



光纖的容量到底多大(三)？

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

光纖通信容量的增加，除了因前文「光纖的容量到底有多大(二)？」提到的調變技術及密集分波多工技術的演化而提高之外，轉波器(Transponder)與光纖本身的演進也是一大貢獻。

不可否認的「同調傳輸」對長途光纖鏈路的傳輸量幫助很大。其實後面有一個很重要的設備，轉波器(Transponder)把市話光纖裡的光波，如1310nm、1490nm、1550nm等，轉換成C波帶或L波帶的波長後

，再藉由同調傳輸技術送入長途光纖鏈路。然而，光纖的傳輸能力也必須配合才能達到今天的高速率傳輸。

二、轉波器

Transponder，中文叫應答器，又叫轉發器。當它收到一個信號時，會自動的轉發出另一對應個信號，但這兩個信號的頻率未必相同。它是Transmitter，加上Responder的合成字。這個元件原本都用在電子通信，現在光纖通信也拿來用而且非常好用。

那麼，它到底那裡好用？用在那裡呢？

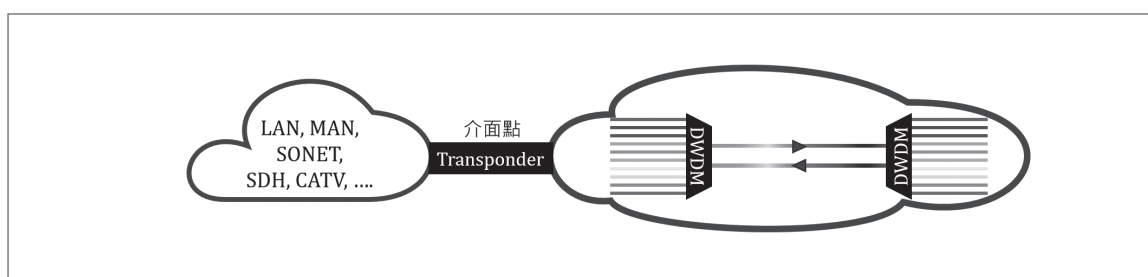


圖1-1 轉波器在網路的功能

在光纖通信裡，它是個介面點。是圖1-1左邊的市話或短距離網路，和圖1-1右邊的密集分波多工網路的介面點。其功能只有接

收→放大→再傳送。不加工、不加料，整個傳送過程非常的透明。

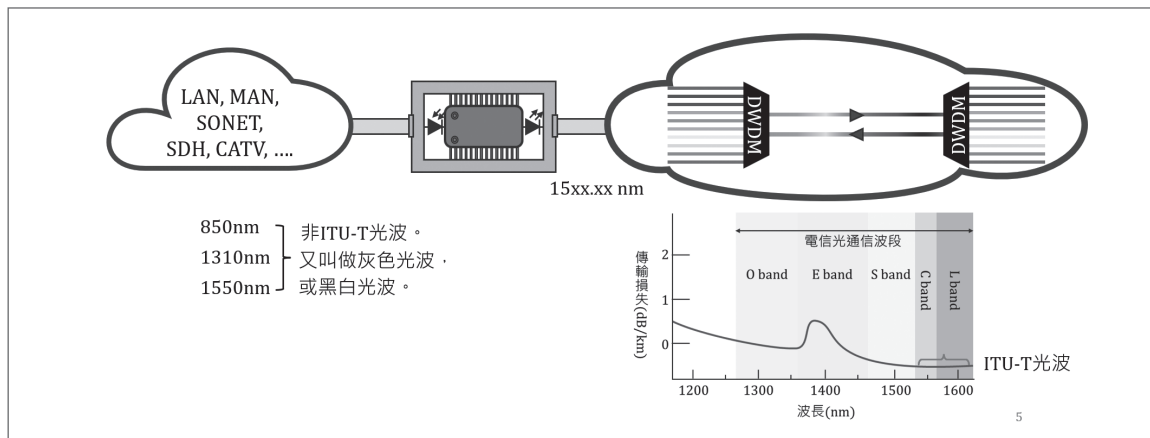


圖1-2 轉波器結構示衰圖

圖1-2是Transponder的結構示意圖。左邊各通信網路的光纖接到Transponder的收信埠。光纖內的光波為850nm、1310nm、1550nm，這些光波通常用於市話或區域網路，不會用在密集分波多工（DWDM）系統裡，通稱為“非ITU-T光波”，又叫做灰色光波或黑白光波。在Transponder裡面，有一個電子电路板和檢光二極體，把進來的光信號轉換成電信號並放大，整形、及發光二極體把電信號再轉換成和先前不同波長的光波出去。這些波長都在DWDM系統波段，

1528.77 ~ 1563.86 nm，也就是圖二中的C波段和L波段，又叫ITU-T波段。

Transponder還能做什麼用呢？做過光纖工程的人都知道，多模態光纖和單模態很難相互熔接，也沒有人這樣做，因為兩種光纖的核心直徑不一樣。當這兩種光纖要互相通信時，怎麼辦？

