

微波雷達系統於 橋梁監檢測實務案例之應用

許耿蒼／朝陽科技大學非破壞檢測中心副主任

鄭家齊／朝陽科技大學營建工程系教授兼系主任

江支弘／朝陽科技大學營建工程系教授

摘要

微波雷達系統其特性為可即時監測橋梁之即時垂直位移量且施作時不影響橋面交通正常運行，為目前發展中之先進檢測技術，此技術與傳統監測儀器不同，不需先將監測儀器裝設於橋梁上，可採隨到即測、測後即走之方式針對重點橋梁或有結構疑慮之橋梁進行監檢測作業，本文將針對此技術使用於橋梁監測作業實務應用上做一介紹，文中將以兩座監測多年之橋梁進行案例說明，而檢測後之結果可供管理維護單位後續方案擬定之用。

前言

橋梁為國家土木工程基礎建設中重要的設施之一。台灣之河川一般而言具有下列特徵，河身短、坡度大、水流急，枯水期的時候水量小，常成為野溪，降雨時洪峰流量十分龐大並夾帶許多之土石材料，台灣又位處於地震帶中，因此島內之橋梁結構皆可能遭受如地震、颱風、洪水，等外力作用之考驗。近年於美國明尼蘇達州 I35 州際公路跨河橋在傍晚交通尖峰時刻，發生突然斷裂坍塌事件，以及國內在辛樂克、莫拉克颱風來襲期間導致包括后豐大橋在內、多座重要橋梁斷橋，造成民眾生命財產損失事件，諸如此類相關類似事件一再於國內外發生。

在另一方面為均衡區域發展，國內交通路網不斷發展，致使全國橋梁橋梁總數量也隨著交通建設的推

動而逐年漸增，台灣橋梁自新建高峰期迄今已將近 30 年，隨著橋梁邁入高齡化的時代，橋梁功能及服務品質因材料老劣化而下降，所衍生之老劣化問題日趨嚴重，為永續管理橋梁，各管理機關莫不注重橋梁檢、監測與維護管理之提昇。

據交通部統計，國內大小橋梁近三萬座，台灣地區橋梁面臨問題包括；基礎沖刷、材料老劣化以及耐震強度普遍不足，一旦發生颱風、地震或洪災等大規模天然災害時，橋梁倒塌或斷裂的機率無法忽視。因此須有中央單位統籌橋梁管理系統，對橋梁依其重要程度做定期監測列管，以因應未來橋梁風險管理、預算分配、緊急災害搶救等。

檢測與維修橋梁一般分為三個步驟；第一步先進行目視調查以了解各橋梁基本狀況，如發現被掏空、劣化及橋面板損壞等，再進一步作較詳細的鑑定。第二步是以各種儀器進行監測，進一步分析橋梁狀況後，如需要修補，再進行第三步必要的工作，如封橋、修復或補強。國內目前常用之整體監測工具包括在橋梁上安置速度規或加速度規藉由橋體震動來計算橋梁結構共振頻率、阻尼、振形或衝擊係數等，或者以應變計、位移計、光纖光柵、線性位移計等量測橋體的變形，但這些方法均需固定參考點或必須進行數值積分方才能獲得絕對變位且儀器架設較費時，而新近發展之非接觸式微波量測系統 (IBIS-S)，可多點監測並即時同步顯示結構體動靜態位移，其位移精度可達 1/10 mm ~ 1/100 mm，動態擷取頻率可達 200 Hz，足以完整紀錄一般結構的模

態頻率。儀器的優點在於設置及操作快速容易，且日夜各種天候環境均不會影響量測結果。

主要或特殊結構橋梁在完工前即埋設多種監測儀器，可做長期監測，但所費不貲。對於既有老舊或典型或中短跨距橋梁，安設監測儀器並不符合成本，僅由目視檢測難以直接判定橋梁的承載受損狀況，因此本量測系統由於架設容易，隨到即測，無須在橋上進行複雜儀器安裝的特點，可提供管理維護單位篩選需要安裝長期監測儀器橋梁的依據。研究團隊已量測多種不同型式橋梁，包括吊橋、箱型連續梁、脊背橋、預力混凝土簡支橋梁跨及其橋墩等，並在多次現場試驗後歸納出各反射點均能量測準確位移訊號的經驗法則，本文中將針對較具代表性之兩座連續監測多年之橋梁結構成果進行探討。

檢測原理與儀器設備

近年發展之變頻雷達波技術已應用於遠距多點動態位移監測，可在 1 公里範圍內多點監測並即時同步顯示結構體靜態或 500 公尺範圍內監測動態位移，其位移精度可達 1/10 mm ~ 1/100 mm，動態擷取頻率可達 200 Hz，足以完整紀錄一般結構的模態頻率。儀器的優點在於設置及操作快速容易，且日夜各種天候環境均不會影響量測結果。此技術所發展的儀器可檢測橋梁上部結構、橋梁墩柱、高樓建築、風車桿、塔樓、

電桿等結構體的動力特徵及受載重時的變形輪廓。國外已有相當數量之學術報告證明此技術應用於量測橋梁、風車、及高樓結構的可行性^[1-5]。以下就此技術的檢測原理，儀器的檢測參數以及此儀器在橋梁檢測的應用實例做一說明。

