

IPv6 企業級路由器測試：符合性、互通性及效能 Conformance, Interoperability, and Performance Tests of IPv6 Enterprise Routers

測試計劃主持人：林盈達

測試人員：田慶明、郭以謙、陳育良、陳銘宏

執行單位：工研院交大網路測試中心(Network Benchmarking Lab; NBL)



摘要

IPv4 位址的數量隨著近年來上網人口的遽增已經有不敷使用的情況發生，新一代的 IPv6 技術可以有效解決 IP 位址數量不足的問題，而 IPv6 router 是建構 IPv6 網路不可或缺的關鍵組件。本計劃的測試對象定位在 IPv6 企業級 router，而待測物包括 6WINDGate 6221, Cisco 3725, Foundry FastIron 4802 Premium, NEC IX5003 四家商業產品及 FreeBSD - KAME, Linux - USAGI 兩個 open source 系統，測試的項目包括 IPv6 功能比較(functionality)、符合性(conformance)、互通性(interoperability)及效能(performance)等大四類。IPv6 功能比較包括 IPv6 services, IPv6 transition/translation 及 IPv6 routing/multicasting。符合性測試包括 ICMPv6, IPv6 core, IPv6 stateless address autoconfiguration, IPv6 neighbor discovery protocol, IPv6 path MTU discovery 等資料平面(data-plane)測試及 RIPng 控制平面(control-plane)測試，總共有 335 個 test cases。互通性測試則涵蓋 RIPng, OSPFv3, BGP-4 及 ISISv6 等協定。在效能測試方面，我們則同時進行 IPv4 及 IPv6 的 forwarding performance, transition performance 及 routing performance 測試，藉以比較 IPv4 及 IPv6 在效能上的差異。在 IPv6 功能的比較上，各家產品差異較大的是在新標準的功能上，如 ISISv6 及 IPv6 multicasting 等。符合性測試的結果顯示整體的通過率有 84%，可見 IPv6 技術已逐漸趨於成熟。而互通性測試結果顯示每家產品均能通過測試，表示這些產品已經堪用，但還是必須朝向完全符合 IETF RFC 的規範邁進。Forwarding 效能測試的結果顯示整體的 IPv6 throughput 約為 IPv4 的 84%，處理 IPv6 packet 的 latency 約為 IPv4 的 1.31 倍。若採用 IPv6 transition 技術，則 throughput 變為原先 IPv4 forwarding 的 90%，但是 latency 則因為封包需封裝及解封裝而變為 83.3 倍。Routing 效能測試的結果顯示 IPv6 與 IPv4 在學習 BGP routes 上並沒有太大異差，在而 BGP route flapping 測試上，IPv6

flap routes 的時間約為 IPv4 的 4.26 倍，recover routes 的時間約為 IPv4 的 1.94 倍。就產品的特點而言，6WINDGate 6221 在 IPv6 的功能支援上較為完整，Cisco 3725 在 routing performance 上表現較佳，Foundry FastIron 4802 在 IPv4/IPv6 forwarding 有不錯的 performance，NEC IX5003 則在 IPv6 符合性及 IPv6 forwarding performance 表現最佳，最後 FreeBSD - KAME 及 Linux - USAGI 則為價廉且各方面兼具的選擇。

1. IPv6 及測試計劃簡介

近年來由於上網人口遽增而造成 IPv4(Internet Protocol version 4)位址的需求量也大增，再加上目前行動通訊裝置如手機及 PDA 等也勢必也搭上上網的風潮，IPv4 位址的需求量已經大增，依照目前 IPv4 32 位元定址之方式約能提供 40 億(2^{32})個 IP 位址，但因實際分配的限制，所以僅能使用約 25 億個 IPv4 位址，故照目前 IPv4 位址消耗的速度，約在 2010 年 IPv4 位址的數量便會不敷使用。因此，IETF (Internet Engineering Task Force)[1]已在數年前就開始制定新一代 IPv6(Internet Protocol version 6)的標準[2]，IPv6 採用 128 位元的定址方式，最多可以提供 2^{128} 個 IPv6 位址，故 IPv6 可以有效解決 IPv4 位址不足的問題。

IPv6 的架構與現行 IPv4 有許多差異點，其差異性的比較如表 1 所示。除了上述所提到的 32 位元及 128 位元的定址方式外，IPv6 支援 link-local, site-local 及 global 三種 scope 的位址，link-local 位址只能在單一網路的 link 上使用，無法在不是該 link 的網路上使用，site-local 位址用於某一個 site 或 intranet，一個 site 可以包含數條 link，而 global unicast 位址則實際用於對外連線到 Internet。在 IP 位址自動組態方面，IPv4 是透過 DHCP(Dynamic Host Configuration Protocol)[3]，而 IPv6 則可以在沒有 server 的情況底下透過 self & neighbor discovery[4]協定來自動組態 IP 位址，當然也可以透過 DHCPv6 server [5]來組態位址。另外在 routing 方面，IPv6 包括有 RIPng [6], OSPFv3[7], ISISv6[8]等 Interior Gateway Protocols 及 BGP-4+[9] Exterior Gateway Protocol。RIPng 比原本的 RIP 多支援了 IPv6 位址及 prefixes，另外也支援 all-routers RIP multicast address group 用以送出 routing update messages 至所有的 RIPng routers，這種方式取代了原本 RIP 的 broadcast messages 方式。OSPFv3 移除了原本 OSPF 中 OSPF 封包及 LSA(Link-State Advertisement)中的 addressing semantics，新的 LSA 可以傳送 IPv6 位址及 prefix，OSPFv3 現在是以 per-link 的方式來運作，取代了原本 per-IP-subnet 的方式，另外原本在 OSPF 中的 authentication 已經被移除，改由 IPv6 的 authentication header 及 Encapsulating Security Payload 來負責。BGP-4+比起原來的 BGP-4 多支援了 IPv6 位址及 network layer reachability information (NLRI) 及使用 IPv6 位址的 next hop 屬性。ISISv6 則讓原本只能發出 IPv4 及 OSI routes 的 ISIS 能夠傳送 IPv6

prefixes。其餘比較的項目和測試計劃較無直接關係，故我們不多作介紹，詳細的 IPv6 介紹可以參閱由 Hubert Feyrer 編著 O'REILLY 出版社所出版的“Introduction to IPv6”[10]一書。

表 1 IPv4 及 IPv6 之比較

Service	IPv4	IPv6
Addressing Range	32-bit, Network Address Translation	128-bit, multiple scopes
Autoconfiguration	DHCP	Serverless configuration through self & neighbor discovery, DHCPv6
IP Routing	RIPv1, RIPv2, OSPFv1, OSPFv2, BGP-4, ISIS	RIPng, OSPFv3, BGP-4+, ISISv6
IP Multicast	IGMP/PIM/Multicast BGP	MLD/PIM/Multicast BGP, scope identifier
Security	IPSec (packets and tunnels)	IPSec mandated
Mobility	Mobile IP	Mobile IP with direct routing
Quality of Service	Differentiated Service, Integrated Service	Differentiated Service, Integrated Service

在整個 IPv6 的佈局(deployment)上，IPv6 router 負責將整個 IPv6 主機及網路連結起來，並且指引網路封包(packet)的流向，是一個不可或缺的關鍵組件，故本計劃的測試對象便鎖定在 IPv6 router 上。目前在國外已經有許多單位對 IPv6 進行過測試，如歐洲電信標準協會(European Telecommunications Standards Institute; ETSI)[11]及日本的 TAHI [12]計劃每年舉辦 IPv6 插拔大會(Plugtest)測試 IPv6 的符合性(conformance)及互通性(interoperability)，中國北京英納特網絡研究所 (Beijing Internet-networking Institute; BII)[13]也曾經對 IPv6 core router 進行過符合性、互通性及效能測試，因此本計劃的測試對象便定位在 IPv6 enterprise router 上。這次測試的待測物共有法國品牌的 6WINDGate 6221，美國品牌的 Cisco 3725、Foundry FastIron 4802 Premium 及日本品牌的 NEC IX5003 等四家商業產品，另外我們也把 open source 作業系統 FreeBSD[14]及 Linux[15]列為待測物，但由於 FreeBSD 及 Linux 核心(kernel)的 IPv6 程式碼過於老舊，故我們便採用日本 KAME[16]及 USAGI(UniverSAl playGround for Ipv6)[17]兩項 IPv6 計劃的核心碼，另外再搭配 open source 的 GNU Zebra routing software[18]，故最後的待測物我們稱為 FreeBSD – KAME 及 Linux – USAGI。

測試的項目主要包括有 IPv6 功能比較(functionality)、符合性(conformance)、互通性(interoperability)及效能(performance)等大四類，敘述如下：

1. 功能比較：

IPv6 功能比較包括 IPv6 services, IPv6 transition/translation 及 IPv6 routing/multicasting 等項目。

2. 符合性測試：

符合性測試是驗證待測物是否有符合 IETF RFC (Requests For Comments)標準中所定義的規範，項目包括 ICMPv6, IPv6 core, IPv6 stateless address autoconfiguration, IPv6 neighbor discovery protocol, IPv6 path MTU discovery

等資料平面(data-plane)測試及 RIPng(Routing Information Protocol next generation)控制平面(control-plane)測試，總計共有 335 個 test cases。

3. 互通性測試：

互通性測試則是驗證各個待測物之間是否能夠正確進行訊息交換相互運作，測試項目涵蓋 RIPng, OSPFv3(Open Shortest Path First version 3), BGP-4+(Border Gateway Protocol version 4 plus)及 ISISv6(Intermediate System to Intermediate System version 6)等協定。

4. 效能測試：

在效能測試方面，我們則同時進行 IPv4 及 IPv6 的 forwarding performance, transition performance 及 routing performance 測試，藉以比較 IPv4 及 IPv6 在效能上的差異。

2. 測試工具及待測物

測試工具

我們整理目前可用的 IPv6 測試工具在表 2 中，各個測試工具對於 IPv6 測試支援程度不一各有特色，如 IXIA ANVL[19]在 IPv6 符合性測試上提供數百個 test cases 及完整的說明文件，Spirent[20]則在 IPv6 routing 測試上提供相當友善的操作介面及圖形化的數據統計結果，TAHI 計劃則提供了 IPv6 符合性及互通性測試的 open source 套件，可以自由下載使用，而 NetIQ Chariot[21]則可以進行 IPv6 TCP 及 UDP 的效能測試。

表 2 中某個測試工類後面有加註星號(*)者，代表我們這次測試所選擇的測試工具。Data-plane conformance 測試工具我們選擇了 IXIA ANVL，因為其 IPv6 Test Suites 所支援的 test cases 最多，而且說明文件最為完備。Spirent Adtech AX/4000 IPv6 Conformance Test Suites 雖然有用圖形的方式呈現測試的流程，但是它的 test cases 較少，而且缺乏說明文件。TAHI IPv6 Conformance Test Suite 缺乏詳細的操作及測試說明文件，而且使用起來相當不便。在 control-plane conformance 測試工具我們選擇了 Spirent Adtech AX/4000 IPv6 Conformance Test Suites，因為其支援 RIPng, OSPFv3 及 BGP-4+協定，IXIA ANVL 目前只支援 OSPFv3 及 ISISv6，而 Agilent QARobot[22]只支援 BGP-4+協定，而目前還沒有正式的版本。在 IPv6 interoperability 測試方面，我們認為許多 data-plane interoperability 的測試有許多 test cases 在 data-plane conformance 測試時就已經測試過，故我們不進行 data-plane interoperability 的測試，另外再加上 TAHI IPv6 Interoperability Test Suite 目前還在發展當中，無法對多個待測物同時進行測試，故最後我只測試 control-plane interoperability，而且利用待測物本身來產生測試時所需的 messages。在 IPv6 data-plane performance 測試方面，我們選擇使用 Spirent SmartBits SmartFlow 來進行 forwarding 測試，因為該測試工具的操作介面較其他測試工具簡易，而且測試結果呈現較易閱讀，不過在 IPv6 transition 的測試，我

