

臺灣東北部海域高頻雷達測流經驗談

王崑¹ 楊穎堅¹ 郭天俠¹ 王弼¹

鍾育仁² 崔怡楓³ 梁文德²

¹國立臺灣大學海洋研究所

²海軍軍官學校 ³海軍大氣海洋局

摘要

國立臺灣大學、海軍軍官學校與海軍大氣海洋局，三方自2010年起即合作在臺灣東北部蘇澳與漢本二地設置並長期維持了一組使用長距型CODAR系統觀測的高頻雷達海流監測站，除經由實地操作藉以學習、熟悉與完善高頻雷達海流觀測作業技術外，亦同步自行研發資料後處理系統程式、持續監測臺灣東北部海域海面海流、運用所累積的監測資料進行相關之海洋科學研究；此二站是以遠端遙控、無線網路資料傳輸以及不定期現場維護之作業方式運作迄今。臺灣海域地處亞熱帶，不論地理環境或是氣候條件均與中、高緯度地區頗有差異，是以CODAR系統作業手冊所述諸多準則往往未能完全適用，而需就本地之局地特性予以調整。例如作業手冊並未說明天線所能承受之極端天候條件；然六年來此二站曾經歷過多次颱風或惡劣天候考驗，蘇澳站雷達發射天線因強風或雷擊分別受損三次，漢本站接收天線亦曾遭颱風巨浪沖毀一次，由過往這些「破壞檢定」事例似可研判CODAR系統發射天線所能承受的最大風力(平均風)範圍應僅為13級以下(過此則易受損)，因此後者似可作為日後防颱作業時評斷是否應撤移天線之參考依據；又如低緯度地區電離層活動較活躍且電離層底之高度亦較低，是以長距型高頻雷達回波訊號受電離層干擾之影響便遠較中緯度地區為烈，且有效之海流觀測範圍亦會大為縮減；因此低緯地區，在CODAR資料後處理前，便有必要另外設計方法(例如可藉不良資料之時空範圍長期統計作為依據，將不良區數據預先剔除)以提昇後處理資料之可信度；另外為了現報或資料同化目的亦需建立合理方法藉以填補因資料品質不良所造成之空白遺漏或內插至不同間距網格內。本文係就上述二站過往之作業經驗，分別從測站選址考量、架站作業、系統維護以及觀測資料校驗、資料比對、空白區資料填補、內插等方面回顧一些實務經驗，中央氣象局日後若需開展高頻雷達海流觀測，規劃作業時或可將這些實務列為參考。

關鍵字：臺灣東北部、高頻雷達、海流觀測、作業經驗

一、前言

海流變化對海軍艦隊運動、反潛作戰、掃佈雷作業、海上救難、航行安全、搶退灘、兩棲作戰等活動均有影響，是以作戰區海況即時變化是海軍需要掌握的重要參考情資。目前對於大面積海表面海流即時監測最經濟的方法當屬海流遙測；岸基高頻測流雷達(如CODAR)即是一種有效的遙測工具，具有觀測資料空間涵蓋區域大(理想狀況下其觀測半徑範圍可達100海浬)、時間解析度高(可由每10分鐘密集觀測至1小時或數小時平均後輸出)之特點，當海流觀測資料數量累積夠多尚可進行統計分析及統計預報；另一方面即時監測資料亦可透過資料同化作為初始條件或邊界條件納入海洋數值模式進行海洋環境現報或預報以提供更為細緻的海洋環境資訊。

基於以上認知，臺灣大學海洋研究所、海軍軍官學校與海軍大氣海洋局，三方合作於2010年在臺灣東北部海岸蘇澳與漢本二地建置了長距型高頻測

流雷達CODAR監測站，並根據初步觀測統計結果在二監測站雷達共同照射區內選定了一塊資料品質相對較好也較穩定的海域作為海流觀測區，此二監測站自2010年起一直持續維持運作迄今。與國外相比，我國海洋學界接觸CODAR系統較晚(國外約已有約40年以上的使用歷史)，作為後進者我們除藉助實地架站與實際運作先行學習、熟悉高頻雷達海流觀測作業技術，並在累積作業經驗後適度調整、完善作業程序與系統參數外，同時也同步自力開發資料後處理相關程式系統，如此方能充份掌握適合我們自己海域的高頻雷達海流觀測作業技術。

