

# 從高頻雷達陣列天線訊號解算流場之研究

吳立中<sup>1</sup>      莊士賢<sup>2</sup>      黃清哲<sup>1</sup>      邱永芳<sup>3</sup>  
近海水文中心<sup>1</sup>    海洋科技與事務研究所<sup>2</sup>    港灣技術研究中心<sup>3</sup>  
國立成功大學      交通部運輸研究所

## 摘 要

利用高頻雷達技術獲取海面流場資訊是一種極具潛力的海洋環境遙測方法。高頻雷達的訊號解算包含有兩大關鍵技術，其一為從所接收到的回波訊號解算出都卜勒能譜(Doppler spectrum)，再從能譜的尖峰頻率偏移量反算出海面流速；另一項關鍵技術則是從陣列雷達天線所接收之回波訊號進行訊號方位角辨識演算之技術。由於相關的關鍵技術大多被國外廠商視為商業機密而無法對外公開，本文嘗試針對高頻雷達前述兩項關鍵技術進行研究討論，並從中建立自主之訊號分析演算技術，藉以更完整窺知雷達遙測資料的演算關鍵。

關鍵字：高頻雷達、陣列天線、流場遙測

## 一、前言

隨著陸地資源的逐漸匱乏，海洋所蘊含的豐富資源已漸成為人類生存發展所須仰仗的重要憑藉。然而海洋環境險惡多變，是人類涉足海洋首要面對的課題。海流是一種複雜多變的物理現象，必須透過長期的監測方能掌握其特性。海流資訊不僅為海洋物理研究的重要依據，同時在實務應用上，也對海上救難支援、海洋污染事件處理以及政府海洋政策之制定等均有相當之貢獻。台灣位處全球最大洋以及最大陸域的交界處，是東亞島弧的重要樞紐。本島四面環海，東部濱臨太平洋；西部面向台灣海峽；北部海域與中國大陸的東海相接；南部則與巴士海峽相鄰。此一特殊的海洋環境，再加上大氣、地形以及天候等條件之影響，致使台灣周圍海域的流場特徵相當複雜多變。

海流監測可分為直接的現場量測與間接的遙感探測兩種方式。其中遙測是用影像攝取或是以電磁回波量測之方式取得觀測目標區的環境資訊。由於遙測並不需要將觀測儀器直接放置於海上，可有效減少儀器遭受到海洋環境外力的破壞，被視為研究海洋的利器。各種海流遙測技術中，衛星及航空方式的海洋遙測已有二、三十年的發展，現已發展出從衛星攝得之海面資訊中萃取出海面流場的方法(Crocker et al., 2007)。然而在飛行高度、儀器解析度及飛行再訪率等多重因素的限制下，諸多海洋研究與作業化觀測需求目前尚無法以衛星或飛機達成。

頻率在3-30MHz之高頻雷達測流技術因可較不受到日夜變化以及降雨影響的限制，且能進行大範圍海域的觀測，是目前國際間使用的主流技術之一。利用高頻雷達設備對海面發送並接收電磁回

波，搭配適當的訊號處理以及分析方法，可從中取出大範圍(可達百公里等級)之海流資訊，是一種極具潛力獲取海洋環境資訊的方法。高頻雷達的訊號解算包含有兩大關鍵技術，其一為從所接收到的回波訊號解算出都卜勒能譜(Doppler spectrum)，再從能譜的尖峰頻率的都卜勒頻移量反算出海面流速；另一項關鍵技術則是從陣列雷達天線所接收之回波訊號進行方位角辨識演算之技術。

