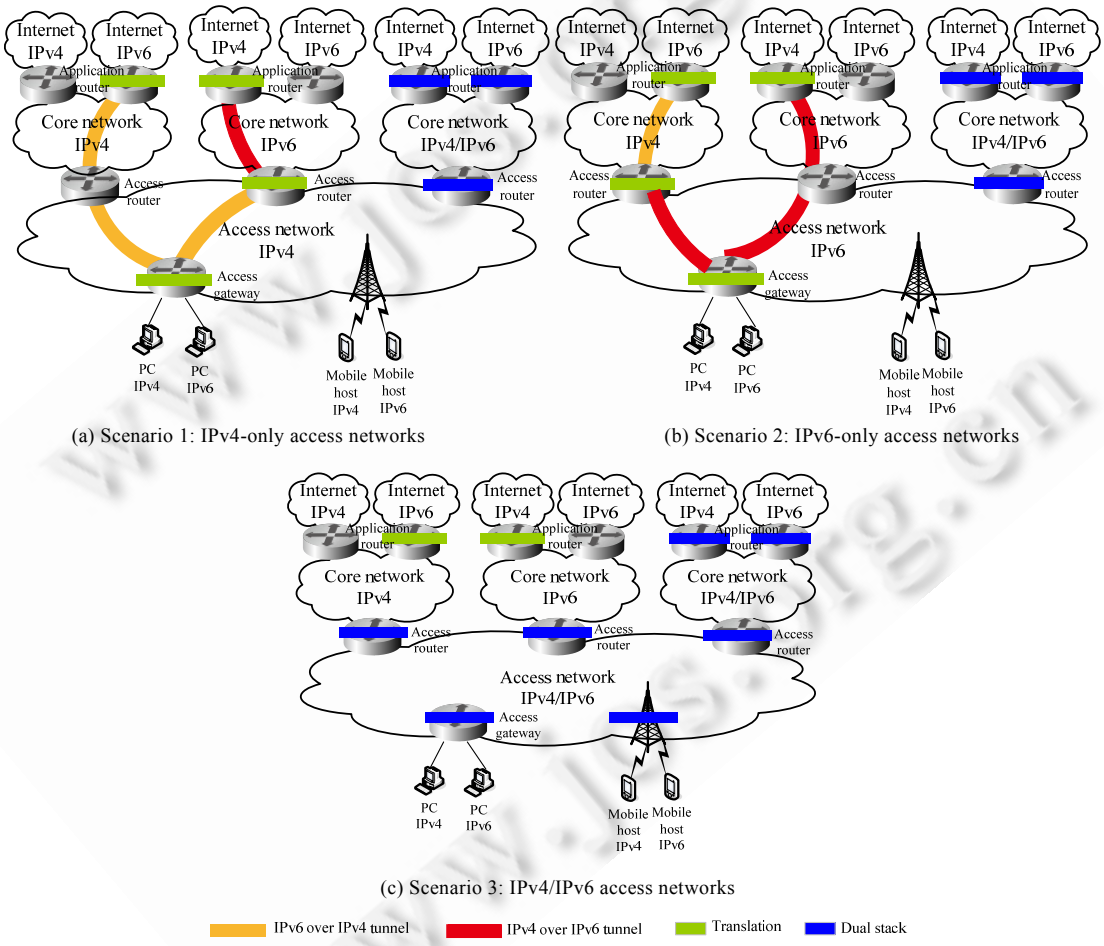
© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

1.1.2 接入网 IPv6 过渡场景

接入网相对于核心网是独立的,它具有聚集特性,为终端用户提供接入核心网的服务.由于终端用户数量巨大,接入网无法为所有的终端用户分配公网 IPv4 地址;在 IPv6 过渡过程中,通常考虑为终端用户分配私网 IPv4 地址或 IPv6 地址.类似地,其过渡方式是在纯 IPv4 接入网中部署过渡机制或将其路由器升级支持双栈,或是新建一个纯 IPv6 接入网.因此,接入网过渡场景可以分为纯 IPv4 接入(IPv4-only access network)、纯 IPv6 接入(IPv6-only access network)和 IPv4/IPv6 双栈接入网(IPv4/IPv6 access network)这 3 种.接入网的 IPv6 过渡场景及其对应的 IPv6 过渡机制如图 3 所示,过渡策略见表 2.

如图 3 和表 2 所示:

- 在 IPv4-only 接入网中,接入网主要需要为 IPv4 用户提供纯 IPv4 路由转发和 IPv4-IPv6 翻译的服务,为 IPv6 用户提供 IPv4-IPv6 翻译和 IPv6-over-IPv4 隧道的服务;
- 在 IPv6-only 接入网中,接入网主要需要为 IPv4 用户提供 IPv6-IPv4 翻译和 IPv4-over-IPv6 隧道的服务,为 IPv6 用户提供纯 IPv6 路由转发和 IPv4-IPv6 翻译的服务;
- 在 IPv4/IPv6 双栈接入网中,接入网主要需要为终端用户提供双栈接入服务.



(a) Scenario 1: IPv4-only access networks

(b) Scenario 2: IPv6-only access networks

(c) Scenario 3: IPv4/IPv6 access networks

Fig.3 IPv6 transition scenarios of access networks

图 3 接入网的 IPv6 过渡场景图

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Table 2 IPv6 translation strategies in the access network

表 2 接入网 IPv6 过渡策略

接入网	终端用户	核心网	应用	
			IPv4	IPv6
IPv4-only (phase 1or 2)	IPv4	IPv4-only or IPv4/IPv6	纯 IPv4 路由转发	
		IPv6-only	纯 IPv4 路由转发	access router 支持 IPv4-IPv6 翻译的功能
	IPv6	IPv4-only	access router 支持 IPv4-IPv6 翻译的功能	access gateway 和 egress router 支持 IPv6-over-IPv4 隧道的功能
		IPv6-only or IPv4/IPv6	access router 支持 IPv4-IPv6 翻译的功能; access gateway 和 egress router 支持 IPv6-over-IPv4 隧道的功能	access gateway 和 egress router 支持 IPv6-over-IPv4 隧道的功能
IPv6-only (phase 1or 2)	IPv4	IPv4-only or IPv4/IPv6	在 access gateway 和 egress router 上支持 IPv4-over-IPv6 隧道的功能或双重翻译的功能	在 access gateway 和 egress router 上支持 IPv4-over-IPv6 隧道的功能;在 access router 上支持 IPv4-IPv6 翻译的功能
		IPv6-only	access gateway 和 egress router 支持 IPv4-over-IPv6 隧道的功能或双重翻译的功能	access gateway 和 egress router 支持 IPv4-over-IPv6 隧道的功能; access router 支持 IPv4-IPv6 翻译的功能
	IPv6	IPv4-only	access router 支持 IPv4-IPv6 翻译的功能	纯 IPv6 路由转发
		IPv6-only or IPv4/IPv6	纯 IPv6 路由转发	
IPv4/IPv6 (phase 1or 2)	公网/私网双栈过渡机制			

1.2 ISP网络的IPv6过渡机制

IPv4 和 IPv6 将在较长时间内共存,需要过渡机制来保持 IPv4 和 IPv6 网络之间的互连互通.本节将总结 ISP 网络中 IPv4-IPv6,IPv6-over-IPv4 和 IPv4-over-IPv6 这 3 种典型过渡场景相关的过渡机制.

1.2.1 IPv4-IPv6 过渡场景中的过渡机制

如图 4 所示,在 IPv4-IPv6 过渡场景中,IPv4 终端用户/网络与 IPv6 终端用户/网络需要直接通信.该场景贯穿整个 IPv6 过渡进程,主要过渡机制包括 IPv4-IPv6 双栈和 IPv4-IPv6 翻译.

