



光纖感測預警系統

三聯科技股份有限公司／蔡瑞禎

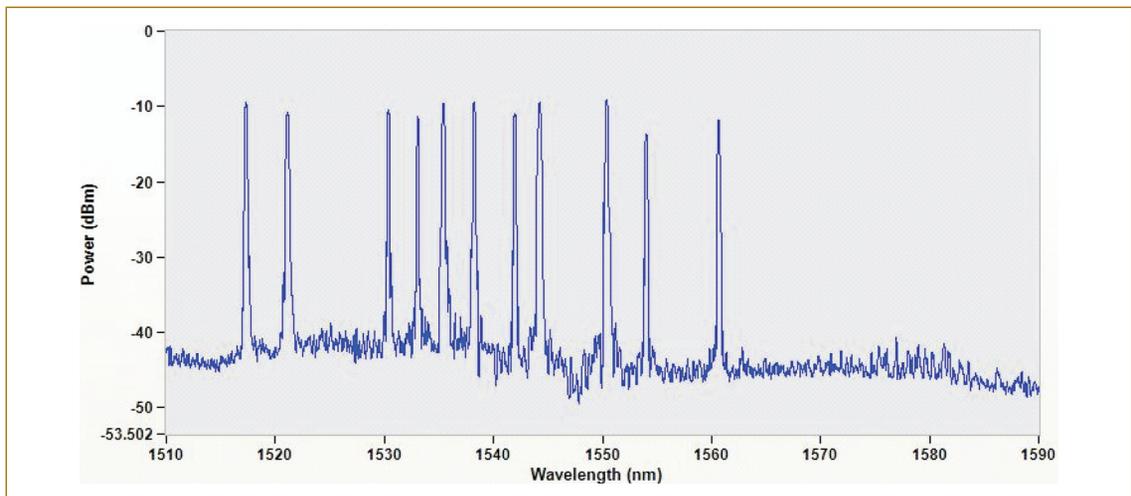


一、前言

光纖感測技術近年因全球公共工程安全意識抬頭，監測市場蓬勃發展，感測器生產技術日新月異，使得建構價格大幅降低，國內以往應用於小規模的學術研究案，逐漸轉變成應用於大型土木結構及公共工程案，其卓越的成效也逐漸受到業界專業人士所重視。

監測預警系統需要大量且穩定的感測器，作為資料分析的來源。傳統電子式感測器因使用環境限制、雜訊干擾使量測品質不穩定、線路長度限制及數量龐大等因素，部分應用不能即時量測而無法滿足工程需求，相對耗費更多人力及經費來維護系統。相較於電子式感測器，光纖光柵（FBG）感測器具有以下獨特的優點：

1. 體積小，重量輕，可內埋於結構體而不破壞其結構強度。
2. 材料强度高，幾何韌性佳，可承受5000 μ c達10000次反覆測試。
3. 能量損耗低，傳輸頻帶寬，量測點長距離傳輸可達10~50km。
4. 不受電磁干擾，抗雷擊，抗高溫高濕及輻射，感測器本身不需電源，是以光纖傳輸訊號，可在惡劣環境下仍有訊號穩定性及耐受性優勢。
5. 多工量測，凡是FBG製作之感測器，不論是溫度計、應變計、傾角計等，皆可由同一台光纖掃描儀擷取波長，再由獨家開發之後端軟體轉成對應之物理量，並可與電子式感測器資料同步彙整於同一監測系統。



