

# IPv6 过渡技术的研究与比较

杨晨 学号 2021212171

北京邮电大学

日期: 2024 年 6 月 27 日

## 摘 要

随着 IPv4 地址的日益枯竭, IPv6 成为下一代互联网协议的必然选择。然而, 由于 IPv4 和 IPv6 之间的不兼容性, 在全球范围内全面过渡到 IPv6 是一个复杂且漫长的过程。本文通过对 IPv6 过渡技术的详细分析和比较, 探讨了 NAT64、Dual Stack、6RD 等过渡技术的优缺点及其适用场景。研究发现, 各种过渡技术各有优劣, 适用于不同的网络环境和需求。本文为网络工程师和研究人员提供了一个系统的参考, 以便在实际应用中选择最适合的过渡方案。

**关键词:** IPv6 过渡技术, NAT64, Dual Stack, 6RD

## 1 引言

IPv4 协议是目前广泛部署的因特网协议。在因特网发展初期, IPv4 以其协议简单、易于实现、互操作性好的优势而得到快速发展。然而, 随着因特网的迅猛发展, IPv4 设计的不足也日益明显, IPv4 地址资源逐渐枯竭, 迫使互联网社区寻找新的解决方案。

IPv6 是未来网络的发展趋势。IPv6 作为下一代互联网协议, 不仅扩展了地址空间, 还提供了更高效的路由和更好的安全特性。然而, IPv4 和 IPv6 之间的技术差异使得过渡过程面临诸多挑战。由于 IPv6 协议与 IPv4 协议不兼容 (IPv6 地址格式与 IPv4 地址格式不同, 并且 IPv6 报文格式与 IPv4 报文格式也有很大差异), 因此在全 IPv4 网络向全 IPv6 网络过渡过程中, 需要 IPv6 过渡技术实现 IPv6 网络孤岛之间、IPv4 网络孤岛之间、IPv6 网络和 IPv4 网络之间的互通。

为了确保平稳过渡, 业界提出了多种过渡技术。本文将对主要的 IPv6 过渡技术进行深入分析与比较, 探讨其在不同场景下的适用性。

## 2 IPv6 过渡技术概述

IPv6 过渡机制是一种技术, 用于促进互联网从 1983 年开始使用的互联网协议版本 4 (IPv4) 基础设施过渡到互联网协议版本 6 (IPv6) 的后续寻址和路由系统。由于 IPv4 和 IPv6 网络不能直接互操作, 因此过渡技术的设计允许任一网络类型上的主机与任何其他主机进行通信。

为满足其技术标准, IPv6 必须有一个从当前 IPv4 直接过渡的计划。互联网工程任务组 (IETF) 通过 IETF 互联网草案和征求意见程序开展工作组和讨论, 为实现这一目标开发这些过渡技术。

这些技术大致可以分为三类：双栈技术（Dual Stack）、隧道技术（Tunneling）和翻译技术（Translation）。

### 3 Dual Stack 技术

双协议栈 IP 实现在通用物理层实现（如以太网）之上，在计算机或网络设备的操作系统中提供完整的 IPv4 和 IPv6 协议栈。这允许双协议栈主机同时参与 IPv6 和 IPv4 网络。RFC 4213 对该方法进行了定义。

在操作系统中实施双协议栈的设备拥有 IPv4 和 IPv6 地址，可以使用 IPv4 或 IPv6 与局域网或互联网中的其他节点通信。两种 IP 协议都使用 DNS 协议来解析完全合格的域名和 IP 地址，但双协议栈要求解析 DNS 服务器能解析两种类型的地址。这种双协议栈 DNS 服务器在 A 记录中保存 IPv4 地址，在 AAAA 记录中保存 IPv6 地址。根据要解析的目标地址，DNS 名称服务器可能会返回 IPv4 或 IPv6 IP 地址，或同时返回这两种地址。需要在主机或 DNS 服务器上配置默认地址选择机制或首选协议。IETF 发布了“快乐眼球”（Happy Eyeballs）来帮助双协议栈应用程序，使其可以同时使用 IPv4 和 IPv6 进行连接，但如果存在可用的 IPv6 连接，则优先选择 IPv6 连接。不过，主机与 DNS 服务器返回 IPv6 地址的服务之间的所有路由器也需要实施双协议栈。只有当网络能使用 IPv6 版本的路由协议转发 IPv6 数据包时，双协议栈客户端才应配置为首选 IPv6。双协议栈网络协议就位后，应用层就可以迁移到 IPv6。

