

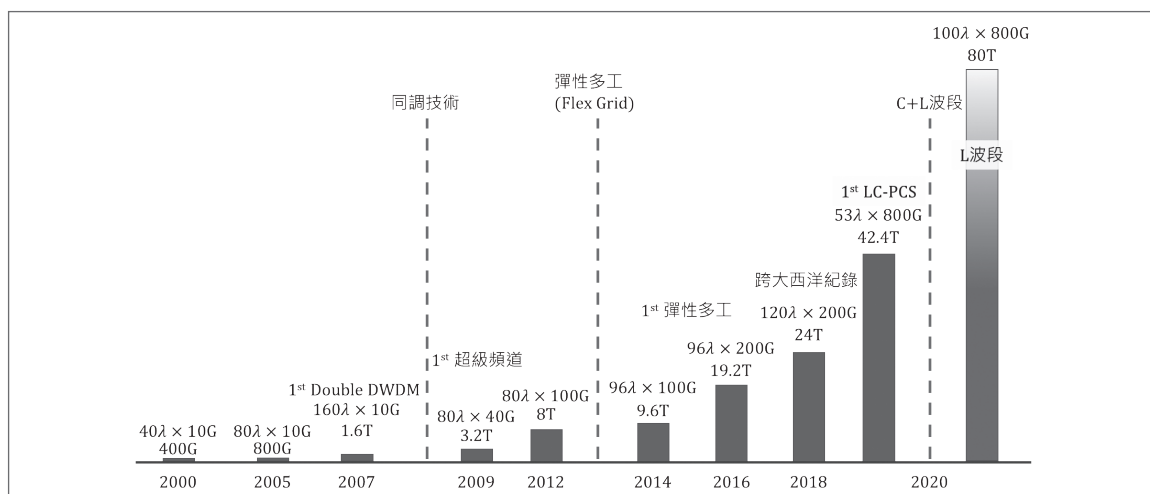
光纖的容量到底多大(二)？

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

從2007年到2020年，光纖通信的波長數量沒有增加，但是傳輸速率卻一直提高，如圖一。為什麼會這樣？因為調變技術進步了，在此必須談一下「調變」才能解釋為什麼

速率一直提高。光纖網路除了以前的第四台的HFC有一段時間用調幅（Amplitude Modulation，AM）之外，光纖數位通信都是相位調變。



資料來源：<https://www.youtube.com/watch?v=7rmElggmI9w&list=WL&index=26>

圖1-1 目前一心光纖能夠承載的容量

二、光通信系統信號調變 (Modulation)

1. 相位調變

下圖左方為一電磁波產生機制示意圖，磁場的南北極之間磁力線橫貫，有一支電樞逆時針旋轉切割磁力線產生正弦電磁波。以電

樞和磁力線平行（x軸）時為相位基點，此時產生的電磁波稱為“同相（In-phase）”，用「I」表示。當電樞和磁力線垂直（y軸）有90°夾角，此時產生的電磁波和「I」的相位相差90°，稱為“正交（Quadrature）”，用「Q」表示。兩者共稱I、Q信號。

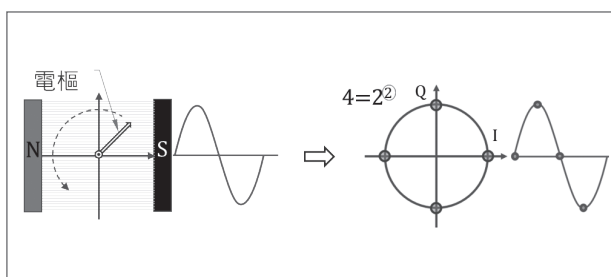


圖2-1-1 正交相位偏移調變
(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)

電樞從 0° 開始逆時針轉一圈 360° 有四個 90° 夾角交點，如圖2-1-1右方。把它當成一個時鐘來看，電樞從3點鐘方向交點開始，每隔一 90° 夾角交點各丟出一個電磁波（12點、9點、6點）。我們給這些電磁波一個名稱，叫做“符號（Symbol）”。之間的差別僅在於正交相位夾角，所以叫“正交相位偏移調變（Quadrature Phase Shift Keying, QPSK）”。

這裡有四個符號。每個符號可以承載（代表）的比次數是「符號總數的開方」，四個等號就是 $4=2^2$ ，故每一符號有2個比次，而這兩個比次又叫做一個“鮑（Baud）”。不同調變技術能丟出的符號數量不同，每一符號能含的比次與符號的數量成正比，這些被包含的比次量都叫做“鮑”。各調變技術在每一秒鐘能丟出的鮑數量，又用「鮑速率（GBds）」來表示：每秒幾個鮑。不同於“Gbps”：是指每秒幾個比次。

