

地面海象遙測技術之研發

盧鴻復¹ 吳朝榮¹ 徐月娟² 麥如俊²
國立臺灣師範大學地球科學系¹ 中央氣象局海象測報中心²

摘要

海象雷達遙測技術利用高頻雷達波作為觀測媒介，遙測的對象包括波浪以及表面海流。根據海水運動的不同特性，採用不同的遙測技術，突破過去現場觀測在時空上的許多限制，對於增進吾人了解近岸海洋波流環境可謂大有助益。其中遙測系統的驗證工作格外重要，在建置時期仍需藉由現場觀測資料的輔助，用以增進遙測系統之準確度、可信度。如何善加利用遙測資料亦為遙測技術中需納入考量的一部份，若搭配具備完整動力過程的海洋數值模式，將已驗證且可信的海象遙測資料送入數值模式進行資料同化，自然可彌補雷達遙測資料在空間分布方面的缺憾。因此在運用雷達海象遙測技術的同時，一併採行合適的資料同化技術亦是不可或缺的一環。

關鍵字：海象遙測、高頻雷達、ROCOS、CODAR

一、前言

台灣週遭區域海氣象環境複雜，民眾生活與週遭海域息息相關，人民與政府對於週邊海洋環境的了解求之若渴。近年來，政府大力推動海洋休閒遊憩活動包括沿海遊憩設施、藍色公路、海上活動等等，無論民間或是政府單位，對於海象資訊的需求更是大幅增加。以往單純的海象資訊早已無法滿足現今的需要。要獲得準確的海象資訊，在沿海廣設海象觀測儀器是最佳的方法之一，然而由於受限於經濟上的考量或其他限制，現場測站並不易全面設置。故採用先進的地面海象遙測技術來獲取即時的海象資訊，便是一個值得發展的嶄新方向。

使用地面海象遙測方法來進行近岸海象觀測，除了可以長期地、連續地、即時地獲得觀測資料之外，更可兼顧儀器設備之維護、保全等工作。地面海象遙測技術利用雷達波為媒介，隔空探測一定範圍內之海表面波場與流場特性。波、流場遙測資料在時空分布上，具有空間二維、時間一維之性質。且雷達遙測採主動式測量，雷達波不受時間、日夜、氣象等因素影響，可達成長時間、全天候觀測之作業能力。將以往「點」的海洋觀測推進至「面」的海象遙測，實為一極具發展潛力以及具有先進技術之海象觀測方法。

此外所收集的遙測資料，除了可以提供即時的海象資訊，更可以搭配資料同化技術進入台灣週遭海域的數值模擬，可以增進海象預報的準確度。此類研發工作可提升我國海象測報能力以及掌握台灣週遭海域的海象特性。

海象遙測技術之遙測對象包含波浪和流，波浪遙測研究目標為建立微波雷達海象遙測示範站；海面流況遙測研究目標為研究CODAR雷達海流遙測資料，建立資料處理架構與技術，並整合至中央氣象局海象監測網。

海象遙測資料整合後，可以再進一步將遙測資料與海流數值模式結合，一方面可以擴大遙測資料的區域，也可以提昇數值海象現報模式之準確度，結合數值模式與遙測資料的關鍵技術通稱為資料同化(data assimilation)。雷達遙測雖可獲得直接的海象資料，但是難以取得較大觀測面積、以及海平面以下的資訊；另一方面，數值模擬流場可以涵蓋所有時間和三度空間海域，同時也是相對便宜的，但模擬流場是否正確也需要靠實際量測資料來驗證，也就是說，兩者各具優缺點。由於實測資料可以反應最新的流況，若能將實測資料融入數值模式中，將會提高模擬流場的準確度，這也就是國際間發展資料同化技術的主要誘因之一。

資料同化模式與傳統數值模式最主要的分別，在於前者將觀測資料與數值模式兩者做整合，去求最佳化的預報結果。可考慮將高頻雷達所測的海流資料同化進入一個三維的海流數值模式，並期待以其結果和現有船測或錨碇之海流資料作比較，找出最佳的模擬結果。

