

# 光通訊被動元件的特性與檢測

## Properties and Measurement of Fiber Optic Passive Components

張文彥

Winyann Jang

光纖通訊是現今寬頻有線通訊網路的主要技術，單模光纖網路是長途通訊、都會網路，甚至短程網路的最佳選擇。一個穩定可靠的網路，有賴於各項網路系統元件優良的特性規格和品質，被動元件是光通訊網路中應用最多、種類最複雜的元件，這類元件最主要的檢測項目是插入損失和色散相關特性。尤其新一代多波長、超高傳訊速率的網路，元件的損失頻譜和極化特性的量測將是不可或缺的一環。

Fiber optic communication is the main stream technology for wire-line broadband communication networks. Single mode fiber optic network has been the best choice for long-haul, metro or short distance communications. A reliable network depends on excellent properties and good quality of all the components applied. Passive components are the most used components in a fiber optic network in terms of quantity and variety. Key elements for characterizing passive components include insertion loss and dispersion related properties. For the next generation multi wavelength and ultra high bit rate fiber optic network, accurate measurement of loss spectrum and polarization-dependent properties for the components is indispensable

### 一、前言

十幾年前，美國柯林頓政府所推動的 NII (National Information Infrastructure) 計畫，以及個人電腦的逐漸盛行，帶動了網際網路的風潮。同時，由於資訊傳送量大幅增加，而引起有線通訊革命性的發展。過去一個世紀，以銅線為主要媒介的傳訊方式，遭遇到很大的瓶頸和挑戰，無論傳輸速度、載訊容量或通訊的距離，都無法滿足新一代網際網路的需求。因此，一個已經蟄伏 20 多年的新傳媒

—光纖，終於能躍上有線通訊的舞台，展露它獨特的優點與光芒，進而成為世紀的新寵兒。

一般而言，通訊光纖是細如髮絲的石英玻璃線，光纖本身外徑約為  $125\ \mu\text{m}$ ，而就單模態的光纖而言，實際訊號存在的範圍只在纖心直徑約  $10\ \mu\text{m}$  的截面上。光纖絲外部表面會加上多層的披覆或強化纖維，以保護光纖本身不受外界環境的影響，並加強其機械強度。光纖本身材料屬於介電 (dielectric) 材質，不導電也不導磁，因此外界環境的電磁雜訊不會對它發生干擾的作用。光纖內部傳

播的訊號主要為紅外線，波長在 1550 nm 到 1310 nm 波段的電磁 (光) 波，這些光波訊號在光纖中傳播的衰減量很低，每公里的衰減量大約在 0.15–1 dB 之間，衰減量會依不同波長及光纖的種類而定。因此光訊號可傳遞幾十公里甚至上百公里，也無需任何增幅放大器，深具長途通訊的優勢。而光訊號本身的頻率很高，約為每秒  $10^{14}$  次，因此能載送的資訊量極大。

再者，一條光纖中可容許多個不同波長的光訊號同時傳播，更可大幅提升光纖的載送容量及效率。訊號傳輸衰減量低、載訊容量大、光訊號不受外部電磁雜訊干擾，而且光纖材質輕巧，這些優點都是光纖通訊能成為有線通訊主流的原因。而過去十年，由於網際網路的興起，更促使光通訊技術和相關產業的蓬勃發展。

一個光通訊網路的基本結構如圖 1 所示，其中包括光纖線、線路兩端的訊號發射器及接收器，以及線路間所需要插入的各式元件<sup>(1)</sup>。光通訊元件可概略分為主動元件和被動元件兩大類。主動元件主要包括發射器所用的半導體雷射元件 (diode laser)、接收器的感光二極體 (photodiode) 和光纖放大器 (optical fiber amplifier) 等。而被動元件是光纖網路中使用種類與個數最多的元件，這類元件包括連結器 (connector)、耦合器 (coupler)、分支器

(splitter)、波長多功元件 (wavelength division multiplexing, WDM)、隔離器 (isolator)、光纖光柵 (fiber grating) 等，元件實例如圖 2 所示。

根據網路本身的設計使用範圍及傳訊模式，所需的元件種類多寡及線路複雜程度可能有很大差異。簡單的光纖網路只需一、二種元件即可達到通訊功能，而複雜的光纖網路則需要各類的元件插入其間，以達到高品質及高容量且穩定的通訊網。這些光纖元件雖然各有其特定功用，使整個光纖網路能達到原來設計的功能，但元件本身的特性，也同時直接影響網路能否持續穩定地傳訊。而其中主要受到的影響：一是傳輸距離，另一個是傳輸的速率。

光纖元件的重要特性，包括有插入損失 (insertion loss, IL)、波長相依損失、極化相依損失 (polarization dependent loss, PDL)、極化模態色散 (polarization mode dispersion, PMD)、材料本質色散及模態色散等，都會直接或間接影響光纖網路的有效傳輸距離和資訊載送速率 (容量) 與穩定性。因此對於這些元件特性值的量測，是元件設計製造與應用非常重要的課題。這些特性參數由於來自不同的物理現象，需要利用多種不同的方法或儀器來檢測，才能做較完整的量測與檢定。本文主要是針對單模光纖被動元件，介紹其相關重要特性與檢測方法。

