

多重訊號分類演算法應用於相位陣列雷達之 徑向速度解析之研究

Multi-Signal Classification Algorithm application of Radial Velocity Analysis of Phased Array Radar

黃郁軒¹ 程嘉彥¹
財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心¹

摘 要

高頻海洋雷達利用電波與海洋表面之布拉格共振，產生後向散射之現象，並根據接收的回波訊號與發射頻率間因表層海流所造成之都卜勒偏移(Doppler shift)進而推算觀測範圍內之海洋表面徑向速度大小。透過至少2座相鄰測站所提供之徑向速度合成產出表層海流流場。而回波頻譜內包含了大量的海洋資訊(海流、風、波場等)，同時也涵蓋了環境裡的其他資訊。財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心(以下簡稱TORI)於2019年引進之高頻相位陣列雷達，已於墾丁建置之8MHz 8頻道3x3方陣陣列雷達系統(以下簡稱PROS系統)，其系統為夏威夷大學Pierre Flament教授所研發。

雷達天線接收到的回波訊號包含了來自四面八方的海面回波，單一天線並無法有效辨析出訊號的實際來源方向。PROS系統利用多組天線同時接收反射雷達波訊號，藉由分析不同天線所接收之反射波的振幅及相位，判斷反射波的方向。本研究採用多重訊號分類演算法(MULTiple Signal Classification, 以下簡稱MUSIC演算法)解算出方向資訊，與Beamforming演算法透過距離造成的相位差，進而解算出流速有很大的差異。

PROS系統以觀測表層海流資訊為主，其主要存在於都普勒能譜的一階峰範圍內。如何快速、有效地劃定含海流資訊的一階Bragg回波區間，為徑向速度以及海流觀測資料品質之關鍵所在。本研究改採用Woods Hole針對高緯度地區透過影像識別(ImageFOLs)的方法來進行一階峰框定作業(A Kirincich, 2017)。

本研究處理及分析陣列雷達之回波訊號，透過頻譜計算都普勒頻移(Doppler shift)獲得觀測範圍內之徑向速度大小資訊，方向辨識則使用MUSIC演算法。初步驗證來源包含鄰近之TORI現有集成式雷達資料，透過基線檢測(baseline)結果顯示於2021年02月之觀測穩定區相關性最高可達0.8，後續將規劃佈放漂流浮標等現地驗證業。。

關鍵字：3x3方陣陣列雷達系統，多重訊號分類(MULTiple Signal Classification)演算法，影像識

別

一、前言

高頻海洋雷達利用電波與海洋表面重力波之布拉格共振，產生後向散射之現象，並根據接收的回波訊號與發射頻率間因表層海流所造成之都卜勒偏移(Doppler shift)。透過對回波譜圖中框定一階峰範圍並利用都卜勒頻移關係式推估載在重力波上之徑向海流速度。由於其具有遠距、範圍大及低成本等優點，近年被廣泛使用於海流觀測。

財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心(以下簡稱海洋中心)自2019年起與夏威夷大學(University of Hawaii)合作，引進非商用之8MHz高頻相位陣列海洋雷達，理想情況下可提供約250公里半徑範圍之表面海流觀測以及100公里之距離單元波浪特徵。根據墾丁當地實測無線射頻背景，頻寬採50kHz進行調變，即距離單元解析度為3公里(賴等

人, 2019)。其系統回波資訊的處理可依需求自主開發處理程序，故海面訊號源回波方向識別，除傳統相位陣列多採用之波束成型演算法(Beam-forming)外，亦可導入美國伍茲霍爾海洋研究所基於MUSIC(MULTiple Signal Classification)演算法。

此外，海洋中心於台灣南部原有兩座13MHz及一座24MHz高頻集成式海洋雷達，三座集成式海洋雷達皆為美國CODAR公司之SeaSonde高頻雷達測流系統(賴等人, 2016)。此類型雷達採用集成式天線設計及根據雷達回波強度進行方向識別技術(Direction Finding, DF)，雖然在方位識別上較相位陣列天線系統差，但因為天線量體小、所需架設空間少，也促成了海洋雷達遙測在全球的迅速發展(Roarty et al., 2019)。

