

大规模 IPv4/IPv6 演进环境下的地址管理关键技术与应用

李子木, 傅怡琦, 潘丽

(清华大学 信息化技术中心, 北京 100084)

摘要: 分析了校园有线网和无线网大规模 IPv4/IPv6 演进环境下的基本地址管理需求, 对 IPv6 地址管理技术进行了阐述, 并对适用于这种大规模演进环境的地址管理服务关键运行技术进行了探索性讨论。最后通过实际部署案例, 给出了地址管理服务在大规模 IPv4/IPv6 双栈演进环境中的具体应用, 为基于 IPv6 的下一代校园有线网和无线网统一地址管理和演进积累了经验。

关键词: 大规模; IPv4/IPv6; 演进; 统一; 地址管理

中图分类号: TP311.134.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)Z1-0082-05

Application of unified IP address management technologies in large-scale IPv4/IPv6 transition environment

LI Zi-mu, FU Yi-qi, PAN Li

(Network Research Center of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Some basic requirements of IP address management (IPAM) in large-scale IPv4/IPv6 transition environment in campus wired LAN and WLAN is summarized, and analyzes some special technologies of IPv6 address management as well as some operating key technologies of IPAM service in such environment. Finally, a real deployment of IPAM service in such a large-scale IPv4/IPv6 transition environment is introduced. Experience of unified IPAM service oriented next-generation wired LAN and WLAN are gathered.

Key words: large-scale; IPv4/IPv6; transition; unified; address management

1 引言

随着互联网, 特别是 WLAN 技术的快速普及与高速发展, 校园无线网已经成为每个学校必备的信息基础设施之一, 成为高校提高教学科研和管理水平的重要途径和手段。大量可移动的无线设备接入到校园网中, 对 IP 地址分配和运行管理提出了新的挑战。如何在 IPv4 向 IPv6 演进过渡的技术浪潮中, 提供支持大规模用户的, 专业可靠、安全高效和可管控的统一地址管理服务, 已经成为网络管理者必须面对的重要课题。

2 演进环境下的地址管理需求

全球可用的 IPv4 地址资源已经枯竭, 但是随着

WLAN 技术的快速发展, 大量无线设备接入到校园网中, 进一步加剧了原本紧张的 IPv4 地址需求。与此同时, IPv6 在许多学校得到了长足的发展, 有些大学的 IPv6 流量已经超过 IPv4 成为主要的资源访问方式。IPv6 地址空间巨大, 手工配置复杂。如何同时管理具有不同特点、不同属性的 IPv4 和 IPv6 地址资源, 为大规模有线网、无线网用户提供安全可靠、方便快捷的网络服务, 是 IP 地址管理服务必须面对的挑战。

在可以预见的将来, IPv4 与 IPv6 将长期共存, IPv4 向 IPv6 过渡是一个长期逐渐的过程。这种长期演进的网络环境, 对 IP 地址管理 (IPAM, IP address management) 提出了新的需求。

1) 地址管理统一化

在 IPv4/IPv6 长期共存、逐步演进的环境下,

收稿日期: 2014-10-14

基金项目: 清华大学信息化建设——校园网 DHCP 系统升级基金资助项目 (清信 2014-5)

Foundation Item: The Information Infrastructure Construction Project of Tsinghua University-DHCP System Upgrade (QX2014-5)

全球各类资源网站对 IPv6 的支持程度是相同的。对于大部分 IPv4/IPv6 双栈用户，希望能够一次认证通过，即可同时访问 IPv4 和 IPv6 资源。在这种需求下，校园网 IPv4 地址池和 IPv6 地址池需要进行统一管理，实现 IPv4 地址和 IPv6 地址的统一映射，为上述认证目标提供基础底层支持。

2) 地址管理动态化

IPv6 地址空间巨大，而且手工配置复杂，IPv6 地址的动态化管理是现阶段的运行需求，也是未来的发展趋势。IPv6 协议提供了多种动态地址配置和管理手段，为地址动态化管理提供了技术基础。