二、遙測原理

現行雷達遙測理論大概最早可追溯至Crombie (1955)有關海面反射雷達散射訊號的研究，Crombie發現靠近海邊所記錄的高頻雷達訊號會與所發射的

雷達波有微小的都卜勒頻移(Doppler Shift)，並且認為這是由於海上的波浪對於雷達波產生布拉格散射(Bragg scattering)效應所致。之後Barrick對雷達測波的一系列研究(Barrick, 1971、1972)，確定反射波譜中第一階波能強度可以決定群波之波長及波向，其一、二階散射理論也驗證以高頻雷達應用於海洋實驗的正確性。

所謂的布拉格散射，如圖一所示，當海面上的運動波浪波長恰好為雷達波長的二分之一時，則會產生強烈的反射雷達波。波長一旦確定，利用深水波相速度公式便可得出波速。圖二是典型的反射波譜，反射波譜主要是由海面上的運動波浪所提供，其中包括了第一階的能量峰值以及次階的峰值。Crombie(1971)提出藉由計算前後兩次的反射波譜都卜勒頻移量，便可以推算出徑向上的流速。

綜上所述並簡言之，雷達所發射出的電磁波會與海面粗糙構造發生散射作用，而後向散射強度又與海面構造物之物理性質有密切關係，因此吾人可根據雷達回波訊號來反算、估求海面粗糙度分布，從而得出海面一些物理量之分布特性，如波高、水流等。

三、海象雷達遙測系統

(一)雷達測波系統

民國八十八年台大海研所自力開發、製作波浪觀測儀器，稱作「雷達海象觀測系統」(Radar Ocean Climate Observation System, ROCOS)。經過多年的實驗與驗證，ROCOS被證明具有監測現場波浪之功效。ROCOS系統主架構包含一座船用雷達、一部個人電腦、以及一組台大自行設計製作的控制電路等三大部分，系統架構如圖三。船用雷達部分是使用Furuno FR-8251型六呎天線雷達系統，個人電腦可採用Pentium II 600Mhz CPU 以上等級Windows系統之個人電腦，並隨電腦作業系統平台升級而在硬體上也一併提昇。目前採用Pentium4以上等級CPU，並於Microsoft Windows XP系統上安裝ROCOS操控作業軟體。控制電路部份主要包含一個12 bit採樣速率為10 MHz的A/D(類比/數位)轉換器。

中央氣象局海象中心出資租用ROCOS系統乙套，並經過選評地點，目前架設於台東成功三仙台海海岸，借用海岸巡防署東部巡防局美山哨站屋頂安裝系統，圖四為該處天線照片；控制系統與主機則安裝於該哨站一樓穿堂，照片如圖五。雷達掃測範圍為距雷達天線半徑5.76km之半圓區域，計算子區為1.92x19.2km之方形區域，如圖六所示。

系統設定每20分鐘採樣一次，雷達波掃測海面，連續擷取32張雷達影像，並取其中之計算子區

將回波強度透過轉移函數推得波浪能譜。再依據波浪離散關係式計算出波浪特性參數資料，例如波高，波向，週期。

此外，在ROCOS系統中，立刻將原始回波強度資料壓縮儲存，連續影像則合併成為雷達回波影像動畫檔與平均圖檔，藉由ADSL網路與雷達參數資料一併回傳遠端控制中心，可作為展示與資料備份之用。

(二)近岸高頻雷達測流系統

美國海洋大氣總署(NOAA)自1971年開始發展近岸高頻雷達測流技術，迄今已發展成著名之商業產品，利用高頻雷達波隔空遙測海表流場。根據使用雷達頻率之不同，最遠可掃測200公里以內海域。近岸高頻雷達系統依其雷達天線陣列設計之不同可分為CODAR(Coastal Ocean Dynamics Application Radar)與OSCR(Ocean Surface Current Radar)，由於近岸高頻雷達測流系統所費不貲，國外方面雖早已進入實際大量應用階段，然目前國內僅有海軍大氣海洋局擁有大約十多年前所購入之數套CODAR系統。