臺灣海域地處亞熱帶，不論地理環境或氣候條件(例如颱風、高溫、高濕)均與中、高緯度地區頗有差異，是以系統製造商操作手冊中所列的一些作業準則(較適用於中、高緯地區)往往便未必能完全適用，而需就本地之局地特性加以調整。這六年來(由2010至2015年)蘇澳與漢本二站曾經歷過多次颱風侵襲或是雷暴惡劣天候考驗，各站雷達發射天線以及接收天線曾多次受損，此外系統附件，如GPS天線、調整

線圈(tuning coil)等，受本地高溫、高濕環境影響其劣化速度亦遠大於中、高緯地區，此二站過去的受損記錄統計與維修經驗可作為訂定作業規範以及評估運作預算及維護頻度之重要參考。此外，低緯度地區長距型高頻雷達回波訊號受電離層干擾影響程度遠較中緯度地區為大，因此在資料後處理過程中便有必要另外設計方法(例如以「好資料」出現率之長期統計為根據，藉以預剔除不良資料出現率過高區之數據)以提昇後處理資料之可信度；另外為了現報或資料同化目的，作業單位亦需建立合理方法，藉以填補觀測區內因資料品質不良、資料遺漏而造成之空白，或是需內插調整至不同間距之網格上。以下章節將就上述二站過往之作業經驗，分就測站選址考量、架站作業、系統維護以及觀測資料校驗、資料比對、空白區填補、資料內插等方面回顧一些實務經驗，以提供中央氣象局未來作業參考。

二、測站選址、架站作業

高頻雷達發出之雷達波會以地波(ground wave)方式向外傳播，遇到障礙物或崎嶇不平海面即會產生後向散射回波。海面上後向散射回波信號主要是由雷達波與海面粗糙度(即波長為雷達波波長一半之海面波浪)經由布拉格共振(Bragg Resonance)所產生。由於構成海面粗糙度的海面波本身便是週期性運動，因此雷達回波頻譜圖上就會在這些波所對應之頻率處顯示出能量尖峰。另一方面，若海面有流時，表面海流會對波浪(也就是海面粗糙度)造成都卜勒效應產生頻率偏移，因此當海面海流在雷達天線徑向方向上具有流速分量時，雷達波與海面粗糙度作用之後向散射回波信號中也會具有頻率偏移的效應，是以利用雷達所測得回波之頻移便可反算出表面海流大小(指雷達天線徑向方向上的流速分量)。由於流速為向量，需由二正交分量才能適度表達，然而一座雷達只能提供其天線徑向上各點海流遠離或接近的資訊，故通常必需結合兩座以上雷達的觀測資料才能正確表達出雷達共同涵蓋區域內的海流。

由以上簡述之雷達測流原理推知，高頻雷達海流測站宜設在視角寬廣之近岸地區，且天線距離海岸線越近越好(地波沿海面傳播之衰減率遠小於沿陸地傳播)，故設站條件受地形限制頗大。依臺灣東北部海岸線形狀來看，位於臺灣最東之三貂角是一處凸出海岬，因此顯然是極佳設站地點。另依CODAR原廠建議，二長距型CODAR雷達站彼此間之最佳距離(直線距離)應相隔80至120公里，因此三貂角以南大約80公里處之花蓮和平地區可考慮為第二站。是以規劃初期即假定在三貂角與和平設站，然而實施時發現現實與理想落差頗大，諸多困難需克服。

紙上規劃後接著是現勘作業，針對三貂角(馬崗)、和平二地區再細選若干地點，分別對土地所有

權、利用方式、周遭地形、地物相對位置、電力供應等因素進行調查與評估，另一方面又因CODAR設備昂貴，必須考慮保全問題，偏僻野外或人力難抵之處顯非適當地點，故站位選擇以有守望輪值之政府單位房舍優先；若無適當之公有地點，才考慮民間用地或私人房舍(然民間對無線發射天線普有疑慮，此想法目前仍不可行)。在這些限制條件下，馬崗附近各點遂被一一排除，而和平一地則因堤防與港區內眾多高聳建物會對CODAR地波傳播造成複雜的干擾效應，因此在試測作業後也被排除。最後南端測站改設在位於和平溪口北岸漢本之海巡署哨所，而北端測站則設在蘇澳海軍基地內之海軍大氣海洋局舊氣象站房舍(位於北方蘇澳燈塔附近小山丘)。