目前國際間常見的作業化高頻雷達測流系統主要有兩套，其中一套為美國的SeaSonde系統；另一套則為德國的WERA(WavE RAdar)系統。比較SeaSonde系統與WERA系統之差別，主要是在於訊號方向解算技術之差異。SeaSonde系統是透過三組共位天線同步接收來自於周圍不同方向的回波能量，每一組天線都可求取出都卜勒自譜(self spectra)以及與另外兩組天線之間的交錯譜(cross spectra)。SeaSonde系統所使用的方向分辨技術為MUSIC(MUltiple SIgnal Classification)演算法，此一技術的原理在於都卜勒自譜與交錯譜搭配雷達站周圍區域所測得之天線場型(Antenna pattern)矩陣，進而界定出不同方向所接收到的速度資訊。WERA系統則是透過陣列天線搭配Beam Forming演算法，可解算訊號中來自不同方向之成分。其原理是透過某一方向的海面回波抵達不同天線的時間不同，會在不同天線訊號之間產生相位差，透過數學三角函數關係解算相位差資訊，即可反算出訊號的方向資訊。

本文嘗試針對高頻雷達前述的兩項關鍵技術進行研究討論，並從中建立自主之訊號分析演算技術，藉以更完整窺知雷達遙測資料的演算關鍵。

## 二、高頻雷達測流方法研究

高頻雷達的測流原理是透過回波訊號的布拉格效應 (Bragg Effect) 進行海表面速度量之解算 (Crombie, 1955)。根據線性波理論，海面的波浪可視為不同頻率與方向的分波所疊加而成之不規則波面。海面波動中，波長為雷達電磁波長一半之成分波(布拉格波, Bragg waves)是造成海面強烈散射回波之主因，雷達回波訊號經能譜轉換之後可取得都卜勒能譜，能譜中隱含有海面速度資訊於其中。都卜勒能譜中頻率正值之物理意義為布拉格波朝接近雷達天線的方向移動 (Targets moving towards antennas)；頻率負值之物理意義則為觀測區域的布拉格波朝遠離雷達天線的方向移動 (Targets moving away from antennas)。當海面沒有流速的影響下，都卜勒能譜的兩組能量尖峰所對應之頻率位置經轉換後，即可求得無流速條件下的布拉格波相位速度。當有流速之影響下，能量尖峰所在的頻率位置將會產生偏離。基於上述之現象，透過都卜勒能譜中的頻率偏移量可解算出海流徑向速度資訊：

$$\Delta v = \frac{\lambda_r}{2} \Delta f \quad (1)$$

上式中， $\Delta v$  為海流徑向速度值， $\lambda_r$  為雷達電磁波之波長， $\Delta f$  為都卜勒能譜中的頻率偏移量。

由於高頻雷達系統是使用全向性之天線，理論上所接收到的回波訊號包含了來自四面八方的海面回波於其中，透過單一天線並無法有效解析出訊號的實際來源方向。如圖1所示，現有高頻雷達辨識訊號的其中一項技術是解算多組(一般至少需要4組天線)天線進行海面回波訊號的接收，再透過陣列天線中不同天線組收到同步訊號之間的相位差解算訊號的方位角。根據數學幾何關係，可透過下式進行來源訊號方位角  $\theta$  的解算：

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\Delta \phi \lambda_r}{2\pi d} \right) \quad (2)$$

上式中， $\Delta \phi$  為不同天線所接收到回波訊號的相位差； $d$  為天線之間的距離。由於來自不同方向的一階布拉格回波訊號會疊加於相對較微弱的二階回波訊號，會導致式(2)無法有效解算出含有二階回波訊號之方向特徵 (Gurgel et al., 2001)。為能有效解算出都卜勒能譜中的回波訊號特徵，可透過 Beam Forming 的解算技術。為方便數學運算，可將不同陣列天線所接收到的訊號  $x[n]$  透過矩陣型式表示之：

$$\begin{bmatrix} x_0[n] \\ x_1[n] \\ \vdots \\ x_{N-1}[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0(\theta_0) & a_0(\theta_1) & \dots & a_0(\theta_{r-1}) \\ a_1(\theta_0) & a_1(\theta_1) & \dots & a_1(\theta_{r-1}) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{N-1}(\theta_0) & a_{N-1}(\theta_1) & \dots & a_{N-1}(\theta_{r-1}) \end{bmatrix} \times \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} s_0[n] \\ s_1[n] \\ \vdots \\ s_{N-1}[n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_0[n] \\ v_1[n] \\ \vdots \\ v_{N-1}[n] \end{bmatrix}$$

$$a(\theta) = [1 \quad e^{-i\omega} \quad e^{-i2\omega} \quad \dots \quad e^{-i(N-1)\omega}]^T \quad (4)$$

