

# 光纖的容量到底多大(一)?

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

## 一、引言

電信網路通常都被劃成一朵雲來表示。然而電信網路是由千萬條光纖及銅纜連接交換機及終端設備而成。其中有無數個節點，每一節點又可用一朵小雲來表示，如下圖。

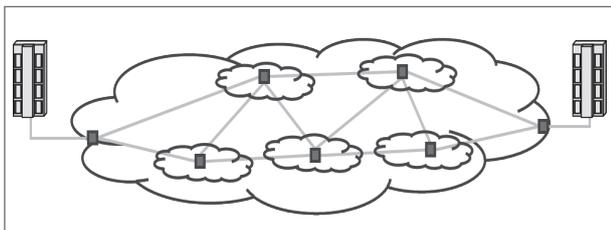
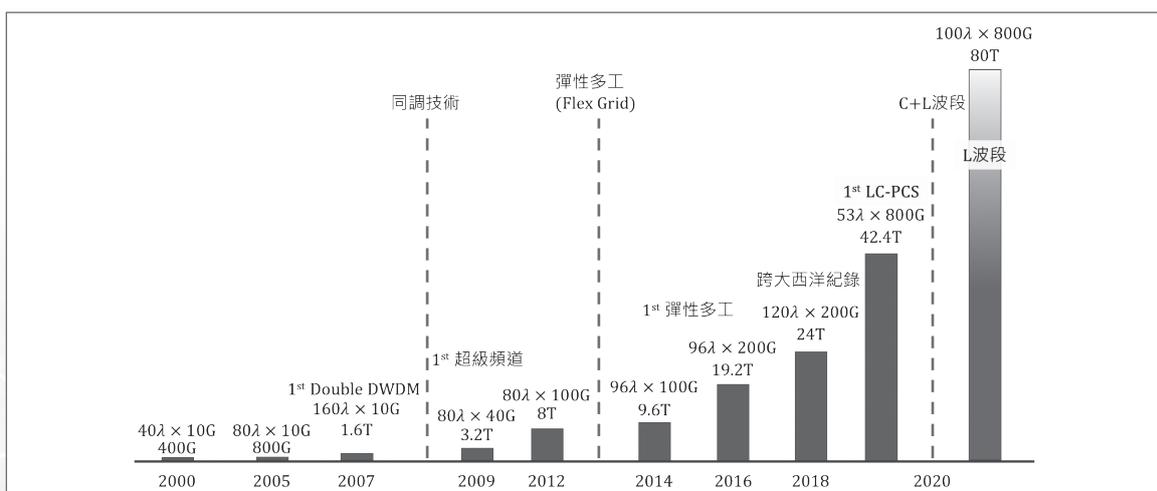


圖1-1 電信網路的雲朵示意

電信網路的通信量每年以30%成長<sup>1</sup>。這麼大的話務量，光纖是怎麼容納？光纖是否會滿載？

## 二、目前光纖能夠傳送的速率

圖2-1顯示目前一心光纖每秒鐘的速率。從2000年的400Gbps開始一直到2020年的800Gbps，現在還一直增加中。光纖傳輸的波長從O波段（起始波段）跨入L波段（長波段），速率可達80兆比次（80Tbps）。80Tbps實在很高，我們用比較低的800Gbps來談談它是什麼概念？



資料來源：<https://www.youtube.com/watch?v=7rmElggml9w&list=WL&index=26>

圖2-1 目前一心光纖能夠承載的容量

<sup>1</sup> Optical Fiber Capacity Limits - Where Do We Go Next?