至於測站架設作業包括了天線架設(長距型發射天線與接收天線二者之水平間距需大於一個雷達波波長，約為60m)、天線底座下方鋪設地網、架設GPS天線(定時以及訊號同步用)、避雷裝置、各天線與主機機房之線路佈設，以及架站完成後尚需另對接收天線做天線場型校正等等，這些事項可參閱系統作業手冊與使用規範，在此不表。至於各分站之准即時觀測資料如何上傳至中控站合成為海流向量一事則涉及到網路架構，視經費以及當地電信環境而可有各種不同選項方式。蘇澳與漢本二站CODAR資料之傳輸係藉由無線3G網路，其資料傳輸、處理、入庫、展示等流程具體作法為：(一)使用3G無線網路，在中控站建立自動化排程程序系統，定時接收二站即時資料載入與備份。由於資料傳輸受網路頻寬影響甚大，當頻寬不足時往往發生資料漏傳或傳輸不完整，此時中控站即無法有效合成海流。因此，准即時資料展示及資料入庫作業係分別處理，其中後者採後處理方式作業；也就是(二)定期派員赴遙測站現場維修系統機具並下載完整之原始資料，攜回後再重新處理，經除錯、合成、統計、網格化後再行入庫；(三)待資料累積一定數量後另行備份、彙整送交海軍大氣海洋局(異地備份)。

准即時海流資料的傳輸、處理與展示均為全自動化作業，作業內容包括網頁伺服器、檔案伺服器以及資料庫伺服器、在網頁伺服器與中控站電腦間建立資料流自動連線程序等，均使用自行撰寫之相關程式或程式化腳本指令運作。基於成本考量，展示端伺服器係採用自由軟體LAMP(S (Linux + Apache + Mysql + PHP + SSL))架構，將中控站所收到由遙測站回傳之自能譜、自能譜訊噪比、遙測站徑向海流、合成表面海流等資料分別定時由網路傳輸至展示系統之檔案伺服器，在後者這端亦由自行撰寫的程式繪製出CODAR自能譜、合成海流、流場動畫與日平均海流等的分佈圖然後匯入網頁伺服器對外展示，海軍大氣海洋局則經由檔案伺服器下載最新的觀測數據參考使用。

三、系統維護

蘇澳與漢本二站自建站後即是以遠端遙控、3G無線網路資料傳輸以及定期與不定期現場維護之作業方式運作迄今。除了一些例行作業(如定期赴現場整理、保養機具、將系統硬碟內之原始觀測資料備份後清除、每年為各站至少做一次天線場型校正等)外，由於二站緊鄰海濱，發射與接收天線皆在室外，長期受高溫烈日曝曬以及高鹽高濕海風日夜吹拂，颱風期間或雷雨來臨時更有強風吹襲且有遭受雷擊的風險，維持系統正常運作有賴熟練的技術人員(熟知系統軟、硬體)以及電子技師密集監控，遇有狀況發生即先行研判並嘗試遠端排除(如僅為簡單狀況則可由電話聯絡當地值勤人員請其重開機以排除)，若不行則需不定期另赴現場處理。

茲舉一些實例說明現場狀況之多樣性。例如：2010年8月蘇澳站發射天線即曾不幸遭閃電擊中全毀(幸賴避雷隔離裝置保護了後端發射機未受損)；2012年6月漢本站系統電腦疑因現場電壓不穩導致硬碟毀損，緊急調用同款主機支援始得以持續觀測；同年8月蘇拉颱風過境後，蘇澳站接收天線訊號減弱，遠端監控發現發射強度低於設定值，現場檢查後查出係因調整線圈部份斷路，致使發射天線內反射過強而影響發射效率，經更換後修復。此外，週邊設備如外接式無線網路接收天線、3G路由器、GPS衛星天線等亦因長期處於高溫潮濕環境易損壞。又如2013年4月初，蘇澳站回傳之能譜資料顯示三支接收天線中有一支訊號微弱，現場查看發現Loop2鞭狀天線被強風吹落遺失且天線盒電阻值異常，攜回檢修又發現天線盒電路中尚有一射頻放大器IC亦故障，經急購IC新品更換裝回現場後恢復正常運作(若送回原廠維修則至少需三個月時間)。然2013年6月初，蘇澳站回傳之接收訊號能譜又漸漸變弱而至消失，疑似發射機未能正常發射，透過遠端檢視主機錯誤訊息記錄檔，發現發射機電壓先呈過低後又過高，導致機體溫度突然升高，之後便無法正常工作。現場檢查發現發射機電源正常，但主控板無燈號，且發射機功率放大器與散熱器皆無法正常啟動；攜回經多次反覆檢查與密集測試，證實為主機之blanking board和front panel board損壞，經向原廠急購二電路板新品更換後恢復運作。

