P-Teredo 服务穿越 Symmetric NAT 的解决方案

张曦煌，夏伏洋
（江南大学 信息工程学院，江苏 无锡 214122）

摘 要：介绍了 Teredo 服务的运行原理和 NAT 设备类型。重点描述了 P-Teredo 服务的架构和应用端口预测算法在该服务中获取客户端 IPv6 地址的方法。为了提高网络连接成功率，提出了几个提高端口预测命中率的方法，分析了网络连接成功率和系统性能。

关键词：Teredo P-Teredo 网络 网络地址转换 命中率

IPv6 作为下一代互联网的核心技术提供了几乎无限的地址空间，改进了安全性和数据完整性，具有自动地址配置、移动计算和数据组播等功能，应用 IPv6 后能为用户提供更为高效的服务质量。但是 IPv6 不能在短期内完全替代 IPv4，而是形成了 IPv4 和 IPv6 网络同时共存的局面。由于 NAT 仍是解决当前公用 IP 地址紧缺和网络安全问题的最有力手段，因此如何使位于 NAT 后的 IPv4 节点与 IPv6 节点通信成为当前研究的热点。Teredo 服务[1]是通过将 IPv6 数据包封装在 IPv4 的 Udp 数据包中进行数据传输的，实现了 IPv4 NAT 后的节点与 IPv6 节点间的通信。但 Teredo 服务却不能穿越 Symmetric NAT，因为客户机通过此 NAT 发送报文到不同的目的地址时将被映射为不同的地址和端口，所以它的穿越问题最为复杂。针对这个难题，基于预测算法的 Teredo(P-Teredo)服务被成功应用于穿越 Symmetric NAT，使得位于 Symmetric NAT 后的 IPv4 节点顺利获得 IPv6 网络连接。

1 Teredo 服务

Teredo 是一种使位于 NAT 设备后的 IPv4 结点获得 IPv6 网络连接的服务。运行 Teredo 服务需要有 Teredo 客户机、Teredo 服务器和 Teredo 中继器。Teredo 客户机可以访问 IPv4 网络，通过发送 Teredo 服务请求到 Teredo 服务器上以获得 IPv6 网络的访问权。Teredo 服务器通过全局路由地址访问 IPv4 网络并为 Teredo 客户机提供 IPv6 连接。Teredo 中继器在 Teredo 客户机与 IPv6 网之间，通过 Teredo 服务执行数据处理和转发功能。Teredo 服务的运行原理[2]是：首先 Teredo 客户端会产生一个 IPv6 的路由器请求的数据包，然后封装在 IPv4 Udp 数据包里通过 IPv4 网络发给 Teredo 服务器。服务器接收到这个 IPv6 的路由器请求消息后，向客户端回传路由器响应消息，这个响应消息包含一个 IPv6 的前缀及 Teredo 客户机经过 NAT 映射后的公有 IP 地址和端口号。Teredo 客户机根据这个响应消息生成自己的 IPv6 地址，并用该地址与 IPv6 节点进行通信。IPv6 地址格式如图 1 所示。

Prefix	Server IPv4	Flag	Port	Address

图 1 IPv6 地址格式

Prefix：32 位 Teredo 服务地址；
Server IPv4：Teredo 服务器的 IPv4 地址；
Flag：16 位指明地址和 NAT 设备的类型；
Port：客户端模糊的外部映射 Udp 端口；
Address：客户端模糊的映射 IPv4 地址。

2 NAT 设备类型

(1) Full cone NAT：从同一内部 IP 地址和端口来的所有请求都映射到相同的外部 IP 地址和端口，而且任何外部主机都可以发送报文到内部主机，通过发送报文到映射的外部地址[3]。

(2) Restricted NAT：从相同的内部 IP 地址和端口的所有请求，映射到相同的外部 IP 地址和端口。但是不同于前者的是一个外部主机只有在收到内部主机发送的报文后才能回发报文到内部主机。

(3) Port Restricted NAT：与 Restricted NAT 相似，但一个外部主机要用外部 IP 地址 X 和端口 *P*，发送报文到内部的主机，只有这个内部主机前面已经发送过一个报文到这个 IP 地址 X 及端口 *P*。

(4) Symmetric NAT：从相同的内部 IP 地址和端口，到不同的目的地址和端口请求时，映射到不同的外部 IP 地址和端口。而且外部的主机，只有在接收到一个报文，才能发送一个 UDP 报文回来到内部的主机。

Teredo 服务能很好地穿越前三种类型的 NAT，但它穿越不了 Symmetric NAT。原因是在 Symmetric NAT 中，向不同的 IP 地址和端口发送的数据包，其外部地址将会被映射为不同的端口。这样，客户端节点就无法从

Teredo Server 的响应消息中得到有效的端口信息，从而无法准确地建立客户端的 IPv6 地址。因此无法完成对这种类型 NAT 的穿越。为了解决对 Symmetric NAT 的穿越，在 Teredo 的基础上，提出一种基于预测算法的 NAT 穿越方法 P-Teredo。

