



光網路的進展

交通部中華技術服務社 顧問 劉時森老師
兼台灣區電信工程工業同業公會 技術諮詢顧問

光纖通信速率，在網路流量、雲端運算、5G、和物聯網（IoT）等技術的推波助瀾下，資訊通信的需求量以指數級（10的次方）成長，一直給光纖網路帶來壓力。各國家及城市的通訊需求，也給光纖的整合帶來了壓力。

業界也作了回應，努力突破光纖傳送資料能力的界限。其中最引人注目的是，2024年，每一波長每秒可傳送1.6兆比次（Tbps）。

背景：光網路的演變

自光纖出現以來，光網路已經歷了數回的演變。最初，網路使用ATM¹、PDH（566Mbps）/SDH（64Gbps）²等技術，以

不算高但還可以的數據速率運行，後來出現了分波多工（WDM）的技術，使用不同波長（或顏色）的雷射透過單一光纖，每一波長傳送一個資料流，波長越多傳送的資料越多，大幅提高了光纖的傳載容量。

WDM技術也是不斷進步，後來發展出密集分波多工（Dense Wavelength Division Multiplex, DWDM），每隔0.1nm波長就劃分一個頻道。傳統的DWDM僅使用C波段（1530至1565 nm）進行DWDM傳輸，可傳送80波長。但現在C+L波段（1530~1625nm）也加進來，而且採用ITU-T G.694.1建議之彈性光格柵（Flex-grid）³技術，頻道數量從80個增加到240個波長，系統容量增加了三倍。

1 ATM是Asynchronous Transfer Mode非同步傳輸模式的縮寫，是當年寬頻ISDN（B-ISDN）的業務的核心技術之一。

2 同步數位階層（Synchronous Digital Hierarchy, SDH），根據國際電信聯盟遠端通訊標準化組（ITU-T）的建議定義，是不同速度的數位訊號的傳輸提供相應等級的資訊結構，包括復用方法和對映方法，以及相關的同步方法組成的一個技術體制。

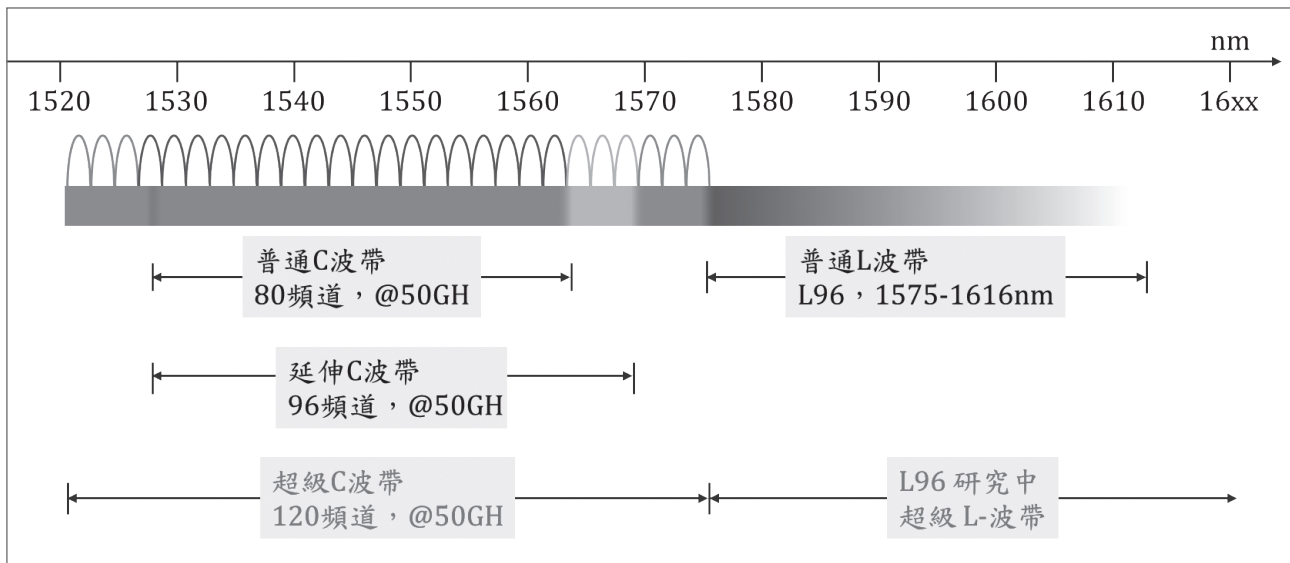
3 用於密集 WDM 系統的固定光格柵中心頻率，根據ITU-T, G.694.1：