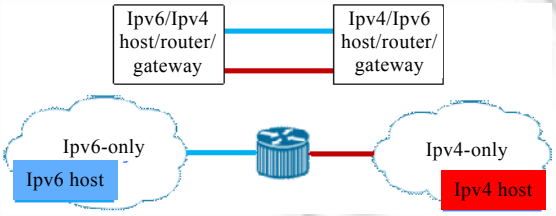


Fig.4 IPv4-IPv6 transition scenarios

图 4 IPv4-IPv6 过渡场景

(1) IPv4-IPv6 双栈机制

双栈机制是 IPv4 向 IPv6 过渡的一种最简单而有效的技术.运行双栈机制的网络设备同时运行 IPv4 和 IPv6 两个协议栈[6],通信源节点根据目的节点的协议类型选择运行的协议栈,而网络设备根据报文的协议类型选择不同的协议栈进行处理和转发.关于 IPv4-IPv6 双栈技术的相关研究主要是从规范、实现和网络运营等方面探讨 IPv4-IPv6 双栈网络环境[7−9],并从终端用户角度对该技术进行性能验证[10].

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

在部署双栈网络时,一种部署方式是将ISP网络的所有设备升级支持双栈机制,使得ISP网络是运行在同一基础设施上的两个逻辑上独立的网络.然而,由于硬件升级和网络操作/管理方面的庞大开销,全双栈 ISP 部署是不现实也不可持续发展的.另一种可行的部署方案是只将处于 IPv4-IPv6 网络边缘的设备升级支持双栈机制,这些设备可以与 IPv4 或 IPv6 设备直接进行通信,并能执行 IPv4-IPv6 之间的互操作.

根据 IPv4 地址的划分(公网 IPv4 地址和私网 IPv4 地址),双栈过渡机制可以分为公网双栈和私网双栈机制两大类.公网/私网双栈机制为终端用户或网络设备分配一个公网/私网 IPv4 地址和一个 IPv6 地址,其中,私网双栈技术可以理解为“NAT444+IPv6”过渡策略.NAT444[11]是两级 NAT 架构,NAT 功能是由用户驻地设备(customer premises equipment,简称 CPE)和 ISP 网络运营级 NAT 设备(carrier-grade NAT,简称 CGN)共同实现的.在私网双栈机制中,用户访问公共服务需要经过 3 个不同的 IPv4 地址域:用户自己的私有 IPv4 网络、运营商的私有 IPv4 网络和 IPv4 互联网.

(2) IPv4-IPv6 翻译机制

IPv4-IPv6 翻译技术一般被认为是 IPv4 协议和 IPv6 协议之间的转换技术,可以实现纯 IPv4 和纯 IPv6 终端用户/设备的直接通信.它通过一个翻译模块将 IPv4 数据包和 IPv6 数据包互相转换,翻译操作通常发生在 IPv4-IPv6 边缘,因此,翻译器通常是边界路由器或网关.

主流翻译技术是网络翻译,根据 IPv4 与 IPv6 地址空间映射方法的不同,翻译机制可以分为无状态翻译,如 SIIT(stateless IP/ICMP translation)[12]和 IVI(IV stands for 4 and VI stands for 6)[13],以及有状态翻译,如 NAT-PT (NAT-protocol translation)[14,15]和 NAT64[16].

无状态翻译机制不需要维护会话的状态,具有一定的灵活性,但它是以消耗 IPv4 地址空间的代价来实现双向通信.SIIT 是最早的无状态翻译算法,定义了 IPv6 和 IPv4 协议报文转换的格式.但是 SIIT 本身存在一些限制,如:SIIT 没有具体定义 IPv6 地址的分配方式以及 IPv6 主机和 IPv4 主机通信时的路由方式;它需要较大的 IPv4 地址池为与其通信的 IPv6 节点分配 IPv4 地址,因此,SIIT 并未解决 IPv4 地址紧缺的根本问题.IVI[17]是一种通过使用特定前缀的无状态地址映射机制来实现 IPv4 和 IPv6 网络互通的过渡技术,它是在 SIIT 算法以及 NAT-PT 的基础上发展起来的.为了解决 IVI 对地址空间需求较大的问题,文献[18]为小中型网络过渡部署提出了一个轻量级的 IPv4/IPv6 协议翻译策略,即 GATEVI,和一个应用层网关(application layer gateway,简称 ALG)架构.为了解决 IVI 中地址映射的静态配置问题,文献[19]提出了一种基于 IVI 的定位器和 ID 分离的架构.该架构提供一个可扩展的地址映射机制,使 IVI 支持域间网络和主机移动性.文献[20]通过端口划分实现多个 IPv6 终端用户共享一个 IPv4 地址,使 IVI 支持地址复用.另外,文献[21,22]对 IPv4-IPv6 IVI 翻译机制的开销进行了测量.

有状态翻译机制需要翻译器维护一个动态的地址(地址和端口)映射和一个 IPv4 地址资源池.NAT-PT 是最早采用有状态翻译机制来实现异构地址空间访问的技术,它结合了 SIIT 协议转换技术和 IPv4 网络中动态地址转换技术(NAT),同时,它在翻译器两侧部署了 DNS-ALG,为一些需要在上层协议中内嵌 IP 地址的应用提供协议转换.但是,DNS-ALG 带来了诸多问题,如拓扑限制、扩展性、转换地址资源记录的非全球有效性等问题,以及一些安全层面的问题,如网络层之上的端到端安全机制变得不可用等.作为一种增强型的有状态翻译机制,NAT64 机制将 DNS-ALG 功能分离出来,变成独立的 DNS64[23]服务器.在进行 IPv6/IPv4 数据包转换时,基于每个 TCP,UDP 和 ICMP 流的状态,使用这些绑定的状态来进行 IPv6 地址与 IPv4 地址之间的转换.NAT64 只定义了 IPv6 单向发起的通信,因此只支持 IPv6 向 IPv4 发起的转换通信.

从以上分析可以看出:在这些网络翻译机制中,IVI 是可行的无状态翻译机制,NAT64 是可行的有状态翻译机制.

1.2.2 IPv6-over-IPv4 过渡场景中的过渡机制

如图 5 所示,在 IPv6-over-IPv4 过渡场景下,两个或多个孤立的 IPv6 终端用户/网络之间需要跨越 IPv4 网络实现通信.IPv6-over-IPv4 隧道机制是该场景下主要的过渡技术.在 2010 年和 2011 年,研究者主要针对隧道技术的关键性能进行评价,包括对隧道端点的吞吐量、时延、抖动和 CPU 利用率的评估和比较[24,25].隧道技术在数

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

据层的操作主要是封装和解封装,为了保证封装和解封装的正确性,控制层面需要通过特定的地址策略或地址/前缀绑定等方法来完成封装地址的映射.

RFC 1933[26]是第一个 IPv6-over-IPv4 隧道技术,由于它是手工配置的隧道技术,缺乏灵活性,已经很少使用.6over4[27]是一种自动配置的隧道机制,采用固定地址构建隧道.到目前为止,6over4 隧道并没有广泛使用,主要是因为它要求 IPv4 网络必须支持多播.其他 IPv6-over-IPv4 隧道技术,如 6to4[28],ISATAP[29]和 Teredo[30],采用固定的地址前缀,造成地址受限.经过长期的研究,目前用于 IPv4-only transit networks(如图 5 所示)的隧道技术主要有 Softwire Mesh[31]和 6PE(IPv6 provider edge router over MPLS)[32],用于 IPv4-only access networks 的隧道技术主要有 L2TP(layer 2 tunneling protocol)[33]和 6RD(IPv6 rapid deployment)[34].