蘇澳與漢本二監測站由2010年建站後至2014年間雖多次遭遇颱風來襲，但很幸運均未受到什麼損害，但去年(2015年)的蘇迪勒颱風(8月)以及杜鵑颱風(9月底)卻對二站造成了重大損失。首先看蘇澳站，蘇迪勒颱風過後，該站3G網路通訊天線遺失，甚至連接屋頂天線與機房通訊設備之線路接頭亦遭損壞；CODAR發射天線從中段調整線圈處攔腰斷裂倒塌，所幸發射天線上段因有四條纜繩緊緊，除鞭狀天線

遺失外餘並無大礙；接收天線盒則鞭形天線遺失兩支。至於漢本站亦不遑多讓，颱風過後蘇花公路完全中斷，8月17日技術人員改乘火車前往，但火車站與測站間之道路亦完全中斷，需徒步翻越沙坑始能抵達哨所建物，途中佈滿漂流木；當時中華電信線路中斷，附近基地台皆無法正常運作，故漢本站對外無線網路失效。哨所附近沙岸地甚被海浪掏空，近海岸的接收天線平台遭巨浪沖毀，後於500公尺外的灘頭尋獲接收天線盒；所幸發射天線尚好，但鞭狀天線全數遺失，哨所建物地基亦被掏空，近半地面均呈懸空。9月15日技術人員再赴蘇澳站重整雷達系統恢復正常運作。可是復工尚不及兩週，9月29日杜鵑颱風來襲，強風將蘇澳站機房外防颱板吹垮，玻璃窗被吹開；驟雨曾灌入室內導致致暫積水約10cm高，所幸排水順利，且機櫃朝內擺放、儀器皆架於高處，雷達設備未受波及；然無線通訊裝置受潮損壞；發射天線亦如蘇迪勒颱風時受損狀況，從調整線圈處齊腰折斷，鞭狀天線全數遺失，至於接收天線之中柱亦齊根而斷，所有鞭狀天線全數遺失。

	次數	總次數	備註
網路通訊問題	12	21	環境
用電、冷氣問題	9		
發射天線	8	28	硬體
發射機	8		
接收天線	7		
GPS天線	4		
遙測站主機	1		
颱風相關	7		天災
天線場型校正	6		例行

表一、蘇澳與漢本二監測站建站後(2010年)至2015年期間，維修項目與次數統計表。

根據上述受損狀況推知，CODAR系統發射天線可承受之最大風力(平均風)範圍應僅為13級以下(根據向中央氣象局颱風資料庫查詢結果，蘇迪勒颱風近中心最大風速為15級，杜鵑颱風則為16級，然二站過去亦曾受13級強風吹襲而天線並未折斷)，過此則會受損，因此似乎可將13級風力作為評斷是否應撤移天線之參考標準。蘇澳與漢本二站這六年期間之定保、維修項目與次數之統計參見表一，由該表可知二站最常發生的狀況是電力(偏遠地區供電品質不佳)與通訊(距基地台過遠，3G訊號不良，需加裝外接天線與強波器，但後二者需置於室外易受損)問題，其次則為天線與發射機，再次之則為GPS天線。六年中總計更換了五次調整線圈(其中兩次為被颱風吹斷，一次為雷擊，正常耗損為兩次)，作業經驗說明天線調整線圈平均在連續使用2-3年後即可能會斷路損壞

(但多可送回原廠維修，修復後仍可當備品使用)，因此各站均應準備至少一套作為備品。至於GPS天線易因日曬雨淋而故障(經加裝自製的防護罩後使用期限可大為延長)，鞭狀天線等亦常會因強風吹襲而受損或遺失，因此這些料件宜多置備品。總之，如欲提高觀測系統之作業妥善率，除上述各種半消耗性料件備品宜多置之外，在經費許可下最好亦能多添置發射機以及接收機至少各一台，如此出狀況時可迅速更換或是有利於檢修作業(原廠並不提供系統電路圖，系統硬體毀壞後若送回原廠必需依序排隊等候維修，需時甚長)；因備份硬體有助於故障事故時快速比對研判主機電路板中僅是部份元件受損或是電路板完全毀壞，可決定是否自行維修、僅將該電路板送修、或採購新品替換(或同步處理)，總之如此或可縮減維修時程，將對觀測作業之影響減至最小。

