

光纖光柵信號解調技術與 環境感測應用

The Fiber Bragg Grating Signal Interrogation System and Its Applications

施明昌

Ming-Chang Shih

本文所介紹的光纖光柵波長解調方法是利用兩個光纖光柵，一個作為標準信號參考，另一個作為待測元件，兩個光纖光柵之間因溫度或應力所造成的波長位移差量會使光柵反射信號強度改變，藉由光柵反射信號的強度來判斷待測光柵元件波長的變化，這種方式可以不需要用到昂貴的光譜儀，系統的架構也較簡單，可以達到實用化的低成本考量。此外，本系統另一項創新的特點是利用兩個光纖光柵組成一個環狀摻鉍光纖光放大共振迴路，藉由其中一個光纖光柵因外界環境變化產生波長的位移變化，造成環型光共振迴路的光調置，能夠將光柵的反射信號再放大，可以提高信號訊雜比，而達到瞬時環境變化的監測。本文也將敘述光纖光柵解調系統的介面控制程式發展，以及一些機械振動及環境溫度的監測應用實例。

We demonstrate a fiber sensing system based on a fiber ring resonator in which the Q-factor of the resonator can be modulated by the perturbation of the fiber Bragg grating. It is able to measure real time strain and stress directly by the variation of the intensity of the output or the fiber ring laser due to the modulation of the FBG, and can achieve frequency response as high as 3K Hz.

一、前言

光纖光柵是最近幾年發展最為迅速的光纖被動元件之一。自從 1978 年 K. O. Hill 等人首先在摻鉍光纖中採用駐波寫入法，完成世界上第一只光纖光柵以來⁽¹⁾，日本、美國、加拿大及歐洲各國等即積極投入光纖光柵元件的製作研發以及相關的應用研究，利用曝光的方法使光纖纖心的折射率沿著光纖縱向呈週期分布，這種光纖光柵結構使得光纖纖心內形成一個窄帶的濾波反射器，當它受到溫度及

應力影響時，其中心波長的飄移呈現線性變化，這種線性變化 ($1 \text{ nm}/100 \text{ }^\circ\text{C}$, $1.2 \text{ nm}/1000 \text{ } \mu\text{E}$)，為應力、應變與溫度等諸多參數檢測提供了一個很好的探測工具⁽²⁻⁷⁾，因此光纖感測技術很適合於遠距惡劣環境之溫度或壓力的感測應用。

光纖感測對於國內中小型企業來說是一項很值得投入的產業，需要政府及產業相關單位共同推展光纖感測這塊市場，除了如儲油槽、輸油管、堤防、水壩與隧道等用途的特殊功能光纖光柵感測技術外，未來光纖感測會更深入往小型家庭或社區的

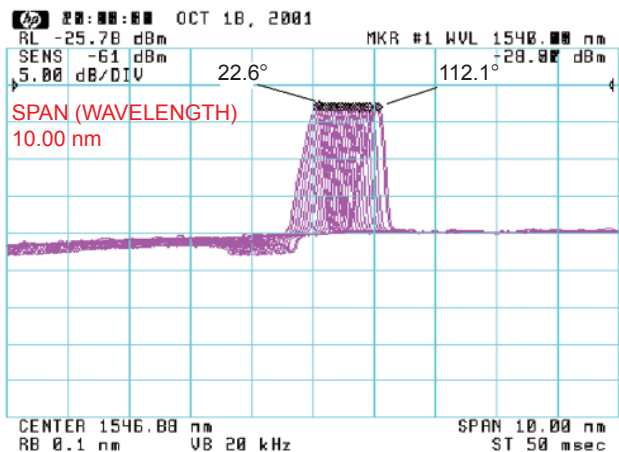


圖 1. 傳統光纖光柵信號解調利用光譜儀得到波長位移的量測再推算光柵溫度的變化。

防盜及水電安全警報系統的產品市場發展，目前光纖光柵感測的主要市場以公共環境監測及防災預警系統為主，國內在光纖及通訊技術方面已經有一些基礎，國內的優勢是產品成本競爭力，而光纖光柵信號解調模組技術的主要市場瓶頸是光纖系統整合能力，能掌握光纖感測系統的維修與更新產品的能力，光纖光柵信號解調模組是整個光纖感測系統的關鍵性技術，國內除了少數幾家有自己發展之外，大部分是靠國外的技術與產品，而國外產品價格昂

貴，不適合普及與實用，所以如果我們能建立自有的產品與研發能力，發展出更具競爭力的產品，以國內在光纖產業的基礎，相信可以有很大的機會。

光纖光柵信號解調技術可以應用於公共建築物，如橋樑、大樓、堤防、隧道、鐵路、儲油槽與輸油管等設施的安全監測，也可以應用於其他與民生有關之環境監控，如地震、火災與土石流等天然災害的警報，小到一般家庭的防盜及水電安全警報系統，應用層面涵蓋廣，不需要大的投資成本，產品的系統整合加值性高，很適合中小企業的發展項目。