上述方程式中， $s[n]$  為海面所傳遞至陣列天線的訊號源； $a(\theta)$  為  $s[n]$  的導引向量 (Steering vector)； $v[n]$  則為雜訊； $[n]$  代表有  $n$  離散點之時序列； $T$  代表轉置矩陣。透過是在不同天線的時域訊號中加入權重函數  $w_k$ ，可抑制訊號束 (beam) 的側瓣 (Side lobe)，並獲得一整合後之時序列訊號 (Beamformer output)：

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} w_k x_k[n] \quad (5)$$

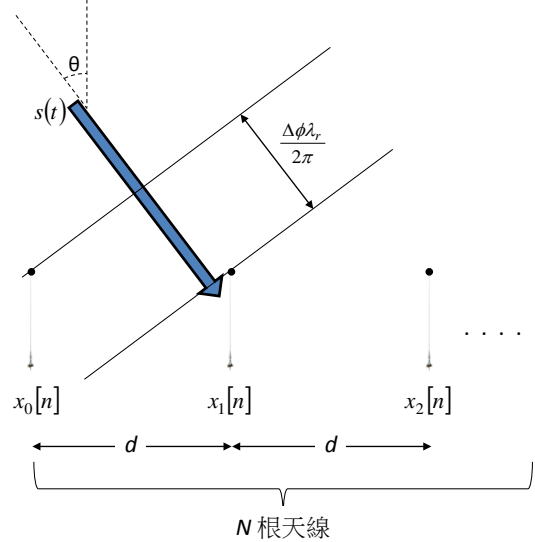


圖1 陣列天線接收訊號之示意圖

根據 Beam Forming 的理論，特定方向的 Beamformer 能量可透過此一方向形成一訊號集束 (Forming a beam)，並令權重等於此一方向的導引向量來估算之。基於此一理論，Beamformer 的能量增益 (Gain) 可透過下式表示之：

$$\begin{aligned} P(\theta) &= E[y[n]^H y[n]] = E\left[ \left[ w[n]^H x[n] \right]^2 \right] \\ &= E\left[ \left[ a(\theta)^H x[n] \right]^2 \right] = a(\theta)^H R_{xx} a(\theta) \end{aligned} \quad (6)$$

$$R_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} x[i] x[i]^H \quad (7)$$

