

MUSIC演算法應用於 高頻雷達線性陣列天線訊號解算之研究

吳立中¹ 莊士賢²
近海水文中心¹ 海洋科技與事務研究所²
國立成功大學

邱永芳³ 陳禹儒²
港灣技術研究中心³
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，也是國際間所普遍在量測近岸大範圍(數十到數百公里等級)空間流場的重要工具。高頻雷達觀測與資料解算過程的其中一項關鍵技術為訊號方位辨識，也就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，進而求取出不同方位角所對應徑向流速的技術。國際間已提出許多改善訊號方向辨識解析度的演算法，能更精準提取出訊號的方位特徵。本研究嘗試引入MUSIC演算法作為WERA高頻雷達線性陣列天線訊號解算之工具，也藉此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、MUSIC演算法

一、前言

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。

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。

電磁波訊號頻率在3-30MHz之岸基高頻(HF)雷達或是訊號頻率在30-300MHz之甚高頻(VHF)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觀測技術之一。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，可從中求取出大範圍(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。

高頻雷達訊號解算的其中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。因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回波於其中，假若透過單一天線並無法有效辨析出訊號的實際來源方向，可透過陣列天線所收集到回波訊號之間的相位差關係解算出訊號的方位特徵。目標訊號方位到達(direction of arrival, DOA)之計算在陣列訊號處理(array signal processing)中扮演重要的角色，且其應用範圍相當廣泛，在處理雷達訊號時更是相當關鍵的課題，有助於確切掌握目標位置。

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(圖1)。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。

然而根據前人研究顯示，Beam Forming解算之訊號方位結果有其解析度上之限制。國際間已提出許多改善訊號方向辨識解析度的演算法，能更精準提取出訊號的方位特徵。本研究嘗試引入MUSIC演算法作為WERA高頻雷達線性陣列天線訊號解算之工具。由於WERA雷達系統本身並未建構MUSIC之演算技術，本研究嘗試針對高頻雷達之關鍵技術進行研究討論，並從中建立自主之訊號MUSIC演算技術，藉以更完整窺知海流物理量轉換演算之關鍵技術。

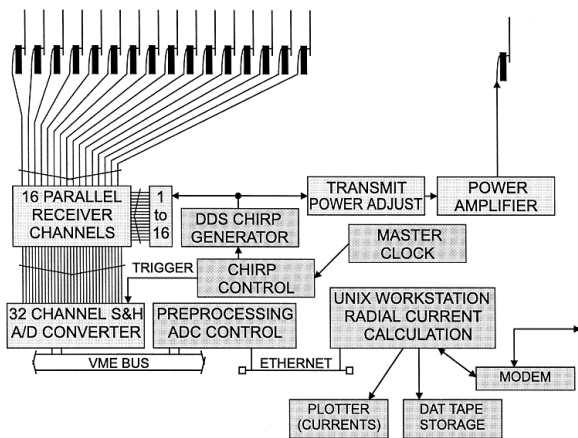


圖1 WERA系統之硬體架構
(圖片來源：Gurgel et al., 1999)

二、高頻雷達方位辨識技術之研究

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， Δv 為海表面徑向速度值， λ_r 為雷達電磁波之波長， Δf 為都卜勒能譜中的頻率偏移量。

根據Beam Forming的基本理論，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：

$$P(\theta) = E[y[n]^H y[n]] = E[w[n]^H x[n]]^2 \quad (2)$$

$$= E[a(\theta)^H x[n]]^2 = a(\theta)^H R_{xx} a(\theta)$$

$$R_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} x[n] x[n]^H \quad (3)$$

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。

透過 Beam Forming 演算法雖然能有效解算出來源訊號之方位角，但前人研究結果中指出，透過 Beam Forming 演算法解算之方位角解析度有其限制。事實上，現有的訊號方位辨識技術並非只有 Beam Forming 一種。隨著通訊技術的蓬勃發展，學界已陸續提出不同的訊號方位辨識技術。如圖2所示，Bhuiya et al. (2012)曾針對不同的訊號方位辨識演算結果進行比較。圖2的能譜中的能量愈集中，其針對方位之解析度愈佳。圖2分析結果顯示 Beam Forming (圖中的 Classical)所解算出能譜之能量分布相對較為不集中，這限制了方向辨識結果的解析度。有鑑於此，本研究嘗試引入多重訊號分類(multiple signal classification, MUSIC)演算法解算出海面訊號相對於雷達站之方位角，藉以從雷達觀測訊號中解算出更為合理與準確的徑向流速。