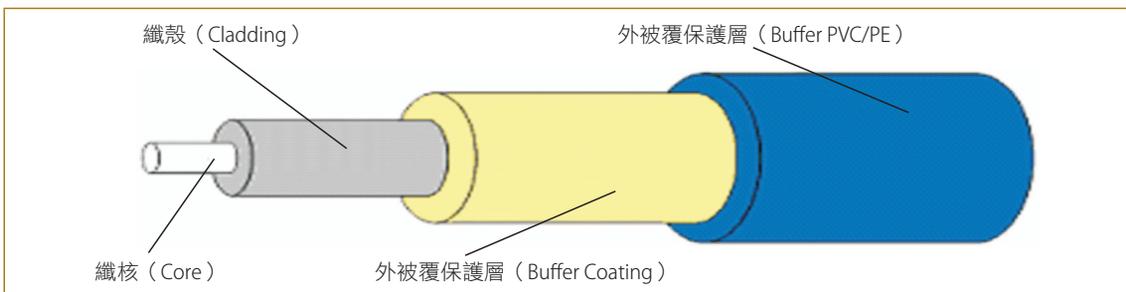
▲ 圖1 光纖擷取器讀取之波長頻譜

6. 無須歸零校正，光纖掃描儀內建校正機制，光纖感測器出廠即附校正參數，使用感測器光波長讀取時，不會因訊號干擾而需一再重複歸零及校正。

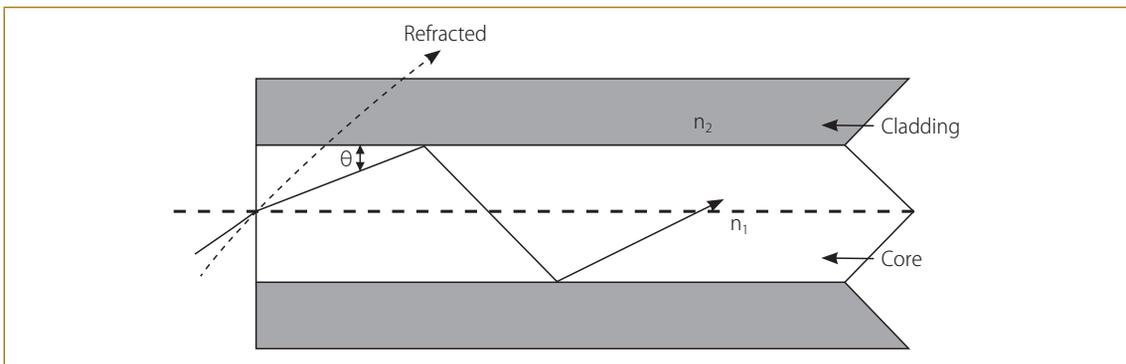
本文為使讀者更深入了解光纖感測器之使用，以淺顯的角度切入，介紹各單元物件及原理，以避免常見的應用上之錯誤。

二、光纖基本原理

裸光纖狀似銀白髮絲，圓柱形介電質波導結構分內、外兩層，內層折射率較高稱為纖核 (Core)，外層稱纖殼 (Cladding)；加上外被覆保護層 (Buffer Coating) 後直徑約 250 μm ，應用上一般使用單模光纖 (SMF) 會加好幾層保護層，例如單芯 3mm PVC 或鎧裝線，或 12 芯 8mm PE 光纜。



▲ 圖2 光纖結構圖



▲ 圖3 光纖全反射示意圖

光纖運作原理為根據司乃耳定律 (Snell's law) 入射光折射方向改變，且滿足下式：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

n 為介質折射率 θ 為折射角

藉由纖核和纖殼折射率差異，使入射光在纖核和纖殼交界面上不斷進行全反射而前進。

三、光纖光柵基本原理

由幾何線性光學中的繞射 (Diffraction) 原理可知光源入射到一狹縫，會因入射光波長及狹縫寬度在另一端產生不同間距的明暗繞射條紋，該明暗繞射條紋會以貝色函數 (Bessel function) 的分佈呈現。若將單狹縫擴展成週



期性狹縫，則可以獲得疊加效果，此一週期性狹縫結構即為光柵（Grating）結構。

當紫外光透過相位光罩（phase mask）曝照於光纖上，使光纖核心的折射率產生週期性變化，此即為光纖光柵（FBG, Fiber Bragg Grating），光纖光柵頻譜如下圖，當光纖光柵受應力拉伸時，所反射的波形會往長波長平移，反之受壓縮則往短波長平移，光纖光