3) 地址管理精确化

由于 IPv6 地址空间非常大，且同一终端经常同时可获得多个 IPv6 地址，可能通过多个 IPv6 同时上网。另外，在 IPv6 环境下还会出现采用 PD 技术获得地址的终端设备。在大规模用户环境下，IPv6 的这些特性都为地址精确化管理提供了需求。

4) 地址服务高可靠

地址管理服务不是一个单独的应用，而是网络的基础支撑服务，诸如认证计费、安全管控等上层服务都是基于地址的，因此 IPAM 服务的可靠性直接影响上层服务的品质。在生产网络中，要求地址服务必须是高可靠和业务连续的。

3 IPv6 地址管理关键技术

IPv6 协议中规定了 SLAAC^[1]方式和 DHCP^[2,3]方式 2 种地址自动配置功能，并规定了可以通过 PD^[4]方式提供层级化地址管理功能。

3.1 IPv6 地址分配方式

IPv6 地址参数可通过 DHCP 服务器和路由器广播获得，根据地址分配方式的不同（DHCPv6 服务器或路由器通告 RA），目前 IPv6 地址分配方式共分为 4 种模式，如图 1 所示。

对于 IPv6 终端，虽然通过 RA 方式获得地址比较简单易行，但是由于这种方式无法实现对地址的统一管控，特别是在认证、溯源和审计方面无法满足企业对安全性的要求，所以 Stateful DHCPv6 被广泛应用于要求高安全性和统一地址管理的运行环境。

3.2 DHCPv6 地址分配方式

随着 IPv6 的应用日益迫切，DHCPv6 协议(RFC 3315) 也于 2003 年提出并得到了不断完善，其主要分配流程以及协议封包分别如图 2 所示。其中标

准 4 步分配过程和 DHCP 基本相同，但是 DHCPv6 同时还支持特有的 2 步快速分配方式，主要应用在某些情况下，客户端和服务端可以通过只有 2 个消息的交互实现快速的地址配置。

• Stateful DHCPv6		
	DHCPv6	IPv6 RA
获取地址	•	
获取网关		•
获取 DNS	•	
• Stateless DHCPv6		
	DHCPv6	IPv6 RA
获取地址		•
获取网关		•
获取 DNS	•	
• SLAAC with RDDNS		
	DHCPv6	IPv6 RA
获取地址		•
获取网关		•
获取 DNS		•
• SLAAC with IPv4		
	DHCPv6	IPv6 RA
获取地址		•
获取网关		•
获取 DNS	通过 IPv4	

注：“•”表示支持该项内容。

图 1 IPv6 地址分配方式

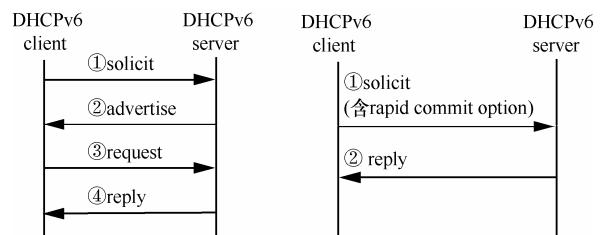


图 2 DHCPv6 分配过程 (client 与 server 的标准④步与②步快速交互)

DHCPv6 分组与 DHCP 类似，如 solicit 分组类似于 discover 分组，advertise 分组类似于 offer 分组，reply 类似于 ack 等。另外，DHCPv6 也有一些 DHCP 没有的特有分组类型。DHCPv6 与 DHCP 的详细对应关系如表 1 所示。

