

國立臺灣大學工學院應用力學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Applied Mechanics

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

分佈式布里淵光纖感測技術之動態量測系統建置
Establishing Dynamic Strain Measurement System of
Distributed Fiber Brillouin Sensing Technology



徐東陞

Tong-Shen Hsu

指導教授：陳兆勛 博士

Advisor: Chao-Hsun Chen, Ph.D.

中華民國一零一年七月

July, 2012

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

分佈式布里淵光纖感測技術之動態量測系統建置

Establishing Dynamic Strain Measurement System of
Distributed Fiber Brillouin Sensing Technology

本論文係徐東陞君（學號：R99543039）在國立臺灣大學應
用力學研究所完成之碩士學位論文，於民國 101 年 7 月 24 日承
下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

陳兆勳

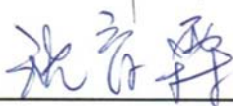


（指導教授）

蔡明義



沈育霖



所 長

張建成



致謝

在這兩年研究過程中，感謝吾師 陳兆勛教授認真指導，使我了解做學問的種種道理與方法。不僅如此，在人生價值觀及健康方面也給予相當多寶貴建議。這些都將是我受用一生的寶物，在此致上我最衷心的感謝。

感謝勞研所 沈育霖博士提供我研究方向與資源，使研究能夠順利進行。再次感謝勞研所 沈育霖博士與長庚大學 蔡明義教授能前來參與口試並對本論文給予指正。

對於父母、姐姐，在此也要謝謝他們，求學路上讓我無後顧之憂。謝謝實驗室夥伴文祥、界甫及忠澤在困難時總是挺身互相幫忙。以及謝謝岑沄，在我猶豫時曾給過我努力目標與人生方向；慧禎，陪著我到處吃吃喝喝，一起變胖；王晴，跟你聊天總是引起我的興趣，太開心。在此感謝所有幫助我、照顧我的人。



摘要

現代建築與結構的規模及複雜度越來越高，若是部分結構發生動態負載或應力集中產生破壞，位置及損害程度就需要感測器來監控，因此如何監測、掌握整體結構安全，為一重要課題。近年來有許多光纖感測技術應用於橋梁及公共建設的安全監控，但通常為單一功能。而本實驗室的光纖感測技術即是以分佈式感測作為結構物之神經系統，不僅有分佈式量測功能且擁有可即時顯示之量測動態應變能力，為多功能應變感測器，來監測結構避免損壞而造成災害。

本文利用硬體更換與不同的軟體撰寫方式，使時序產生變化，以加速既有系統之速度，大大減少靜態量測中所花費的時間，不僅節省使用者時間，對於結構物發生損害時，能在更短的時間內及時發現。在對時序有清楚的了解後，建立動態量測系統，取樣速率可達 5 Hz。布里淵訊號強度取樣速率約為 50 Hz。再增加 PXI 模組式介面卡取代傳統的可程式化電源供應器，達到縮小體積及降低成本。未來，在結構安全上的應用價值是可以預期的。

關鍵字：光纖感測、分佈式感測、PXI、靜態量測、動態量測

Abstract

Contemporary architecture has been vastly developing, and the scale and complexity of its structure have expanded exponentially as a result. In the case of partial structure breaking up due to its loading and stress concentration, the monitoring of a sensor is required for the determination of the location and its damage level. How we monitor and handle the general safety of the structure, then, is the main issue. In recent years, many fiber sensing system have been monitoring the safety of bridges and other public constructions. Our lab's fiber sensing system utilizes the property of distributed sensing for establishing the nervous system of structures that instantaneously displays dynamic strain capacity, serving its best to detect structure cracks and avoid accidents.

This study proposes updating hardware and software to enhance the measure time of distributed fiber Brillouin sensing system, shortening the static strain measurement time by multiple times. Not only does it save time for the users, it also enables us to discover sooner once the structure is damaged. We establish the dynamic strain measurement system after having more understanding about timing. The sampling rate reaches 5Hz; the sampling rate of Brillouin signal intensity is approximately 50Hz. Moreover, we use PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) modules to replace conventional programmable power supply, reducing the system volume and cutting down the cost. The applicable value of structure safety of the system is to be expected in the future.

Keywords: fiber sensor, distributed sensing, PXI, static strain measurement, dynamic strain measurement

目錄

第一章 緒論.....	1
1-1 動機與目的.....	1
1-2 文獻回顧.....	1
1-2.1 光纖感測器應用.....	1
1-2.2 單點式光纖感測.....	2
1-2.2.1 SOFO 感測器.....	2
1-2.2.2 光纖光柵感測器(FBG).....	3
1-2.2.3 費布里-佩洛干涉式感測器(EFPIs).....	3
1-2.3 分佈式光纖感測.....	3
1-2.3.1 布里淵光時域反射技術(BOTDR).....	3
1-2.3.2 布里淵相關域感測技術(BOCDA).....	4
1-3 內容大綱.....	5
第二章 光纖感測原理.....	8
2-1 光纖感測技術.....	8
2-2 光纖的散射.....	9
2-3 布里淵散射.....	9
2-4 布里淵相關域感測技術(BOCDA).....	10
2-4.1 系統架構.....	10
2-4.2 基本原理.....	10
2-4.3 定位原理.....	11
2-4.4 空間解析度.....	12
2-4.5 BOCDA 元件.....	12
2-4.5.1 光學被動元件.....	12
2-4.5.2 光學主動元件.....	14

2-4.5.3 電子儀器	15
2-4.6 量測流程	16
第三章 系統增強與實驗結果	29
3-1 系統增強	29
3-1.1 增加 PXI 系統模組	29
3-1.2 Agilent E8267D 向量訊號產生器	29
3-2 實驗結果	30
3-2.1 靜態量測速度之改善成果	30
3-2.2 即時動態量測	31
3-2.2.1 DSF 動態量測	32
3-2.2.2 SMF 動態量測	34
3-2.3 非即時動態量測	34
第四章 結論與未來展望	53
4-1 結論	53
4-2 未來展望	53
參考文獻	55



圖目錄

圖 1.1 SOFO 系統配置[3].....	6
圖 1.2 費布里-佩洛干涉式感測器[7].....	6
圖 1.3 BOTDR 示意圖[8].....	7
圖 1.4 光脈波寬度與布里淵頻寬之關係[9].....	7
圖 2.1 各種散射頻譜圖[11].....	17
圖 2.2 布里淵散射示意圖[12].....	17
圖 2.3 BOCDA 架構.....	18
圖 2.4 單模光纖之布里淵頻譜.....	18
圖 2.5 色散位移光纖之布里淵頻譜.....	19
圖 2.6 泵波與探測波之調變波型與拍頻[14].....	19
圖 2.7 藉由光源調變在特定位置產生激發性布里淵增益示意圖[8].....	20
圖 2.8 不同應變下與布里淵頻率飄移之關係[16].....	20
圖 2.9 不同溫度下與布里淵頻率飄移之關係[16].....	21
圖 2.10 correlation peak 示意圖[2].....	21
圖 2.11 頻率調變之 correlation peak 示意圖[2].....	22
圖 2.12 利用不同調變頻率求得實際位置.....	22
圖 2.13 光隔離器.....	23
圖 2.14 光耦合器.....	23
圖 2.15 光循環器.....	23
圖 2.16 Anritsu MN924A 衰減器.....	24
圖 2.17 衰減器工作原理示意圖.....	24
圖 2.18 手動極化控制器.....	25
圖 2.19 自動極化控制器.....	25
圖 2.20 雷射二極體.....	26

圖 2.21 EDFA 示意圖.....	26
圖 2.22 電光調變器.....	27
圖 2.23 PXI 系統模組.....	27
圖 2.24 BOCDA 量測流程圖.....	28
圖 3.1 傳統(右)與 PXI(左)可程式化電源供應器.....	36
圖 3.2 向量訊號技術方塊圖.....	36
圖 3.3 過去 BOCDA 時序示意圖.....	37
圖 3.4 現在 BOCDA 時序示意圖.....	37
圖 3.5 測試光纖 A.....	38
圖 3.6 測試光纖 I，分佈式量測.....	38
圖 3.7 測試光纖 II，50 點分佈式量測，耗時 1 分 04 秒.....	39
圖 3.8 測試光纖 II，100 點分佈式量測，耗時 2 分 13 秒.....	39
圖 3.9 測試光纖 II，150 點分佈式量測，耗時 3 分 11 秒.....	40
圖 3.10 動態量測之人機介面.....	40
圖 3.11 線性滑車、光學尺與 KA counter.....	41
圖 3.12 小型線性滑車.....	41
圖 3.13 測試光纖 B.....	42
圖 3.14 布里淵頻率飄移與應變關係圖[2]	42
圖 3.15 DSF 0.01 GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.25Hz.....	43
圖 3.16 DSF 0.01 GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.5Hz	43
圖 3.17 DSF 0.01 GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.75Hz.....	44
圖 3.18 DSF 0.01 GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1 Hz.....	44
圖 3.19 DSF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.5 Hz.....	45
圖 3.20 DSF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1 Hz.....	45
圖 3.21 DSF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1.5 Hz.....	46
圖 3.22 DSF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1.75 Hz.....	46

圖 3.23 DSF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 2 Hz.....	47
圖 3.24 DSF 布里淵訊號強度與時間關係圖.....	47
圖 3.25 SMF 0.01 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 0.25Hz.....	48
圖 3.26 SMF 0.01 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 0.5Hz.....	48
圖 3.27 SMF 0.01 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 0.75Hz.....	49
圖 3.28 SMF 0.01 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 1Hz.....	49
圖 3.29 SMF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 0.5Hz.....	50
圖 3.30 SMF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 1Hz.....	50
圖 3.31 SMF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 1.5Hz.....	51
圖 3.32 SMF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 1.75Hz.....	51
圖 3.33 SMF 0.03 GHz 應變解析度之動態量測, 震動頻率 2Hz.....	52
圖 3.34 SMF 布里淵訊號強度與時間關係圖.....	52



第一章 緒論

1-1 動機與目的

建築與結構安全一直是國內長期以來所關注的議題。台灣因為地理位置的緣故，常常飽受天然災害，如地震、梅雨季節、颱風來襲，甚至引發土石流，人為的疏忽、設計不良、過度反覆載重負荷，都會對建築與結構造成損害。若是無法及時提出預警，恐怕對生命財產沒有足夠的保障，因此突顯出監控結構安全的重要性。

以往的監測系統大多使用傳統感測器，如應變規、加速規等單點式感測器。近年來，單點式及分佈式的光纖感測技術已應用在公共建設之中。Hotate 和 Hasegawa[1]於 2000 年提出藉由控制連續波的相關性(correlation)以達到分佈式感測功能，並且擁有高解析度，此技術稱為布里淵光纖分佈感測技術(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis , BOCDA)。

光纖具有低色散、低損失、電磁屏障、耐惡劣環境、可撓性高、原料豐富等優點，因此應用於感測器上有著比傳統感測器更優越的部分。本實驗室沈育霖學長已建置一套布里淵光纖分佈感測系統，並且成功應用於鋼結構負載、管線薄化監測、壓力感應地板[2]。而本文增加 PXI 模組，以縮小系統體積，並改善時序控制，使量測時間縮短，建立可即時顯示之動態量測功能。

1-2 文獻回顧

1-2.1 光纖感測器應用

近幾年國內光纖感測應用越來越普及，美國、日本等先進國家，因航太工業

對光纖感測器需求殷切，且致力於研發，而引領光纖感測器技術的發展，並早在70年代就應用於設計機翼結構，現在在飛行器、渦輪機、撞擊檢測、飛航時線上監測等都可看到光纖感測器。

工業界是感測器的最大用戶，前景無可限量，因此大部分的技術就從航太工業轉移出來，目前應用方面有：土木結構如橋樑及建築結構體安全監測、核電廠排氣管線及儲存物料場、石油開採機具、醫療、帆船船桅、軌道工程及腐蝕感測等。國外曾使用在海上鑽油台之豎管，傳統豎管為鋼製，非常笨重，為節省重量，嘗試研發以高分子複合材料製造，並使用光纖感測器以掌握其應變情形，監測結構的完整性。

由於半導體二極管技術，可將光信號進行光電、電光轉換，所以與電子裝置能輕易的搭配使用，便可達到便利、智慧、多功。目前常用於結構物之光纖感測器有以下幾種：SOFO光纖感測器、費布里佩洛(Fabry-Parot)干涉式感測器、布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Grating)式感測器、布里淵光時域反射感測器(BOTDR)等。

1-2.2 單點式光纖感測

1-2.2.1 SOFO 感測器

SOFO為法文Monitoring of Structures by Optical Fibers之縮寫，由瑞士聯邦理工學院洛桑分校(EPFL)所發展[3-5]，此光纖感測系統包含讀取單元(Reading Unit)、佈設於結構物上之光纖感測器(Optical fiber sensor)及個人電腦等，如圖1.1[3]。SOFO光纖感測系統的量測原理為基於雙麥克生干涉儀採串聯形式，經由耦合器將光入射至第一組以麥克生干涉儀系統架構作為感測的光纖，此組光纖內包含一條量測光纖及一條參考光纖，量測光纖藉由機械式的連結於待測結構物上，使其可隨著結構物而變形，進而量測結構物產生的變化；而參考光纖則不受拘束地安置

於光纖管內，不受結構物變形而改變，僅隨著溫度而變，當待測結構物因外在環境因素產生變形，造成不相同路徑而產生相位差，此相位差訊號再經由耦合器連結後送至資料讀取單元，經擷取單元轉換後得到變形量。

1-2.2.2 光纖光柵感測器(FBG)

含銻量高的光纖對紫外光 (UV) 具有光敏感性，在經過紫外光照射後，折射率會產生變化，光纖光柵是利用這種原理製作而成，如果折射率呈週期性改變的話，就稱為光柵光纖感測器。

1-2.2.3 費布里-佩洛干涉式感測器(EFPIs)

費布里-佩洛干涉式感測器[6]是由一條單模光纖 (輸入/輸出) 及一條單模或多模反射光纖，外覆一個中空矽晶管構成，如圖1.2[7]所示。光源及偵測器由光纖耦合器連接於感測計，兩條光纖較準後套在管中，並於中間存在著一個空腔 (air gap)，稱之為F-P空腔。當空腔長度因感測器受應變而發生改變時，則感測器的輸出反應將因而變化，於是利用F-P的輸出變化，就能校正成為一個應變感測器。

1-2.3 分佈式光纖感測

1-2.3.1 布里淵光時域反射技術(BOTDR)

BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)是利用量測布里淵散射光做依據[8]，布里淵散射在第二章有詳細的介紹。圖 1.3 為 BOTDR 示意圖[8]，用雷射光源射入一道連續光脈波，經過光纖耦合器一分為二，一道為參考光，一道進入感測區產生向後的布里淵散射，將此向後布里淵散射光接至光接收器做偵

測，掃描接收到的散射光局部頻率，得到光纖中對應此頻率的光訊號強度，並藉由入射和散射兩道光回來的時間差來定位，(1.1)式為距離與時間關係式。

$$Z = \frac{cT}{2n} \quad (1.1)$$

Z為光脈波行進距離、c為真空中的光速、T為向後散射光到達光接收器之時間、n為光纖核芯之折射率。於是便可得到分佈式布里淵光譜，從各位置的布里淵光譜，可找到增益最高所對應的頻率，其與入射光頻率差值即為布里淵頻率(ν_B)。當有應變或溫度變化發生在光纖上，會與布里淵頻率呈線性改變，由布里淵頻率的漂移反推即可得到應變或溫度的變化，達到分佈式量測。BOTDR的測試方式必須利用脈衝波來達成，其空間解析度與脈衝波寬度有關，脈衝波寬度越窄空間解析度越高，但當其窄到一定程度時，布里淵頻譜寬度會大幅增加，所以在小於10ns以下的脈衝波，會使得檢出的布里淵光譜變寬而無法準確得到其中心頻率，圖1.4[9]。因此的最大空間解析度約為1公尺。

1-2.3.2 布里淵相關域感測技術(BOCDA)

空間解析度不佳為 BOTDR 應用上缺點之一，只有公尺等級。2000 年，東京大學的 Hotate 和 Hasegawa 教授提出一個分佈式布里淵散射應用量測的新方法 (BOCDA)[1]，其利用兩道同調連續波光源之相關(correlation)特性，來產生極小局部的激發性布里淵增益，並從激發性布里淵增益的中心頻率變化進而得到應變或溫度之分佈資料，並且避免了脈衝波而造成的空間解析度的限制，此技術下空間解析度是決定於聲波衰減時間(acoustic damping time)以內的傳遞距離，聲波的衰減時間為 29ns，速度為 6km/s，因此理論上 BOCDA 最佳空間解析度為 0.175 公厘，但其空間解析度與量測範圍仍有 trade off 關係。本實驗室經過多位學長的建立及改善，目前實際應用中可在 50m 的量測範圍達到 30cm 以下的空間解析度。

1-3 內容大綱

本論文總共分成四個章節，以下將介紹各章節內容概要：

- 第一章 研究動機與目的，光纖感測應用及文獻回顧。
- 第二章 介紹光纖感測技術及光學散射原理，並深入探討 BOCDA 之系統架構、基本原理、定位原理與空間解析度。
- 第三章 增加 PXI 模組，以及經由軟硬體改良時序，使靜態量測所耗時間減少，並建立可即時顯示之動態量測系統。
- 第四章 結論與未來展望。



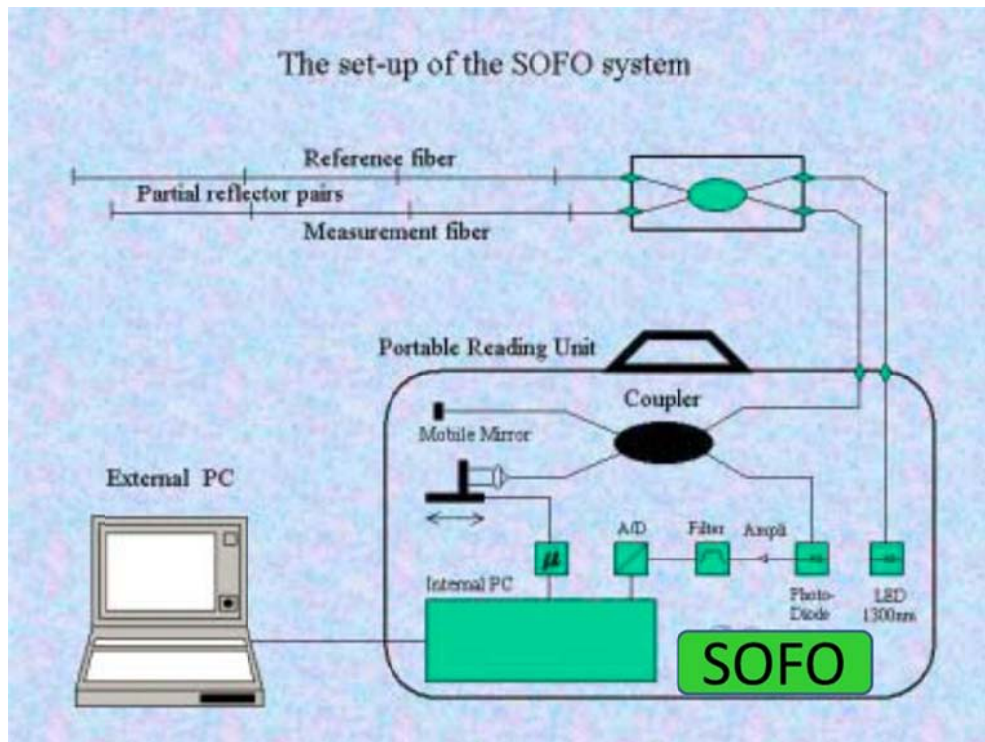


圖 1.1 SOFO 系統配置[3]