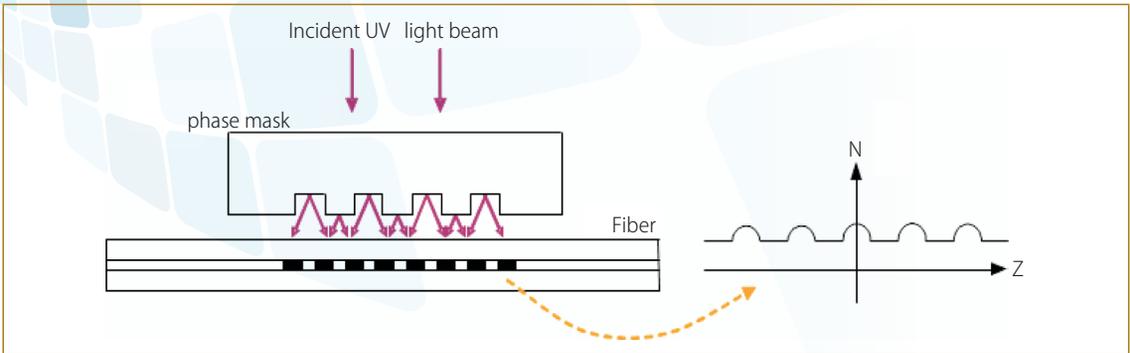
柵會同時受外部應力及溫度影響，波長飄移如下式：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \kappa_\epsilon \epsilon + \kappa_T \Delta T$$

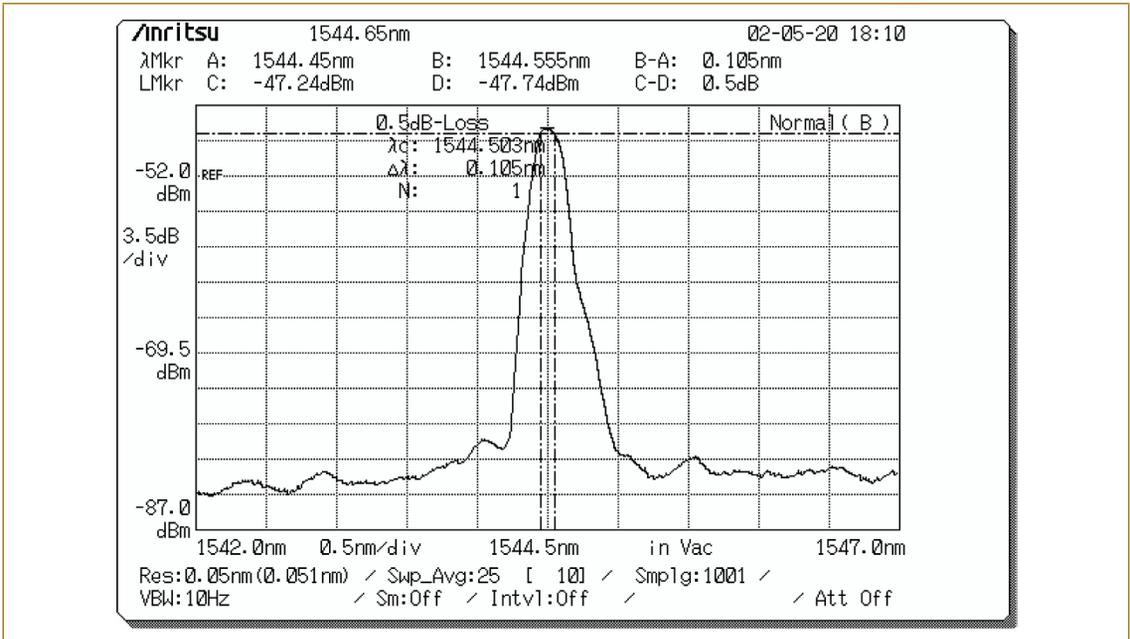
where $\kappa_\epsilon \approx 0.80$ and $\kappa_T \approx 5.88 \times 10^{-6}$ (1/K)

$$\Rightarrow \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.80\epsilon + 5.88 \times 10^{-6} \Delta T$$

