

SeaSonde 高頻雷達測流演算法之研究

吳立中¹ 湯世燦² 黃清哲³ 高家俊³

¹ 國立成功大學近海水文中心專案助理研究員

² 國立成功大學水利及海洋工程研究所客座研究員

³ 國立成功大學水利及海洋工程研究所教授

摘要

本文之目標為研究高頻雷達量測海流的關鍵技術，其核心技術為根據雷達所發射電磁波與所接受海面回波之間的都卜勒偏移效應來反推流場。上述都卜勒偏移效應的物理機制與數學關係本身雖已有明確之定義，但其流場解析方法牽涉到一系列的訊號處理以及解析步驟。本研究已針對 SeaSonde 長距離(工作頻率為 4.58 MHz)以及標準型(工作頻率為 24.3 MHz)雷達系統於台灣海域所測得之海面回波訊號進行解析與研究。首先針對複數型態的海面回波時序進行解析，透過快速傅立葉轉換求解不同距離單元的能譜。由於 SeaSonde 雷達系統運用了 FMCW(frequency modulated continuous wave)技術，都卜勒能譜中布拉格波第一階峰的頻率條件與觀測區域與天線距離之間的關係必須被明確釐清。本文從 FMCW 演算結果中發現，都卜勒能譜中的高階項會影響能譜的訊噪比(S/N ratio)以及後續觀測結果之準確度。

關鍵詞：雷達遙測、高頻雷達、都卜勒偏移

Exploring Algorithms for SeaSonde HF Radar Current and Its Internal Consistencies

Li-Chung Wu^{*} S. Tang Ching-Jer Huang Chia-Chuen Kao

^{*} Project-Appointed Assistant Research Fellow, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

ABSTRACT

This research aims to examine the algorithms of retrieving the ocean surface current with HF radars sea echoes. As the scattering from Bragg ocean waves contribute the Doppler shift of the HF radar waves, the additional frequency shift enable us to estimate ocean surface currents. However, the calculation scheme is in general simplified; further examination of the scheme is needed. We have conducted research on the signals obtained from both standard and long range SeaSonde radars which were deployed by Taiwan Ocean Research Institute (TORI) with radar operation frequencies at 4.58 and 24.3 MHz respectively. The complex time series of radar sea return is first examined; the range spectra are then obtained by fast Fourier transform (FFT). As the frequency modulated continuous wave (FMCW) technique is applied, the calculation scheme is first examined with the time series data obtained at HOPE long-range HF radar station. The first-order peaks are smeared out as the range cell is further away from the radar station. The analysis of FMCW algorithms indicates the negligence of higher order terms in peak detection may affect the S/N ratio and thus HF radars' higher-order applications.

Keywords: Remote sensing; HF radar; Doppler shift

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也相當複雜多變。根據研究發現，東南海域的表面流主要是受到太平洋北赤道洋流影響；台灣東北部海域則是由季風支配該海域的流況，冬季受到東北季風造成的風趨流影響，海流會隨風速變化，流速並不規則；在台灣西海岸，其表面流則是以潮流為主。此外，於西太平洋海域，還有黑潮自菲律賓開始，穿過台灣東部海域，沿著日本往東北向流。

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、海洋污染事件處理以及政府海洋政策之制定等均有相當之需求。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。此外，海流資料品質與準確度也關乎了海流觀測資料之可利用性與價值。因此，如何確保海流資料的高品質，對海流觀測實為必要的程序。一般而言，海流的觀測方法可分為直接的現場觀測(In-situ measurement)與間接的遙感探測(Remote sensing)兩種方式。其中遙測技術具有「廣景覽要」之特性，能對海面進行大範圍之監測，對於流場資訊的獲得為一極具潛力的方式。在各種海面流場的遙感探測技術中，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。綜觀當前所發展出的各種高頻雷達測流技術，SeaSonde 高頻雷達系統係屬國際間較為普及的觀測系統。我國的財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心自 2008 年起引進美國 CODAR 公司之 SeaSonde 高頻雷達測流系統，並針對台灣周邊海域的表面海流進行作業化監測，至 2011 年已完成環島 15 座高頻雷達站之建置。

