

相位陣列海洋雷達資料品質初步探討

Preliminary Discussion on the Data Quality of Phased Array Marine Radar

陳少華¹ 徐堂家¹ 程嘉彥¹ 蕭毓宏¹
¹財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心

摘要

財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心相位陣列海洋雷達於2019年完成屏東貓鼻頭站硬體架設，2020年進行發射天線移設及校驗作業，並陸續解決天線硬體問題，如2號天線頻譜錯置，5號天線無接收訊號等等問題。為瞭解此區域雷達回波的特性及資料品質，就目前雷達資料進行統計分析，初步分析結果在本區域UTC 9點到12點資料易受環境雜訊干擾，使得一階峰訊號不易辨識，UTC 0點-5點為本地區資料訊號最佳的時間區間；訊號隨著距離增加而遞減，最遠距離為150公里。

關鍵字：高頻雷達、陣列海洋雷達

一、前言

高頻雷達測流系統為一不需直接接觸海面，由岸上雷達發射雷達波，如海面波浪波長為雷達波的 $n/2$ 倍，會產生布拉格散射，雷達接收天線接收到強大的經波浪散射的回波訊號，在二次傅立葉頻譜有明顯峰值產生(Crombie,1995)，明顯峰值為一階峰能量(Barrick,1972)，並由一階峰頻率和布拉格波頻率的差值計算出靠近雷達及遠離雷達的海流流速分量(Barrick,1997)，需透過兩站以上並間隔適當距離的雷達站所各別產出的雷達流速分量合成出真實海流的流速及流向(Lipa and Barrick,1983 及 Kim et al.,2007)。

傳統海流量測方法，受限於天候，如若海況狀況不佳，便無法於海上進行儀器佈放作業獲取海流資料，但高頻雷達測流系統固定架設於岸上，不受海上天候影響，可連續不間斷觀測大範圍海表面海流資料，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2009年起於台灣沿海區域建置由美國codar公司研發之高頻雷達測流系統(楊等，2010)，獲取海上回波訊號，解算出台灣周遭海域海流流況。

雖說高頻雷達測流系統與傳統直接碰觸海水的儀器而言，不易受天候影響，但實際上雷達資料同樣為觀測資料，雷達波的回波可能受環境雜訊及電離層影響造成觀測範圍縮小，影響資料品質，限制雷達效能(鍾等，2016)。Fang et al.(2014)在美國阿拉斯加雷達資料品質研究發現，由於電離層干擾造成雷達資料在UTC 07:00-11:00空間產出筆數降低。

本研究採用海洋中心2019架設於恆春墾丁站(賴等，2019)由夏威夷大學研發之線性調頻相位陣列雷達(Least-Expensive Radar, LERA)，由雷達接收

之IQ電壓原始資料，經過二次快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)所取得的能譜資料，初步界定出訊號及雜訊區間，以時序列回波強度變化初步探討墾丁站區域資料品質狀況。

二、陣列海洋雷達建置與訊號處理

陣列海洋雷達建置及維運作業

位於墾丁站的相位陣列雷達裝置主要包含9支接收天線陣，架設型式為長寬皆25公尺的田字型陣列，其中一角落天線不使用，如圖1所示，9*為不使用的接收天線，其主要功能為測試及備用，4支發射天線為矩形擺放(如圖2)，天線擺放間距為雷達波長的一半，並配置一台發射機、一台接收機，接收機內配置Linux嵌入式運算處理器及訊號產生器，可控制雷達系統中心頻率及頻寬，並產出雷達發射訊號；雷達控制電腦採用Intel NUC迷你準系統電腦，安裝Linux系統Ubuntu 18.04版本，進行雷達參數設定及資料解算作業，本中心於墾丁貓鼻頭所使用頻率為7.8125MHz、頻寬採用50kHz，距離解析度依據頻寬為3公里，單一chirp持續時間為0.455秒，圖3顯示為一個chirp在0.455秒內，訊號由fb(7.7875MHz)線性調頻至ft(7.8375MHz)，中心頻率為 $(fb+ft)/2$ ，頻寬為 $ft-fb$ 。整點0分時控制電腦由接收控制單元蒐集3540秒雷達回波的IQ原始資料(dta資料)，因原始檔案過大，為使資料傳輸順利及節省儲存空間，原始資料由單一chirp採樣數5760，降採樣至168/chirp，採樣頻率由原11815Hz降至370Hz，檔案資料由2.49GB降至26.9MB，詳細雷達參數資料如表1。

