

臺中港單基海洋陣列雷達波浪及海流觀測之 分析研究探討

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

摘要

本研究以臺中港線性陣列海洋雷達調查港區與鄰近海域之海象，利用雷達產生的電磁波於海水表面所發生的共振與都卜勒頻偏現象，觀測海象波浪波高與週期的時序列變化趨勢，結果顯示與本所臺中港底碇式水下觀測儀器之觀測結果具有一致性，相關研究成果可提供船舶航行與進出港區應用參考。

一、前言

自從雷達發明以來，已廣泛應用於科學研究、無線電探測、軍事定位、沿海地區管理、漏油偵測、海嘯預警等用途，隨著微電子技術發展成熟與遙測技術相繼提升，各項功能與應用範疇亦越發精進；本研究採用交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)2019 年建置之臺中港海洋陣列雷達北側觀測站，進行港區與鄰近海域之海象觀測、波浪與海流之觀測分析，以及風速觀測之可行性研究，研究成果可做為回饋臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司未來擴港計畫之設計規劃使用，另協助交通部建構安全交通環境之應用參考。

本研究引進之雷達系統，係由美國夏威夷大學無線電海洋學實驗室開發，並提供通用相控陣列高頻都卜勒雷達服務。量測原理係依據無線電波頻率能夠將數公里遠的海流與波浪性質傳遞回

來，目前與夏威夷大學合作之國家，先後有義大利(2002~2004 年)、墨西哥(2005 年至今)、菲律賓(2008 年至今)、臺灣(2018 年至今)等。本研究海洋陣列雷達海洋現況，如圖 1 所示。



圖 1 臺中港線性陣列雷達海洋現況

本研究範圍為臺中港朝向臺灣海峽外海 40km 遠，兩側夾角 120 度之扇形區域，此範圍涵蓋臺中港船舶進出口要道，如圖 2 所示。



圖 2 臺中港觀測範圍示意圖

二、研究方法與探討

雷達波具有可在海水與大氣介面間進行傳遞之特性，該介面能量衰減率甚小，可沿著海水表面隨著彎曲的地球表面傳播電磁波，藉由雷達可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，包括海面風速、波高、流速等，本章節將就雷達海象觀測原理、海洋陣列雷達基本資料與雷達電磁理論說明如下。

2.1 雷達海象觀測原理

本研究所採用雷達系統為線性陣列高頻雷達(Linear Phased Array High Frequency Radar)，其陣列之意係指雷達天線排列方式，一般常見的陣列包含：線陣列與方陣列，二者都是常見的陣列型式，高頻之意係指雷達波發射時的頻率，簡要分類包含：高頻(HF)、甚高頻(VHF)、超高頻(UHF)、微波(Microwave)與毫米波(Millimeter wave)等，如圖 3 所示。不同的頻率引致不同物體將產生反射現象，就像各種顏色的物體經由可見光照射時，反射物體無法吸收波長的光線，再由人類眼睛接收所見，本研究以高頻雷達進行觀測，與物體反射可見光模式類似，當雷達波正好為波浪波長的 2 倍時，雷達回波將攜回海面的共振訊號，因此，可以利用此特性與演算法，求解海面之海氣象特性。

