

# IPv6 與 NAT 網路傳輸之效能分析

陳懷恩 鄭仕遠 邱俊傑

國立宜蘭大學資訊工程學系

wechen@niu.edu.tw

## 摘要

現在普遍使用的網際網路位址(IP Address)是第四版,簡稱 IPv4。隨著寬頻網路的普及與無線網路的快速發展,有越來越多的設備連上網際網路。而 IPv4 位址不足的問題有日趨嚴重。目前的解決方案有使用網路位址轉換(Network Address Translation, 簡稱 NAT)以及採用新世代網際網路通訊協定(Internet Protocol version 6, 簡稱 IPv6 或 IPng)。在相關文獻中,大多著重分析比較 IPv4 與 IPv6 協定功能的不同與效能差異。為了選擇合適的解決方案,本論文以效能的觀點討論採用 NAT 與 IPv6 機制的差異。本論文建構了一個實驗環境,採用商用路由器 CISCO 2811 以及個人電腦為基礎(PC-based)之路由器作為待測裝置(Device Under Test, 簡稱 DUT),並以硬體測試工具(SmartBits 600B)產生不同長度的測試封包作壓力測試。觀察 NAT 與 IPv6 機制在兩個待測裝置中的效能表現。效能結果包括吞吐量(Throughput)、封包遺失率(Packet Loss Rate),以及封包延遲(Packet Delay)。

**關鍵詞:** 網際網路通訊協定第 4 版、網際網路通訊協定第 6 版、網路位址轉換

## Abstract

In the current stage, the Internet Protocol version 4 (IPv4) addresses are widely used all over the world. However, with the easier broadband accesses and the rapidly development of wireless network, there are more and more devices/machines connect to Internet. Therefore, the IP address shortage problem is getting serious. Network Address Translation (NAT) and Internet Protocol version 6 (IPv6) are adopted to solve the problem. In the previous works, most articles compare the different functions and the performance between IPv4 and IPv6. To choose the suitable solution, this paper discusses the difference between NAT and IPv6 from the performance point of view. This paper conducts an experimental environment which includes a commercial router (i.e., CISCO 2811) and a PC-based router as the devices under test (DUTs). In addition, a hardware-based tester (i.e., SmartBits 600B) is adopted to generate variable-length test packets to evaluate the performance results of the DUTs. This paper compares and analyzes the performance of NAT and IPv6 on the DUTs. The results include the throughput, the packet loss rate and the delay.

**Keywords:** IPv4, IPv6, NAT.

## 1. 前言

網際網路通訊協定第 4 版(Internet Protocol Version 4, IPv4)是現今網路被大量使用的網際網路定址協定,由於目前 IPv4 位址已被網際網路號碼分配局(Internet Assigned Numbers Authority, IANA)分配完畢,往後會有更多需要使用網路服務的裝置沒有 IPv4 位址可用的窘境,例如使用網路電話(Voice Over Internet Protocol, VoIP)所需的 IP 位址、因應物聯網(Internet of Things, IOT)所產生大量的網路裝置、第三代合作夥伴計畫(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)所提出大量的機器與機器(Machine to Machine, M2M)通訊架構等[1]。為解決 IPv4 不夠的問題,可使用近期經常被討論的網際網路通訊協定第 6 版(Internet Protocol Version 6, IPv6),其是由網際網路工程任務組(Internet Engineering Task Force, IETF)新訂定的網際網路協定標準,是被認為可延續 IPv4 網路協定的新一代網路技術。IPv6 在位址數量上大幅增加外,更進一步針對安全性與 QoS 等問題加以改進。另一個解決方案則為網路位址轉換(Network Address Translation, NAT)機制, NAT 可將多個私有的 IPv4 對應到一個公有的 IPv4 上,因此可節省部分的 IPv4 位址。

相關的論文旨在討論 IPv4 與 IPv6 的效能比較[3-7],以及 IPv6 與 NAT 之比較討論[8-9],而缺少分析 IPv6 與 NAT 之效能的差異性。本論文認為 IPv4 的解決方案為 IPv6 與 NAT 機制,因此本論文選擇以 CISCO Router 2811 與 PC-based Router [10]作為實驗測試平台,並以 SmartBits 600B [2]作為壓力測試的工具,進行分析與比較 IPv6 與 NAT 封包在網路傳輸時的效能,並介紹以 netfilter 實現 IPv6 與 NAT 轉送的方法,最後為實驗結果與結論。