這時Transponder就可以派上用場。藉由光→電轉換的機制，把光信號轉換成單模態的通信波長，再利用同樣的機制轉換成多模態的光波波長，再送到多模態。

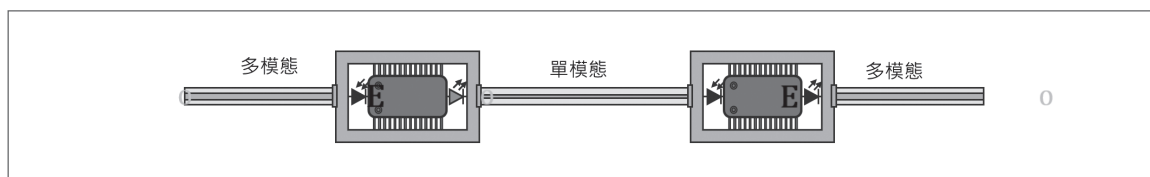


圖1-3 單模態與多模態光纖靠轉頻器連接

也可以把短程低功率雷射換成高功率雷射，要做什麼？延長鏈路的傳輸距離。850或1310波長可被轉換成衰減比較低的1550波長，就可達到增加服務距離的目的。

三、光纖的發展

隨著通信速率不斷的提高，光纖技術也是一直在演進。光纖通信波長越長衰減越低，可以傳得更遠。說得更明白一點，光纖的演進是為了能夠完整的傳送長波長光波。



1. 傳統光纖

長年以來石英光纖的核心及纖殼是光纖的主要結構，但是核心面積會變。風水輪流轉，最早佈放的石英單模態光纖卻成為現在最

好的高速率光纖。下圖是不同年份訂定的光纖規格¹，纖殼直徑都是 $125\mu m$ ，核心面積不同：

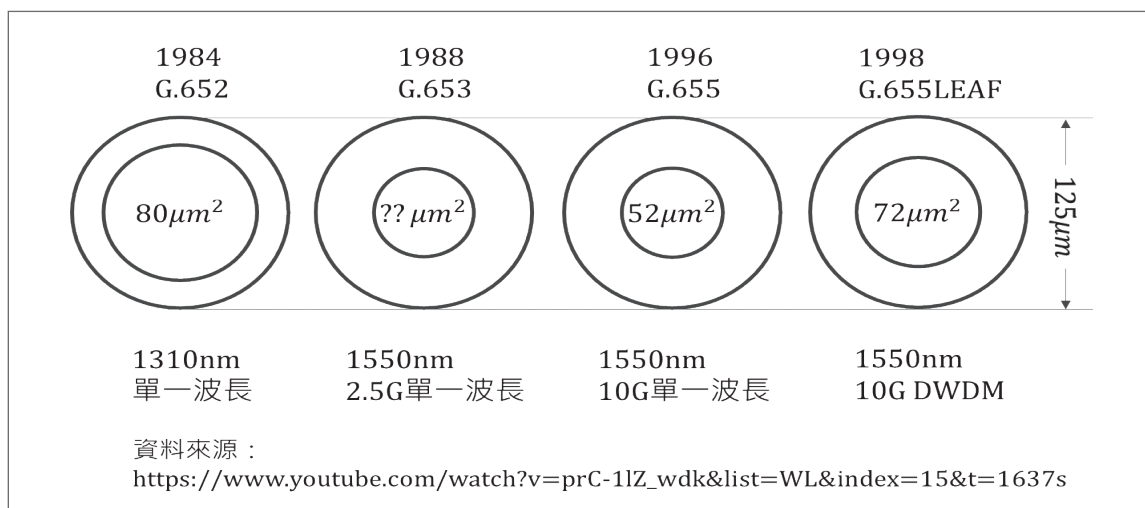


圖3-1 各種光纖的截面尺寸

圖左的G.652是電信網路的老單模態光纖，只傳輸1310nm單一波長，原因在於80年代無法製造出波長更長的商用雷射，光纖是為了配1310nm波長而設計在這個波長為“零色散”²。然而，1310nm光波的衰減大，傳輸距離只適於市區無法用在長途線路。後來商用的1550nm的雷射上市了，但是G.652光纖在1550nm波長的色散太大，還是無法使用。四年後（1988年）開發出G.653光纖，把原先在1310nm的零色散點遷移到1550nm，所以叫做“色散遷移光纖”，單傳1550nm波長，速率達2.5Gbps。

接著新版的光纖G.655出來了，拜分波多工（WDM）之賜，可以同時傳送4個波長，每一波長速率2.5Gbps，共10Gbps，同時也預言「密集分波多工（DWDM）」時代的到來。