上式中， $H$  代表 Hermitian 矩陣。透過上述之數學關係即可估算不同方向的訊號集束，並透過找尋能量增益最強的訊號集束來決定訊號的來源方向。

### 三、雷達觀測資料分析與討論

本文所分析研究的資料為交通部運輸研究所於臺北港所測得之 WERA 高頻雷達觀測數據。本文研究 WERA 系統原始資料的結構，並自行將原始資料解算出，圖 2 為解算出的臺北港 WERA 系統天線所測得之原始觀測時序列表例。此一資料為雷達從海面所接收到的電磁回波時序列，其訊號取樣頻率為 4.6Hz。時序列的  $I$  與  $Q$  分別代表同相 (in-phase) 與正交 (quadrature，或被稱為  $90^\circ$  相移分量) 訊號。如圖 3 所示， $I/Q$  時序列可呈現訊號強度 ( $M$ ) 與相位 ( $\varphi$ ) 改變量。使用  $I/Q$  時序列的主要原因在於電路系統中，不易透過輸入的訊號來精確改變硬體電路中的訊號相位。因此控制訊號強度和相位的硬體設備製造成本相對較高，也不易設計，且相對應之系統並不能像使用  $I$  和  $Q$  波型的電路那樣具有變通性。也因此許多雷達系統都會透過  $I/Q$  時序列進行電路之設計。將上述時序列經由譜轉換後可求得雷達回波都卜勒能譜，如圖 4 所示。分析所得都卜勒能譜的能量尖峰位置與其布拉格波的都卜勒頻率相近，初步確認了資料解算流程的正確性。再經由整合不同距離單元之雷達回波都卜勒能譜，則可獲得圖 5 之結果。透過圖 5 雖可求解出不同觀測距離的徑向流速，但還未能確認各種徑向流速所對應之方位角。本文進一步依據前述之陣列天線訊號解算理論進行實測高頻雷達訊號之分析，藉以從中解算出海面流速之方向。如圖 6 所示，為透過 Beam Forming 的解算技術所求解出的結果。圖中能量增益值尖峰所對應之方向即為陣列天線所辨識出海面訊號相對於雷達陣列天線之方位角。透過不同速度與不同觀測距離的雷達訊號解算，可求得如圖 7 之空間徑向流場分析結果。圖 7 扇形區域中，正值流速代表徑向流朝接近雷達天線的方向移動；負值流速則代表徑向流朝遠離雷達天線的方向移動。從圖 7 可發現，扇形區域左半區域與右半區域的徑向流向大致相反，說明了在陣列天線的左前方與右前方可分別觀測到朝雷達天線接近與遠離雷達天線的流場。儘管這樣的結果符合流場之物理現象，但仍有待後續進行更完整的資料分析檢討與比對工作。

