

亞太學術研究網路的發展合作與量測應用探討

古立其¹、李慧蘭²

^{1,2} 國家高速網路與計算中心

¹lku@niar.org.tw、²gracelee@niar.org.tw

論文摘要

學術研究網路在網路的發展中身負特別的角色，而亞太地區的學術研究網路更因其地理條件、及環境的限制，發展出獨樹一格的樣貌及合作模式。本文就亞太地區學術研究網路的發展歷程、所面臨的來自天然、人為及技術面的挑戰，以及隨之所發展出的合作方式進行探討及分析，並在網路效能量測及大資料傳輸合作等應用層面發掘亞太地區學術研究網路共同合作的可能性及未來的展望。

關鍵詞：學術研究網路、亞太地區、海纜、網路量測

Abstract

Due to geological and economical reasons, the research and education networks in the Asia pacific region rely heavily on under-sea cable systems and face complicated challenges from natural disasters, human activities and technological issues. This paper analyzed those challenges and how the Asia pacific research and education networks collaborate in link resource sharing and network measurement to mitigate the issues. How such collaboration has been further extended to bring an impressive big data movement to reality has been introduced.

Keywords: Research and education network, under-sea cable, network measurement.

前言

現今的網路雖然起源於上個世紀美國國防部先進研究計畫 (Defense Advanced Research Projects Agency; DARPA)[1]，但真正為其奠基，開發各種通信協定，並在作業系統中實作，成為後來網路得以全面普及的契機，來自大學等學術單位及研究單位的貢獻可謂功不可沒。以致於網路後來即便在網路商業公司的推動中蓬勃發展，來自學研界以及學術研究網路的影響力始終保持重要的地位。由於較少商業公司的成本投資效益以及取得商業成功的考量，先進但初期未必具備商轉潛力的網路技術，往往先在學術研究網路中誕生，並在跨單位的合作中，透過專長領域的截長補短，逐漸發展為成熟的網路技術，最終被商業公司採用並發揚光大。因此學術研究網路同時也是先進網路技術發展的重要搖籃。

除了少數國家的學術研究網路由同時身兼商業網路服務的公司經營 (例如澳洲的 AARNet[2]) 之外，絕大多數國家的學術研究網路由政府投資建置及營運，也因此學術研究網路的規模與發展程度，往往與國家的科技及經濟實力息息相關。從世界的角度來看，美國的學術研究網路

Internet2[3] 發展最早，亦最具規模。歐洲則緊追在後，藉由關鍵應用的發展 (例如大型強子對撞機，Large Hadron Collider; LHC)[4] 及光纖基礎設施共享等特長，其學術研究網路亦佔據重要位置。相較之下，亞洲地區的學術研究網路發展較晚、規模較小、亦較缺乏關鍵應用。此一先期條件再加上亞洲各國語言各自不同，均非學術研究界的主導語言，造成關鍵的學術研究合作，都需與美、歐進行，甚少在跨亞洲國家間形成。這也形塑了亞洲學術研究網路最早期均跨洋與美國連線，較少彼此互連，亦較難發展出具規模的互連規則及學研網交換中心的遠因。

本文就亞洲學術研究網路的發展背景、面臨的挑戰、合作的契機與展望進行分析，以期能對我國學術研究網路未來國際發展的方向提供建議。

亞洲研網的發展

由於亞洲區的學術研究網路起步較美國及歐洲晚，且亞洲國家國際線路建置的最初目的為連接美國，因此初期受美國的影響較大。美國主要的資助機構國家科學基金會 NSF 早期即提出了國際學術研究網路連線計畫 (International Research and education Network Connections; IRNC)[5] 贊助亞洲或歐洲國家建立與美國間的國際線路，其中 TransPAC 及後續的 TransPAC2[6] 計畫即為 IRNC 資助而生的跨太平洋連線計畫，連接了美國西岸及日本。日本亦成為亞洲區中，學術研究網路發展最早、亦最具規模的國家。亞洲區的主要學術研究網路及其對應的國家如表 1。