本研究利用墾丁相位陣列雷達站觀測資料進行分析解算，此系統採用指向性發射並配有8支接收訊號之天線，採用矩形方陣配置，方向辨識技術上導入 MUSIC 演算法以及影像識別之雷達回波分析技術，並就解算結果進行探討。

二、相位陣列雷達佈置及訊號處理

相位陣列雷達佈置

高頻海洋雷達利用電波與海洋表面之布拉格共振，產生後向散射之現象，並根據接收的回波訊號與發射頻率間因表層海流所造成之都卜勒偏移(Doppler shift)進而推算觀測範圍內之海洋表面徑向速度大小。然而回波頻譜內包含了大量的海洋資訊(海流、風、波場等)，同時也涵蓋了環境裡的其他資訊。

財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心(以下簡稱海洋中心)於 2019 年引進夏威夷大學 Pierre Flament 教授所研發之高頻相位陣列雷達，海洋中心於屏東縣恆春鎮貓鼻頭架設 8MHz 8 頻道 3x3 方陣陣列雷達系統(以下簡稱 KNTN)進行資料分析，與 13MHz 集成式海洋雷達貓鼻頭站(以下簡稱 MABT)相距約 400 公尺。相位陣列海洋觀測系統含 4 支發射天線，8 支接收天線及機房設備相關元件，接收天線以等間距矩形陣列之方式排列如圖 1，預期可提供約 250 公里半徑範圍之表面海流觀測及 100 公里之距離單元波浪特徵。根據墾丁當地實測無線射頻背景，目前僅以其中 50kHz 進行調變，即距離單元解析度為 3 公里。海洋中心相位陣列雷達 KNTN 所使用參數如表 1 所示。



圖1. 相位陣列雷達KNTN佈置圖

表 1. 相位陣列雷達 KNTN 使用參數

項次	物理參數	數值
1	Radar frequency (MHz)	7.8125
2	Chirp length (sec)	0.455
3	Bandwidth(KHz)	50
4	Transmitter antennas	4
5	Receiver antennas	8
6	Time measurement (minutes)	60
7	Range resolution (km)	3
8	Maximum Range (km)	252
9	Sampling rate (Hz)	370
10	Number of samples per chirp	5376
11	Number of minimum chirps(NCHIRP)	7600

相位陣列雷達訊號處理

雷達波之回波訊號，由接收系統接收回波 I(In phase)-Q(Quadrature phase)訊號並紀錄成複數形式之 I/Q 資料，透過 I/Q 函數可求得回波強度與相位等訊息。將實數(I-Voltage)以及虛數(Q-Voltage)部分整合為複數回波時序列，可寫成

$$Voltage = (I - Voltage) + i \cdot Q - Voltage \quad (1)$$

接著執行第一次快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)分析複數回波時序列可得出距離序列;接著執行第二次 FFT 得出 Doppler 距離譜(圖 2)。由於相位陣列雷達 KNTN 為指向性雷達，故 Doppler 距離譜距離為負數的部份表示訊號在天線的後方，因此不具有物理的意義，僅保留正值之 Doppler 距離譜。而 Doppler 距離譜中頻率正/負值之物理意義分別表示觀測區域 Bragg waves 移動方向，接近雷達為正，遠離雷達為負。

當雷達系統接收到 Bragg 散射回波後，經過上述一連串的數學轉換後可獲得到含有海況訊息的都卜勒能譜，頻譜內包含了大量的資訊包含我們所關注的海流、風、波場等資訊，同時也涵蓋了環境裡的其他資訊。依據線性波理論，海面的波浪可視為不同頻率以及方向的成分波疊加而成。因此當海面波長為雷達波長一半時，此波長之海浪將受雷達電波激起布拉格共振散射(Bragg scattering)，進一步形成布拉格散射回波譜。