二、光纖光柵信號解調系統

本文中將介紹一種低成本實用型光纖光柵感測模組相關技術整合，包括一種單模光纖高壓載氣的處理得到較穩定的光纖光柵特性，如圖 1 所示傳統光纖光柵信號的解調是採用光譜儀來得到光纖光柵波長位移的量然後再推算光柵溫度（應變）變化量，這種方式費時，不容易達到高頻的量測，且其成本較高，系統體積大，本文將介紹一種雙光柵元件的信號解調系統，能夠有效降低成本，提高其實用性。圖 2 為光纖光柵信號解調模組系統架構

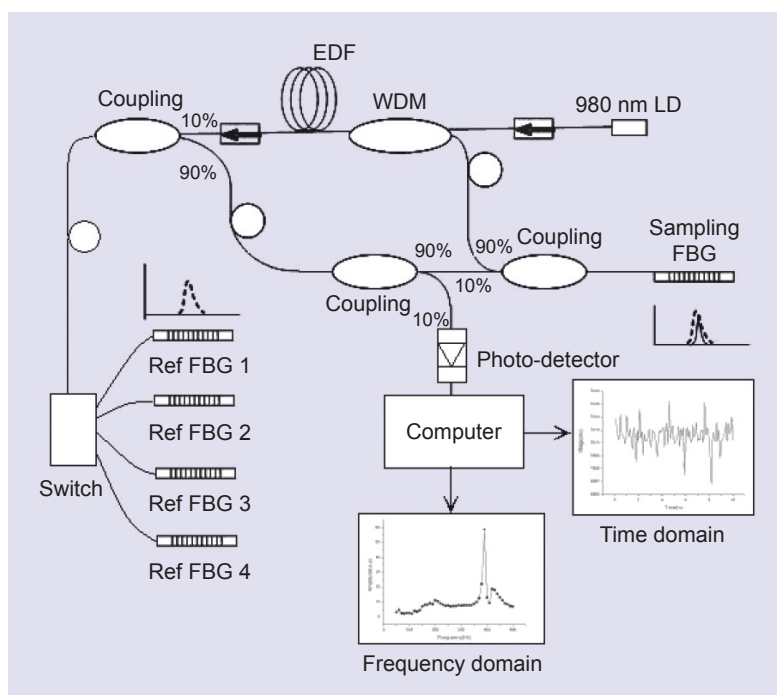


圖 2. 雙光纖光柵感測信號解調系統架構。

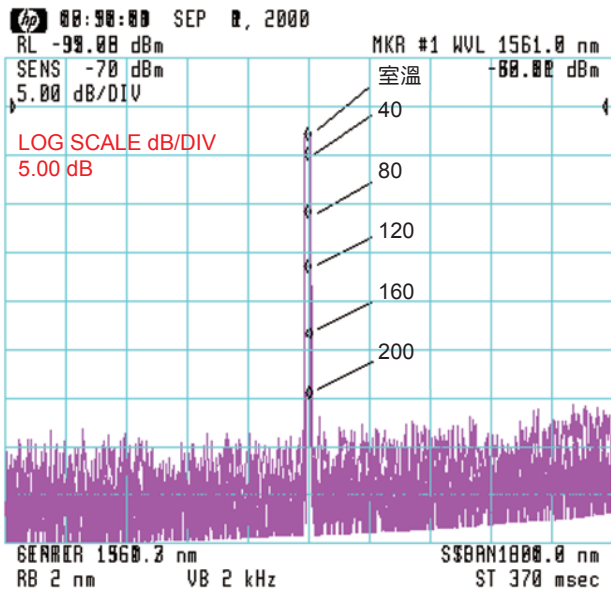


圖 3. 本文採用的光纖光柵信號解調直接由光纖雷射輸出強度變化得到光柵溫度的變化量測。

如下：使用 980 nm 雷射通過摻鉕光纖激發出寬頻的光源，其波長範圍約為 1515 nm 至 1575 nm，利用兩個 λ_B 一樣的光纖光柵，一個作為信號參考，另一個作為待測元件，當兩個光纖光柵之間因溫度或應力差所造成的 λ_B 差量會使反射光信號強度改變如圖 3，再由信號的強度來判斷待測光柵溫度／應力的變化，雖然這種方法的精度沒有前述方法一好，但是這種方式可以不需要用到昂貴的光譜儀，

系統的架構也較簡單，可以達到實用化的低成本考量，信號來回經過兩個光譜性質相似的光纖光柵，再經光纖耦合器組合成一個環狀線路產生一光放大共振迴路，藉由其中一個光纖光柵因外界環境變化產生波長的位移變化，造成環型光共振迴路的光調置，而達到瞬時環境變化的監測，本系統亦可以使用多通道光纖開關控制器，達到多點的信號監測能力。