四、資料校驗、比對

高頻雷達觀測所得流速資料之準確性要如何校驗？由文獻知不外使用海面漂流浮標流速或是使用底碇ADCP量測之最上層流速作為比對參考基準。然不論使用何者，對於長距型CODAR而言，由於其徑向方向的解析度約為8公里，側向則為2度(在距測站50公里處，即相當於1.75公里)，如以距測站50公里之環狀域為例，長距型CODAR所給出該環狀域上任一單點之流速值相當於以該點為中心， $8 \times 1.75 = 14$ 平方公里取樣範圍內之平均值，也就是說這相當於水平低通濾波，對應之截止波長即分別約為16公里與3.5公里，試問想要在這麼大的取樣範圍內，得出可信的面積平均海流流速至少需要同步施放多少漂流浮標(或要佈放多少組ADCP)?顯然在實務上難度(成本以及人力)相當大，並不易行。以下我們簡述兩種間接、低成本作法；首先是利用流經臺灣東部沿海黑潮的長期統計做為比對根據，可用來校驗高頻雷達觀測長期平均值整體是否存在系統性誤差；其次則是利用網路上現有各種流經觀測區之GPS漂流浮標資料(並無法避免上述之資料空間代表性問題)，藉以驗證即時觀測之雷達測流資料的可信度。

首先看長期平均。黑潮雖具有各種週期的變化，但一般認知其長期平均值變化甚小且相對穩定，是以我們就利用這個特性來驗證蘇澳站與漢本站徑向海流的準確性。使用科技部海洋學門資料庫所收集，在東經120度至124度以及北緯22度至27度間範圍內，由1992年5月至2008年6月期間所有水深20公尺的船錠式都普勒流剖儀(Sb-ADCP)海流流速資料，將其網格化後取平均值再轉換成分別以蘇澳與漢本站為中心的徑向方向流速，以此作為比對基準。長期統計平均值之比對結果顯示由Sb-ADCP資料轉換出的平均徑向流速與由CODAR量測資料得出的平均徑向流速二者間相關性頗佳，使用線性迴歸處理，二

站之線性迴歸決定係數(R^2)均在0.7以上。換言之，以平均徑向流速而言，蘇澳與漢本站CODAR觀測之平均徑向流速與歷史海流資料之統計平均值十分接近，二者間具有甚高的相關性，並未呈現任何顯著的系統性偏差(詳見Fang et al. 2012)。

其次則為與漂流浮標之比對。自2011年4月蘇澳及漢本站正式運作起至2013年6月止，漂經觀測海域且資料品質為優的浮標共計64組，這些浮標資料係由美國國家海洋大氣總署負責資料品管與維護，各浮標代表之測量深度為水下15 m，釋出之浮標軌跡與相關參數的時間間隔為6小時。比對春夏季(3至10月)以及強東北季風或冬季(11月至2月)流經觀測區之浮標軌跡分佈，以及軌跡對時間微分後所得之水下15 m流速與雷達所測流速(相當於水下1 m流速)知，無論冬或春夏季節，CODAR測得之流速在遠離測站的觀測區東邊界邊緣處與浮標漂流速度差異較大，其原因或許與資料處理方法有關(該區域是處在CODAR觀測範圍邊緣，因此將CODAR資料內插至浮標點位時，因僅能利用最東邊幾個觀測格點之測值進行內插或外插，誤差易被放大)。比對結果顯示春夏季節間浮標速度遠較CODAR觀測流速為大，但冬季則二者差距較小，這種季節性差異猜測或許與源自於宜蘭灣近岸水域的低鹽份沖淡水之水平分佈有關。整體而言，儘管雷達表面海流流速量測結果普遍較浮標漂流速度為小，但其流速數值相對較為穩定且不會隨時間發生劇烈變化。至於流向方面，二者流向多集中在東北方向，並無明顯的系統性差異(詳見Kuo et al. 2014)。