虽然主要的操作系统和网络设备供应商都支持双协议栈，但传统的网络硬件和服务器并不支持 IPv6。

#### 3.1 Dual-Stack Lite (DS-Lite)

Dual-Stack Lite 技术不涉及向用户端设备（CPE）分配 IPv4 地址以提供互联网接入。CPE 将 IPv4 数据包封装在 IPv6 数据包中。CPE 使用其全局 IPv6 连接将数据包传送到 ISP 的运营商级 NAT（CGN），CGN 有一个全局 IPv4 地址。原始 IPv4 数据包将被恢复，并对 IPv4 数据包执行 NAT，然后路由到公共 IPv4 互联网。CGN 通过记录 CPE 公共 IPv6 地址、私有 IPv4 地址以及作为会话的 TCP 或 UDP 端口号来唯一识别流量。

轻量级 4over6 扩展了 DS-Lite，将 NAT 功能从 ISP 端移至 CPE，从而无需实施运营商级 NAT。将 NAT 功能转移到 CPE 允许 ISP 减少每个用户的状态跟踪量，从而提高转换基础设施的可扩展性。

#### 3.2 应用

- Google: Google 在其全球基础设施中广泛采用了双栈技术，使其能够同时支持 IPv4 和 IPv6 访问。Google 的许多服务（如搜索、Gmail 和 YouTube）都通过双栈技术提供。
- Facebook: Facebook 也是采用双栈技术的先驱之一，确保其平台在全球范围内可通过 IPv4 和 IPv6 访问。Facebook 的双栈部署有助于提高网络性能和用户体验。
- 微软: 微软在其 Azure 云服务中实现了双栈支持，使客户能够部署和管理同时支持 IPv4 和 IPv6 的应用程序和服务。

- 亚马逊: 亚马逊 Web 服务 (AWS) 支持双栈配置, 使其客户能够在 AWS 云中运行 IPv4 和 IPv6 应用程序。AWS 的许多服务, 如 EC2 和 S3, 都提供了双栈支持。
- 思科: 思科在其网络设备和操作系统中全面支持双栈技术, 使企业能够部署支持 IPv4 和 IPv6 的网络基础设施。
- 苹果: 苹果公司在其设备和服务中广泛采用了双栈技术。iOS 和 macOS 设备均支持双栈配置, 确保用户可以通过 IPv4 和 IPv6 访问互联网。

## 4 NAT64 技术

NAT64 是一种 IPv6 过渡机制, 通过使用一种网络地址转换 (NAT) 形式, 促进 IPv6 和 IPv4 主机之间的通信。NAT64 网关是 IPv4 和 IPv6 协议之间的转换器, 为此它至少需要一个 IPv4 地址和一个由 32 位地址空间组成的 IPv6 网段。为这项服务预留的“知名前缀”是 64:ff9b::/96。

IPv6 客户端使用 IPv6 网段的主机部分嵌入其希望通信的 IPv4 地址, 从而产生一个 IPv4 嵌入式 IPv6 地址 (因此 IPv6 网段中的地址空间为 32 位), 并向产生的地址发送数据包。NAT64 网关在 IPv6 地址和 IPv4 地址之间创建映射, 映射可以手动配置或自动确定。

### 4.1 工作原理

一个简单的 NAT64 安装可能由一个网关和两个接口组成, 这两个接口分别连接到一个 IPv4 网络和一个 IPv6 网络。来自 IPv6 网络的流量通过网关进行路由, 网关执行所有必要的转换, 以便在两个网络之间传输数据包。然而, 由于 IPv6 地址空间比 IPv4 地址空间大得多, 这种转换不是对称的, 因此不可能实现一对一的地址映射。网关维护 IPv6 到 IPv4 地址映射, 当来自 IPv6 网络的第一个数据包到达 NAT64 网关时, 可通过自动算法 (无状态映射) 或特殊的手动转换 (有状态映射) 建立 IPv6 到 IPv4 地址映射。