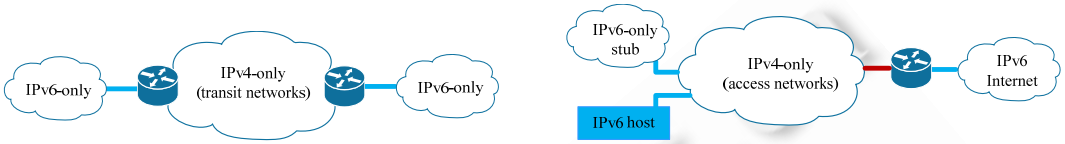


Fig.5 IPv6-over-IPv4 transition scenarios

图 5 IPv6-over-IPv4 过渡场景

Softwire Mesh 用来连接纯 IPv4 网络之外的 IP 子网络,既适用于 IPv6-over-IPv4 场景,也适用于 IPv4-over-IPv6 场景.6PE/6VPE(IPv6 VPN provider edge over MPLS)[35]技术在现有 MPLS 网络的基础上,为将来的 IPv6 用户提供类似于目前 IPv4 网络中的 MPLS VPN 服务;6PE 提供从 IPv4 到 IPv6 的过渡技术,6VPE 是为 IPv6 网络提供 VPN 服务的技术.

L2TP 是一个用于建立 VPN 的二层隧道协议,对 PPP 数据包进行封装,实现跨越互联网的传输.Softwire Hub and Spokes[36]采用 L2TP-over-UDP-over-IP 隧道形式来支持 IPv4/IPv6 终端用户或网络穿越 IPv6/IPv4 网络接入互联网,其数据平面是基于每个用户的状态信息,因此控制层面很复杂.L2TP 和 PPP 需要维护会话的状态和信号信息,在大规模部署时严重影响其性能,并存在较多的安全隐患.因此,近期的研究主要关注纯 IP-IP 隧道机制的发展.

6RD 机制是一种 IPv4 接入网过渡技术,它是一种纯 IP-IP 的 IPv6-over-IPv4 隧道机制,可以在 IPv4 ISP 基础设施上快速部署 IPv6 服务,利用无状态的 IPv6-in-IPv4 封装来提供 IPv6 接入.

1.2.3 IPv4-over-IPv6 过渡场景中的过渡机制

如图 6 所示,在 IPv4-over-IPv6 过渡场景中,两个或多个孤立的 IPv4 终端用户/网络之间需要跨越 IPv6 网络实现通信.IPv4-over-IPv6 隧道机制能够实现两个或多个 IPv4 终端/网络跨越 IPv6 网络的通信.目前,在 IPv6-only access networks 中,主流的 IPv4-over-IPv6 隧道机制有 DS-Lite(dual-stack lite)[37],public 4over6[38],LAFT 4over6 (lightweight 4over6)[39]和 MAP-E(mapping of address and port using encapsulation)[40];在 IPv6-only transit networks 中,主要的隧道技术包括 Softwire Mesh 和 6VPE.

Fig.6 IPv4-over-IPv6 transition scenarios

图 6 IPv4-over-IPv6 过渡场景

在 IPv6-only access networks(如图 6 所示)中,对隧道机制的研究添加了地址共享的特征.一种实现方式是采用运营级 NAT(CGN),它将终端用户私网 IPv4 地址映射到公网 IPv4 地址及其对应的动态分配的端口;另一种方式是采用受限端口设置,它为每个 IPv4 地址指定多个受限的端口,为终端用户分配具有受限端口设置的地址.另外,封装的方式可以分为有状态封装和无状态封装两种.在有状态封装中,汇聚设备(concentrator)将维护源节

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

点(initiator)的 IPv4 和 IPv6 地址绑定关系;而在无状态封装中,将源节点的 IPv4 地址嵌入到 IPv6 地址内,不需要维护地址绑定关系.

DS-Lite 机制以有状态封装和 CGN 的方式,采用 IPv4-over-IPv6 隧道和 IPv4 NAT 技术,将 IPv4 流量封装在 IPv6 隧道进行传输,使得 IPv4 主机能够跨越 ISP 的 IPv6 网络与 IPv4 Internet 进行单向通信.

4over6(IPv4 over IPv6 access network)机制采用受限端口设置和有状态封装的方式,目前主要有 Public 4over6 和 LAFT 4over6 两种.Public 4over6 是一种 IPv6 边缘网络过渡方案,终端设备使用独享的公有地址,通过 IPv4-over-IPv6 的隧道与 IPv4 Internet 实现双向 IPv4 通信;LAFT 4over6 机制保持边缘网络 IPv4 与 IPv6 编址与路由的独立性,采用地址复用的方式增加终端设备公网 IPv4 地址复用,从而避免引入运营商级 NAT.MAP-E 采用受限端口设置和无状态封装方式,基于运营商前缀分配地址的 IPv4-over-IPv6 隧道技术.

理论上,IPv4-IPv6-IPv4 或 IPv6-IPv4-IPv6 场景能够通过在隧道入口进行一次 IPv4-IPv6 或 IPv6-IPv4 翻译,再在隧道出口进行一次 IPv6-IPv4/IPv4-IPv6 翻译来实现.在第 1 次翻译时,将 IPv6 地址转换为 IPv4 地址;而在第 2 次翻译阶段,要想从 32 位的 IPv4 地址恢复为 128 位的 IPv6 地址是不可能的,因此,IPv6-IPv4-IPv6 双重翻译是不可行的.在 IPv4-IPv6-IPv4 过渡场景中,MAP-T(mapping of address and port using translation)[40]和 464XLAT[41]是主要的双重翻译机制.对于无状态方式,MAP-T 与 MAP-E 是同时提出来的;对于有状态的方式,464XLAT 在某种程度上与 DS-Lite 类似.

2 IPv6 过渡机制的评价指标及比较

在实际部署前,ISP 需要为具体的应用选择合适的过渡机制,并制定可行的过渡方案.如何选择和评价这些过渡策略是关键.本文制定统一的过渡技术评价指标体系,客观地评估 IPv6 过渡机制,并结合网络自身的结构和需求,选择合适的过渡机制,制定可行的过渡部署方案.

2.1 IPv6过渡机制统一的评价指标

目前,针对 IPv6 过渡机制的评价已有一些研究,其中,文献[42]介绍了 IPv6 过渡机制对用户应用的影响;文献[10]利用网络连接性、跳数、RTT、吞吐量、操作系统的依懒性和地址配置延迟等多个网络性能指标对双栈技术进行性能评价;文献[24,25]利用吞吐量、时延、抖动和隧道端点的 CPU 利用率等关键性能参数对隧道机制进行了评价;Guerin 和 Hosanagar[43]利用端到端时延和吞吐量作为关键性能参数对隧道机制和翻译机制进行了比较;Wu 和 Zhou[44]提出一个简单的模型,针对不同流量来说明翻译机制中翻译设备的质量和容量对 IPv4 互联网向 IPv6 过渡的影响;文献[45]利用吞吐量和往返时延参数对双栈过渡机制和隧道过渡机制进行了评价比较;文献[5,46−48]从操作复杂度与可扩展度、实时通信、现场设备、多播地址和应用层协议方面对翻译机制进行了比较;此外,文献[5,49]从可扩展性、异构地址与应用层翻译、硬件成本、设备性能与容量、安全性、端到端性能和应用等方面对过渡机制进行了评估.

与现有的研究相比,本文提出的针对 IPv6 过渡机制统一评价指标体系主要体现在功能、应用、性能、部署和安全 5 个方面,见表 3.其中,功能、应用和性能已在一些研究中被提到;而部署和安全问题还很少作为关键因素被考虑到评价指标中,但是它们的确是实际部署中的关键影响因素.