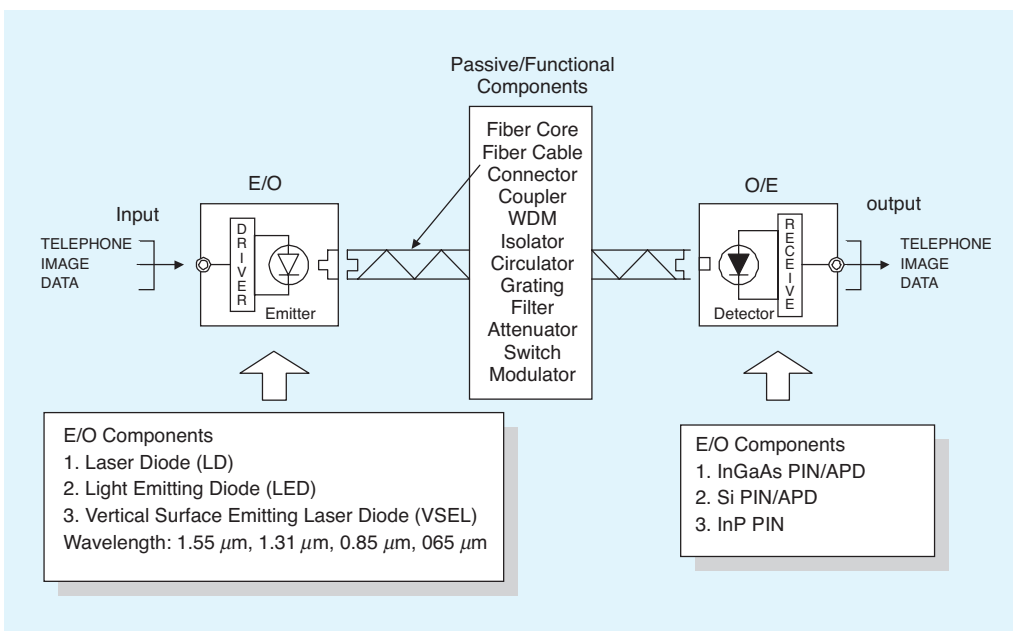


圖 1. 光通訊網路系統基本結構。

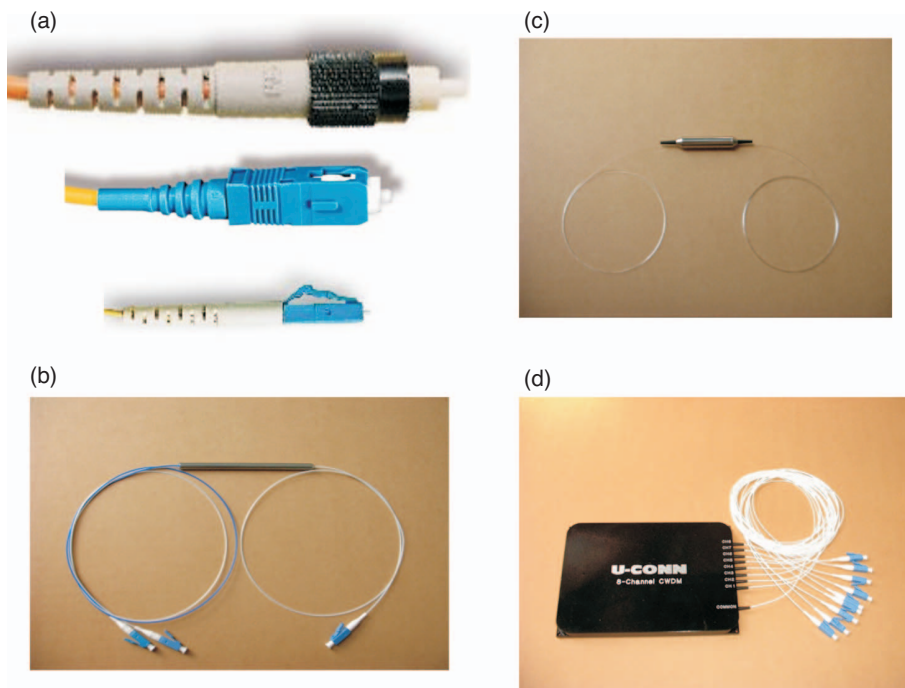


圖 2. 光通訊被動元件實例，(a) 連結器，(b) 耦合器，(c) 隔離器，(d) 高密度波長多工器。

## 二、元件插入損失與反射損失

光纖本身的訊號傳輸損失很低，是光通訊成為主要有線通訊方式的主因之一，然而光通訊網路中使用的元件所造成的訊號衰減和訊號擴散，往往決定整個網路的有效距離及資料的傳送速率。因此，光纖元件的插入損失特性是元件檢測的主要項目<sup>(2)</sup>。

雖然理想的元件對光訊號的強度不會有所影響，但實際的元件或多或少都會對光訊號造成衰減。每一個元件，由於它的結構組件及構成方式的不同，對光訊號的透明度也不同。由於加入這個元

件所產的訊號強度減弱，即所謂的插入損失 (圖 3(a))。當多個元件的插入損失累加後，其整體訊號衰減量可能對整個網路的穩定性造成威脅，因此元件的插入損失越低越好，而對各元件插入損失的量測是必要的基本檢測項目。

### 1. 插入損失

一般插入損失的量測架構如圖 4(a)，主要包括一個適當的光源和一個接收器 (receiver)。對於單一波長的網路元件，量測用的光源有發光二極體 LED、DFB 雷射和 FP 半導體雷射等，而接收器可以是個簡單的光功率計 (optical power meter,

