

# 超長距離與超高速 OTN 實驗網路的建置與驗證

黃英欽<sup>\*a</sup>、胡晉誠<sup>a</sup>、史泰爵<sup>a</sup>  
中華電信研究院寬網所<sup>a</sup>

**摘要** — 本文提供 1200km 與 100Gbit/s OTN(Optical Transport Network)實驗網路的建置與驗證。該實驗網路由 4 個 OTN 節點所組成的網狀網路，每個跨距損耗約為 26dB (約為 100km 光纖)，每部 OTN 設備均擁有小顆粒服務的映射、交接、集縮及波長交接能力，該網路具有控制平面，提供電路的保護恢復能力，波長介面以 40Gbit/s 及 100Gbit/s 為主。本文主要討論 OTN 設備及網路的簡介、OTN 實驗網路架構及 OTN 實驗網路評估驗證的過程與結果。

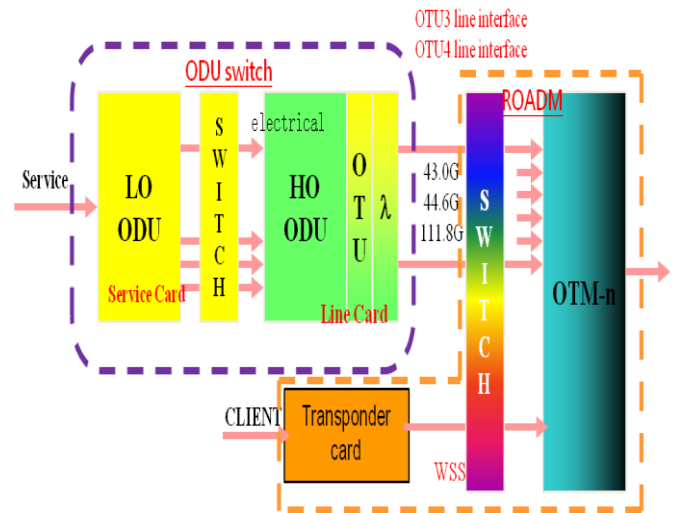
## 一、簡介

傳輸骨幹網和都會核心網路的傳輸速率迅速增加，未來即將以 100Gbit/s 傳輸需求為主。在服務發展中，數據服務為主的寬頻服務的大量增加，促進波長和次波長服務靈活調度的需求，同時大量高可靠性要求的數據服務亦急速增加，促使骨幹和都會核心網路對電層和光層的可靠性更加重視。光傳送網(Optical Transport Network, OTN) [1]是現階段部署骨幹和都會核心網能滿足此需求的理想技術選擇。由於在ITU-T所定義的OTN架構包含了光層和電層，同時具有ODU(Optical Channel Data Units) 電交接和光交接兩種技術。ODU電交接可靈活提取服務，提供10G(含)以下的服務映射、交接與集縮，提升波長使用率。因節能及效率考量，40Gbit/s 及 100Gbit/s IP服務通常直接使用光交接及波長傳送來實現。OTN設備(如圖一)的主要技術特點為其交接能力，分為ODU電交接和波長交接兩種。ODU電交接能力，支援次波長級的交接和調度。交接的顆粒為ODU<sub>k</sub>，目前設備主要支援的顆粒有ODU0、ODU1、ODU2、ODU2e、ODU3、ODU4及ODUflex[1]。目前商用化OTN設備支援的最大電交接容量可達5TB，下一步將開發交叉容量達15TB以上的大容量OTN設備。

波長交接能力，目前一般是指採用WSS (Wavelength-Selective Switch)結構的ROADM (Reconfigurable Optical Add-drop Multiplexer)，目前最大支援20維以上，每維度載送波長不小於96波，骨幹及都會核心網路向Mesh方向演進，提供高度自動化，降低OPEX，同時經由光層直通，減少背對背的連接，降低CAPEX。ROADM發展的長遠方向是實現3個功能，即colorless(與波長無關)、Directionless(與傳輸方向無關)及Contentionless(波長上下無衝突性)，可達到透明靈活網路的目標。