三、實驗量測結果與分析

1. 光纖光柵的製作

現今製造 FBG (fiber Bragg grating, FBG)，大多是以使用相位光罩 (phase mask) 為主如圖 4，因為 UV 光源一般同調長度很短，利用近場干涉 (near field interference) 的方法，可以方便獲得光柵的干涉效果，此法是利用相位光罩產生的干涉條紋，用接觸曝光的方式在光纖上製作光柵，首次由 K. O. Hill 等人提出。相位光罩是在石英基板上用刻蝕方法製成，刻蝕深度 $d = \lambda/2 (n - 1)$ ，式中 λ 為曝光波長， n 為石英折射率，刻蝕光柵的周期為 Λ_{PM} ，用此光罩作成的光纖光柵的濾波中心波長 $\Lambda = \Lambda_{PM/2}$ 。一般相位光罩，可使每一級繞射光能量達入射光約 40%，而零級繞射光強則小於入射光強的 5%，所以製作光纖光柵時可不考慮零級繞射

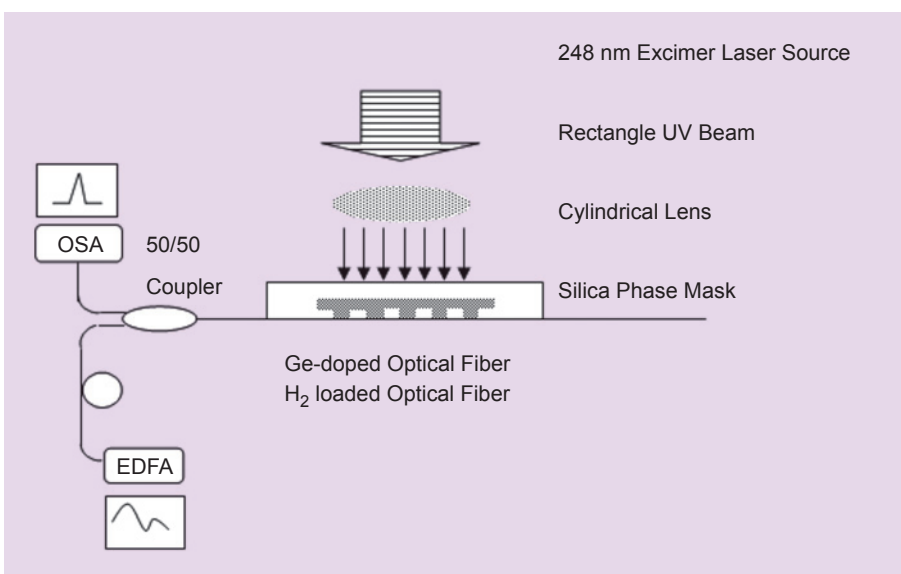


圖 4. 相位光罩光柵曝光。

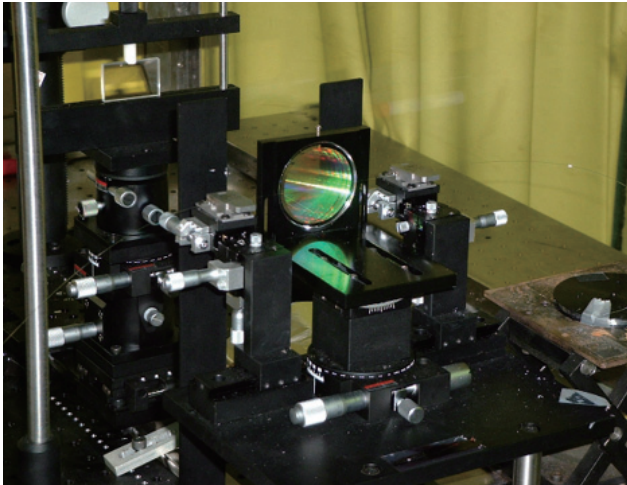


圖 5. 光柵曝光系統架設機構。

光的作用。用相位光罩製作光纖光柵的優點為：簡單，重複性好，良率高；可製作長的光柵 (由光罩有效長度決定)。

圖 5 是光柵曝光系統架設。相差光罩和光纖幾乎接觸，紫外光 (248 nm) 垂直入射於相差光罩，由於相位光罩上光柵的衍射作用產生 +1 和 -1 級兩束衍射光，兩衍射光疊加後在光纖上形成干涉條紋，經一定時間曝光即成光纖光柵，圖 6 為曝光完成的光纖光柵光譜特性，中心波長 1557.14 nm，頻寬 0.2 nm，以及實驗驗證光纖光柵經過多次來回加熱 (25 °C–210 °C) 處理布拉格波長的穩定性。