們則是選擇了 IXIA ScriptMate Software，因為它支援的 IPv6 transtion 測試較為完整。在 IPv6 control-plane performance 測試方式，我們選擇了 Spirent Adtech AX/4000 Routing Emulation Software 及 Spirent SmartBits TeraRouting Tester，因為其操作介面相當人性化，而且測試的結果會自動畫成圖表，省去手動整理測試數據的麻煩。我們最後採用的 IPv6 測試工具，其詳細的軟硬體說明列於表 3。

表 2 IPv6 測試工具

Item	Data-plane test tools	Control Plane test tools
Conformance	<ul style="list-style-type: none"> IXIA Automated Network Validation Library (*) Spirent Adtech AX/4000 IPv6 Conformance Test Suites TAHI IPv6 Conformance Test Suite 	<ul style="list-style-type: none"> Agilent QARobot IXIA Automated Network Validation Library Spirent Adtech AX/4000 IPv6 Conformance Test Suites (*)
Interoperability	<ul style="list-style-type: none"> TAHI IPv6 Interoperability Test Suite 	<ul style="list-style-type: none"> TAHI IPv6 Interoperability Test Suite
Performance	<ul style="list-style-type: none"> Agilent RouterTester Traffic Generation software IXIA ScriptMate Software (*) Spirent Adtech AX/4000 Controller Software Spirent SmartBits SmartFlow (*) Spirent SmartBits SmartWindow NetIQ Chariot IPv6 Test Module 	<ul style="list-style-type: none"> Agilent RouterTester Routing Protocol Emulation Software IXIA Routing Protocol Emulation Software Spirent Adtech AX/4000 Routing Emulation Software (*) Spirent SmartBits TeraRouting Tester (*)

表 3 本計劃所採用的測試工具

Tests	Data-plane test tools	Control-plane test tools
Conformance	IXIA: <ul style="list-style-type: none"> ANVL IPv6 Test Suites 6.2 	Spirent Adtech AX/4000: <ul style="list-style-type: none"> AX/ 4000 Mainframe Ethernet Control Module IP Ethernet 10/100 Interface * 2 Test Suite Manager 3.80 RIPng Test Suite 1.01
Interoperability		Tested by DUTs themselves
Performance	Spirent SmartBits: <ul style="list-style-type: none"> SMB-6000B Chassis LAN-3101A 6-port 10/100Mbps Ethernet Module SmartFlow 2.0 IXIA: <ul style="list-style-type: none"> 1600T Chassis LM100TXS8 8-port 10/100Mbps Ethernet Module ScriptMate IPv6 Tunneling Test Scripts 3.651.284a EA SP5b 	Spirent SmartBits: <ul style="list-style-type: none"> SMB-6000B Chassis LAN-3101A 6-port 10/100Mbps Ethernet Module TeraRouting Tester 2.0 Spirent Adtech AX/4000: <ul style="list-style-type: none"> AX/4000 Mainframe Ethernet Control Module IP Ethernet 10/100 Interface * 2 Controller Software 4.42.0

待測物

本次測試的待測物(Device Under Test; DUT)共有六款，各款的軟硬體規格列於表 4，其中較特殊的是 6WINDGate 6221，其系統軟體其實是以 FreeBSD + Zebra 為基礎，另外其主機配有 256 MB DRAM，而其他的待測物都只有 128 MB。另

外在網路介面方面，大多數的待測物都只有 2 個 10/100 Mbps 的 Ethernet ports，而 Foundry FastIron 4802 及 NEC IX5003 分別有 48 個及 8 個 10/100 Mbps 的 Ethernet ports，不過在實際測試時都只有用到 2 個 ports。

表 4 待測物之軟硬體規格

Device under test	Software version	Processor	Memory capacity	Network interfaces
6WINDGate 6221	SIXOS 6.3.1	Pentium III 766 MHz	256 MB DRAM	2 10/100 Mbps Ethernet ports
Cisco 3725	IOS 12.3(1)	R7000 240 MHz	128 MB DRAM	2 10/100 Mbps Ethernet ports
Foundry FastIron 4802	07.6.01aV6-3mT53	Power PC 466 MHz	128 MB DRAM	48 10/100 Mbps Ethernet ports
NEC IX5003	7.4.53	R4700 200MHZ	128 MB DRAM	8 10/100 Mbps Ethernet ports
FreeBSD - KAME	kame-20030331-freebsd47-snap + Zebra 0.93b	Pentium III 1 GHz	128 MB DRAM	2 10/100 Mbps Ethernet ports
Linux - USAGI	usagi-linux24-stable-20030214 + Zebra 0.93b	Pentium III 1 GHz	128 MB DRAM	2 10/100 Mbps Ethernet ports

3. IPv6 功能比較

在 IPv6 功能的比較方面，我們分為 IPv6 services、IPv6 transition/translation 及 IPv6 routing/multicasting 三大類，比較的結果如表 5 所示，以下我們說明各類功能比較的意義及比較的結果。詳細 IPv6 各個功能的介紹，可以參閱前面所提到的“Introduction to IPv6”一書。

表 5 IPv6 功能比較結果

Device under test	IPv6 services	IPv6 transition/translation	IPv6 routing/multicasting
6WINDGate 6221	Multiple link local addresses, Anycast address, ICMPv6, Neighbor discovery, IPv6 stateless autoconfiguration, Path MTU discovery, IPv6 jumbograms, IPv6 QoS, IPv6 IPSec, IPv6 MIB, DNS for IPv6	v6 into v4 tunnels, v4 into v6 tunnels, automatic tunnels, configured tunnels, ISATAP tunnels, NAT-PT	RIPng, BGP-4+, OSPFv3, MLDv2, PIMv6 SM, PIMv6 SSM
Cisco 3725	ICMPv6, Neighbor discovery, IPv6 stateless autoconfiguration, Path MTU discovery, IPv6 QoS, IPv6 MIB, DNS for IPv6	IPv6 manually configured tunnels, IPv6 over IPv4 GRE tunnels, Automatic IPv4-compatible tunnels, Automatic 6to4 tunnels for IPv6, ISATAP tunnels, NAT-PT	RIPng, BGP-4+, OSPFv3, ISISv6
Foundry FastIron 4802	ICMPv6, Neighbor discovery, IPv6 stateless autoconfiguration, Path MTU discovery, IPv6 over MPLS, IPv6 QoS, DNS for IPv6	IPv6 manually configured tunnels, Automatic IPv4-compatible tunnels, Automatic 6to4 tunnels for IPv6	RIPng, BGP-4+, OSPFv3, ISISv6
NEC IX5003	Anycast address, ICMPv6, Neighbor discovery, IPv6 stateless autoconfiguration, Path MTU discovery, IPv6 QoS, IPv6 IPSec/IKE, IPv6 MIB	IPv6 over IPv4, IPv6 over IPv6, IPv4 over IPv6, IPv4 over IPv4, Auto-Tunneling	RIPng, BGP-4+, OSPFv3, MLD, PIMv6 SM, PIMv6 DM

FreeBSD KAME	-	Multiple link local addresses, Anycast address, ICMPv6, Neighbor discovery, IPv6 stateless autoconfiguration, Path MTU discovery, IPv6 Jumbograms, IPv6 QoS, IPv6 IPsec, IPv6 MIB, DNS for IPv6	IPv6 manually configured tunnels, ISATAP tunnels, NAT-PT	RIPng, BGP-4+, OSPFv3, MLDv2, PIMv6 SM, PIMv6 DM
Linux USAGI	-	Multiple link local addresses, Anycast address, ICMPv6, Neighbor discovery, IPv6 stateless autoconfiguration, Path MTU discovery, IPv6 IPsec, DNS for IPv6	IPv6 manually configured tunnels, IPv6 over IPv4 GRE tunnels, Automatic IPv4-compatible tunnels, Automatic 6to4 tunnels for IPv6, ISATAP tunnels, NAT-PT	RIPng, BGP-4+, OSPFv3, MLD, PIMv6 SM, PIMv6 DM

IPv6 services

IPv6 services 主要是比較待測基本的 IPv6 功能，如 multiple link local addresses, anycast address, ICMPv6, neighbor discovery, IPv6 stateless autoconfiguration, IPv6 path MTU discovery 等，另外還有較進階的 IPv6 功能，如 IPv6 jumbograms, IPv6 QoS, IPv6 IPsec, IPv6 MIB, DNS for IPv6 等。以下列出”不”支援某項 IPv6 services 功能的待測物：

- l Multiple link local addresses: Cisco 3725, Foundry FastIron 4802, NEC IX5003
- l Anycast address: Cisco 3725, Foundry FastIron 4802
- l IPv6 jumbograms: Cisco 3725, Foundry FastIron 4802, NEC IC5003, Linux – USAGI
- l IPv6 QoS: Linux – USAGI
- l IPv6 IPsec: Cisco 3725, Foundry FastIron 4802
- l IPv6 MIB: Foundry FastIron 4802, Linux – USAGI
- l DNS for IPv6: Foundry FastIron 4802

IPv6 transition/translation

因為目前整個 Internet 的骨幹(backbone)仍然以 IPv4 網路為主，無法在一夜之間就把整個 IPv4 網路換成 IPv6 網路，故 IPv6 勢必要與 IPv4 共存很長的一段時間，所以位於 IPv4 及 IPv6 網路之間的 router 必須有把 IPv6 packet 封裝(encapsulate)在 IPv4 packet 內 的能力，然後再透過 IPv4 網路建立通道(tunnel)來傳送被封裝的 IPv6 packet，等抵達目的地的後再解封裝(decapsulate)還原成原來的 IPv6 packet，這種動作稱為 transition。IPv6 transition 又有分手動及自動建立 tunnel，手動建立 tunnel 的機制有 IPv6 manually configured tunnels (RFC 2893)[23] 及 IPv6 GRE tunnels (RFC 2473)[24]，而自動建立 tunnel 的機制有 IPv4-compatible tunnels (RFC 2893), 6to4 tunnels (RFC 3056)[25]及 ISATAP (Intra-Site Automatic Tunnel Addressing Protocol) tunnels[26]。另外一種共存的機制是把 IPv6 packet 的格式直接轉換(translation)成 IPv4 packet 的格式，常見的轉換機制為 NAT-PT (Network Address Translation – Protocol Translation) (RFC 2766)[27]。以下列出”不”支援某項 IPv6 transition/translation 功能的待測物：

- l IPv6 over IPv4 GRE tunnels: 6WINDGate 6221, NEC IX5003, FreeBSD-

KAME

- | IPv4-compatible tunnels: NEC IX 5003, FreeBSD- KAME
- | 6to4 tunnels: FreeBSD - KAME
- | ISATAP tunnels: Foundry FastIron 4802, NEC IX5003
- | NAT-PT: Foundry FastIron 4802, NEC IX5003

IPv6 routing/multicasting

此處比較的是待測物是否有實作各種 IPv6 routing protocols，如 RIPng, OSPFv3, BGP-4+, ISISv6 等，以及 IPv6 multicasting 如 MLD (Multicast Listener Discovery)[28], PIMv6 SM (Protocol Independent Multicast version 6 - Sparse Mode)[29], PIMv6 DM (Protocol Independent Multicast version 6 - Dense Mode)[30]。以下列出”不”支援某項 IPv6 routing/multicasting 協定的待測物：

- | ISISv6: 6WINDGate 6221, NEC IX5003, FreeBSD – KAME, Linux - USAGI
- | MLD: Cisco 3725, Foundry FastIron 4802
- | PIMv6 SM, PIMv6 DM: Cisco 3725, Foundry FastIron 4802