DWDM用於長途傳輸時會用到摻鉕光纖放大器（Erbium Doped Fiber Amplification，EDFA）³，把信號功率放大後G.653和G.655光纖就會產生四波混非線性失真⁴，嚴重妨礙傳輸效率。於是，專門用在DWDM系統傳輸10Gbps的G.655 LEAF（Large Effective Area Fiber）⁵光纖再被開發出來，不過這光纖並非用於「同調光傳輸」。

1 石英光纖規格在2000年後又翻新一次。

2 因為雷射發出的光信號是一個波段，不同波長在光纖的速度不同，同一時間送出的光脈衝內有不同波長的光波，傳輸時速度不同，到達終點的時間因而不同，於是這個脈衝就會擴散佔用到“0”脈衝的時間，或與隔壁“1”脈衝相疊，導致收信端無法識別1或0。零色散的意思是使用1310nm傳送，雷射丟出去的脈衝傳到終端都維持原樣不會互跨佔用時槽。

3 摻鉕光纖放大器（Erbium Doped Fiber Amplification，EDFA）：將一截約一公里的光纖內摻上稀土“鉕”，接上一顆激雷射（Pump Laser），1550nm光信號通過後這截光纖後會被放大。

那麼，到底何種光纖適用於「同調光傳輸」？這裡有一個公式：

$$\text{四波混} = \frac{n_2 P}{A_{\text{eff}} D (\Delta\lambda)^2},$$

分母中的 A_{eff} 為有效面積，D是色散，這兩個數字越大非線性四波混越小。

圖3-1的G.652老光纖的有效面積最大，但是在1550nm波段的光色散最大，可用「反色散」⁶元件把色散降低需要的值，所以G.652老光纖最適合同調傳輸。聽起來有點諷刺，這些佈滿90%電信網路的老光纖竟然是現在最適合傳送高速率的光纖，真是始料未及。

圖3-1的老G.652單模態光纖固然最適合同調傳輸但衰減太大，遂又研發了新的G.652 SMF ULL光纖，圖3-2。ULL就是“超低衰減（Ultra Low Loss）”的意思，把原先2.5dB/km的衰減降成0.16dB/km，傳輸距離增加1.5倍。800GBd/s可傳送約1,000公里。