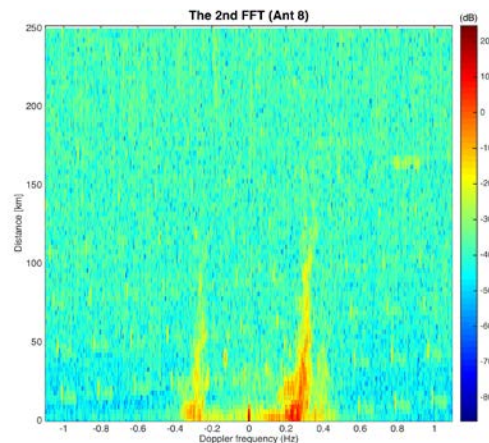


圖2. 雷達都卜勒距離譜示意圖(Ant8)

三、一階峰框定作業

相位陣列雷達 KNTN 觀測的表層海流資訊主要存在於都卜勒能譜的一階峰範圍內。因此如何快速、有效地劃定含海流資訊的一階 Bragg 回波區間，為徑向速度以及海流觀測資料品質之關鍵所在。傳統一階峰框定透過最大流速限制、訊噪比及噪音訊號的門檻等多個相關參數定義出劃定一階 Bragg 回波區間。根據 Barrick (1972) 等人提出，雷達回波平均能譜資料一階峰設定上有主要五大參數，包含 1.噪音訊號的門檻 2.交錯譜的平滑化 3.偵測一階峰與二階峰的交界 4.一階峰區間 5.頻率視窗限定最大徑向流速產出(圖 3)。然而台灣周邊海況的變化快速，若無法適切框定一階峰資

訊將影響後續解算的徑向速度精度。傳統 SeaSonde 系統一階峰的框定作業既繁複又耗時，本研究改採用導入美國伍茲霍爾海洋研究所針對高緯度地區，基於 MUSIC (Multiple Signal Classification) 演算法以及影像識別之雷達回波分區技術(圖 4、圖 5)來進行一階峰框定作業(A Kirincich, 2017)。

- 噪音訊號的門檻 → **noisefact** (噪音範圍)
- 交錯譜的平滑化 → **nsm** (平滑視窗大小)
- 偵測一階譜與二階譜的交界 → **nsec** (海面無長波時應設為0)
- 一階譜區間 → **amax/flim** (都卜勒一階譜範圍)
- 頻率視窗限定最大徑向流速產出 → **currmax** (最大都卜勒頻偏)

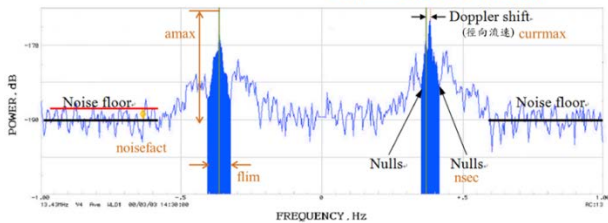


圖3. SeaSonde系統一階峰框定參數示意圖

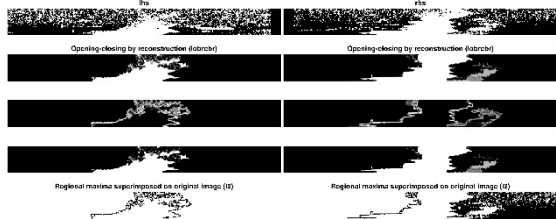


圖4. 影像識別框定技術示意圖

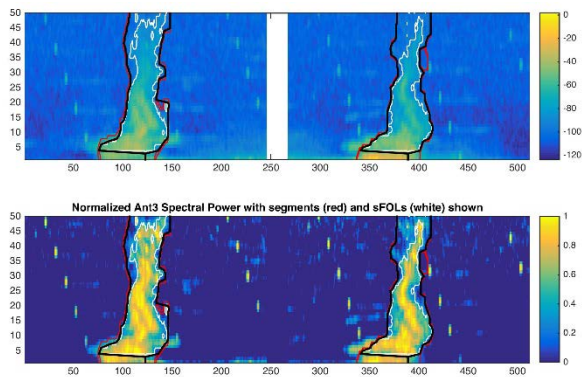


圖4. ImageFOLs技術框定結果示意圖

(下圖為強度正歸化結果)

