

海洋陣列雷達應用於臺中港海象觀測之探討

李政達 交通部運輸研究所臺灣技術研究中心副研究員
林受勳 交通部運輸研究所臺灣技術研究中心助理研究員
蔡立宏 交通部運輸研究所臺灣技術研究中心主任

摘要

全球暖化日益嚴重，為降低二氧化碳的排放量與減少使用石化燃料，我國開始發展國家能源之轉型，行政院於 101 年 2 月鼓勵發展再生能源，推動「千架海陸風力機」計畫，造成海陸交通日益繁忙，交通部基於掌管各式船舶航行安全及維持新能源政策發展，衍生調查基地母港(臺中港)與鄰近周邊海域海氣象之需求，為提供船舶航行與進出港區之參考資訊使用，本所港研中心於 107 年 12 月 18 日於臺中港北淤沙區設置線性陣列海洋雷達，主要研究臺中港與鄰近海域之海象調查與特性分析，以發展雷達遙測。本研究雷達觀測波高、週期、徑向流速的時序列漲落趨勢與實測結果具有一致性，相關係數大於 0.8 以上，研究成果針對海域之波浪與海流等資料進行長期的資料蒐集、分析與建檔，可以提供交通部航港局及港務分公司船舶進出臺中港管理應用，災害發生時能適時提供海面資訊，做為處置對策及預防措施之參考，有助於離岸風電海下工程技術發展。

一、前言

臺灣海峽風力充沛，係世界上少數具有潛力的開發場址之一，基於流體力學之原理，通行斷面越窄流體速越快，新竹南寮漁港到中國福建平潭島為兩岸最短的距離，兩者僅相距 125 公里（約 68 海哩相當於臺北到苗栗的距離），故

由新竹南至中彰地區都為適合的開發地點；依照目前我國離岸風電總體開發策略，由近岸向遠域逐漸發展，因此產業鏈之港埠設施需求與承載量日漸繁重，109 年規劃累計 1,200MW 陸域風場，114 年規劃累計 3,000 MW 離岸風場，兩者併合計共設置 1,000 架以上風力機組，總裝置容量規劃達成 4,200 MW，約可占 30% 以上再生能源總設置目標。

行政院於民國 105 年推動「前瞻基礎建設計畫」興建綠能建設，重新定位臺中港之港埠發展，檢討港區之經營環境運量需求及整體規劃，後，將臺中港重塑配置成離岸風電產業發展母港，整建 5A 碼頭與興建 5B 碼頭及 106 號碼頭做為風電產業組裝與裝卸作業之重件碼頭，後線土地設置風力發電零組件堆儲基地，並開放公民營企業投資土地承載改良與組裝設施，提供港埠腹地作為風機組裝場地，以及風電專用碼頭作為運輸、物流、裝卸、倉儲等服務之用。臺中港條件優渥，距離彰化漁港僅 40 公里的距離，距離岸風場運程適中，且各項條件皆較彰化漁港更為理想，滿足風機零件的運輸與倉儲，依據臺中港務分公司近 5 年進出船舶統計資料 103 年度月平均進出船舶約 1,250 艘次，106 年度月平均進出船舶約 1,316 艘次，108 年度月平均進出船舶約 1,458 艘次，顯示離岸風電確實已經造成臺中港進出船舶日益頻繁，運量有微幅成長之趨勢，如表 1 所示。

隨著科技時代的推陳出新，遙測已逐步發展為現今最舉足輕重的觀測方式之一，不外乎是儀器維護陸域較海域安

全，維護費用較海域儀器低，觀測視距較遠，調查面積大，故自於 20 世紀初海洋雷達逐漸嶄露頭角，科學家們率先嘗試從頻譜中獲取海洋信息，高頻雷達取得了廣泛的響應與豐碩的研究成果，特別是美國 Barrick, D. E. 在國家海洋暨大氣總署(NOAA)研究期間，所發表技術報告之研究成果奠定日後高頻雷達研究的基礎，並由美國逐漸發展至世界各地。本所港研中心期望藉由本雷達系統精進海氣象調查技術，提供臺中港做為進出口船舶航行安全相關資訊使用改進傳統單點底碇式海氣象調查方式，不僅增加海氣象觀測範圍，又能解決海下維護不易等問題。

表 1 臺中港進出港船舶統計

年別	平均艘次	總噸位
103	1,250	2.4325 億
104	1,299	2.5526 億
105	1,349	2.7262 億
106	1,316	2.7144 億
107	1,284	2.7021 億
108	1,458	2.8161 億

二、海洋雷達簡介

海洋雷達發展需要追溯至 100 年前無線電發展的時代，當時科學家認為大氣層中存在一導電層可以反射電磁波，因此無線電傳輸才得以跨越大洋傳遞，為了驗正該導電層是否真實存在，Breit 與 Tuve(1925)發明了一個無線電脈衝發射與接收裝置，這套系稱之為電離層測高儀，透過量測脈衝波的反射距離推算該導電層之高度，最後證明電離層(ionosphere)的存在，與此同時逐漸衍生出多種無線電探測及定位方法：Radio Detection and Ranging，因此雷達就此縮寫為 Radar。無線電波因向天空傳遞因