遠距微波動態位移測量儀（見圖 1）可發射階梯頻率的連續雷達波（SFCW, step frequency continuous wave），圖 2 為連續雷達波之波形及頻譜示意圖，每一組掃描訊號均發射含有 n 個固定頻率差 (Δf)，總歷時為 T_{tone} 的連續電磁波（圖 2(a)），訊號會造成總頻寬為 B 、頻率間隔為 Δf 之離散頻譜（圖 2(b)）。SFCW 訊號設計之目的如下：由於離散頻譜在反傅立葉轉換後乃是固定時間間隔的脈波，其時間間隔 T 為頻率間隔的倒數 ($1/\Delta f$)，而其每一脈波延時 (τ) 約為總頻寬的倒數 ($1/B$)，在雷達波發射路徑兩物件所造成的反射波不造成前後脈波因延時造成資訊混淆的最小距離即為空間解析度 (ΔR)，可由公式 (1) 計算，其中 c 為光速。在天線的波束範圍內（見圖 3(a)），每一個解析度範圍（Range bin）內物件的反射訊號，均可轉換為位移訊號同時紀錄。對橋梁而言，如圖 3(b) 所示，其天線 -3dB 能量範圍之視角 (α) 內任何有反射訊號的凸出點，其間距在空間解析度以上均可計算出精確位移，因此可描繪出位移的一維剖面輪廓。

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} \tag{1}$$



圖 1 遠距微波動態位移測量儀

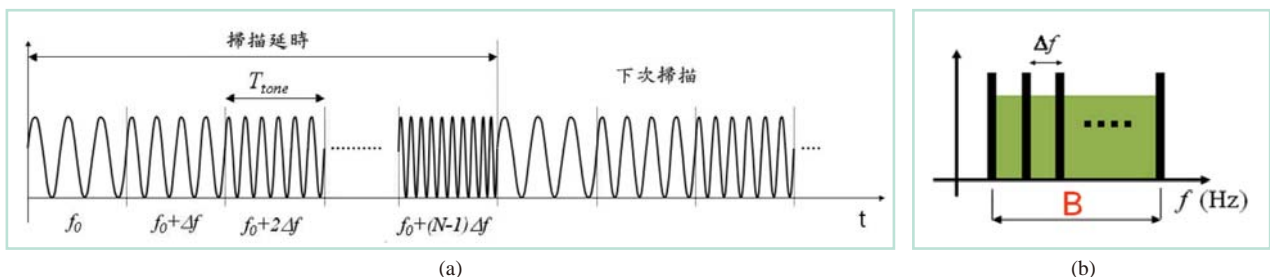


圖 2 階狀頻率連續雷達波之 (a) 波形及 (b) 頻譜示意圖^[6]

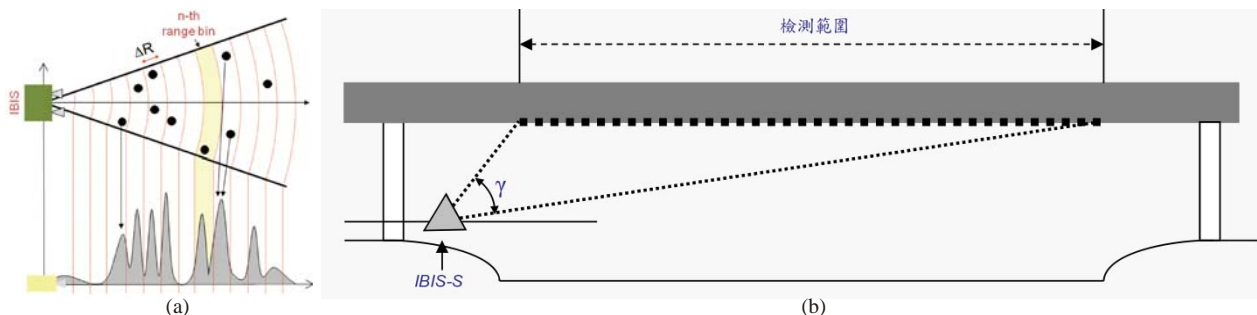


圖 3 雷達之 (a) 水平與 (b) 垂直有效檢測範圍 [6]

由於由物件反射的雷達波必須在上述之時間間隔 (T) 之內才不會與下一組到達的脈波相混，理論上可測之最遠距離 (R_{max}) 如公式 (2) 所示。

$$R_{max} = \frac{cT}{2} = \frac{c}{2\Delta f} \quad (2)$$

位移量測方面，每一個解析度範圍所回傳的電磁波均包含振幅及相位資訊，固定點的變位 (Δ_r) 是由時間解析間隔所記錄的相位差 ($\Delta\phi$) 計算，如公式 (3) 所示，其中 f_c 及 λ_c 分別為雷達的中心頻率及波長，因此本儀器位移的精度應不隨儀器與受測點之距離而改變，然而當距離變遠時，儀器的訊噪比會增大而影響到量測的精確性，通常訊噪比必須大於 40 其檢測資料才有可信度。此外，由於相位差超過 2π (360°) 時將無法計算出正確位移，因此由公式 (3) 可知當一個時間解析間隔之變位差超過 $\lambda_c/2$ ，將使正確位移無法辨識。舉例而言，目前市售儀器其 $\lambda_c/2$ 為 8.76 mm。

$$\Delta r = \frac{c}{4\pi f_c} \Delta\phi = \frac{\lambda_c}{4\pi} \Delta\phi \quad (3)$$

在橋梁檢測時，位移量測儀是放置於橋的正下方，如圖 4 所示，儀器量測的位移為天線發射視線方向反射之電磁波相位差所計算的位移 (d_p)，而此位移大部分是由橋梁垂直方向位移所造成，因此在儀器位置與橋頂距離 (h) 及儀器與反射點之距離 (R) 可由 IBIS-S 直接量測已知的狀況下，可由公式 (4) 計算橋梁真正垂直位移 (d)。

$$d = d_p \cdot \frac{R}{h} \quad (4)$$

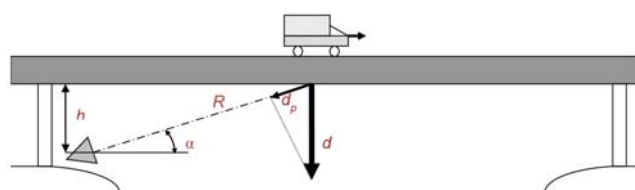


圖 4 遠距微波動態位移測量儀橋梁檢測之示意圖 [6]