五、資料填補、內插

高頻雷達海流觀測作業常受環境雜訊或是電離層干擾等影響，尤其是低緯度地區電離層活動較活躍且電離層底之高度亦較低，是以長距型高頻雷達回波訊號受電離層干擾之影響便遠較中緯度地區為大，且有效之海流觀測範圍亦會大為縮減，經常會造成觀測區內出現海流觀測值缺漏的情形(方盈智等2012)。噪訊干擾造成蘇澳及漢本站海流觀測資料平均缺漏率約在6%以下(陳俞彰等2013)。如何有效填補觀測缺漏以及資料同化是海流監測作業化階段前必需先解決的問題。資料填補可以採用各種內插，或是統計方法，以下簡介兩種實用作法，其一是使用經驗正交函數(EOF)展開，另一則是以開邊界模(Open Boundary Mode, OBM)作為基底展開，前者只能用以填補固定網格資料之缺漏，後者除可用於填漏外更可用於任意網格之資料同化或內插，甚至還可推估出測站基線海岸外觀測死角海域內的流場。

使用EOF展開法的先決條件是必需已累積有足夠長期(至少要超過一年)的觀測數據，我們採用實向量方式，將觀測區內所有觀測點網格(N點)之二維流

速向量時序資料以 $2N$ 個元素之行向量來表示，再求出此行向量中各元素分量間的協方差矩陣以及所對應之特徵值和特徵函數，後者即構成隨後實向量EOF展開所用之模組。由蘇澳、漢本二站CODAR一年半的海流資料經濾潮後計算出實向量EOF模組，並以能量最大的前20個模組(可解釋流速資料總變異量96%以上)作為展開基底。另外則選用一組獨立的一個月觀測數據作為檢驗根據，採用Monte Carlo法以人為方式隨機「創造」資料缺漏情形(被人為屏蔽的資料則假設為真實值)，再以EOF為基底，用最小平方方法從有缺漏之資料組估求出各模組之振幅，然後再重新合成得出缺漏點之流速並與真實值比較；實驗結果顯示，當資料缺漏率小於57%時，此法填補所得流速之均方根誤差小於7 cm/s，但當缺漏率大於71%時，誤差即呈指數成長而不可用(陳俞彰等2013)。

接著再看OBM法的基本原理與作法。海流運動需滿足連續方程式 $\nabla \cdot \vec{u} = 0$ ，式中 $\vec{u} = (u, v, w)$ 為三維流速向量， u, v, w 分別為沿 x, y, z 座標方向上的流速分量。由於任意一個三維的流速向量 \vec{u} 可用兩個純量函數之運算來表示(Lipphardt et al. 2000)，即 $\vec{u} = \nabla \times [\hat{k}\Psi] + \nabla\Phi$ ，式中 \hat{k} 為 z 方向上的單位向量；將此式代入連續方程式後可得 $\nabla \cdot \vec{u} = \nabla^2\Phi = 0$ (1)，另外亦可得出垂直流速 $w = \hat{k} \cdot \vec{u} = \partial\Phi/\partial z$ (2)，以及相對渦度 $\nabla_H^2\Psi = -\hat{k} \cdot \nabla \times \vec{u} = -\zeta$ (3)，而(1)式又可另寫為 $\nabla_H^2\Phi = -\partial w/\partial z$ (4)。(3)、(4)二式之解包括齊次與非齊次二部份，其中前者可用無限階特徵函數正模(Normal Mode)展開(4式之齊次解對應非旋性海流，根據所用之邊界條件特性可稱為Neumann modes；3式之齊次解對應旋性海流，稱為Dirichlet modes)，後者則需根據邊界條件再行求解；如果觀測區為封閉海域，則所有邊界為同一條流線，此時齊次解即為完整解；若邊界包括有開口邊界，則需給定邊界流入流域之流量才能求出非齊次解部份；然而後面這句話說來容易但實際上要預先給定是有相當難度，OBM法(Kaplan and Leikien 2007)便是針對此問題應運而生的解法。簡言之，OBM法主要精神是應用富立葉級數的特性來求解非齊次部份(3、4二式只需擇一求解即可；見Lipphardt et al. 2000)；雖然沿著開口邊界的入流量為未知，但此入流量(邊界條件)可以用富立葉級數展開，也就是(4)式等號右方的項可以用未知係數之富立葉級數展開來表示，於是(4)式又可以再按富立葉級數中的每一項折解出一個對應的Poisson方程式，後者即可用數值方法來求解，這樣得出的解即稱為邊界模(Boundary Modes, Kaplan and Leikien 2007)。正模與邊界模構成了一組滿足流體連續特性的完整基底，觀測區內海流資料便可用此組基底來展開。