DHCPv6 的协议封包有 2 种结构，即在中继与客户端上使用的分组结构是不同的，如图 3 和图 4 所示。

表 1 DHCPv6 与 DHCP 对应关系

DHCPv6 消息	描述	等效 DHCP 消息
要求 (solicit)	由客户端发送以定位服务器	DHCPDiscover
公告 (advertise)	由服务器对“要求”消息进行响应时发送以指明可用性	DHCPOffer
请求 (request)	由客户端发送以请求来自特定服务器的地址或配置设置	DHCPRequest
确认 (confirm)	由客户端发送给所有服务器, 以确定对于已连接的链接客户端的配置是否有效	DHCPRequest
更新 (renew)	由客户端发送给特定服务器以延长分配地址的生存期并获取更新的配置设置	DHCPRequest
重新绑定 (rebind)	未接收到对“更新”消息的响应时由客户端发送给任何服务器	DHCPRequest
应答 (reply)	对要求、请求、更新、重新绑定、信息请求、确认、发布或拒绝消息进行响应时由服务器发送给特定客户端	DHCPAck
发布 (release)	由客户端发送以指明客户端不再使用分配的地址	DHCPRelease
拒绝 (decline)	由客户端发送给特定服务器以指明分配的地址已在使用	DHCPDecline
重新配置 (reconfigure)	由服务器发送给客户端以指明该服务器具有新的或更新的配置设置。客户端随后发送“更新”或“信息请求”消息	N/A
信息请求 (information-request)	由客户端发送以请求配置设置 (但不包括地址)	DHCPInform
中继转发 (relay forw)	由中继代理发送以转发消息给服务器。中继转发包含封装为 DHCPv6 中继消息选项的客户端消息	N/A
中继应答 (relay reply)	由服务器发送以通过中继代理发送消息给客户端。中继应答包含封装为 DHCPv6 中继消息选项的服务器消息	N/A

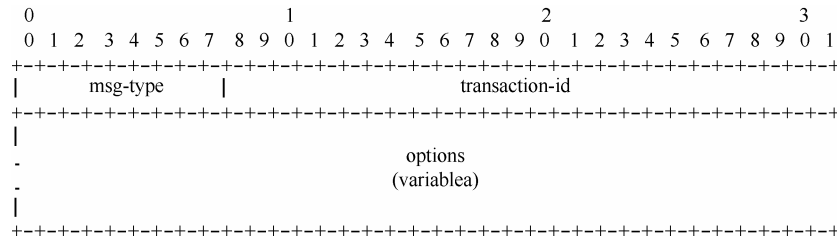


图 3 客户端与服务器协议封装

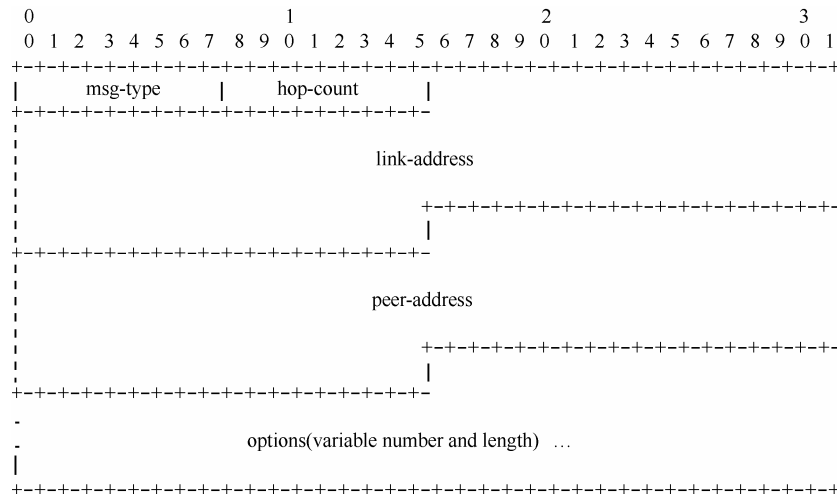


图 4 中继与服务器协议封装

3.3 IPv6 PD 工作原理

IPv6 前缀代理 PD(prefix delegation)是由 Cisco 公司提出的一种前缀分配机制, 并在 RFC3633 和 RFC6603^[5,6]中得以标准化。在一个层次化的网络拓扑结构中, 不同层次的 IPv6 地址分配一般是手工指定的。手工配置 IPv6 地址扩展性不好, 不利于

IPv6 地址的统一规划管理。通过 PD 前缀代理机制, 下游路由器不需要再手工指定用户侧链路的 IPv6 地址前缀, 它只需要向上游路由器提出前缀分配申请, 上游路由器便可以分配合适的地址前缀给下游路由器, 下游路由器把获得的前缀(一般前缀长度小于 64)进一步自动细分成 64 前缀长度的子网

网段，把细分的地址前缀再通过路由通告(RA)至与 IPv6 主机直连的用户链路上，实现 IPv6 主机的地址自动配置，完成整个系统层次的地址布局。PD 工作过程如图 5 所示。