[https://www.youtube.com/watch?v=prC-1Iz\\_wdk&list=WL&index=1&t=273s](https://www.youtube.com/watch?v=prC-1Iz_wdk&list=WL&index=1&t=273s)

在談這之前，有兩概念需先釐清：一是電路；另一是線路。“電路”是在“線路”裡傳送信號的通路。例如家裡的一對電話銅線可以傳送電話、ADSL、MOD、及傳真機等四項電信服務，每一項的通信速率都不同，所以這一對銅線裡邊就有四條信號通路，即四條電路。有時，一條電路會使用數條線路，例如電玩最常租用的E1電路就要靠四條線路傳送。光纖的頻寬（Bandwidth）<sup>2</sup>是銅線的好幾萬倍，能傳送的語音及影片是銅線的好幾萬倍！

吾人電話的類比信號如果要不失真的轉換成數位信號，其速率是每秒鐘56,000個1、0，即56kbps。倘若用一心800Gbps速率的光纖來傳送電話信號，一秒鐘可以傳送（ $800 \times 10^9$ ）÷（ $56 \times 10^3$ ）= $14.286 \times 10^6$ 通電話，即1億4仟2佰80萬通電話可以在一心光纖內同時講話而不會互相干擾。

若要看一部網路影片，經壓縮後只需2-3Mbps（每秒傳送2~3佰萬個比次），影片動作就不會瞬斷或像機器人一樣。如果用一心已經佈放在管道內的光纖傳送時，則（ $800 \times 10^9$ ）÷（ $3 \times 10^6$ ）= $266.6666 \dots \times 10^3$ 支影片，即一秒鐘可以同時傳送26萬6仟6百多支影片且不會互相干擾，換成“空間”來表示，即可供26萬6仟6百人同時觀看這支影片（假設這26萬人的家都有光纖到府）。

像這樣的傳輸量的光纖都發生在中繼、長途、或跨洋光纜，如果這樣還不夠，可以再多加幾心光纖變成光纜來傳送。一般市話光纜不會傳送這麼大的通信量，因為光纖到府的光纖只有這一戶人家在使用。即然市話沒

有這麼大的通信量，為什麼還要用光纖？有三個理由：

- a. 光纖細徑，一支管道可以佈放幾百心光纖，且一支4”管道可以佈放3或4條光纖，電信公司可以節省管道。
- b. 光纖通信不受電磁干擾，省去大量的維修工作。
- c. 光纖頻寬大，日後可以提供更高速率的服務，增加電信公司的營收。
- d. 環保，銅的資源有限，石英（砂）資源無限。

本文所談的侷限在長途光纖容量。

### 三、光纖能夠傳送的光譜

本來，把光信號送進光纖的技術是很簡單的，只要雷射亮一下就送出一個“1”，暗一下就是“0”。隨著電路的“關”、“開”，雷射就跟著“亮”、“暗”。這種把信丟入光纖的技術叫做「開、關鍵移調變（On Off Keying Modulation）」，又叫OOK調變或直接檢光（Direct Detect），圖3-1。

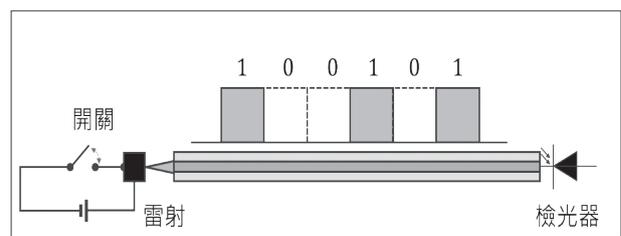


圖3-1 OOK調變

OOK調變的最高速率是單一波長的2.5Gbps（即每秒25億個1、0）。後來分波多工（Wavelength Division Multiplex，WDM）技術出現，使一心光纖可以傳送數

2 頻寬在此定義為在光纖通信光譜內以頻率為單位，從最高頻到最低頻所佔的寬度。

個波長。就像一條高速公路上有四線或更多線道，可同時讓多台車在路上跑。OOK調變增加了4個波長，調變速率提高到10Gbps，然而因為光纖的色散現久（光色散和極化色散）<sup>3</sup>而遇到了瓶頸。因此，光纖網路以10Gbps為單元使用了好幾年。

1995年，WDM技術演化為「密集分波多工（Dense Wavelength Division Multiplex，DWDM）」，40個、80個、及160個波長可以一齊放進光纖內傳送。光纖的傳輸速率一下子從400Gbps提昇到2007年的1.6Tbps（見圖1-1）。但是電信網路的通信量的成長一直維持在30%，顯然的1.6Tbps還是不夠！