符號的排列取決於電磁波發生點的相位，請參閱圖2-1-2的四個相位。和高中時代的解析幾何座標讀法一樣：先水平，後垂直。每一電磁波分別代表10、11、01、和00等不同的組合。這四個組合要如何排列？其先後順序取決於所要傳遞的資訊之涵意。

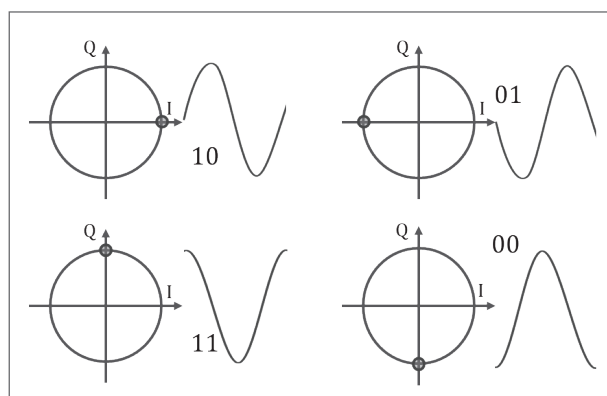


圖2-1-2 每一符號代表的1、0順序

2.正交振幅調變

正交相位偏移調變（QPSK）在技術上有10Gbps的侷限，無法滿足大量的資訊傳遞，才又採取「正交振幅調變（Quadrature Amplitude Modulation, QAM）」。

把前面QPSK符號發射點的相位調整成圖2-2-1左邊的模樣，除了IQ正交點之外，還有不同的夾角及不同的振幅（與x軸的距離），等於把各個電磁波的振幅及相位一同放進一個象限內。圖中有16個電磁波發射點，每一點之間不是相位就是振幅不相同，可各依其所在之象限而付予不同的1、0組合。16個符號即16鮑，每一鮑所含的比次數為 $16=2^4$ ，即4個比次，如圖右所示。

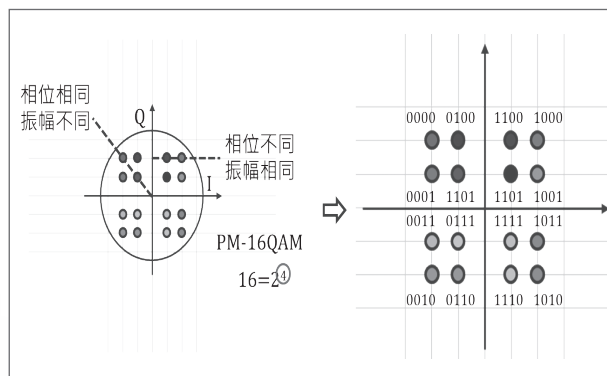


圖2-2-1 16-QAM調變

當然，現在的QAM不會只放進16個符號，還可以放進更多，如圖2-2-2。32-QAM每一鮑含5個比次，64-QAM每一鮑含6個比次。64-QAM屬於高階調變（High Order Modulation），又稱為“概率星座塑形（Probabilistic Constellation Shaping）”。

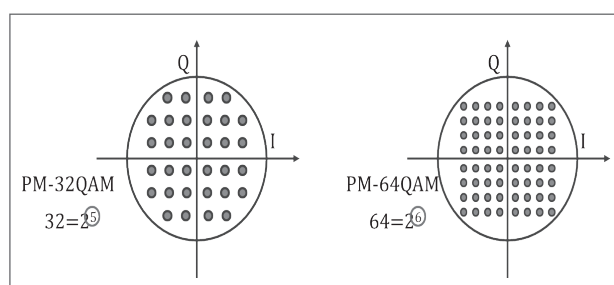


圖2-2-2 32-QAM及64-QAM調變

雖然64-QAM每一個符號含的比次量是QPSK的3倍，但天下沒有白吃的午餐。大量的符號擠在一起，彼此會靠得很近，如圖2-2-3。在黑影下的符號每一點和隔壁的點長像、高度、及位置都很相似，會產生信號雜訊比的問題。在光纖裡傳輸，就像近視眼看遠端一樣，距離只有QPSK的1/30，這時就要靠光放大器解決傳輸的問題。相對的QPSK的每一點都很清楚且相位都相反，可在光纖裡作長距離的傳送。

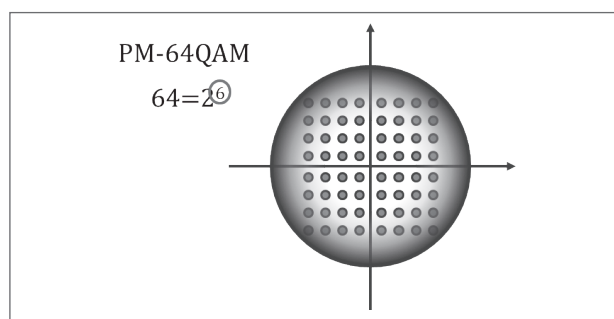


圖2-2-3 符號靠太近產生的干擾

3.同調檢光傳輸

第1、2小節所談者僅是從調變器出來的電信號，一旦轉換成光信號進入光纖經長距離的傳輸後就會產生“非線性現象”，如色散及衰減，到了收信端即無法正確的判讀。因此，在把這些電信號變成光信號後，在“傳輸前”，必須先對光信作數位處理，到了終端也要作對應的處理，使之和發送端信號的相位同一步調（同調），才能正確的將符號內的鮑轉換成電信號，再解多工下來。因此叫“同調檢光傳輸”。