在OTN介面速率方面，目前OTN能夠提供的最高接口速率是100 Gbit/s(OTU4: Optical channel Transport Unit-4)。ITU-T已經開始進行速率高於100G OTN介面的研究。未來將定義一個OTU5，OTU5的速率將與IEEE未

來定義的40G或100G介面速率相匹配。本文主要探討OTN實驗網路架構及OTN實驗網路評估驗證的過程與結果。



圖一：OTN 設備功能方塊圖

## 二、OTN 實驗網路架構

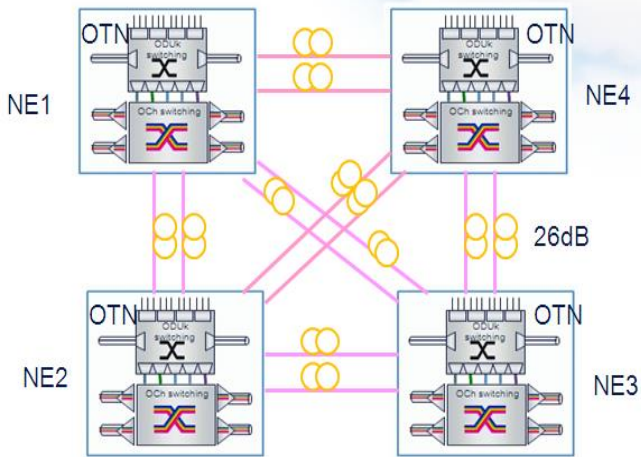
如圖二，OTN 實驗網路架構由 4 個 NE 組成網狀網路，SPAN 衰減量為 26dB(相當於 100km 光纖)，網路組成說明如下：

- (1) OTN 設備\*4，每部 OTN 設備皆包含 ODU switch 及 ROADM。
- (2) 每個 OTN 設備之 ROADM 部份為 3 維度，可升級至 8 或 16 維度，上下波具有 1+1 directionless and colorless 功能。網路端最大可傳送 96 波，每波傳送速率以 40Gbit/s 及 100Gbit/s 為主。
- (3) ODU 電交接容量 1Tb 以上。
- (4) 接入 GbE、10GbE、SDH STM-16/64 信號，映射至 ODU 層次信號，經 ODU 電交接後，集縮至 40G、100G 信號，再經 ROADM 以 DP-QPSK(Dual Polarization - Quadrature Phase Shift Keying)調變信號[2]傳輸。
- (6) 40GbE 及 100GbE 信號，經 ODU3 及 ODU4 包裝後，以 DP-QPSK 調變信號方式經 ROADM 傳輸。實際評估系統是一個龐大的系統，耗費許多物力人力及財力才完成，為國內第一次引進評估。