Table 3 Evaluation criterion of IPv6 transition mechanisms

表 3 IPv6 过渡机制的评价指标

评价指标	描述
协议功能	包括过渡场景、过渡功能、网络功能需求、过渡设备功能需求、对 IPv4 和 IPv6 地址的需求等[5,10,24,25,42−48]
业务应用	对现有的 IPv4 或 IPv6 业务应用的影响[29,36,46]
性能	性能评价主要针对过渡设备,包括过渡设备的容量、转发性能、查找能力、处理能力等[10,24,25,43−45]
部署	包括技术成熟度、产业成熟度、对现网的影响、部署成本和复杂度、管理维护、易于使用和扩展性等[5,46−48]
安全	包括主要的安全问题[5,49]

ISP 网络向 IPv6 演进是一个长期且复杂的系统工程,涉及到用户终端、接入网、城域网、核心网及业务支

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

撑系统等多个方面.为实现网络的平滑演进和部署,在可以解决过渡问题的基础上,必然希望选择和部署的过渡机制/方案能够尽量地降低部署成本和部署复杂度、减少对用户和应用的影响、保证部署的可持续发展.因此,ISP 运营商在选择和部署过渡技术前必须对这些过渡技术进行部署方面的客观评价和比较.本文通过研究分析总结出,过渡机制在部署方面的评价指标包括:

- 部署成本和部署复杂度.过渡机制在实际部署过程中,对网络设备的更新、网络的配置、维护和排障方面造成的成本和难易程度;
- 对用户和应用的影响.包括对用户端设备或软件的更新、对用户体验现有业务的影响;
- 部署的可持续性,对现有网络架构、系统架构和现有网络设备的影响.
- 另外,在 IPv4 向 IPv6 过渡的过程中,网络是 IPv4 和 IPv6 混杂的,网络设备运行的协议既有 IPv4 协议也有 IPv6 协议,故除传统 IPv4 和传统 IPv6 网络中的安全问题外,过渡网络还面临了混杂 IPv4 和 IPv6 网络状态下的各种安全问题,尤其是过渡机制/方案带来的安全问题.因此,本文在评价和比较过渡机制/方案时将安全作为其重要评价指标之一,主要分析了各个过渡机制带来的安全问题.

2.2 IPv6过渡机制的评价比较

基于统一评价指标体系,本节将对主流的 IPv4-IPv6 过渡机制、IPv6-over-IPv4 过渡机制和 IPv4-over-IPv6 过渡机制进行评价比较,其中,功能评价指标中包括过渡场景、设备需求以及 IPv4/IPv6 地址需求.

2.2.1 IPv4-IPv6 过渡机制的评价比较

IPv4-IPv6 过渡机制用来实现 IPv4 和 IPv6 之间的直接通信.对 IPv4-IPv6 过渡机制的评价比较见表 4.

Table 4 Evaluation of IPv4-IPv6 transition mechanisms

表 4 IPv4-IPv6 过渡机制的评价比较

	Public/private dual-stack	Stateless translation (IVI)	Statelful translation (NAT64)
场景	IPv4-visting-IPv6 和 IPv6-visting-IPv4		IPv6-visting-IPv4
设备需求	Border router/gateway 支持双栈或 NAT444	Border router/gateway 支持 IVI 或 DNS64	Border router/gateway 支持 NAT64 或 DNS64
对 IPv4 和 IPv6 地址需求	1) 一个公网或私网 IPv4 地址; 2) 一个 IPv6 地址	采用具体的网络前缀(NSP)[36]作为 IPv6 地址的前缀,IPv6 地址格式为 NSP+IPv4 地址+后缀	提取 IPv6 前缀作为 IPv4-mapped 地址 64:FF9B::/96
对 IPv4/IPv6 应用的影响	1) 在公网双栈内没有影响; 2) 像 FTP 等部分应用在私网双栈中有些影响	1) 促进传统应用的过渡; 2) 对于那些将 IP 地址嵌入到 payload 内的应用会有一些影响	支持 IPv6 终端用户接入 IPv4 和 IPv6 应用
部署开销	1) 在 public dual-stack 中较小 2) 在 private dual-stack 中中等	中等	
部署复杂度	较小	中等	
安全	在 NAT444 中涉及到单点登录认证和用户隐私的安全问题	针对 IVI 网关的 DDoS 攻击	针对 binding table 的 DoS 攻击

双栈机制不能完全解决 IPv4 地址紧缺的问题,但由于 IPv4 和 IPv6 协议的不兼容性,双栈节点是实现 IPv4-IPv6 之间互操作不可或缺的元素.公网双栈机制更适用于拥有充足 IPv4 地址和业务增长平滑的 ISP 网络;私网双栈机制更适用于那些 IPv4 地址紧缺或业务快速增长的 ISP 网络,需要维护用户状态、地址的管理和分配.另外,NAT444 网关的部署改变了现有网络的架构和端到端的通信模式.

IVI 是一个可行的无状态翻译机制,它能够实现 IPv4-IPv6 的双向通信,但是需要网络运营商划出一部分特定的 IPv4 地址空间用于 IVI 转换.NAT64 是一种可行的有状态翻译机制,它能够达到较好的 IPv4 地址利用率,但需要维护每条流的状态、IPv4 地址池、TCP/UDP 绑定信息库(binding information base,简称 BIB)和会话状态.因此,IVI 和 NAT64 均不适用于大规模网络.到目前为止,还没有可行的有状态机制适用于 IPv4 主机/网络访问 IPv6 主机/网络的场景,也没有可行的无状态机制适用于 IPv4 主机/网络访问 IPv6 互联网的场景.此外,翻译器需要支持应用层翻译,但在实际部署中,由于应用种类繁多,在网络设备上实现应用层操作的开销比较大,因此无法实时满足这些需求.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2.2.2 IPv6-over-IPv4 过渡机制的评价比较

隧道机制中,基础的数据平面操作是封装和解封装.对于 IPv6 过渡来说,主要的封装方式有 IP-in-IP 和 MPLS.为了支持数据平面正确地封装/解封装,控制平面需要采用特殊地址策略或地址/前缀绑定方式来支持封装地址的映射.对 IPv6-over-IPv4 过渡机制的评价比较见表 5.

Table 5 Evaluation of IPv6-over-IPv4 transition mechanisms

表 5 IPv6-over-IPv4 过渡机制的评价比较

	Softwire mesh	6PE/6VPE	6RD
场景	1) 在 IPv4 传输网络上部署的 IPv6-over-IPv4 隧道; 2) 在 IPv6 传输网络上部署的 IPv4-over-IPv6 隧道	在基于 MPLS 的 IPv4 网络核心网上部署的 IPv6-over-IPv4 隧道	在 IPv4-only 接入网上部署的 IPv6-over-IPv4 隧道
设备需求	位于 core network 和 stub-networks 边界的 AFBRs 需要支持一个 iBGP mesh 来产生前缀的绑定	1) Provider Edge (PE) Router 支持双栈; 2) IPv6 流量通过 iBGP (MP-BGP) 在 PE 之间路由转发	6RD CE 和 6RD BR 支持隧道的入口和汇聚地 (concentrator)
对 IPv4 和 IPv6 地址需求	IPv6 地址前缀和 IPv4 地址的绑定映射	1) E-IP 前缀和 I-IP 地址与 MPLS 的标签映射; 2) PE 之间的 IPv6 包嵌入在 MPLS 内	1) 无状态自动地址映射; 2) IPv4 地址被嵌入 IPv6 内
对 IPv4/IPv6 应用的影响	无影响		IPv6 应用可能受 IPv4 故障的影响;极个别应用受影响;可能产生 MTU 问题
部署开销	中等		
部署复杂度	中等	较小	中等
安全	数据平面可能会遭受欺骗攻击		Spotting 攻击、spoofing 攻击和 reflection 攻击