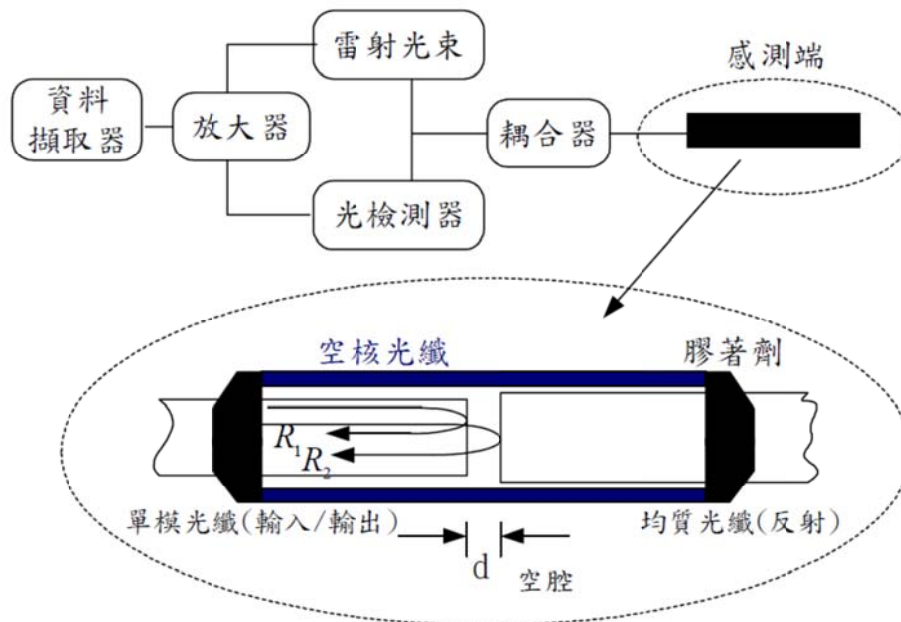


圖 1.2 費布里-佩洛干涉式感測器[7]

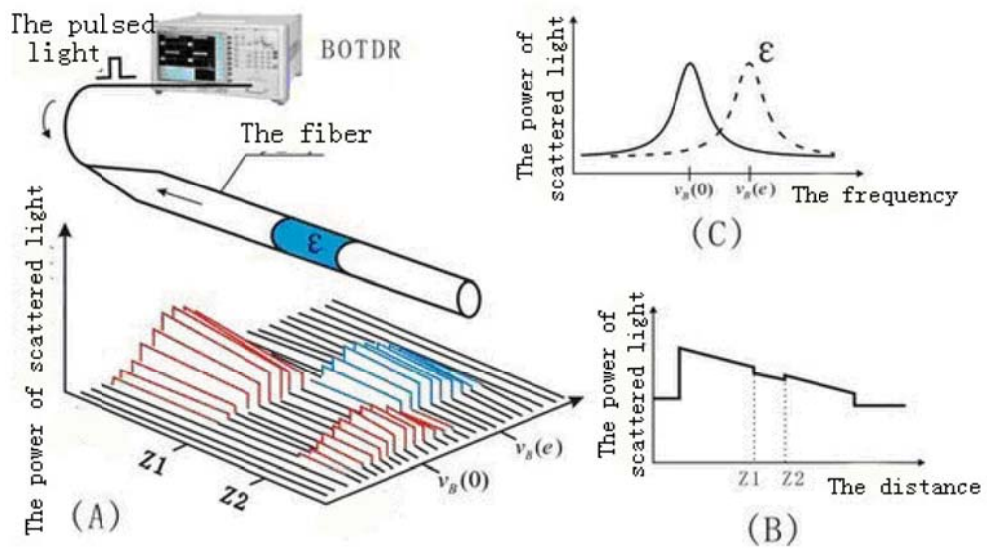


圖 1.3 BOTDR 示意圖[8]

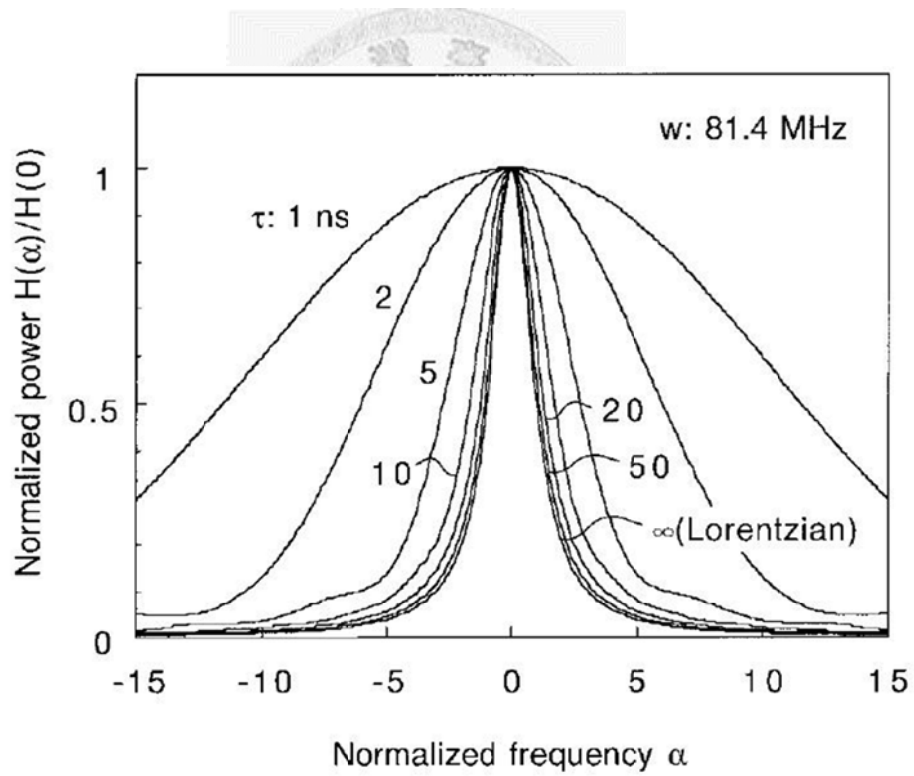


圖 1.4 光脈波寬度與布里淵頻寬之關係[9]

第二章 光纖感測原理

2-1 光纖感測技術[10]

光纖感測的基本原理是利用光纖作為光訊號的傳輸介質，光源所產生的光波經由光纖導引至待測區，待測區中環境的改變將造成光波特性的改變，再藉由分析光波特性改變，即可得到待測物理量之變化。

光纖感測器可分為本質型(Intrinsic)與非本質型(Extrinsic)兩類，如果光波一直沒有離開光纖，而由環境的改變直接造成光纖內光波特性之改變，此類稱為本質型；如果光波離開光纖而被環境調製後再耦合進入原來或另外的光纖，此類就稱為非本質型。一般常用的調變方式可分為：

- (1)光強度(Intensity)調變，利用光強度變化量可以量測待測參數變化量，因兩者之間並不是線性，因此常需要作適當的校正工作，且光源調變的電路必須相當穩定，才可對輸出光源作精密的控制。
- (2)光相位(Phase)調變，將一同調光源同時耦合進入兩條長度相近的光纖中，一條為感測用，另一條為參考用，感測原理是利用干涉，當兩光纖輸出的光波交會時，由於相位差，造成合成波的振幅增加或減少，用此來推算待測物理量之變化。
- (3)光頻率(Frequency)調變，光波進入待測區受外界環境引響，其反射或透光之頻率會有比原入射光的頻率高或低的現象，藉由頻譜分析，即可量測物理量之變化。
- (4)光偏極化(Polarization)調變，當感測光纖受應力或磁場作用，會改變光纖的雙折射係數，使得光纖中光的偏極化狀態產生改變，經由分析即可量測物理量之變化。

2-2 光纖的散射

光在行進過程中，會受到光路徑上的微粒或介質的分子吸收，再往其他方向發射出去，此現象稱為散射，強度和波長的四次方成反比，亦即波長越短的光線越容易被散射。

光纖中的散射現象可分為彈性散射和非彈性散射，彈性散射一般發生於光功率在十毫瓦以下，主要是因為光纖製造過程分子排列不均勻或幾何結構不均勻所造成，又可分為雷利散射(Rayleigh scattering)及梅氏散射(Mie scattering)；而非彈性散射則發生於光功率數十毫瓦以上，主要是入射光子與晶格間碰撞，光子會將部分能量傳給晶格，導致散射光子有部分能量轉移使光子頻率產生變化，又可分為布里淵散射(Brillouin scattering)和拉曼散射(Raman scattering)。

就量子振動的觀點來看，散射現象可視為光子與聲子的互相作用。在兩者互相作用的過程中，光子可能會產生聲子，光子的能量會減少，其頻率也會減少，稱為史托克飄移(Stoke shift)；也有可能光子會吸收聲子，光子的能量會增加，頻率也會增加，稱為反史托克飄移(Anti-Stokes shift)，如圖 2.1[11]。

2-3 布里淵散射

產生布里淵散射的主要原因為當光射入光纖中，造成原子與原子間震動，引起音波(acoustic wave)並因此改變折射率，而形成的一種散射現象，也就是入射光波場與介質內彈性聲波場互相作用的結果。且入射光與音波互相作用時，會有一部分光往後散射(180 度)，因都普勒效應(Doppler effect)，使得散射光會比入射光低一個頻率值，稱為布里淵頻率 ν_B ，此頻率改變量又與音波成正比關係，音波又與應變和溫度有關，一般情況下布里淵頻率約為 11GHz，如圖 2.2[12]。

布里淵散射又可分為自發性(spontaneous)與激發性(stimulated)，自發性布里淵

散射發生在光功率較低的情況，所以觀察十分困難，通常使用的都是功率較高才會出現的激發性布里淵散射，主要是由泵波(pump wave)、探測波(probe wave)及音波(acoustic wave)三者相互作用產生的結果[13]，大部分的入射光都會被轉成反向的散射光。所以泵波和探測波在光纖內以反方向傳輸，再透過電致伸縮效應(electrostriction)激發出音波，此時光的能量由泵波移至探測波，在整個聲光過程中皆保持能量及動量守恆。

2-4 布里淵相關域感測技術(BOCDA)

2-4.1 系統架構

圖 2.3 為本實驗室 BOCDA 系統架構圖，由可調變頻率之雷射光源出發，經過摻鉕光纖放大器(EDFA)，並將光分為 10%與 90%兩道，前者經過調變器、放大器及光循環器後做為泵波；後者經過調變器、極化控制器及光隔離器後做為探測波，探測波通過測式區(Fiber Under Test, FUT)會被光循環器導引到光偵測器來讀取由泵波所得到的能量，此時用不同頻率去掃描探測波，從鎖相放大器可得到布里淵增益頻譜(BGS)，如圖 2.4、2.5 為單模光纖(Single Mode Fiber, SMF)與色散位移光纖(Dispersion Shifted Fiber, DSF)，其最大值對應之頻率即為布里淵頻率。

2-4.2 基本原理

光源的頻率調變可改變泵波與探測波之相關性(correlation peak)，此關係可用在定位，下節將詳細介紹。在 correlation peak 位置上，泵波與探測波頻率差為一特定頻率，此時泵波如同一個單模態光源，產生出強且頻寬窄的布里淵增益給探測波；在非 correlation peak 位置上，泵波如同一個多模態光源，產生的布里淵增益微弱且平坦，故所得之探測波增益遠小於在 correlation peak 位置上，如圖 2.6[14]、

圖 2.7[8]。

由[15]已知布里淵頻率與光纖軸向應變與溫度有以下關係式(2.1)(2.2)：

$$v_B(\varepsilon) = v_B(0)[1 + C_S\varepsilon] \quad (2.1)$$

$$v_B(t) = v_B(t_r)[1 + C_t(t - t_r)] \quad (2.2)$$

其中 ε 為軸向應變、 t_r 為參考溫度、 C_S 與 C_t 為光纖常數，隨光纖種類而變。由此可知布里淵頻率與軸向應變或溫度呈線性關係，圖 2.8[16]、圖 2.9[16]為單模光纖受到不同應變或溫度下的頻率與增益之關係，增益最高點所對應的頻率即為布里淵頻率，藉由判讀布里淵頻率值可推得應變或溫度改變量，達到光纖感測之目的。

2-4.3 定位原理

在測試區中，因泵波與探測波反向傳輸，而產生週期的 correlation peak，如圖 2.10[2]。將雷射光源藉由調變頻率(f_m)的方式，可使 correlation peak 位置移動，由圖 2.11[2]可知當 f_m 調高時，correlation peaks 會往第零個 peak 移動，且只有在 correlation peaks 的位置才有布里淵增益，故只要讓待測區內只存在一個 correlation peak 即可以此 peak 來做定位，再藉由移動該 peak 來達到分佈式量測。

如圖 2.12 在固定 f_m 的情況下，peaks 間的距離(d_m)皆相同， f_m 與 d_m 有以下關係式(2.3)

$$d_m = \frac{v_g}{2f_m} \quad (2.3)$$

可用不同的 peak 來進入測試區來得知實際的空間關係，如圖 2.12。假設調變頻率為 $f_{m(n)}$ 時，第零個 peak 至測試區內第 n 個 peak 的距離為 L ，則可得式(2.4)。

$$L = n \times d_{m(n)} = n \times \frac{v_g}{2f_{m(n)}} \quad (2.4)$$

若調變頻率為 $f_{m(n+1)}$ 時，第零個 peak 至測試區內第 $n+1$ 個 peak 的距離仍為 L ，則可得式(2.5)。

$$L = (n + 1) \times d_{m(n+1)} = (n + 1) \times \frac{v_g}{2f_{m(n+1)}} \quad (2.5)$$

由式(2.4)(2.5)聯立可得

$$n = \frac{f_{m(n)}}{f_{m(n+1)} - f_{m(n)}} \quad (2.6)$$

將式(2.6)代入式(2.4)，即可得知 L。如此一來，即可得知光纖測試區內任何一點的正確位置。

2-4.4 空間解析度

本系統的空間解析度和最大量測範圍有 trade-off 關係。在測試區中，只能存在一個 correlation peak，因此最大量測範圍就等於兩相鄰 peak 間的距離 d_m 。

空間解析度定義為在規則區內所能偵測到的最短不規則區長度，不規則區是指光纖內布里淵飄移頻率發生變化的區域，根據[1]顯示空間解析度有下列關係式

(2.7)

$$\Delta x_r = \frac{\Delta v_B}{f_m} \frac{v_g}{2\pi m f_m} \quad (2.7)$$

其中 v_g 為光在纖核內之速度、 f_m 為調變頻率、 $m f_m$ 為調變深度、 Δv_B 為布里淵頻率之半高寬。

藉由觀察(2.3)(2.7)式可發現當 f_m 調高，最大量測範圍降低，空間解析度變好；反之當 f_m 調低，最大量測範圍提高，空間解析度變差，因此必須依照實際需求來選取適當的 f_m 來做量測。

2-4.5 BOCDA 元件

2-4.5.1 光學被動元件

光學被動元件不需要外加能量即可產生作用的元件，故不牽涉光能與電能轉換，其純粹做對光訊號做各種形式的傳輸(分光、轉向)，本系統所使用之光學被動

元件如下：

1. 光隔離器(isolater)：只允許單方向的光傳輸，如圖 2.13，在欲傳播方向(1→2)的損失極小(<1dB)，而在反方向(2→1)的損失則極大(>50dB)，其工作原理是基於法拉第旋轉的非互易性(non-reciprocal)。本系統以此防止泵波穿越待測區，並定出待測區範圍。
2. 光耦合器(coupler)：用來將一光訊號分成多道光訊號的元件，並依照設計將能量匯集在一起或做適當的分配。本系統中使用的為 T 型耦合器(1 輸入端/2 輸出端)，分離比例為 90：10 將雷射光源分成探測波和泵波，如圖 2.14。
3. 光循環器(circulator)：圖 2.15 為本系統所使用之三端點光循環器及示意圖，在順時針方向(1→2、2→3、3→1)傳播損失極小(<1dB)，而在逆時針方向(3→2、2→1、1→3)傳播損失則極大(>50dB)。主要為了將布里淵增益的訊號導入光偵測器內，因此 port 1 接泵波端，port 2 接待測區，port 3 接光接收器。
4. 衰減器(attenuator)：本系統中，使用可調式光衰減器，主要是用來控制探測波的強度，來達到最理想的布里淵增益頻譜[17]，所用之衰減器為 ANRITSU MN924A，如圖 2.16。其工作原理是利用迴轉機械，由衰減板和連續可變衰減板組合而成，讓光線在對接時，發生一定錯位，使光能量產生損失，而達到控制衰減量的目的，如圖 2.17。
5. 極化控制器(polarization controller)：可分為手動及自動，如圖 2.18、2.19，主要是控制光的極化狀態，可將任意極化態的輸入光轉成指定的極化態輸出，工作原理是利用雙折射效應，將圓形迴圈做旋轉來改變光纖的壓力差，使得光纖的極化態可以在很短的距離內做大幅度的改變。在使用本系統進行量測中，當泵波與探測波有著相同的極化態，在 correlation peak 處可得到顯著的布里淵增益；相反的，如果泵波與探測波的極化態不同，甚至是正交，其在 correlation peak 處所得之布里淵增益會被大幅抑制[18]，使得應變量測產生誤差，因此極化控制器對布里淵增益頻譜有關鍵的影響。

2-4.5.2 光學主動元件

與被動元件相反，需要外加能量才可產生作用的元件，主要的特性是元件本身會自動產生光電轉換效應，因此稱為主動元件。本系統所使用之光學主動元件如下：

1. 雷射二極體(Distributed Feedback Laser Diode)：如圖2.20，本系統使用Optoway DL-5300 series DFB作為光源，其在共振腔內有一周期性的波形波導層，特定波長的光因建設性干涉而增大，其餘波長光將被破壞性干涉給濾掉，其較易作成單頻雷射產生狹小的頻譜，光譜越狹小對量測布里淵增益頻譜越有利。本系統雷射光源操作波長為1550nm，並以雷射二極體控制器將操作溫度及電流控制在25°C、20mA，確保光源處於最佳狀態下作動。
2. 摻鉕光纖放大器(EDFA)：EDFA(erbium-doped fiber amplifier)內部架構如圖2.21，輸入光訊號經由耦合器分為主光源及監控光兩道，主光源經過隔離器會與波長980nm的pump雷射經過波長多工器後進入摻鉕光纖，因摻鉕光纖是在製造光纖時把鉕離子(Er^{3+})加入核心中，當鉕離子受到外加光源激發時，能階會從基態躍遷至激發態，當入射光入射到核心與激發態鉕離子相遇，會使激發態鉕離子返回基態，產生激發性輻射，所以主光源會在摻鉕光纖內被放大，再處理及監控後輸出。
3. 電光調變器(EOM)：EOM(Electro-Optical Modulators)是利用線性電光效應原理來運作，電光效應是藉由外部電場感應，使材料(一般為 LiNbO_3)的折射係數發生改變，折射率與電場關係式為 $n(E) = n_0 + aE + bE^2 \dots$ ，其中 n_0 為無外部電場時的折射率， a 、 b 為電光效應係數，高次項影響很小可忽略，因此稱為線性電光效應，可使反射光的強度產生改變而達到調變其相位或振幅。在本系統中，定位上必須控制correlation的頻率，量測上必須控制布里淵頻率掃頻，不管是定位或量測皆需使用，所用之電光調變器如圖2.22。

4. 法布立-柏若濾波器(Fabry-Perot Filter)：可讓特定波長的光通過，且具有調整的功能，能濾掉欲濾的特定波長光。在量測過程中，泵波的反射光與得到增益的探測波皆會由光循環器傳至光偵測器，而本系統即以此濾波器來濾掉不想接收的泵波反射光。

2-4.5.3 電子儀器

BOCDA 主要電子儀器有雷射驅動器、電源供應器、信號產生器、鎖相放大器及電腦，其中信號產生器、鎖相放大器及電腦已整合至 PXI 機箱內[19]，以下將介紹本系統所使用之 PXI 模組：

1. NI PXI-8106 控制器：圖 2.23，具有 1 組 Intel Core 2 Duo T7400 處理器、最多 1GB DDR RAM、1 組硬碟，與標準 PC 週邊，如 USB 2.0、乙太網路、序列埠，與平行埠。
2. NI PXI-4461：圖 2.23，其為一高準確度資料擷取模組(2 input/2 output)，結合 LabVIEW 鎖相放大器開發套件，可模擬一虛擬鎖相放大器(Lock-In Amplifier)，在量測中為重要儀器，用來偵測非常小的交流訊號，即使雜訊大於訊號數千倍。它主要是利用 PSD(phase sensitive detector)將和參考訊號頻率、相位的訊號鎖住，並過濾其他雜訊。在量測過程中，先將泵波以特定頻率截波，在能量轉移後，探測波內含有做記號的訊號，再經由濾波器將反射泵波過濾掉，最後由鎖相放大器擷取特定頻率的增益訊號做分析。
3. NI PXI-5652：圖 2.23，其為一具有模組化功能的連續波(Continuous-wave)產生器，最高頻率可達 6.6GHz。

2-4.6 量測流程

圖 2.24 為 BOCDA 量測流程圖，步驟介紹如下：

1. 前置作業，將光纖鋪設在待測結構物上或黏著於待測物上。
2. 將光纖接至待測區，一端接至 isolator(probe 端)，另一端接至 circulator(pump 端)。
3. 開啟系統各元件。
4. 調整濾波器至只允許布里淵散射光通過之頻段。
5. 開啟系統主程式。
6. 利用衰減器調整探測波強度至最佳訊雜比。
7. 取待測區內一特定位置，以極化控制器作極化最佳化。
8. 視待測物量測需求輸入適當的布里淵頻譜範圍、量測頻率範圍。
9. 開始量測，其在待測區每一位置做布里淵頻譜掃描。
10. 量測結果輸出。
11. 量測結束。



