

光通訊測試儀器發展現況與展望

高密度波長多工 (DWDM) 技術利用了光纖耗損最小之頻帶，使得在一根光纖中能同時傳輸多個光通道，並且能接受不同之信號傳輸協定與格式，成功地解決了高容量的需求，而實際地應用於市場上。此複雜技術之元件極為精細與靈敏，因此測試及量測就扮演非常重要之角色，以確保網路發揮最佳效能。光通訊測試可分光學層測試與通信層測試兩種，本文將比較此兩類測試項目之差異，並對光功率計、光譜分析儀與波長計之工作原理做介紹。

葉峻毅

一、前言

由於高密度波長多工 (DWDM) 及光放大器 (OFA) 這兩個革命性之技術問世，使得寬頻光通訊網路能夠由實驗室進入到真實之生活中。DWDM 通信系統可以在同一條光纖中放進數十個波長之波道，同時每個波道都能以每秒 gigabit 之資訊量來傳輸，因此系統之頻寬能大幅增加。光放大器則是利用了摻鉕光纖取代以往的光電轉換式放大器，克服了光纖的損耗，使得長距離傳輸成為可能 (圖 1)。光通訊 DWDM 系統包含了數十種元件及模組，例如光源、光多工／解多工器、光學塞取器、光放大器、接收器等。

也因為 DWDM 系統使用了大量複雜的光／電、主動／被動元件，因此不論在元件的研發與製造、光纖的現場鋪設上 (field installation) 及通信網

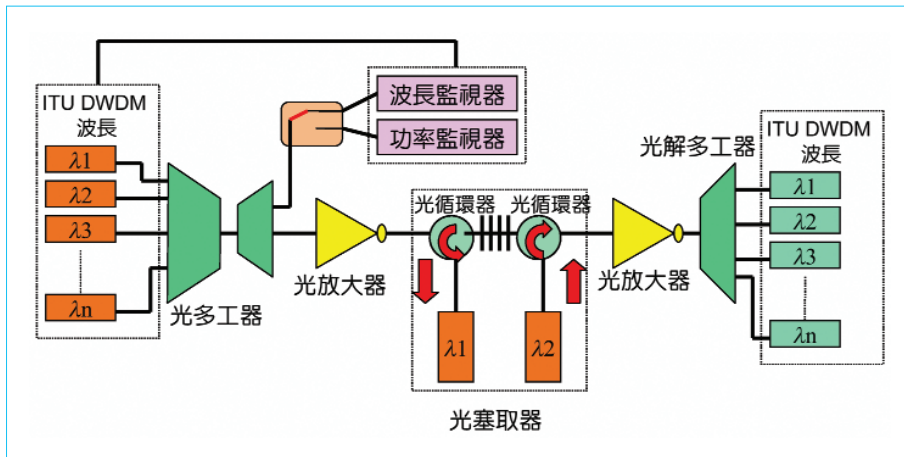
葉峻毅先生為中央大學光電所碩士，現任工業技術研究院量測中心精密光學感測實驗室副工程師。

路系統的整合，也遇到複雜的工程挑戰及更久的測試時間。目前較常使用的光通訊測試儀器有光源、功率計、光譜分析儀器、光調變器及時域測試儀器等五類。在光通訊測試領域中可以不同層次之量測應用來將這些儀器分類，筆者歸納出兩種目前定義較清楚之分類法，在本文中一一介紹。同時也將這些分類出來的測試環境所需之測試儀器種類及特性來作說明。

二、光通訊測試儀器的分類

1. 光學層測試與通信層測試

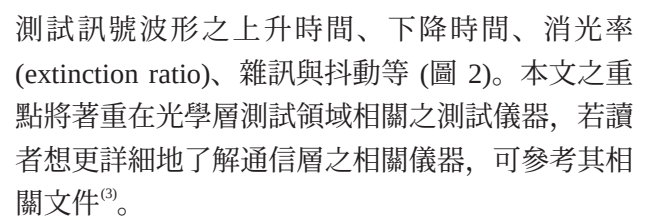
光學層 (optical-layer) 與通信層 (client-layer) 的分別就是在時間變異 (time-variance) 的特性上。光學層也稱為實體層 (physical layer)，其測試為一段積分時間之平均結果 (time-averaged)，這一類的測試與通信之傳輸速度及協定 (protocol) 無關，而是針對元件之光學特性做測試。不同的元件需要不同