而稱之天波(sky wave)，然因海水之導電性，科學家注意到某些波段(現已知為高頻波段的無線電電磁波)傳遞過程會在大氣與海表之間反覆折射，並讓訊號沿地球曲面前進，這種海水表面存在的電磁波傳播模式，稱之為地波(ground wave)，而地波雷達能被廣泛應用到氣象調查係 Barrick, D. E. 奠定具體可行的分析方法，嘗試從頻率譜中獲取海洋信息，探測超視距外的海洋特徵，探測距離可達 40~200km，因而逐漸應用於海流和波浪的觀測，雷達波傳遞形式示意圖，如圖 1 所示。

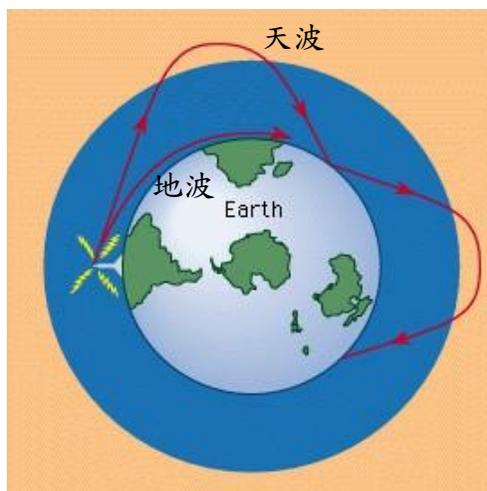


圖 1 雷達波傳遞形式示意圖

2.1 雷達頻率的分類

雷達頻率範圍約為 0.003 ~ 40GHz，分別有 HF 高頻雷達、VHF 特高頻雷達、UHF 超高頻雷達、L 波段雷達、S 波段雷達、C 波段雷達、X 波段雷達、Ku 波段雷達、K 波段雷達、Ka 波段雷達，各雷達波段分類情形如表 2 與圖 2 所示。其中頻率較低的 HF 高頻雷達與 VHF 特高頻雷達朝海面發射時在海水與大氣介面之間的傳遞衰減率甚小，一定程度會將沿著海水表面，並隨著彎曲的地球表面傳播電磁波，可於短

時間連續獲取數平方公里海面的海洋狀態參數分布，探測各項海洋動力學參數（海面風速、波高、流速等），此係其他儀器無法達成之目標，且陸域維護成本較水域維護成本低廉，因此利用高頻雷達觀測海氣象已經成為各國常規化的調查方式。

表 2 雷達波段與頻率

雷達波段	頻率(MHz)
F 高頻雷達	3~30
HF 特高頻雷達	30~300
UHF 超高頻雷達	300~1,000
L 波段雷達	1,000~2,000
S 波段雷達	2,000~4,000
C 波段雷達	4,000~8,000
X 波段雷達	8,000~12,500
Ku 波段雷達	12,500~18,000
K 波段雷達	18,000~26,500
Ka 波段雷達	26,500~40,000
MMW 毫米波雷達	34,000 以上

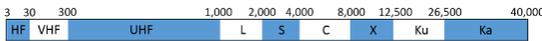


圖 2 雷達波段與頻率分類(MHz)

2.2 雷達工作的原理

雷達工作原理主要係利用都卜勒效應的概念，如圖 3 所示，當雷達發射一頻率於靠近物體，其回波訊號發生改變有頻率變高現象，當雷達發射一頻率於遠離物體，其回波訊號發生改變有頻率變低現象，經驗如同急駛而過的救護車，當車輛接近觀察者時感覺救護車的鳴笛聲越來越急促，當車輛越遠離觀察者時，鳴笛頻率又逐漸變慢，假設雷達發射頻率為 f_0 ，所測得回波頻率差為 f_D ，目標物的徑向觀測速度 v 與光速 c ，就有此關係式(1)，透過回波與發射波的頻率差，藉以測得目標物在雷達徑向上的相對速度，假設目標物於雷達徑向

所在距離位置為 R ，接收訊號時間為 Δt ，目標物體與雷達的間距為 R ，距離公式 R 可表示為關係式(2)，不論雷達形式為何，皆使用相同原理計算，故統稱為都卜勒雷達(Doppler Radar)，但由於該雷達常廣泛應用於氣象，故氣象調查的雷達又稱之為氣象雷達。

$$f_D = \frac{2vf_0}{c} \dots\dots\dots(1)$$

$$R = \frac{c \times \Delta t}{2} \dots\dots\dots(2)$$

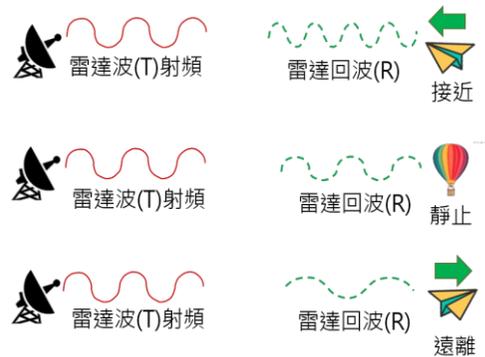


圖 3 都卜勒效應之頻偏現象

2.3 雷達應用的種類

雷達是一個多組複雜的硬體所構成之設備，完整的系統需包含發射機、接收機、發射天線與接收天線與儲存設備，如圖 4 所示，雷達的分類有許多種，其中一種分類方式係依據使用目而區別，當雷達系統搭載不同雷達的使用頻率將被賦予各種不同的功能，前 2.1 小節已簡要分述雷達波的波段與頻率，截至目前為止仍沒有一個完美的雷達波段可以實現所有的目的，現階段使用仍以軍事情用途居多，綜括來說雷達種類有預警雷達、搜索雷達、照明雷達、射控雷達與測候雷達 5 種類型，如後分述。