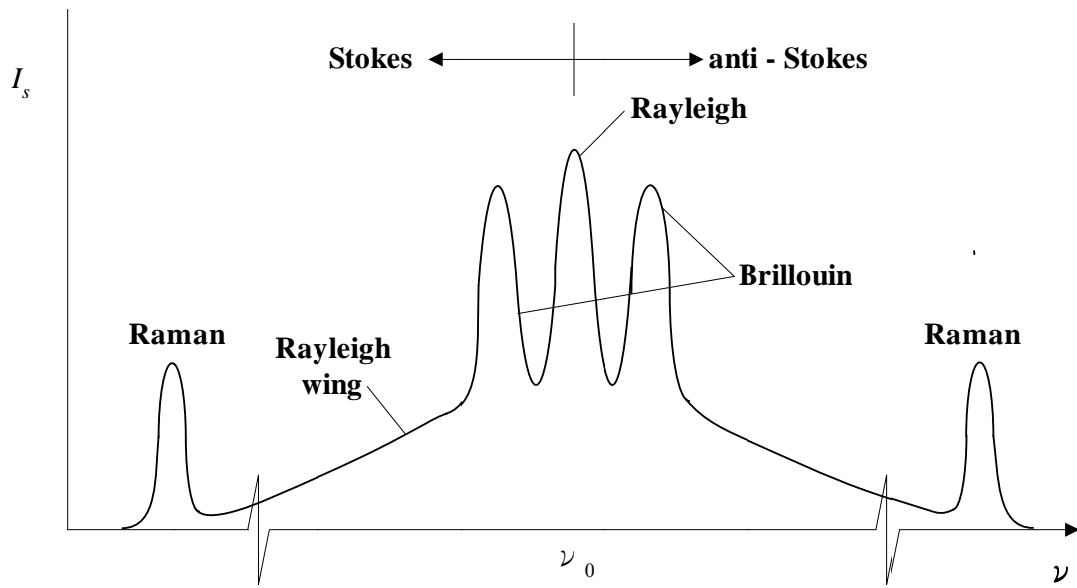


圖 2.1 各種散射頻譜圖[11]

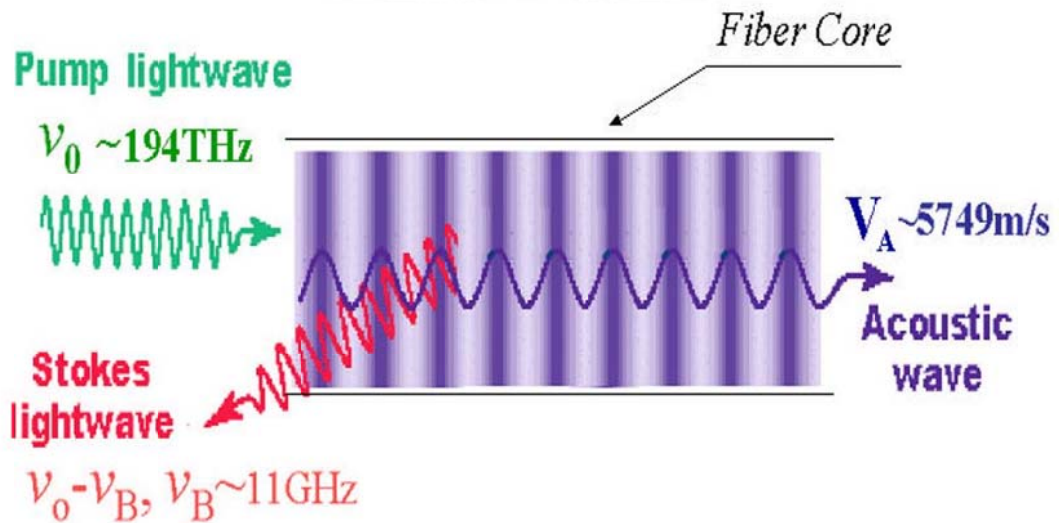


圖 2.2 布里淵散射示意圖[12]

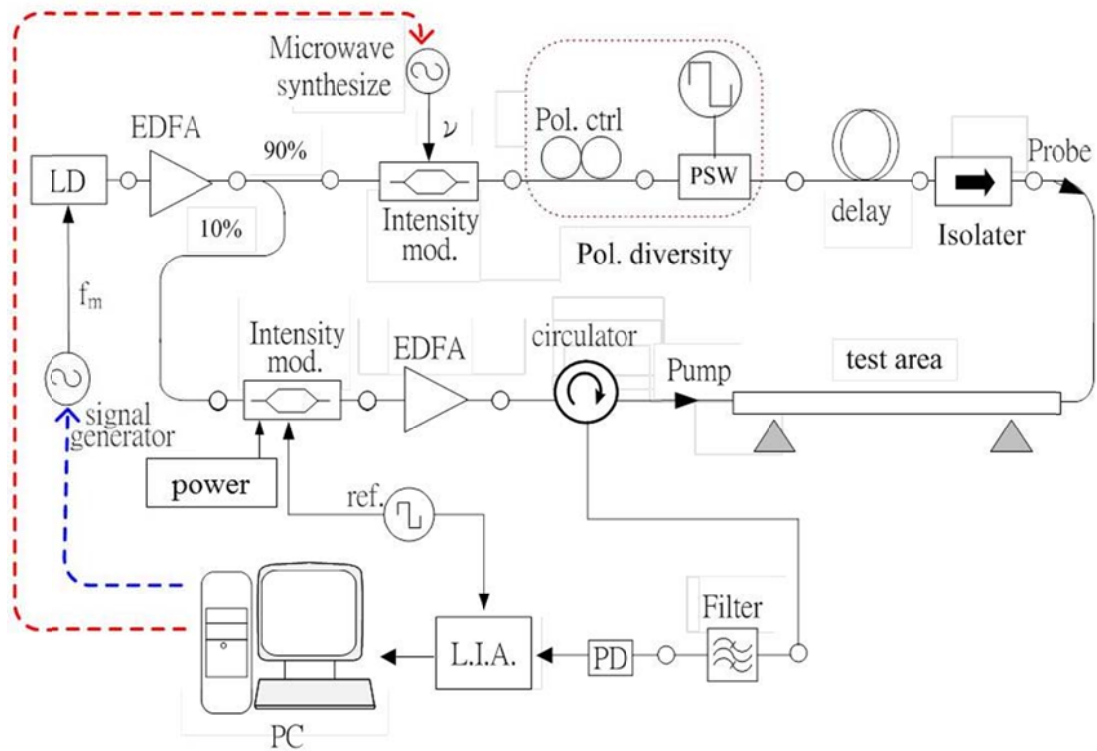


圖 2.3 BOCDA 架構

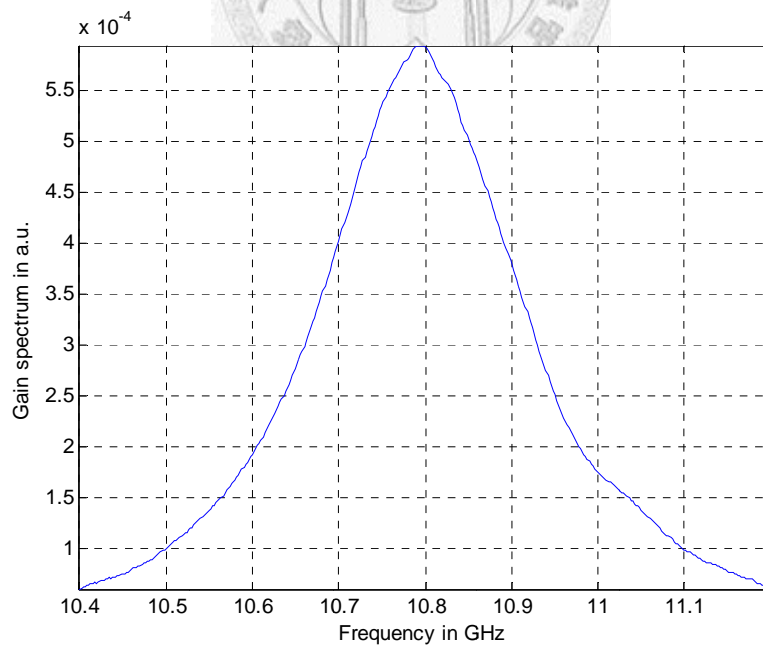


圖 2.4 單模光纖之布里淵頻譜

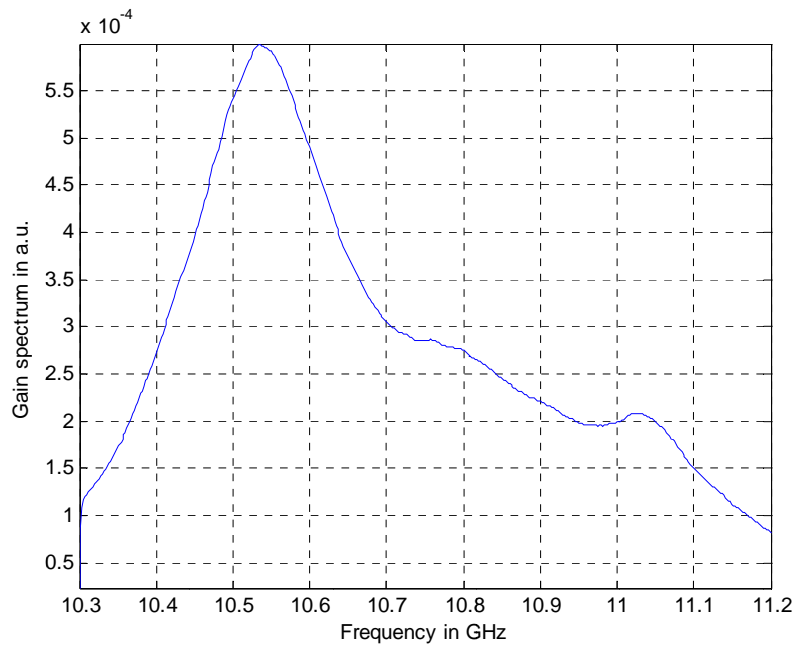


圖 2.5 色散位移光纖之布里淵頻譜

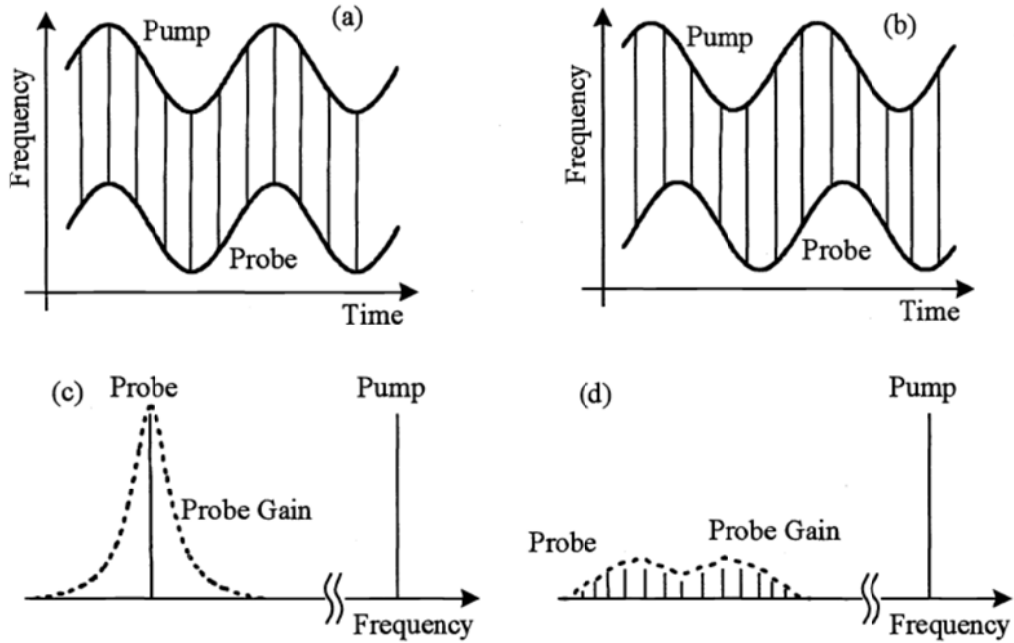


圖 2.6 泵波與探測波之調變波型與拍頻[14]

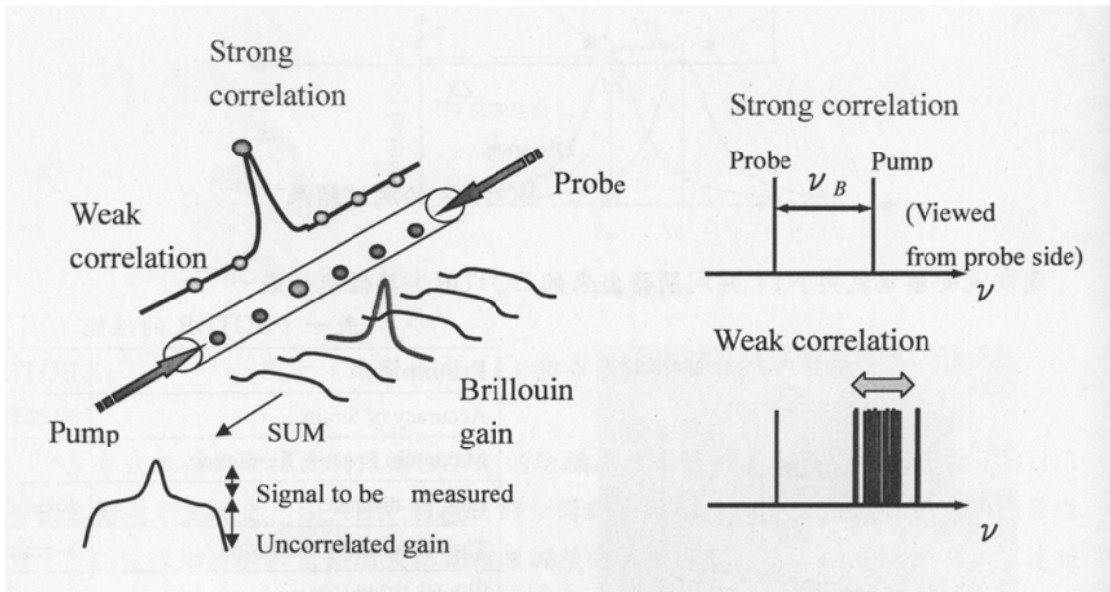


圖 2.7 藉由光源調變在特定位置產生激發性布里淵增益示意圖[8]

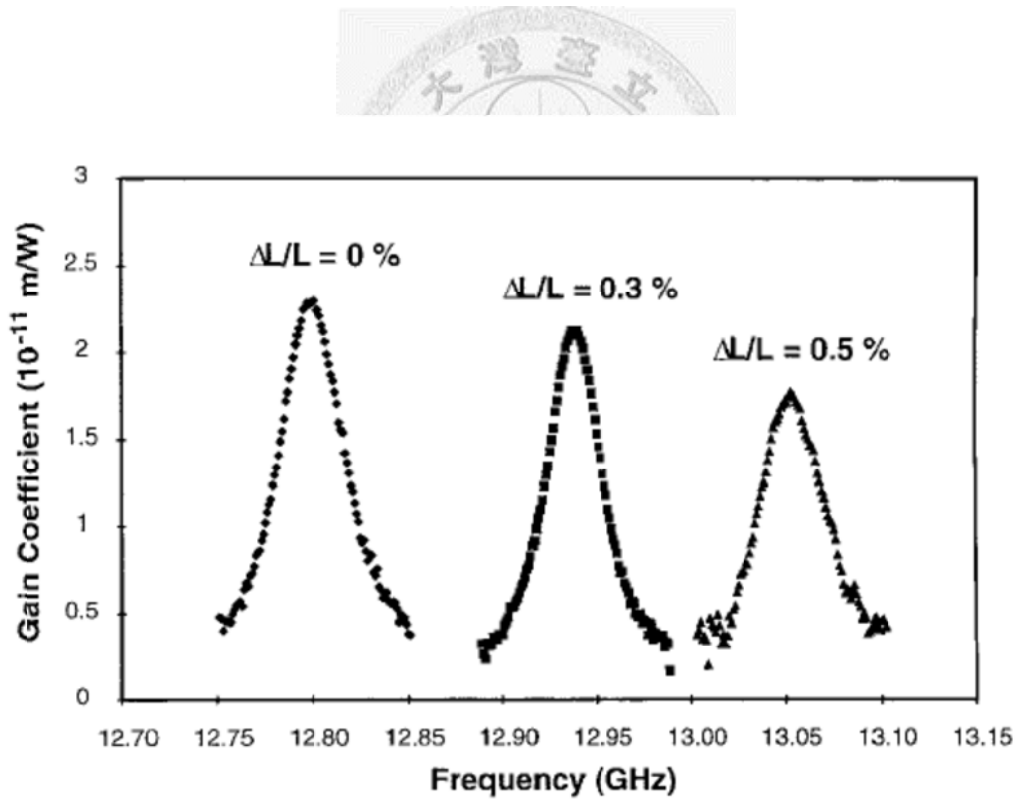


圖 2.8 不同應變下與布里淵頻率飄移之關係[16]

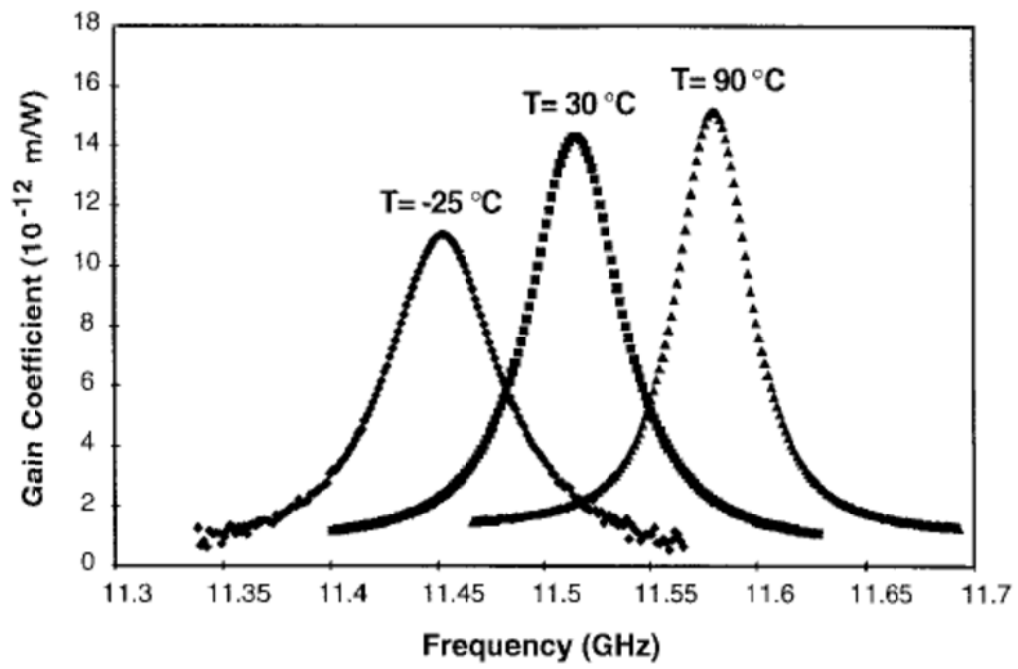


圖 2.9 不同溫度下與布里淵頻率飄移之關係[16]

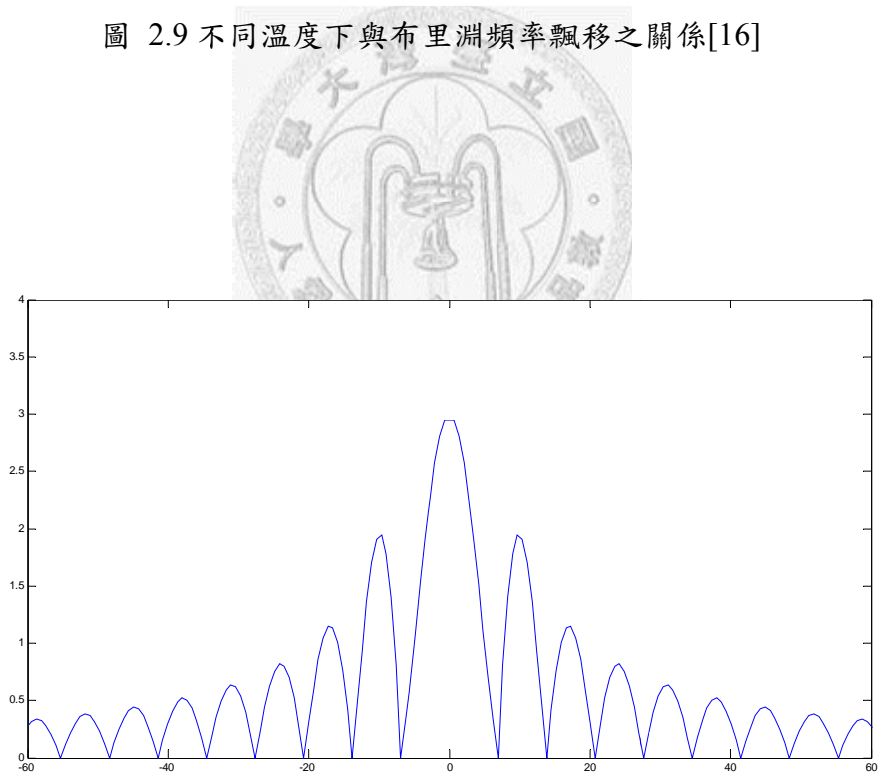


圖 2.10 correlation peak 示意圖[2]