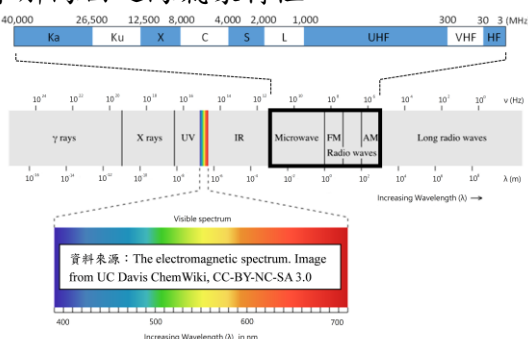


圖 3 訊號分類圖

研究追溯至美國 Barrick, D.E.任職於國家海洋暨大氣總署(NOAA)研究期間發表之基礎，發展布拉格散射機制的公式與分析與半經驗方法，該方法不僅同時適用於單基或雙基雷達站情況，成功測量海流、風場及表面波，在 Barrick 研究中表面波理論是基於非線性流體動力和水波電磁方程式之攝動理論展開而發展。該文獻已提出許多理論，描述 HF 雷達散射回波的特徵，比如海面雷達回波的都卜勒頻譜 Barrick, D.E. (1972b, 1971b)提出第一階與第二階的理論，透過計算背景雜訊時，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，該理論於參數上具有限的收斂半徑，當雷達空間波數與表面振幅的乘積等於 1 時，該理論將失去效用，基此，存在飽和極限，高頻雷達可獲得最大 Hs (有義波高)，有義波高受到 2 倍雷達空間波數倒數的限制，因此，在極端情況下，當波高大於飽和值時，雷達量測有義波高的結果將被低估，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)所提出的權重係數，估計波高與估計的平均週期。定位入射角(Direction of arrival)，理論上接收天線量測的雷達回波來自四面八方，所接收到的訊號，包含海面初級回波與陸地結構及地表起伏的多重反射，因此，僅藉由單一天線並無法分析出訊號來源的實際方向，但如接收天線排列成線陣列的型式，就能透過海面回波訊號抵達各接收天線的不同時間，分析彼此訊號間的相位差。波束成形(Beam forming)演算技術便是利用蒐集各接收天線的回波訊號與相位差關係，解算來自不同方向之訊號成分，

配合數學三角函數關係與計算相位差資訊，反算出訊號的方向資訊，達成辨識方位特徵的目的。

2.2 海洋陣列雷達基本資料

本研究雷達採用美國夏威夷大學研製的 LERA(Least-Expensive Radar, 簡稱 LERA)系統，於臺中港北淤沙區設置雷達機房、4 支發射天線與 16 支接收天線。其中，天線模組皆設置於 6m 高擋沙牆頂部，雷達線性調頻發射週期設定為 0.2166sec，最小線性調頻取樣數量 8,192 筆，觀測時距為 29.12mins(約為 30min 每筆)，每小時可發布 2 筆觀測資料，觀測範圍呈現扇形 120°，最遠觀測距離可達 40km，空間中方向解析度為 8°，空間解析度為 500m，有關海洋陣列雷達基本資料，如表 1 所示。

表 1 海洋陣列雷達基本資料

雷達參數	參數值	單位
觀測時距	30	min
雷達頻率	27.75	MHz
頻寬	300	KHz
發射天線數量	4	支
接收天線數量	16	支
方位角	296	度
觀測距離	40	KM
空間解析度	500	m
方位解析度	8	度
線性調頻發射週期	0.2166	sec
A/DC 取樣頻率	740	Hz
線性調頻取樣數量	1,280	個
最小線性調頻數量	8,192	個

2.3 雷達電磁理論

雷達電磁理論先由天線接收之複數形式的 I/Q 資料開始說明，I/Q 資料其實是 RF(Radio Frequency)通訊中常見的調變型態，該資料可做為頻率調製、混頻與解碼之基礎，本研究所需之回波強度與相位訊息即可透過 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。每個啁啾(Chirp)訊號時間長 0.2166sec，經過 A/DC(Analog/Digital Converter，類比/數位轉換)以 740Hz 頻率取樣，可以取出 160 個時序離散樣本，經由傅立葉轉換，可用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 個啁啾進行合併，可得到受波浪影響之 I/Q 週期震盪的雷達回波強度圖，同相位頻道 I 第 9 支天線的回波強度圖，如圖 4 所示。