- Softwire Mesh 是一种路由器到路由器的隧道机制,可以穿越传输网络来连接终端用户网络,它适用于 IPv4-over-IPv6 和 IPv6-over-IPv4 两种隧道.通过在 MP-BGP(multiprotocol extensions for BGP)之间提供通用的隧道信号来支持穿越 IP 和 MPLS 的隧道,每个地址簇转换路由器(address family transition router,简称 AFTR)都需要维护绑定关系.在封装/解封装过程中,用于绑定查找的开销是可接受的.因此,Softwire Mesh 机制具有良好的性能和可扩展性,但对于地址空间和 IPv4 端口仍有需求;
- 6PE 采用与 Softwire Mesh 类似的机制来穿越 IPv4 MPLS 网络连接 IPv6 网络,提供商边界路由器(provider edger router,简称 PE)需要维护绑定信息.6PE 对于现有的 IPv4 或 MPLS 核心网无影响,只需要升级 PE 设备,实现网络的渐进式部署;
- 6RD 是一种 IPv4 接入网过渡技术,采用无状态 IPv6-in-IPv4 封装方式,提供给用户快速过渡到 IPv6 的方案.6RD 的隧道两端分别由客户边界(customer edge,简称 CE)和 6RD 中继(border relay,简称 BR)构成,其中,BR 的数据处理时间是线性的.6RD 的无状态和简单的特性使其具有较好的性能,且方便管理.尽管如此,在 IPv6-over-IPv4 接入网场景中仍然存在问题,如 IPv4 网络中的 NAT 穿越问题.隧道跨越的 IPv4 网络中可能存在一个或多个 IPv4 NAT,由于 6RD 采用的是 IP-in-IP 的封装方式,而典型的 NAT 只允许 TCP/UDP/ICMP 包的穿越,封装的数据包是不能穿越这些 NAT 的.

2.2.3 IPv4-over-IPv6 过渡机制的评价比较

对 IPv4-over-IPv6 过渡机制的评价比较见表 6.

- 在 IPv4-over-IPv6 隧道机制中,DS-Lite 采用了 CGN 和有状态封装的方式来解决过渡问题,具有较高的地址复用率.相比于 IPv6-IPv4 翻译机制,DS-Lite 的公网-私网 IPv4 地址转换不需要涉及不同协议间的转换,因此是比较轻巧的.但是类似于 NAT64,CGN 的查找操作仍然是 DS-Lite 的性能瓶颈,CGN 还引入了一些像 ALG 和入站访问失败的问题.此外,DS-Lite 机制需要 ISP 记录五元组绑定的时间戳用于用户的溯源,并且在 AFTR 网关上需要维护大量的 NAT 表项,存在一定的可扩展性和状态同步的问题;
- 4over6 隧道机制采用了端口设置和有状态封装的方式,需要维护的状态是基于用户规模的而不是基于流的,它不存在 ALG 问题,通信是全双向的.相对于 DS-Lite 机制,4over6 的性能好一些.但由于每个用户

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

上的端口数量是有限的,4over6 的地址复用率不及 DS-Lite.ISP 保持 IPv6 灵活的可操作性,是以 BR 维护端口地址映射的开销为代价的;

- MAP-E 机制采用运营商前缀分配的统一无状态隧道技术.与 4over6 和 DS-Lite 相比,MAP-E 由于其无状态特性,具有较高的性能优势,BR 上数据处理是线性的.但由于该机制将 IPv4 和 IPv6 地址紧紧地绑定了,导致它在部署时缺少灵活性.MAP-E 更适用于整个网络的过渡部署,否则将会浪费部分 IPv4 地址.因此,MAP-E 的灵活性比 4over6 要差,地址复用率也没有 DS-Lite 高;
- 隧道机制通过保留原始数据包来保持内部 IPv4 的全透明性.由于 IPv4-IPv6 协议的转换,翻译机制不能保留协议包头内的所有信息,即,保留了大部分的字段,但丢弃了部分字段,如 ToS,Flags 和 Identification.因此,与隧道机制相比,双重翻译机制的带宽利用率更高.此外,由于 MAP-T 和 464XLAT 双重翻译机制暴露了更多的内部 IPv4 地址信息,理论上为网络运营商的流量优化提供了更多的信息.但是,双重翻译需要消耗更大的地址空间和 IPv4 地址端口设置.

Table 6 Evaluation of IPv4-over-IPv6 transition mechanisms

表 6 IPv4-over-IPv6 过渡机制的评价比较

	DS-Lite	Public/LAFT 4over6	MAP-E	MAP-T	464XLAT
场景	在 IPv6 接入网上部署 IPv4-over-IPv6 隧道			IPv4-IPv6-IPv4 无状态过渡方式	在终端用户端采用 SIIT 方法,在核心网侧采用 NAT64 方法
设备需求	1) AFTR 支持公网-私网 IPv4 翻译; 2) B4 通过隧道将 IPv4 数据包传送给 AFTR	4over6 CE 和 4over6 BR 部署为隧道的入口和汇聚地	MAP CE 和 MAP BR 部署为隧道的入口和汇聚地	CE 和 BR 支持翻译功能	1) B4 实现 SIIT 机制; 2) AFTR 实现 NAT64 机制
对 IPv4 和 IPv6 地址需求	基于流的(IPv6 addr, private IPv4 addr, port)和(public IPv4 addr, port)绑定映射	基于用户的 IPv6 addr 和 IPv4 addr/IPv4 addr+port 绑定映射	(IPv4 addr, port)嵌入 IPv6 内	(IPv4 addr, port)嵌入 IPv6 内	1) 终端用户使用私网地址; 2) 私有 IPv4 地址嵌入到 IPv4-translated 地址
对 IPv4/IPv6 应用的影响	IPv4 应用可能受 IPv6 故障影响;极个别应用受影响;可能产生 MTU 问题				
部署开销	较高	中等			
部署复杂度	较大	中等			
安全	针对 CGN 的 DoS 攻击	针对 DHCP 的 Man-in-the-Middle 攻击	通过对 DHCPv6 进行 man-in-the-middle 攻击而产生 traffic hijacking 攻击		针对绑定表的 DoS 攻击

3 IPv6 过渡部署的考虑

本节突出强调 ISP 中核心网和接入网在 IPv6 过渡部署方面的考虑,并提出结合软件定义网络(SDN)这种新兴技术来缓解过渡部署所带来的开销、加速过渡部署的进程.

3.1 ISP核心网过渡部署的考虑

在过渡过程中,核心网需要具备同时承载 IPv4 和 IPv6 传输服务的能力,过渡路线为纯 IPv4 阶段、IPv6-over-IPv4 阶段、双栈阶段、IPv4-over-IPv6 阶段和纯 IPv6 阶段.根据网络现状,ISP 核心网可以分成 IP 核心网、MPLS 核心网和新建 IPv6 核心网这 3 种类型.因此,ISP 核心网的过渡部署方案各不相同.下面总结核心网的过渡策略,见表 7.

- 在 MPLS 核心网过渡部署中,主要的过渡机制是 6PE/6VPE.该机制需要 PE 路由器支持双栈和 6PE/6VPE 功能,PE 路由器不需要运行 IPv6 协议栈.MPLS 核心网需要支持 IPv6 互联网流量和 MPLS IPv6 VPN 承载;
- 在 IP 核心网过渡部署中,主要的过渡机制包括双栈和隧道机制,需要核心网的边界路由器支持升级双

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

栈,核心网内部路由器保持单栈并采用隧道机制支持 IPv4 和 IPv6 的传输服务.由于其复杂性和可扩展性问题,翻译机制更适合于部署在接入网而不是核心网;

- 新建 IPv6 核心网适用于那些需要新建核心网,或者已有 IP 或 MPLS 核心网但需要新建 IPv6 核心网的 ISP 网络.相对于现有的核心网,新建 IPv6 核心网没有设备升级的负担,因此在业务发展需求、升级难度和投资成本方面具有一定的优势.

