

114-023-7D92
MOTC-IOT-113- H2CA001g

臺中港海洋陣列雷達訊號應用 分析(2/3)-波浪觀測分析



交通部運輸研究所
中華民國 114 年 3 月

114-023-7D92
MOTC-IOT-113- H2CA001g

臺中港海洋陣列雷達訊號應用 分析(2/3)-波浪觀測分析

著者：李政達、林受勳、羅冠顯、李俊穎、
李江澤、陳天時

交通部運輸研究所
中華民國 114 年 3 月

GPN : 1011400260

定價 200 元

臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析. (2/3)：波浪觀測
分析 / 李政達, 林受勳, 羅冠顯, 李俊穎, 李江澤, 陳
天時著. -- 臺北市：交通部運輸研究所, 民 114.03
面； 公分
ISBN 978-986-531-659-4(平裝)

1.CST: 海洋氣象 2.CST: 海流 3.CST: 雷達 4.CST:
管理資訊系統

444.94

114002193

臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

著 者：李政達、林受勳、羅冠顯、李俊穎、李江澤、陳天時

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品)

電 話：(04)2658-7200

出版年月：中華民國 114 年 3 月

印 刷 者：綠凌興業社

版(刷)次冊數：初版一刷 47 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸科技及資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中區中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1011400260 ISBN：978-986-531-659-4 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部
運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-531-659-4 (平裝)	政府出版品統一編號 1011400260	運輸研究所出版品編號 114-023-7D92	計畫編號 MOTC-IOT-113-H2CA001g
運研所主辦單位：運輸技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：李政達 研究人員：林受勳、羅冠顯、李俊穎、李江澤、陳天時 聯絡電話：(04)2658-7200 傳真號碼：(04)2657-1329			研究期間 自113年1月 至113年12月
關鍵詞：表面波浪、陣列雷達、波束合成			
摘要： 隨著臺灣積極推動離岸風電與低碳能源轉型，港區與航道的安全挑戰日益加劇，離岸風電場與商船航道交錯，增加航行風險，此外，日益嚴重的極端氣候進一步增加港區航安管理之複雜性，為建立陸運與港灣設施的防災數據，強化智慧環境監測，推動數據智慧化與防災技術發展，以滿足交通部暨部屬機構的災防需求，本計畫發展海洋雷達遙測技術，以提升臺中港鄰近海域航行安全，並確保臺灣在能源轉型過程中的航運的穩定性與效率。 雷達波浪觀測數據受品管、環境條件及設備妥善率影響，113年1~3月雷達數據品質較為穩定，雙雷達合成數據相關性維持在 0.836 至 0.890，顯示較高準確性，然而，時間進入 4~5 月觀測品質逐漸下降，雷達北站與 AWAC 相關性降至 0.559，雷達南站相關性降至 0.280，時間進入 6~8 月期間，雷達北站相關性驟降至 0.053，8 月份幾乎無相關性。此外，雷達與 AWAC 波浪週期數據部分，整體相關性偏低，5~8 月幾乎為 0，某些月份數據明顯高估，需進一步探討改進。至於颱風期間的波浪頻譜變化，結果顯示高頻波浪(0.2-0.3Hz)受風浪影響，低頻波浪(0.05-0.15Hz)來自遠方湧浪，形成雙峰結構，當颱風遠離後，湧浪能量仍然存在，而高頻風浪則逐漸減弱。 本計畫持續優化雷達監測技術與數據品質，深化跨領域合作，推動資料開放與技術本土化應用，以支援商港運營、海岸管理、救生救難及海事污染應變等需求，確保港區航安與能源轉型的推動順利。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
114 年 3 月	220	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽運研所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
備註：1.本研究計畫之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Taichung Port High-Frequency Radar Signal Application Analysis (2/3) –Wave observation and analysis			
ISBN(OR ISSN) 978-986-531-659-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011400260	IOT SERIAL NUMBER 114-023-7D92	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-113- H2CA001g
DIVISION: Transportation Technology Research Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Cheng-Da Lee PROJECT STAFF: Shou-Shiun Lin, Guan-Sian Luo, Chun-Ying Lee, Chiang-Tse Lee, Tian-Shih Chen PHONE: 886-4-2658-7200 FAX: 886-4-2657-1329			PROJECT PERIOD FROM January 2024 TO December 2024
KEY WORDS: Surface waves, Radar array, Beamforming			
ABSTRACT : As Taiwan actively promotes offshore wind power and low-carbon energy transition, the safety challenges in port areas and navigation channels are becoming increasingly severe. The overlap of offshore wind farms and commercial shipping routes raises navigation risks. Additionally, the growing severity of extreme weather further complicates the management of maritime safety in port areas. To establish disaster prevention data for land transportation and port facilities, enhance intelligent environmental monitoring, and drive the development of data intelligence and disaster prevention technologies to meet the disaster prevention needs of the Ministry of Transportation and its affiliated agencies, this project develops ocean radar remote sensing technology to improve navigation safety in the waters near Taichung Port and ensure the stability and efficiency of Taiwan’s maritime transportation during the energy transition. The quality of radar wave observation data is influenced by quality control, environmental conditions, and equipment availability. From January to March 2024, radar data quality remained relatively stable, with the correlation of dual-radar composite data maintained between 0.836 and 0.890, indicating high accuracy. However, as time progressed into April and May, observation quality gradually declined, with the correlation between the northern radar station and AWAC dropping to 0.559 and the southern radar station correlation decreasing to 0.280. During the June to August period, the correlation at the northern radar station plummeted to 0.053, with almost no correlation observed in August. Furthermore, in terms of wave period data between the radar and AWAC, the overall correlation remained low, with values close to zero from May to August. Some months exhibited significant overestimation, necessitating further investigation and improvement. Regarding the changes in wave spectra during typhoons, results indicate that high-frequency waves (0.2–0.3 Hz) are influenced by wind waves, while low-frequency waves (0.05–0.15 Hz) originate from distant swells, forming a bimodal structure. Even after a typhoon moves away, the energy of the swells persists, while high-frequency wind waves gradually weaken. This project continues to optimize radar monitoring technology and data quality, deepen interdisciplinary collaboration, promote data openness, and localize technology applications to support commercial port operations, coastal management, search and rescue, and maritime pollution response. These efforts aim to ensure port safety and facilitate the smooth progress of the energy transition.			
DATE OF PUBLICATION March 2025	NUMBER OF PAGES 220	PRICE 200	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目 錄	III
圖目錄	V
表目錄	IX
第一章 前言	1-1
1.1 計畫背景與目的	1-1
1.2 計畫範圍與對象	1-11
1.3 研究項目	1-12
1.4 研究架構	1-13
1.5 預期成果	1-14
第二章 文獻回顧	2-1
2.1 歷年成果說明	2-1
2.2 高頻雷達觀測波浪文獻回顧	2-3
2.3 本計畫文獻回顧及運用情形	2-25
第三章 雷達數據品管與系統精進	3-1
3.1 雷達系統品管	3-2
3.2 波浪資料品管標準探討	3-5
3.3 波浪數據限制	3-13
3.4 雷達系統精進	3-14
第四章 觀測資料分析與交互驗證	4-1
4.1 研究方法	4-1
4.2 統計分析方法	4-7
4.3 觀測資料驗證	4-9

4.4 海流觀測資料分析	4-10
第五章 研究分析與探討	5-1
5.1 本年度觀測成果	5-2
5.2 颱風觀測情境比較分析探討	5-30
第六章 結論與建議	6-1
6.1 結論	6-1
6.2 建議	6-2
6.3 成果效益與後續應用情形	6-2
參考文獻	參-1
附錄一、期末報告審查意見處理情形表	附錄 1-1
附錄二、期末簡報資料	附錄 2-1
附錄三、專家學者座談會議紀錄	附錄 3-1
附錄四、工作會議紀要	附錄 4-1

..

圖目錄

圖 1.1 臺灣第 1 島鏈位置.....	1-1
圖 1.2 臺中海洋資源地區與沿海中華白海豚野生動物棲地分佈圖 ..	1-2
圖 1.3 國家發展委員會 2050 淨零排放路徑藍圖.....	1-3
圖 1.4 氣候變遷調適政策.....	1-4
圖 1.5 NRG Energy 公司碳捕捉技術.....	1-5
圖 1.6 Lake Charles Methanol 公司生產藍色甲醇位置.....	1-5
圖 1.7 工業技術研究院與台灣電力公司燃煤二氧化碳捕捉實驗	1-6
圖 1.8 國內首座二氧化碳捕捉再利用示範工廠	1-7
圖 1.9 微藻固碳及利用技術.....	1-8
圖 1.10 鐵砧山二氧化碳封存場址與東西向岩性模型剖面圖	1-9
圖 1.11 臺灣海氣象觀測時空觀測不足	1-10
圖 1.12 臺灣周遭海域海洋雷達 113 年建置現況.....	1-11
圖 2.1 臺灣首座海洋陣列雷達.....	2-1
圖 2.2 108 年開發海洋雷達觀測之船艦偵測技術.....	2-2
圖 2.3 110 年雷達品管研究之初步成果.....	2-2
圖 2.4 海上浮標觀測資料輸入 Barrick 理論都卜勒譜比較圖.....	2-3
圖 2.5 英格蘭康沃爾郡北海岸 2 座雷達站.....	2-4
圖 2.6 神經網路架構概要圖.....	2-5
圖 2.7 研究結果 SLNN 與 Seaview 反演算波浪與浮標比較圖.....	2-6
圖 2.8 研究結果 SLNN 與 MLNN 結果比較圖.....	2-7
圖 2.9 海洋陣列雷達站發射與接收類型	2-8
圖 2.10 單基地雷達站海氣象不同位置不同布拉格夾角比較圖	2-10
圖 2.11 雙基地雷達站海氣象不同位置不同布拉格夾角比較圖	2-11
圖 2.12 表面波流統計分析比較	2-12

圖 2.13 BPNN 神經網路模型結構.....	2-13
圖 2.14 BPNN 處理架構概念	2-14
圖 2.15 福建龍海高頻雷達訊號線性調頻與八木宇田天線示意圖 ..	2-16
圖 2.16 福建龍海雷達站.....	2-17
圖 2.17 BPNN 模型訓練、測試與海域海表面波高觀測情形.....	2-18
圖 2.18 雙基地雷達海面散射幾何結構，二階頻譜波向量關係圖 ..	2-19
圖 2.19 雷達工作頻率反演算不同風速結果	2-21
圖 2.20 平台運動模型單方向單一運動組成圖.....	2-23
圖 2.21 利用固定雷達頻率不同取樣率估算實際示性波高比較	2-25
圖 2.22 利用固定取樣率不同雷達頻率估算實際示性波高比較	2-25
圖 3.1 雷達硬體系統架構.....	3-2
圖 3.2 雷達系統品管流程.....	3-3
圖 3.3 臺中港雷達天線系統.....	3-4
圖 3.4 美國 QARTOD 即時高頻雷達表面海流品管手冊	3-6
圖 3.5 第 0 級品管程序.....	3-7
圖 3.6 第 1a 級品管程序	3-8
圖 3.7 都卜勒頻譜示意圖.....	3-8
圖 3.8 二階頻譜異常升高情形.....	3-10
圖 3.9 調適性偵測法船舶探測資料處理流程	3-11
圖 3.10 都卜勒距離譜使用調適性偵測法移除船舶訊號之案例	3-12
圖 3.11 第 1b 級品管流程圖	3-13
圖 3.12 赫茲偶極發射天線與環形接收天線架構	3-15
圖 3.13 雷達接收天線導線纏繞示意圖.....	3-16
圖 3.14 主動式天線消除倍頻雜訊的情形	3-17
圖 3.15 主動式天線低通濾波器銹蝕情形	3-18

圖 3.16 雷達天線更換情形.....	3-19
圖 4.1 雙雷達系統空間網格分佈圖.....	4-1
圖 4.2 一階峰受海流相對速度影響的都卜勒頻偏現象	4-2
圖 4.3 布拉格加權函數圖.....	4-4
圖 4.4 天線場型與波束合成技術的幾何原理	4-6
圖 4.5 AWAC 與 Seaview 反演算法波浪驗證.....	4-9
圖 4.6 Seaview 與本計畫反演算法波浪驗證.....	4-10
圖 4.7 臺中港 113 年 1~8 月海表面流監測與波流儀比較與潮位圖	4-15
圖 4.8 臺中港 113 年 1 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖.....	4-18
圖 4.9 臺中港 113 年 2 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖.....	4-19
圖 4.10 臺中港 113 年 3 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖.....	4-20
圖 4.11 臺中港 113 年 4 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖.....	4-21
圖 4.12 臺中港 113 年 5 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖.....	4-22
圖 4.13 臺中港 113 年 6 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖.....	4-23
圖 4.14 臺中港 113 年 7 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖.....	4-24
圖 4.15 臺中港 113 年 8 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖.....	4-25
圖 5.1 運研所與國立中央大學開發的 Matlab 處理程序示意圖	5-1
圖 5.2 臺中港各測站儀器平面配置與雷達觀測範圍	5-2
圖 5.3 臺中港底碇式與雷達波高相關性分析(113 年 1 月份).....	5-14
圖 5.4 臺中港底碇式與雷達平均週期相關性分析(113 年 1 月份)...	5-15
圖 5.5 臺中港底碇式與雷達波高相關性分析(113 年 2 月份).....	5-16
圖 5.6 臺中港底碇式與雷達平均週期相關性分析(113 年 2 月份)...	5-17
圖 5.7 臺中港底碇式與雷達波高相關性分析(113 年 3 月份).....	5-18
圖 5.8 臺中港底碇式與雷達平均週期相關性分析(113 年 3 月份)...	5-19
圖 5.9 臺中港底碇式與雷達波高相關性分析(113 年 4 月份).....	5-20

圖 5.10 臺中港底碇式與演算平均週期相關性分析(113 年 4 月份).	5-21
圖 5.11 臺中港底碇式與雷達波高相關性分析(113 年 5 月份).....	5-22
圖 5.12 臺中港底碇式與雷達平均週期相關性分析(113 年 5 月份).	5-23
圖 5.13 臺中港底碇式與雷達波高相關性分析(113 年 6 月份).....	5-24
圖 5.14 臺中港底碇式與雷達平均週期相關性分析(113 年 6 月份).	5-25
圖 5.15 臺中港底碇式與雷達波高相關性分析(113 年 7 月份).....	5-26
圖 5.16 臺中港底碇式與雷達平均週期相關性分析(113 年 7 月份).	5-27
圖 5.17 臺中港底碇式與雷達波高相關性分析(113 年 8 月份).....	5-28
圖 5.18 臺中港底碇式與雷達平均週期相關性分析(113 年 8 月份).	5-29
圖 5.19 凱米颱風路徑圖	5-30
圖 5.20 凱米颱風相關性與誤差分析探討	5-31
圖 5.21 凱米颱風方向波譜.....	5-32
圖 5.22 海洋雷達凱米颱風期間方向波譜圖	5-33
圖 5.23 凱米颱風路徑與雷達平面波場變化圖	5-34

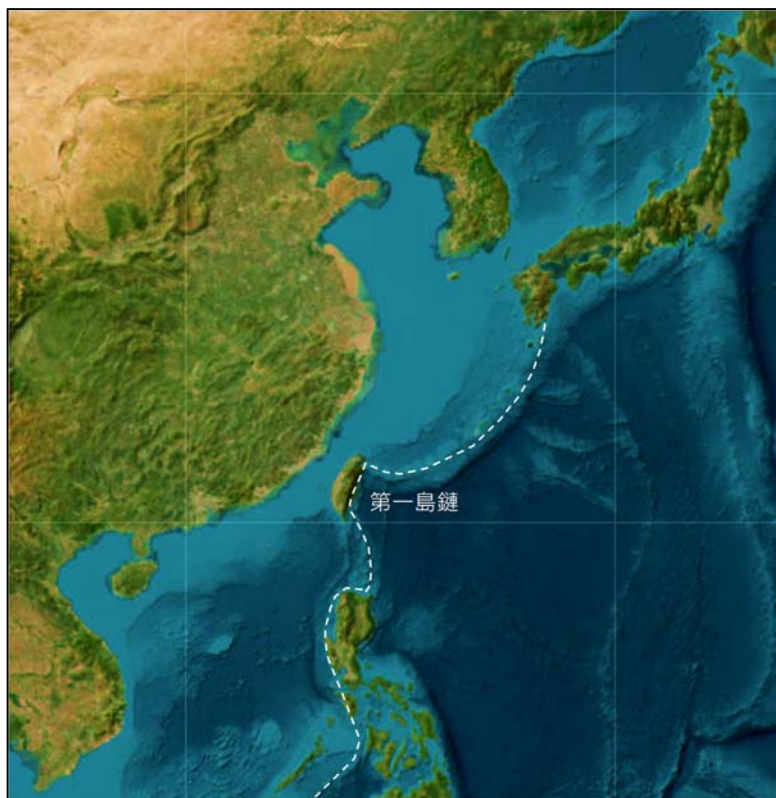
表 目 錄

表 1-1 臺中港海洋雷達系統規格表	1-11
表 2-1 神經網路訓練參數	2-5
表 2-2 本計畫海洋雷達文獻回顧與運用情形彙整表	2-26
表 3-1 臺中港北側雷達站天線駐波比量測情形	3-4
表 3-2 臺中港南側雷達站天線駐波比量測情形	3-5
表 3-3 波浪數據的物理限制	3-14
表 3-4 不同雷達頻率與天線設計關係表	3-15
表 4-1 雷達海表面流觀測情形統計分析	4-15
表 4-2 雷達與底碇式海表面流觀測情形之流向統計分析	4-17

第一章 前言

1.1 計畫背景與目的

臺灣位處東亞第一島鏈的關鍵位置，如圖 1.1 所示，為西太平洋海陸交通運輸樞紐，其中臺中港不僅是臺灣中部行政區域的門戶，更是政府推動綠能政策的關鍵角色，肩負離岸風電產業風機預組裝、風電國產化、港勤運維及人才培訓等四大使命；隨著全球氣候變遷問題日益嚴峻，2050 年淨零碳排已成為國際趨勢與國家發展的核心目標，推動下一階段政策勢在必行，因此，運研所運輸技術研究中心以海陸運防災技術、智慧港埠、低碳綠運輸及氣候調適為核心，致力於協助商港低碳轉型升級，提升港區應用價值。

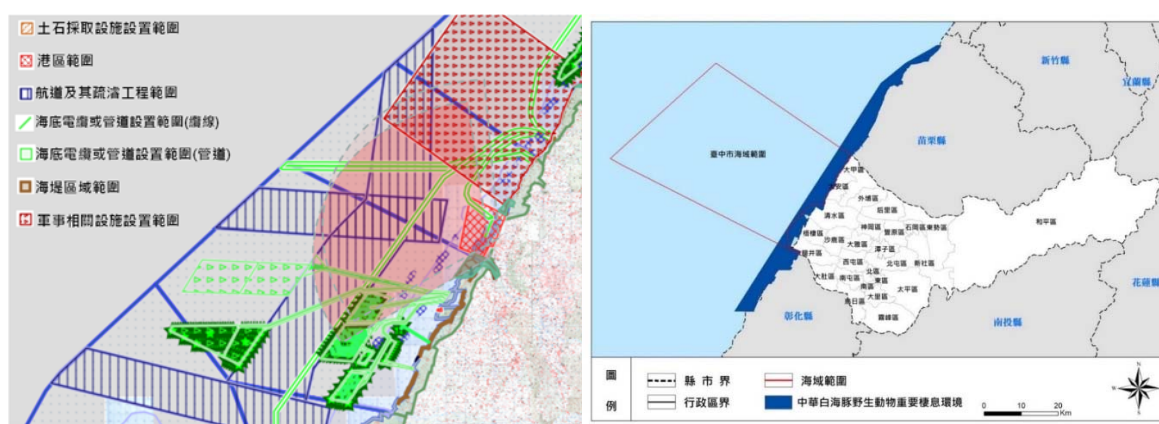


資料來源：本計畫繪製

圖 1.1 臺灣第 1 島鏈位置

目前船舶為交通運輸領域最主要的碳排放來源之一，有需要推動低碳綠運輸轉型，以確保臺中港航行安全與商港發展，這將會是交通部未來航運發展的任務，如此情況，政府面臨再生能源發展與產業轉型的困

境，不僅需要重新檢討國土規劃政策，以解決過去陸域與海域「合法但不合理或未合理劃設」的國土問題，依據國土功能分區的劃分已將全國國土劃分為四大類：(1)國土保育區、(2)海洋資源地區、(3)農業發展區與(4)城鄉發展區，其中臺中港海域之海洋資源地區的劃設，已依據 111 年臺中市國土功能分區公開閱覽草案劃設完成，臺中市海域及陸域總面積為 388,778 公頃，其中海域部分為 167,288 公頃，臺中港海域值得注意的是中部沿海的生態，恰為中華白海豚的重要棲息環境，橫跨苗栗、臺中與彰化沿海，如圖 1.2 所示，此如何維繫臺中港船舶航行安全、兼顧生態與商港繁榮是交通部應盡責任。



資料來源：(左圖)本計畫繪製，(右圖)臺中市國土功能分區公開閱覽

圖 1.2 臺中海洋資源地區與沿海中華白海豚野生動物棲地分佈圖

隨著臺灣海洋資源開發與氣候變遷衝擊的增加，為建立完善的海洋監測系統已成為政府重要的發展方向，本計畫背景將簡要說明臺灣政府積極推動能源政策調整與再生能源發展，以及臺灣積極導入碳捕捉與封存技術(CCUS)的進展，並透過海洋陣列雷達技術的應用，臺灣不僅能強化海域環境監測，也能提升防災預警能力，以下將探討(一)國家能源政策發展情況、(二)國際與國內淨零碳排放政策推動情況、(三)臺中海洋陣列雷達發展近況，分析臺灣在這三大領域的政策推動現況與未來發展趨勢。

(一)國家能源政策發展情況：

113 年 5 月 20 日，總統宣示未來國家供電穩定政策，行政院國家發展委員會(簡稱國發會)提出的「2050 淨零排放路徑藍圖」為基礎，

持續推動第 2 次能源轉型。政策目標為減煤、增氣、發展綠能及非核潔淨能源，並透過發展多元綠能與智慧電網，強化電力系統韌性，確保穩定供電，同時兼顧降低空氣污染與減碳。(1)在減煤方面，自 114 年起，政府將停止新建與擴建燃煤機組，並規劃在現有燃煤機組陸續除役後，逐步改建為燃氣機組，以降低燃煤發電對環境的影響。(2)在增氣方面，為確保電力穩定，政府計畫將天然氣發電占比提高至 50%，並積極推動臺中及永安接收站的擴建計畫，以及第 3 座接收站的興建計畫。同時，臺灣電力公司亦規劃新建協和接收站與臺中港接收站，以滿足國內天然氣需求的成長；此外，為提升天然氣供應穩定性，政府自 107 年起逐步增加自備儲槽容積與安全存量，並規劃至 116 年將儲槽容積天數由現行至少 15 天提升至 24 天，安全存量天數由至少 7 天提高至 14 天，以強化能源供應的穩定度。考量全球局勢變化，政府也因應烏克蘭與俄羅斯戰事的不確定性，於 108 年起將美國 Cameron LNG 氣源納入 16 個進口液化天然氣國家名單，確保供應穩定並分散風險。(3)在發展綠能方面，政府積極推動再生能源發展，規劃於 115 年將再生能源占比提升至 20%，119 年達 30%，並於 139 年超過 60%，以逐步邁向淨零排放的目標，如圖 1.3 所示。

資料來源：行政院與國家發展委員會

(二)國際與國內淨零碳排政策推動情況：

球行動在地的趨勢，臺灣積極參與國際減碳行動，同步推動相關法規與政策，以確保能源轉型目標符合全球發展方向。2021 年聯合國氣候峰會(COP26)上，格拉斯哥氣候公約首次明確將「減少化石燃料」列為全球減碳目標，強調各國應自主減碳、2023 年聯合國氣候峰會(COP28)進一步強調，能源轉型應加速擺脫化石燃料，並推動再生能源及各項脫碳技術。

有鑑於此，國發會依循國際趨勢，推動國家氣候變遷調適政策綱領，如圖 1.4 所示，全面提升我國應對氣候變遷的調適能力。為強化減緩與調適作為，臺灣於 111 年公布淨零排放路徑及策略總說明，並制定溫室氣體減量及管理法，以因應氣候變遷挑戰，此外，112 年制定氣候變遷因應法，進一步強化減碳與氣候調適措施，以降低風險、減少災害損失並創造永續發展效益。



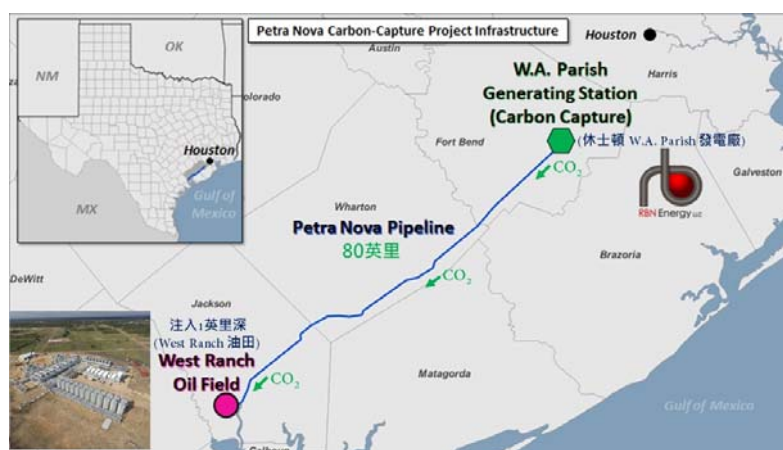
資料來源：行政院與國家發展委員會

圖 1.4 氣候變遷調適政策

1. 國際碳捕捉技術方面：

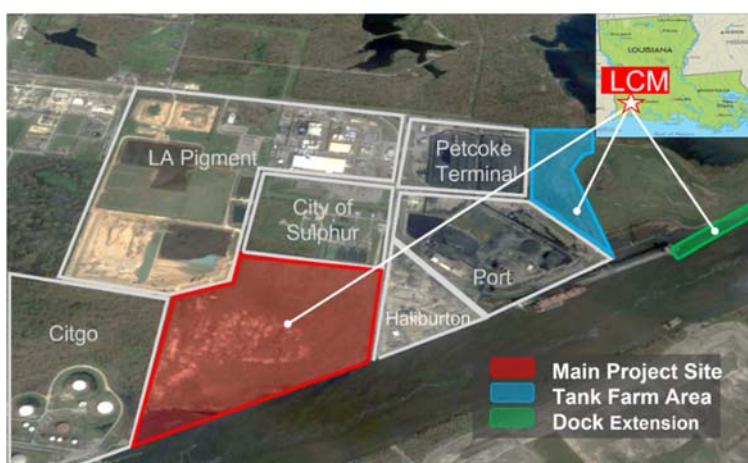
目前全球淨零排放的關鍵技術係由碳捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)轉變為碳捕獲、利用與封存(Carbon Capture Utilisation and Storage, CCUS)，相關例如(1)美國 NRG Energy 公司利用捕捉技術將休士頓 W.A. Parish 燃煤發電產生的二氧化碳利用化學技術捕捉與蒐集，估計每年可捕獲 160 萬噸的二氧化碳，並將蒐集的二氧化碳注入 West Ranch 油田油井當中，藉此提高石油採收效率，如圖 1.5 所示。(2)美國墨西哥灣 Lake Charles Methanol 公司利用天然

氣重整技術，透過化學反應轉化出成本較低的低碳氫，再將其轉化為氫載體燃料成為藍色甲醇，提供商船使用，如圖 1.6 所示。(3)德國 Heidelberg Materials AG 公司成為世界上第 1 個碳捕獲的淨零水泥，該公司研發全新的黏合劑，能減少水泥中石灰石比例，最大限度地減少能源消耗與二氧化碳排放，並利用碳化技術將二氧化碳融入產品中，使建築材料能儲存二氧化碳，另外，(4) 德國 Heidelberg Materials AG 公司瑞典 Cementa 子公司，於瑞典哥特蘭島 Slite 水泥廠，利用單乙醇胺吸收酸性氣體二氧化碳的醇胺捕捉二氧化碳技術 (Najmus et al., 2019)，每年可捕獲 180 萬噸的二氧化碳，相當於瑞典全國總排放量的 3%，是水泥行業目前為止最大的捕獲專案。



資料來源：Cemre Shipyard LinkedIn

圖 1.5 NRG Energy 公司碳捕捉技術



資料來源：Lake Charles Methanol II, LLC

圖 1.6 Lake Charles Methanol 公司生產藍色甲醇位置

2.國內碳捕捉、利用及封存技術方面：

工業技術研究院與台灣電力公司合作，於臺中火力發電廠進行燃煤碳捕捉技術實驗驗證，108 年底利用煙道氣體與醇胺捕捉劑捕捉二氧化碳研究每年捕捉約 7 噸二氧化碳，未來計畫擴展至每年捕獲 2,000 噸二氧化碳，如圖 1.7 所示，此外，捕獲的二氧化碳可以透過銅鋅觸媒材料轉移成甲醇，目前可生產每日 3 公斤的甲醇。



資料來源：工業技術研究院與台灣電力公司

圖 1.7 工業技術研究院與台灣電力公司燃煤二氧化碳捕捉實驗

此外，工業技術研究院、台塑企業與國立成功大學合作，於高雄仁武廠研究煙道氣化學固碳技術，應用醋酸鉀捕獲劑(高效能吸收劑)，成功捕獲每年 30 噸二氧化碳，雲林台塑麥寮廠測試再次驗證二氧化碳每日捕獲，並已於 110 年 9 月 24 日於成功大學安南校區落成啟用國內首座二氧化碳捕捉再利用示範工廠，每年約捕獲 36 噸二氧化碳，轉化產出 12 噸甲烷等化學品，如圖 1.8 所示。





資料來源：國立成功大學與經濟部

圖 1.8 國內首座二氧化碳捕捉再利用示範工廠

再者，工業技術研究院與中國鋼鐵股份有限公司合作方面，利用變壓吸附裝置捕捉煉鋼廠冶煉轉爐過程產出的一氧化碳與二氧化碳，再透過純化分離技術提煉純度更高的二氧化碳，再將二氧化碳轉化為甲醇及甲烷等低碳能源，每年約可捕獲超過 15 噸二氧化碳，此外，台灣水泥股份有限公司與工業技術研究院合作，研發「鈣迴路捕獲二氧化碳技術」與「微藻固碳及利用技術」，於花蓮和平水泥廠建立鈣迴路碳捕捉試驗廠，利用不飽和氧化鈣做為吸收劑，透過化學反應形成碳酸鈣，再利用煅燒高溫分解碳酸鈣為氧化鈣與高純度二氧化碳，氧化鈣經過氧失去活性，再送回水泥廠使用，鈣迴路碳捕捉不斷循環，達到零排放的目標，每小時可捕獲 1 噸二氧化碳，每年約可減少 5,000 多噸二氧化碳，高純度二氧化碳再餵養高一種固碳微藻稱做兩生紅球藻，再從球藻中提煉出高價值蝦紅素，達到循環經濟，每日可捕捉約 9 噸二氧化碳進行微藻養殖固碳，預計 114 年大量生產每年捕捉約 3 萬噸，如圖 1.9 所示。

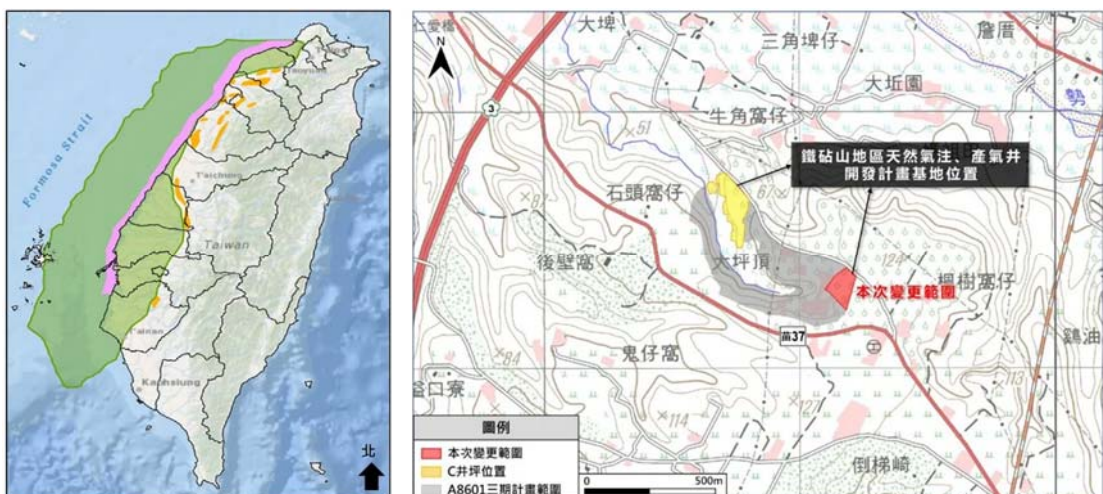


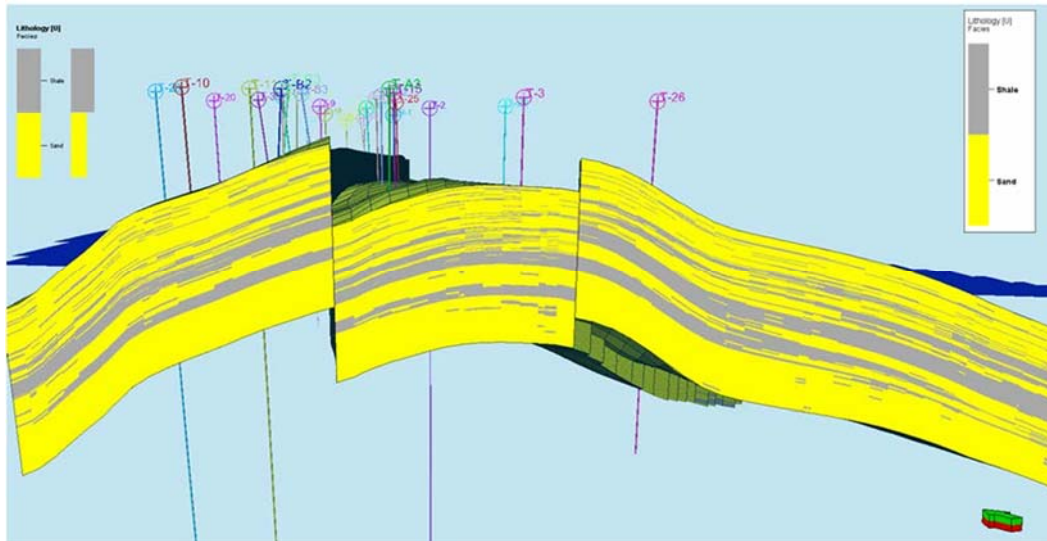


資料來源：工業技術研究院

圖 1.9 微藻固碳及利用技術

此外，112 年經濟部能源署委託台灣中油股份有限公司完成「鐵砧山碳捕存跨部會試驗計畫」二氧化碳灌注數值模擬與封存量評估工作，該地點地質具備完整封閉背斜構造，儲氣層深度適中與厚度足夠，擴建儲氣窖，設置 6 口注產氣井，規劃 114 於 116 每年灌注 10 萬噸二氧化碳進行封存，如圖 1.10 所示，以及「桃園濱海碳封存計畫」與「台西盆地海域碳封存計畫」等多項二氧化碳封存計畫。





資料來源：臺灣大學風險社會與政策研究中心、台灣中油股份有限公司探採研究所田志明(2019)、李奇峰(2023)

註：(左上圖)封存潛力場址：綠色-平原與近海碳封存、粉紅-濱海碳封存潛能區、黃色-陸域碳封存潛能區；(右上圖)中油鐵砧山二氧化碳封存場址；(下圖)鐵砧山東西向岩性模型剖面圖

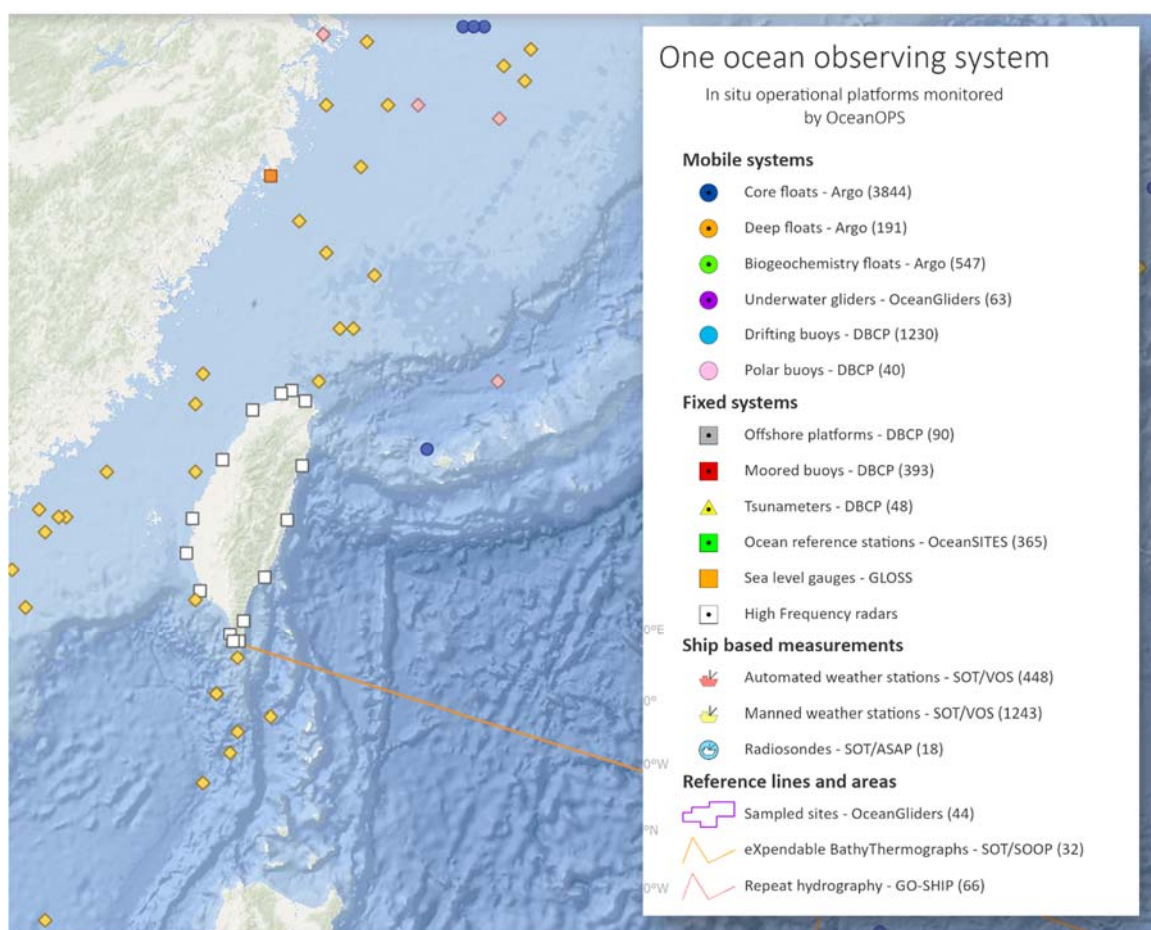
圖 1.10 鐵砧山二氧化碳封存場址與東西向岩性模型剖面圖

(三)臺中海洋陣列雷達發展近況：

臺灣面對海洋資源開發、海洋資源管理、海洋生態保育，更甚者氣候變遷與自然災害預防等需求，皆需要海洋數據分析與應用。回顧我國海洋觀測歷史，歸納海洋觀測來源概分為四大分支，浮標觀測(buoy)、遙感探測(remote sensing)、水下無人載具(Unmanned Underwater Vehicle)與船測(Observing Ship)，過去一般傳統作法僅以單點觀測(例如：固定式浮標或漂流浮標)，觀測成本高，以及空間覆蓋範圍有限，爰僅適合沿海或特定海區域進行局部觀測，難以獲得海域完整所需之觀測資訊，但我國海洋觀測刻面臨(1)設備維護困難觀測資料獲取不易、(2)受限空間覆蓋情形時空觀測不足，如圖 1.11 所示、(3)即時性不完備與缺乏長期性與連續的觀測，以及(4)觀測精度與資料品質仍待提升。

時勢所趨，源自 1980 年興起海洋雷達觀測近岸海流、波浪與海洋表面風，交通部運輸研究所(簡稱運研所)為提升臺中港域船舶進出港及海上作業安全，107 年於臺中港北防沙堤投入建置國內首座海洋

陣列雷達站(又稱為臺中港海洋雷達南站 HTCEN)，並發展海表面波浪及海流解析技術，此外，為改善觀測不確定性及精進觀測品質，110年於臺中火力發電廠放流口建置臺中港第二座海洋陣列雷達站(又稱為臺中港海洋雷達南站 HTCS)，聯立解析空間波流場。截至目前為止，運研所、交通部中央氣象署(簡稱氣象署)、國家海洋研究院(簡稱為國海院)、國科會國家實驗研究院與海軍大氣海洋局等所屬各涉海單位，依據自身業務職掌陸續建置海洋雷達，包括：陣列高頻與特高頻雷達站 22 座、集成式高頻雷達 15 座、微波雷達站 20 座與機動雷達系統 4 套，已構築臺灣周遭經濟海域及沿近海遠近交織之海氣邊界層環境特性海洋雷達監測網絡，如圖 1.12 所示。



資料來源：JCOMM 與 WMO

圖 1.11 臺灣海氣象觀測時空觀測分佈圖

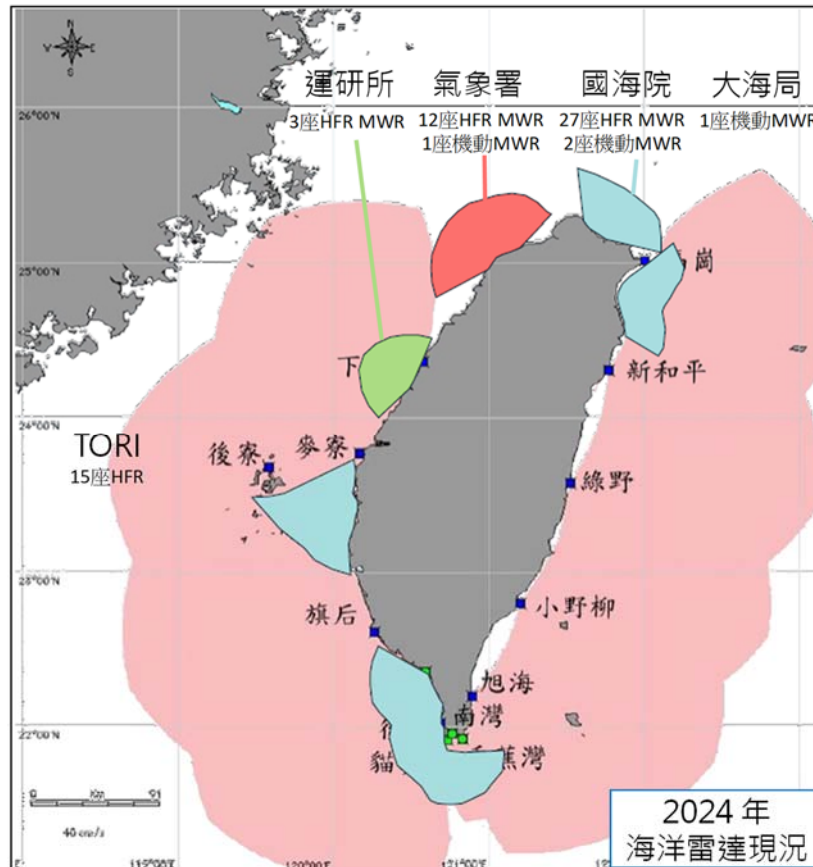


圖 1.12 臺灣周遭海域 113 年海洋雷達建置現況

隨著臺灣積極推動離岸風電與低碳能源轉型，港區與航道的安全挑戰日益加劇，風電場與商船航道交錯，增加航行風險，而極端氣候變遷亦使得港區航安管理更具挑戰性，因此，運研所為建立陸運與港灣設施的防災資料數據，加強智慧環境監測，建構數據智慧化，並推動防災技術發展，以滿足交通部暨部屬機構災防的需求，本計畫發展海洋雷達遙測技術，以提升港區與風電場的航行安全，確保臺灣在能源轉型過程中的海運穩定性與效率。

1.2 計畫範圍與對象

本計畫地點位於臺中港與領海海域範圍，運研所建置的海洋陣列雷達包含許多理論與技術，例如：射頻技術、相控陣原理、布拉格反射、都卜勒效應與波束合成，能調查觀測臺中港區鄰近周邊海域海氣象，提供觀測範圍 40 公里半徑遠，扇形 120°的空間平面，提供空間解析度為 500 公尺與方向角解析度 5°之波浪與海流觀測資訊，雷達硬體規格整理，如表 1-1 所示。

表 1-1 臺中港海洋雷達系統規格表

雷達參數	參數值	單位	備註
觀測時距	30	分鐘	
雷達頻率	27.75	MHz	高頻
頻寬	300	KHz	
發射天線數量	4	支	
接收天線數量	16	支	陣列式
方位角	296	度	發射方位角
觀測距離	40	公里	
距離解析度	500	公尺	
方位解析度	5	度	
線性調頻發射週期	0.216666	秒	
A/DC 取樣頻率	740	Hz	類比數位轉換
最小線性調頻數量	8,192	個	最小啣啾數

1.3 研究項目

本計畫研究項目包含：文獻蒐集與回顧、雷達數據品管與系統精進、觀測資料分析與交互驗證、研究分析與探討等4項，各項目工作要點分述如下：

(一)文獻蒐集與回顧：

蒐集近來海洋陣列雷達觀測波浪相關方法與神經網絡相關等研究，單點位神經網絡(Single-Location Neural Network, SLNN)、多點位神經網絡(Multi-Location Neural Network, MLNN)、反向傳播神經網路(Back propagation neural network，BPNN)與長短期記憶模型(long short-term memory，LSTM)，以及假設風已引起布拉格譜峰，利用風湧理論修正雷達波浪參數演算法之方法，或利用假設波浪分佈已知，演算無方向性海洋波數譜之方法，又或利用電場與海表面位移關係線性關係與電場頻域時域變異數之方法，探討國外海洋雷

達觀測技術之相關研究與技術論文的進展。

(二)雷達數據品管與系統精進：

本計畫雷達主動天線受限於環境因素，評估替換為被動天線，以精進雷達系統，參考美國 IOOS 所提出的 QARTOD 陣列雷達品管手冊，結合 111 年度的研究成果，以及遵循科學界公認的數據標準，基於實務品管制度與專業判斷，制定本計畫的雷達波浪品管標準，以確保各項雷達觀測數據的可用性與準確性，並說明 113 年度雷達系統精進的措施。

(四)觀測資料分析與交互驗證：

本計畫探討海洋陣列雷達進行海表面波浪觀測的理論與做法，並蒐集臺中港海洋陣列雷達雙雷達站資料，探討兩種不同雷達演算海表面波浪的方式，以及分析海洋陣列雷達品管後波流之觀測資料，結合鄰近短天期氣候變化與觀測環境之波流觀測數據，進行波流觀測之潮時分析，藉以驗證資料之相關係數 r 、均方根 RMSE、偏誤分析 bias、散點因子 SI 等關係。

(五)研究分析與探討：

本計畫利用 113 年臺中港海域觀測結果，並以海洋陣列雷達品管後海表面波浪觀測資料，並利用運研所臺中港設置的底碇式潮波流儀進行港灣環境波浪觀測分析與討論，並藉由驗證資料相關係數 (R)、均方根誤差 (RMSE)、散點因子 (SI)、偏誤分析 (bias) 等關係，掌握雷達數據與雷達目前運作狀態，以及進行颱風觀測情境比較分析，探討時序列、颱風雷達方向波譜與平面波場分析。

1.4 研究架構

本計畫架構係簡要說明如下：

第一章：前言部分先就計畫背景回顧進行概述、並對研究目的、研究項目、研究方向、研究範圍與對象、研究方法、與臺灣海域離岸風電、海岸帶使用情形，並考量國家能源政策與國內外淨零碳排放政策對於臺中港航運現況之闡述。

第二章：文獻回顧，回顧歷年研究成果，說明運研所過去海洋陣列雷達發展的演算法及解算技術與品管作業流程等、並回顧過外其他雷達波浪相關文獻，並探討文獻回顧於本計畫運用情形，做為研究人員瞭解運研所研究，以及後續運研所檢討改進之應用參考。

第三章：雷達數據品管與系統精進，3.1 小節探討雷達系統品管，，3.2 小節參考美國 IOOS 發行的 QARTOD 品管手冊與科學界公認的數據標準，探討波浪的品管標準，討論可調適性偵測法與船舶濾除的品管流程，3.3 小節說明波浪數據品管的適用條件，釐清目前雷達系統波浪觀測之限制，3.4 小節探討雷達系統精進，解決雷達系統面臨問題，說明主動天線更換為被動天線的經過。

第四章：觀測資料分析與交互驗證，本計畫說明海洋陣列雷達進行海表面波浪觀測的理論，並蒐集臺中港海洋陣列雷達雙雷達站資料，探討兩種不同雷達演算海表面波浪的方式，以及波流觀測分析，驗證波流資料的相關係數 r 、均方根 RMSE、偏誤分析 bias、散點因子 SI 等關係。

第五章：研究分析與探討，綜合討論 113 年臺中港海域觀測結果，並利用海洋陣列雷達波浪觀測成果與運研所臺中港設置的底碇式潮波流儀進行觀測成果討論與研究，並於本章進行波高統計分析比較，以及颱風期間波浪觀測情境之分析。

第六章：結論與建議，綜上研究成果提出結論與建議，做為後續研究應用參考依據。

1.5 預期成果

(一)本計畫連續定時觀測海洋表面波浪，提供航行管理單位與港務公司港區波浪觀測資料，做為港灣工程規劃設計應用參據。

(二)持續發展海洋陣列雷達監測技術，透過建立跨域研究機制，與各單位資料共享、技術與應用合作能更加切實交流合作。

- (三)提升海洋陣列雷達觀測成效，穩定產出平面海表面波浪觀測資訊方面，實現廣泛蒐集海洋環境資訊。
- (四)本計畫透過相關文獻回顧與討論，確立運研所海洋陣列雷達精進研究之方向。

第二章 文獻回顧

本計畫延續 108 年與 110 年相關研究成果，主要探討臺中港鄰近海域的海氣象觀測技術。運研所前期相關研究計畫，已建置臺中港海洋陣列雷達系統，並利用巴里克(Barrick)1972 年於美國 NOAA 電波傳播實驗室研究提出中頻(MF)、高頻(HF)與甚高頻(VHF)雷達之海面散射理論與分析原理，以及船舶訊號反射電磁波訊號探討海流、波浪與船艦等偵測技術，歷年成果說明及相關文獻回顧整理如下。

2.1 歷年成果說明

運研所於 107 年引進全臺灣首座海洋陣列雷達，並於臺中港設置完成，如圖 2.1 所示。108 年初步發展海表面波浪與海流之解析技術，囿於陣列雷達係由國外引進的草創時期，因此，對雷達運作狀況與掌握仍相當有限，故先著重探討雷達硬體建置與功能，以及系統運行的要領。隨著時間推移，逐漸熟稔操作機制，當雷達向海面發射電磁訊號後，這些訊號與海水表面交互作用後產生反射訊號，再經由接收，將外部雷達反射訊號蒐集進入系統處理，利用雷達演算法與雷達訊號之分析，從而獲得海氣象數據資訊之研究成果，以及摸索陣列雷達船舶辨識之先導技術，並利用船舶自動識別系統(Automatic Identification System，簡稱 AIS)加以驗證，如圖 2.2 所示。



圖 2.1 臺灣首座海洋陣列雷達

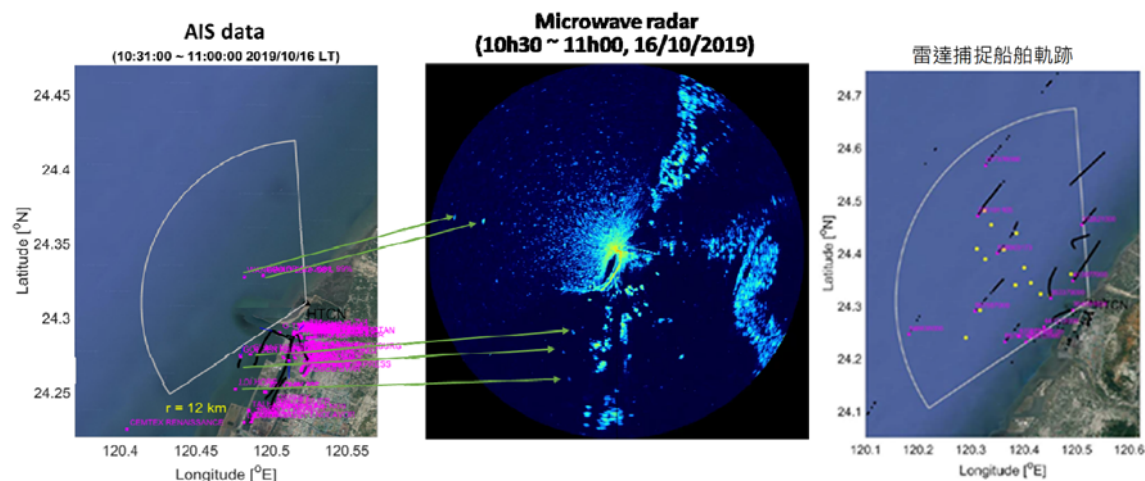


圖 2.2 108 年開發海洋雷達觀測之船艦偵測技術

初步探討多重監測系統對海域船舶的動態監控，以確保海上航道的安全並提升港埠使用效能。後續接著開發電子海圖整合展示系統，同時建立了資料庫。進一步，運研所進行了船舶分類統計與管理功能之研發，期望提高港埠與航運的效率。然而，於當時研究中存在一些不足之處，特別係雷達訊號的品管制度尚未完善。因此，對於雷達觀測作業化程度仍有待加強。基此，後續研究賡續精進發展雷達觀測作業化。110 年並沿用前期成果，以獲得更好之海氣象觀測資訊，嘗試消除雷達的船舶訊號對海氣象觀測的干擾。此外，參考美國 IOOS 提出的 QARTOD 陣列雷達品管手冊，將海洋陣列雷達系統的產品與品管分為 0 到 3 個等級，具體細節如圖 2.3 所示。然而，由於品管建議項目眾多，無法在該年度實現，因此，後續研究仍需持續努力改進與完善。

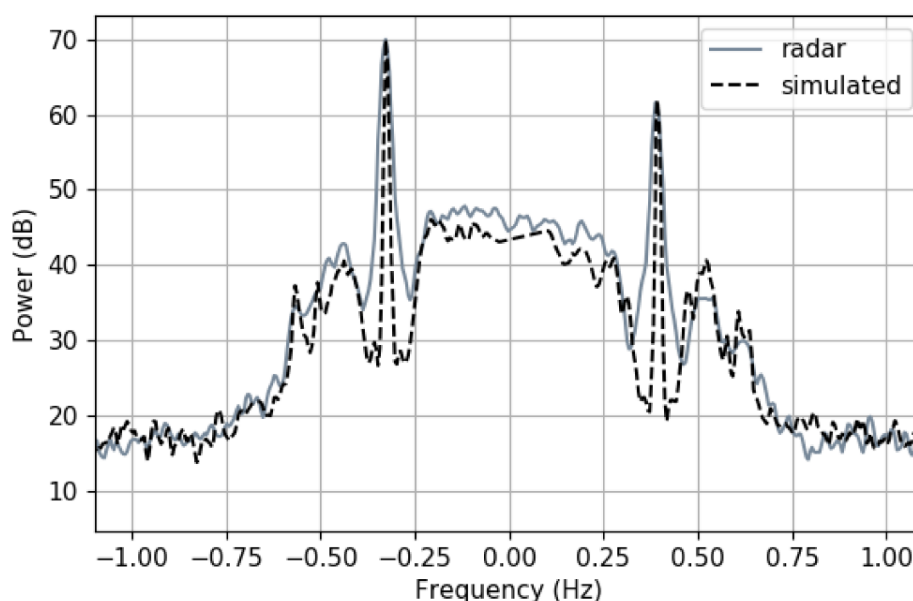
 Manual for Real-Time Quality Control of High Frequency Radar Surface Current Data A Guide to Quality Control and Quality Assurance for High Frequency Radar Surface Current Observations Version 2.0 June 2022	產品劃分	品管內容
	Level 0	單雷達站/原始(IQ)資料品管
	Level 1	單雷達站/都卜勒距離譜(DRS)品管
	Level 2	單雷達站/徑向波浪、流速品管
	Level 3	雙雷達站/空間波浪、流速品管

圖 2.3 110 年雷達品管研究之初步成果

2.2 高頻雷達觀測波浪文獻回顧

(一) Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2019) Inversion of HF Radar Doppler Spectra Using a Neural Network.

高頻雷達長期應用於距離超過 100 公里之海洋表面參數(海流、波浪與風速)觀測，其觀測原理源自於 Barrick(1972)利用 Rice(1951)電磁波從略微粗糙表面反射與微擾法，推導出海洋表面單基地雷達散射截面，配合方向海洋頻譜(directional ocean spectrum，包含 1 組海風系統與 3 個主要湧分量)與雷達回波波數進行非線性積分，獲得 Barrick 理論方程式；然而，本文獻研究作者利用海上浮標觀測資料輸入 Barrick 理論方程式與實際雷達回波分析都卜勒譜進行比較，理論與實際頻譜兩者非常相似，但都卜勒頻率接近零處差異越為明顯，如圖 2.4 所示。

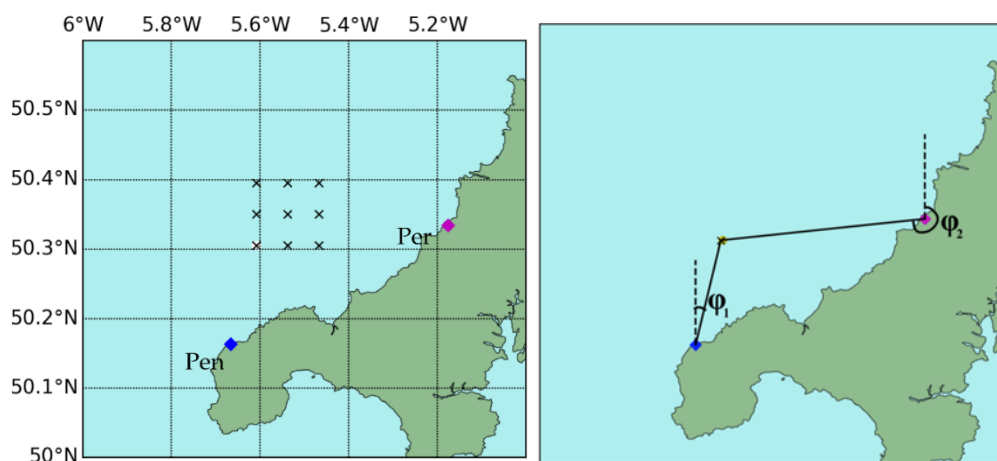


資料來源：Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2019)

圖 2.4 海上浮標觀測資料輸入 Barrick 理論都卜勒譜比較圖

更甚者雷達觀測實際情況並非是如此，Wyatt(2005)表示雷達訊號可能會出現較大的旁瓣效應，再加海域強洋流的影響，導致現有海洋頻譜反演算海表面參數的方法，可能不再適用，因此，本文獻研究作者表示若能以神經網路反覆學習受干擾雷達訊號的案例，理論上能重新建立雷達都卜勒頻譜與相對應海洋頻譜的關係，故本文獻研究以英格蘭康沃爾郡北海岸(north coast of

Cornwall) 2 座雷達站進行研究，該雷達頻率為 12.3MHz，參數發佈的時間間隔為 60 分鐘，空間解析度為 1 公里，雷達發射天線組由 4 支正方陣列天線組成，雷達接收天線組為 16 支陣列天線排列而成，該雷達由普利茅斯大學負責維護與運作，協助海上再生能源風場觀測與測試，如圖 2.5 所示。

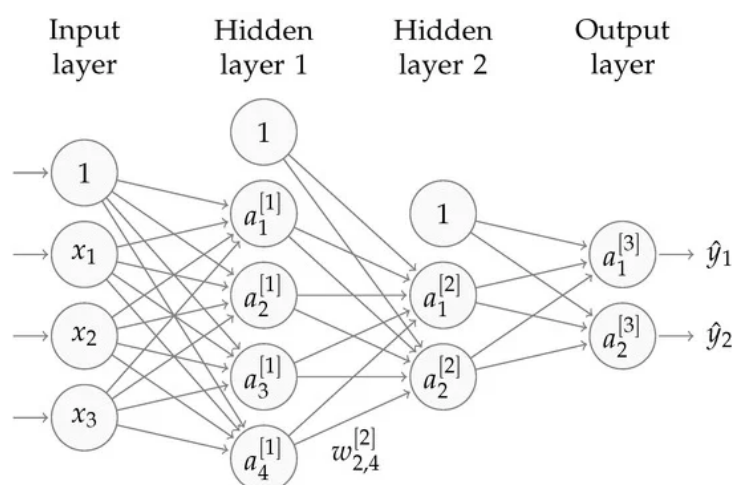


資料來源：Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2019)

圖 2.5 英格蘭康沃爾郡北海岸 2 座雷達站

更進一層回顧本文獻研究，該作者使用 2 種神經網絡系統進行訓練，分別為單點位神經網絡(Single-Location Neural Network, 簡稱 SLNN)與多點位神經網絡(Multi-Location Neural Network, 簡稱 MLNN)，該神經網路架構概為 1 個輸入層、1 組隱藏層與 1 個輸出層組成，每層包含不同數量的節點，神經網路的學習目標為尋找適當權重值與神經元的連結，以供日後準確輸入向量並轉換為輸出向量，如圖 2.6 所示。然而，神經網路效能很大程度取決於層數多寡、以及每層節點的數量、選擇的啟動函數、最小化演算法與神經網路反覆運算次數等，故本文獻研究作者測試階段於 SLNN 系統分別選擇節點數 179 點、256 點、512 點與 880 點進行測試與運算，層數計算為 6~9 層，啟動函數選擇 elu 或 relu，最小化演算法選擇 RMSProp 或 Adam 方法，反覆計算次數選擇 2,500 次、3,000 次或 3,500 次進行學習與測試；反觀於 MLNN 系統測試階段，選擇節點數 444 點、497 點、512 點、666 點、701 點、768 點、800 點或 999 點進行測試與運算，層數計算為 4~9 層，啟動函數亦由 elu 或 relu 兩者進行選擇，最小化演算法亦可選擇

RMSProp 或 Adam 方法，反覆計算次數選擇 2,000 次、2,500 次、3,000 次或 3,500 次學習與測試。



資料來源：Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2019)

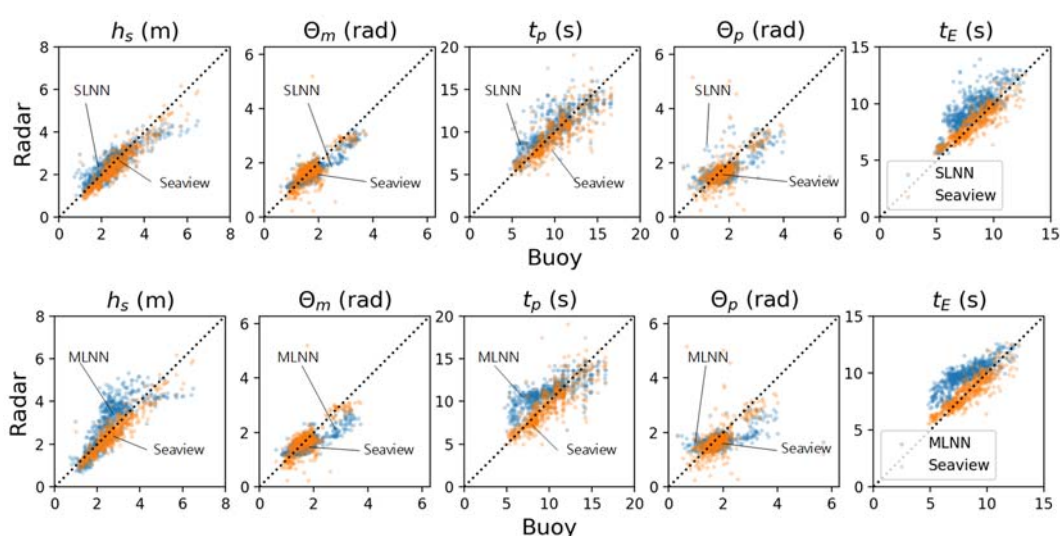
圖 2.6 神經網路架構概要圖

本文獻研究 SLNN 系統單點位波束角(φ)為固定角度，分別為 $\varphi_1 = 15^\circ$ 、 $\varphi_2 = 264^\circ$ ，MLNN 系統多點位波束角(φ)為範圍角度，分別為兩組範圍 $\varphi_1 = 9^\circ \sim 42^\circ$ 、 $\varphi_2 = 261^\circ \sim 288^\circ$ ，經過神經網絡訓練，學習雷達波束角度間與都卜勒譜之關係，最後將兩個訓練後最佳化的結果進行比較。作者最後最佳化訓練參數：SLNN 系統節點數選擇 880 點、計算 8 層、啟動函數為 elu、最小化演算法為 Adam 方法、反覆計算 3000 次，而 MLNN 系統節點數選擇 999 點、計算 9 層、啟動函數為 relu、最小化演算法為 Adam 方法、反覆計算 3000 次，整理如表 2-1 所示。

表 2-1 神經網路訓練參數

訓練參數	SLNN	MLNN
波束角 φ_1	15°	$9^\circ \sim 42^\circ$
波束角 φ_2	264°	$261^\circ \sim 288^\circ$
節點數量	880	999
層數	8	9
啟動函數	elu	relu
最小化演算法	Adam	Adam
計算次數	3,000	3,000

本研究結果顯示 SLNN 與 Seaview 反演算法與與波浪浮標觀測散布圖結果具有良好一致性，如圖 2.7 所，突顯機器學習演算法於高頻雷達遙測領域的潛力，雖然 MLNN 系統反演算結果成效不如 SLNN 反演算的結果，但從訓練與測試數據集的結果而言，MLNN 系統的多點位雷達波束角範圍，一定程度影響模型準確性，使 MLNN 演算結果較 SLNN 差。若將研究分析結果進行時序列圖比較，如圖 2.8 所示，不論採用何種演算方法均能獲得良好趨勢，但進一步比較發現 MLNN 擬合情形仍較 SLNN 結果差，特別係 t_p 與 t_E 參數，作者表示儘管神經網路訓練的時間成本很高，但神經網路反演算方法的雷達訊號仍受到部分程度旁瓣效應或空間解析度影響導致成果較差，但此方法確實能有效地獲得更好的成果。

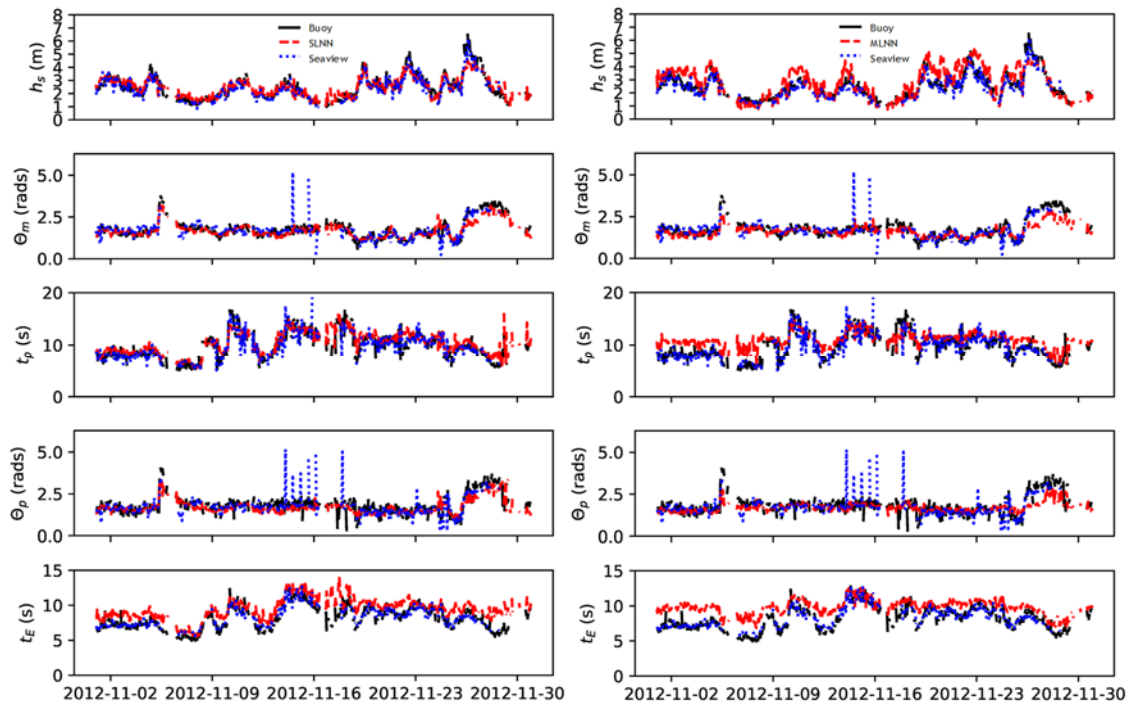


資料來源：Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2019)

註：(上圖) 研究結果 SLNN 與 Seaview 反演算波浪與浮標比較

(下圖) MLNN 與 Seaview 反演算波浪與浮標比較

圖 2.7 研究結果 SLNN 與 Seaview 反演算波浪與浮標比較圖



資料來源：Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2019)

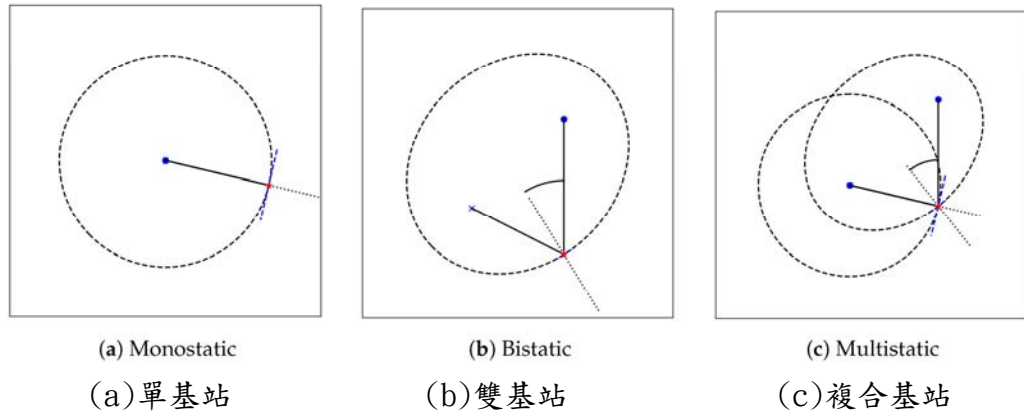
註：(左圖) SLNN 研究結果與(右圖) MLNN 研究結果比較

圖 2.8 研究結果 SLNN 與 MLNN 結果比較圖

(二) Rachael L. Hardman, Lucy R Wyatt & Charles C. Engleback (2020)

Measuring the directional ocean spectrum from simulated bistatic HF radar data.