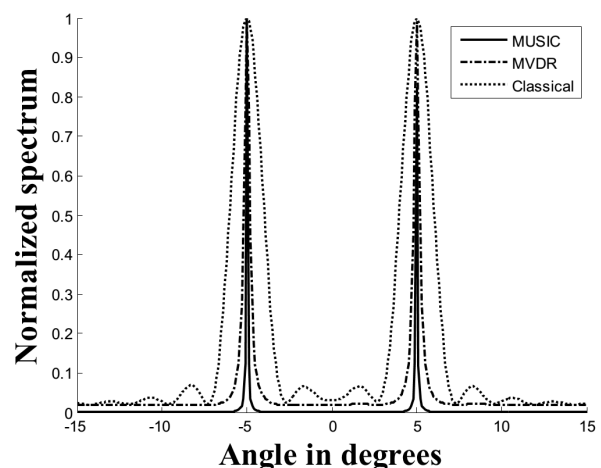


圖2 不同演算法解算訊號方位之結果
(圖片來源：Bhuiya et al., 2012)

MUSIC 演算法為Schmidt在1986年提出的DOA解算方法(Schmidt, 1986)，經由分析每組天線自譜(self-spectrum)

與其他組天線交錯譜(cross-spectrum)之特徵，進而解算目標物之主要方位，其優點為訊號方向辨識率高。

MUSIC 演算法是一種矩陣特徵向量的分解技術。在訊號領域中，可將信號處理的空間分解為訊號子空間(signal subspace)與雜訊子空間(noise subspace)，且這兩種空間互為正交。利用上述子空間正交特性，可將信號來源的方向進行估測。訊號子空間由陣列接收到的資料共變異數矩陣(Covariance matrix)中與訊號對應的特徵向量組成，雜訊子空間則由共變異數矩陣中所有最小特徵值對應的特徵向量組成。令雷達接收陣列天線之天線組數為 n ，其所產生的共變異數矩陣 C 則可定義為：

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle S_{11} \rangle & \langle S_{12} \rangle & \dots & \langle S_{1n} \rangle \\ \langle S_{21} \rangle & \langle S_{22} \rangle & \dots & \langle S_{2n} \rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \langle S_{n1} \rangle & \langle S_{n2} \rangle & \dots & \langle S_{nn} \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

上式中 $\langle S_{nn} \rangle$ 為第 n 組天線的自譜； $\langle S_{mn} \rangle$ 則為第 m 組與第 n 組天線的互譜。若是訊號源為單一角度(single angle solution)的情況下，從共變異數矩陣 C 所解算出的特徵向量 e_1 生成的子空間稱為訊號子空間；而剩下的特徵向量 e_1, e_2, \dots, e_n 所生成的空間稱為雜訊子空間，會與訊號子空間垂直正交。若是訊號源是多角度的情況下，令訊號源來自於 m 組方位角，從共變異數矩陣 C 所解算出的特徵向量 e_1, \dots, e_m 生成的子空間稱為訊號子空間；而剩下的特徵向量 e_{m+1}, \dots, e_n 所生成的空間稱為雜訊子空間，同樣會與訊號子空間垂直正交。透過前述之特徵向量，可求得訊號來源的目標訊號方位到達(direction of arrival, DOA)函數：

$$DOA(\theta) = \frac{1}{A^*(\theta)E_n E_n^* A(\theta)} \quad (5)$$

其中 E_n 為雜訊子空間的特徵向量， $A(\theta)$ 為天線的導引向量， $A^*(\theta)$ 為 $A(\theta)$ 的轉置矩陣。同時透過單角度或是多角度兩種假設來界定出不同方向所接收到訊號，將天線導引向量逐一帶入函數之中，由於雜訊子空間與訊號子空間之正交特性，因此當 $A(\theta)$ 愈接近正確訊號源角度時， $A(\theta)$ 投影(projection)在訊號子空間的成分愈重，與雜訊子空間 E_n 內積就會趨近於 0 (De Paolo et al., 2007)。也就是說天線導引向量與雜訊子空間正交時，DOA 公式中分母會趨近於 0。利用此特性，MUSIC 在 DOA 解算結果顯示在特定角度將產生峰值，進而有效估算訊號來源。彙整上述分析過程，利用 MUSIC 法解算 WERA 雷達原始觀測