近岸高頻雷達測流需要藉由兩套以上之雷達收發設備相互覆蓋掃測海域，才得以計算出流速、流向。原因是海上波狀介面之移動可另雷達波產生都卜勒效應，反射波的頻率會隨著的遠離或靠近而改變，藉此可推算出相對的移動速度。然此流速僅限於徑向上之流速，無法得知相對於地理座標之速流向，故需用兩套以上之設備取得不同徑向上之流速再加以合成方可得到具備流向之表面流速資訊。

四、海象遙測觀測結果與資料處理

(一)雷達測波系統

自去年七月以來位在台東成功之ROCOS系統已採樣12267次，根據去年與今年之逐月資料(未展示)與氣象局之波浪浮球比較顯示：去年雷達資料由於系統建立之初，仍有許多系統不穩定之因素(大多數是外力影響)導致資料漏失；今年度則有改善。就波高方面來看，雷達遙測所得結果對應浮球資料於高低峰值處皆有不錯對比，對於季節性北方大氣鋒面南下所造成的波高變化可有一定程度的掌握。去年度與今年度雷達遙測與波浪浮球二者之波高點聚圖分別如圖七、圖八；未率定之波高線性迴歸關係，分別為：

$$H_{\text{bouy}} = 1.3164 + 0.3845 \times H_{\text{radar}}$$

$$H_{\text{bouy}} = 0.69581 + 0.5607 \times H_{\text{radar}};$$

相關係數分別為 0.23、0.60。兩者的比較顯示，收集足夠的觀測資料可在某些程度上提高遙測資料的準確度。但是再與過去 ROCOS 系統於台北港的測量結果相比，相關係數卻略有不足，顯示台東成功海象雷達遙測站仍有需要調整之處。

主要方法可以改進波浪轉移函數，先藉由數組有波高較大情形海面之實測波浪波數能譜建立轉移函數，或者是由大雨期間之波浪實測資料改進轉移函數，便可更加提高海象遙測系統的準確性。

改進轉移函數之步驟如下：

1. 依所選取之較大波高時間之雷達測波影像與同步實測之波浪儀觀測數據，分別求出對應之波浪(一維)波數能譜(k)以及雷達波數能譜($R(k)$)，將二者相除以得到轉移函數之倒數 $T^{-1}(k)$ 。
2. 依照所得之 $T^{-1}(k)$ 之曲線分布，使用單或多區段以近似方法獲得 $T^{-1}(k)$ 之經驗式。
3. 依所得之 $T^{-1}(k)$ 之經驗式將以往所測之雷達能譜反算出波浪能譜，繼而計算出各種波浪參數(如波高、週期、波向等)。

又或者可以提出波高率定公式，將雷達波浪參數資料進一步與實測波浪資料進行迴歸統計，取得率定公式。

獲得率定公式之步驟如下：

1. 因波浪傳播需遵守離譜關係式，因此將由雷達波譜轉換為海面波浪譜後，依離譜關係式將能譜中與波浪場最相關的成分篩選出來並求得其方根值(R_s)。
2. 此 R_s 與波高成正比，故可由實測示性波高資料以統計方法，求得波高之率定公式。如台北港之率定公式(王等，2003)為：

$$H_{1/3} = 0.65991 - 2.4093 \times 10^{-4} R_s + 4.7377 \times 10^{-6} R_s^2 - 7.4388 \times 10^{-10} R_s^3$$

(二) 近岸高頻雷達測流系統

我國海軍大氣海洋局雖早在十餘年前便已購置 CODAR Seasonde® 系統，然受限軍事設備之使用限制並無法合作使用其 CODAR 系統之硬體設備或觀測數據，因此僅能採用可取得之有限 CODAR 觀測資料，撰寫電腦程式，建立後端處理程序與軟體環境。

針對 CODAR 資料處理流程，CODAR 資料處理之數據為來自美國 Monterey bay 之 ICON 研究觀測資料，資料時間為 2004 年 6 月 8 日全天 24 小時之觀測資料，至今已完成程式開發並規劃以下列流程進行處理。

1. 資料檢核

- (1) CODAR 資料密度(未展示)
- (2) 資料網格分布(未展示)

2. 資料展示

- (1) 遙測流場展示(圖九)
- (2) 流場時間變化展示(圖十)
- (3) 平均流場展示(未展示)