本儀器的操作參數如表 1 所示，在實際檢測時首先設定 R_{max} 及 ΔR ，由公式 (2) 儀器即自動設定 Δf ，由公式 (1) 即可決定頻率帶寬 B 以及階狀頻率數目，此外必須量測儀器位置與橋頂距離 (h)，帶入公式 (4) 即可計算垂直方向位移。

橋梁監測實務案例

本章節針對兩座以微波雷達系統進行長期監測之橋梁做一說明，其中橋梁 A 為結構特性介於斜張橋與連續梁橋間之脊背橋，橋梁 B 為上部結構為懸臂設計之預力箱型梁橋，兩座橋梁研究團隊均針對其上部結構進行多年之監測作業。

脊背橋 — 橋梁 A

橋梁 A 結構形式為脊背橋，上部結構箱型梁體為 300 公尺之連續梁體，橋梁結構如圖 5 中所示，以遠距微波動態位移量測儀在正常交通所造成的環境激振 (ambient vibration) 下檢測箱型上部結構的動態位移訊號，以辨識箱型梁的振動模態振形、振態頻率。由於橋梁之箱型梁底平滑，沒有顯著的微波反射標的，

表 1 雷達操作參數規格

中心頻率 (f_c)	垂直方向 -3dB 範圍 視角 (α)	階狀頻率間隔 (Δf) 最大數目	最大模擬頻率 帶寬 (B)	最小模擬單一脈 波延時 (τ)	最大掃描延時
16.75 GHz	15°	2502	380 MHz	12.3 ms	30.76 ms

試驗時將自行研發的金屬三角錐形反射器伸出橋跨護欄並以 C 型夾固定於護欄上作為微波反射的規標，反射器規標間距約為 4 m，如圖 6 中所示，現地檢測時即可以微波雷達系統一次多點同時記錄到箱型梁之動態位移振幅值。本項檢測之取樣頻率為 103.07 Hz，總紀錄時間為 20 分鐘。舉例而言，圖 5 左跨檢測兩測線，圖 7 為試驗中其中三個反射器規標之時間位移關係曲線，其中 Y 軸為位移量，X 軸為時間，其中高低起伏的位移量即為正常交通時重量不一之車輛所造成，由於反射器規標之位置不同故所呈現之最大位移量也隨之不同，但可見其走勢大致上相近。

正常交通狀況所造成各反射規標動態垂直位移訊號是以 ARTeMIS 軟體中 FDD (Frequency Domain Decomposition) 方法加以分析^[1]，以辨識橋面板的振動頻率、模態振形。FDD 法是僅以輸出訊號作結構系統識別的有效分析方法，橋上交通載重所造成橋面板隨機性的輸入振動，在記錄時間夠長時，這些載重可視為每個頻率的機率均為 1 的環境激振 (ambient vibration)，利用檢測各點位移訊號之自能譜及互能譜求得能量譜矩陣，將每一個頻率能量譜矩陣作奇異值分解 (singular value decomposition, SVD) 即可取得此頻率的多重奇異值及各對應之奇異向量，在頻率接近