墾丁陣列站接收天線及機房於2019年架設於墾丁貓鼻頭公園內，2020年因土地使用問題，發射天線由原位置往西移約200公尺至林務局用地，距接

收天線約500公尺，如圖2所示，並進行發射天線調校作業，調校作業包含量測發射天線場型、電壓駐波比(vswr)、功率及相位。

維運期間，接收天線5無訊號產生，本中心工程師至現場檢測為發射天線端晶片進水，夏威夷大學提供晶片電路圖，重製電路板更換後正常(圖4)。

墾丁陣列站2019年架設完成時，即發現2號天線頻譜對置現象(圖5)，本中心工程師與夏威夷大學團隊反覆交互檢測經一年多的努力，檢測問題於接收機內電路板上，零組件焊接相反導致此結果，重新焊接後正常。



圖1. 墾丁海洋雷達站接收天線陣及測站位置

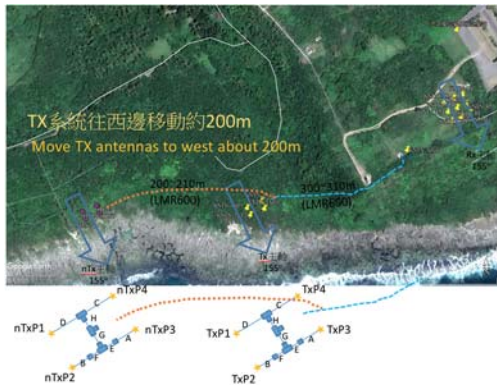


圖2. 墾丁站發射天線移設位置

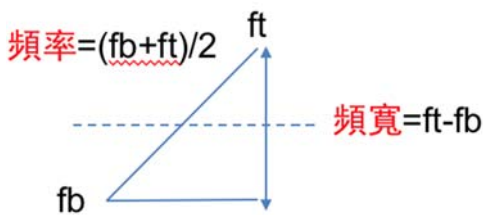
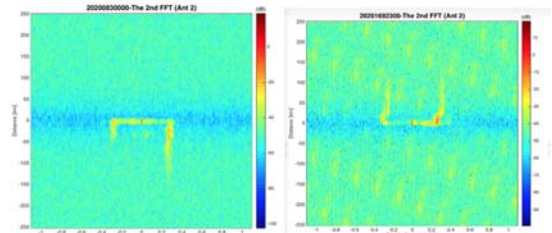


圖3. 單一chirp在0.455秒內的頻率時間變化圖



圖4. 5號天線無訊號，左為接收天線端電路板進水，右為重製電路板，更換後正常。



LERA_KNTN 2020/06/10 修復

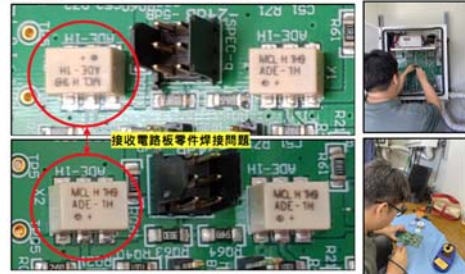


圖5. 2號天線頻譜反置(上圖左)及接收電路板零件焊接對調後(下)，頻譜恢復正常(上圖右)。

表1. 墾丁陣列雷達參數表

雷達工作頻率(MHz)	7.8125
發射天線陣	4 (矩形)
接收天線陣	8 (田字型，角落一支不使用)
量測收集時間(秒)	3540
距離解析度(km)	3
單一chirp持續時間(sec)	0.455
頻寬 (kHz)	50 kHz
原始採樣頻率(Hz)	11815
降採樣後採樣頻率(Hz)	370
原始單一chirp採樣數	5760
降採樣後單一chirp採樣數	168