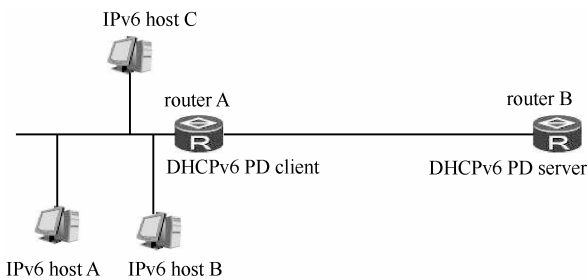


图 5 IPv6 PD 地址分配方式

PD 通过 4 步交互实现 IPv6 地址分配。

1) PD 客户端发送 solicit 分组，请求 PD 服务器为其分配 IPv6 地址前缀。

2) 如果 solicit 分组中没有携带 rapid commit 选项，或 solicit 分组中携带 rapid commit 选项，但服务器不支持快速分配过程，则 DHCPv6 服务器回复 advertise 分组，通知客户端可以为其分配的 IPv6 地址前缀。

3) 如果 DHCPv6 客户端接收到多个服务器回复的 advertise 分组，则根据 advertise 分组中的服务器优先级等参数，选择优先级最高的一台服务器，并向该服务器发送 request 分组，请求服务器确认其分配地址前缀。

4) PD 服务器回复 reply 分组，确认将 IPv6 地址前缀分配给 PD 客户端使用。

PD 同样也支持携带 rapid commit 选项的 2 步交互方式。

4 IPAM 服务关键技术

在小规模用户环境下，普通 DHCP 服务器（系统自带 DHCP 系统或开源 DHCP 系统）可以基本满足运行服务要求。但是在大规模 IPv4/IPv6 环境下，DHCP 服务的运行管理已经不仅仅是简单的分配地址，此时它已经成为整个网络运行支撑系统的基础，涉及到 IPv4/IPv6 地址的统一规划、模版管理、认证审计、计费安全、在线统计等众多基础功能，这对 IPAM 服务的性能、可靠性、可维护性和扩展性提出了更高的要求。

4.1 多线程高性能架构

在实际应用环境下，如常见的校园网密集用户

无线接入点由于高峰接入或掉电重启而导致的无法上网的现象，专业 IPAM 服务通过采用“多线程+整体优化”技术提升性能，以应对大规模用户环境的短期密集接入。

4.2 failover 灾备技术

传统 DHCP 在实现主备容灾备份时，往往遇到许多实际问题，主要是不能有效解决地址池重叠或者 IP 冲突混乱等问题。专业 IPAM 服务通过完善的主备心跳监测、地址在线信息实时更新等机制，实现高效的 failover 容灾备份。

4.3 API 扩展技术

针对越来越多的认证和计费方面的个性化需求，专业 IPAM 服务不仅要支持标准的 DHCP 分配流程，更需要通过灵活丰富的 API 支持不同的终端认证策略、计费策略。API 扩展回调 (callback) 技术已经成为专业 IPAM 服务的基本需求。

4.4 IPv6 特殊支持

针对 IPv6 地址空间巨大的特点，IPAM 服务需要能够根据管理员要求，支持多种灵活的地址分配模式。例如可以灵活规划 IPv6 地址池大小，可以从地址池头部、地址池尾部按照顺序和逆序分配地址，或者基于预定义的间隔策略为客户端分配 IPv6 地址等（离散地址分配需求已经在 IVI 过渡技术中得到应用），如图 6 所示。

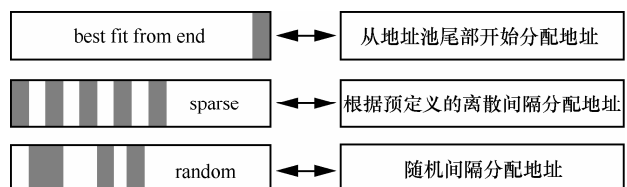


图 6 IPv6 地址池预定义分配

5 部署案例

清华大学之前地址管理系统共有 4 套服务器在线提供服务（2 台 QIP，1 台 ISC，1 台 Windows），主要存在以下问题：

1) ISC 和 Windows DHCP 服务器在统计管理和模板配置上功能较弱，无法满足大规模用户和 IP 地址池的高效分配、灵活调整和多形态查询统计等管理需求；