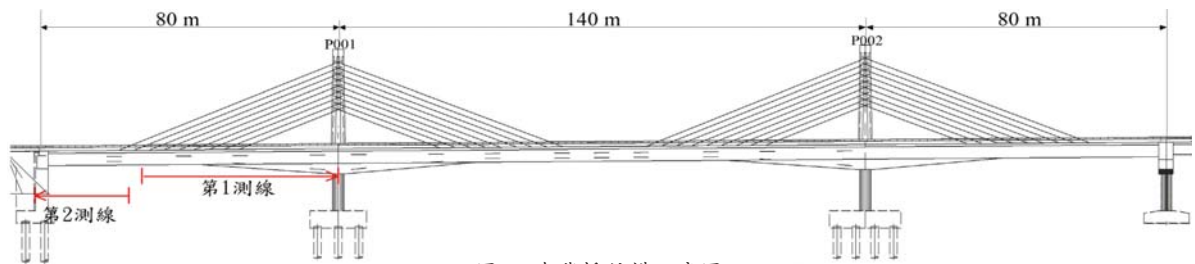


圖 5 脊背橋結構示意圖



圖 6 微波雷達系統現地檢測作業照片

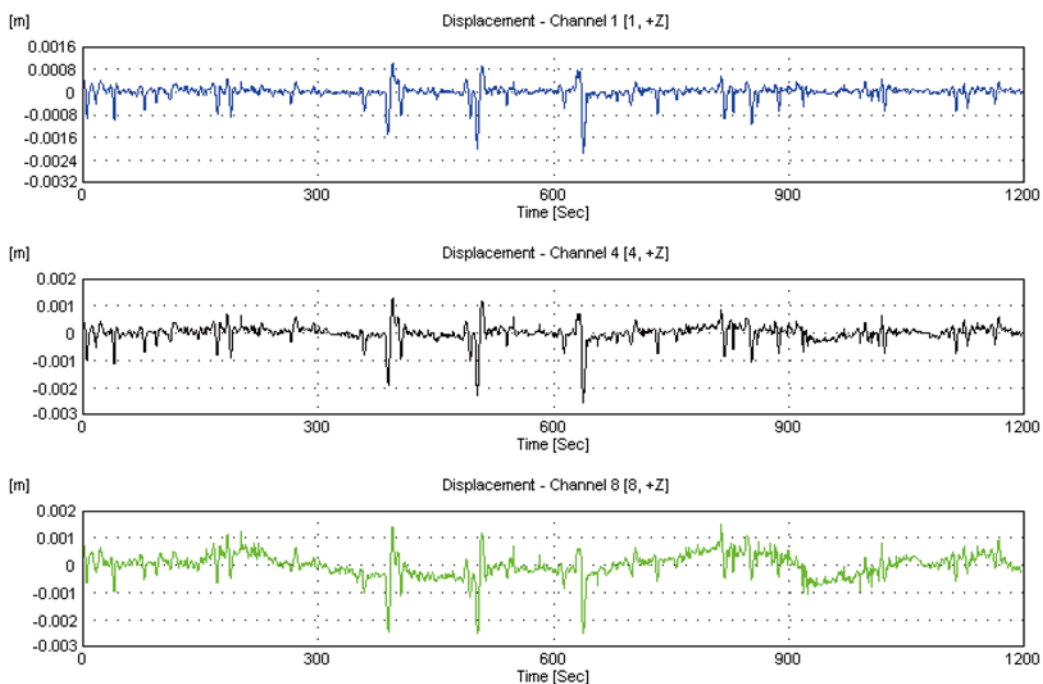


圖 7 反射規標時間位移曲線

結構的某個振態時，最大奇異值頻譜在振態頻率會顯示尖峰，其尖峰奇異值所對應之奇異向量通常即為其模態振形。上述兩測線位移訊號之最大奇異值頻譜如圖 8(a) 與 8(b) 所示，在頻譜可觀察到其最大奇異值頻譜之尖峰頻率大致上一致。

選定固定尖峰頻率，將測線之多點訊號以 FDD 法計算該頻率之模態振形，並將多條測線之振形相連接，可得到此頻率下橋跨的振形全貌。圖 9 為上述兩測線所計算之左跨所辨識的模態振形，圖 10 為全橋過去檢測所辨識的模態振形與橋梁數值模擬結果之對應圖。由圖 9 中可見 0.856 Hz、2.114 Hz 及 3.624 Hz 模態

頻率振形與相對應的全橋檢測所辨識的模態振形中 220 m 至 300 m 位置之橋梁振形均十分相似。

本座橋梁於 2010 年開始進行橋梁的監測作業，均是以正常交通狀況下紀錄各反射規標 20 分鐘的位移紀錄，將各期檢測之尖峰特徵頻率與其差異百分比整理於表 2 中，表中可見歷年來垂直向三個撓曲模態相關的頻率（0.856、2.114、3.624 Hz）監測的頻率變化差異量均在 3.4% 以內，由監測結果顯示本橋之檢測區域雖在監測期間檢測區域經歷四次 5 級以上之地震與 6 個強烈颱風考驗後，對本橋梁之結構之影響不大，顯示本橋梁仍在原設計結構安全範圍內。

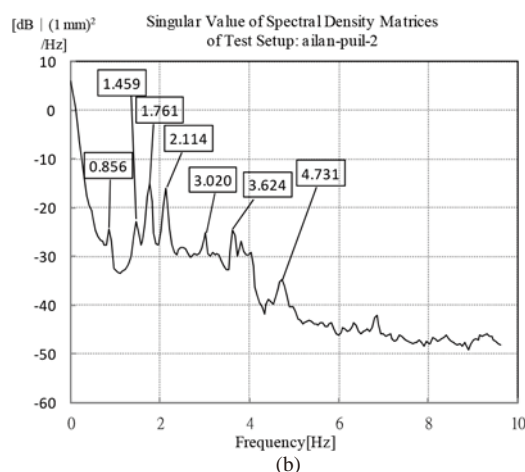
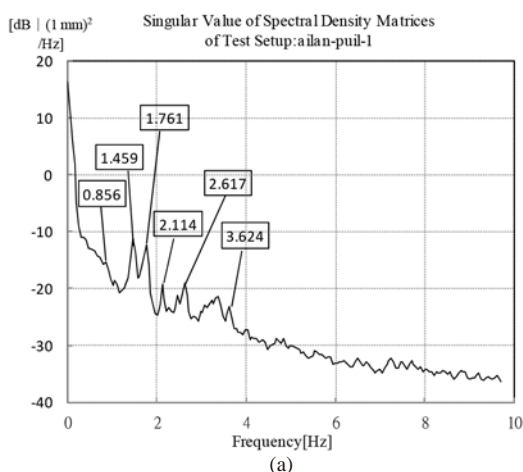


圖 8 各測線之最大奇異值頻譜 (a) 第一測線 (b) 第二測線

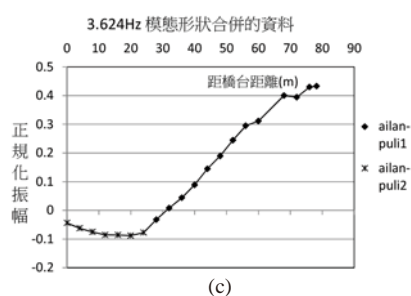
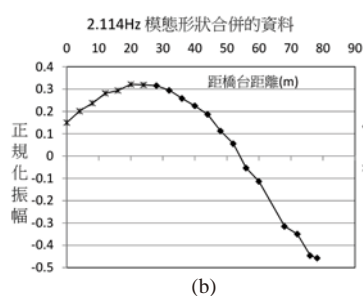
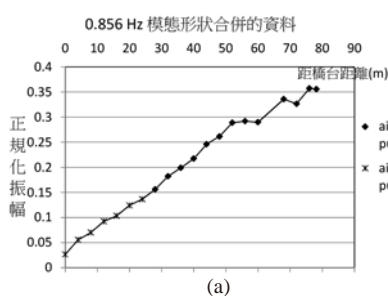