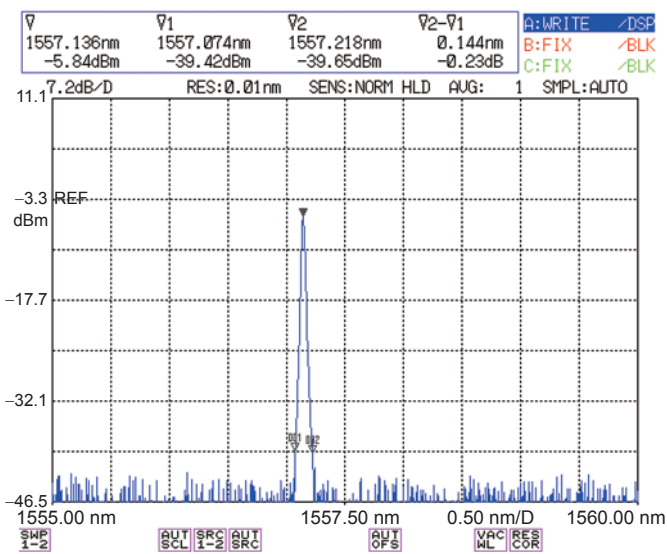


圖 6. 完成之光纖光柵光譜特性及對溫度反應的穩定性。

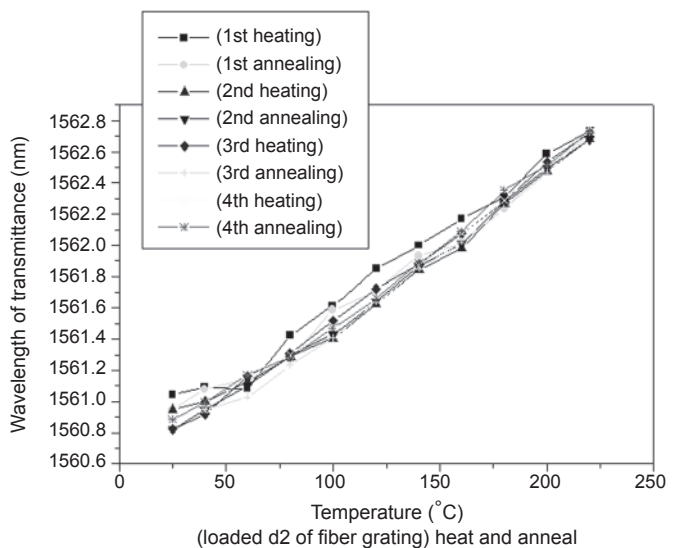
2. 光纖光柵信號解調迴路及資料處理程式發展

整個光纖光柵信號解調系統的信號及介面控制架構如圖 7 所示，可以針對使用者的需求而修改，我們使用 NI 的控制和擷取模組，能夠大幅降低雜訊產生，以增加量測的準確性，並且縮短各模組之間的延遲時間，大致上的設計架構如下：先利用電腦主機端控制 NI 信號擷取，改變光纖通道，並使用標準 RS-232 信號傳輸控制可調光柵模組，來比對感測端光柵所產生之波長位移微小的改變，之後經過光偵測器，再由 NI 信號擷取傳至電腦主機，最後再經由電腦主機透過 LabVIEW 進行介面信號控制及數據分析輸出。

本系統程式控制採用 LabVIEW 軟體，編寫程式控制整體系統如圖 8，使各元件之間的延遲時間能夠精確地掌握並加以執行，提升系統工作的穩定。大致上的架構如下：主要分為四個主要架構迴圈，先利用 switch 迴圈控制 sensor 通道，再經過可調光柵迴圈定位和量測通道之區段和量測波長，並利用光偵測器 PD 迴圈擷取訊號，最後由存檔迴圈將訊號資料儲存。