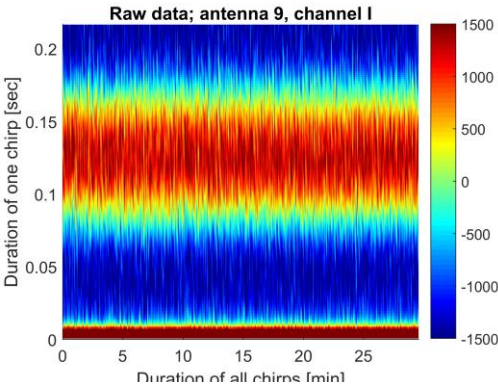
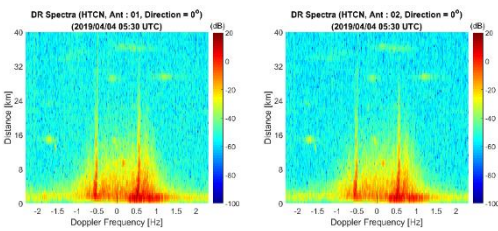


圖 4 雷達回波強度圖

承上，先將雷達回波強度圖縱軸進行第 1 次傅立葉轉換，原縱軸時間可轉換為頻率再轉換為距離；此時，再將橫軸做第 2 次傅立葉轉換，原橫軸的時間可轉換為頻率，即可繪製出都卜勒距離譜圖(或稱 D-R 譜)，由於海洋陣列雷達具指向性，故都卜勒距離譜距離負數部分，表示雷達訊號於天線發射方向之後方，不具有物理的意義，將予以剔除，如圖 5 所示。



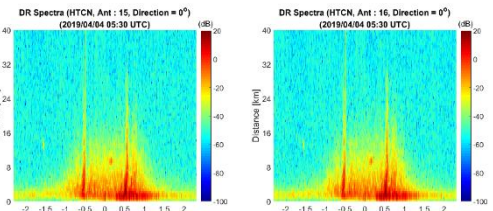
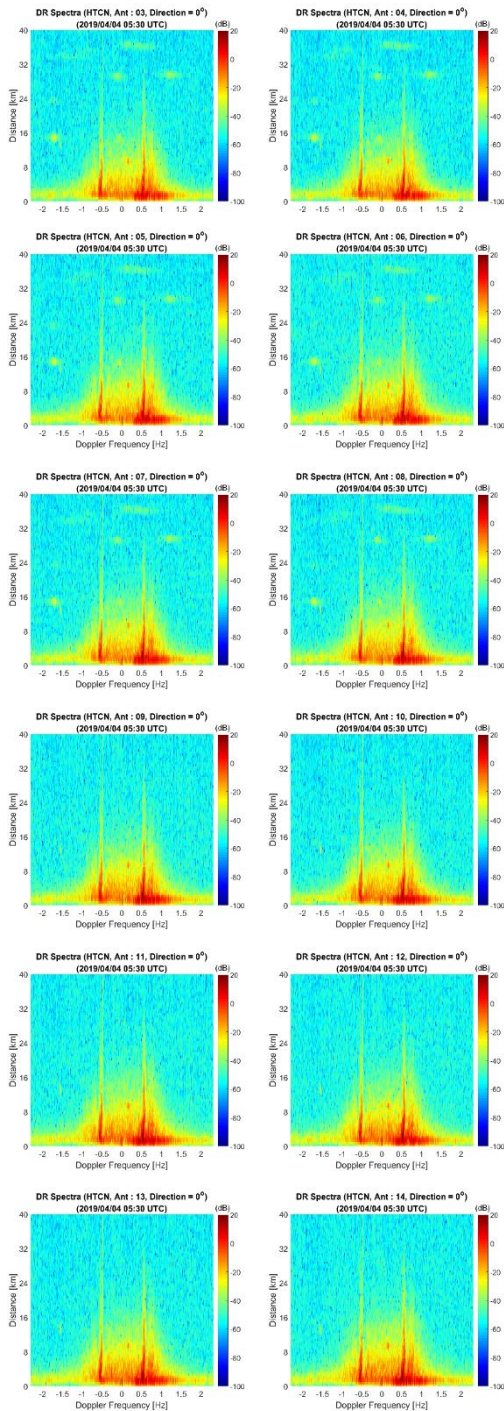