G.654為大核心面積光纖，用於海底光纖。800GBd/s可傳送約1,600公里，也有用於陸地改良型光纖。為了讓光纖能夠收容更多心的光纖，業界用盡苦心縮小光纖纖殼直徑，G.657光纖就是這種環境下的產物。纖殼直徑縮小20%，可增加光纖50%的光纖的容量⁷。

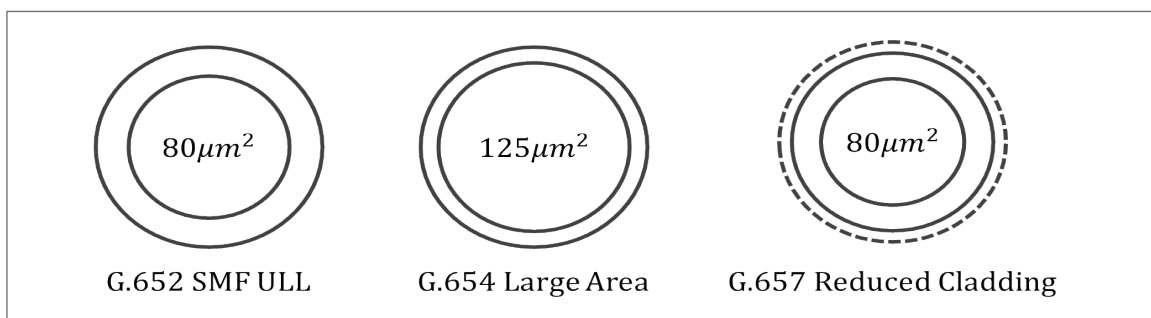


圖3-2 新傳統的光纖

2. 稀土光纖

又叫“ZBLAN”光纖。在光纖中添加鈷（Zirconium）、鉍（Bismuth）、鐳（Lanthanum）、鋁（Aluminum）等稀土，和氟化物（Fluorides）混合後產生的光纖。取這些稀土的字首，即為ZBLAN。ZBLAN光纖的衰減低於傳統光纖的10~100倍，因製造困難甚少用於電信網路的線路部份，但會用於光柵（Grating）以及放大光纖等元件場合。

ZBLAN光纖在地球上生產時因地心引力的影響會產生極其細微的瑕疵，如光纖胚在高溫熔融抽絲過程中摻雜物因地心引力而分佈不均勻。為了避免這種現象，美國有幾家商業公司⁸把ZBLAN光纖移到國際太空站美國實驗室（ISS National Lab）去製造。結果令人驚豔，未來計畫在地球低軌道上空製造。除非這種光纖能在地球上生產，否則很難普及於長途電信網路。

4 四個波長經光纖傳輸後，波與波之間會產生子子孫孫的小波，這些子孫小波若落在通信波道上會產生雜訊。

5 G.655 LEAF（Large Effective Area Fiber）：大有效面積光纖，這種光纖用來應付四波混非線性效應。

6 色散有“正負”之分，如材料色散為“正”，波導色散為“負”，在設計光纖時可將兩者綜合變成零。

7 目前陸地光纖在1.25英寸（31mm）的管中管內，可收容1728對光纖。2英寸（50mm）管道可收容6912對光纖。

8 Fiber Optics Manufacturing in Space（FOMS）、Made In Space（MIS）、和Physical Optics Corporation（POC）。



3. 少模態光纖

對光纖稍有瞭解的人都知道單模態光纖與多模態光纖的不同。單模態光纖只有一個導光路徑，一次只傳導一條模態（一條光束）⁸，多模態光纖有多個導光路徑，一次可以傳導多條個模態（多條光束）到光纖終端。多模態光纖依其核心/纖殼介面實體尺寸、折射率、及所傳送之波長，一心光纖一次可以傳導一到兩仟個模態。如果有一心多模態