由以上三類的比較我們可以發現，6WINDGate 6221 及 Linux - USAGI 對於各項 IPv6 功能的支援較為完整，Cisco 3725 及 Foundry FastIron 4802 對於 IPv6 routing protocols 的支援非常完整，但是在 IPv6 multicasting 則較為缺乏，NEC IX5003 及 FreeBSD – KAME 在 IPv6 multicasting 的支援較為完整，但是在 IPv6 tunneling 功能方面較為缺乏。

4. IPv6 符合性測試

廠商在開發產品時通常會照按標準規範來實作產品，但是每家廠商對於標準規範的解釋不一或是用不同的方式來實作，抑或是標準規範中某些項目並不是必須的，而是選擇性的，所以會造成所開發出來的產品並不見得會百分之百完全符合標準規範。因此，符合性測試在產品開發的過程中扮演著重要的角色。

本計劃的 IPv6 符合性測試主要是驗證待測物是否有符合 IETF RFC 的標準規範，我們測試了 data-plane ICMPv6, IPv6 core, IPv6 stateless address autoconfiguration, IPv6 neighbor discovery protocol, IPv6 path MTU discovery 以及 control-plane RIPng 等協定的符合性，總計 test cases 的個數為 335 個，同樣屬於 control-plane 的 OSPFv3, BGP-4+及 ISISv6 等協定則因為測試工具支援及測試時程的問題並沒有列入我們測試的範圍之中。我們採用了 IXIA ANVL IPv6 Test Suites 來測試 IPv6 data-plane 的符合性，另外用 Spirent Adtech AX/4000 RIPng Test Suite 來測試 IPv6 control-plane 的符合性，各項 IPv6 符合性測試說明如下：

1. ICMPv6:
標準規範：RFC 2463, Internet Control Message Protocol (ICMPv6) for IPv6
Test cases 個數：38
說明：ICMPv6 的訊息主要的用途為 packet processing error reporting, diagnostics, multicast membership reporting 及 neighbor discovery。此測試的內容主要為驗證 ICMPv6 的封包格式是否正確、遇到錯誤情況的處理方式以及 echo request 及 echo reply 收送的情況。
2. IPv6 core:
標準規範：RFC 2460, IPv6 Specification
RFC 2464, Transmission of IPv6 Packets over Ethernet Networks
Test cases 個數：99
說明：此測試的內容主要為驗證 IPv6 的封包格式、各種 options 及 extension headers 的支援程度。
3. IPv6 stateless address autoconfiguration:
標準規範：RFC 2462, IPv6 Stateless Address Autoconfiguration
Test cases 個數：13
說明：IPv6 stateless address autoconfiguration 可以讓主機根據本身的內部資訊及 router 所發出的訊息來自動組態 IPv6 位址，不需要以手動的方式設定。此測試的內容主要為驗證主機在收送 neighbor solicitation, neighbor advertisement 及 router advertisement 的情況及 IPv6 位址設定的動作。
4. IPv6 neighbor discovery protocol:
標準規範：RFC 2461, Neighbor Discovery for IP Version 6
Test cases 個數：129
說明：IPv6 neighbor discovery 讓在同一條 link 上的 IPv6 node 發現彼此的存在、決定對方的 link-layer 位址、發現 router 以及維護 neighbors 連結路徑的資訊。此測試的內容主要為驗證各種 neighbor solicitation, neighbor advertisement 及 router solicitation, router advertisement 訊息的的格式及收送情況。
5. IPv6 path MTU discovery
標準規範：RFC 1981, Path MTU Discovery for IP version 6
Test cases 個數：8
說明：當一個 IPv6 node 有大量的資料要傳送時，資料會由一連串的 IPv6 封包來傳送，而我們希望這些封包的大小剛好是從來源端到目的端路徑(path)所能傳送最大的封包大小，而這個封包大小便稱為 path MTU(Maximum Transmission Unit; PMTU)，也就是一條路徑中最小的 link MTU，而 path MTU discovery 則是一個找出任何路徑的 PMTU 的機制。此測試的內容主要為驗證 path MTU discovery 的協定需求、儲存及清除 PMTU 資訊的處理情況。
6. RIPng

標準規範：RFC 2080, RIPng for IPv6

Test cases 個數：48

說明：RIPng 能讓 routers 彼此交換資訊來計算連接到 IPv6 網路的路徑，它計算路徑的方式乃是基於 distance vector 也就是 Bellman-Ford 演算法。此測試的內容主要為驗證 RIPng 的 request message, response message, split horizon, timers 及 forwarding 的處理情況。

IPv6 符合性測試的組態設定如圖 1 所示，Tester 會出發訊息到待測物，在測試的過程中有的時候需要手動對待測物進行一些參數設定，然後再繼續進行測試，最後再依照待測物的回應來判斷待測物是否通過某個 Test cases。某些 Test cases 只需要一個 port 便能完成測試，但也有許多 Test cases 是由 Tester Port A 發出訊息，然後再從 Tester Port B 接收待測物回應的訊息。

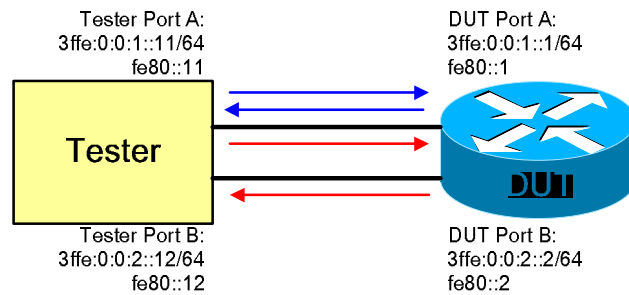


圖 1 IPv6 符合性測試組態

IPv6 符合性 Test cases 的統計結果如表 6 所示，由表 6 中我們可以得知每個待測物通過(Passed)的 test cases 個數、沒有通過(Failed)的 test cases 個數、無法進行參數設定(Unconfigurable)的 test cases 個數以及待測物的通過率(Pass ratio)。由表 6 中我們可以發現 6WINDGate 6221 不可組態的 test cases 個數偏高，這是因為 6WINDGate 6221 並沒有提供設定 router advertisement 訊息參數的設定介面，但是有許多的 test cases 是需要設定這些參數的。Foundry FastIron 4802 的通過率偏低是因為 Foundry 主要的 IPv6 產品是 NetIron 4802 並非 FastIron 4802，但是廠商因為 NetIron 4802 庫存量不足的關係所以只送測 Foundry FastIron 4802，而 FastIron 4802 的 IPv6 系統軟體仍然還在發展除錯的階段，所以仍然有許多項目未符合標準規格。NEC IX5003 的通過率為最高，因為日本廠商很早就投入 IPv6 的市場，而且很積極在研發 IPv6 的技術，如前文所述的 TAHI, KAME 及 USAGI 等計劃都由日本的 WIDE(Widely Integrated Distributed Environment)計劃提出執行的。從各個待測物的通過率可以算出整體 IPv6 符合性測試的通過率為 84%，可見 IPv6 的技術已逐漸趨於成熟，但是目前 IETF 仍然在訂定許多 IPv6 的相關標準，對 IPv6 廠商來說仍然有許多挑戰。

表 6 IPv6 符合性 test cases 統計(總計 335 個 test cases)

Device under test	Passed	Failed	Unconfigurable	Pass ratio
6WINDGate 6221	277	37	21	83%
Cisco 3725	287	34	14	86%
Foundry FastIron 4802	266	55	14	79%
NEC IX5003	305	23	7	91%
FreeBSD - KAME	281	45	9	84%
Linux - USAGI	282	48	5	84%

圖 2 為 IPv6 符合性測試通過率統計，我們可以從圖 2 中看出每個待測物在每一項測試的通過率。NEC IX5003 在大多數的測試項目中均有不錯的表現，在 ICMPv6 及 IPv6 path MTU discovery 符合性測試中更達到了 100% 的通過率。FreeBSD - KAME 在 IPv6 path MTU discover 通過率為 0%，和 TAHI 計劃網站上公佈的測試結果一致，雖然測試工具不同，但是測試結果卻是相同。另外 FreeBSD - KAME 在 RIPng 符合性測試中一直無法回應由 Tester 所發出的 request message，所以造成其通過率較低。

對於各個待測物沒有通過或是無法設定組態參數的測試案我們都有追蹤其原因，結果發現每個待測物在某些 test cases 中都是沒有辦法通過或是設定組態參數的，例如在 IPv6 neighbor discovery protocol 測試中的 Neighbor Advertisement Validation Tests，沒有一個待測物能通過其中幾個 test cases，故我們推測也有可能是測試程式本身有問題，畢竟 IPv6 算是相當新的技術，測試工具本身也還在發展的過程中，不能算是 100% 成熟。另外，也有些組態參數可能是因為不太重要或是很少用到，所以許多待測物並沒有辦法設定這些參數，例如 router advertisement 訊息中的 link MTU 參數，許多待測物都無法設定。不過，也有些待測物是真的在產品實作上有問題的，例如某個待測物在接受不正常的封包訊息後就發生當機的情況，或者是 timer 的精確度設計錯誤，把 1/1000 秒當作 1 秒來計算。總而言之，符合性測試可以幫廠商找出產品的問題所在，以作為將來產改良及除錯時的參考。

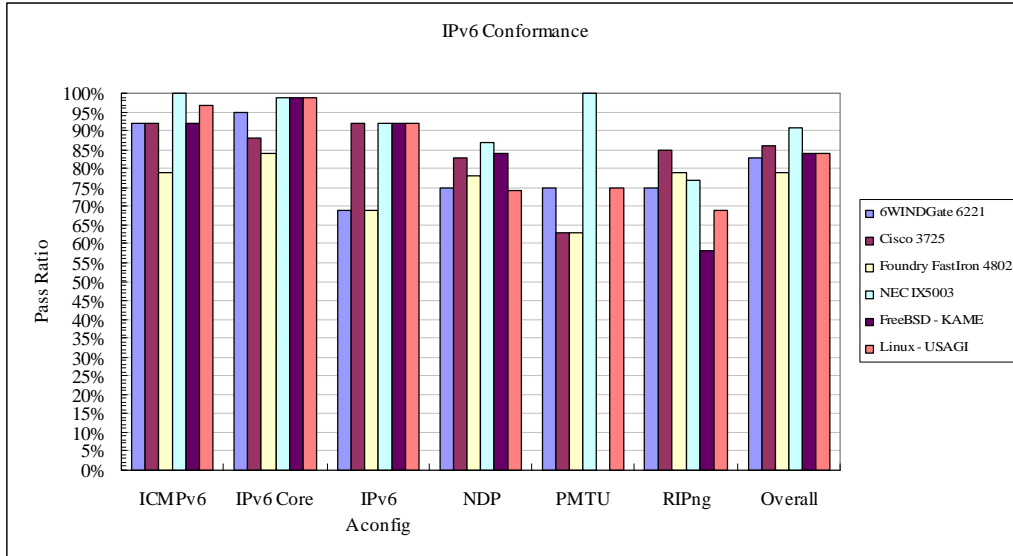


圖 2 IPv6 符合性測試通過率統計

5. IPv6 Routing Protocol 互通性測試

互通性測試主要是在測試各家產品之間是否能夠正確交換訊息相互運作互通，由於每家廠商對於標準規範的解釋或是實作方式不一，有可能會造成小廠的產品雖然有符合標準規範但是無法與市場領導品牌或是大廠產品互通的情況發生，因此互通性測試對於許多廠商來說其重要性可能會更甚於符合性測試，因為產品能要打入市場，最重要的就是能夠與大廠的產品互通。

在 IPv6 的互通性測試方面，我們測試了 RIPng, OSPFv3, BGP-4+ 及 ISISv6 等 IPv6 routing protocol 的互通性，各項測試說明如下。