3. 機械振動量測與分析

本系統提供兩種量測模式，一種是時間掃描 (time domain scan) 如圖 9 所示，掃描速率最高



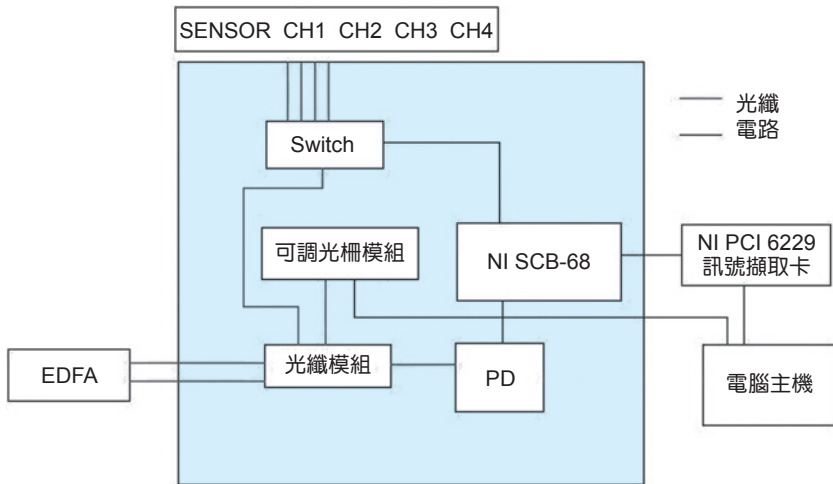


圖 7. 光纖光柵信號解調控制模組架構。

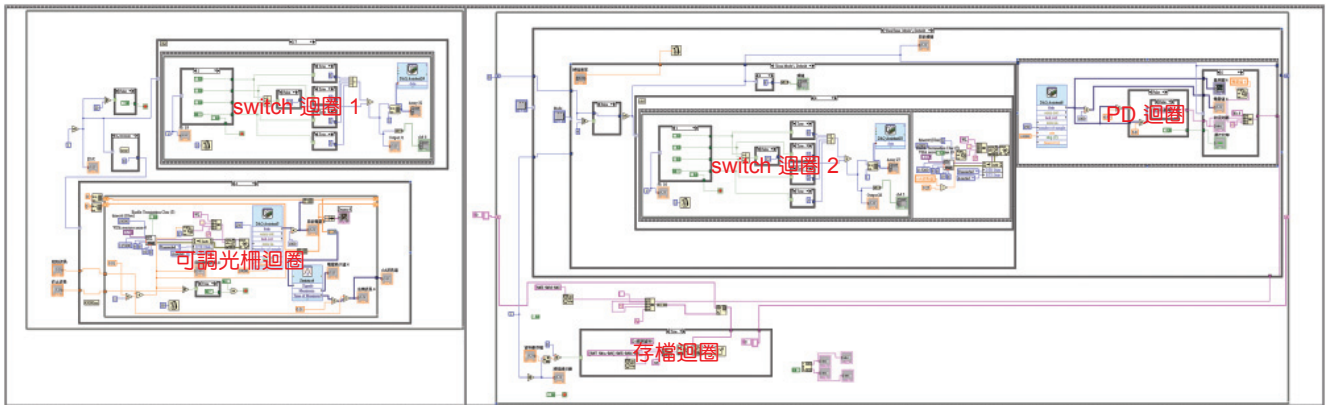


圖 8. LabVIEW 程式架構圖。

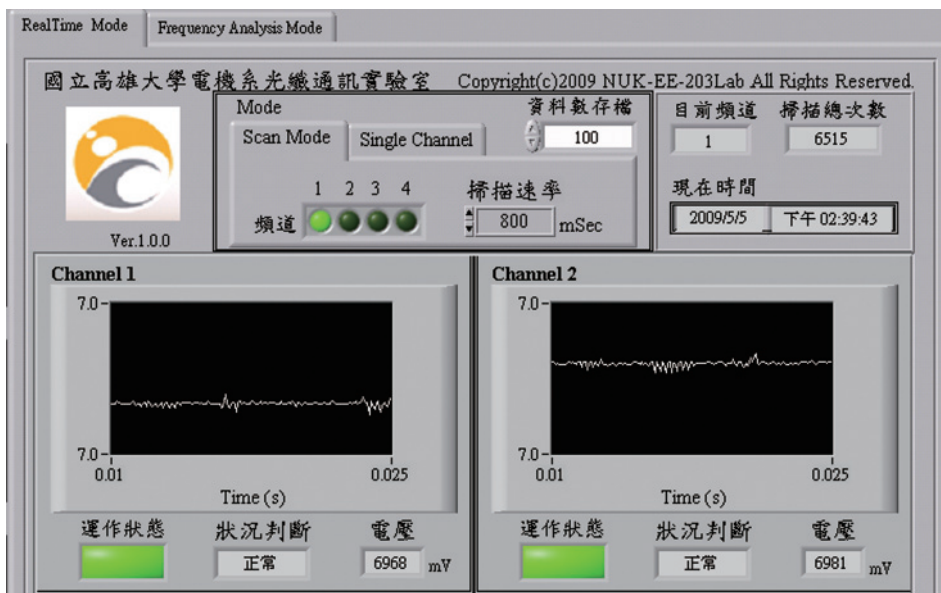


圖 9. 時域掃描。

為 10 msec，並可設定輸出準位，電壓值 VG 以上，運作狀態顯示綠色，狀況判斷為正常。電壓 VR 以下，運作狀態顯示紅色，狀況判斷為異常，亦可作多點的掃描，另一種是頻率掃描模式 (frequency domain scan) 如圖 10 所示，可以針對量測物件的振動模態分析，頻率掃描準確度為 1 Hz。

針對機械振動的量測應用，我們設計一個振動子 (oscillator) 元件如圖 11，將光纖光柵固定於振動子樣品的中央，如圖 12 所示，振動子一端固定於一基座，另一端利用一壓電喇叭產生驅使振動 (driving oscillation)，由光纖光柵解調系統量測振動子在不同驅使頻率的振動模態，圖 13 為一標準 200 Hz 的驅使頻率作用之下，由光纖光柵信號解調