本研究 Hardman 作者闡述岸基高頻雷達為一功能強大的遙測工具，高頻雷達頻率範圍為 3MHz ~30MHz，自從 1955 年 Crombie 首次以無線電波觀察記錄海面回波的都卜勒頻偏現象以來，高頻雷達已被應用於即時遠端觀測海表面海流、海表面風與海表面波浪，而岸基高頻雷達依照雷達站數量，以及發射與收集數據的情形，一般情況概分為 3 種型式：單基站(Monostatic)、雙基站(Bistatic)與複合基站(Multistatic)，如圖 2.9 所示，而雙基地雷達站與多基地雷達站之優點，不僅可以降低雷達設置與維護雷達的成本，增加觀測空間域的覆蓋範圍，此外，雙基地雷達站能檢測與接收無線電波以非零角度的散射回波，從而獲得較好的雷達數據品質，因此，雙基地雷達站與僅能接收反向散射的單基地雷達站相比，雙基地雷達站(發射器與接收器兩者距離較遠)正逐漸佔據觀測的主導地位。



資料來源：Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2020)

圖 2.9 海洋陣列雷達站發射與接收類型

本文獻研究內容綜述海表面流、海表面風與海表面波浪，解釋雙基地雷達都卜勒頻譜理論，並開發模擬與反演算雷達訊號與數據之方法，故研究重點會放在雙基地雷達站，以及如何應用雙基地雷達數據獲得方向波譜。回顧 Zhang 和 Gill (2006) 於雙基地雷達曾開發 1 種反演算法，可以由雷達數據獲得不具方向的波譜(即無方向波譜)，使用模擬數據比對測試，並斬獲良好結果。Silva (2017) 研究使用吉洪諾夫正則化(tikhonov regularization)估計方向波譜，並模擬雙基地高頻雷達數據與獲得良好的反演算結果，但該研究過程已假設模型頻譜的方向，故實際應用面受到諸多限制；反觀若採用現有單基地雷達數據獲得波浪觀測值的數值方法為布拉格頻率方程的反演算法，也就是由雷達觀測時所獲得的布拉格頻率提取海洋頻譜，Anderson (2000)指出如果能將反演算單基地雷達站的雷達橫截面更改為雙基地雷達站的表示方式，則現有演算法應該適用於雙基地雷達系統，於是本文獻研究另一位作者 Wyatt 曾經檢驗 Anderson 這個假設，以及修改調整 Seaview 演算法，以觀測雙基地雷達站觀測的方向波譜，故需要先掌握雙基地雷達的橫截面，才可以檢驗該假設的正確性，因此，必須精確地將雙基地雷達散射截面歸結為 Barrick 單基地雷達的表達式，此對於 Seaview 反演算法採用 Barrick 研究成果具有重要意義。由於雷達空間覆蓋範圍內，雙基地夾角可能於 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之間變化，單基地與雙基地散射截面表達式之間的不連續性，將會導致反演算的程式不穩定，造成結果影響，故本文獻研究作者遵循 Barrick 的

方法，於保留雙基地夾角前提下，推導出海面的雙基地雷達散射截面。

一階雙基地雷達截面：

$$\sigma^1(\omega) = 2^5 \pi k_0^4 \cos^4 \varphi_{bi} \sum_{m,m'=\pm 1} S(\overline{mk_B}) S(\omega - m\omega_B) \quad (2.1)$$

二階雙基地雷達截面：

$$\sigma^2(\omega) = 2^5 \pi k_0^4 \cos^4 \varphi_{bi} \sum_{m,m'=\pm 1} \iint |\Gamma_E - i\Gamma_H|^2 S(\overline{mk_1}) S(\overline{m'k_2}) (\omega - m\omega_1 - m'\omega_2) dp dq \quad (2.2)$$

由於 m 與 m' 的四種組合的頻率等值線相對於 q' 軸對稱，因此上述方程式積分可以限定於對稱平面的右半部分，然後將結果加倍。因此修正方程式為平面右側積分，並將結果翻倍，得出以下表示式：

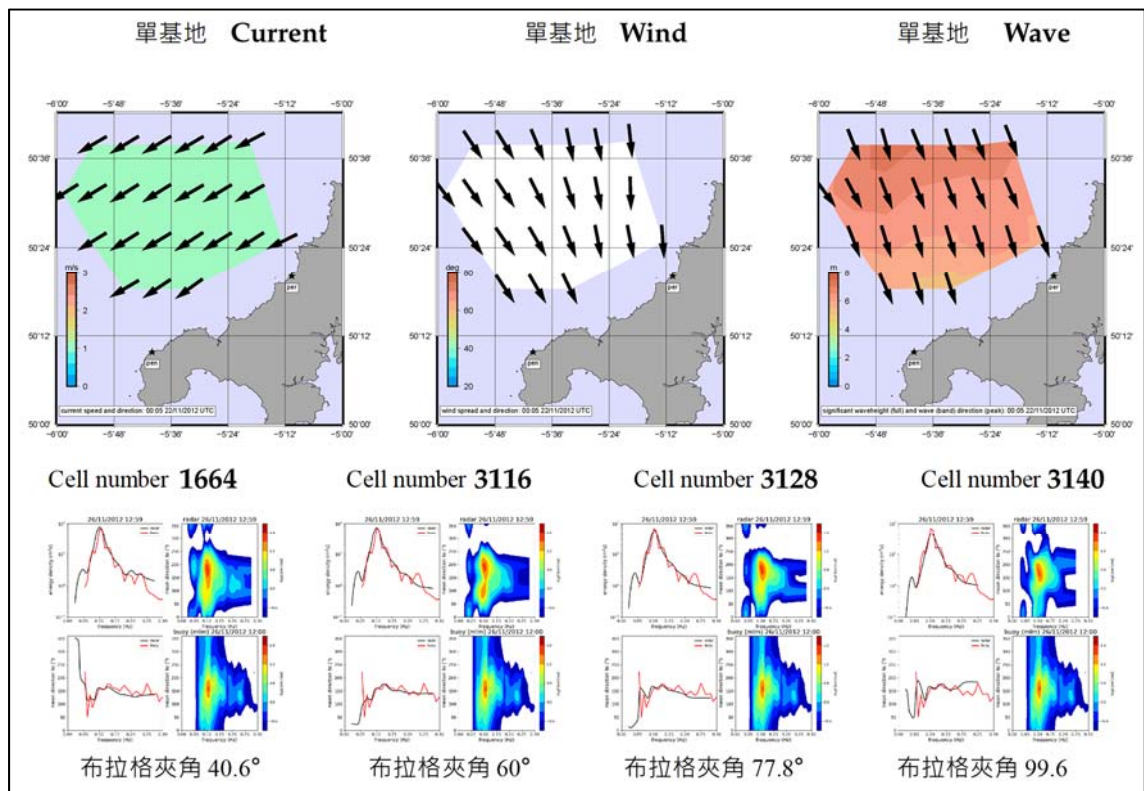
$$\sigma^2(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \cos^4 \varphi_{bi} \sum_{m,m'=\pm 1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{q'}^{\infty} |\Gamma_E - i\Gamma_H|^2 S(\overline{mk_1}) S(\overline{m'k_2}) (\omega - m\omega_1 - m'\omega_2) dp dq \quad (2.3)$$

在 p' 平面右側，當 $k_1 \leq k_2$ 時，可以改用極座標 k_1 與 θ_1 進行積分，其中 θ_1 係 k_1 與 p 軸之間的角度，得出以下表示式：

$$\sigma^2(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \cos^4 \varphi_{bi} \sum_{m,m'=\pm 1} \int_{-\theta_L^-}^{\theta_L^+} \int_0^{\infty} |\Gamma_E - i\Gamma_H|^2 S(\overline{mk_1}) S(\overline{m'k_2}) (\omega - m\omega_1 - m'\omega_2) k_1 dk_1 d\theta_1 \quad (2.4)$$

總括言之，本文獻研究概述雙基地雷達散射截面的推導過程，與介紹推導所獲得雙基地雷達站表示式的數值解法，並於研究過程中詳述 Seaview 反演算方法的必要基礎，包括(1)雷達散射截面方程與(2)數值模擬細節，(3)研究成果展示與(4)修改後 Seaview 反演算法於模擬雙基地雷達數據的測試結果。Seaview 反演算法假設一階布拉格波向量(k_B)係由局部風產生的，並通過限制反演過程中都卜勒頻率範圍，將二階散射波分離為長波向量(k_1)與短波向量(k_2)，短波亦受到局部風力影響驅動，並利用 P-M 波譜(Pierson–Moskowitz Spectrum)建模，初始波高通過經驗方法

獲得，並採用 sech^2 方向分佈函數，其參數由風向估計模型確定，進行疊代運算，假設風波模型適用於所有波數，透過 $\sigma_2(\omega)$ 與 $\sigma_1(\omega)$ 比值積分獲得都卜勒頻譜比，再將該都卜勒頻譜比與雷達都卜勒頻譜比計算其差值，再根據都卜勒頻譜比差值與長波向量波數的耦合係數更新波譜，持續疊代至收斂或達到最大疊代次數(通常為 100)，以雷達觀量比率與模擬比率的差異反映收斂品質，結果可能與初始化譜差異較大，尤其在湧浪或風況變化下，可能呈現雙峰現象，如圖 2.10 與圖 2.11 所示，此方法的細節可參考 Wyatt (1990) 及 Green 與 Wyatt (2006)，其中可被觀測長波的最大頻率 Wyatt (2011) 表示由雷達發射頻率決定，最小頻率則受雷達數據品質影響，進而影響一階與二階多普勒頻譜的分離能力。

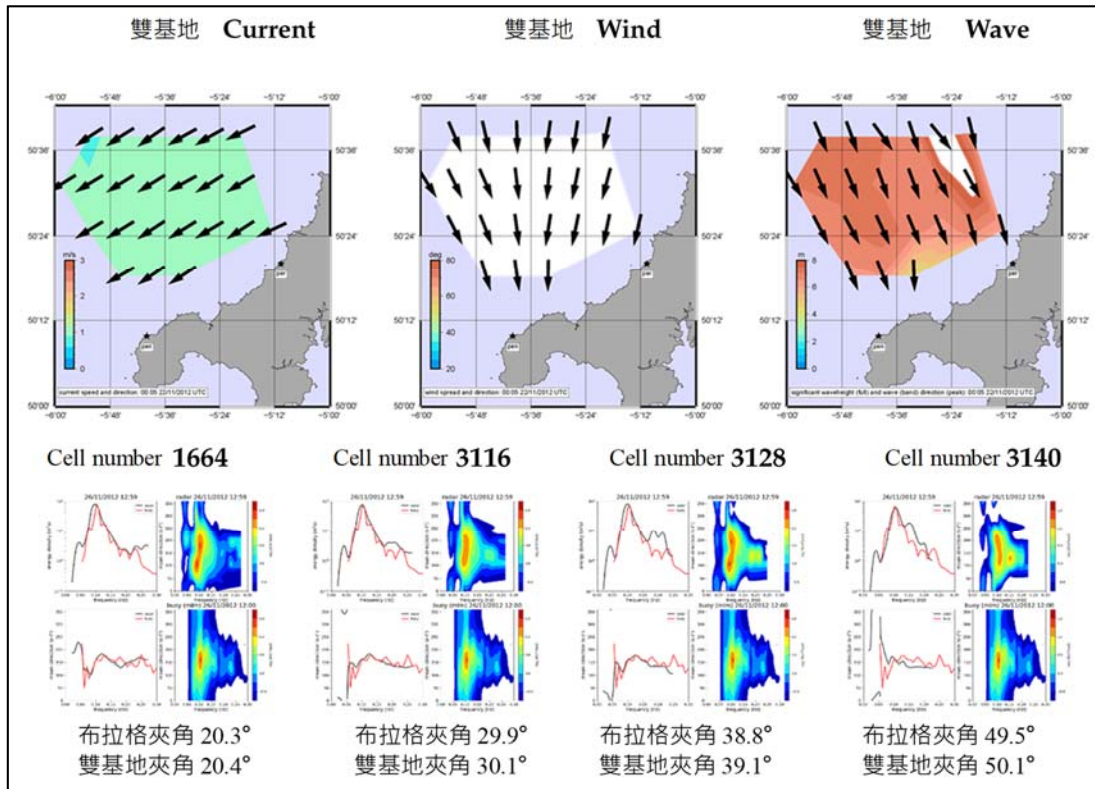


資料來源：Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2020)

註：(上圖) 單基地雷達站反演算海表面海流、海表面風與海表面波浪

(下圖) 不同位置不同布拉格夾角高頻雷達與浮標能量密度與平均方向比較

圖 2.10 單基地雷達站海氣象不同位置不同布拉格夾角比較圖



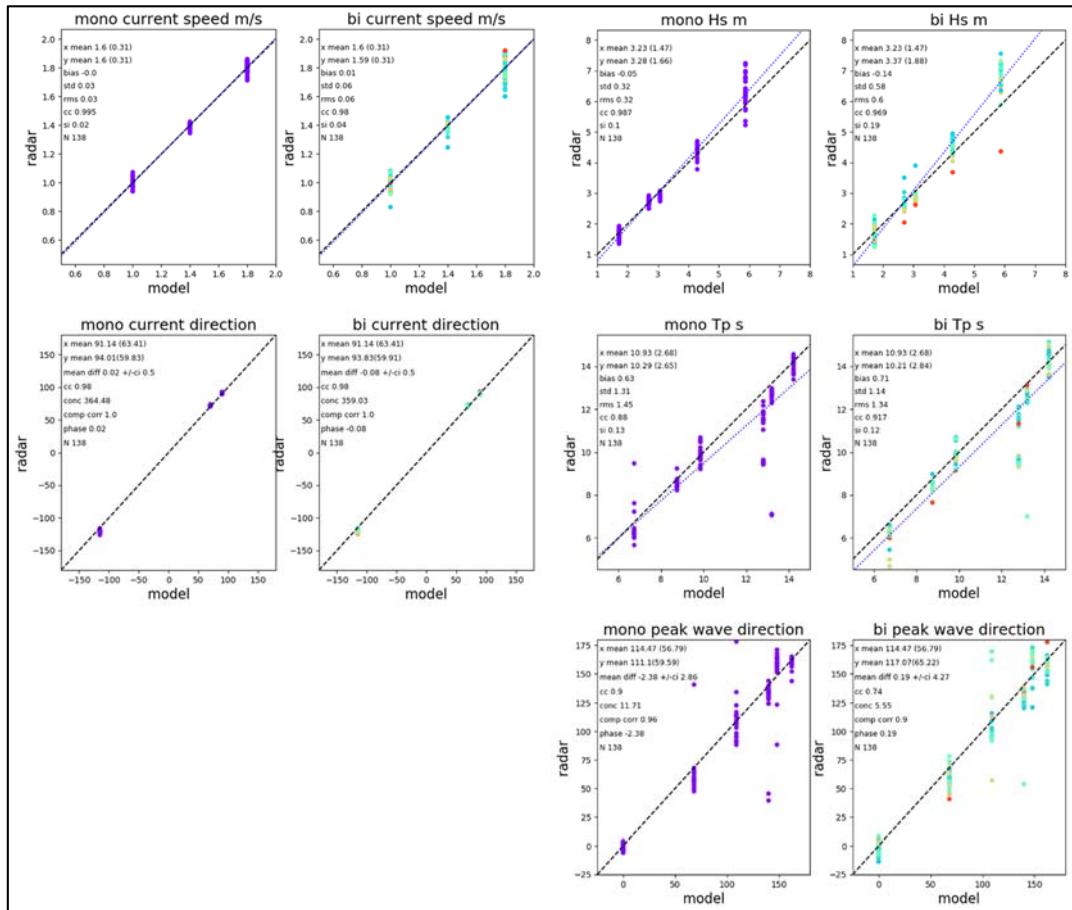
資料來源：Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2020)

註：(上圖) 雙基地雷達站反演算海表面海流、海表面風與海表面波浪

(下圖) 不同位置不同布拉格夾角高頻雷達與浮標能量密度與平均方向比較

圖 2.11 雙基地雷達站海氣象不同位置不同布拉格夾角比較圖

本研究使用同前篇文獻回顧的英格蘭康沃爾郡北海岸 2 座雷達站為研究對象，該雷達頻率為 12.3MHz，參數發佈的時間間隔為 60 分鐘，空間解析度為 1 公里，此外，研究過程事先並未對波譜形狀進行任何假設，直接由雙基地雷達數據提取波浪的方向波譜，已知該波譜的最大頻率取決於幾何參數，研究結果表明雙基地雷達觀測數據獲得海表面海流、海表面風與海表面波浪觀測值具有合理精度，然而，波浪反演算不像海流與風那樣均勻，如圖 2.12 所示，某些情況雙基地雷達站的統計精度，反倒不如單基地雷達站，特別係在雙基地站夾角過大情況下，觀測誤差較為明顯，至於雙基地角與布拉格角之間的最佳角度範圍尚需進一步研究確認。



資料來源：Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2020)

註：(左圖 2x2) 海流表面海流散佈圖與統計數據

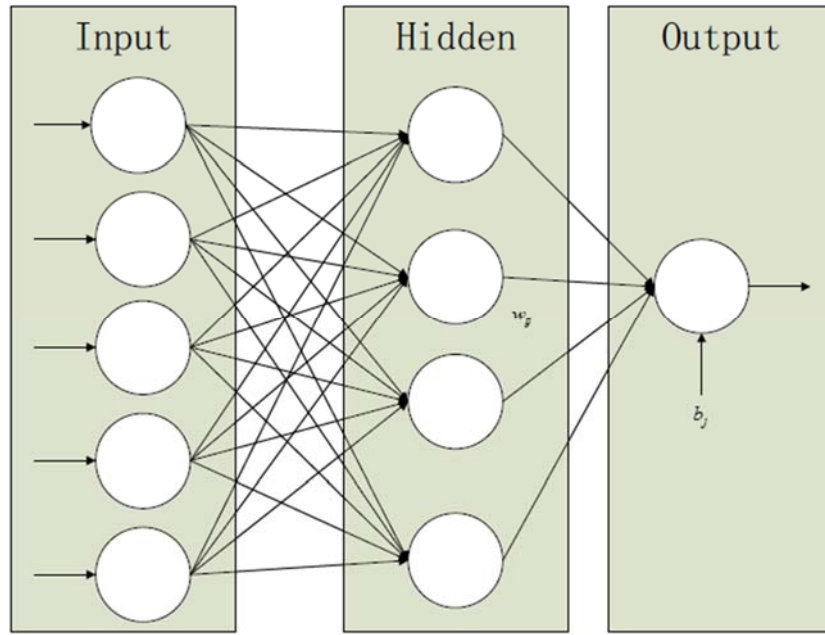
(右圖 2x3) 波參數測量的散點圖和統計數據，波浪反演算結果篇差較大

圖 2.12 表面波流統計分析比較

(三) Li, L., Sheng, L., Wu, H., & Wu, X. (2022) Ocean Wave Inversion from HF Radar with BP Neural Network.

高頻雷達散射都卜勒譜包含豐富海洋表面動力參數訊息，例如：海表面風、波浪、海流與水深，本文獻研究介紹由高頻雷達回波訊號獲取海表面參數的基本原理，如海表面海流數據係透過一階頻譜所獲取，但由於該項技術簡單，而且雷達回波訊號的訊噪比(SNR)較高，因此，此技術已經成熟被發展至許多商業海流反演算軟件，並應用於常規海洋觀測。反觀波浪與風的觀測數據資訊係透過的二階頻譜所獲取，該頻譜具有高度非線性與複雜性，以及海洋回波訊號的訊噪比(SNR 值)較低，爰此，為擬合複雜非線性有義波高與高頻雷達回波之關係，以解決風與波浪反演

算的問題，本研究提出一種反向傳播神經網路(Back propagation neural network，簡稱 BPNN)方法，並設計 BPNN 模型結構，如圖 2.13 所示，做為高頻雷達有義波高反演算的方法，該神經網路無需瞭解雷達回波與波浪的物理機制，即可自動擬合輸入與輸出數據之關係，能廣泛解決無法定性模型描述的複雜問題。



資料來源：Li, L., Sheng, L., Wu, H., & Wu, X. (2022)

圖 2.13 BPNN 神經網路模型結構

總括言之，本研究架構概念基於 Barrick 提出的無線電波散射理論，首先建立可應用計算有義波高之公式，隨後發展反向傳播神經網路的反演算方法，結合兩者為海洋高頻(HF)雷達 BPNN 模型，並反演算海洋的有義波高，如圖 2.14 所示。

無線電波散射理論 Barrick (1977) 一階雷達散射截面：

$$\sigma^1(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m,m'=\pm 1} S(-2mk_0) \delta(\omega - m\omega_B) \quad (2.5)$$

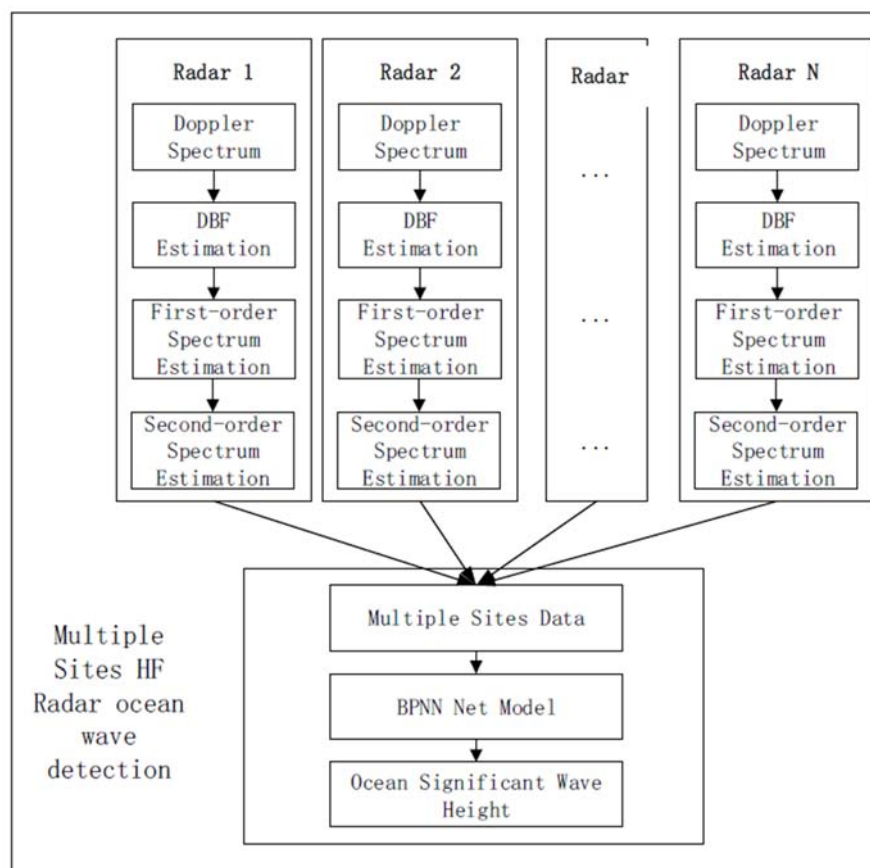
無線電波散射理論 Barrick (1977) 二階雷達散射截面：

$$\sigma^2(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m,m'=\pm 1} \int_{-\infty}^{+\infty} dp \int_{-\infty}^{+\infty} dq |\Gamma|^2 S(m\vec{k}) S(m'\vec{k}') \delta(\omega - m\sqrt{gk} - m'\sqrt{gk'}) \quad (2.6)$$

高頻雷達二階頻譜具有高度非線性，雷達回波訊噪低，因此

風與波浪參數演算並不容易，因此，Barrick 利用加權函數($W(\omega)$ 加權函數可以表示為 2 個相反傳播波之間，非線性波耦合效應)將非線性函數簡化為線性函數，有義波高 H 公式為：

$$H^2 = \frac{2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma^{(2)}(\omega)}{W(\omega)} d\omega}{k_0^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega} \quad (2.7)$$



資料來源：Li, L., Sheng, L., Wu, H., & Wu, X. (2022)

圖 2.14 BPNN 處理架構概念

BPNN 模型的是一種多層結構網絡，該神經網路使用 3 層神經網路模型設計，概括三個部分：輸入層結構、隱藏層結構與輸出層結構，能以 3 個分量的數學理論表示式，其中 x 表示為神經元輸出結果， f 表示為激勵函數(activation function)， w 表示為權重， b 表示為神經元閾值， N 表示為隱藏層數量，而權重與閾值係透過數據資料集訓練而成。該研究共包括含 5 個輸入節點、10 個隱藏節點與 1 個輸出節點，以擬合海浪與高頻雷達回波之間複雜的非線性函數關係，其中反向傳播神經網絡的輸入層節點數量

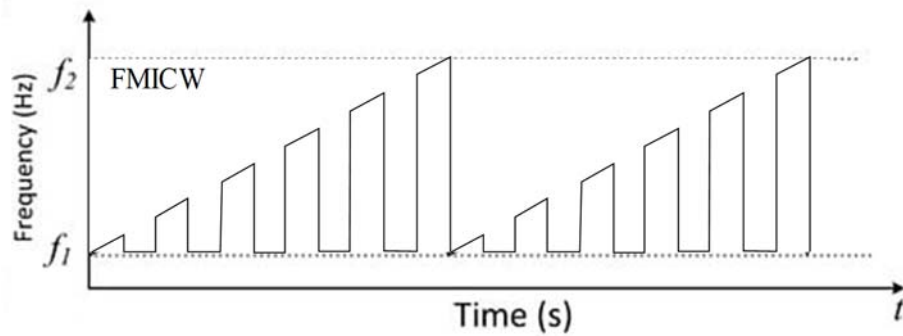
係由雷達都卜勒頻譜特徵參數決定，該研究提取正一階頻譜、正二階頻譜、負一階頻譜、負二階頻譜與噪聲共 5 項特徵做為輸入節點參數，輸出節點參數為一維海表面有義波高，故 BPNN 模型輸出層維度為 1，隱藏層節點數量對於預測精度有顯著影響，若節點數量過少，神經網絡學習效果差，需要增加訓練次數，且訓練精度會受限；節點數量過多，訓練時間增加，且神經網絡容易過度擬合。

$$x_{j,output} = f\left(\sum_{i=1}^N x_{i,hidden} w_{ij} + b_j\right) \quad (2.8)$$

BPNN 處理步驟如下：

- 步驟 1：收集雷達觀測數據，並進行預處理
- 步驟 2：設計 BPNN 模型結構，並確定神經網絡收斂規則
- 步驟 3：設置 BPNN 模型的初始權重
- 步驟 4：使用輸入樣本正向計算神經網絡輸出；
- 步驟 5：建立疊代公式並逐步進行疊代
- 步驟 6：判斷數據公式的合理性
- 步驟 7：獲得波浪反演算結果。

此外，該研究為驗證 BPNN 模型之可行性，設計一現場實驗，進行高頻雷達觀測數據與浮標測量數據的對比實驗，並進行數據分析，研究所使用的高頻雷達為福建龍海 (Longhai) 雷達站，數據採集時間為 2008 年 11 月 1 日 0：00 至 11 月 30 日 23：50，該雷達係中國武漢大學自主研發的高頻雷達 (OSMAR071 高頻雷達)，該雷達發射天線種類為三單元八木宇田天線，接收天線種類為八單元非線性陣列接收，八木宇田天線單元由反射器 (reflector)、偶極子 (dipole) 與引向器 (director) 所構成的高指向性與高增益天線，該雷達訊號源電磁波型式為線性調頻中斷連續波 (Frequency Modulated interrupted Continuous Wave, FMICW) 與運研所採用的訊號源電磁波型式不同，如圖 2.15 所示。



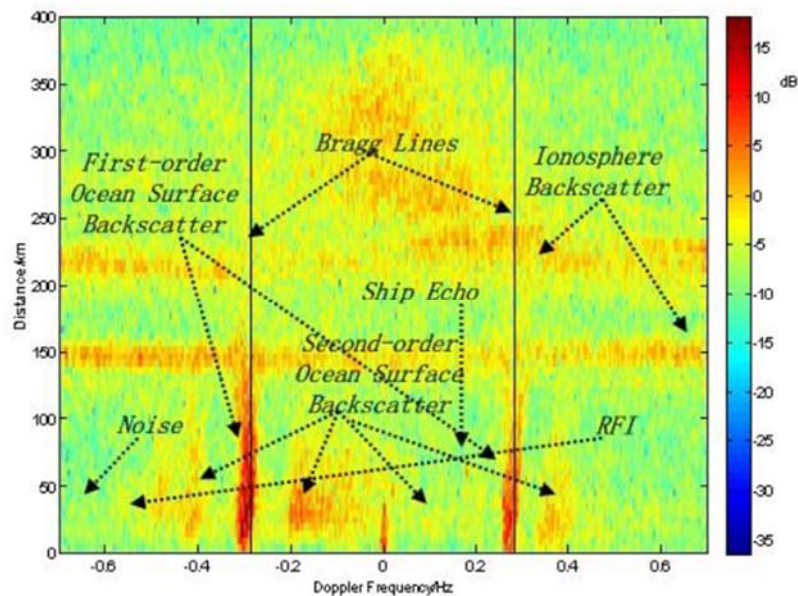
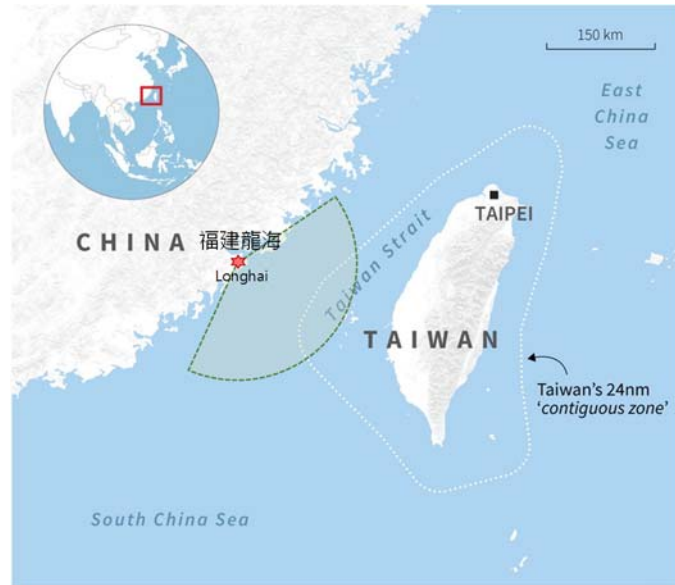
資料來源：(上圖) 本計畫繪製，(下圖) Tevarak, Thailand

註：(上圖) 福建龍海 OSMAR071 高頻雷達線性調頻中斷連續波

(下圖) 八木字田天線示意圖(又稱魚骨天線)

圖 2.15 福建龍海高頻雷達訊號線性調頻與八木字田天線示意圖

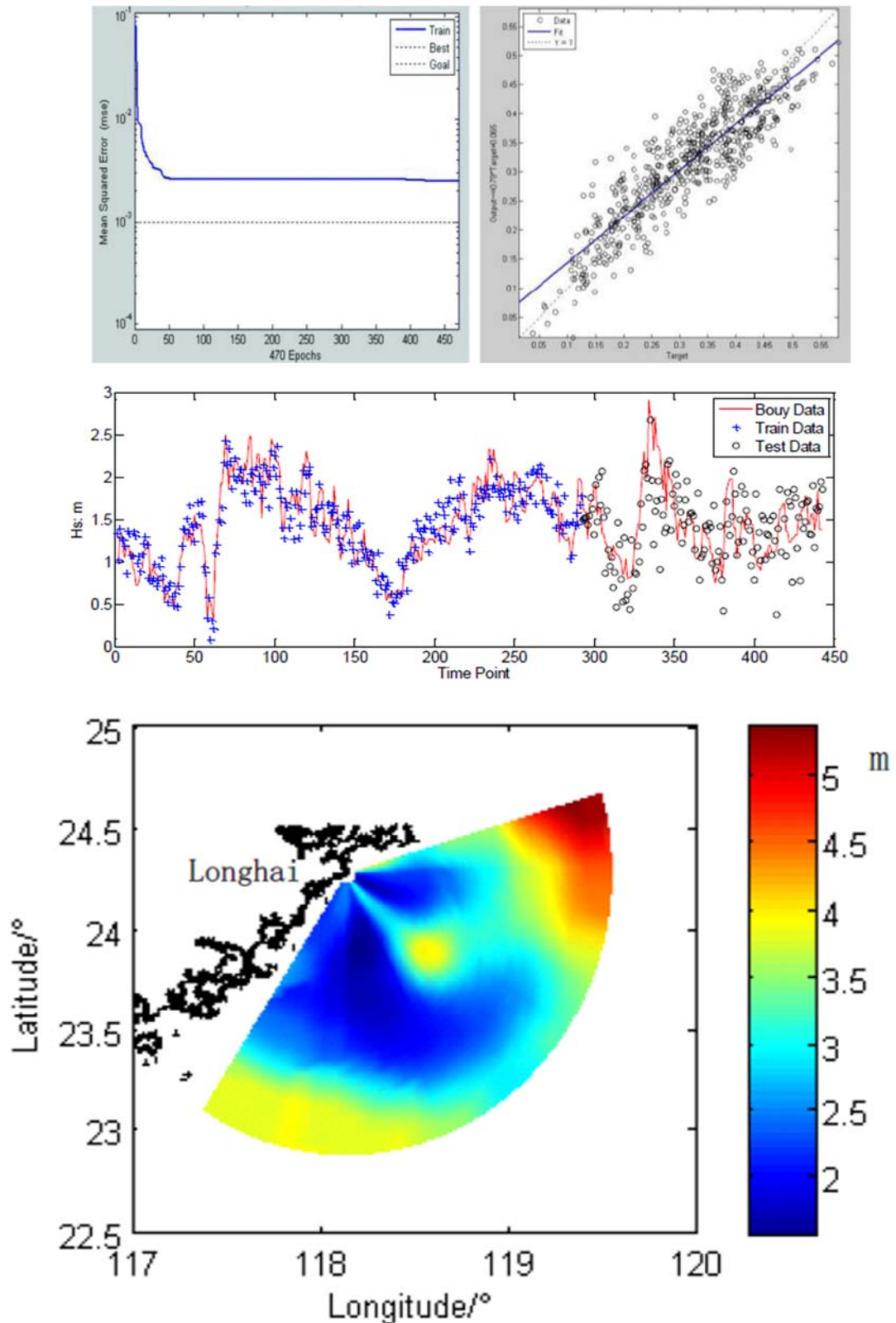
雷達頻率為 7.85MHz，頻寬 30KHz，發射功率 150W，最大觀測距離海表面流 200 公里，空間解析度為 5 公里，方位分辨率海表面波浪 1.5°、海表面海流與風 5°，參數發佈的時間間隔為 10 分鐘，雷達反演算方面，觀測海表面流採用 MUSIC (Mutiple Signal Classification)演算法，觀測海表面波浪採用 DBF (Digital Beam Forming)演算法；海上浮標位於距高頻雷達站點約 30 公里位置，可測量海表面參數，例如：風速、風向、有義波高與均方根波高等，龍海雷達站位置與雷達回波都卜勒距離譜，如圖 2.16 所示。



資料來源：Li, L., Sheng, L., Wu, H., & Wu, X. (2022)

圖 2.16 福建龍海雷達站

本研究以浮標測得的有義波高做為 BP 網絡的輸出節點，浮標數據的觀測頻率為 1 小時。經過數據品管後，共選取 447 個有效樣本用於 BPNN 模型訓練與 197 測試樣本數進行測試，並計算高頻雷達大面積海表面的有義波高，如圖 2.17 所示。研究結果顯示反向傳播神經網路反演算法模型擬合相關係數達到 0.89，均方根誤差為 0.25 m，證實 BPNN 為 1 種海洋高頻雷達新型可行之反演算方法，以獲取海洋表面觀測數據，具有重要的工程應用價值。



資料來源：Li, L., Sheng, L., Wu, H., & Wu, X. (2022)

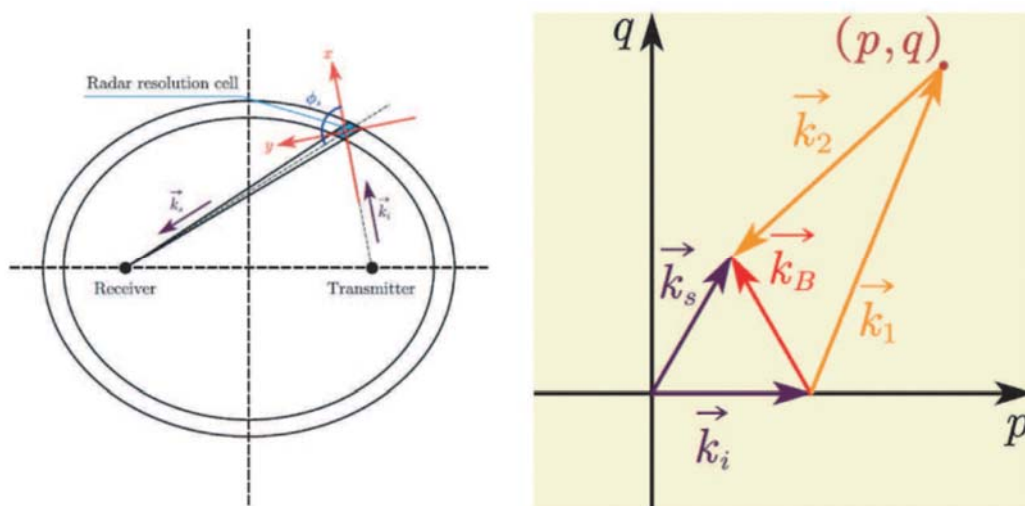
註：(上圖) BPNN 模型訓練與測試情形

(下圖) BPNN 回算高頻雷達海域海表面波高情形

圖 2.17 BPNN 模型訓練、測試與海域海表面波高觀測情形

(四) Ding, F., Zhao, C., Chen, Z., & Deng, M. (2022). Inversion of Ocean Wavenumber Spectrum from the Bistatic High-frequency Radar Sea Echoes.

本研究回顧近年來雙基地高頻(HF)雷達於海表面觀測領域引起廣泛關注，然而，有關海表面波浪數據提取的研究報告仍然較為稀少，眾所周知，雙基地雷達回波原理機制(幾何結構，如圖 2.18 左圖所示)係雷達電磁波與海面波浪發生布拉格共振，其中二階頻譜的波向量滿足一向量關係式(如圖 2.18 右圖所示)，滿足兩組向量封閉三角形，有共同布拉格波向量($\vec{k}_B$)，布拉格波波數(k_B)，1 組來自於雷達訊號與雷達回波，另 1 組來自海面上導致電磁波發生布拉格共振訊號的 2 個波浪，意即表示第一波浪向量($\vec{k}_1$)與第二波浪向量($\vec{k}_2$)的合成等於海面背向散射的回波向量($\vec{k}_s$)減去發射電磁波的向量($\vec{k}_i$)。其中 ϕ_s 表示海面散射方位角， $\vec{k}_i=(k_0,0)$ 係雷達發射無線電波的電磁波向量， $\vec{k}_s=(k_0\cos\phi_s, k_0\sin\phi_s)$ 表示為海面散射無線電波的回波向量， k_0 為雷達波數，兩者均對應於雷達工作頻率 f_0 ， $\omega_d=2\pi f_d$ 為都卜勒角頻率， f_d 為都卜勒頻譜；二階頻譜布拉格波為 $\vec{k}_B=(k_0\cos\phi_s-k_0, k_0\sin\phi_s)$ ，其中 $m_1=\pm 1$ 、 $m_2=\pm 1$ 分別表示第 1 個與第 2 個波向量雷達移動或遠離雷達。 k_1 、 k_2 分別表示第 1 個與第 2 個波向量的波數。



資料來源：Ding, F., Zhao, C., Chen, Z., & Deng, M. (2022)

註：(左圖) 雙基地雷達海面散射的幾何結構

(右圖) 二階頻譜波向量關係圖

圖 2.18 雙基地雷達海面散射幾何結構，二階頻譜波向量關係

本研究分析雙基地雷達回波的都卜勒頻譜，一階頻譜包含 2 個狄克拉函數 δ (Dirac Delta function)，二階頻譜為型態更複雜的二維積分函數，該被積函數包含 1 個狄克拉函數(δ)，其中狄克拉函數係實數線上定義的廣義函數，通常表示為物理學質點，該函數特性為零點以外的所有位置均為零，但整個定義域積分值總合為 1，

一階海面回波的理論模型：

$$\sigma^1(\omega_d) = 2^4 \pi k_0^4 (1 - \cos \varphi_s)^2 \sum_{m_1=\pm 1} S(m\bar{k}_B) \delta(\omega_d - m_1 \sqrt{gk_B}) \quad (2.9)$$

二階海面回波的理論模型：

$$\sigma^2(\omega_d) = 2^4 \pi k_0^4 (1 - \cos \varphi_s)^2 \sum_{m,m'=\pm 1} \iint |\Gamma_T|^2 S(m\bar{k}_1) S(m'\bar{k}_2) \delta(\omega_d - m_1 \sqrt{gk_1} - m_2 \sqrt{gk_2}) dp dq \quad (2.10)$$

故該研究定義一個函數 $h(k_1, \theta_1) = m_1 \sqrt{gk_1} + m_2 \sqrt{gk_2} - \omega_d$ 去簡化狄克拉函數，可將二階頻譜 p 與 q 關係式轉化為 $h(k_1, \theta_1)$ 與 θ_1 的關係式，二階海面回波的理論模型簡化如下：

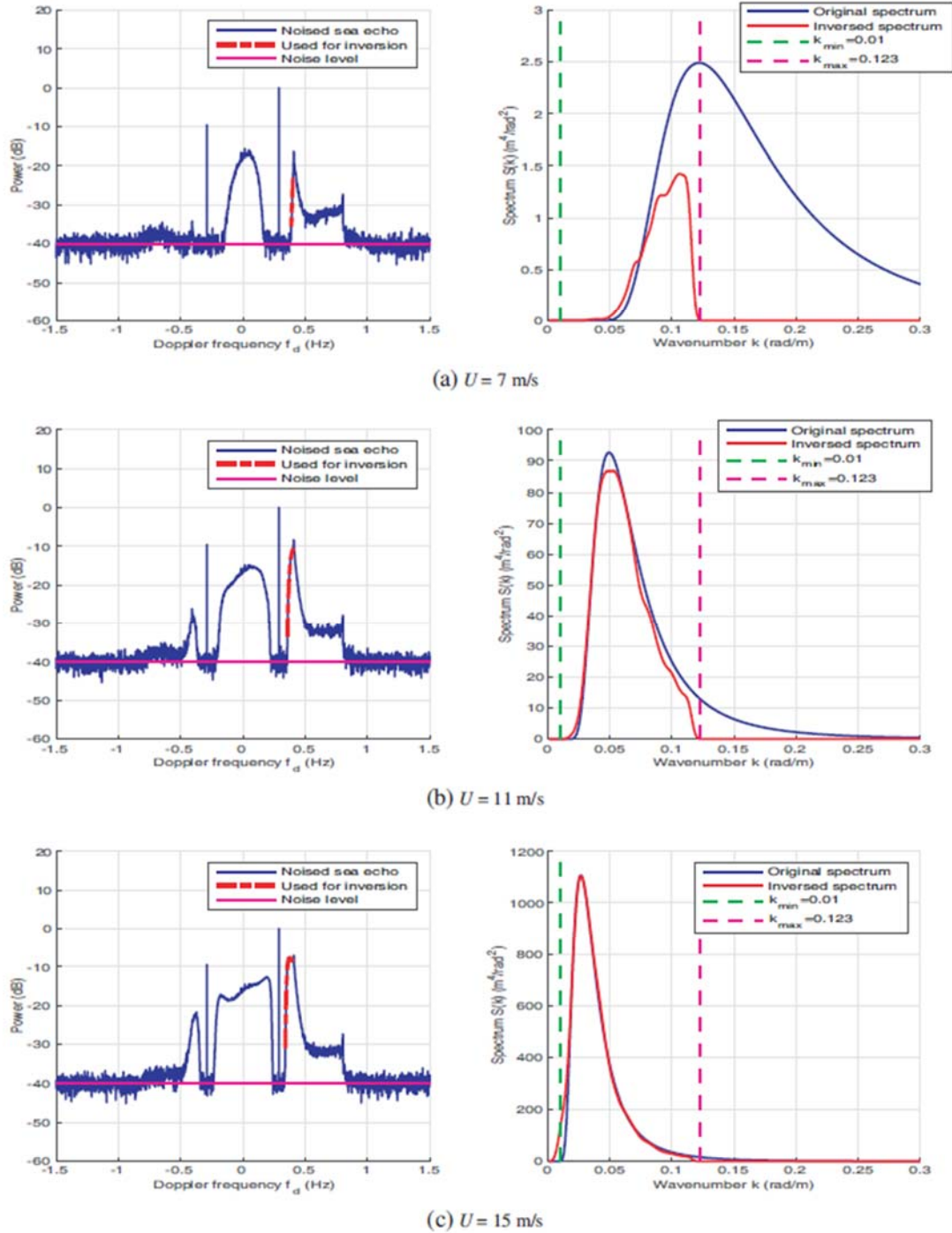
$$\sigma^2(\omega_d) = 2^5 \pi k_0^4 (1 - \cos \varphi_s)^2 \int_{\theta_B}^{\theta_B+2\pi} |\Gamma_T|^2 S(m\bar{k}_1) S(m_2\bar{k}_2) k_1 \frac{1}{\left| \frac{\partial h(k_1 - \theta_1)}{\partial k_1} \right|} d\theta_1 \quad (2.11)$$

波數 $k_1 = f(\theta_1)$ ，可以通過求解 $h(k_1, \theta_1) = 0$ 。當 $|\omega_d| \approx \omega_B$ ，第二個海浪波向量方向幾乎等於布拉格波向量的方向， $\theta_2 \approx \theta_B$ ，二階海面回波的理論模型簡化近似如下：

$$\sigma^2(\omega_d) \approx 2^5 \pi k_0^4 (1 - \cos \varphi_s)^2 \int_{\theta_B}^{\theta_B+2\pi} |\Gamma_T|^2 S(m\bar{k}_1) S(m_2\bar{k}_B) \left(\frac{k_B}{k_2}\right)^4 k_1 \frac{1}{\left| \frac{\partial h(k_1 - \theta_1)}{\partial k_1} \right|} d\theta_1 \quad (2.12)$$

因此，可以利用二階頻譜與一階頻譜的比值，並轉化為值轉化為待求解的海洋波數譜與加權係數的線性組合，一般而言海洋方向波譜 $S(\bar{k})$ 是海洋波譜 $S(k)$ 與方向分佈函數 $g(\theta)$ 兩者，另外，向量 $\bar{k}$ 是海洋波數 k 與角度 θ 的波浪向量，最後可以利用線性系統的解析結果，反演算海洋波數譜。現實海況變化迅速，於較高的海況會帶來更強的海洋能量回波。如圖 2.19 所示，隨著風速增加，反演算波數頻譜與原始頻譜的符合程度更高。係因為於高風速時

海況較為劇烈時，波數譜的主要能量分佈更集中偏向低波數區域範圍。



資料來源：Ding, F., Zhao, C., Chen, Z., & Deng, M. (2022)

圖 2.19 雷達工作頻率反演算不同風速結果

本研究作者提出一種與以往不同的新方法，即由雙基地高頻雷達數據中，反演算無方向性的海洋波數譜(ocean wavenumber

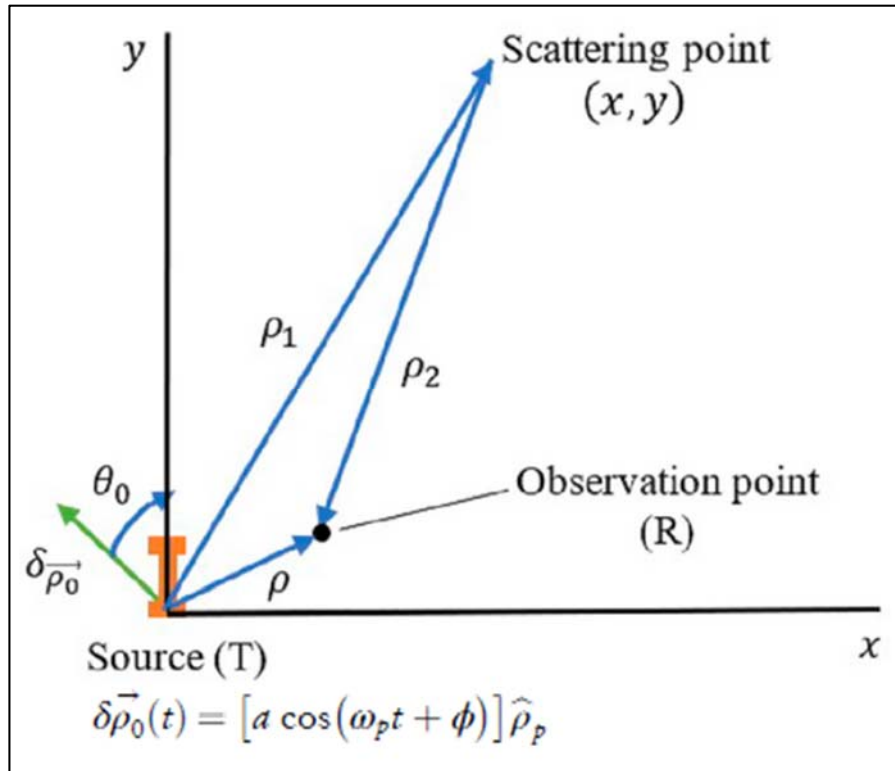
spectrum)，該方法係假設波浪方向分佈已知，其反演算流程，首要計算二階與一階海洋回波都卜勒頻譜的比值，然後對雙基地雷達二階頻譜的回波理論模型進行線性與簡化處理，再將該比值轉化為海洋波數譜與加權係數的線性組合，最終由線性化數據當中提取波數譜，本文獻研究通過對於模擬雷達回波的數據，對此方法進行驗證與評估，研究結果顯示此研究方法確實有效。

- (五) Hashemi, S., Shahidi, R., & Gill, E. W. (2023). Extraction of the significant wave height from synthetic HF radar data acquired on a floating platform.