核心网的规模通常是有限的,因此,IPv4 地址短缺并不是非常明显的问题.核心网中的路由器通常都是具有最高升级优先级的,但其缺点也是显而易见的:硬件升级成本、操作和管理成本都较高.

Table 7 Comparison of transition strategies in ISP core networks

表 7 ISP 核心网中过渡策略的比较

	MPLS core network (6PE/6VPE)	IPv4 core network (dual-stack and tunneling)	New IPv6 core network
场景	已经提供 IPv4 服务的 MPLS 核心网	已经提供 IPv4 承载的 IP 核心网	需要建设的全新核心网
设备需求	PE 更新以支持 IPv6 和 6PE/6VPE	内部路由器维持单栈,边缘路由器需要更新以支持双栈,在隧道技术中提供 IPv4 和 IPv6 路由转发服务	新建的 IPv6 设备
对 IPv4 应用的影响	较小影响		无影响
部署开销	较低		初始成本高
部署复杂度	较小		较高

3.2 ISP接入网过渡部署的考虑

针对不同接入网过渡场景中适用的过渡机制进行比较分析,结果见表 8.

Table 8 Comparison of transition strategies in ISP access networks

表 8 ISP 接入网中过渡策略的比较

	IPv4-IPv6: Public/Private dual-stack	IPv4-IPv6: Stateless translation (IVI)	IPv4-IPv6: Stateful translation (NAT64)
场景	具备足够公网/私网 IPv4 地址的接入网,并提供双栈接入	IPv4 和 IPv6 网络之间互相通信	从 IPv6 网络端发起的通信
CE/CPE 设备需求	1) 桥接 CPE 不需要支持 IPv6 2) 用户端的 CPE 需要支持 IPv6	无变化	
对接入网的影响	1) 三层接入网需要支持双栈 2) 二层接入网需要支持 IPv4 和 IPv6 的安全策略	无变化	
对 BRAS 设备的影响	BRAS 必须支持双栈,并为终端用户分配一个公网/私网 IPv4 地址和一个 IPv6 地址	无变化	
对 AAA 的影响	支持 IPv6 用户认证、授权和计费	支持 IPv4 和 IPv6 用户认证、授权和计费	
对应用的影响	1) 在公网双栈中无影响 2) 在私网双栈中有些应用受到影响,如 FTP	1) 促进传统应用的过渡 2) 对于那些将 IP 地址嵌入到 payload 内的应用会有一些影响	支持 IPv6 终端用户接入 IPv4 和 IPv6 应用
对业务模式的影响	维持原有的模式		
网关的部署	边缘路由器或网关支持双栈或 NAT444	边缘路由器或网关支持 IVI 或 DNS64	边缘路由器或网关支持 NAT64 或 DNS64
部署开销	1) 在公网双栈中较低 2) 在私网双栈中中等	中等	
部署复杂度	较低	中等	
安全	在 NAT444 中涉及到单点登录认证和用户隐私的安全问题	针对 IVI 网关的 DDoS 攻击	针对 binding table 网关的 DDoS 攻击

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Table 8 Comparison of transition strategies in ISP access networks (continued)

表 8 ISP 接入网中过渡策略的比较(续)

	IPv6 single-stack: IPv6 over IPv4 tunneling (6RD)	IPv4 single stack: IPv4 over IPv6 tunneling (DS-Lite)	IPv4 single stack: Double translation (MAP-T)
场景	在 IPv4-only 接入网上部署的 IPv6-over-IPv4 隧道	在 IPv6-only 接入网上部署的 IPv4-over-IPv6 隧道	IPv4-IPv6-IPv4 无状态过渡方式
CE/CPE 设备需求	1) 桥接型 CPE 不需要支持 IPv6 2) 终端用户的 CPE 需要支持 IPv6		CE 和 BR 上支持翻译
对接入网的影响	1) 三层接入网络需要支持 IPv4 2) 二层接入网络支持 IPv4 的安全策略	1) 三层接入网络需要支持 IPv6 2) 二层接入网络支持 IPv6 的安全策略	无变化
对 BRAS 设备的影响	BRAS 支持双栈,并为终端用户分配一个 IPv4 地址	BRAS 支持 IPv6,并为终端用户分配一个 IPv6 地址	无变化
对 AAA 的影响	支持 IPv4 用户认证、授权和计费	支持 IPv6 用户认证、授权和计费	
对应用的影响	IPv6 应用可能受 IPv4 故障影响;极个别应用受影响;可能产生 MTU 问题	IPv4 应用可能受 IPv6 故障影响;极个别应用受影响;可能产生 MTU 问题	支持 IPv4 终端用户接入 IPv4 和 IPv6 应用
对业务模式的影响	无影响	改变桥接用户接入模式,与原有模式不一致	无影响
网关的部署	6RD-BR;集中式部署	DS-Lite CGN 提供隧道和 NAT 转换;集中式部署	CE 和 BR 支持翻译
部署开销	中等	较高	中等
部署复杂度	中等	较高	中等
安全	Spotting 攻击、spoofing 攻击和 reflection 攻击	针对 CGN 的 DoS 攻击	Spotting 攻击、DoS 攻击和 routing cycle 攻击

公网/私网双栈机制适用于拥有充裕 IPv4 公网/私网地址且对新增地址需求量小的 ISP 网络,该过渡机制比较简单、有效.但由于其很高的升级成本和大量的终端用户,实际部署比较困难,通常需要结合隧道和翻译机制.

IPv4-IPv6 翻译机制实现了 IPv4/IPv6 接入网中的终端用户访问 IPv6/IPv4 的应用,例如有状态的 NAT64 翻译机制和无状态的 IVI 翻译机制.为了实现翻译机制,ISP 需要在网络边界上部署一个或多个翻译器、在 DNS 系统中添加 DNS64 的功能.IVI 以消耗端口地址为代价提供 IPv4-IPv6 双向通信,而 NAT64 只提供了 IPv6 侧发起的通信,但可以动态地共享 IPv4 地址,提高了地址复用率.

IPv4 接入网为终端用户提供 IPv4 接入服务.在 IPv4 接入网过渡场景中,若终端用户想要访问 IPv6 网络或业务,需要 IPv6-over-IPv4 隧道 6RD 机制为其提供过渡通信的能力.在该机制中,终端用户或 CPE 需要升级支持双栈和 6RD CE 的功能;在 ISP 侧,需要部署一个或多个 6RD BR 作为隧道终端的汇聚设备(concentrator).在 BR 和核心网入口之间的 IPv6 转发路径可以建立在专用的 IPv6 链路上、无状态隧道或 Softwire Mesh 上.BR 可以通过实现 DHCPv4 扩展或 out-of-band 配置的方式来发现 CE.

新建 IPv6 接入网可以为终端用户提供 IPv6 接入服务.对于 IPv4 访问的需求,ISP 可以部署 IPv4-over-IPv6 隧道机制,如 DS-Lite,4over6,MAP-E 等,或 IPv4-IPv6-IPv4 双重翻译机制,如 MAP-T,464XLAT 等,来完成过渡场景中的通信需求.在 IPv4-over-IPv6 隧道机制中,需要终端用户或 CPE 升级支持双栈和隧道始发端的功能;在 ISP 侧,需要部署一个或多个隧道终端的汇聚设备;该设备的发现可以通过 DHCPv6 扩展或 out-of-band 配置来完成.在 IPv4-IPv6-IPv4 双重翻译机制中,CE 和 BR 上都需要完成一次翻译.

3.3 基于SDN架构的IPv6过渡部署考虑

IPv6 过渡较为复杂,将涉及到用户迁移、设备升级改造、地址池规划管理和支撑系统迭代改造等问题.作为一种新型的网络架构,SDN 具有三大助力 IPv6 过渡部署的特性,包括控制与转发分离、设备资源虚拟化、通用硬件及软件可编程.本节将考虑如何使用 SDN 技术降低 IPv6 过渡部署的开销和复杂性.