的測試項目及測試儀器，而在光學層測試中最重要
的儀器為光譜分析儀 (OSA)、功率計及波長計，在
本文中將有詳細介紹。但不論測試項目為何，其總
不離開波長及功率這兩個基本物理量。表 1 列出光
學層的測試項目⁽¹⁾，第 1、2、3 項為波長多工器與
DWDM 系統量測之項目，來驗證其特性是否符合
ITU 之規範⁽²⁾。邊模壓抑比 (side-mode suppression
ratio, SMSR) 為 DFB 雷射光源主要之評估參數；插
入損失與反射率為量測被動元件之功率損失情形。

通信層測試為時間取樣 (time-sampled) 之量測，其又可分為 data transport layer testing 及 signal transmission layer testing，其測試參數如表 1。

誤碼率 (bit error rate, BER) 是評估數位通訊網路最有效率且最精準之工具之一。另外，眼狀圖遮罩測試 (eye pattern mask) 可在一次量測中，計算出



2. 研發等級儀器／元件製造測試儀器／現場測試儀器 (光學層)

第二種分法是以應用場合來分，不論是哪種測試環境，仍須具有量測功率及波長之能力。研發等級之儀器 (laboratory equipment) 須具備較高解析度及高精密度之規格，並且最好能做多功能之實驗；元件製造測試儀器 (manufacturing test equipment) 需要自動化量測功能及能做 pass/fail testing，以利自動化品質管制；現場測試儀器 (field test equipment)

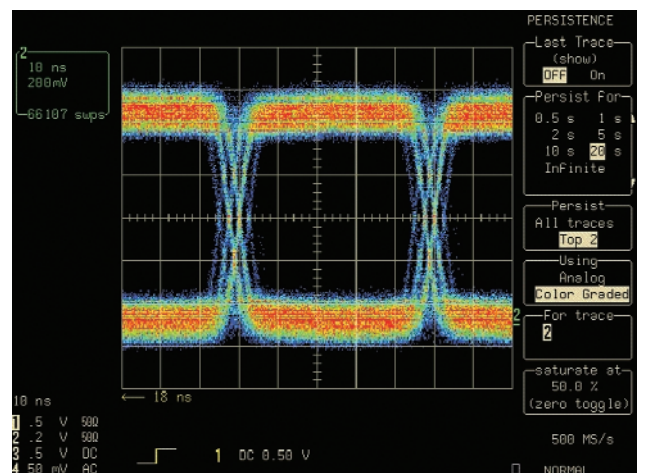


圖 2. 光功率眼狀圖。

的需求為可攜帶、堅固、對環境影響容忍度佳、容易使用及能輸出測試報告 (documentation)。

OSA 仍是每一個應用測試領域都需要的儀器，即使是同一家光通訊測試設備廠商的 OSA 產品，也有實驗室型及現場測試型之分。這說明了光通訊測試儀器之種類極多，而也沒有任何一家儀器公司能推出所有的產品，如 Advantest 與 Tektronix 公司在光通訊測試產品上結盟，及 EXFO 併購 Burleigh 公司，都是為了擴充產品線的證明。以下介紹各個測試應用領域之主要儀器及其特性，希望對讀者在選購光通訊測試儀器時有所幫助。

(1) 研發等級儀器

研發階段的測試儀器其效能必須能不斷提升，以供研究人員發展出最高品質的元件。這些儀器通常操作繁複，但也能提供多樣功能以進行複雜之實驗。

這個測試環境使用之儀器有可調式雷射 (tunable laser source, TLS)、光譜分析儀 (OSA)、光功率計 (optical power meter) 與波長計 (wavelength meter) 等。這些儀器內部具有精密之轉動及掃描光學機構，以提供高解析度及微調功能；但也因此，造成精確度 (accuracy) 不佳，因此儀器校正便成為一個重要的課題。目前校正有兩種方案，一是以送標準維持單位 (如國家標準實驗室) 做校正⁽⁴⁾，二是仰賴儀器本身之內建校正機制。例如，以干涉儀為架構之波長計，其內部內建了 633 nm 氦氖雷射以提供參考光程長度；OSA 也利用 1.55 μm 之 EE-LED (edge-emitting LED) 通過 C_2H_2 (acetylene gas)⁽⁵⁾ 所產生的吸收譜線做自我校正 (圖 3)。研發等級之儀器必須維持其穩定性，包含震動的防制及溫度溼度的環境控制，以維持精確度及重複性，而這點也與現場測試儀器之訴求有明顯之不同。

(2) 元件製造測試儀器

元件製造測試儀器扮演兩個角色，一是在元件製造過程中協助生產設備機構之對準與微調，第二是檢驗是否達成客戶之規格及標準規範。在成品之檢驗上，必須能做到大量及半自動化或全自動化的要求。在目前，大部分之光通訊主動元件還是利用人工來完成，產能無法提升，因此生產之自動化