下圖左為雷射發出之電磁波。因為電波和磁波相互正交90°，可以把電磁波看成IQ信號。經極化分歧後，變成磁波和電波兩個IQ信號，①；再將這兩個IQ信號同時送進光纖，②；在光纖內傳送，③；於收信端有一個雷射發出相位參考光信號，④；與傳送進來之光信號比對相位，⑤；依相位差再將光纖送來之電波和磁波混合，還原成原來之信號，⑥；轉換成數位信號，⑦。

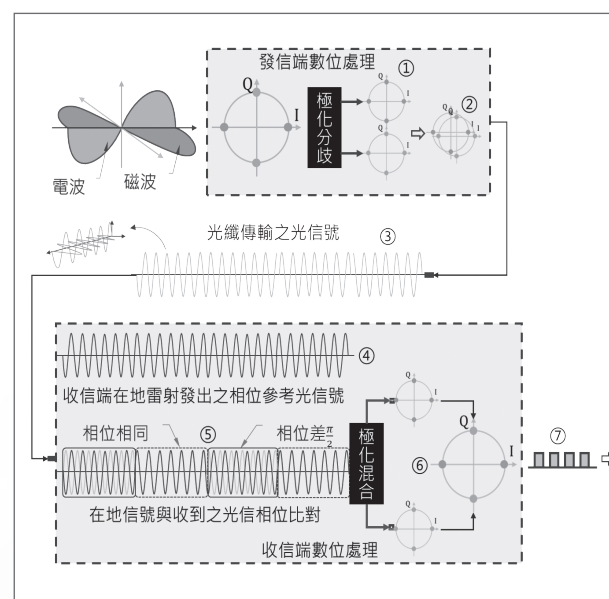


圖2-3-1收、發信端光信號極化處理



「同調檢光傳輸」是目前光通信系統使用之最佳調變，且最能夠沿線到終端維持信號原樣的技術。其運作除了前述的調變相位與振幅之外，而且數位信號處理可以補償因光纖長距離傳輸時非線性對信號造成的損害，

光纖內的信號衰減可用光放大器補償。還可以同時傳輸數個波長，但僅限於C波帶（1530~1565nm）。這就是為什麼在2009年開始光纖傳輸的波長雖然增加卻比不上傳輸速率成長的原因之一（請再閱圖1-1）。

「同調檢光技術」從2009年到2020年共演變了五代，詳如下表：

年代	2009~11	2015	2017	2019	2020
調變技術	PM-QPSK	PM-16QAM	PM-32QAM	PM-64QAM	PS-PM-16QAM
鮑速率	32GBds	32GBds	56GBds	68GBds	100GBds
比次率	40→100Gbps	200Gbps	400Gbps	600Gbps	800Gbps
波帶傳輸量 (Terabyte)	C帶 8TB	C延伸帶 19.2TB	C延伸帶 38TB	C延伸帶 38TB	C延伸帶 42TB
使用晶片	65nm	28nm	28nm	16nm	7nm

晶片是同調技術及調變品質的靈魂。目前用到7奈米，將來會進入5或3奈米。iPhone現在用的是5奈米，消費市場和電信系統架構的腳步總是有所不同。

三、密集分波多工系統

除了同調傳輸之外，另一個提高光纖容量的「密集分波多工（DWDM）」技術，更是功不可沒。在本刊物第219期「光纖容量到底有多大（一）」文中第三章第二小節提到1995年的DWDM技術可在同一心光纖內放進40個、80個、及160個波長，再配合前述的「概率星座塑形」調變，光纖的承載量已經到達8Tbps（兆比次/秒）。

DWDM技術可分成「固定框格」及「彈性框格」兩種，分述如下：

1. 固定框格DWDM

2012年之前，DWDM都是「固定框格」。什麼是「固定框格」DWDM？就是在DWDM系統傳送的頻寬內規劃固定寬度的頻道，如圖3-1下方。把C波帶4THz的頻寬內切割成80個頻道，每一頻道給予50GHz的固定頻寬。圖下方的n是ITU-T建議的頻道內的最小粒度（Granularity）¹，50GHz就是由4個粒度組合而成。