一般而言雷達頻率越高衰減愈大，係因波長短容易造成電磁波被干擾遮蔽，故如需探測更甚距離者，建議採用頻率較低的雷達系統，另外依據雷達方程式，雷達觀測距離與功率呈現正相關，故增加功率也增加觀測距離的方法之一，能量越強觀測距離則越遠。



圖 4 雷達的實體架構

(1)預警雷達

設備頻率 300 至 1,000MHz 超高頻(UHF)與 30~300MHz 特高頻(VHF)，發射功率數兆瓦級以上的發射器，訊號不易被大氣吸收，主要用於蒐集海空情報資料，擅長中長、遠程目標監控，缺點為精確度不足。

(2)搜索雷達

設備頻率 1,000~2,000MHz(L)與 2,000~4,000MHz(S)的雷達頻段，作用距離在 400 公里至 600 公里不等，為常見艦載監控設備之一，目前我國海軍仍使用 2D 機械式雷達居多，包括：康定艦(L)、成功艦(L)。

(3)照明雷達

設備頻率 4,000~8,000MHz(X)的雷達頻段，平均發射功率 10KW，最大功率 34KW，主要配合船艦之砲射控系統做為自動追蹤目標之用，啟動時雷達將

直接鎖定目標並發射照明波引導飛彈摧毀目標。

(4)射控雷達

設備頻率 18,000~26,500MHz(K)的雷達頻段屬於窄波範圍，雷達能量集中具有多目標搜索及追蹤功能，主要搭配射擊武器運行，實施瞄準與發射，有效距離約達 17km，此雷達搜索範圍較小，但精確度高，可測定各項參數，有效鎖定範圍內極小的目標。

(5)測候雷達

設備頻率 2,000~4,000MHz(S)與 4,000~8,000MHz(C)的雷達頻段，有效範圍距離在 300 公里至 500 公里之間，雷達回波可依據特徵分析對流性強的降雨區域，掌握降水的結構，目前臺灣共建置 8 座雷達站，分別於五分山、花蓮、七股、墾丁、桃園機場、綠島、清泉崗與馬公，如圖 5 所示，其中 4 座為中央氣象局雷達站。

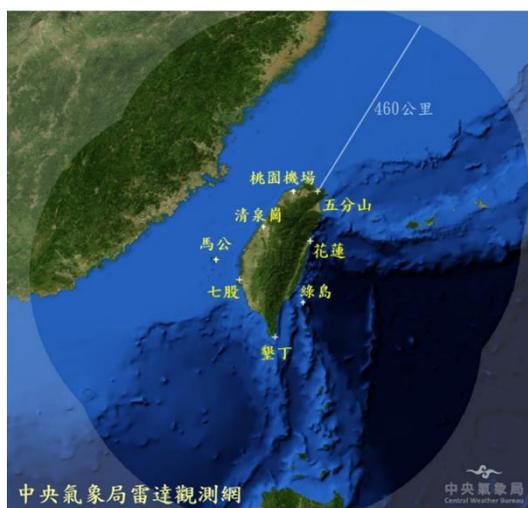


圖 5 臺灣氣象雷達觀測範圍

三、臺中港線性陣列海洋雷達訊號處理與分析

3.1 臺中港線性陣列雷達

本所海洋雷達設置地點之位於臺中港北淤沙區屬於港埠低密度開發區域，主要雷達機房座標：E 120°31'25.82”，N 24°18'39.28”，收發射天線座標：E 120°31'22.66”，N 24°18'33.95”佈設於現地擋沙牆頂部，觀測範圍扇形 120°，觀測距離最遠達 40km，如圖 6 所示，本雷達所使用參數如表 3 所示。



圖 6 本雷達站位置(臺中港北淤沙區)

表 3 本雷達規格與主要設定

本雷達參數	參數值[單位]
觀測時距	30 [min]
達頻率	27.75 [MHz]
頻寬 (Band width)	300 [KHz]
發射天線數量	4 [支]
接收天線數量	16 [支]
方位角 (Main Bearing)	296 [度]
觀測距離	40 [KM]
距離解析度 (Range resolution)	500 [m]
方位解析度 (Azimuthal resolution)	8 [度]
線性調頻發射週期 (Sampling frequency)	0.2166 [sec]
/DC 取樣頻率 (Sampling frequency)	740 [Hz]

線性調頻取樣數量 (Number of samples per chirp)	1,280
小線性調頻數量 (Number of minimum chirps)	8,192

3.2 線性陣列雷達的訊號處理

雷達原始資料紀錄成複數形式之 I/Q 資料，I/Q 資料是 RF 通訊系統中常見的調變型態，適合作為頻率調製、混頻與解碼，回波強度與相位等訊息可以透過 I/Q 函數來求得，I 表示電磁場的實部，Q 表示電磁場的虛部，如圖 7 所示。