是元件廠商一致追求的目標。市場上已經有一些自動化的產品，如光纖元件之自動檢視系統與對光系統，可協助製造商改善效率。因此，越來越多的自動光學檢測 (automated optical inspection, AOI) 公司開始投入這個自動化需求強烈，但尚未開發之領域，如 Next Fiber Systems、NI 與 Cognex 等公司，皆有相關產品的推出。

(3) 現場測試儀器

為了確保光通訊網路之正常運作，操作員 (personnel) 必須依靠現場測試儀器來協助系統之建置 (installation)、佈放 (deployment)、維護與檢修。為了因應各種戶外作業環境，現場測試儀器對震動、溫度與溼度的變化要有相當之容忍度，以達成穩定及精確之結果。此外，單一之量測功能與友善的使用者界面，更能幫助操作員迅速完成測試。

光時域反射分析儀 (optical time domain reflector, OTDR) 是現場測試最常用之儀器，它可以在長距離之光纖網路中找出有問題的接點，並且能找出該問題發生點之位置 (距離)，其精確度與解析度可達 1 公尺之內，因此可視為一個一維空間的光雷達。OTDR 可以提供一條光纖各個距離的衰減量、衰減係數與接點形態等，以利現場人員找到故障點進行維修，同時也可在活纖 (active fiber) 中進行即時的監控。所謂活纖就是有信號在內傳輸之光纖，必須用與信號光源不同波長的 OTDR 以進行監控，靠著 WDM 多工器或濾光器將混在傳輸信號中之量測信號分離出來。目前是用 1550 nm 之光源測 1310 nm 之傳輸信號，1625 nm 之光源測 1550 nm 之傳輸信號。

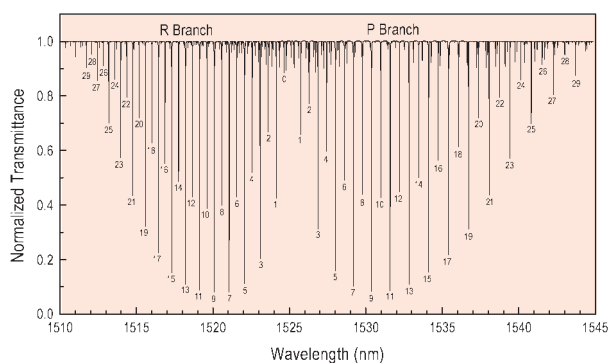


圖 3. C_2H_2 之吸收譜線⁽⁵⁾。

現場測試儀器的趨勢為遠端光纖測試系統 (remote fiber testing systems, RFTS)。藉著在網路各個重要節點 (如光塞／取多工器、光放大器、光開關等) 安裝光學監控器 (optical performance monitor, OPM) 與遠端測試模組 (remote test unit, RTU)，即時監控光網路之各項參數，一旦問題發生，即時將數據資料傳至管理中心 (central office)，以進行參數調整及問題分析。其最大之優點是只需要極少之現場操作員便可使光通訊網路之管理達到最大之效率。

三、常見之光通訊儀器

目前最常見之光通訊儀器為光功率計、光譜分析儀、波長計與光時域反射儀，以下將一一介紹其工作原理並比較其差異性。

1. 光功率計

光功率計可用來量測主動元件 (如 DFB 雷射) 之輸出功率，亦可以配合可調式雷射來量測被動元件之光譜通帶 (spectral shape)，其量測結果較 OSA 來得精準，但速度也較慢。理想的光功率計必須滿足以下三個條件：平坦化之光譜響應、無光偏極化差異 (independence of polarization) 與溫度敏感度小。另外，在某些測試項目，如反射損失及 SMSR 等，須具備量測極微小訊號之能力，目前功率計之動態範圍都可達 80 dB 以上。目前在光通訊應用上最重要之光感測器 (photodiode sensor) 材料為砷化銦鎵 (InGaAs)、鍺 (germanium) 與矽。InGaAs 的響應峰值位於 DWDM 之頻帶，其優點是動態範圍大且反應速度快，缺點則是光譜響應為一緩慢上升之曲線，因此在光功率量測用上必須依使用波段做定點校正，重要之校正點為 850 nm、980 nm、1310 nm 與 1550 nm (圖 4)。光感測器之光偏極化差異在 0.001 dB—0.05 dB 間，欲降低此效應須從感測器之晶格結構設計來努力。在溫度效應方面，當溫度升高，砷化銦鎵之光譜響應往長波長方向延伸，但在截止波長前之波帶，溫度所造成之變化不大⁽⁶⁾。矽感測器之響應在 400 nm—1100 nm 之間，並不落於 DWDM 頻帶，主要應用為 datacom 之量測，如 820 nm 之 LED 與 850 nm 之雷射。