圖 5 都卜勒距離譜(D-R spectrum)

雖然發射天線場型具有指向性發射，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。

2.3.1 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(1)，將公式(1)代入電磁波速度公式經過換算，波浪的徑向速度 $V_{\text{radar current}}$ ，即可表示為公式(2)所示。

$$\lambda_{\text{wave}} = \frac{\lambda_{\text{radar}}}{2} \dots \dots \dots (1)$$

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

因此利用高頻雷達蒐集都卜勒距離譜一階峰之頻移，依據公式(2)公式求得海面徑向流速度，將整個海域依序解算各距離元的徑向速度，並標示在雷達範圍圖內可繪製出雷達觀測流場圖，如圖 6 所示。

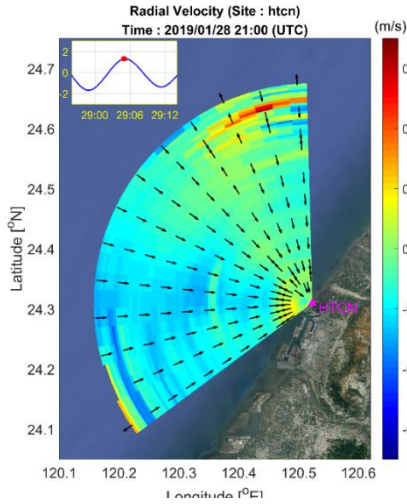


圖 6 雷達觀測流場圖

2.3.2 海面波高(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(3)與公式(4)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(5)、與公式(6)與權重係數，其中參數 K_0 雷達波的波數、 $w(\nu)$ 雷達波於電磁和流體動力的散射效應總耦合情況下的權重係數、 ω 海面波浪的週波率、 ω_B 雷達布拉格週波率、 T_m 平均週期、 σ_1 第一階都卜勒譜、 σ_2 第二階都卜勒，如圖 7 所示。

$$\sigma^{(1)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S(-2mk_0) \delta(\omega - m\omega_B) \dots \dots (3)$$

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

$$k_0 h_{rms} = 2 \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(2)}(\omega) w^{-1}(\eta) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega} \right]^{1/2} \dots \dots (5)$$

$$\frac{\omega_B T_m}{2\pi} = \frac{\int_{0.1}^{1.0} \sigma^{(2)}(\omega) w^{-1}(\eta) d\eta}{\int_{0.1}^{1.0} |\eta - 1| \sigma^{(2)}(\omega) w^{-1}(\eta) d\eta} \dots \dots (6)$$

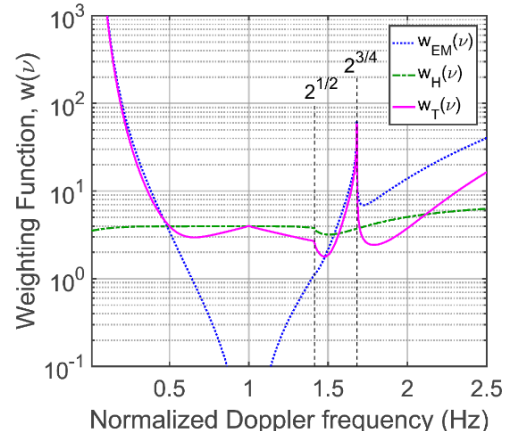


圖 7 權重函數與頻率正規化圖

2.3.3 雷達訊號處理步驟

本研究採用都卜勒距離譜之成分譜，計算電磁理論的第一階分量的總能量與第二階分量的總能量，配合權重函數、比例因子與均方根波高演算法，估算波浪波高與週期，將雷達訊號處理步驟，如圖 8 所示。