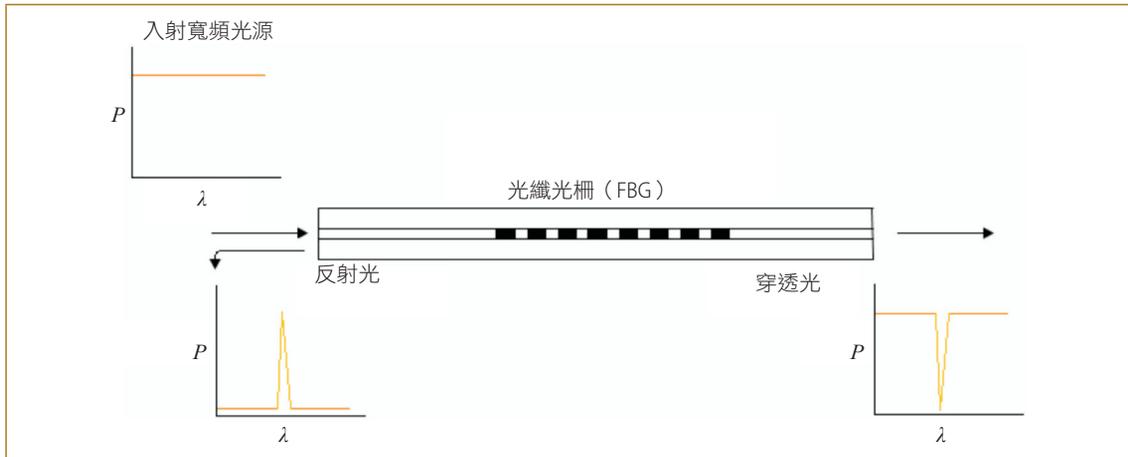
$$\Rightarrow 1\text{pm} \approx 0.8\mu \text{ strain} \approx 0.1^\circ\text{C}$$



▲ 圖4 光纖光柵曝光示意圖



▲ 圖5 光纖光柵頻譜圖



▲ 圖6 光纖光柵特性示意圖

故應力量測須使用光纖溫度計或另一不受應力之對照組作溫度補償，使獲得較精確之讀值。

四、光纖熔接及接續

一般會使用到光纖接續大多是將裸光纖熔接或是將跳線（Patchcord）對接，熔接是以光纖熔接機（Fusion Splicer）操作，長期接續不建議使用機械接續子（Mechanical Splicer），操作時需特別注意環境及手部清潔，以酒精及無塵紙徹底清潔光纖後才能操作，接頭或切斷面放置於大氣中會沾附灰塵及溼氣，需再次清潔或上保護套。

光纖接頭不怕泡水，但水中的細微顆粒及油垢會在兩接頭對接時，使得兩接續面產生刮痕或破損，造成接續損失（Insertion Loss）增加，所以接頭一旦沾水就需用酒精及超音波震盪，徹底清潔其白色陶瓷頭（ferrule）。

五、光纖感測器的應用

由於國內的天然氣候及地理環境因素，地

震、颱風、土石流等災害頻傳，常導致土木結構物未達設計年限，即需進行修復與補強，不僅不符合工程效益，更對民眾生命財產安全造成危害。

光纖感測技術應用於結構監測領域，在歐美日、中國大陸等早已通過驗證並普遍應用。針對平時結構物使用狀態及突發性災害影響進行即時監測，不僅符合現代科技發展趨勢，並且能避免人工量測所面臨之潛在風險，另外光纖感測器不會因雷擊感電、泡水短路而失效，依長期監測資料所建立之監測資料庫，不但可供管理及設計單位參考應用，所節省之維護費用遠比建構費用來的多更多。