另外一個常用之感測器材料為鍺，其光譜響應在 1550 nm 波帶變化較大，且對溫度極為敏感，因此較不適合做為光功率計。另一種光功率計為熱電偶式 (pyroelectric) 之感測器，其光譜響應既平且寬，但動態範圍不大且響應速度不快，因此只在標準實驗室使用，應用於標準傳遞之用途。而 NIST 最近採用了加上溫度控制的鍺感測器光功率計，以方便功率計製造商做標準功率之傳遞。

2. 光譜分析儀 (OSA)

在 1998 年前，光通訊測試領域最重要之儀器為 OTDR (光時域反射分析儀)。但在 DWDM 正式在商業上成功地使用後，OSA 成為了最重要且必需的儀器。根據工研院產業經濟與資訊服務中心 (Industrial Economics and Knowledge Center, IEK) 研究指出，OSA 在未來三年內將有 160% 之年成長率。它具備了同時量測波長與功率之能力，因其極佳之波長解析度與動態範圍，特別適合用來量測光源之 SMSR、DWDM 之波道中心波長、波道間隔、OSNR (optical signal to noise ratio)、光放大器之 NF (noise figure) 與各式濾波器 (filter) 之穿透率等。OSA 簡單的來說，就是一部「專門工作於光通訊波段之單光儀 (monochromator)」。單光儀的功能為可調式帶通濾波器 (tunable bandpass filter)，靠