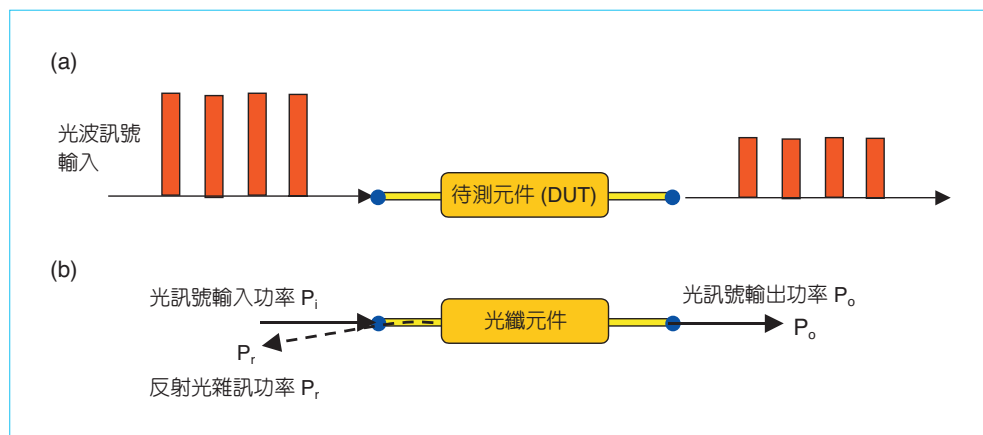


圖 3. (a) 元件插入損失示意圖，(b) 插入損失 (IL) 和反射損失 (RL) 的定義。

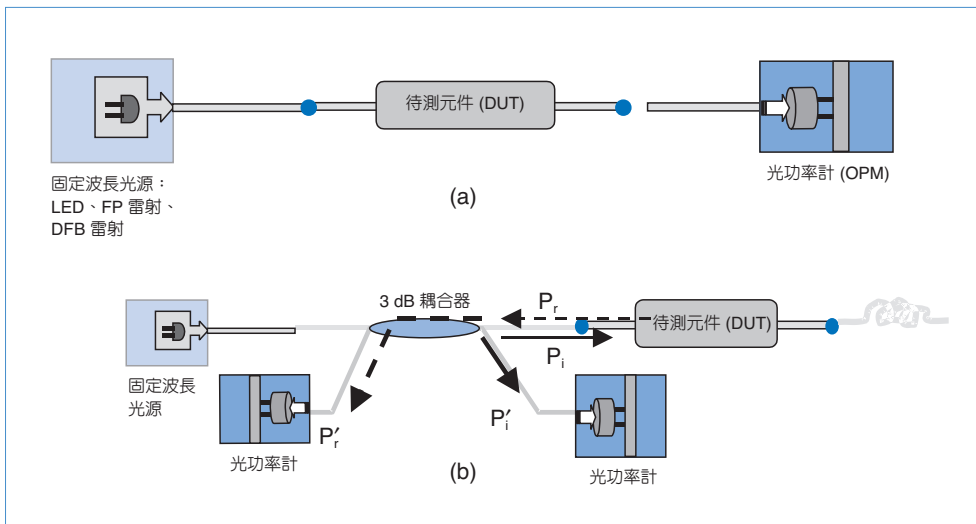


圖 4.  
(a) 單波通訊元件插入損失量測架構，(b) 反射損失量測架構。

OPM)，OPM 一般用 Si、Ge 或 InGaAs 感光二極體 (pin photodiode) 為主要偵測元件。插入損失值可由光功率計測得待測元件 (DUT) 輸入端的功率  $P_i$  及待測元件輸出端的功率  $P_o$  (如圖 3(b))，依光通訊元件的插入損失定義 (公式 (1)) 計算，插入損失值的單位為分貝 (dB)。

$$IL = 10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i} \quad (1)$$

## 2. 反射損失

反射損失或反射量是指由插入元件本身所引起在光纖中反方向傳播的雜訊量，這種逆向傳播的反射雜訊可能造成光訊號發射器的不穩定，嚴重者甚至可癱瘓整個光纖網路。反射損失 (RL) 的定義如公式 (2) 所示，即反射量  $P_r$  和輸入訊號強度  $P_i$  的比例，取其對數乘以 10。

$$RL = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_r} \quad (2)$$

量測反射損失的儀器架構如圖 4(b) 所示，可由一個光源、一個 3 dB (分光比例 50%) 光纖耦合器及二個偵測器構成。這二個偵測器，經由耦合器，一個監測入射光源比例強度  $P_i'$ ，實際輸入強度  $P_i = P_i'$ ，另一個監測反射量的比例強度  $P_r'$ ，而實際反射量  $P_r = 2P_r'$ ，反射損失值 (RL) 即可由前述之定義式計算。在量測反射損失時，有一很重要的步驟，即必須把元件的訊號輸出端的光纖做小圈的纏

繞，目的是要隔離後端傳來的任何可能反射，使量測到的反射值只侷限於元件本身所引起的。而量測儀器也要針對使用的訊號波長，選擇適當波長的光源及偵測器，才能作準確的檢測。

光纖元件的插入損失和反射損失量測儀器，市面上有很多現成的機台可選用，有針對個別單一測試功能的機台，也有把多個測試功能整合在一起的多功機台，知名廠商包括 JDSU、Agilent、EXFO 等。

## 三、插入損失頻譜量測

每一個光纖被動元件的插入損失並不是一個固定的值，事實上，由於元件的構造、材料及製造原理不同，元件的插入損失除了可能由於不同波長而有差異，大多也和光線的極化方向 (即電場的方向) 有關，所以插入損失往往是光波訊號波長以及其電場極化方向的函數；也就是說損失或衰減量會隨訊號的波長和極化方向的不同而變化。簡單的光通訊網路只使用單一波長的光線來載送資訊，光纖元件的頻譜特性量測並不重要，對於使用單一波長的光通訊系統，插入損失的量測只要針對所使用的波長進行檢測即可。

但現代的光通訊網路同時使用多波長的訊號，來大幅提高每一條光纖線路的載訊容量及使用效率，同時也增加各元件設計的複雜度，因此元件對不同波長的反應特性，需要做嚴格的要求與界定。

表 1.  
插入損失頻譜量測架構  
及功能之比較。

量測儀器架構		功能特性				
光源	偵測器	波長範圍	解析度	動態範圍	量測速度	應用
白光源 (鎢絲燈泡)	光頻譜儀 (OSA)	極大	中等	小	快	一般元件
ELED		中等	中等	中等	快	波長多功 元件
ASE、SLD		中等	高	中等	快	高密度 波長多功 元件
可調波長 雷射 (TLS)	光功率計 (OPM)	大	高	高	中、慢	高隔離 度、高密 度波長多 功元件
	光頻譜儀 (OSA)	大	極高	極高	極慢	極高隔離 度量測