无状态翻译适用于在纯 IPv4 服务器前使用 NAT64 翻译器, 使远程纯 IPv6 客户端能够访问这些服务器。有状态翻译适用于在客户端或服务提供商处部署, 允许纯 IPv6 客户端主机与远程纯 IPv4 节点连接。

一般来说, NAT64 设计用于由 IPv6 主机发起的通信。包括静态地址映射在内的一些机制允许反向情况。

并非所有类型的资源都能通过 NAT64 访问。嵌入 IPv4 字面地址的协议, 如 SIP 和 SDP、FTP、WebSocket、Skype、MSN, 以及任何其他包含 IPv4 字面地址的内容都被排除在外, 但双栈网络代理允许纯 IPv6 客户端访问 URL 中包含 IPv4 字面地址的网页。不过, 使用 NAT64 的 464XLAT 允许通过纯 IPv6 连接使用这些协议。对于 SIP 和 FTP, 也可以使用应用级网关或使用带有 PREFIX64 扩展的端口控制协议来解决这个问题。

### 4.2 应用

- T-Mobile USA: T-Mobile USA 在其网络中广泛采用 NAT64 和 464XLAT 技术, 使其移动用户能够无缝地在 IPv6 和 IPv4 网络之间切换, 提供了稳定和高效的网络连接。

- **Verizon Wireless:** Verizon Wireless 采用 NAT64 技术，为其用户提供 IPv6 支持，并确保在过渡期间与 IPv4 资源的互通。
- **SK Telecom:** 韩国 SK Telecom 利用 NAT64 和 464XLAT 技术，推动其网络向 IPv6 的过渡，提高了网络的可扩展性和性能。
- **Orange:** 法国电信运营商 Orange 在其网络中部署了 NAT64 技术，提供了稳定的 IPv6 连接，并确保与 IPv4 服务的兼容性。
- **Swisscom:** 瑞士电信运营商 Swisscom 通过 NAT64 技术，确保其用户能够访问 IPv6 和 IPv4 资源，实现了平稳的网络过渡。
- **Internode:** 澳大利亚 ISP Internode 采用 NAT64 技术，为其用户提供 IPv6 支持，并确保与现有 IPv4 服务的兼容。

## 5 6RD 技术

6rd 是一种促进 IPv6 在互联网服务提供商 (ISP) 的 IPv4 基础设施上快速部署的机制。

该协议源于 6to4 (一种在 IPv4 网络上传输 IPv6 数据包的现有机制)，但有一个重大变化，即它完全在终端用户的 ISP 网络内运行，从而避免了 6to4 设计中固有的重大架构问题。6rd 这个名字既是指它能

实现 IPv6 的快速部署，也是指它的发明者 Rémi Després 的首字母缩写 (RD)。

关于 6rd 原则及其首次在 ISP Free 中的应用的描述发表在 RFC 5569 中，为 IETF 标准化而准备的 6rd 规范作为 RFC 5969 提供。

### 5.1 与 6to4 比较

6to4 的工作原理是利用中继服务器在本地 IPv6 和 IPv4 之间进行流量中继，这些服务器会向准备提供中继服务的网络发布通用 IPv4 和 IPv6 前缀广告，但不能保证所有本地 IPv6 主机都有通往中继服务器的有效路由。因此，不能保证所有本地 IPv6 主机都能到达 6to4 主机。即使有中继站，通常也是由第三方运营，随着流量的增长，第三方没有义务保持良好的服务质量。6rd 改变了这一模式，让每个 ISP 使用自己的一个 IPv6 前缀，而不是 6to4 标准化的特殊 2002::/16 前缀，这样就保证了提供商的 6rd 主机可以从所有可以到达其 IPv6 网络的本地 IPv6 主机到达。由于中继完全由 ISP 控制，因此 ISP 对客户的服务质量负全部责任。