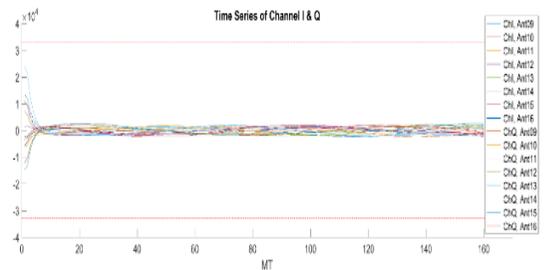


圖 7 雷達 I/Q 訊號序列圖

每個啁啾訊號間隔時間為 0.2166 秒，經過 A/DC 以 740Hz 頻率取樣，可以取出 160 個時序離散樣本，經過傅立葉轉換後可以由傅立葉係數計算相應距離元的振幅與相位，資料處理後將 8,192 個啁啾合併，可以得到受波浪影響造成 I/Q 隨時間週期震盪的雷達回波強度圖，再將縱軸進行傅立葉轉換，原縱軸時間將轉換為頻率，頻率值可運算並回推至各距離元位置，縱軸值可轉換為距離，得出橫軸仍為時間之都卜勒譜，圖 8 所示，該譜表示各個不同都卜勒頻偏下的回波強度。

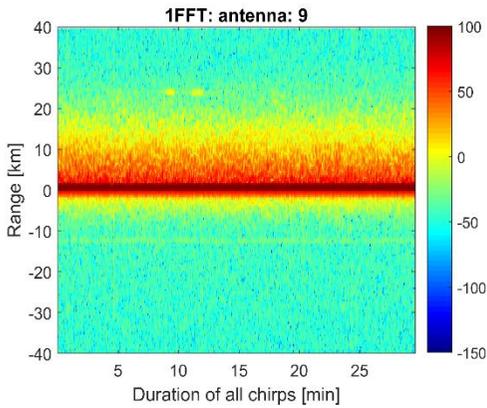


圖 8 雷達都卜勒譜

再將圖 8 時間橫軸進行傅立葉轉換，原橫軸時間將轉換為頻率，縱軸距離值保持不變，即可繪製雷達觀測中最主要的都卜勒距離譜圖，但由於本研究之高頻線性雷達為指向性雷達，故都卜勒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，將予剔除，得出實部之都卜勒距離譜，如圖 9 所示。

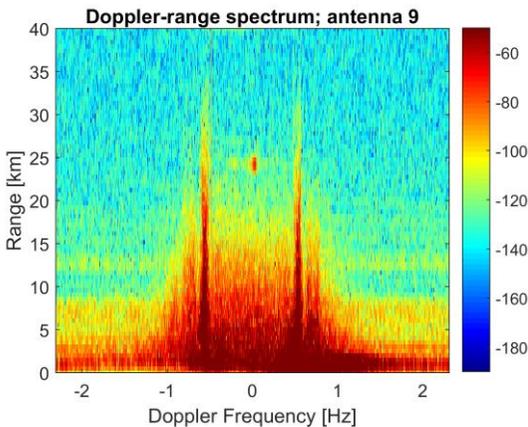


圖 9 雷達都卜勒距離譜

3.3 線性陣列雷達的訊號分析

雖然發射天線場型具有指向性發，但接收天線則係全向性接收，意即來自四面八方的訊號全部接收，利用多天線組的相位差進行波束成形 (beam forming) 以分析海面流速與波高。

(1) 海洋流場之徑向流速 (V)

海洋雷達之回波訊號會隨著波浪運動產生都卜勒頻率位移效應，由於布拉格共振波所造成的連續性頻移可紀錄於都卜勒距離譜中，透過分析都卜勒距離譜一階峰頻率位移的差值 $f_{current}$ ，再配合海面波浪波長等於雷達波長的 1/2 之公式(3)，將公式(3)代入電磁波速度公式經過換算，波浪的徑向速度 $V_{radar\ current}$ ，即可表示為公式(4)所示。

$$\lambda_{wave} = \frac{\lambda_{radar}}{2} \dots \dots \dots (3)$$

$$V_{radar\ current} = f_{current} \frac{\lambda_{radar}}{2} \dots \dots \dots (4)$$

換句話說即利用高頻雷達蒐集都卜勒距離譜一階峰之頻移，再依據公式(4)公式求得海面徑向流速，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臺中港海域內流場圖，如圖 10 所示。

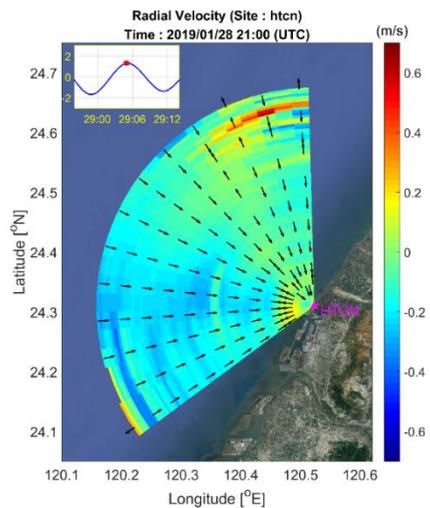


圖 10 臺中港鄰近海域流場圖

(2)海面的波高(H)與週期(T)