因此量測元件對不同光訊號波長的相依損失及頻譜，已是不可或缺的一環。尤其對於高密度波長多工網路 (dense wavelength division multiplexing, DWDM) 或低密度波長多工網路 (coarse wavelength division multiplexing, CWDM)，某些具有波長選擇功能的元件，例如濾波器、光纖光柵、波長多功模組等，精確的頻譜量測極為重要。有關電場極化方向對元件特性及光纖網路訊號傳輸的影響，我們稍後再討論，接著要談的是和光訊號波長有關的特性量測。

一個波長多工系統中，由於元件損失特性的檢測和波長相關，所以需考量使用波長的範圍、解析度及隔離度等問題。量測用的光源和接收器的搭配較為複雜，檢測儀器架構有多種選擇，這些不同的量測架構各有其特色與優缺點，使用者必須依據待測元件的主要波長特性、量測精度、量測所需花費的時間，以及量測儀器的成本等作整體的考量，來作最適當且符合效益的選擇。

插入損失的頻譜量測架構主要可分為兩大類。第一類是使用白光源或寬波帶光源 (broadband light source) 搭配光波頻譜分析儀 (optical spectrum analyzer, OSA)，這一類的量測架構的優點是所需量測時間很短，只需幾秒至數十秒的時間，就可將整個頻譜掃描完成。很適合一般元件，例如：耦合器、衰減器、WDM 等的量測，需要大的波長範圍，但大多不需高解析度或頻譜的細節。

另一類則是用可調波長雷射光源 (wavelength tunable laser source, TLS)，搭配光功率計或光頻譜分析儀。可調波長雷射光源具有高功率及波長位置精確的特性，其發光的波長可在一個範圍內隨意調整和控制，它可涵蓋的範圍已可達 150 nm。光功率計 (OPM) 可量測訊號的功率強度，但本身不具有波長的分辨功能，因此波長解析度由可調波長雷射的調整解析度決定。這個量測插入損失頻譜的方法，最大優點具有很好的波長解析度和量測動態範圍，同時也能達到很大的波長範圍，適合量測像 DWDM 濾波模組、光纖光柵等波形細窄的元件。

依據上述兩類儀器不同的組合，量測光通訊被動元件頻譜的方法與儀器架構主要有以下幾種：

- (1) 白光源 + 光頻譜分析儀。
- (2) 寬波帶光源 ELED、ASE (amplified spontaneous emission) 或 SLD (super luminescent diode) + 光頻譜分析儀。
- (3) 可調波長雷射光源 (tunable laser source, TLS) + 光功率計 OPM + 電腦資料收集處理。
- (4) 可調波長雷射光源 TLS + 光頻譜分析儀

這些不同的量測架構，由於各光源的波長範圍、單位波長能量密度及偵測器靈敏度、波長解析度等條件的差異，各有其優缺點和適用範圍，如表 1 所列。圖 5 為幾個不同方法量測 CWDM 模組之實例及其動態範圍比較。