## 三、OTN 實驗網路評估驗證

### 3.1 40G 及 100G 信號長途傳輸驗證

目前 10G ROADM 傳送仍是主流，未來將漸漸往 40G 及 100G 移動，目前也有業界認為將跳過 40G 往 100G 移動。



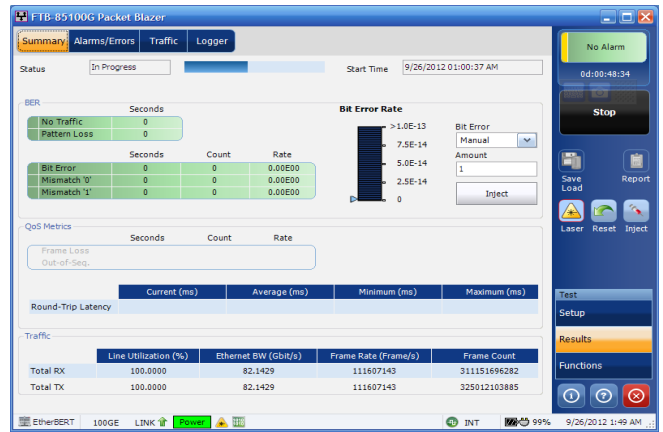
圖二：OTN 實驗網路架構圖

100G 的調變方式遵循 ITU-T 定義的 112G 傳輸速率，採用 OIF 標準的雙極化四相位移鍵 DP-QPSK 技術來開展 100G 長距離傳輸；40G 亦模仿 100G 採用 DP-QPSK 調變。接收端使用 coherent 技術，並透過數位訊號處理 DSP (Digital Signal Processing) 降低亂碼、色散、PMD (Polarization Mode Dispersion) 等效應。40G 及 100G 採用 DSP 技術補償了色散及 PMD，使得系統設計上可以減少光放大器及色散補償模組且 PMD 容忍度比 10G 好，因此未來的系統設計是以 40G 及 100G 傳送為主流，無 10G 信號，避免額外的 CAPAX，亦可避免傳送性能劣化。如圖三，將總波長 16 波的 40G 及 100G 信號利用圖二架構以繞路的方式傳送 1200KM 的距離，驗證其性能及互相干擾特性。16 波分為三群，左邊一群第 4 波為 100G，其餘為 40G，中間一群第 2、5 波為 100G，其餘為 40G，右邊一群與中間一群相同。



圖三：16 波的 40G 及 100G 信號光譜圖

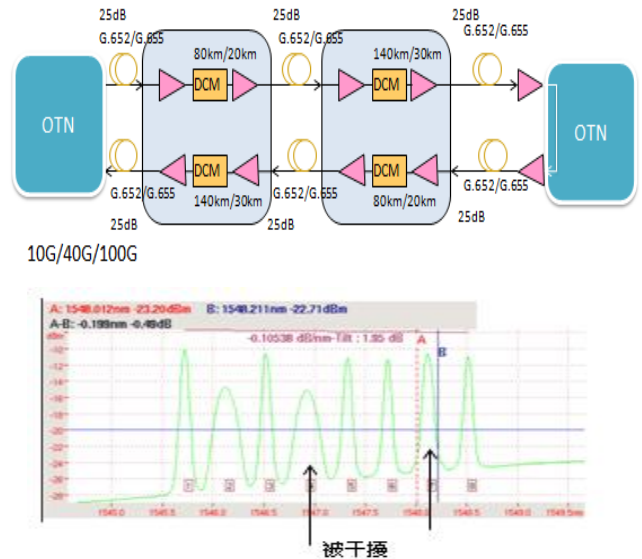
16 波信號經過 1200KM (G652 及 G.655 光纖各半) 的傳送，BER 結果如圖四，使用積分法技術量取 OSNR 及 OSNR sensitivity，OSNR 約為 17-19dB，對 100G 而言尚有 4-6dB 的 margin，作為系統劣化使用，40G 與 100G 干擾的 Penalty 0.3dB 以下，可推論 100G 及 40G 適合混合傳送。



圖四：100GbE BER 的結果

### 3.2 10G、40G 及 100G 信號干擾驗證

目前傳輸骨幹由 ROADM 所組成，速率以 10G 為主及少數的 40G 傳統電路。但 100G Coherent/ 40G Coherent 電路的需求急速增加，因此需評估原有 ROADM 是否適合提供 10G/ 40G Coherent/100G Coherent 速率混合傳送，為方便調整，在不影響評估結果的前題下，以圖五做為評估架構，共計使用 8 波道，2 路 100G 信號、1 路 40G 信號分別被 5 路的 10G 信號所包圍，每個波道功率為 3dBm。依光纖種類分為兩部份加以評估，一為在帶有 DCM (Dispersion Compensation Module) 的 G.652 光纖上傳送，另一為在帶有 DCM 的 G.655 光纖上傳送。10G/40G/100G 速率混合傳送在帶有 DCM 的 G.652 光纖上，100G 信號被 10G 信號干擾量為 0.67dB，40G 信號被 10G 信號干擾量為 3.37dB，故 40G 較不適合與 10G 混合傳送。



