

交換中心網路品質測量系統建置實例

古立其 李慧蘭 陳敏

財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心
{lku,gracelee,minchen}@narlabs.org.tw

摘要

網路交換中心位居各種網路相互介接的樞紐，在雲端服務興起後更成為使用者網路與雲端服務商互連交換訊務的關鍵門戶，與現代網路品質及使用體驗密切相關。當重要性逐步高升，服務的範圍也逐漸由點走向線、面的同時，確保交換中心網路品質的測量技術也日漸扮演更顯著的角色。本文就台灣交換中心的沿革及發展現況，可能遭遇的問題、以及適用於交換中心的網路效能測量方案進行探討及分析。

關鍵詞：交換中心、網路效能測量

Abstract

Network exchanges serve as the hub for different networks to interconnect and exchange traffic. Due to its unique role as interconnecting networks to the cloud providers, its importance is getting increasingly more. As the complexity of network exchange rises, effective ways to monitor the network quality across connecting members become crucial as well. This paper introduced the development of network exchange in Taiwan, the problem affecting the quality, and the measurement strategy to strengthen the long term quality of the traffic exchanging.

Keywords: Network Exchange, Performance Measurement, perfSONAR.

1. 前言

如同網路設備可以靠網路線互相連接，不同的網路彼此需要連接，也可以視距離租用或建置短程或長途的線路來彼此相連。網路以這種方式相連，就會面臨和網路設備連接一樣的問題，就是有 N 個網路設備，就會需要 $N \times (N-1) / 2$ 條線，才夠讓每個設備間彼此都產生連線。為了解決設備一多，就需要架設數量龐大的網路線的問題，所以使用網路交換器。每個設備都只需要一條線路連上交換器，藉由交換器就能與所有其他設備交換訊務。

而網路交換中心，就如同交換器一樣，讓需要彼此互連的網路，只需要各準備一條線路連上交換中心，就能與同一交換中心的所有其他網路交換訊務。事實上最單純的交換中心，在架構上就等同於一台網路交換器，讓來自每個網路的線路接上後彼此連接。而較複雜的交換中心則可能同時提供網路第一至三層的交換功能，甚至利用其位於網路邊界交際地帶的位置優勢，提供主機代管、邊緣運算 (Edge Computing)、內容傳遞網路 (Content Delivery Network; CDN) 等附加服務[1]。

更有交換中心同時在不同城市地區建置機房

及交換設施，並在內部連通，使連線單位不管連入哪一個機房，都能與所有機房的其他連線單位互連，達成廣域的服務。這樣的服務等同於協助連線單位克服了地理位置及距離的限制，減少了長途連線資源的壟斷及分佈不均，因而促進了網路資源的普及和平衡發展。然而當交換中心的架構漸趨複雜、甚至跨越異地之後，影響交換中心本身網路品質的變因便大幅增加。為了維持訊務的交換品質，有效的網路品質效能監控策略不可或缺。本文即就交換中心及其網路品質監控方式進行探討。

2. 交換中心的沿革與建置

2.1 交換中心淺介

網路服務供應商 (ISP) 或內容服務供應商 (ICP) 若以完全互連 (Fully-Meshed) 架構彼此連接，勢必會提高互連成本，但若僅需連接至網際網路交換中心即可改善訊務交換拓撲與互連成本。國際內容服務業者也僅需要串接至網際網路交換中心即可串接至境內。顯見建置一家具中立且非營利性的網路網路交換中心以創造臺灣網際網路健全發展的重要性。其中以考量整體公眾利益具中立性質的交換中心，可為網路服務供應商 (ISP) 或內容服務供應商 (ICP) 所信任；另，非營利性質可提供公平合理介接成本，有利於小型內容業者和新創產業的發展。

2.2 國內外交換中心的介紹

台灣網際網路交換中心 (簡稱 TWIX)[2] 是台灣首家 IX 中心，於 1997 年由中華電信所設立。由台北主節點和三個位於板橋、台中和高雄的衛星節點組成。衛星節點為資料中心機房提供當地電信業者、有線電視業者和網路內容供應商介接。自 TWIX 流出的網路流量為全台之冠。

