

## 以雷射干涉儀量測超音波探頭激發之聲場

劉永慧<sup>1</sup>、周隆亨<sup>1</sup>

<sup>1</sup>工業技術研究院量測中心研究員

300 新竹市光復路二段 321 號 16 館

電話：03-574-3778 Fax：03-572-6445

E-mail：iris@itri.org.tw

### 摘要

本文彙整各國國家標準實驗室超音波校正標準與雷射干涉儀校正超音波探頭激發聲場技術。實驗部分先就相位法雷射干涉術量測動態振動之方法進行系統說明，進一步測試 5MHz 超音波探頭振動位移量，並成功檢測超音波聲場特性。以此為基礎，未來對於建立國家度量衡標準實驗室超音波校正系統具有實質幫助，並可擴充國家實驗室校正能量並與國際接軌。

### Abstract

This paper was compiled the technique of ultrasonic standard calibration system from PTB (Germany) and the interferometric technique for measuring ultrasonic field. The experimental results show the preliminary research in determining nano-scale ultrasonic vibrations. The interferometric phase decomposition method was used to decode the small scale vibrations from ultrasonic transducer. The stabilized laser will be used in the interferometer for improving stability and uncertainty of the ultrasonic calibration system.

**關鍵字：**超音波(Ultrasonic Wave)、雷射干涉儀(Laser Interferometer)、聲場(Acoustic Field)

### 一、前言

隨著科技日新月異，超音波非破壞檢測的應用層面越來越廣，從工業用超音波器材至醫療用超音波儀器，各式各樣超音波設備接二連三問世。為了規範超音波設備的性能及安全性，許多國家皆已制定各種超音波設備聲學特性(包含聲功率與聲場分佈)之量測標準[1,2]，對於聲學之校正應用十分重要。而近年來，有關醫療用超音波規範也漸漸公佈，包括醫療用超音波安全範圍及設備需求，及輸出能量等，亦為超音波標準之重要一環[3,4]。根據這些國際標準規範，可歸納出現階段有關超音波校正方法包括互換技術(Reciprocity Techniques)、平面掃描技術(Planar Scanning)、超音波輻射力平衡技術(Radiation Force Balance)、及雷射干涉技術(Laser Interferometry)，其中又以雷射干涉術之方法最新、亦為非接觸式量測技術[5]。本文針對雷射干涉技術之量測方法進行系統性說明，並期望建立國家度量衡標準實驗室之超音波校正系統，以擴充能量並與國際接軌。

## 二、雷射干涉儀架構

本文實驗是利用精密之雷射都卜勒振動 / 干涉儀來量測彈性波之波場及振幅 [6]。此雷射干涉儀系統應用圓偏極光干涉及創新之解相位運算，使量測精確度提高至奈米級，而此特性可應用於精確彈性波量測。

干涉術主要是量測兩道光波前的光程差，而引致光程差的原因為待測物體位移或因形狀變形或移動導致波前偏離所引起，因此產生明暗交錯的干涉條紋。當物體位移時，明暗交錯的干涉條紋也會隨之改變移動。本文所使用之雷射都卜勒干涉儀屬於反射式圓偏光干涉儀，當物體移動四分之一波長( $\lambda/4$ )時，光程差改變二分之一波長( $\lambda/2$ )，此時相差為 $\pi$ ，造成破壞性干涉而形成暗紋。若物體移動二分之一波長( $\lambda/2$ )時，此時光程差為 $\lambda$ ，相差為 $2\pi$ ，形成建設性干涉，表現出亮紋。所以當干涉紋從亮紋到亮紋，或是暗紋到暗紋都代表物體移動 $\lambda/2$ 的長度。因此物體移動距離 $D$ ，與相角差 $\Phi$ 和光波長 $\lambda$ 關係為：

$$D = \frac{\Phi}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

實驗中量測位移所用之雷射都卜勒振動 / 干涉儀，具有解析度達奈米級及可量測絕對與相對位移之特點，其原理為利用雷射圓偏極光干涉儀之特性。有別於傳統干涉儀使用線偏極光，引入移頻來達成區分振動方向的量測目標；本文所採用之干涉儀改採圓偏極光干涉儀架構，此一架構不需事先於兩干涉臂其中之一引入頻率移動，僅須於系統之最後端，令最終干涉的兩信號具有相互垂直的偏極態，而後再利用一個夾角為 $45^\circ$ 的四分之一波板，及一對偏振方向夾 $45^\circ$ 之偏極分光鏡，與二極體光偵測器，即可產生一對相差 $90^\circ$ 之都卜勒干涉電子訊號，藉由此兩個訊號的相位領先與落後，來判斷物體之運動方向。