圖五：10G、40G 及 100G 信號干擾驗證

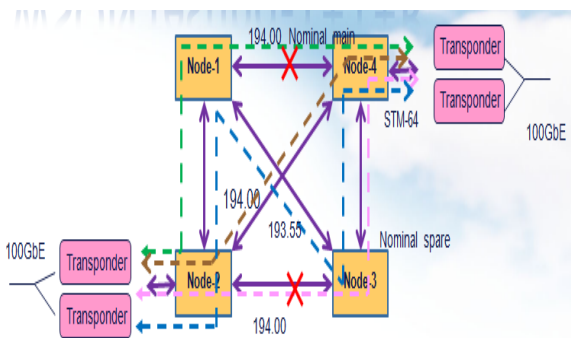
10G/40G/100G 速率混合傳送在帶有 DCM 的 G.655 光纖 100G 信號與 10G 信號間需要有大 Guard band，40G 信號與 10G 信號則無法共存。但舊 ROADM 系統有 10G/40G/100G 速率混合傳送的需求，為了解決這些問題，我們利用模擬方式採用 G.652 光纖及 40G/100G 與 10G 信號功率的差別性解決混合傳輸問題。10G/ 40G

Coherent/100G Coherent 的干擾現象可以用交互相位調變 [3]來說明，由於交互相位調變將造成高速傳送性能劣化，且交互相位調變的影響力與色散成反比，故信號在 G.652 光纖上傳送比 G.655 光纖上傳送性能更佳。

### 3.3 控制平面評估

為提高網路資源利用率和降低運營成本，提出了動態網路配置和以 GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) 為基礎的自動交換光網路 ASON (Automatic Switched Optical Network) [4] 的概念。GMPLS 支持 PSC、L2SC、TDM、LSC、FSC 五種交換方式的控制，基本上包含了承載網所有設備類型的控制能力。隨著技術的進步，控制平面的範圍已經從 SDH 擴展到 OTN (Optical Transport Network)、PTN (Packet Transport Network)、CE (Carrier Ethernet)等，要求不同交換技術的控制平面互通，或者形成統一的控制平面對各種不同交換技術進行統一控制，此已成為當前網路的需求。因此 WSON (Wavelength Switched Optical Network) 的出現也就是以 ROADM 傳輸網為基礎的 ASON，實現了光波長的動態分配。本文以 ASON 指 ODU 電交換的控制平面，WSON 指 ROADM 的控制平面。前文說明 OTN 設備由 ODU 電交換及 ROADM 所組成，所以控制平面亦由兩種所組成，即 ASON 和 WSON，最常使用的功能是保護及恢復功能，因此本測試針對這個功能進行評估。

傳統網路保護以 1+1 保護的 OSNCP (Optical Subnetwork Connection Protection) 為主，但出現兩處光纜障礙亦常發生，導致訊務中斷，MTTR (Mean Time To Repair) 時間拉長，而使用控制平面的網路可尋找多條迂迴路由由保證訊務不中斷，提高網路的存活性和抗障礙能力，迅速恢復訊務。在 ODU 電層及 ROADM 的保護及恢復架構至少提供兩種方式，分別為 1+1+R (Restoration) 及 1+R，下面以光層為例，電層類似，如圖六及圖七所示。