陣列海洋雷達訊號處理

本研究採用python程式處理IQ資料，讀入已降採樣之IQ雷達資料，I表示同相(in-phase)稱為實部，Q表示正交(quadrature)與I相位差90度為虛部，IQ訊號為(I+iQ)的形式，如圖6所示為2021/7/23 05:00(UTC)天

線1的IQ訊號圖，橫軸為chirp數，縱軸為單一chirp採樣數，顏色表電壓伏特。

Kirincich et al.(2019)為研究多天線雷達於表面海流解析度的提升，於美國東岸的南塔克特島 (Nantucket) 及瑪莎葡萄園島(Martha's Vineyard)架設兩座夏威夷大學研發之Iera雷達，並提供研究所開發程式(Kirincich,2019)，當中Iera IQ 資料換算電壓公式如下：

$$X \text{ (in V)} = 10 * \text{obs_counts} / 2^{17}$$

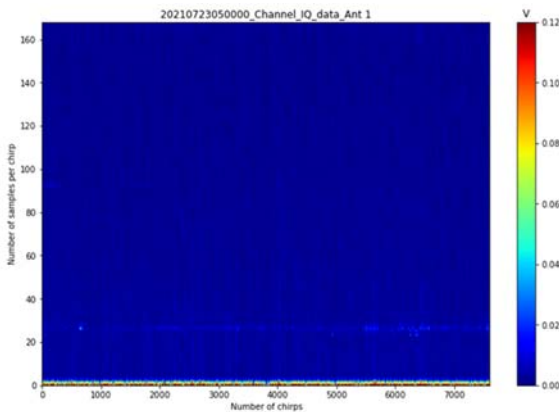


圖6. 2021/7/23 05:00(UTC)天線1的IQ訊號圖

訊號處理第一步，針對單一chirp進行快速傅立葉計算，圖7上為對第1000個chirp的IQ訊號在0.455秒時間的168個觀測數變化 (Y軸未進行電壓變化轉換)，圖7下為測試各窗函數套入對第一次快速傅立葉轉換比較，藍表無窗函數、綠表Hamming窗，紅表Hanning窗、橘表Blackman-Harris窗，相互比較並無太大變化，故取用和Kirincich (2019)程式相同的Blackman-Harris窗進行下一步計算。

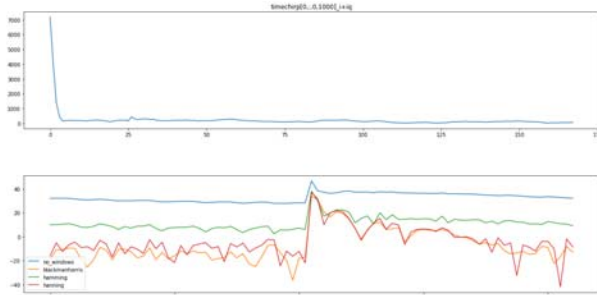


圖7. 上圖為IQ訊號在第1000個chirp在0.455秒內的時序變化，下圖為上圖的快速傅立葉轉換套用窗函數結果。

蒐集全部時間(3540秒)的第一次傅立葉轉換頻譜圖如圖8 (僅顯示距離為正的數據)，縱軸為距離，橫軸為觀測時間，顏色代表電壓值 (dB)。電壓值轉換能量dB公式為