## 2. 封包傳輸成本分析

封包傳輸成本分析的方法是使用 CISCO 2811 路由器以及 PC-based Router 兩種不同的平台,實際測量 NAT 伺服器以及 IPv6 路由器對不同負載(Payload)長度之使用者資料包協定(User Datagram Protocol, 簡稱 UDP)封包,其吞吐量(Throughput)、平均延遲(Average latency)、以及封包遺失率(Packet loss rate)進行比較。目的在於比較純 IPv6 環境中以及 Private IPv4 環境中,IPv6 路由器與 NAT 伺服器的封包傳輸效能,藉此來比較 IPv6 定址機制與 NAT 定址機制。以下將分成三個部分來說明, CISCO 路由器平台測試實驗、PC-based Router 平台測試實驗,及 netfilter 實現 IPv6 與 NAT。

## 2.1 CISCO 路由器平台測試實驗

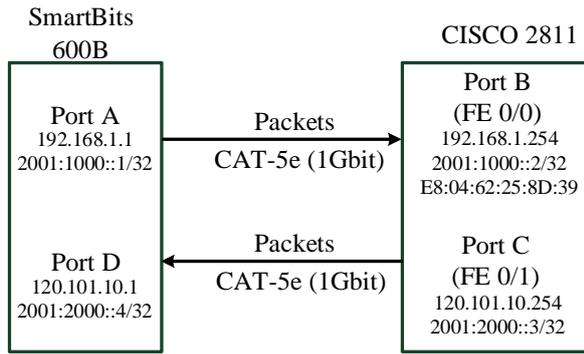


圖 1 CISCO 平台之 IPv6 與 NAT 實驗架構

CISCO 平台之 IPv6 路由器和 NAT 伺服器二個測試實驗，此實驗架構如圖 1 所示。本實驗中將 CISCO 2811 路由器設定成 IPv6 路由器和 NAT 伺服器，並透過網路線 CAT-5e 與 SmartBits 600B 相連接。CISCO 2811 路由器設定 Port B 的 IPv4/IPv6 位址設定為 192.168.1.254 與 2001:1000::2/32、Port C 的 IPv4/IPv6 位址設定為 120.101.10.254 與 2001:2000::3/32、Port B 的 MAC 位址為 E8:04:62:25:8D:39。CISCO 2811 Port B/C 的 IPv6 與 NAT 轉送配置說明如表 1 所示。

表 1 IPv6 與 NAT 轉送配置

```
interface FastEthernet0/0
ip address 192.168.1.254 255.255.255.0
ip accounting output-packets
ip nat inside
ip virtual-reassembly
duplex auto
speed auto
ipv6 address 2001:1000::2/32
!
interface FastEthernet0/1
ip address 120.101.10.254 255.255.255.0
ip accounting output-packets
ip nat outside
ip virtual-reassembly
duplex auto
speed auto
ipv6 address 2001:2000::3/32
ipv6 enable
!
ip nat pool test1 120.101.10.1 120.101.10.1
netmask 255.255.255.0
ip nat inside source list 1 pool test1
```

SmartBits 600B 設定 Port A 的 IPv4/IPv6 位址設定為 192.168.1.1 與 2001:1000::1/32、Port D 的 IPv4/IPv6 位址設定為 120.101.10.1 與 2001:2000::4/32。本實驗流程是利用測試軟體 SmartFlow，讓 SmartBits 600B 產生不同 Payload 長度的 IPv4/IPv6 UDP 封包，Payload 長度分別為 32 Bytes、64 Bytes、128 Bytes、256 Bytes、384 Bytes、

512 Bytes、640 Bytes、768 Bytes、896 Bytes、1024 Bytes、1152 Bytes、1280 Bytes、1408 Bytes，並對不同的 Payload 長度進行各 20 秒的測試。當 CISCO 2811 路由器接收到來自 SmartBits 600B 所產生的 IPv6 UDP 封包後，透過 Port C 收到的 UDP 封包轉送回 SmartBits 600B 的 Port D；或收到來自 SmartBits 600B 所產生的 IPv4 UDP 封包後，透過 Port C 將收到的 UDP 封包做 NAT 的位址轉換，將轉換過後的 UDP 封包傳送回 SmartBits 600B 的 Port D。藉此測出 IPv6 路由器和 NAT 伺服器對不同 Payload 長度的 UDP 封包之吞吐量、平均延遲，及封包遺失率。