3. 統計分析應用

- (1) 網格資料良率分布(未展示)
- (2) 流速誤差統計(未展示)

五、資料同化模式

資料同化技術是沿岸海洋預報系統之中一個重要的部分。運用同化海洋資料的方法，可以使得海洋預報模式持續不斷地更新初始條件。近年來，近岸高頻雷達在沿岸海洋監測系統上的發展突飛猛進。以現在技術來說，近岸高頻雷達已經可以用來即時地觀測表面海流，在 2 至 3 公里的解析度下，其觀測距離可達離岸 50 公里處。如此強力的觀測系統在沿岸海洋預報方面可以說是極具潛力的一項工具，但是如何將此觀測所得之海流資料應用在模式當中，卻也是一項非常具有挑戰性的工作。

在資料同化的方法當中，有一種是將雷達所測得之海表流況資料以假剪應力(pseudo-shearing stress)的方式取代模式的表層資料(Lewis et al., 1998)。此種資料同化方法可以在某些程度上重現 CODAR 觀測所得到的情況，但是此種同化方法接近所謂的 nudging 法(nudging technique)。在此種資料同化方法中，並無法模組化以及考慮觀測誤差協方差(observational error covariance matrix)與模式誤差預測協方差(model error prediction covariance matrix)。

我們將建構一個可以應用表面海流測量資料的流體動力模式，該模式模擬的區域是在台灣的週邊海域，並且會使用了經過改良的最佳化內插方法(Optimum Interpolation scheme)，此方法是以實體空間統計分析系統(Physical-space Statistical Analysis System)(Cohn et al., 1998)為基礎研發而來。在這個方法中，上述的兩個誤差協方差也將被列入考慮。

除了將表面海流資料同化入模式表層以外，模式還必須能夠將表層的訊息經由某些物理或動力的方法向下傳遞。也就是說這個資料同化的方法必須要建構在動力理論之上，並將海洋表面的資訊「投射」至次表層海洋之中。因此可以利

用表層流速經資料同化後的修正量以及艾克曼理論來推算次表層海流修正量，此種修正量的計算方法不僅合艾克曼理論且可將表層流速修正量向下層傳遞，而此結果將與渦流黏滯度或相對應的艾克曼深度有關。

六、結語

海象遙測技術可謂之先進科技，尤以國內現況而言更屬起步階段。如何提昇系統之準確度，自然是首先要面對的問題，但更值得吾人思考的是，更多的資料量往往代表更複雜的後續處理與應用問題。本文簡單說明目前國內由中央氣象局海象中心負責的海象遙測研發工作現況，主要的工作包括1.建立雷達測波站、2.雷達測波資料處理、3.CODAR資料處理軟體開發、4.海流資料同化模式開發。至於其他邊際工作受限於篇幅，則在此省略不談。希望此研發工作能夠起到拋磚引玉的作用，引發未來更多的後續相關研究，並且希望能夠提供更加多元與豐富的海象資訊予產官學研各界參考。

七、參考文獻

- Barrick D. E. (1971), Dependence of Second-order Sidebands in HF Sea Echo upon Sea State, IEEE G-Ap International Symposium Digest, Sept. 21-24 Los Angeles, California, pp. 194-197.
- Barrick D. E. (1972), First-order Theory and Analysis of MF/HF/VHF Scatter from the Sea, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-20, 2-10.
- Cohn, S. E., A. da Silva, Jing Guo, M. Sienkiewicz, and D. Lamich, 1998: Assessing the effects of data selection with the DAO Physical-space Statistical Analysis System. Monthly Weather Review, 126, 11, 2913-2926.
- Crombie D. D. (1955), Doppler Spectrum of Sea Echo at 13.56 Mc/s, Nature 175, 681-682.
- Crombie, D.D. (1971), Backscatter of HF radio waves from the sea, Electromagnetic Probing in Geophysics, J.R. Wait, ed., Golem Press: Boulder, CO., pp. 131-162.
- Lewis, K. J., I. Shulman, and A. F. Blumberg (1998): Assimilation of Doppler radar current data into numerical ocean models.