光纖傳輸波寬每隔12.5 GHz，其中心頻率（THz）是： $193.1 + n \times 0.0125$ ，n可正，可負包括“0”。

光纖傳輸波寬每隔0.25 GHz，其中心頻率（THz）是： $193.1 + n \times 0.025$ ，n可正，可負包括“0”。

光纖傳輸波寬每隔0.05 GHz，其中心頻率（THz）是： $193.1 + n \times 0.05$ ，n可正，可負包括“0”。

光纖傳輸波寬每隔0.1 GHz，其中心頻率（THz）是： $193.1 + n \times 0.1$ ，n可正，可負包括“0”。



圖一 分波多工系統使用波長示意圖

每個波長傳送 1.6 Tbps

託先進的調變技術⁴、更高的包速率¹、和複雜的數位信號處理（Digital Signal Processing, DSP）技術的結合之福，目前DWDM系統每一波長可以傳送 1.6 Tbps，算是光傳輸技術的重大突破。

1. 進階調變格式

傳統的光網路使用開關鍵控（On Off Keying, OOK），現在看來是個簡單的調變機制。更複雜的調變格式有正交幅度調變（QAM）⁵，64-QAM允許每個符號傳輸6個數位，資料速率從而提高。

2. 更高的包速率（Baud Rates）：

包速率是指每秒傳輸的訊號變化（符號）數量，提高包速率直接提高數據速率。每一波長傳送 1.6 Tbps就是靠著每秒傳送超過 100 Gbaud的收發器來實現。

3. 數位訊號處理（DSP）：

先進的DSP技術可以彌補高速光傳輸造成的信號損傷和處理電路所產生的雜訊。DSP演算法可使資料精確的編碼和解碼、糾錯、和補償訊號的失真，確保傳輸系統在超高速率下仍然能可靠的運作。

更高的數據速率意味著需要更高的處理能力，需要更複雜的3nm/5nm級芯片組的製造

4 包速率是連續通信系統中變化速度（不是傳輸速率）的測量值，是通訊通道中每秒的訊號變化數。包速率通常與每秒位元（bps）互換使用，以描述設備之間資料傳輸的速度。包速率與通訊通道的頻寬密切相關。頻寬是指通道可以傳輸資料的最大頻率範圍。包速率表示該頻率範圍內的信號變化次數。包速率與數比速率或每秒比次（bps）密切相關，但兩者未必相同的。包速率表示每秒訊號變化的次數，而比次速率則對應於每秒傳輸的位元數。

5 正交振幅調變（QAM, Quadrature Amplitude Modulation）是一種在兩個正交載波上進行振幅調變的調變方式。這兩個載波通常是相位差為90度（ $\pi/2$ ）的正弦波，因此被稱作正交載波，因此而得名。



技術。英飛朗（Infinera）⁶公司聲稱其ICE7（第七代嵌入式光學引擎）利用5奈米CMOS⁷ DSP和最新一代先進的高速光學元件提供高達140+ Gbaud的包速率。Ciena⁸聲稱其Wave Logic 6 Extreme（WL6e）系統利用3nm芯片技術，以1.6 Gbauds 的包速率，使每個波長速率達到200Tbps。