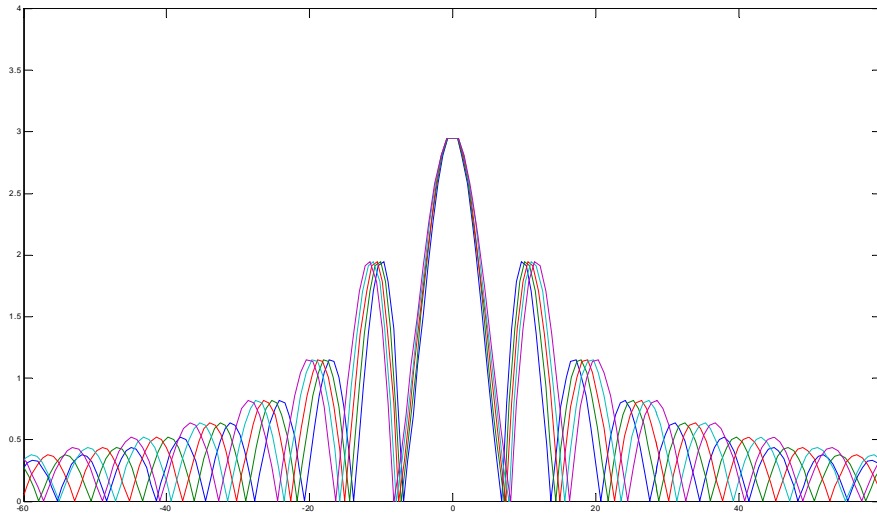


圖 2.11 頻率調變之 correlation peak 示意圖[2]

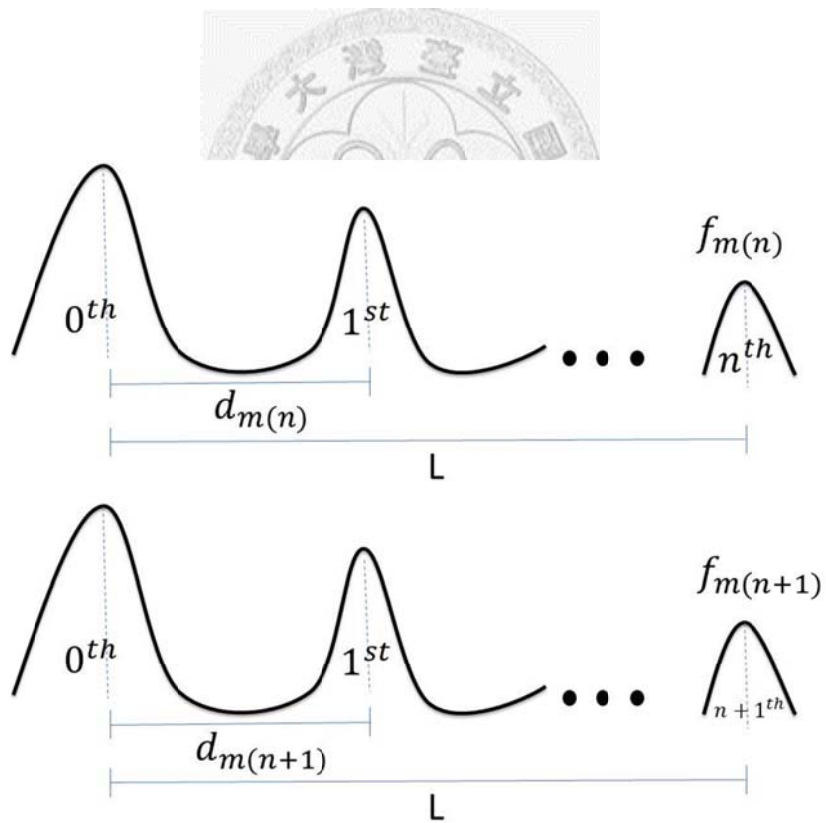


圖 2.12 利用不同調變頻率求得實際位置

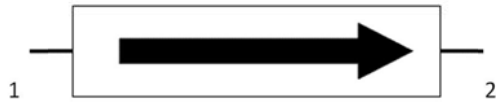
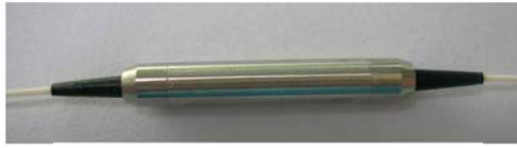


圖 2.13 光隔離器

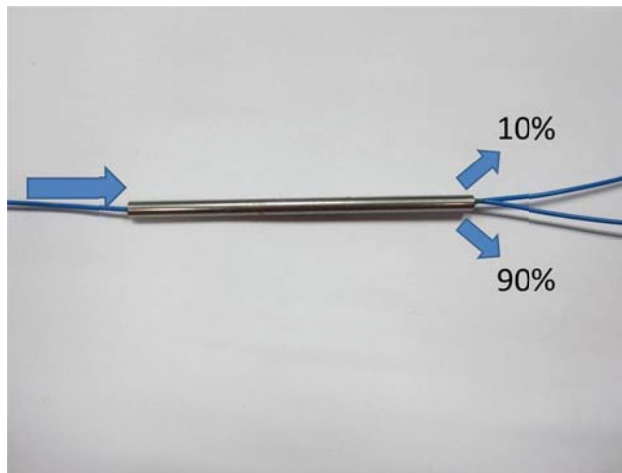


圖 2.14 光耦合器

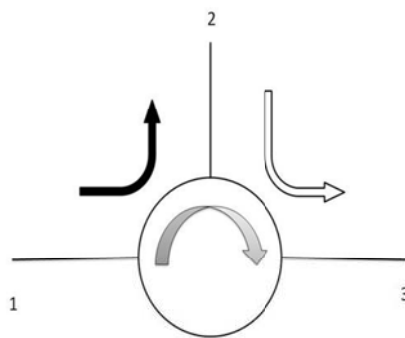


圖 2.15 光循環器



圖 2.16 Anritsu MN924A 衰減器

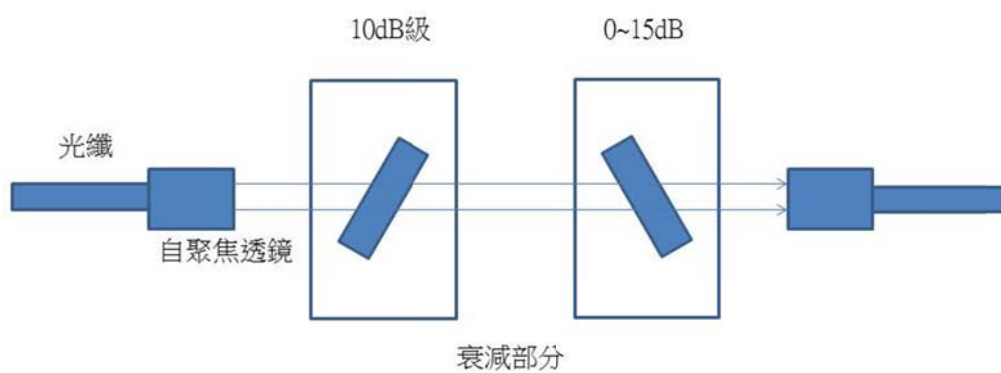


圖 2.17 衰減器工作原理示意圖

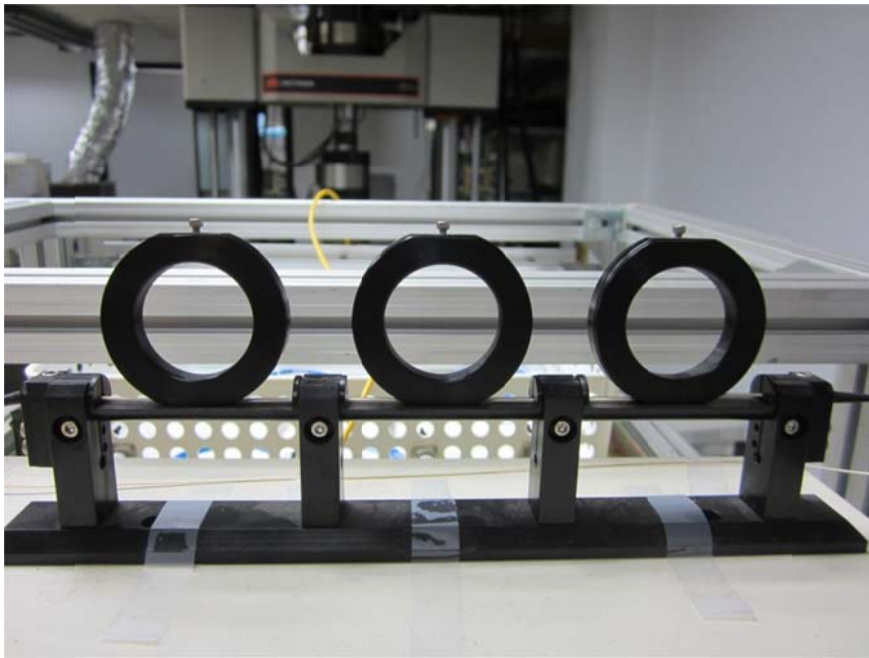


圖 2.18 手動極化控制器

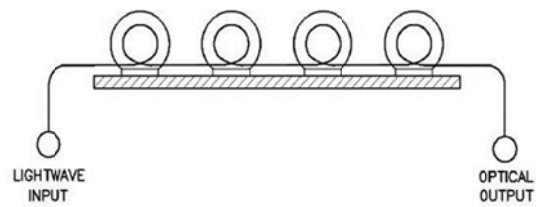


圖 2.19 自動極化控制器



圖 2.20 雷射二極體

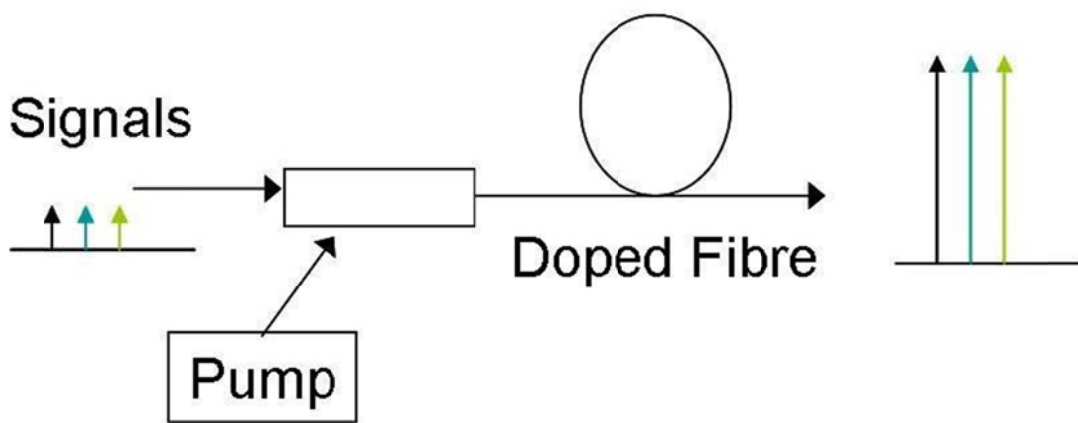


圖 2.21 EDFA 示意圖



圖 2.22 電光調變器



NI PXI-8106



NI PXI-4461



NI PXI-5652

圖 2.23 PXI 系統模組

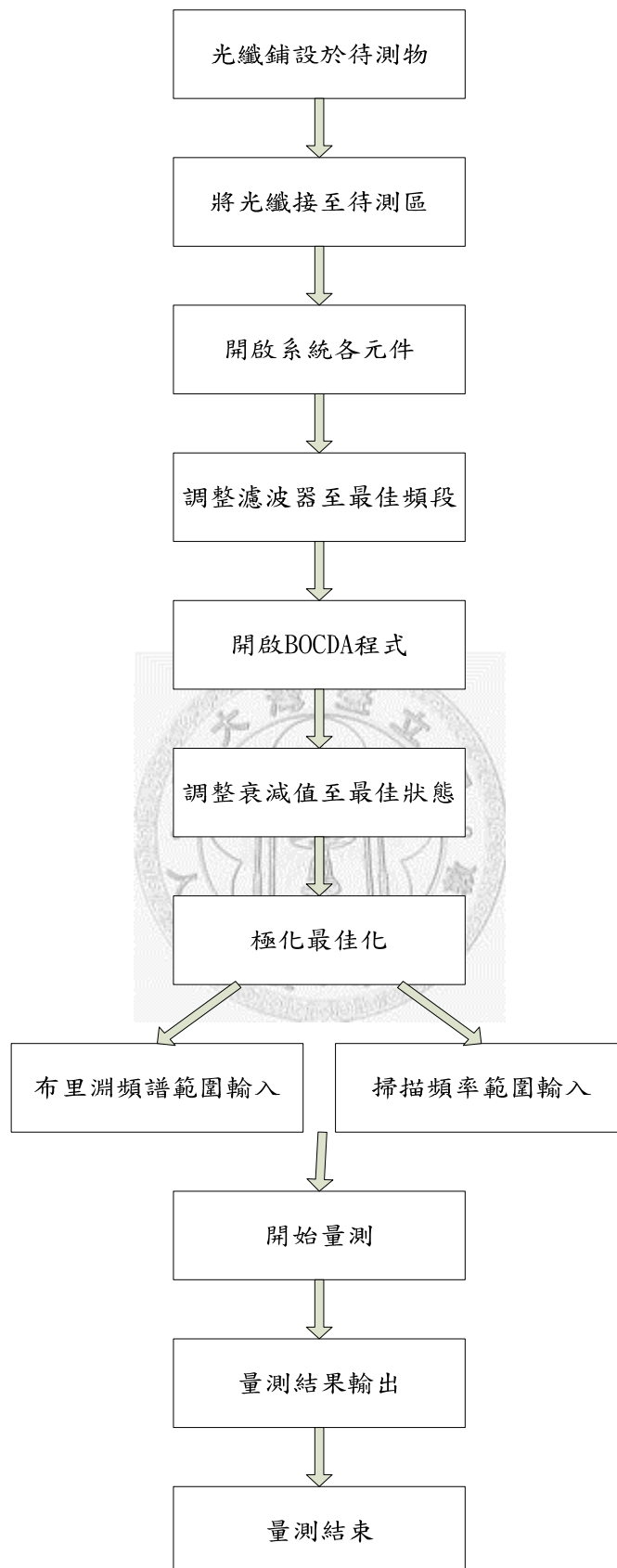


圖 2.24 BOCDA 量測流程圖

第三章 系統增強與實驗結果

3-1 系統增強

3-1.1 增加 PXI 系統模組

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation)於 1997 年進行開發，並發表於 1998 年，為開放式的工業級標準，以滿足益形複雜的儀控系統需求，其為 PC 架構的堅固平台，可做為量測與自動化系統。PXI 整合 PCI 高效能匯流排的特色，再加入專業的同步化匯流排與強大功能軟體。PXI 並為兼具高效能與低價位的佈署平台。這些系統應用包含製造測試、軍事/航太、機器監控、汽車，與工業級測試。

在本文中將 NI PXI-4110 模組卡片加入 PXI 系統並以 LabVIEW 控制來取代可程式化之電源供應器(Programmable Power Supply)，使得 BOCDA 系統體積縮小，增加便利性，如圖 3.1。NI PXI-4110 為單槽式 3U PXI 模組，並可程式化 3 組輸出精確之直流電源供應，其中有 2 個隔離通道：1 個通道為 0~20 V，另 1 個通道為 0~-20V，還有 1 個非隔離的 0~6V 電源供應。且具有 16 位元解析度，可針對電壓設定點(Setpoint)與限流(Current limit)，並適於使用電壓與電流的回讀/量測功能。以及有多種供電軌(Supply rail)與高精確度，為絕佳的通用單一象限(Single-quadrant)電源供應。

3-1.2 Agilent E8267D 向量訊號產生器

Agilent E8267D 為目前最先進的微波訊號產生器，提供高達 44 GHz 的 I/Q 調變能力。此外，它還具備+23 dBm 典型輸出功率、高達 20 GHz 的頻寬，以及在 10 GHz 訊號出現 10 kHz 偏移時的-120 dBc/Hz 相位雜訊。除了提供具備高輸出功率和出色相位雜訊的高效能微波訊號源外，其內建的先進寬頻基頻產生器具備彈性的任意波形播放與複雜的即時訊號產生能力。並配備內建的寬頻 I/Q 調變器，可提

供高達 2GHz 的 RF 調變頻寬。圖 3.2 為向量技術方塊圖。

圖 3.3 為過去 BOCDA 時序示意圖，取樣速率是由布里淵掃頻速度、極化開關和 FM 頻率調變所決定，後兩者相加約 200 μ s，而在執行一次長距離或短距離高解析度之靜態量測所需要的時間必超過十分鐘，可知主要受限於訊號產生器的掃頻速度，導致使用者必須花較長時間操作、監控系統，也可能因光極性因時間過長產生改變，由[18]可知，泵波與探測波的極化狀態會影響彼此之間的作用。當泵波與探測波有著相同的極化態，其在 correlation peak 處可得到顯著的布里淵增益；相反的，如果泵波與探測波的極化態不同，甚至是正交，其在 correlation peak 處所得之布里淵增益會被大幅抑制，使得所得信號受雜訊影響，而造成後半量測結果有誤差。由以上原因可推測若將本系統應用在動態量測，其效果非常有限。因此為了加速布里淵頻率之掃描，加入 Agilent E8267D 向量訊號產生器，並修改系統時序如圖 3.4，取樣速率變為由資料傳輸、極化開關和 FM 頻率調變所決定，徹底解決掃頻速度之問題。



3-2 實驗結果

本章節將介紹 BOCDA 系統量測速度之改善成果，先比較現在和過去的靜態量測速度差異。再使用 LabVIEW 軟體建立 BOCDA 即時與非即時動態量測系統，並且對動態量測能力進行測試。

3-2.1 靜態量測速度之改善成果

BOCDA 系統和其他分佈式光纖量測系統之最大優勢是擁有長距離且高解析度的量測能力，在使用高解析度分佈式量測時，可能每一小段距離就必須掃描一次布里淵頻率，掃描越多量測時間會越長，但某些應用中不需要使用到最高解析

度，因此在待測區內就不需要過多的掃描而浪費時間。圖 3.5 測試光纖 I，總長約 1.6 公尺，0.1 公尺接 DSF 光纖，剩下為 SMF 光纖，其中 0.2 公尺發生約 $3000\mu\epsilon$ ，此種應用之量測大約只需掃描五十點左右，解析度約為 3 公分，即可將應變情形正確顯示，如圖 3.6。

如圖 3.5 測試光纖 II，使用 1.6 公尺之 SMF 光纖來說明靜態量測速度之改善成果，比較改善前後所花費的時間長短，舉出三種不同解析度當範例，掃描點數分別為 50、100、150 點。改善前 50 點量測須時 11 分 50 秒，改善後只須 1 分 04 秒，量測結果如圖 3.7；改善前 100 點量測須時 23 分 42 秒，改善後只須 2 分 13 秒，量測結果如圖 3.8；改善前 150 點量測須時 35 分 32 秒，改善後只須 3 分 11 秒，量測結果如圖 3.9。

因此可知改善前後花費時間差別約 11 倍，不僅大大減少量測時間及降低因光極性而產生量測誤差的機率，並且能更早一步在結構發生問題後得到警告。

3-2.2 即時動態量測

本系統即時動態量測軟體開發是使用美商國家儀器股份有限公司所開發之 LabVIEW，量測所使用的人機介面如圖 3.10，上半部為參數設定，包括儀器設定、correlation 頻率、布里淵頻率掃描範圍、peak 數.....等；下半部為動態量測中最重要兩個結果，以圖形顯示，左為時間與布里淵頻率關係圖，右為時間與布里淵增益強度關係圖。