## 1.光纖通信光譜

光纖通信光譜如圖3-1所示，從1.3微米的O波帶<sup>4</sup>直到1.6微米的L波帶，其中C波帶和L波帶的衰減最小（Sweet Spot）<sup>5</sup>，是目前長途光纖鏈路使用的波帶。圖下方是C波帶使用的頻寬，從傳統的3.6到4兆赫，延伸到4.8兆赫，到了6兆赫稱為“超級C帶”。以現在的雷射製造技術，這一段光譜內頂多可以分割出100個波長。

目前商用光纖通信系統在C帶及L帶能傳送的速率各為40Tbps。再往超級C帶及超級L帶，各增加25%，即50Tbps。已經漸漸趨近於實際的極限。

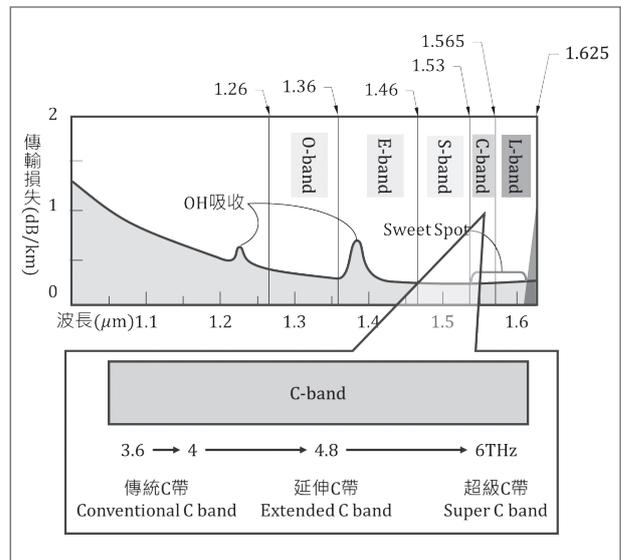


圖3-1 光纖通信高速率頻寬使用的波帶

## 2.C和L以外的波段可否用來增加容量？

答案是市話可以，長途未必。上一節提到WDM技術演化為DWDM，在演化的同時還有一種分波多工技術叫「粗調分波多工（Coarse Wavelength Division Multiplexing，CWDM）」，圖3-2上方。CWDM使用的頻道寬度是圖下方DWDM的百倍。

CWDM頻道寬度雖大，卻不須使用高檔雷射。DWDM因頻道極窄，使用的雷射必須靠主動冷卻及光波鎖定技術，因此價格高昂。而CWDM使用的雷射不需冷卻，放任自行運作，可以使用O、E、S、C、L等波帶。不過，O、E、S波帶衰減大，故涵蓋距離僅及於區網路或不需要放大器的市話範圍。

3 色散有三種：模態色散（兩兔旁地走，淵能辨我是雄雌），發生於多模態光纖，不在本文話題裡。光色散（隱隱約約，看起來模糊），是指雷射發出來的光都是一段光譜，光譜內不同波長在光纖跑的速度不同所造成的色散。極化色散（搶拍子）：起因於光纖本身結構不均勻，極長距離光纖受到震動造成電磁波的電波和磁波相對位置產生變化。