台北網際網路交換中心 (簡稱 TPIX)[3] 由是方電訊公司營運，是全台灣最多海纜業者匯集的交換中心，匯聚國內外網路營運商、網路服務商、網路內容供應商以及網路增值服務供應商，會員結構多樣化。

阿姆斯特丹互連網交換中心 (簡稱 AMS-IX)[4] 發展已近 30 年，最初是用於連接荷蘭的學術機構網路，後來商業網路服務業者和電信營運商也加入。在 2003 年躍升為全球互連成員網路數量最多的 IX (178 名成員)，並於 2005 年成為全球最大的公共交換流量據點。AMS-IX 是中立性質的交換中心，其營運管理是由非營利協會組成。

香港國際互聯網交換中心 (簡稱 HKIX)[5] 是亞

太區最大的訊務交換中心，其地理位址賦予低延遲優勢，目前 100GE 通訊埠成員用戶占了全部成員的三分之一，以內容服務供應商和雲端服務業者為主。HKIX 是由非營利組織的大學所營運，具中立性質。

新加坡網際網路交換中心(簡稱 SGIX)[6]是由新加坡資通訊發展局所成立，屬於唯一營運中立之非營利網際網路交換中心。主要目的是吸引區域型或國際型內容業者可以進駐新加坡，SGIX 將互連端主機置於資料中心內，以分散式網路交換中心模式營運，因此其路由伺服器均是虛擬化運行，目前 SGIX 與全球超過 45 家資料中心和網際網路交換中心建立了遠端互連機制。SGIX 優越的地理位置使其成為東南亞地區 IX 樞紐的不二選擇。

Pacific Wave[7] 是位於美國西岸的分散式學術研究網路交換中心。在成立之初，其服務據點即包括西雅圖、Sunnyvale、洛杉磯，縱貫美西海岸線。其連線服務對象包含跨太平洋的日本、韓國、台灣、中國、甚至遠達澳洲及紐西蘭。其宗旨為只要連達 Pacific Wave 任一處據點，即可透過其內部連線，與其他各處據點之學研網進行互連。我國的台灣高品質學術研究網路 (Taiwan Advanced Research and Education Network; TWAREN)[8] 即在 Pacific Wave 與 包含美國 DREN、墨西哥 CUDI、日本 SINET、澳洲 AARNET、加拿大 CANARIE 在內之多達 16 個國際學術研究網路互連。近幾年 Pacific Wave 更將據點擴大至日本東京、關島、阿拉斯加 Fairbanks、芝加哥等地，使其服務範圍大增。國際學術研究網路透過 Pacific Wave 進行介接也更能打破地理位置的限制，與更多地區的國際研網互連。

2.3 FOX 交換中心的建置

我國政府於 110 年起推動數位國家創新經濟發展方案，為加速疫後的數位轉型，擴大國家數位基礎建設的需求，持續投入強化數位韌性相關建設，其中建置公共服務網路交換中心至關重要，透過公共服務網路交換中心整合現有公共網路、提升各公部門跨域傳輸效率及備援能力。國研院國網中心配合我國數位發展政策於 111 年完成建置公共服務網路交換中心，並命名為福爾摩沙開放網際網路交換中心 (Formosa Open eXchange; FOX)[9] 簡稱為 FOX 交換中心。如圖 1 所示，國內四大公共服務網路：GSN 政府服務網路[10]、TANet 台灣學術網路[11]、TWAREN 研究網路和 ASNet 中研院研究網路[12] 分別以 20G 或 100G 頻寬接入 FOX 交換中心，進行網路傳輸高速直連交換，提升公共服務網路跨網傳輸效率。