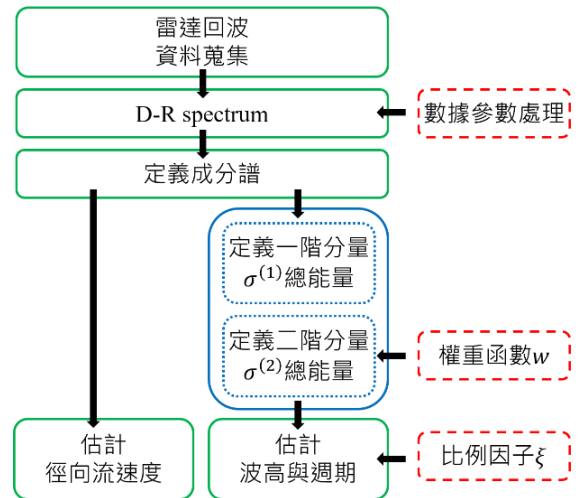


圖 8 雷達訊號處理步驟

三、海氣象觀測成果分析

本研究雷達觀測成果分析，將依據臺中港海氣象之海流流速、波浪波高與週期進行統計分析探討。本研究參與評估之統計項目有：相關係數(r)、均方根誤差(RMSE)、偏誤(BIAS)與散點因子(Scatter Index，稱為SI)；其中1.相關係數(r)為判斷雷達觀測與實測資料間關聯性之參數，數值越高表示兩數據彼此關聯程度越高；2.均方根誤差(RMSE)表示為統計後之標準誤差，標準誤差量越高，則顯示誤差越大；3.偏誤(BIAS)為數據間的偏差程度，用以衡量雷達觀測與波流儀量測間的偏差，偏誤越小，表示雷達觀測越接近實測值；4.散點因子(SI)為無因次正規化均方根誤差，屬於統計學誤差評估之另種方式，可視為一種誤差百分比，散點因子越接近 0，資料品質與觀測成效越好，如散點因子恰好為 0，表示與波流儀實測值完全一致。

3.1 海面波高(H)與週期(T)探討

本研究蒐集 109 年度雷達回波頻譜資料與分析海面波浪觀測值，配合港研中心臺中港北堤外海實測資料加以比對，觀測時段介於 109 年 4 月 20 日至 109 年 4 月 25 日期間，雷達觀測波浪有義波高(H_s)與實測資料結果比對，相關係數為 0.87 高度相關，均方根誤差為 0.54，偏誤為 0.389，散點因子為 0.468，如圖 9 所示。

同觀測時段之平均週期與實測資料結果比對一階譜週期(T_{m01})與二階譜週期(T_{m02})， T_{m01} 相關係數為 0.78 高度相關，均方根誤差為 1.28，偏誤為 1.172，散點因子為 1.172，而 T_{m02} 相關係數為 0.74 高度相關，均方根誤差為 0.92，偏誤為 0.76，散點因子為 0.762，如圖 10 所示，由於 T_{m02} 的散點因子小於 T_{m01} ，顯示於存在觀測誤差情形下， T_{m02} 誤差較 T_{m01} 小，此與二者均方根誤差一致

(RMSE： $T_{m02} < T_{m01}$)， T_{m02} 與實測資料更為吻合；惟同觀測時段之尖峰週期與實測資料結果比對， T_p 相關係數為 0.21 低度相關，均方根誤差為 1.38，偏誤為 0.385，散點因子為 0.820，如圖 11 所示，比較週期偏誤值，尖峰週期偏誤值最小，故雷達資料尖峰週期與實測更為吻合。