根據不同的雷達操作頻率(radar operation frequency)，雷達系統能解析出不同觀測範圍的流場資訊。一般而言，現有 SeaSonde 系統可區分為長距離(工作頻率為 4.58 MHz)以及標準型(工作頻率為 24.3 MHz)雷達系統，其觀測範圍可達 60km 到

200km 之間。

高頻雷達的流場解算技術核心是根據布拉格波(Bragg wave)的都卜勒頻率偏移量。此一布拉格波之頻率則是透過波浪的分散關係式以及特定條件之深水重力波之波長(雷達電磁波長的一半)做為參數所求得之(Crombie, 1955)。上述的布拉格波以及都卜勒偏移效應物理機制與數學關係本身雖已有明確之定義，但其流場解析方法牽涉到一系列的訊號處理以及解析步驟。為能完整掌握 SeaSonde 測流之關鍵技術，本研究嘗試建立整個演算流程，並嘗試針對 SeaSonde 長距離以及標準型雷達系統於台灣海域所測得之海面回波訊號進行解析與研究。透過快速傅立葉轉換的演算技術，從雷達天線所取得之原始訊號時序列進行轉換，求取不同距離單元(range cell)的雷達回波時序列(range series)。透過再一次的快速傅立葉轉換則可求取不同距離單元的都卜勒能譜。此外，本文也針對 SeaSonde 系統所使用的 FMCW (CODAR Ocean Sensors, 2009) 技術進行研究與討論，藉以更完整掌握高頻雷達的測流關鍵技術。

二、雷達訊號之解析

本文嘗試透過台灣海域雷達實測資料的解算與分析，檢討雷達回波資料的解析流程。使用的資料分別為台灣東海岸的和平站(HOPE)長距離雷達(工作頻率為 4.58 MHz)測得資料以及台灣南部的貓鼻頭站(MBTA)標準型雷達(工作頻率為 24.3 MHz)測得資料，兩測站之地理位置則如圖 1 所示。