圖 9 本次量測各模態振形 (a) 0.856 Hz, (b) 2.114 Hz, (c) 3.624 Hz

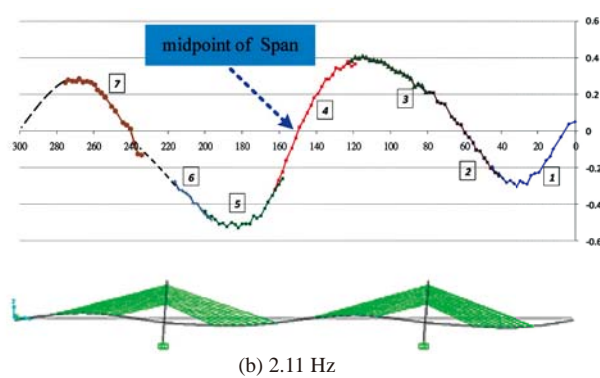
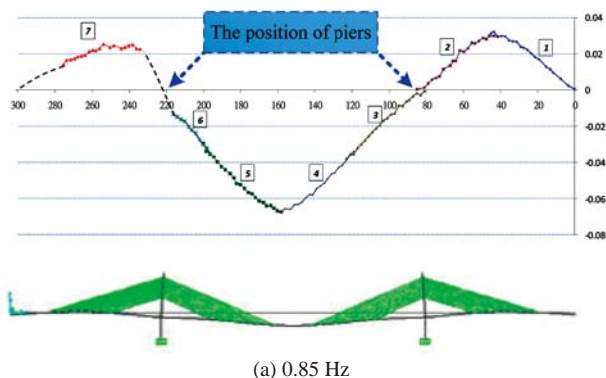


圖 10 微波雷達橋梁全跨量測模態振形與數值模擬比較圖 (a) 0.85 Hz, (b) 2.11 Hz

表 2 各測線最大奇異值頻譜之模態頻率比較

歷年測線監測		最大特徵值尖峰頻率 (Hz)						
		撓曲模態	扭轉振態	扭轉振態	撓曲模態	扭轉振態	撓曲模態	扭轉振態
第一測線	2010 年監測值	0.850	1.436	1.729	2.110	2.960	3.634	4.718
	2013 年監測值	0.856	1.459	1.761	2.114	-	3.624	-
	2014 年監測值	0.880	1.460	1.760	2.16	3.020	3.68	4.740
	2015 年監測值	0.872	1.482	1.744	2.180	3.052	-	4.796
	2013 年監測值差異百分比	0.71%	1.60%	1.85%	0.19%	-	-0.28%	-
	2014 年監測值差異百分比	3.41%	1.64%	1.76%	2.31%	1.99%	1.25%	0.46%
	2015 年監測值差異百分比	2.52%	3.10%	0.86%	3.21%	3.01%	-	1.63%
第二測線	2010 年監測值	0.850	1.436	1.729	2.110	2.96	3.634	4.718
	2013 年監測值	0.856	1.459	1.761	2.114	3.02	3.624	4.731
	2014 年監測值	0.880	1.480	1.780	2.160	-	3.680	4.760
	2015 年監測值	0.872	1.482	1.744	2.180	3.052	-	4.796
	2013 年監測值差異百分比	0.71%	1.60%	1.85%	0.19%	2.03%	-0.28%	0.28%
	2014 年監測值差異百分比	3.41%	2.97%	2.87%	2.31%	-	1.25%	0.88%
	2015 年監測值差異百分比	2.52%	3.10%	0.86%	3.21%	3.01%	-	1.63%

備註：差異百分比計算以 2010 年第一年之監測資料為基底進行計算

預力箱型梁橋 — 橋梁 B

橋梁 B 為雙向高架橋，上部結構為獨立單孔場鑄預力箱型梁，檢測範圍為橋頭至第一橋墩間共計 105 m，如圖 11 所示，由於兩行向高架橋上部結構過於靠近且均為曲橋，在行車時會產生翼板接觸造成局部破損，本橋經五年五次定期檢測，檢測目的在求取東行及西行高架橋的自然振動頻率、模態以了解雙向橋梁之振動的特性的變化歷程。

微波檢測亦是採用 IBIS-S 檢測系統，設置於高架橋翼板邊緣下方，並以多支金屬三角錐形反射器固定於橋邊護欄作為量測位移的規標，本儀器可於橋梁振動變形時，由三角錐所反射微波的相位差記錄，計算橋梁在該點之位移，三角錐架設於東行及西行高架橋外側，反射器間距均為 5 m，如圖 12 所示，其中東行高架橋以兩條測線量測，其編號為 E-1 與 E-2，IBIS 儀器均架設於橋墩所在地平面，西行高架橋則分三條測線量測，測線 W-1

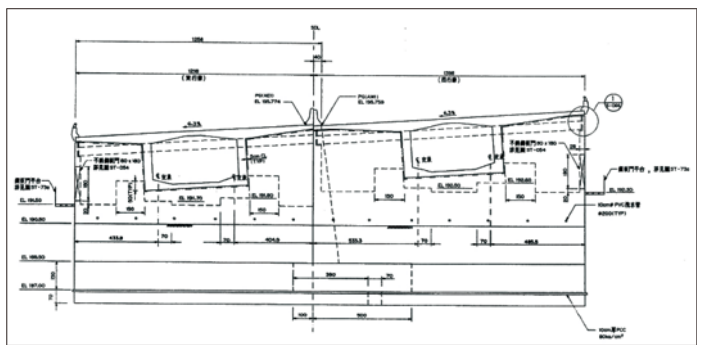
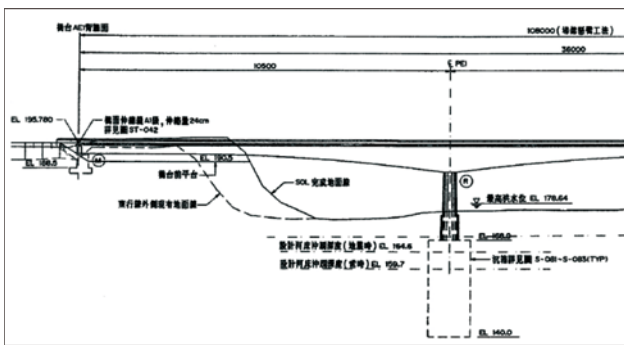