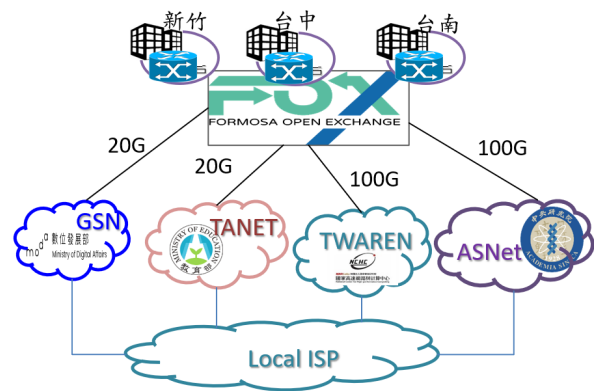


圖 1 FOX 交換中心連線架構圖

FOX 交換中心為異地三中心（新竹、台中及台南）高可靠性網路架構，如圖 2 所示，三地可互為備援，在新竹、台中和台南的核心路由器（Core Router, CR）以 TWAREN 的第二層多點對多點的虛擬私有網路 VPLS VPN 串聯；四大公共網路透過 VPLS VPN 藉由各自的邊際路由器（Border Router, BR）彼此以邊界閘道通訊協定（Border Gateway Protocol, BGP）互相連線。且 TANet 在台北科技大樓和台北三峽佈建 BR、TWAREN 在國網新竹和國網台南佈建 BR、GSN 在台北和高雄佈建 BR，均有兩台異地 BR 互為備援，連接至 FOX 交換中心的新竹與台南節點，ASNet 則以一台台北南港院區的 BR 連線 FOX；每一台 BR 以連線鏈路聚合（Link Aggregation Group, LAG）達到線路負載分流與線路備援，提升網路強韌性。

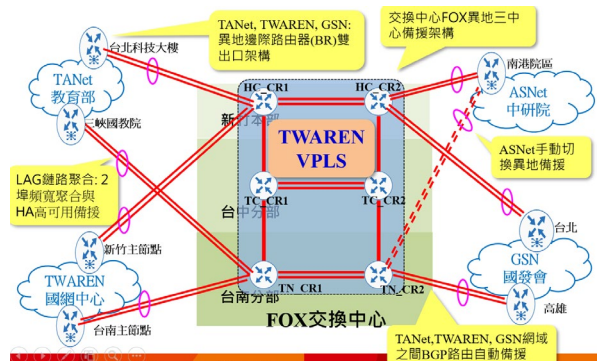


圖 2 FOX 交換中心高可靠性網路架構

2.4 交換中心的未來展望

受惠於人口密集及基礎建設完善之故，與世界上多數先進國家相較，台灣已是寬頻網路資源相對普及的國家。但由於台灣地形多山，山地佈建網路基礎建設成本較高、回收不易，因此在偏鄉地區，特別是山地偏鄉，形成大型電信公司投資意願較低、地區型小型網路業者卻又難以負擔高昂的上游介接成本，難於在大型業者環伺的市場上存活的盲區。

台灣目前的交換中心資源高度集中於北部都會地區，除了不利於風險分散外，也造成中、南部地區型固網業者需要以高昂的價格租用長程電路北上與其他網路或交換中心介接、又或透過其他大型電信業者的服務進行轉訊，以至於被墊高成本，失去競爭力[13]。

交換中心在台灣的未來發展趨勢以及使命，就是協助各地各種規模的電信、固網業者都能以相對公平、透明且一致的成本取得與其他台灣網路業者、乃至於國際重要的服務提供商介接的機會。為達成這樣的目標，台灣需要在未來具備中立、而且能夠跨區為中、南部地區型網路就近提供介接服務的分散式非營利網路交換中心。以此促進網路業者良性競爭，並使偏鄉地區的網路經營成本得以因此降低，真正促成台灣寬頻網路的完整普及。