OBM法實際運作需先設定好計算之流域範圍(包括海岸、島嶼以及開口邊界)，然後將流域網格化再藉數值方法求解流域的Neumann modes、Dirichlet modes以及Boundary Modes。我們係採用有限元素法去求出設定流域對應之各正模

以及邊界模，然後將各模函數均內插到CODAR觀測網格上，再應用最小平方方法，根據CODAR合成後的海流資料(TUV)，求出各模函數之振幅，得出振幅後便可再合成求出流域內任意格點上的流速。然而OBM法並不限定只能處理CODAR合成後的海流資料，也可以直接使用CODAR所測徑向海流資料(RUV)來合成海流場，對比於CODAR系統使用影響圈範圍內之局地徑向資料來合成海流(故可稱為局地去)，上述這種用OBM法的合成方式則可稱為全域法。

六、討論與建議

在前四節中，我們根據蘇澳、漢本二站過去六年間的操作與維護經驗，分別從測站選址考量、架站作業、系統維護以及觀測資料校驗、資料比對、空白區資料填補、內插等方面具體回顧了一些實務作法。在測站選址與架站作業方面首要考量的當然是要找一個有可行性的地點，此處環境背景電波噪訊干擾要越小越好(且天線位置要離海越近越好，天線四周要開闊平坦，盡可能遠離人工建築物等)。過往的選址經驗告訴我們，紙上作業是一回事，現勘以及現場試測更重要，這三個步驟是三位一體，缺一不可。如果所選場站位置電波環境不良，雷達量測結果便往往會在許多量測角度方向上呈現出資料品質很差或壞資料出現率過高的情形，這點是無法靠事後改善硬體設備或在後處理時靠軟體系統就能完善解決的，因此選一個好的地點遠勝過事後硬體改善。特別是測站附近的電波環境可能會變動，因此每年至少要為各站做一次天線場型量測，這是必要的工作。

架站後真正的考驗才開始。以遠端遙控、無線網路資料傳輸以及定期與不定期現場維護是可行且成本較低的作業方式。由於觀測站緊鄰偏野海濱，電力品質往往不佳，而發射與接收天線又皆置於室外，無法避免高溫、高濕以及高鹽腐蝕環境，颱風期間或雷雨時會被強風吹襲或遭雷擊，種種風險均會威脅到系統運作，實際維持作業有賴一批熟練的技術人員以及電子技師支援，這些人員需要在建站前即加以適度培訓。另一方面系統妥善率之維持亦有賴預先儲備一些半消耗性的元件(如調整線圈、鞭狀天線、GPS天線等等)。又，雖然事後根據損壞事件研判，CODAR發射天線可承受之最大風力(平均風)應當為13級以下，並建議可依此作為颱風來襲前考量是否撤除天線之依據。不過，計畫往往趕不上變化，第三節所述去年(2015年)兩次颱風造成的損壞便是如此，原因出在「距離」；雖然我們可以用遠端遙控方式監看現場運作狀況，但卻無法用遠端遙控來撤除天線，這兩次事件都是等到颱風警報明確而決心要撤移天線時，然而此時蘇花公路已封閉，而蘇澳基地亦無法進入，颱風期間工作人員除祈禱外別無他法。當然如果我們在颱風尚遠時便提前撤除天線那一定可以減少硬體損失，但是如此一來必然

會犧牲觀測時間，因此這是一個兩難問題。或許我們不妨將防颱SOP稍做修改，如果對測站有侵襲可能的是中度以上的颱風，那麼晚撤不如早撤；如果只是輕度颱風那就不妨賭一下，可以不撤。

當觀測資料數目累積夠多後，便應當統計分析該站壞資料出現率之時空變化，藉以了解可能受環境噪訊影響的程度與狀況，透過這些或許可以對資料後處理時如何提升資料可信度有所幫助。其次要做的則是觀測資料校驗與比對工作。在第四節所舉的兩個實例均是充份運用背景海流場—黑潮的特性，其一是利用黑潮的長期統計做為統計比對的根據，其次則是利用各種流經黑潮區之GPS漂流浮標資料以驗證即時觀測之雷達測流資料的可信度。如果測站位置正好不在黑潮流軸附近(例如位於臺灣西岸)沒法用到黑潮海域這些特點那又該怎麼辦？如果測站附近海域潮流不弱，利用潮流(臺灣附近淺海區潮流預報可以做得很準)來做雷達觀測資料之校驗、比對基礎也是完全可行的作法。