圖 11 (a) 橋梁側立面圖, (b) 橋梁前立面圖



圖 12 東行橋跨儀器設置照片；測線 E-1 與測線 W-1

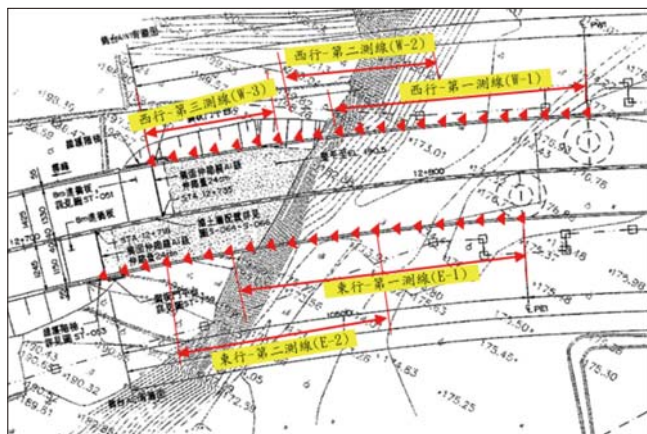


圖 13 角錐反射規標架設位置及測線布設位置示意圖

及 W-2 儀器架設於橋墩所在地平面，測線 W-3 儀器需架設於橋台整平處地面。

現場檢測時首先調整 IBIS 天線的角度，使天線高訊噪比的反應能延伸至最遠的範圍，但亦須考慮儀器

位置與橋頂距離及儀器與反射點之距離比 (h/R) 必須在 $1/10$ 以內又以 $1/5$ 以內較佳，儀器設定之最小空間解析度為 0.5 m ，訊號取樣頻率為 120 Hz 。量測是在正常交通狀況下進行，每一測線均紀錄 20 分鐘正常交通狀況下之垂直位移歷時。

各反射規標位置量測之車行橋梁振動如圖 14 所示，圖 14 為 W-1 測線上距第一橋墩水平距離 15 m 、 30 m 及 45 m 位置的位移訊號，可見當重車經過時會造成較大的位移，距離 45 m 位置反射規標較靠近橋跨中央，位移也最大，可達 -4 mm ，而距離 15 m 規標最大位移僅 -0.8 mm 。

正常交通狀況所造成各反射規標動態垂直位移訊號可再以 ARTeMIS 軟體中 FDD (Frequency Domain Decomposition) 方法加以分析^[1]，以辨識橋面板的振動頻率及模態振形。東行橋 E-1 測線及西行橋測線 W-1 不同位置的位移訊號以 FDD 法求取之最大奇異值頻譜分別顯示於圖 15 中並整理於表 3 與表 4 中，在頻譜可觀察到同橋

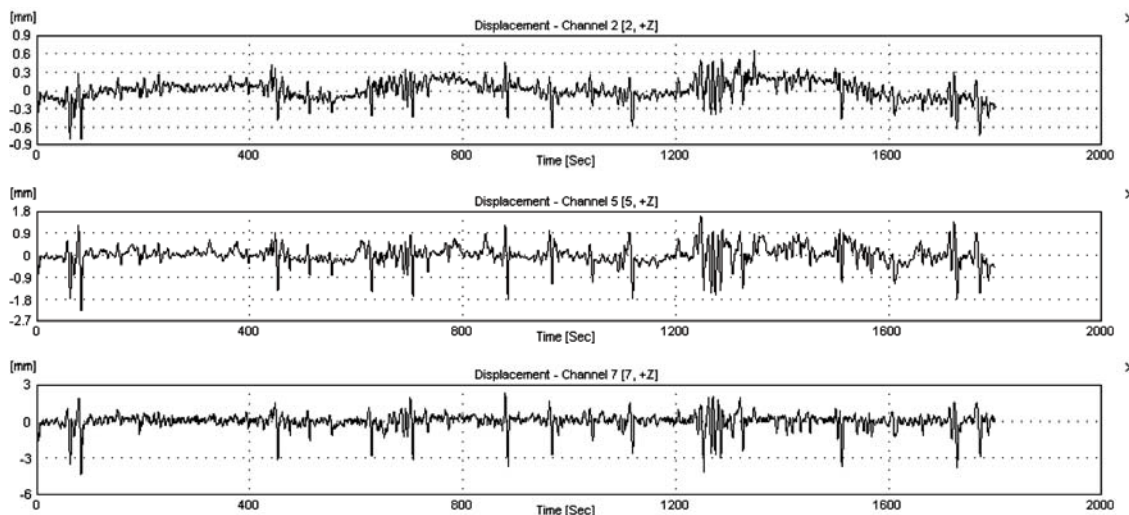


圖 14 W-1 測線距第一橋墩水平距離 15 m 、 30 m 及 45 m 位置的位移訊號

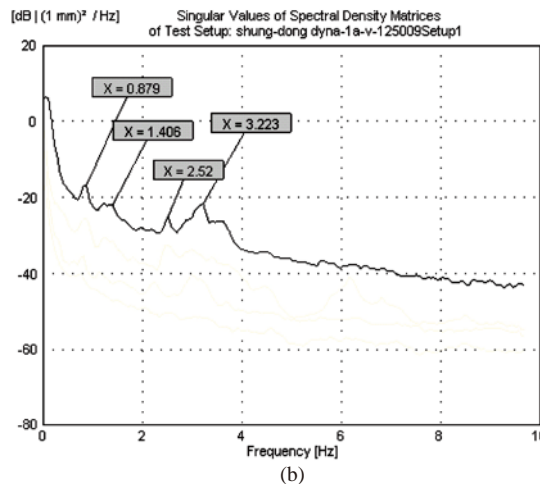
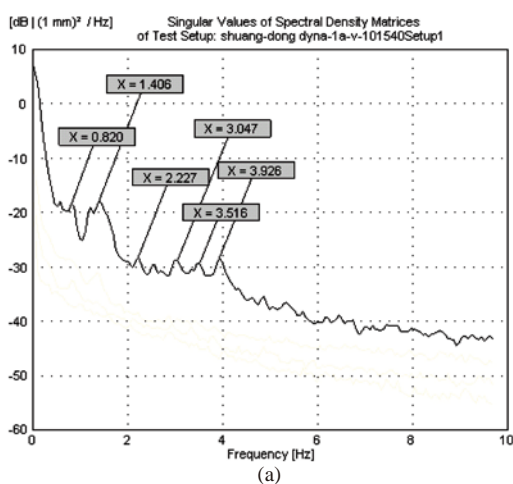