於量測絕對振動位移時，透過兩軸相差為 $45^\circ$ 的兩個偏極分光鏡來量光強，將可得一組正弦及餘弦信號。由圓偏極光干涉儀之原理可知，於計算光程差時，為提高相位差精度之計算，利用兩順時針及逆時針正交偏極光於呂薩加圓中，因此由此創新解相位方法，可將雷射都卜勒干涉儀精度，由雷射光半波長(約為數百 nm)增加至奈米級 nm。並且為使計算相位角時，所對應之位移量為正確的，故採用一個數學運算，將原始橢圓上之正交信號對映對到正圓上，以消除解相位誤差，提高量測精度。

## 三、國外現況

現今先進國家之國家標準實驗室已完成多項有關超音波標準之校正系統，其中以德國聯邦物理技術研究院(PTB)及英國國家物理實驗室(NPL)所開發之系統最為完整。PTB 於 1999 年正式發表將超音波水聽器(Hydrophone)的絕對校正標準擴展至(1~70) MHz 的頻率範圍，基本校正系統的實驗架構如圖 1 所示[5]。

超音波水聽器的高頻校正是建立在雷射干涉技術的理論上。它是比較薄膜位移量與 He-Ne 雷射的光波長，藉以得到超音波聲場振幅。薄膜為  $2\mu\text{m}$  厚度的 PET，放置在水槽內之液面上，超音波從底部入射，並以雷射干涉儀偵測薄膜的位移量，此代表著聲場粒子的位移量。完成聲場特性的量測之後，移開薄膜，在相同位置放入水聽器，並加入適量的水。在相同條件下重複量測，可獲得水聽器的輸出電壓，並經由定義的公式可獲得水聽器的靈敏度。

薄膜與水聽器的精確定位是校正程序的關鍵部分，至少有五個自由度必須調整，包括三個平移與兩個旋轉。在干涉儀系統中，PTB 採用功率  $2\text{mW}$  的 He-Ne 雷射，雷射經過分光鏡後分為量測光束與參考光束，量測光束會藉由一個焦距  $50\text{mm}$  鏡片聚焦於薄膜上，薄膜與空氣接觸的一側鍍上一層  $18\text{nm}$  厚之鋁膜，藉以增加光反射量。參考光束的反射鏡面裝在 PZT 上，藉由伺服迴路電路驅動 PZT，可使干涉儀路徑穩定，去除低頻的雜訊。量測光束與參考光束再經過分光鏡後，形成干涉訊號，此訊號由光偵測器測量，再輸出電壓訊號至數位示波器予以記錄。目前 PTB 系統的校正頻率範圍為  $500\text{ kHz} \sim 60\text{ MHz}$ ，可以量測的最小超音波位移量為  $1\text{ nm}$ ，最大約可達  $50\text{ nm}$ 。而超音波水聽器靈敏度的測定會受到系統誤差的影響，必須將量測數據予以修正。因此必須詳加考慮五個重要特性，包括：水聽器與雷射聚焦點的限定尺寸、薄膜內之多重穿越效應、光感測器的頻率響應、前置放大器增益的頻率相依以及負載。