由於背景干擾影響無法完全避免，觀測區內常會出現資料缺漏；另外在二雷達站連線的近岸海域，由於二雷達射線夾角過小無法合成海流，也會有一塊範圍相當大的觀測死角。關於資料填補我們在第五節介紹了兩種作法，其一是使用最小平方方法與實向量EOF展開，在資料缺漏率小於57%時，如此所得之填補值與「真實值」之均方根誤差甚小，填補效果很好。但此法只能用於固定網格且至少需已有一年以上的實測資料作為計算實向量EOF模組基底之統計基礎方為可行。另一種作法則是根據觀測海域之幾何形狀求出理論的正模以及邊界模，然後藉這些模組基底，以最小平方方法求出各模之振幅後，再重新合成算出觀測海域中任一點之流速向量。

以理論模展開的作法不單可處理TUV資料，也可以根據RUV資料自行合成流域內任一點的海流向量，第五節將後述這種由理論模合成的方法簡稱為全域法，而CODAR系統本身之海流合成作法則稱作局地法；局地法與全域法二者之優缺點比較如下：(一)局地法所需系統預設工作較少，全域法預設工作則較繁複。(二)當資料量夠多且在觀測海域內分佈均勻時，兩種方法均能給出合理的海流場，但全域法能解出位於雷達站基線海岸附近的流場，局地法則否。(三)當資料數量過少且分佈偏近雷達站附近時，局地法仍能給出一些仍可信的合成海流，但全域法則否。(四)若只有一站徑向流速資料時，全域法仍可使用，不過對遠距海域估算海流之可信度較低(甚至很低)，局地法則完全不可用。(五)局地法在每一網格之估算誤差會不一致，全域法之誤差理論上對每一網格點應為一致。(六)同理局地法所估出海流場所反映之水平尺度在全域中會不一致(接近雷達站資料較多且每點所代表之取樣面積會較小)，全域法則應較為一致。

(七)以全域法合成或同化後的海流資料能滿足流體連續性之要求，但局地法則未必。

在理想情況下(資料量夠多且在觀測海域內資料分佈均勻時)，全域法確能使用。研究團隊目前仍在持續發展全域法，此法在徑向海流資料篩選、模組選用、合成海流資料所代表之水平尺度估算、海流估算誤差以及信賴區間等方面仍有許多工作待加強。總之，全域法在概念上確有可行性，同時也具有很多局地法無法做到的特點(例如可充分運用到局地法雷達測流死角區內的徑向海流資料，並得出可信的流速值)，但要發展成為日常作業工具，在實務上猶有很多工作待做。

參考文獻

Chen Y.W., Y.J. Yang, and J. Wang, 2014: A study on data filling from incomplete dataset of HF radar measured ocean currents — A case study of the flow field Northeast of Taiwan: Data filling from incomplete ocean currents dataset. In OCEANS 2014 - TAIPEI (pp. 1-4). IEEE.

Fang Y. C., J. Wang, and Y. J. Yang, 2012: Surface Current Measurement Using HF-Radar off Northeastern Taiwan: Preliminary Result and Validation. 1st Ocean Radar Conference for Asia, Seoul, Korea, 45-48.

Kaplan, D.M. and F. Lekein, 2007: Spatial interpolation and filtering of surface current data based on open-boundary modal analysis. J. Geophys. Res., 112, C12007.

Kuo T. H., Y. C. Fang, J. Wang, Y.J. Yang, and W.D. Liang, 2014: Surface currents observed by the HF radar Northeast of Taiwan. In OCEANS 2014-TAIPEI (pp. 1-4). IEEE..

Lipphardt, B. L. Jr., A. D. Kirwan, Jr., C. E. Grosch, J. K. Lewis, J. D. Paduan, 2000: Blending HF radar and model velocities in Monterey Bay through normal mode analysis, J. Geophys. Res., vol. 105: no. C2, pp. 3425-3450.

方盈智、王冑、楊穎堅、郭天俠、唐存勇，2012：運用高頻雷達觀測臺灣東北海域表面海流及其資料品質與準確性之探討。101年天氣分析與預報研討會，臺北，429-434。

陳俞彰、王冑、楊穎堅，2013：高頻雷達觀測流場補缺值問題之探討—以台灣東北部海域為例。第35屆海洋工程研討會論文集，國立中山大學。