系統所得到振動子的時間掃描結果，可以證實光纖光柵信號解調系統可以達到準確快速的機械振動頻率量測。

我們也進行振動子對不同驅使振動源的頻率響應，如圖 14，記錄振動子在不同驅使頻率作用之下振幅與頻率的關係，可以清楚得知振動子在 390 Hz 有一共振響應，這項結果與數學模擬結果是一致的。

4. 微輻射量及溫度監測

因為光纖光柵質量很小，微小的熱量就可以造成光纖光柵的溫度變化，所以可利用其作為光輻射的感測，圖 15 是用一白光光源照射於光纖光柵上，然後記錄光纖光柵信號解調儀的輸出強度，得到不

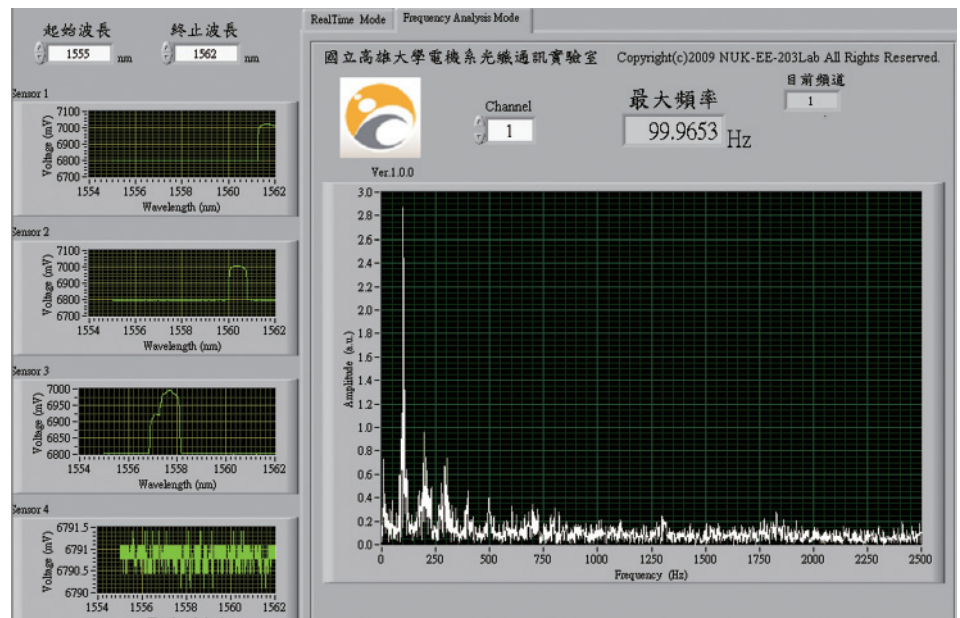


圖 10. 頻率掃描。

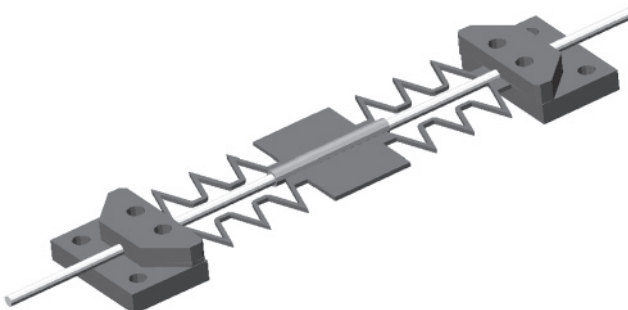


圖 11. 振動子樣品外觀。

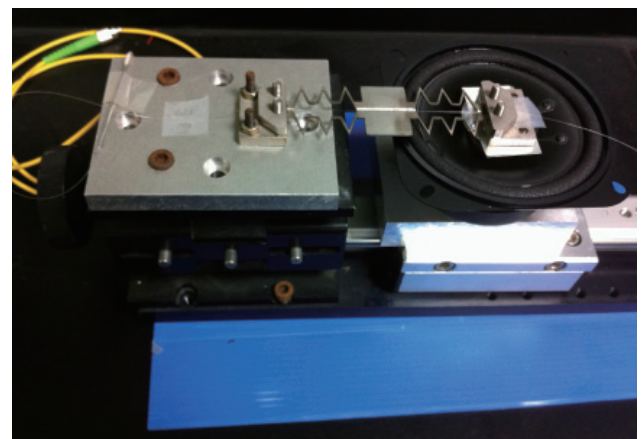