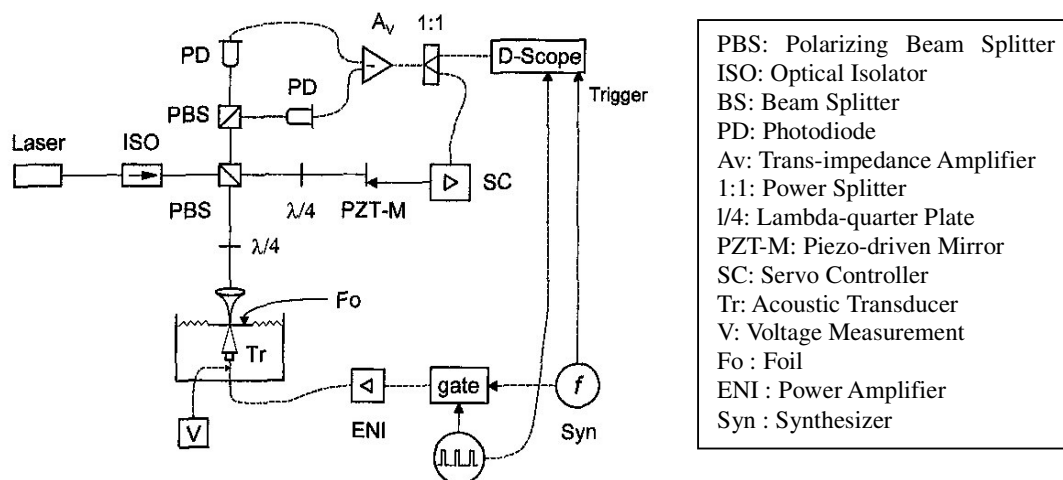


圖 1 德國 PTB 實驗室以雷射光學方法之超音波校正實驗架構圖(雷射干涉儀部分)

#### 四、國內現況－測試超音波聲場方法

圖 2 為實驗量測裝置及實驗架設方法圖，本文利用雷射都卜勒干涉儀量測超音波探頭振幅位移場，對於所持有之探頭作一品質檢測[7]。將超音波探頭固定於移動平台上，以控制量測位置，量測所使用之超音波探頭頻率為 5 MHz，直徑 0.5 in(ALPHA 5.0 MHz/.5 00FRW1)，為非破壞檢測常使用的縱波超音波探頭之一。

由超音波激發及接收器 (Pulser/Receiver)發出脈衝電壓訊號激發超音波探頭，觸發訊號 (Trigger Signal)同步發出觸發 Pulser/Receiver 及控制雷射都卜勒干涉儀接收時間原點。振幅之微小位移由雷射都卜勒干涉儀量測，雷射都卜勒干涉儀使用紅光 He-Ne 雷射，波長 632.8 nm，取樣頻率調至 20 MHz。實驗中使用 LabView 程式擷取波形位移訊號，記錄最高波峰與最低波谷的振幅差異(Peak to Peak Amplitude)。

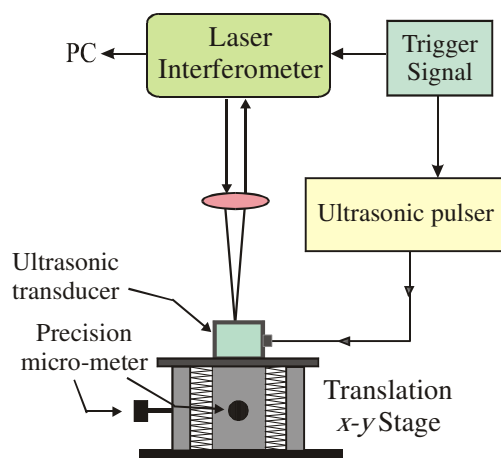


圖 2 超音波探頭位移量測實驗架構圖

#### 五、測試實驗結果

圖 3 為以雷射干涉儀量測到超音波聲場之振動結果，由實驗結果可知此 5 MHz 超音波縱波探頭激發約 4 個來回振盪，經過訊號頻譜分析後發現其訊號激發符合 5 MHz 頻率。本實驗並利用平均法降低雜訊，因超音波探頭激發具有高重複性，故於同一點連續量測並加以平均，可以消除雜訊。圖 4 為平均 200 次後之超音波探頭位移量結果，由實驗結果可知，平均後之雜訊干擾較小，因此一般重複性高之超音波探頭適用平均法加以量測。