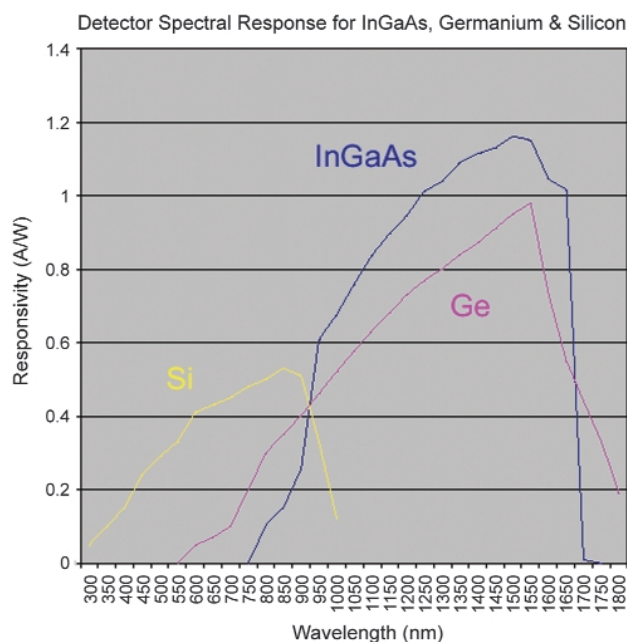


圖 4. 光功率計常用之三種偵測器響應。

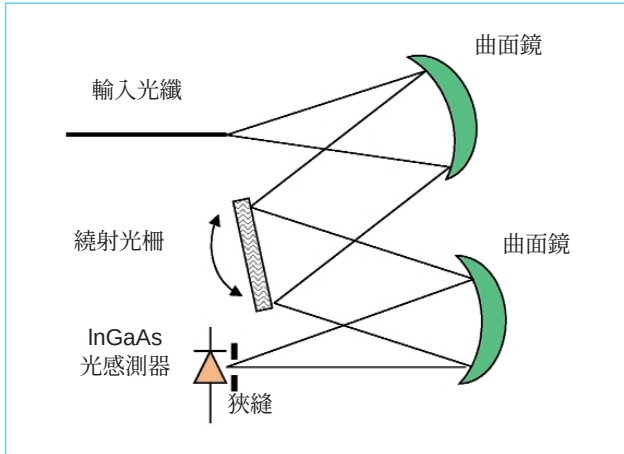


圖 5. 光譜分析儀工作原理。

著轉動繞射光柵來進行帶通波長之掃描，如圖 5。

OSA 最主要之規格包括波長範圍、波長解析度、精確度、動態範圍等。一般之 OSA 都具備 700 nm—1700 nm 之範圍，符合各種不同之光通訊系統之波長需求。其波長解析度 (resolution bandwidth, RBW) 可視需要而調整，可獲得之解析度有 0.5 nm、0.2 nm、0.1 nm、0.05 nm，甚至到 0.01 nm。當然，解析度越高，量測時間也越長 (對相同之掃描範圍)，而 0.05 nm 之解析度已足夠量測 50 GHz 之 DWDM 系統了，圖 6 是一個 DFB 雷射在不同解析度下之量測結果。波長精確度是 OSA 之致命傷，若在量測前無先經過校正，則波長誤差可能達到 0.5 nm。在經過校正後，波長精確度可達 0.02 nm。若在精確度重要之應用上 (如中心波長)，則應使用波長計。動態範圍 (也有人稱為 optical rejection ratio, ORR) 是 OSA 最大之優點，達 60 dB，可滿足 OSNR 量測之需求。動態範圍主要決定於單光儀之 filter shape，當 filter shape 越陡峭時，動態範圍越大。而影響 filter shape 的因素為狹縫 (slit) 之開口大小、系統雜光 (stray light) 與光學元件之成像品質。動態範圍測量方法為以一線寬極小之光源輸入 OSA，在輸出之光譜圖上量測在中心波長 0.1 nm offset (或 0.2 nm) 波長處之相對功率，如圖 7。圖 8 是兩台不同之 OSA 對同一單頻光量測之結果。當光纖內之波道數增加時，OSA 動態範圍之重要性就會更加明顯，若是 OSNR 比儀器之動態範圍大時，則真正的光信號就無法被解析出來。

3. 波長計

在光通訊量測應用上，繞射光柵式分光儀已足夠應付大部分之需求。但也有些情形是例外的，例如觀察 DFB 雷射之長期 (long term) 波長飄移、校正可調式雷射之波長與量測光纖色散時之波長參考等，都是需要非常精準之波長準確度才能達成。不管是波長計或是 OSA，量到之波長值都為儀器內介質之波長，而不是 ITU 所制定用來比對之真空波長，因此此值必須乘上介質之折射率才是真空波長。以介質折射率 1.00027 來計算，在真空中波長 1550 nm 之單頻光在此介質中變成 1549.58 nm，若忽略掉這一點，產生之誤差極大，可達 270 ppm，

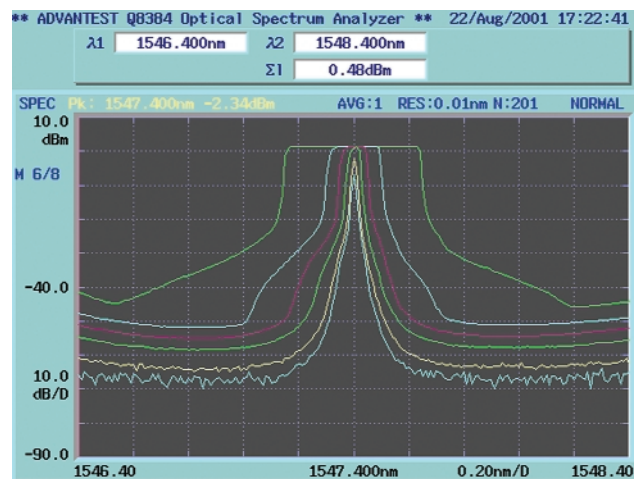


圖 6. 六種解析度之量測結果 (0.5 nm、0.2 nm、0.1 nm、0.05 nm、0.02 nm、0.01 nm)。

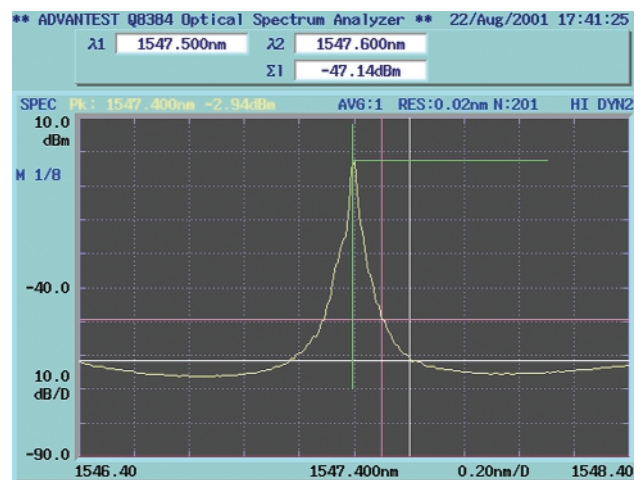


圖 7. 動態範圍之定義 (中心波長 = 1547.4 nm, $\lambda_1 = 1547.5$ nm, $\lambda_2 = 1547.6$ nm)。