為了測試動態量測是否能做到即時且正確的顯示，使用三峰儀器(Mitutoyo) AT115 光學尺、KA counter 與十公分、一公尺兩台尺寸不同的線性滑車輔助此項實驗，如圖 3.11、3.12。線性滑車一端為固定端，另一端為移動端，並將光學尺安裝在線性滑車，連結至 KA counter，即可偵測及顯示固定端與移動端之間的距離，精確度可達 $10\mu\text{m}$ ，因此再將位移控制桿利用馬達控制，使光纖達到週期性動態應變之效果。圖 3.13 為動態實驗中所用之測試光纖，將兩熱縮套管相距十公分熔接至

光纖上，安裝到線性滑車，即為固定端與移動端。I、色散位移光纖(DSF)；II、單模態光纖(SMF)。

主要測試以下幾個重點：

1. 定位：因熔接技術問題和目前沒有用在範圍極微小之動態感測，所以從實驗中只能確認約 1 公分的定位準確度。依理論上 PXI-5652 訊號產生器產生的頻率精確度以及雷射二極體的光源穩定度，是可完全定位在需量測的點上，誤差會在微米以下。
2. 布里淵頻率飄移與應變關係：與一般靜態量測時相同，並無誤差，如圖 3.14[2]。
3. 極化狀態：只要在進行量測前先針對該點做極化最佳化，使用至今並無發生泵波與探測波正交而造成難以判斷布里淵頻譜之問題。
4. 扭轉：測試光纖若同時也受到扭轉變形，可使用極化切換器做補償[19]，使量測不受扭轉變形之影響。
5. 穩定性：在連續執行五個小時不停歇後仍然可以正確無誤的做到即時動態感測，若無外在因素、儀器故障與電腦當機等情形，相信可做到長期且持續性之監測。
6. 布里淵增益值：因光極性會隨時間與空間變動而使布里淵增益值也會變動，如果要使用布里淵增益強度推斷布里淵頻率之方法時會有誤差，時間越長誤差會越大，下節會再做說明。

3-2.2.1 DSF 動態量測

針對色散位移光纖做動態測試，布里淵掃頻區域固定設定為 10.5 GHz – 10.8 GHz，所對應之應變範圍 $0\mu\epsilon - 5500\mu\epsilon$ ，再將其分為兩種設定方式，第一種應變解析度 0.01GHz($200\mu\epsilon$)，對應變大小判定較精準，但量測所耗時間較長；第二種應變解析度 0.03GHz($600\mu\epsilon$)，對應變大小判定較不精準，但量測所耗時間較短。以

下為利用各種不同頻率之震動所量測到的結果：

一. 應變解析度 0.01GHz：

- (1) 震動頻率 0.25Hz：如圖 3.15
- (2) 震動頻率 0.5Hz：如圖 3.16
- (3) 震動頻率 0.75Hz：如圖 3.17
- (4) 震動頻率 1Hz：如圖 3.18

以正弦波振動方式為基準來討論，由以上結果可知，在此情況下，取樣速率 (sampling rate) 平均為 1.7Hz，當振動頻率 0.25Hz、0.5Hz 時，量測可完整描繪出應變輪廓；當振動頻率 0.75Hz、1Hz 時，所得量測結果沒辦法呈現正確之應變輪廓，而造成失真的發生。

二. 應變解析度 0.03GHz：

- (1) 震動頻率 0.5Hz：如圖 3.19
- (2) 震動頻率 1Hz：如圖 3.20
- (3) 震動頻率 1.5Hz：如圖 3.21
- (4) 震動頻率 1.75Hz：如圖 3.22
- (5) 震動頻率 2Hz：如圖 3.23



為了增加量測速度，因此將應變解析度調低至 0.03GHz，由以上結果可知，在此情況下，取樣速率平均為 4.95Hz，當振動頻率 0.5Hz、1Hz、1.5Hz 時，量測可完整描繪出應變輪廓；1.75Hz 已有可能會有失真發生；2Hz 量測結果則無法描繪正確之應變輪廓。

由[17]提出另一種偵測動態應變方式，藉由布里淵訊號強度推斷布里淵頻率飄移量，當然，此種方法只能得到近似解，原因有以下兩點：在量測過程中布里淵增益值通常很小，若要得到非常準確之布里淵增益與布里淵頻率關係是非常困難；且布里淵增益值並不是能夠在經過一段時間後仍維持一個定值，舉例來說，在固定一個應變狀態下，一開始布里淵增益值和三十分鐘後的可能會不相同。故此種

方式量測的應變關係只能得到近似解。圖 3.24 為在 4.3Hz 振動下所量測之布里淵訊號強度與時間關係圖，取樣速率為 53Hz。

3-2.2.2 SMF 動態量測

針對單模態光纖做動態測試，布里淵掃頻區域固定設定為 10.8GHz – 11.1GHz，所對應之應變範圍 $0\mu\epsilon - 5400\mu\epsilon$ ，分為 0.01GHz($180\mu\epsilon$)和 0.03GHz($540\mu\epsilon$)應變解析度，以下為利用各種不同頻率之震動所量測到的結果：

一. 應變解析度 0.01GHz：

- (1) 震動頻率 0.25Hz：如圖 3.25
- (2) 震動頻率 0.5Hz：如圖 3.26
- (3) 震動頻率 0.75Hz：如圖 3.27
- (4) 震動頻率 1Hz：如圖 3.28

二. 應變解析度 0.03GHz：

- (1) 震動頻率 0.5Hz：如圖 3.29
- (2) 震動頻率 1Hz：如圖 3.30
- (3) 震動頻率 1.5Hz：如圖 3.31
- (4) 震動頻率 1.75Hz：如圖 3.32
- (5) 震動頻率 2Hz：如圖 3.33

SMF 動態量測所得結果和 DSF 差別不大，在應變解析度 0.01GHz，取樣速率平均為 1.73Hz；應變解析度 0.03GHz，取樣速率平均為 5.14Hz。圖 3.34 為在 3.2Hz 振動下所量測之布里淵訊號強度與時間關係圖，取樣速率為 50Hz。

3-2.3 非即時動態量測

在即時動態量測中，布里淵增益值資料傳輸在量測所花時間中佔了 90%以上，

可知目前受限於此使得即時動態量測系統速度無法更進一步，為避免傳輸導致耗時過多，於是使用鎖相放大器內部暫存記憶體(buffer)功能，將增益值資料存於暫存記憶體內，再讀取分析，即可增加動態取樣速率，當然，就無法做到即時顯示。

根據測試結果，單值存入鎖相放大器之暫存記憶體中需 10msec，和即時系統相比，可減少 40% 的時間，優點為增加 1.6 倍取樣速率，缺點是非即時與量測執行約兩分鐘後因內部暫存記憶體已滿，需做資料輸出處理而使量測必須暫停。若有結構是要持續不間斷的即時監控，此方式就不適合。選用何種量測功能，要依照需求來決定。





圖 3.1 傳統(右)與 PXI(左)可程式化電源供應器

Vector Signals – Block Diagram

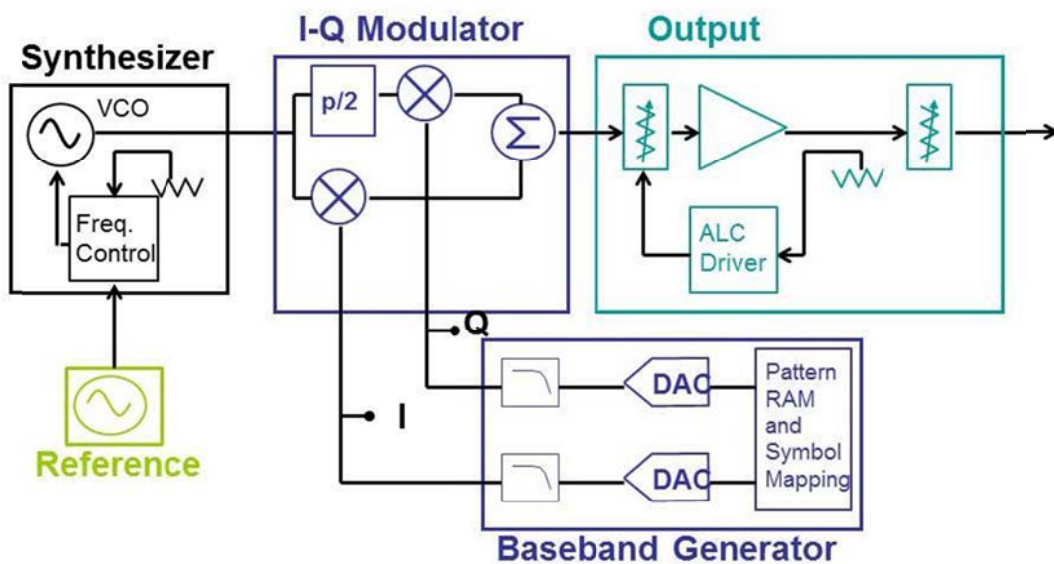


圖 3.2 向量訊號技術方塊圖

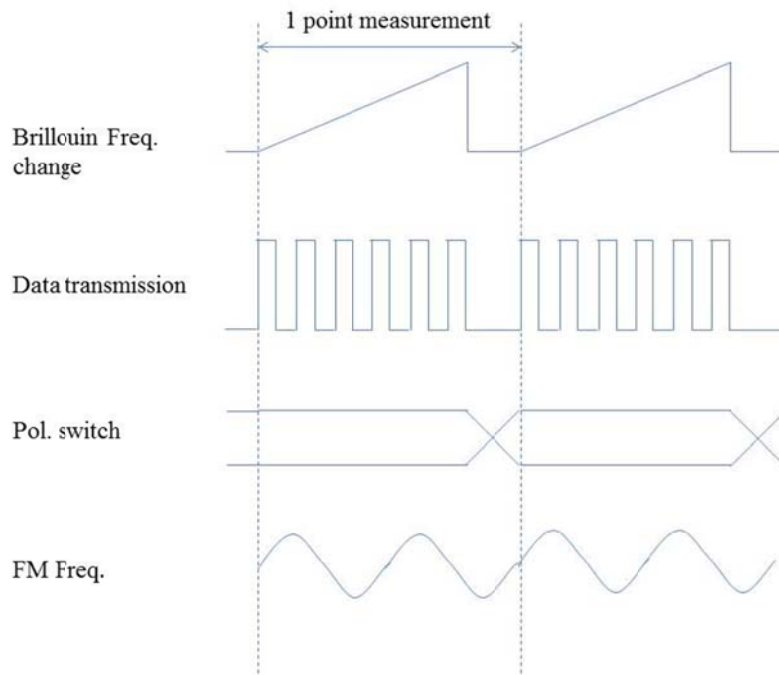


圖 3.3 過去 BOCDA 時序示意圖

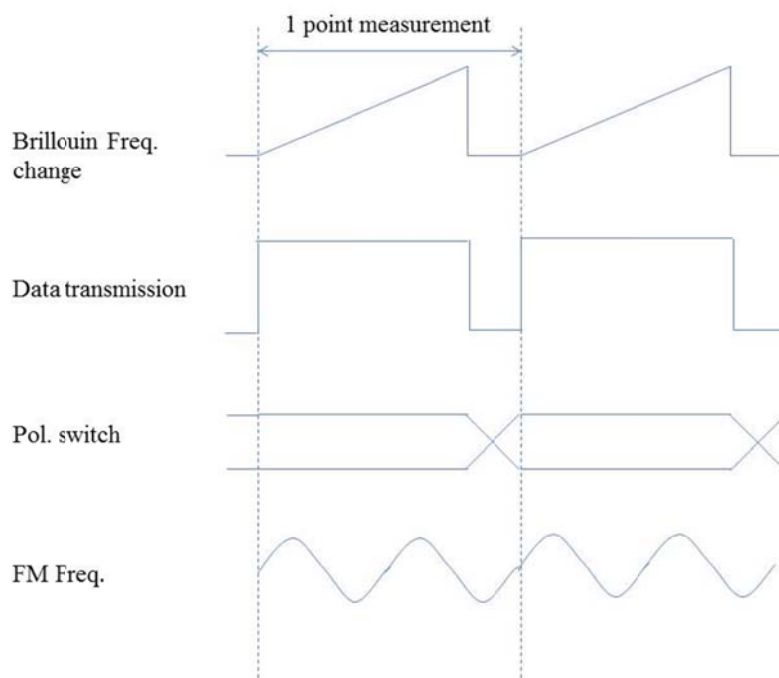


圖 3.4 現在 BOCDA 時序示意圖

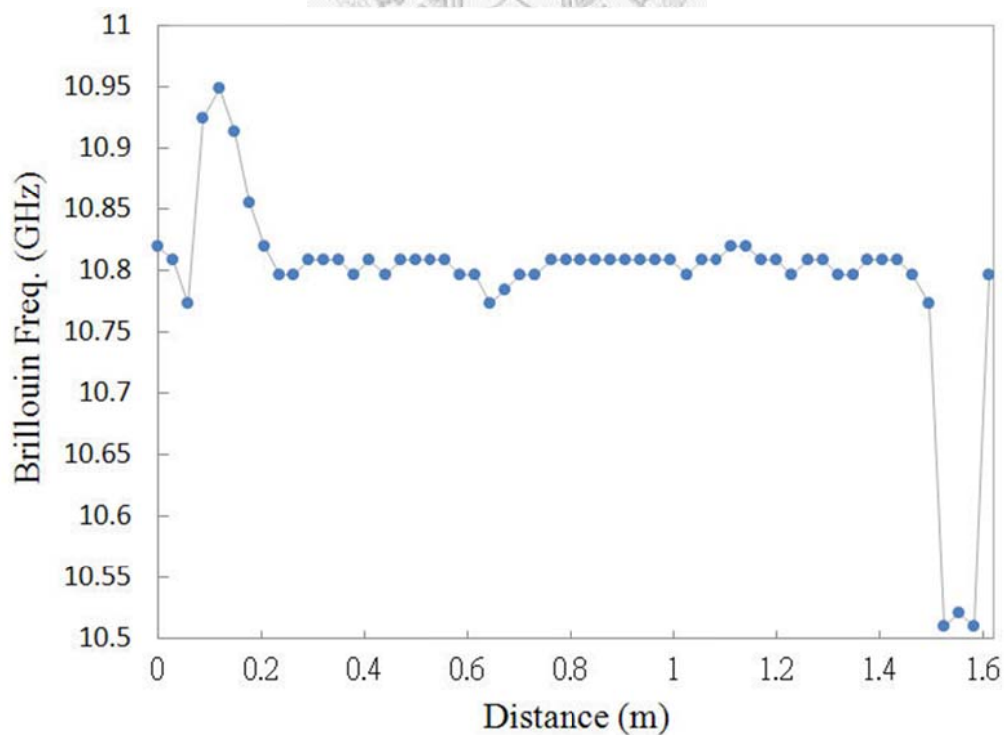
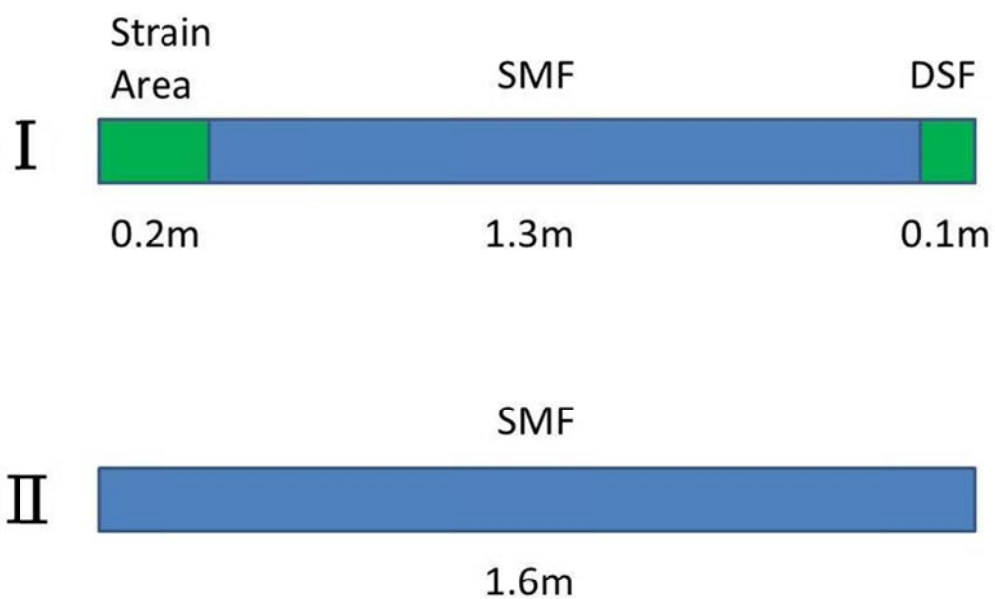