Barrick, D. E.(1972b, 1971b)提出許多海洋雷達的回波理論，有關都卜勒頻譜一階與第二階的理論，如公式(5)與公式(6)所示，計算背景雜訊的時候將使用背景散射定律 (Background scatter theory)，雷達散射面積(rad/s)等於每單位頻寬分之海表面平均雷達橫截面積，原則上計算背景雜訊並加以濾除，後續應用布拉格能量大於平均能量，以確認都卜勒頻譜的平均能量與布拉格波範圍，最後利用第一階與第二階的邊界條件與權重方程式，在第二階訊噪比要大於3dB 的情況下，再利用 Barrick, D. E.(1977)所提出公式(7)、與公式(8)與權重係數，如圖 11，求出估計波高與估計的平均週期，分析結果如圖 12 所示。

$$\sigma^{(1)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S(-2mk_0) \delta(\omega - m\omega_B) \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma^{(2)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1, m_2=\pm 1} \iint_{-\infty}^{+\infty} |r|^2 S(m_1 k_1) S(m_2 k_2) \delta(\omega - m_1 g k_1 - m_2 g k_2) dpd \dots\dots\dots (6)$$

$$k_0 h_{rms} = 2 \left[\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma^{(2)}(\omega) \omega^{-1}(\eta) d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\omega_B T_m}{2\pi} = \frac{\int_{0.1}^{1.0} \sigma^{(2)}(\omega) \omega^{-1}(\eta) d\eta}{\int_{0.1}^{1.0} |\eta - 1| \sigma^{(2)}(\omega) \omega^{-1}(\eta) d\eta} \dots\dots\dots (8)$$

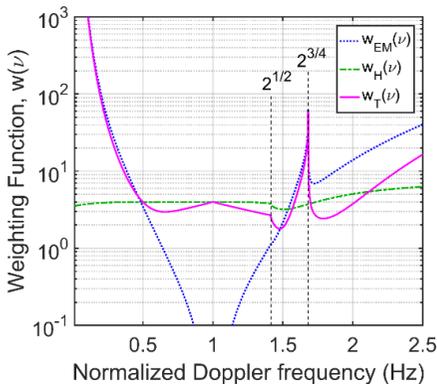


圖 11 雷達權重與頻率正規化

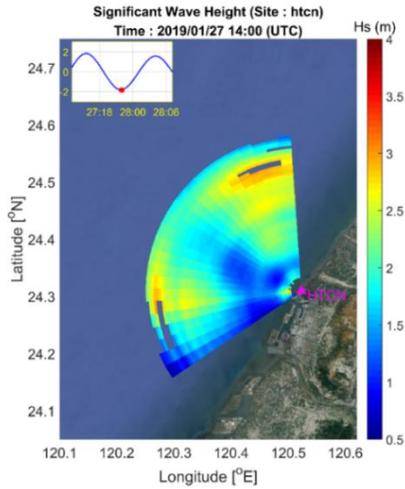


圖 12 計算流程與分析結果

3.4 線性陣列雷達最小啁啾數分析

每個線性調頻代表 1 個啁啾，每個啁啾時間固定為 0.2166 秒，因此取樣時間越久分析的啁啾數量越多，數量決定資料分析的品質，下就最小線性調頻數分別討論 1,024 啁啾、2,048 啁啾、4,096 啁啾與 8,192 啁啾的情況下，雷達的相關係數與誤差變化，以釐清最小線性調頻數量之問題。以 108 年 1 月 17~29 日期間之新竹浮標實測值與本雷達系統觀測值相互比較為例，分別討論不同數量啁啾變化，如圖 13 所示，該圖顯示啁啾數量越高雷達觀測序列與新竹實測資料越趨吻合，特別是 8,192 啁啾的情況下，雷達資料近乎與實測資料重合。

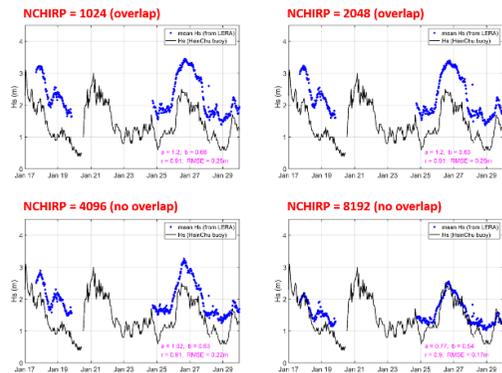


圖 13 最小線性調頻數分析比較圖

進一步分析相關性與散佈圖，縱軸為臺中港陣列雷達觀測波高，橫軸為新竹實測資料，比較觀察 1,024 啣啣、2,048 啣啣、4,096 啣啣與 8,192 啣啣散佈圖情況，顯示不論最小啣啣數量為何，各啣啣數量相關性皆有 9 成以上，以當日成果而言，雷達觀測已取得良好的成果，在各情境相關性比較方面探討均方根誤差(RMSE)情境，1,024 啣啣數、2,048 啣啣數前二種情況下均方根差分別為 0.25 及 0.24，當啣啣數增加至 4,096 時，均方誤差微幅變化有逐漸變小之趨勢，而啣啣數 8,192 時均方根誤差最小，降至 0.17，經分析比較後得出最小啣啣數量越高，數值均方根差越小，雷達散佈偏離最小與實測資料最為接近，有關各情境比較情形，如圖 14 與表 4 所示。

表 4 最小啣啣數量分析表

啣啣數	相關係數 [R]	均方根差 [RMSE : m]
1,024	0.91	0.25
2,048	0.91	0.24
4,096	0.90	0.22
8,192	0.91	0.17