$20 * \log_{10}(|I + iQ|)$ 。

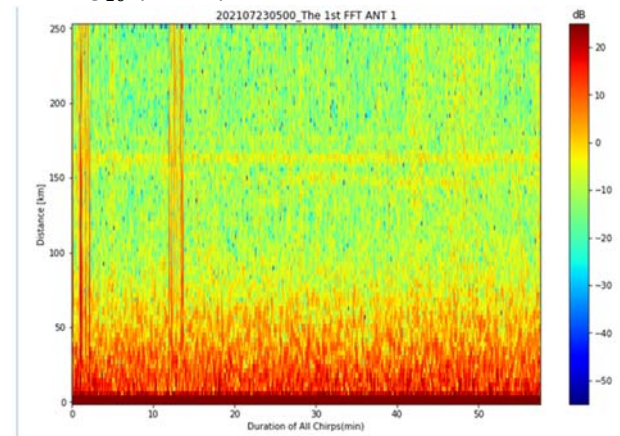


圖8. 2021/7/23 05:00(UTC)天線1的IQ訊號快速傅立葉頻譜圖

第二步，為防止訊號洩漏 (leakage) 狀況，同樣使用視窗加權函數 (Blackman-Harris窗)，進行第二次快速傅立葉轉換頻譜(圖9)，黑色虛線表示理論布拉格頻率位置，對應雷達操作頻率7.8125MHz，由(1)解算出布拉格頻率為0.282Hz。

$$F_{brag} = 0.102 * \sqrt{Freq} \quad (1)$$

如海流在沒有流的狀態下，一階峰位置會在此，如有海流流動狀態與此頻率的偏移量可計算出海流靠近及遠離雷達的流速，及徑向海流速度。

$$f_D = 2V/\lambda \quad (2)$$

其中 f_D 為都卜勒頻偏 (Doppler Shift)， V 為徑向方向上的海流速度， λ 為電磁波波長。

第三步，框定最大偏移量即為最大徑向流速設定，如圖9實線 (藍線)，最大徑向海流速度設定為200m/s，由(2)式推導出頻率偏移量框定為海流訊號範圍(一階峰區域)。

第四步，雜訊區間(noise floor)界定，根據Cosoli et al.(2012)由工作頻率25MHz雷達資料品管分析研究，將雜訊區間界定於-1Hz到-0.6Hz及0.6Hz-1Hz之間，由Lai et al.(2020)一階峰量測研究，將二階峰界定 $\sqrt{2} * F_{brag}$ 處，依墾丁站中心頻率計算二階峰位在0.399Hz，本研究藉由營運至今之墾丁站能譜圖資料，避開二階峰區間，將雜訊區間定義在-1.1Hz到-0.75Hz及0.75Hz-1.1Hz之間，如圖9紫線。

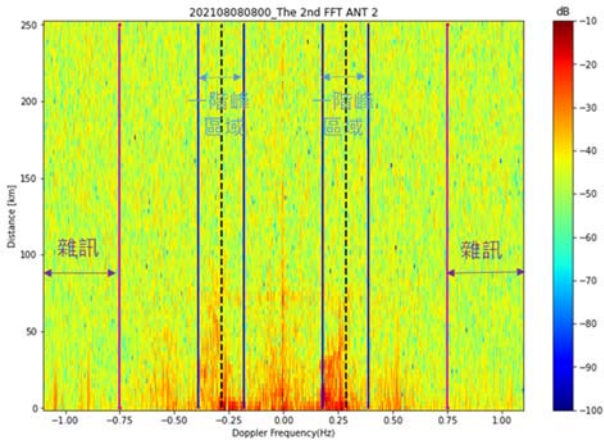


圖9. 2021/8/8 08:00(UTC)天線2都卜勒能譜，橫軸為都卜勒頻率，顏色表回波強度（單位為dB），縱軸為距離（單位：公里）

三、結果與討論

以每小時訊號區間強度平均(圖9藍色區間)及雜訊區間平均(如圖9紫線所示範圍) 接收1、3、5及7號天線在2021年8月每小時時間序列圖(圖10)，天線3在2021年8月UTC 8/28 03:00-04:00之間訊號及雜訊能量數值瞬間下降，疑似天線訊號異常；其餘各圖顯示每日都有固定震盪，訊號及雜訊值在夜間近乎重疊，表示夜間常有訊號及雜訊無法區分現象，各天線間變化大致相同，背景雜訊皆很高並且和訊號兩者差距很小，後續資料以5號天線(圖1接收天線陣中間位置)為主要分析結果說明。