光纖一次只傳導10~20個模態，或有時僅2~6個模態，即稱為「少模態光纖（Few Mode Fiber）」，如圖3-3。

圖中光纖核心面積是一般的單模態光纖約1.5倍，以不同角度可以同時射入數個模態的光束，如信號1、信號2、信號3，到了終端再以將這三個信號解開。光纖的容量隨著傳導的波數增加。

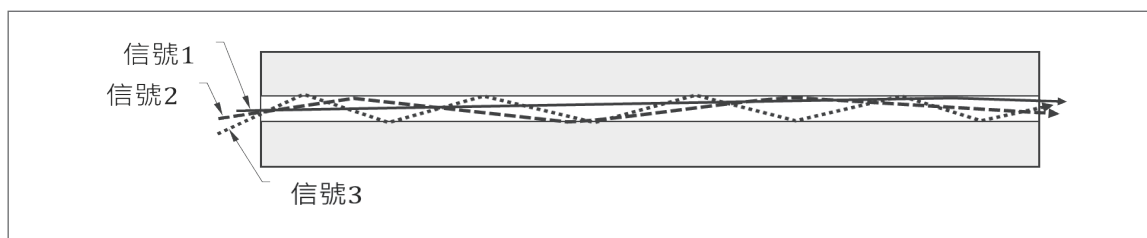


圖3-3 少模態光纖

這種光纖傳導的模態數雖然不多，但在傳輸過程中會引起模態間串音及相位落差等非線性現象，只是把它容忍下來，再於轉波器上用分模多工（Mode Division Multiplexing）⁹技術把非線性現象消除。這種光纖又稱為「大有效面積光纖」，當單模態光纖使用，如本前面提到的「G.655 LEAF

」光纖。

4. 多核心光纖

顧名思義，就是在一個纖殼內，於軸心週圍再抽出數個核心，光纖的容量隨著核心數量增加，如下圖。

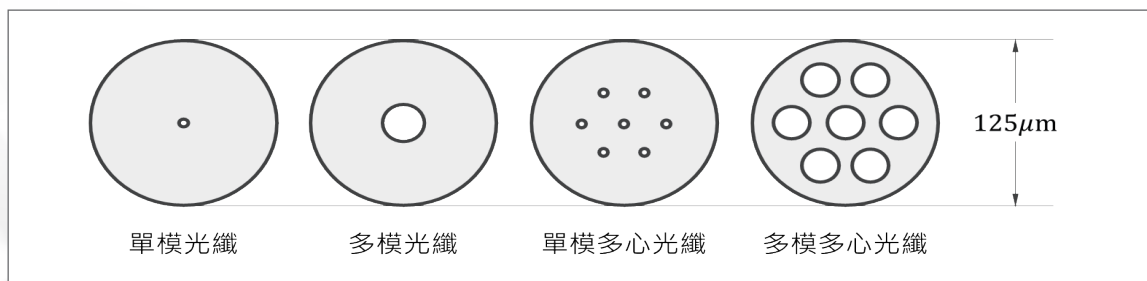


圖3-4 多核心光纖

⁹ 模態（Mode）即為路徑。一心光纖的長度必須是所傳送波長的倍數（或該波長是光纖長度的因數）才能將波長從送端傳導到終端。因為一個數字（質數除外）都有好幾個因數，所以叫多模態光纖。

¹⁰ 用分模多工：類似劃空多工，把不同模態的光放在光纖內不同路徑傳導。

光纖內每一核心就是一個單獨的波導。不過，如果核心彼此靠得太近，之間會互相耦合（串音），其現象就像光耦合器（Coupler）。單模核心之間相隔 $30\sim 40\mu m$ ，信號在光纖裡傳輸數公里不會發生耦合。若只 $20\mu m$ ，只要傳輸50m的距離就產生耦合。所以，多核心光纖可以製造成「會耦合」及「不會耦合」兩種。

a. 多核心光纖的使用

直覺上，我們會認為「不會耦合的多核心光纖」才是電信線路網裡最好的光纖，因為串音小而且終端接收相簡單。然事情都有正反兩面，纖殼直徑只有 $125\mu m$ ，能夠放入的核心數量有限，若加大纖殼直徑又會影響到光纖的彎曲特性。