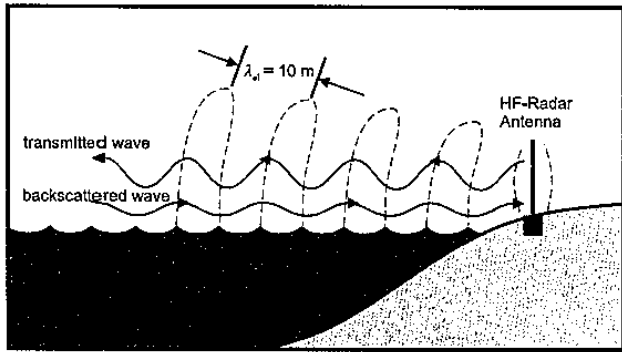
Continental Shelf Research, 18, 541-559.

Lipa, B.J. and D.E. Barrick (1983), Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSLOE, IEEE J. Oceanic Engr., vol. OE-8, pp. 226-253.

王青、邱永芳、蘇青和(2003):九十一年台北港雷達遙感波浪監測研究，交通部運輸研究所臺灣技術研究中心。

[Http://www.codaros.com/index.htm](http://www.codaros.com/index.htm)

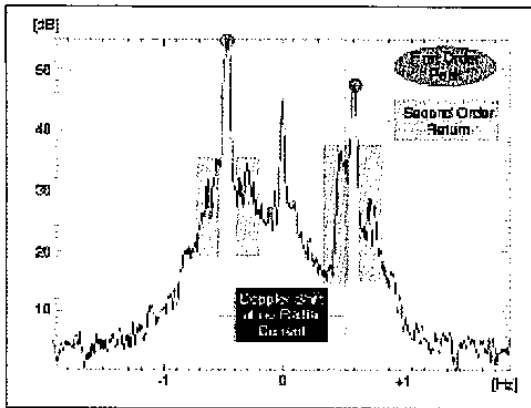
[Http://www.oc.nps.navy.mil/~icon/](http://www.oc.nps.navy.mil/~icon/)