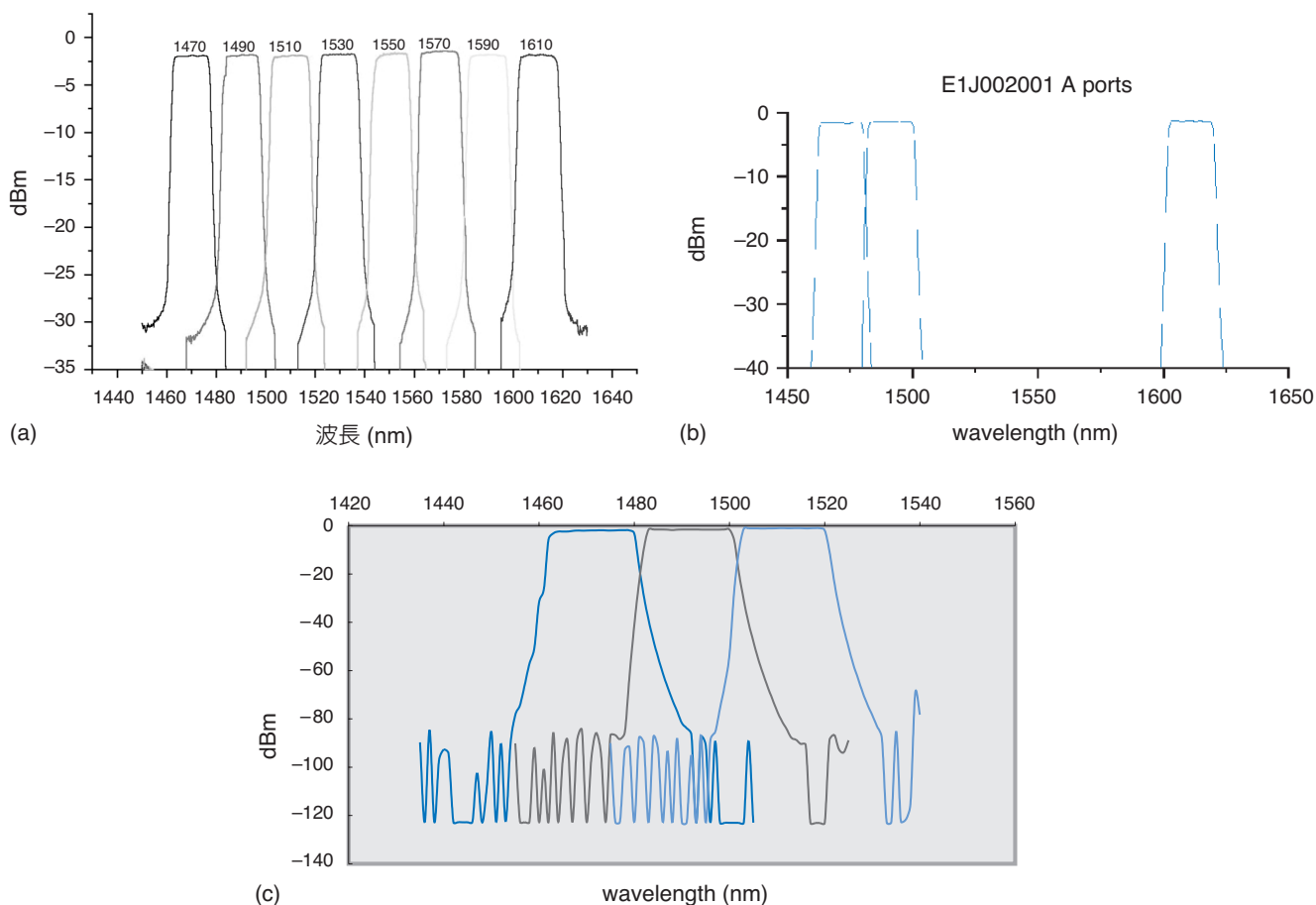


圖 5. 頻譜量測架構及其動態範圍比較，以 CWDM 模組為量測實例。(a) 寬帶光源 ASE+光頻譜儀，(b) 可調波長雷射+光功率計，(c) 可調波長雷射+光頻譜儀。

### 1. 白光源+光頻譜分析儀

此種架構是最傳統的頻譜量測法，白光源是高強度的鎢絲燈炮，發出光線的波長涵蓋範圍很廣，從可見光到紅外線區，在 600 nm 至 1700 nm 之間，可涵蓋整個光纖通訊使用波長的範圍，但所發射出的單位波長的能量密度低，在單模光纖中，約在  $-50$ — $-60$  dBm/nm 左右。光頻譜分析儀的核心引擎是具週期性刻紋的折射光柵 (grooved diffraction grating)，利用光柵的波長色散特性作波長的分離，另外經由內部偵測器量測各波長強度，並經微電腦作數據處理後把頻譜顯示出來，且具有分析訊號頻譜的功能。其頻譜的解析能力取決於光柵的密度和其內部偵測器的敏感度。一般偵測靈敏度大約在  $-90$  dBm，因此光能量頻譜的動態量測範圍只有 30—40 dB 左右。

### 2. 寬波帶光源+光頻譜分析儀

寬波帶光源包括發光二極體 (light emitting diode, LED)、ASE、SLD，這些光源能量密度較高，約在  $-30$ — $0$  dBm/nm 之間，發光的波長範圍則較窄，大多在 100 nm 以內，若搭配好的光頻譜分析儀，其量測的動態範圍可達 60 dB 左右，但是只適合量測波長範圍較小的元件。

### 3. 可調波長雷射+光功率計+電腦資料收集處理

可調波長雷射是同調激發放射的光源，其能量密度可達數 dBm/nm 以上，可用的光能量强度高，因此頻譜的能量解析範圍，主要取決於雷射發光強度與本身自發性放射雜訊的對比，以及光功率計的偵測靈敏度和雜訊水平。這種量測系統的動態範圍

可輕易達 40 dB 以上，而如果使用高隔離度的可調波長雷射光源，降低雷射本身自發放射的雜訊，可把量測動態範圍提高到 60 dB 左右。不過一般使用可調波長雷射量測損失頻譜所需的時間較長，主要原因是它的操作方法採用「步進量測 (step-and-measure)」的方式，雷射在每一點波長調整及量測，需要一些等待穩定量測的時間，因此整體頻譜量測的速度較慢。在最近新一代具有連續掃描功能 (swept-wavelength) 的可調雷射被開發出來之後，這個問題已經大有改善。

#### 4. 可調波長雷射 + 光頻譜分析儀

這個量測架構結合高能量密度和高解析的能力，量測能量的動態範圍可達 80 dB 以上，是量測極高隔離度和解析度的元件唯一的方法。其缺點是量測過程需同時掃描雷射及光譜儀，量測每一點波長的時間較長，整體頻譜量測的時間相當久。如果需要最佳解析度和動態範圍，使用可調波長雷射同時搭配光頻譜儀 (OSA) 的量測架構為最佳的頻譜量測方法，不過量測的速度也是最慢的。

### 四、光波的電場極化效應

光波或紅外線都是電磁波，是由電場與磁場交互振盪來傳播，在一般非磁性介質中 (例如玻璃光纖) 及大部份的元件，光波與這些元件交互作用的

特性，都由電場與元件的材料結構來決定。前面所討論的是有關元件對光波的電場強度及波長特性所產生的衰減，表現在光訊號經過元件後之訊號損失及波長相關頻譜的現象。除了光波電場的強度之外，電場的方向其實也是很重要的因素，對光通訊網路的功能與品質有密切的關係。其中最重要的兩個問題，一是極化相依損失 (polarization dependent loss, PDL)，即元件的插入損失會因光訊號的電場極化方向不同而產生變化，另一個是極化模態色散 (polarization mode dispersion, PMD)，尤其 PMD 會造成訊號脈衝的擴散，嚴重限制高速光纖網路的傳輸速率。