與傳統感測器比較，光纖感測器在國內一部分工程案並無法顯示出優勢，但精度、耐用性及與穩定性，光纖感測器在特殊案例及惡劣環境之下，的確優於傳統感測器，原因在於光纖感測系統可並聯及串連不同感測器，例如應變計、溫度計、傾角計、位移計等等，可共用同一台資料擷取器，所節省的擷取器及線材費用就相當可觀，尤其以下案例更能凸顯其優越



功能：

1. 土石流監測：

光纖感測器適用於長距離傳輸、供電不易之地區，因光纖感測器使用單模光纖（SMF），損耗僅0.2dB/km，山區或野外佈放後，以光纜拉10~50km至可供電之控制室後，再透過網路（ADSL）連至遠端辦公室。

2. 長隧道火災監測：

光纖感測器可大量串接並聯，一台擷取器可串接320個溫度監測點，擴增後最高到1280個監測點，相較於傳統溫度監測系統，大幅減少擷取器及線材之數量。

3. 橋梁震動及橋墩掏空安全監測：

光纖感測器可同時連接應變計、位移計、傾角計、壓力計、溫度計及震動計，無須因雜訊產生而一再歸零校正，防水及防雷擊是最大優勢，大幅降低每年編列之高額維護費用。

4. 油槽沉陷及傾斜監測：

尤其以填海造陸地區之高爆性人工建築，防護區避免電氣及火花，光纖感測器可確保其安全性及穩定性。

5. 高壓變電廠溫度監測：

光纖感測器無電磁效應，不會因外界干擾而失真，即時監測可避免多數爆炸意外。

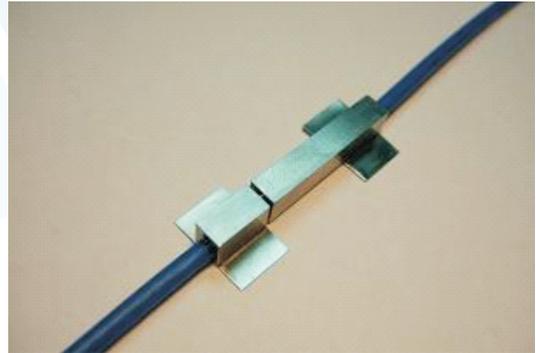
6. 軌道安全監測：

光纖感測器適合長距離量測且無電磁效應之特性，已應用於國內數個軌道監測案，國內尚有許多高風險之路段及高速通車之大眾交通系統仍有待推廣。

六、光纖感測器簡介

1. 光纖點焊式應變計：

小尺寸，高剛性，使用點焊機固定於金屬結構物上，使用方便且牢固，無須擔心膠老化脫落而失效。



2. 光纖細管型應變計：

外徑僅1.6mm，適合內埋於玻璃纖維（FRP）或混凝土材質結構內，而不破壞結構本身強度。



3. 光纖軟管式應變計：

可繞式鐵氟龍軟管可內埋於混凝土或外掛於鋼筋結構物上，方便攜帶及施工，可應用於橋梁建造預力監測及建築物梁柱變形監測。



4. 光纖硬管式應變計：

堅硬的不銹鋼外管可保護感測器不易受外力破壞，適合於外掛結構物使用。



5. 光纖溫度計：

可量測待測物本身溫度或作為溫度補償用途，大量串接成溫度鏈可方便快速佈放。



6. 光纖傾角計：

可串接1~50m連接桿，置放於傾斜管中，可長期並即時監測邊坡或連續壁位移狀況，尤其在有走山及順向坡高風險之區域，降低人工量測之潛在風險。



各式新型光纖感測器將在後續文章中為讀者介紹，敬請期待。

此光纖感測預警系統實為國內創新之整合性多功能監測系統，除了可連結各類FBG光纖感測器之擷取器外，獨創可連接電子式擷取器之軟體介面，避免使用人員操作多系統而產生莫大困擾，更可提供系統設計及資料分析人員資料擷取同步化之數據，降低龐大資料處理時間及人力。期待此預警系統能普遍應用於各公共工程及監測，為美麗寶島的安全盡一份心力。