本研究探討高頻表面波雷達(HFSWR)安裝於浮動平台(如石油勘探平台)獲取海洋表面資訊情境，情境中浮動平台運動會污染接收到的雷達信號，影響海表面參數的運算，為解決此一問題所進行的研究。傳統解決方法係利用運動補償參數去彌補與恢復都卜勒頻譜，再提取海浪參數。眾所皆知，對於靜止 HFSWR 雷達頻譜觀測海面波參數，目前已有數種方法論，其中以 Barrick (1977) 所提出雷達散射截面比值估算示性波高的方法最為成熟，亦即利用二階頻譜雷達散射截面與一階頻譜雷達散射截面的能量比值來計算波高，但後來許多研究學者改進此一方法，例如 Wyatt 使用模型擬合與經驗方式反演算該理論，以及 Heron et al. (1998) 過去研究比較三種不同示性波高的演算法，但所有演算法皆源於 Barrick 方法的縮放形式，後續其他研究陸續發表，例如 Zhou (2015) 利用無方向波譜對風速之關係，加上都卜勒頻譜一階布拉格譜峰去估算示性波高。此外，亦有些學者的研究方法，透過非線性優化來獲取方向海洋頻譜，以估算示性波高。

本研究係以 Shahidi (2020) 提出 2 種方法不需要計算都卜勒頻譜估算示性波高(Hs)的方式，改由直接從固定 HFSWR 雷達接收的時間序列訊號計算 Hs，第 1 種方法係利用頻域一階接收場的短時傅立葉變換係數的變異數計算波高，以及第 2 種方法係利用時域一階接收電場的變異數計算波高，不論哪種 2 種方法皆利用統計學中變異數描述一個隨機變數的離散程度估計波高；後續 Shahidi (2023) 研究加入二階電磁分量或三階與高階散射分量。本

研究以 Shahidi (2020)研究為基礎提出一種可行方法，於浮動平台搭載的高頻表面波雷達，透過接收電場數據直接估計有效波高，無需事先進行運動補償或了解運動參數，相較傳統方法需要補償天線運動對都卜勒頻譜影響，並從中補償結果與提取海洋表面參數方法更具優勢。本文獻研究方法僅基於接收電場與海洋表面位移之間的關係，透過計算接收電場包絡視窗的變異數來估計有效波高，爰無需對雷達與平台運動進行補償，本研究假設平台運動模型係由單方向上單一運動頻率組成，如圖 2.20 所示。



資料來源：Hashemi, S., Shahidi, R., & Gill, E. W. (2023)

圖 2.20 平台運動模型單方向單一運動組成圖

Shahidi (2020) 核心理論為一階散射接收到電場(E)與海洋表面位移(ξ)成線性比例，Shahidi (2023)二階散射電場(包括流體動力學散射與電磁散射)與海洋表面位移減去 1 (即 $\xi^2 - 1$)。因此，可結論電場為海洋表面位移的總合，其中 A 、 B 、 C 為估計示性波高校正的待定係數：

$$E \approx A\xi^2 - A + B\xi + C \quad (2.13)$$

通過選取電場的上包絡線與方程得出下列式子，其中 Var 表示為變異數， $E_{upperEnvelope}$ 表示為接收電場的上包絡線，其中上包包絡線的海洋表面位移(ξ)呈現 Rayleigh 分佈，總雷達散射截面依循 Gill(2008)、Walsh(2010)方法獲得：

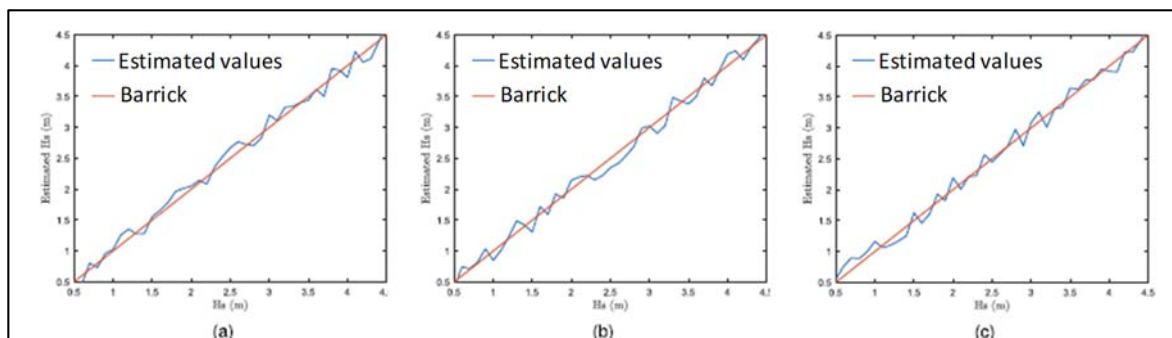
$$Var[E_{upperEnvelope}(t)] \approx \frac{16A^2}{H_s^2} + B^2 H_s^2 \frac{4-\pi}{32} + C + 2AB(3\frac{\sqrt{\pi} H_s^{\frac{3}{2}}}{4} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} - \frac{\sqrt{2\pi} H_s}{4}) \quad (2.14)$$

λ_0 為雷達發射訊號的波長， k_0 為雷達波數， G_T 為接收器增益 (Gain) 值、 G_t 為發射器增益值、 P_t 為發射器功率， ρ_{02} 與 ρ_{01} 表示雷達發射器到散射面的距離， $\Delta\omega$ 為都卜勒譜的解析度， F 為衰減函數、 $\sigma(\omega)$ 總雷達散射截面、 $\varepsilon(\omega)$ 表示 $0 \sim 2\pi$ 的相位變數、 BW 為雷達系統頻寬。

$$E(t) = \sqrt{\frac{M}{\Delta\omega}} \int_{BW} e^{i\omega t} e^{j\varepsilon(\omega)} \sqrt{\sigma(\omega) \frac{d\omega}{2\pi}} \quad (2.15)$$

$$M = \frac{\lambda_0^2 G_T G_t P_t}{(4\pi)^3 \rho_{02}^2 \rho_{01}^2} F^4(\omega_0) \quad (2.16)$$

由於缺乏來自浮動平臺 HF 雷達的可用測量現場數據，因此，校正採用 Barrick (1977) 所提出的方法做為驗證數據來源，由浮動平臺上雷達的運動補償頻譜應用計算出合成數據進行比較，未來該項透過電場技術需進行初步校準，可通過部署波浪浮標或分析海況變化期間的數據來實現。研究成果不論利用固定雷達頻率 15 MHz 於不同取樣率，估算與實際的示性波高值比較情形，如圖 2.21，或利用固定取樣率為 0.4 秒雷達於不同雷達頻率情況估算與實際示性波高值比較情形，如圖 2.22 所示，研究顯示該方法考慮了一階和二階散射特性，並使用改進 Barrick 方法示性波高校準與運動補償。應用結果顯示，該技術在廣泛的有效波高範圍內均方根誤差(RMSE)僅為 10 至 14 公分，顯示出其在估算有效波高方面的高效性與精確性。



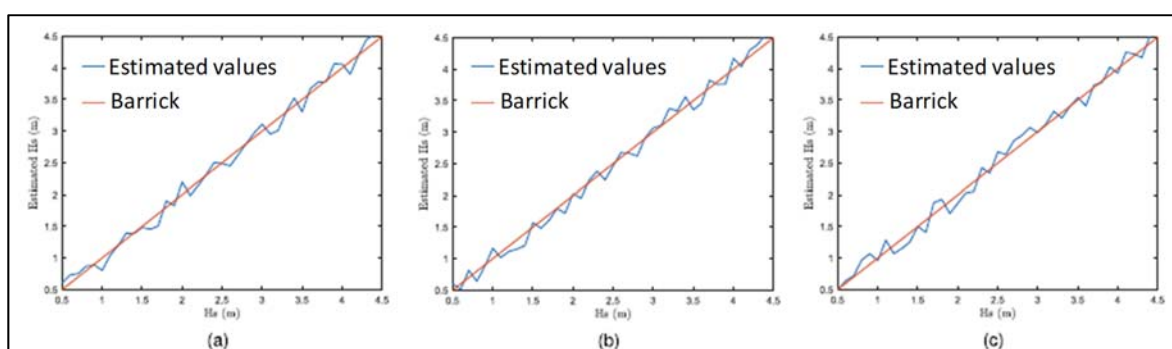
(a) $T_s = 0.1$ 秒

(b) $T_s = 0.4$ 秒

(c) $T_s = 0.6$ 秒

資料來源：Hashemi, S., Shahidi, R., & Gill, E. W. (2023)

圖 2.21 利用固定雷達頻率不同取樣率估算實際示性波高值比較



(a) $f = 5$ MHz

(b) $f = 10$ MHz

(c) $f = 20$ MHz

資料來源：Hashemi, S., Shahidi, R., & Gill, E. W. (2023)

圖 2.22 利用固定取樣率不同雷達頻率估算實際示性波高比較

2.3 本計畫文獻回顧及運用情形

本計畫回顧文獻，文獻展示各種高頻雷達遙測波流技術與不同方法，包括：機器學習、數值模擬與新型計算方法，並探討雷達配置(如雙基地雷達不同接收發類型、浮動平台設置雷達)，對於波高數據觀測的影響，為利瞭解各研究差異與適用性，本計畫整理表 2-2 進一步說明運用情形。

表 2-2 本計畫海洋雷達文獻回顧與運用情形彙整表

文獻	研究重點	方法	結果說明	運用採行情形
Hardman & Wyatt (2019)	利用神經網絡反演算都卜勒頻譜	SLNN 與 MLNN 神經網絡，訓練不同層數與節點數的模型	SLNN 在都卜勒頻譜反演算波浪參數上表現較佳，但仍受旁瓣效應與解析度影響	本計畫尚未採行，納入後續研究評估
Hardman, Wyatt & Engleback (2020)	雙基地高頻雷達測量方向性波譜	透過 Seaview 演算法與雙基地雷達散射截面公式修正	雙基地雷達提高觀測範圍，但大夾角時誤差較大，波浪反演算結果不如海流與風精確	本研究已採行，刻辦理雷達雙基站 (Bistatic) 一發多收方式與 Seaview 反演算法修正
Li et al. (2022)	利用反向傳播神經網路 (BPNN) 應用於有義波高反演算	BPNN 模型，使用 MUSIC 演算法計算海流與 DBF 演算法計算波浪	BPNN 可有效反演算有義波高，相關性與誤差值得參考 (相關係數達 0.89，均方根誤差為 0.25 m)	本計畫尚未採行，納入後續研究評估
Ding et al. (2022)	雙基地雷達數據反演算海洋波數譜	透過都卜勒頻譜比值與線性化處理波數譜	風速增強時，波數譜反演算結果更符合實際狀況	本計畫尚未採行，納入後續研究評估
Hashemi, Shahidi & Gill (2023)	浮動平台 HFSWR 觀測示性波高	利用接收電場變異數計算波高，無需運動補償	可有效估算示性波高，RMSE 僅為 10 至 14 公分	本計畫尚未採行，利用接收電場變異數計算波高效果佳，納入後續研究評估

第三章 雷達數據品管與系統精進

隨著海洋產業與航運的蓬勃發展，海域使用日益頻繁，海洋污染防治與船舶救難案件亦逐漸增加。為維護海域安全，亟需海洋觀測資料的支援與強化周遭海域波浪場的即時監測。跨單位籌備臺灣海洋雷達觀測網，並透過海洋雷達相關單位合作（目前參與單位，包括：國家海洋研究院、交通部中央氣象署、臺灣海洋科技研究中心、海軍大氣海洋局及運研所等），共同構築涵蓋遠近海域的聯合觀測系統，以提升整體監測效能。

面對政府資料開放政策與跨部會合作的要求，雷達觀測數據在資訊安全、資料格式介接與數據正確性等方面，仍面臨諸多挑戰；近年來，美國針對雷達海流數據的品管提出多項建議。其中，美國綜合海洋觀測系統(IOOS)於 2016 年制定「即時高頻雷達表面海流品管手冊(QARTOD 1.0 版)」，並於 2022 年首次更新，推出「即時高頻雷達表面海流品管手冊(QARTOD 2.0 版)」，以進一步提升觀測數據品管的準確性與相關性。然而，高頻雷達於即時反演算海表面波浪與風數據時，雷達都卜勒頻譜具有高度非線性與複雜性，導致該手冊目前尚無即時高頻雷達表面波浪之品管標準，因此，本計畫希望藉此機會制定適用於海洋陣列雷達的波浪數據品管標準，並秉持數據公開原則，與建立符合品管檢驗標準之程序，做為後續資料分析、整理與展示查詢之基礎。

本計畫參考美國 IOOS 提出的 QARTOD 陣列雷達品管手冊，結合 111 年度的研究成果，並遵循科學界公認的數據標準，基於實務品管制度與專業判斷，制定本計畫的雷達波浪品管標準，以確保各項雷達觀測數據的可用性與準確性。此外，此標準亦做為未來評估雷達波浪觀測數據是否符合開放使用標準的依據，後續將進一步詳細說明相關內容。本章將探討雷達數據品管與系統精進，內容涵蓋雷達系統品管與觀測數據品質管制措施，包括：數據蒐集、校正與驗證機制，以提升觀測準確性與穩定性；此外，針對高頻雷達波浪數據的品管標準進行分析，並提出適用於臺灣環境的品管機制，以及雷達系統優化，將說明天線由主動式改為被動式的技術調整，以提升整體效能。

3.1 雷達系統品管

本計畫所使用的雷達為 Ocean Physics 公司與美國夏威夷大學共同研發的海洋雷達系統，主要包含 GLONASS 衛星定位系統、恆溫控制晶體振盪器(OCXO)、頻率調製器(DDS)、固態電子功率放大器(PA)、低雜訊放大器(LNA)、低通濾波器(LPF)、混頻器(MIXER)、類比數位訊號轉換器(ADC)、控制系統(embedded controller)及天線(antenna)。雷達運作可分為發射(Tx, transmit)與接收(Rx, receive)兩部分，發射端的整合系統負責訊號調製，透過正弦(sin)與餘弦(cos)正交訊號進行混頻、倍頻、分頻與帶通濾波等處理，進行合成訊號，並經數位調變與相位調整後，數位訊號轉換為類比波形，最終發射出線性調頻的電磁波脈衝訊號，接收端則負責處理來自海面的雷達回波訊號，透過雙平衡混頻器與雷達接收器組成的通道網絡，將回波訊號調製為複數形式的 IQ 訊號，做為後續數據分析與應用的基礎。本計畫雷達硬體系統架構，如圖 3.1 所示。

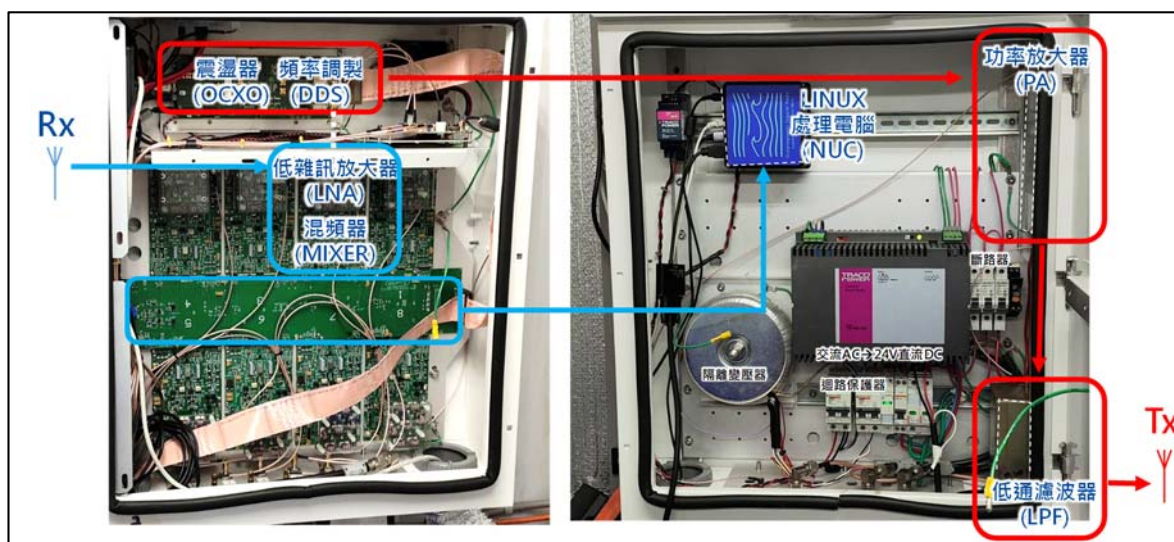


圖 3.1 雷達硬體系統架構

雷達系統品管是確保雷達系統穩定運作的關鍵程序，主要負責在運行過程中排除各種故障問題，以維持雷達的正常運行，系統品管流程，如圖 3.2 所示，依序為(1)檢查電源供應：需確保所有電源連接穩定且供電正常，包括主電源與雷達系統內部的電源連接。先確認電源線與插座是否連接良好，並測試電壓與電流是否在正常範圍內，再檢查電源開關是否運作正常，如有需要可更換保險開關以確保系統正常運行；(2) 進行軟體診斷，使用雷達 Linux 系統進行故障檢查，確認雷達運作狀態，以

及獲取更詳細的錯誤 log 檔，先檢查系統錯誤代碼，並參考手冊對應的解決方法，再確認是系統否可恢復正常運作；(3)查看設定參數，確保所有參數符合工作與觀測需求，包括發射頻率、功率設置及接收靈敏度，先參照設備手冊核對標準設定值，再檢查是否有錯誤的設定導致系統異常；(4)檢查天線系統，需確保天線無損壞、安裝正確且對準精確，避免影響信號發射與接收，先檢查天線是否有物理損壞或鬆動，確認訊號駐波比與相位是否正確，最後測試天線的發射與接收功能；(5)檢查傳輸電纜時，確保發射器、接收器與信號處理器的連接穩固，確保信號路徑無障礙與元件正常運作。先檢查所有電纜是否牢固連接，並測試導通性，確認是否有損壞或短路，再清理電纜接頭，避免氧化或接觸不良，最後確認電纜防水保護措施是否完整，以確保系統穩定運行。



圖 3.2 雷達系統品管流程

檢查天線系統方式係將雷達系統發射頻率調整為定頻模式，以利檢查示波器顯示發射值，並依序進行發射天線線路互調與訊號量測。將海洋雷達北站設定發射頻率 27.9 MHz，南站設定發射頻率 27.6 MHz，發射天線駐波比錶量測值(比值越接近 1 表示雷達訊號品質越好)，再以示波器查詢天線狀態，本計畫臺中港天線系統如圖 3.3 所示。



圖 3.3 臺中港雷達天線系統

駐波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)是衡量天線與傳輸線匹配程度之重要指標，直接影響訊號傳輸效率與系統性能，當駐波比接近 1.0 時，表示阻抗匹配良好，功率損失最小，訊號品質最佳，一般 1.0 至 1.5 屬於正常範圍，然而，當駐波比過高(超過 2.0)，部分訊號會因阻抗不匹配而反射回傳輸線，導致功率損失、訊號衰減，影響雷達偵測距離與靈敏度，甚至可能損害發射設備，需特別關注與調整。本計畫雷達北站天線駐波比介於 1.0 至 1.5 之間，其中第 7 號與第 15 號天線駐波比表現最佳為 1.0，而第 4 號、第 5 號、第 14 號天線則為最高，駐波比數值為 1.5，其餘天線駐波比多落在 1.1 至 1.4 之間，整體數值正常，如表 3-1 所示。

表 3-1 臺中港北側雷達站天線駐波比量測情形

天線 編號	駐波 比值	天線 編號	駐波 比值	天線 編號	駐波 比值	天線 編號	駐波 比值
1	1.1	5	1.5	9	1.4	13	1.3
2	1.3	6	1.1	10	1.4	14	1.5
3	1.3	7	1.0	11	1.4	15	1.0
4	1.5	8	1.2	12	1.2	16	1.1

南站天線駐波比介於 1.3 至 1.8 之間，第 1 號與第 9 號天線最低為 1.3，第 8 號天線最高為 1.8，其他部分天線第 2 號、第 6 號、第 8 號、第 12、第 16 號天線駐波比較高為 1.6 以上，應進行調整與更換，如表 3-2 所示。

表 3-2 臺中港南側雷達站天線駐波比量測情形

天線 編號	駐波 比值	天線 編號	駐波 比值	天線 編號	駐波 比值	天線 編號	駐波 比值
1	1.3	5	1.5	9	1.1	13	1.5
2	1.6	6	1.6	10	1.4	14	1.4
3	1.5	7	1.5	11	1.4	15	1.6
4	1.4	8	1.8	12	1.6	16	1.7

南北站天線系統駐波比相比，北站範圍較低(1.0 至 1.5)，整體較穩定；南站較高(1.3 至 1.8)，部分天線數值偏高。北站有 2 支天線最低 1.0 駐波比，最高 1.5 駐波比有 3 支，南站最低 1.3 駐波比有 2 支，但有 5 支天線超過 1.6 駐波比，最高達 1.8 駐波比，南站駐波比較高的天線較多，明顯影響系統效能。綜上所述，故障排除時，建議從最容易檢查的項目開始，逐步排除可能的問題來源，以提高診斷效率，進行物理檢查，確認電源，並透過軟體診斷檢查錯誤代碼與設定參數，再檢查天線與傳輸電纜內部的組件狀況，最後針對確定的故障點進行更換或必要維修，依循此步驟，可有效診斷並排除雷達系統可能的問題，確保設備穩定運行。

3.2 波浪資料品質標準探討

Kirincich(2017)指出，雷達信號對無線電背景雜訊的干擾極為敏感，因此，雷達應安裝於腹地廣闊、地勢平坦且遠離電力系統的地點。然而，尋找合適的安裝地點並不容易，在此，特別感謝臺中港務股份有限公司提供臺中港腹地，使運研所得以進行雷達架設與安裝。關於無線電頻率干擾、無線電通訊問題及大氣電離層效應等因素，均可能影響都卜勒頻譜之品質，進而影響海表面海流、波浪與風力等參數估計之準確性。基此，高頻雷達數據的資料品質為雷達觀測應用中不可或缺之重要環節，本小節將說明雷達數據的處理過程及相關的品質管理程序。

雷達數據品質標準並不涉及雷達設計、自然環境的時空變異或內外部的電磁干擾，而是聚焦於海洋陣列雷達數據之品質管控。根據美國 QARTOD 即時高頻雷達表面海流品質管手冊(如圖 3.4 所示)，Bushnell (2005) 定義品質控制(QC)為一套基於科學理論與統計特性所建立的標準，能透過濾除各種干擾，實現自動化或人工數據檢查，從而獲取高品質數據。

質數據的過程。

Test Type	Test Name	Status	Test Control
Signal (or Spectral) Processing	Signal-to-Noise Ratio (SNR) for Each Antenna (Test 101)	Required	Embedded
	Cross Spectra Covariance Matrix Eigenvalues* (Test 102)	Suggested	Embedded
	Direction of Arrival (DOA) Metrics* (magnitude) (Test 103)	Suggested	Embedded
	Direction of Arrival (DOA) Function Widths* (3 dB) (Test 104)	Suggested	Embedded
	Positive Definiteness of 2×2 Signal Matrix* (Test 105)	Required	Embedded
Radial Components	Syntax (Test 201)	Required	National
	Max Threshold (Test 202)	Required	Local and National
	Valid Location (Test 203)	Required	Local and National
	Radial Count (Test 204)	Suggested	Local and National
	Spatial Median Filter (Test 205)	Suggested	Local and National
	Temporal Gradient (Test 206)	Suggested	Local and National
	Average Radial Bearing (Test 207)	Suggested	Local and National
	Synthetic Radial (Test 208)	In development	Local and National
	Radial Stuck Value (Test 209)	In development	Local and National
Total Vectors	Data Density Threshold* (Test 301)	Required	Local and National
	GDOP Threshold ** (Test 302)	Required	Local and National
	Max Speed Threshold (Test 303)	Required	Local and National
	Spatial Median Comparison (Test 304)	Suggested	Local and National
	Valid Location (Test 305)	Suggested	Local
	U Component Uncertainty** (Test 306)	Required	Local
	V Component Uncertainty ** (Test 307)	Required	Local

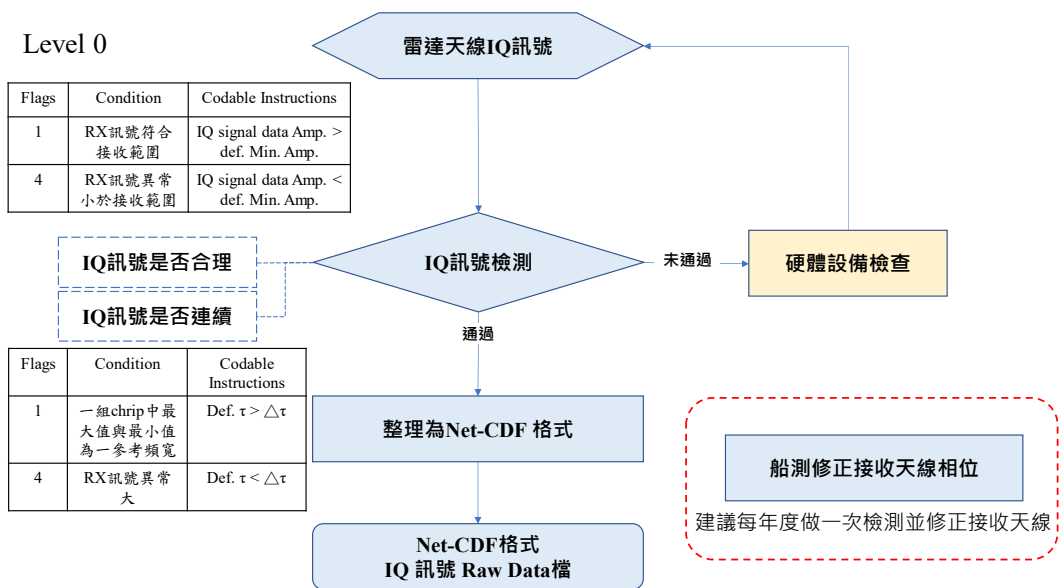
資料來源：IOOS QARTOD, USA

圖 3.4 美國 QARTOD 即時高頻雷達表面海流品管手冊

根據品管手冊的檢查步驟，主要包括：(1)資料完整性檢查，確認資料格式並進行時間戳核對；(2)數據檢查，檢驗閾值與變化率；(3)相鄰值比對；(4)訊噪比分析；以及(5)數據標記等，惟本計畫本年度僅討論波浪觀測情形，爰此，僅列出與雷達波浪相關的品管標準。

(一) 第 0 級品管

第 0 級品管為品管流程中最前端的品管程序，負責當雷達系統接收回波訊號時的初步品管作業。目前，雷達系統的 0 級品管主要依賴建站初期觀測建檔的環境背景雜訊，作為後續品管資料比對的基準，此程序仍以人工判斷為主，若訊號品質良好，表示雷達周遭環境變異較小，且硬體未出現老化或劣化情況，顯示雷達硬體健康狀況良好，若訊號品質未達標準，則可於硬體系統中加入降低或濾除雜訊的過濾器，以確保雷達收發天線的增益值符合標準，並確保品管程序所要求的 IQ 訊號品質，品管程序流程，如圖 3.5 所示。



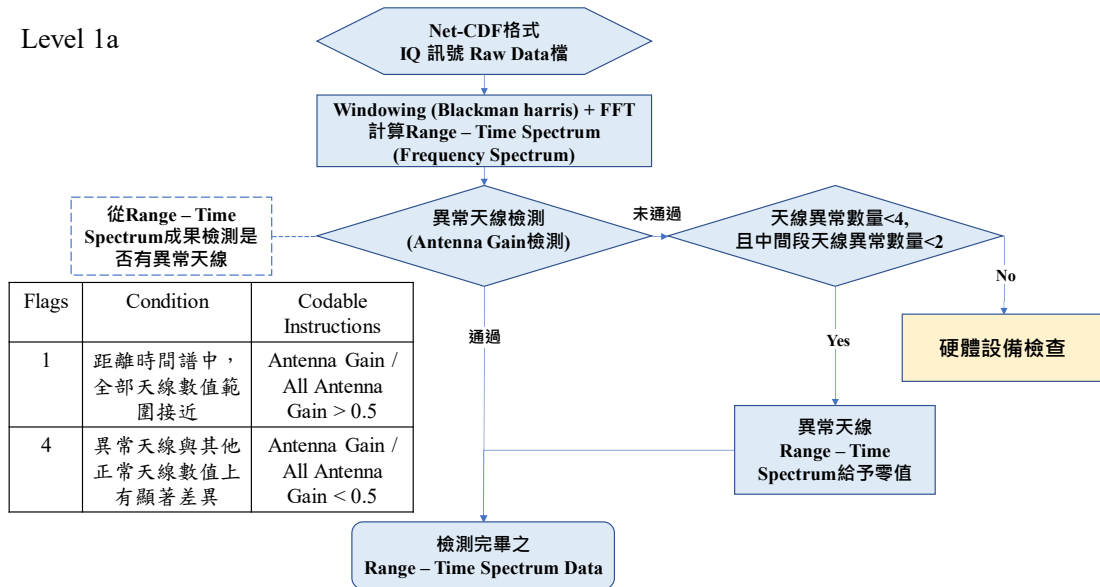
資料來源：運研所與流浪者科技有限公司

圖 3.5 第 0 級品管程序

(二) 第 1 級品管

第 1 級品管針對從接收雷達訊號到生成都卜勒頻譜過程中的資料品質管理，由於天線可能因外在環境影響而劣化，導致接收效能下降，因此，需透過第 1a 級品管來監測天線數據狀態。所謂第 1a 級品管可視為天線增益值之品管，其增益值定義為各天線功率譜的均方根值除以所有天線功率譜的平均值，用以衡量單支天線功率與平均功率之差異，判斷訊號強度之偏差狀況，因此，有別於天線系統物理狀態的品管。一般而言，當接收天線的增益值大於 0.5 容許下限時，表示天線狀況正常，若低於 0.5 容許下限時，則可能異常，需進一步檢查。根據近年雷達維護經驗，大部分觀測不確定性源於異常天線、而雷達系統故障或連接線路短路為少部分發生的問題。利用當前天線增益值低於容許下限時做為判斷標準，可確認為異常天線狀態，後續應進行維修與保養，以提供做為硬體改善依據，第 1a 級品管程序流程，如圖 3.6 所示。

Level 1a



資料來源：運研所與流浪者科技有限公司

圖 3.6 第 1a 級品管程序

都卜勒頻譜不僅包含一階頻譜與二階頻譜的特性，還同時涵蓋雷達雜訊之特徵，一階頻譜特徵反映海表面海流與風向參數，二階頻譜特徵主要與海表面波浪及風參數，從頻譜的解析來看，橫軸的正頻率表示參數向雷達站靠近，負頻率則表示遠離雷達站，縱軸則代表相對功率譜密度，因此，在反演算法計算雷達海表面參數時，必須確保都卜勒頻譜的訊噪比符合標準，以維持良好的訊號品質，確保數據的可靠性，都卜勒頻譜示意圖，如圖 3.7 所示。

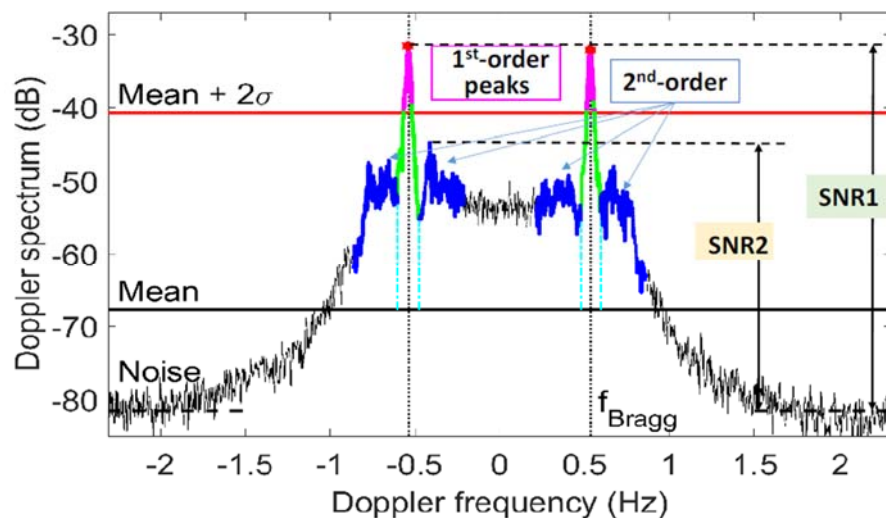


圖 3.7 都卜勒頻譜示意圖

其次，第 1b 級品管針對都卜勒頻譜的品質管理，該頻譜之所以重要，主因為該頻譜它記錄了雷達回波與海表面數據間之關鍵訊息，並與海洋表面海流、海表面波浪及風特徵密切相關，因此，第 1b 級品管是雷達數據品質管控的關鍵步驟。

(1)第 L1b 步驟 1：

此步驟稱為一階頻譜訊噪比(SNR1 品管)：訊噪比(Signal-to-noise ratio)係衡量訊號與雜訊強度比值的一種方式，其計算方式為訊號強度減去雜訊強度，SNR 值越大，表示訊號強度越強或雜訊較低，於都卜勒頻譜中，雜訊值定義為第一階譜峰當下正負頻率 3 倍以外區間的平均功率值，被稱做為雜訊值。根據 Wang 與 Gill(2016)研究結果，若使用波束合成演算法，建議 SNR1 需高於 10 dB，此外，根據近年雷達觀測經驗，若採用 Bartlett 窗函數，當 SNR1 高於 15 dB 時，頻譜誤差幾乎僅為隨機誤差，故本計畫建議將 SNR1 品管標準設定為 15 dB，做為區分雜訊與識別一階頻譜功率的門檻標準，以確保數據品質。

(2)第 L1b 步驟 2：

此步驟稱為都卜勒譜左右一階峰比(r12 品管)：在理想狀況下，都卜勒頻譜的左右一階譜峰能量應該相等，但實際上往往存在差異。r12 品管方式是提取一階譜峰訊號功率值，以較大值減去較小值來獲取差值，當 r12 品管值低於 10 dB，表示左右譜峰較為一致，頻譜特性較為理想，符合穩定的數據品質標準。

(3)第 L1b 步驟 3：

此步驟稱為二階頻譜訊噪比(SNR2 品管)：根據 Ramos (2009)的文獻回顧，建議雷達 SNR2 至少需高於 11 dB 才能計算波浪參數，Wyatt (2000)進一步指出，若 SNR2 門檻值高於 15 dB，則可計算方向波譜，而 Wyatt (2005)則認為 SNR2 門檻至少設定為 10 dB 即可，綜合以上研究，本計畫為確保良好獲取海表面波浪參數，將 SNR2 品管標準設定為 15 dB，做為波浪參數品管的標準。

(4)第 L1b 步驟 4：

此步驟稱為都卜勒譜平均二階峰訊噪比(SNRAv2 品管)：SNRAv2 品管標準與示性波高密切相關，其計算方式為取二階頻譜譜峰能量的平均值後計算訊噪比，當 SNRAv2 高於 10 dB，雷達反演算所得的海表面波浪參數較為可信；若未達 10 dB，則至少需符合 Cai (2019) 所提出的 5 dB 預定門檻值，以判斷計算出的波浪參數是否有效。

(5)第 L1b 步驟 5：

此步驟稱為船舶訊號率除品管：Wyatt et al.(2011)於英國利物浦灣利用海洋陣列雷達與現場 ADCP 觀測數據，觀察到風力發電機的旋轉葉片可能會對雷達訊號產生干擾，當某些船舶體積過大或海上風機數量增加，其空間覆蓋範圍擴大，將使海洋表面雜訊被雷達直接觀察到。一般而言，二階頻譜的能量通常比一階頻譜低約 20-30 dB，然而，在某些時刻，二階頻譜被觀察到異常升高，甚至超過一階頻譜譜峰，這種現象多數情況是船舶回波或其他干擾源所導致，影響雷達對海洋表面參數觀測的準確性，二階頻譜異常升高情形，如圖 3.8 所示。

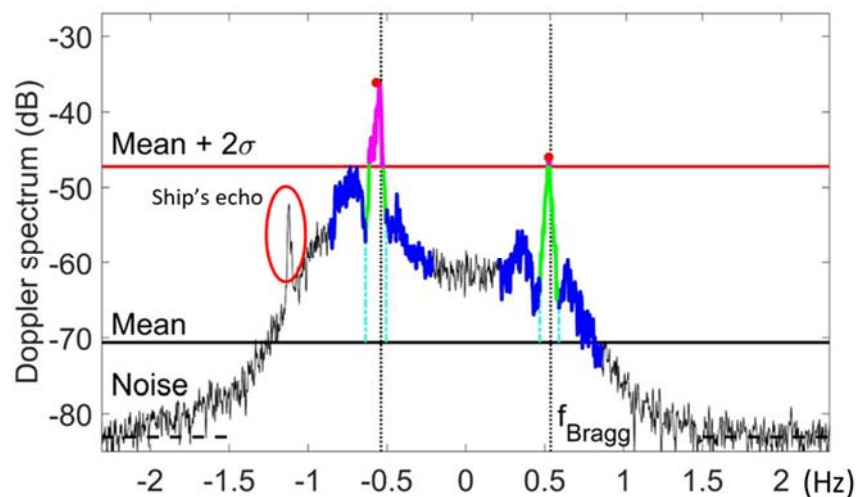


圖 3.8 二階頻譜異常升高情形

通常海面上小型漁船或工作船所產生的雷達回波可以忽略，然而，於商港區域，常見輪船長度動輒數百公尺，油輪船寬亦可

長達數十公尺，這些大型船舶所產生的雷達回波訊號顯著不可忽視，直接影響海表面波浪參數估算的準確性，為有效處理船舶訊號，本計畫船舶訊號處理採用 Chuang(2015)提出的二維移動平均法(2D moving average)。具體做法是使用 12 種不同尺寸的平滑窗函數來處理交叉頻譜訊號，並對雷達頻譜訊號進行二維移動平均過濾，接著將交叉頻譜訊號扣除經過二維移動平均處理後的頻譜訊號，以獲得殘餘訊號，再根據不同倍數標準差值(1.5σ 、 2σ 、 2.5σ 與 3σ)做為門檻值，當殘餘訊號超過該門檻值時，即判定為船舶回波訊號，這種利用不同尺寸平滑窗進行訊號分析之方法，又可稱之為調適性偵測法(Adaptive Detection technique, ADT)，如圖 3.9 所示

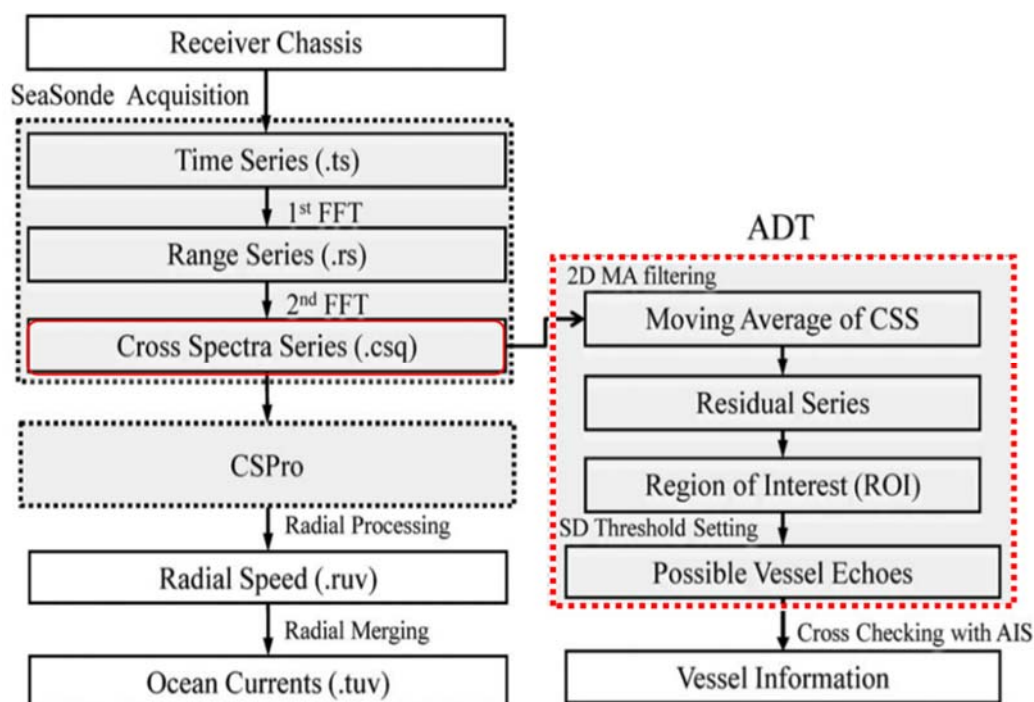


圖 3.9 調適性偵測法船舶探測資料處理流程

Chuang(2015)使用二維移動平均濾波器來檢測船舶回波。為了確定最佳的窗大小，研究測試從 3×5 至 15×50 不同範圍的測試窗，並評估相應殘餘序列的峰度(Kurtosis 亦稱尖度)與偏度(skewness 亦稱歪度)，根據該研究統計分析結果，最佳選擇的測試窗尺寸為 10×40 的範圍，該二維移動平均濾波器為最佳參數設定，並以 2σ 值做為自適應門檻值，用於檢測都卜勒距離譜圖中不

同方位角方向的船舶訊號。若任譜峰值的殘餘值高於門檻值，則船舶回波訊號與能量將被刪除，接著，透過二維移動平均法進行插值處理，用以填補都卜勒一階頻譜能量的空白區域，使頻譜區域功率得以恢復，進一步完成船舶訊號的濾除與訊號填補處理，調適性偵測法移除船舶訊號之案例，如圖 3.10 所示。

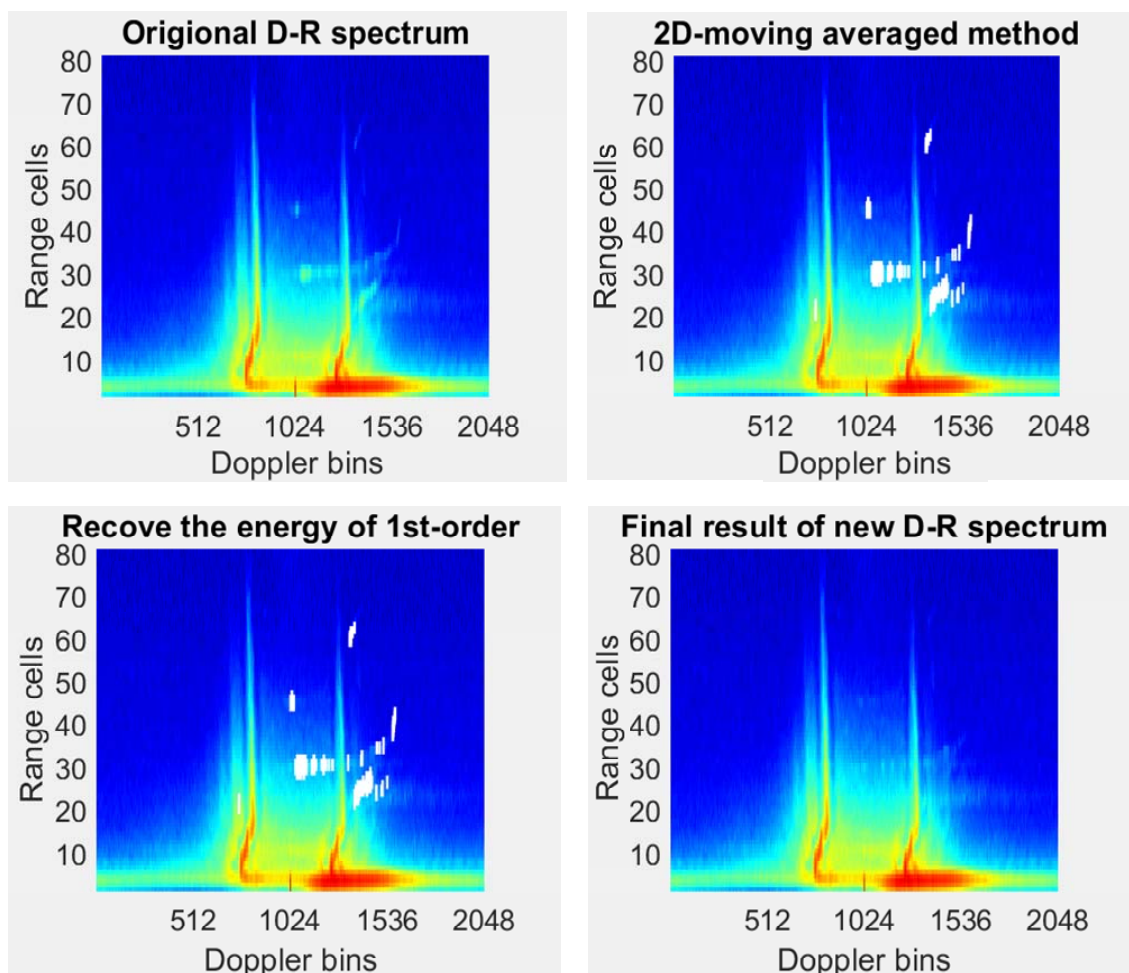
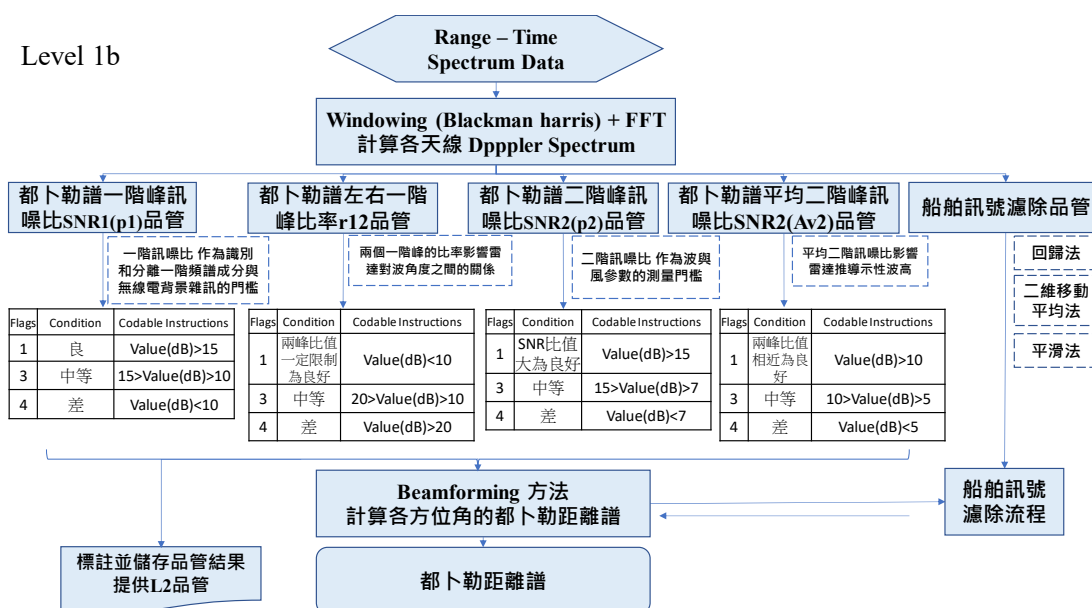


圖 3.10 都卜勒距離譜使用調適性偵測法移除船舶訊號之案例

都卜勒頻譜的 L1b 級品管流程可確保雷達觀測數據的準確性與穩定性。本流程首先透過一階頻譜訊噪比(SNR1 品管)來篩選出信號品質較佳的數據，進一步透過左右一階峰比(r12 品管)檢查都卜勒頻譜的對稱性，以確認訊號的穩定性，再透過二階頻譜訊噪比 SNR2 品管) 與平均二階峰訊噪比(SNRAv2 品管)，確保波浪參數計算的可靠性，避免受到低訊噪比影響而導致觀測數據誤差。此外，為解決來自船舶對雷達訊號的干擾，流程最後加入船舶訊

號率除品管，利用二維移動平均法與調適性偵測法濾除異常的回波訊號，確保海表面參數估算的品質，如圖 3.11 所示。



資料來源：運研所與流浪者科技有限公司

圖 3.11 第 1b 級品管流程圖

3.3 波浪數據限制

海表面波浪示性波高、平均週期、尖峰週期及波譜等波浪參數係通過一階與二階頻譜計算獲得，然而，波浪參數的品質受到多個都卜勒頻譜訊噪比的影響，若頻譜的訊噪比超出資料品質控制(QC)的範圍，則相關波浪參數數值必須被濾除，如本章第 3.2 小節所述。根據文獻回顧而言，Barrick(1972)利用 Rice(1951)電磁波從略微粗糙表面反射與微擾法(Perturbation Method)，推導出浪波非線性流體力學與電磁學的方程，假設波浪斜率(wave slope)為微小量，該理論微小參數具有有限收斂半徑，其中雷達波數(k_0)與示性波高表面振幅 h 乘積，隨著雷達頻率增加，但微擾法理論的適用範圍將逐漸減小；Wyatt (1995b)提出 k_0h ，當微小參數值接近 1 時，二階頻譜理論將難以準確描述較強海況的波譜，這種效應稱為波譜飽和(spectrum saturation)，基於飽和值限制，高頻雷達能觀測的最大有效波高將受到限制，最大有效波高受到 $H_{sat}=2/ k_0$ (Lipa 和 Nyden, 2005；Wyatt et al., 2011)，因此，當發現雷達觀測波浪參數超過飽和值時，波高估算值將被低估，建議使用較低的雷達頻率 (Lipa 與 Nyden,

2005；Wyatt et al., 2011b)。

本計畫以 27.75 MHz 的雷達工作頻率為例，示性波高(H_s)的適用範圍為 0.52 公尺至 3.44 公尺。根據 Barrick (1977) 的研究表明在推算波高與實測波高之間，需要考慮校正係數(Correction Factor)，該係數取決於雷達增益、海況及雷達與波浪的角度，當 $k_0 h_{rms} > 0.3$ 時，示性波高估計誤差仍在可接受範圍內，由於雷達推算波高參數與雷達頻率相關，原則適用範圍為 $0.15 < k_0 h_{rms} < 1$ 。此外，為估算波浪週期與波譜，根據 Wyatt et al. (2011a) 的研究，於處理雷達資料時，波浪頻率可取值範圍為 0.05~0.5 Hz，顯示平均波週期與尖峰週期受限於 2 至 20 秒之間。

綜上所述，本計畫針對雷達波浪數據設定多項限制條件，以確保數據的可靠性與適用性，示性波高範圍訂為 0.52~3.44 公尺，波浪週期的適用範圍則介於 2~20 秒，因此，平均波浪週期需小於 12 秒，而最大波浪週期不超過 15 秒，以避免異常數據影響分析結果，以確保測量數據的穩定性與實用性，相關限制整理如表 3-4 所示。

表 3-3 波浪數據的物理限制

特徵	品管條件
訊噪比 SNR_{Av2}	5dB
示性波適用範圍	0.52~3.44m
波浪週期適用範圍 平均波浪週期(T_m) 最大波浪週期(T_p)	2~20sec

3.4 雷達系統精進

海洋雷達不論發射與接收系統種類與設計為何，最終都需要天線傳遞電磁波訊號，因此，在雷達技術發展歷程中，天線設計始終係一項重要之關鍵技術，本計畫雷達接收天線技術係採用 1887 年赫茲(Hertz)設計的矩形感應線圈，該感應線圈被歷史記載為第一個接收天線，又稱為環形天線(Loop antenna)，如圖 3.12 所示，此技術奠定了現代雷達接收系統

的基礎，對於電磁波的捕捉與訊號處理具有重要意義。

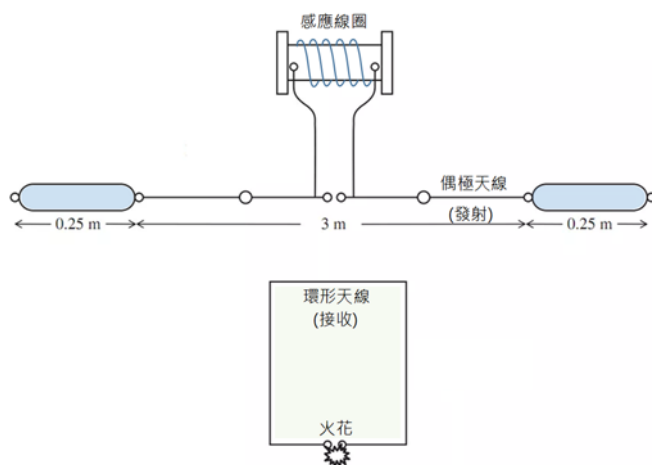


圖 3.12 赫茲偶極發射天線與環形接收天線架構

為減少電耦合效應，降低產生雜訊的原因，天線被設計與製造成許多不同型式，以滿足不同環境與使用需求，因此，天線可為整個雷達系統最困難之部分，本計畫海洋雷達接收為單極天線(monopole antenna)，依據本雷達中心頻率 27.75MHz，換算電磁波波長 λ 約為 11.11m，故天線結構垂直導線長度 $\lambda/4$ 約為 2.78m，電桿高度 $\lambda/8$ 約為 1.29m，電桿直徑 $\lambda/300$ 約為 3.7cm，電桿導線以均勻間隔纏繞於電桿(纏繞 14 圈)，收尾部分搭配環形天線，將導線纏繞為 3~4 圈的環形結構進行網綁，最後鋪設地網提升天線的輻射效能，因為地網能在垂直極化天線(即單極天線)運作時發揮關鍵作用，當高頻電磁波進行傳輸時，地網可模擬天線的鏡像反射面，來形成完整的電場分佈，良好的搭建地網，能增幅訊號，改善訊號的指向性，不同雷達頻率與天線設計關係，如表 3-3 所示，單極天線纏繞情形，如圖 3.13 所示。

表 3-4 不同雷達頻率與天線設計關係表

	長度關係	4.46MHz	8.25MHz	13.5MHz	16MHz	27MHz
電磁波長	λ	67.26m	36.36m	22.22m	18.75m	11.11m
垂直導線	$\lambda/4$	16.8m	9.09m	5.55m	4.69m	2.78m
環向導線	$\lambda/4$	16.8m	9.09m	5.55m	4.69m	2.78m
電桿高度	$\lambda/8$	8.4m	4.55m	2.78m	2.35m	1.29m
電桿直徑	$\lambda/300$	22.4cm	12cm	7.5cm	6.3cm	3.7cm



圖 3.13 雷達接收天線導線纏繞示意圖

(一) 本計畫雷達主動天線

當天線接收到海面反射的線性調變訊號時，該訊號會使接收設備產生諧振(即設備以相同頻率持續振動)。此種諧振行為與接收電路的電感(L)與電容(C)比值(L/C)密切相關，故接收天線的設計通常需具備適當的阻抗，以保護接收電路並限制訊號的隨機變化，使振動幅度逐漸減小，並趨於穩定。理想的接收天線應具備廣泛的接收範圍，並能維持良好的穩定性與可控性。若接收天線無法有效抑制隨機相位誤差，或無法將諧振頻寬穩定控制在 30 kHz 以內，則可能導致訊號失真或干擾增加。在此情況下，可透過主動式天線(Active Antenna)來解決問題；主動式天線的工作原理類似於濾波機制，其主要作用在於濾除接收訊號中的整數倍共振頻率，以減少不必要的諧振影響，提升訊號的穩定性與接收品質。如圖 3.14 所示，紅色曲線代表接收的原始訊號，可觀察到其中包含諸多倍頻雜訊。然而，經過主動濾波(Active Filtering)處理後，倍頻雜訊已被有效抑制，使訊號變得更加穩定且清晰。此類天線特別適用於鄰近強干擾源的環境，尤其當接收區域周圍存在

鐵網、金屬結構或其他高導電物體時，常會導致額外的電磁耦合效應，透過主動式天線，可顯著提升訊號品質，降低外部環境對接收效能的影響，使系統獲得更穩定可靠的訊號品質。

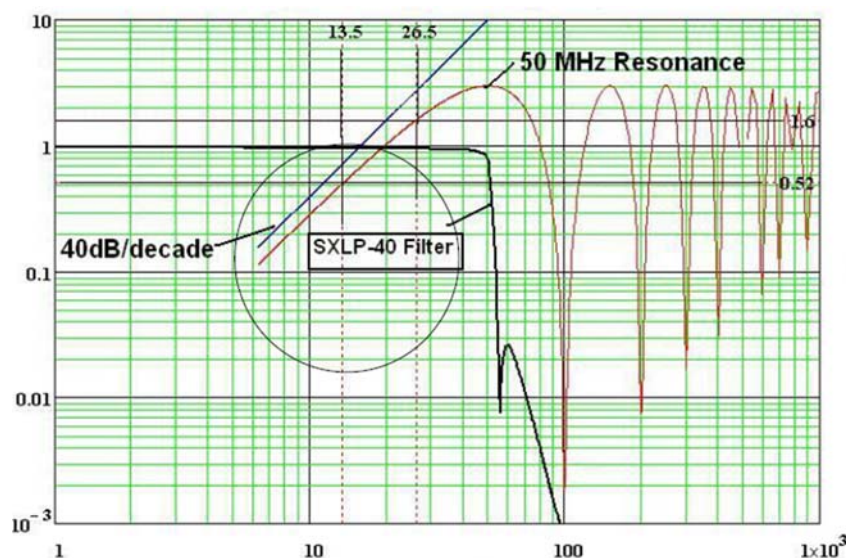


圖 3.14 主動式天線消除倍頻雜訊的情形

(二) 本計畫更換接收天線的情形

眾所周知，主動式天線雖然具備低通濾波的優勢，能有效消除倍頻雜訊，但同時也存在一些限制與挑戰，舉例來說，低通濾波會影響天線頻率的響應，導致無法全面捕獲海面的回波訊號，影響雷達對細微波浪特徵之感測能力。此外，低通濾波對天線感應電極極為敏感，容易受到閃電放電或瞬間高壓脈衝影響，導致零件受損，此外，本雷達天線為自行纏繞搭建，受更嚴峻的防水挑戰，加上其結構較為複雜，容易受環境因素影響而降低天線的耐用性，因此設計上，主動式天線僅能視為次優選擇。

本計畫雷達站於 107 年 12 月建置初期，忽略了臺灣沿海地區的高濕度環境，導致雷達天線設備在陽光曝曬下產生吸水泵效應，使主動天線的低通濾波器 IC 零件，因吸收過多濕氣，而產生銹蝕損壞(如圖 3.15 所示)，印證結果顯示，最初採用的主動式設計不僅未能提升效能，反而成為最糟糕的方案。類似問題也發生於墨西哥使用相同型號雷達系統的案例中，其天線的低通濾波器因受潮損壞情況極為嚴重，每年需投入大量經費進行零件更換

與維修，相較之下，美國夏威夷採用被動式天線(未使用低通濾波器)穩定運行數十年，這樣對比顯示雷達與天線設備的設計應依據當地氣候條件進行調整，顯示天線設備因地制宜的重要性。



圖 3.15 主動式天線低通濾波器銹蝕情形

有鑑於此，本計畫雷達天線參考美國夏威夷經驗，決定將主動式天線更換為被動式天線，以改善雷達雜訊過高、訊噪比偏低的問題。因此，技術人員拆卸舊有主動天線，移除低通濾波器重新固定與纏繞纜線至電桿，同時為確保被動天線結構穩固，提升耐候性與防水效果，纜線外部以環氧樹脂進行密封處理，並額外覆蓋電器膠帶，以防止潮氣等外部環境影響，此一精進措施有助於提高天線穩定與耐久性，如圖 3.16 所示。





圖 3.16 雷達天線更換情形

第四章 觀測資料分析與交互驗證

本計畫海洋陣列雷達採用雙機站雷達系統，雷達頻率 27.75MHz，資料分析採用英國雪菲爾大學開發的作業化軟體，稱為 Seaview Sensing 該軟體規劃的空間網格總數為 721 個儲存格(Cell)，南北距離範圍為 33.89Km，東西距離範圍為 22.17Km，如圖 4.1 所示；4.1 小節說明本章節說明 113 年度資料監測情形、資料比較分析與交互驗證工作等內容，海洋陣列雷達獲得海洋表面參數：海表面海流參數、波浪參數與方向定位分析方法等。

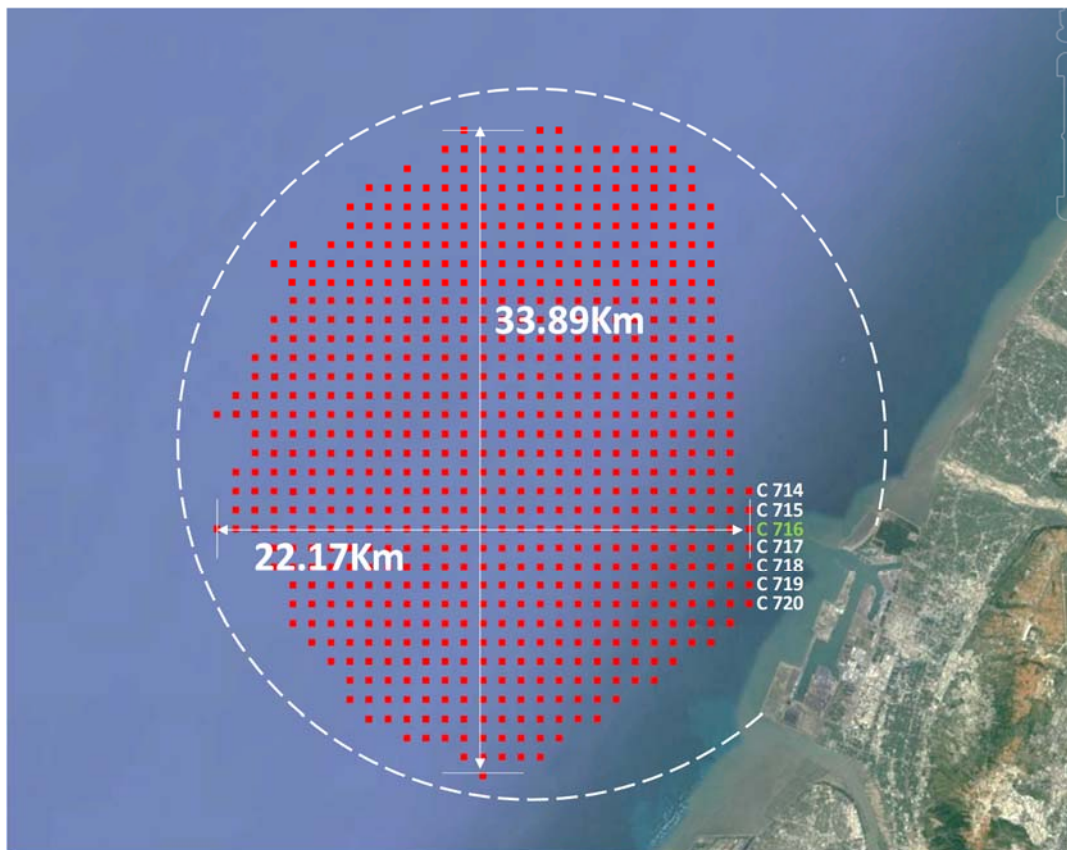


圖 4.1 雙雷達系統空間網格分佈圖

4.1 研究方法

(一) 海流參數分析方法

因此，為獲取表面海流的速度資訊，需要計算雷達背向散射的都卜勒譜，計算雜訊(noise)的平均值與雜訊能量的標準差，再追蹤一階峰頻率(f_{peak})，以及理論布拉格的頻率，雷達波與海流

相對速度造成的理論布拉格頻率與第一階峰頻率產生都卜勒頻偏，如圖 4.2 所示。

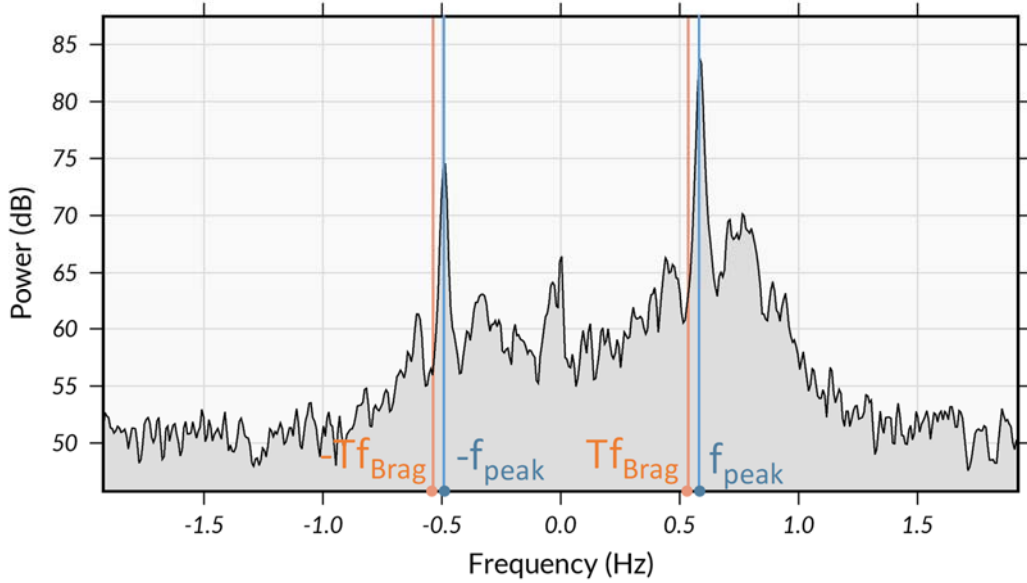


圖 4.2 一階峰受海流相對速度影響的都卜勒頻偏現象

若海洋表面靜止則理論布拉格頻率(Theoretical bragg frequency，簡寫為 Tf_{Brag})與將一階峰頻率(Bragg peak frequency，簡寫為 f_{peak})相同， g 為 $9.81m/s^2$ ， F_r 為雷達的頻率， C 為潮濕空氣的熱帶地區電磁波速度約為光速的 0.9997 倍，理論布拉格頻率(4.1)公式如下：

$$Tf_{Brag} = \sqrt{(g \times F_r)/(C \times \pi)} \quad (4.1)$$

但海洋表面海流受制於風與潮汐等營力影響，使電磁波與海流發生相對速度的影響，造成一階峰速度(V_p)、布拉格速度(V_B)與逕向海流速度(V_c)之關係變化，整理得(4.2)~(4.4)公式如下：

$$V_p = V_B + V_c \quad (4.2)$$

$$V_c = V_p - V_B \quad (4.3)$$

$$V_c = (\lambda \times f_{peak}/2) - (\lambda \times Tf_{Brag}/2) \quad (4.4)$$

再利用逕向海流速度與雷達電磁波長(λ)與發生共振時的頻率關係，整理如(4.5)公式：

$$V_c = (f_{peak} - Tf_{Brag}) \times \lambda/2 = \Delta f \times \lambda/2 \quad (4.5)$$

(二) 波浪參數分析方法

為測量示性波高、週期等波參數，發展了許多由理論、經驗和統計組成的方法。1977年，Barrick首次提出從都卜勒距離頻譜中獲取示性波高和平均週期的經驗方法。根據波參數和二階能量總合與一階功率總合的比值，建立了經驗公式。也有取得示性波高的修訂方法被提出(Maresca and Georges 1980, Heron, Dexter et al. 1985, Heron and Heron 1998)。最終，Heron及Heron (1998)為Barrick的公式提供一經驗係數 scaling factor $\xi=0.551$ 和去掉背景雜訊 N ，提供誤差最低以估計波高來呈現 Barrick 經驗公式。Barrick (1977) 推導出均方根波高 h_{rms} 、能量、功率的關係，包含了二階能量總合與一階功率總合的比值，並提出估算 h_{rms} 的經驗公式，由都卜勒頻譜得出(公式 4.6)，以及 Heron 及 Heron (1998) 提出之公式 4.7 如下：

$$h_{rms} = \frac{1}{k_0} \left(\frac{2 \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(2)}(\omega) / w(\omega/\omega_B) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega} \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

$$h_{rms} = \frac{\xi}{k_0} \left(\frac{2 \int_S (\sigma(\omega) - N) / w(\eta) d\omega}{\int_F (\sigma(\omega) - N) d\omega} \right)^{1/2} \quad (4.7)$$

ω 為都卜勒頻率， $w(\omega/\omega_B)$ 為加權函數圖 4.3 所示，由各方向標準化耦合係數的平均值計算出來的(Barrick, 1977)，得到示性波高，波高的均方根誤差(RMSE)於 $k_0 h_{rms} > 0.3$ 約為 22.7%。而 Barrick 的理論是建立在討論水與波的非線性流體力學和電磁方程的微擾理論延伸發展來的(Rice, 1951)，這個理論在微小參數具有有限的收斂半徑，其參數包括雷達波波數(radar spatial wavenumber) k_0 、表面振幅(surface amplitude) h 、 $k_0 h$ (Wyatt, 1995)。當微小參數統一時，理論就會失效(Wyatt, 1995)。基於飽和條件，高頻雷達獲得的最大示性波高受 $H_{sat} = 2/k_0$ (Lipa and Nyden 2005, Wyatt and Green et al. 2011) 限制。當實測波高大於飽和條件的情況時，雷達所估計的波高會被低估。在這種情況下，應選擇較低的雷達頻率(Lipa and Barrick 1986, Lipa and Nyden

2005, Wyatt and Green et al. 2011)。

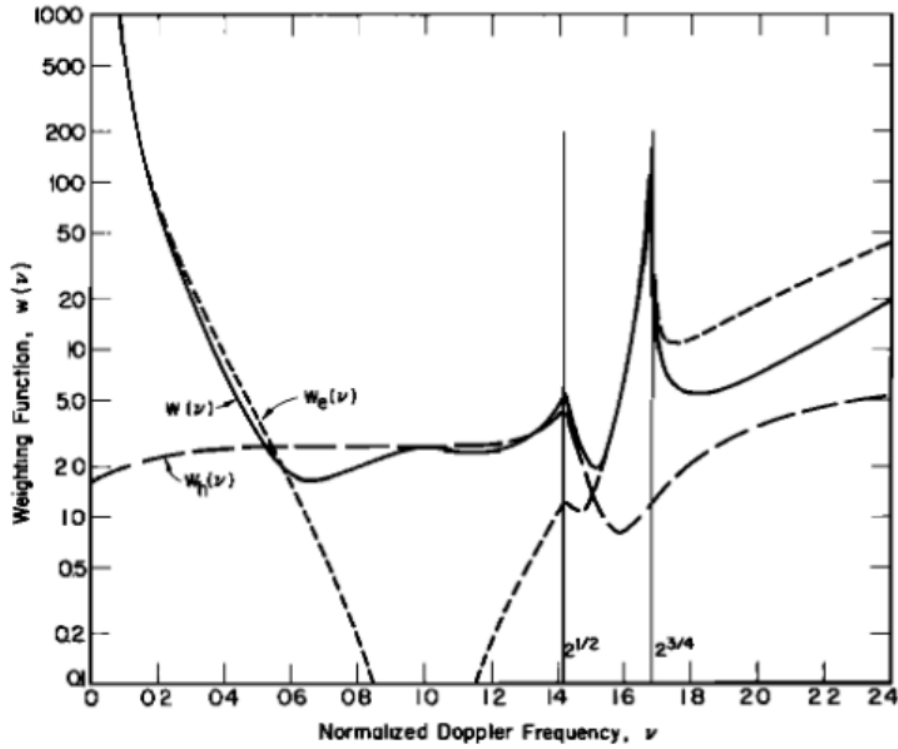


圖 4.3 布拉格加權函數圖

波浪週期計算引用 Barrick(1997)單基站方程式(4.8)如下：

$$T_m = \frac{2\pi}{\omega_B} \left(\frac{\int_{0,1}^{1,\infty} \sigma^{(2)}(\omega)/w(\eta)d\eta}{\int_{0,1}^{1,\infty} |\nu - 1| \sigma^{(2)}(\omega)/w(\eta)d\eta} \right) \quad (4.8)$$