四、方向辨識(MUSIC演算法)

相位陣列雷達 KNTN 中發射天線場型具有指向性發，但接收天線則係全向性接收，雷達天線接收到的回波訊號包含了來自四面八方的海面回波，單一天線並無法有效辨析出訊號的實際來源方向。利用多組天線同時接收反射雷達波訊號，藉由分析不同天線所接收之反射波的振幅及相位，判斷反射波的方向。

雷達測流在計算目標訊號方位到達(Direction Of Arrival, DOA)時分為兩種型態，本研究採用 Schmidt (1986)提出之 MUSIC 演算法，其為一種矩陣特徵向量的分解技術。與 Beamforming 演算法透過距離造成的相位差，進而解算出流速有很大的差異。在訊號領域

中，可將自譜(auto-spectrum)與交錯譜(cross-spectrum)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，從而估測主要信號來源的方向。

使用 MUSIC 演算法必須先假設目標源的個數 N ，理論上目標源的個數範圍為 $1 < N < M - 1$ ，其中 M 是接收天線的數量。然而實際運算時，訊號可能會來自超過 N 個方向，進而影響 MUSIC 演算法在方位估算的準確度。理論上，洋流剖面之單一徑向速度，不可能包含超過三個可解析的 DOA 解(Laws 2000)。因此，PROS 系統沿用 WHOI (A Kirincich 2019)設定，假設目標源的個數 $N=4$ 。目標物之 DOA 解算主要包含四個步驟(如圖 5)，分別說明如下：

(1)將原始交錯譜序列中對應的 8 組自頻譜(auto-spectrum)及 8 組交錯譜(cross-spectrum)所記錄的平均電壓值取出，並建構出 8×8 的共變異矩陣(covariance matrix) C ：

$$C = C(r, f) \quad (2)$$

其中， r 為給定的距離， f 為多普勒頻率，而共變異矩陣為一複數型態的 Hermitian 矩陣。

(2)利用上式將所建構之共變異矩陣作特徵值分解(eigenvalue decomposing)：

$$C = EAE^{-1} \quad (3)$$

其中， E 為 C 的特徵向量；對角線數值 λ 為特徵值，是將共變異數矩陣作特徵值分解後產生出的特徵值 λ_i ，由大到小排列後 λ_i 依序分別對應到 E_i 的正交特徵向量(orthogonal eigenvector)。

(3)定義子空間型態(subspace type defining)。經特徵分解求得特徵值與特徵向量後進而分成訊號子空間(signal subspace)與雜訊子空間(noise subspace)，利用上述子空間正交特性，可將信號來源的方向進行估測。所求得最大的特徵值以及對應之特徵矩陣代表海面回波訊號，而較小的特徵值則代表雜訊。