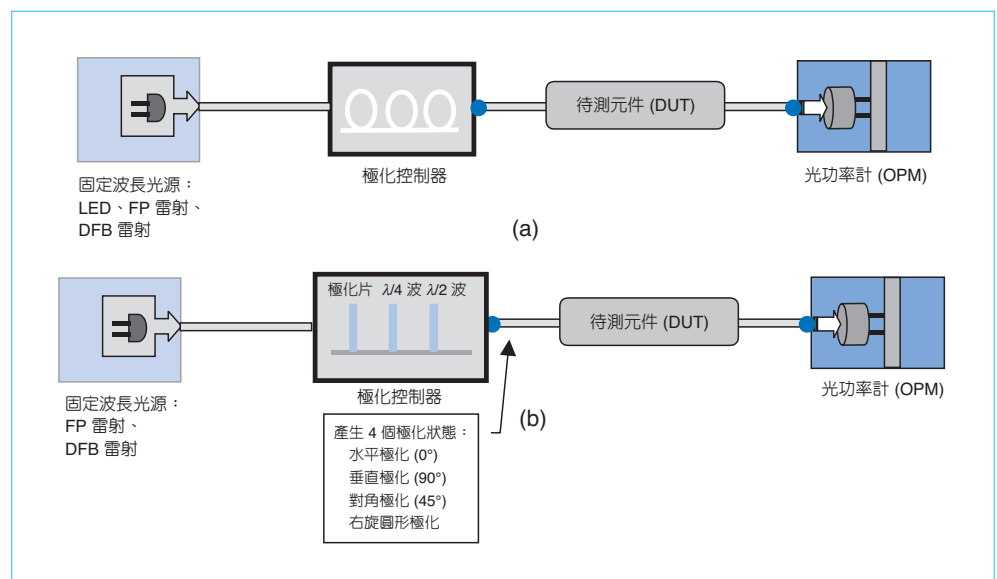
#### 1. 極化相依損失的量測

所謂極化相依損失 (PDL) 是指在所有不同極化方向的光源經過一個元件後，其訊號損失之最大和最小值的差異量。量測 PDL 的方法主要有兩種：一是極化方向掃描法，另一是姆勒法 (Mueller method)，如圖 6 所示。

##### (1) 極化方向掃描法<sup>(3)</sup>

極化方向掃描法的主要檢測方式如圖 6 (a) 所示，它是運用電場方向高度極化的雷射作為光源，並使用一個極化控制器，把輸入光源轉化成任意方向的極化狀態，包括任何線性極化、橢圓方向極化及圓形旋轉極化狀態。極化控制器可由數個光纖環

圖 6. 極化相依損失 (PDL) 量測架構示意圖，(a) 極化掃描法，(b) 姆勒法 (Mueller method)。



圈串接組合而成，搖擺這些環圈作各種不同方向的組合，就能達成任意方向的極化狀態。使用光功率計量測在各種不同極化方向的輸入光訊號所產生的輸出訊號強度，由此找出所有不同極化方向的最大功率強度  $P_{\max}$  和最小強度  $P_{\min}$ ，PDL 值即可依定義式 (公式 (3)) 計算求得。這個量測 PDL 的方法的精確度之高低，決定於輸入光源的功率要能保持穩定，極化控制器要能製造所有可能的極化狀態，以及光功率計本身的量測敏感度與訊號的極化方向無關。

$$\text{PDL} = 10 \log \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \text{ (dB)} \quad (3)$$

對多波通訊系統而言，PDL 也會隨訊號波長的不同而有變化，那麼 PDL 頻譜的量測也很重要。要量測元件的 PDL 頻譜，只要把量測儀器的雷射光源換成可調波長雷射光源，並對所要量測的波長範圍，逐步對不同波長重複 PDL 量測步驟，就能得到 PDL 頻譜。由於多個波長的 PDL 量測時間逐一疊加起來，所以要完成一個 PDL 頻譜相當費時。

## (2) 姆勒法<sup>(4)</sup>

這個方法主要基於四個已知特定的極化狀態，應用光功率計量測待測元件在這四種極化光訊號下所輸出的訊號強度。根據姆勒法的理論，PDL 可由這四個極化狀態下的輸出功率計算而得。姆勒法所使用的儀器架構與前述極化掃描法類似，但所使用的極化控制器有很大的不同，這個極化控制器是由一片  $\lambda/4$  波片、 $\lambda/2$  波片和一個極化片所組合而成 (如圖 6(b) 所示)。

首先轉動極化片，使它和雷射光的極化方向對齊，可觀測所量測到的功率為最大時。而要製造四個特定的極化狀態，必須調整  $\lambda/4$  波片和  $\lambda/2$  波片的相對角度在  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  三個線性極化方向以及右旋圓形極化狀態。功率計先量測這四種極化狀態的光源訊號強度  $P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$  和  $P_d$ ，接著將待測物插入，並量測這四個極化訊號通過待測物後的功率分別為  $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$  和  $P_D$ 。據姆勒理論，在  $4 \times 4$  的姆勒矩陣中，只有四個元素和 PDL 有關，其關係如公式 (4) 所示。

$$\begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left( \frac{P_A}{P_a} + \frac{P_B}{P_b} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{P_A}{P_a} - \frac{P_B}{P_b} \right) \\ \frac{P_C}{P_c} - m_{11} \\ \frac{P_D}{P_d} - m_{11} \end{bmatrix} \quad (4)$$

而最大和最小的功率為  $T_{\max} = m_{11} + \sqrt{m_{12}^2 + m_{13}^2 + m_{14}^2}$ ， $T_{\min} = m_{11} - \sqrt{m_{12}^2 + m_{13}^2 + m_{14}^2}$ ，則  $\text{PDL} = 10 \log \frac{T_{\max}}{T_{\min}}$ 。