上式積分的極限範圍可為 0~1，亦可以是 1~∞。η 為除以布拉格頻率後的標準化都卜勒頻率。實測資料顯示，平均週期的殘差標準誤差(Residual Standard Error,RSE)於 $k_0 H_{rms} > 0.3$ 約為 12.4% (Barrick 1977)。根據 Barrick (1977)和 Young(1995)，可以從加權二階邊帶之一估計波峰週期非定向頻譜，(4.9)公式如下所示：

$$T_{p(m)} = \frac{\int_{0,\omega_B}^{\omega_B,\infty} \sigma_{w(m)}^{(2)n}(\omega)d\omega}{\int_{0,\omega_B}^{\omega_B,\infty} |\omega - \omega_B| \sigma_{w(m)}^{(2)n}(\omega)d\omega} \quad (4.9)$$

其中 $\sigma_{w(m)}^{(2)}$ 是通過將邊帶 m^{th} 處的加權函數除以 $m = 1、2、3$ 和 4 得到的加權二階頻譜，n 是加權指數，建議到 5 (Young 和

Verhagen, 1996)。用於峰值週期計算的二階頻譜的都卜勒頻率範圍與用於平均週期估計的相同。通常使用都卜勒頻譜的主導側進行反演計算，除非兩個布拉格峰相差小於 3 dB，則使用兩側的平均值作計算(Alattabi et al., 2019)。

根據布拉格推導，深水區之示性波高估算公式(4.10)如下：

$$H_s \simeq 4.004h_{rms} = 4.004 \sqrt{\frac{2}{k_0^2} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(2)}(\omega)/w(\eta)d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(1)}(\omega)d\omega}} \quad (4.10)$$

基於原始波浪理論，示性波高也可從一維波譜中估計出來，公式(4.11)如下所示：

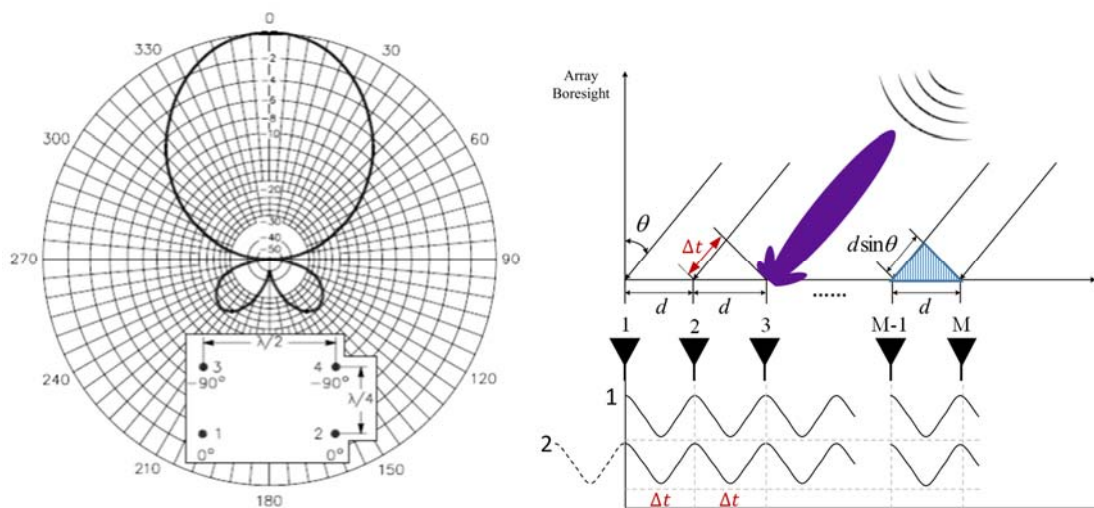
$$\int_0^{\infty} S(f)df = \frac{\alpha(f)}{0.5k_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(1)}(\omega)d\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_w^{(2)}(\omega)d\omega \quad (4.11)$$

其中， $\alpha(f)$ 為每個波段頻率的連接係數(Gurgel et al., 2006；Alattabi et al., 2019)。公式(4.11)最後一項可表示式(4.12)如下：

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_w^{(2)}(\omega)d\omega &= \int_{-\infty}^{-\omega_B-\Delta\omega} \sigma_w^{(2)}(\omega)d\omega + \int_{-\omega_B-\Delta\omega}^0 \sigma_w^{(2)}(\omega)d\omega \\ &+ \int_0^{\omega_B-\Delta\omega} \sigma_w^{(2)}(\omega)d\omega + \int_{\omega_B+\Delta\omega}^{\infty} \sigma_w^{(2)}(\omega)d\omega \end{aligned} \quad (4.12)$$

(三) 訊號方向定位技術

海洋陣列雷達方位辨別係使用波束合成(Beamforming)技術，此演算技術發展經歷 Teague (1986)、Helzel et al.(2006)與 Bhuiya et al.(2012)幾位學者之研究，相繼提出完善的方向定位方法，以下對於波束合成技術進行說明，原理係利用電磁波的破壞性干涉與建設性干涉影響，對於接收訊號產生加成與相消，為達成此目標，雷達的接收天線被設計以線性排列，並組成海洋陣列雷達的接收系統。陣列天線的排列型式係以相同距離為間隔，等間距排列，其用意係為使天線接受來自海面的布拉格反射訊號時，能透過不同的陣列天線對於接收訊號產生建設性干涉，達到訊號加強的效果，陣列天線排列型式，如圖 4.4 所示。



(資料來源：Antenna Book Vol. 7)

圖 4.4 天線場型與波束合成技術的幾何原理

由於接收天線係以全向性接收訊號的方式接收訊號，訊號能成為空間域的頻圖譜， d 是每個接收天線的間距， d 為被限制的電磁波半波長(以臺中港雷達站為例 27.75 MHz 波長為 10 m，半波長為 5m 是固定的)， θ_i 為來自訊號 i 的入射角，根據天線間距與訊號入射角的幾何關係，假設第二支天線距離第一支天線更接近訊號來源，當第二支天線接收到訊號時，第一支天線尚未接收到海面的反射訊號，由於陣列天線的間距是被設計為固定距離，第二支天線將相較於第一支天線提前於 $d \sin \theta$ 距離的時間接收到訊號，但如此無法達到訊號加強的目的，爰此，第二支天線會設計一延遲接收器，強迫第二支天線延遲 $d \sin \theta$ 距離的時間後再進行接收，如此一來，時間差所導致的相位移動，會使來自特定方向的訊號於第二支與第一支天線接收到同相位的海面訊號，使海面的接收訊號得到疊加，來自其他方向的訊號相消，以此類推，當陣列天線數量越多，接收獲得的訊號加強次數越多，都卜勒譜的雜訊與峰值訊號將更加突顯不同。假設入射訊號以傳播速度 c 傳播於入射距離 D 上，訊號源 $S_i(t)$ ， $1 \leq i \leq d$ ，故 Bhuiya et al.(2012)提出第 M 支天線於時間 t 收到的所有訊號可以表示為(4.13)公式所示：

$$x_m(t) = S_i(t) \sum_{i=1}^d e^{(M-1)u_i} + n_M(t), \text{ for } M = 1 \quad (4.13)$$

公式經簡化後表示為(4.14)公式所示：

$$x = AS(t) + n(t) \quad (4.14)$$

總括來說，變數 x 可視為擷取訊號的總合， S 為陣列天線之資料列向量， n 可視為接收的雜訊， A 為導引矩陣，反應陣列天線於特定方向之導引向量，當陣列天線於某段時間內接收訊號，去追蹤量測某特定方向之能量，若導引方向與回波訊號的方位一致時，將能量測到最大能量，藉此估算電磁波到達方向(Direction Of Arrival，簡稱 DOA)。因此，高頻雷達陣列系統可被視為電子陣列，故可設計出權重向量 w ，以接收天線接收到的資料進行線性組合其式簡化，輸出訊號 $Y(t)$ 如(4.115)公式所示：

$$Y(t) = \sum_{i=1}^M w_i^* x_i(t) + w^H X(t) \quad (4.15)$$

其中陣列系統之總平均輸出能量以 K 取樣數擷取，能量方程式表示如(4.16)公式所示下：

$$P(w) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |Y(t_k)|^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w^H X(t_k) X(t_k)^H w \quad (4.16)$$

其中 w_i 為 i 個反射訊號源之權重， $*$ 表示共軛複數， H 為向量之共軛轉置矩陣，導引向量 $A(\theta)$ 做為權重向量， θ 為掃描角，權重可表示為(4.17)公式所示：

$$w = A(\theta) \quad (4.17)$$

因此，即可解算(4.18)公式，獲得產生最大輸出能量之方位，並藉此求得訊號來源的方向 θ ，其中 R 為輸入訊號之協方差矩陣。

$$P(\theta)_{BF} = A(\theta) R_{xx} A(\theta)^H \quad (4.18)$$

4.2 統計分析方法

本計畫時序列統計分析採用美國兵工團(United States Army Corps of Engineers，簡稱 USACE)波浪資訊研究計算的評估統計數據方法，本計畫按照四種常用統計參數進行討論，分別為相關係數(Correlation coefficient)、均方根誤差(Root-mean-square error, RMSE)、散點因子(Scatter Index, SI)與偏誤(Bias)，原理與意義說明如下：

(一)相關係數(Correlation coefficient)

相關性是衡量時序列數據或兩個不同變量的統計方法，具體有 3 種類別，分別為皮爾森(Pearson)相關係數、肯德爾(Kendall)相關係數與斯皮爾曼(Spearman)相關係數，最廣泛應用的相關係數是皮爾森(Pearson)相關係數，又簡稱為 R 值，該相關係數位於 ± 1 之間，數值高低表示資料數據的關聯程度，正值表示數據變量呈現正相關，負值表示數據變量呈現負相關，R 值絕對值數值越高表示兩數據彼此關聯程度越高，數值等於 1 表示完全相關，這種情況相當少見，若數值能介於 0.7~0.99 稱為高度相關，0.4~0.69 稱為中度相關，0.1~0.39 稱為低度相關、0.01~0.09 稱為弱相關、等於 0 表示無相關。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.19)$$

(二)均方根誤差(RMSE)

所謂誤差為兩數據(例如：實際值 y 與量測值 $\hat{y}$) 的差值，因此，均方根誤差為誤差平方和除以誤差數量後再開平方根的統計數差，意指兩數據資料距離的遠近，也代表數據的集中情況，均方根誤差越高，顯示兩數據間距離越遠，表示兩數據越不相近。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (4.20)$$

(三)散點因子(SI)

散點因子為均方根誤差與數據平均值(實際值 $\bar{y}$) 的比值，亦屬於統計學誤差評估的另種方式，可視為誤差相較數據平均值之占比，散點因子越低，顯示數據誤差程度越小，數據若為觀測資料，表示觀測品質越好，散點因子恰為 0 值，表示兩數據資料完全一致。

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (4.21)$$

(四)偏誤(Bias)

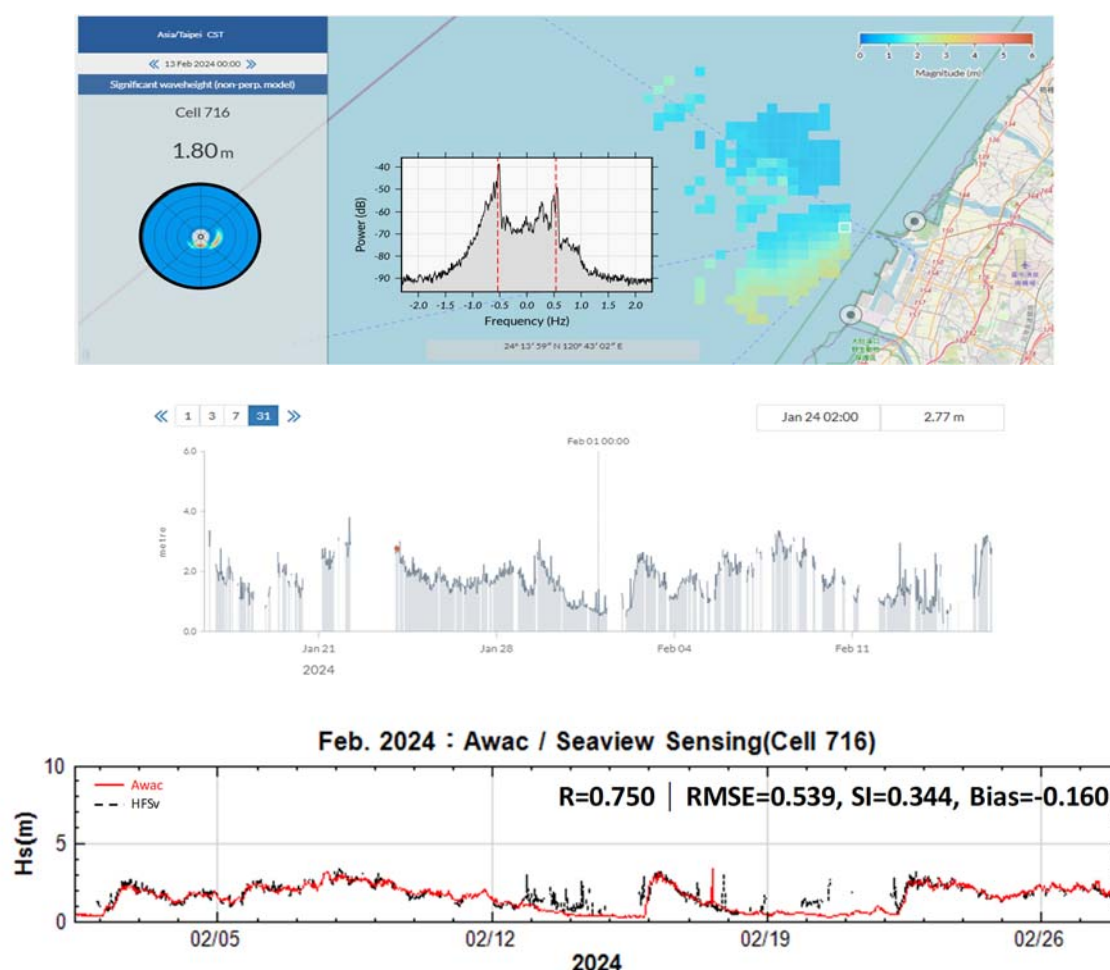
偏誤是統計學中探討抽樣準確性的概念，進一步探討抽樣統

計與實際母體狀況的偏差情形稱為偏誤，常被應用於探討長期性的兩組數據間的偏差程度，正值表示數據呈現高估狀況，負值表示數據呈現低估狀況；若數據為觀測資料，偏誤越小顯示兩數據彼此之間越為相近，資料數量太少，偏誤可能造成偏大情況。

$$Bias = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i) \quad (4.22)$$

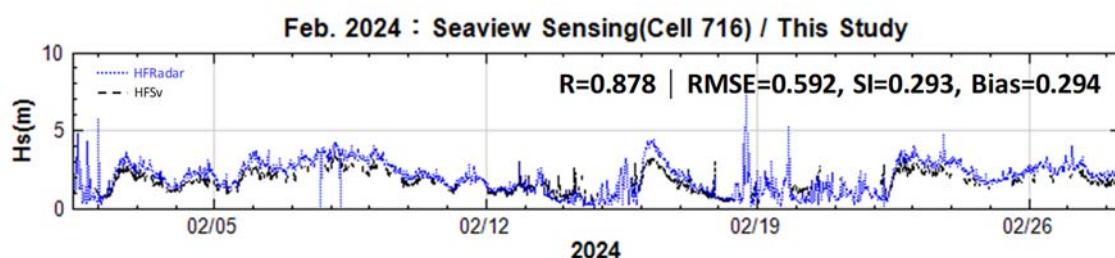
4.3 觀測資料驗證

本計畫資料監測情形與交互驗證，使用英國雪菲爾大學開發的 Seaview Sensing 軟體(簡稱 SV)，該軟體雷達站空間點位選用與臺中港佈署的底碇式波流儀(簡稱 AWAC)較為接近的第 716 號儲存格(Cell)，如圖 4.5 所示，另與本計畫開發軟體驗證，如圖 4.6 所示。



圖例：AWAC (紅色)，Seaview (Cell 716，黑色)

圖 4.5 AWAC 與 Seaview 反演算法波浪驗證



圖例：Seaview (黑色)，本計畫 (藍色)

圖 4.6 Seaview 與本計畫反演算法波浪驗證

根據雷達觀測海表面波浪與底碇式觀測數據的分析，圖 4.5 採用雷達 SV 演算法獲得之海表面波浪數據與底碇式波流儀(AWAC) 觀測數據進行比較，兩者相關係數 (R) 為 0.750，顯示具有高度相關，亦即當雷達 SV 觀測波浪增大時，AWAC 觀測結果也傾向增加。此外，兩者均方根誤差 (RMSE) 為 0.539，表示預測值與實際值的平均誤差約為 0.539，誤差屬於適中範圍。進一步分析，散點因子 (SI，亦稱標準化均方根誤差) 為 0.344，顯示誤差約佔數據變異的 34.4%，屬於中等偏低水準，說明雷達 SV 演算法與底碇式觀測數據之間擬合程度尚可，但仍有改善空間，最後，偏誤 (Bias)統計分析為 -0.160，顯示雷達觀測值平均略低於實際觀測值，有輕微低估的現象。

圖 4.6 進一步使用國立中央大學水文與海洋科學研究所以 MATLAB 程式語言平台開發的處理程序進行分析(簡稱本計畫演算法)，並與雷達 SV 演算法進行比較，兩者相關係數(R)為 0.878，顯示兩種演算法結果具有高度相關，數據趨勢一致，其均方根誤差 (RMSE) 為 0.592，表示兩種方法的平均誤差約為 0.592，誤差較小。此外，散點因子(SI)為 0.293，顯示誤差約佔數據變異的 29.3%，在合理範圍內，而偏誤 (Bias)統計分析方面為 0.294，顯示本研究演算方法相較於雷達 SV 演算法略有正偏差，但偏差幅度小，綜合而言，數據處理後整體擬合度良好，可用於進一步的分析與應用。

4.4 海流觀測資料分析

本小節討論海表面流數據相關性(R)、均方根誤差(RMSE)，散點因子(SI)，以及偏誤 (Bias)統計分析進行討論，7~8 月份雷達站健康程度降

低，因此本計畫僅討論 1~8 月份海表面流與潮汐時序數據，如圖 4.7 所示，觀測說明如下：

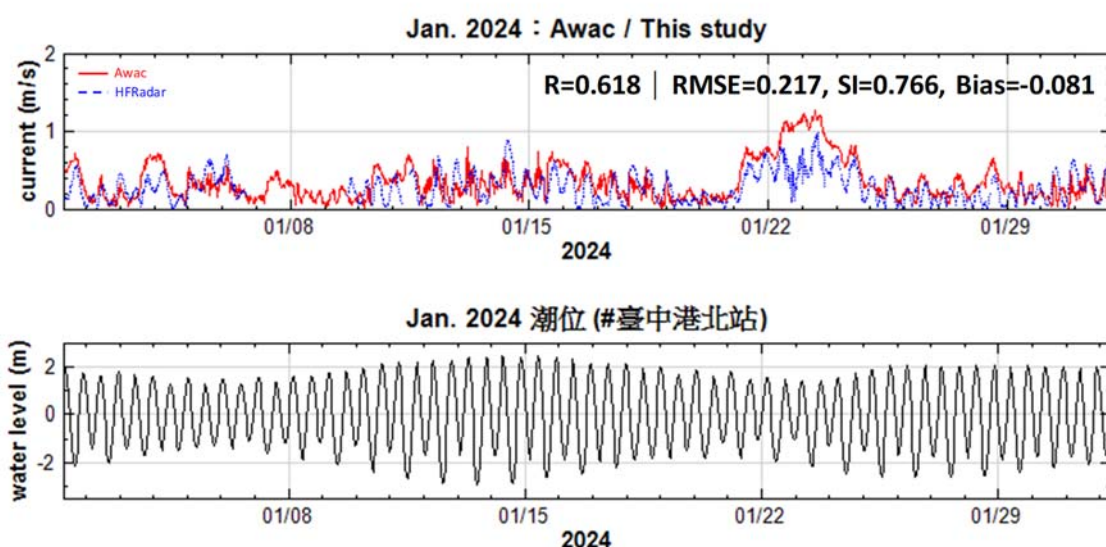
- (一) 由 113 年 1 月份海表面流流速與潮位變化圖中，Awac 觀測海流速度(紅線)與雷達觀測數據(藍線)相關性(R) 0.618 為中度相關，兩者趨勢變化相似。均方根誤差 (RMSE) 為 0.217，兩者觀測誤差相近；散點因子 (SI) 為 0.766，顯示誤差約佔數據變異 76.6%，相對變異程度較高，偏誤 (Bias) 為 -0.081，呈現負偏差，顯示雷達觀測值整體略低於 Awac 觀測值。
- (二) 113 年 2 月份海表面流流速與潮位變化顯示，兩者趨勢變化相似，相關性(R) 0.532，同樣屬於中度相關，均方根誤差(RMSE) 為 0.168，低於 1 月份雷達與 Awac 觀測誤差小；散點因子(SI)為 0.659，誤差約佔數據變異的 65.9%，相對變異程度較高，偏誤 (Bias) 為 -0.048，仍為負偏差，顯示雷達觀測值整體略低於 Awac 觀測值。
- (三) 113 年 3 月份數據顯示，兩者趨勢變化相似，相關性(R) 0.581，屬於中度相關，均方根誤差(RMSE)為 0.174，低於 1 月份，但略高於 2 月份，顯示觀測誤差仍然較小；散點因子(SI)為 0.522，誤差約佔數據變異的 52.2%，變異程度較 1、2 月份低，偏誤(Bias) 為 -0.009，負偏差極小，顯示雷達觀測值與 Awac 觀測值幾乎無系統偏差。
- (四) 113 年 4 月份的海流速率與潮位變化顯示，相關性(R) 0.562，屬中度相關，均方根誤差(RMSE)為 0.161，低於 3 月份，顯示雷達與 Awac 觀測誤差較小；散點因子(SI)為 0.525，誤差約佔數據變異的 52.5%，與 3 月份相近，偏誤(Bias)為 0.003，出現輕微正偏差，顯示雷達觀測值略高於 Awac 觀測值，但系統性偏差極小。
- (五) 113 年 5 月份的數據顯示，相關性(R) 0.251，為 113 年 1~5 月份最低，顯示觀測相關性下降，均方根誤差(RMSE)為 0.189，高於 4 月份，表示觀測誤差增加；散點因子(SI)為 0.874，誤差約佔數據變異的 87.4%，為 1~5 月份最高，顯示誤差較不穩定，偏誤(Bias)為 -0.016，顯示雷達觀測值略低於 Awac 觀測值，無明顯

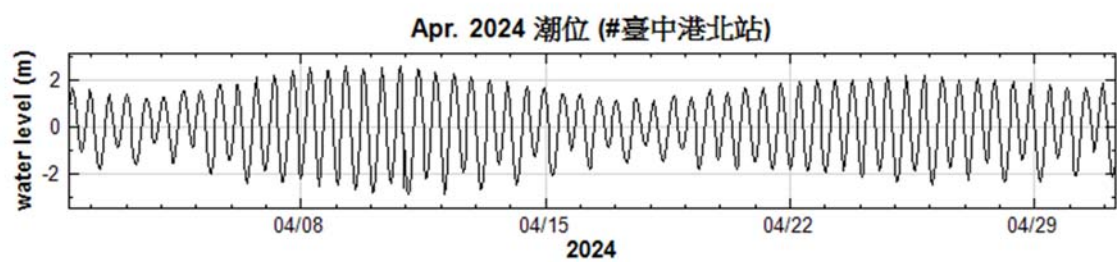
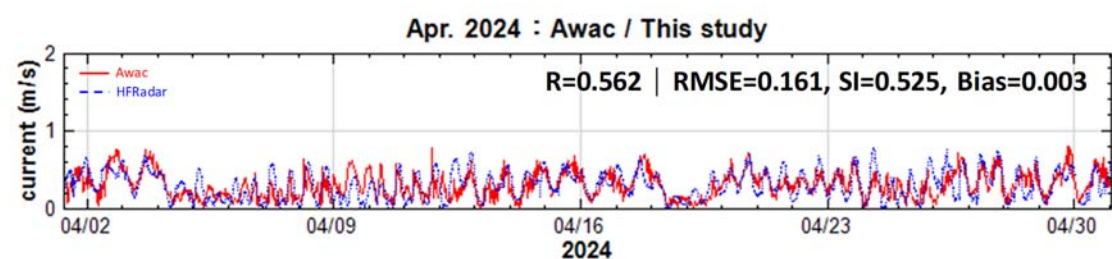
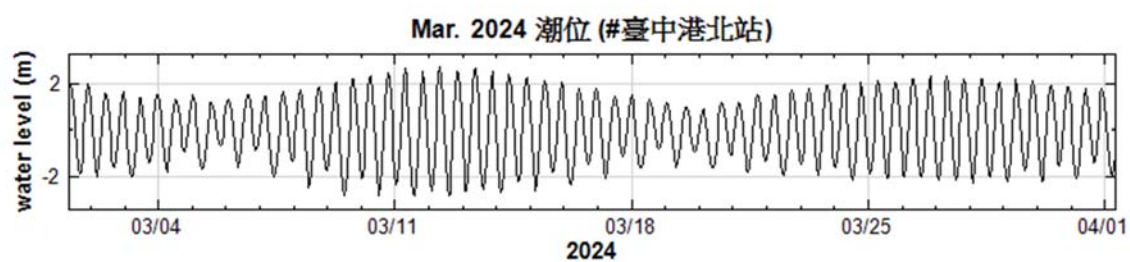
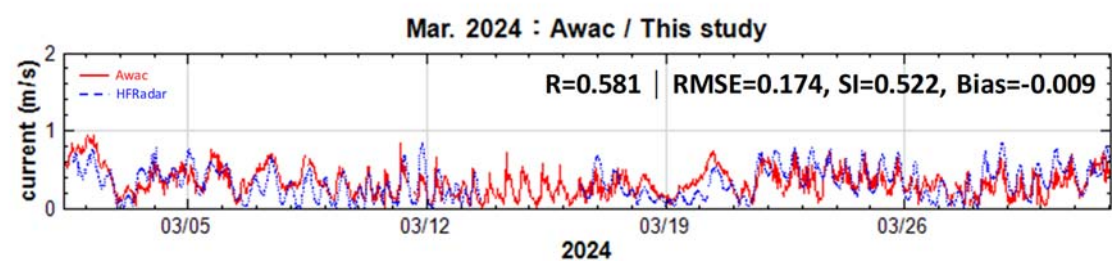
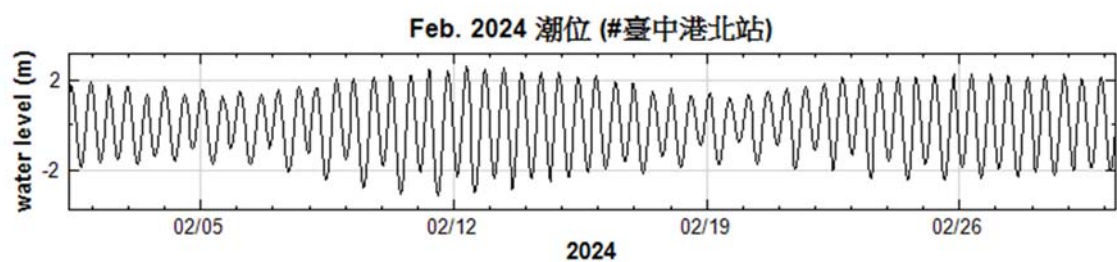
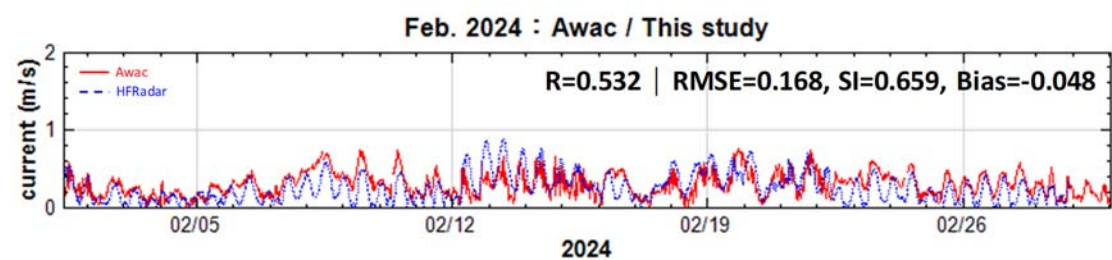
系統性偏差。

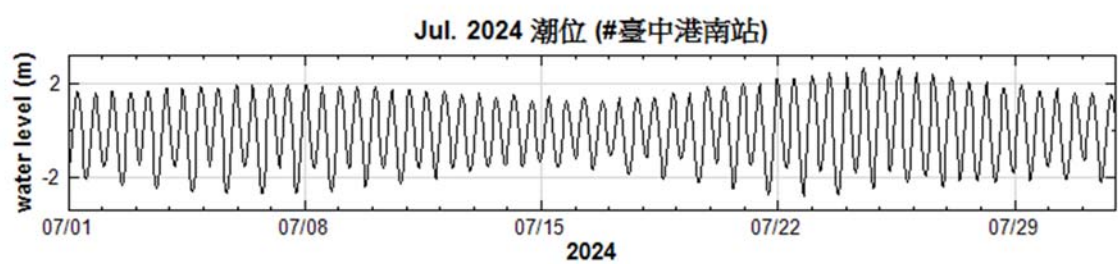
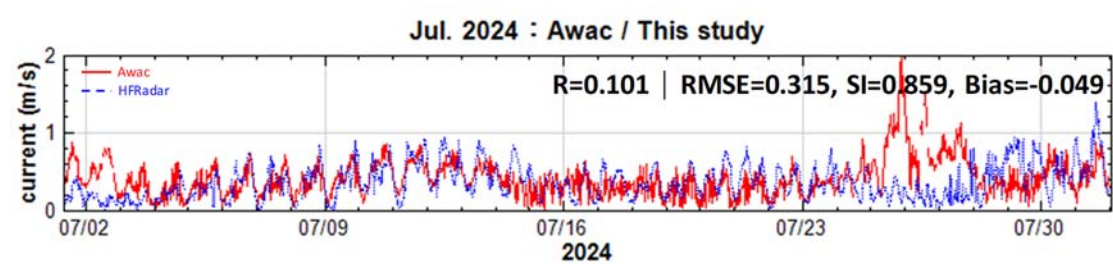
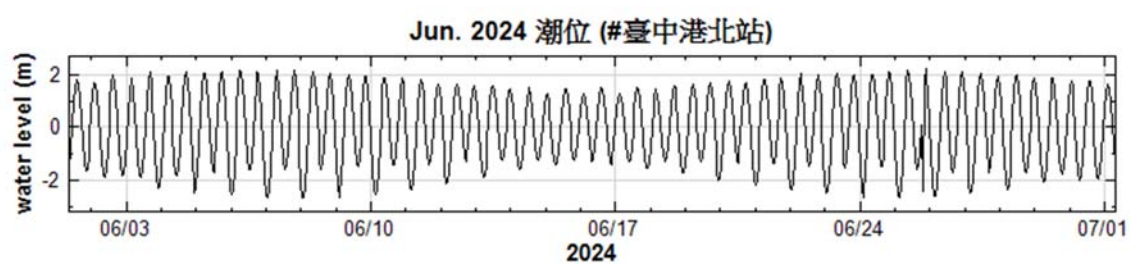
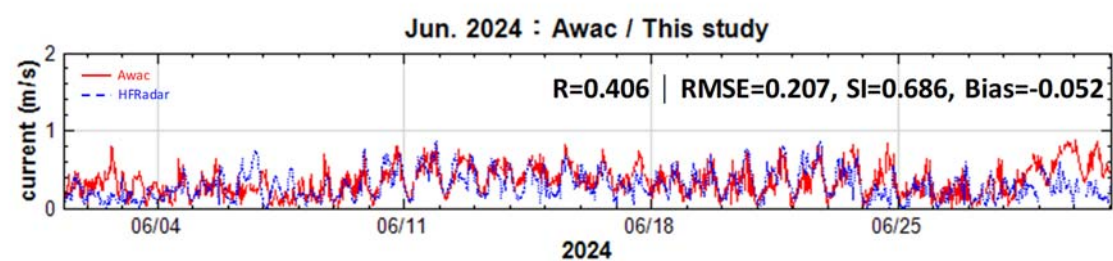
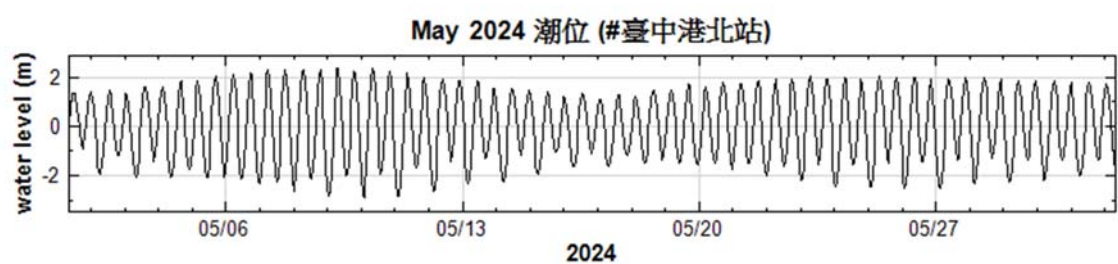
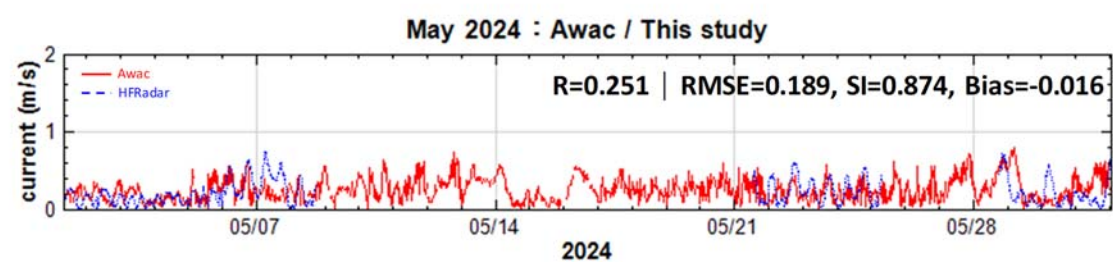
(六) 113 年 6 月份的數據顯示，相關性(R) 0.406 回升至中度相關，觀測一致性稍微改善，均方根誤差(RMSE) 為 0.207，高於 5 月份，觀測誤差略有增加；散點因子(SI)為 0.686，誤差約佔數據變異的 68.6%，低於 5 月份，但仍高於 3~4 月份，偏誤(Bias)為 -0.052，負偏差稍微增加，顯示雷達觀測值略低於 Awac 觀測值，無明顯系統性偏差。

(七) 113 年 7 月份的數據顯示，相關性(R) 0.101，為低度相關，雷達觀測結果較差，均方根誤差(RMSE)為 0.315，為 113 年 1~7 月份最高，顯示觀測誤差最大；散點因子(SI)為 0.859，誤差約佔數據變異的 85.9%，高於 6 月份，接近 5 月份的統計數據，顯示雷達觀測結果不夠穩定，偏誤 (Bias) 為 -0.049，雷達觀測值略低於 Awac 觀測值，無明顯系統性偏差。

(八) 113 年 8 月份的數據顯示，相關性(R) 0.096，顯示觀測結果無明顯相關性，均方根誤差(RMSE)為 0.279，低於 7 月份；散點因子(SI)為 0.731，誤差約佔數據變異的 73.1%，較 7 月份低，偏誤 (Bias) 為 -0.002，負偏差接近 0，顯示雷達觀測值略低於 Awac 觀測值，亦無明顯系統性偏差。







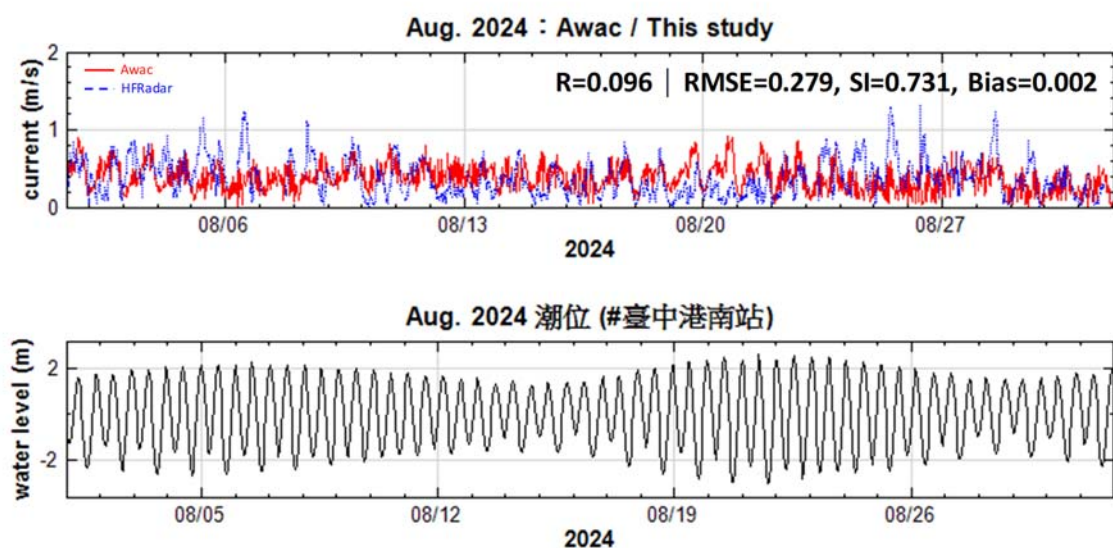


圖 4.7 臺中港 113 年 1~8 月海表面流監測與波流儀比較與潮位圖

數據分析結果總結來說，相關係數 (R) 逐漸下降：1 月份 R 值 0.618，隨著時間推移逐漸下降，到了 8 月份僅剩 0.096，顯示數據之間的相關性逐漸減弱。均方根誤差(RMSE)呈現上升趨勢，誤差由 0.161 (4 月份)上升至 0.315 (7 月份)達到高峰，雷達觀測變化波動較高，8 月份降至 0.279，顯示誤差仍然較大。散點因子(SI)討論變異性變化，SI 於 5 月份急遽上升至 0.874，數據變異性極大，當月測量結果波動劇烈，6 月份 SI 降到 0.686，7 月份 SI 再度上升到 0.859，偏誤(Bias)數值始終維持在 -0.081 至 0.003 之間，沒有明顯的系統性偏誤，如表 4-1 所示。

表 4-1 雷達海表面流觀測情形統計分析

指標	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月
R(相關係數)	0.618	0.532	0.581	0.562	0.251	0.406	0.101	0.096
RMSE(均方根誤差)	0.217	0.168	0.174	0.161	0.189	0.207	0.315	0.279
SI(散點因子)	0.766	0.659	0.522	0.525	0.874	0.686	0.859	0.731
Bias(偏誤)	-0.081	-0.048	-0.009	0.003	-0.016	-0.052	-0.049	0.002
說明	1-4 月份相關性較穩定，誤差逐漸降低，測量準確度提升。 5-7 月份相關性下降，誤差與變異性增加，雷達觀測不穩定。 8 月份誤差與變異性下降，但相關性最低，雷達觀測精準度仍需改善							

圖 4.8 至圖 4.15 分別顯示 113 年 1 月至 8 月臺中港雷達與底碇式 (AWAC) 海表面流的流向玫瑰圖。冬季流向(1~2 月)統計分析說明為，圖 4.8 為 113 年 1 月份的流向玫瑰圖，雷達觀測主要流向為西向(W) 28.1%，其次為東向(E) 21.2% 及東北東(ENE) 20%；AWAC 觀測則以西南西(WSW) 26.5% 及南西(SW) 24.0% 為主。圖 4.9 為 113 年 2 月份的流向玫瑰圖，雷達觀測主要流向為西向(W) 24.7%，其次為東向(E) 23.7% 及東北東(ENE) 20%；AWAC 觀測主要流向為西南西(WSW) 23.9% 及南西(SW) 22.4%。

春季流向(3~5 月)統計分析說明為，圖 4.10 為 113 年 3 月份的流向玫瑰圖，雷達觀測主要流向為東向(E) 24.0%，其次為東南東(ESE) 23.1% 及西向(W) 17.2%；AWAC 觀測主要流向為西南西(WSW) 19.5% 及北(N) 16.0%。圖 4.11 為 113 年 4 月份的流向玫瑰圖，雷達觀測主要流向為東南東(ESE) 38.6%，其次為東向(E) 30.5% 及東北東(ENE) 10.1%；AWAC 觀測則以東北東(ENE) 30.4% 及東向(E) 20.3% 為主。圖 4.12 為 113 年 5 月份的流向玫瑰圖，雷達觀測主要流向為東向(E) 14.1%，其次為東北東(ENE) 11.6% 及西向(W) 3.5%；AWAC 觀測主要流向為東向(E) 21.1% 及東北東(ENE) 16.8%。

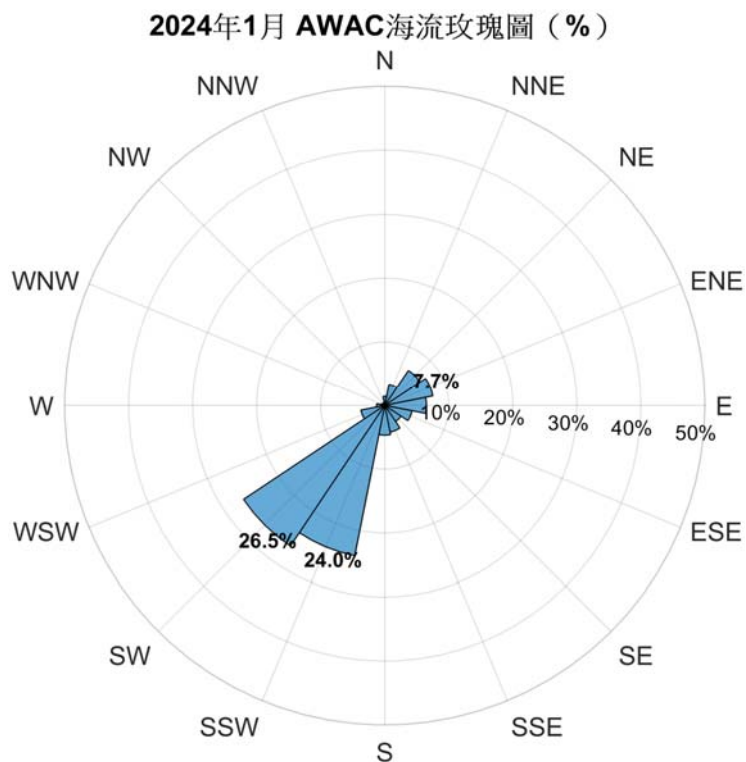
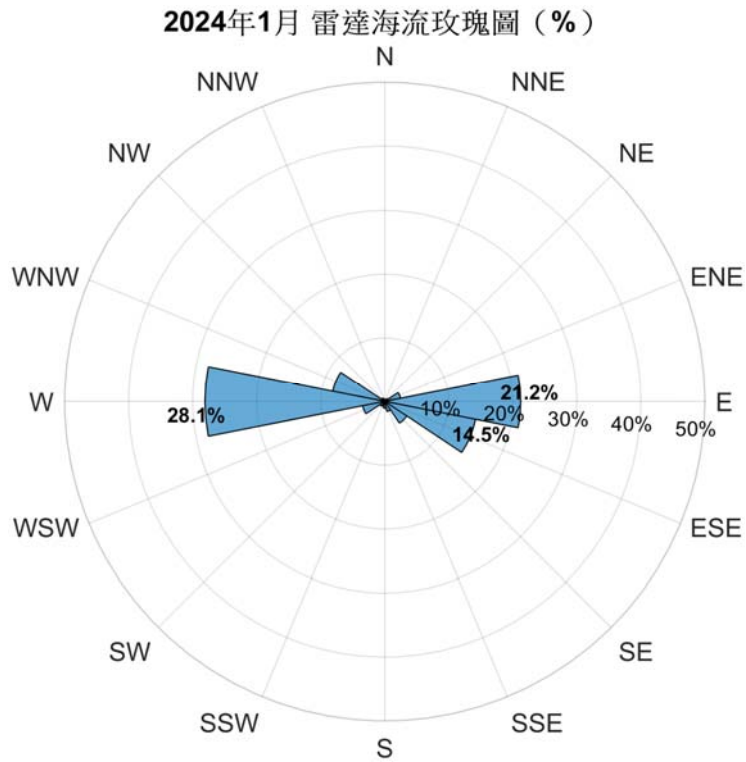
夏季(6~8 月)流向統計分析說明為，圖 4.13 為 113 年 6 月份的流向玫瑰圖，雷達觀測主要流向為東向(E) 33.0%，其次為東南東(ESE) 21.9% 及西向(W) 13.5%；AWAC 觀測主要流向為東北東(ENE) 30.7% 及東向(E) 28.8%。圖 4.14 為 113 年 7 月份的流向玫瑰圖，雷達觀測主要流向為東向(E) 26.0%，其次為東南東(ESE) 21.6% 及北向(N) 18.9%；AWAC 觀測主要流向為東向(E) 39.3% 及東北東(ENE) 32.4%。圖 4.15 為 113 年 8 月份的流向玫瑰圖，雷達觀測主要流向為東向(E) 32.0%，其次為東北東(ENE) 23.4% 及北向(N) 11.6%；AWAC 觀測則以東向(E) 42.7% 及東北東(ENE) 33.4% 為主。

透過 113 年 1 ~ 8 月海流玫瑰圖，觀察以下趨勢，(1)冬季雷達觀測流向較為分散，出現西向(W)與東向(E)海流，與 AWAC 觀測則主向西南西(WSW)不同，顯示較不穩定的流向模式，底碇式觀測與雷達觀測可能受到冬季東北季風影響，導致較大的變異性。(2)春季雷達觀測 4 月的東南東(ESE)流向比例達 38.6%，與 AWAC 觀測則海流主向東北東(ENE)不

同，雷達觀測與底碇式觀測流向差異。(3)夏季觀測 7 月、8 月雷達觀測與底碇式觀測東北東 (ENE) 流向增加，與東 (E) 方向交錯，尤其 8 月份 AWAC 數據顯示 42.7% 海流往東 (E)，可能受夏季風及颱風影響，造成穩定東向流，流向統計分析整理如表 4-2 所示。

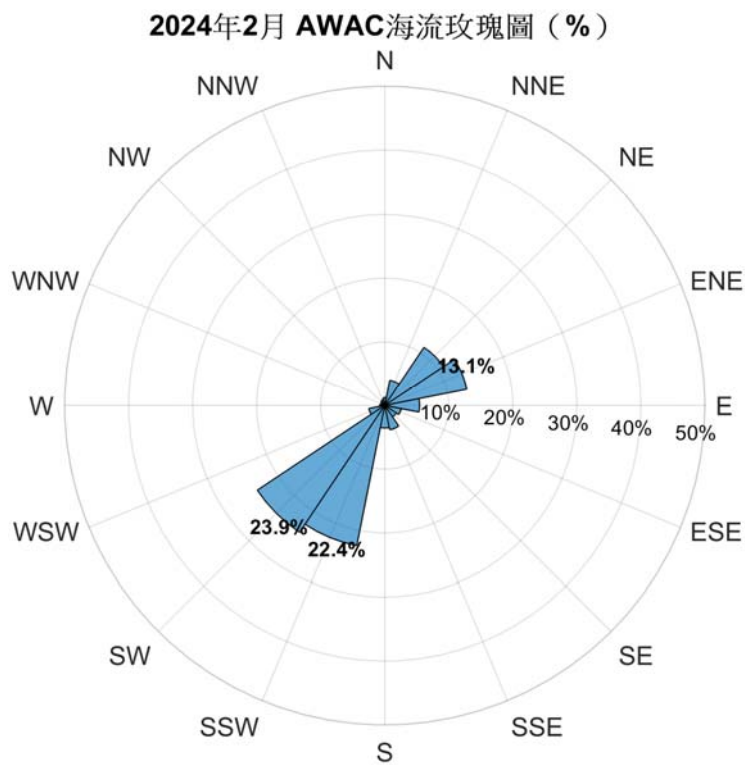
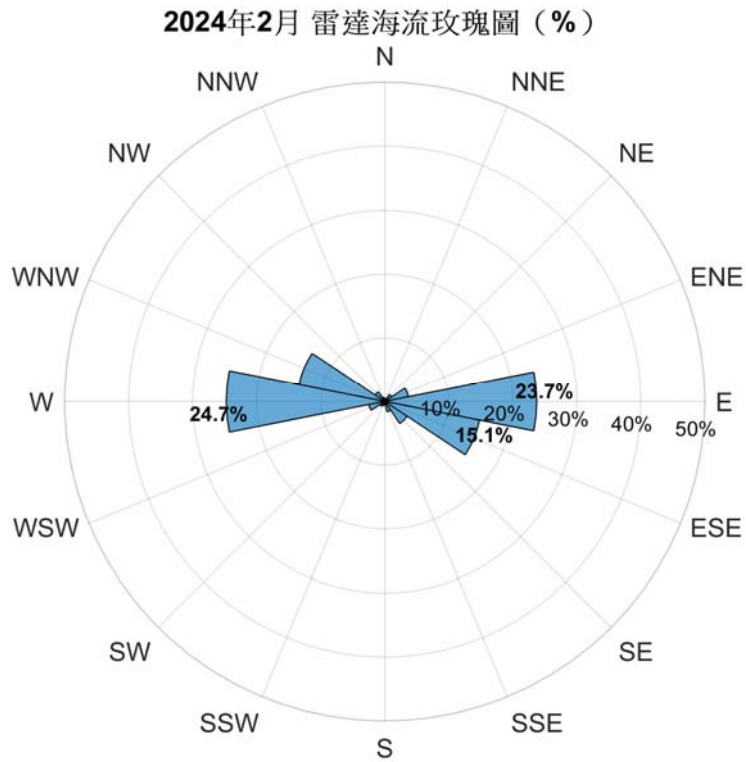
表 4-2 雷達與底碇式海表面流觀測情形之流向統計分析

月份	雷達 主向	佔比 (%)	雷達 次流向	佔比 (%)	AWAC 主向	佔比 (%)	AWAC 次流向	佔比 (%)
1 月	西(W)	22.5	東(E)	21.3	西南西 (WSW)	21.8	南(S)	19.6
2 月	西(W)	24.7	東(E)	23.7	西南西 (WSW)	23.9	南(S)	22.4
3 月	東(E)	24.0	東南東 (ESE)	23.1	西(W)	19.5	北(N)	16.0
4 月	東南東 (ESE)	38.6	東(E)	30.5	東(E)	30.4	東北東 (ENE)	20.3
5 月	東(E)	14.1	東北東 (ENE)	11.6	東(E)	21.1	東北東 (ENE)	16.8
6 月	東(E)	33.0	東南東 (ESE)	21.9	東(E)	30.7	東北東 (ENE)	28.8
7 月	東(E)	26.0	東南東 (ESE)	21.6	東(E)	39.3	東北東 (ENE)	32.4
8 月	東(E)	32.0	東北東 (ENE)	23.4	東(E)	42.7	東北東 (ENE)	33.4



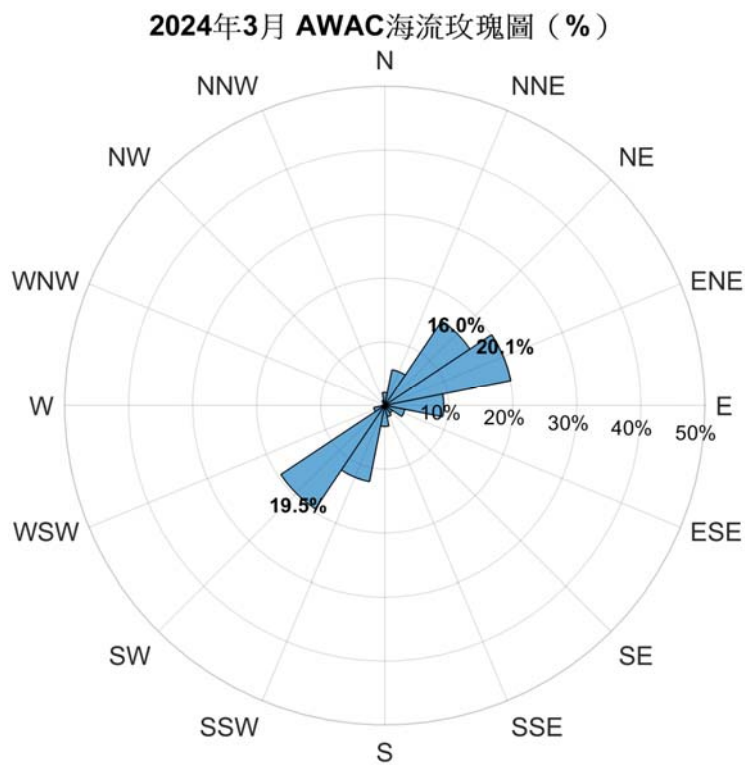
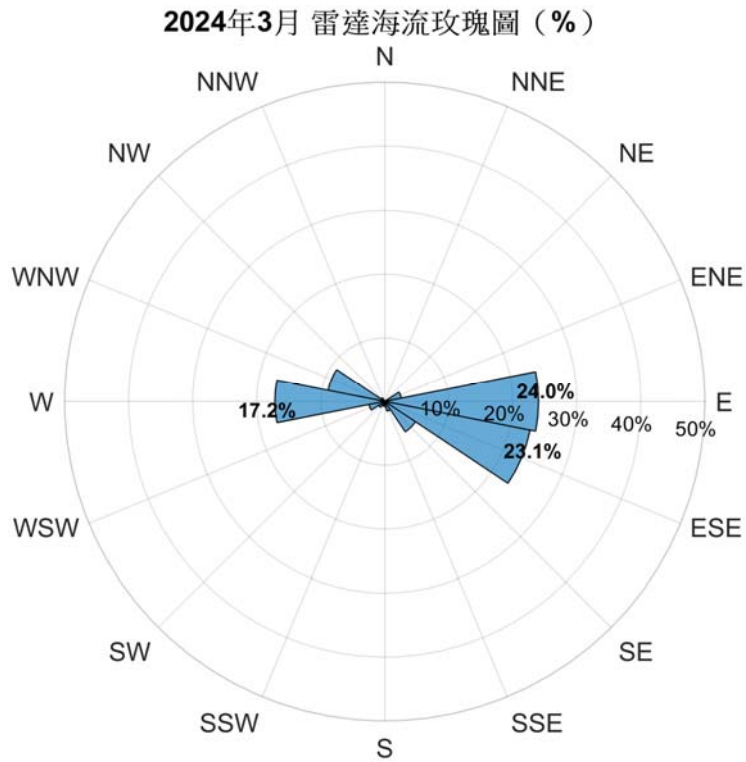
註：(上圖)雷達與(下圖)底碇式海表面流流向

圖 4.8 臺中港 113 年 1 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖



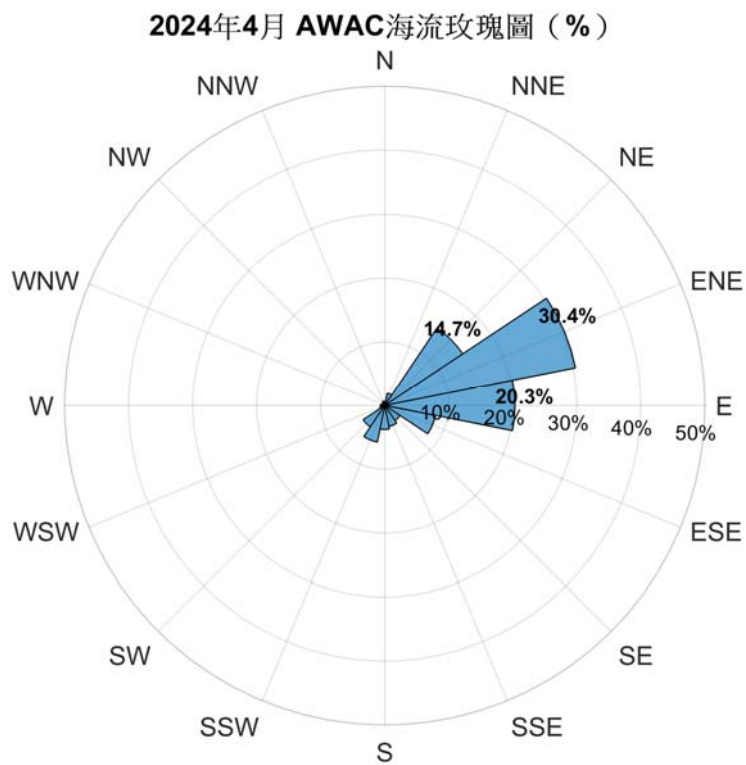
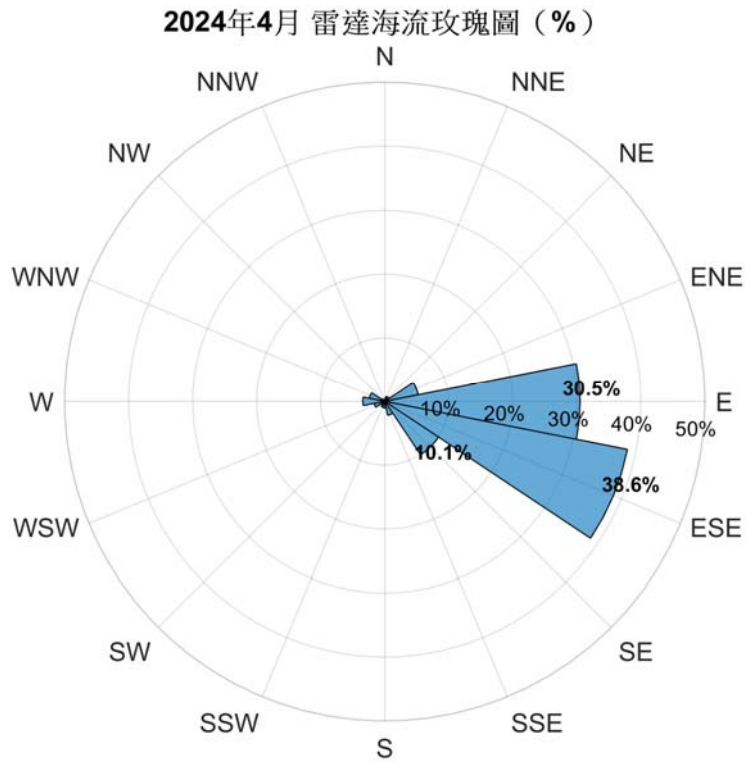
註：(上圖)雷達與(下圖)底碇式海表面流流向

圖 4.9 臺中港 113 年 2 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖



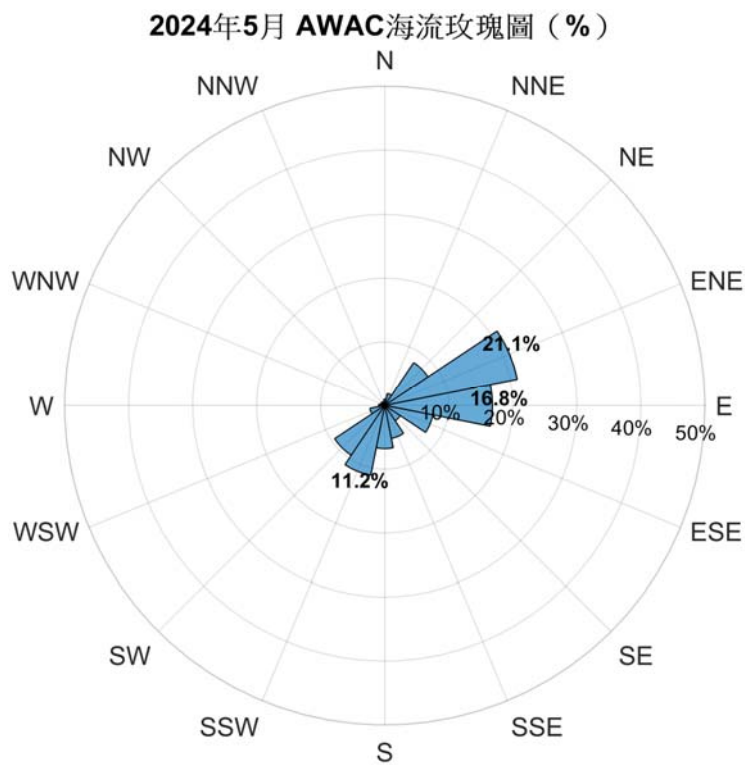
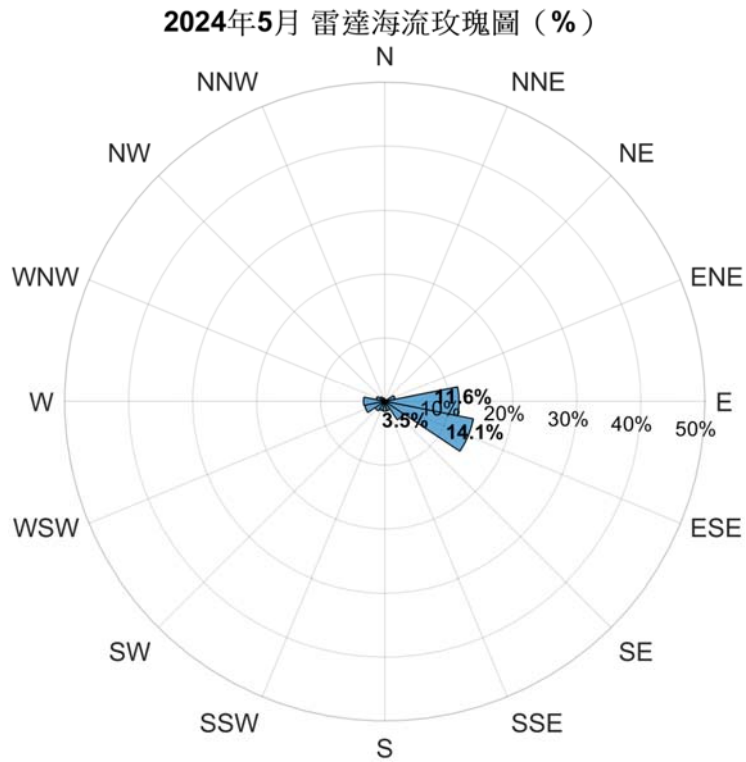
註：(上圖)雷達與(下圖)底碇式海表面流流向