## 2.2 PC-based Router 平台測試實驗

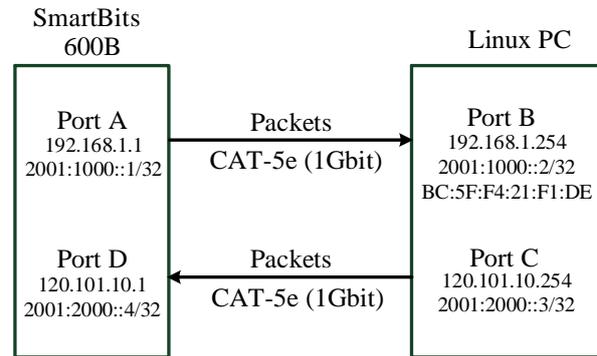


圖 2 PC-based Router 平台之 IPv6 與 NAT 實驗架構

本實驗分別將 PC-based Router 設定成 IPv6 路由器與 NAT 伺服器，透過網路線 CAT-5e 與 SmartBits 600B 相連接，此實驗架構如圖 2 所示。本實驗的流程中，SmartBits 600B 的 SmartFlow 設定以及測試項目同 CISCO 平台的實驗，不同的部份在 CISCO 2811 換成 PC-based Router。此 PC-based Router 的設定為 CPU 為 Intel I5-2500K、RAM 為 16GB、硬碟 WD 500GB、OS 為 ubuntu 12.04、Port B 的 IPv4/IPv6 位址設定為 192.168.1.254 與 2001:1000::2/32、Port C 的 IPv4/IPv6 位址設定為 120.101.10.254 與 2001:2000::3/32、Port B 的 MAC 位址為 BC:5F:F4:21:F1:DE。

## 2.3 netfilter 實現 IPv6 與 NAT

本論文利用 netfilter 實現 IPv6 與 NAT 轉送，IPv6 啟動轉送指令為 net.ipv6.conf.all.forwarding = 1，以及 NAT 啟動轉送指令為 net.ipv4.conf.all.forwarding = 1。

5 個規則鍵分別為 prerouting、postrouting、input、output 以及 forward。prerouting 為收到封包後判斷路由前所觸發的規則。postrouting 為本機判斷路由後傳送至網路介面前所觸發的規則。input 為目的網路位址為本機時所觸發的規則。output 為本機送出封包時所觸發的規則。forward 為封包經過路由判斷後，目的網路位址非本機時所觸發的規則。

2 張表格分別為 filter、nat。filter 表格的用途為依據使用者設定之過濾條件,例如:來源位址、目的位址、網路協定等條件,過濾連入伺服器之封包。nat 表格的用途為對封包來源網路位址及埠號 (Port)或目的網路位址及埠號進行置換。

本論文所提出以 netfilter 實現封包轉送處理流程以及規則鏈執行順序說明如下。

本論文使用 nat 表格提供之功能,針對封包來源位址以及埠號進行置換,但 nat 表格僅能夠記數每條連線的第 1 個封包,因此每次連線僅會記數 1 個封包數。

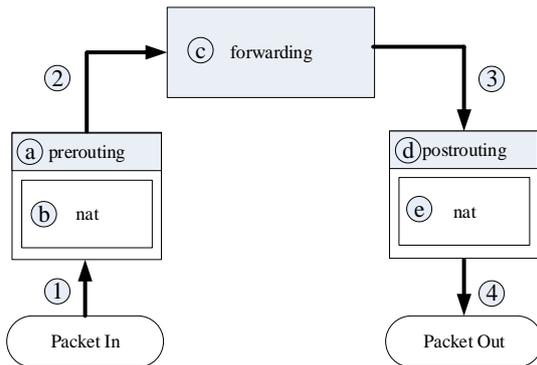


圖 3、netfilter 封包處理流程

1. 目的實體位址(MAC address)為本機之封包連入。
2. 封包進入 netfilter,在本機判斷封包路由前觸發圖 3 prerouting 規則鏈 ①,封包將套用圖 3 nat 表格 ② 中所設定之規則,修改封包目的網路位址及埠號。
3. 依據封包目的網路位址進行路由判斷。此封包已於 nat 表格 prerouting 規則鏈修改目的網路位址,故封包目的網路位址已非本機,將透過圖 3 forward 規則鏈 ③,轉送封包。
4. 判斷封包路由後,封包傳送至網路介面前觸發圖 3 postrouting 規則鏈 ④,封包將套用圖 3 nat 表格 ⑤ 中所設定之規則,透過 nat 表格中的規則修改封包來源網路位址為本機並修改封包來源埠號。