圖 12. 振動子的振動模態量測裝置。

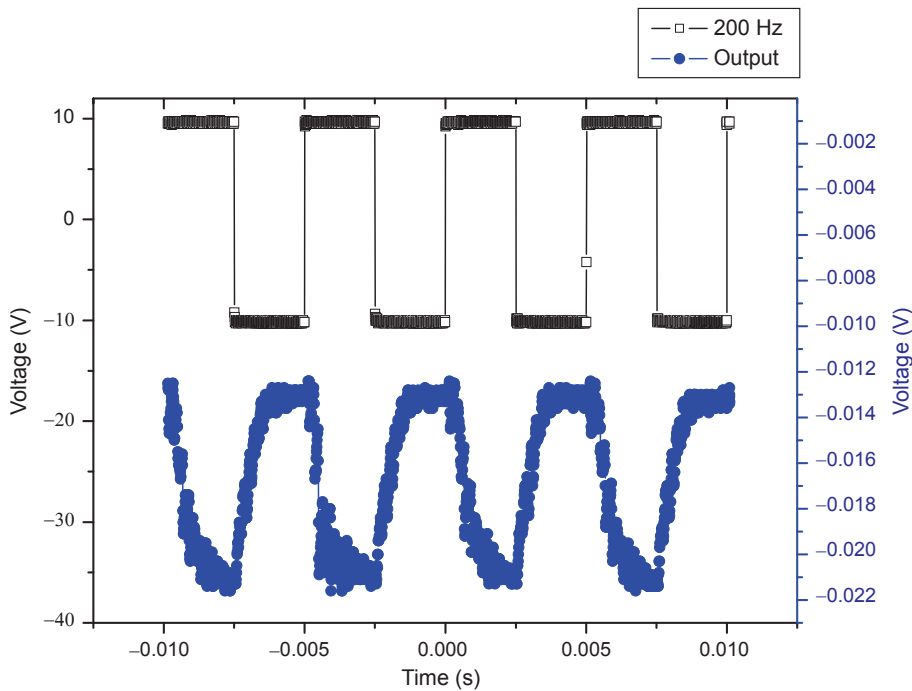


圖 13. 振動子在 200 Hz 驅使振源作用之下，光纖光柵信號解調系統得到的時域掃描結果。

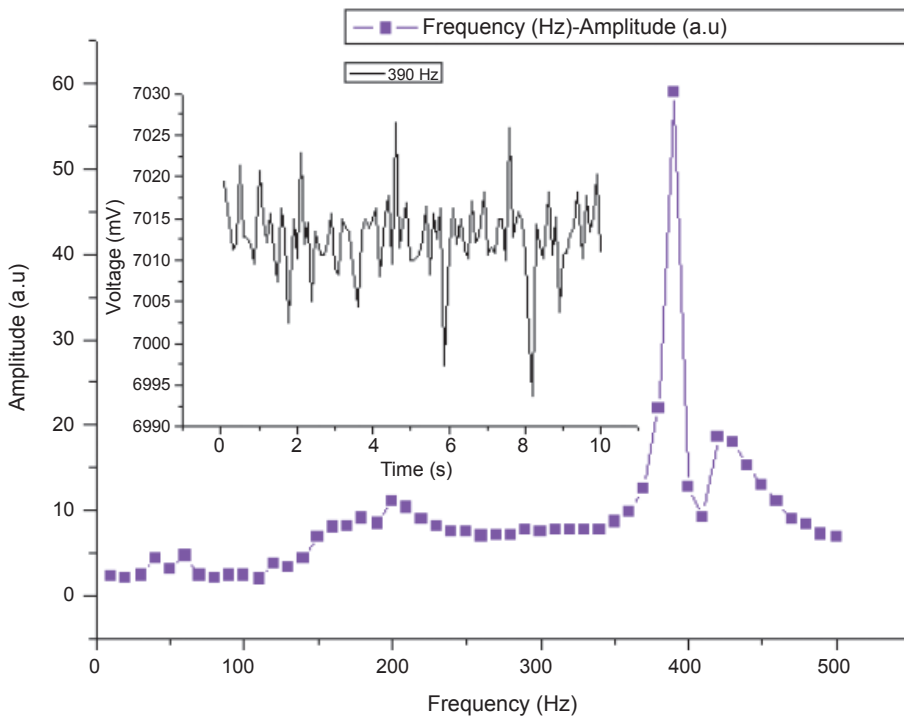


圖 14. 利用光纖光柵信號解調系統所得振動子振動響應曲線。

同照度下之光纖光柵解調儀的輸出作圖，可以得到明顯的光輻射強度與光纖光柵解調儀的信號輸出關係，所以我們可以利用光纖光柵來達到環境光輻射亮的監測，特別是對於大面積的範圍輻射量的監測，更可以強化光纖傳輸低損耗及耐惡劣環境的特點。

5. 荷重量監測

除了溫度與振動的量測之外，光纖光柵也可以應用於物件重量的量測，圖 16 為利用前述之振動子結構，另一端施以一定的重力，使用光纖光柵信號解調儀記錄不同作用力的輸出，可以得到重力與