圖 4.10 臺中港 113 年 3 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖



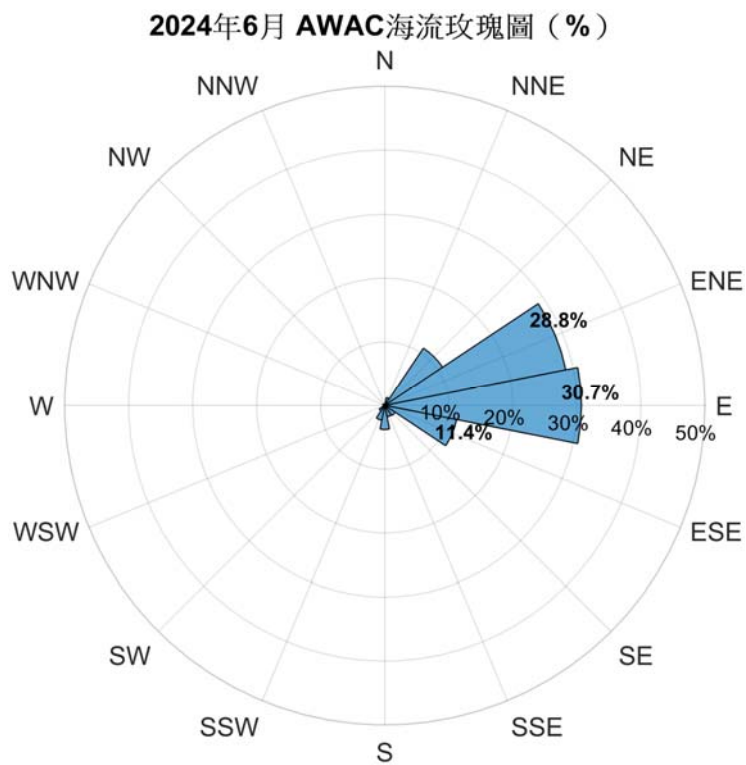
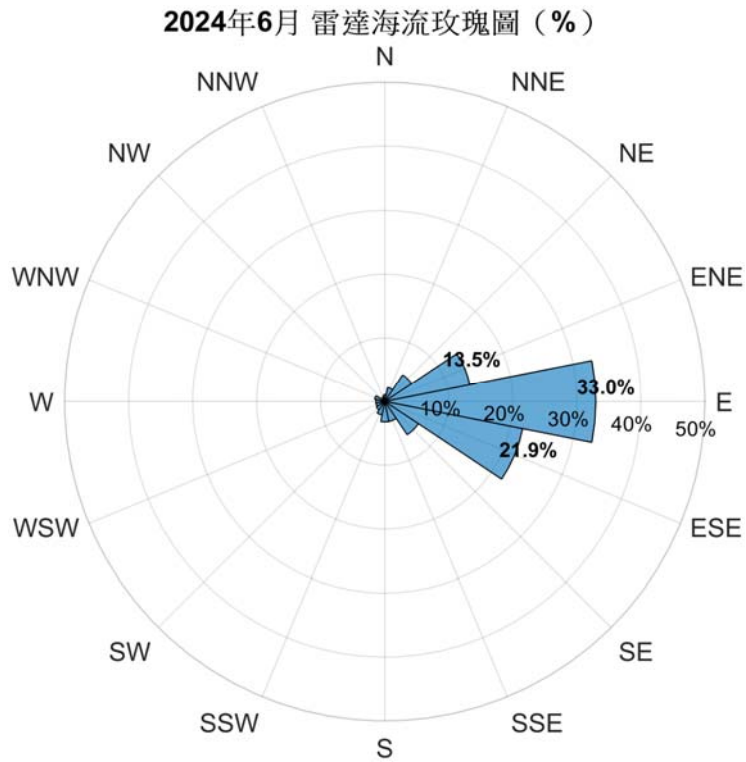
註：(上圖)雷達與(下圖)底碇式海表面流流向

圖 4.11 臺中港 113 年 4 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖



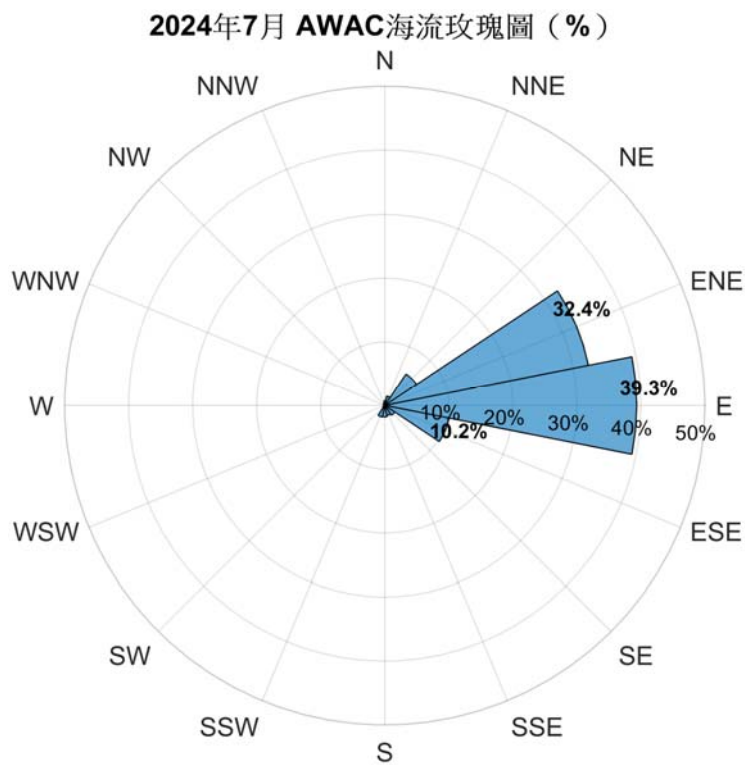
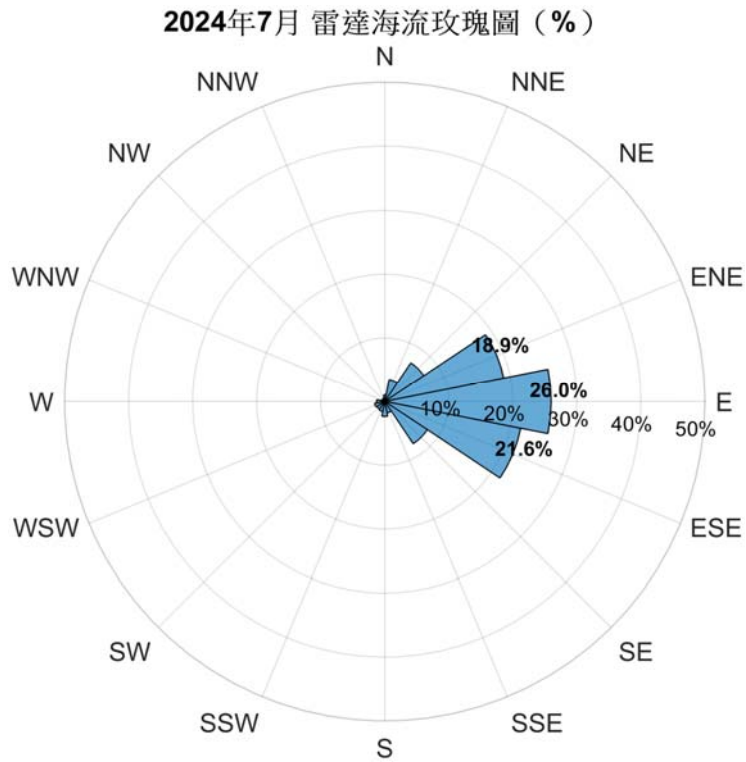
註：(上圖)雷達與(下圖)底碇式海表面流流向

圖 4.12 臺中港 113 年 5 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖



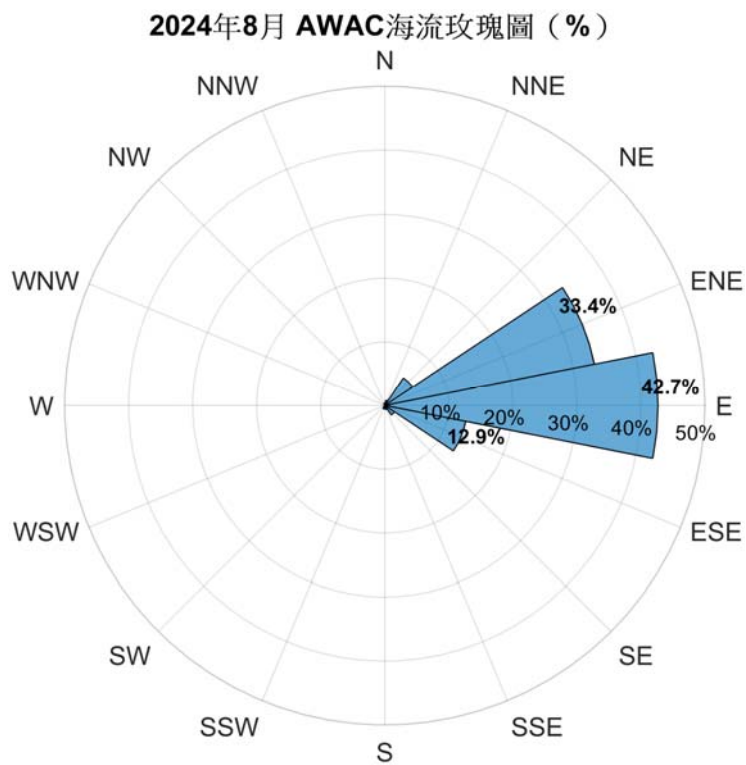
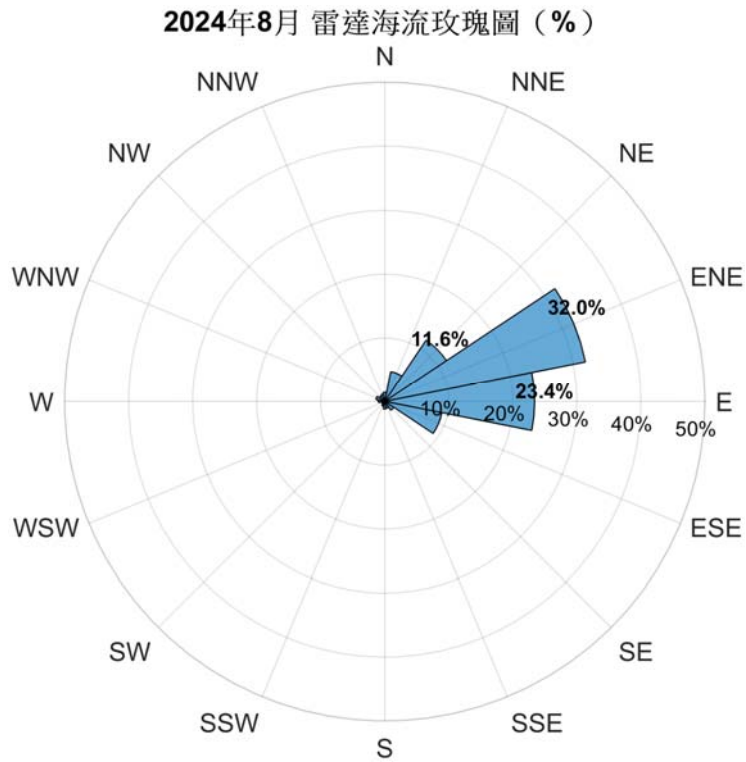
註：(上圖)雷達與(下圖)底碇式海表面流流向

圖 4.13 臺中港 113 年 6 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖



註：(上圖)雷達與(下圖)底碇式海表面流流向

圖 4.14 臺中港 113 年 7 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖



註：(上圖)雷達與(下圖)底碇式海表面流流向

圖 4.15 臺中港 113 年 8 月雷達與底碇式海表面流流向玫瑰圖

第五章 研究分析與探討

本計畫使用之雷達為 107 年於臺中港北防沙堤建置的海洋陣列雷達站(臺中港海洋雷達北站，HTCN)，以及 110 年於臺中火力發電廠放流口建置的第二座海洋陣列雷達站(臺中港海洋雷達南站，HTCS)。數據處理與分析方面，採用運研所與國立中央大學水文與海洋科學研究所以 Matlab 程式語言平台開發的處理程序進行計算。該程序的空間網格點數為 1185 個，其中南北向垂直距離約 34.04 公里，東西向水平距離約 28.23 公里，比較分析則選擇與臺中港佈署的底碇式波流儀較為接近的第 1012 號儲存格(Cell)做為對比點，空間示意圖，如圖 5.1 所示。

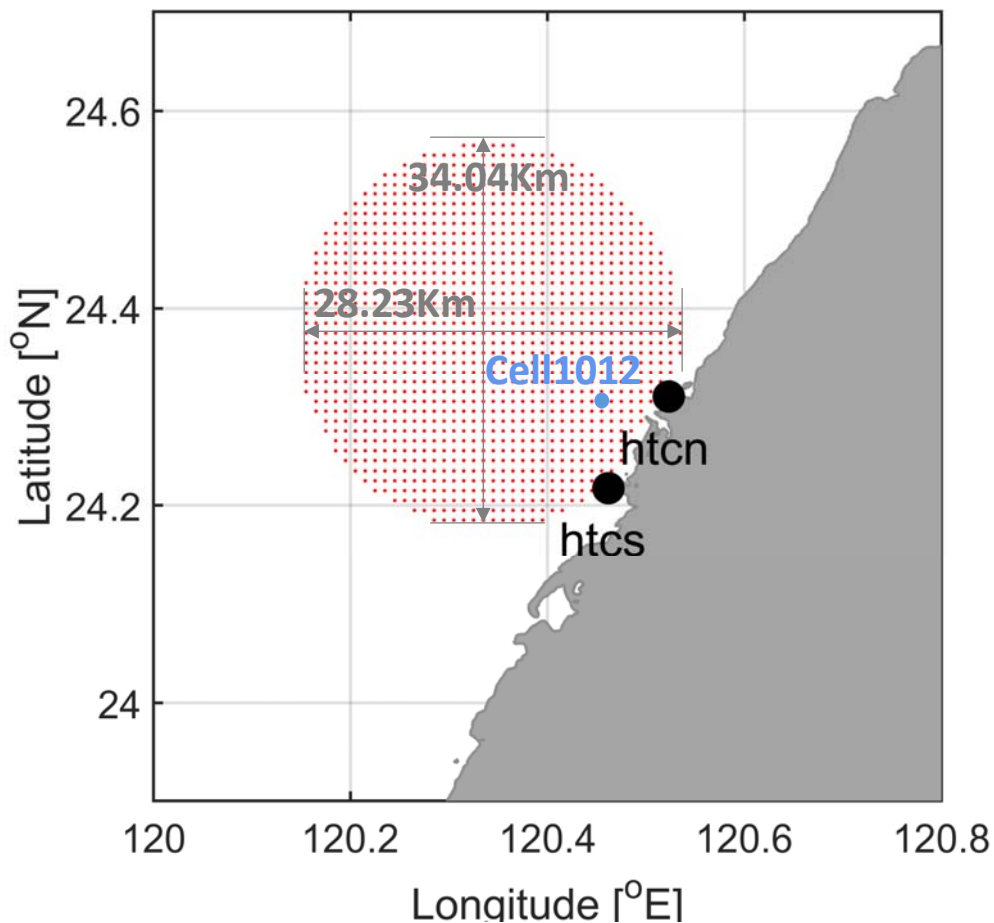


圖 5.1 運研所與國立中央大學開發的 Matlab 處理程序示意圖

本章節討論 113 年度雷達海表面波浪觀測作業情形，並進行比較分析，校驗比對選用運研所佈署於臺中港北堤附近的波流儀(#5)，該儀器為長期性觀測站點，臺中港北防波堤延長工程完成後，於 2003 年 7 月設

置完成，該測站距離北防波堤堤頭約 150 m、設置水深約 25 m 處，蒐集逐時海表波浪，儀器平面位置與雷達觀測範圍圖，如圖 5.2 所示。

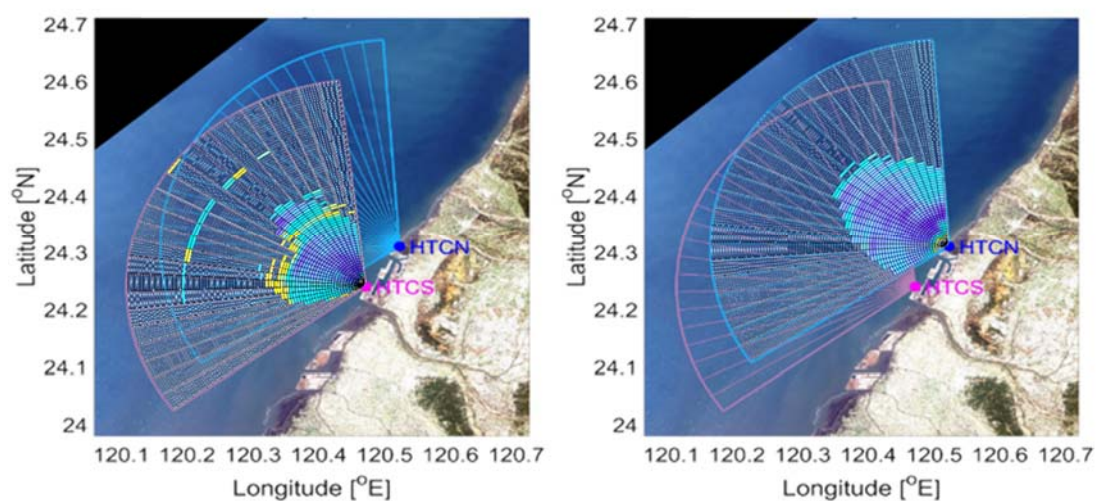


圖 5.2 臺中港各測站儀器平面配置與雷達觀測範圍

5.1 本年度觀測成果

本計畫完成 113 年度臺中港港灣環境觀測作業，特性分析則以臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算示性波高(Hs)與波浪週期(Tm)數值進行比較，此外，以該底碇式(AWAC)平均週期時間序列與本計畫雷達反

演算平均週期(T_m)數值進行相關性分析，由於 113 年 9 月份後資料雷達進行檢修維修，本計畫僅分析 113 年 1~8 月資料，逐月比較資料，如圖 5.3~圖 5.18 所示。

(一) 1 月份波高與波浪週期統計分析

示性波高(H_s)：

透過 1 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 1 月份波高相關性(R)高達 0.882，顯示兩者觀測結果具良好一致性，觀測趨勢相當吻合，均方根誤差(RMSE)為 0.641，代表雷達觀測有些許誤差，偏誤(Bias) 0.439 顯示雷達北站相較於 AWAC 觀測數據稍高。

相較之下，1 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 1 月份波高相關性(R)為 0.686 較北站低，顯示觀測一致性較差，其均方根誤差(RMSE)高達 1.037，顯示觀測誤差較大，波高估計準確度較低。偏誤(Bias) 0.574 亦高於北站，顯示雷達南站可能存在高估波高情形。

1 月份雷達合成數據(L3)與 AWAC 觀測數據相比，波高合成數具相關性(R)為 0.890，比任何單一雷達站更好，顯示合成數據更能準確地反映真實波高，均方根誤差(RMSE)僅為 0.343 低於南北兩站，顯示 1 月份合成數具誤差顯著減少，偏誤(Bias) -0.057 幾乎趨近於 0，顯示 1 月份雷達合成數據未有明顯高估或低估情況，關於 2024 年 1 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算示性波高(H_s)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.3 所示。

波浪週期(T_m)：

透過 1 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 1 月份波浪週期相關性(R)為 0.344，顯示兩者觀測結果未有顯著相關性，觀測趨勢仍具參考價值，均方根誤差(RMSE)為 1.298，代表雷達觀測有些許誤差，而偏誤(Bias) 1.110，則顯示雷達北站觀測值相較於 AWAC 波浪週期明顯高估情形。

相較之下，1 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 1 月份波浪週期相關性(R)為 0.254，較北站更低，顯示南站觀測一

致性更差，其均方根誤差(RMSE)為 1.362，顯示觀測誤差較北站更大，波浪週期估計準確度較低。偏誤(Bias) 1.148 亦高於北站，顯示雷達南站可能存在高估波浪週期情形。

1 月份雷達合成數據(L3)與 AWAC 觀測數據相比，波浪週期合成數據相關性(R)為 0.376，僅比單一雷達站稍微改善，顯示合成數據仍未有顯著相關性，均方根誤差(RMSE)僅為 0.836，低於南北兩站，顯示 1 月份合成數據的誤差顯著減少，但波浪週期仍然偏高，偏誤(Bias) 0.518，顯示 1 月份雷達合成數據仍存在一定的偏高情形，僅較單一雷達站稍微準確，關於 2024 年 1 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(T_m)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.4 所示。

(二) 2 月份波高與波浪週期統計分析

示性波高(H_s)：

透過 2 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 2 月份波高相關性(R)高達 0.809，顯示兩者觀測結果趨勢相當吻合，均方根誤差(RMSE)為 0.759，代表雷達觀測有些許誤差，而偏誤(Bias) 0.496，顯示雷達北站相較於 AWAC 觀測數據稍高。

相較之下，2 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 2 月份波高相關性(R)為 0.711，較北站低，顯示觀測一致性較差，其均方根誤差(RMSE)高達 0.991，顯示觀測誤差較北站大，波高估計準確度較低。偏誤(Bias) 0.682 亦高於北站，顯示雷達南站可能存在高估波高情形。

2 月份兩站雷達合成數據(L3)與 AWAC 觀測數據相比，波高合成數據相關性(R)為 0.836，比任何單一雷達站更好，顯示合成數據更能接近真實波高，均方根誤差(RMSE)僅為 0.443，低於南北兩站，顯示 2 月份合成數據誤差較低，偏誤(Bias) 0.046 幾乎趨近於 0，顯示 2 月份雷達合成數據合理，未有明顯高估或低估情況，關於 2024 年 2 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算示性波高(H_s)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.5 所示。

波浪週期(T_m)：

透過 2 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 2 月份波浪週期相關性(R)僅為 0.111，顯示觀測結果未有顯著相關性。均方根誤差(RMSE)為 1.906，顯示雷達觀測存在較大誤差，而偏誤(Bias) 1.536，則顯示雷達北站觀測值相較於 AWAC 波浪週期明顯高估情形。

相較之下，2 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 2 月份波浪週期相關性(R)為 0.176，略高於北站，但仍顯示觀測未有顯著相關性。均方根誤差(RMSE)為 1.818，顯示觀測誤差仍較大，波浪週期估計準確度偏低，雖然偏誤 (Bias) 1.436 亦較北站稍低，但仍顯示雷達南站存在波浪週期高估情形。

2 月份雷達合成數據 (L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波浪週期合成數據相關性(R)為 0.141，介於兩雷達站，呈現未有顯著相關性。均方根誤差(RMSE)為 1.397，低於南北兩站，顯示 2 月份合成數據的誤差有所降低，但波浪週期仍然偏高，偏誤(Bias) 0.914，顯示 2 月份雷達合成數據仍存在一定的的高估情形，僅較單一雷達站稍微準確，關於 2024 年 2 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(Tm)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.6 所示。

(三) 3 月份波高與波浪週期統計分析

示性波高(Hs)：

透過 3 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 3 月份波高相關性(R)高達 0.855，顯示兩者觀測結果趨勢相當良好，均方根誤差(RMSE)為 0.654，代表雷達觀測有些許誤差，而偏誤(Bias) 0.427，顯示雷達北站相較於 AWAC 觀測數據稍高。

相較之下，3 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 3 月份波高相關性(R)為 0.807，較 1 月份南站相關性有所提升，顯示南站觀測數據的一致性有所改善。然而，均方根誤差(RMSE)仍達 0.792，代表觀測誤差仍然較大，波高估計準確度仍不如北站。偏誤(Bias) 0.556 亦高於北站，顯示南站仍存在高估波高情形。

3 月份兩站雷達合成數據(L3)與 AWAC 觀測數據相比，波高合成數據相關性(R)為 0.865，比任何單一雷達站更好，顯示合成數據更

能準確地反映真實波高，均方根誤差(RMSE)僅為 0.399，低於南北兩站，顯示 3 月份合成數據的誤差顯著減少，偏誤(Bias) 0.044 幾乎趨近於 0，顯示 3 月份雷達合成數據未有明顯高估或低估情況，關於 2024 年 3 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算示性波高(Hs)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.7 所示。

波浪週期(T_m)：

透過 3 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 3 月份波浪週期相關性(R)為 0.253，趨勢相近，但觀測相關性較差，均方根誤差(RMSE)為 2.010，顯示雷達觀測存在較大誤差，而偏誤(Bias) 1.669，則顯示雷達北站觀測值相較於 AWAC 波浪週期明顯高估情形。

相較之下，3 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 3 月份波浪週期相關性(R)為 0.275，略高於北站，趨勢亦相近，但觀測相關性較差，均方根誤差(RMSE)為 1.856，顯示觀測仍存在較大誤差，波浪週期估計準確度偏低，雖然偏誤(Bias) 1.524 亦較北站稍低，但仍顯示雷達南站存在波浪週期高估情形。

3 月份雷達合成數據(L3)與 AWAC 觀測數據相比，波浪週期合成數據相關性(R)為 0.317，趨勢亦相近，略優於單一雷達站，但觀測相關性仍差，均方根誤差(RMSE)為 1.474，低於南北兩站，顯示 3 月份合成數據的誤差有所降低，波浪週期估計有所改善，偏誤(Bias)為 1.060，顯示 3 月份雷達合成數據亦存在一定的高估情形，但較單一雷達站更為準確，關於 2024 年 3 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(T_m)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.8 所示。

(四) 4 月份波高與波浪週期統計分析

示性波高(Hs)：

透過 4 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 4 月份波高相關性(R)為 0.679，較 1~3 月份相關性(R) 0.809~0.882 下降，顯示北站雷達與 AWAC 之間觀測相關性逐漸降低，均方根誤差(RMSE)為 0.689，顯示雷達觀測存在些微誤差，偏誤(Bias) 0.480，

顯示雷達北站相較於 AWAC 觀測數據稍高。

相較之下，4 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 4 月份波高相關性(R)為 0.596，較 1~3 月份相關性(R) 0.686~0.807，顯示南站雷達與 AWAC 的觀測相關性亦逐漸降低。均方根誤差(RMSE)為 0.754，顯示雷達觀測存在些微誤差，而偏誤(Bias) 0.508 顯示南站雷達仍存在波浪觀測高估情形。

4 月份兩站雷達合成數據(L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波高合成數據相關性(R)為 0.706，比南北單站雷達皆高，顯示合成數據仍能提供較準確的波高估計，均方根誤差(RMSE)僅為 0.418，低於北站與南站，顯示 4 月份合成數據的誤差顯著減少，偏誤(Bias) 0.163，較任一單站雷達數據良好，但 4 月份雷達合成數據仍有輕微高估情況，關於 2024 年 4 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算示性波高(Hs)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.9 所示。

波浪週期(Tm)：

透過 4 月份雷達北站(HTCN) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 4 月份波浪週期相關性(R)為 0.238，趨勢相近，但相關性較低，且較前幾個月無明顯改善，均方根誤差(RMSE)為 2.394，顯示雷達觀測誤差變大很多，而偏誤(Bias) 2.078，則顯示雷達北站觀測值相較於 AWAC 波浪週期明顯高估情形。

相較之下，4 月份雷達南站 (HTCS) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 4 月份波浪週期相關性(R)為 0.384，趨勢正確，但觀測結果仍未有顯著相關性。均方根誤差(RMSE)為 1.946，顯示觀測誤差仍較大，波浪週期估計準確度偏低，偏誤(Bias) 1.699 則顯示雷達南站仍存在波浪週期高估情形。

4 月份雷達合成數據 (L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波浪週期合成數據相關性(R)為 0.264，略高於北站，但低於南站，顯示合成數據未能有效提升觀測相關性。均方根誤差(RMSE)為 1.808，低於北站與南站，顯示 4 月份合成數據的誤差有所降低。偏誤(Bias) 為 1.463，顯示 4 月份雷達合成數據仍存在一定的高估情形，但較單一雷達站更為準確，關於 2024 年 4 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫

雷達演算平均週期(T_m)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.10 所示。

(五) 5 月份波高與波浪週期統計分析

示性波高(H_s)：

透過 5 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 5 月份波高相關性(R)為 0.559，較 4 月份相關性(R) 0.679 更低，顯示北站雷達與 AWAC 之間的觀測結果變差，均方根誤差(RMSE) 0.727，較 4 月份略為升高，顯示雷達觀測誤差些微增加，而偏誤(Bias) 0.378，顯示雷達北站相較於 AWAC 觀測數據稍高。

相較之下，5 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 5 月份波高相關性(R)為 0.280，顯示南站雷達與 AWAC 之間的觀測相關性大幅下降，均方根誤差(RMSE) 為 0.858，亦較 4 月份均方根誤差略微升，顯示觀測誤差稍微增加，波高估計準確度較低，偏誤(Bias) 0.422，顯示南站雷達些微高估波高情形。

5 月份兩站雷達合成數據(L3)與 AWAC 觀測數據相比，波高合成數據相關性(R) 為 0.595，較南北單站雷達相關性高，均方根誤差(RMSE) 僅為 0.503，低於北站與南站，顯示合成數據的誤差較少，而偏誤(Bias) 0.004，幾乎趨近於 0，顯示 5 月份雷達合成數據未有明顯高估或低估情況，關於 2024 年 5 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算示性波高(H_s)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.11 所示。

波浪週期(T_m)：

透過 5 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 5 月份波浪週期相關性(R) 僅為 0.012，雖趨勢相近，但顯示觀測數據幾乎無相關性，均方根誤差(RMSE) 為 2.123，顯示雷達觀測誤差較大，而偏誤 (Bias) 1.750，則顯示雷達北站觀測值相較於 AWAC 波浪週期明顯高估情形。

相較之下，5 月份雷達南站 (HTCS) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 5 月份波浪週期相關性(R) 僅為 0.001，雖趨勢相近，但亦顯示觀

測數據未有顯著相關性，均方根誤差(RMSE) 為 2.217，顯示觀測誤差大，波浪週期估計準確度低，偏誤 (Bias) 1.833 則顯示雷達南站仍存在波浪週期明顯高估情形。

5 月份雷達合成數據 (L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波浪週期合成數據相關性(R) 為 0.049，雖略高於單站雷達，但仍未能有效提升觀測相關性，均方根誤差(RMSE) 為 1.543，合成數據誤差低於南北兩站，雖誤差有所降低，但觀測誤差仍大。偏誤(Bias) 1.103，顯示 5 月份雷達合成數據仍然高估於 AWAC 觀測數據，關於 2024 年 5 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(T_m)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.12 所示。

(六) 6 月份波高與波浪週期統計分析

示性波高(H_s)：

透過 6 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 6 月份波高相關性(R) 僅為 0.085，顯示北站雷達與 AWAC 之間的觀測一致性大幅下降，均方根誤差(RMSE)為 0.990，較 5 月份略為升高進一步上升，顯示雷達觀測誤差明顯增加，而偏誤(Bias) 0.669，顯示雷達北站相較於 AWAC 觀測數據稍高。

相較之下，6 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 6 月份波高相關性(R) 為 0.162，顯示南站雷達與 AWAC 之間的觀測術具相關性低，均方根誤差(RMSE)為 1.083，高於 5 月份，顯示觀測均方根誤差，且誤差進一步增加，波高估計準確度更低，偏誤(Bias) 0.642，顯示南站雷達同樣存在波高高估情形。

6 月份兩站雷達合成數據(L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波高合成數據相關性(R) 為 0.060，顯示即使合成數據也未能有效提升觀測一致性，均方根誤差(RMSE)為 0.713，低於雷達北站(RMSE=0.990)與雷達南站(RMSE =1.083)，顯示合成數據的誤差較單站數據小，但仍高於前幾個月的 L3 誤差，偏誤(Bias) 0.316，雖較單站數據低，但仍未達到合理的低估或高估範圍，關於 2024 年 6 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算示性波高(H_s)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.13 所示。

波浪週期(T_m)：

透過 6 月份雷達北站(HTCN) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 6 月份波浪週期相關性(R) 僅為 0.066，顯示觀測結果幾乎無相關性，均方根誤差(RMSE)為 3.150，顯示雷達觀測誤差較大，而偏誤(Bias) 2.767，則顯示雷達北站觀測值相較於 AWAC 波浪週期明顯高估情形。

相較之下，6 月份雷達南站(HTCS) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 6 月份波浪週期相關性(R)為 0.178，顯示觀測未有顯著相關性，均方根誤差(RMSE)為 2.551，顯示觀測誤差仍較大，波浪週期估計準確度偏低，偏誤(Bias) 2.174 則顯示雷達南站亦存在波浪週期明顯高估情形。

6 月份雷達合成數據 (L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波浪週期合成數據相關性(R) 為 0.080，略高於單站雷達，但仍未能有效提升觀測相關性，均方根誤差(RMSE)為 2.528，顯示觀測誤差仍未達到合理範圍，偏誤(Bias)為 2.118，顯示 6 月份雷達合成數據仍存在高估情形，關於 2024 年 6 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(T_m)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.14 所示。

(七) 7 月份波高與波浪週期統計分析

示性波高(H_s)：

透過 7 月份雷達北站(HTCN)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 7 月份波高相關性(R)僅為 0.053，顯示北站雷達與 AWAC 之間的觀測相關性極低，均方根誤差(RMSE)為 1.479，較 6 月份均方根誤差增加，顯示雷達觀測誤差進一步擴大，而偏誤(Bias) 0.719，顯示雷達北站相較於 AWAC 觀測數據稍高。

相較之下，7 月份雷達南站(HTCS)與 AWAC 觀測數據相比，兩者 7 月份波高相關性(R)為 0.357，雖較 6 月份相關性好，但仍顯示南站雷達與 AWAC 之間的觀測相關性低，均方根誤差(RMSE)為 1.387，亦較 6 月份均方根誤差進一步增加，顯示觀測誤差仍然較大，偏誤(Bias) 0.916，顯示南站雷達的波高明顯高估，可能受到信號雜訊或環境影響。

7 月份兩站雷達合成數據(L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波高合成數據相關性(R)為 0.083，仍然處於極低相關狀態，顯示即使合成數據也未能有效提升觀測相關性，均方根誤差(RMSE)為 1.110，低於雷達北站(RMSE =1.479)與雷達南站 (RMSE =1.387)，顯示合成數據的誤差較單站數據小，但仍高於前幾個月 L3 合成數據的誤差，偏誤(Bias) 0.373，雖較單站數據低，但仍顯示波高估計的準確度不足，關於 2024 年 7 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算示性波高(Hs)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.15 所示。

波浪週期(Tm)：

透過 7 月份雷達北站(HTCN) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 7 月份波浪週期相關性(R)僅為 0.003，顯示觀測結果幾乎無相關性，均方根誤差(RMSE)更是高達 3.092，雷達觀測誤差變大，而偏誤(Bias) 2.540，則顯示雷達北站觀測值相較於 AWAC 波浪週期明顯高估情形。

相較之下，7 月份雷達南站(HTCS) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 7 月份波浪週期相關性(R) 為 0.040，顯示觀測未有顯著相關性。均方根誤差 (RMSE)為 2.710，觀測誤差亦過大，波浪週期估計準確度低，偏誤 (Bias) 2.171 則顯示雷達南站仍存在波浪週期高估的情形。

7 月份雷達合成數據(L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波浪週期合成數據相關性(R) 為 0.001，觀測結果亦幾乎無相關性，均方根誤差(RMSE)為 2.445，觀測誤差大，偏誤(Bias)為 1.838，顯示 7 月份雷達合成數據仍存在高估情形，關於 2024 年 7 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(Tm)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.16 所示。

(八) 8 月份波高與波浪週期統計分析

示性波高(Hs)：

透過 8 月份雷達北站(HTCN) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 8 月份波高相關性(R)僅為 0.010，顯示北站雷達與 AWAC 之間的觀測一致性極低，均方根誤差(RMSE)為 0.976，雖較 7 月份均方根誤差有所

下降，但仍然顯示較大的誤差，而偏誤(Bias) 0.752，顯示雷達北站相較於 AWAC 觀測數據稍高。

相較之下，8 月份雷達南站(HTCS) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 8 月份波高相關性(R)僅為 0.001，南站雷達與 AWAC 之間的觀測相關性極差，均方根誤差(RMSE)為 1.895，顯示觀測誤差仍然很大，波高估計準確度極低，而偏誤(Bias) 1.504，顯示南站雷達的波高高估現象更加明顯。

8 月份兩站雷達合成數據(L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波高合成數據相關性(R)為 0.073，仍然極低，顯示即使合成數據也未能有效提升觀測一致性，均方根誤差(RMSE)為 0.628，低於南北兩站，顯示合成數據的誤差較單站數據小，但仍顯示較大的不確定性。偏誤(Bias) 0.410，雖然較單站數據明顯變低，但仍顯示波高估計準確度不足，關於 2024 年 8 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算示性波高(Hs)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.17 所示。

波浪週期(Tm)：

透過 8 月份雷達北站(HTCN) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 8 月份波浪週期相關性(R) 僅為 0.001，顯示觀測結果幾乎無相關性，均方根誤差(RMSE) 為 3.984，顯示雷達觀測誤差極大，而偏誤 (Bias) 3.641，則顯示雷達北站觀測值相較於 AWAC 波浪週期明顯高估情形。

相較之下，8 月份雷達南站(HTCS) 與 AWAC 觀測數據相比，兩者 8 月份波浪週期相關性(R) 亦為 0.001，觀測未有顯著相關性，均方根誤差(RMSE)為 3.816，顯示觀測誤差極大，波浪週期估計準確度極低，偏誤(Bias) 3.214 則顯示雷達南站存在波浪週期極為高估情形。

8 月份雷達合成數據(L3) 與 AWAC 觀測數據相比，波浪週期合成數據相關性(R) 仍為 0.001，與單站雷達無顯著改善，亦無明顯相關性，均方根誤差(RMSE) 為 3.253，顯示雷達觀測誤差極大，偏誤(Bias)為 2.904，顯示 8 月份雷達合成數據存在高估情形，未明顯改善，關於 2024 年 8 月份臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均

週期(Tm)統計指標評估其相關性與誤差，如圖 5.18 所示。

總括波高而言，致獲以下結論，(1) 113 年 1~3 月份雷達觀測數據表現穩定，雷達北站波高相關性維持在 0.809 至 0.882 之間，顯示與 AWAC 觀測數據具良好相關性，測量誤差相對較小，偏誤亦低，雷達南站相關性則介於 0.686 至 0.807，雖然較雷達北站略低，但整體仍維持一定程度的觀測一致性，雙雷達合成數據相關性穩定於 0.836 至 0.890，顯示合成數據比單站數據更準確，且測量誤差較少。然而，(2) 自 4~5 月份起觀測品質開始下降，雷達北站相關性由 4 月份的 0.679 下降至 5 月份的 0.559，顯示與 AWAC 觀測數據的一致性減弱。雷達南站相關性亦明顯下降，由 4 月份的 0.596 降至 5 月份的 0.280，測量準確度持續降低，偏誤亦呈增大趨勢，雖然合成數據仍優於單站雷達，但其相關性亦降低至 0.595，觀測誤差開始增加。(3) 進入 6~8 月份，觀測數據品質嚴重惡化，雷達北站相關性於 6 月份驟降至 0.085，7 月份進一步降至 0.053，8 月份幾乎無相關性，表示北站雷達觀測結果已與 AWAC 完全不符，雷達南站在 6~8 月間相關性介於 0.001 至 0.357，觀測測量均方根誤差顯著增加，偏誤甚至超過 1.5，未在合理明顯範圍之內，顯示雷達測得的波高明顯高估，雖然合成數據仍優於單站雷達，但 6、7、8 月份觀測結果亦不可靠，誤差與偏誤仍然較大。

總括波浪週期而言，致獲以下結論，(1) 從 2024 年 1 月至 8 月本計畫雷達與 AWAC 的波浪週期觀測結果來看，雷達觀測數據與 AWAC 之間的相關性整體偏低，尤其在 5、6、7、8 月份，相關性幾乎為 0，且部分月份出現顯著高估情形，因此，雷達數據無法有效反映 AWAC 實測波浪週期的趨勢，儘管雷達合成數據在某些月份比單站雷達表現稍佳，但整體來說，仍未能有效提升觀測準確度，誤差依然較大，波浪週期是否存在改善空間，值得後續計畫進一步探討。(2) 合成數據方面而言相關性亦整體偏低，但部分月份略優於單站雷達，均方根誤差與偏誤表示波浪週期準確度低，但探討穩定度部分 1~4 月份觀測數據相對較穩定，然而，進入 5~8 月份，觀測誤差明顯增加，波浪週期觀測趨勢相近，但觀測數據表現不盡理想。

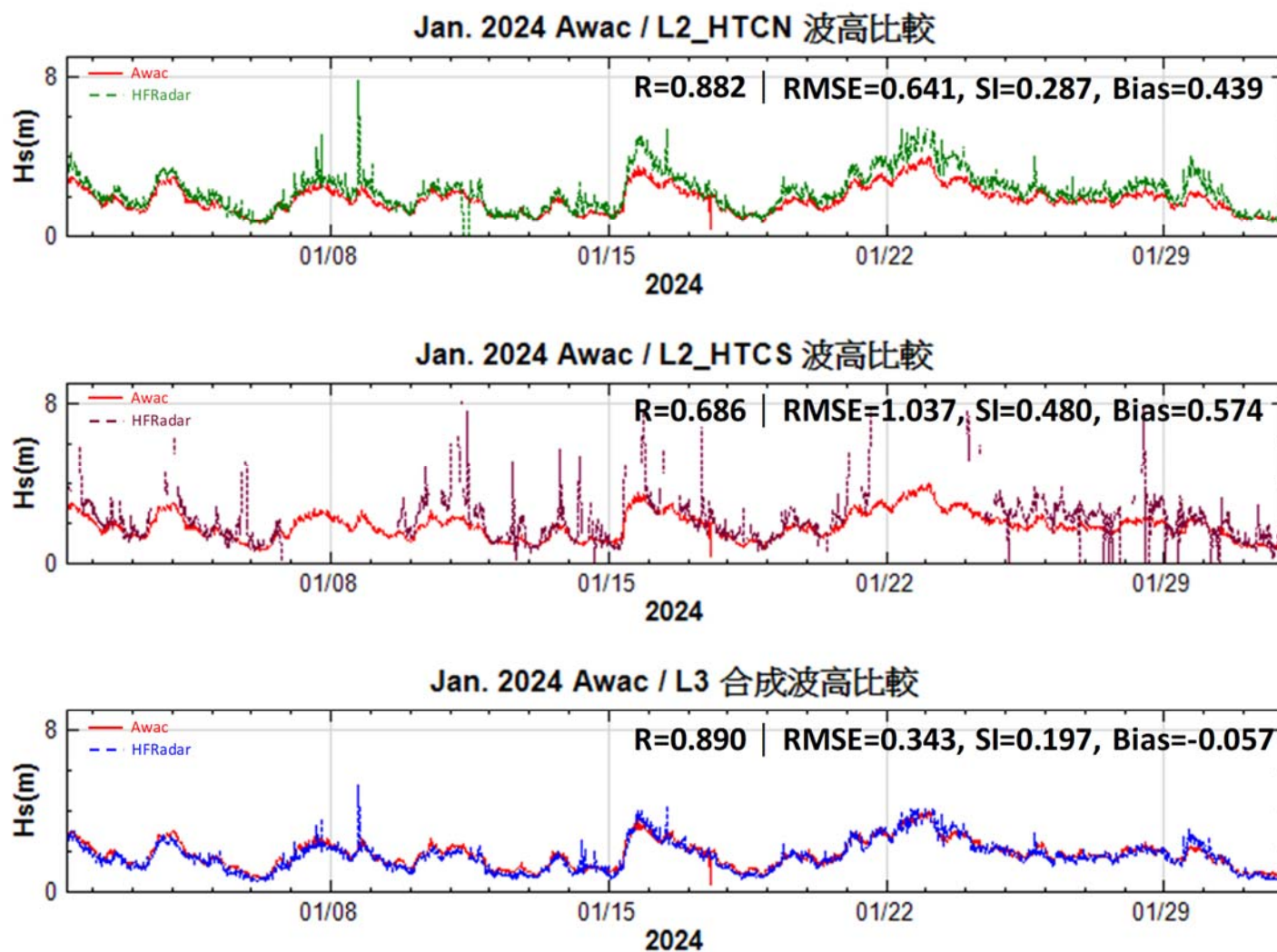


圖 5.3 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算波高(Hs)相關性分析(113 年 1 月份)

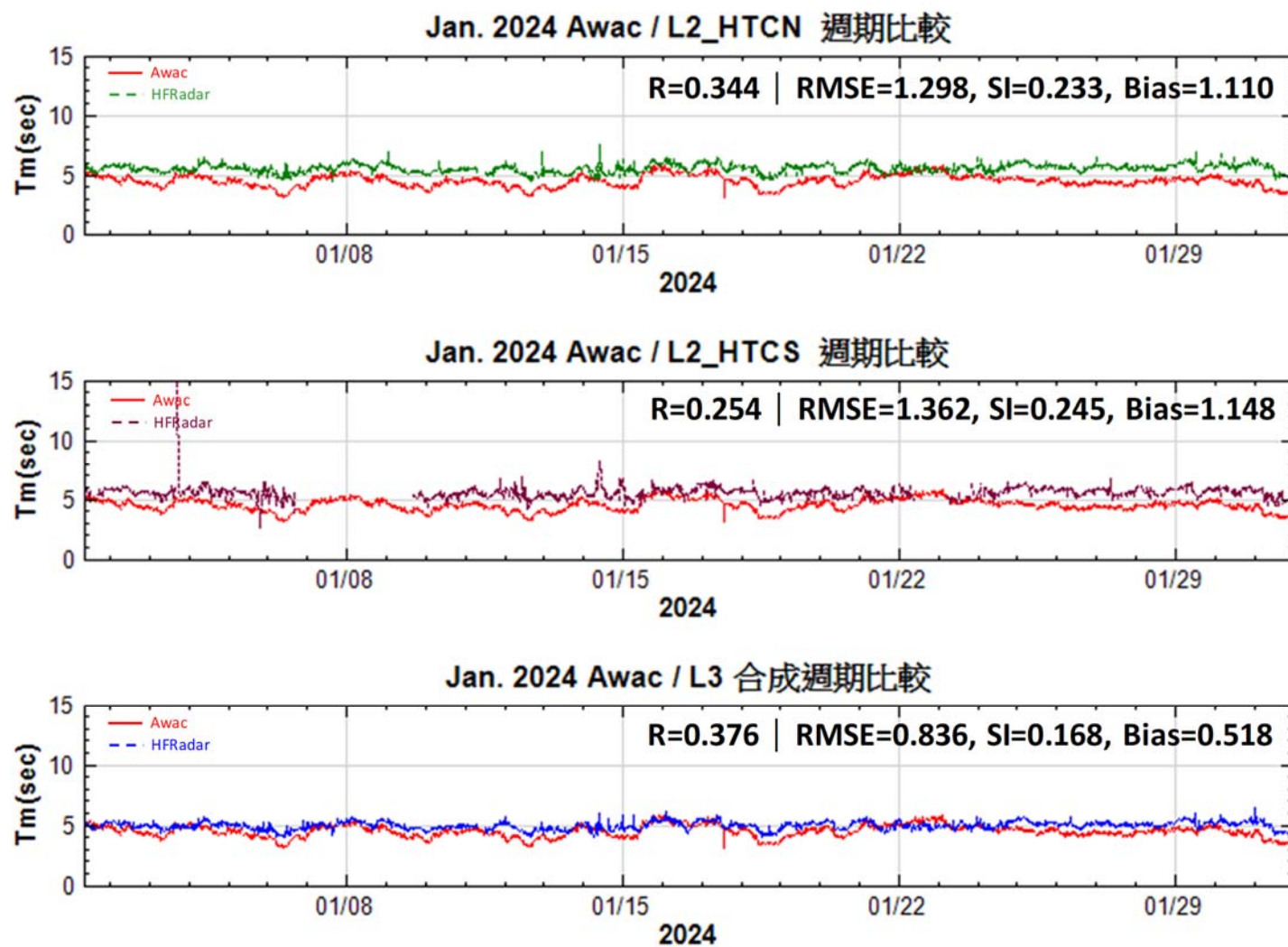


圖 5.4 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(Tm)相關性分析(113 年 1 月份)

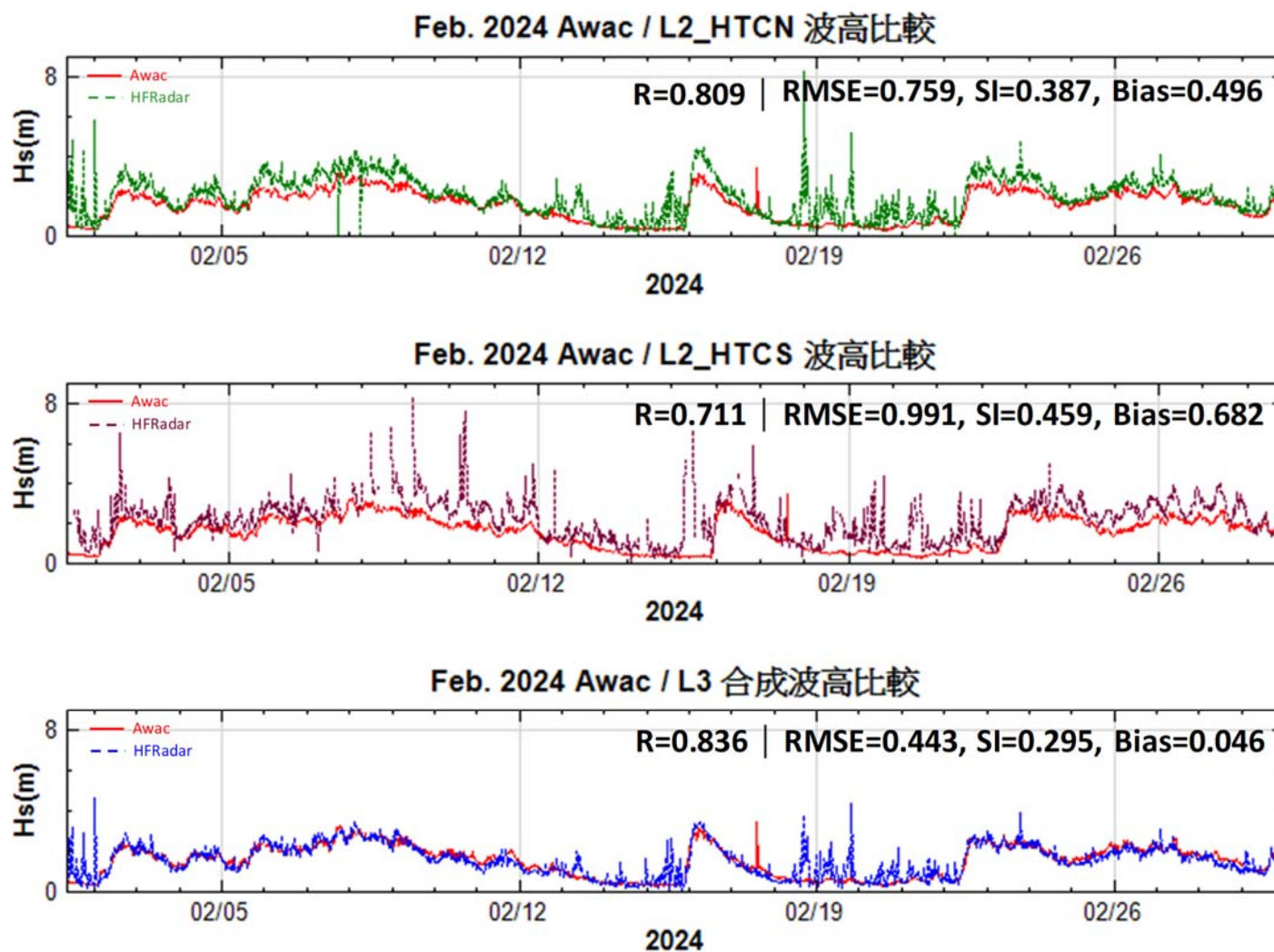


圖 5.5 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算波高(Hs)相關性分析(113 年 2 月份)

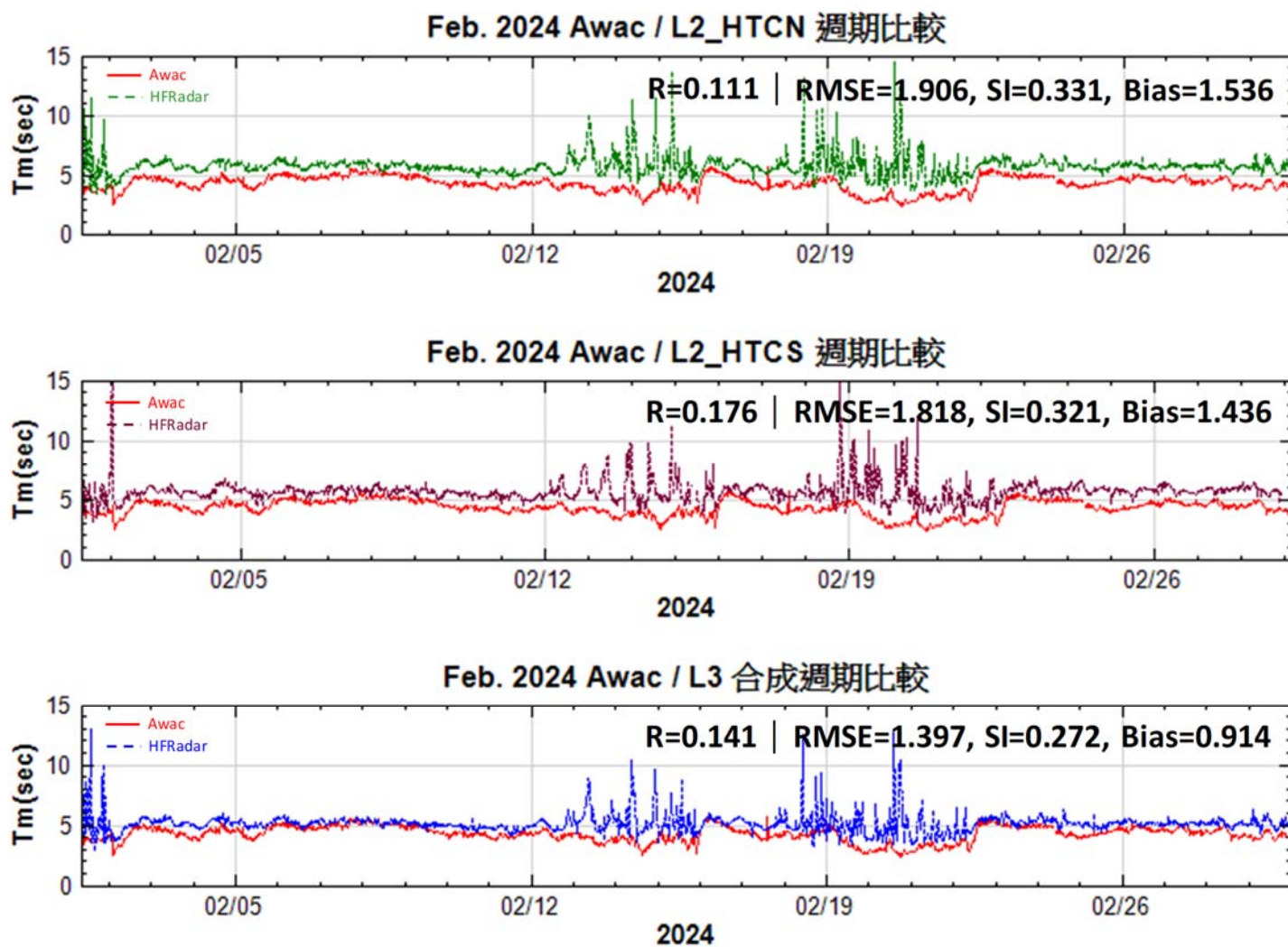


圖 5.6 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(Tm)相關性分析(113 年 2 月份)

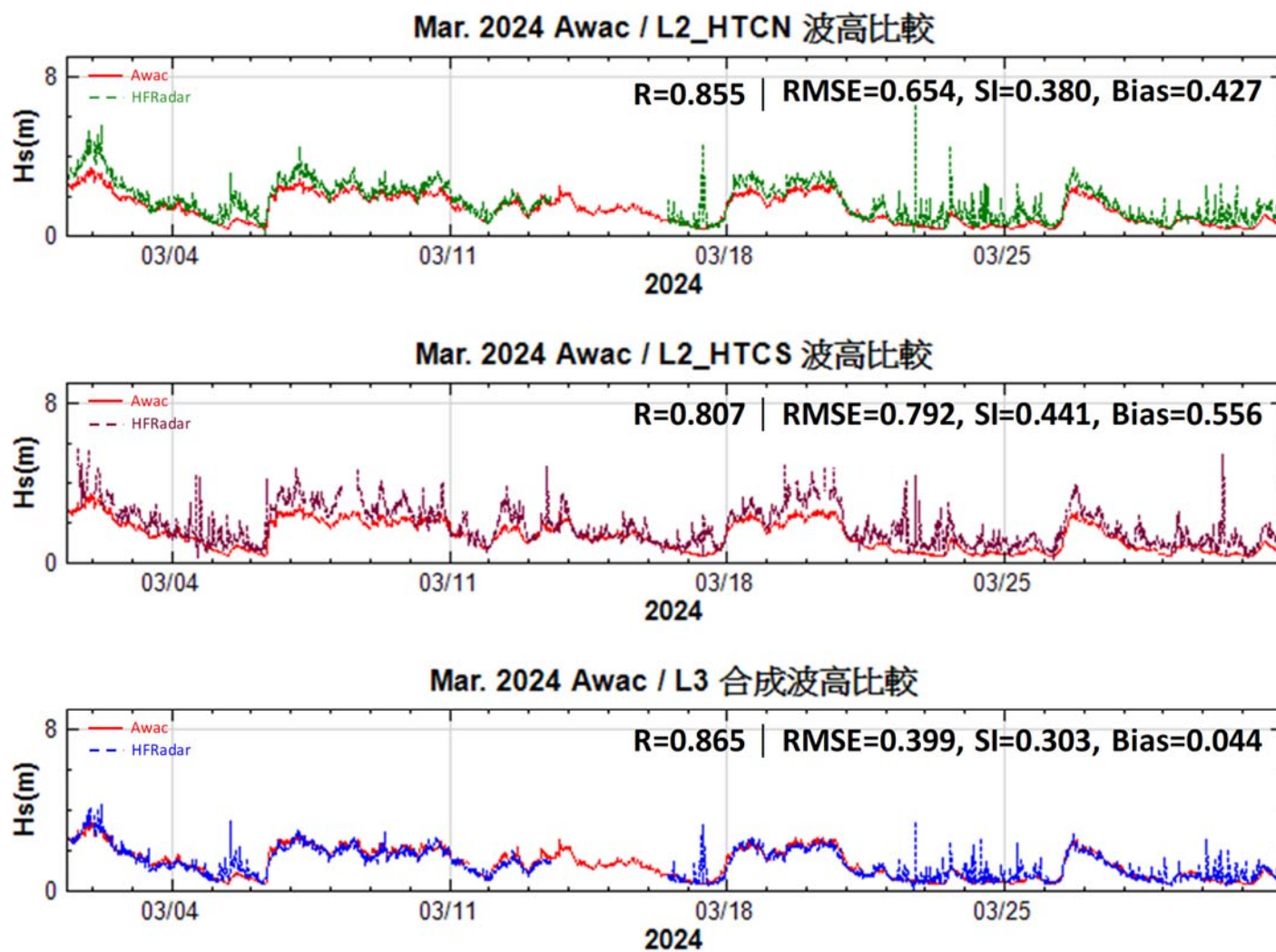


圖 5.7 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算波高(Hs)相關性分析(113 年 3 月份)

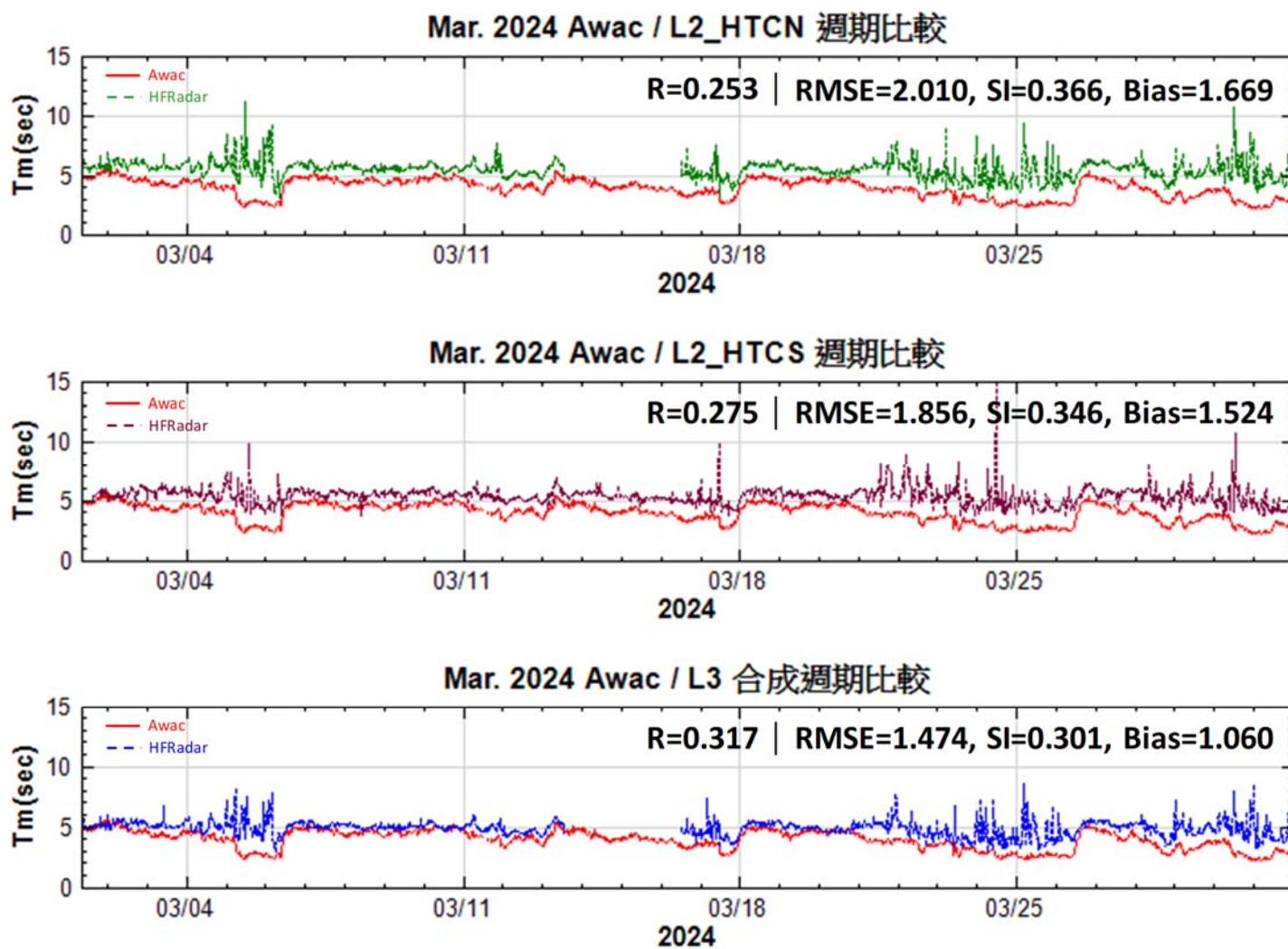


圖 5.8 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(T_m)相關性分析(113 年 3 月份)

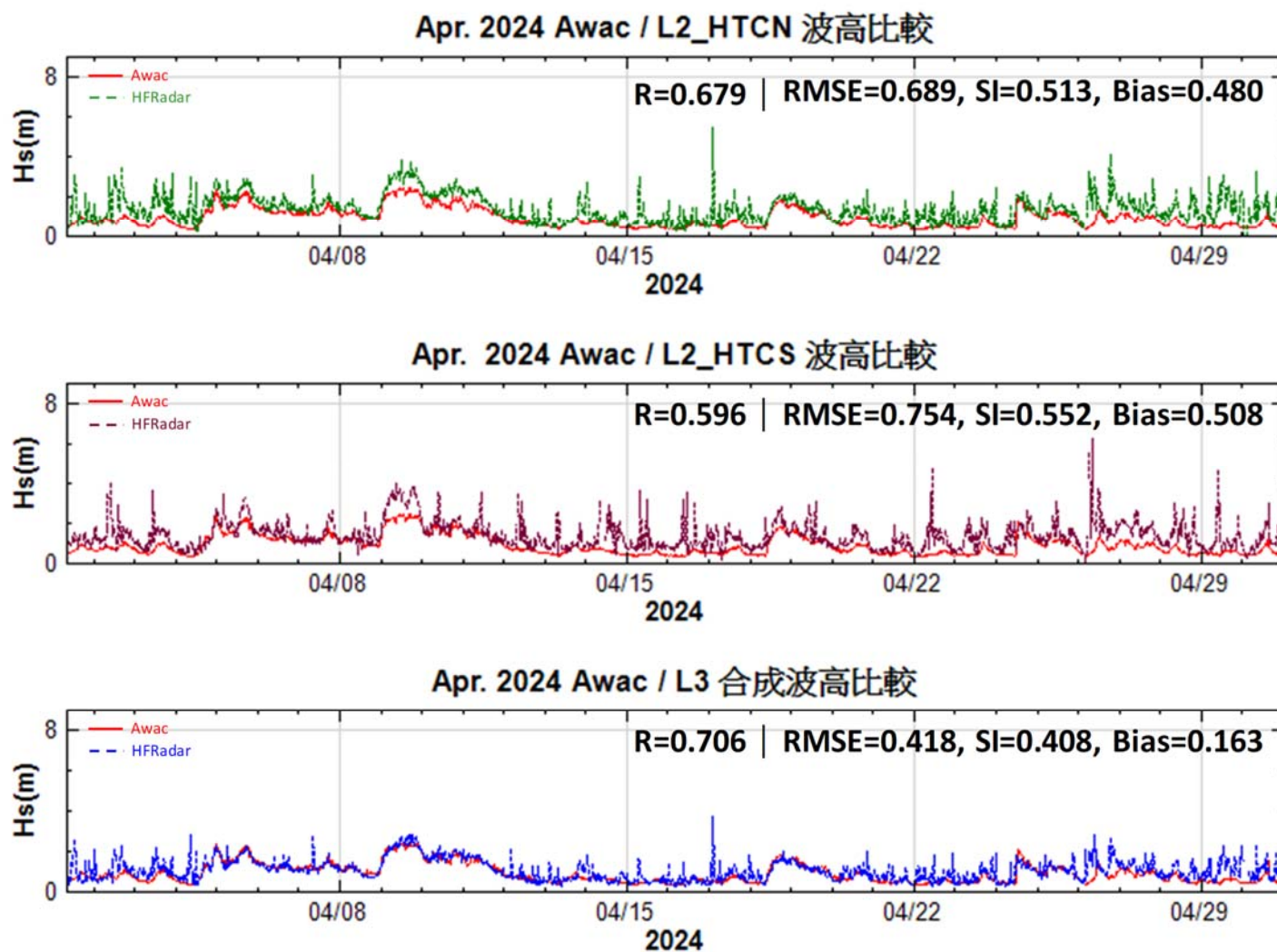


圖 5.9 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算波高(Hs)相關性分析(113 年 4 月份)