挑戰與解決方案

每個波長能傳送1.6 Tbps是個理想，但挑戰擺在眼前。關鍵問題包括光纖內的訊號衰減、色散和非線性效應。為了緩解這些挑戰，需要採用下策略：

A - 光放大器：

摻鉕光纖放大器（EDFA）和拉曼放大器（Raman Amp.）常用於提高傳統系統中的長距離信號強度。品質好的光纖傳輸1.6Tbps超過10公里，信號就需要放大。截至目前為止（2025年）1.6Tbps的系統尚未商用化，如果商用化，EDFA和拉曼放大器會被大量使用。

B - 色散補償：

色散補償光纖（Dispersion Compensation Fiber, DCF）和電子色散補償（Electronic Dispersion Compensation, EDC）等技術有助於補償（或抵消）光脈衝在遠距離上的擴

散。在G.652D⁹光纖，10Tbps的色散補償已經測試成功，但其他光纖的色散仍然把速率限制在1.6Tbps的範圍內。

C - 非線性效應管理：

光纖的摻雜不可能完全的均勻。造成折射率不均勻，會改變光波的相位。一個脈衝內的光波相位因折射率而改變，稱為“自我相位調（Self-phase Modulation, SPM）變”。光也是電磁波的一種，而且在密集分波多工系統中相鄰頻道僅隔0.1nm，頻道間自然會互相感應，稱為“串調變（Cross-phase Modulation）”。把光纖的有效面積加大，就可以把串調變降低。先進的調變技術和數位處理運算可以有效的改善這兩個非線性現象。

超越1.6 Tbps：光網路的未來

每個波長1.6 Tbps就光通信系統而言，還不算是門檻。登高山復有高山，研究人員和專家們仍在探索多種途徑來突破這一門檻，繼續在追求更高的容量：

1、超級頻道：

將多個波長組合成一個超級通道以提高總吞吐量，加上靈活的管理可以提高頻寬利用率。

6 據維基百科：Infinera Corporation 是一家位於加利福尼亞州聖何塞的分波多工（WDM）的數據包光傳輸設備的美國垂直整合製造商。它也是電信服務提供商市場的 IP 傳輸技術製造商，設計和製造大型光子積體電路（PIC）的先驅。該公司為一級運營商、互聯網內容提供商、有線電視運營商、政府和企業網絡銷售硬件和軟件網絡選項。2024 年 6 月，諾基亞以 2.3 億美元收購了英飛朗。

7 Complementary Metal-Oxide-Semiconductor（CMOS）叫互補式金屬氧化物半導體，是一種積體電路的設計製程，可以在矽質晶圓模板上製出NMOS（n-type MOSFET）和PMOS（p-type MOSFET）的基本元件，由於兩者在物理特性上為互補性，因此被稱為CMOS。

8 維基百科：Ciena Corporation，美國馬理蘭州漢諾瓦的一家光網路系統及軟體公司。

9 一種可不受水分子限制，可以傳送1260nm-1380nm波寬的傳統光纖。



2、劃空多工（Space-Division Multiplexing，SDM）：

顧名思義，劃空多工就是把數個頻道擺在一個侷限的光纖纖殼內，例如多核心或數個模態，又稱“少模態光纖”。常見的多模態光纖，一心光纖有2仟個以上模態。“少模態光纖”指的是一心光纖內只建立兩個或三個模態，利用調變技術可以增加容量。

3、量子通訊：

利用量子力學進行資料傳輸可以徹底改變光網絡傳輸特性，可提供高安全性和潛在的海量資料速率。量子計算在光學領域的應用已經有一些成果，特別是當每波長達到 2.4Tbps及以上時。

結語

每波長傳送 1.6 Tbps可以看成光網路發展的里程碑。專家正在努力將光通信頻譜中的O-波段（O-Band）放入分波多工系統，希望把總容量提高到100Tbps。在不久的將來，每一波長的速率會提昇到2.4Tbps。

數據需求的不斷增長，需要更高容量和更高效傳輸技術。光網路技術的研究從未停止過，未來和AI技術結合有望取得更大的突破。相信，每個波長 2.4 Tbps 和 3.0 Tbps 的傳送技術，在不久的將來可見。