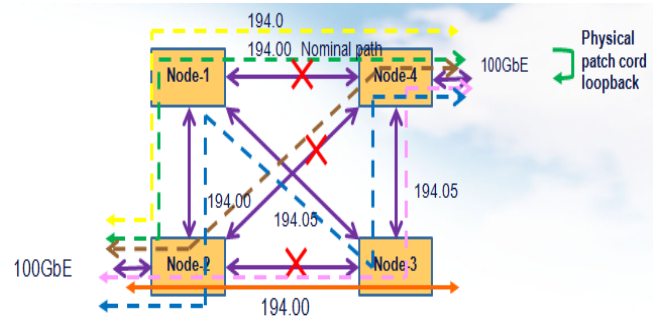


圖六：1+1+R 驗證

1+1+R 說明如下：(1)以 Y-cable 及 transponder，配合綠色路由(Nominal main)及粉紅色路由(Nominal Spare)由形成 OSNCP (2) 綠色路由由故障，切換至粉紅色路由，另外再建立另一個棕色路徑做為備用路徑 (3) 粉紅色路由(Nominal Spare) 故障，則信號再度切至棕色路徑，另外再建立另一個藍色路徑做為備用路徑 (4) 1+1 切換時間小於 50ms (5) 綠色路由(Nominal main)及紅色路由

(Nominal Spare) 恢復，棕色路徑的 Traffic 經 5min WTR (Wait To Restore) 時間，切至綠色路由(Nominal main)，時間小於 50ms。

1+R 說明如下：(1) 綠色 path 故障，WSON 計算及建立棕色路由，再切換至棕色路由，時間為秒級 (2) 棕色 path 故障，WSON 計算及建立粉紅色路由，再切換至粉紅色路由，時間為秒級 (3) 因 194.00THz 頻率被佔用，故頻率自動改變至 194.05THz (4) 粉紅色 path 故障，WSON 計算及建立藍色路由，再切換至藍色路由，時間為秒級 (5) Nominal path 恢復，路由由恢復至 Nominal path，WTR 時間 5 min，切換時間為秒級。



圖七：1+R 驗證

1+1+R 在 restoration 建立電路方面，有些情況要分鐘等級才可完成，如此會在第二路中斷期間，且在第三路由尚未建立時，發生訊務中斷。此種情況下通常在分散式架構的 WSON 較易發生，因波長電路需要考慮光損傷，分散式架構是靠每一個 node 去計算，網路越大時間越長，因此大網路需往集中式發展，波長電路的保護及恢復預先規劃，才能保持光網路的可靠性及穩定性。

經評估驗證後得到 ASON 與 WSON 可以解決雙斷的問題，1+R 亦可提供 OSNCP 與不保護之間的另一個選項，豐富 SLA 項目。ASON 與 WSON 無法同時運作，經研究二者應以 UNI 或 NNI 溝通，並以 ASON 為主，WSON 為輔。

### 3.4 ODU 集縮、電交換及光交換整合評估

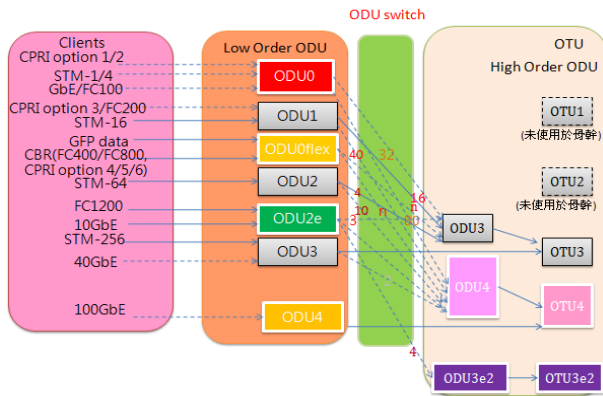
OTN 設備由服務映射、ODU 電交換、ODU 集縮及光交換整合而成，傳統的 ITU-T OTN 規格 僅定義了針對 SDH 服務的傳輸層，即 ODU<sub>k</sub> (Optical Data Unit k; k=1, 2, 3)。在標準制定完成後的最初幾年，OTN 技術被業界普遍理解為一種“數位包封”技術，即採用 OTN frame 定義的 Overhead 對波長進行管理，在 Payload 方面，CBR (Constant Bit Rate) 的服務採用 AMP (Asynchronous Mapping Procedure) 映射或者 BMP (Bit Synchronous Mapping) 映射或者 BMP/ODUflex/GMP (Generic Mapping Procedure) 映射到相應的 ODU<sub>k</sub>，數據服務採用 GFP (Generic Framing Procedure) 方式映射到 ODU<sub>k</sub>，這些 ODU<sub>k</sub> 再映射到相應的 OTU<sub>k</sub> 中。傳統的 OTN 大部份作為一種介面技術，廣為市場接受與使用如 ROADM Transponder 的介面。隨著 IP 等數據服務的大量商用，建構可交接調度並支援客戶服務多樣化的需求再度被討論，驅動著 OTN 向