表 1 亞洲研網及其國家對應表

國家	學術研究網路
日本	SINET、JGN
南韓	KOREN、KREONET
台灣	TANet、TWAREN、ASNet
香港	HARNET
中國	CSTNET、CERNET
新加坡	SingAREN
馬來西亞	MYREN
印尼	iDREN
越南	VinaREN

柬埔寨	CamREN
泰國	UniNet

南韓的學術研究網路發展約與台灣同期，但投入更多的資源，且受惠於當時亞洲區國際海纜佈纜時傾向通過東北亞的日、韓周邊，擁有較他國更充沛的海纜資源，因此趁勢加入了環北半球網路計畫 GLORAIID[7]，在亞洲學術研究網路的國際線路發展之初，即已擁有通過太平洋海纜連接美國、以及通過歐亞大陸陸纜連接阿姆斯特丹的優勢國際線路地位。

由於早期亞洲研網均連接美國，受美國影響甚深，歐洲為了與之競爭，拓展對亞洲國家的影響力，因而推出歐亞資訊網路計畫 (The Trans-Eurasia Information Network; TEIN)[8]，建置海纜通過地中海、紅海、印度洋，繞過新加坡抵達東南亞國家，並資助越南等東南亞國家建立國際線路與 TEIN 網路相連，成為中南半島及東南亞國家建置國際學術研究網路的濫觴。

亞洲研網面臨的挑戰

亞洲主要國家俱皆臨海，主要的傳輸合作對象無法或難以從陸路抵達，加上海纜的單位長度建置成本遠較陸纜為低，因此亞洲各國學術研究網路的國際線路皆依靠海纜，而所面臨的挑戰，往往與海纜的特性有關。

1. 建置成本

建置及維運海纜的價格極高，並非單一學術研究網路可以獨力負擔。因此各國學術研究網路通常向電信業者或海纜業者租用部份海纜資源做為國際線路之用。然而海纜的價格通常由市場競爭決定，因此海纜建置數量稀少的區域，其租用價格往往比佈纜數量充足的區域高上許多倍。而海纜業者在建置時，基於商業考量，傾向盡可能通過經濟較具規模、網路需求高的國家，以便獲得較多的潛在客戶。舉例來說，位於亞洲及美國西岸的大圓航線 (即最短路徑) 上的日本、韓國，又因其經濟規模及網路需求很高，大多數美、亞間的海纜均經過該處，因此租用海纜的價格最低、選擇亦多、當發生斷纜故障時，能相互備援的海纜系統亦多。而在海纜業者眼中較不具商業規模及吸引力的東南亞國家，佈纜最少，因此租用海纜的價格遠較日、韓為高。造成國家經濟實力高的國家獲取海纜資源成本低、經濟實力較低的國家成本高的狀況，不利於小國發展其國際學研網，往往必須依靠大國的支持。

2. 低效率的路由

受限於海纜系統的佈設路徑，相鄰的國家未必有海纜直達。例如菲律賓和印尼間最近距離僅 200 公里，但兩地間幾乎沒有海纜直達，因此兩地間的網路傳輸往往必須繞經新加坡或香港，效率因而降低。然而更嚴重的路由問題來自於亞太區複雜的國際線路路由設定。目前學術研究網路通常使用 Border Gateway Protocol (BGP) 彼此進行路由交換，然而亞太區研網不但數量眾多，路由

複雜，而且路由經常改變。單一學術研究網路改變路由的設定或政策之後往往缺乏與其他學術研究網路間的橫向溝通，隨著時間推移，路由問題逐漸累積，常常造成各種低效率的路由。在亞太區常見的路由問題如下：