圖 3.6 測試光纖 I，分佈式量測

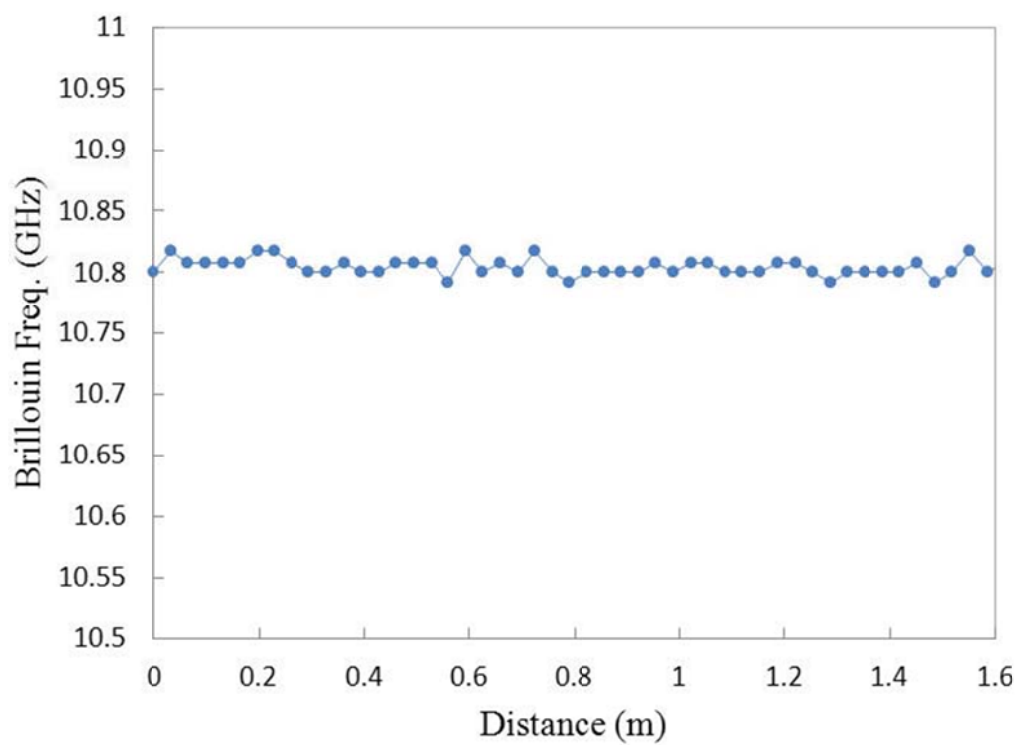


圖 3.7 測試光纖 II，50 點分佈式量測，耗時 1 分 04 秒

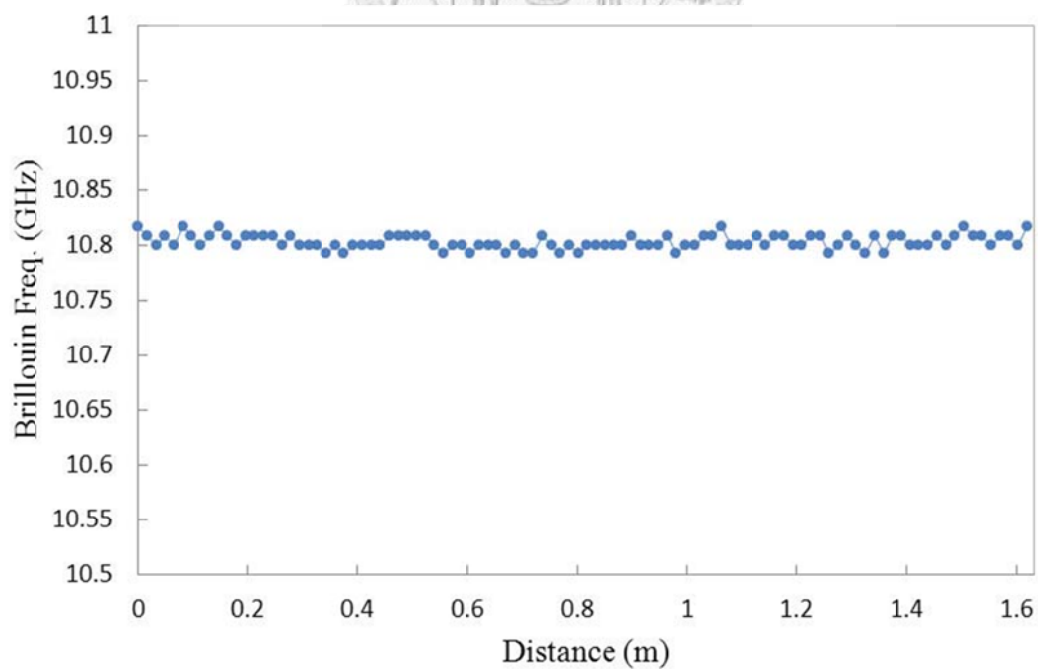


圖 3.8 測試光纖 II，100 點分佈式量測，耗時 2 分 13 秒

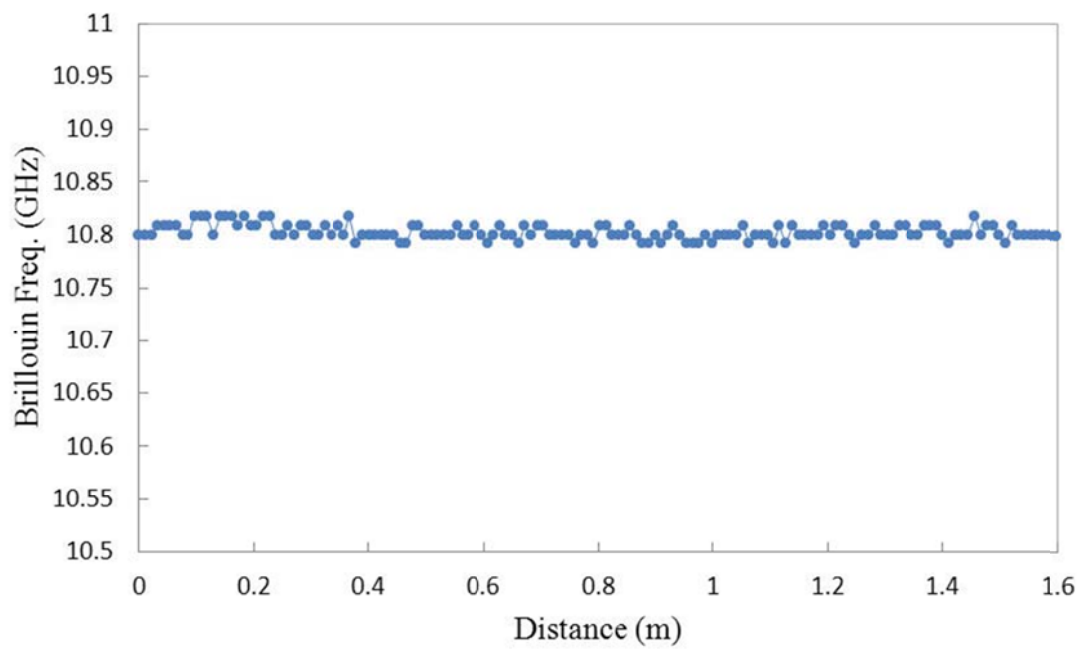


圖 3.9 測試光纖 II，150 點分佈式量測，耗時 3 分 11 秒

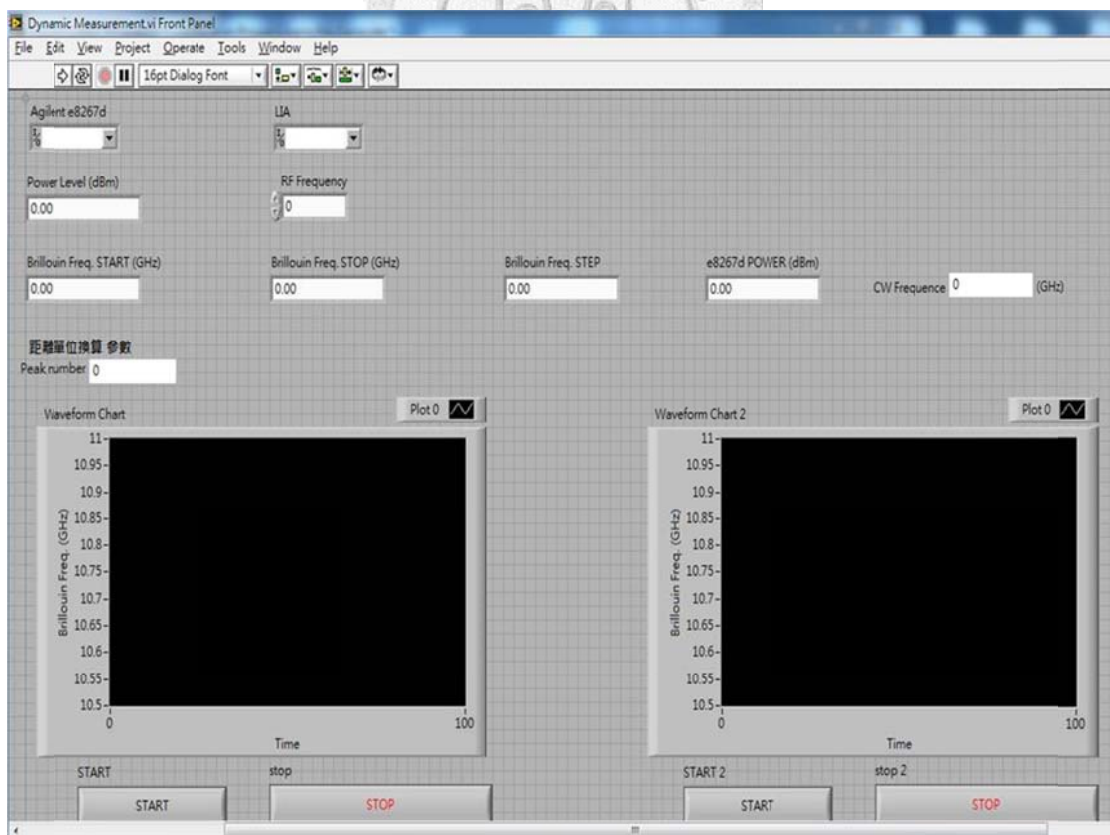


圖 3.10 動態量測之人機介面



圖 3.11 線性滑車、光學尺與 KA counter

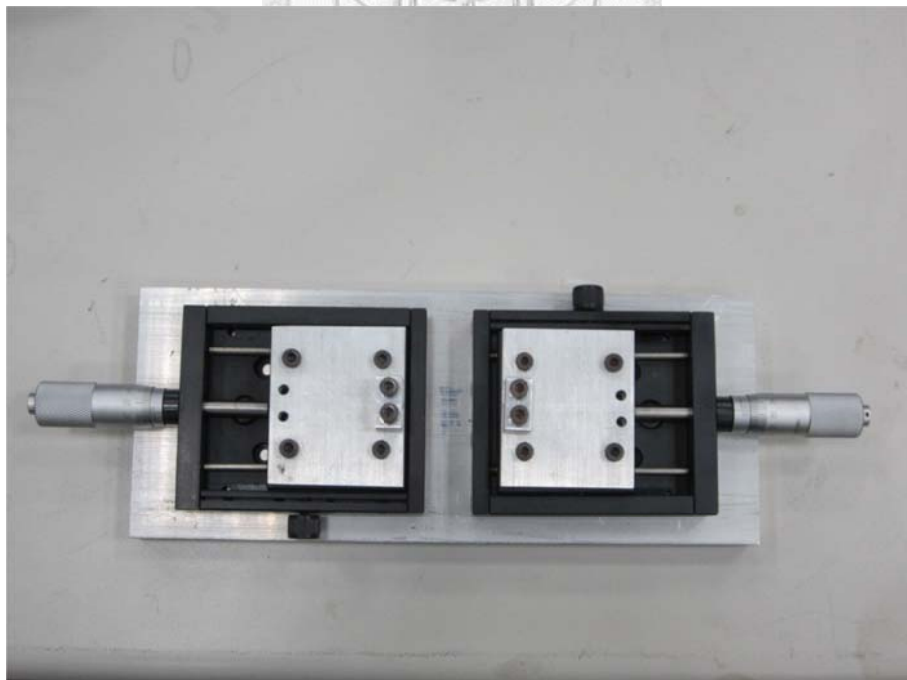


圖 3.12 小型線性滑車

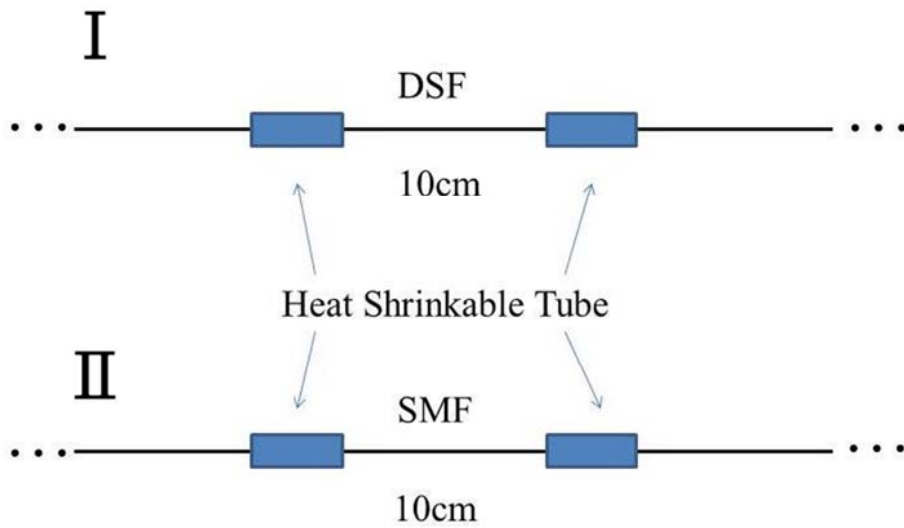


圖 3.13 測試光纖 B

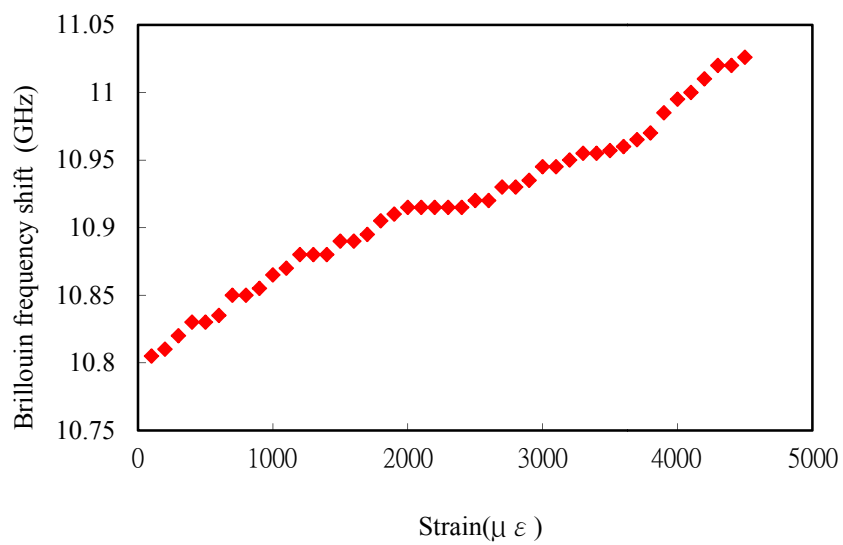


圖 3.14 布里淵頻率飄移與應變關係圖[2]