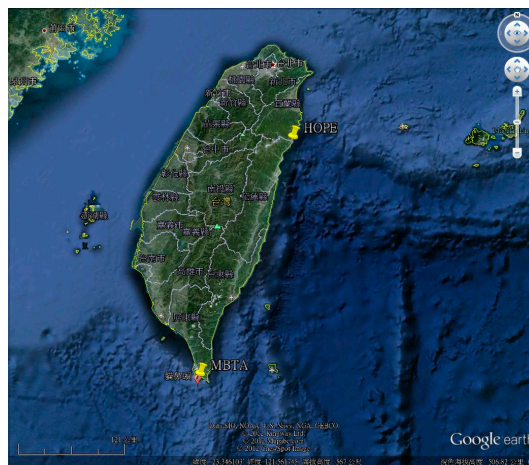


圖 1 測站之地理位置

2.1 長距離雷達系統資料解析

長距離型雷達每次觀測所取得的資料包括了來自三組不同共位接收天線(兩組 closed-loop 以及一組 monopole)所記錄約 17 分鐘的回波訊號時序列(CODAR Ocean Sensors, 2009)。透過調變技術所發送的掃頻訊號(swept-frequency signal)以及解調天線所接收到的訊號,可有效解析出訊號中所隱含的觀測距離資訊(Barrick, 1973)。這也就是 FMCW 技術之關鍵,本文將於後續章節詳細討論之。針對和平站(HOPE)長距離雷達系統,掃頻的頻率為 1 Hz,系統每次工作時將進行 1024 次的掃頻,因而取得約 17 分鐘的訊號。每次掃頻時,系統將取得 4096 組複數型態的訊號,其取樣時間則為 243 微秒。透過上述之過程,將可取得 1024×4096 組的譜矩陣。其中數值 4096 代表了不同觀測距離(range cell)所取得之能譜資訊,而每一組能譜都包含有 1024 個能譜值。透過再一次的快速傅立葉轉換則可取得觀測範圍 175 km 內,不同距離單元所對應的能譜。如圖 2 所示,為從第 1 組天線中,第 1、第 5 以及第 15 個距離單元(Range Cells of #1, #5, and #15)所求取出的都卜勒偏能譜。從分析結果可辨識出一階以及二階布拉格波之能量尖峰。由於長距離天線系統都卜勒單元時序列的取樣頻率為 1Hz,因此都卜勒單元經傅立葉轉換至頻率域後,其頻率範圍將落於 -0.5Hz~ 0.5 Hz 之間。從分析結果可發現第 1 以及第 5 距離單元的一階以及二階布拉格波之頻率位置附近皆可偵測到能量尖峰,然而在第 15 個距離單元中並沒有明顯的能量尖峰發生在上述的布拉格波之頻率位置附近。如圖 3 所示,為前 15 個距離單元所解算出之都卜勒譜。從分析結果可看出一階以及二階布拉格波之頻率附近的能量尖峰會隨著距雷達天線越遠而越不明顯。針對長距離 SeaSonde 雷達系統的相關參數設定則詳述於表 1。

表 1 長距離 SeaSonde 雷達系統的相關參數設定

雷達操作頻率, f_r	4.58 MHz
布拉格波之波長, λ_w	32.75 m
布拉格波之速度, V_w	7.1 m/s
掃頻之頻率, f_s	1 Hz
掃頻之帶寬, B	15 KHz
第一階布拉格波頻率, $f_{w1} = V_w / \lambda_w$	0.21 Hz
第二階布拉格波頻率, $f_{w2} = \sqrt{2} f_{w1}$	0.30 Hz

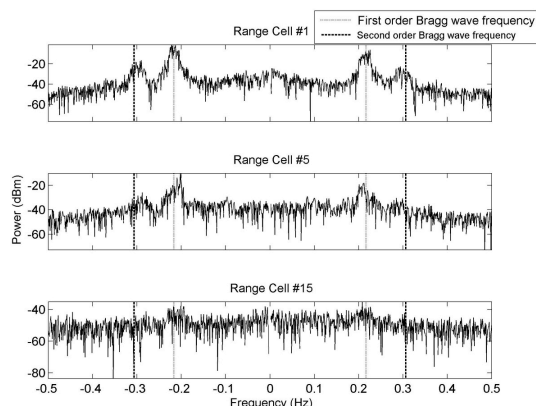


圖 2 從不同距離單元所解算出之都卜勒譜

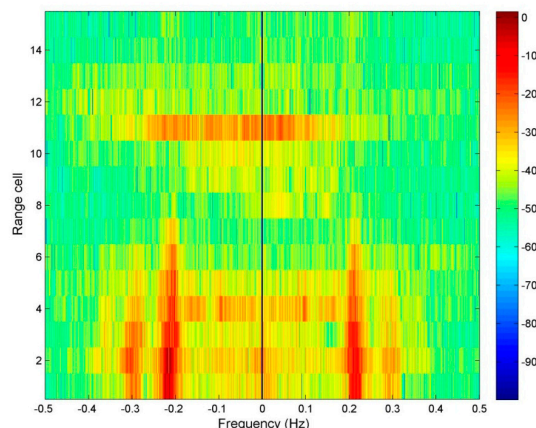


圖 3 前 15 個距離單元所解算出之都卜勒能譜

2.2 標準型雷達系統資料解析

針對台灣南部的貓鼻頭站(MBTA)標準型雷達系統,系統將從每一組接收天線以及每一次的掃頻過程中取得 1024 組複數型態的訊號。由於貓鼻頭站掃頻的頻率為 4 Hz,系統每次觀測時將進行 512 次的掃頻,因而取得約 128 秒的訊號。採用類似於長距離雷達系統資料解析流程,可透過快速傅立葉轉換分析 512 次的掃頻訊號,進而求取得不同距離單元所對應的能譜。