3. 網路效能量測

3.1 網路效能量測原理

由於網路發展初期，軟硬體技術均尚不成熟，為了使長距離的廣域網路傳輸能夠實現並以相對低成本的方式普及，如今成為網路世界標準的 TCP/IP 協定在設計之初，將網路傳輸控制切分為 7 層，其中與網路傳輸的軟體控制最相關的第 3、4 層由作業系統的核心程式 (Kernel) 統一負責，使底下與硬體設計高度相關的第 1、2 層能保持單純，降低硬體設計的難度及成本；而提供給網路應用的第 7 層的介面得以獲得統一，使網路應用易於開發，更易普及。這個設計確實獲得空前的成功，造就了今日網路的榮景，但將網路傳輸控制分由硬體、作業系統等分層負責的結果，就是應用程式本身、以及使用這些應用程式的使用者無從得知網路的運作狀態，增加了網路故障原因鑑定的困難。

主動式網路效能量測就是因應上述網路架構設計的現況所發展出來的網路量測技術。透過主動送出量測封包、由量測的彼端收到後回傳特定資訊的方式，讓量測發起端在不依賴底層的網路狀態資訊的情況下，從接收到的資訊判定居中的網路品質及問題。使用這種方式進行網路品質量測，需要傳輸的兩端共同配合。以測試網路最常用的 ping 及 traceroute 為例，需要量測彼端在收到量測封包後，回傳特定的 ICMP echo reply 或是 ICMP port unreachable 訊息。回應此類 ICMP 訊息的功能，通常已內建在現今流行的各種作業系統中，由作業系統核心 Kernel 層負責，因此量測的雙方一般不需要另外安裝程式就能進行。但如果要進行更複雜的網路量測，例如 one way ping[14] 或頻寬量測，則由於作業系統沒有內建支援，需要量測的兩端都安裝相同的量測程式，並以相互搭配的參數啟動，才能進行相關量測。也因此，

通常針對不特定的目標主機只能進行 ping 等基本量測。當基本量測的結果不能滿足我們查找網路障礙的需求，而要進行較複雜的量測時，則待測網路的兩端通常都必須同時有主機在我們的控制之下，才能安裝配套的量測軟體進行量測。

3.2 網路效能量測軟體介紹

國際學術研究單位普遍偏好採用 Open Source 的網路效能量測工具，主要的原因包含幾個方面：

- 國際學術研究網路常需進行大量跨單位量測。而跨單位量測需要所有參與的單位採用相同的量測工具。Open Source 工具開放且低成本的特色易於所有單位普遍採用。
- 學術研究網路經常導入尚未在商業網路普及的最新網路技術，量測軟體也需要相應的修改才能適用。Open Source 工具易於自行修改程式碼並與合作單位分享共用。

目前國際學術研究網路最廣泛採用的量測工具為 perfSONAR[15]。

表 1 perfSONAR 測項一覽表[16]

測項	工具	量測標的
http	psurl	HTTP 回覆時間
latency	owping	網路單向延遲時間及單向封包遺失率
latencybg	powstream	單向延遲的連續量測
rtt	ping	來回延遲時間及封包遺失率
throughput	iperf3, iperf2, nuttcp	網路傳輸速率
s3throughput	s3-benchmark	S3 儲存服務的傳輸速率
trace	traceroute, tracepath, paris-traceroute	網路路徑追蹤

perfSONAR 提供的測項相當多元，如表 1 所示。其設計上是固定安裝於常時保持開機的量測伺服器中。藉由位於網路不同位置的量測伺服器兩兩互測，藉以獲取居中的網路路徑的狀態及品質的長時間變化資料。其中較常使用於網路骨幹及交換中心的測項為 latencybg, rtt, throughput 及 trace，可提供網路維運者鑑別網路問題極珍貴的第一手資料。

perfSONAR 3.0 在 2017 年升級至版本 4。經過漫長的 5 年，至 2022 年演進至 perfSONAR 5.0。最大的改變是後端的量測資料儲存檢索系統 (archive) 由 Esmond 替換成 OpenSearch 及 Logstash，如圖 2 中紅色框線所示。