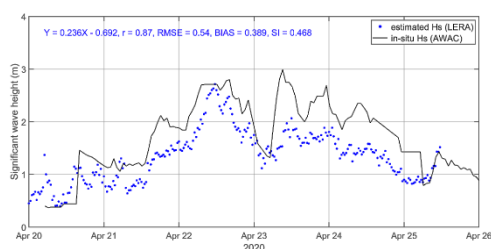


圖 9 波高 109 年 4/20~4/26 比對

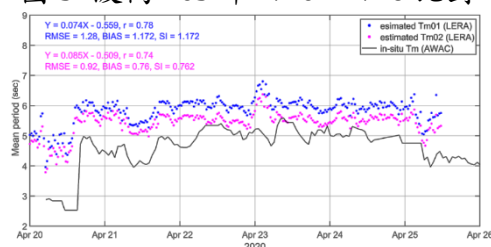


圖 10 週期 109 年 4/20~4/26 比對

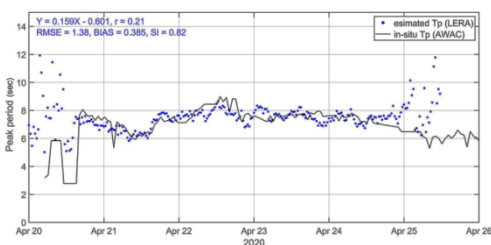


圖 11 尖峰週期 109 年 4/20~4/26 比對

觀測時段介於 109 年 5 月 20 日至 109 年 6 月 29 日期間，雷達觀測波浪有義波高(H_s)與實測資料結果比對，相關係數為 0.55 中度相關，均方根誤差為 0.34，偏誤為 0.389，散點因子為 0.274，如圖 12 所示。

同觀測時段之平均週期與實測資料結果比對， T_{m01} 相關係數為 0.02 微弱相關，幾乎可稱之為無相關，均方根誤差

為 3.08，偏誤為 2.869，散點因子亦為 2.869，而 T_{m02} 相關係數為 0.08 微弱相關，均方根誤差為 2.48，偏誤為 2.301，散點因子亦為 2.301，如圖 13 所示；惟同觀測時段之尖峰週期與實測資料結果比對， T_p 相關係數為 0.01 微弱相關，均方根誤差為 5.99，偏誤為 5.058，散點因子為 5.084，如圖 14 所示。

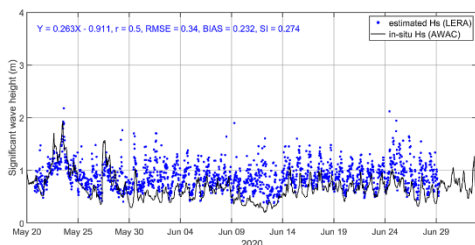


圖 12 波高 109 年 5/20~6/29 比對

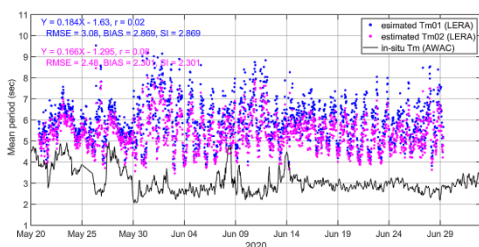


圖 13 週期 109 年 5/20~6/29 比對

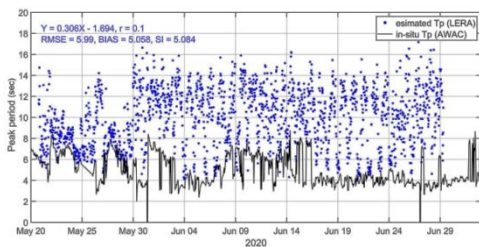


圖 14 尖峰週期 109 年 5/20~6/29 比對

3.2 海流徑向流速(v)探討

由於本雷達系統目前為單基雷達站系統僅能獲取逕向流資料，因此，本研究以臺中港海域流速之成果分析，僅取 109 年 6 月 12 日至 109 年 6 月 14 日於鸚鵡颱風侵擾期間資料進行比對，該颱風路徑係由菲律賓生成，行經南海至廣州，如圖 15 所示。