RIPng 互通性測試

1. RIPng routes propagation:

本項測試主要是測試各個待測物是否能把自已 RIPng routing table 內的 RIPng routes 藉由 routing update messages 傳送(propagate)到其他的 router，而且在接收到由其他待測物所發出的 routing update messages 後，能夠在自己的 routing table 內建立所學到的 RIPng routes。

本測試的組態設定如圖 3 所示，我們先把每個待測物的 Port A 透過一台 switch 接線在一起並且設定在同一個 subnet 的 IPv6 位址，然後在各待測物的 Port B 設定不同的 subnet 的 IPv6 位址，以當作 Port A 準備要送出去的 RIPng route。設定完畢後，下個動作就是要讓待測物送出包含 RIPng routes 的 routing update

message，其方法有二，一個是透過第三者的測試工具如 IXIA 或是 Spirent 的產品來模擬 RIPng protocol 來送出 routing update messages，但是此方法只能測試待測物與測試工具之間的互通性，若要測試待測物和待測物之間的互通性，仍然還是要讓待測物本身發出 routing update messages，故我們便採直接利用待測物上已有的 routes 或是手動建立 static routes，再利用 router 的“redistribute”機制，將“connected”的 routes(亦即指向 Port B 的 route)或是 static routes 重新分配到 RIPng 協定中，如此待測物便有 RIPng 的 routes 可以在 routing update message 中送出。我們在每個待測物中皆利用 redistribute 機制讓待測物送出 RIPng routes，並且觀察每個待測物是否都能夠學習到所接收到的 routes，然後在 RIPng routing table 中建立 entry。

RIPng 的互通性測試結果為每個待測物均能正確將 RIPng routes 傳送出去，並且學習到其他待測物所發出的 RIPng routes。

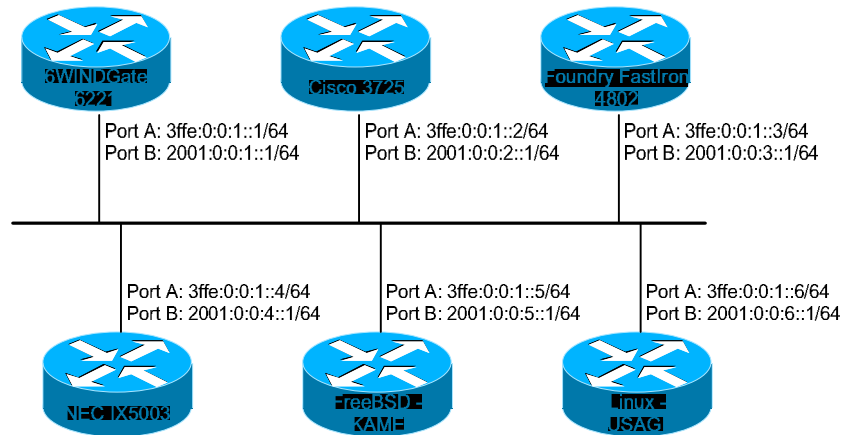


圖 3 RIPng 互通性測試組態

OSPFv3 互通性測試

1. Adjacency establishment and negotiation of designated router:

本項測試主要是測試各個待測物之間是否能夠正確建立 OSPFv3 adjacencies 而且選出 designated router (DR)及 backup designated router (backup DR)，並且在當 DR 消失時原本的 backup DR 變為 DR，而其餘的 DR Other 能選出新的 backup DR。

本測試的組態設定如圖 4 所示，由於 6WINDGate 6221 並沒有提供 OSPFv3 的組態設定介面，故我們不列入測試。我們先把每個待測物的 Port A 透過一台 switch 接線在一起並且設定同一 subnet 的 IPv6 位址，另外指定相同的 area ID 為 0.0.0.0 但是不同的 router ID 及 router priority。設定完成後，由於此時在 area 0.0.0.0 內尚未有 DR 及 backup DR 的存在，故所有的待測物便會開始選出新的 DR 及

backup DR，經過選舉之後的結果，router priority 較高的待測物變成 DR，次高的變成 backup DR，其餘的待測物則為 DR Other，此時 DR 與 backup DR 會與所有的待測物建立起 full adjacencies，但是 DR Other 與 DR Other 之間僅會建立 2-way adjacency。之後我們將 DR 從網路中移除掉，然後觀察原本的 backup DR 是否會變為 DR，並且各個 DR Other 之間會重新選出一個 backup DR，而且重新調整 DR, backup DR 及 DR Other 之間建立 adjacency 的方式。

完成以上的測試後，我們再進行相同的測試方式，但是要重新調整各個待測物的 router priority，讓在上一次測試中沒有機會成為 DR 或 backup DR 的待測物在這一次的測試中有機會成為 DR 或 backup DR。如此一重覆測試，直至所有的待測物都曾經被選為 DR 及 backup DR 才算完成本項測試。

Adjacency establishment and negotiation of designated router 的互通性測試結果為每個待測物均能正確選出 DR 及 backup DR，並且與其他待測物之間建立起正確的 OSPFv3 adjacencies。

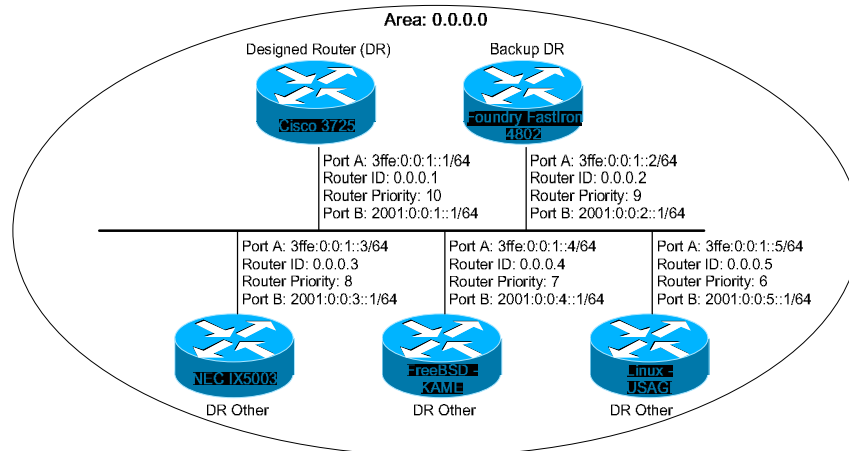


圖 4 OSPFv3 互通性測試組態

2. LSA database exchange:

本項測試主要是測試擔任 DR 的待測物是否能夠在收到其他待測物所發出的 LSA(Link-State Advertisement)後更新自己的 LSA database，並且將所學到的 topology 傳送到所有的 DR Other。

本測試的組態設定如圖 4，我們在每個待測物的 Port B 上設定不同 subnet 的 IPv6 位址，然後利用 redistribute 機制在待測物上產生 OSPFv3 routes，然後再觀察 DR 更新及傳送 LSA database 的情況是否有符合以上所述的動作。

完成以上的測試後，我們再進行相同的測試方式，但是要重新調整各個待測物的 router priority，讓在上一次測試中沒有機會成為 DR 的待測物在這一次的測試中有機會成為 DR。如此一重覆測試，直至所有的待測物都曾經被選為 DR 而且觀察 LSA database 交換的情況後才算完成本項測試。

LSA database exchange 的互通性測試結果為每個待測物均能正確更新及傳送 LSA database。

BGP-4+互通性測試

1. Internal BGP session establishment:

本項測試主要是測試各個待測物之間是否能夠正確建立 internal BGP session。

本測試的組態設定如圖 3 所示，我們先把每個待測物的 Port A 透過一台 switch 接線在一起並且設定在同一個 subnet 的 IPv6 位址，另外指定相同的 Autonomous System (AS) number 為 1 及不同的 router ID，並且也在每個待測物上設定其他待測物為 neighbors，之後再觀察每個待測物是否都能與其他的待測物建立起 internal BGP sessions。

Internal BGP session establishment 的測試結果為每個待測物均能與其他的待測物建立起 internal BGP sessions。

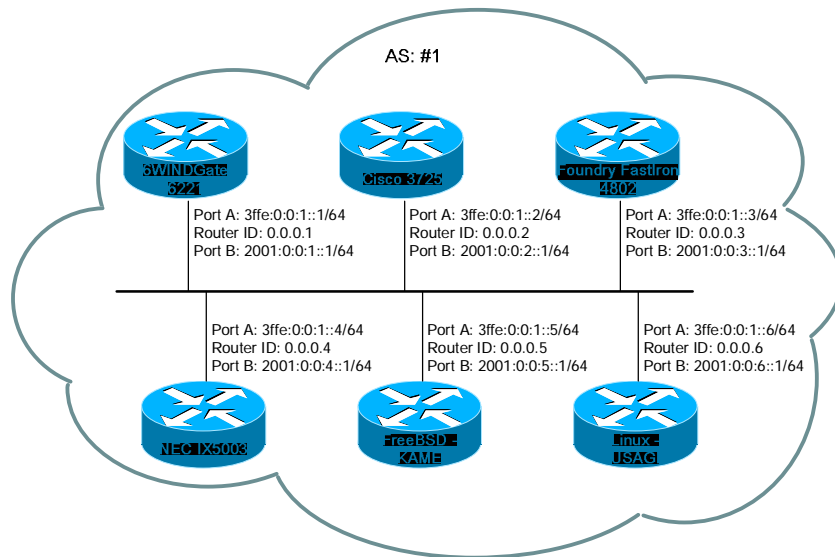


圖 5 Internal BGP 互通性測試組態

2. Internal BGP routes propagation:

本項測試主要是測試各個待測物之間是否能夠正確傳送出自己的 internal BGP routes，並且接收從其他待測物傳來的 internal BGP routes。

本測試的組態設定如圖 5，我們在每個待測物的 Port B 上設定不同 subnet 的 IPv6 位址，然後利用 redistribute 機制在待測物上產生 internal BGP routes，然後再觀察待測物之間是否能夠正確傳送及接收 internal BGP routes。

Internal BGP routes propagation 的測試結果為每個待測物均能正確傳送及接收 internal BGP routes

3. External BGP session establishment:

本項測試主要是測試待測物與另一個待測物之間是否能夠正確建立 external BGP session。

本測試的組態設定如圖 6 所示，我們把某個待測物的 Port A 接到另一個待測物的 Port B，然後設定在同一個 subnet 的 IPv6 位址，如此兩兩對接成為一串，待測物與待測物之間的連線分屬不同的 subnet，另外我們也設定每個待測物有不同的 AS number 及 router ID，並且也在某個待測物上設定另一個待測物為 neighbor，之後再觀察待測物與另一個待測物之間是否能建立起 external BGP sessions。

External BGP session establishment 的測試結果為每個待測物均能與另一個待測物建立起 external BGP sessions。

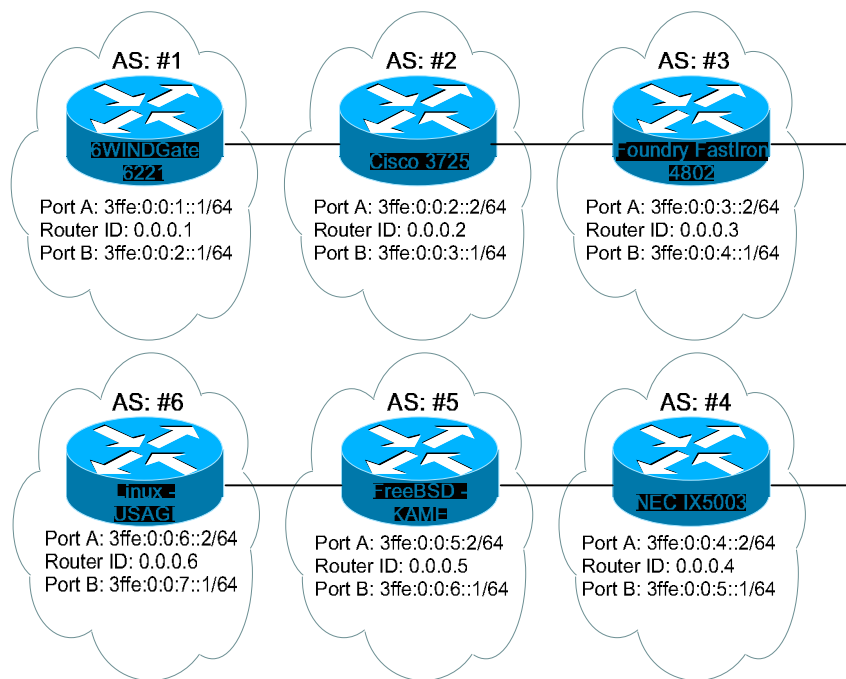


圖 6 External BGP 互通性測試組態

4. External BGP routes propagation:

本項測試主要是測試各個待測物是否能夠正確傳送出自己的 external BGP routes，並且接收從另一個待測物傳來的 external BGP routes。