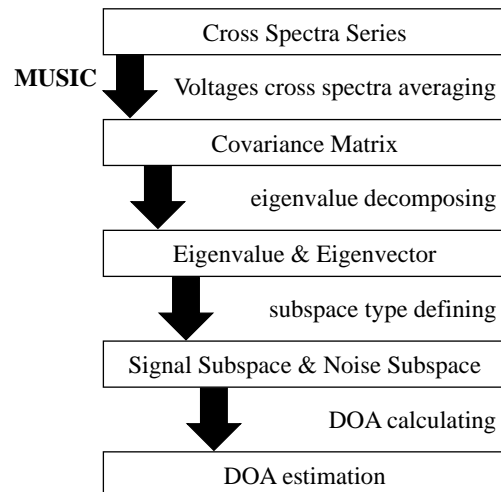


圖5. 目標物之DOA解算流程圖

理論上，當接收天線收到某一方向傳來的海面回波訊號，上式計算結果就會獲得非零的特徵值，且雜訊的特徵值會小於海面回波訊號的特徵值。然而當回

波訊號來自於兩個以上不同的方向時則未必成立，因此必須加入判斷條件，PROS 系統參考 Lipa et al. (2006) 提出之三個可行性之判別門檻(表 2)。若三種判斷條件中有任一條件不符，則轉為使用單一角度(single angle solution)之假設進行訊號之解算，單一角度解算(single angle solution)即假設特定條件之回波訊號僅來自於某一方向。

表 2. 可行性之判別門檻表

項次	判別門檻說明
1	共變異數矩陣中的電壓最大值與次大值之間的比值須 < 40
2	回波訊號強度中的最大值與最小值之間的比值須 < 20
3	訊號矩陣中的對角矩陣(diagonal elements)乘積與非對角矩陣(off-diagonal elements)乘積之間比值須 > 2。

(4)算目標訊號到達方位估測(Direction Of Arrival, DOA)函數：

$$P_{music} = \frac{1}{A^H E_N E_N^H A} \quad (4)$$

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。利用雜訊子空間與訊號子空間之正交特性，當 $A(\theta)$ 越接近正確訊號來源時， $A(\theta)$ 投影在訊號子空間的成分越高，與雜訊子空間 E_N 內積將趨近於零。換句話說，當 $A(\theta)$ 與 E_N 正交時 P_{music} 的分母趨近於零而產生峰值。利用此特性，MUSIC 在 DOA 解算結果顯示在特定角度將產生峰值(圖 6)，進而有效估算訊號來源。

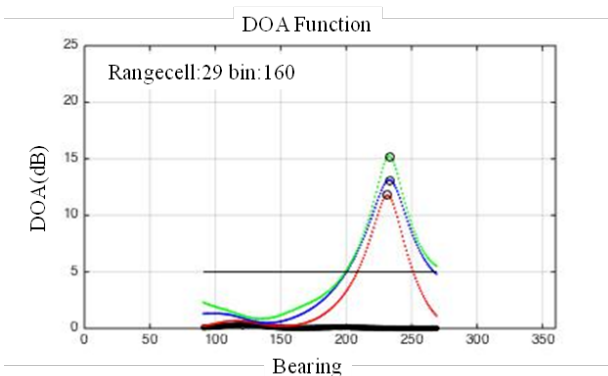


圖 6. 方位角估算結果示意圖

五、初步結果及未來規劃

用高頻雷達蒐集都卜勒距離譜一階峰之頻移，再反推求得海面徑向流速度，將整個海域依序求解各距離元的徑向速度，並標示在雷達範圍圖內即可求出台灣南部海域內徑向流場圖。然而 KNTN 徑向流場空間產出率分布圖顯示在近岸區域、西南海域以及 150 公里至 250 公里遠程海域產出率不佳(圖 7 左)。以下分別針對三個區域進行論及說明：

(1)近岸 0 至 15 公里區域：影響雷達相關參數包含頻寬及完整啁啾(chirp) T_r 長度。頻寬與系統距離解析度成正比；而 T_r 長度則影響類比數位轉換器(ADC)所需最低取樣率 F_s (Hz)。以 PROS KNTN 為例，理論推導系統近岸盲區為 3 公里(即距離解析度)。然而，實際盲

區約 0~15km，透過對回波訊號快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)所得出距離序列，結果顯示近岸盲區 0~15km 受到直接波(雜波)影響，進而限制回波中 Bragg 波的資訊(圖 8)。