由于 6rd 中继器只能由同一管理实体控制下的有限主机使用，因此也减少了流量匿名攻击的范围，如 6to4 中可能出现的攻击。

### 5.2 应用

- **Free:** 法国的互联网服务提供商 Free 是最早采用 6rd 技术的公司之一。通过 6rd，Free 迅速为其用户提供了 IPv6 支持，解决了 IPv4 地址枯竭的问题。
- **Comcast:** 美国的 Comcast 在其网络中实施了 6rd 技术，以便快速部署 IPv6 服务，并确保其用户能够无缝访问 IPv6 和 IPv4 资源。

- **Swisscom:** 瑞士电信运营商 Swisscom 利用 6rd 技术, 在其 IPv4 基础设施上快速部署了 IPv6 服务, 提供了稳定和高效的网络连接。
- **T-Mobile Czech Republic:** 捷克的 T-Mobile 利用 6rd 技术, 推动其网络向 IPv6 的过渡, 提高了网络的可扩展性和性能。
- **Internode:** 澳大利亚 ISP Internode 采用 6rd 技术, 快速为其用户提供了 IPv6 支持, 并确保与现有 IPv4 服务的兼容。
- **SoftBank:** 日本的 SoftBank 通过 6rd 技术, 在其网络中部署了 IPv6 服务, 确保用户能够访问 IPv6 和 IPv4 资源, 实现了平稳的网络过渡。

## 6 比较与分析

在选择合适的 IPv6 过渡技术时, 网络工程师和研究人员需要考虑多个因素, 包括网络规模、现有的网络基础设施、未来的扩展需求以及成本等。以下是对 NAT64、Dual Stack 和 6RD 技术的综合比较:

### 6.1 NAT64

NAT64 是一种基于网络地址转换 (NAT) 的技术, 主要用于实现 IPv6 和 IPv4 之间的互通。其核心在于使用一个 NAT64 网关来转换 IPv6 和 IPv4 数据包。

- 优点:
  - 支持 IPv6 和 IPv4 之间的互通, 有助于 IPv6 网络访问 IPv4 资源。
  - 对 IPv4 地址资源的依赖较少, 减少了对 IPv4 地址的需求。
- 缺点:
  - 需要在网络中部署 NAT64 网关, 增加了网络架构的复杂性。
  - 对一些应用程序和协议的支持有限, 尤其是那些嵌入 IPv4 地址的应用。
  - 性能可能受到 NAT 转换的影响, 尤其是在高流量环境中。
- 适用场景:
  - 适用于希望逐步迁移到 IPv6 但仍需要与 IPv4 设备通信的环境, 如企业内部网络和数据中心。
  - 适合拥有大量 IPv6 客户端但需要访问 IPv4 资源的网络, 如移动运营商网络。

### 6.2 Dual Stack

Dual Stack 技术允许设备同时运行 IPv4 和 IPv6 协议栈, 从而能够在任何情况下使用两种协议进行通信。

- 优点:
  - 同时支持 IPv4 和 IPv6, 兼容性高, 能够无缝过渡。
  - 无需翻译, 性能较好, 减少了延迟和转换带来的开销。
- 缺点:
  - 需要同时维护 IPv4 和 IPv6 网络, 增加了管理和运营的复杂性。

- 对 IPv4 地址资源的需求依然存在，无法完全解决 IPv4 地址枯竭的问题。
- 对现有基础设施的要求较高，可能需要升级硬件和软件。
- 适用场景：
  - 适用于拥有足够 IPv4 地址资源且希望逐步引入 IPv6 的网络环境，如大型企业和数据中心。
  - 适合希望提供全面 IPv6 支持的互联网服务提供商（ISP）。