如圖 4 所示,為從第 1 組天線中,第 1、第 5 以及第 15 個距離單元(Range Cells of #1, #5, and #15)所求取出的都卜勒偏能譜。由於標準型天線系統都卜勒單元時序列的取樣頻率為 4Hz,因此都卜勒單元經傅立葉轉換至頻率域後,其頻率範圍將落於 -2Hz~ 2 Hz 之間。本文進一步整合不同距離單元所計算獲得之都卜勒偏能譜如圖 5 所示。從圖 4 以及圖 5 的分析結果可發現於二階布拉格波之頻率位

置附近並無法偵測到明顯的能量尖峰。針對標準型 SeaSonde 雷達系統的相關參數設定則詳述於表 2。

表 2 長距離 SeaSonde 雷達系統的相關參數設定

雷達操作頻率, f_r	24.3 MHz
布拉格波之波長, λ_w	32.75 m
布拉格波之速度, V_w	7.1 m/s
掃頻之頻率, f_s	4 Hz
掃頻之帶寬, B	100 KHz
第一階布拉格波頻率, $f_{w1} = V_w / \lambda_w$	0.50 Hz
第二階布拉格波頻率, $f_{w1} = \sqrt{2}f_{w1}$	0.71 Hz

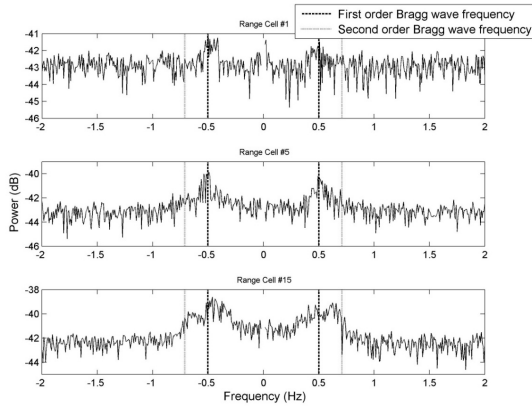


圖 4 從不同距離單元所解算出之都卜勒譜

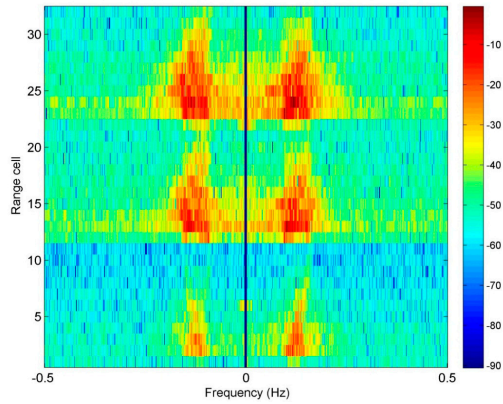


圖 5 前 32 個距離單元所解算出之都卜勒譜

三、FMCW 技術解析

FMCW 是 Seasonde 高頻雷達系統所使用之調頻載波技術。此一技術是透過訊號產生器生成出相位調變的訊號(phase modulated signal)：

$$S_1(t) = a_1 \cos \phi(t) \quad (1)$$

$$\phi(t) = 2\pi f_r t + \pi \frac{B}{T} t^2 \quad (2)$$

式(2)中的 $\phi(t)$ 為在時間 t 的訊號相位, f_r 為雷達頻率, B 為帶寬, T 為脈衝波重覆週期(如圖 6 所示)。因此, 所發射訊號的頻率為：

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = f_r + \pi \frac{B}{T} t \quad (3)$$