姆勒方法的精確度和前述極化掃描法差不多，但姆勒法最大的優點是測量速度快，每一次 PDL 量測只需幾秒時間，這對 PDL 頻譜的量測是最好的解決方案。

## 2. 極化模態色散的量測

所謂極化模態色散 (PMD) 是指不同電場極化方向的光訊號在經過光纖網路中的元件時，傳播速度不同，有些極化方向的光線走得較慢，結果造成同一個脈衝訊號的寬度擴散<sup>(5)</sup>，如圖 7 所示。如果訊號的寬度擴散嚴重，可能使前後訊號位元產生重疊，而使接收器無法分辨，因此產生誤碼的情形。PMD 的發生，主要因為光學元件本身材料結構不對稱，或機械應力所產生的雙折射性質 (birefringence)，使不同極化方向的光波以不同的速度傳播。而兩不同極化模態間的相對延遲時間，即所謂訊號的群組差分延遲時間 (differential group delay, DGD)，一般是以 ps (picosecond，即  $10^{-12}$  秒) 為單位。

對一般速率在 2.5 Gb/s 的光纖網路，PMD 效應的不良影響小得可以忽略，但以 10 Gb/s 或甚至 40 Gb/s 高傳訊速率的系統，PMD 將對網路系統的穩定性造成很大的衝擊。一般要保持網路的傳輸訊號穩定，必須將整體的 DGD 控制在一個位元訊號週期的 10—20% 以內。對不同速度的光訊號網路系統，其最大可忍受的 PMD 有所不同，請參照圖 8 所示<sup>(6)</sup>。

極化模態色散 PMD 之量測，以瓊式矩陣析解法 (Jones matrix eigenanalysis, JME)<sup>(7)</sup> 是最標準的量

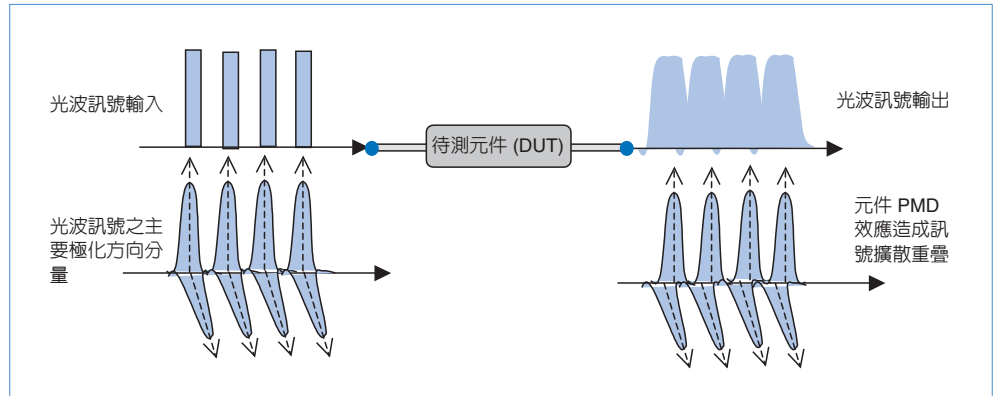


圖 7. 光纖元件之極化模態色散 (PMD) 效應示意圖。

測法。瓊式矩陣是一個能描述元件對光波的傳播特性的數學方法，這個矩陣把光纖元件輸入端光波訊號和輸出端光波訊號的強度、相位和極化狀態作明確的關聯。而經由量測相鄰之不同波長所對應的瓊式矩陣的變化量，來計算訊號群組差分延遲時間 (DGD)，其適用於線性且特性不隨時間變化的元件。

瓊氏理論<sup>(6)</sup> 用二維的向量代表輸入訊號或輸出訊號的強度和極化方向。每一瓊氏向量包含兩個複數，代表訊號極化狀態的電場強度和相位。瓊氏矩陣代表某元件對訊號極化狀態的轉化關係函數，與輸入訊號和經過元件後的輸出訊號之間的關係，如公式 (5) 所示。

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， $\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$  和  $\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}$  分別為輸入及輸出訊號的極化狀態， $J_{11}$ 、 $J_{12}$ 、 $J_{21}$ 、 $J_{22}$  為元件轉化矩陣函數的四個組成元素。瓊式矩陣中的這些元素，可直接經由量測實驗來求得。把三個已知極化狀態的光訊號射入待測元件，然後使用極化分析儀，測定各輸出訊號的極化狀態，就可找出待測元件的瓊氏矩陣函數。一般所使用的三個已知極化方向，是相對於光軸  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  三種極化訊號。

PMD 的 JME 量測架構如圖 9 所示。這種架構需要一台窄帶的可調波長雷射光源、一台極化調整器、一台三個方向的線性極化切換器，以及一台快速極化狀態分析儀，並經由電腦介面作控制和資料收集與處理。

首先，雷射光源經過極化調整器，把極化方向調整為圓形旋轉極化狀態，使雷射光可以通過後面的極化切換器所選的任一個極化方向  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  或  $90^\circ$ 。對每一雷射波長，極化分析儀量測輸出端訊號的極化方向和強度，及其對應的瓊氏矩陣。逐段改變光源的波長，就可測得一系列不同波長的瓊氏矩陣。而訊號群組差分延遲時間 (DGD) 就可依下列關係計算出來：

$$\text{訊號群組微差量： } \Delta\tau = |\tau_{g,1} - \tau_{g,2}| = \left| \frac{\text{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}{\Delta\omega} \right| \quad (6)$$

其中， $\tau_{g,1}$  和  $\tau_{g,2}$  兩個主要極化方向的群組延遲時間， $\Delta\omega$  為兩點波長間的頻率間隔， $\rho_1$  和  $\rho_2$  為相鄰兩個波長量測到的瓊氏矩陣要滿足  $T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega)$  方程式的正解值， $\text{Arg}$  是個取複數之角位的函數，即  $\text{Arg}(ae^{i\theta}) = \theta$ ，由  $\Delta\tau$  的關係式可知，要決定  $\Delta\tau$  不需知道個別的  $\tau_{g,1}$  和  $\tau_{g,2}$  值。這一系列  $\Delta\tau$  值和波長的關係可畫出一個頻譜，把  $\Delta\tau$  對所有的波長作平均，即可得平均的訊號群組微差量  $\langle\Delta\tau\rangle_\lambda$ 。