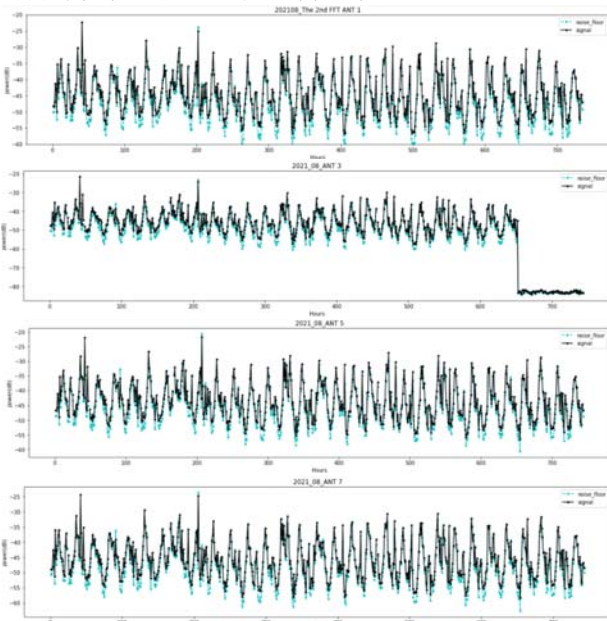


圖 10. 接收 1、3、5 及 7 號天線訊號雜訊區間平均每小時強度的時間序列圖(2021 年 8 月)

將圖10訊號及雜訊強度資料依照UTC時間，在8月區間進行時間平均，以5號天線為例繪出0-23點月平均訊號及雜訊能量變化圖(圖11)。訊號和雜訊間在UTC 0點到5點兩者差距較大，環境雜訊低，UTC 5點後雜訊持續攀升，11點時雜訊值最高，訊號和雜訊之前沒有分別，11點後雜訊漸漸往下降，訊號及雜訊曲線分離，表資料品質好轉，圖12為天線5在2021年8月2日UTC 11點都卜勒能譜，能譜顯示高度雜訊在此時間區間，一階峰被雜訊屏蔽無法分辨。而典型電離層干擾如圖13，圖中顯示天線5在2021年8月2日UTC 3點都卜勒能譜，能譜在距離100公里處有橫向干擾。