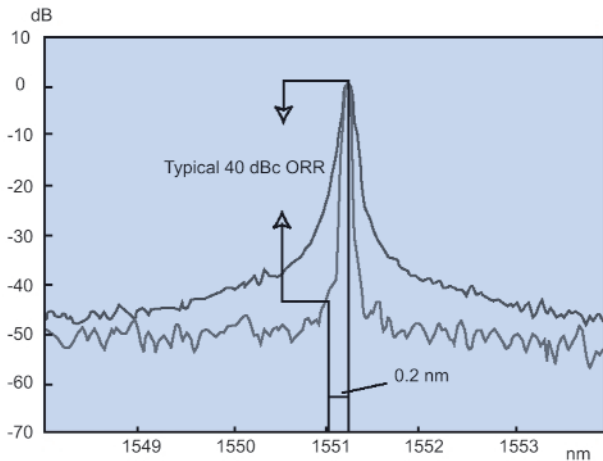


圖 8.不同 OSA 之動態範圍比較。

對 100 GHz (通道間隔 0.8 nm) 之 DWDM 系統來說是法忍受的。因此，準確的介質折射率是達成準確度之首要條件。

波長計是以麥克遜干涉儀基本架構，再配合上穩定之參考光源 (通常為 HeNe 雷射) 以達成波長準確量測之目的。如圖 9，待測光由分光鏡形成兩道光，靠著可移動之反射鏡來調整兩道光之光程差，而形成干涉。若待測光之線寬 (linewidth) 夠窄的話，則此光源之同調長度也越大，干涉條紋可見性 (fringe visibility) 也越好。

當光程差每相差一個波長時，建設性干涉 (或破壞性干涉) 就出現一次。當反射鏡移動一段距離 (ΔL) 後，觀察到 N 次之干涉亮紋，由以下公式

$$\Delta L = N\lambda_u$$

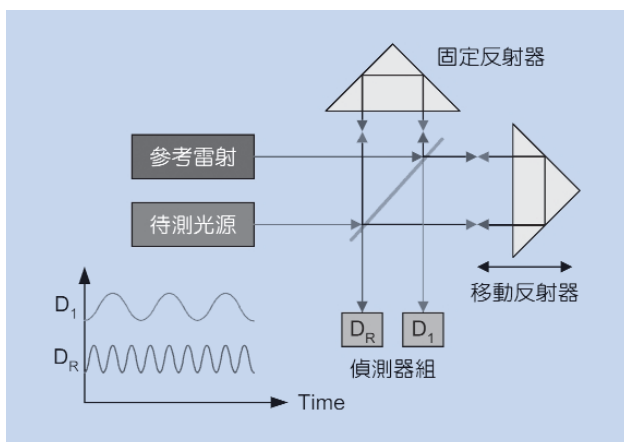


圖 9.波長計之工作原理。

就可計算出待測光波長。影響波長量測精確度之兩個因素為介質之折射率與精確反射鏡移動位置，為了消除這兩個因素，波長計採用了參考光源來解決這兩個問題。待測光與參考光經歷相同之光程差同時產生干涉，由不同之偵測器 (detector) 接收。因參考光具有穩定與精確之波長，因此可反推得到精確之反射鏡移動距離。

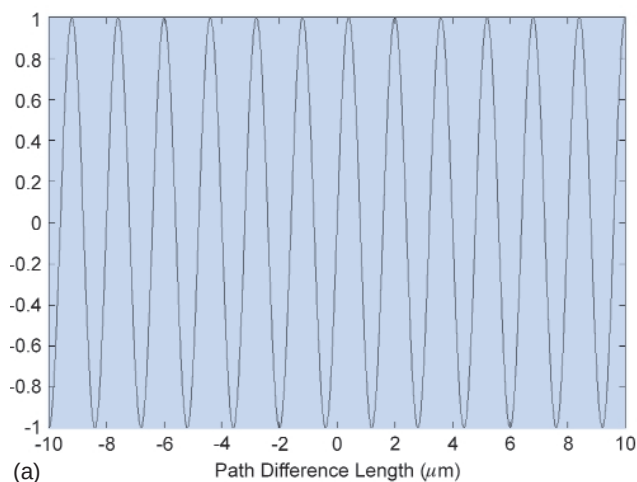
另外，由於在不同之大氣環境下，參考光波長與待測光之折射率比值 (n_u/n_r) 幾乎固定，因此也解決了折射率精確度之問題。因此，真正之待測光波長可由以下公式得到：

$$\Delta L = \frac{N_r \lambda_r}{n_r} = \frac{N_u \lambda_u}{n_u}$$

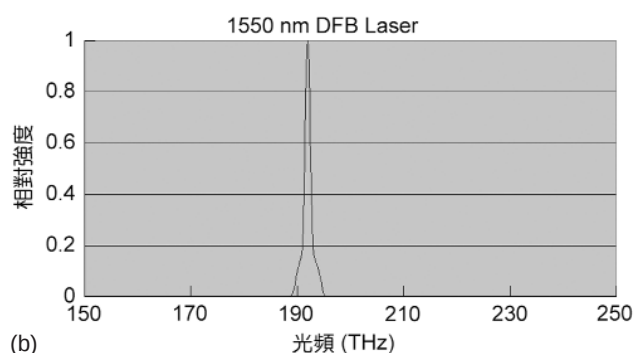
$$\lambda_u = \left(\frac{N_r}{N_u} \right) \left(\frac{n_u}{n_r} \right) \lambda_r$$