(2)西南海域：由於發射天線佈陣指向東南，即意味向西南的傳輸功率將遠低於向東南，因此造成徑向速度在東南方的表現較佳，資料產出率與發射天線理想場型套疊結果顯示兩者分佈情況一致(圖 7 右)。

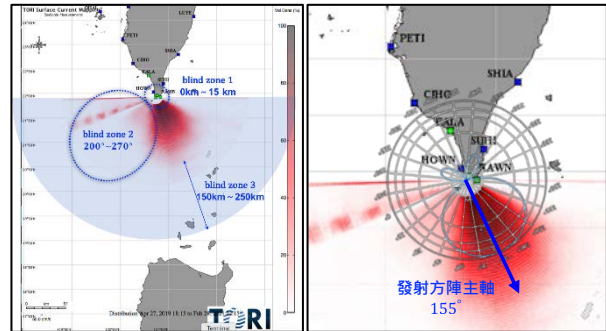


圖 7. 徑向資料產出率分佈圖(左)

產出率與發射理想場型套疊示意圖(右)

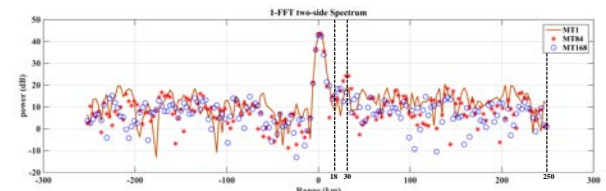


圖 8. 單一啁啾(chirp)雷達都卜勒譜示意圖

(3)遠程 130 至 250 公里海域：推估影響原因包含天線性能(發射功率不足)、D-Tacq 基頻電路與 ADC 取樣電路(取樣率不足)及射頻電路(SNR 不足)。

相位陣列雷達初步比對結果

當高頻雷達之測流結果與現場同步觀測的流場資料比對時，應考慮不同儀器在觀測條件下時空差異以及後端訊號處理方式之間的差異。因目前雷達系統 KNTN 產出為徑向系統，故本篇僅初步討論徑向物理量。KNTN 方陣陣列海洋雷達，目前最遠觀測距離自岸基向外海約 130 公里。鄰近海洋中心建置的岸基雷達測流系統(TOROS)之貓鼻頭站、香蕉灣站及南灣站因採用美國 CODAR 系統，13MHz 與 24MHz 系統最大測距由岸基向外海分別可達約 75 及 40 公里。

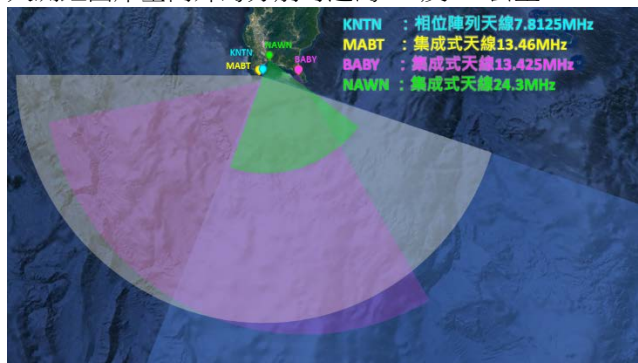


圖 9. KNTN 及鄰近雷達站位置示意圖

因鄰近資料浮標與相位雷達系統觀測範圍並無重疊，故本研究先以 13MHz CODAR 系統之香蕉灣站與鄰近鵝鑾鼻系統之水利署鵝鑾鼻浮標資料進行比對後，再與相位雷達系統進行基線檢測(Baseline velocity Comparisons)作業。透過間接比對結果可初步推論相位雷達系統觀測海流資訊之有效性。