本論文使用 iptables 程式設定 netfilter,此程式為 Linux 中設定 netfilter 之應用程式式。

### 3. 實驗結果分析

本章節分成 CISCO 2811 為平台的 IPv6 路由器與 NAT 伺服器實驗結果,及 PC-based Router 為平台的 IPv6 路由器與 NAT 伺服器實驗結果等兩部分說明。測量結果包括吞吐量 (Mbps)、平均延遲 (μs),及封包遺失率 (%)。

### 3.1 CISCO 平台之實驗結果

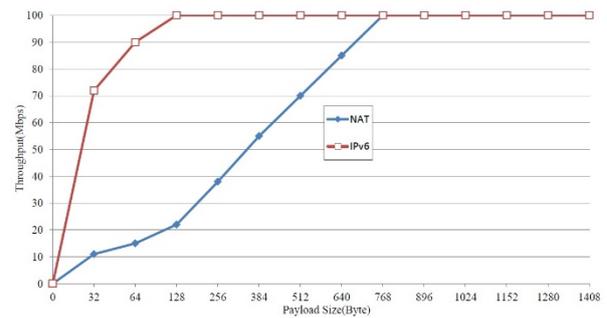


圖 6 CISCO 2811 路由器吞吐量

在壓力測試中,封包長度會影響吞吐量。舉例來說,以 100Mbps 的速率輸入測試封包,封包長度越短則封包個數越多。待測設備所需處理的封包個數就越多,資源(如 CPU)耗損也越大。圖 6 吞吐量測試中,可以發現在 Payload 長度為 32 Bytes 時,NAT 吞吐量只有 11 Mbps,這表示 NAT 伺服器在吞吐量超過 11Mbps 時,傳輸到 NAT 伺服器的封包數,超過 NAT 伺服器能轉換的封包數量,因此就會開始掉封包造成吞吐量降低。然而,當 Payload 長度為 32 Bytes 時,IPv6 路由器的吞吐量則為 72 Mbps,可以看出 NAT 伺服器吞吐量比 IPv6 路由器低 84% 效能。Payload 長度為 128 Bytes 時,IPv6 的吞吐量達到 100 Mbps,而 NAT 只有 22 Mbps。NAT 伺服器直到 Payload 長度為 768 Bytes 時,NAT 的吞吐量才達到 100 Mbps,所以可以看出 IPv6 路由器對 Payload 長度為 32 Bytes 到 640 Bytes 的吞吐量,都優於 NAT 伺服器。

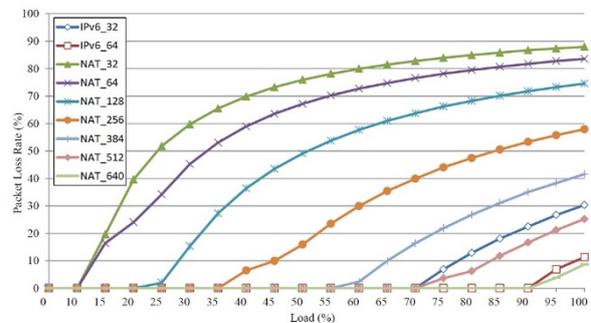


圖 7 CISCO 2811 路由器封包遺失率

當輸入測試封包速率超過封包處理速率時,封包會開始被丟棄。此時,隨著封包輸入的速率 (Load%)增加,封包遺失率也會隨之增加。圖 7 封包遺失率測試項目中, NAT 伺服器從 NAT\_32(表示輸入封包承載為 32 位元組)到 NAT\_640,都有封包遺失的現象。Payload 長度是 32 Bytes 時,NAT\_32 會隨著 Load 的增加,封包遺失率從 19% 增加到 87%。當 NAT 伺服器 Payload 長度為 640 Bytes(即 NAT\_640)時,封包遺失率在 Load 為 90% 後,才會上升至 10%。IPv6 路由器在 IPv6\_32 和 IPv6\_64 之測試有封包遺失的現象;Payload 長度是 32 Bytes 與 Load 為 70% 時,IPv6\_32 會隨著 Load 的增加,