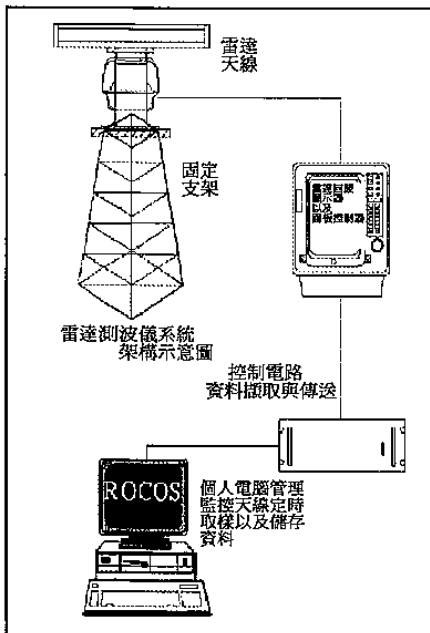
圖一、布拉格散射示意圖



圖四、雷達天線安裝完成照片



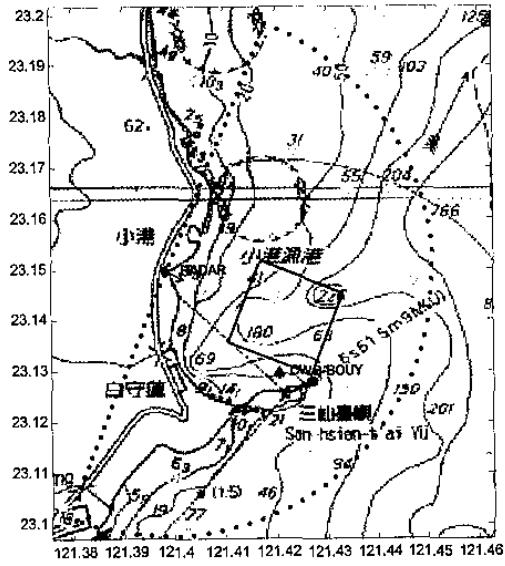
圖二、典型反射波譜



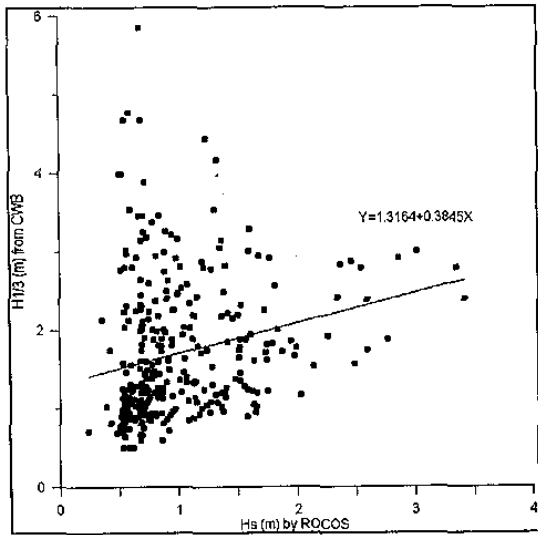
圖三、ROCOS 系統示意圖



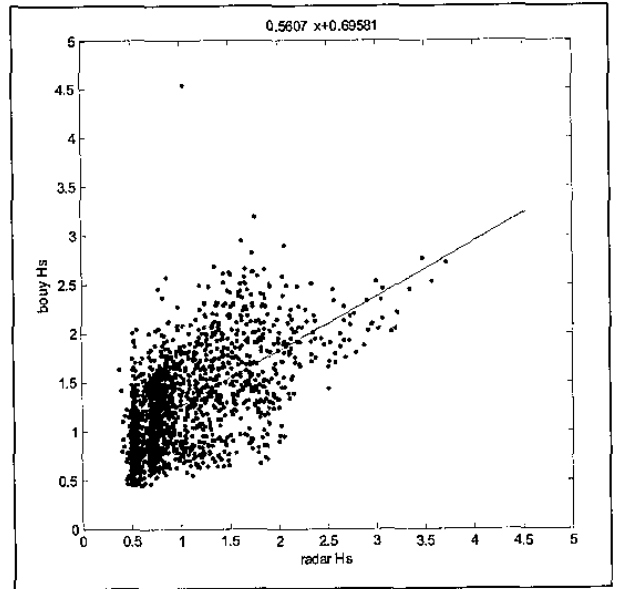
圖五、雷達監控主機與控制單元



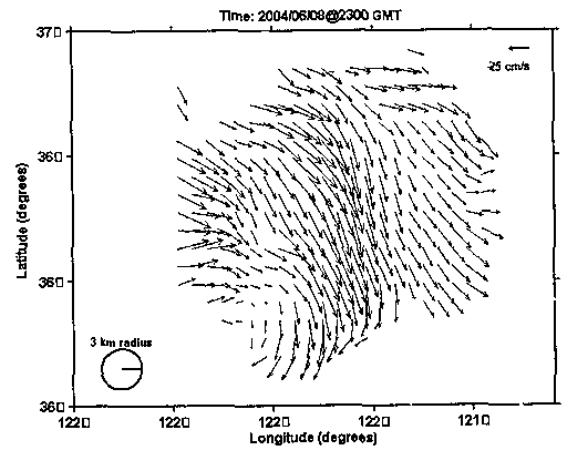
圖六、台東成功海象雷達掃測與計算子區範圍



圖七、2005年雷達與浮球波高點對點圖



圖八、2006年雷達與浮球波高點對點圖



圖九、CODAR 遙測流場分布圖

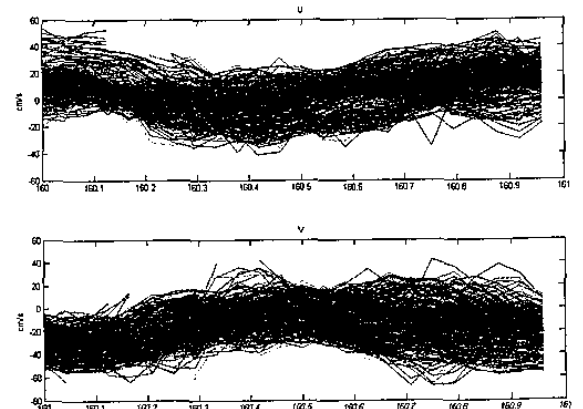


圖 10、流速分量逐時變化圖