在發送任一脈衝波期間(0, T), 雷達波頻率的線性變動範圍為 $f_r \sim f_r + B$ 。透過 FMCW 雷達訊號處理技術, 所生成的訊號可分為兩部分。其中一小部分被送入混頻器(mixer), 作為偵測回波特徵的參考訊號。另外一部分的生成訊號則透過環流器(circulator)送進雷達天線。環流器的電子裝置僅容許電子訊號以順時鐘的方式傳遞。透過環流器可將發送以及接收天線共用同一套雷達系統。透過天線所發送出去的雷達波訊號碰觸到目標後會產生回波, 並傳送至接收天線。回波訊號經過環流器再進到混頻器之中。假設目標位置與雷達天線之間的距離為 R , 則進入到混頻器的回波訊號則可透過用下式表示：

$$s_2 = a_2 \cos \phi(t - \tau) \quad (4)$$

式(4)中 $\tau = 2R/c$ 為回波之傳遞延遲, c 為光速, a_2 為傳遞損失以及目標物反射因子。混頻器將原來所保留的參考訊號以及回波訊號相乘。透過此一方式, 會產生訊號相加以及相抵消的效果。因此從混頻器中所得到的訊號可透過用下式表示：

$$\begin{aligned} s_3 &= a_3 \cos[\phi(t) - \phi(t - \tau)] \\ &= a_3 \cos \left[2\pi f_{beat} t + 2\pi f_c \tau - \frac{\pi B}{T} \tau^2 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$f_{beat} = \frac{B\tau}{T} = f_m B \cdot (2R/c) = f_m \frac{R}{\Delta R} \quad (6)$$

式(6)中 f_{beat} 為目標區域回波訊號之拍頻(beat frequency), $f_m = 1/T$ 為雷達脈衝調變頻率, $\Delta R = c/(2B)$ 為雷達脈衝的距離解析度。

FMCW 技術之關鍵在於, 目標訊號之特徵可透過混頻器所輸出訊號之傅立葉轉換求得。透過導入矩形視窗函數的傅立葉轉換, 針對時間 T 的區間內進行積分, 可從混頻器訊號中獲得下式之關係：

$$S_{echo}(f, f_{beat}, B, T) \propto \left\{ \frac{\sin[\pi(f - f_{beat})T]}{\pi(f - f_{beat})T} \right\}^2 \quad (7)$$

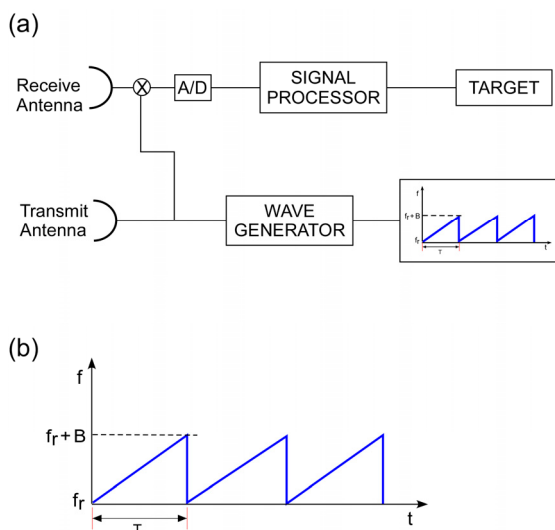


圖 6 (a). FMCW 訊號處理流程; (b). 訊號頻率變化

四、分析結果討論

如前所述，圖 2 的分析結果為台灣東海岸的和平站(HOPE)長距離雷達觀測資料所前算出第 1、第 5 以及第 15 個距離單元的都卜勒偏能譜。根據雷達系統所設定之參數，這幾個距離單元所對應的觀測距離(觀測區域與雷達接收天線之間的距離)分別為 10km、50km 以及 150km。從分析結果可看出二階布拉格波之頻率位置附近的能量尖峰會隨著距雷達天線越遠而越不明顯。其中第 15 個距離單元的都卜勒偏能譜的二階布拉格波之能量尖峰與雜訊相混和，無法有效被分辨出。