待測波長為單頻光時，計算波長之方式為上述之干涉條紋計數 (fringe counting) (圖 10)。若待測光包含多個頻率光波時，採取之波長計算方法為快速複利葉轉換 (FFT)，將反射鏡移動距離與功率之資訊轉換成光頻率 (波長) 與功率之資訊，達成波長量測之目的，這種形式之波長計也稱為 multiple wavelength meter (MWM)，如圖 11。波長量測之範圍由對干涉條紋之空間取樣間隔來決定，而波長之解析度則由反射鏡總移動距離來決定，距離越長，則解析度越高。至於取樣間隔要多細才足夠，則由待測光波長決定。例如，要量測到氦氖雷射 633 nm 之波長 (475 THz)，則干涉條紋之空間取樣間隔須小於 317 nm (根據 Nyquist sampling theorem)。若反射鏡移動了 30 mm，則實際掃描距離為 60 mm，光頻解析度為 10 GHz，對 100 GHz 之 DWDM 系統已經足夠。

影響波長計精確度之因素為參考雷射之穩定性及準確度、大氣環境下之正確折射率與最大之反射鏡掃描距離 ΔL 。因 ΔL 不一定為 λ_u 之整數倍，也就是說會有餘數產生，若 N 值能越大，則忽略餘數之效應就可以減少。MWM 功能類似 OSA，但其優點是精確度高，可達 0.003 nm 以下，但動態範圍不理想，因此波長計較適合於波長標準傳遞及校正用途。表 2 為 OSA 與 MWM 之比較。

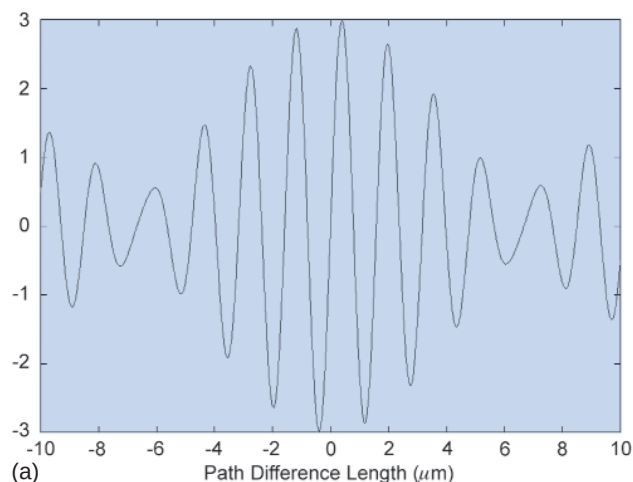


(a)

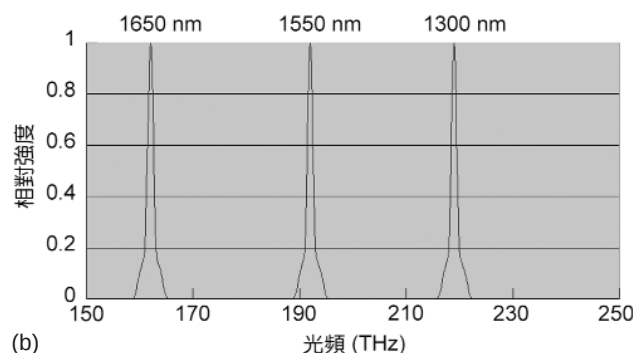


(b)

圖 10. Fringe counter : (a) 干涉條紋圖 : (b) 單頻光譜。



(a)



(b)

圖 11. Multi-line wavelength meter : (a) 干涉條紋圖 : (b) 混頻光譜。

7. 光時域反射儀 (OTDR)

OTDR 是以一個極短的光脈衝導入待測光纖中，然後在發射端接收其反射光之強度與接收時間 (time of flight)，而得到距離與反射光強度之函數，依此判斷各節點之衰減情形。當光脈衝在光纖通信系統內傳遞時，會遭遇反射 (Fresnel reflection) 與散射 (Rayleigh scattering)，因此有部分之光能量會以反方向返回接收端。

OTDR 由脈衝產生器、雷射二極、信號處理器、光偵測器所組成。信號處理器在觸發雷射後，開始計時並量測接收器所得到的信號。光源之脈衝寬度為 30 ns—10 μ s，端看空間解析度與靈敏度之要求。所謂的雙波長 (dual-wavelength) OTDR 為同時具有 1310 nm 與 1550 nm 之光源，以一個 WDM 多工器將兩者耦合進待測光纖。為了避免雷射光之信號將接收器飽和掉，OTDR 使用了一個具方向性之耦合器，分光率 (split ratio) 為 50 : 50。光偵測