2) 多系统混用，各自为政，缺乏统一管理界面；

3) 无 IP 子网规划管理功能，在 IPv6 演进环境下效率低下；

4) 缺乏灵活可靠的 API 接口，无法实现与其

他运行支撑系统（认证、计费）等的有效整合。

通过在校园网部署新一代 IPAM 系统，有效克服了以上实际运行中面临的问题，为大规模演进环境下的校园网未来发展奠定了基础。

图 7 展示了校园网整体结构和 IPAM 服务的位置，其中有有线网和无线网分别独立运行，在边界网络入口实现互联。IPAM 服务位于网管中心，同时为有线网和无线网提供 IPv4/IPv6 地址分配管理服务。整个 IPAM 系统包含 2 台管理机（1 主，1 备），以及 4 台前端服务器（3 主，1 备），在管理层和服务层形成了分级备份架构，大幅度提高了系统的可用性。

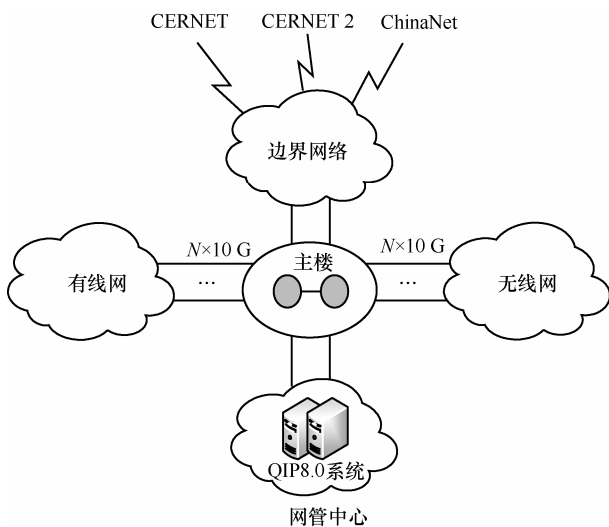


图 7 校园网 IPAM 架构示意

6 结束语

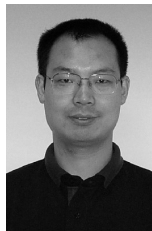
通过对大规模 IPv4/IPv6 演进环境的分析，总结了适应此环境需求的 IPAM 系统的关键技术特征，通过实际部署 IPAM 服务，有效解决了原有系统在可靠性、性能和管理方面的问题，为 IPv4/IPv6 的演进提供有力支持。大幅提升了校园网 IP 地址资源管理水平，对下一代校园网 IP 地址管理模式和发

展方向进行了有益探索。

参考文献:

- [1] THOMSON S. IPv6 Stateless Address Auto Configuration[S]. IETF RFC 4862, 2007.
- [2] DROMA R, BOUND J, PACKARD H. Dynamic Host Configuration Protocol Service for IPv6[S]. IETF RFC 3315, 2003.
- [3] DROMA R. Stateless Dynamic Host Configuration Protocol Service for IPv6[S]. IETF RFC 3736, 2004.
- [4] MIYAKAWA S. Requirements for IPv6 Prefix Delegation[S]. IETF 3769, 2004.
- [5] TROAN O. IPv6 Prefix Options for Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) Version 6[S]. RFC 3633, 2003.
- [6] SAVOLAINEN T. Prefix Exclude Option for DHCPv6-Based Prefix Delegation[S]. RFC 6603, 2012.

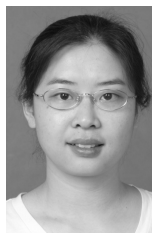
作者简介:



李子木（1971-），男，河南郑州人，清华大学工程师，主要研究方向为网络运行管理、高性能网络架构和网络安全等。



傅怡琦（1960-），男，北京人，清华大学高级工程师，主要研究方向为网络运行管理和网络安全。



潘丽（1977-），女，湖南冷水江人，清华大学工程师，主要研究方向为网络运行。