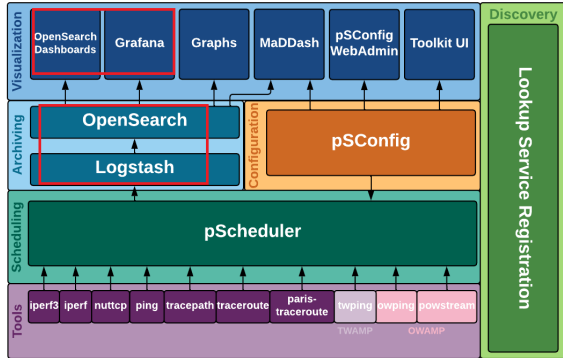


圖 2 perfSONAR 5.0 架構圖



圖 3 OpenSearch 演進分支圖

OpenSearch 是開放原始碼的搜尋引擎，也包含 OpenSearch Dashboards 資料可視化儀錶板。此軟體始於 2021 年，作為 Elasticsearch 與 Kibana 的分支，主要由 AWS(亞馬遜雲端運算服務)開發。如圖 3 所示。

perfSONAR 從 5.0 版起不再提供 iso image，僅支援以 Linux 套件或 Docker image 的方式提供 (docker image 僅限於 perfSONAR testpoint 功能)。在 perfSONAR 4.0 套件中的 perfsonar centralmanagement package 在新版的 perfSONAR 5.0 將被淘汰，取而代之的是 perfsonar archive package。

從 perfSONAR 5.0 起提供 Test point 量測點功能的 docker image，讓佈建 perfSONAR 量測點增加了一個極為便利且易於管理的途徑。perfSONAR Test point 容器化的量測工具擁有以下優點：

- 相比於採用虛擬機器 (VM) 的量測點，容器化的量測軟體啟動快速許多，且方便動態在啟動時進行參數設定，利於搭配網路自動化軟體，納為自動化流程的一環。
- perfSONAR 需使用特定版本的 Java、資料庫等元件。所在主機如同時擔任其他任務 (例如 www 伺服器或資料庫) 往往會造成上述系統元件的版本衝突。容器化後量測軟體可自帶適用的元件版本，與所在主機軟體環境隔離，可同時安裝互不衝突。利於

網路自動化的佈建及主機資源共用。

perfSONAR 5.0 採用的架構對於量測計畫的派送及量測資料的儲存具備高度的彈性。因此使用在大量佈署的場合時，可以在各量測點安裝 Test point 套件 (或 docker image)，共同訂閱同一量測計畫發佈節點的 json 量測設定，即能依同一份量測計畫的指示分別進行量測。量測的結果可以各自寫入本地端的儲存資料庫，亦可以依量測計畫的設定，共同集中寫入同一資料儲存節點 (Measurement Archive; MA)。此特點對於擁有大量量測節點的資料需要收集的場合非常方便。同時 perfSONAR 支援將量測結果寫入多個目的資料庫，產生備援。可以避免在單一儲存節點故障時，量測結果遺失的不便。

4. 交換中心網路效能量測

對於網路交換中心而言，交換中心本身在架構上相當於一台網路交換器，在交換介面上並無配置 IP 位址。因此主動式網路量測節點無法設立在交換中心內部，必須設立在參與交換中心的各成員網路的邊際路由器之後，才能量測到各成員網路穿過交換中心後的真實網路品質。

以 FOX 交換中心為例，所使用的量測節點分別為位於 TWAREN、TANET、中央研究院 ASNet、以及政府服務網路 GSN 之 perfSONAR 5.04 量測點。在安裝 perfSONAR 前必須先以 traceroute 指令驗證各量測點 IP 間的路徑有通過 FOX 交換中心。這是因為在 FOX 交換中心設立之前，各公共服務網路原本已有其他交換路由的機制。必須確認各量測點間的路徑有經過 FOX 交換中心，其量測結果才能做為 FOX 交換中心的網路品質參考。

Docker container 提供數種網路模式[17]，其中與交換中心量測相關的分別為 host, bridge, 以及 macvlan。安裝 container 版的 perfSONAR testpoint 時，視網路環境的狀態，需要從 3 種模式中選擇適當的模式。3 種網路模式適用的時機如表 2 所示。