本測試的組態設定如圖 6，我們在每個待測物的 Port B 上設定不同 subnet 的 IPv6 位址，然後利用 redistribute 機制在待測物上產生 external BGP routes，然

後再觀察每個待測物是否能夠正確傳送及接收 external BGP routes。

External BGP routes propagation 的測試結果為每個待測物均能正確傳送及接收 external BGP routes。

ISISv6 互通性測試

1. ISIS adjacency establishment:

本項測試主要是測試各個待測物之間是否能夠正確建立 ISIS adjacency。

本測試的組態設定如圖 7 所示，由於待測物中僅有 Cisco 3725 及 Foundry FastIron 4802 有支援 ISISv6，故只測試此兩待測物的 ISISv6 互通性。我們先把兩個待測物接線在一起並且設定在同一個 subnet 的 IPv6 位址，然後再觀察兩個待測物之間是否能夠建立起 ISIS adjacency。

ISIS adjacency establishment 的測試結果為每個待測物均能建立起 ISIS adjacency。

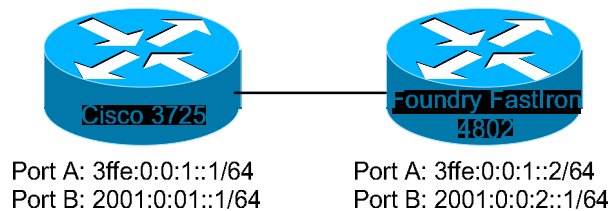


圖 7 ISISv6 互通性測試組態

2. LSP database exchange:

本項測試主要是測試待測物是否能夠在收到其他待測物所發出的 LSPs (Link-State Packets)後更新自己的 LSP database，並且將所學到的 topology 傳送到其他的待測物上。

本測試的組態設定如圖 7，我們在每個待測物的 Port B 上設定不同 subnet 的 IPv6 位址，然後利用 redistribute 機制在待測物上產生 ISIS routes，然後再觀察每個待測物是否能夠交換 LSP database。

LSP database exchange 的測試結果為每個待測物均能正確交換 LSP database。

在以上 RIPng, OSPFv3, BGP-4+及 ISISv6 的互通性測試中，每個待測物均通過測試，由此我們認為 IPv6 routing protocols 目前是沒有問題而且是堪用的，但是基於 IPv6 符合性的測試尚未有一個十分讓人滿意的結果，因此有可能在某些特殊的狀況底下 IPv6 router 與 IPv6 router 之間還是沒有辦法互通的，仍然有一些邊界限制條件的存在。

6. IPv4/IPv6 效能測試

在效能測試方面，我們進行了 data-plane IPv4 與 IPv6 的 forwarding performance、IPv6 transition performance 及與 control-plane IPv4 與 IPv6 的 routing performance，同時進行 IPv4 及 IPv6 的測試主要用意是想要瞭解 IPv6 的效能比起 IPv4 來變好或是變壞多少，各個測試項目說明如下。

IPv4/IPv6 forwarding performance 測試

此項測試是根據 RFC 2544(Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices)[31]所定義的方法來量測待測物的 throughput 及 latency，此測試會找出待測物在固定封包大小的 traffic 底下沒有 packet loss 發生時最大的轉送速率，然後在此速率下量測轉送的 throughput 以及待測物處理每個封包的 latency，我們所採用的測試工具為 Spirent SmartBits SmartFlow。

本測試的組態如圖 8 所示，我們分別在 Tester 及待測物上設定 IPv4 及 IPv6 的位址，然後從 Tester Port A 送出某個固定速率的 traffic 到待測物的 Port A，然後從 Tester Port B 接收待測物 Port B 轉送過來的 traffic。若是 Tester 發現有 packet loss 的情況發生，則 Tester 會減少 offered load 再重複進行測試，若是發現沒有 packet loss 的情況發生，則 Tester 會增加 offered load 再重複進行測試，如此二元搜尋(binary search)的方式會一直持續到 Tester 找到待測物在沒有 packet loss 情況底下最大的轉送速率。為了要瞭解 IPv4 及 IPv6 forwarding performance 的差異性，我們先讓 Tester 送出 IPv4 traffic 量測 IPv4 forwarding performance，然後再改送 IPv6 traffic 量測 IPv6 forwarding performance，最後再同時送出 IPv4 及 IPv6 各佔 50% 的 traffic 量測 dual stack forwarding performance。

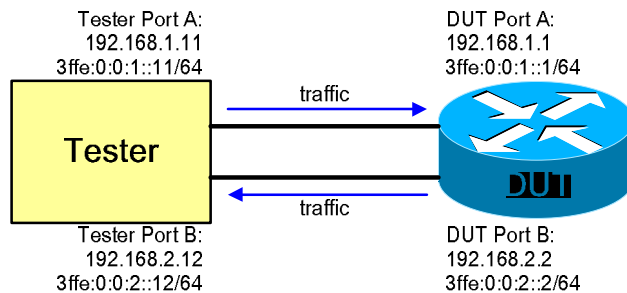


圖 8 IPv4/IPv6 forwarding performance 測試組態

圖 9 及圖 10 為 IPv4 forwarding performance 的測試結果，我們發現 Foundry FastIron 4802 在 throughput 的表現非常優異，不論是在何種封包大下的 traffic 底下皆能到達 wire-speed(亦即 100 Mbps)的 throughput 而且處理封包的 latency 也最

小。其次表現良好的為 NEC IX5003，在封包大小為 256 bytes 就能夠到達 wire-speed，只是 NEC IX5003 的 latency 最所有待測物當中最高的，我們推測是因為 NEC IX5003 的處理器速度較慢，或是 NEC IX5003 採用了較大的 buffer 來存放所收到的封包，所以造成 queuing delay 較長。整體而言，所有待測物在各種大小封包的 IPv4 traffic 底下平均的 throughput 為 83.6 Mbps，而平均 latency 為 95.8 us。

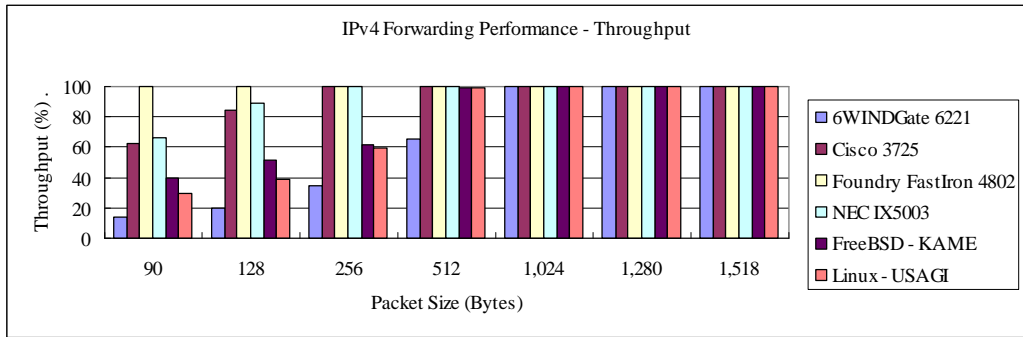


圖 9 IPv4 forwarding performance 之 throughput

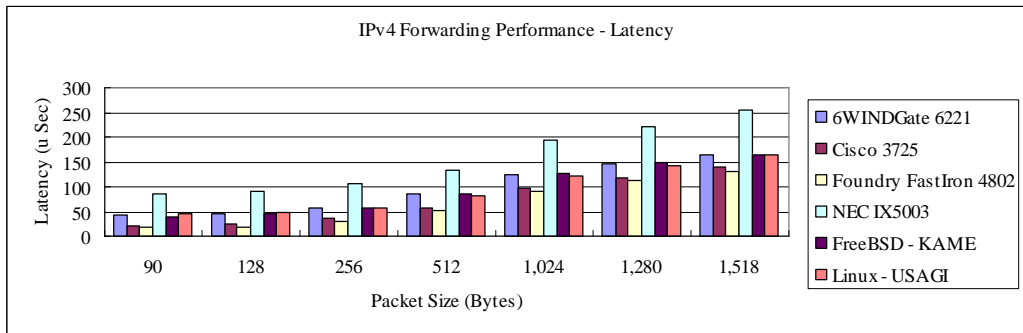


圖 10 IPv4 forwarding performance 之 latency

圖 11 及圖 12 為 IPv6 forwarding performance 的測試結果，我們發現 NEC IX5003 在 throughput 的表現非常優異，在封包大小為 256 bytes 就能夠到達 wire-speed，只是其處理 IPv6 封包的 latency 也一樣偏高。其次表現優異的是 Foundry FastIron 4802，在封包大小為 512 bytes 就能夠到達 wire-speed，而且在封包大小小於 512 bytes 的 traffic 底下時其 latency 也為最短。整體而言，所有待測物在各種大小封包的 IPv6 traffic 底下平均的 throughput 為 70.4 Mbps，而平均 latency 為 125.9 us。

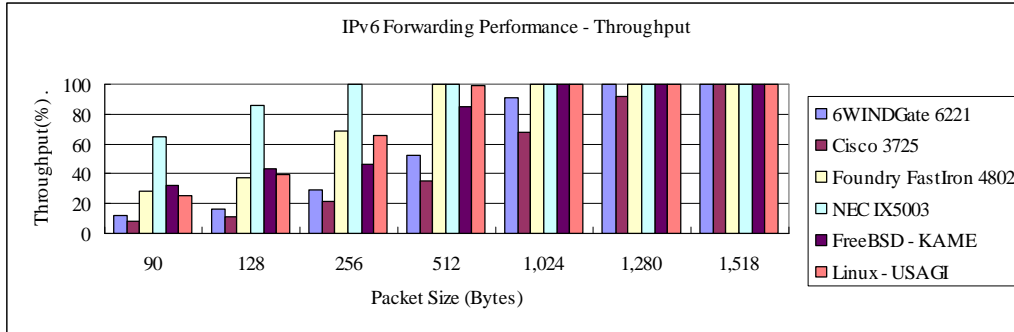


圖 11 IPv6 forwarding performance 之 throughput

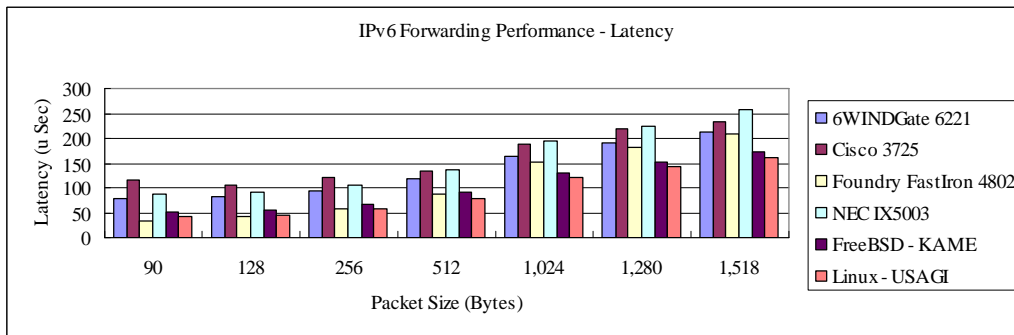


圖 12 IPv6 forwarding performance 之 latency

圖 13 及圖 14 為 IPv4/IPv6 dual stack forwarding performance 的測試結果，我們發現 NEC IX5003 在 throughput 的表現最佳，在封包大小為 256 bytes 就能夠到達 wire-speed，只是其處理封包的 latency 也一樣偏高，其次表現佳較的為 Foundry FastIron 4802，在封包大小為 512 bytes 就能夠到達 wire-speed，而且 latency 平均來說也最短。整體而言，所有待測物在各種大小封包的 IPv4 及 IPv6 traffic 底下平均的 throughput 為 76 Mbps，而平均 latency 為 112.6 us。