資料之流程如圖 3 所示。

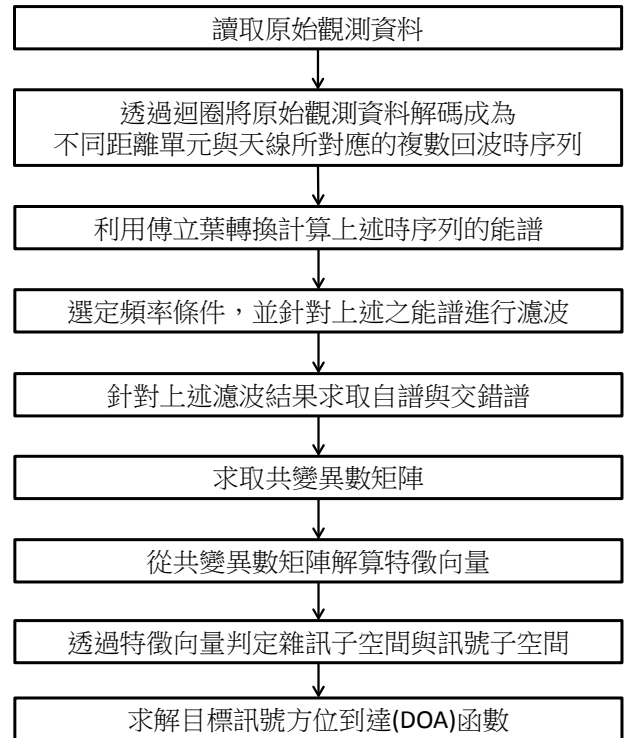


圖3 利用MUSIC法解算 WERA 雷達原始觀測資料之流程

三、雷達觀測資料分析與討論

本研究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。圖 4 為臺北港所架設 WERA 高頻雷達系統的天線陣列。

將 WERA 雷達觀測所得原始資料經過解碼以及能譜分析後，獲得如圖 5 的不同距離單元之雷達回波都卜勒能譜，進一步從固定距離單元擷取出的雷達回波都卜勒能譜則如圖 6 所示。從圖 5 與圖 6 可辨識出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，且與圖 7 國外提出都卜勒能譜結果相近，初步確認了資料解算流程的正確性。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。

本研究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 8 所示，為透過 Beam Forming 與 MUSIC 演算法所求解出的能量在方位角分布之結果。圖中能譜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。從分析結果中確認了 MUSIC 演算法所解算之方向分布較為集中，更有助於訊號方位之辨識。

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 9 之空間徑向流場分析結果。圖 9 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 9 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。



圖4 臺北港WERA高頻雷達天線 (箭頭處)