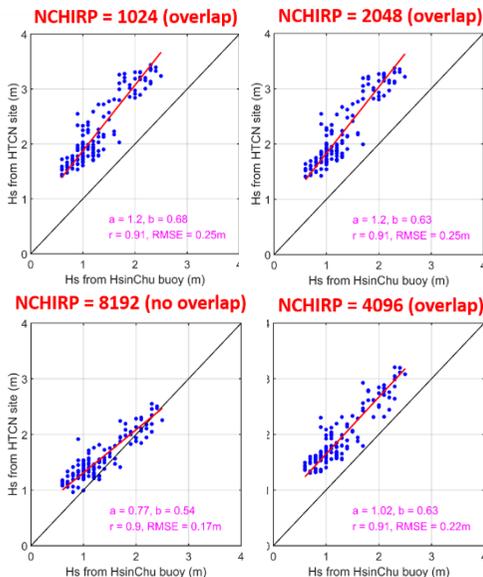


圖 14 各距離元相關性變化圖

四、臺中港線性陣列海洋雷達資料與觀測資料比對的情形

前章已就雷達基本的工作原理與訊號的處理之模式進行說明，本章將就本所觀測蒐集之雷達資料與與台灣海洋科技研究中心(下稱：海科中心)建置的岸基雷達測流系統(TOROS)之下龜殼站(TUTL)，以及本所設置底碇式剖面海流儀(AWAC)選三點實測資料進行比對，由於目前雷達系統為徑向系統，故以下綜合討論均討論徑向物理量。

臺中港線性陣列海洋雷達因採用美國 LERA 系統，為觀測區域紅色範圍，最遠距離自岸基向外海 40 公里，海科中心下龜殼站因採用美國 CODAR 系統，由於下龜殼站(TUTL)雷達屬於長距型雷達其頻率較低，最大測距由岸基向外海可達 180 公里為藍色範圍，另臺中港 AWAC 任選 3 個不同觀測點進行時序列分析，其中點 1 距離 LERA 岸基 11.1 公里，點 2 距離 LERA 岸基 10.9 公里、點 3 距離 LERA 岸基約 18.4 公里，詳細位置座標與位置，如圖 15 所示。

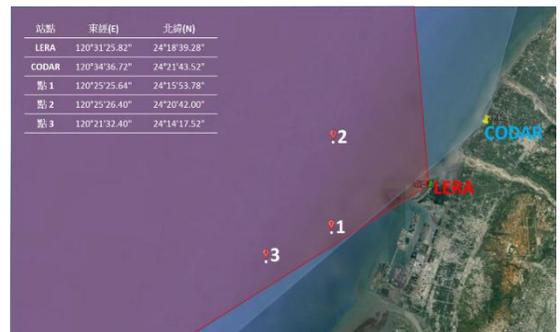


圖 15 本所觀測點與海科中心觀測位置

(1)徑向流速(V)觀測比較

本雷達觀測資料經分析後徑向流速於 108 年 1 月 25~31 日時序列漲落趨勢有一致性結果，如圖 16 所示，將 LERA

量值與海科中心 CODAR 量值進行相關性分析，點 1 相關性最高達 0.93，點 3 相關性 0.876 次之，點 2 相關性 0.82 為最差，但無論如何本所 LERA 與海科中心 CODAR 相關性皆有 0.8 以上觀測值具有高度相關性；誤差部份探討同樣以均方根差(RMSE)進行分析計算，此三個不同觀測點以點 2 誤差最大達 19.70 cm/s，其於點 1 與點 3 二者誤差較為相近，分別為 15.06 cm/s 與 15.69 cm/s，如表 5 所示。

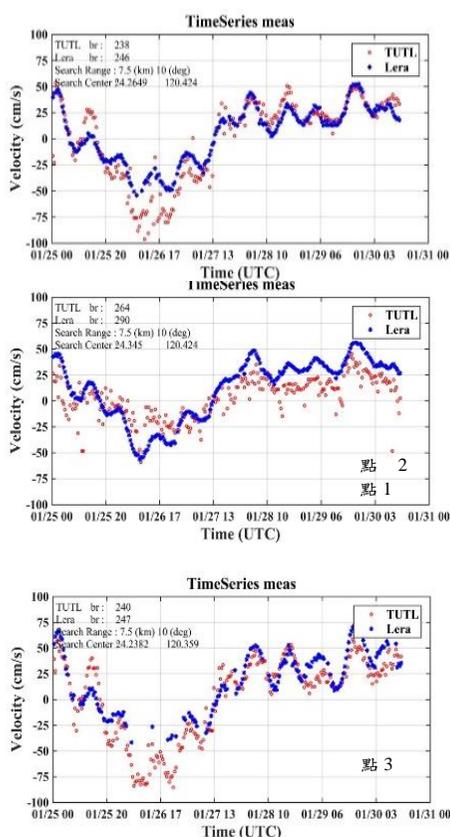


圖 10 徑向流速時序列比較圖

表 5 本所徑向流速觀測分析比較表

觀測位置	相關係數 [R]	均方根差 [RMSE : cm/s]
點 1	0.93	15.06

點 2	0.82	19.70
點 3	0.876	15.69

(2)徑向波高(H_s)觀測比較

將本所 108 年 1 月 17 日至 108 年 4 月 11 日期間 AWAC 觀測資料加以比對，LERA 與 AWAC 波高時序列漲落趨勢有一致性結果，另外將本所臺中港風速站 (Station 6 北堤堤頭)與新竹浮標風速相比，研判斷新竹外海風速較慢，臺中港港區風速較快，因此新竹浮標波浪較臺中港區小屬於合理現象，因此雖然新竹浮標(HsinChu buoy)波高時序列漲落趨勢相同，但仍有些許偏差，其中原因可能係新竹浮標觀測位置距離臺中港距離太遠導致，觀測值無法直接代表中部海域的狀況，如圖 17 所示。