可交換的 OTN 技術演進。因此設備商提出了高階/ 低階 ODU (High Order/ Low Order ODU) 架構概念，低階 ODU 相當於服務層，用於映射不同速率和不同格式的的服務，高階 ODU 相當於傳送層用於提供高頻寬的傳送能力，該層次化的結構支援 service card 與 Line card 分離，使得網路部署更加靈活和經濟，多工架構進一步清楚化。同時，OTN 標準新制訂了多種服務的低階 ODU 容器，例如：ODU0、ODU2e、ODU4 及 ODUflex，其中 ODUflex 能夠彈性收容客戶服務，使 OTN 具備了傳輸多種服務及未來服務的能力。對於高階 ODU container，目前 OTN 支持 4 個等級的速率，但常用的骨幹速率僅兩種為 40G (ODU3、ODU3e2) 和 100G (ODU4)，其中 ODU3e2 這種超高的 40G 線路速率目前僅僅在 G.sup43 中規範。這種高階/ 低階 OTN 架構不僅能夠相容於傳統 OTN 架構，還增強了 OTN 對主流服務的 mapping 能力，解決了小顆粒服務的接收，提高了傳輸頻寬的利用率，簡化了設計複雜度，使得網路部署更加靈活和經濟，如圖八，低階 ODU 接收服務，經交接及高階 ODU 集縮後以 ODU3 及 ODU4 速率經 ROADM 傳送，為了評估可行性，建立圖九的測試架構，在單一網管之下建立經 100G 光交換及傳送的 GBE 及 10GbE 電路，確認此概念可行。

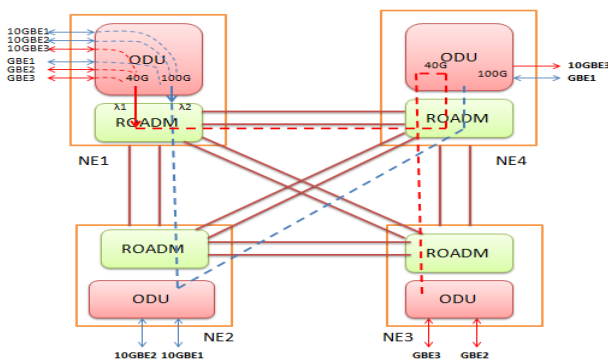
將繼續往 400Gbit/s 或 1Tbit/s 前進，基於此種趨勢，未來將進行這些功能的研究及評估驗證。

參考文獻

- [1] ITU-T G.709, "Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)", 12/2009.
- [2] OIF, "100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document", 2008.
- [3] M. A. Khayer Azad and M. S. Islam, "Performance Limitations of WDM Optical Transmission System Due to Cross-Phase Modulation in Presence of Chromatic Dispersion", Feb. 15-18 ICACT 2009.
- [4] ITU-T G.8080/Y.1304, "Architecture for the automatically switched optical network (ASON)", 2001.



圖八：OTN 映射架構



圖九：OTN 電路的建立

結論

由 ODU switch 和 ROADM 組合的 OTN 設備為骨幹端的主流產品，未來的發展趨勢，ODU switch 將繼續往 ODU + Ethernet +MPLS-TP 三合一 switch 演進，交接容量由 3T 到 5T，慢慢往 15T 移動，速度目前是 100Gbit/s，