表 2 Docker container 網路模式對應表

模式	適用情境
host	使用 host 主機的實體網路介面 IP 進行量測時。
bridge	當 host 本身為使用浮動 IP 的 VM，host 自身的網路介面僅有 Private IP，需以對外的浮動 IP 進行量測時。
macvlan	當 host 為實體主機，且有專用於量測的獨立網路實體介面及獨立 Public IP 時。

其中 host 模式直接共用 host 的網路及 IP，在

網路層面來看相當於量測軟體直接運行在 host 上 (但記憶體及檔案系統仍與 host 隔離)。直接佔用 host 的 port，無需使用 docker 的 publish 功能即可如同運作於 host 上的程式一般收發網路封包。因此使用上最為簡單。但由於交換中心以各參與網路的 Public IP 進行交換，此模式僅能用在 host 本身具備 Public IP 的場合。



圖 5 Grafana 頻寬及封包遺失率顯示圖

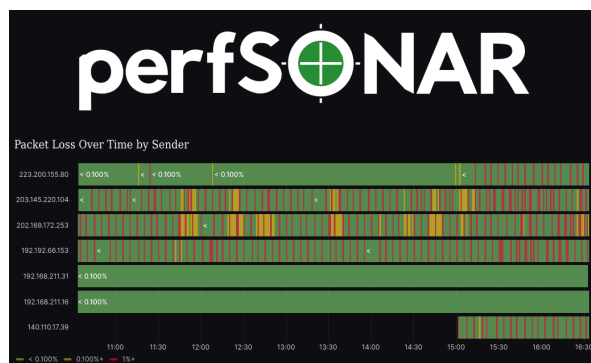


圖 6 Grafana 封包遺失率總覽圖

Bridge 模式則在 host 中產生 bridge 介面，container 則為位於 bridge 之下的虛擬網路介面。藉由 host 的 NAT 機制，將 container 的虛擬介面 IP 轉址為 host 的 IP 達成連網的目的。由於 perfSONAR 設計上以介面 IP 為規劃量測的標的，因此無法使用在對外 IP 及 perfSONAR 軟體所見的介面 IP 不同的場合。會發生例如 5.5.5.5 (舉例) 被要求與 6.6.6.6 進行量測，但位於 5.5.5.5 的 perfSONAR 卻因為自身介面 IP 為 192.168.1.1，認為這個量測的要求與己無關，因而不執行量測的情況。因而 perfSONAR 設計上無法使用於 NAT 環境。但由於雲端虛擬主機服務絕大多數都為 NAT 環境，即申請到的 VM 介面為 192.168.x.x 的 Private IP，透過上層的 Network Node (OpenStack) 或 Edge server (VMware NSX-T) 轉址為浮動 Public IP 連網。欲將

perfSONAR 安裝於此類雲端 VM 環境，則可利用 Bridge 模式會在 host (此例中為雲端 VM) 再進行一次 NAT 的特性，透過兩層 NAT 讓 perfSONAR container 轉成原本對外的浮動 IP 位址連網，即可克服 perfSONAR 無法安裝於雲端虛擬主機服務的限制。

當量測節點為實體機，除了管理用的網路介面之外，還另有專供量測使用的實體網路介面及 IP 時就適合採用 macvlan 模式。此時使用 docker network create 指令開設對應於此專用介面的 docker 網路，並將 parent 網路介面指定於此專用介面上。此介面就會綁定成為 container 的專用介面。接著 perfSONAR container 在啟動時，直接以 -ip 參數指定此介面的專用 IP，perfSONAR 就會以此專用 IP 進行量測。

perfSONAR 的 Archive 儲存節點可以安裝於其他位置，並透過 testpoint 量測節點的 psconfig remote 指令指定使用遠端 Archive 進行量測資料的儲存。寫入的資料可以透過 Archive 的 OpenSearch 介面以 Grafana 進行圖形化 (如圖 5、圖 6 所示)，或是安裝 perfSONAR 配套的 Maddash 進行資料的圖形化。對於已經使用 Grafana 進行各項監控作業的管理者而言，新增 OpenSearch 資料來源，在現有的 Grafana 環境新增 perfSONAR 的 Panel，可以將 perfSONAR 無縫整合入現有的監控方案中，十分方便。