封包遺失率會從 6% 增加至 30%，可觀察出 IPv6 路由器的封包遺失率比 NAT 伺服器少 57%。當 Payload 大於 64 Bytes 後，IPv6 路由器將不再掉封包，因此封包遺失率為 0%；而 NAT 伺服器必須到 Payload 為 768 Bytes 時才停止掉封包。因此在封包遺失率測試中，IPv6 路由器在 IPv6\_32 到 IPv6\_640 時，封包遺失率都小於 NAT 伺服器。

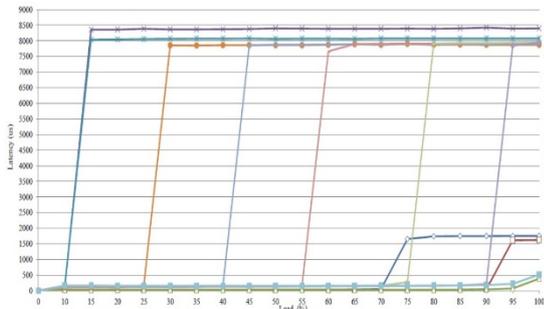


圖 8 CISCO 2811 路由器平均延遲

封包開始被丟棄，表示此時封包輸入速率超過服務速率。此時封包若能進入路由器，是因封包暫存器中有一筆封包被送出。因此剛輸入的封包需要等暫存器中排在前面的封包被處理完畢之後，才會被處理。圖 8 路由器平均延遲測試項目中，NAT\_32 從 Load 超過 11% (測試封包速率為 11Mbps) 時，NAT 伺服器就會開始丟棄封包，從圖中可以看出平均延遲上升至 8356  $\mu$ s；而 IPv6\_32 當 Load 超過 72% 後，就開始掉封包且平均延遲上升到 1649  $\mu$ s。從 IPv6\_32 可看出 IPv6 路由器在 load 為 100% 時，平均延遲為 1750  $\mu$ s，而 NAT\_32 可看出 NAT 伺服器在 load 為 100% 時，平均延遲為 8411  $\mu$ s。NAT\_32 的平均延遲比 IPv6\_32 高出 6661  $\mu$ s。由於 NAT 伺服器從 NAT\_32 到 NAT\_640 時，Load 還沒到 100% 就開始丟棄封包，直到 NAT\_768 時，NAT 伺服器就不會掉封包，因此平均延遲降低至 512  $\mu$ s。接下來當 Payload 大於 758 Bytes 後，由於 NAT 伺服器沒有出現掉封包的現象，所以平均延遲介於 512  $\mu$ s 到 575  $\mu$ s 之間。同樣的 IPv6 路由器在 IPv6\_128 時，就沒有出現掉封包的現象所以 Payload 大於 128 Bytes 後，IPv6 路由器平均延遲在 289  $\mu$ s 到 386  $\mu$ s 之間。因此可以看出 IPv6 路由器對於不同長度的封包傳輸延遲都低於 NAT 伺服器。

### 3.2 Linux PC 平台之實驗結果

本章節將詳細說明以 PC-based Router 為測試平台的 NAT 伺服器以及 IPv6 路由器，對 UDP 封包的三個測試項目之結果。測試項目有吞吐量單位是 Mbps、平均延遲單位是毫秒( $\mu$ s)、以及封包遺失率單位是百分比(%)。