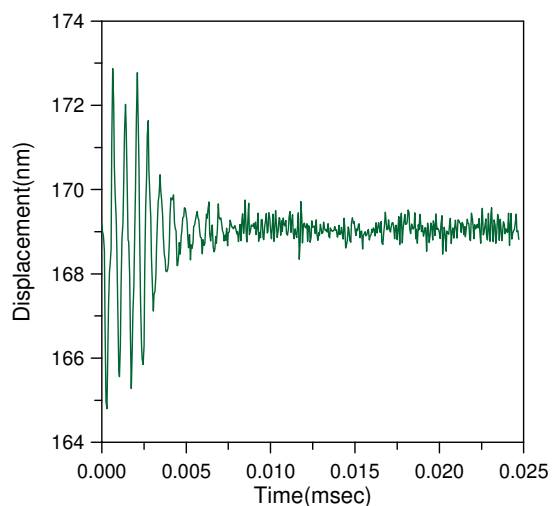


圖 3 超音波探頭位移量測結果

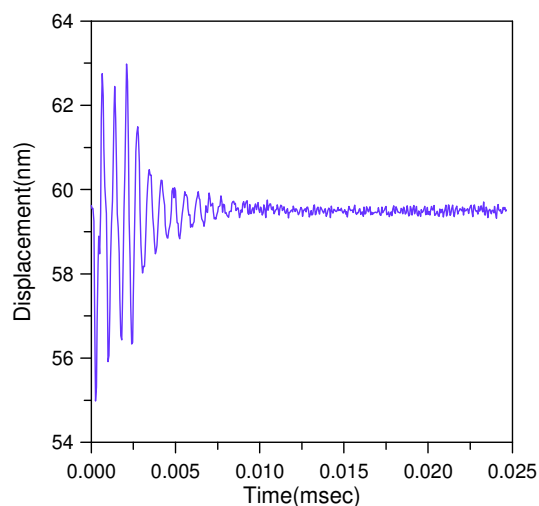


圖 4 平均 200 次後之超音波探頭位移量結果

實驗之超音波探頭為固定於一精密  $x$ - $y$  平台上，設定量測間距為 0.6 mm，掃描此超音波探頭中央線上超音波激發狀態，結果如圖 5。此超音波探頭激發之最大振幅介於 6 nm~7 nm，且位移變化量小於 10%，中央部分所激發之超音波振動量趨近一致，直到探頭邊界振動量才降低其振動位移場符合平面波激發特性。

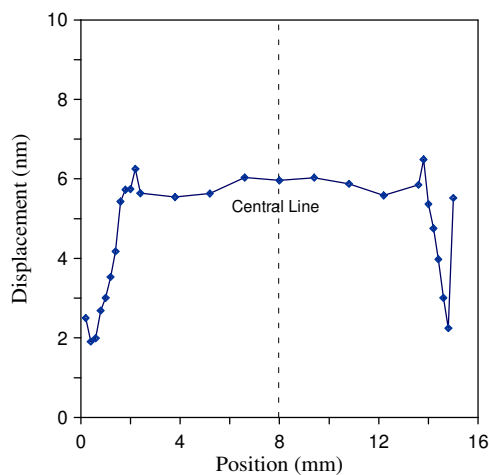


圖 5 超音波探頭中央線上激發位移量

## 六、結論

本文彙整德國 PTB 現階段以雷射干涉技術校正超音波標準系統之現況，並結合國內雷射干涉技術量測超音波聲場技術。由實驗結果可知，國家標準實驗室有能力利用相位法雷射干涉術量測奈米等級(小於 10 nm)超音波振動位移量，證明現階段量測技術能力，未來將建立超音波校正系統，進一步使用穩頻雷射增加系統光源穩定度，並計算系統不確定度，對於超音波校正系統之建立具有實質幫助。

## 七、誌謝

本研究承經濟部研究計畫編號 92-EC-17-A-99-R1-0377 經費補助，特此致謝。

## 八、參考文獻

- [1] IEC 61101, The absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz, IEC Publication 61101 (1991).
- [2] IEC 61161, Ultrasonic power measurement in liquids in the frequency range 0,5 MHz to 25 MHz, IEC Publication 61161 (1992).
- [3] IEC 61102, Measurement and characterization of ultrasonic fields using hydrophones in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz, IEC Publication 61102 (1991).
- [4] IEC 61847, Ultrasonics - Surgical Systems - Measurement and declaration of the basic output characteristics, IEC publication 61847 (1998).
- [5] Koch, Ch. and W. Molkenstruck, Primary Calibration of Hydrophones with Extended Frequency Range 1 to 70 MHz Using Optical Interferometry, IEEE Trans. UFFC, pp.1303-1314 (1999).
- [6] Lee, C. K. etc., A high Performance Doppler Interferometer for Advanced Optical Storage Systems, Journal of Japanese Applied Physics Vol.38, Part 1, No.3B (1999).
- [7] Liu, Y.-H., T.-T. Wu and C.-K. Lee., On The Calibration of Piezoelectric Transducers Using Laser Interferometer, The Fifth Far-East Conference on Nondestructive Testing (1999).