● 短徑長繞

兩個亞太區的學術研究網路的路徑繞過不必要的跨洋線路。例如日本—台灣的通訊繞經美國西岸。因此一次封包來回 (Round Trip) 需長途跨越太平洋 4 次。

● 途經不必要的路由器

封包跨越兩個學術研究網路的邊界時，通過了多個路由器。這往往是由於路由設定錯誤，導致封包繞經了不只一個(不必要)的交換中心。

● 訊務流經商業網路

為了服務學術研究網路使用者也能連上商業網路的各種服務，各國學術研究網路通常有租用各自的商業網路轉運服務 (Internet Transit)，但此類 Transit 服務通常頻寬較小且昂貴。學術研究網路間的訊務理論上應該走在頻寬充裕、互連成本低的學術研究網路路徑，但經常由於路由的錯誤，導致兩個學術研究網路間的訊務途經商業網路，造成資源的浪費及效率的降低。

為了正視這個問題，自 2021 年起，亞太先進網路組織 (Asia Pacific Advanced Network; APAN) [9] 即設立專門討論及改進路由問題的 Routing Working Group[10] 邀集亞太區的各學術研究網路每個月進行路由問題討論，以期解決問題、發展更容易發現路由問題的網路管理軟體工具，並制定更能維持路由高效穩定的路由政策。但即使按時開會商討路由問題，亞太區學術研究網路間的路由問題數量並沒有隨時間而減少，新的問題仍然不停發生。發生的原因通常為：

● 新增路由

學術研究網路租用新的線路連接本來沒有連接的另一學術研究網路、或是在已有連線的兩個網路間增加連線數量。例如 A 網租用線路連接本來沒有線路直連的 C 網。對 A 網來說，前往 C 網可以改走新的直連線路，效率提高。但此一路由經由 BGP 宣告給其他網路後，可能造成 B 網改經由 A 網連到 C 網。若 B 網原本連接 C 網的路由較佳，繞道 A 網反而造成 B 網的效率降低。然而 BGP 是自動的協定，若無定期的路由監測，A 網也未主動告知其他研網此一變更(可能 A 網的管理者忘了或根本沒意識到此一變更會對其他研網造成影響) B 網在完全沒有更動自身的路由設定的不知不覺的情況下，路由效率已經受損。

● 路由減少

學術研究網路停租某條線路。有可能是因為該學術研究網路已另行租用更有利的國際線路，因而停租舊有線路。若其他學術研究網路未同步修正其手動設定的路由，或 BGP 不再收到此舊有路由後，自動改走其他路由，但新的路由效率較差(例如新路由需跨洋繞經美國西岸再返回亞洲)，其他學術研究網路的路由效率即可能受損下降。

● 頻寬擴充

這是最常見的情況。由於技術逐漸進步，更

高速率的海纜價格逐漸進入可負擔的範圍，學術研究網路因而租用新的海纜做為其國際線路之用。由於新海纜的速率升級明顯，其他舊有路由相對速率較低，該學術研究網路於是賦與新國際線路較高的路由權重，優先使用新國際線路。但對於途經此學術研究網路的其他學術研究網路而言，新的路徑可能造成短徑長繞，造成路由效率降低。舉例來說，假設印尼原本可以經由新加坡連達僅僅一水之隔的菲律賓。但日本與新加坡間假設啟用了一條 400G 新線路，遠較舊有的 100G 線路要大，因而被賦與較高權重，即可能導致印尼及菲律賓在不知情的狀況下，原本印尼—新加坡—菲律賓的路由，改變為印尼—新加坡—日本—香港—菲律賓。

由於 BGP 的自動機制僅依靠權重的設定，決定下一個目的地的選擇。但若下一個目的地並非最終目的地，則權重較高的下一目的地，之後的路徑是否也較佳，則未可知。事實上學術研究網路間的路由通常在特定時間點經過人為的選擇(例如前述線路擴充或新增時)，為較佳的路徑走法。任何未預期的變更通常都只會讓路由效率劣化。但由於亞太區研網數量眾多，各研網又各自擁有多條對外路徑，並如上所述經常變更，因此未預期的路由變更經常發生。路由效率降低的原因如果來自其他學術研究網路，往往只能透過人工開會協調，商請該學術研究網路的管理人員協助調整設定或政策。因此目前僅能以發展更理想的自動化路由監測工具、以及定時開會的方式被動解決問題。