圖 15 最大特徵值頻譜 (a) 測線 E-1 (b) 測線 W-1

跨之最大奇異值頻譜之尖峰頻率一致，但不同橋跨頻譜尖峰頻率略有不同，將同橋梁各測線頻譜中同模態頻率所對應之特徵模態振形相連接，可得到此頻率在檢測範圍橋跨的振形全貌，如圖 16 中不同測線所連結之振形。

再觀察歷年資料中第一撓曲模態之頻率值經五年五次之監測後期監測頻率有逐年下降之現象，最多由第一年之 0.879 Hz 下降至 0.732Hz，頻率下降之百分

比最多達 16.72%，在確認橋梁邊界條件並無明顯之變化狀況下，顯著模態頻率之改變應與橋梁之質量、勁度、預力損失、完整性及邊界條件的變化有關，在近五年來之檢測數據，發現橋梁主要模態頻率有逐年下降之現象，亦代表上述性質有改變，因此建議本橋安裝儀器做長期監測，並進行有限元素分析探求影響模態頻率的關鍵損害部位。

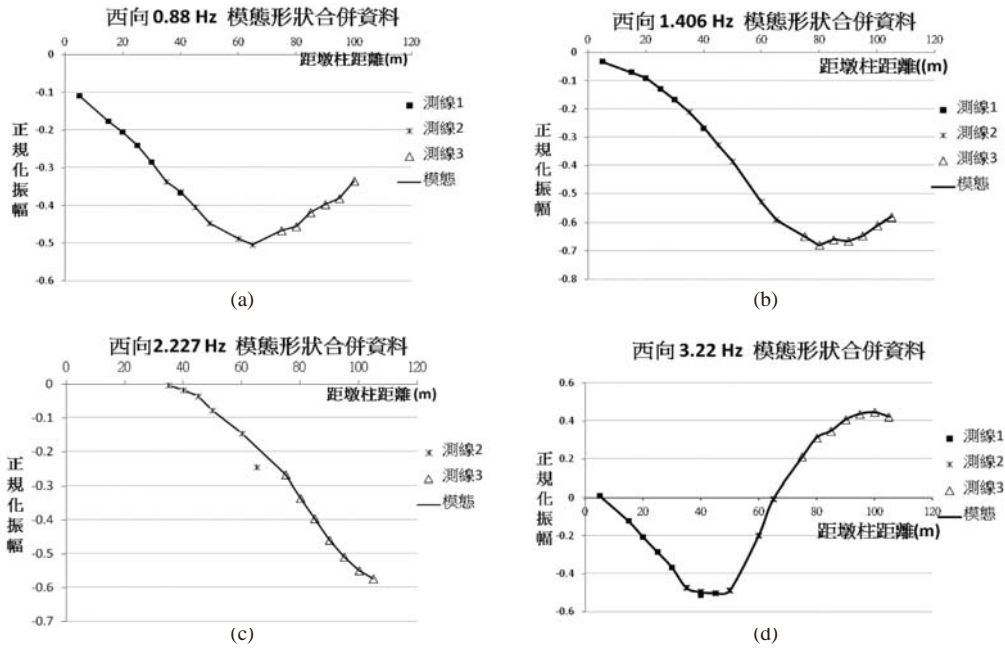


圖 16 西行高架橋可辨識模態振形 (a) 0.879 Hz, (b) 1.406 Hz, (c) 2.227 Hz, (d) 3.22 Hz

表 3 各測線最大奇異值頻譜之模態頻率比較

歷年測線監測		最大特徵值尖峰頻率 (Hz)				
		撓曲模態	扭轉振態	扭轉振態	撓曲模態	扭轉振態
W-1 測線	2011 年監測值	0.879	1.406	-	3.223	-
	2012 年監測值	0.856	1.359	-	3.120	-
	2013 年監測值	0.805	1.409	-	3.020	3.422
	2014 年監測值	0.800	1.400	2.120	3.020	3.380
	2015 年監測值	0.732	1.302	-	3.174	-
	2012 年監測值差異百分比	-2.62%	-3.34%	-	-3.20%	-
	2013 年監測值差異百分比	-8.42%	0.21%	-	-6.30%	-
	2014 年監測值差異百分比	-8.99%	-0.43%	-	-6.30%	-
	2015 年監測值差異百分比	-16.72%	-7.40%	-	-1.52%	-
W-2 測線	2011 年監測值	0.879	1.406	2.227	3.223	-
	2012 年監測值	0.856	1.409	2.214	3.171	-
	2013 年監測值	0.805	1.409	2.114	3.070	3.523
	2014 年監測值	0.800	1.420	2.120	3.060	3.480
	2015 年監測值	0.732	1.302	-	3.174	-
	2012 年監測值差異百分比	-2.62%	0.21%	-0.58%	-1.61%	-
	2013 年監測值差異百分比	-8.42%	0.21%	-5.07%	-4.75%	-
	2014 年監測值差異百分比	-8.99%	1.00%	-4.80%	-5.06%	-
	2015 年監測值差異百分比	-16.72%	-7.40%	-	-1.52%	-
W-3 測線	2011 年監測值	0.879	1.406	2.227	3.146	-
	2012 年監測值	0.856	1.409	2.214	3.171	-
	2013 年監測值	0.856	1.409	2.214	3.171	-
	2014 年監測值	0.800	1.400	2.120	3.080	-
	2015 年監測值	0.732	1.302	-	3.174	-
	2012 年監測值差異百分比	-2.62%	0.21%	-0.58%	0.79%	-
	2013 年監測值差異百分比	-2.62%	0.21%	-0.58%	0.79%	-
	2014 年監測值差異百分比	-8.99%	-0.43%	-4.80%	-2.10%	-
	2015 年監測值差異百分比	-16.72%	-7.40%	-	0.89%	-