### 6.3 6RD

6RD（Rapid Deployment）是一种基于 IPv4 基础设施快速部署 IPv6 的机制，主要用于 ISP 环境。

- 优点：
  - 部署快捷，能够在现有 IPv4 基础设施上快速部署 IPv6 服务。
  - 避免了传统 6to4 方案的架构问题，提供了更稳定和高效的连接。
  - 完全在 ISP 控制范围内运行，提高了服务质量和安全性。
- 缺点：
  - 依赖于 ISP 的支持和配置，用户端无法自主实现。
  - 对一些应用程序和协议的支持可能不如其他方案，尤其是那些对 IPv4 地址依赖较强的应用。
  - 需要在 ISP 端部署 6RD 网关，增加了运营商的成本和管理负担。
- 适用场景：
  - 适用于需要快速部署 IPv6 的 ISP 和大规模网络环境，如大型电信运营商和互联网服务提供商。
  - 适合希望在现有 IPv4 基础设施上扩展 IPv6 服务的网络环境，尤其是那些面临 IPv4 地址枯竭压力的地区。

## 7 总结

IPv6 过渡是一个复杂而长期的过程，不同的过渡技术各有优劣，适用于不同的网络环境和需求。本文通过对 NAT64、Dual Stack、6RD 等主要过渡技术的详细分析和比较，提供了一个系统的参考，帮助网络工程师和研究人员在实际应用中选择最适合的过渡方案。在未来的发展中，随着更多网络逐步向 IPv6 迁移，过渡技术的选择将变得更加关键。

## 参考文献

- [1] M. Bagnulo, P. Matthews, and I. van Beijnum. *Stateful NAT64: Network Address and Protocol Translation from IPv6 Clients to IPv4 Servers*. Internet Engineering Task Force (IETF). RFC 6146. Proposed Standard. Apr. 2011. doi: [10.17487/RFC6146](https://doi.org/10.17487/RFC6146).
- [2] C. Bao et al. *IPv6 Addressing of IPv4/IPv6 Translators*. IETF. RFC 6052. Proposed Standard. Updates RFC 4291. Oct. 2010. doi: [10.17487/RFC6052](https://doi.org/10.17487/RFC6052).

- [3] M. Boucadair. *Discovering NAT64 IPv6 Prefixes Using the Port Control Protocol (PCP)*. Internet Engineering Task Force. RFC 7225. Proposed Standard. May 2014. doi: [10.17487/RFC7225](https://doi.org/10.17487/RFC7225).
- [4] Y. Cui et al. *Lightweight 4over6: An Extension to the Dual-Stack Lite Architecture*. Internet Engineering Task Force. RFC 7596. Proposed Standard. July 2015. doi: [10.17487/RFC7596](https://doi.org/10.17487/RFC7596).
- [5] A. Durand et al. *Dual-Stack Lite Broadband Deployments Following IPv4 Exhaustion*. Internet Engineering Task Force (IETF). RFC 6333. Proposed Standard. Aug. 2011. doi: [10.17487/RFC6333](https://doi.org/10.17487/RFC6333).
- [6] Silvia Hagen. *IPv6 Essentials: Integrating IPv6 into Your IPv4 Network*. O'Reilly Media, Inc., 2014, p. 222. ISBN: 9781449335267.
- [7] *IPv6 Rapid Deployment on IPv4 Infrastructures (6rd)*. IETF. RFC 5569.
- [8] *IPv6 Rapid Deployment on IPv4 Infrastructures (6rd) – Protocol Specification*. IETF. RFC 5969.
- [9] Alex Mavrin. *NAT64 power and limitations*. Archived from the original on 8 January 2014. Retrieved 6 January 2014. 2014.
- [10] M. Mawatari, M. Kawashima, and C. Byrne. *464XLAT: Combination of Stateful and Stateless Translation*. IETF. RFC 6877. Informational. Apr. 2013. doi: [10.17487/RFC6877](https://doi.org/10.17487/RFC6877).
- [11] *NAT64 Technology: Connecting IPv6 and IPv4 Networks*. Archived from the original on 2020-11-12. Retrieved 2021-01-12. 2020.
- [12] E. Nordmark and R. Gilligan. *Basic Transition Mechanisms for IPv6 Hosts and Routers*. IETF. RFC 4213. Archived from the original on 11 January 2024. Retrieved 20 August 2012. Oct. 2005. doi: [10.17487/RFC4213](https://doi.org/10.17487/RFC4213).