3. 天然災害帶來的損壞

為了減少洋流帶動海纜在海床上長期磨擦石塊等硬物造成斷纜，實務上在鋪設海纜時，通常是以高壓水柱在預定佈纜的路線上沖噴出大約 1 公尺深的溝，隨即將纜線佈入溝中。待海流帶來的泥沙堆積將溝填滿後，海纜即埋設在海床表面下約 1 公尺的深度中，可大幅減少裸露在海床上的磨擦、鯊咬等斷纜因素。但正因為海纜其實已佈在土層之中，土層的任何橫向或垂直向的錯動，都會撕裂或扯斷海纜。一般在 6 級或 7 級以上的地震，都會造成地層的明顯錯動。例如發生於南投縣集集鎮的 921 地震，芮氏規模 7.3，即在地表造成長達 106 公里的破裂面，地表垂直的最大錯動量達 11 公尺、水平最大錯動量達 10 公尺，平均錯動量約為 4 公尺[19]。這樣的地面錯動量若發生在海床，途經該處的海纜必定無法倖免。這在地震頻繁的地區，例如台灣南部的巴士海峽，便相當常見。海纜一旦斷纜，運作於其上的學術研究網路國際線路即告中斷。過去僅能依靠電信公司調配其他未受影響的海纜系統支援，而學術研究網路間若能進行線路的合作，亦有機會通過其他仍能連線的學術研究網路來互相支援。

4. 人為活動帶來的損壞

近岸的區域海床較淺，光線較易透入海底，加上河流為出海口附近的近岸帶來豐富的有機質及礦物質，因此各種藻類及魚類等生物相相對豐富，人為的漁撈活動因而旺盛。部份亞洲國家漁民由於競爭激烈，為了增加漁獲而使用流刺網捕

魚。流刺網為在漁網底端加上錨等重物，使漁網在拖行的漁船之後能夠完全沉底，將海面直至海底的所有魚類全部捕撈的技術。由於會將漁場內不分種類不分大小的魚類全面捕捉，且讓漁網沉底的重物在海床上拖行會造成海底的珊瑚等海底生態遭到全面破壞，造成長遠的漁類資源枯竭，為許多國家所禁止。但仍有大量不肖漁民違法使用。拖底的重物在行經海纜佈設的區域時，容易將海纜扯斷，往往是海纜在近岸區域反覆故障的原兇。例如大陸舟山島海域即為此類海纜斷裂的熱點。此外經由新加坡到達亞洲的 TEIN 線路由於經過的紅海、印度洋沿岸皆有大量漁撈活動，因此海纜中斷造成訊務受到影響的情形也時有所聞。

近年來以刻意破壞海纜為目的的人為活動也急劇增加，並實際在波羅的海、挪威及台灣周邊進行，引起國際的高度注意。中國國家海洋局、中國浙江麗水學院分別於 2009 及 2020 年申請過錨狀「海洋曳航型切斷裝置」及「拖曳式海底電纜切割裝置」專利[20]，中國船舶科學研究中心的胡浩龍研究團隊並在 2024 年發表了「深海纜線電動切割裝置設計」論文[12]，加上多艘與中國相關的權宜輪被發現在海纜佈設的敏感海域無明確航行目標的長期逗留，並與隨後的斷纜事件產生軌跡重疊，加深了海纜遭人為破壞的風險及疑慮。

亞洲研網的合作

為了促成亞太區域的先進網路相關應用研究，增進亞太區學術研究網路的路由穩定及線路資源互惠互助，在 2021 年 6 月位於太平洋週邊的美國、亞洲及大洋洲共 11 個學術研究網路單位宣佈共同成立亞太及大洋洲網路組織 Asia Pacific Oceania network (APONet)。創立初期參與的共有下列單位：