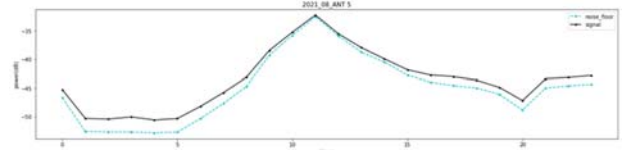


圖11. 天線5在2021年8月0-23點月平均變化

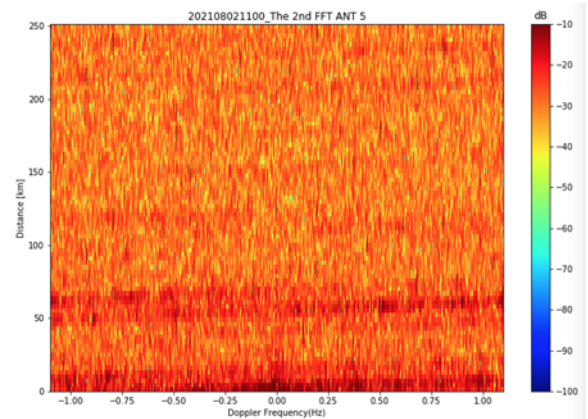


圖12. 天線5在2021年8月2日UTC 11點都卜勒能譜

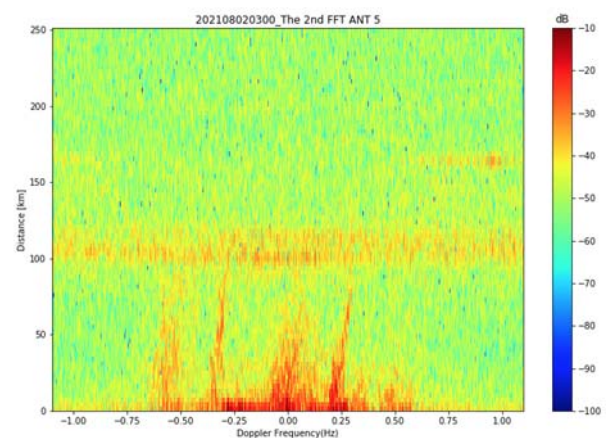


圖13. 天線5於2021年8月2日UTC 3點之都卜勒能譜

取出天線5在相同時間，在29.97公里處的都卜勒能譜資料如圖14，以每一個距離單元計算雜訊區間平均及訊號區間平均，於此時間區間訊號及雜訊依距離的變化如圖15(上)，在100公里處雜訊突然上升，對照圖13頻譜圖，表100公里處所顯示的電離層橫向干擾，170公里處在右側頻譜也有一顯著橫向干擾，在圖15(上)170公里右側雜訊平均也有一凸起的峰值。圖15(下)訊號及雜訊的差值隨距離的變化，隨著距離遞增慢慢下降，至100公里處近乎為0，由圖13頻譜圖一階峰也是在100公里處受電離層橫向干擾而無法分辨。

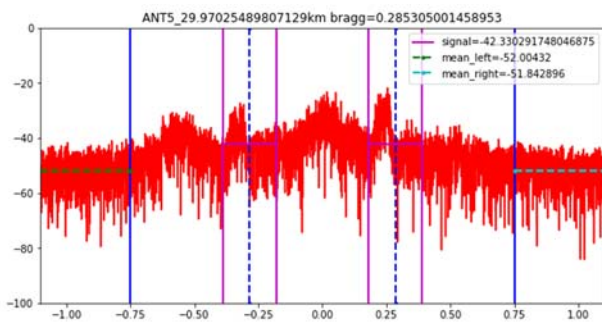


圖14. 天線5在2021年8月2日UTC 3點，距離29.97公里的都卜勒能譜，橫軸為頻率(單位為Hz)，縱軸為回波強度(單位為dB)

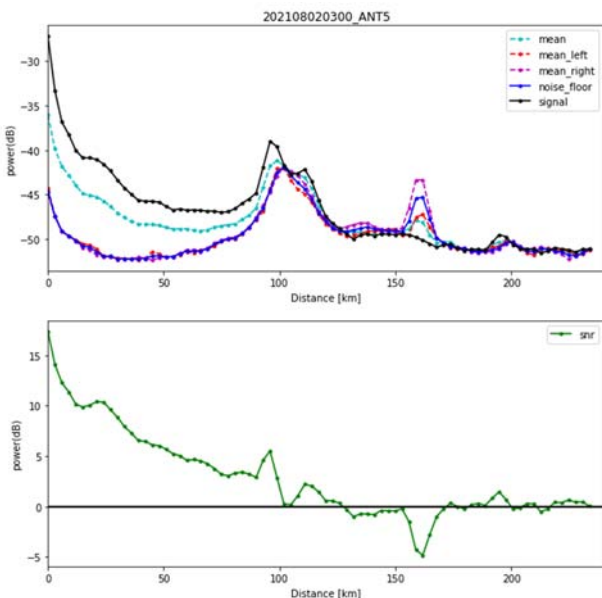


圖15. 天線5於2021年8月2日UTC 3點時，雜訊及訊號強度隨距離的變化(上圖)及訊號與雜訊差值隨距離的變化(下圖)。

最後以天線5在8月月平均訊號及雜訊隨距離變化狀況(圖16)，訊號隨著距離在50公里內迅速遞減，50-100公里間緩慢遞減至和雜訊幾乎不可分，訊號品質應可界定在100公里內資料較可信。各時間點會有不同的干擾如背景雜訊蓋過整個訊號(圖12)及典型電磁波在100公里處呈現橫向干擾(圖13)。