IPv6 过渡部署过程中的复杂性和部署开销,在很大程度上决定了 IPv6 过渡部署的速度.影响 IPv6 过渡部署的关键因素有多厂商过渡设备的融合、过渡设备部署实现的开销、云计算给 IPv6 过渡部署带来的新挑战(如亟需充足的 IPv6 地址资源、网络流量模型更加复杂、云数据中心更高的性能要求等)、超宽带、云服务和移

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

动互联网等新业务为 IPv6 过渡带来的新需求(如多网络资源协同、移动性支持和网络虚拟化等).

针对这些挑战,SDN 可以从以下几个方面来助力 IPv6 过渡部署:

1) 利用控制层和数据层分离的设计理念,SDN 可以非常容易地将 IPv6 过渡协议在控制器上以软件形式部署运行.设备硬件归一化,硬件只关注数据转发和存储能力,这样可以提高过渡设备的数据转发性能,降低过渡设备的部署开销,并且能够解决过渡设备垄断的问题;
2) 基于 SDN 架构,云数据中心的边界设备只负责数据转发,而云计算管理平台负责相应的全局控制.这样可以直接控制和管理 IPv4-IPv6 的通信流量,如指派 IPv4-IPv6 流量流向特定的设备.一方面可以减少 IPv6 地址的需求量,只要满足部分边界设备的地址需求即可;另一方面,可以简化网络流量模型,极大地降低云数据中心边界上的过渡设备的部署开销,提高处理容量;
3) SDN 技术可以实现控制平面集中化、数据平面虚拟化,在 IPv6 过渡时期,这些特征恰好能满足超宽带、云服务和移动互联网等新型业务类型的新需求.

基于上述特征和优势,下面对基于 SDN 的过渡策略进行简单的举例描述.由于过渡机制的部署可能会发生在 ISP 网络中的各个位置,且不同网络中的设备也不可能同时都部署某一种过渡机制,因此采用 SDN 架构,可以将复杂的不同的 IPv6 过渡机制在控制器上以协议形式生成相应的过渡策略,通过下发相关策略到对应的网络设备上,以降低过渡部署的复杂度和成本,提高网络设备的运行效率.基于 SDN 的过渡策略可简单描述为:1) ISP 网络中部署控制器(controller),它主要用于过渡机制的生成以及过渡策略的下发,从而对网络中的过渡流量导向执行相应过渡策略的网络设备;2) ISP 网络中的设备,它主要执行控制器下发给它的过渡策略和传统的路由转发,实现过渡机制及传统路由转发的功能.

4 总 结

本文对 ISP 网络中所有潜在 IPv6 过渡场景及其典型的过渡机制进行了综述;研究并提出统一的 IPv6 过渡机制评价指标体系,评估并比较了 IPv4-IPv6 双栈、IPv4-IPv6 翻译、IPv6-over-IPv4/IPv4-over-IPv6 隧道以及 IPv4- IPv6-IPv4 双重翻译四大类多种典型的过渡机制;依据网络实际特征和过渡需求,提出 ISP 网络中核心网和接入网过渡部署的策略;结合 SDN 技术,提出基于 SDN 框架的 IPv6 过渡部署考虑来缓解过渡部署的开销,加速部署进程.

典型过渡机制的评价比较结果表明:

1) 双栈机制不能完全解决 IPv4 地址紧缺的问题,但由于 IPv4 和 IPv6 地址的不兼容性,双栈节点是实现 IPv4-IPv6 互操作不可或缺的元素;
2) IPv4-IPv6 翻译机制可以实现 IPv4 主机/网络和 IPv6 主机/网络的直接通信,但是 IVI 和 NAT64 均不适用于大规模的网络.此外,不对称的 IPv4 和 IPv6 地址空间映射带来一些关键问题,如 ALG 的实现、端到端性能的破坏等;
3) Softwire Mesh,6RD,DS-Lite,4over6 和 MAP-E 隧道技术构成了一系列增强型的隧道机制,且凭借各自的特点覆盖并满足 IPv6-over-IPv4 和 IPv4-over-IPv6 主要的过渡场景和过渡需求;
4) IPv4-IPv6-IPv4 双重翻译虽然不能实现全透明地传输内部 IPv4 报文,但相对于隧道来说,可以暴露更多内部 IPv4 的地址信息.因此,理论上,双重翻译机制更便于操作者执行一些类似流量工程的任务.

在对 IPv6 过渡部署进行研究和考虑中发现:

1) 在核心网中,网络规模是有限的,因此 IPv4 地址短缺不是主要关注的问题;核心网中的路由器通常具有较高的性能和升级优先权,同时,这些核心设备的硬件升级和操作/管理成本是非常高的;
2) 在接入网中,双栈和翻译机制更适用于 IPv6 直接接入 IPv4 或 IPv4 直接接入 IPv6 的场景;6RD 机制可以为 IPv4 终端用户提供接入 IPv6 网络的服务;IPv4-over-IPv6 隧道机制(如 DS-Lite,4over6,MAP-E)或 IPv4-IPv6-IPv4 双重翻译机制(如 MAP-T 和 464XLAT)可以为 IPv6 终端用户提供接入 IPv4 网络的服务.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

References:

[1] Huston G, IPv4 address report. Technical Report, 2013. http://www.potaroo.net/tools/ipv4

[2] IETF behave WG charter. http://datatracker.ietf.org/wg/behave/charter/

[3] IETF softwire WG charter. http://datatracker.ietf.org/wg/softwire/charter/

[4] Wu J, Wang JH, Yang J. CNGI-CERNET2: An IPv6 deployment in China. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011,41(2):48−52. [doi: 10.1145/1971162.1971170]

[5] Wu P, Cui Y, Wu J, Liu J, Metz C. Transition from IPv4 to IPv6: A state-of-the-art survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012,PP(99):1−18.

[6] Nordmark E, Gilligan R. Basic transition mechanisms for IPv6 hosts and routers. IETF RFC 4213, 2012.

[7] Hirorai R, Yoshifuji H. Problems on IPv4-IPv6 network transition. In: Proc. of the 2006 Int'l Symp. on Applications and the Internet Workshops (SAINT 2006 Workshops). 2006. 38−42. [doi: 10.1109/SAINT-W.2006.33]

[8] Park EY, Lee JH, Choe BG. An IPv4-to-IPv6 dual stack transition mechanism supporting transparent connections between IPv6 hosts and IPv4 hosts in integrated IPv6/IPv4 network. In: Proc. of the Conf. on Communications. 2004. 1024−1027. [doi: 10.1109/ICC.2004.1312656]

[9] Cho K, Luckie M, Huffaker B. Identifying IPv6 network problems in the dual stack world. In: Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Network Troubleshooting: Research, Theory and Operations Practice Meet Malfunctioning Reality. 2004. 283−288. [doi: 10.1145/1016687.1016697]

[10] Law YN, Lai MC, Tan WL, Lau WC. Empirical performance of IPv6 vs. IPv4 under a dual-stack environment. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on ICC 2008. 2008. 5924−5929. [doi: 10.1109/ICC.2008.1107]

[11] Donley C, Howard L, Kuarsingh V, Berg J, Doshi J. Assessing the impact of carrier-grade NAT on network applications. IETF RFC 7021, 2012.

[12] Nordmark E. Stateless IP/ICMP translation algorithm. IETF RFC 2765, 2000.

[13] Zhu Y, Chen M, Zhang H, Li X. Stateless mapping and multiplexing of IPv4 addresses in migration to IPv6 Internet. In: Proc. of the GLOBECOM. 2008. 1−5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.433]

[14] Tsirtsis G, Srisuresh P. Network address translation—Protocol translation (NAT-PT). IETF RFC 2766, 2000.