- AARNet: 澳洲學研網
- ARENA-PAC: 亞太區學研網海底電纜合作計畫
- Internet2: 美國學研網
- KISTI: 韓國資訊科學技術研究院
- NICT: 日本資訊通訊技術研究院
- NII: 日本資訊機構，營運日本學研網 SINET
- SingAREN: 新加坡學研網
- Pacific Wave: 美西研網交換設施
- REANNZ: 紐西蘭學研網
- TransPAC: 美日跨太平洋連線
- University of Hawaii: 夏威夷大學，位居美國至澳洲及關島之網路樞紐

創立之後香港的 HARNET 也申請加入，因此目前成員共有 12 個學術研究網路。其線路分佈如圖 1。

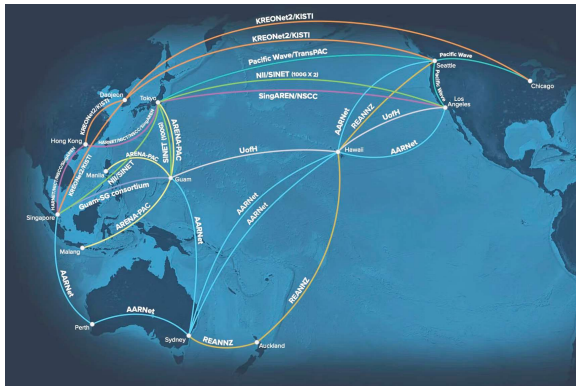


圖 1 APOnet 線路資源分佈圖[11]

APOnet 的線路資源幾乎涵蓋亞洲區所有主要的學術研究網路國際線路。而在亞太區僅有 2 條重要海纜不在 APOnet 的清單之中，為北歐學術研究網路 NORDUnet[13] 繞過北極海抵達亞洲及美洲北部的 Polar Connect 線路，如圖 2 所示。藉由 APOnet 成員間的線路資源共享及技術合作，將可共同對抗局部的海纜故障、增進整體的傳輸韌性，並能共同就大型的大資料科學傳輸需求進行資源的整合及合作。



圖 2 Polar Connect 海纜線路圖[14]

由於加入 APOnet 的門檻條件為在太平洋周邊擁有 100G 以上的國際線路，目前馬來西亞、越南、泰國、柬埔寨等國尚不符合加入條件，因此未在會員清單之中。台灣預定將於今年新增 100G 國際海纜線路，可望於完成擴充後加入 APOnet 成為其中一員。

除了在海纜硬體建設上的合作之外，亞太區域的學術研究網路也藉由 APAN 進行跨國的軟體合作，先期發現學術研究網路互連間隱藏的網路品質問題，以期提高亞太區學術研究網路的品質。代表者即為由亞太各國各自建立，再匯整進入 APAN 的網路效能量測 perfSONAR[15] 平台。目前亞洲各學術研究網路的量測動態結果如圖 3 所示。



圖 3 APAN perfSONAR Packet Loss 圖

台灣目前由台灣高品質學術研究網路 (TWAREN) 建置 perfSONAR 5.0.1 量測點 (即圖中 perfsonar-m1.twaren.net 量測點)，加入目前由日本維運之 APAN 量測資料收集節點，與其他亞太學術研究網路互相量測。可對網路的延遲及封包遺失率變化精準量測，並早期偵測發現可能之網路故障問題。

亞太地區的學術研究網路合作，也在世界最重要的計算機年會 Super Computing 2024 (SC24) [16] 中成功展示。由日本 NICT、NII 及歐洲的泛歐聚合網 GEANTII[17] 所領導的合作團隊，使用了 APOnet 等前述亞太區幾乎所有主要學術研究網路的國際線路，分別自日本跨越太平洋至美西、或跨越歐洲至美東，一共同時串接使用了 10 條不同的 100G 學術研究網路路徑 (如圖 4 所示)，將此 10 條 100G 連線引至 Super Computing 2024 會場所在的亞特蘭大，並在其上達成了日本一會場 800 Gbps 的驚人總合傳輸速率。成為亞太區學術研究網路合作的成功範例。