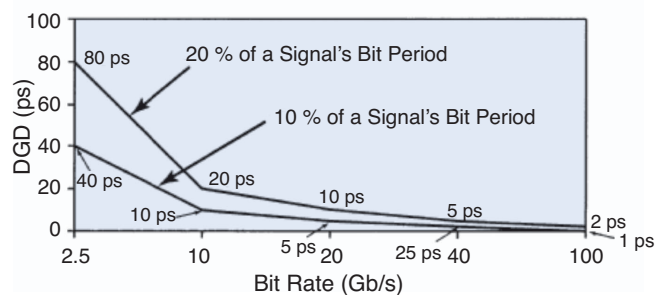


圖 8. 傳訊速率和可忍受模態色散 (PMD) 範圍<sup>(8)</sup>。

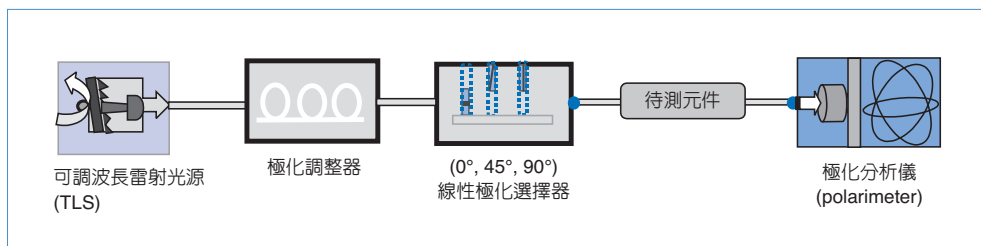


圖 9. PMD 量測架構：瓊氏矩陣析解法 (JME)。

JME 量測法的準確度受多個因素的影響，包括光纖線路的折射性質變化、光纖線路的穩定性、光源的波長調變步進的精確度、極化分析儀的精確度和入射光源極化方向的穩定性等。一般而言，量測每一點採取的波長間隔  $\Delta\lambda$  與量測精度也有很大的關係，較大的波長間隔可能量測準確度較高，但必須符合所謂「alias limit」的限制條件，即  $\Delta\tau\phi\Delta\lambda \leq 4.0$  (ps·nm)。

另外，由於 JME 量測法所量測的 PMD 是包含待測元件及線路，因此要保持很好的量測精確度，必須讓待測元件及線路保持極度靜止穩定，些微的線路振動或位移，都會降低量測準確度，尤其群組差分延遲時間 (DGD) 在 0.1 ps 以下的元件更是如此。現代光通訊元件的 DGD 多要求在 0.05 ps 以內。

## 五、結語

光纖通訊網路是現代寬頻有線通訊的主流，而單模光纖通訊系統更是長程及區域網，甚至短距離通訊網的最佳選擇。一個光纖網路需要多種不同的主動或被動元件，以發揮穩定可靠的通訊功能，而被動元件是光纖網路中應用最多、種類最複雜的元件。這些元件各有不同的功能，同時它們的特性也直接影響整體網路的穩定性，因此，這些插入元件特性與規格的檢測是極為重要的課題，而光纖被動元件的最主要檢測項目是插入損失和色散相關特性。

一般而言，插入損失隨光訊號波長或電場極化方向的不同而產生變化，插入損失 (IL)、反射損失 (RL) 和極化相依損失 (PDL) 是必要的基本量測項目。新一代的多波通訊系統，所有元件設計規格都要考慮與波長相關的特性，尤其波長多功元件及模組，量測插入損失頻譜是判定元件特性規格的最佳利器。隨著網路的傳訊速率越來越高，極化模態色

散 (PMD) 的不良影響將顯現而不可忽略，速率 10 Gb/s 以上的系統，甚至對於未來 40 Gb/s 的系統，失控的 PMD 效應將會嚴重威脅高速網路的穩定性，並限制其傳訊速率。因此，元件的 PMD 量測將成為必要檢測項目。

這些被動元件的重要檢測項目，有多種不同的量測方法，有些已經標準化，而有些仍在繼續研究與改良，本文只簡要介紹幾個常用的方法。市面上已有很多儀器製造商，針對這些檢測項目，提供單機型、模組化或整合型的量測解決方案。使用者應該依據所要量測的項目、特性、精確度，以及量測速度和應用的環境等條件，選擇最適當有效的儀器。適當的量測方式，可以正確地檢定光纖網路元件的損失、頻譜與極化色散等特徵，提供網路系統設計者作完善的功能規劃與預算，也才能確保整體光纖通訊網路的安全、高速及穩定。

## 參考文獻

1. J. Palais, *Fiber Optic Communication*, New Jersey: Prentice Hall (1992).
2. D. Derickson, *Fiber Optic Test and Measurement*, New Jersey: Prentice Hall (1998).
3. Product Note 11896-1, Hewlett Packard (1996).
4. B. Nyman, *OFC Technical Digest*, ThK6, 230 (1994).
5. M. Albert, *WDM Solutions*, June (2002).
6. R. C. Jones, *J. Optical Soc. Amer.*, **37**, 110 (1947).
7. B. L. Heffner, *IEEE Photonics Technology Letters*, **4**, 1066 (1992).
8. Product Note 8509-2, Agilent Technologies (2001).

- 張文彥先生為美國奧瑞岡州立大學物理博士，現任新竹科學園區台精科技股份有限公司光纖產品事業處協理。
- Winyann Jang received his Ph.D. in physics from Oregon State University, USA. He is currently the Director of Fiber Optic Products Division at U-CONN Technology, Inc., Hsinchu Science Park, Taiwan.