備註：差異百分比計算以 2011 年第一年之監測資料為基底進行計算

表 4 各測線最大奇異值頻譜之模態頻率比較

歷年測線監測		最大特徵值尖峰頻率 (Hz)				
		撓曲模態	扭轉振態	扭轉振態	撓曲模態	扭轉振態
E-1 測線	2011 年監測值	0.820	1.406	-	-	3.516
	2012 年監測值	0.805	1.409	-	-	3.475
	2013 年監測值	0.805	1.409	2.114	3.221	-
	2014 年監測值	0.780	1.400	2.140	3.180	-
	2015 年監測值	0.732	1.465	2.035	-	-
	2012 年監測值差異百分比	-1.83%	0.21%	-	-	-1.17%
	2013 年監測值差異百分比	-1.83%	0.21%	-	-	-
	2014 年監測值差異百分比	-4.88%	-0.43%	-	-	-
E-2 測線	2011 年監測值	0.879	1.406	-	-	3.516
	2012 年監測值	0.856	1.409	-	-	3.473
	2013 年監測值	0.775	1.409	2.063	-	3.322
	2014 年監測值	0.780	1.400	2.120	-	3.360
	2015 年監測值	0.732	1.465	1.953	-	3.174
	2012 年監測值差異百分比	-2.62%	0.21%	-	-	-1.22%
	2013 年監測值差異百分比	-11.83%	0.21%	-	-	-5.52%
	2014 年監測值差異百分比	-11.26%	-0.43%	-	-	-4.44%
2015 年監測值差異百分比	-16.72%	4.20%	-	-	-9.73%	

備註：差異百分比計算以 2011 年第一年之監測資料為基底進行計算

結論

本文中以實務上兩個案例說明微波雷達系統針對橋梁監測的方式，第一個案例中的脊背橋在建造時已有安裝多種監測設備，但在通車後幾年間均損壞不堪使用。因此以微波雷達定期檢測箱型梁身模態頻率及振形，加速度定期檢測外置鋼鍵振動頻率評估鋼鍵預力的方式，亦可持續監測橋梁是否有變異的狀況。第二座橋梁在五年定期監測過程中有顯著模態頻率值下降之狀況，因此建議管理單位在橋上設置長期連續性監測儀器，並進行更進一步的數值模擬分析，來做更進一步之狀況釐清。此技術與傳統監測儀器不同，不需先將監測儀器裝設於橋梁上，可採隨到即測、測後即走之方式針對重點橋梁或非重點橋梁進行監檢作業，此外此技術除結構頻率與模態振形外，亦可於靜態及動態載重實驗中量測橋梁位移，此外本研究團隊亦在進行研發微波雷達系統應用於橋梁監檢作業的新檢測方法應用，以期許針對國內橋梁管理維護與安全評估工作盡一份力量。

參考文獻

- Z. Zhou, L. D. Wegner, and B. F. Sparling, "Structural Health Monitoring of Precast Concrete Box Girders Using Selected Vibration-Based Damage Detection Methods", *Advances in Civil Engineering* Volume
- M. Pieraccinia, F. Parrinia, M. Fratinia, C. Atzenia, P. Spinellib, M. Michelonic, "Static and dynamic testing of bridges through microwave interferometry", *NDT&E International*, 40, 2007, pp. 208-214.
- M. Pieraccinia,*, G. Luzia, D. Mecattia, M. Fratinia, L. Noferinia, L. Carissimib, G. Franchionib, and C. Atzenia, "Remote sensing of building structural displacements using a microwave interferometer with imaging capability", *NDT&E International*, 37, 2004, pp. 545-550.
- M. Pieraccini, F. Parrinia, M. Fratinia, C. Atzenia, and P. Spinellib, "In-service testing of wind turbine towers using a microwave sensor", *Renewable Energy*, 33, 2008, pp.13-21.
- M. Pieraccini, M. Fratini, F. Parrini, G. Macaluso, and C. Atzeni, "Highspeed CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures." *Electronic Letter*, 40, 2004, pp.907-8.
- Gentile C., Brnardini G., and Ricci P. "A New Interferometric Radar for Full-Scale Testing of Bridges: 2. Ambient Vibration Tests and Operational Model Analysis", *Proc. 12th Int. Conf. on Structural Faults & Repair (SF&R'08)*, Edinburgh, Schotland.
- Huang N.E, "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary time Series Analysis," *Nasa*. (Manuscript), 1996.
- Brincker R., Zhang L. and Andersen P., "Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition," *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference (IMAC)*, San Antonio, Texas, USA. Park, K.T., Kim S.H., Park H.s., Lee K.W., "The determination of bridge displacement using measured acceleration", *Engineering Structures*, Vol. 27, pp. 371-378 (2005)。
- Zhu X.Q., Law S.S., "Wavelet-basd crack identification of bridge beam from operational deflection time history", *International Journal of Solids and Structures*, 43, 2006, pp. 2299-2317.
- Yan Z., Miyamoto A. and Jiang Z. "Frequency slice algorithm for model signal separation and damping identification", *Computer and Structures*, 89, 2011, pp. 14-26.