3 基于端口预测的 P-Teredo 服务

3.1 P-Teredo 架构

Teredo 服务不能实现对 Symmetric NAT 穿越的原因是无法预测 Teredo 客户机在下一次传输数据时所分配到的 IP 地址和端口号。P-Teredo 服务的思想是 Teredo 客户机通过多次发送请求到 Teredo 服务器以获得足够的预测信息，根据这些信息预测实际传输时可能会分配到的端口号，从而实现对 Symmetric NAT 的穿越[4]。图 2 为 P-Teredo 服务的系统架构。

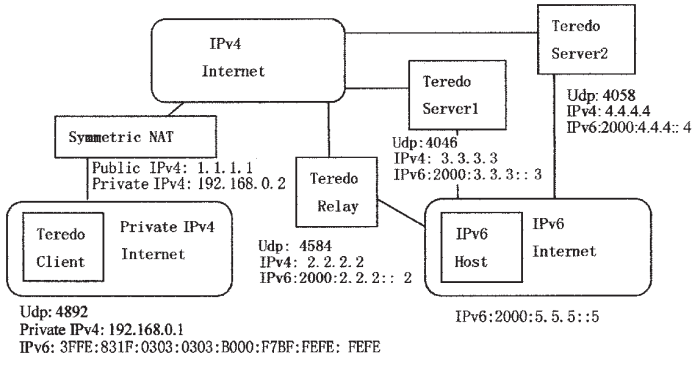

图 2 P-Teredo 服务的系统架构

由于 Teredo 客户机位于 Symmetric NAT 后，它在 NAT 上的映射端口是不断变化的，所以要使该 Teredo 客户机与外部网络节点通信就必须要知道 NAT 的端口分配策略。图 2 中位于 Symmetric NAT 后的 Teredo Client 要与 IPv6 网内的 IPv6 Host 进行通信，系统中设置了两个 Teredo 服务器 Teredo Server1 和 Teredo Server2，用于当 Teredo Client 向其发送的路由器请求信息时返回相应的响应消息。Teredo Relay 的功能是实现数据包转发，它将 Teredo Host 发送过来的 IPv6 数据包封装在 IPv4 Udp 数据包中在 IPv4 网络上传输[4]，并将 Teredo Client 发送过来的 IPv4 Udp 数据包解包为 IPv6 数据包并发送到 IPv6 Host。

3.2 端口预测算法

在 Symmetric NAT 上端口常用线性增长的端口分配策略[6]。位于 Symmetric NAT 后的同一个 IP 地址发送数据到不同的目的地时，在 NAT 上映射的端口号之间存在线性增长关系。应用 P-Teredo 服务穿越 Symmetric NAT 的端口预测算法描述如下：

(1)Teredo Client 分别向 Teredo Server1 和 Teredo Server2 发送请求消息，从两次响应消息中可以得到 Teredo Client 在 NAT 上映射的外部地址分别为 1.1.1.1：4096，1.1.1.1：4098。

(2)根据得到的两个端口号，计算端口分配间距 ΔP=4098-4096=2。

(3) 预测 Teredo Client 实际建立连接时，将要被分配的端口号 P=Pl+ΔP=4098+2=4100(Pl 为最后一次映射的端口号)。

(4) Teredo Client 根据 Teredo Server1 返回的响应消息得到此次报文传送在 NAT 上映射的 IP 地址。Teredo 前缀 (32 位)=0x3FFE:831F，Teredo 服务器 IPv4 地址(32 位)=0x03030303，标志位(16 位)= 0xB000(Symmetric NAT)，外部端口(16 位)=4100 xor 0xFFFF=0xF7BF，外部地址(32 位)=0x01010101 xor 0xFFFFFFFF=0xFEFEFEFE。Teredo Client 的 IPv6 地址为 3FFE:831F:0303:0303:B000:F7BF:FEFE: FEFE。

(5) Teredo Client 根据此 IPv6 地址发送连接请求消息到 IPv6 Host，其 IP 地址为 2000:5.5.5::5，然后 IPv6 Host 发送相应的响应消息到 Teredo Client 确认连接。