初步驗證顯示香蕉灣站與鵝鑾鼻浮標流速資料於 2021 年 02 月之觀測穩定區相關性約為 0.6。探究錨錠浮標於雷達測流間的偏差原因，除了錨錠系統單點侵入式觀測方式和雷達遙測系統本存在空間與時間的差異外，鵝鑾鼻浮標位處近岸，其地形複雜性影響海流在空間上中的均一性(homogeneity)，進而影響了兩系統測流結果的相關性(呂等人, 2019)。過往台灣周遭錨錠浮標與雷達測流驗證作業結果，也顯示位於平直海岸或流場平穩的區域會有較高的相關性。

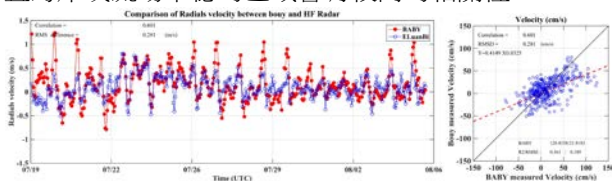


圖10. 鵝鑾鼻錨錠浮標與香蕉灣雷達站時序序列圖

基線檢測(Baseline velocity Comparisons)概念為，在理想情況下兩獨立系統在同一觀測單元內將演算出相同海流速度。南灣海域除了相位列雷達系統 KNTN 外，同時還有三座集成式海洋雷達，此配置可提供一種快速且持續的方式評估雷達系統中速度不確定性，因為測量中的時空尺度都可以匹配(Paduan, J.D. et al., 2006)。理想的基線檢測為兩個獨立雷達沿連接它們的基線中點，所測得的數值進行比對。然而 KNTN 與他站的理想基線皆位於近岸盲區，即(1)近岸 0 至 15 公里區域，因此調整觀測點至產出相對穩定區域來進行檢驗。此處需特別說明，觀測點的位置若非基線中點，兩雷達在觀測點的空間尺度則不一致。比對 2021 年 02 月間 KNTN 與香蕉灣/南灣站結果顯示相關性最高可達約 0.8(圖 11)，其中貓鼻頭站於此期間設備損壞故無納入比對。

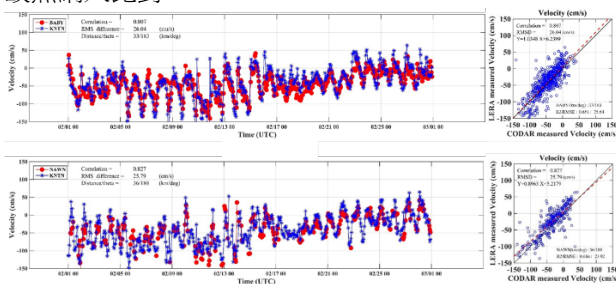


圖11. KNTN鄰近雷達站基線檢測結果圖

(上:香蕉灣; 下:南灣)

未來規劃

過往雷達測流驗證方式除了本研究所使用之錨錠浮標與兩座以上雷達站的基線檢測外，就是大量佈放漂流浮標。然而不論錨錠或是漂流浮標等侵入式觀測系統與雷達系統都存在時空尺度不均的問題。根據電

磁波與粗糙水面作用理論可知雷達訊號特性品質與入射角度及雷達波瓣方向與波浪方向的夾角有關，這說明了為何雷達觀測結果在空間上的誤差分佈不同。海洋中心規劃 2022 年於此海域佈放漂流浮標，期望透過相關實驗除了驗證雷達系統測流品質外，另可發展出一套適用於雷達遙測系統的驗證機制。

Abstract

High frequency ocean radar utilizes the strong backward scattered Bragg resonance between the radio waves and ocean surface waves to extract the sea state. The ocean surface radial velocity within the observation range could then be estimated by calculating the Doppler shift of the received signal. Gathering the radial velocities provided by two vicinal stations at least, the surface current field could be obtained accordingly. The echo spectrum contains large amount of ocean information including not only current, wind and wave, but also wealthy environmental messages. A 8-channel 3x3 square matrix array radar system (Phased-array Radar Observation System, PROS) with 8 MHz operating frequency has been established by Taiwan Ocean Research Institute (TORI) in Kenting, which is a high frequency phased array radar system developed by Prof. Pierre Flament from Hawaii University.