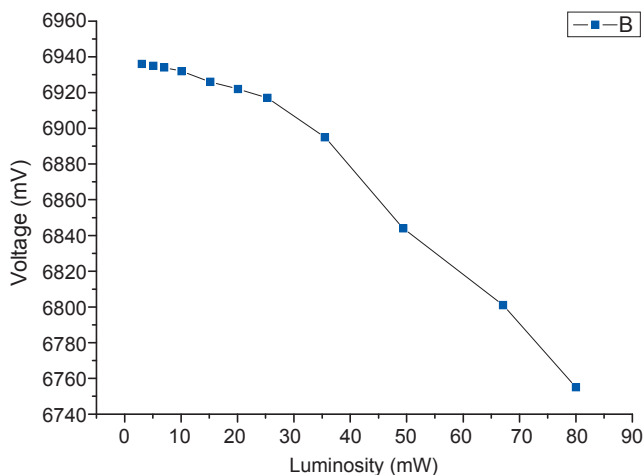


圖 15. 不同光強度之下光纖光柵信號解調儀的輸出關係。

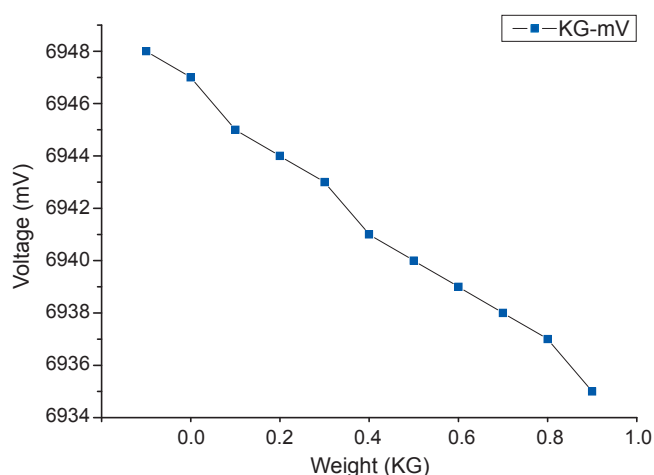


圖 16. 光纖光柵信號解調儀輸出與振動子荷重的關係。

光纖光柵解調儀的信號輸出關係，我們可利用光纖光柵來達到環境重量變化的監測，例如外來物體入侵的安全監控，車量或行人的出入管制等。

四、結論

我國在光電產業有完整的上、中游產業基礎，但在光電檢測技術應用及系統整合上還有很大發展空間，本文中所介紹的光纖光柵信號解調模組屬於光電應用及系統整合層次，光纖光柵信號解調技術可以應用於公共建築物，如橋梁、大樓、堤防、隧道、鐵路、儲油槽與輸油管等設施的安全監測，也可以應用於其他與民生有關之環境監控，如地震、火災與土石流等天然災害的警報，小到一般家庭的防盜及水電安全警報系統，應用層面涵蓋廣，不需要大的投資成本，產品的系統整合加值性高，很適合中小企業的發展項目，有感於目前所使用的光纖光柵感測信號解調儀都是跟國外採購，價格昂貴，採購到交貨所發的時程冗長，且系統故障維修不易等問題，希望透過本文的介紹能提供更多中小企業投入發展相關的光纖感測應用技術，同時也提供對於光纖感測技術有興趣的青年加入，逐漸建立國內的光纖感測研發能力與產業，讓我國的光纖感測產業能有更多的發展機會。

參考文獻

1. K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, and D. C. Johnson, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **23**, 125 (1993).
2. J. Mandal, S. Pal, T. Sun, K. T. V. Grattan, A. T. Augousti, and S. A. Wade, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16**, 218 (2004).
3. W. Jin, Y. Zhou, P. K. C. Chan, and H. G. Xu, *Sens. Actuators A*, **79**, 36 (2000).
4. H. L. Ho, W. Jin, C. C. Chan, Y. Zhou, and X. W. Wang, *Sens. Actuators A*, **96**, 21 (2002).
5. M. C. Shih, C. C. Wang, C. T. Yu, and T. J. Chuang, *Proceedings of SPIE*, **4082**, 144 (2000).
6. M. D. Todd, G. A. Johnson, and C. C. Chang, *Electron. Lett.*, **35** (22), 1970 (1999).
7. R. Measures, *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*, New York: Academic Press (2001).



施明昌先生為美國哥倫比亞大學固態及應用材料科學博士，現任國立高雄大學電機工程學系教授兼創新育成中心主任。

Ming Chang Shih received his Ph.D. in solid state and applied materials from Columbia University, USA. He is currently a professor in the Department of Electrical Engineering at National University of Kaohsiung and the director of Advanced Business Incubation Center at National University of Kaohsiung.