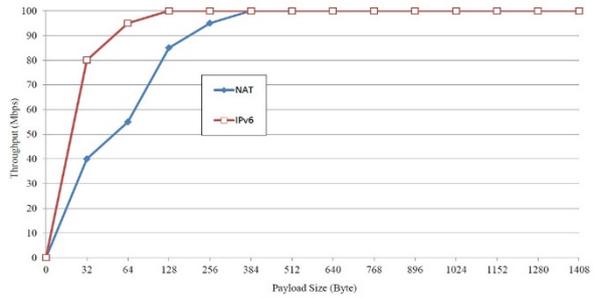


圖 9 Linux\_PC 吞吐量

如圖 9 吞吐量測試中，IPv6 路由器從 IPv6\_32 到 IPv6\_256 的吞吐量表現明顯比 NAT 伺服器還來的好。當 Payload 是 32 Bytes 時，IPv6 的吞吐量為 80 Mbps，而 NAT 的吞吐量只有 40 Mbps，NAT 伺服器的吞吐量明顯低於 IPv6 路由器 50%。當 Payload 是 64 Bytes 時，IPv6 的吞吐量是 95 Mbps 而 NAT 的吞吐量只有 55 Mbps。Payload 超過 256 Bytes 後 IPv6 路由器與 NAT 伺服器的吞吐量才到相同的 100 Mbps，IPv6 路由器在 IPv6\_128 時，就達到 100 Mbps 但 NAT 伺服器必須到 NAT\_384，吞吐量才到 100 Mbps。因此從吞吐量的測試中，我們可以看出 IPv6 路由器在 Payload 大小為 32 Bytes 到 256 Bytes 的吞吐量的效能優於 NAT 伺服器。

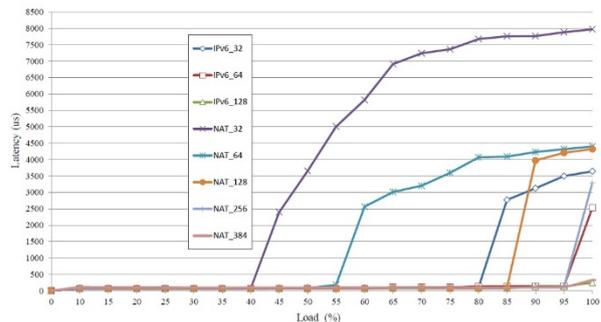


圖 10 Linux\_PC 平均延遲

圖 10 平均延遲測試中，當 IPv6 路由器 Payload 為 32 Bytes 到 128 Bytes 的時候，IPv6\_32、IPv6\_64、IPv6\_128 的平均延遲，都小於同樣 Payload 長度的 NAT 伺服器的 NAT\_32、NAT\_64、NAT\_128。在 Payload 為 32 Bytes 時，由於 IPv6\_32 的吞吐量為 80 Mbps。所以當 Load 超過 80% 時，IPv6 路由器才會開始掉封包，造成平均延遲上升至 3640  $\mu$ s，而 NAT 伺服器的 NAT\_32 則是當 load 超過 40% 時就會開始掉封包，造成平均延遲上升至 7970  $\mu$ s，NAT\_32 平均延遲比 IPv6\_32 高出 4330  $\mu$ s。IPv6 路由器在 IPv6\_120 到 IPv6\_1408 時，由於沒有出現掉封包的現象，所以平均延遲時間介於 132  $\mu$ s 到 620  $\mu$ s 之間。而 NAT 伺服器是在 NAT\_384 到 NAT\_1408 時，才不會掉封包，平均延遲是介於 330  $\mu$ s 到 750  $\mu$ s 之間，因此平均延遲測試中我們發現當 IPv6 路由器在封包傳輸的平均延遲上比 NAT 伺服器好。

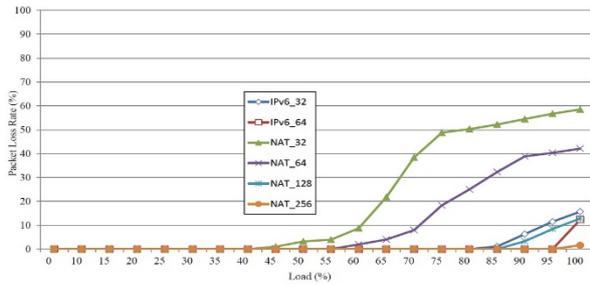


圖 11 Linux\_PC 封包遺失率

圖 11 封包遺失率測試項目中，在 NAT 伺服器的部份 NAT\_32 到 NAT\_256 都有封包遺失的現象，Payload 為 32 Bytes 時隨著 Load 從 40% 增加到 100% 的過程中，NAT\_32 的封包遺失率從 1% 增加到 58%。在 IPv6 路由器部份 IPv6\_32 隨著 Load 從 80% 的增加到 100% 的過程中，封包遺失率從 1% 增加至 15%，封包遺失率比起 NAT 伺服器少將近 25%。NAT 伺服器在 Payload 大於 256 Bytes 後，封包遺失率才維持在 0%，而 IPv6 路由器則是在 Payload 大於 64 Bytes 後，由於不在掉封包所以封包遺失率就保持 0%。因此 Payload 為 32 Bytes 到 256 Bytes 之間，IPv6 路由器的封包遺失率比 NAT 伺服器好。