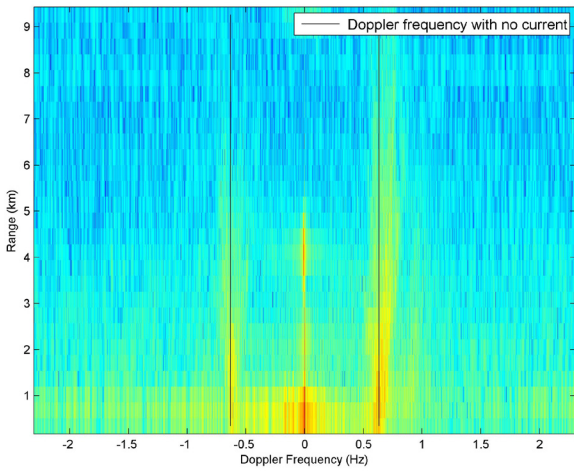


圖5 不同距離單元之雷達回波都卜勒能譜

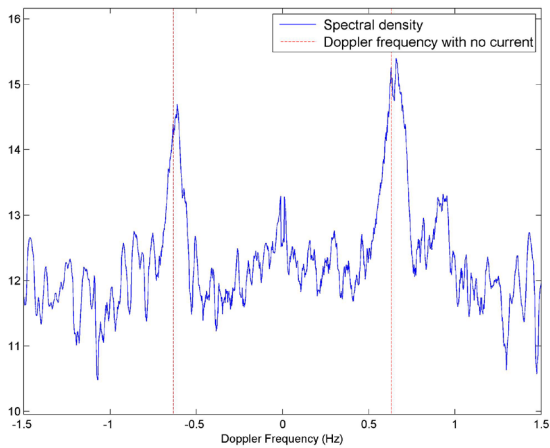


圖6 第五距離單元之雷達回波都卜勒能譜

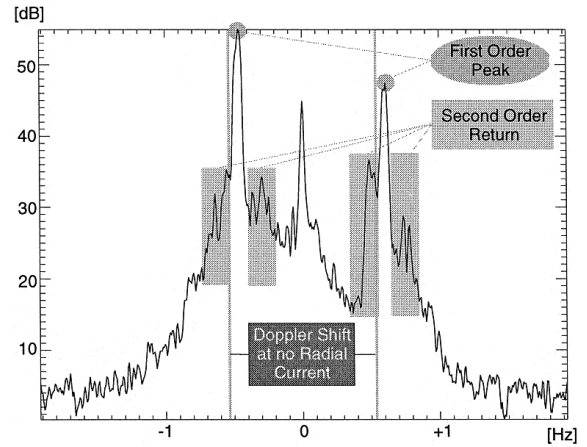


圖7 國外高頻雷達測得之都卜勒能譜範例 (圖片來源：Gurgel et al., 1999)

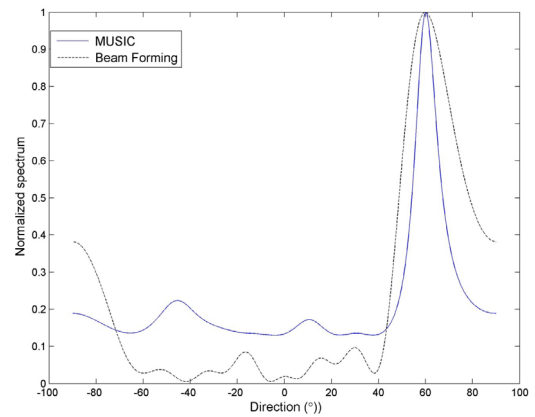


圖8 透過Beam Forming方法解算出之結果

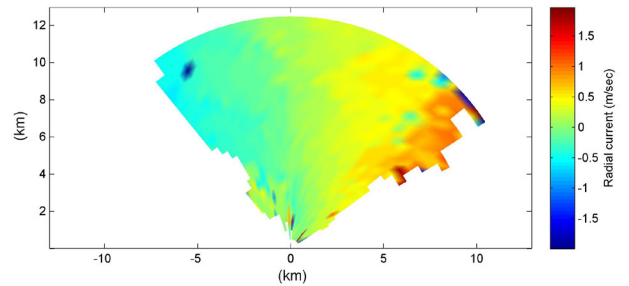


圖9 從陣列天線解算出徑向流速之結果

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。

本研究嘗試將MUSIC此一演算法引入WERA雷達觀測資料的解算過程中，藉以更有效的進行訊號之方位辨識。經初步的分析結果證實了MUSIC演算法所解算之訊號方向分布較為集中，這更有助於解算出高準確度的徑向海面流速資訊。在此一分析結果的基礎下，未來還有待進行更完整的資料分析檢討與比對工作，藉以更完整釐清MUSIC演算法應用於WERA觀測資料分析的使用優勢與限制。

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]. De Paolo, T., Cook, T., Terrill, E. (2007). Properties of HF Radar Compact Antenna Arrays and Their Effect on the MUSIC Algorithm, In *OCEANS 2007*, 1-10.
- [4]. Gurgel, K.W., Essen, H.H., Kingsley, S.P., 1999. High-frequency radars: physical limitations and recent developments, *Coastal Engineering*, 7(3-4), 201-218.
- [5]. 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.
- [6]. Schmidt, R.O. (1986). Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 34(3), 276-280.