器採用 APD，以達成動態範圍大與快速量測之要求。由於反射信號極弱，也包含著雜訊，因此通常取多次數據再予平均，以達到增加訊雜比之目的。

圖 12 是 OTDR 之量測曲線，橫軸為儀器與待測點之距離 (單程)，是以量測時間乘以一個參數 (約為 10 μ s/km) 所計算出的。A 事件為光纖之起點，也是儀器與待測光纖之連接器所造成之反射事件。一個好的連接器能降低發射信號之損失，也避免反射光再進入待測光纖而造成 echos 或 ghost pattern。B 事件為機械式之接續點，C 事件為熔接點，D 事件為光纖之終點 (具良好之切面)。直線段之斜率為該段光纖之衰減係數 (dB/km)，各點產生之 dB 值差即為接續點之信號損失。藉由此圖，現場人員可以快速進行維修及驗收之工作。

OTDR 中重要之規格有動態範圍與量測範圍、盲區 (dead zone) 與解析度等。動態範圍是用來評比 OTDR 最重要之參數之一，它的定義為從儀器

	Scanning Grating	Scanning Michelson Interferometer
應用	OSA	Multi-wavelength meter
波長量測範圍	700 nm—1700 nm	1250 nm—1650 nm
波長精確度	20 pm	1 pm
動態範圍	+15—-80 dBm	+10—-30 dBm
功率量測精確度	0.6 dB	2 dB
OSNR @ 50 GHz	> 50 dB	35 dB
售價	NT\$ 1,200,000	NT\$ 1,000,000

表 2.
繞射光柵與干涉儀分光光譜量測特性之比較。

接面之衰減值與光纖末端雜訊值之 dB 差值，也代表能夠量測的光纖損耗範圍越大。目前典型值為 35 dB，但此值與脈波寬度有關。光脈衝越寬，動態範圍越大，但解析度也越差，目前典型之空間解析度為 10 cm。當光脈衝一個接續點時，會產生一定寬度之反射脈衝寬度，若有另一相鄰事件落在此寬度內，就無法分辨此事件，因此稱為盲區。盲區之發生與反射有關，它發生在反射光使偵測器飽和之情形下。偵測器在飽和後，需要一段時間才能恢復靈敏度，因此在這段時間 (空間) 中就損失了量測的資訊。盲區的典型值為 5 公尺，此值也與光偵測器之頻寬有關。要達到這樣的典型值，偵測器之頻寬需要 50 MHz。

四、結論

國內儀器製造廠商對於光通訊測試儀器尚在起步階段，而全世界對此儀器之需求日益增加，「今日之儀器將變成明日之元件」—這將是光通訊量測儀器及光通訊系統技術的趨勢。工研院量測中心已投入大量之人力進行光通訊儀器開發與標準建立之工作，期能協助國內儀器廠商掌握趨勢，配合產業之發展脈動，並儘量縮短時程，以達到協助國內光通訊測試儀器產業之建立與升級。

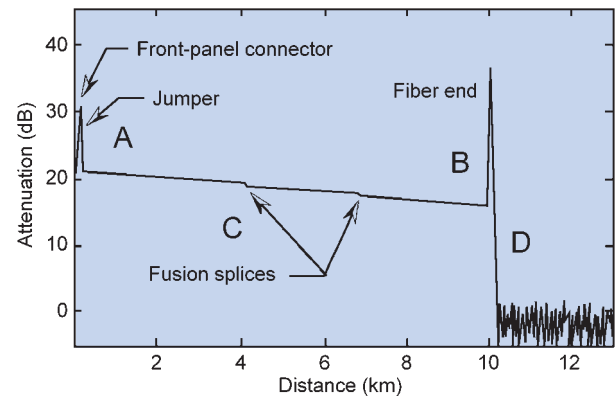


圖 12. OTDR 之量測曲線。

參考文獻

1. S. V. Kartalopoulos, *Fault Detectability in DWDM - Toward Higher Signal Quality & System Reliability*, IEEE Press (2001).
2. ITU-T SG15 Recommendations, G959.1: Optical transport networks physical layer interfaces.
3. Technical Brief, Performance Assessment of Photonic Network, Tektronix Inc. (1998).
4. 藍玉屏, 量測資訊, **79**, 24 (2001).
5. NIST Special Publication 260-133, SRM-2517a (2001).
6. D. Derickson, *Fiber Optic Test and Measurement*, New Jersey: Prentice Hall (1998).
7. A. Girard, et al, *Guide to WDM Technology & Testing-Fiber-Optics Industry Reference*, EXFO Electro-Optical Engineering (2000).