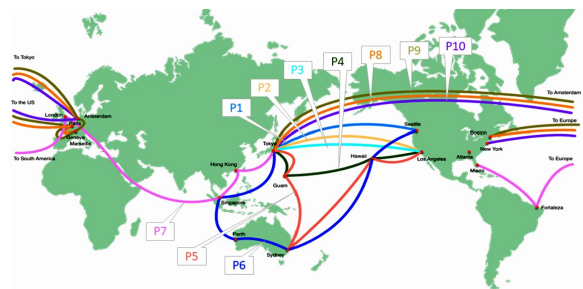


圖 4 SC 傳輸展示路線圖[18]

結論與討論

隨著大型雲端內容商 (如 Google、Facebook 等) 的興起、與電信業開始重疊、並逐漸主宰一般民眾使用網路的方式，Internet 的傳輸樣態也逐漸從過去端點對端點，演變為使用者對雲端商的模式。這個演變對於傳統電信領域的商用網路衝擊甚大，相對之下，對學術研究網路的衝擊較小。

這是因為學術研究網路所主要服務的，並非 80-20 法則中，80%的人所使用的那 20%主流內容，因此其重要性並未隨著雲端服務的興起而減低。亞太地區的學術研究網路起步的時間較歐美晚，面臨的複雜度及挑戰卻猶有過之。然而亞太區的有志之士能夠集合眾智，促成學術研究網路間的區域合作，共同面對來自天然、人為、以及技術面的挑戰，且讓我們共同期待，亞洲學術研究網路所引領的共同美好未來。

參考文獻

- [1] DARPA, <https://www.darpa.mil/>
- [2] AARNet, <https://aarnet.edu.au/>
- [3] Internet2, <https://internet2.edu/>
- [4] The Large Hadron Collider, <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>
- [5] International Research and education Network Connections (IRNC), <https://www.nsf.gov/funding/opportunities/irnc-international-research-education-network-connections>
- [6] TransPAC2, <http://www.transpac2.net/>
- [7] GLORIAD, <https://www.gloriad.org/>
- [8] TEIN, <https://www.tein3.net/Pages/home.html>
- [9] Aisa Pacific Advanced Network, <https://apan.net/>
- [10] APAN Routing Working Group, <https://apan.net/elements/working-groups/routing/>
- [11] Asia Pacific Oceania network (APONet), <https://www.aponet.global/>
- [12] H. Hu, L. Long, Y. Qian, X. Shen, K. Xu, and H. Jiao, "Design of an Electric Cutting Device for Deep-sea Cables," Mechanical Engineer, no. 7, 2024. [Online]. Available: <https://www.pekingnology.com/api/v1/file/79b0e758-c509-43d2-b929-a3960c318bf0.pdf>
- [13] NORDUnet, <https://nordu.net/>
- [14] Polar Connect, <https://nordu.net/polar-connect/>
- [15] perfSONAR, <https://www.perfsonar.net/>
- [16] Super Computing 2024, <https://sc24.supercomputing.org/>
- [17] GEANT, <https://geant.org/>
- [18] Leonardo Marino, "Multi-path data transfer experiment at SC24 showcases interwoven fabric of research and education networking worldwide", GEANT Community News, Jan, 2025. [Online]. Available: <https://connect.geant.org/2025/01/15/multi-path-data-transfer-experiment-at-sc24-showcases-interwoven-fabric-of-research-and-education-networking-worldwide>
- [19] 維基百科, "921 大地震", <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/921%E5%A4%A7%E5%9C%B0%E9%9C%87>
- [20] 陳怡菱, "開發為虛破壞為實? 中國發表切斷深水海纜的潛水鑽石鋸", Pourquoi, Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://pourquoi.tw/intlnews-neasia-250328-1/>