Generally, radar antenna receives echo signal in all directions, so it's difficult to distinguish the direction of source. PROS could determine echo signal direction by analyzing the amplitudes and phases of received echo signals from multi-antennas simultaneously. This study uses MUlti-SIgnal Classification algorithm (MUSIC) to calculate current direction. The result of MUSIC has significant difference compared with Beam-forming algorithm which derive current direction by calculating the phase differences of the reflected signals.

PROS is mainly used to observe surface current, which is existing within the first order peak region of Doppler spectrum. To rapidly and efficiently delineate first order Bragg echo interval is critical for better quality of radial velocity and observational current data. This study utilizes the ImageFOLs method developed by Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) to confine first order peak in high latitude areas (A Kirincich, 2017).

This study also process and analyzes the echo signal of array radar. The radial velocity amplitude within the observation range is acquired by calculating Doppler shift through spectrum, and direction is recognized by MUSIC algorithm. Preliminary verification is finished by comparing with the data acquired by TORI's existing vicinal integrated radar. The baseline verification shows the highest correlation could be up to 0.8 in the stable area in February 2021. Furthermore, drifting buoys are planning to be deployed for in-situ data verification in the near future.

六、參考文獻

1. D. Barrick, (1971), First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea. IEEE

- Transactions on Antennas and Propagation, vol. 20, no. 1, pp. 2–10.
2. Kirincich, A., Emery, B., Washburn, L., Flament, P.,(2019), Improving Surface Current Resolution Using Direction Finding Algorithms for Multiantenna High-Frequency Radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 36, 1997–2014.
 3. Kirincich, A., (2017), Improved detection of the first-order region for direction-finding HF radars using image processing techniques. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 34, 1679–1691.
 4. 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.
 5. Paduan, J.D.; Kim, K.C.; Cook, M.S.; Chavez, F.P. Calibration and validation of direction-finding high-frequency radar ocean surface current observations. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2006, 31, 862–875.
 6. Roarty H, Cook T, Hazard L, George D, Harlan J, Cosoli S, Wyatt L, Alvarez Fanjul E, Terrill E, Otero M, Largier J, Glenn S, Ebuchi N, Whitehouse B, Bartlett K, Mader J, Rubio A, Corgnati L, Mantovani C, Griffa A, Reyes E, Lorente P, Flores-Vidal X, Saavedra-Matta KJ, Rogowski P, Prukpitikul S, Lee S-H, Lai J-W, Guerin C-A, Sanchez J, Hansen Band Grilli S., (2019) “The Global High Frequency Radar Network,” *Front. Mar. Sci.*, 6:164. doi: 10.3389/fmars.2019.00164
 7. Schmidt, R. O. (1986). Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 34(3),276-280.
 8. 賴堅戊、黃郁軒、徐堂家、陳思樺、楊雅兆、吳季莊、陳少華、余昭明、林昆毅 (2016) 「104年度台灣四周海域表層海流觀測年報」，技術文件 2016-TR-018，國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心。
 9. 賴堅戊、林昆毅、蕭毓宏、黃郁軒、徐堂家、楊文榮、呂宜潔(2019) 「北側呂宋海峽雷達遙測實驗平台建置」，108年天氣分析與預報研討會論文集。
 10. 呂宜潔、賴堅戊、黃郁軒、吳季莊 (2019) 「高頻雷達徑向資料品管流程之研發」，108年天氣分析與預報研討會論文集。
 11. 程嘉彥、陳少華、黃郁軒、徐堂家、余昭明、蕭毓宏 (2020) 「應用陣列雷達觀測海洋表面流場」，第42屆海洋工程研討會論文集。
 12. 黃郁軒、程嘉彥、余昭明、陳少華、徐堂家、陳世明、王建堯、蕭毓宏 (2021) 「相位陣列海洋