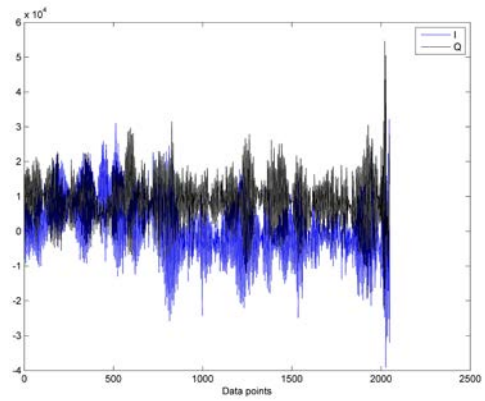


圖 2 本研究自行解算出的 WERA 雷達訊號時序列

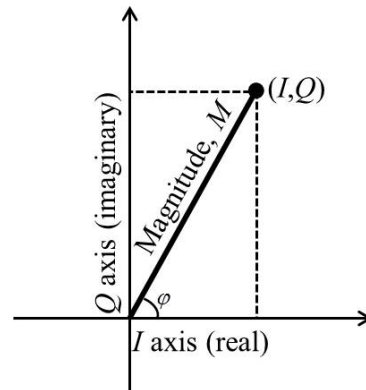


圖 3  $I/Q$  時序列之說明

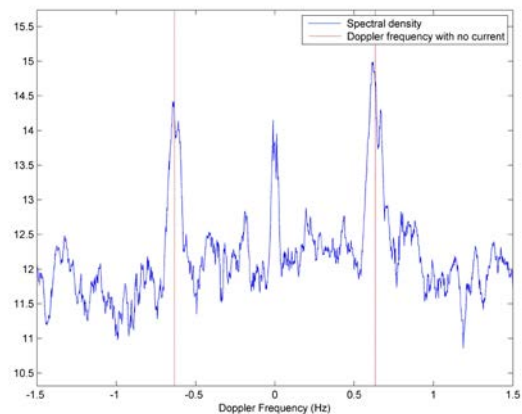


圖 4 單一距離單元之雷達回波都卜勒能譜

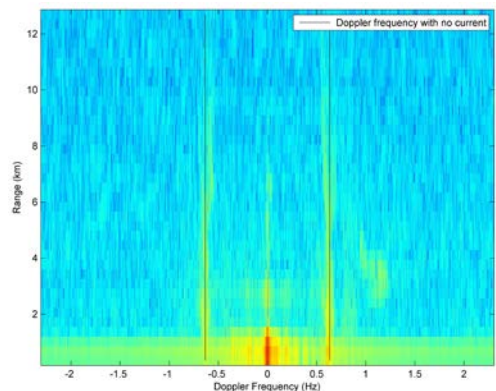


圖 5 不同距離單元之雷達回波都卜勒能譜

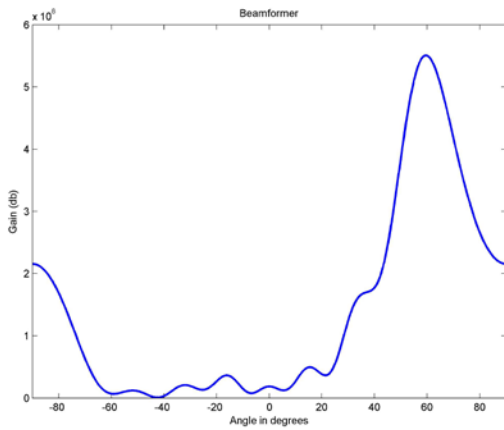


圖6 透過Beam Forming方法解算出之結果

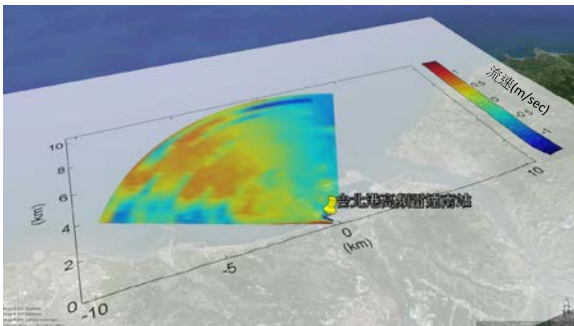


圖7 從陣列天線解算出徑向流速之結果

#### 四、結論

海流資訊不僅為海洋物理研究上的重要參數，同時在實務應用上，也對海上救難支援、海洋污染事件處理、及政府海洋政策之制定等均有相當之貢獻。現今前瞻性之海流觀測必須達到空間域上的全面性，以及時間域上的即時性。相較於透過現場量

測取得海流資料，流場遙測技術具有「廣景覽要」之優勢，能對海面進行大範圍之觀測，是目前海洋學界所積極發展的技術之一。高頻雷達海面流場是近年常見之海象遙測技術，常見高頻雷達技術是透過陣列天線進行海面回波訊號方向辨識，同時也是海面徑向流場的辨識。為確保能完整掌握高頻雷達陣列天線訊號的解算技術，本研究自行解算陣列雷達訊號，從中求取都卜勒能譜，並透過陣列天線搭配 Beam Forming演算法，解算出雷達回波訊號中來自不同方向之成分。分析結果初步確認了演算過程的可行性。本研究後續將進行兩站所測得徑向流之合成，藉以求取海面之流場向量資訊。

#### 謝誌

承蒙交通部運輸研究所港灣技術研究中心提供雷達觀測資料，使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

#### 參考文獻

- [1]. Crombie, D. D. (1955). Doppler Spectrum of Sea Echo at 13.56 Mc./s. *Nature*, 175(4459), 681-682.
- [2]. Crocker, R. I., Matthews, D. K., Emery, W. J., & Baldwin, D. G. (2007). Computing Coastal Ocean Surface Currents from Infrared and Ocean Color Satellite Imagery. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 45(2), 435-447.
- [3]. Gurgel, K.-W., Essen, H.-H., & Schlick, T. (2001). The University of Hamburg WERA HF Radar - Theory and Solutions. Paper presented at the First International Radiowave Oceanography Workshop ROW 2001 Proceedings.