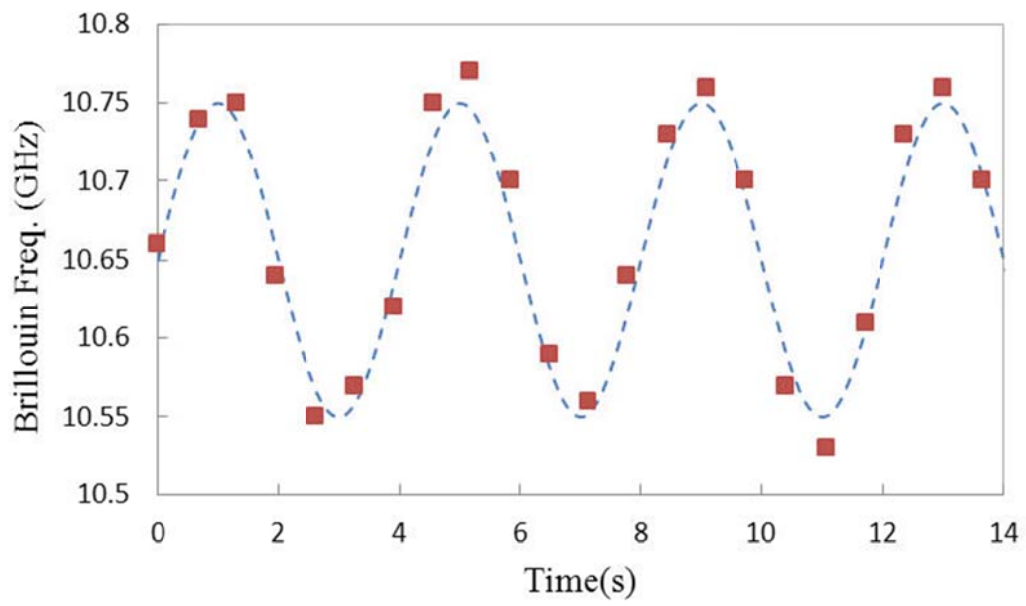


圖 3.15 DSF 0.01GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.25Hz

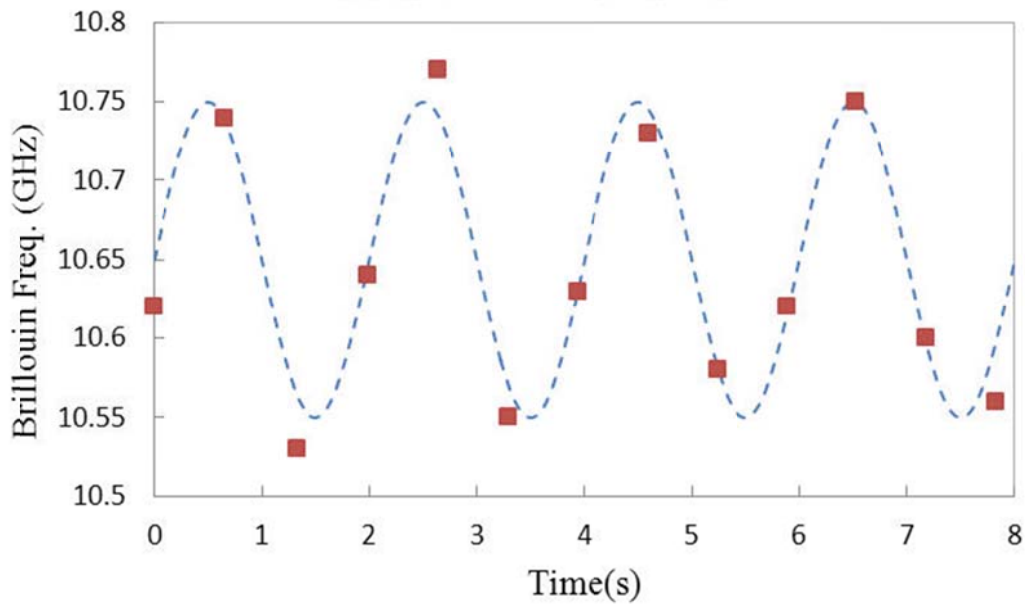


圖 3.16 DSF 0.01GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.5Hz

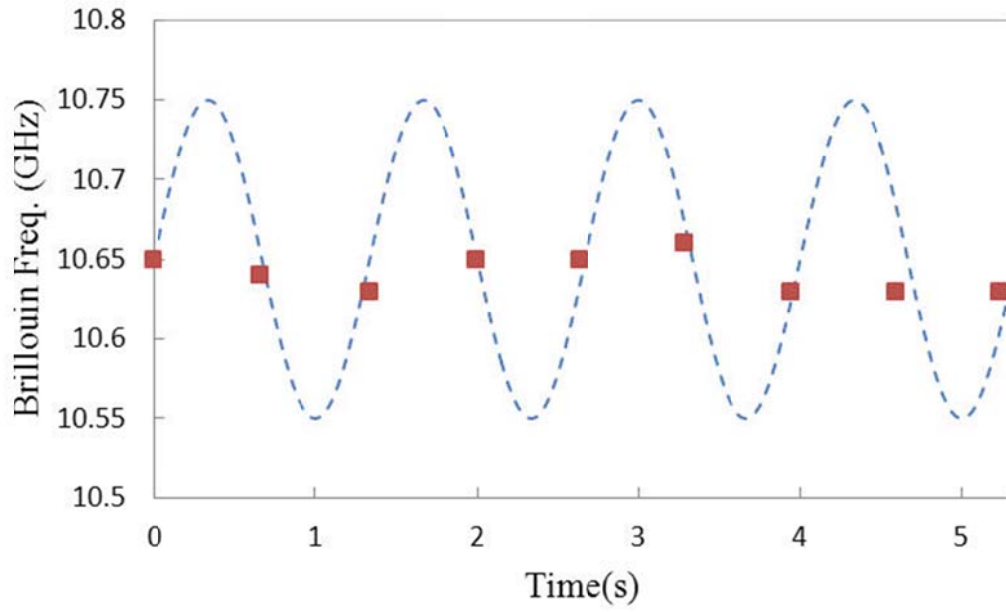


圖 3.17 DSF 0.01GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.75Hz

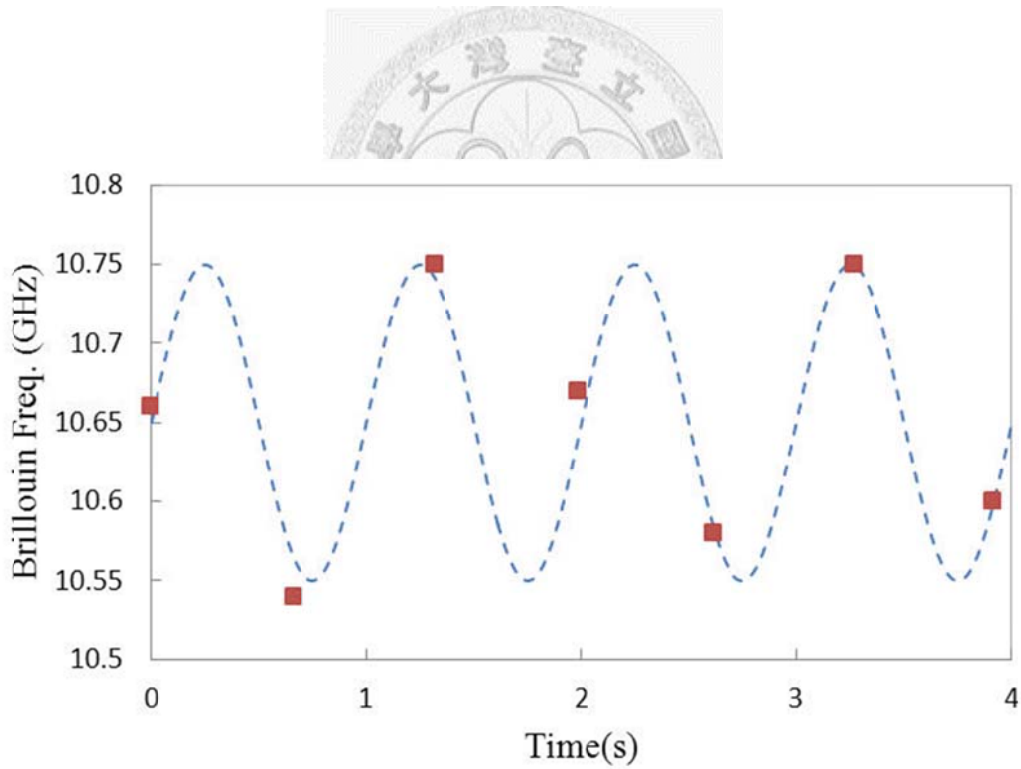


圖 3.18 DSF 0.01GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1 Hz

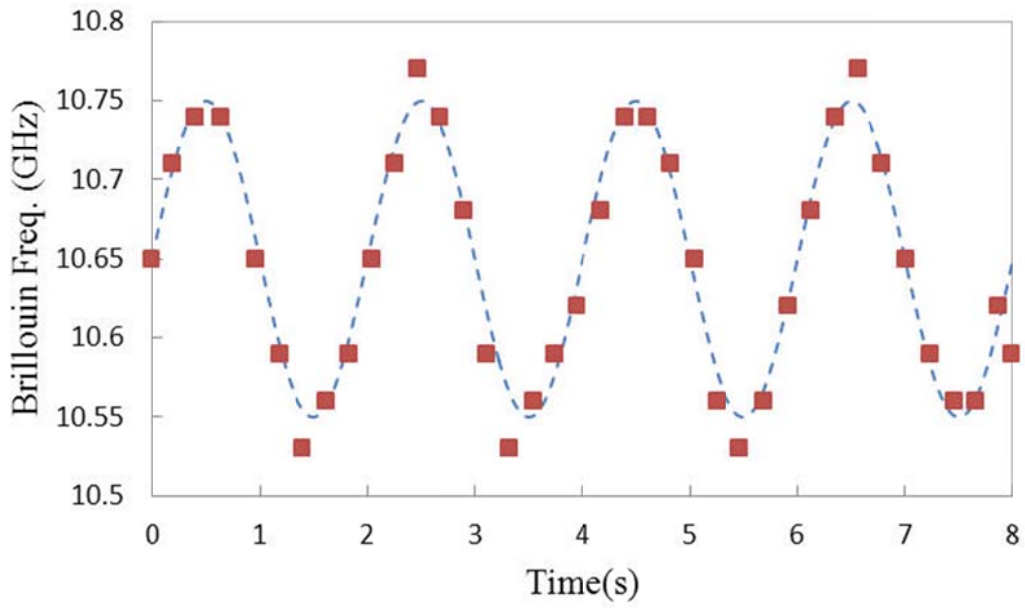


圖 3.19 DSF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.5 Hz

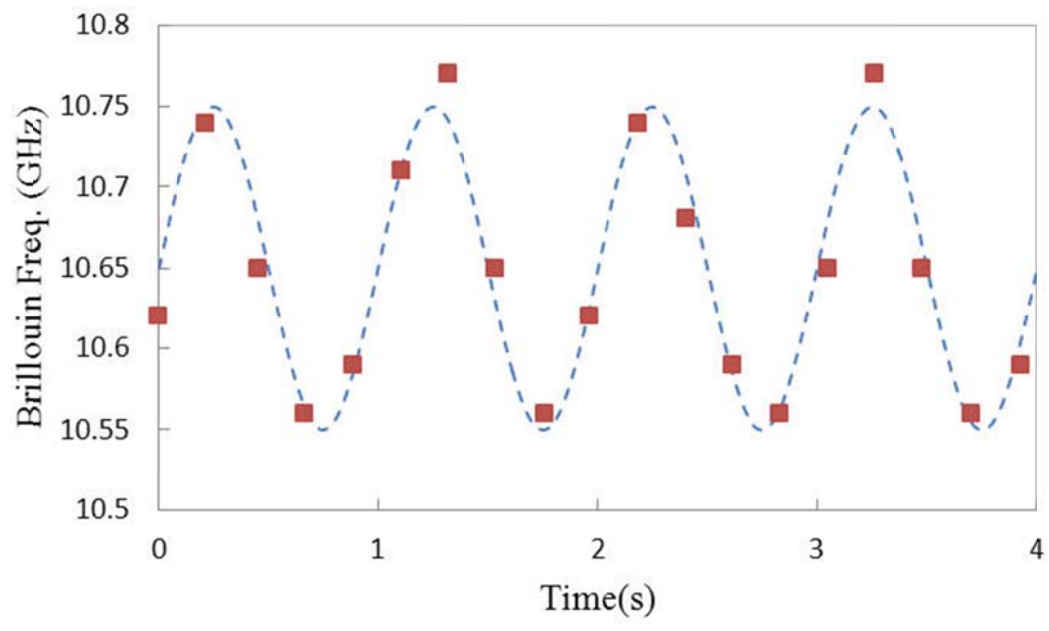


圖 3.20 DSF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1 Hz

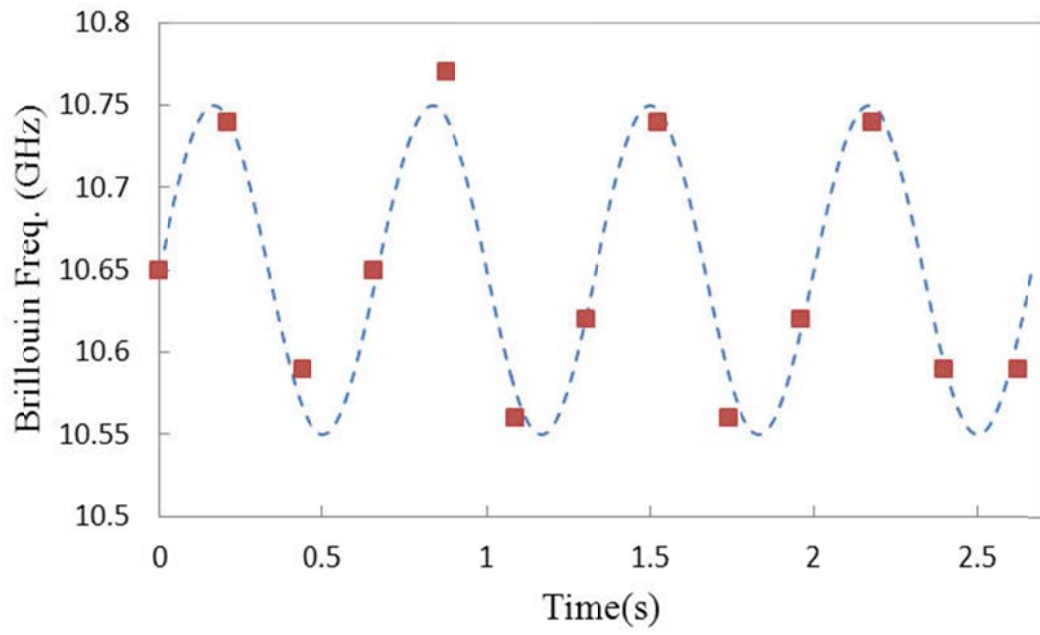


圖 3.21 DSF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1.5 Hz

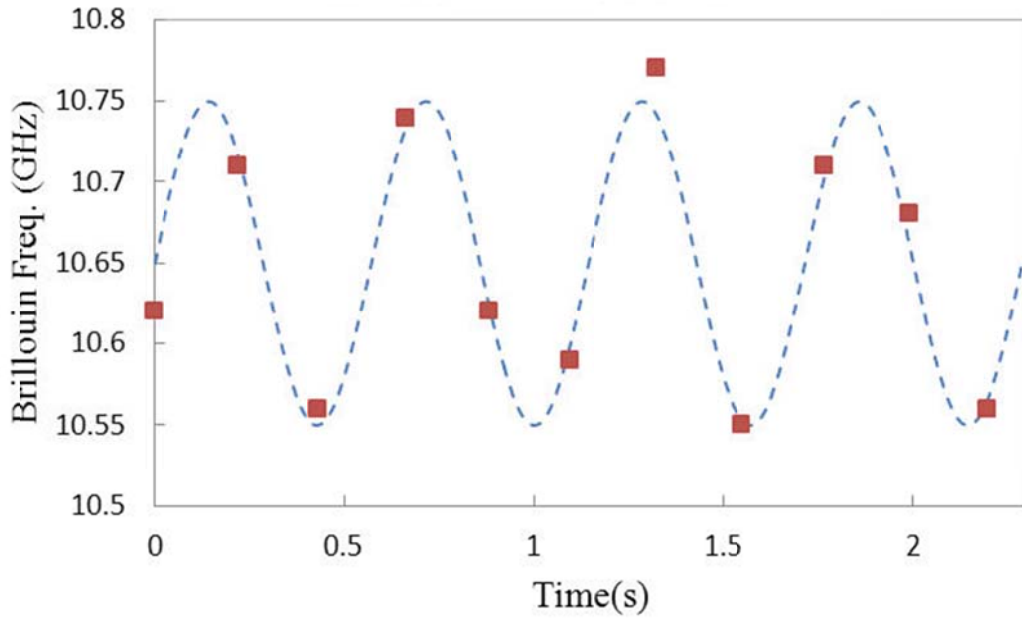


圖 3.22 DSF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1.75 Hz

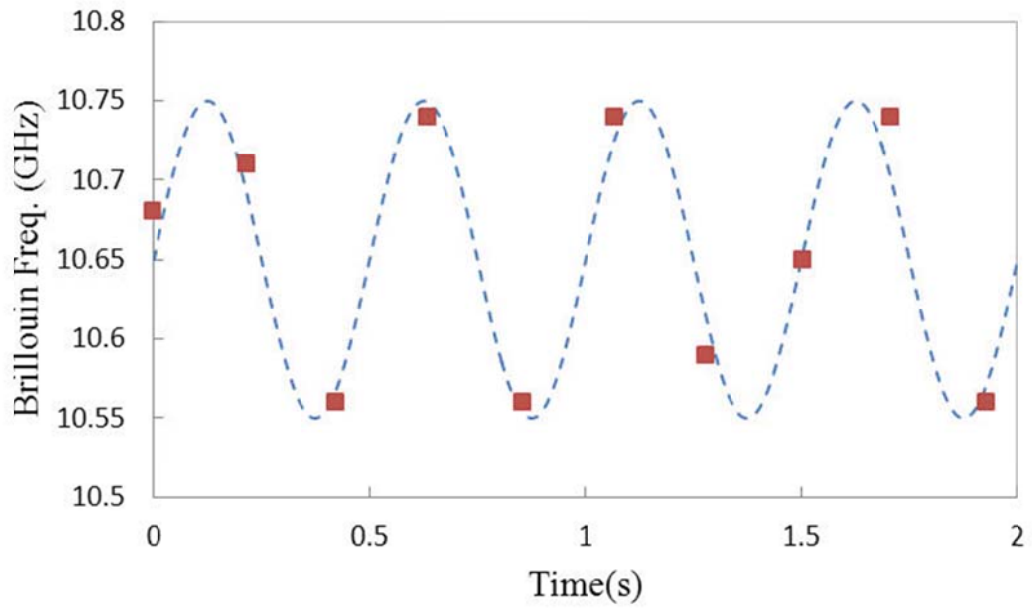


圖 3.23 DSF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 2 Hz

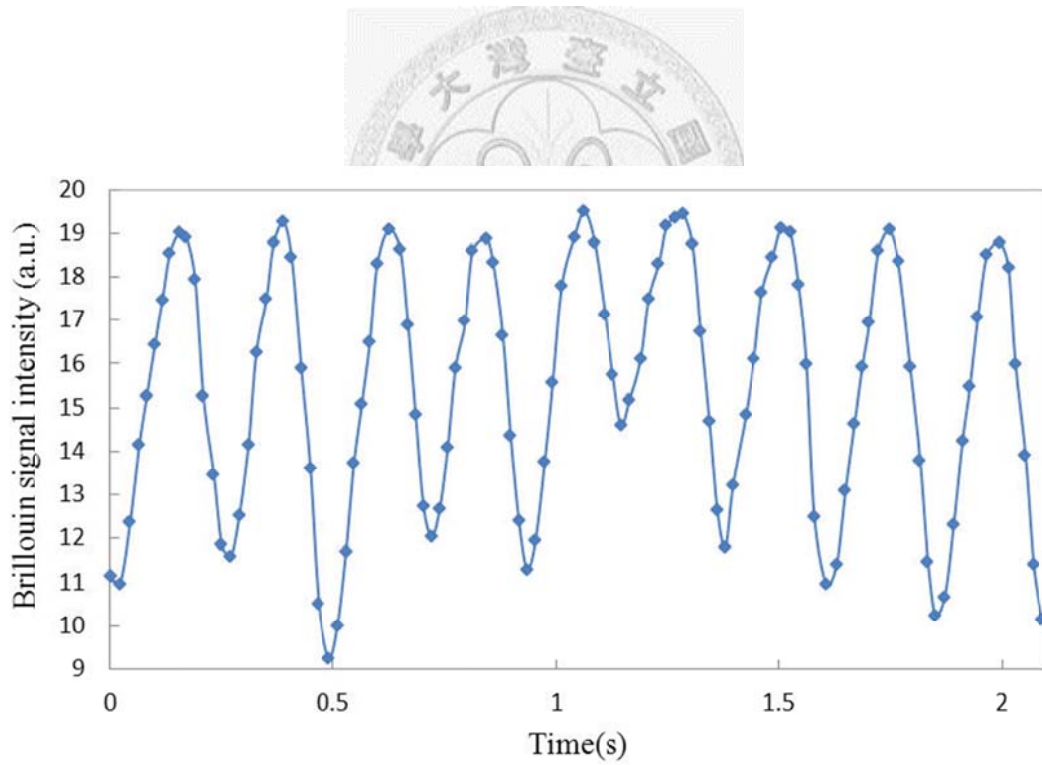


圖 3.24 DSF 布里淵訊號強度與時間關係圖

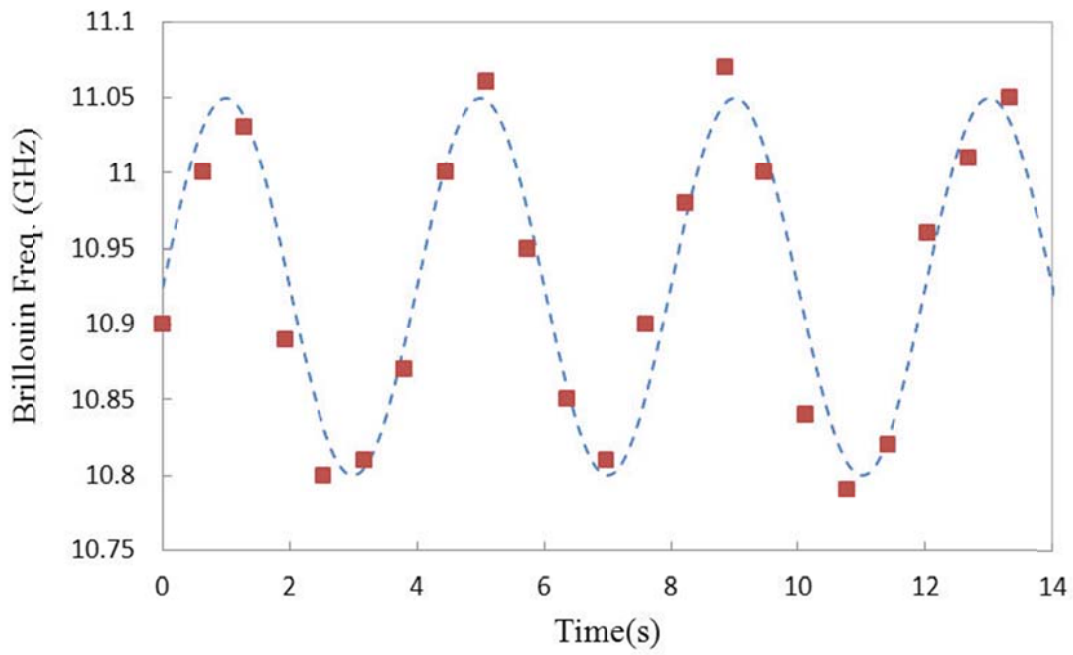


圖 3.25 SMF 0.01GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.25Hz

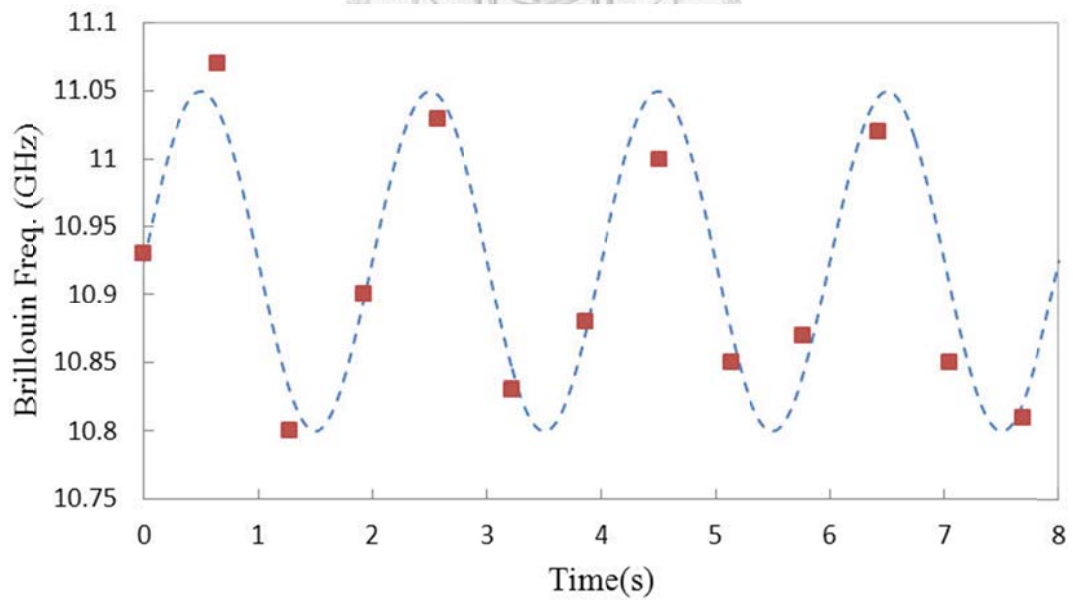


圖 3.26 SMF 0.01GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.5Hz

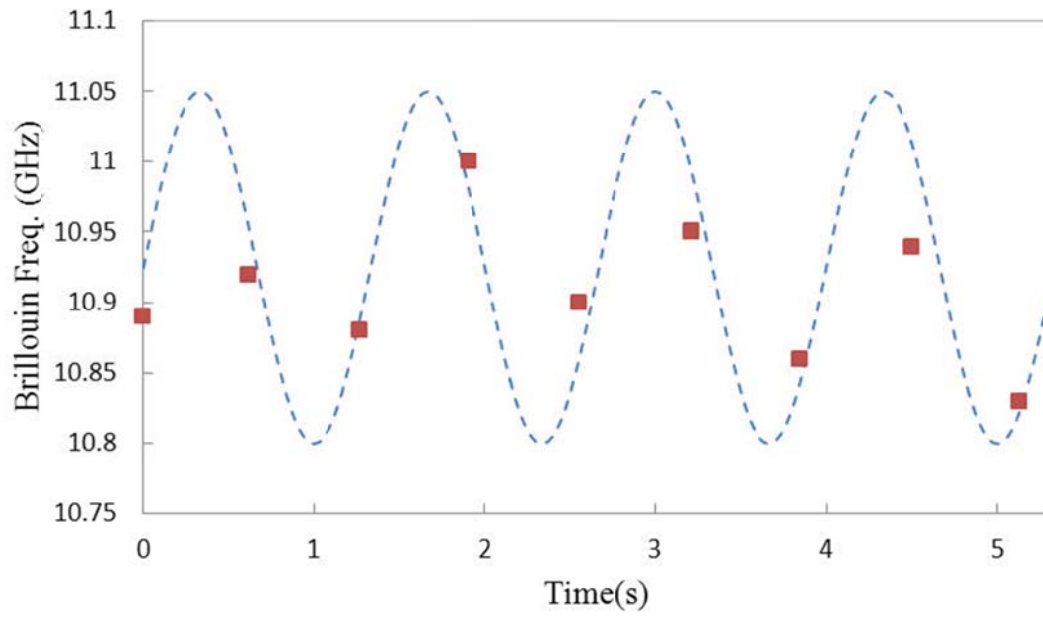


圖 3.27 SMF 0.01GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.75Hz

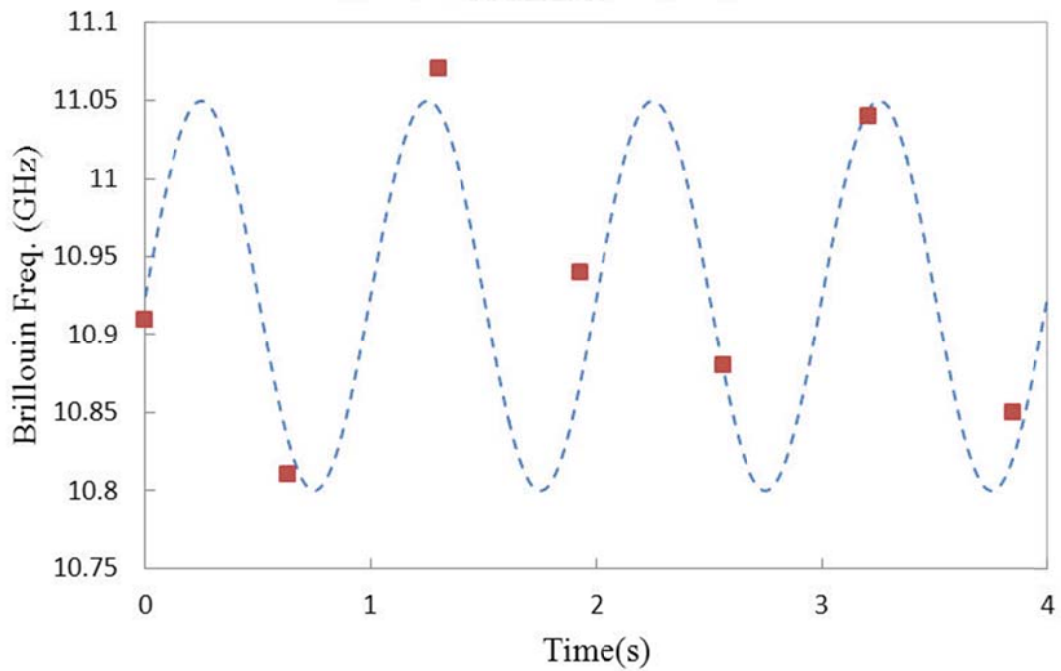


圖 3.28 SMF 0.01GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1Hz

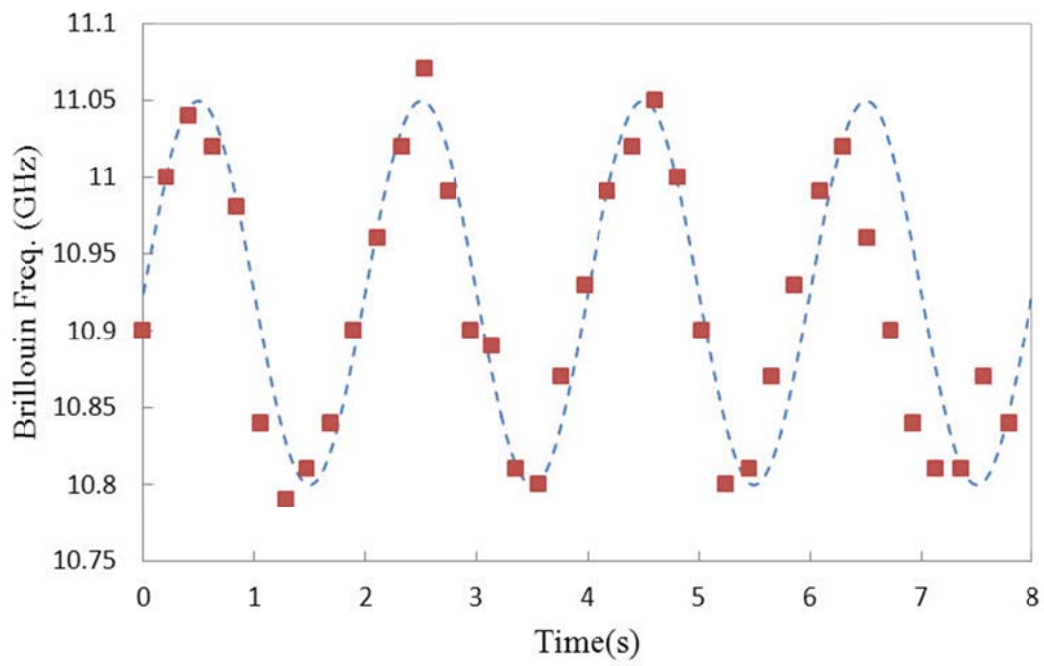


圖 3.29 SMF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 0.5Hz

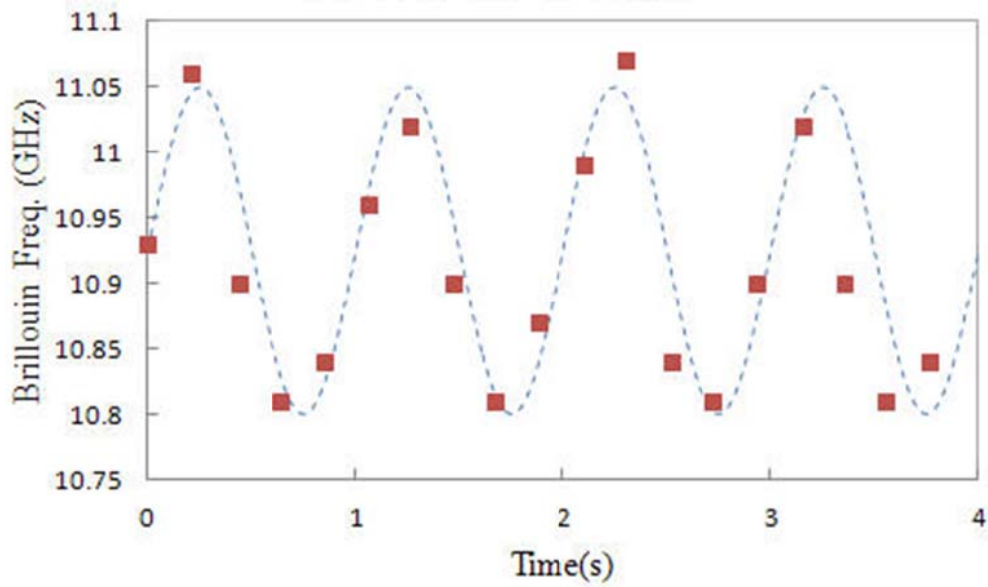


圖 3.30 SMF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1Hz

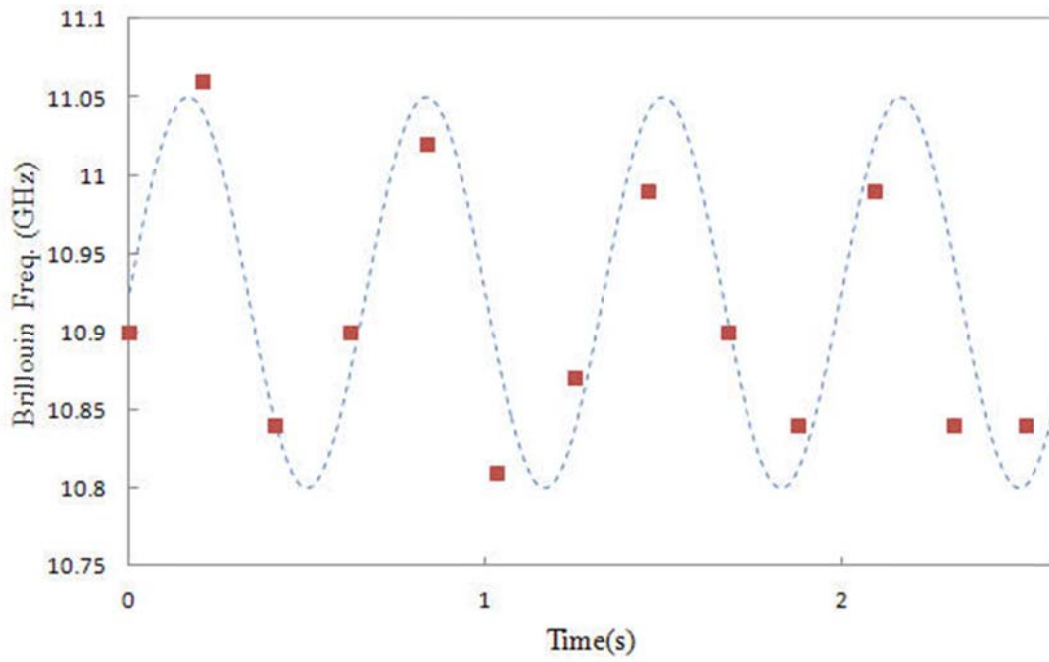


圖 3.31 SMF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1.5Hz

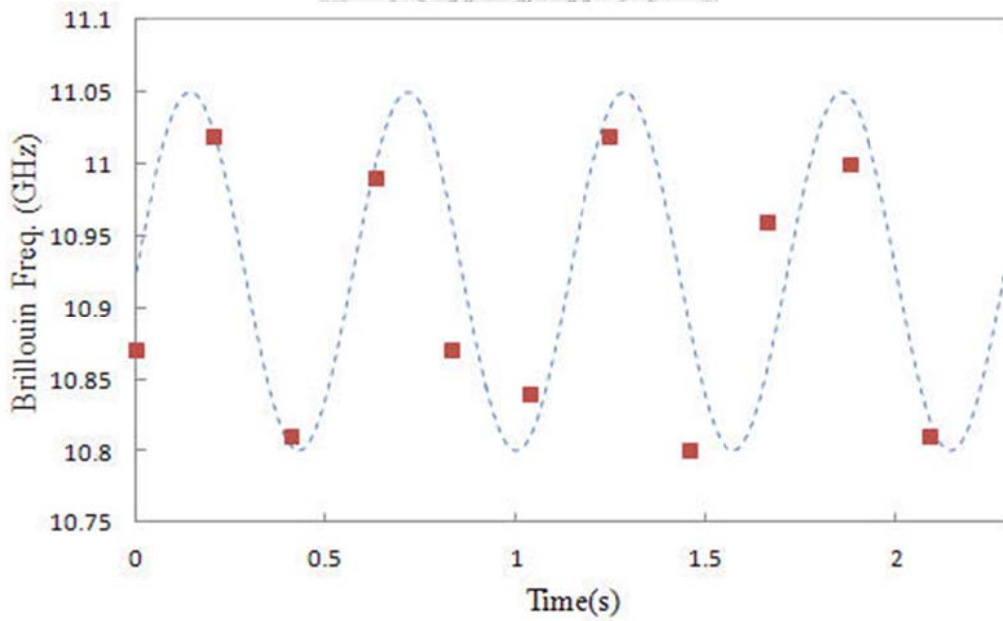


圖 3.32 SMF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 1.75Hz

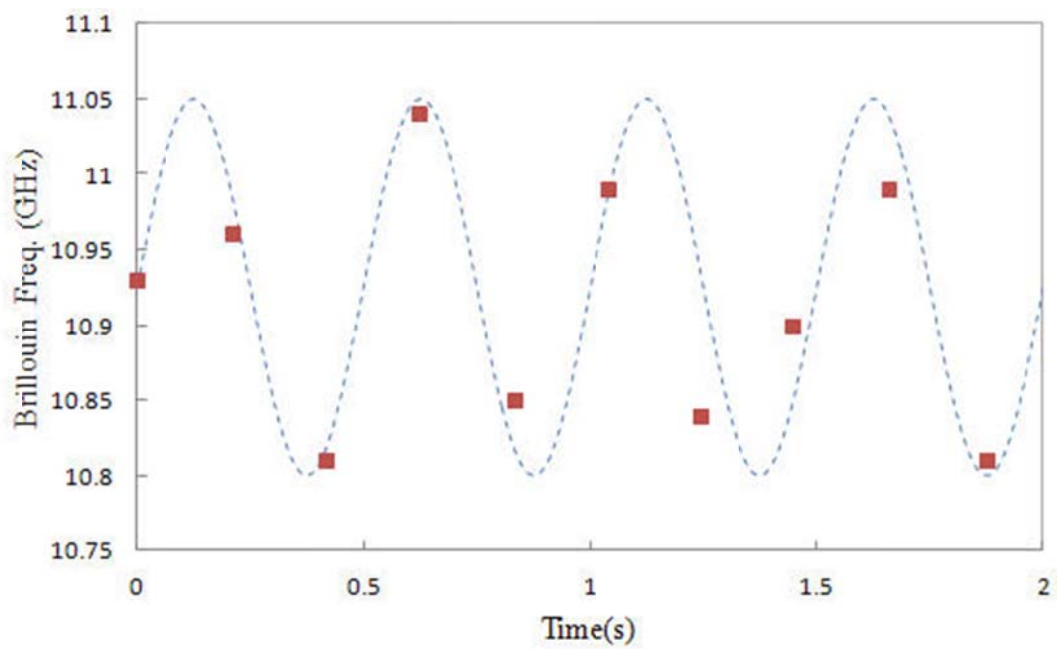


圖 3.33 SMF 0.03GHz 應變解析度之動態量測，震動頻率 2Hz

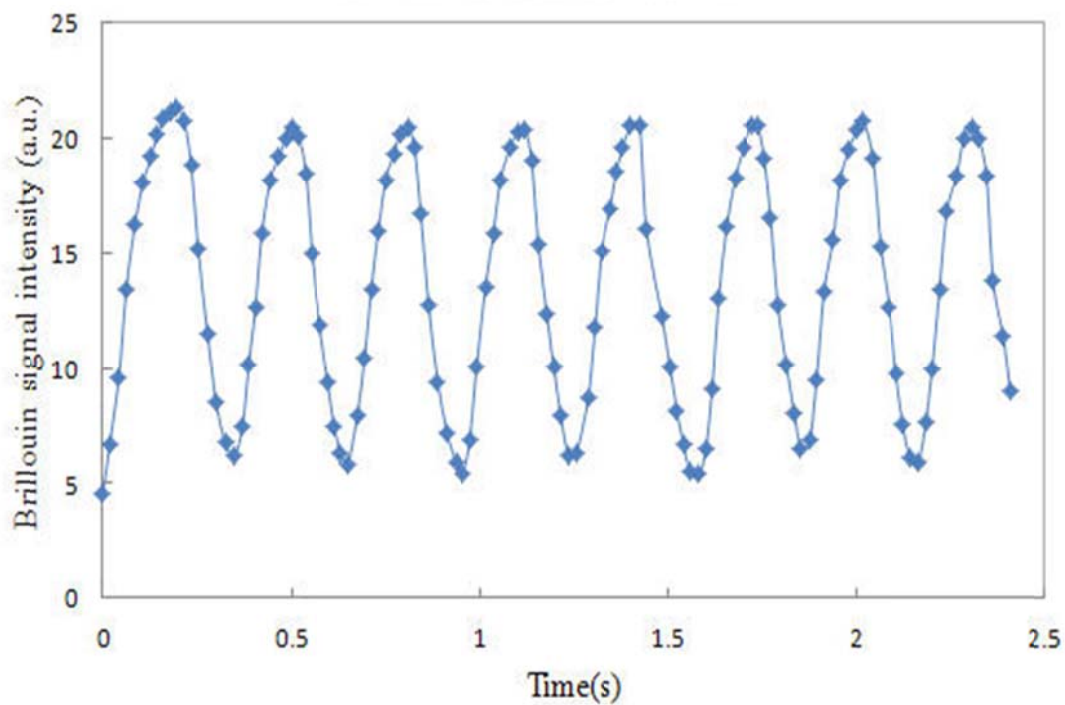


圖 3.34 SMF 布里淵訊號強度與時間關係圖

第四章 結論與未來展望

4-1 結論

本研究提升了 BOCDA 整體量測速度，節省時間便是增加對危險結構安全監測敏銳度，並建立即時與非即時動態量測系統，成為多功能感測器，使技術更為完善。以下列出本研究所做之改善：

1. 增加模組卡 NI PXI-4110 至 PXI 系統中，達到縮小體積、降低成本及使用 LabVIEW 程式操控增加其便利性；以及加入 Agilent E8267D 向量訊號產生器至 BOCDA 中。
2. 修改 BOCDA 執行時序，配合 Agilent E8267D，使靜態量測所費時間與過去相比相差 11 倍以上。
3. 使用 LabVIEW 建立即時動態量測系統，並擁有淺顯易懂的人機介面，大大降低使用者對於程式的上手門檻。
4. 利用線性滑車達到週期性位移，對即時動態量測能力做實驗，得知在應變解析度 0.01 GHz，取樣速率約為 1.7Hz；應變解析度 0.03 GHz，取樣速率約為 5 Hz；以及布里淵訊號強度取樣速率約為 50 Hz。且證實 DSF 與 SMF 兩種光纖均可應用在動態量測上。

4-2 未來展望

本實驗室 BOCDA 發展至今已經過了八年，歷經許多位學長及本人的改良，在成本、體積、訊雜比、應用層面、量測速度及人性化界面都有很大的進步。跟隨著科技與技術的發展，BOCDA 不論是改良還是應用，均有很大的嘗試空間，以下列出幾點未來可著重的研究方向：

1. 動態量測

雖然本文已經解決掃頻速度問題與針對時序做了改善，但效果還是有限，主要原因是布里淵增益值資料傳輸的消耗時間過長，改善後佔了每次量測時間的 90% 以上，於是加速資料的傳輸為一重大課題。未來若以上問題得以解決，動態系統取樣速率快慢必會回到布里淵掃頻速度，此時便可完全發揮 Agilent E8267D 向量訊號產生器之能力，尤其是 0.2 GHz(4000 $\mu\epsilon$) 應變範圍內，執行一次掃頻只需幾微秒時間即可完成。

2. 擴大量測範圍