如果用「會耦合的多核心光纖」，信號傳輸時核心的光纖會彼此混在一起，在終端時必增處理的複雜性，如3-5圖中的方形框內要增加MIMO（Multiple IN Multiple Out）解多工機與數位處理器以用來解開混在一起的信號。

Out）到各自的EDFA放大後，再把核心扇回（Fan Back）到下一段光纖內，增加很多跳線及設備擺設，如圖3-6上方。使用「會耦合多核心光纖」時不須扇出，只要一個EDFA就可以放大光纖裡各核心的光，如圖下方。

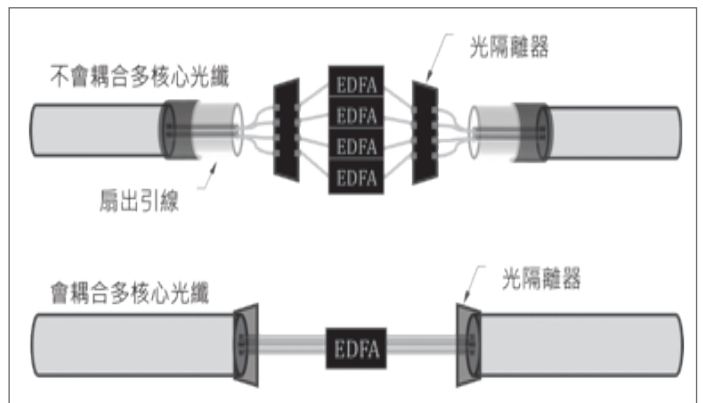


圖3-6 多核心單模光纖與EDFA

b. 多核心光纖可能面臨的挑戰

對光纖製造商而言，多核心光纖的製造的品管將會是相當嚴謹，所製造的光纖中只要有一心壞了，整條光纖就必須被淘汰掉。

就陸纜而言，目前電信管道相當足夠，而且大心數光纜加上管中管佈設，可以把管道數量三或四倍的增加。除非管道不足或刻意規劃，幾乎沒有多核心光纖使用的空間。

在海纜方面可能只使用兩核心或四核心光纖，理由是依目前的技術，只要超過四個核心就會變成「會耦合多核心光纖」，但四或二核心卻可以製成「不會耦合多核心光纖」。但在2025年之前，全世界的光纖製造商還沒有生產多核心光纖的計劃。就算有，也是「不會耦合多核心光纖」優先，因為不必更新轉波器的設計。

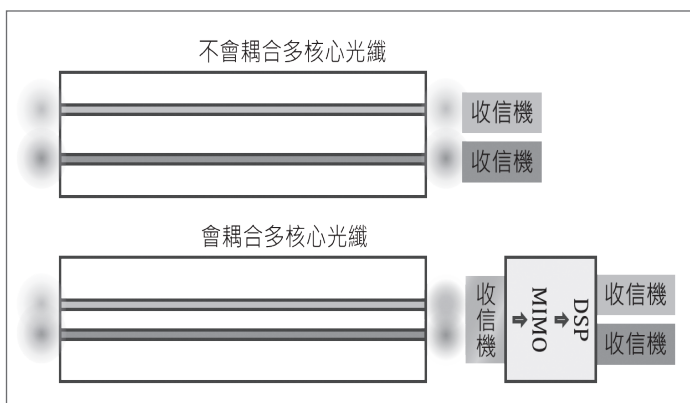


圖3-5 「會耦合」與「不會耦合」多核心光纖終端

不過，從EDFA光放大器的角度又不一樣了。在EDFA放大點，如果用「不會耦合多核心光纖」時，必須把這些核心扇開（Fan