根據 CISCO 2811 與 PC-based Router 平台上的 IPv6 路由器與 NAT 伺服器測試結果，可以明顯看出 IPv6 路由器在吞吐量、平均延遲、封包遺失率的效能都比 NAT 伺服器好。由於 NAT 的機制在傳送資料時，需要做位址轉換，因此 IPv6 機制在吞吐量、平均延遲、封包遺失率等傳輸效能都優於 NAT 機制。因此從效能分析上的觀點，IPv6 機制比 NAT 機制更適合作為解決 IP 位址不足問題的解決方案。

#### 4. 結論

為了選擇較佳的解決 IP 位址不足問題方案，本論文以效能的觀點討論採用 NAT 與 IPv6 機制的差異。本論文建構了一個實驗環境，採用商用路由器 CISCO 2811 以及個人電腦為基礎(PC-based)之路由器作為待測系統(Device Under Test, 簡稱 DUT)，並以硬體測試工具(SmartBits 600)產生不同長度的測試封包作壓力測試。觀察 NAT 與 IPv6 機制在兩個待測系統中的吞吐量(Throughput)、封包遺失率(Packet Loss Rate)，以及封包延遲(Packet Delay)等效能。在本論文的分析中，無論是在商用路由器或是個人電腦為基礎之路由器中，IPv6 的各項傳輸效能均優於 NAT。雖然 IPv6 在初期建置費用平均較高，但隨著使用者人數增加，NAT 的效能將大幅降低，且穿越 NAT 的建置成本也會提昇。因此以長遠來說 IPv6 才是解決 IP 位址不足問題的最佳選擇。

#### 致謝

This work was supported in part by NSC 101-2221-E-197-001-MY2 and III project.

#### 參考文獻

- [1]. 3GPP TR 23.888. V1.6.0. System Improvements for Machine-Type Communications (MTC). Release 11. Nov. 2011.
- [2]. SmartBits network performance analysis system. <http://www.spirentcom.com/>
- [3]. Narayan, S.; Kolahi, S.S.; Sunarto, Y.; Nguyen, D.; Mani, P., "Performance comparison of IPv4 and IPv6 on various windows operating systems," ICCIT 2008. pp.663-668, Dec. 2008.
- [4]. Gunasundari, R.; Shanmugavel, S., "Performance Comparison of Mobile IPv4 and Mobile IPv6 protocols in wireless systems," COMSNETS 2009. Jan. 2009
- [5]. Soorty, B.K.; Kolahi, S.S.; Chand, N.; Zhang Qu, "Performance Comparison of Category 5e vs. Category 6 Cabling Systems for both IPv4 and IPv6 in Gigabit Ethernet," 2010 IEEE CIT. pp.1525-1529, Jul. 2010.
- [6]. Qiang Li; Tao Qin; Xiaohong Guan; QingHua Zheng, "Empirical analysis and comparison of IPv4-IPv6 traffic: A case study on the campus network," IEEE Networks (ICON), pp.395-399, Dec. 2012.
- [7]. Yasinovskyy, R.; Wijesinha, A.L.; Karne, R.K.; Khaksari, G., "A comparison of VoIP performance on IPv6 and IPv4 networks," Computer Systems and Applications, 2009 IEEE/ACS AICCSA, pp.603-609, May 2009.
- [8]. Goth, G., "Close to the edge: NAT vs. IPv6 just the tip of a larger problem," IEEE Internet Computing, vol.9, no.2, pp.6-9, March-April 2005
- [9]. McFarland, S., "IPv6 Solutions for NAT Overlap," Networking and Services, 2006 ICNS, July 2006.
- [10]. Ssang-Hee Seo; In-Yeup Kong, "A performance analysis model of PC-based software router supporting IPv6-IPv4 translation for residential gateway," Computer and Information Science, 2005. pp.144-150, 2005.