目前本系統在待測區內只能有一個 correlation peak，且量測範圍與空間解析度有著反比關係。為了增加量測範圍且又不降低解析度，待測區可用兩種不同種類之光纖組成，並用兩相鄰 correlation peak 同時進入兩種不同種類之光纖組成的待測區，達到擴大量測範圍[20]。

3. 整合式系統

本系統電子元件除了雷射光源驅動器和 Agilent E8267D 高頻向量訊號產生器以外，其餘均整合至 PXI 系統。若能將光學元件也整合至一系統，將能大大增加其便利性以及商業價值。

4. 實際應用

光纖感測器在工程上應用非常廣泛，而 BOCDA 又擁有分佈式感測能力與高解析度兩大優勢，因此應用上不僅只有大型結構物監測，相信也可勝任如複合材料試驗中使用之小型試片的量測。

參考文獻

- [1] K. Hotate and T. Hasegawa, “Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation.” *IEICE trans.Electron.*, 2000. 83(3): p. 405-412.
- [2] 沈育霖, “光纖分佈式感測技術於結構安全監測之多功能應用研究”, 國立台灣大學應用力學研究所, 博士論文, 2010。
- [3] Inaudi D., “Fiber optic smart sensing”, *Optical measurement techniques and applications*, P.K. Rastogi editor, Artech House'(1997), Chapter 9, p 255-275
- [4] Inaudi D.,“Long-gage fiber optic sensors for structural monitoring”, *Photomechanics*, P.K. Rastogi editor, Springer'(2000), p 273-293.
- [5] Inaudi D.,“Application of fiber optic sensors to structural monitoring”, *Trends in optical nondestructive testing and inspection*, P. K. rastogi and D.Inaudi editors, Elsevier Science (2000), Chapter 30, p459-472.
- [6] T. Liu, G.F.Fernando, Y.J.Rao, D.A.Jackson, L.Zhang and I. Bennion, “Simultaneous strain and temperature measurements in composites using a multiplexed fiber Bragg grating sensor and an extrinsic Fabry-Perot sensor” *SPIE Vol.3042*,pp203-211,1997.
- [7] 吳嘉原, “橋梁監測之感測技術”, 國立中央大學, 碩士論文, 2002。
- [8] 李哲賢, “BOTDR、BOCDA 應用於土木工程的監測與感測”, 國家地震工程研究中心, 2001。
- [9] H. Naruse and M. Tateda, “Trade-off between the spatial and the frequency resolutions in measuring the power spectrum of the Brillouin backscattered light in an optical fiber.” *Applied Optics*, 1999. 38(31): p. 6516-6521.

- [10] 吳曜東， “光纖原理與應用” ，全華科技圖書，2001。
- [11] <http://metwww.epfl.ch/Brillouin/CaptTempE.htm> ; METLab, “Temperature and strain sensor.”
- [12] 蔣博文， “利用自發性布里淵散射技術之分佈型應變與溫度感測” ，國立交通大學光電工程研究所，2001。
- [13] F. T. Arecchi and E.O. Schulz-Dubois, eds. ,“Laser Handbook”, vol2, pp.1077-1150, North-Holland, 1972.
- [14] T. Yamauchi and K. Hotate, “Performance evaluation of Brillouin Optical Correlation Domain Analysis for fiber optic distributed strain sensing by numerical simulation.” Proc. SPIE, 2004. 5589: p. 164-174.
- [15] T. Horiguchi, K. Shimizu, T. Kurashima, M. Tateda, and Y. Koyamada, “Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering,” J. Lightwave Technol., vol. 13, pp. 1296-1302, 1995.
- [16] M. Nikles, L. Thevenaz, and P. A. Robert, “Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers,” Journal of Lightwave Technology, 1997. 15(10): pp. 1842-1851.
- [17] 張智奇， “分散式布里淵散射量測系統之建置” ，國立台灣大學應用力學研究所，博士論文，2007。
- [18] M. O. van Deventer and A. J. Boot, “Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers,” J. Lightwave Technol., vol.12, no.4, pp. 585-590, 1994
- [19] 徐進鴻， “以極化差異法與 PXI 平台改善分佈式布里淵光纖感測系統” ，國立台灣大學應用力學研究所，碩士論文，2010。

- [20] J. H. Jeong, K. Lee, J. M. Jeong, and S. B. Lee, “Measurement range expansion in Brillouin Optical Correlation-Domain Analysis System” Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2011.