相較於二階布拉格波之能量尖峰，第一階布拉格波之能量尖峰雖然較為明顯，但在較遠觀測距離處也無法有效被分辨出。如圖 3 所示，當觀測距離為 150km(第 15 個距離單元)時，第一階布拉格波之能量尖峰已與雜訊相混和，無法有效被分辨出。因此，長距離 SeaSonde 系統的預設觀測範圍雖然可達 200km，但於較遠距離區域，作為求取流場之依據的第一階布拉格波之能量尖峰強度並不一定能達到有效求取高準確度流場資訊之需求。

從圖 3 的分析結果也發現到，第 11 個距離單元(距離雷達天線約 110 公里)所解算出之 Doppler 譜，其能量分布明顯與其他的 Doppler 譜不同。經檢討發現，距雷達天線 110 公里附近為日本與那國島，如圖 7 所示。為能有效檢討這其中的關聯性，後續有必要透過方向辨識(direction finding)技術 (Lipa et

al., 2006; Paduan, 2006; Schmidt, 1986)進行更深入之檢討。

針對台灣南部的貓鼻頭站(MBTA)標準型雷達系統，分析結果則可發現於二階 Bragg wave 之頻率位置附近並無法偵測到明顯的能量尖峰。判斷這可能是因為水深效應對雷達波場之影響(Stewart and Joy, 1974)。

海面流場所造成的都卜勒偏移量為 $2U / \lambda_r$ 。假定台灣附近海域的黑潮流速為 2m/sec，換算得都卜勒偏移量為 0.04Hz。也因此進行系統參數設定時，必須要掌握所能觀測到的最大流速極限，以免解析在流速資訊時，能量與雜訊被不當之混淆，而獲得錯誤之分析結果。



圖 7 HF 雷達與日本與那國島之間的距離

五、小結與建議

有別於操作 SeaSonde 系統的商業軟體，本研究自行發展並解算從 SeaSonde 高頻雷達天線所取得之原始訊號，嘗試與商業軟體所產出之結果進行交互比對，並嘗試透過前人所提出的研究內容(Lipa et al., 2006; Paduan, 2006)，從中檢討本文自行分析結果與 SeaSonde 系統商業軟體所產出結果之間差異的原因。本研究目前已針對 SeaSonde 系統所產出的各類資料自行建立格式解算技術以及逐步釐清相關分析流程。針對現階段所進行之研究工作，本計畫提出以下之建議：

- (1) 本研究發現目前 SeaSonde 系統所設定之工作參數，如：blanking time, blanking delay and sweep period, and sampling interval (243 μ s)等參數值與並不能被合理解釋，需要更進一步的去釐清。

- (2) 海上島嶼之雷達回波對海流觀測工作有一定程度之影響。為能有效檢討這其中的關聯性，後續有必要透過方向辨識技術進行更深入之檢討。
- (3) 簡化後的 FMCW 技術可能會增加雜訊的強度，這對於後續流場解析之影響有必要被釐清。

謝誌

感謝財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心提供雷達原始觀測資料，使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

1. Crombie, D. (1955) "Doppler spectrum of the sea echo at 13.56 Mc/s," *Nature*, Vol. 175, pp. 681-682.
2. CODAR Ocean Sensors (2009) "Seasonde radial site release 6: time series file format," *Mountain View*, California, 3 pages.
3. Barrick, D.E. (1973) "FM/CW radar signals and digital processing," *NOAA Technical Report*, ERL 283-WPL 26.
4. Stewart, R. and Joy, J. (1974) "HF radio measurements of surface currents," *Deep-Sea Res.*, Vol. 21, pp. 1039-1049.
5. Lipa, B., Nyden, B., Ullman, D. and Terrill, E. (2006) "SeaSonde radial velocities: Derivation and internal consistency," *IEEE J. Oceanic Engineering*, Vol. 31, pp. 850-861.
6. Paduan, J. D. (2006) "Calibration and validation of direction finding high-frequency radar ocean surface current observations," *IEEE J. Oceanic Engineering*, Vol. 31, pp. 862-875.
7. Schmidt, R. (1986) "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antenna Propagation*, AP-34 (3), pp. 276-280.