FOX cross-member perfSONAR Dashboard

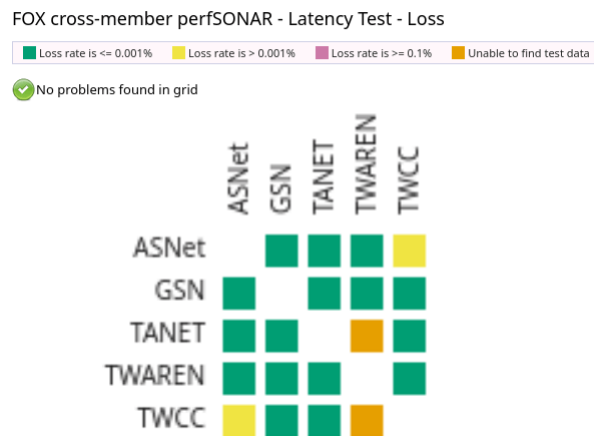


圖 7 Maddash 封包遺失率方格圖

若現有管理環境中沒有 Grafana，則不妨直接使用 perfSONAR 提供的 Maddash 圖形化套件 (須另外安裝)。Maddash 隨 perfSONAR 發展已久，因此功能其實更加完整，佔用資源也省。Maddash 使用方格圖呈現大量量測點彼此兩兩互量的全貌總覽，如圖 7 所示。方格圖中，位於左邊縱向排列的是量測的 Source 端，位於上方橫向排列的是目的端。方格圖以顏色做為量測值狀況嚴重程度的區別。綠色為 packet loss 值小於 0.001%，黃色為 0.001% 至 0.1% 之間，粉紅色則為大於 0.1%。如此

一來，在節點數量較多時，整體網路狀況即可一眼得知。

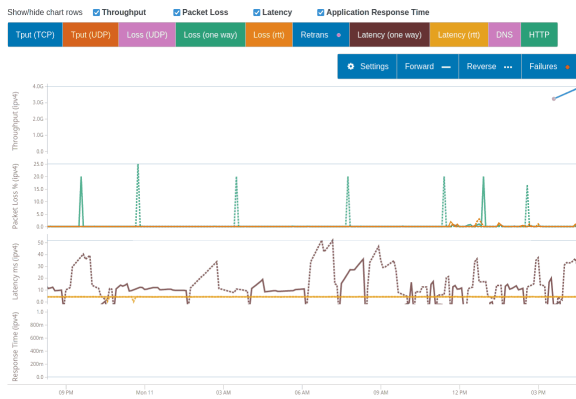


圖 8 Maddash 封包遺失率及延遲時間圖

點入方格圖中的任一方格，就會呈現該兩個量測點間的各项量測數值圖。包含頻寬量測、封包遺失率(單向及來回)、封包延遲時間(單向及來回)、以及 DNS / HTTP 回應時間等資訊。如圖 8 所示。線條顏色所代表的測項則在上面的圖例中顯示。透過此圖可以觀察在所選擇的時間範圍中，該兩個量測點間的各项網路特性。如果發生封包遺失，是發生在哪个方向上、嚴重程度為何等資訊。

psTracerouteViewer v2

Measurement Archive:

Start Time:

End Time:

Timezone:

Select endpoints available on <https://203.145.218.110/esmond/perfsonar/archive/>

Do not de-duplicate results

Topology beginning at Sun Sep 10 13:41:37 2023 (UTC)

Hop	Router	IP	Delay	MTU
1	202.169.172.252	202.169.172.252	0.4ms	
2	10.96.81.13	10.96.81.13	4.3ms	
3	192.192.61.59	192.192.61.59	4ms	
4	192.192.61.51	192.192.61.51	5.6ms	
5	192.192.62.38	192.192.62.38	5.8ms	
6	192.192.66.153	192.192.66.153	5.5ms	