將序列資料分區段處理再進行相關性分析，顯示 LERA 與 AWAC 觀測結果 108 年 1 月 17 日至 108 年 2 月 14 日區段 1 相關性達 0.96，108 年 2 月 14 日至 108 年 3 月 14 日區段 2 相關性係數達 0.81，均方根差(RMSE)而言區段 1 與區段 2 誤差分別為 0.26m 與 0.39，由於二觀測結果相關係數均達 0.8 成以上且均方根誤差均小於 0.4，二觀測結果呈現高度相關。

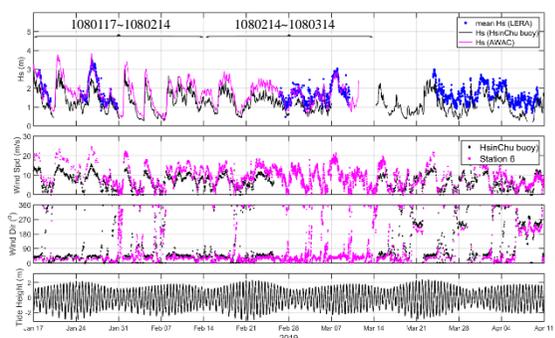


圖 17 徑向流速時序列比較圖

理論雷達在不受吸收、散射與外加因素等干擾情況下，觀測範圍內的誤差

是可以被忽略的，但實際雷達受干擾因素太多，因此只有在雷達波場形指向性密度最高，反射訊號最強位置處，該量測的準確性也相對最高，將區間 1 與區間 2 時間範圍內，各距離元 LERA 與 AWAC 相關係數分別計算並套繪在雷達範圍圖內，可顯見雷達範圍圖中間區域相關性最高達大於 0.9，兩側邊緣區域相關性最低小於 0.1，故可驗證量測相關性的程度與雷達設計場形狀相符，中央量測較為準確並向兩側遞減，如圖 18 所示。

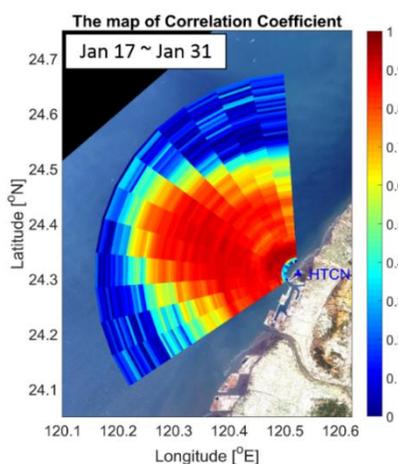


圖 18 各距離元相關係數比較圖

本研究再將 108 年取冬季 1 月、春季 3-4 月、夏季 7-8 月資料進行比較，期間共測得兩場：丹那絲颱風(7/16~7/21)與白鹿颱風(8/21~8/25)，冬季 1 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，相關性部份冬季 1 月份波高(Hs)相關係數達 0.95 與週期(Tm)相關係數達 0.87 時序列漲落趨勢有一致性結果，均方根誤差值部份波高(Hs)均方根差為 27cm 與週期(Tm)均方根差為 0.32sec。

春季 3 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，惟在 3/3 與 3/6 這幾天量測較無吻合，春季 3 月份波高(Hs)相關係數達 0.78 與週期(Tm)相關係數達 0.87，故春季 3

月的量測結果較冬季的量測結果為差，均方根誤差值部份：波高(Hs)均方根差為 31cm 與週期(Tm)均方根差為 0.32sec；春季 4 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，惟在 4/7~4/10 這幾天量測較無吻合，春季 4 月份波高(Hs)相關係數達 0.91 與週期(Tm)相關係數達 0.72，春季 3 月的波高(Hs)量測結果較週期(Tm)為佳，均方根誤差值部份波高(Hs)均方根差為 45cm 與週期(Tm)均方根差為 0.91sec。

夏季 7 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，但反而在丹娜絲颱風侵臺期間中 7/17~7/19 這幾天量測較為吻合，夏季 7 月份波高(Hs)相關係數降至 0.55 與週期(Tm)相關係數更是降至 0.07，故夏季 7 月的量測結果較前者(冬季與春季)量測結果為差，均方根誤差值部份波高(Hs)均方根差為 49cm 與週期(Tm)均方根差為 1.64sec；夏季 8 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，同樣也在白鹿颱風侵臺期間中 8/23~8/25 這幾天量測較為吻合，夏季 8 月份波高(Hs)相關係數較 7 月好，係數值提升至 0.69，但週期(Tm)相關係數較差為 0.42，故夏季 8 月的量測結果較前者(冬季與春季)量測結果亦差，均方根誤差值部份波高(Hs)均方根差為 47cm 與週期(Tm)均方根差為 1.07sec，詳細比較情形，如表 6 所示。

表 6 本所徑向波浪觀測分析比較表

季節	月份	波高 相關 係數	週期 相關 係數	波高 均方 根差	週期 均方 根差	備註
冬	1	0.95	0.87	27 cm	0.32 sec	量測 相關 性高
春	3	0.78	0.87	31 cm	0.32 sec	
	4	0.91	0.72	45	0.91	

				cm	sec	
夏	7	0.55	0.07	49 cm	1.64 sec	丹娜 絲颱風
	8	0.69	0.42	47 cm	1.07 sec	白鹿 颱風

五、結論與建議

本研究以基地母港與鄰近海域之海象調查為目標，發展雷達遙測，並針對目標海域之波浪與海流之海象資料進行長期的資料蒐集、分析與建檔。本研究結果希冀提供交通部航港局及港務分公司，能作為管理船舶進出臺中基地港參考、提供制定港灣規劃之標準，面對災害發生時能適時提供處置對策及預防措施，或作為相關單位參考應用之標準。