3.3 提高端口预测命中率

基于预测的端口分配策略中存在临界时间段和端口分配范围的问题[6]。临界时间段是指客户端向服务器发送连接请求消息开始到客户端向目的主机发送连接请求数据包为止所经历的时间段。应用程序 A1 和应用程序 A2 为运行在 Symmetric NAT 后的两个应用程序。A1 在 $t0$ 时刻向两个 Teredo 服务器分别发送请求消息，根据服务器返回的响应消息获得 Teredo 客户机在外部的映射地址和端口分配间距，并根据这个地址预测实际传输时可能被分配的端口号；随后 A2 在 $t1$ 时刻向远程主机发送一个数据包，当数据包通过 NAT 时，它很可能使用了 A1 预测的端口号；而 A1 在 $t2$ 时刻根据刚才所预测的端口号发送数据包到远程主机则发生了错误，因为 A1 预测的端口号已经被 A2 所使用。所以准确预测的临界时间段 Δt 是 $t0$ 到 $t2$ 这段时间。因此，为了提高预测的准确率，必须尽可能使临界时间段 Δt 最小。端口分配范围是指 Symmetric NAT 进行端口分配时，它所分配的端口在某一个范围之间(如 0xa000~0xafff)。这些端口是循环分配的，当最后一个端口分配完时，再从端口首部开始继续分配。在 P-Teredo 服务中造成端口预测失败的原因有以下几点：

(1) 在临界时间段 $t0$ 与 $t2$ 之间有另一个请求发生。

(2) 在限制端口分配范围的分配方案中，端口到达了端口范围的底部。

(3) 本地网络中高的 Udp 使用率。

对于上面提及的端口预测失败原因，有如下改进方法：(1)降低 Udp 使用率。尽量减少 Symmetric NAT 后应用程序同时开启的数量，使得 Udp 使用率降低。(2)最小化临界时间段。通过优化算法使得 $t0$ 到 $t2$ 的时间间隔尽可能短，可以在临界时间段内减小另一个请求发生的概率，以此提高端口预测的准确率。(3)多端口预测策略。在 NAT 上设置一个端口使用情况的状态表，当创建

一个新的连接时，先从表中查看这个端口的使用情况。如果这个端口已经被使用，则用下一个预测的端口号，根据新的端口号重新建立客户机的IPv6地址，并用新的IPv6地址继续向Teredo Host发送建立连接的请求，直到彼此之间成功建立网络连接为止。假设预测的端口号为P,则实际传输时的端口号可能是：$P+1,P+2,\cdots,P+N(N>1$,一般取$N=4)$和$P+2\times\Delta P,P+3\times\Delta P,\cdots,P+n\times\Delta P$, $Pf(n>1$, 一般取$n=4$；Pf为第一次映射的端口)。通过多端口预测，可以提高端口的命中率，使网络连接的成功率提高。

4 性能分析

为了检验此方法在实际应用中的性能，笔者编写了一个程序对该方法进行测试。首先，测试该方法建立网络连接的成功率，由于使用基于端口预测算法的性能与客户端Udp使用率的高低有很大关系，因此测试客户机在不同Udp负载率情况下网络连接的成功率。在低负载(2个应用程序)、中负载(6个应用程序)和高负载(20个应用程序)情况下，使用预测算法获得网络连接，每种负载方式下进行30次连接测试，测试结果如表1所示。

表1 测试结果

	建立连接次数	成功次数	成功率%
低负载	30	30	100
中负载	30	30	100
高负载	30	27	92

从表1中可以看到，在低负载和中负载时算法工作性能良好，网络连接的成功率为100%。而在高负载下连接的成功率有所下降，主要是因为在临界时间段内新请求发生的概率大大增加，一次命中端口的概率下降，必须根据预测的端口建立新的客户端IPv6地址后，再进行端口连接尝试，这增加了系统开销，降低了网络连接成功率。

基于预测算法的P-Teredo服务很好地解决了Teredo服务无法穿越Symmetric NAT的难题。由于采用多端口预测算法，提高了网络连接的成功率，使Teredo服务的应用范围更加广泛。但是，P-Teredo服务也存在着一些不足，因为它是基于Teredo服务的，只能完成UDP类型NAT的穿越而不能完成TCP类型NAT的穿越。在算法中设定Symmetric NAT上端口分配是线性增长的策略，具有一定的局限性，因为如果NAT上的映射端口是随机分配的，应用该算法就无法完成NAT的穿越。但是在实际应用领域中，Symmetric NAT的端口分配策略基本都是线性的，所以该算法有其实用性。

参考文献

[1] HUITEMA. Tunneling IPv6 over UDP through NATs[C], IETF, 2004.12.

[2] HUANG S M, WU Q, LIN Y B. Tunneling IPv6 through NAT with Teredo Mechanism [J], IEEE, 2005.

[3] 路松峰,胡维琦.基于代理机制改进UDP封装方式实现VPN穿越NAT[J].计算机应用,2004,24(10):1-2.

[4] MIDCOM W G, TAKEDA Y. Symmetric NAT traversal using. STUN [C], IETF, 2003,6.

[5] ROSENBERG J, WEINBERGER J. STUN - Simple traversal of user datagram protocol (UDP) Through Network Address Translators (NATs) [S], RFC 3489, 2003,3.

[6] 王晓枫,钱夕元.对UDP中穿越NATs的IPv6隧道的改进[J].计算机工程,2004,30(13):1-3.

(收稿日期：2006-09-12)