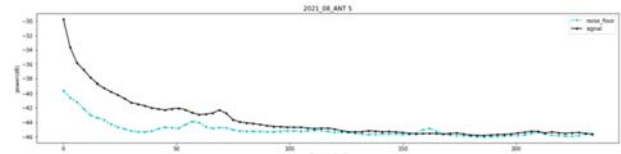


圖16. 5號天線隨距離變化的月平均回波雜訊及訊號資料

四、結論

1. 以每小時訊號區間強度平均及雜訊區間平均在2021年8月每小時強度的時間序列圖，可初步判定天線硬體設備異常狀態，若有異常如天線電纜線損壞或接收天線電路板異常，都可能如圖10天線3在8/28 03:00-04:00之間訊號及雜訊能量數值瞬間下降，可快速檢測設備異常時間，可作為日常檢視雷達硬體健康度的指標之一。
2. 以2021年8月UTC整點月平均資料，資料狀況0點到5點間環境雜訊較低，5點以後慢慢上升至11點為巔峰，表9~12時間環境雜訊蓋過訊號資料如圖12所示。
3. 回波能量隨距離的變化，每小時所受的干擾狀況皆不太相同，藉圖15可看出橫向干擾狀況。
4. 初步得出8月時間回波能量在0-5點雜訊最低，雜訊及訊號的差值也較大，表此時間區段資料品質狀況良好，9-12點區間為資料品質不佳，背景雜訊蓋過訊號，過此時間區間後，訊號強度逐漸回升。

五、未來工作

未來將搜集更多資料持續進行本區資料品質研究，並同時以附近已建置之codar雷達能譜資料進行環境雜訊比對作業。

誌謝

本研究在科技部資助財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心之「海洋科技發展計畫」下推展，特此感謝。感謝國家海洋研究院楊文昌博士及賴堅戊博士為海洋中心海洋雷達奠定基礎，並感謝夏威夷大學Pierre Flament教授、中央大學錢樺老師實驗室及博士生陶瑞全提供陣列雷達資料相關程式及技術合作與支援。

參考文獻

1. 楊文昌、梁恩昱、王雅真、陳少華、胡建驊、李俊賢,2010：“利用高頻雷達監測台灣四周海域表層海流”，第32屆海洋工程研討會論文集，683-688
2. 賴堅戊、林昆毅、蕭毓宏、黃郁軒、徐堂家、楊文榮、呂宜潔，2019：“北側呂宋海峽遙測實驗平台建置”，108年天氣分析與預報研討會，A5海象測報與應用-131.
3. 鍾育仁、呂黎光、陳禹儒、楊穎堅、崔怡楓、黃承琮,(2016)“超視距雷達測流系統之環境雜訊特性初探”,海軍軍官學校海洋科學與應用學術研討會，第45-53頁。
4. Barrick, D. E., 1972: “First-order theory and analysis of MF/HF/ VHF scatter from the sea. “. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 20, pp. 2-10.
5. Barrick, D.E., Evans, M.W. and Weber, B.L. (1977) “Ocean surface currents mapped by radar,” *Science*, 198, pp. 138-144.
6. Crombie, D. (1955) “Doppler spectrum of the sea echo at 13.56 Mc/s,” *Nature*, Vol. 175, pp. 681-682.
7. Fang, Y.H., Weingartner, T.J., Winsor, P.R., Statscewich, H., (2014) “Quality Assessment of HF Radar-Derived Surface Currents Using Optimal Interpolation.” *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol.32, pp.282-296.
8. Kim, S. Y., E. J. Terrill, and B. D. Cornuelle, (2008):” Mapping surface currents from HF radar radial velocity measurements using optimal interpolation.”, *J. Geophys. Res.*, 113, C10023
9. Kirincich, A., 2019: LERA HF radar developer package. Woods Hole Oceanographic Institution, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3353662>
10. 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.*, Vol.36, pp.1997-2014.
11. Lipa, B., Barrick, D.E.,(1983) “Least-Square methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSLOE,” *IEEE J. Oceanic Engineering*, Vol. OE-8, pp. 226-253.
12. Lai, Y.; Wang, Y.; Zhou, H. (2021) ,”First-Order Peaks Determination for Direction-Finding High-Frequency Radar. “. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 8.