4 波帶(Band)在此定義為依波長為單位將光纖通信頻譜分割成數個區塊，每一區塊內從最短波長到最長波的寬度，如O、E、S、C、和L。

5 Sweet Spot，依自然運作最常被用到的“區域”或“點”。有用球拍打球的人都知道，桌球、網球、羽毛球都有一點是最好的球落點，那一點的久後就是球拍網線會脫毛或磨損的痕跡。

通常會使用CWDM的理由不是為了容量，而是因其價格便宜。每一頻道的速率10Gbps，有18個頻道，夠一般通信用了。

CWDM說明了一件事：光纖通信光譜內任何波長的雷射都可以被製造出來。

光纖通信波帶的訂定是依據雷射製造技術。1984年隨著市話通信的需要可以製造出1310nm的雷射，1988年因應長途傳輸的需求可製造出1550nm波段的雷射。

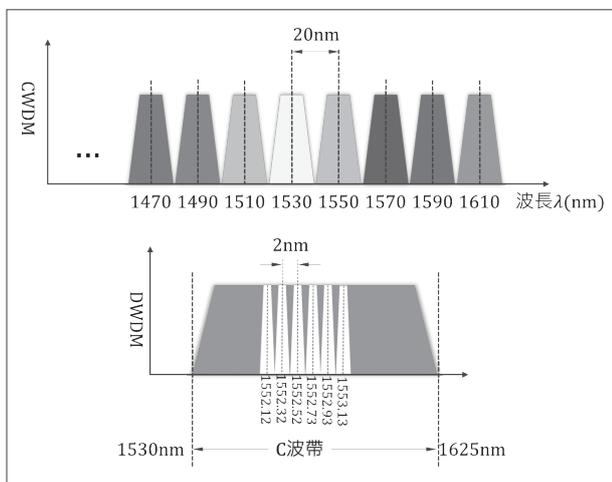


圖3-2 粗調分波多工與集密分波多工

### 3. 放大器與長途光纖容量

長途光纖的傳輸量是沿途各都市話務的匯集，國際海纜是沿線各國通信量的匯集，如果沒有放大器則無法將大容量話務傳送到遠方，等於“容量不大”，所以在考慮長途光纖容量時不得不把光放大器也算進去。

圖3-3有兩條線，紅虛線是光纖各種波長的衰減，黑色線是各種波長在光纖內發生的色散。先談紅線，即使C帶及L帶光波衰減很低，在長途光纖傳輸時仍需使用放大器才能把光信號適當的送到收端。光譜從O帶到L帶都可以被放大，C帶及L帶使用大家熟悉的

摻鉕光纖放大器（EDFA）；S帶使用摻鉍（Thulium）光纖放大器（TDFA）；E帶使用摻釹（Neodymium）光纖放大器（NDFA）；O帶使用摻鐳（Praseodymium）光纖放大器（PDFA）。除了EDFA，其他的沒有一個商用化，根據精算使用了其他放大增加每一個Gbps/km的成本。

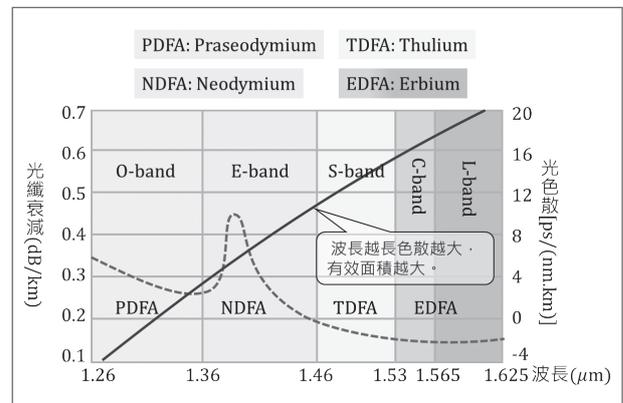


圖3-3 各波帶適用之摻稀土放大器

現在光纖網路面臨了一個困境。由於長期使用C帶和L帶通信，放大器區間已經建置，很難改變。能夠傳輸其他短波帶的光纖會陸續推出，短波帶衰減大，放大區間較小，很難把這些小區間建置在既有的線路上，就算建置了也會增加傳輸成本。

上圖中上揚的黑色線是各波長在光纖內產生的光色散。色散有正（材料色散）、負（波導色散）之分，在1980年代，色散主導了光纖及雷射的製造，在製造光纖時故意把正負色散相加變成零，這一點就落在1.31μm波長的地方，所以最早的市話光纖通信波長就以1.31μm為主。但是WDM出來後，光纖“沒色散”即無法通信，因此在1990年代所製造出來的光纖會故意留一點色散。隨著時間一久（現在2024），這些通1.31μm波長的光纖現在叫做“老光纖”。