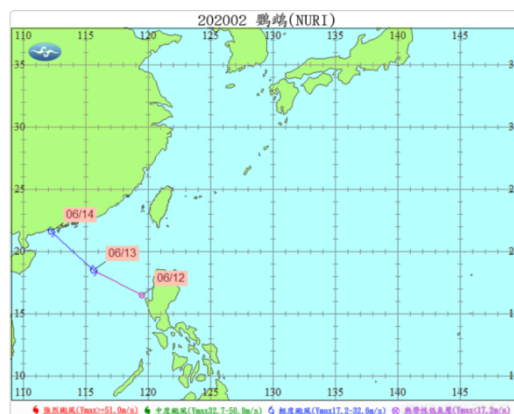


圖 15 鸚鵡颱風路徑圖(資料來源：交通部中央氣象局)

實測海流流速係以港研中心波流儀量側值約 0.135~0.623m/s 之間，如圖 16 所示，將實測流速轉換為逕向速度與雷達逕向流速進行比對，如圖 17 所示，逕向流速較大時，實測值與雷達值較為接近，顯示颱風強度距離遙遠臺中港甚遠，對雷達干擾程度有限，且速度值較大時，雷達訊號品質較好，分析結果較為準確。此外，本研究於鸚鵡颱風侵襲期間 72 小時內，逕向速度實測與雷達觀測散佈圖比較，相關係數 0.762，如圖 18 所示。



圖 16 海洋實測流速資料

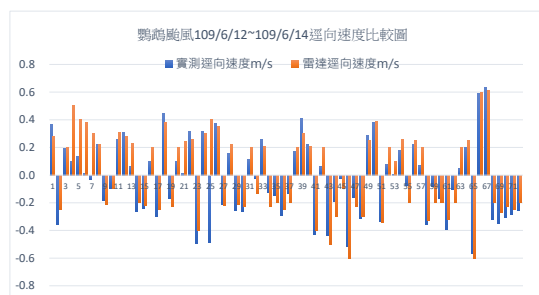


圖 17 海洋逕向速度比較圖

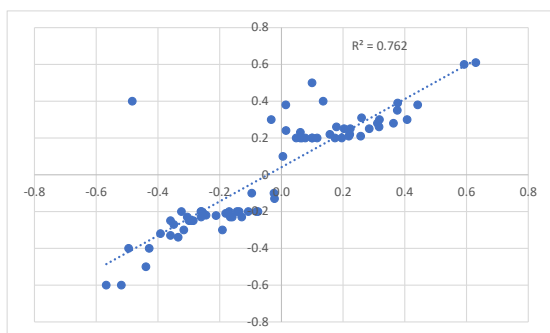


圖 18 逕向速度實測與雷達觀測散佈圖

四、雷達分析之影響成因探討

本研究雷達訊號分析之影響成因，依照影響因素歸納，概可分為 2 類：(1) 設備類型與(2)環境類型，設備類型屬於雷達系統硬體設備方面，期間電力系統無法穩定供電，探討成因主要係臺中港務分公司辦理回填取沙作業、工程廢棄土石拋放與整地工程等人為因素，因機具挖掘未能注意雷達電纜，以致於至少 6 處以上電纜線因挖掘而受損的案例，建議加強港務相關人員與廠商作業時需留意管路，另港研中心後續施工電纜線管道埋設深度至少須 1m 以上，以確保電力之穩定性。

由於無線電頻率、無線電通信、電離層效應等干擾，對雷達觀測品質都有影響，因此，環境類型影響之雜訊影響，需於硬體增加能降低與濾除雜訊之濾波器，藉以除去環境噪音對雷達訊號品質之干擾，有關雷達 D-R 譜背景雜訊，如圖 19 所示。