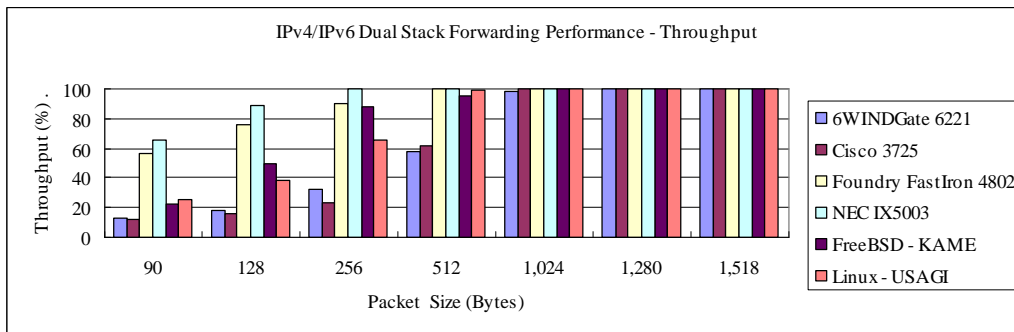


圖 13 IPv4/IPv6 dual stack forwarding performance 之 throughput

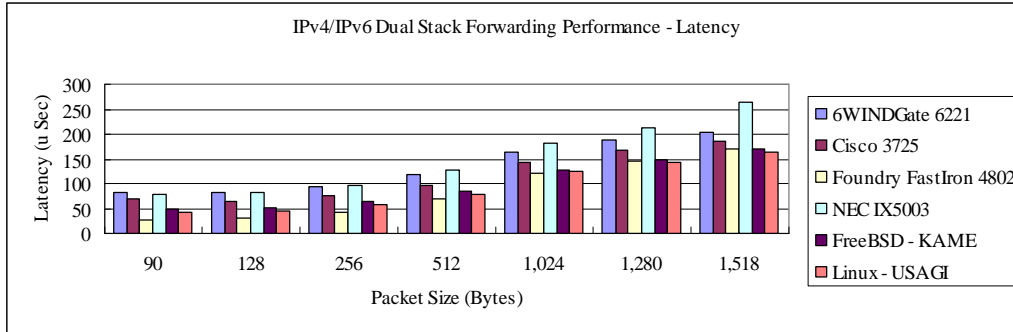


圖 14 IPv4/IPv6 dual stack forwarding performance 之 latency

就以上三項的測試結果我們可以發現，NEC IX 5003 在 IPv4, IPv6, IPv4/IPv6 dual stack forwarding 的 throughput 表現都很不錯，但是其處理封包的 latency 較長。Foundry FastIron 4802 在 IPv4 forwarding 的 throughput 表現最佳，在 IPv6 及 IPv4/IPv6 dual stack forwarding 的表現也不錯，而且平均處理封包的 latency 是所有待測物中最小的。另外我們比較所有待測物對於 IPv4 forwarding 及 IPv6 forwarding performance 的差異，從測試的結果我們發現整體的 IPv6 throughput 約為 IPv4 的 84%，處理 IPv6 封包的 latency 約為 IPv4 的 1.31 倍。

IPv6 transition performance 測試

在此項目中我們測試了 IPv6 manually configured tunnel performance 及 automatic IPv4-compatible tunnel performance，所採用的測試工具為 IXIA ScriptMate IPv6 Tunneling Test Scripts。

1. IPv6 manually configured tunnel performance:

本測試是在待測物上建立 IPv6 manually configured tunnel，讓收到的 IPv6 封包經過 IPv4 封包的封裝之後再轉送出去，此測試會找出待測物在固定封包大小的 traffic 底下沒有 packet loss 發生時最大的轉送速率，然後再此速率下量測轉送的 throughput 以及待測物處理每個封包的 latency。

本測試的組態如圖 8 所示，我們手動建立 manually configured tunnel，並且指定 tunnel 的 source 端為 192.168.2.2 及 destination 端為 192.168.2.12，Tester 在收到 tunneled packets 後會解封裝還原成 IPv6 封包。此測試量測 throughput 及 latency 的方法如前面 forwarding performance 測試方法所述。

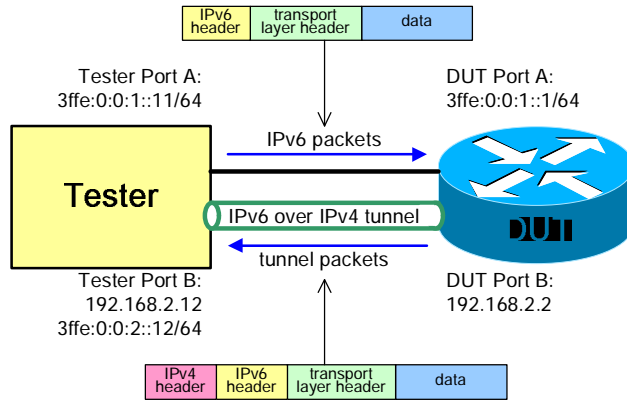


圖 15 IPv6 manually configured tunnel performance 測試組態

圖 16 及圖 17 為 IPv6 manually configured tunnel performance 的測試結果，我們發現 NEC IX5003 在 throughput 的表現最佳，只是其處理封包的 latency 卻比其他待測物高上許多，其次 throughput 表現佳較的為 Linux - USAGI 與 Foundry FastIron 4802，但 Linux - USAGI 處理封包的 latency 要比 Foundry FastIron 4802 小上很多。整體而言，所有待測物在各種大小封包的 traffic 底下平均的 throughput 為 75.3 Mbps，而平均 latency 為 7981.6 us。

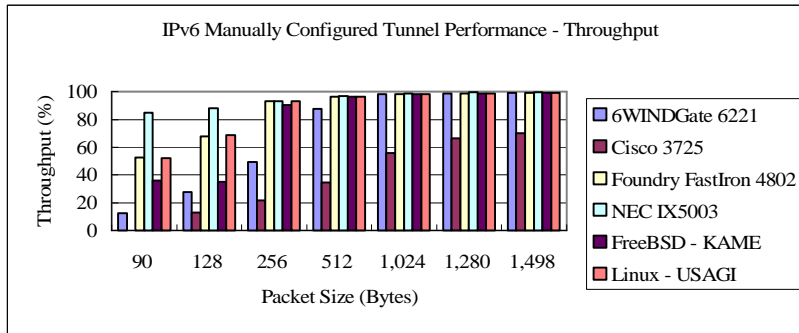


圖 16 IPv6 manually configured tunnel performance 之 throughput

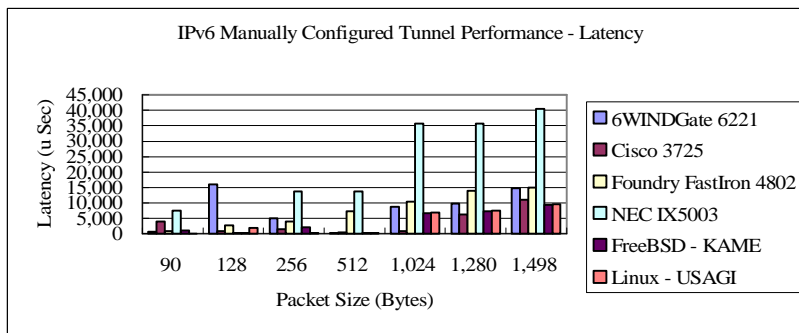


圖 17 IPv6 manually configured tunnel performance 之 latency

2. Automatic IPv4-compatible tunnel performance:

本測試是在待測物上建立 automatic IPv4-compatible tunnel，讓收到的 IPv6 封包經過 IPv4 封包的封裝之後再轉送出去，此測試會找出待測物在固定封包大小的 traffic 底下沒有 packet loss 發生時最大的轉送速率，然後在此速率下量測轉送的 throughput 以及待測物處理每個封包的 latency。

本測試的組態如圖 18 所示，我們只需要指定 tunnel 的 source 端為 192.168.2.2 就可以，而待測物會根據所收到的封包中 IPv6 位址最後的 32 bits 轉換成 IPv4 的 32 bits 位址，自動與目的端建立 tunnel，並且封包透過 tunnel 轉送出去，Tester 在收到 tunneled packets 後會解封裝還原成 IPv6 封包。此測試量測 throughput 及 latency 的方法如前面 forwarding performance 測試方法所述。由於 NEC IX5003 及 FreeBSD – KAME 並未支援 IPv4-compatible tunnel，故沒有列入此項測試。

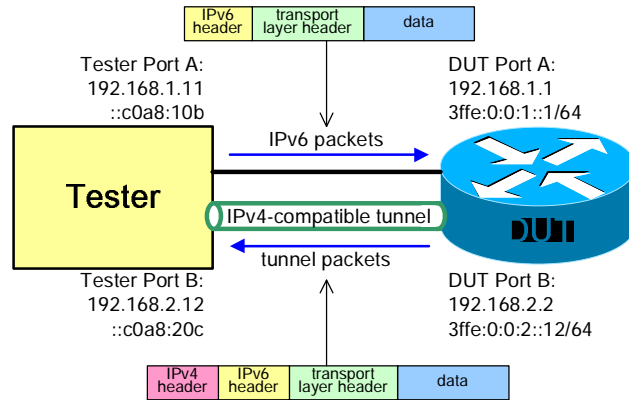


圖 18 Automatic IPv4-compatible tunnel performance 測試組態

圖 19 及圖 20 為 automatic IPv4-compatible tunnel performance 的測試結果，我們發現 Linux - USAGI 在 throughput 的表現最佳，而且處理封包的 latency 也最小，其次 throughput 表現較佳的為 Foundry FastIron 4802，但是其處理封包的 latency 卻偏高。整體而言，所有待測物在各種大小封包的 traffic 底下平均的 throughput 為 68.9 Mbps，而平均 latency 為 6754.4 us。