5.1 結論

- (1) 本雷達量測波高、週期、徑向流速的時序列漲落趨勢與實測結果具有一致性，相關係數絕大部分大於 0.8，小部分甚至達 0.95 以上，現階段研究季風觀測結果較好，惟颱風期間相關性較差，尚有改進的空間。
- (2) 雷達量測波高的時序列均方誤差與其量測量級相比，平均誤差約在 10%~20% 間，最佳量測週期為 4 秒~12 秒內範圍，4 秒低頻波與 12 秒以上長波有無法分析量測情形，顯示都卜勒距離譜分析方法尚有改進的空間，建議可以再持續精進。
- (3) 最小啁啾數量探討部分，無論 1,024、2,048、4,096 與 8,192 啁啾數量，散佈圖情況相關性皆大於皆有 0.9，另均方根誤差探討部分，啁啾數量越大

誤差越小，當啁啾數為 8,192 時有最小均方根誤差 0.17，訊號分析建議至少有 8,192 啁啾數量，研究成果較好。

- (4) 目前海洋雷達為單站系統僅能獲取徑向觀測資料，且量測受天線場型影響，盲區由指向性方位向兩側漸增，越靠近場型觀測成果越佳，越遠離場型觀測成果越差。

5.2 建議

- (1) 本海洋雷達站為單站，現僅能獲取徑向資料，尚無法完整分析海流方向，建議增設臺中港南站，如此訊號將能完整涵蓋港區，分析成果可以取得更完整的資料，惟現階段雖已確定適當架設範圍之位置，但卻與港務公司 LNG 新港區工程規劃重疊，需更進一步洽商，以獲得港務公司用地與港工同意。
- (2) 對於雷達訊號辨識的誤差，可能係雷達訊號重複反射訊號的雜訊造成，建議持續觀察與蒐集，取得長期的背景訊號，如為長期固定雜訊將有機會予以濾除，增加觀測的品質。另本研究經測試最小啁啾數量越大均方誤差越小，按目前雷達設定值為 8,192 個啁啾數，此時均方誤差已降至 0.17，建議再增加最小啁啾數，以確認均方誤差是否有降低趨勢。

參考文獻

1. 林昆毅、陳少華、楊文昌、梁恩昱、高家俊，「高頻雷達測流系統之建置與天線場型測量之實例探討」，第 34 屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2012 年，763-768 頁。
2. 吳立中、湯世燦、黃清哲、高家俊，「SeaSonde 高頻雷達測流演算法之研究」，第 34 屆海洋工程研討會，社

- 團法人臺灣海洋工程學會，2012年，757-762頁。
3. 董東璟、蔡政翰、陳盈智、顏志偉、馬名軍，「應用岸基微波雷達量測近海流空間分布」，航測及遙測學刊，第18卷第3期，2014年，193-204頁。
 4. 黃郁軒、賴堅戊、吳立中、黃清哲、黃清哲，「集成式高頻雷達波浪與風向量測性能初探」，第40屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2018年，367-372頁。
 5. Duy-Toan Dao、Hwa Chien、蘇青和、黃茂信、許義宏，「Assessment of phase array HF radar for ocean surface wave monitoring in the Taiwan Strait」，第41屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2019年，352-356頁。
 6. 國家實驗研究中心台灣海洋科技中心，103年度台灣四周海域表層海流觀測年報，2014年。
 7. 交通部運輸研究所，海洋雷達應用於海象觀測之探討-應用案例探討，2018年。
 8. 交通部運輸研究所，107年國際商港風波潮流觀測與特性分析，2018年。
 9. 交通部運輸研究所，2018年12港域海氣象觀測資料年報，2018年。
 10. Barrick, D. E. ,“Dependence of second-order Doppler sidebands in HF sea echo upon sea state”, IEEE, Antennas and Propagation Society International Symposium, 1971, Vol. 9, pp. 194-197.
 11. Yukiharu Hisaki, “Ocean wave directional spectra estimation from an HF ocean radar with a single antenna array: Observation”, Journal of Geophysical Research, 2011, Vol. 110.
 12. Guiomar Lopez, Daniel C. Conley, “Comparison of HF Radar Fields of Directional Wave Spectra Against In Situ Measurements at Multiple Locations”, Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7, 271.
 13. Barrick, D. E. ,“FM/CW radar signals and digital processing”, NOAA Technical report, 1973, ERL 283-WPL 26.
 14. Barrick, D. E. ,“Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra”, Radio Science, 1977, Vol. 12, No. 3, pp. 415-424.
 15. Lipa, B. ,“Derivation of directional oceanwave spectra by integral inversion of second order radar echoes”, Radio Science, 1977, Vol. 12, No. 3, pp. 425-434.
 16. Lipa, B. ,D. Barrick, “Methods for the extraction of long-period ocean wave parameters from narrow beam HF radar sea echo”, Radio Science, 1980, 15 (04), pp. 843-853.
 17. Wyatt, L. R. ,J. J. Green and A. M. Middleitch, “HF radar data quality requirements for wave measurement”, Coast. Eng., 2011, 58 (4), pp. 327-336.