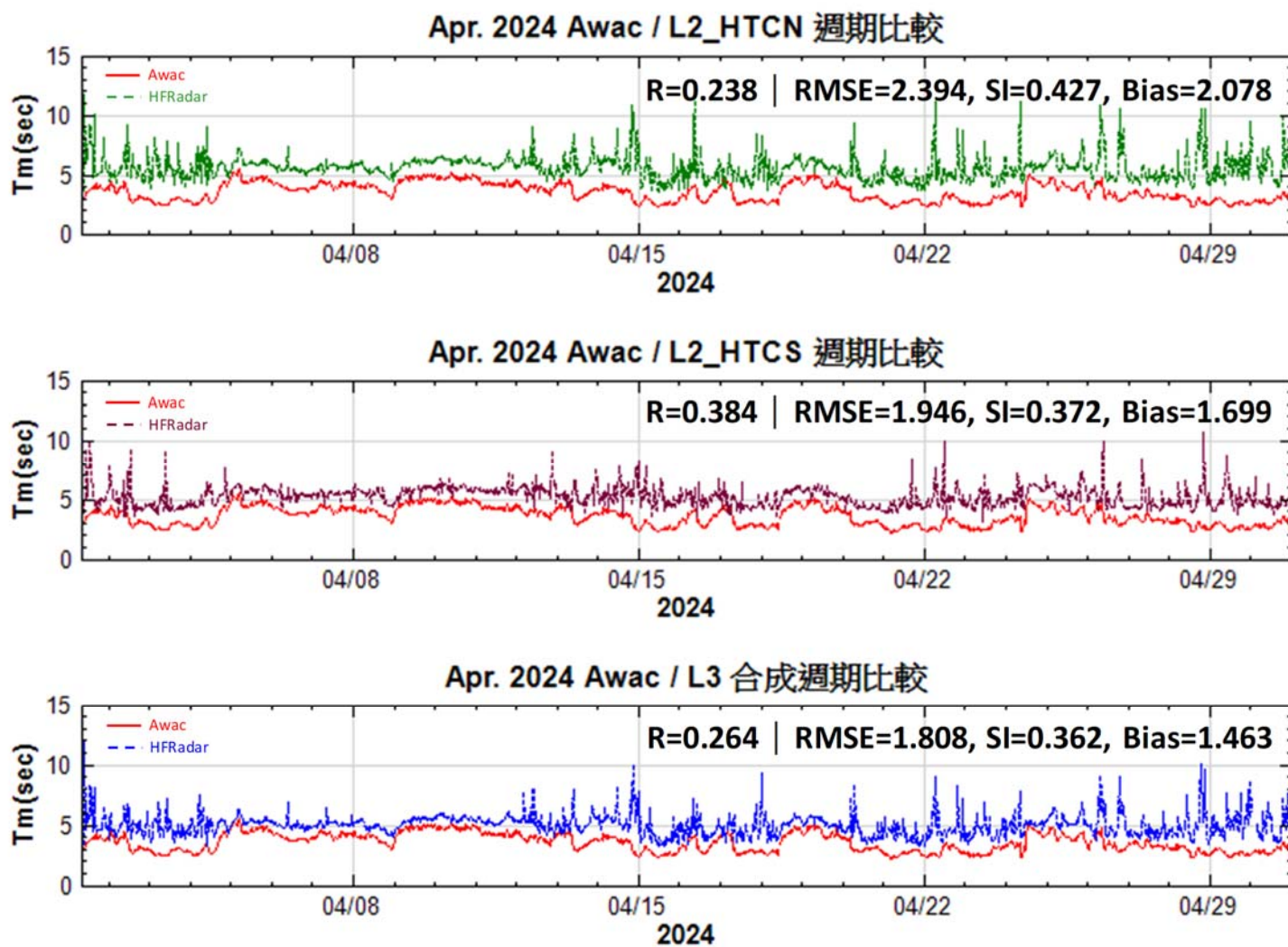


圖 5.10 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(Tm)相關性分析(113 年 4 月份)

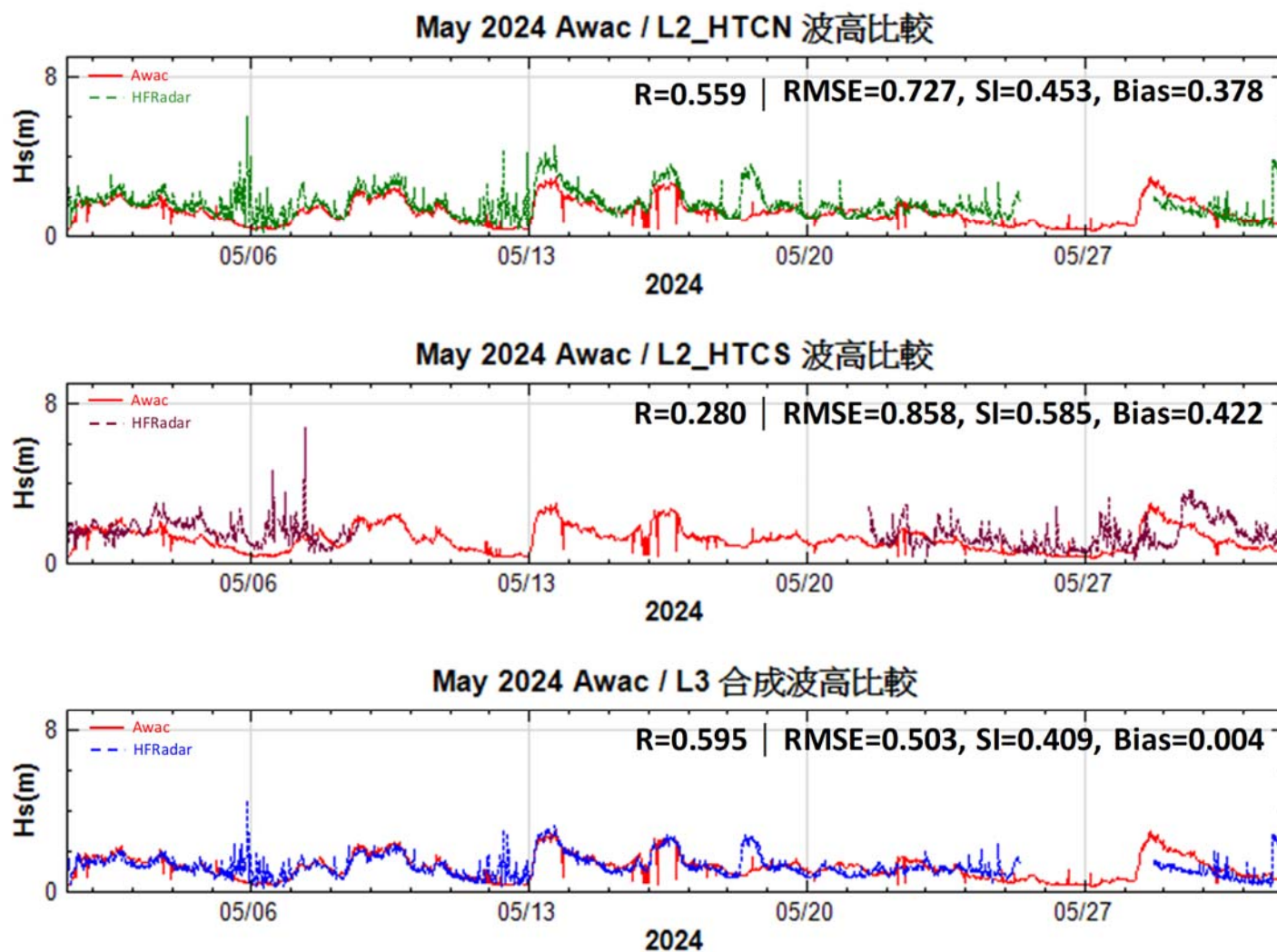


圖 5.11 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算波高(Hs)相關性分析(113 年 5 月份)

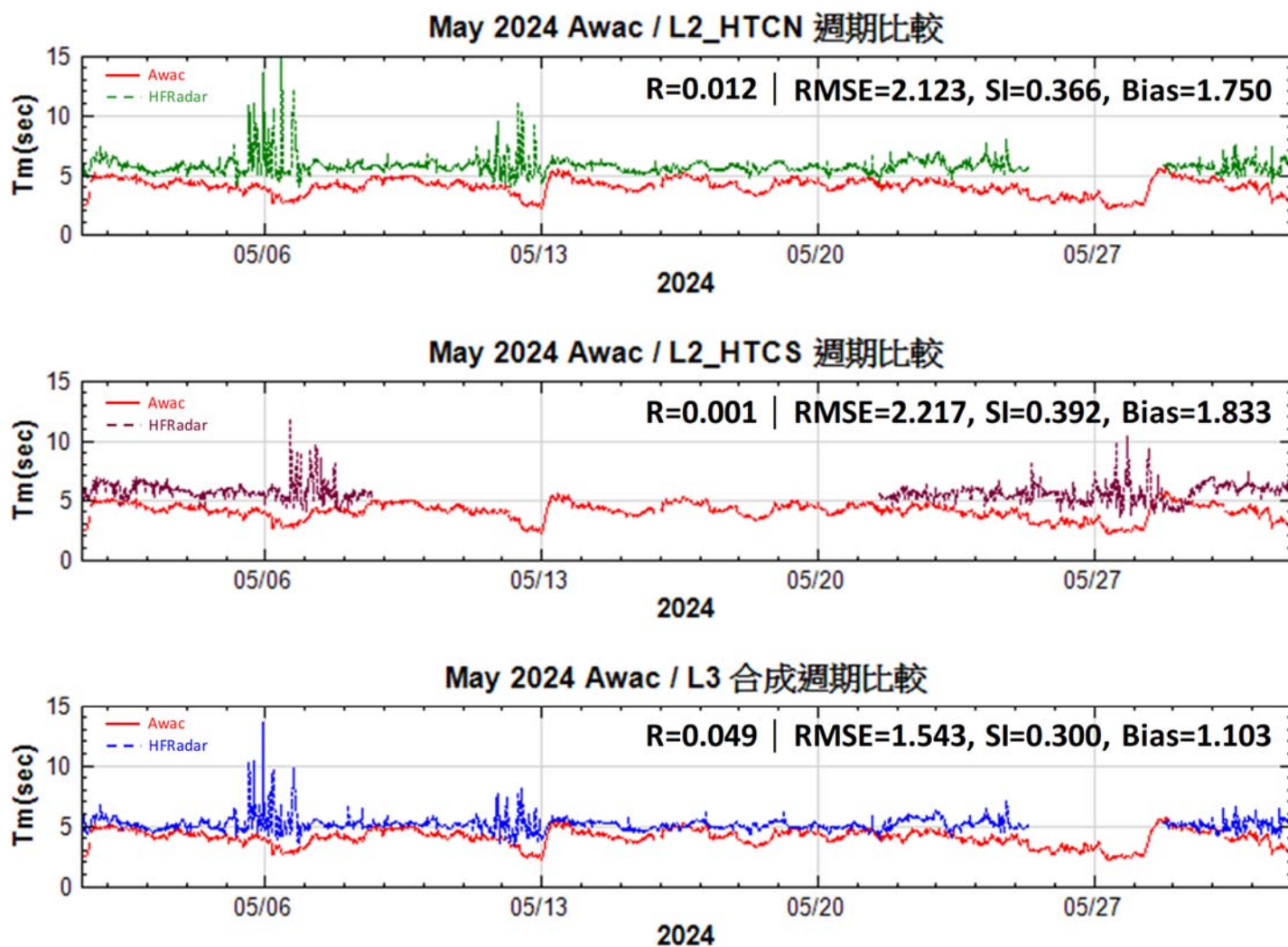


圖 5.12 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(Tm)相關性分析(113 年 5 月份)

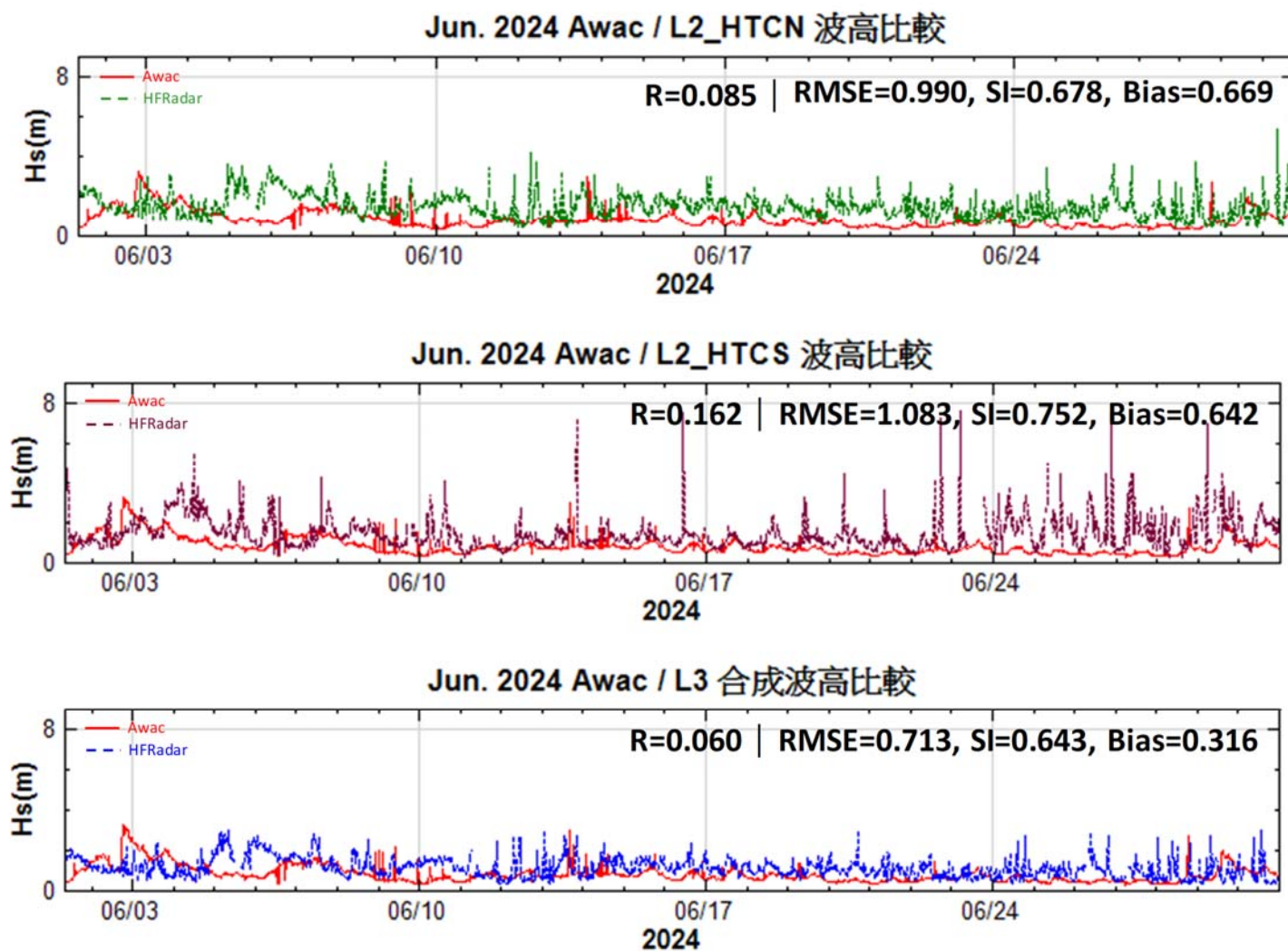


圖 5.13 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算波高(H_s)相關性分析(113 年 6 月份)

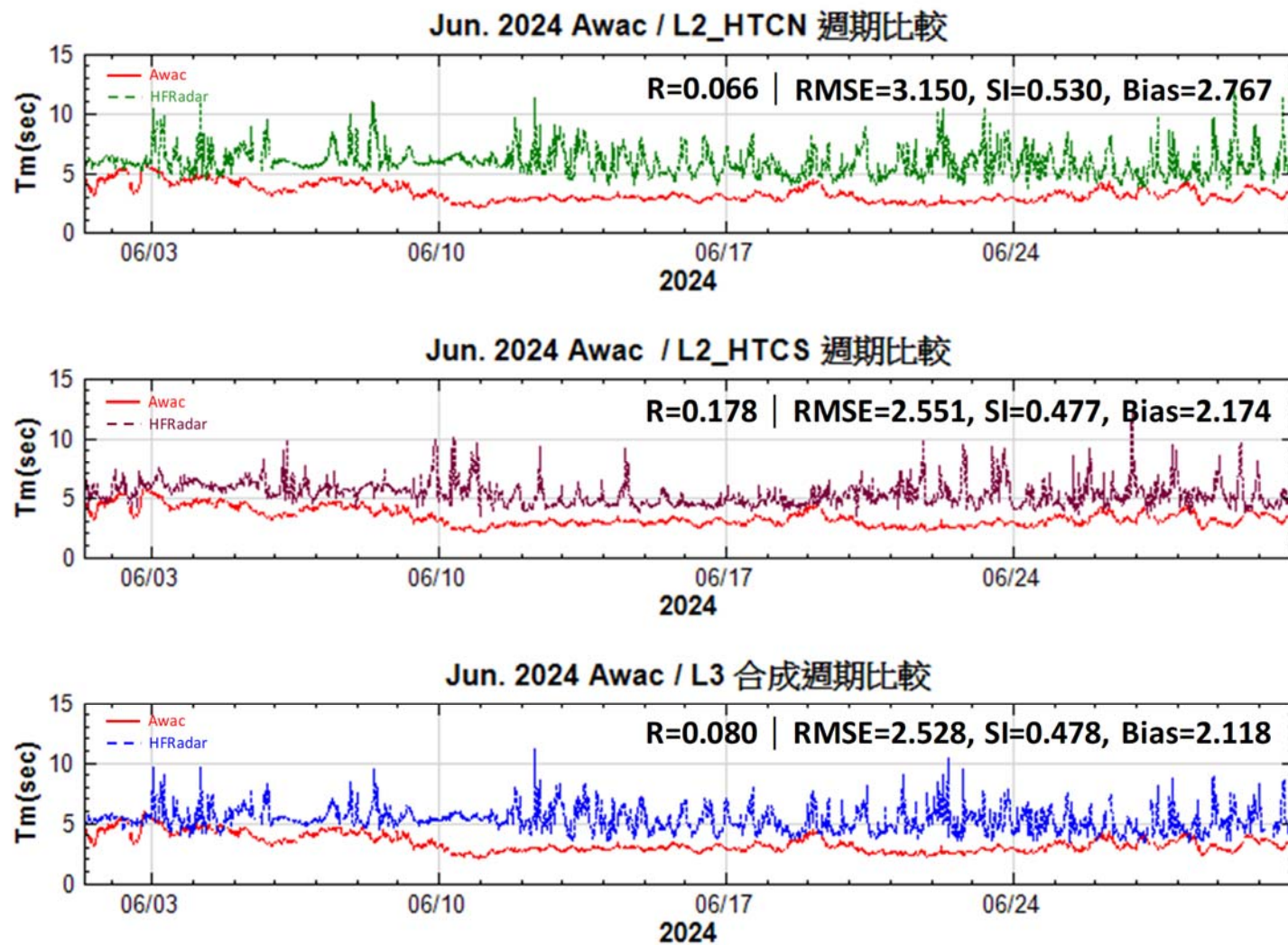


圖 5.14 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(Tm)相關性分析(113 年 6 月份)

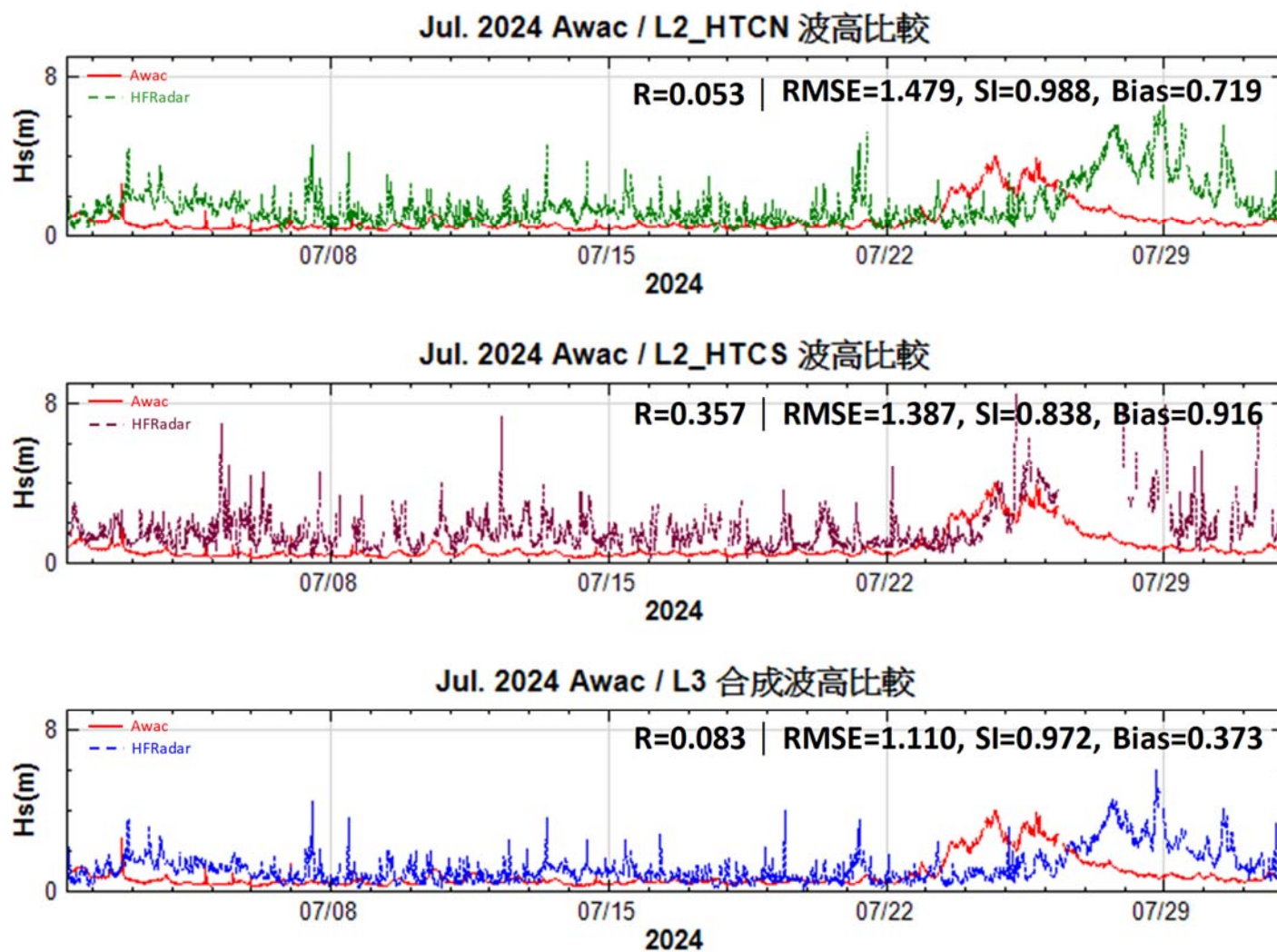


圖 5.15 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算波高(Hs)相關性分析(113 年 7 月份)

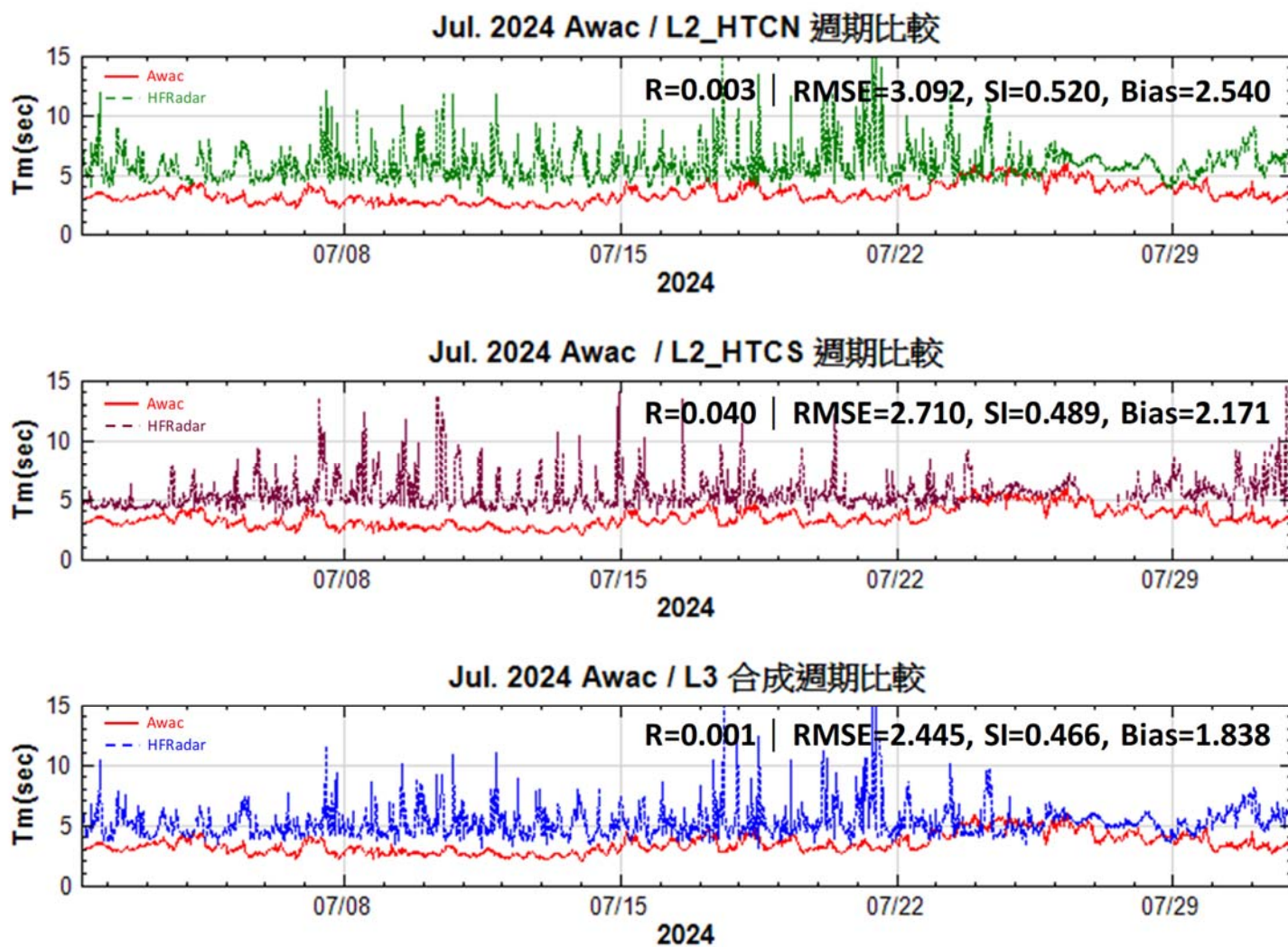


圖 5.16 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(T_m)相關性分析(113 年 7 月份)

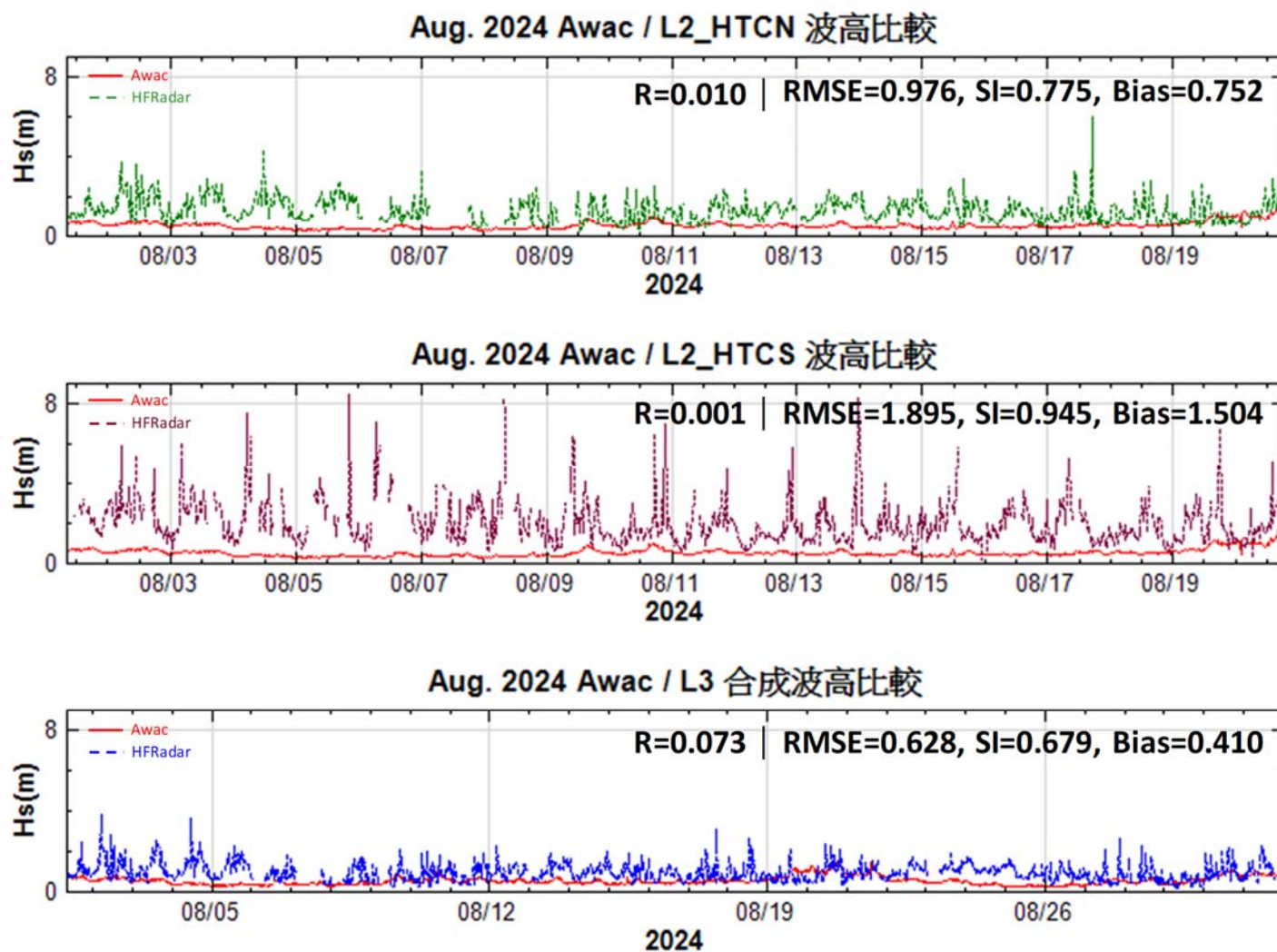


圖 5.17 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算波高(Hs)相關性分析(113 年 8 月份)

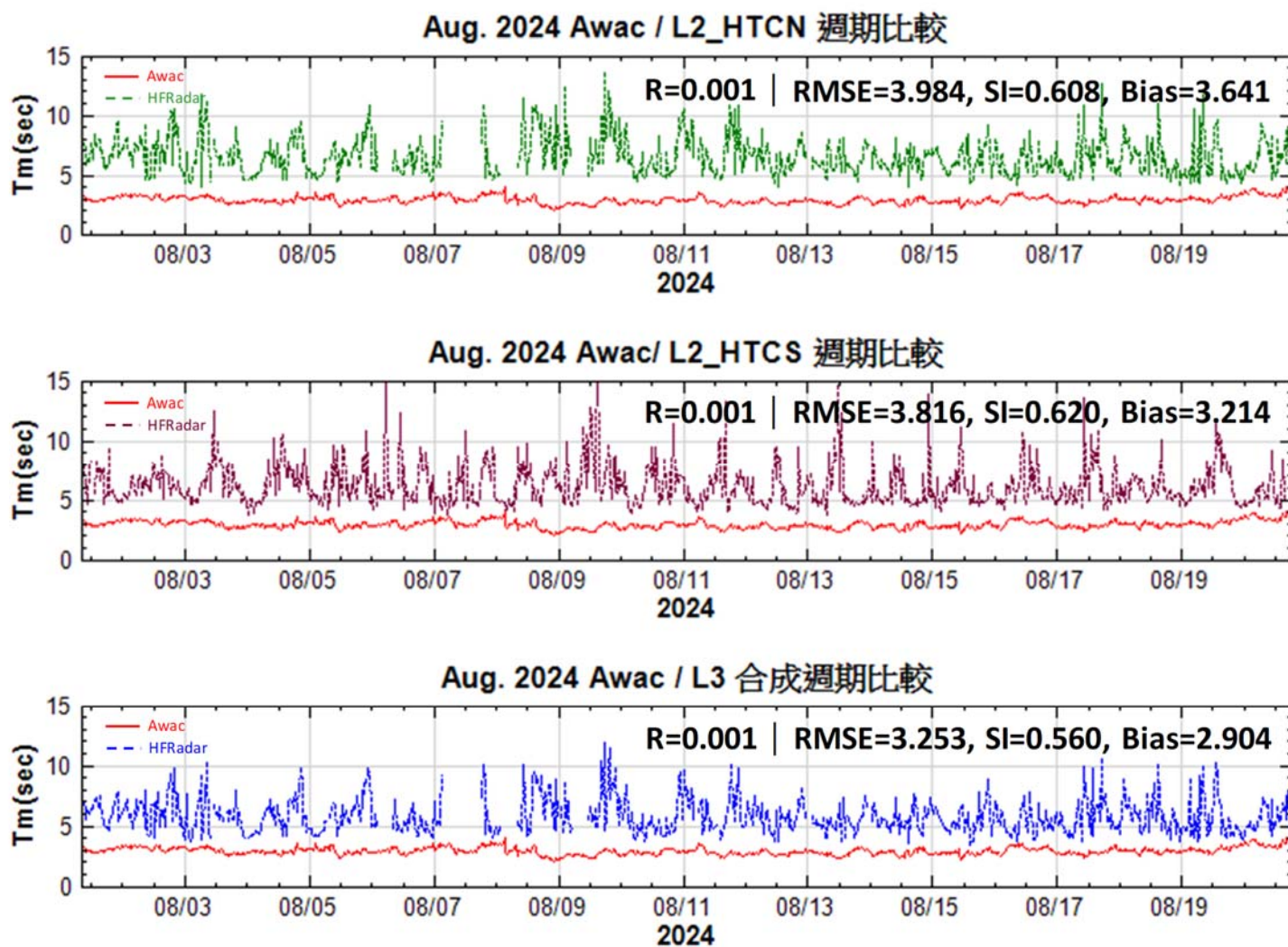


圖 5.18 臺中港底碇式 AWAC 與本計畫雷達演算平均週期(Tm)相關性分析(113 年 8 月份)

5.2 颱風觀測情境比較分析探討

根據交通部中央氣象署 113 年度有發警報颱風列表，共有 4 場主要颱風情境，分別為天兔(中度颱風警報期間 11.14~11.16)、康芮(強烈颱風警報期間 10.29~11.01)、山陀兒(強烈颱風警報期間 9.29~10.04)、凱米颱風(強烈颱風警報期間 7.22~7.26)，考慮雷達觀測數據品質逐漸降低，9 月之後需安排檢修，爰本計畫僅討論凱米颱風情境比較分析探討。

(一) 凱米(GAEMI) 颱風時序列分析

凱米颱風 7 月 20 日於菲律賓東方海面生成，向西北轉北北西移動，臺灣時間 7 月 22 日 23 時 30 分正式發布海上颱風警報，並於 7 月 26 日 8 時 30 分解除所有警報，颱風中心於 7 月 25 日零晨 0 時於宜蘭南澳登陸，登陸前發展為強烈颱風，登陸後強度減弱為中度颱風，同(25)日零晨 4 時 20 分自桃園新屋出海，主要影響範圍為新北、宜蘭、花蓮、臺東，資料顯示颱風中心最低氣壓為 920 hPa，最大風速 53 m/s，最大暴風半徑 250 公里，如圖 5.19 所示。

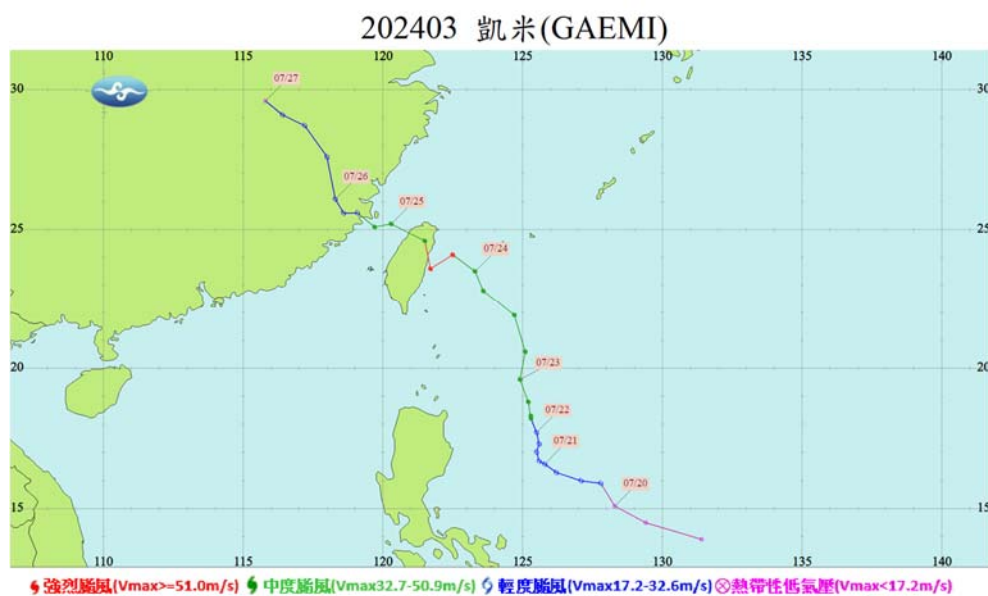


圖 5.19 凱米颱風路徑圖

本計畫將雷達系統與底碇式儀器之海表面波浪觀測結果進行比較，分析時段為今(113)年 7 月 20 日 00:00 至 7 月 27 日 23:00，由觀察結果顯示，雷達觀測時序列數據與臺中港底碇式 AWAC 於颱風期間波浪變

化無明顯相關性；統計分析顯示，本計畫開發之演算法與 AWAC 均方根誤差為 1.4387，而 SV 演算法與 AWAC 均方根誤差為 1.3451，顯示凱米颱風期間雷達觀測與實際量測數據之間存在一定差距，而此時段 SV 演算法均方根誤差稍低，但仍然偏高，完整分析結果如圖 5.20 所示。目前雷達觀測與演算結果在颱風環境下仍存在較大誤差，颱風期間波浪變化劇烈，導致本計畫現有雷達觀測於高波狀況時準確度較低，因此，未來需進一步調整與驗證，並建議優化演算法與數據處理方式，以提升預測準確度與可靠性。

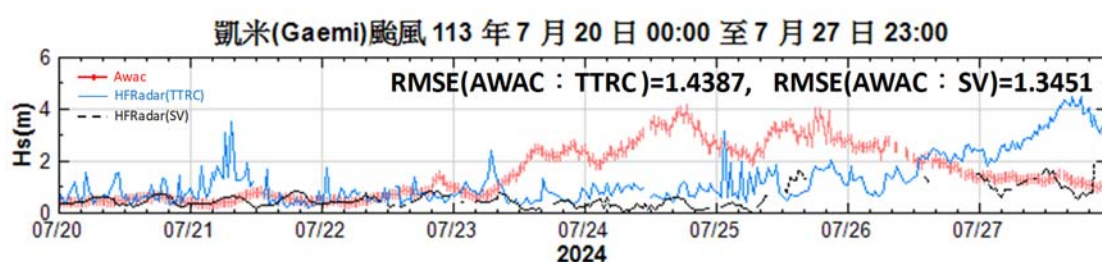
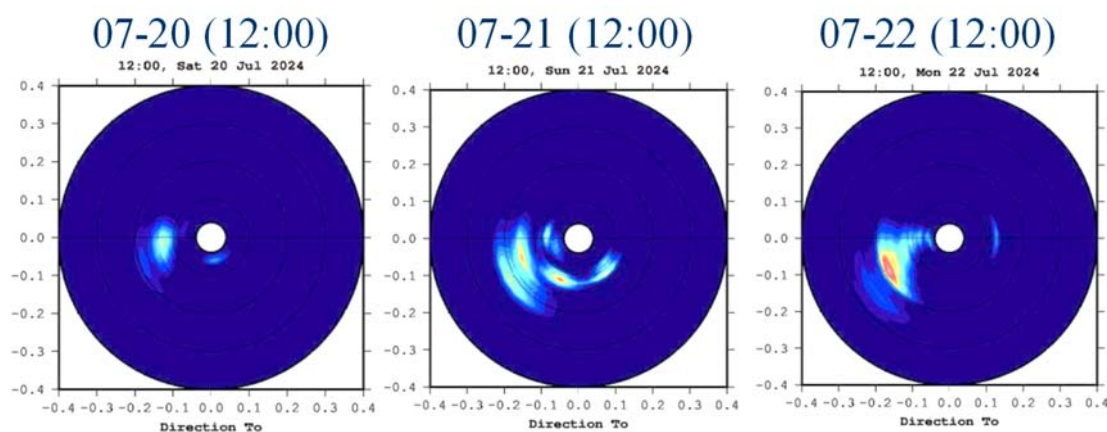


圖 5.20 凱米颱風相關性與誤差分析探討

(二) 凱米(GAEMI) 颱風方向波譜分析

更進一步利用英國雪菲爾大學開發的 SV 演算法，所獲得 720 號儲存格(Cell)的方向波譜進行探討，於 7 月 20 日(颱風影響初期)波浪能量分布較集中，主要方向較為穩定，但隨著時間推進於 7 月 21~23 日期間，波浪能量開始分散，可能受到風場或外海湧浪影響，使波浪方向變異增大，直到 7 月 24~25 日，波浪頻率與方向分布更為廣泛，顯示颱風影響加劇，波浪方向在強風與地形影響下波浪行為變得更為複雜，如圖 5.21 方向波譜所示。



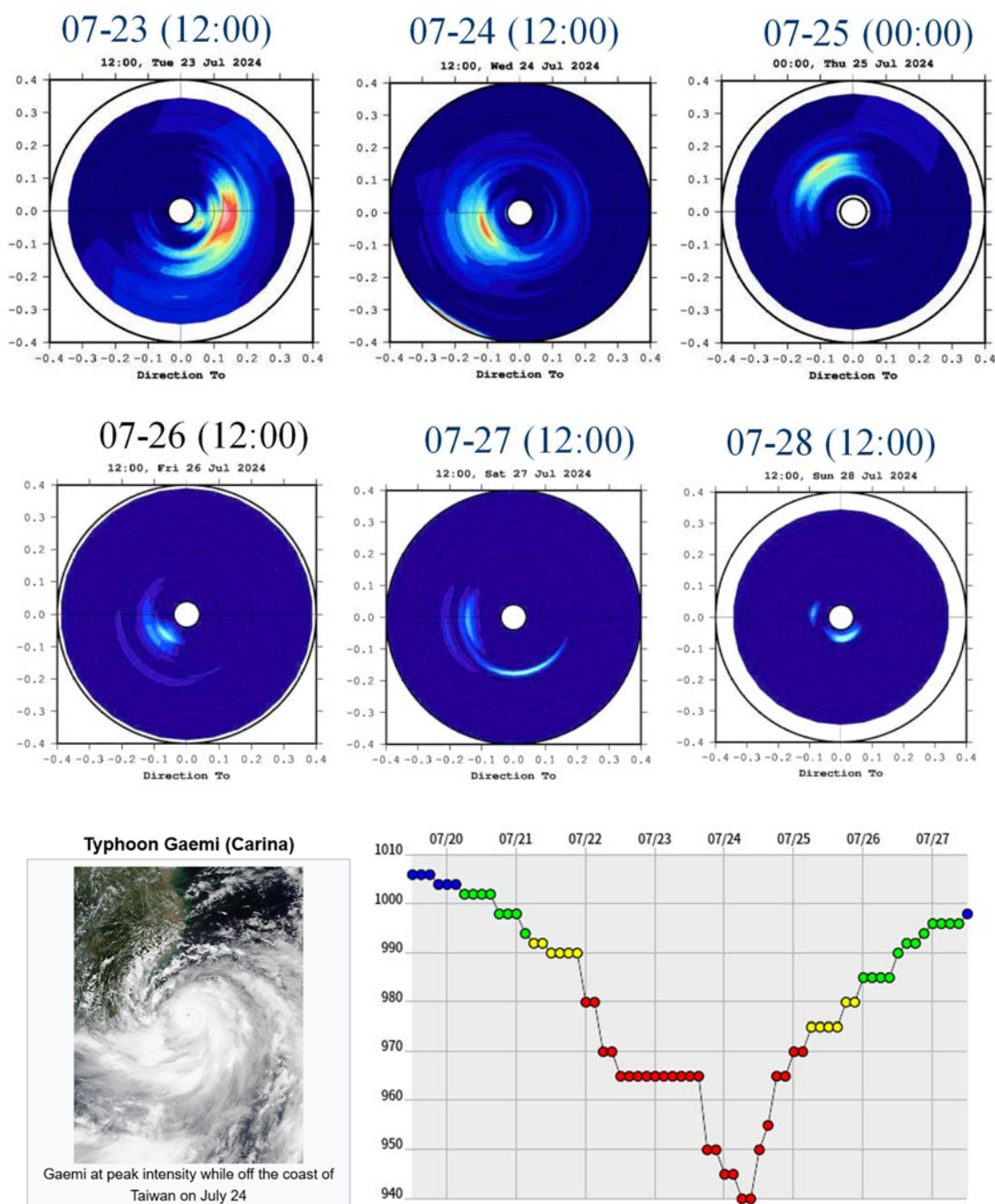


圖 5.21 凱米颱風方向波譜

除此之外，示性波高(H_s) 由 7 月 20 日的 2.14m 上升至 7 月 24 日的 2.61~2.79m，反映颱風逐漸接近時，波浪能量增強，7 月 25~27 日之間，波高維持較高值，顯示颱風影響持續，直到 7 月 28 日後方向波譜中波高開始下降，能量區域開始收斂，表示颱風逐漸遠離，波浪能量減弱與波浪方向趨於穩定，如圖 5.22 所示。

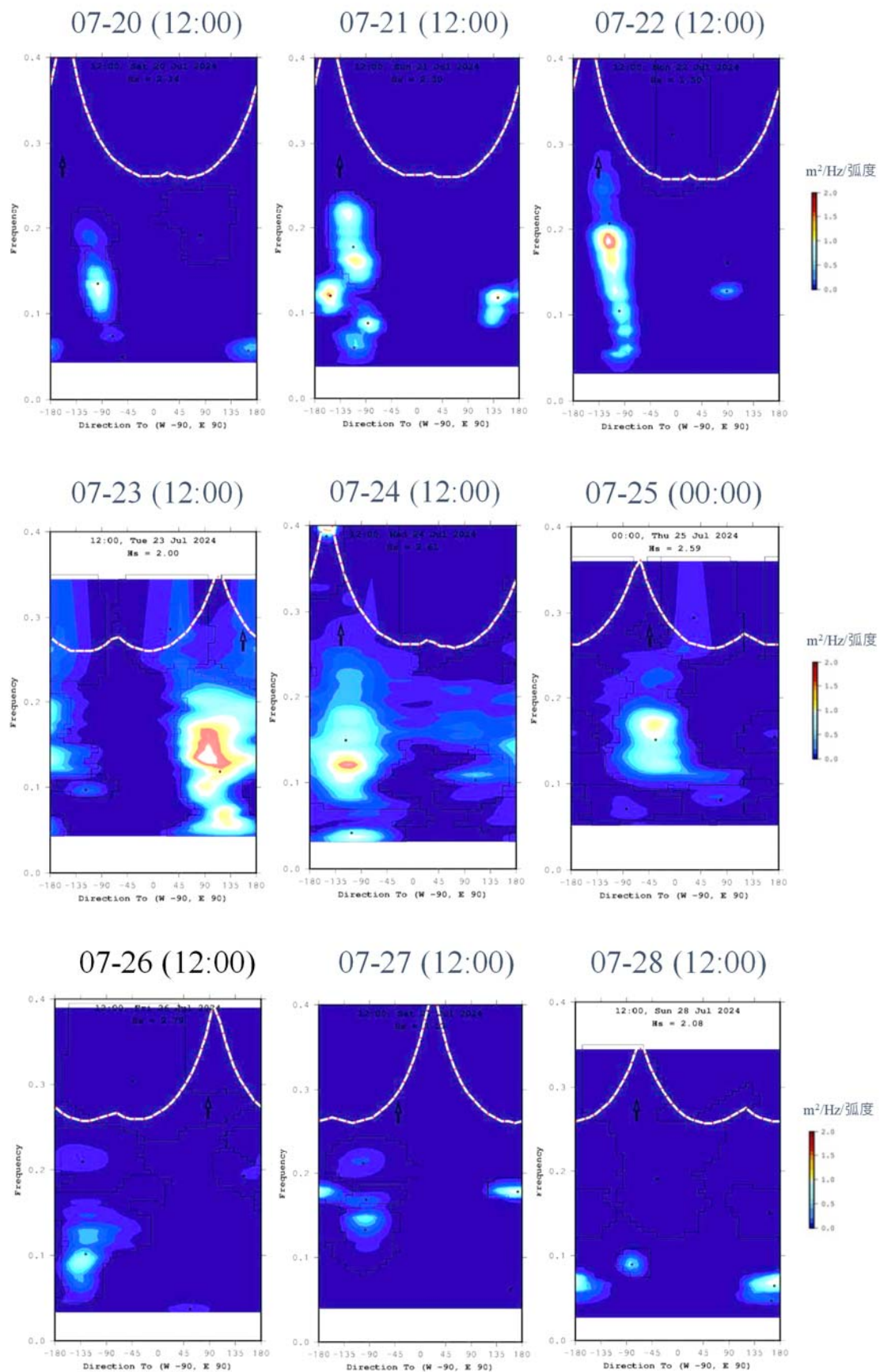


圖 5.22 海洋雷達凱米颱風期間方向波譜圖

總結來說，波浪頻譜的結構亦隨颱風發展而變化，在颱風前期波浪頻譜的主能量區域較小，顯示波浪主要來自單一頻率與方向，隨著颱風影響增強能量區域變得廣泛，較高頻率 (0.2-0.3Hz) 的波浪可能是風浪的影響，而低頻波浪 (0.05-0.15Hz) 可能來自遠方的湧浪，反映波浪來自多個方向，海面產生風浪與湧浪的混合效應，因此，方向波譜產生雙峰結構，當颱風遠離時，湧浪能量仍存在，但高頻風浪逐漸減弱。

(三) 凱米(GAEMI) 颱風臺中港平面波場分析

颱風的移動與波場變化具有直接關聯。當颱風接近時，風浪較強，局部風場對波浪的影響顯著；相反地，當颱風遠離，風場逐漸減弱，遠方湧浪影響則相對增強，有關颱風路徑與雷達平面波場變化，如圖 5.23 所示。

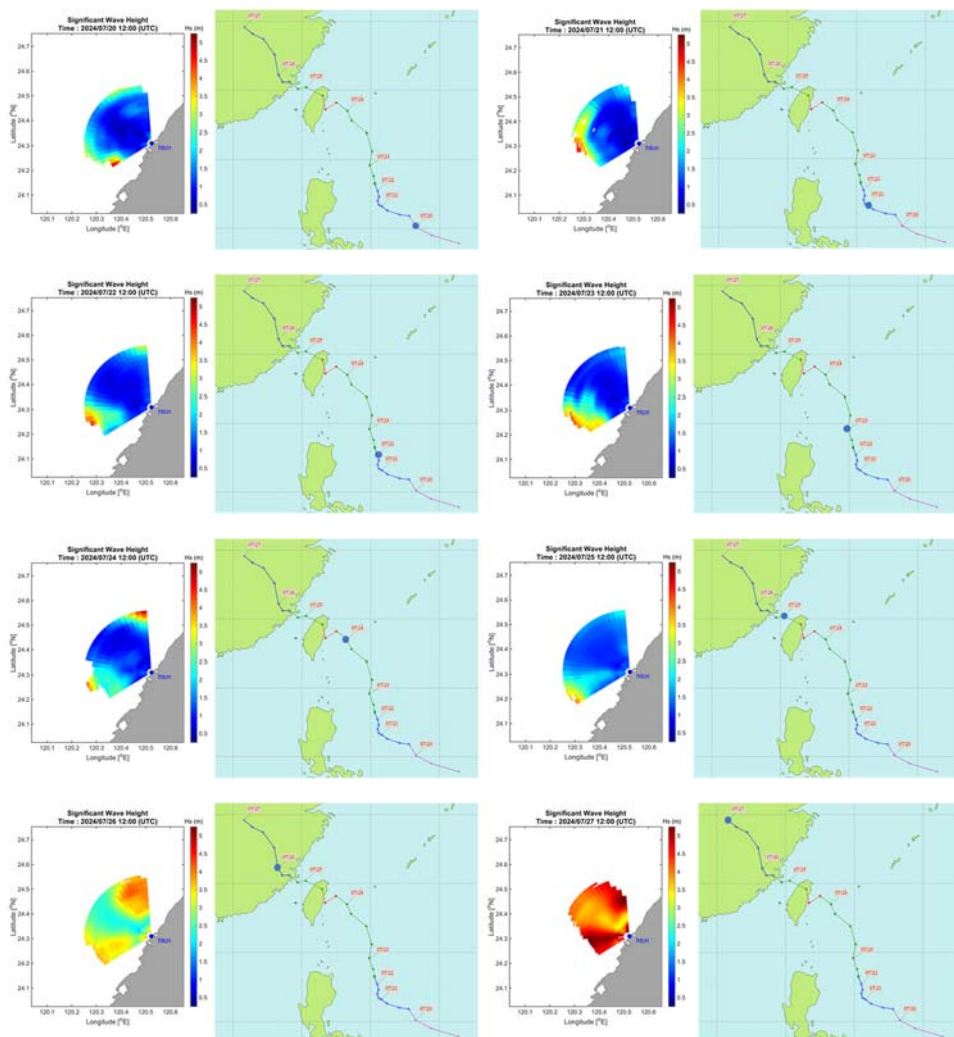


圖 5.23 凱米颱風路徑與雷達平面波場變化圖

凱米颱風於 7 月 25 日登陸臺灣前位於較南方位置海域，因此，雷達北站觀測數據受到影響，臺中港海域西南側波高自然增加，然而，隨著颱風中心穿越臺灣本島並逐漸遠離，但湧浪對臺中港海域的影響逐步增加，故凱米颱風 7 月 27 日對於西半海域波高影響達到最高值，除此之外，海上作業、航運安全及沿海防災皆須謹慎因應，以降低風浪帶來的潛在風險。

第六章 結論與建議

面對全球氣候變遷、極端氣候與複合型災害發生機率增加的影響，強化運輸系統的抗災能力已成為當前的重要課題。為順應此趨勢，2024年臺灣海洋聯盟大會倡議海洋永續與數據智慧化的願景，期望透過合作與有效行動計劃的制定，更妥善應對環境變化的挑戰，促進海洋科學的發展，並實現全球可持續發展目標。在此背景下，本計畫年度觀測成果獲得以下結論與建議：

6.1 結論

- (一)由文獻回顧所知雷達波浪觀測利用類神經網絡機器學習方式，能解決二階頻譜訊號較差不易分析，以及雷達頻譜具有高度非線性與複雜性的問題，又或利用假設已知波浪分佈，推算無方向性海洋波數譜方法，以及透過電磁波電場與海表面位移關係線性，推估海表面波浪，皆示未來可以投入應用發展的技術之一。
- (二)本計畫依據美國 QARTOD 即時高頻雷達表面海流品管手冊以及遵循科學界公認的數據標準，釐訂的波浪 0 級與 1 級品管，對於波浪數據的品管限制有顯著效果，能確保雷達波浪觀測數據的可用性與準確性。此外，雷達資料品質取決於環境訊號品質及硬體健康程度，與天線狀態健檢，需定期雷達訊噪比是否降低。
- (三)波浪觀測成果方面，113 年 1~3 月雷達觀測數據穩定，北站波高與 AWAC 相關性介於 0.809 至 0.882，誤差與偏誤皆低；南站相關性介於 0.686 至 0.807，略低於北站但仍具一致性。雙雷達合成數據相關性穩定於 0.836 至 0.890，顯示合成數據比單站更準確且誤差較少。
- (四)承上，自 113 年 4~5 月起，雷達觀測品質開始下降，雷達北站與 AWAC 相關性由 0.679 降至 0.559，南站則由 0.596 降至 0.280，顯示測量準確度降低且偏誤增加。至 6~8 月夏季期間，雷達北站相關性驟降至 0.053，8 月幾乎無相關性，初步研判可能與雷達系統健康狀態有關，後續將安排人員進一步檢查維修，以釐清原因。
- (五)波浪週期觀測成果方面，自 113 年 1 至 8 月雷達與 AWAC 波浪週期

觀測相關性偏低，5 至 8 月幾乎為 0，且部分月份數據顯著高估，無法有效反映實測趨勢，後續應進一步探討波浪週期的改善空間。

- (六)根據波浪頻譜圖，前期主能量區域較小，波浪主要來自單一頻率與方向。隨颱風影響增強，能量範圍擴大，高頻波浪(0.2-0.3Hz)受風浪影響，低頻波浪(0.05-0.15Hz)則來自遠方湧浪，形成風浪與湧浪混合的雙峰結構，當颱風遠離後，湧浪能量仍存在，但高頻風浪逐漸減弱。

6.2 建議

- (一)本計畫研究成果發現南北雷達站(兩站)已逐漸老化，為維持觀測成效，建議安排雷達站更新作業，以維持雷達觀測服務的品質。此外，關於雷達海表面波浪觀測，本計畫已掌握其他種類可行的解決方案，建議未來能朝向類神經網絡的學習方式，協助改善雷達觀測數。
- (二)本計畫經由 113 年度觀測分析，已確定雷達波浪數據的品管限制，建議未來能引進其他有效的品管措施，持續檢討與改善波浪觀測數據的結果。
- (三)本計畫發展雷達於近岸海表面觀測研究，改善過往單點與時空覆蓋不足問題，期望未來跨域合作，能提供合作單位更好的支援，彌補與解決各產官學研於商港及海岸管理、海上救生救難、海事污染應變等專業性課題。

6.3 成果效益與後續應用情形

- (一)本計畫致力於不斷改進，持續進行定時觀測海洋表面波浪與海流，以提供港區海氣象觀測資料，為航行管理單位和港務公司的應用規劃提供參考。
- (二)持續發展海洋陣列雷達監測技術，透過建立跨領域研究機制，促進各單位間資料共享、技術合作和應用合作，以更實質地促進交流，有助於推動海洋陣列雷達領域研究，促進資料共享與應用。

參考文獻

1. Hardman, R. L., & Wyatt, L. R. "Inversion of HF radar Doppler spectra using a neural network." *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8) , 2019 , p. 255.
2. Li, L., Sheng, L., Wu, H., & Wu, X. Ocean "Wave Inversion from HF Radar with BP Neural Network." In 2022 IEEE, International Conference on Frontiers of Communications, Information System and Data Science (CISDS), 2022, pp. 133-137..
3. Ding, F., Zhao, C., Chen, Z., & Deng, M. "Inversion of Ocean Wavenumber Spectrum from the Bistatic High-frequency Radar Sea Echoes." IEEE, In 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2022, pp. 996-1003.
4. Hashemi, S., Shahidi, R., & Gill, E. W. "Extraction of the significant wave height from synthetic HF radar data acquired on a floating platform." *IET Radar, Sonar & Navigation*, 17(11), 2023, pp. 1639-1645.
5. Alattabi, Z.R., Cahl, D., & Voulgaris, G. "Swell and Wind Wave Inversion Using a Single Very High Frequency (VHF) Radar." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36, 2019, pp. 987-1013
6. Atanga, J. N. and L. R. Wyatt "Comparison of Inversion Algorithms for HF Radar Wave Measurements." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 22(4), 1997, pp. 593-603.
7. Barrick, D. "Remote Sensing of Sea State by Radar." *Ocean 72 - IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment*, 1972.
8. Barrick, D. and B. Lipa "Evolution of Bearing Determination in HF Current Mapping Radars." *Oceanography* 10, 1997.
9. Barrick, D. E. "First-order Theory and Analysis of MF/HF/VHF Scatter from The Sea." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 20(1), 1971, pp. 2-10.
10. Barrick, D. E. "Remote Sensing of Sea State by Radar." *Ocean 72 - IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment*, 1972.
11. Barrick, D. E. "Extraction of Wave Parameters from Measured HF Radar Sea-echo Doppler Spectra." *Radio Science* 12(3), 1977, pp. 415-424.
12. Barrick, D. (2005a). "SeaSonde Power to Range. " In. CODAR reference document.
13. Barrick, D.E. (2005b). "Geometrical Dilution of Statistical Accuracy (gdosa) in Multi-static HF Radar Networks. " In. CODAR reference document.

14. Bhuiya, S. N., F. Islam and M. Matin "Analysis of Direction of Arrival Techniques Using Uniform Linear Array." *International Journal of Computer Theory and Engineering* 4, 2012, pp. 931-934.
15. Cai, L., Shang, S., Wei, G., He, Z., Xie, Y., Liu, K., Zhou, T., Chen, J., Zhang, F., & Li, Y. "Assessment of Significant Wave Height in the Taiwan Strait Measured by a Single HF Radar System." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36, 2019, pp. 1419-1432.
16. Capon, J. "High-resolution Frequency-wavenumber Spectrum analysis." *Proceedings of the IEEE* 57(8), 1969, pp. 1408-1418.
17. Chapman, R., Shay, L., Graber, H., Edson, J., Karachintsev, A., Trump, C., & Ross, D. "On the Accuracy of HF Radar Surface Current measurements: Intercomparisons with Ship-based Sensors." *Journal of Geophysical Research*, 1021, 1997, pp. 18737-18748
18. Chen, Z., Zezong, C., Yanni, J., Lingang, F., Gengfei, Z. "Exploration and Validation of Wave-Height Measurement Using Multifrequency HF Radar." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30, 2013, pp. 2189-2202.
19. Chuang, L., Chung, Y.-J., & Tang, S. "A Simple Ship Echo Identification Procedure With SeaSonde HF Radar." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12, 2015, pp. 1-5
20. Cook, T. M. and L. K. Shay "Surface M2 Tidal Currents along the North Carolina Shelf Observed with a High-frequency Radar." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 107(C12), 2002, pp. 15-11 - 15-12.
21. Crombie, D. D. "Doppler Spectrum of Sea Echo at 13.56 Mc/s." *Nature* 175, 1955, p. 681.
22. Dao, D.-T., H. Chien, J.-W. Lai, Y.-H. Huang and P. Flament "Evaluation of HF radar in Mapping Surface Wave Field in Taiwan Strait under Winter Monsoon." *OCEAN's 2019-Marseille*, 2019, pp. 1-7.
23. De Paolo, T., & Terrill, E. "Skill Assessment of Resolving Ocean Surface Current Structure Using Compact-Antenna-Style HF Radar and the MUSIC Direction-Finding Algorithm." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology - J ATMOS OCEAN TECHNOL*, 24, 2007.
24. Dzvonkovskaya, A., Gurgel, K., Rohling, H., & Schlick, T. "Low power High Frequency Surface Wave Radar Application For Ship Detection and Tracking." In, *2008 International Conference on Radar*, 2008, pp. 627-632.