[15] Ceng LA, Cheng CH, Ling L. An enhanced NAT-PT model. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2003,14(12):2037−2044 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/2037.htm

[16] Bagnulo M, Matthews P, Van Beijnum I. Stateful NAT64: Network address and protocol translation from IPv6 clients to IPv4 servers. IETF RFC 6146, 2011.

[17] Li X, Bao CX, Chen M, Zhang H, Wu J. The CERNET IVI translation design and deployment for the IPv4/IPv6 coexistence and transition. IETF RFC 6219, 2011.

[18] Shang W, Bao CX, Li X. IVI-Based locator/ID separation architecture for IPv4/IPv6 transition. In: Proc. of the 7th IEEE Int'l Conf. on NAS. 2012. 144−153. [doi: 10.1109/NAS.2012.23]

[19] Xia Y, Lee BS, Yeo CK, Seng VLS. An IPv6 translation scheme for small and medium scale deployment. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on AFIN. 2010. 108−112. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5558183&abstractAccess=no&userType=inst

[20] Bao CX, Li X, Zhai Y, Zhang W. dIVI: Dual-Stateless IPv4/IPv6 transition. IETF draft-xli-behave-divi-06, 2014.

[21] Tsetse AK, Wijesinha AL, Karne RK, Loukili A. Measuring the IPv4-IPv6 IVI translation overhead. In: Proc. of the 2012 ACM Research in Applied Computation Symp. 2012. 186−190. [doi: 10.1145/2401603.2401646]

[22] Narayan S, Tauch S. IPv4-v6 transition mechanisms network performance evaluation on operating systems. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on ICCSIT. 2010. 664−668. [doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5564141]

[23] Bagnulo M, Sullivan A, Matthews P, van Beijnum I. DNS64: DNS extensions for network address translation from IPv6 clients to IPv4 servers. IETF RFC 6147, 2011.

[24] Aazam M, Syed AM, Khan I, Alam M. Evaluation of 6to4 and ISATAP on a test LAN. In: Proc. of the IEEE Symp. on ISCI. 2011. 46−50. [doi: 10.1109/ISCI.2011.5958881]

[25] Gilligan R, Nordmark E. Transition mechanisms for IPv6 hosts and routers. IETF RFC 1933, 1996.

[26] Carpenter B, Jung C. Transmission of IPv6 over IPv4 domains without explicit tunnels. IETF RFC 2529, 1999.

[27] Carpenter B, Moore K. Connection of IPv6 domains via IPv4 clouds. IETF RFC 3056, 2001.

[28] Templin F, Gleeson T, Thaler D. Intra-Site automatic tunnel addressing protocol (ISATAP). IETF RFC 5214, 2008.

[29] Huitema C. Teredo: Tunneling IPv6 over UDP through network address translations (NATs). IETF RFC 4380, 2006.

[30] Wu J, Cui Y, Metz C, Rosen E. Softwire mesh framework. IETF RFC 5565, 2009.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[31] Clercq JD, Ooms D, Prevost S, Faucheur FL. Connecting IPv6 islands over IPv4 MPLS using IPv6 provider edge routers (6PE). IETF RFC 4798, 2007,.
[32] De Clercq J, Ooms D, Carugi M. BGP-MPLS IP virtual private network (VPN) extension for IPv6 VPN. IETF RFC 4659, 2006.
[33] Despres R. IPv6 rapid deployment on IPv4 infrastructures (6rd). IETF RFC 5569, 2010.
[34] Storer B, Pignataro C, Santos M D, Stevant B, Toutain L, Tremblay J. Softwire hub and spoke deployment framework. IETF RFC 5571, 2009.
[35] Lau J, Townsley M, Goyret I. Layer two tunneling protocol—Version 3 (L2TPv3). IETF RFC 3931, 2005.
[36] Durand A, Droms R, Woodyatt J, Lee Y. Dual-Stack lite broadband deployments following IPv4 exhaustion. IETF RFC 6333, 2011.
[37] Cui Y, Wu J, Wu P, Metz C, Vautrin O, Lee Y. Public IPv4 over access IPv6 network. IETF RFC 7040, 2013.
[38] Cui Y, Wu J, Wu P, Sun Q, Xie C, Zhou C, Lee Y, Zhou T. Lightweight 4over6 in access network. IETF draft-cui-softwire-b4-translated-ds-lite-11, 2013.
[39] Troan O, Dec W, Li X, Bao CX, Zhai Y, Matsushima S, Murakami T. Mapping of address and port (MAP)—Deployment considerations. IETF draft-mdt-softwire-map-deployment-02, 2012.
[40] Mawatari M, Kawashima M, Byrne C. 464XLAT: Combination of stateful and stateless translation. IETF RFC 6877, 2013.
[41] Shin M, Kim H, Santay D, Montgomery D. An empirical analysis of IPv6 transition mechanisms. In: Proc. of the 8th Int'l Conf. on ICACT. 2006. 1990−1996. [doi: 10.1109/ICACT.2006.206385]
[42] AlJa'afreh R, Mellor J, Awan I. A comparison between the tunneling process and mapping schemes for IPv4/IPv6 transition. In: Proc. of the Int'l Conf. on WAINA 2009. 2009. 601−606. [doi: 10.1109/WAINA.2009.209]
[43] Guerin R, Hosanagar K. Fostering IPv6 migration through network quality differentials. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010,40(3):17−25. [doi: 10.1145/1823844.1823847]
[44] Wu Y, Zhou X. Research on the IPv6 performance analysis based on dual-protocol stack and tunnel transition. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. on ICCSE. 2011. 1091−1093. [doi: 10.1109/ICCSE.2011.6028824]
[45] Jayanthi JG, Rabara SA. Transition and mobility management in the integrated IPv4 and IPv6 network-a systematic review. In: Proc. of the Int'l Conf. on ICEIE. 2010. 162−166. [doi: 10.1109/ICEIE.2010.5559898]
[46] Wu P, Cui Y, Xu M, Wu J, Li X, Metz C, Wang S. PET: Prefixing, encapsulation and translation for IPv4-IPv6 coexistence. In: Proc. of the GLOBECOM 2010. 2010. 1−5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683446]
[47] Miyata H, Endo M. Design and evaluation of IPv4/IPv6 translator for IP based industrial network protocol. In: Proc. of the 8th IEEE Int'l Conf. on INDIN. 2010. 142−147. [doi: 10.1109/INDIN.2010.5549446]
[48] Govil J, Kaur N, Kaur H. An examination of IPv4 and IPv6 networks: Constraints and various transition mechanisms. In: Proc. of the IEEE Southeastcon. 2008. 178−185. [doi: 10.1109/SECON.2008.4494282]
[49] Wang XF, Wu JP, Cui Y. Survey of Internet IPv6 transition technologies. Mini-Micro Systems, 2006,27(3):385−295 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

[15] 曾立安,程朝辉,凌力.一个加强的 NAT-PT 模型.软件学报,2003,14(12):2037−2044. http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/2037.htm
[49] 王晓峰,吴建平,崔勇.互联网 IPv6 过渡技术综述.小型微型计算机系统,2006,27(3):385−295.

葛敬国(1973－),男,安徽合肥人,博士,副研究员,CCF 会员,主要研究领域为互联网体系结构与关键技术.
E-mail: gejingguo@cstnet.cn

吴玉磊(1983－),男,博士,助理研究员,CCF 会员,主要研究领域为网络体系结构与关键技术,移动网络,系统建模与性能优化.
E-mail: wuyulei@cstnet.cn

弭伟(1985－),女,博士,助理研究员,主要研究领域为 IPv6 过渡,互联网体系架构与关键技术,P2P.
E-mail: miwei@cstnet.cn

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn