

敦煌研究院网络向IPv6过渡技术策略初探

Preliminary Study of Transition Strategies to IPv6 for Dunhuang Academy Network

那刚,杨静,胡海旭,何安东(敦煌研究院文物数字化研究所,甘肃敦煌736200)

Na Gang, Yang Jing, Hu Haixu, He Andong (Institute of Cultural Digitization, Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China)

摘要:

随着IPv4地址资源日渐枯竭,IPv6已成为推动新一代互联网发展的关键技术。敦煌研究院作为我国重要的文化遗产保护和研究机构,其信息化网络建设至关重要,同时也面临着从IPv4向IPv6过渡的挑战。以研究院局域网为研究对象,分析IPv4网络的现状,结合IPv6过渡技术特点,提出以双栈技术为基础,辅以隧道技术和协议转换技术的渐进式过渡策略,并通过模拟实验验证了这一策略的可行性,为敦煌研究院未来大规模部署IPv6及其他类似机构的IPv6过渡提供了重要参考。

Abstract:

With the exhaustion of IPv4 address resources, IPv6 has become a pivotal technology driving the advancement of the next-generation Internet. The Dunhuang Academy, as an important cultural heritage protection and research institution in China, plays a pivotal role in the construction of information network. At the same time, it is also facing the challenge of the transition from IPv4 to IPv6. It examines the current state of the Academy's local area network (LAN) under the IPv4 framework. Drawing on the characteristics of IPv6 transition technologies, it proposes a phased migration strategy based on dual-stack technology, supplemented by tunneling and protocol translation techniques. The feasibility of this strategy is validated through simulation experiments, offering valuable guidance for the large-scale deployment of IPv6 at the Dunhuang Academy and serving as a reference for similar institutions navigating the transition to IPv6.

Keywords:

IPv6 networking; Transition technology; Transition strategy

关键词:

IPv6组网;过渡技术;过渡策略

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.02.013

文章编号:1007-3043(2026)02-0067-07

中图分类号:TN915

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式:那刚,杨静,胡海旭,等. 敦煌研究院网络向IPv6过渡技术策略初探[J]. 邮电设计技术,2026(2):67-73.

0 引言

随着互联网的迅速发展,IPv4地址资源逐渐枯竭,这一全球性问题促使各国IPv4网络逐步向IPv6过渡^[1]。IPv6不仅提供了海量的地址空间,还具备更高的安全性和扩展性,因此,IPv6的广泛应用被视为未来网络发展的必然趋势^[2]。自2017年底中共中央办公厅、国务院办公厅印发《推进互联网协议第六版

(IPv6)规模部署行动计划》^[3]以来,越来越多的单位开通了IPv6,以应对互联网不断增长的需求^[4-5]。

IPv4向IPv6过渡是一个渐进的过程,不可能一蹴而就,目前主要的过渡技术有双栈、隧道和协议转换技术^[6],这3类技术分别针对不同的过渡环境和要求,各有其优缺点,可以灵活组合。目前,还没有一种机制能够适用于所有的过渡情况^[7]。

敦煌研究院是负责世界文化遗产敦煌莫高窟、天水麦积山石窟、永靖炳灵寺石窟,全国重点文物保护单位瓜州榆林窟、敦煌西千佛洞、庆阳北石窟寺管理的综合性研究型事业单位^[8],经过多年信息化的发展,

基金项目:2023年敦煌研究院院级课题(2022-KJ-YB-3)

收稿日期:2025-12-10

已形成了自身独特的复杂网络环境。部署 IPv6, 从现有的 IPv4 网络逐步向 IPv6 网络过渡, 不仅是为了适应互联网发展的趋势, 更是为了构建更为广泛、高效且安全的网络环境, 以满足研究院在资源共享及合作交流等方面的长远需求。因此, 探索敦煌研究院网络向 IPv6 过渡的技术策略有着极为重要的现实意义。

本文聚焦于敦煌研究院的 IPv4 网络, 以 IPv6 组网过渡技术为依托, 给出了切实可行的 IPv6 过渡技术策略。通过在模拟实验中构建原型系统, 对方案的可行性进行验证, 从而为现网的 IPv6 改造提供参考依据。

1 敦煌研究院网络现状分析

1.1 网络拓扑结构

敦煌研究院的基础 IPv4 网络已具备一定规模, 其网络拓扑如图 1 所示。网络拓扑采用分层设计, 包括出口层、核心层、汇聚层和接入层, 涉及路由器、交换机、防火墙、防病毒网关、入侵检测 (IPS)、上网行为管理、VPN 网关、无线 AC 和 AP 等多种网络设备。当前, 该 IPv4 网络划分为内部办公网络、对内服务网络和对

外服务网络, 其中内部办公网络用于员工的日常办公和管理, 对内服务网络用于内部员工进行内部资源数据的共享、科研、数据处理和分析等工作, 对外服务网络用于向公众提供与敦煌研究院相关的信息服务。

1.2 应用系统情况

敦煌研究院经过多年的发展, 基于 IPv4 网络建设的业务应用系统涵盖了文物保护、文物数字化、学术研究、展览展示、游客服务等多个领域。现有的应用系统包括“数字敦煌”资源库^[9]、敦煌莫高窟监测预警平台^[10]、莫高窟参观预约网、办公 OA 系统、邮件系统、资产管理系统、图书借阅管理系统、VPN 系统、无线网接入认证系统、视频会议系统、人力资源系统、财务系统、门禁系统、饭卡系统等。

1.3 IPv4 网络存在的问题

1.3.1 IPv4 公网地址资源不足

敦煌研究院从运营商处购置的公网 IPv4 地址数量极为有限, 部分业务应用系统已经占用了一部分, 内部办公网络通过网络地址转换 (NAT) 访问互联网, 新增的部分业务系统面临着没有更多公网 IP 可用的问题, 很多业务应用系统不得不迁移至公有云。尽管

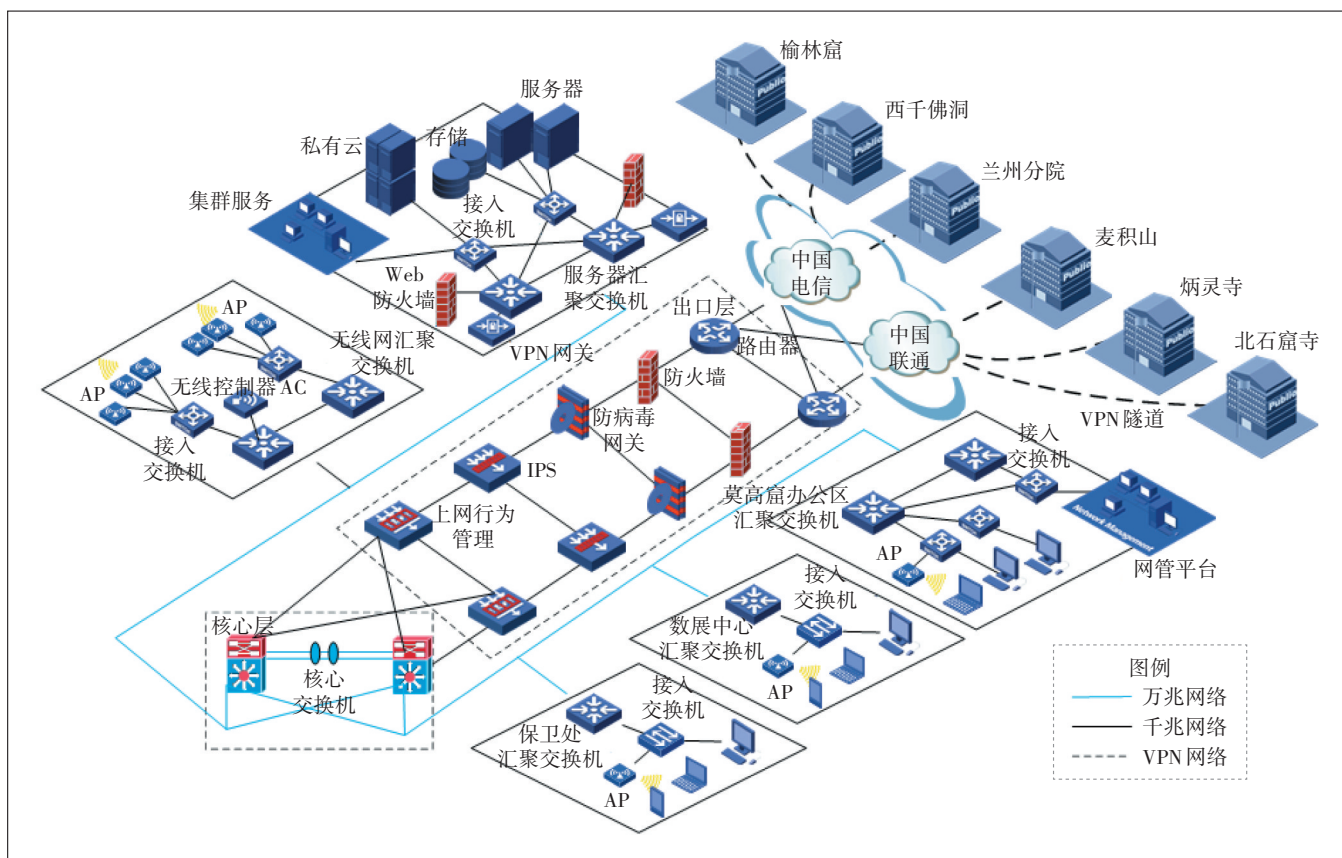


图 1 敦煌研究院 IPv4 网络拓扑

这种方式在一定程度上暂时缓解了地址紧张的问题,然而,长期依赖公有云可能会带来数据安全风险、成本增加以及对第三方服务提供商的过度依赖等问题^[11],并非长远之计。

1.3.2 网络性能瓶颈

随着文物保护、文物数字化和文物展示等工作的不断深入,大量数据传输需求增加,而现有的IPv4网络存在网络拓扑结构设计不够优化的情况,导致数据传输路径过长或存在冗余,增加了数据包的传输延迟和丢包率,IPv4网络无法满足大规模的数据高速传输需求,影响工作效率。另外,虽然NAT在节省IPv4地址资源、增强网络安全和提供灵活配置方面具有一定优势,但也带来了性能开销、配置增加和管理复杂性^[12]。随着IPv6的普及,网络逐步向IPv6过渡,减少对NAT的依赖,提高性能,将是未来发展的重要方向^[2]。

2 敦煌研究院IPv6组网过渡技术策略

2.1 IPv6组网过渡技术

IPv6作为下一代互联网协议,解决了IPv4地址枯竭的问题,同时兼顾了网络的效率和安全性,地址数量激增至 3.4×10^{38} 个,极大地超越了IPv4的43亿个地址的限制,提供了几乎无限的网络布局可能性^[13-14]。当前,IPv4向IPv6的过渡技术有双栈、隧道和协议转换技术,在实际应用中可以根据网络的具体情况和需求进行选择 and 组合,以实现从IPv4向IPv6的平滑过渡^[15]。

2.1.1 双栈技术

双栈技术是指在网络设备和主机上同时运行IPv4和IPv6协议栈,使网络设备和主机能够同时处理IPv4和IPv6数据包^[16]。双栈技术能够同时支持IPv4和IPv6,实现平滑过渡,适用于大部分网络设备、服务器设备及用户终端^[6]。然而,由于IPv4和IPv6需要独立维护路由信息,该技术也增加了网络设备的负担和管理难度^[17]。

2.1.2 隧道技术

隧道技术是一种封装技术,可以把分隔的IPv6或IPv4孤岛连通起来^[16]。目前有多种隧道技术,如通用路由封装(Generic Routing Encapsulation, GRE)隧道、VPN GRE、IPv6 in IPv4隧道、6to4隧道、ISATAP隧道、Teredo、6PE、Tunnel Broker等^[7]。隧道技术适用于在现有的IPv4网络中逐步引入IPv6流量的场景,但可能导

致性能下降和网络复杂度的提高^[18]。

2.1.3 协议转换技术

协议转换技术将IPv4数据包转换为IPv6数据包,或将IPv6数据包转换为IPv4数据包,以实现IPv4和IPv6网络之间的互联互通^[16]。目前,协议转换技术有NAT-PT(Network Address Translation - Protocol Translation,包括静态和动态)、NAT64/DNS64、IVI技术、Smart6和Space6等^[7]。协议转换技术会导致设备损失一定的性能,适用于老旧设备接入、特定业务系统过渡场景^[19]。

IPv6组网过渡技术已经非常成熟,具备了全面的设备和软件支持,拥有成熟的过渡技术和安全管理机制^[20],并在全球范围内积累了丰富的部署和应用经验^[1-2]。所有这些因素都表明IPv6组网过渡技术已经完全具备支撑大规模网络过渡的能力,敦煌研究院也可以平稳、顺利地实现向IPv6组网过渡。通过这些技术,敦煌研究院可以在过渡过程中,确保IPv6和IPv4设备之间的互通性,保证业务的连续性。

2.2 总体策略

基于敦煌研究院IPv4网络现状,立足于IPv6组网过渡技术,拟定的IPv4向IPv6组网过渡技术策略如下:以双栈技术为基础,辅以隧道技术和协议转换技术的渐进式过渡策略。

2.2.1 渐进式过渡阶段

渐进式过渡阶段示意如图2所示。在第1阶段进行试点与评估,选择部分非关键业务区域进行IPv6组网试点,对试点区域的网络连通性、性能、应用兼容性进行监测和评估,总结经验教训。在第2阶段进行局部推广,在试点成功的基础上,将IPv6组网推广到更多的业务区域,并且能实现IPv4和IPv6之间的通信。在第3阶段进行扩大推广,进一步扩大IPv6的覆盖范围,逐步过渡到以IPv6为主的网络环境,完善IPv6网络的安全防护和管理措施。在第4阶段,最终实现纯IPv6网络。

2.2.2 灵活应用

敦煌研究院在进行IPv6组网过渡中需要灵活应用各种技术。过渡时期的工作重点应放在对内服务业务和对外服务业务中,需要分别对网络设备平台、服务器平台、应用系统平台、安全平台等开展研究,为IPv6网络过渡量身裁衣,提供优质的过渡配置方案,充分利用和保护已有的网络设备投资和软件资源。具体为:以双栈技术为IPv6组网过渡的基石,逐步对网

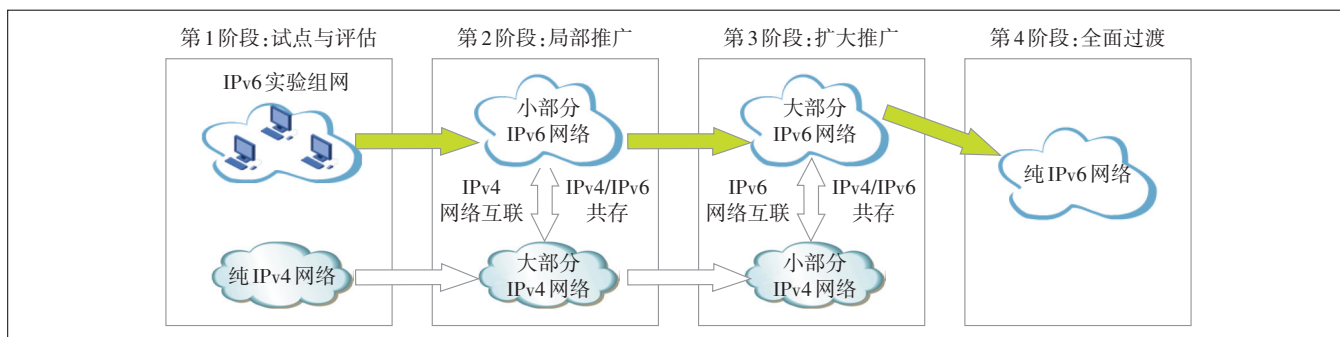


图2 从IPv4向IPv6网络的过渡阶段示意

络设备和主机进行升级,使其成为双栈设备。在部分内部办公网络以及部分对内网服务网络中,运用隧道技术构建IPv6隧道,实现IPv6网络孤岛间的连通。对于对外服务网络,采用协议转换技术来实现IPv4与IPv6网络的交互联通,同时逐步将对外服务升级为支持IPv6的站点。

2.2.3 部署流程

在敦煌研究院IPv6网络的组建进程中,通过深入剖析3种过渡技术,绘制了如图3所示的双栈、隧道和协议转换技术部署流程,明确了具体的实施步骤并完成了系统配置。在双栈技术方面,先开展详尽的网络环境分析,保证网络设备对IPv6协议的支持。依据分析结果,规划双栈网络架构,并在支持IPv6的环境中配置IPv6协议,对于不支持IPv6的设备,保留其IPv4

设定,且确保其在双栈网络中的正常运作。在隧道技术方面,规划隧道技术的解决方案,审慎选取契合当前网络状况的隧道技术类型,并在网络内布设隧道连接。在协议转换技术方面,制定协议转换技术的解决方案,选择适合的协议转换技术,并在网络中部署连接。通过系统的全面测试,验证双栈、隧道和协议转换技术配置在实际网络环境中的稳定性和兼容性,并依据测试结果对网络配置予以调整和优化。

3 实验验证与测试

3.1 实验环境搭建

为了验证敦煌研究院网络向IPv6过渡技术策略的可行性,在莫高窟私有云vSphere ESXi中部署了仿真虚拟环境(Emulated Virtual Environment-NextGeneration, EVE-NG)来搭建实验环境,模拟了敦煌研究院的部分网络架构。本实验聚焦于IPv6过渡技术,结合实际的网络拓扑情况,覆盖了敦煌研究院各关键网络设备,以此来模拟IPv6的部署环境。对于双栈技术,为每个节点配置了独立的IPv4和IPv6协议环境,并均衡和有效管理IPv4与IPv6流量;对于隧道技术,选取GRE over IPv4技术进行了深入探讨;对于转换技术,通过在防火墙上进行NAT-PT配置,实现了IPv4和IPv6网络的互通,以观察在不同转换场景下的网络连通性和服务影响。

3.2 实验内容与结果

3.2.1 双栈技术实验

在双栈技术实验环境中,结合敦煌研究院IPv4网络架构,绘制了如图4所示的实验网络拓扑。本实验网分为内部分区网络、内部核心区网络和外部网络,其中内部分区网络IPv4地址段为10.192.0.0/16,内部核心区的IPv4地址段为10.1.0.0/16。模拟新开通IPv6网络,申请了2408:8a27:42e0::/48的IPv6地址段,并

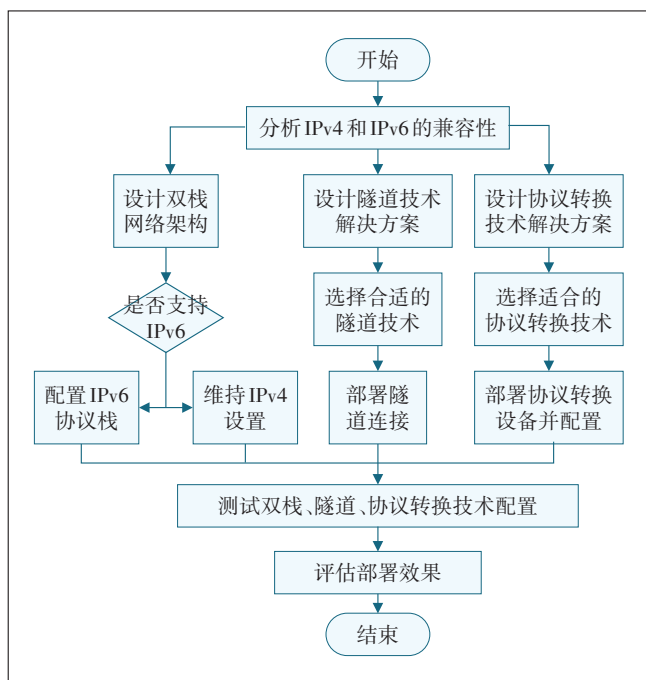


图3 双栈、隧道和协议转换技术部署流程

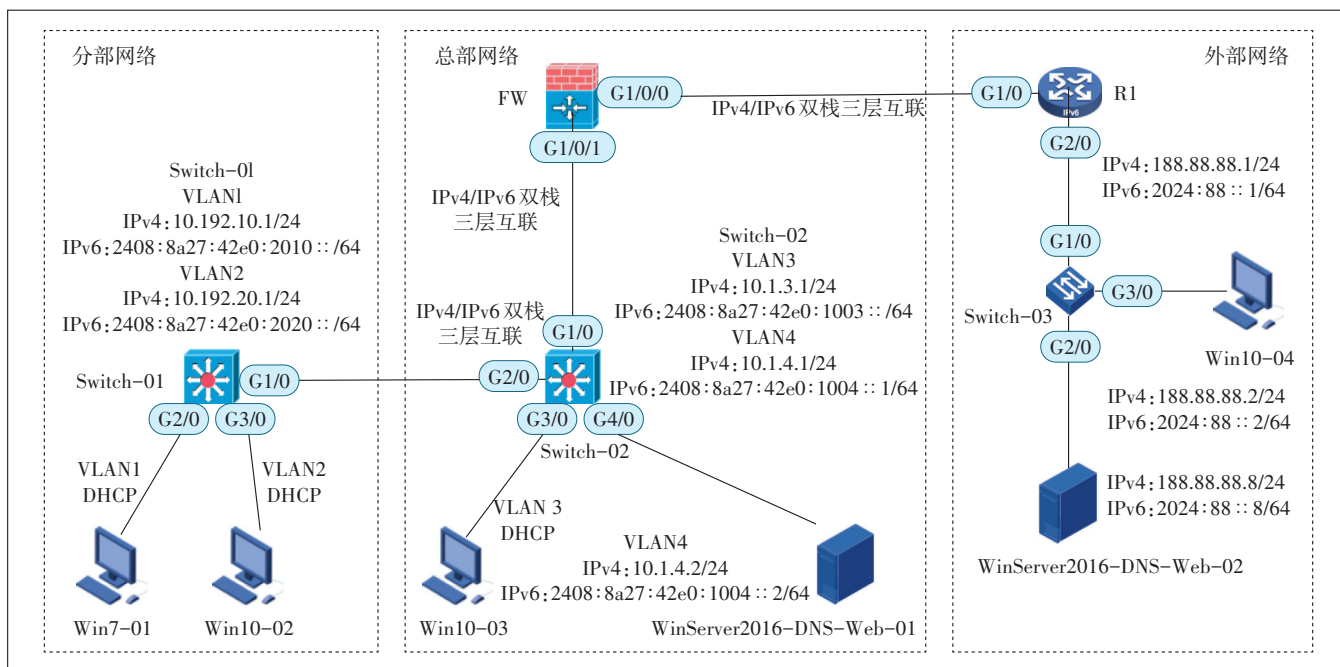


图4 双栈技术实验拓扑

将 2408:8a27:42e0:2::/52 分配给内部分区网络,将 2408:8a27:42e0:1::/52 分配给内部核心区网络。

本实验的配置如图4所示,其中,WinServer2016-DNS-Web-01 服务器在 VLAN 4 中,配置的 IPv4 地址为 10.1.4.2/24,IPv6 地址为 2408:8a27:42e0:1004::2/64,该服务器是单位内网的 DNS 服务器和 Web 服务器,管理域名为 dha.ac.cn,分别配置 A 记录和 AAAA 记录,配置 Web 服务,同时开放 80 端口,对应的域名是 www.dha.ac.cn,并将私网 IPv4 地址 10.1.4.2 映射为公网 IPv4 地址 188.66.66.1。

WinServer2016-DNS-Web-02 服务器配置的公网 IPv4 地址为 188.88.88.8,IPv6 地址是 2024:88::8/64,该服务器是互联网的 DNS 服务器,管理域名为 dhaoutside.ac.cn,分别配置 A 记录和 AAAA 记录,同时也提供 Web 服务,开放 80 端口,对应的域名是 www.dhaoutside.ac.cn。

配置完成后的实验测试结果如下。

a) 电脑 Win7-01、Win10-02 和 Win10-03 通过 DHCP 和 DHCPV6 服务均可获取到 IPv4 和 IPv6 地址,说明 DHCP 和 DHCPV6 服务可以共存,互不影响,Win10-04 手动配置 IPv4 和 IPv6 地址,均可正常通信。

b) 通过 Ping 命令测试不同节点之间 IPv4 和 IPv6 的连通性。Win7-01 通过 IPv4 地址 ping Win10-02、Win10-04、WinServer2016-DNS-Web-01 等终端地址,

连通性正常。Win10-02 通过 IPv6 地址 ping Win7-01、Win10-03、Win10-04、WinServer2016-DNS-Web-01 等终端地址,连通性也正常。IPv4 和 IPv6 网络的连通性测试的结果表明双栈技术能够实现 IPv4 和 IPv6 网络的共存,并且各自互通,互不影响。

c) 域名访问测试。Win7-01 代表内部网络终端、Win10-04 代表外部访问终端,分别访问内网 Web 网站 www.dha.ac.cn 和外网 Web 网站 www.dhaoutside.ac.cn。通过测试,无论是仅 IPv4 地址或仅 IPv6 地址均可以访问。通过 IPv4 和 IPv6 访问 Web 应用服务的测试,说明双栈技术对 DNS 服务和 Web 服务的支持良好。

根据测试结果可得出如下结论:双栈技术能够在不影响现有 IPv4 网络正常运行的基础上,顺利实现 IPv6 网络的接入和通信,并且对 DHCP 服务、DNS 服务和 Web 服务支持良好,敦煌研究院网络以双栈技术为基础向 IPv6 过渡具有可行性。

3.2.2 隧道技术实验

敦煌研究院部署 IPv6 网络处于起步阶段,因此有相当长的时间会部署小范围的纯 IPv6 网络,主干网络还是以 IPv4 网络为主。结合此实验场景,绘制了如图 5 所示的实验网络拓扑,用以实现纯 IPv6 网络之间的通信。

本实验的配置如图 5 所示。Win-01、R1 和 R2 之间是纯 IPv6 网络,R1 和 Win10-01 之间的 IPv6 地址段

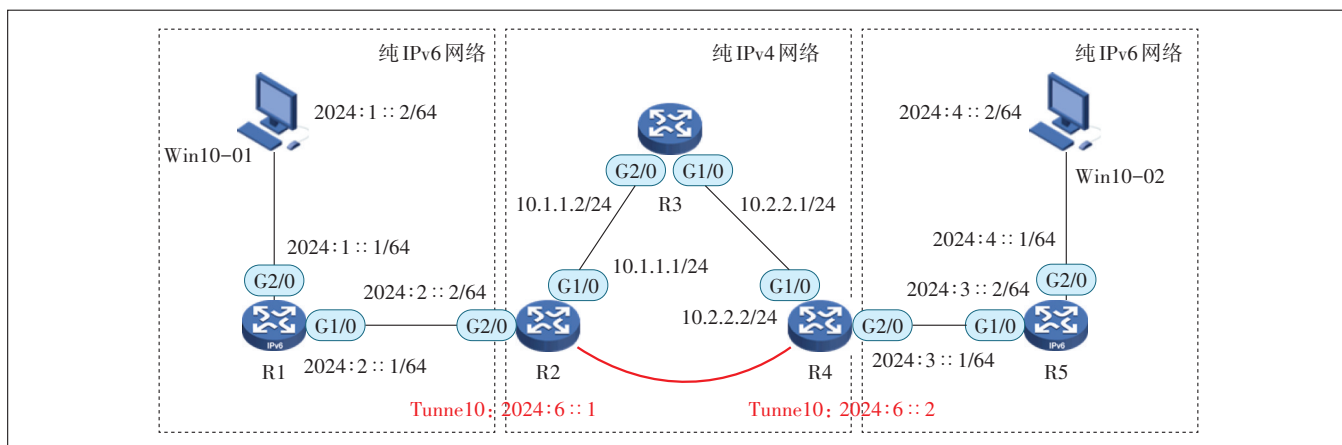


图5 隧道技术实验拓扑

为2024:1::/64, R1和R2之间的IPv6地址段为2024:2::/64; R2、R3和R4之间是纯IPv4网络, R2和R3之间的IPv4地址段为10.1.1.0/24, R3和R4之间的IPv4地址段为10.2.2.0/24; Win10-02、R4和R5之间是纯IPv6网络, R4和R5之间的IPv6地址段为2024:3::/64, R5和Win10-02之间的IPv6地址段为2024:4::/64。R1和R5是纯IPv6路由器, R3是纯IPv4路由器, R2和R4是双栈路由器。在R2和R4之间建立一条GRE隧道, 隧道之间的IPv6地址段为2024:6::/64。

配置完成后的实验测试结果如下。

a) Win10-01与Win10-02的IPv6地址进行互Ping测试, 均可以Ping通, 说明IPv6的流量穿越了IPv4网络。

b) Win10-01与Win10-02的IPv6地址进行互tracert测试, 均可达, 并经过了5跳。这说明隧道成功建立, 且经过了如图5所示的5个IPv6网段的中间节点。

根据测试结果可得出如下结论: 隧道技术能够有效地在IPv4网络中实现IPv6数据包的传输, 使IPv6孤岛之间可以相互通信, 为敦煌研究院IPv6的逐步部署和推广提供了一种可行的过渡方案。

3.2.3 协议转换技术实验

对于协议转换技术的实验, 结合敦煌研究院的IPv4网络, 在出口层部署了防火墙, 绘制了如图6所示的网络拓扑。本实验以防火墙为例来演示配置NAT-PT以实现IPv4和IPv6网络之间的互联互通。

本实验的配置如图6所示。实验中IPv4网络和IPv6网络通过防火墙连接, 其中Winserver-01的IPv4地址10.66.66.2被防火墙映射为2066:66::2, Winserver-02的IPv6地址2088:88::2被防火墙映射为10.88.88.2。

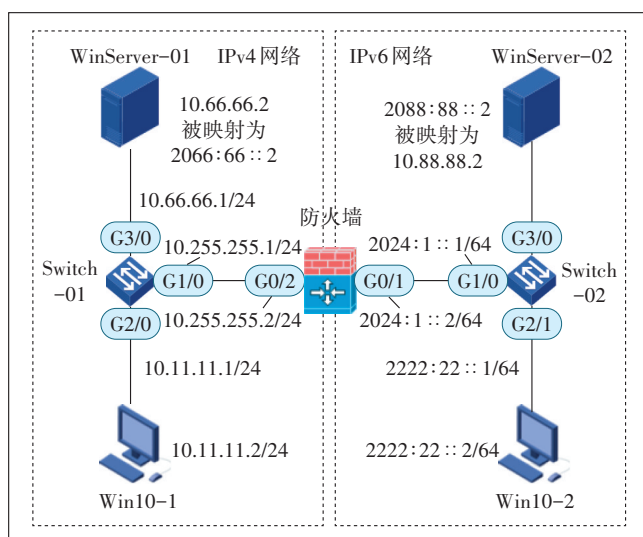


图6 协议转换实验拓扑

10.88.88.2。

本实验防火墙的地址转换核心配置如图7所示, 实验结果如下。

a) Win10-01主动访问Winserver-02被映射后的地址10.88.88.2, 测试连通性正常, 说明纯IPv4网络主机可以访问到纯IPv6网络的服务。

b) Win10-02主动访问Winserver-01被映射后的地址2066:6::2, 测试连通, 说明纯IPv6网络主机可以访问到纯IPv4网络的服务。

测试结论如下: 运用恰当的协议转换技术, 能够让原本仅支持IPv4或IPv6的设备或网络实现通信。在敦煌研究院的互联网出口部署防火墙, 该防火墙能够达成IPv4和IPv6协议的转换, 并且能够在一定程度上实现IPv4与IPv6网络之间的互通。

```
Hillstone(config)#ip vrouter "trust-vr"
Hillstone (config-vrouter)# snatrule id 1 from "Any" to "10.88.88.2"
service "Any" trans-to 2099:99::100 mode dynamicport #配置源地址转换,任何IPv4地址访问10.88.88.2时,把源IPv4地址转换成IPv6地址2099:99::100,该地址可与IPv6网络通信
Hillstone (config-vrouter)# snatrule id 2 from "IPv6-any" to "2066:66::2" service "Any" trans-to 10.99.99.100 mode dynamicport #配置源地址转换,任何IPv6地址访问2066:66::2时,把源IPv6地址转换成IPv4地址10.99.99.100,该地址可与IPv4网络通信
Hillstone (config-vrouter)# dnatrul id 1 from "Any" to "10.88.88.2"
service "Any" trans-to "2088:88::2" #配置目的地址转换,任何IPv4地址访问10.88.88.2时,把目的IPv4地址转换成IPv6地址2088:88::2
Hillstone (config-vrouter)# dnatrul id 2 from "IPv6-any" to "2066:66::2" service "Any" trans-to "10.66.66.2" #配置目的地址转换,任何IPv6地址访问2066:66::2时,把目的IPv6地址转换成IPv4地址10.66.66.2
Hillstone (config-vrouter)# ip route 0.0.0.0/0 10.255.255.1 #默认IPv4静态路由,所有IPv4的流量被转发到下一条10.255.255.1
Hillstone (config-vrouter)# ipv6 route ::/0 2024:1::1 #默认的IPv6路由,所有IPv6流量都会被转发到下一跳地址2024:1::1
```

图7 防火墙的地址转换核心配置

4 结语

随着全球IPv4地址的枯竭,网络向IPv6的过渡已成必然。中国从政策与技术双管齐下推动IPv6的发展,敦煌研究院公网IPv4地址不足,迫切需要推动IPv6的部署,以保障未来网络需求。从技术可行性来看,现有的网络技术已非常成熟,足以支持敦煌研究院平稳过渡至IPv6。基于敦煌研究院当前的IPv4网络状况,本研究提出以双栈技术为基础,辅以隧道技术和协议转换技术的渐进式过渡策略,这一策略不仅切实可行,还充分利用和保护已有的网络设备投资和软件资源。然而,IPv6组网过渡是一个需要持续关注和优化的过程,未来应密切跟踪IPv6技术的发展,及时调整网络策略,以适应不断变化的业务需求与技术环境。此外,应加强与其他研究机构和行业的合作,共同推动IPv6在文化遗产保护、研究与弘扬领域的广泛应用。总的来说,敦煌研究院网络向IPv6过渡策略具备可行性,能够为其信息化建设提供坚实支持。这一经验也为未来大规模IPv6部署以及其他类似机构的组网过渡提供了宝贵的参考。

参考文献:

[1] 高巍,高静,葛坚,等. IPv6创新发展的形势与挑战[J]. 邮电设计技术,2024(4):1-7.
 [2] 郭胜楠,刘雅承,庞冉,等. IP承载网络技术演进方向研究[J]. 邮电设计与技术,2024(4):8-11.

[3] 新华社. 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《推进互联网协议第六版(IPv6)规模部署行动计划》[EB/OL]. [2025-08-09]. https://www.cqn.com.cn/cj/content/2017-11/27/content_5149625.htm.
 [4] 全球IPv6论坛,下一代互联网国家工程中心. 2023全球IPv6支持度白皮书[R/OL]. [2025-08-09]. https://www.ipv6testingcenter.com/index/index/center_info?id=17.
 [5] 中国互联网络信息中心. 第53次《中国互联网络发展状况统计报告》[R/OL]. <https://www.cnnic.net.cn/n4/2024/0322/c88-10964.html>.
 [6] MCFARLAND S,SAMBI M,SHARMA N,等. IPv6在企业网络中的部署[M]. 孙余强,孙剑,译. 北京:人民邮电出版社,2012.
 [7] 崔北亮,徐斌,丁勇. IPv6网络部署实战[M]. 北京:人民邮电出版社,2021.
 [8] 敦煌研究院. 敦煌研究院机构简介[EB/OL]. [2025-08-09]. <https://www.dha.ac.cn/jggk/jgj.htm>.
 [9] 俞天秀,吴健,赵良,等. “数字敦煌”资源库架构设计与实现[J]. 敦煌研究,2020(2):120-130.
 [10] 王旭东. 基于风险管理理论的莫高窟监测预警体系构建与预防性保护探索[J]. 敦煌研究,2015(1):104-110.
 [11] 王永生,宋爱波,叶亚伟,等. 面向“互联网+”的公有云数据安全[J]. 电信科学,2017,33(10):71-80.
 [12] 刘登超,杜晓鹏. 基于四六桥双栈协议的IPv6部署与应用——“邯郸广电网”IPv6的部署与应用[J]. 科学与信息化,2024(1):102-104.
 [13] 格拉西亚尼. IPv6技术精要[M]. 孙余强,王涛,译. 2版. 北京:人民邮电出版社,2020.
 [14] 张千里,姜彩萍,王继龙,等. IPv6地址结构标准化研究综述[J]. 计算机学报,2019,42(6):1384-1405.
 [15] 王晓峰,吴建平,崔勇. 互联网IPv6过渡技术综述[J]. 小型微型计算机系统,2006,27(3):385-395.
 [16] 王相林. IPv6网络—基础、安全、过渡与部署[M]. 北京:电子工业出版社,2021.
 [17] 岳超. 探讨IPv6协议的双栈技术研究与应用[J]. 自动化应用,2023,64(4):13-16.
 [18] 李清平,陈巧妮,孟祥芳. 4over6隧道技术的应用及网络性能分析[J]. 成都大学学报(自然科学版),2016,35(3):263-266.
 [19] 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[J]. 软件学报,2014,25(4):896-912.
 [20] 崔北亮,岳阳. IPv6中邻居发现协议剖析及攻防探索[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(6):746-754.

作者简介:

那刚,网络工程师,学士,主要从事局域网相关网络规划和运维管理工作;杨静,管理工程师,主要从事信息管理、IT运维管理等工作;胡海旭,安全工程师,学士,主要从事局域网相关的网络安全工作;何安东,信息系统的工程师,学士,主要从事局域网相关信息系统运维和管理工作。