25. Dzvonkovskaya, A., Rohling, H. "Target Detection with Adaptive Power Regression Thresholding for HF Radar.", 2006.
26. Dzvonkovskaya, A.L., & Rohling, H. "HF Radar Ship Detection and Tracking Using WERA system". In, 2007 IET International Conference on Radar Systems, 2007, pp. 1-5.
27. Essen, H. H., K. W. Gurgel and T. Schlick "Measurement of Ocean Wave Height and Direction by Means of HF Radar: An Empirical Approach." *Deutsche Hydrografische Zeitschrift* 51(4), 1999, pp. 369-383.
28. Fujii, S., M. L. Heron, K. Kim, J. W. Lai, S. H. Lee, X. Wu, X. Wu, L. R. Wyatt and W. C. Yang "An Overview of Developments and Applications of Oceanographic Radar Networks in Asia and Oceania Countries." *Ocean Science Journal* 48(1), 2013, pp. 69-97.
29. Gill, E. W. and E. J. Walsh "High-frequency Bistatic Cross Sections of The Ocean Surface." *Radio Science* 36(6), 2001, pp. 1459-1475.
30. Godara, L. C. "Application of Antenna Arrays to Mobile Communications. II. Beam-forming and Direction-of-arrival Considerations." *Proceedings of the IEEE* 85(8), 1997, pp. 1195-1245.
31. Gurgel, K. "Shipborne Measurement of Surface Current Fields by HF Radar." *IEEE in Proceedings of OCEANS'94*, Vol. 3, 1994, pp. III-23.
32. Gurgel, K. W., G. Antonischki, H. H. Essen and T. Schlick "Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for Ocean Remote Sensing." *Coastal Engineering* 37(3), 1999, pp. 219-234.
33. Gurgel, K. W., H. H. Essen and S. P. Kingsley "High-frequency Radars: Physical Limitations and Recent Developments." *Coastal Engineering* 37(3), 1999, pp. 201-218.
34. Gurgel, K. W., H. H. Essen and T. Schlick "An Empirical Method to Derive Ocean Waves From Second-Order Bragg Scattering: Prospects and Limitations." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 31(4), 2006, pp. 804-811.
35. Gurgel, A.D.I.K.-W., and Schlick, T. "HF Radar WERA Application for Ship Detection and Tracking 1." ,2010.
36. Hardman, R. L., L. R. Wyatt and C. C. Engleback "Measuring the Directional Ocean Spectrum from Simulated Bistatic HF Radar Data." *Remote Sensing* 12(2), 2020.
37. Hashimoto, N. and M. Tokuda "A Bayesian Approach for Estimation of Directional Wave Spectra with HF Radar." *Coastal Engineering Journal* 41(2), 1999, pp. 137-149.

38. Hashimoto, N., L. R. Wyatt and S. Kojima "Verification of a Bayesian Method for Estimating Directional Spectra from HF Radar Surface Backscatter." *Coastal Engineering Journal* 45(2), 2003, pp. 255-274.
39. Hasselmann, K. "Determination of Ocean Wave Spectra from Doppler Radio Return from the Sea Surface." *Nature Physical Science* 229, 1971, p. 16.
40. Helzel, T., M. Kniephoff and L. Petersen "WERA : Remote Ocean Sensing for Current, Wave and Wind Direction." *IEEE US/EU Baltic International Symposium*, 2006.
41. Heron, M. L., P. E. Dexter and B. T. McGann "Parameters of the Air-sea Interface by High-frequency Ground-wave Doppler Radar." *Marine and Freshwater Research* 36(5), 1985, pp. 655-670.
42. Heron, S. and M. L. Heron "A Comparison of Algorithms for Extracting Significant Wave Height from HF Radar Ocean Backscatter Spectra." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology - J ATMOS OCEAN TECHNOL* 15, 1998.
43. Heron, S. F. and M. L. Heron "A Comparison of Algorithms for Extracting Significant Wave Height from HF Radar Ocean Backscatter Spectra." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15(5), 1998, pp. 1157-1163.
44. Hilmer, T. "Radar Sensing of Ocean Wave Heights. " *Master*, 2010.
45. Hisaki, Y. "Nonlinear Inversion of the Integral Equation to Estimate Ocean Wave Spectra from HF radar." *Radio Science* 31(1), 1996, pp. 25-39.
46. Howell, R. and E. J. Walsh "Measurement of Ocean Wave Spectra Using Narrow-Beam HF Radar." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 18(3), 1993, pp. 296-305.
47. Howell, R. K. "An Algorithm for the Extraction of Ocean Wave Spectra from Narrow Beam HF Radar Backscatter." *Masters Thesis (Masters)*, Memorial University of Newfoundland, 1990.
48. Jangal, F., Saillant, S., & Helier, M. "Wavelet Contribution to Remote Sensing of the Sea and Target Detection for a High-Frequency Surface Wave Radar. " *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5, 2008, pp. 552-556.
49. Kendall, M.G., A. Stuart and J. K. Ord "The Advanced Theory of Statistics." London: Charles Griffin and Company Ltd , 1967.
50. Kirincich, A. R., T. de Paolo and E. Terrill "Improving HF Radar Estimates of Surface Currents Using Signal Quality Metrics, with Application to the MVCO High-Resolution Radar System." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 29(9), 2012, pp. 1377-1390.

51. Kirincich, A. "Improved Detection of the First-Order Region for Direction-Finding HF Radars Using Image Processing Techniques." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34, 2017, pp. 1679-1691
52. Lipa, B. and D. Barrick "Least-squares Methods for the Extraction of Surface Currents from CODAR crossed-loop data : Application at ARSLOE." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 8(4), 1983, pp. 226-253.
53. Lipa, B. and D. E. Barrick, "Extraction of sea state from HF Radar Sea Echo: Mathematical Theory and Modeling." *Radio Science* 21(1), 1986, pp. 81-100.
54. Lipa, B. and B. Nyden, "Directional Wave Information from the SeaSonde." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 30(1), 2005, pp. 221-231.
55. Lipa, B. J. and D. E. Barrick, "Analysis Methods for Narrow-beam High-Frequency Radar Sea Echo." , Vol. 82, No.252123, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories., 1982.
56. Lipa, B. J. and D. E. Barrick, "Extraction of Sea State from HF Radar Sea Echo:Mathematical Theory and Modeling." *Radio Science* 21(1), 1986, pp. 81-100.
57. Longuet-Higgins, M., D. E. Cartwright and N. D. Smith "Observations of the Directional Spectrum of Sea Waves Using the Motions of a Floating Buoy." *Ocean Wave Spectra*, proceedings of a conference, Easton, Maryland, Prentice-Hall, 1963.
58. Lopez, G., Conley, D. C., & Greaves, D. Calibration, "Validation, and Analysis of an Empirical Algorithm for the Retrieval of Wave Spectra from HF Radar Sea Echo." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, 2016, pp. 245-261.
59. Lukijanto, L., N. Hashimoto and M. Yamashiro, "Verification of a Modified Bayesian Method for Estimating Directional Wave Spectra from HF Radar." *Coastal Engineering Proceedings* 1(32), 2011.
60. Mantovani, C., Corgnati, L., Horstmann, J., Rubio, A., Reyes, E., Quentin, C., Cosoli, S., Asensio, J.L., Mader, J., & Griffa, A., "Best Practices on High Frequency Radar Deployment and Operation for Ocean Current Measurement." *Frontiers in Marine Science*, 7, 2020.
61. Maresca, J. W. and T. M. Georges, "Measuring Rms Wave Height and the Scalar Ocean Wave Spectrum with HF Skywave Radar." *JGR Oceans* 85, 1980, pp. 2759-2772.
62. N. Bhuiya, S., Islam, F., & Matin, M., "Analysis of Direction of Arrival Techniques Using Uniform Linear Array." *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 4, 2012, pp. 931-934.

63. Paduan, J. D., R. Delgado, J. F. Vesecky, Y. Fernandez, J. Daida and C. Teague ,
"Mapping coastal winds with HF radar." Proceedings of the IEEE Sixth Working
Conference on Current Measurement (Cat. No.99CH36331), 1999.
64. Paduan, J. D. and L. Washburn, "High-frequency Radar Observations of Ocean
Surface Currents." *Ann Rev Mar Sci* 5, 2013, pp. 115-136.
65. Ramos, R.J., Graber, H. C., & Haus, B. K, "Observation of Wave Energy Evolution
in Coastal Areas Using HF Radar." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*,
26, 2009, pp. 1891-1909.
66. Rice, S. O., "Reflection of Electromagnetic Waves From Slightly Rough Surfaces."
Communications on Pure and Applied Mathematics 4(2-3), 1951, pp. 351-378.
67. Roarty, H., T. Cook, L. Hazard, D. George, J. Harlan, S. Cosoli, L. Wyatt, E. Alvarez
Fanjul, E. Terrill, M. Otero, J. Largier, S. Glenn, N. Ebuchi, B. Whitehouse, K.
Bartlett, J. Mader, A. Rubio, L. Corgnati, C. Mantovani, A. Griffa, E. Reyes, P.
Lorente, X. Flores-Vidal, K. J. Saavedra-Matta, P. Rogowski, S. Prukpitikul, S.-H.
Lee, J.-W. Lai, C.-A. Guerin, J. Sanchez, B. Hansen and S. Grilli, "The Global High
Frequency Radar Network." *Frontiers in Marine Science* 6(164), 2019.
68. Robinson, A. M., L. R. Wyatt and M. J. Howarth, "A Two Year Comparison between
HF Radar and ADCP Current Measurements in Liverpool Bay." *Journal of
Operational Oceanography* 4(1), 2011, pp. 33-45.
69. Rubio, A., J. Mader, L. Corgnati, C. Mantovani, A. Griffa, A. Novellino, C. Quentin,
L. Wyatt, J. S.-S., J. Horstmann, P. Lorente, E. Zambianchi, M. Hartnett, C.
Fernandes, V. Zervakis, P. Gorringe, A. Melet and I. Puillat, "HF Radar Activity in
European Coastal Seas: Next Steps toward a Pan-European HF Radar Network."
Frontiers in Marine Science 4(8), 2017, pp. 1-20.
70. Schmidt, R., "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation." *IEEE
Transactions on Antennas and Propagation* 34, 1986, pp. 276-280.
71. Shahidi, R. and E. Gill, "A New Automatic Nonlinear Optimization-Based Method
for Directional Ocean Wave Spectrum Extraction From Monostatic HF-Radar Data."
IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, pp. 1-19.
72. Shay, L. K., J. Martinez-Pedraja, T. M. Cook, B. K. Haus and R. H. Weisberg, "High-
Frequency Radar Mapping of Surface Currents Using WERA." *Journal of
Atmospheric and Oceanic Technology* 24(3), 2007, pp. 484-503.
73. Shen, W., K.-W. Gurgel, G. Voulgaris, T. Schlick and D. Stammer, "Wind-speed
Inversion from HF Radar First-order Backscatter signal." *Ocean Dynamics* 62(1),
2012, pp. 105-121.

74. Stewart, R. H. and J. R. Barnum, "Radio Measurements of Oceanic Winds at Long Ranges: An evaluation." *Radio Science* 10(10), 1975, pp. 853-857.
75. Teague, C., "Multifrequency HF Radar Observations of Currents and Current shears." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 11(2), 1986, pp. 258-269.
76. Tian, Y., Tian, Z., Zhao, J., Wen, B., & Huang, W., "Wave Height Field Extraction From First-Order Doppler Spectra of a Dual-Frequency Wide-Beam High-Frequency Surface Wave Radar." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58, 2020, pp. 1017-1029
77. Tian, Y., Wen, B., Tan, J., & Li, Z., "Study on Pattern Distortion and DOA Estimation Performance of Crossed-Loop/Monopole Antenna in HF Radar." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65, 2017, pp. 6095-6106
78. Voronovich, A. G. and V. U. Zavorotny, "Measurement of Ocean Wave Directional Spectra Using Airborne HF/VHF Synthetic Aperture Radar: A Theoretical Evaluation." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 55(6), 2017, pp. 3169-3176.
79. Wang, W., & Gill, E.W., "Evaluation of Beamforming and Direction Finding for a Phased Array HF Ocean Current Radar." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, 2016, pp. 2599-2613
80. Wyatt, L. R., "A Relaxation Method for Integral Inversion Applied to HF Radar Measurement of the Ocean Wave Directional Spectrum." *International Journal of Remote Sensing* 11(8), 1990, pp. 1481-1494.
81. Wyatt, L. R., B. W. Green, A. Middleditch, M. D. Moorhead, J. Howarth, M. Holt and S. Keogh, "Operational Wave, Current, and Wind Measurements With the Pisces HF Radar." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 31(4), 2006, pp. 819-834.
82. Wyatt, L. R., J. Venn, G. Burrows, A. Ponsford, M. Moorhead and J. V. Heteren, "HF Radar Measurements of Ocean Wave Parameters During NURWEC." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 11(2), 1986, pp. 219-234.
83. Wyatt, L. R., "High Order Nonlinearities in HF Radar Backscatter From the Ocean Surface." *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation* 142(6), 1995, pp. 293-300.
84. Wyatt, L.R., Liakhovetski, G., Graber, H. C., & Haus, B. K., "Factors Affecting the Accuracy of SHOWEX HF Radar Wave Measurements." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22, 2005, pp. 847-859
85. Wyatt, L. R., A. Mantovanelli, M. L. Heron, M. Roughan and C. R. Steinberg, "Assess-ment of Surface Currents Measured With High-Frequency Phased-Array

Radars in Two Regions of Complex Circulation." IEEE Journal of Oceanic Engineering, 43(2), 2018, pp. 484-505.

86. Wyatt, L. R., "Measuring the Ocean Wave Directional Spectrum 'First Five' with HF radar." Ocean Dynamics 69(1), 2019, pp. 123-144.
87. Wyatt, L. R., J. J. Green and A. Middleditch, "HF Radar Data Quality Requirements for Wave Measurement." Coastal Engineering 58(4), 2011, pp. 327-336.
88. Young, I. R., "The Determination of Confidence Limits Associated with Estimates of The Spectral Peak Frequency." Ocean Engineering 22(7), 1995, pp. 669-686.
89. Young, I. R. and L. A. Verhagen, "The Growth of Fetch Limited Waves in Water of Finite Depth. Part 1. Total Energy and Peak Frequency." Coastal Engineering 29(1), 1996, pp. 47-78.
90. Zhou, H., C. Wang, J. Yang, Y. Tian and B. Wen, "Wind and Current Dependence of the First-Order Bragg Scattering Power in High-Frequency Radar Sea Echoes." IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, pp. 1-5.
91. R. Shahidi, W. Huang, Eric W. Gill, "High-Frequency-Radar Ocean Remote Sensing on the Atlantic's Edge." , IEEE Canadian Review, 2020, pp. 18-20.
92. Yang, Y., Wei, C., Yang, F., Lu, T., Zhu, L., & Wei, J., "A Machine Learning-Based Correction Method for High-Frequency Surface Wave Radar Current Measurements. " Applied Sciences, 12(24), 2022, p.12980.
93. Zhou, C., Wei, C., Yang, F., & Wei, J., "A Quality Control Method for High Frequency Radar Data Based on Machine Learning Neural Networks." Applied Sciences, 13(21), 2023, p.11826.
94. Zhu, L., Lu, T., Yang, F., Liu, B., Wu, L., & Wei, J., "Comparisons of Tidal Currents in the Pearl River Estuary between High-Frequency Radar Data and Model Simulations." Applied Sciences, 12(13), 2022, p.6509.

附錄一

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所自辦研究計畫 期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-113- H2CA001g

計畫名稱：臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

執行單位：交通部運輸研究所運輸技術研究中心第二科

參與審查人員及其所提之意見	執行單位處理情形
(一)臺灣港務股份有限公司 張欽聰委員：	
1.第6-2頁，第6.2小節(二)「...已確定雷達波浪數據的品管限制...」，品字漏印。	感謝委員建議，有關第6.2小節(二)品字漏印已修訂完成。
2.本案113年度觀測成果發現兩座雷達站老化，是否可以引入軟體定義無線電(SDR)技術為雷達系統延壽。	感謝委員建議，傳統無線電通常依賴特定的電子元件（例如：調變器、濾波器、混頻器等元件）來處理無線電訊號，因此，維護較容易受到限制，若能採行無線電 (SDR, Software Defined Radio) 技術透過數位處理方式取代部分硬體功能，具有較高的靈活性，可執行度高，理論上可做為延壽方案之一，本計畫後續將納入改善評估項目中探討。
3.本案於112年期末報告中曾納入112年登陸之颱風比較雷達陣列、底碇式儀器與中央氣象署浮標的觀測結果，在數據統計分析上有波高、週期、流向與潮汐變化等等探討，惟今年僅有波高與週期之分析，建議數據分析應有一致與連續性，更能凸顯研究之價值。	感謝委員建議，為數據分析應有一致與連續性，數據分析應保持連貫的處理方式，以提升研究價值，故本計畫報告內容已針對海流流速、流向及潮汐變化等數據進行統計分析，並將其整理納入第四章 4.4 海流觀測資料分析，詳細內容可參閱報告第4-10頁至第4-25頁。此外，針對波高與颱風情境的比較分析部分，亦比照去(112年)報告颱風海流情境分析模式，補充波高受颱風影響之特性分析，並納入第五章 5.2 小節颱風觀測情境比較分析探討，相關內容可參閱報告 第5-30頁。
4.近日發生「液態寶石輪」於臺中港南防沙堤擱淺，鑒於本案海洋陣列雷達亦可偵測船舶，建議本案應用分析將船舶擱淺、碰撞等列入分析，以提供臺中港務分公司做為預警告示及提高應變餘裕。	感謝委員建議，本次擱淺事件凸顯海上航行風險的不確定性，針對此議題，運研所已將船舶偵測納入明（114）年度海洋陣列雷達研究課題，並將結合雷達與船舶自動識別系統（AIS），進行臺中港船舶航行預警分析，期望透過精進技術與數據應用，提升預警能力，降低類似事件發生的風險。

5. 臺中港北淤沙區為具備風力發電潛力區域，惟該區鄰近VTS，風力發電機恐屏蔽VTS雷達而有陰影區域，因此均未能有效開發利用。建請是否可於北防波堤設置副雷達，以延伸偵測區域，倘若可行，則可增加陸域風機場域，為能源轉型與淨零碳排等政策盡一份心力。	感謝委員建議，關於臺中港北淤沙區風力發電開發影響VTS雷達偵測議題，產生遮蔽與假回波問題，設置副雷達站，利用主副雷達站延伸偵測區域技術理論可行，但風機對於雷達回波影響，難以消除，僅能盡可能降低風機對於航安影響，若北淤沙區有需要增設風機與進行有條件開發，建議進行可行性評估，以確保兼顧航安與臺中港發展。
(二)國立成功大學 莊士賢委員：	
1. 系統品管監控是品管流程的第一步，報告只著重在資料品管，建議補充「系統品管」的說明，包括天線場型品管。	感謝委員建議，本報告已針對第三章內容進行調整，調整章節順序並補充「雷達系統品管」相關流程與說明，包括：硬體各項參數、天線系統、傳輸電纜等，確保系統品管機制完整納入報告。具體修訂情形，如第3-2頁第 3.1 小節。
2. 本年度將主動天線改為被動天線，雖可讓系統更能適用於本土環境與氣候條件，但是否會存在原本採用主動天線欲解決的問題(見報告第3-5頁之第1行)。	感謝委員建議，本年度已將主動式天線更換為被動式天線，此調整使系統更能適應本土環境與氣候條件，減少潮濕環境對設備影響。然而，對於原先採用主動式天線所欲解決的問題是否仍然存在，又或者原本採用主動天線欲解決的問題尚未解決，仍需經由長期監測進一步評估確認，以確保整體雷達效能維持穩定與最佳化。
3. 第3.3小節的波浪數據品管似乎與報告第2.2頁所提供的Level 2 與Level 3 之規劃不一致？	感謝委員建議，原第 3.3 小節「波浪數據品管」為避免誤解，已調整為「波浪數據限制」，由於本(113)年度報告聚焦於波浪觀測分析結果，因此，僅呈現Level 2 與Level 3 的波浪品管內容。若需完整納入第2.2頁波浪與流速Level 2 (單站逕向)與 Level 3(雙站合成)的品管機制，將於第3年報告中進一步補充與詳述，確保整體品管架構的完整性。
4. 第4.2小節 (第4-7頁的倒數第2行)提及採用第716號儲存格(Range cell)，但 range cell是代表某一距離帶，且包含各角度，無法代表空間上某一位置，請補充說明。此外，本節的驗證結果應有文字說明。	感謝委員指導與建議，先前對於「Range cell」的意義理解有誤解，經委員指導後，確認其代表為某一距離帶，故已將「Range cell」修正為「cell」，以更準確描述數據所對應的空間範圍。此外，配合章節調整，將「統計分析方法」新增至第4.2小節，原第4.2 小節的驗證結果，調整至4.3小節，並已依據委員建議

	於報告第 4-9 頁與第 4-10 頁補充文字說明，以強化數據分析與驗證結果的完整性。
5. 圖 5.3~5.10 中的 HTCN 與 HTCS 各代表什麼？請在 5.1 節中補充說明。圖 5.4 中之第二圖與第三圖相同應為筆誤，圖二應改為 HTCS。	感謝委員建議，運研所 107 年北防沙堤建置的海洋陣列雷達站，稱為臺中港海洋雷達北站(HTCN)，110 年於臺中火力發電廠放流口建置的第二座海洋陣列雷達站，稱為臺中港海洋雷達南站(HTCS)，已於報告第 1-10 頁及第 5.1 節報告第 5-1 頁補充說明。另外，有關委員指正圖 5.4 筆誤誤植處亦已修正完成。
6. 本計畫所需的理論與技術相當繁多，報告著者確實能掌握系統每一程序的細節，進而有效應用於作業化的運作，相當不易。從目前運輸技術研究中心在雷達系統應用所達之成果看來，未來的長期運作，甚至進一步運用會有相當大的發展空間，但國內有能力兼顧此領域之理論與應用的研究人員相當稀少，故目前培養的這些專才，應有持續的計畫去支持。	感謝委員肯定與建議，本計畫涉及理論與技術確實繁多，能夠逐步掌握並應用於作業化運作，仰賴研究人員持續努力與專業累積。運研所也深刻體認到雷達系統應用在國內仍具相當大的發展潛力，未來將持續精進技術、優化運作模式，並探索更廣泛的應用領域，以發揮最大效益；同時，認同委員所提，目前國內在此領域兼顧理論與應用的專業人才仍屬於稀缺，為確保技術延續與發展，將積極透過合作推動人才培育與知識傳承，期望深化研究與提升專業能力，強化國內雷達領域之自主性。
(三)國家海洋研究院 賴堅戈委員委員	
1. 本研究對我國在海洋雷達遙測技術落地有重要貢獻和意義，研究團隊在研究方向和技術開發規劃與執行都很專業，值得佳許。	感謝委員對本計畫肯定與支持。運研所針對海洋雷達遙測技術的發展與應用，期望能強化海洋監測與應用。研究人員於技術開發與應用規劃上，積極與相關單位密切合作，以確保研究成果能有效落地應用。未來將持續優化技術，透過跨領域合作，促進雷達遙測技術於海洋環境監測、防災減災等方面的應用，為國家政策與產業發展提供更具實用的價值。
2. 建議在第一章能加強「精準的問題意識」，描述如何解決什麼現況未能解決的問題，改善或釐清運輸研究所或利害關係人的什麼問題。	感謝委員指導與建議，臺灣推動離岸風電與低碳能源轉型過程，港區與航道安全挑戰日益加劇，風電場與商船航道交錯，增加航行風險，本計畫希望透過海洋雷達遙測技術，加強智慧環境監測，建構數據智慧化，以滿足交通部暨部屬機構防災的需求，相關說明已於報告第一章第 1-11 頁補充。

3. 建議在第二章文獻回顧可以多一個小節，彙整2019—2023年間5篇和高頻雷達測波流有關的文獻，釐清和本研究的關係或突破，為後面的章節埋下伏筆，讓讀者更瞭解這個研究在科學研究進程中的位置。	感謝委員指導與建議，第二章文獻展示各種高頻雷達遙測波流技術與不同方法，包括：機器學習、數值模擬與新型計算方法，並探討雷達配置，對於波浪高度數據觀測之影響，為利讀者更瞭解本計畫於科學研究進程中的位置，增加第2.3小節進一步說明2019—2023年間這5篇文獻研究成果差異，相關成果與運用情形，整理如報告第2-26頁與表2-2。
4. 在結論中提及老化的推論，建議更多的佐證論述，強化結論的正當合理性。潮位觀測資料之品管措施，建議可補註說明。	感謝委員建議，關於結論提及雷達站老化的推論，僅依據雷達站架設時間估計不夠嚴謹，應該需要提出更多老化的直接證明，才足以證實老化情形存在，已酌修結論(三)內容，如報告第6-1頁；另外，有關潮位觀測的補充資料已補充說明如報告第4-12頁至第4-15頁與圖4.7，請委員參閱。
(四)運研所運輸技術研究中心第二科 李俊穎科長	
1. 本研究應用2種雷達訊號分析方式進行波浪觀測成果具參考性。	感謝委員肯定。本計畫透過雷達觀測資料與傳統波浪測量方法進行比對，結果顯示兩者誤差均在可接受範圍內。此外，不同雷達訊號分析方式各具優勢，能相互補強，提供更完整的波浪資訊。
2. 第4-8頁、第5-3頁至第5-10頁等時序列遙測與AWAC均有相位差，建議加以釐清。	感謝委員建議，有關雷達遙測與AWAC時序列數據相位差，主要來自時間標準不同所致，雷達遙測採用世界協調時間(UTC)，即英國格林威治時間，AWAC則使用臺灣標準時間(UTC+8)，本計畫已統一時間標準，確保資料比對的一致性，以避免類似情況發生。
3. 表3-2品管限制，Hs、Tm、Tp無下限請再釐清說明。	感謝委員建議，本計畫已針對表 3.2 品管限制中的 Hs、Tm、Tp 參數補充下限值，報告第3-14頁與表3-3。
(五)運研所運輸技術研究中心第三科 林雅雯科長	
1. 本研究進行雷達演算軟體開發並與國外Seaview Sensing軟體及AWAC比較，值得肯定。	感謝委員的肯定。本計畫採用英國雪菲爾大學開發的 Seaview Sensing 軟體，該軟體遵循嚴謹的品管程序，並已廣泛應用於各國研究分析，因此，成為本計畫雷達演算軟體開發的重要參考標準。後續研究將持續優化演算方法，並拓展更多應用場景，以提升本土技術的精確度

	與實用性。
2. 第 4-8 頁，圖 4.5 顯示 AWAC 與 Seaview Sensing 演算法所得示性波高似有 6 小時的時間差，建議後續釐清原因。	感謝委員建議，有關 AWAC 與 Seaview Sensing 演算法所得示性波高時序列數據相位差，主要來自時間標準不同所致，雷達遙測採用世界協調時間(UTC)，而 AWAC 採用臺灣標準時間(UTC+8)，本計畫統一時間標準，並已修正報告第 4-9 頁與圖 4.5～圖 4.7。
3. 第 4-8 頁，圖 4.6 顯示本計算演算法示性波高趨勢與 Seaview Sensing 演算法一致，但數據突然偏高或偏低的情形較 Seaview Sensing 演算法多，且異常值較 Seaview Sensing 演算法大 1 倍，建議後續釐清原因。	感謝委員建議，本計畫演算法示性波高趨勢與 Seaview Sensing 演算法一致，但在某些時段數據波動較大，異常值幅度較高，初步分析，可能與雷達回波訊號處理方等濾波參數設定或特定環境條件影響有關，後續研究將針對異常值出現的情境進行更細緻的分析，檢視可能的影響因素，並優化演算方法，以提升穩定性與準確性。
4. 第 5-3 頁，本計算演算法與 AWAC 示性波高比較即有時間差及異常值較多的情形。	感謝委員建議，本計算演算法與 AWAC 示性波高比較即有時間差，已將雷達遙測時間修正為臺灣 UTC+8 時間，異常值較多情形亦一併修正，並重新繪製圖，詳如報告第 5-14 頁至第 5-29 頁與圖 5.3 至圖 5.18。
5. 第 5-8～5-10 頁，6-8 月夏季 AWAC 示性波高約 1m 時，雷達反演波高與其差異較大，建議後續釐清原因。	感謝委員建議，有關夏季 6～8 月期間，雷達觀測品質嚴重降低，雷達與 AWAC 觀測波高幾乎無相關性，初步研判應與雷達系統的健康狀態有關，後續將安排人員進一步檢查維修，以釐清原因。

附錄二

期末簡報資料

交通部運輸研究所運輸技術研究中心

臺中港高頻雷達訊號應用分析(2/3)- 波浪流觀測分析

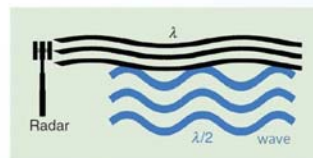
報告人：李政達

中華民國113年12月30日

大綱

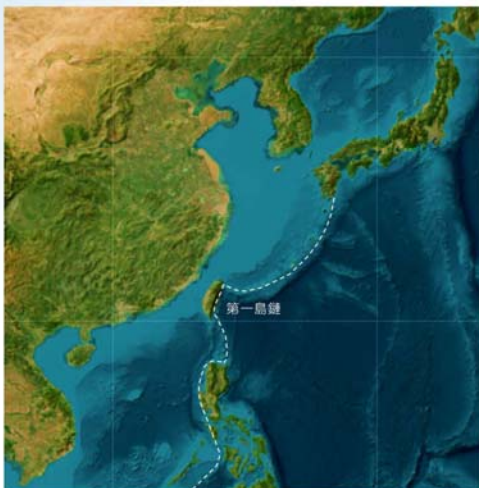
Outline

- 一、前言
- 二、文獻回顧
- 三、雷達系統精進與波浪數據品管
- 四、波浪監測資料分析與交互驗證
- 五、研究分析與探討
- 六、結論與建議



前言(1/9)：研究緣起與目的

臺灣位處東亞第一島鏈的關鍵位置



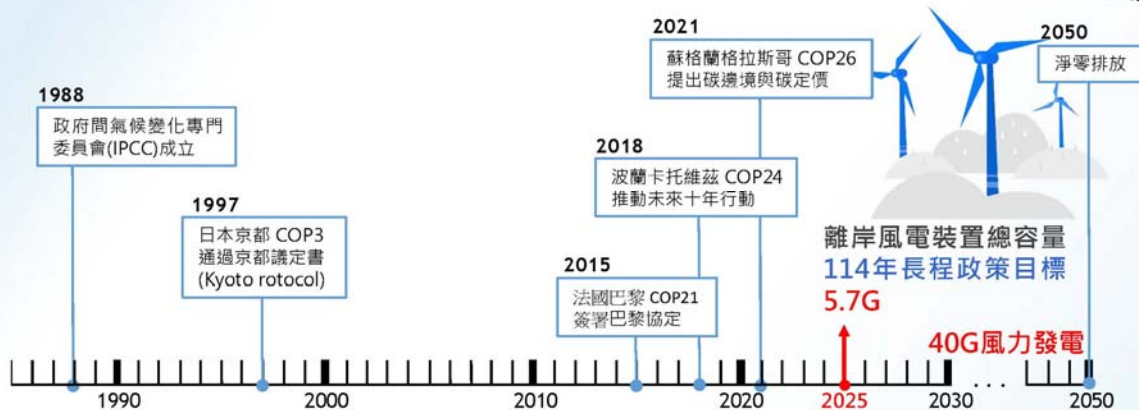
近憂遠慮 concern

- 01 能源政策轉型
Energy Development
- 02 國土空間規劃
Taiwan MSP situation

戰略意義為太平洋防線的門戶，臺灣暴露在地緣政治的風險區域。
在此意義上，**國土空間規劃甚至無法對外宣稱專屬經濟海域(EEZ)範圍**

2

前言(2/9)：研究緣起與目的



能源政策 淨零排放

歐盟、英國與加拿大已訂定2050年達成淨零排放目標，中國訂定2050年達成碳中和目標，**美國與澳洲尚未設定確切目標。**

3



前言(3/9)：研究緣起與目的



能源
01

2050 淨零路徑規劃 階段里程碑



前言(4/9)：研究緣起與目的



能源
01



前言(5/9)：研究緣起與目的



國土空間重新檢討 Taiwan MSP situation

都市計畫法

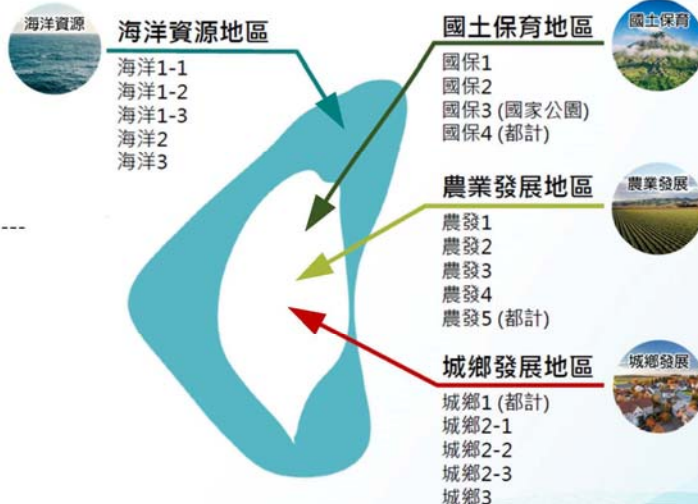
區域計畫法(非都)

2015-國土法

2018-全國國土計畫

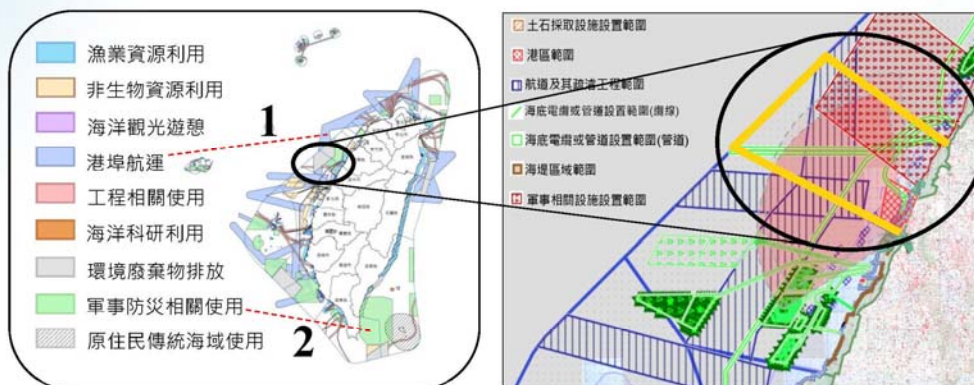
2021-縣市國土計畫

2025-國土功能分區



6

前言(6/9)：研究緣起與目的



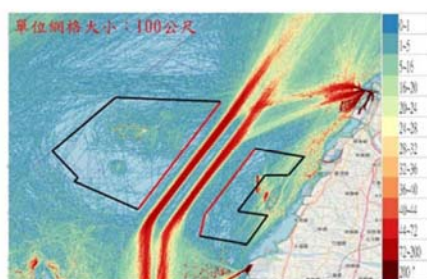
臺中港係臺灣海峽中部
重要的航運路線

臺中海1-1： 9305公頃 (2.39%)
海1-2： 19,589公頃 (5.04%)
海2： 91,423公頃 (23.51%)
海3： 42,654公頃 (10.97%)

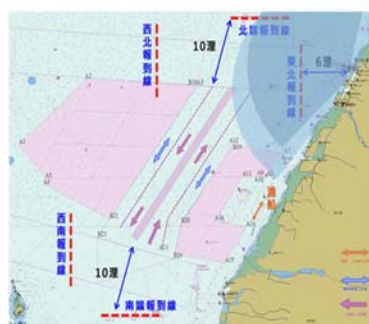
7

一 前言(7/9)：研究緣起與目的

- ① 研究範圍：**臺中港**沿海近岸、彰化風場道北航道。
- ② 應用單位：航港單位船舶出入口管理、臺灣港務股份有限公司臺中港分公司碼頭作業與港灣發展之參考。



2022年1~3月船舶交通流航跡密度分布圖



8

一 前言(8/9)：研究緣起與目的

- ① 基於交通部**掌管陸海空交通安全及維持航行安全**之必要。
- ② 本計畫接續海洋陣列雷達觀測研究，精進觀測技術，以獲得的海流資訊可做為船舶進出港區、相關單位做為港灣設計規劃、海事工程、海岸防護之重要參據

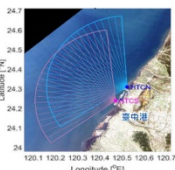


9

前言(9/9)：研究緣起與目的

研究範圍

- 臺中港鄰近海域之海象觀測
- 觀測半徑約40公里，120°以內之扇形區域



建置時間

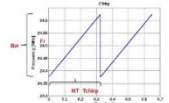
- 雷達北站 2018.12
- 雷達南站 2021.09

天線

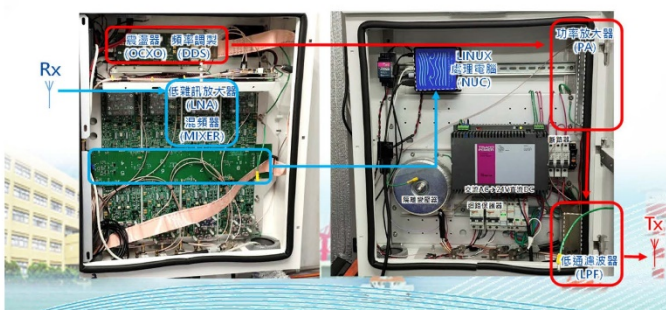
- 4 支發射
- 16 支接收

雷達基本資料

- 陣列式
- 中心頻率27.75MHz
- 頻寬300KHz
- 方向解析度5°
- 空間解析度500m
- 量測間隔30分鐘



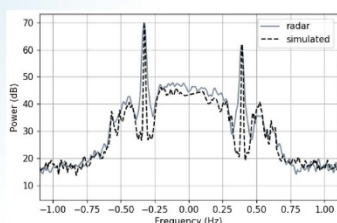
雷達參數	參數值	單位
觀測時距	30	分鐘
雷達頻率	27.75	MHz
頻寬	300	KHz
發射天線數量	4	支
接收天線數量	16	支
方位角	296	度
觀測距離	40	公里
距離解析度	500	公尺
方位解析度	8	度
線性調頻發射週期	0.216666	秒
A/DC 取樣頻率	740	Hz
最小線性調頻數量	8,192	個



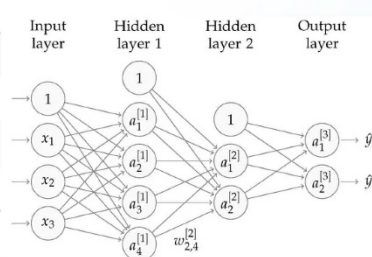
10

文獻回顧(1/12)：Hardman(2019) 1

Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2019)
Inversion of HF Radar Doppler Spectra Using a Neural Network.

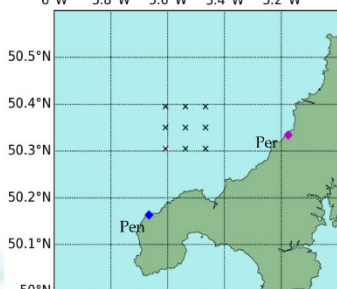


雷達頻率	12.3MHz
時間間隔	60Mins
發射天線	4支
接受天線	16支



Neural Network

單點位神經網絡(SLNN)
多點位神經網絡(MLNN)



(英格蘭康沃爾郡北海岸2座雷達站)

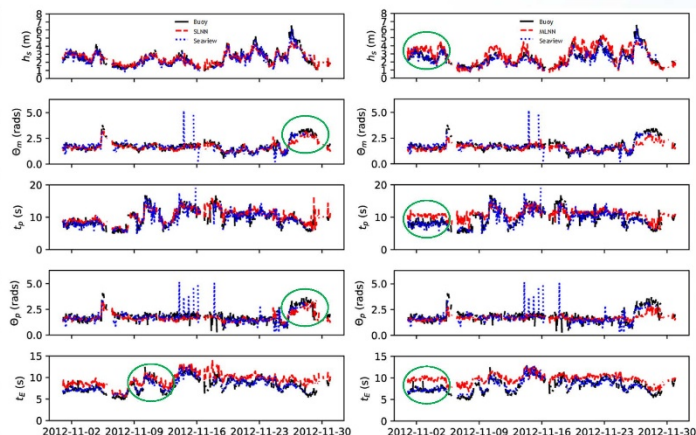


11

二 文獻回顧(2/12) : Hardman(2019) 1

Rachael L. Hardman & Lucy R Wyatt (2019)
Inversion of HF Radar Doppler Spectra Using a Neural Network.

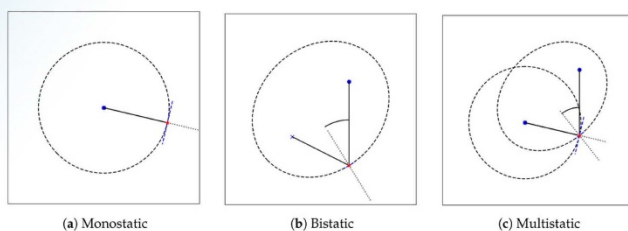
訓練參數	SLNN	MLNN
波束角 ϕ_1	15°	9°~42°
波束角 ϕ_2	264°	261°~288°
節點數量	880	999
層數	8	9
啟動函數	elu	relu
最小化演算法	Adam	Adam
計算次數	3000	3000



12

二 文獻回顧(3/12) : Hardman(2020) 2

Rachael L. Hardman, Lucy R Wyatt & Charles C. Engleback (2020)
Measuring the directional ocean spectrum from simulated bistatic HF radar data.



Anderson (2000)指出如果能將反演單基地雷達站的雷達橫截面更改為雙基地雷達站的表示方式，則現有演算法應該適用於雙基地雷達系統。



(1)雷達散射截面方程

(2)數值模擬細節

(3)研究成果展示

(4)修改後 Seaview 反演算法於模擬雙基地雷達數據的測試結果

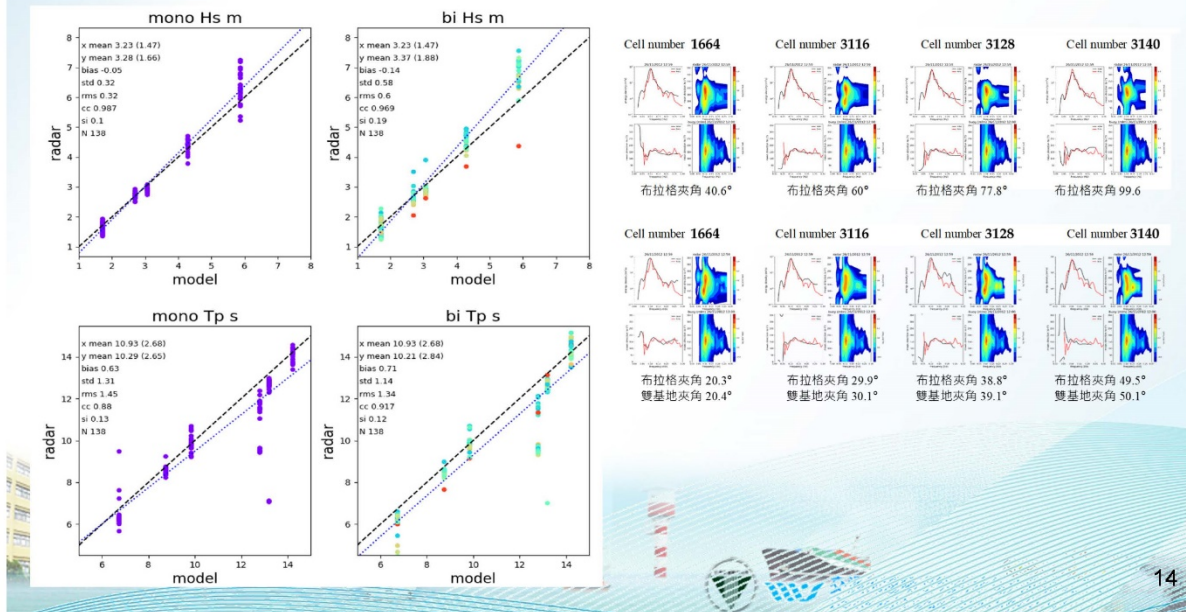
雷達頻率	12.3MHz
時間間隔	60Mins
發射天線	4支
接受天線	16支



13

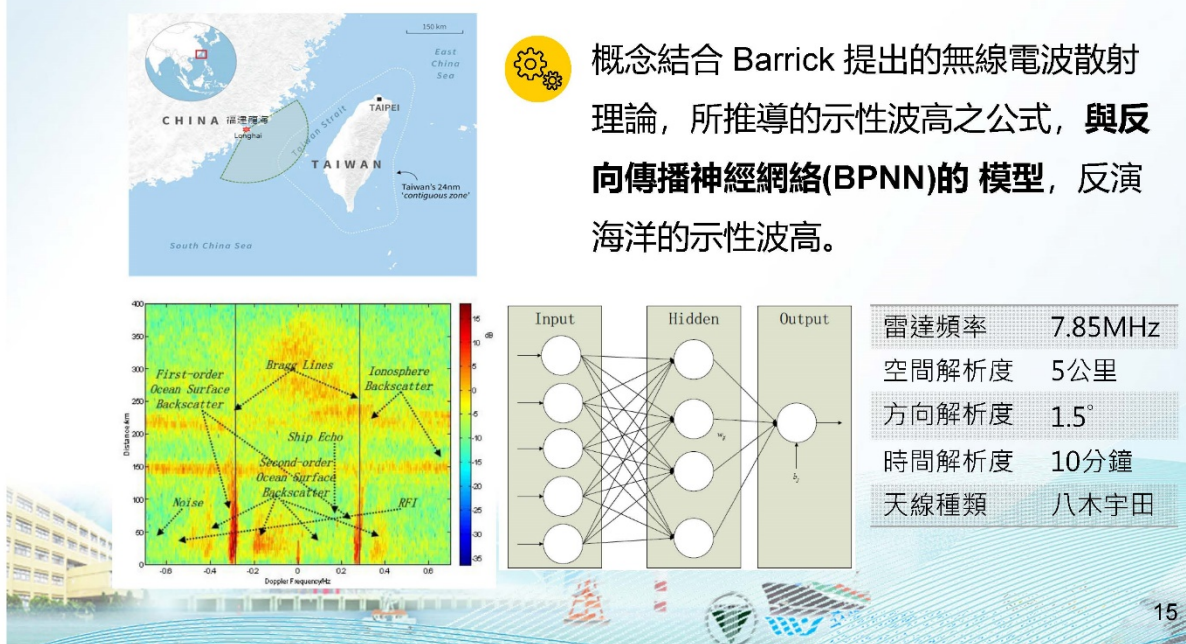
二 文獻回顧(4/12) : Hardman(2020) 2

Rachael L. Hardman, Lucy R Wyatt & Charles C. Engleback (2020)
Measuring the directional ocean spectrum from simulated bistatic
HF radar data.



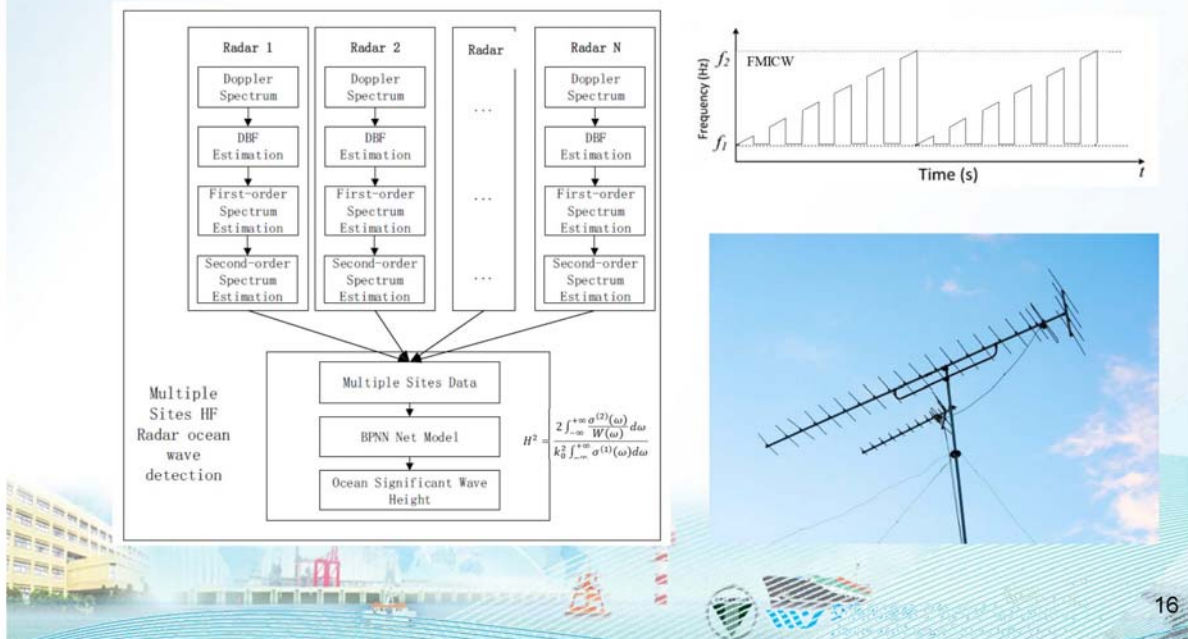
二 文獻回顧(5/12) : Li(2020) 3

Li, L., Sheng, L., Wu, H., & Wu, X. (2022)
Ocean Wave Inversion from HF Radar with BP Neural Network.



二 文獻回顧(6/12) : Li(2020) 3

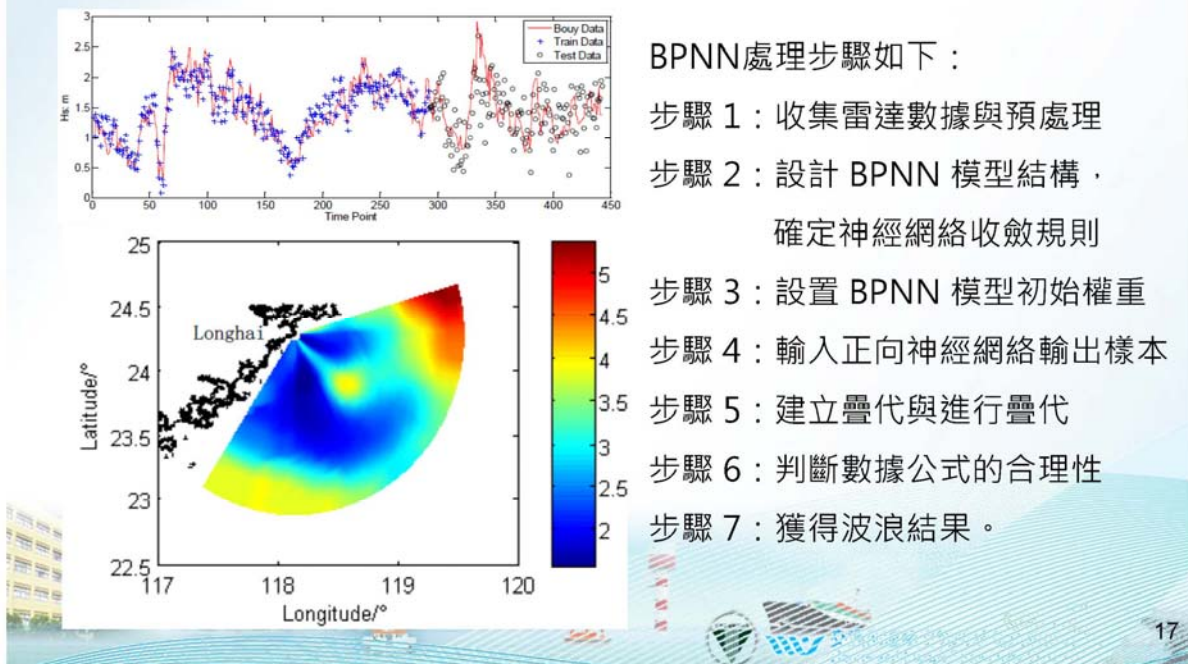
Li, L., Sheng, L., Wu, H., & Wu, X. (2022)
Ocean Wave Inversion from HF Radar with BP Neural Network.



16

二 文獻回顧(7/12) : Li(2020) 3

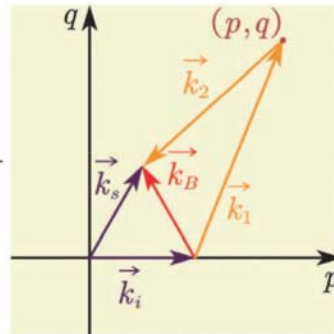
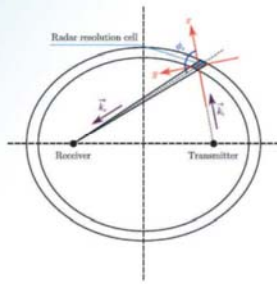
Li, L., Sheng, L., Wu, H., & Wu, X. (2022)
Ocean Wave Inversion from HF Radar with BP Neural Network.



17

二 文獻回顧(8/12) : Ding(2022) 4

Ding, F., Zhao, C., Chen, Z., & Deng, M. (2022).
Inversion of Ocean Wavenumber Spectrum from the Bistatic High-frequency Radar Sea Echoes.



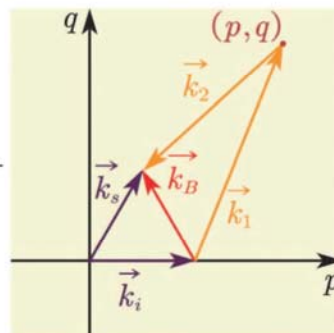
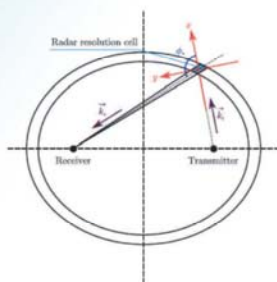
雙基地高頻雷達反演無方向性的海洋波數譜：
假設波浪方向分佈已知，透過計算二階與一階都卜勒頻譜的比值，再進行線與簡化處理，最後將比值轉為海洋波數譜與加權係數的線性組合，最後提取波數譜。



18

二 文獻回顧(9/12) : Ding(2022) 4

Ding, F., Zhao, C., Chen, Z., & Deng, M. (2022).
Inversion of Ocean Wavenumber Spectrum from the Bistatic High-frequency Radar Sea Echoes.



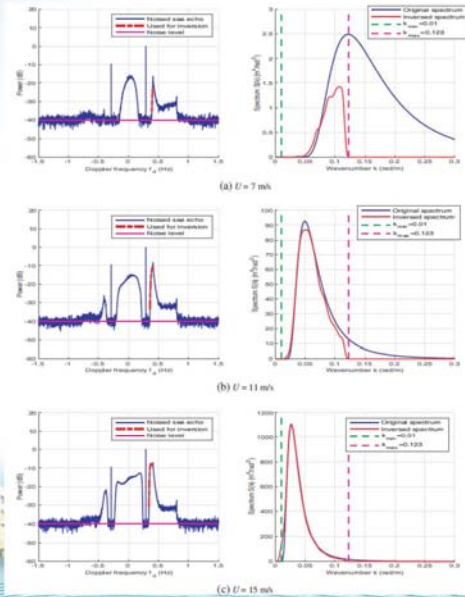
雙基地高頻雷達反演無方向性的海洋波數譜：
假設波浪方向分佈已知，透過計算二階與一階都卜勒頻譜的比值，再進行線與簡化處理，最後將比值轉為海洋波數譜與加權係數的線性組合，最後提取波數譜。



19

二 文獻回顧(10/12) : Ding(2022) 4

Ding, F., Zhao, C., Chen, Z., & Deng, M. (2022).
Inversion of Ocean Wavenumber Spectrum from the Bistatic High-frequency Radar Sea Echoes.



二階海面回波的理論模型：

$$\sigma^2(\omega_d) = 2^4 \pi k_0^4 (1 - \cos \varphi_s)^2 \sum_{m, m' = \pm 1} \iint |\Gamma_T|^2 S(m\bar{k}_1) S(m'\bar{k}_2) \delta(\omega_d - m_1 \sqrt{gk_1} - m_2 \sqrt{gk_2}) dp dq$$

定義 $h(k_1, \theta_1) = m_1 \sqrt{gk_1} + m_2 \sqrt{gk_2} - \omega_d$ 函數去簡化狄克拉函數，可將二階頻譜 p 與 q 關係式轉化為二階海面回波理論模型。

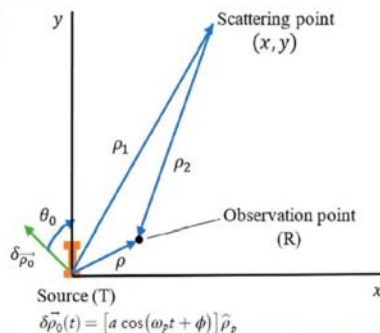
$$\sigma^2(\omega_d) \approx 2^5 \pi k_0^4 (1 - \cos \varphi_s)^2 \int_{\theta_B}^{\theta_B + 2\pi} |\Gamma_T|^2 S(m\bar{k}_1) S(m_2 \bar{k}_B) \left(\frac{k_B}{k_2}\right)^4 k_1 \left| \frac{\partial h(k_1 - \theta_1)}{\partial k_2} \right| d\theta_1$$

二 文獻回顧(11/12) : Hashemi (2023) 5

Hashemi, S., Shahidi, R., & Gill, E. W. (2023).
Extraction of the significant wave height from synthetic HF radar data acquired on a floating platform.



本研究係以 Shahidi (2020) 提出2種方法不需要計算都卜勒頻譜估算示性波高(Hs)的方式：



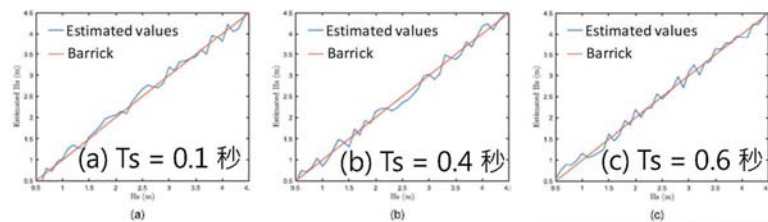
第1種方法：利用頻域一階接收場的短時傅立葉變換係數的變異數計算波高。

第2種方法：利用統計學變異數能描述一個隨機變數的離散程度，透過時域一階接收電場的變異數計算波高。

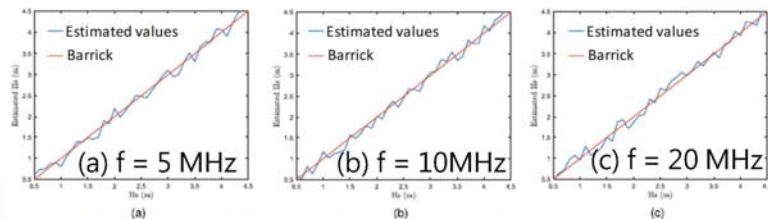
二 文獻回顧(12/12)：Hashemi (2023) 5

Hashemi, S., Shahidi, R., & Gill, E. W. (2023).
Extraction of the significant wave height from synthetic HF radar
data acquired on a floating platform.