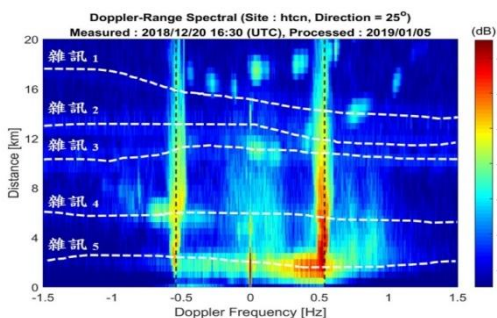


圖 19 雷達 D-R 譜背景雜訊

造成雷達雜訊干擾都卜勒距離譜，而產生之觀測誤差成因，可能源於鄰近雷達站周邊的陸上風力發電機所致，因旋轉葉片可能造成雷達波之反射，另冷氣室外機的金屬外殼與葉片等金屬材質，都有可能直接反射雷達訊號，造成訊號重複反射與接收之雜訊。此外，為了減少都卜勒距離譜演算海氣象參數的不確定性，還需要從海面回波資料識別與刪除船舶之回波訊號，故需利用第一階峰及第二階峰部分之訊噪比 (SNR)，並設置門閾值，將不確定的訊號予以濾除，以提升雷達資料演算海氣象參數之資料品質。

五、結論與建議

本研究採用之雷達係臺灣目前唯一運行中的海洋陣列雷達，港研中心發展運用雷達觀測波浪與海流，並精進其遙測技術，以海面波浪與海流之雷達訊號進行多重處理，將所得海象資料進行蒐集、分析與建檔，研究成果可提供臺中港務分公司完整的海象資訊，協助掌握港區與鄰近海域之海氣象現況。

5.1 結論

本研究運用雷達觀測波浪波高與週期之時序列，顯示漲落趨勢與實測結果，具有一致性。109 年 4 月份雷達觀測分析結果，有義波高相關係數尚達 0.87，相關係數仍呈現高度相關，平均週期介於 0.74~0.78，亦屬高度相關範圍，顯示雷達觀測波浪已具可參考性。此外，本研究量測逕向流速時序列之實測值與雷達觀測值，二者於鸚鵡颱風期間相關係數達 0.76，亦屬高度相關範圍，顯示雷達逕向流速已具可參考性。

雷達背景雜訊探討部分，經測試冷氣室外機風扇可能會產生噪音雜訊，但量值小時，干擾可以忽略不計，而陸上風力發電機葉片旋轉之重複反射干擾較

大，故無法忽略不計。此外，都卜勒譜時常有很強的都卜勒斑點，由於雷達站鄰近臺中港進出港口，該訊號比較像是船舶的反射訊號，可以確定此反射訊號屬於主動噪聲干擾的物體。

5.2 建議

雷達觀測波浪與海流參數觀測，取決於雷達第一階與二階分量值的計算，雜訊是影像訊號計算結果的重要因素，故本研究特別重視控制雷達訊號與數據品質，建議設置數據資料控制平台，並利用控制數據品質之反演方法與資料平台，針對雷達回波訊號進行改善處理。

本研究雷達觀測建議未來能建置可視化介面平台提供查詢表面波高、平均週期、流速、流向等觀測目標，此外，後續期能與船舶自動辨識系統(AIS)進行整合，提供臺中港周遭海域航行船舶之參考，若於海上事故發生時，將有助於監控港區與鄰近區域航行船舶與協助救援或提供海象等資訊。

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長期性的雷達訊號紀錄，以確認訊號來源為海面或者雜訊，長期觀測如確定為固定源訊號，可藉設置濾波器將其剔除，改善都卜勒距離譜之特徵值；此外，雷達資料品質對於高頻雷達的波流參數之評估十分重要，後續應建立雷達品質流程與訊號分類方法，以精進雷達訊號分析技術及解算最佳海氣象資訊。

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、HwaChien、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, p. 194-197.

11. Yuki Haru 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, p. 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 ocean wave 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. Middleton, "HF radar data quality requirements for wave measurement", *Coast. Eng.*, 2011, 58 (4), pp. 327-336.
18. Roarty, H., Cook, T., Hazard, L., George, D., Harlan, J., Cosoli, S., ... & Grilli, S., "The global high frequency radar network", *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6, p. 164.