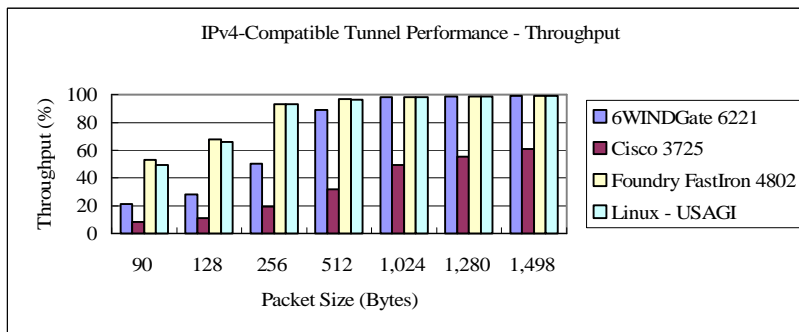


圖 19 Automatic IPv4-compatible tunnel performance 之 throughput

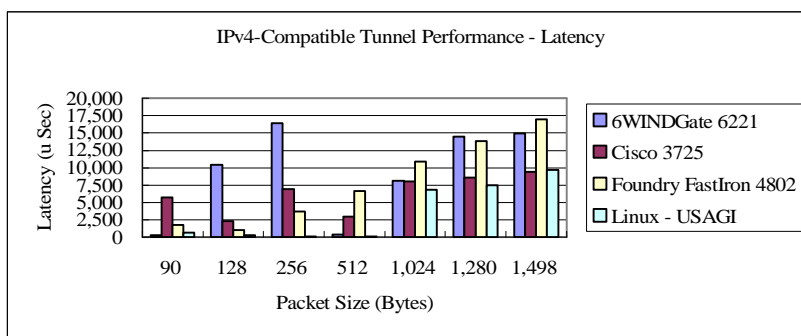


圖 20 Automatic IPv4-compatible tunnel performance 之 latency

我們以 IPv6 manually configured tunnel performance 來和之前所測試的 IPv4 forwarding performance 作一個比較，結果發現若採用此項 IPv6 transition 技術，則 throughput 為原先 IPv4 forwarding 的 90%，但是 latency 則變為 83.3 倍。

IPv4/IPv6 routing performance 測試

在此項目中我們測試了 maximum BGP routes learned 及 route flapping test，我們也比較了 IPv4 與 IPv6 在 routing performance 上的差異。

1. Maximum BGP routes learned:

本測試主要是找出待測物的 BGP routing table 最多能夠加入多少條 BGP routes，直到待測物無法從 BGP UPDATE message 中學習或傳送新的 routes。

本測試的組態設定如圖 21 所示，我們所採用的測試工具為 Spirent Atdach AX/4000 Controller Software。我們將 Tester 及待測物的兩個 port 都設定 IPv4 及 IPv6 位址，並且兩者都將對方設為 neighbor，接著我們從 Tester Port A 送出 BGP UPDATE messages 至待測物，並且從 Tester Port B 接收從 DUT Port B 所傳送過來的 BGP UPDATE messages，藉以驗證所有從 Tester 送出的 routes 都有被待測物學到並且傳送回 Tester，Tester 所送出的 BGP routes 數量會一直增加，直至待測物無法學習或傳送新的 routes，此時的 routes 數量即為待測物的 BGP routing table 所能加入的最大 routes 數量。我們首先針對 IPv4 方面進行測試，對待測物送出 BGP-4 routes，測試完畢後，再送出 IPv6 的 BGP-4+ routes 進行測試。

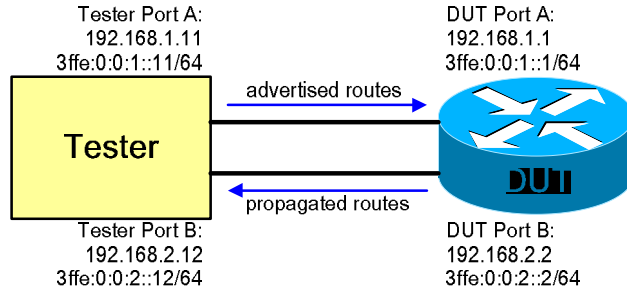


圖 21 Maximum BGP routes learned 測試組態

圖 22 為測試結果，我們發現 6WINDGate 6221 在 BGP-4 及 BGP-4+ 上都能學到 86 萬多條路徑，其主要的原因是因為 6WINDGate 6221 的主記憶體為 256 MB，而其他的待測物都只有 128 MB。在 Cisco 3725 的測試上，我們比較了有打開 Cisco Express Forwarding (CEF) 功能與有沒有打開時的差別，我們發現打開 CEF 功能時對 BGP-4 路徑學習的影響不大，但是對於 BGP-4+ 路徑學習的影響頗大，可以學到的 BGP-4+ 路徑約為沒有打開 CEF 功能時的 60%。Foundry FastIron 4802 在學習 BGP-4 路徑時表現不錯，但是卻在 BGP-4+ 的測試中可以學到的路徑變少很多。NEC IX5003 的最大 BGP-4 及 BGP-4+ 學習數量都大略相同。FreeBSD - KAME 及 Linux - USAGI 由於硬體的規格都相同，而且執行的 routing 軟體都是 Zebra，故測試出來的結果都相同。但是在測試的過程中我們發現 Foundry FastIron 4802 及 NEC IX5003 學習 BGP 路徑的速度非常緩慢，也就是說要測得它們所能學得的最大路徑數需要花費數十分鐘甚至數小時的時間。由於 IPv6 位址的長度 128 bits 而 IPv4 位址的長度為 32 bits，兩者相差 4 倍，我們原本認為待測物最多所能學到的 BGP-4+ 數量應該無法超過 BGP-4 數量的 1/4，但是從測試結果來看，其實兩者相差不大，甚至 FreeBSD - KAME 及 Linux - USAGI 的測試中，兩者最多所學到的 BGP-4+ 數量比 BGP-4 數量還要多。

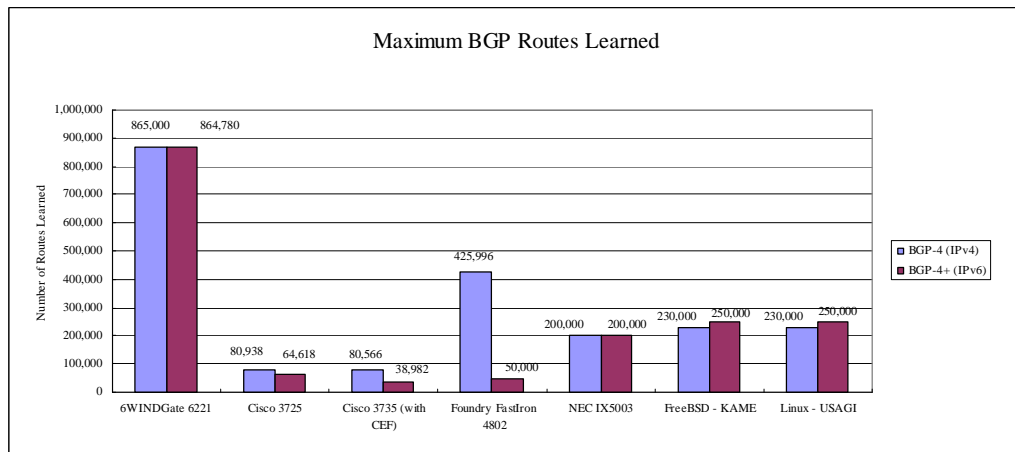


圖 22 Maximum BGP routes learned 測試結果

2. BGP route flapping test:

網路的 topology 會隨著一些新發生的事件而有所改變，例如網路線路中斷、router 故障或是有新的 node 要加入網路，當發生此種狀況時 router 的 routing table 的內容應該要隨之改變，我們稱這些路徑改變的動作稱為 route flapping，router 在發現有 route flapping 的狀況時應該要能夠很快更新 routing table 的內容。本測試主要是找出待測物在 BGP routes 撤回(withdraw)及重新傳送(re-advertise)時的 flap 及 recover routes 的時間。

本測試的組態設定如圖 23 所示，我們所採用的測試工具為 Spirent SmartBits TeraRouting Tester。我們將 Tester 及待測物的兩個 port 都設定 IPv4 及 IPv6 位址，並且兩者都將對方設為 neighbor，接著我們從 Tester Port A 送出 BGP UPDATE messages 讓待測物學習，然後從 Tester Port B 送出 traffic 經由待測物的轉送到 Tester Port A，當時間到達我們預設的步驟一(Step 1)時間點時，我們模擬 Test Port A 及待測物 Port A 之間的 BGP session 中斷，此時待測物會從 routing table 中撤回所學到的 BGP routes，當時間到達我們預設的 Final Unflap 時間點時，我們再重新建立剛才中斷的 BGP session，此時待測物會重新學習 BGP routes，我們在 Step 1 及 Final Unflap 事件發生後觀察待測物需要多久的時間來 flap 及 recover routes。在測試的參數設定中，Tester 對待測物所發出的 BGP route 數目分別為 5,000、10,000 及 50,000 條，Tester Port B 的 offered load 為 80%。我們先進行 BGP-4 route flapping test 然後再進行 BGP-4+ route flapping test，比較 IPv4 及 IPv6 在 route flapping 上的差異。

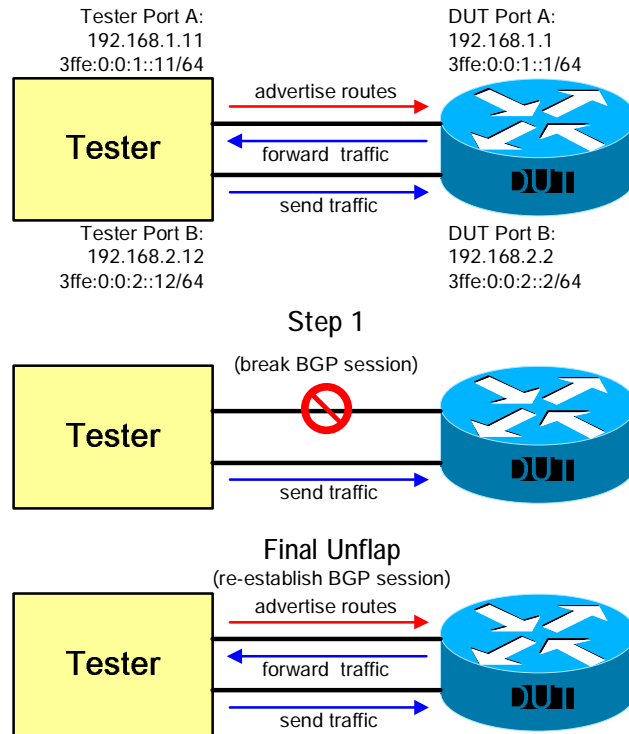


圖 23 BGP route flapping 測試組態

表 7 為測試結果，其中有些測試無法完成最後的數據，例如在表格中的 Not converged 代表待測物在一剛開始測試的時候就無法學習到所有 Tester 所送出的 BGP routes，也就是沒有辦法收斂，N/A 代表無法順利進行此項測試，例如某些待測物過習 BGP routes 的時間過長，或者是 Linux – USAGI 在測試一剛開始時無法正確回應 neighbor advertisement 給 Tester，造成 Tester 無法送出 traffic。從表 7 中我們可以看出 Cisco 3725 不論是在 BGP-4 及 BGP-4+ 的 route flapping 測試上表現都相當好，Foundry FastIron 4802 則是在 BGP-4 route flapping 測試中表現不錯。比較 BGP-4 及 BGP-4+ route flapping 測試的結果，我們可以發現 IPv6 flap routes 的時間約為 IPv4 的 4.26 倍，recover routes 的時間約為 IPv4 的 1.94 倍

表 7 BGP route flapping 測試結果

Device under test	Number of Routes	BGP-4 (IPv4)		BGP-4+ (IPv6)	
		Time to flap routes (Sec)	Time to recover routes (Sec)	Time to flap routes (Sec)	Time to recover routes (Sec)
6WINDGate 6221	5,000	5	12	5	62
	10,000	22	40	63	62
	50,000	50	Not converged	100	Not converged
Cisco 3725	5,000	3	5	2	5
	10,000	2	6	3	8
	50,000	3	14	5	11
Foundry	5,000	2	3	23	18

FastIron 4802	10,000	2	6	90	84
	50,000	3	5	N/A*	N/A*
NEC IX5003	5,000	20	31	22	76
	10,000	51	54	N/A*	N/A*
	50,000	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*
FreeBSD - KAME	5,000	3	29	47	23
	10,000	4	43	21	18
	50,000	8	36	Not converged	Not converged
Linux - USAGI	5,000	5	5	Not converged	Not converged
	10,000	5	5	N/A**	N/A**
	50,000	Not converged	Not converged	N/A**	N/A**