圖 9 Maddash 封包路徑顯示

量測點間的路徑資訊為 traceroute、tracpath 等工具所產生，本身為文字型態的資訊。Maddash 則將路徑以表格的方式展示。如果兩點的路徑會動態變化，則每一種被偵測到的路徑會分別以不同的表格表示，並在表格上標示偵測到該路徑的時間。由於參與交換中心的網路有可能有交換中心以外的其他交換方式存在，並以 BGP 宣告的方式動態改變。因此路徑偵測對於交換中心的網路量測格外重要。不但可以確知量測點間的量測是否真的經過交換中心，同時也可以得知每一種路徑變化發生的時間，以做為障礙發生時，障礙鑑定的重要依據。

由於交換中心的特性所致，通常用於交換中心量測的測項，以下列幾種較有價值：

- latencybg: 鑑別品質及故障發生的方向
- rtt: 鑑別斷線及整體延遲時間的變化
- trace: 鑑別網路交換使用的路徑

由於交換中心提供的網路交換介面頻寬甚大，以 FOX 交換中心為例，多數公共服務網路以 100G 介面彼此介接，並非單一量測主機的輸出能力所能企及。因此位於各參與網路的單一量測節點，彼此間的頻寬量測數值無法真正代表網路間的介接實際頻寬，只能做為故障發生時的鑑別障礙的參考。

5. 結論

交換中心身為各網路相互介接的門戶，位於各成員網路的邊界之外，因此各成員網路既有的品質監控機制皆無法直接監控通過交換中心的網路交換品質。隨著現今交換中心的角色及功能逐漸成長，以 FOX 交換中心為例，即同時擁有新竹、台中、台南多地交換的分散式架構，因此交換中心影響網路品質的變因，卻是與日俱增。使用成熟的網路品質量測系統來協助交換中心即時發現並排除網路障礙，保障最佳的網路交換品質，實是確保使用者網路使用體驗的重要基礎。

perfSONAR 是廣為各國學術研究網路採用的網路品質量測系統。隨著 container 版的推出，更使得 perfSONAR 可以適用在更加多元的網路環境，非常適合應用於交換中心的長時間網路品質量測之中。結合未來網路自動化的趨勢，能隨時保持最佳交換品質的交換中心，將成為網路世界成長前進最重要的基石。

參考文獻

- [1] Wikipedia, "Internet exchange point", Aug 2023.
- [2] 台灣網際網路交換中心, <https://www.twix.net/>
- [3] Taipei Internet eXchange (TPIX), <https://www.tpix.net.tw/>
- [4] Amsterdam Internet Exchange (AMS-IX), <https://www.ams-ix.net/>
- [5] Hong Kong Internet eXchange (HKIX), <https://www.hkix.net/>
- [6] Singapore Internet Exchange (SGIX), <https://www.sgix.sg/>
- [7] Pacific Wave, <https://pacificwave.net/>
- [8] 台灣高品質學術研究網路 (TWAREN), <https://www.twaren.net/>
- [9] 福爾摩沙開放網際網路交換中心 Formosa Open eXchange, <https://www.fox-net.tw/>
- [10] 政府網際服務網 GSN, <https://gsn.nat.gov.tw/>
- [11] 臺灣學術網路 (Taiwan Academic Network; TANet), <https://noc.tanet.edu.tw/>
- [12] Academia Sinica Network (ASNet), <https://www.peeringdb.com/net/1356>
- [13] 古立其, 李慧蘭, 陳敏, "台灣國際連網設施的風險與契機", TANET 2022 Proceeding, December 2022.
- [14] Internet2, One-Way Ping (OWAMP), https://software.internet2.edu/owamp/owping_man.html
- [15] The perfSONAR Project, "perfSONAR", <https://www.perfsonar.net/>
- [16] PerfSONAR, "Test and Tool Reference," perfSONAR 5.0.4 Documentation, 2023.
- [17] Docker docs, "Network drivers overview", <https://docs.docker.com/network/drivers/>