假使要提高傳輸速率，除了增加波長數之外，仍需提高每一波長含「鮑」的比次量，速率越高需要的頻寬越寬。在50GHz的頻道內以32GBd最適當，在頻道的左右兩邊有適當的空間（Band Guard），不會和隔壁的頻道相互干擾，如圖中的②；如果要送的速率很高（譬如100GBd），就會像圖中的①跨

¹ DWDM系統內頻道最小的寬度，12.5GHz。

越頻道，被跨越的頻道就不能再當成一個頻道再使用，浪費頻寬；倘若速率很低如③，也是浪費頻道寬。從1995到2013只有固定

框格DWDM商用化，這段時期的光纖通信頻寬就一直受到這樣的侷限。

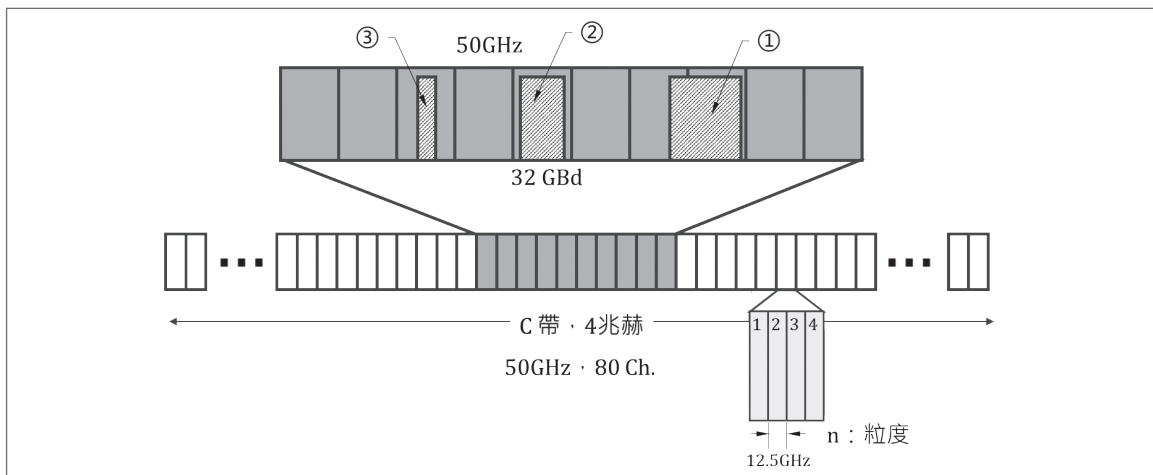


圖3-1固定框格DWDM

2.彈性框格DWDM

到了2012年，DWDM從固定框格（Fixed Grid）經歷了一個演變。多個頻道的粒度可以合在一起（多工）也可以解開（解多工），讓頻道寬可以隨著速率需求彈性的變化，捨棄固定框格的束縛，即形成「彈性框格

（Flexible Grid）」。

在C波帶4THz的頻寬內可彈性的規劃頻寬200GHz~100GHz、50GHz、25GHz的頻道，數量從20、40、80、到160個等，大幅提昇光纖頻寬效率得以，如圖3-2。

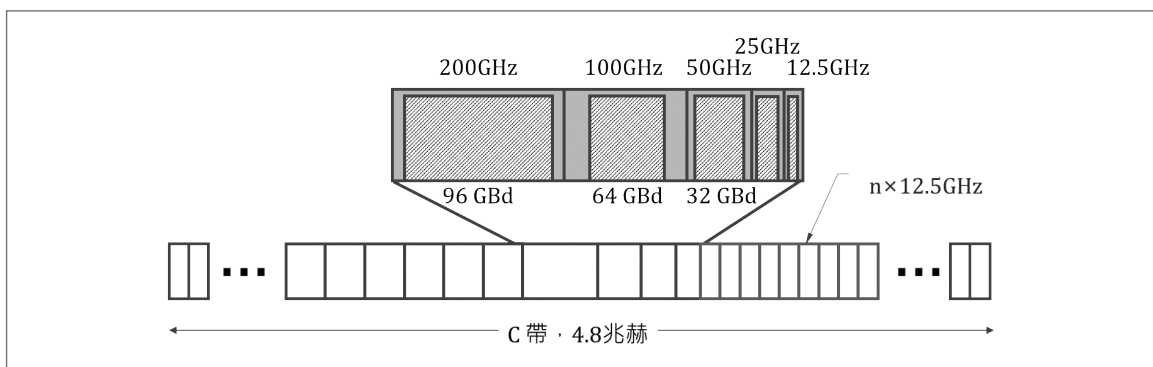


圖3-2彈性框格DWDM

光纖容量的變大，除了因本文所談調變技術及終端設備的演化而提高之外，轉波器的使用與光纖本身的演進也是一大貢獻，將在

下篇「光纖的容量到底有多大（三）」有詳細的討論。