*學習 BGP routes 的時間過久

**Linux – USAGI 無法回應正確的 neighbor advertisement 給 Tester

我們從眾多 route flapping 測試結果圖表中挑選出三張較具有代表性的圖加以說明。圖 24 為 Cisco 3725 在 50,000 條 BGP-4 routes 測試的結果，其中的 24 代表 route 的 prefix 長度，Step 1 發生在第 90 秒時秒，而 Cisco 3725 在 93 秒時就已經將所有學習到的 BGP-4 routes 撤回，故 flap routes 的時間為 3 秒，另外 Final Unflap 發生在第 180 秒，而 Cisco 3725 在第 194 秒時就已經重新學到所有的 BGP-4 routes，故 recover routes 的時間為 14 秒。從圖 25 我們可以看出 NEC IX5003 在學習及撤回 BGP-4+ routes 的速度比較慢，故 flap routes 及 recover routes 的時間分別為 22 秒及 76 秒。從圖 26 我們可以看出 Linux – USAGI 在 5,000 條 BGP-4+ routes 測試時，Tester 的 receive rate 無法到達 100%，也就是學習路徑無法收斂，故我們無法判斷其真正的 flap routes 及 recover routes 的時間。

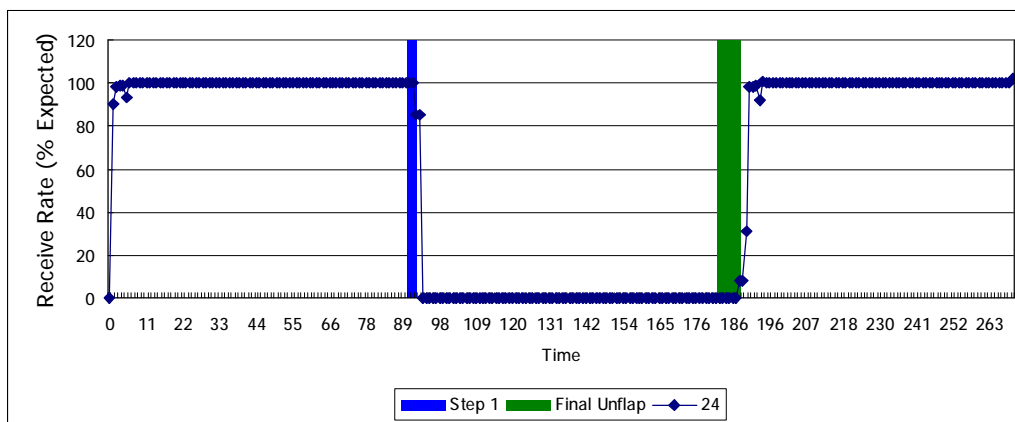


圖 24 Cisco 3725 之 BGP-4 route flapping 測試結果(50,000 routes)

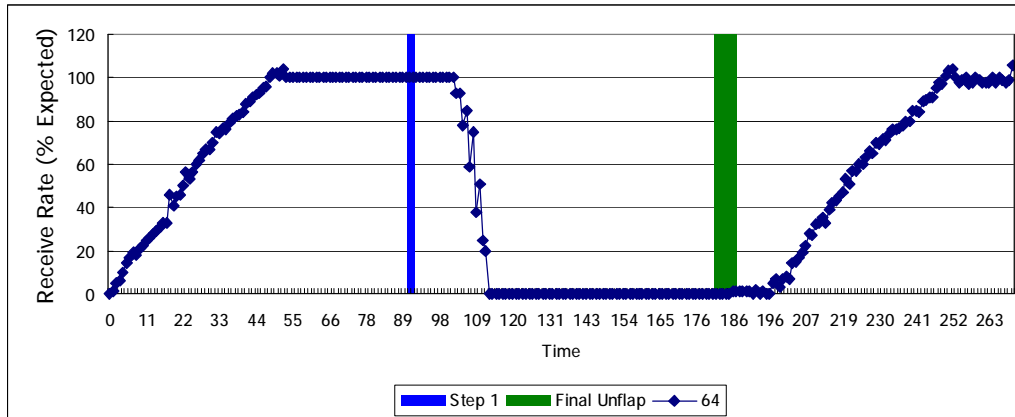


圖 25 NEC IX5003 之 BGP-4+ route flapping 測試結果(5,000 routes)

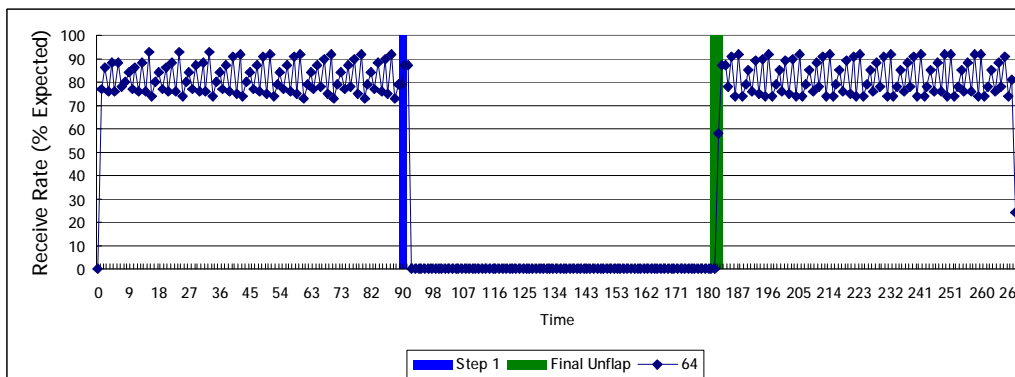


圖 26 Linux - USAGI 之 BGP-4+ route flapping 測試結果(5,000 routes)

7. 結論

本計劃測試了 IPv6 企業級的 router，而受測的裝置包括 6WINDGate 6221, Cisco 3725, Foundry FastIron 4802 Premium, NEC IX5003 四家商業產品及 FreeBSD - KAME, Linux - USAGI 兩個 open source 系統，測試的項目包括 IPv6 功能比較、符合性、互通性及效能(performance)等大四類。

從符合性測試的結果來看，整體的通過率有 84%，可見 IPv6 技術已逐漸趨於成熟。而互通性測試結果顯示每家產品均能通過測試，表示這些產品已經堪用，但還是必須朝向完全符合 IETF RFC 的規範邁進。Forwarding 效能測試的結果顯示整體的 IPv6 throughput 約為 IPv4 的 84%，處理 IPv6 packet 的 latency 約為 IPv4 的 1.31 倍。若採用 IPv6 transition 技術，則 throughput 變為原先 IPv4 forwarding 的 90%，但是 latency 則因為封包需封裝及解封裝而變為 83.3 倍。Routing 效能測試的結果顯示 IPv6 與 IPv4 在學習 BGP routes 上並沒有太大異差，

在而 BGP route flapping 測試上，IPv6 flap routes 的時間約為 IPv4 的 4.26 倍，recover routes 的時間約為 IPv4 的 1.94 倍。

就產品的特點而言，6WINDGate 6221 在 IPv6 的功能支援上較為完整，Cisco 3725 在 routing performance 上表現較佳，Foundry FastIron 4802 在 IPv4/IPv6 forwarding 有不錯的 performance，NEC IX5003 則在 IPv6 符合性及 IPv6 forwarding performance 表現最佳，最後 FreeBSD – KAME 及 Linux – USAGI 則不失為價廉且各方面兼具的選擇。

除了測試 IPv6 routers 之外，我們也介紹了許多 IPv6 的測試工具，Agilent 的測試工具有許多還在發展中，IXIA 在支援 IPv6 conformance 測試上最為完整，test cases 最多而且說明文件也很詳細，Spirent 的 IPv6 performance 測試工具則提供了相當友善的操作界面，而且測試結果數據也大多以圖表的方式來呈現，可以節省測試人員在分析測試結果上的時間，TAHI 計劃則提供了 open source 的 IPv6 conformance 及 interoperability 測試軟體，但是操作及測試說明文件略嫌不足。

由於目前 IPv6 是一個相當新穎的技術而且其市場尚未興起，故我們並沒有對各個待測物進行評分，本次測試主要是在檢視目前 IPv6 產品的成熟度為何、產品之間的互通性程度，而未來可以努力的方向為探討 IPv6 網路在實際佈局時可能會遭遇到的困難與障礙。

參考資料

- [1] The Internet Engineering Task Force, <http://www.ietf.org/>.
- [2] S. Deering, and R. Hinden, “Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification,” IETF RFC 2460, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2460.txt>, 1998.
- [3] R. Droms, “Dynamic Host Configuration Protocol,” IETF RFC 2131, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2131.txt>, 1997.
- [4] T. Narten, E. Nordmark, and W. Simpson, “Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6),” IETF RFC 2461, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2461.txt>, 1998.
- [5] R. Droms, and et al., “Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6),” IETF draft, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-dhc-dhcpv6-28.txt>, 2002.
- [6] G. Malkin, and R. Minnear, “RIPng for IPv6,” IETF RFC2080, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2080.txt>, 1997.
- [7] R. Coltun, D. Ferguson, and J. Moy, “OSPF for IPv6,” IETF RFC 2740, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2740.txt>, 1999.
- [8] C. E. Hopps, “Routing IPv6 with IS-IS,” IETF Draft, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-isis-ipv6-05.txt>, 2003.

- [9] T. Bates, and et al., "Multiprotocol Extensions for BGP-4," IETF RFC 2858, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2858.txt>, 2000.
- [10] H. Feyrer, "Introduction to IPv6," O'REILLY, 2001.
- [11] European Telecommunications Standards Institute, <http://www.etsi.org/>.
- [12] TAHI Project, <http://www.tahi.org/>.
- [13] Beijing Internet-networking Institute, <http://www.biigroup.com/>.
- [14] The FreeBSD Project, <http://www.freebsd.org/>.
- [15] Linux, <http://www.linux.org/>.
- [16] KAME Project, <http://www.kame.net/>.
- [17] USAGI Project, <http://www.linux-ipv6.org/>.
- [18] GNU Zebra routing software, <http://www.zebra.org/>.
- [19] Ixia Corporation, <http://www.ixiacom.com/>.
- [20] Spirent Communications, <http://www.spirentcom.com/>.
- [21] NetIQ Corporation, <http://www.netiq.com/>.
- [22] Agilent Technologies, <http://www.agilent.com/>.
- [23] R. Gilligan and E. Nordmark, "Transition Mechanisms for IPv6 Hosts and Routers," IETF RFC 2893, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2893.txt>, 2000.
- [24] A. Conta, and S. Deering, "Generic Packet Tunneling in IPv6 Specification," IETF RFC 2473, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2473.txt>, 1998.
- [25] B. Carpenter, and K. Moore, "Connection of IPv6 Domains via IPv4 Clouds," IETF RFC 3056, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3056.txt>, 2001.
- [26] F. Templin and et al., "Intra-Site Automatic Tunnel Addressing Protocol (ISATAP)," IETF Draft, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ngtrans-isatap-13.txt>, 2003.
- [27] G. Tsirtsis, and P. Srisur, "Network Address Translation - Protocol Translation (NAT-PT)," IETF RFC 2766, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2766.txt>, 2000.
- [28] S. Deering, W. Fenner, and B. Haberman, "Multicast Listener Discovery (MLD) for IPv6," IETF RFC 2710, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2710.txt>, 1999.
- [29] D. Estrin, et al., "Protocol Independent Multicast-Sparse Mode (PIM-SM): Specification," IETF RFC 2362, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2362.txt>, 1998.
- [30] A. Adams, J. Nicholas, and W. Siadak, "Protocol Independent Multicast - Dense Mode (PIM-DM): Protocol Specification (Revised)," IETF Draft, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-pim-dm-new-v2-03.txt>, 2003.
- [31] S. Bradner, and J. McQuaid, "Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices," IETF RFC 2544, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt>, 1999.