■ 雷達頻率 15 MHz，不同取樣率估算與實際的示性波高值比較

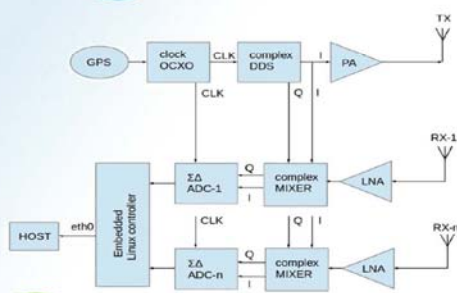


■ 固定取樣率 0.4 秒，不同雷達頻率情況估算與實際示性波高值比較



22

三 雷達系統精進與波浪數據品管

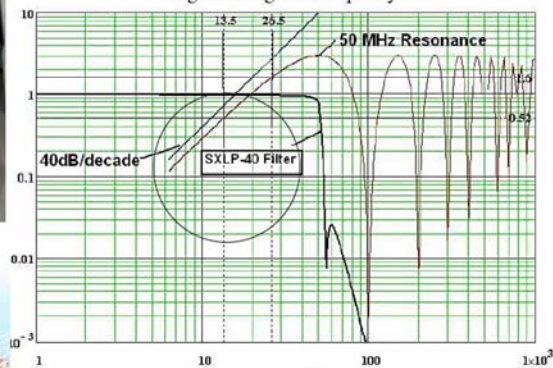


	長度關係	4.46MHz	8.25MHz	13.5MHz	16MHz	27MHz
電磁波長	λ	67.26m	36.36m	22.22m	18.75m	11.11m
垂直導線	$\lambda/4$	16.8m	9.09m	5.55m	4.69m	2.78m
環向導線	$\lambda/4$	16.8m	9.09m	5.55m	4.69m	2.78m
電桿高度	$\lambda/8$	8.4m	4.55m	2.78m	2.35m	1.29m
電桿直徑	$\lambda/300$	22.4cm	12cm	7.5cm	6.3cm	3.7cm

精進

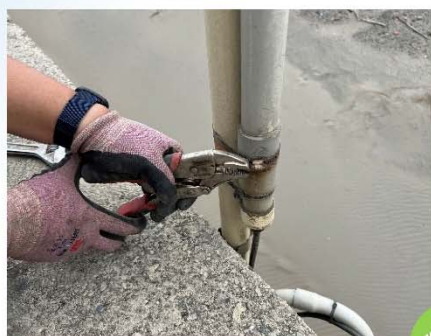


Signal Strength vs Frequency

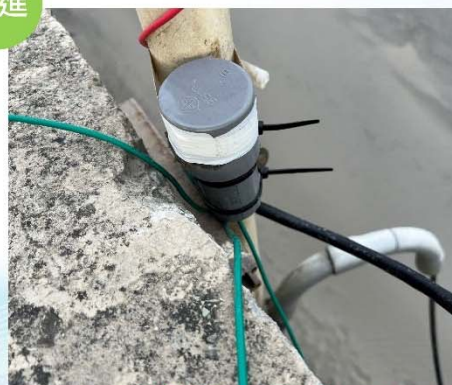


23

雷達系統精進與波浪數據品管



精進



24

雷達系統精進與波浪數據品管



Manual for Real-Time Quality Control of High Frequency Radar Surface Current Data

A Guide to Quality Control and Quality Assurance for
High Frequency Radar Surface Current Observations

Version 2.0
June 2022

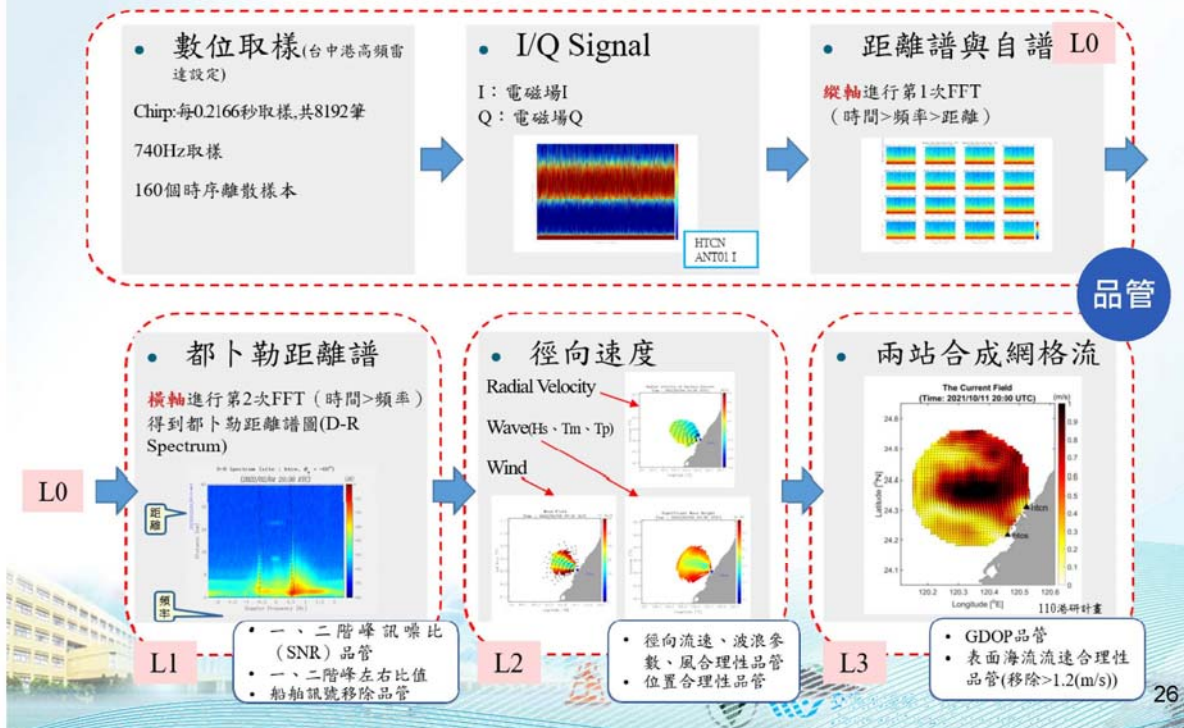
產品劃分	品管內容
Level 0	單雷達站/原始(IQ)資料品管
Level 1	單雷達站/都卜勒距離譜(DRS)品管
Level 2	單雷達站/徑向波浪、流速品管
Level 3	雙雷達站/空間波浪、流速品管

Test Type	Test Name	Status	Test Control
Signal (or Spectral) Processing	Signal to Noise Ratio (SNR) for Each Antenna (Test 101)	Required	Embedded
	Cross Spectra Covariance Matrix Eigenvalues ¹ (Test 102)	Suggested	Embedded
	Direction of Arrival (DOA) Metrics ² (magnitude) (Test 103)	Suggested	Embedded
	Direction of Arrival (DOA) Function Widths ³ (dB) (Test 104)	Suggested	Embedded
	Positive Definiteness of 2x2 Signal Matrix ⁴ (Test 105)	Required	Embedded
	Spikes (Test 201)	Required	National
Radial Components	Max Threshold (Test 202)	Required	Local and National
	Valid Location (Test 203)	Required	Local and National
	Radial Count (Test 204)	Suggested	Local and National
	Spatial Median Filter (Test 205)	Suggested	Local and National
	Temporal Gradient (Test 206)	Suggested	Local and National
	Average Radial Bearing (Test 207)	Suggested	Local and National
	Synthetic Radial (Test 208)	In development	Local and National
Total Vectors	Radial Stock Value (Test 209)	In development	Local and National
	Data Density Threshold ⁵ (Test 301)	Required	Local and National
	GDOP Threshold ⁶ (Test 302)	Required	Local and National
	Max Splice Threshold (Test 303)	Required	Local and National
	Spatial Median Comparison (Test 304)	Suggested	Local and National
	Valid Location (Test 305)	Suggested	Local
	U Component Underlying ⁷ (Test 306)	Required	Local
	V Component Underlying ⁸ (Test 307)	Required	Local

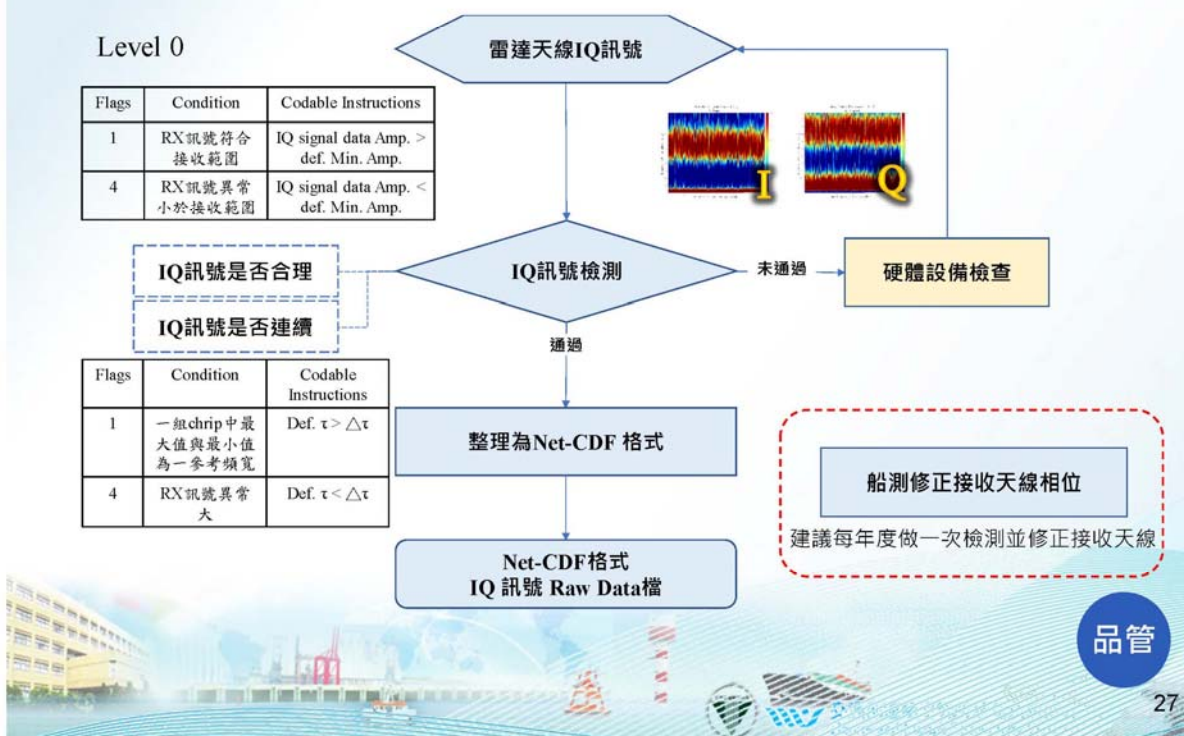
品管

25

雷達系統精進與波浪數據品管

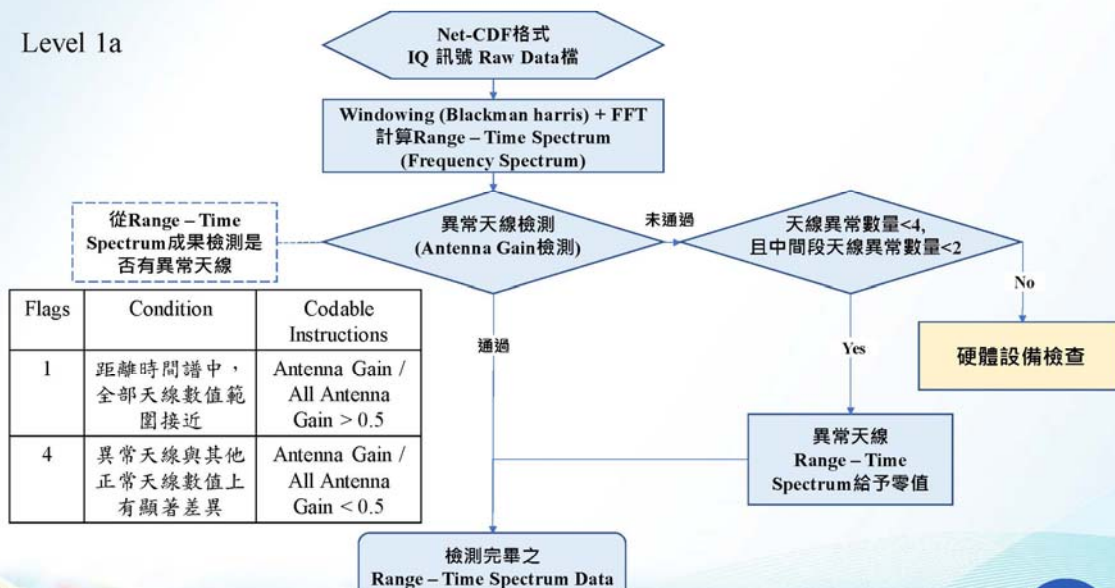


雷達系統精進與波浪數據品管



雷達系統精進與波浪數據品管

Level 1a

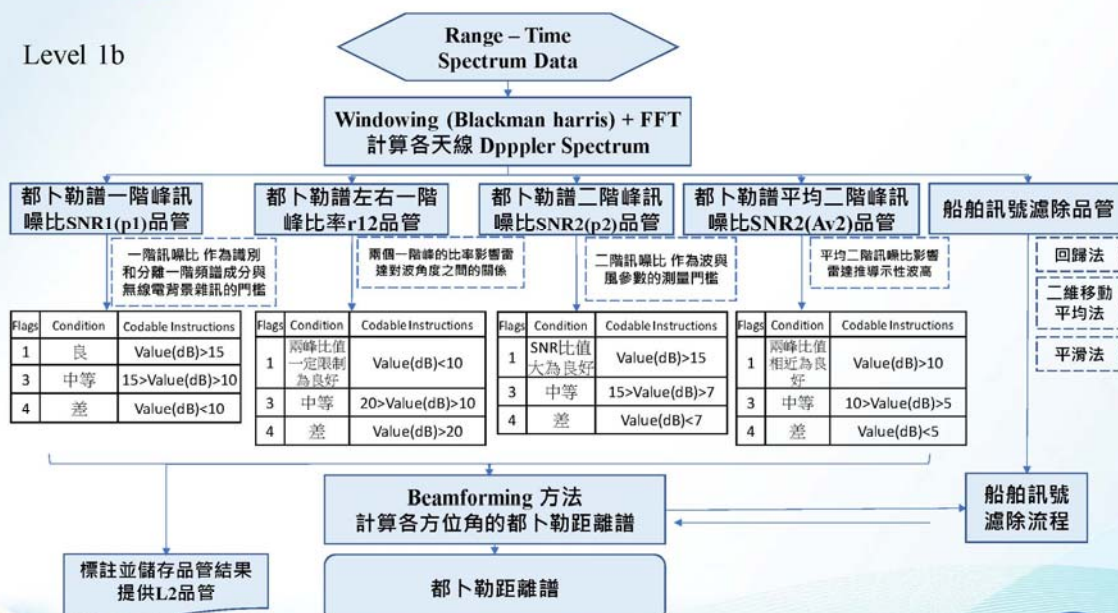


品管

28

雷達系統精進與波浪數據品管

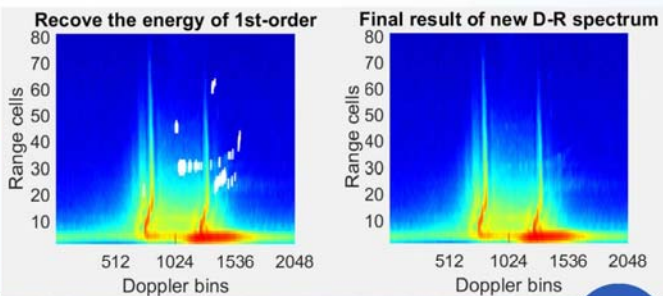
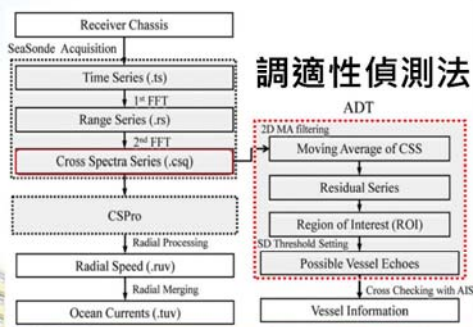
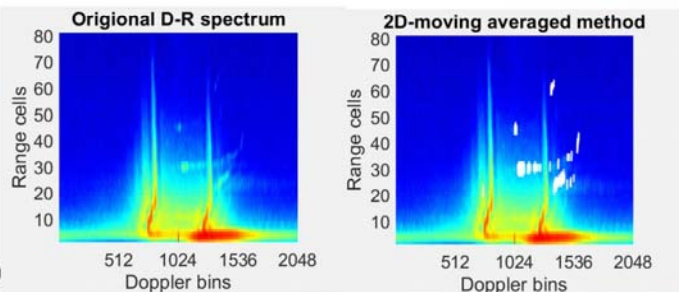
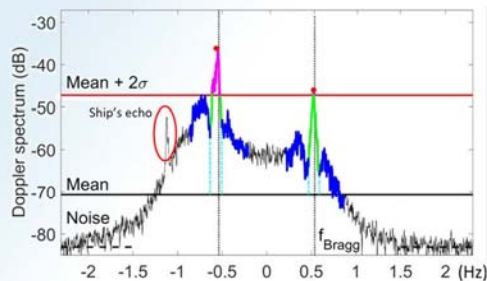
Level 1b



品管

29

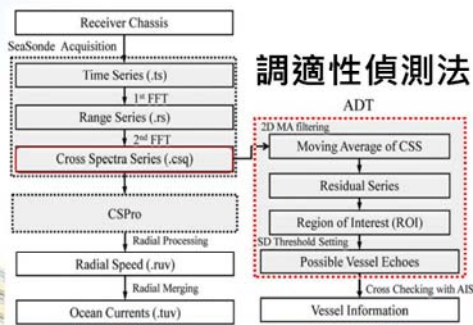
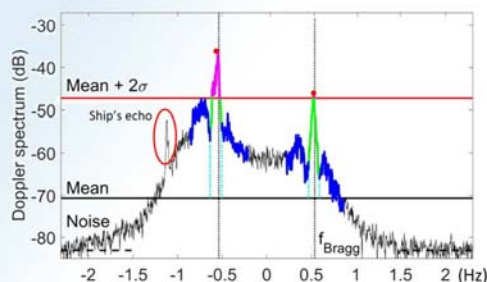
雷達系統精進與波浪數據品管



品管

30

雷達系統精進與波浪數據品管

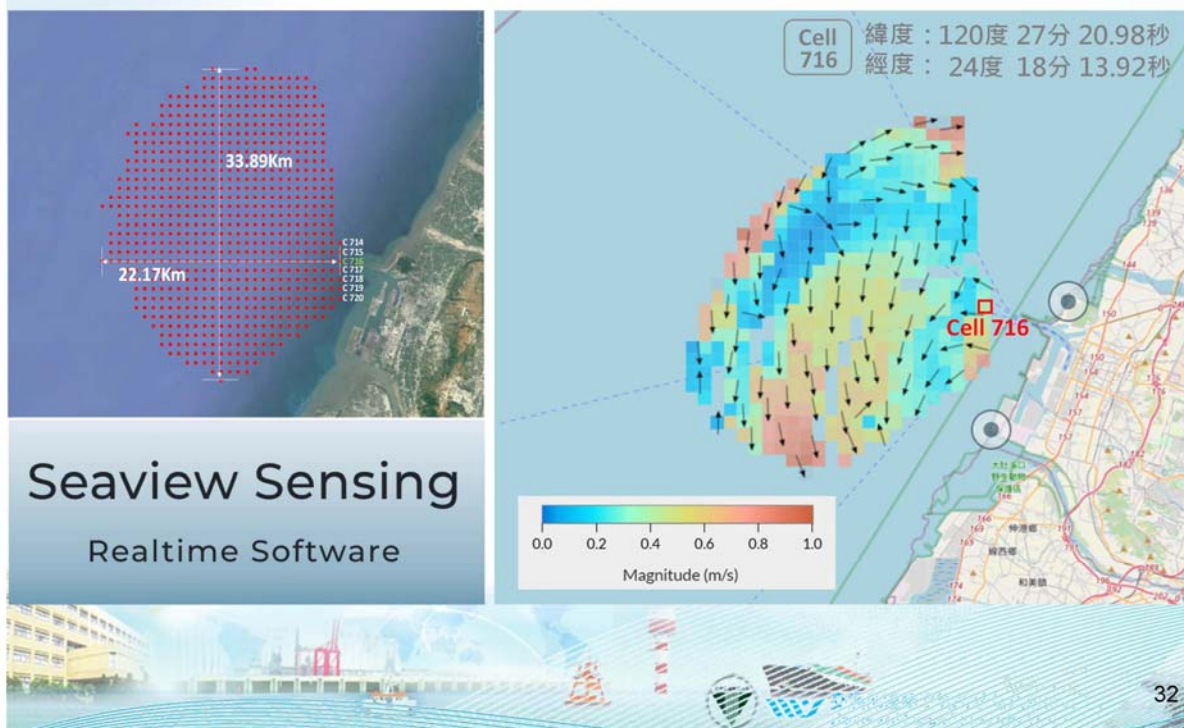


特徵	品管條件
訊噪比 SNR_{Av2}	5dB
示性波適用範圍	0.52~3.44m
示性波(Hs)	< 6m
波浪週期適用範圍	2~20sec
平均波浪週期(T_m)	< 12sec
最大波浪週期(T_p)	< 15sec

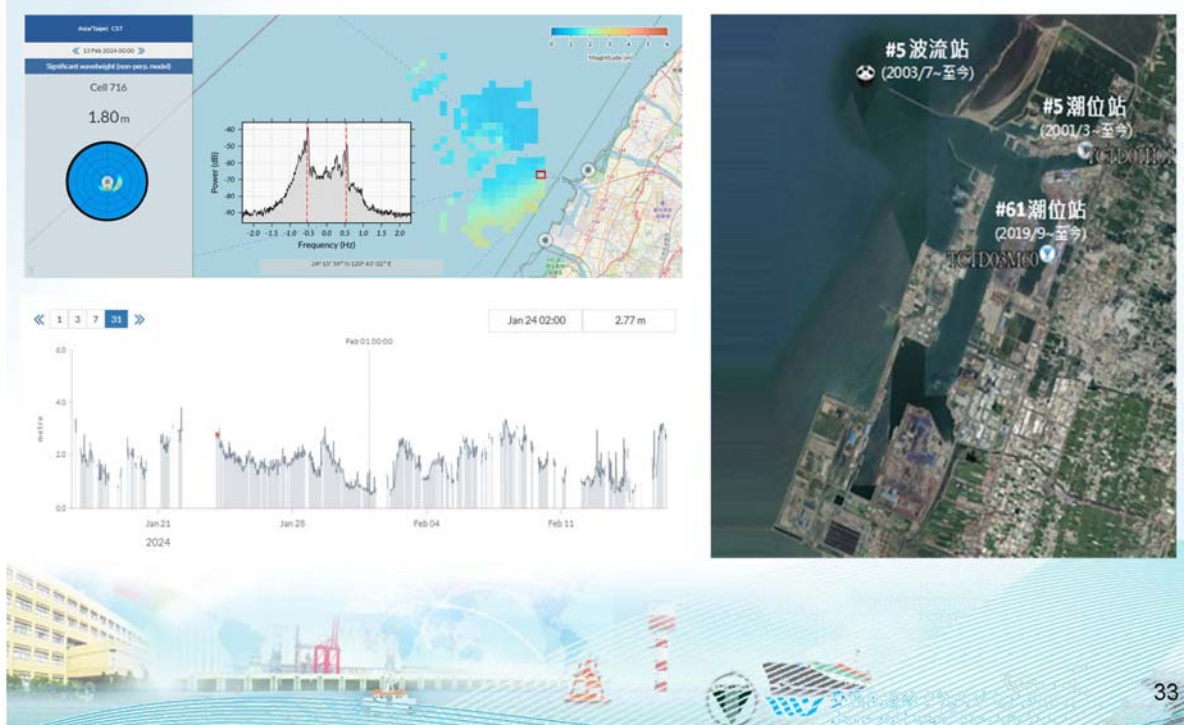
品管

31

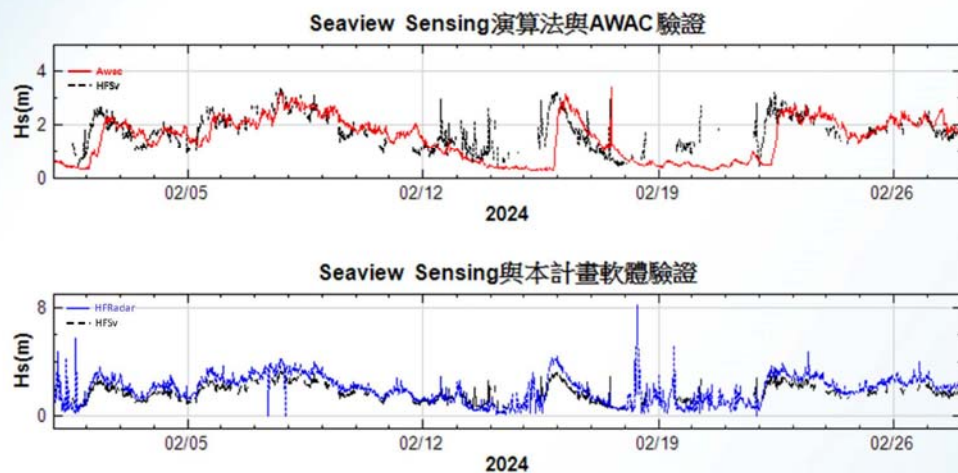
四 波浪監測資料分析與交互驗證



四 波浪監測資料分析與交互驗證

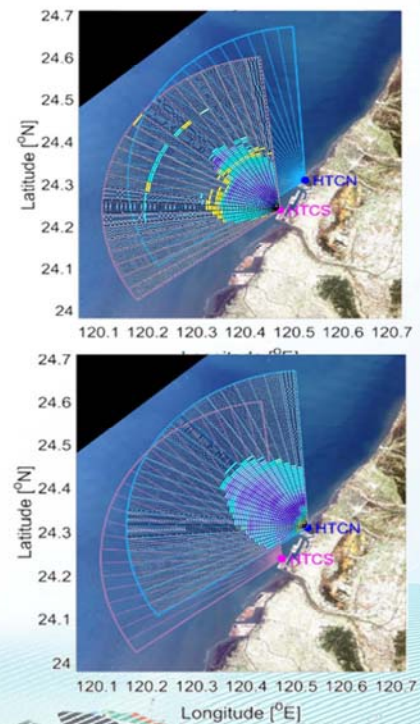
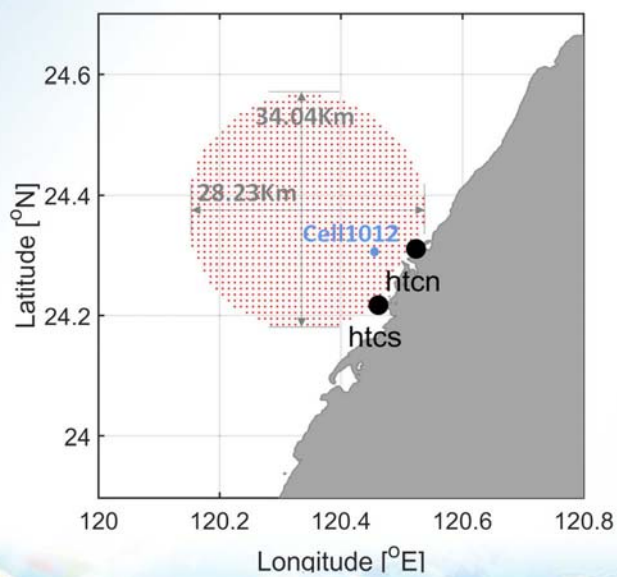


四 波浪監測資料分析與交互驗證



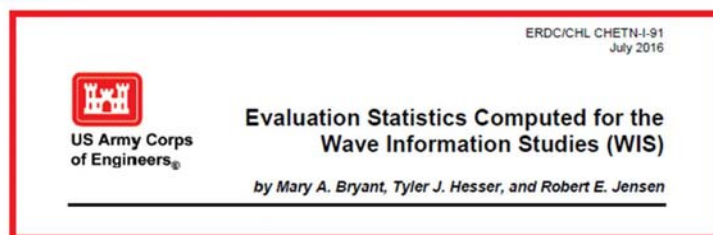
34

五 研究分析與探討



35

五 研究分析與探討



$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{y}}$$

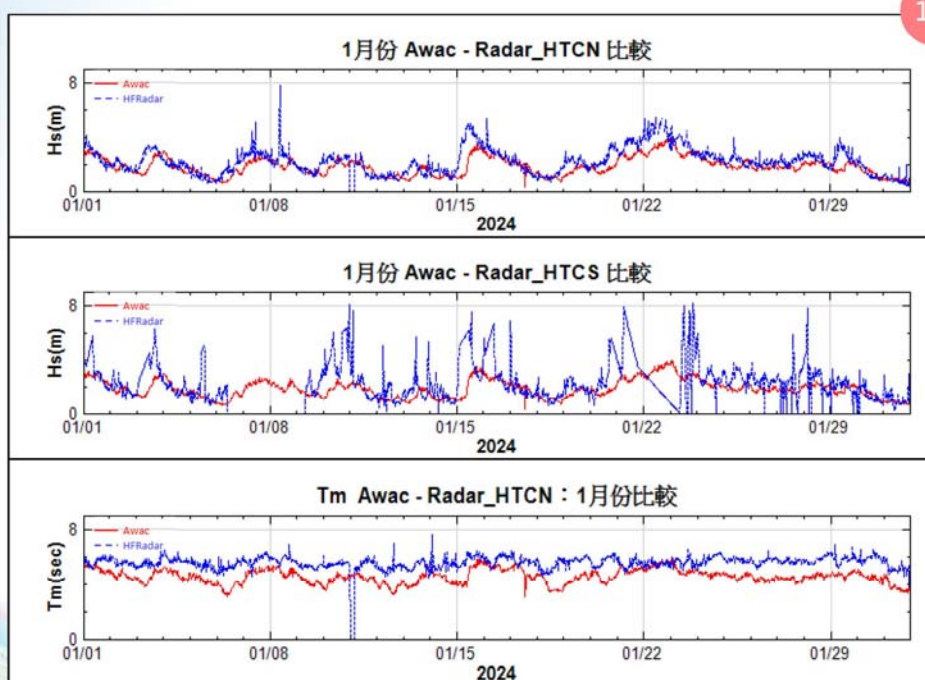
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

$$Bias = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i)$$

36

五 研究分析與探討

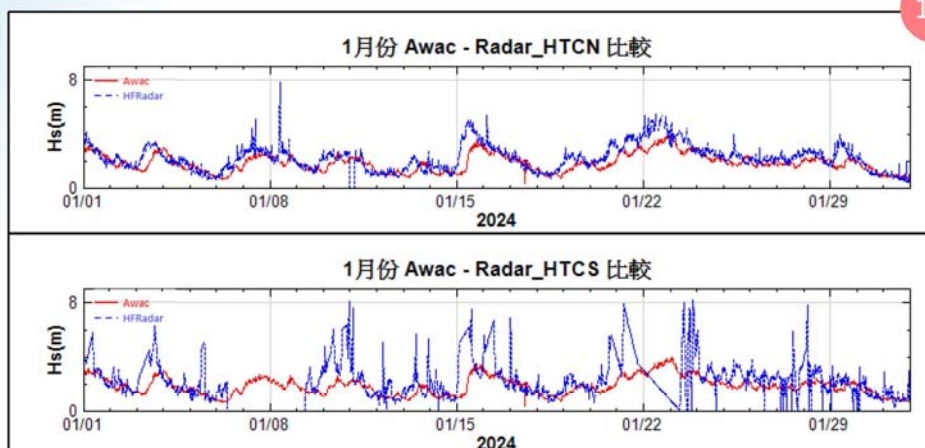
1月



37

五 研究分析與探討

1月

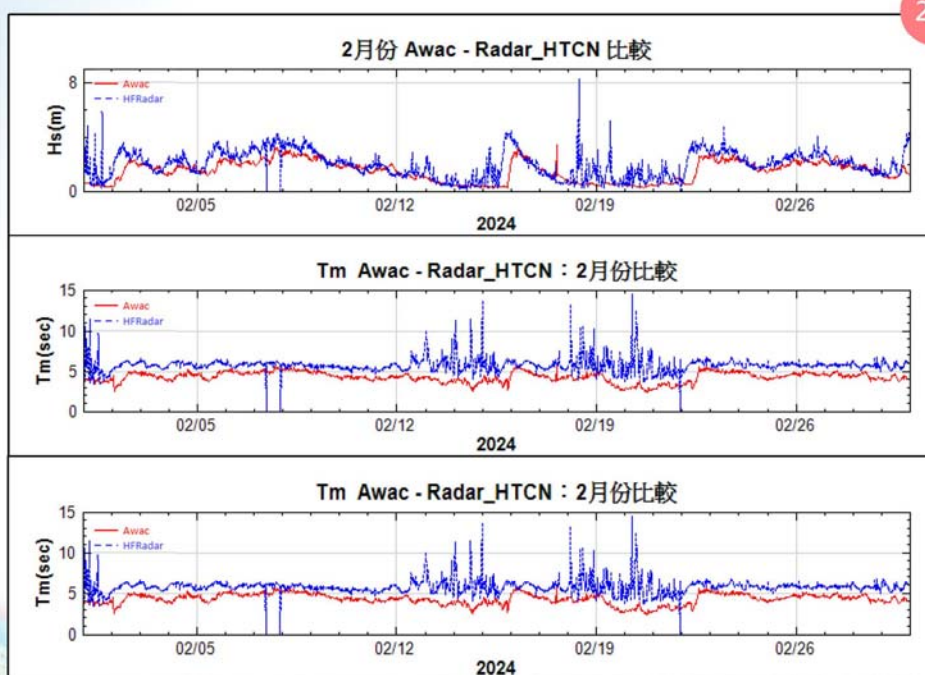


1月	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
HTCN	0.67	0.82	0.37	0.39
HTCS	0.04	1.55	1.05	-0.34

38

五 研究分析與探討

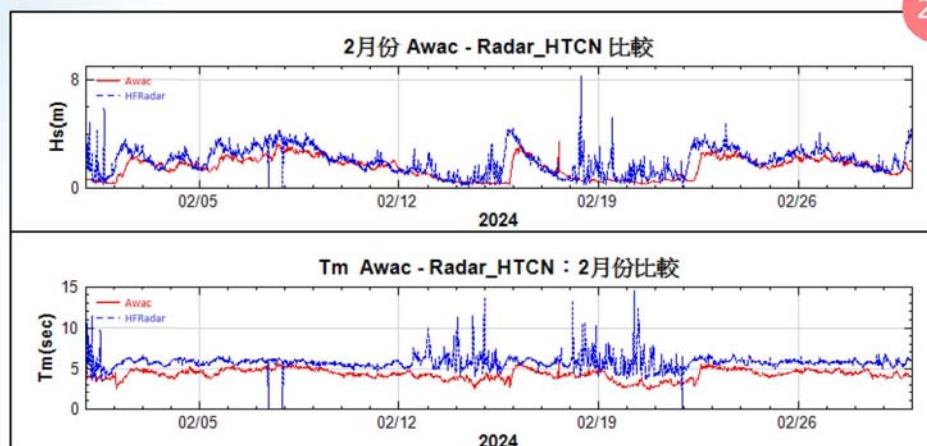
2月



39

五 研究分析與探討

2月

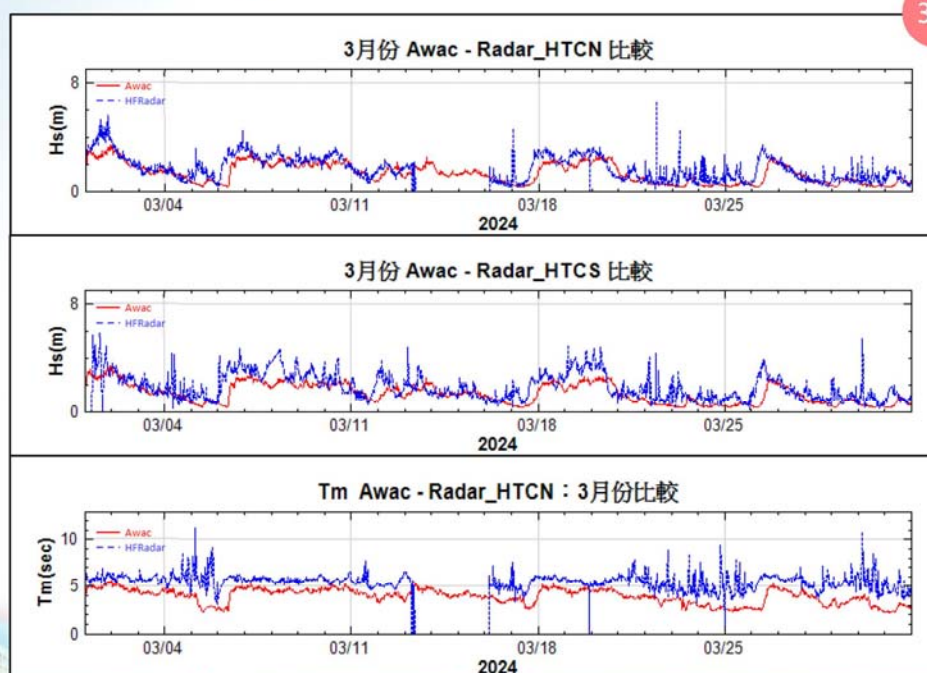


2月	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
HTCN	0.63	0.93	0.48	0.51
HTCS	0.46	1.17	0.59	0.53

40

五 研究分析與探討

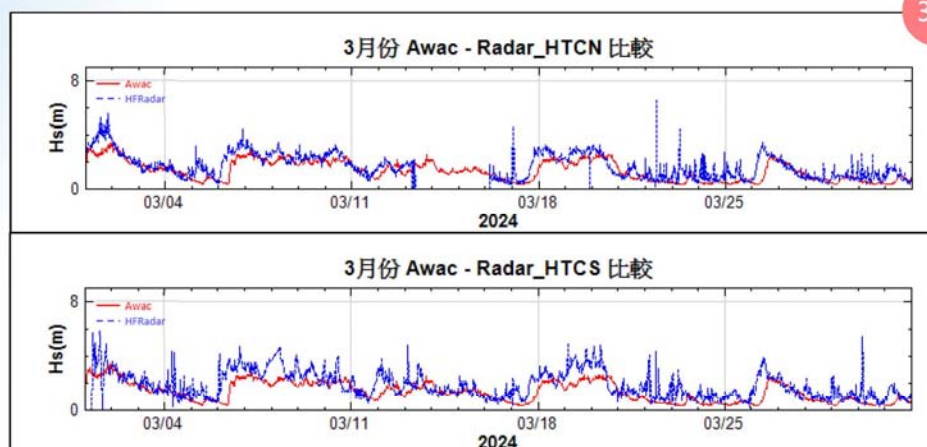
3月



41

五 研究分析與探討

3月

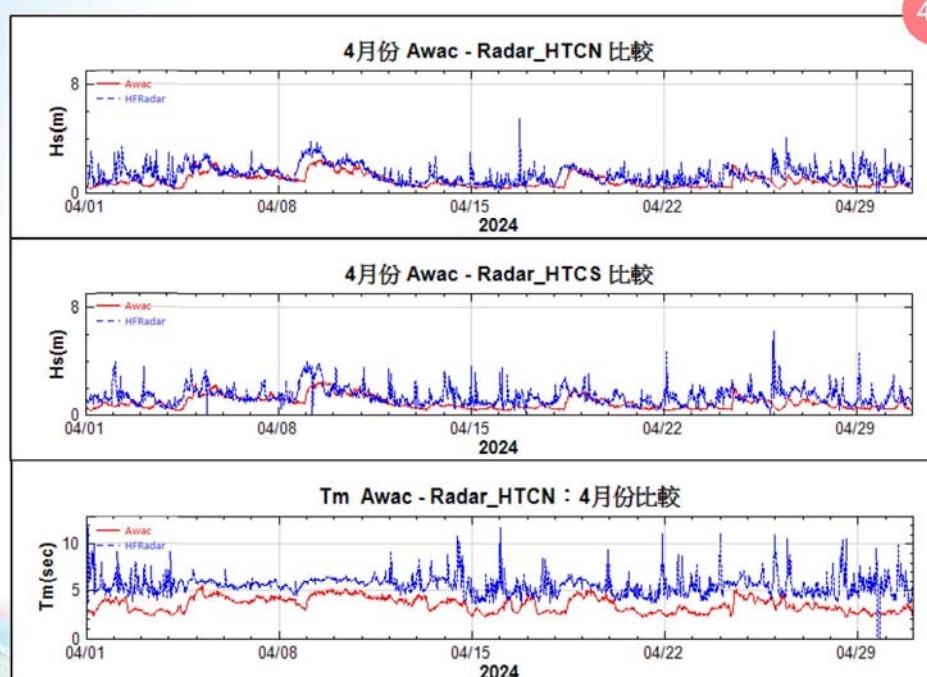


3月	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
HTCN	0.59	0.87	0.57	0.23
HTCS	0.48	1.17	0.59	0.41

42

五 研究分析與探討

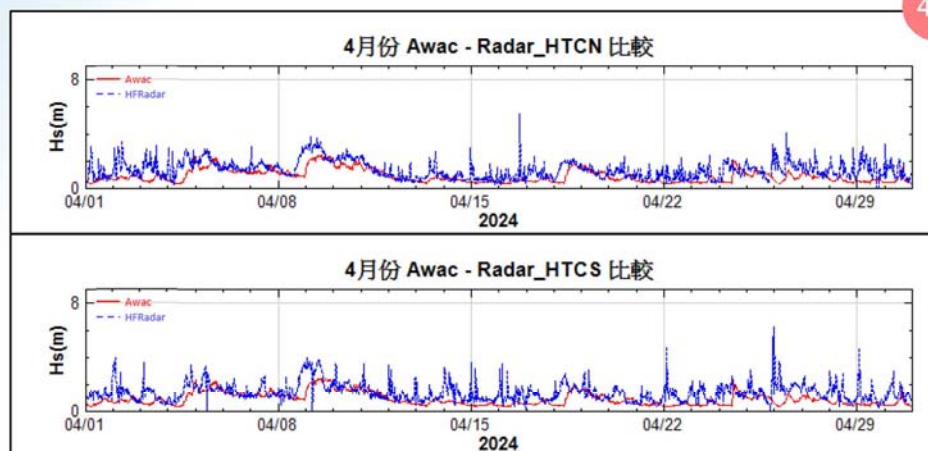
4月



43

五 研究分析與探討

4月

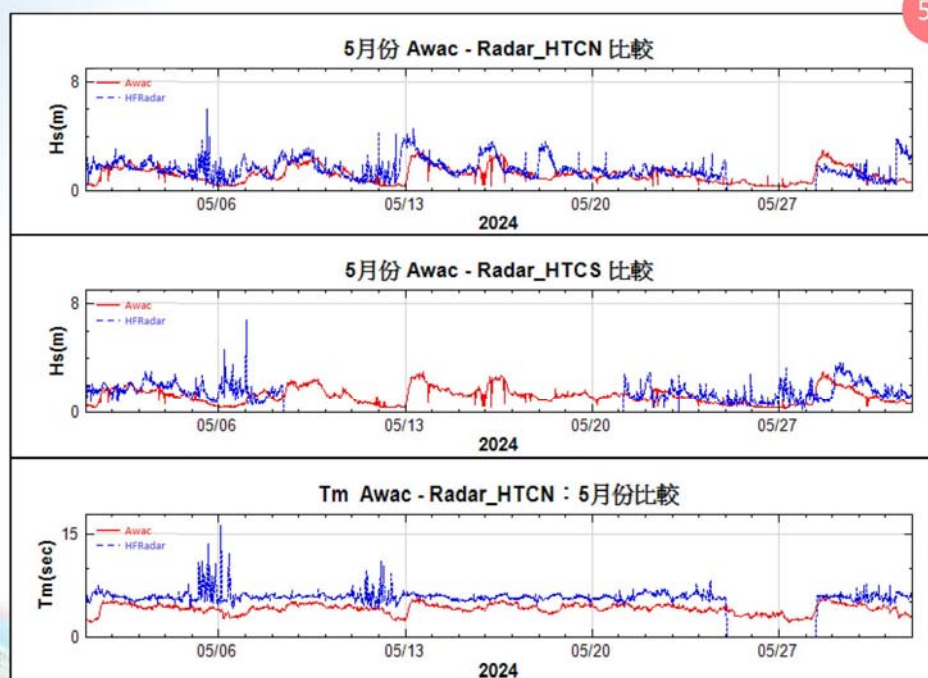


4月	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
HTCN	0.49	0.77	0.57	0.47
HTCS	0.33	0.86	0.64	0.49

44

五 研究分析與探討

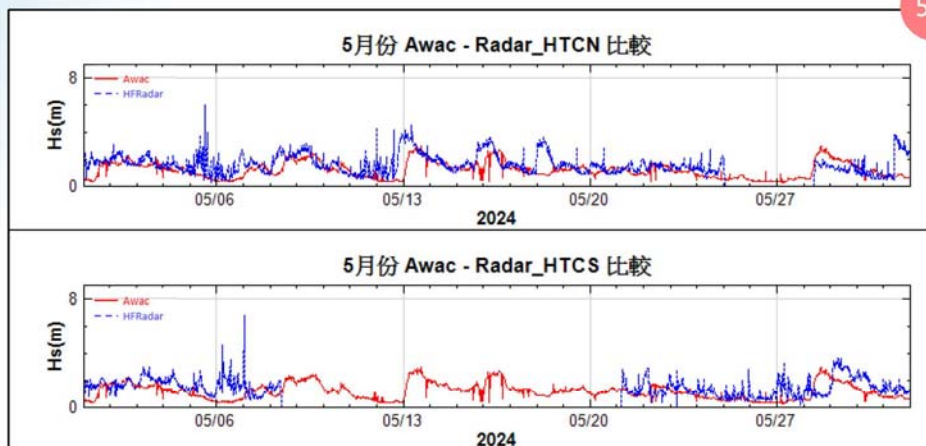
5月



45

五 研究分析與探討

5月

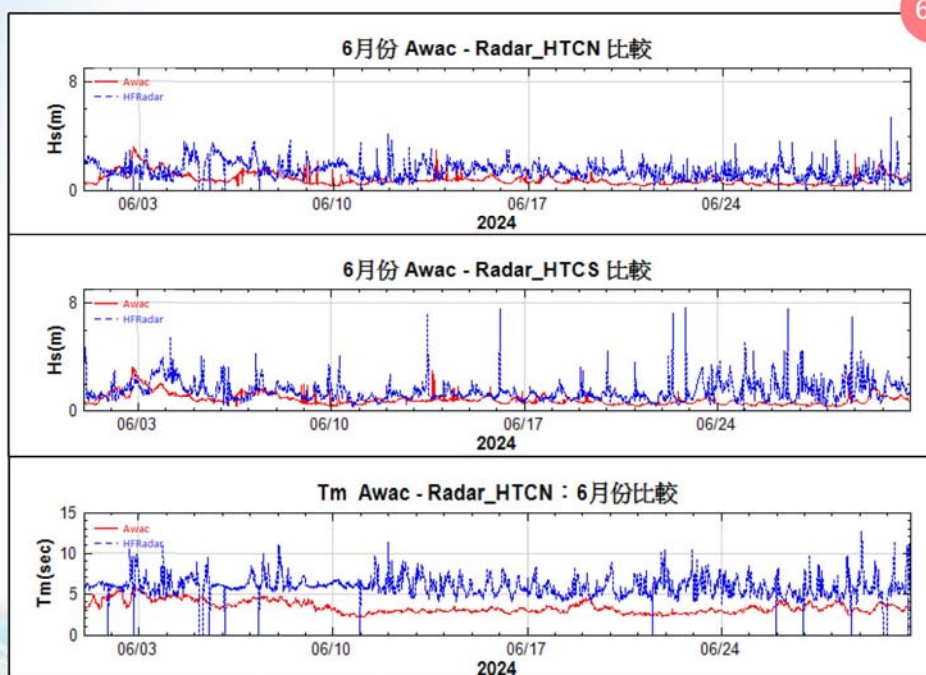


5月	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
HTCN	0.42	0.86	0.59	0.28
HTCS	0.01	1.16	1.35	-0.30

46

五 研究分析與探討

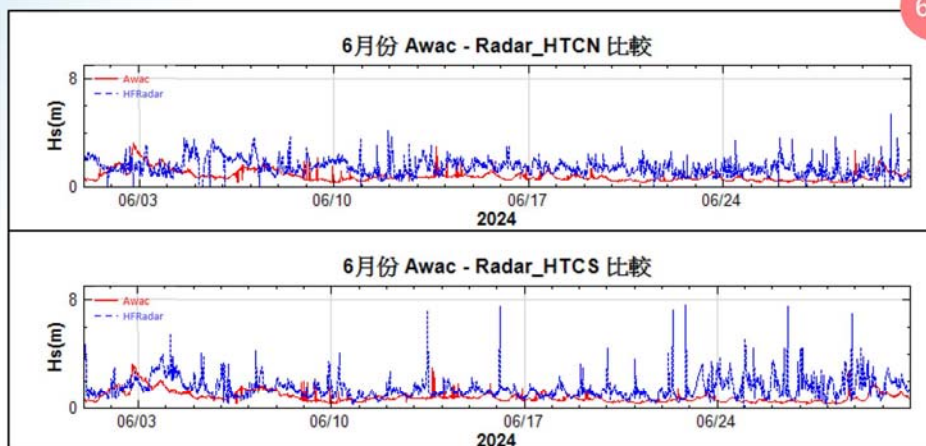
6月



47

五 研究分析與探討

6月

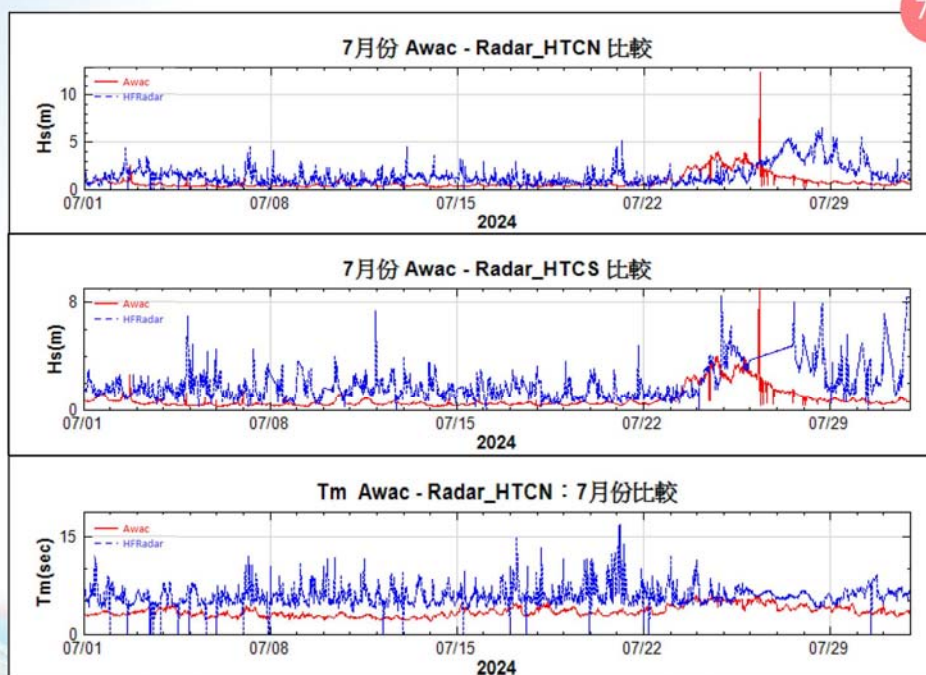


6月	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
HTCN	0.02	1.00	0.70	0.48
HTCS	0.16	1.07	0.78	-0.59

48

五 研究分析與探討

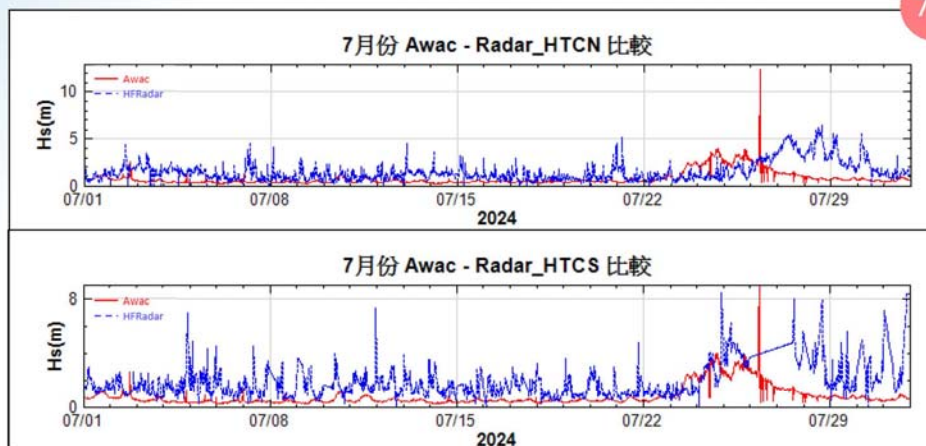
7月



49

五 研究分析與探討

7月

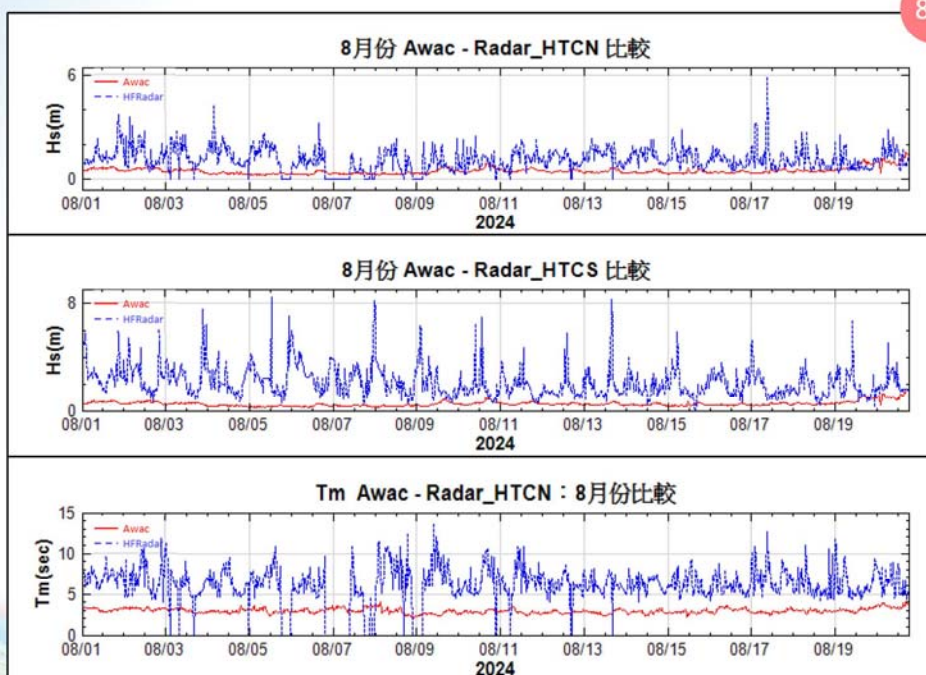


7月	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
HTCN	0.15	1.41	0.96	0.69
HTCS	0.16	1.41	1.02	0.62

50

五 研究分析與探討

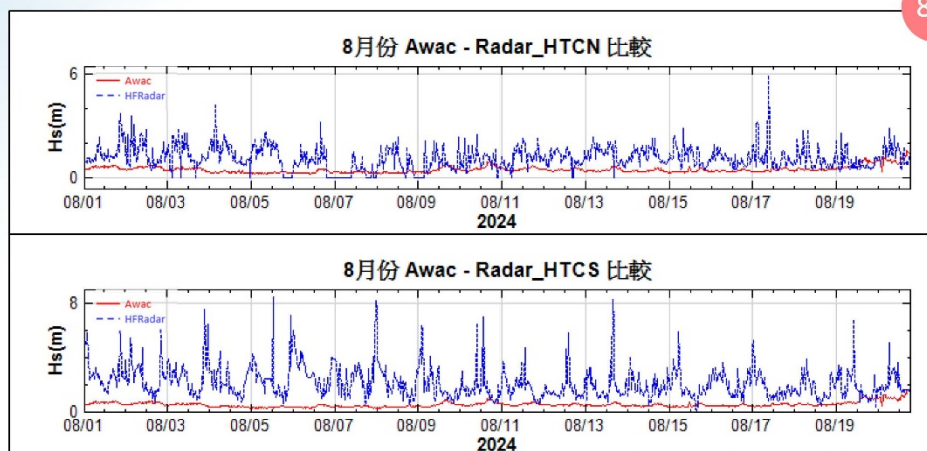
8月



51

五 研究分析與探討

8月



8月	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
HTCEN	0.04	0.95	0.82	0.66
HTCS	0.00	1.8	1.00	1.30

52

五 研究分析與探討

HTCEN	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
1月	0.67	0.82	0.37	0.39
2月	0.63	0.93	0.48	0.51
3月	0.59	0.87	0.57	0.23
4月	0.49	0.77	0.57	0.47
5月	0.42	0.86	0.59	0.28
6月	0.02	1.00	0.70	0.48
7月	0.15	1.41	0.96	0.69
8月	0.04	0.95	0.82	0.66

- ① 雷達北站(HTCEN)相關係數逐漸降低，由1月份0.67至8月份0.04，由中度相關降至低度相關。
- ② 均方根誤差RMSE為0.77~1.41範圍間誤差持續增加，散點因子(SI)由0.37擴大至0.96，偏誤(Bias)0.23~0.69多有增加，顯見雷達北站有逐漸老化現象。

53

五 研究分析與探討

HTCS	相關係數 R	均方根差 RMSD	散點 SI	偏誤 bias
1月	0.04	1.55	1.05	-0.34
2月	0.46	1.17	0.59	0.53
3月	0.48	1.17	0.59	0.41
4月	0.33	0.86	0.64	0.49
5月	0.01	1.16	1.35	-0.30
6月	0.16	1.07	0.78	-0.59
7月	0.16	1.41	1.02	0.62
8月	0.00	1.8	1.00	1.30

- ① 雷達南站(HTCS)相關係數逐漸降低，從1月份開始至8月份雖偶有中度相關性，幾乎都呈現低度相關。
- ② 均方根誤差RMSE為0.86~1.55範圍間誤差持續增加且誤差高於雷達北站，散點因子(SI)範圍亦由0.59~1.35有所增加，且散點因子也高於雷達北站，致於偏誤(Bias)由-0.30~1.30，顯示抽樣統計與實際母體狀況的偏差情形嚴重。

54

六 結論與建議

結論

- ① 由文獻回顧所知雷達波浪觀測(1)利用類神經網絡機器學習方式，能解決二階頻譜訊號較差不易分析問題，以及雷達頻譜具有高度非線性與複雜性的問題，又或(2)利用假設已知波浪分佈，推算無方向性海洋波數譜方法，以及(3)透過電磁波電場與海表面位移關係線性，推估海表面波浪，皆示未來可以投入應用發展的技術之一。

55

六 結論與建議

結論

- ② 本研究依據美國QARTOD即時高頻雷達表面海流品管手冊以及遵循科學界公認的數據標準，釐訂的波浪0級與1級品管，對於波浪數據的品管限制有顯著效果，能確保雷達波浪觀測數據的可用性與準確性。此外，雷達資料品質取決於環境訊號品質及硬體健康程度，與天線狀態健檢，需定期雷達訊噪比是否降低。

56

六 結論與建議

結論

- ③ 本年度觀測成果致獲以下結論，臺中港底碇式儀器時間序列與雷達反演算波高(Hs)平均週期(Tm)數據趨勢起伏漲落呈現一致性，但由觀測數據相關性係數(R)、均方根誤差(RMSE)、最大散點因子(SI)、最大偏誤(Bias)統計分析數據不佳，造成此原因的最主要情況可能與雷達站逐漸老化有關。

57

六 結論與建議

建議

- ① 本計畫研究成果發現南北雷達站(兩站)已逐漸老化，為維持觀測成效，建議安排雷達站更新作業，以維持雷達觀測服務的品質。此外，關於雷達海表面波浪觀測，本計畫已掌握其他種類可行的解決方案，建議未來能朝向類神經網絡的學習方式，協助改善雷達觀測數。



58

六 結論與建議

建議

- ② 本計畫經由113年度觀測分析，已確定雷達波浪數據的管限制，建議未來能引進其他有效的品管措施，持續檢討與改善波浪觀測數據的結果。



59

六 結論與建議

建議

- ③ 本計畫發展雷達於近岸海表面觀測研究，解決過往單點與時空覆蓋不足問題，期望未來跨域合作，能提供合作單位更好的支援，彌補與解決各產官學研於商港及海岸管理、海上救生救難、海事污染應變等專業性課題。

60

感謝聆聽 敬請指教



61

附錄三

專家學者座談會議紀錄

交通部運輸研究所運輸技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：交通部運輸研究所運輸技術研究中心第二科與第三科自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：113 年 4 月 29 日(星期一)上午 10 時

參、地點：本所運輸技術研究中心 2 樓會議室

肆、主持人：蔡立宏主任

紀錄：蔡世璿

伍、出席單位及人員：如後附簽到表

陸、審查意見：

一、交通部中央氣象署呂國臣副署長

有關運輸技術研究中心(以下簡稱運技中心)第二科和第三科自行研究計畫分別有9項及6項研究，其內容符合運技中心自行研究計畫的需求。在個別計畫方面有以下幾點建議：

- (一)在商港風力觀測技術精進部分，風力觀測的定義一致性很重要，例如風速觀測的採樣頻率和平均秒數等，聯合國氣象組織規定平均風為連續 600 秒紀錄之平均值，期間連續 3 秒之最大平均值為瞬間風(或陣風)，船舶觀測亦同，惟因各類群使用有其特殊性，例如航空飛行上之平均風採 120 秒平均。在儀器校驗部分，若有需要可送到中央氣象署新北園區新建的風洞進行。
- (二)馬祖港福澳碼頭潮位站旁即是中央氣象署的潮位站，2 站是否有合作或整併機制，可進一步去瞭解。
- (三)關於臺灣港群觀測的統計資料精進部分，須注意無線電傳輸和電力供應技術。
- (四)關於智慧航安的海氣象資料應用的探討，可以依使用者角度進行客製化監測與預警；惟對公眾發布部分，可參考中央氣象署發布之港口客製化天氣預報，若需要有較特殊之天氣或海象預報，可逕與中央氣象署合作，評估是否採共同發布。
- (五)臺中港陣列雷達的訊號處理應用於海流與波浪，已有一定的技術，但在落地應用上，仍有許多技術開發備受期待。這部分未來建議能有跨單位的交流與合作。
- (六)觀測資料系統的建置需要有資料治理的觀念，在大數據需求日增趨

勢下，包含的資料一致性、格式、品管、資料履歷和生命週期，還有觀測儀器變遷等，都需要長時且階段性的規劃。

二、海洋委員會國家海洋研究院翁健二副院長

(一)第 1 案，商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究：

- 1.研究中分別用超音波風速計與螺旋槳風速計進行比對，但 2 者設備後續的比對方式，建議再詳細論述。
- 2.經費概估表中儲存伺服器概估費用為 30 萬元，建議增加規格說明。

(二)第 3 案，臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)：

- 1.建議說明觀測傳輸方式改成無線後，通訊距離、傳輸速率與電力搭配的問題。
- 2.112 年於室內水槽進行研究，而 113 年則在開放海域進行驗證測試，惟測試環境條件不同應如何比對？

(三)第 7 案，臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)：

- 1.請說明 112 年與 113 年探討雙雷達系統平面波浪觀測時，其特性與執行內容的差異。
- 2.計畫書中提及空間解析度為 500 公尺方能判讀，然而部分船舶長度小於 500 公尺的部分如何監測判讀？
- 3.114 年延續 113 年船舶判讀研究，透過 AIS 進行船舶航安研究，而微波雷達有進行船舶監測，在陣列雷達則較少，其 2 者差異應注意。

(四)第 8 案，海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)，建議於系統建置前先行律定資料庫系統資料格式。

(五)第 9 案，港區水下巡查技術初探(2/3)，建議可參考臺灣港務股份有限公司於 110 年港區水下無人載具及擴充設備應用研究，已初步探討之相關內容。

(六)第 10 案，運技中心網頁資訊安全現況分析與探討，建議分析後可提出改善方法，如狀況處理、事先預防等。

(七)第 12 案，花蓮港碼頭波高預測模式作業化研究，請說明計畫經費於文字概述為 1,670 仟元，與總計畫經費 5 萬元之差異。

三、臺灣港務股份有限公司高雄港務分公司鄭智文總工程司

(一)第 1 案，商港風力觀測技術精進及強風特性分析研究，建議後續可應用風速與延時在不同高度風力梯度之推算與模擬，以提供港區大

型船舶受高度較高之風壓對於航行操控之影響。

(二)第 3 案，臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)：

- 1.經費概估無水聲通訊數據機。
- 2.建議可增加電力損耗、船舶通過干擾、底泥及水域混濁干擾之校正與應用。
- 3.建議可建立港區即時波流資訊與颱風長浪預測及潮位之關聯模型。

(三)第 4 案，花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)，今年評估消能設施布設於花蓮港之模型，除評估設施布設前後波高變化情形以外，應增加布設前後波浪頻率(週期)之變化。

(四)第 6 案，智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)：

- 1.針對船舶於不利航行之海氣象水域，可提高預測及識別，並對船舶操航及港口管理單位，雙方提出危險預警。
- 2.建議研究範圍可擴大至港口外之錨泊區，或商港區域範圍外之領海。
- 3.建議系統可針對船舶運動狀態與航行軌跡，深度學習及識別其是否受局部海流與風力紊亂影響，或船舶機械故障之情形，並提早提出警示。
- 4.建議可結合港區塔臺雷達系統，針對刻意關掉 AIS 應答機之船舶，提出警告。

(五)第 7 案，臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)，建議可針對海域受油污染時之波高壓抑特性，觀測海域污染之分布及趨勢，並預測未來流向及範圍。

(六)第 8 案，海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)，於過往觀測取得之 Raw data 整理與比對時，應要求建立資料之校正與回歸標準作業程序，以利後續更精確之研究與模型建立。

(七)第 9 案，港區水下巡查技術初探(2/3)，建議水下無人載具可結合機械手臂，以利取樣及強化定位能力。

(八)第 12 案，花蓮港碼頭波高預測模式作業化研究：

- 1.有關經費概估為 1,670 千元，與計畫經費概估表有異。
- 2.建議可蒐集過往資料，經校正及回歸後，導入深度學習及人工智能，強化預測模型，提高預測準確度。

四、國立中山大學陳冠宇教授

(一)第 1 案，商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究：

1.建議說明儀器不確定性的檢驗方式。

2.建議是否以某些參數(如 Gustiness)為中心，較易突顯？

(二)第 2 案，馬祖港福澳碼頭設計水位之探討，建議說明水位以中潮系統為準，是以大地水準面亦或引測求得？

(三)第 3 案，臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)，聲波通訊在淺水域易有多重反射，建議藉由例證說明其適合應用於港域。

(四)第 4、5 案，花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)、長週期波斷面模型試驗(2/3)，花蓮港震盪乃亞重力波(約 100 多秒的週期)引致，建議透過相關例證說明可有效消能與模擬。

(五)第 6 案，智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)，111 年與 114 年、112 年與 113 年的工作項目有重覆。

(六)第 7 案，臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)，建議波流觀測儀器 AWAC 遠離防波堤，以利與雷達的觀測結果進行驗證比較。

(七)第 8 案，海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)，數位管理系統之建置是否有自動化品管、自動即時回傳與自動補遺(年報)的功能？

(八)第 9 案，港區水下巡查技術初探(2/3)，是否引進 ROV？

(九)第 10 案，運技中心網頁資訊安全現況分析與探討，建議可列入各資料庫。

(十)第 12 案，花蓮港碼頭波高預測模式作業化研究，港池震盪造成的困擾可能更要注意流所造成的斷纜狀況。

(十一)第 13、15 案，評估 SCHISM 模式於港區波浪模擬可行性、評估 FUNWAVE 模式於港內波浪模擬可行性，建議說明採用模式之原因與應用的方向。

五、臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司鄭璟生處長(書面意見)

(一)第 4 案，花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)：

1.本計畫著重於如何透過佈設消能設施，評估消能工法對於各湧浪條件下之波能削減成效。在消能選址方面，花蓮港新舊東防波堤

交界處起算 500 公尺處係常受颱風損壞之弱點(沉箱編號 #1~#22)，建議可選擇新東堤 0k+000~0k+500 港側規劃設置消能設施，此外，建議可選擇佈放消能設施位址如以下 3 處：

(1) 束縮航道(有效寬度僅 100 公尺)之兩側，設施方案宜檢討不得影響操船空間。

(2) 7 號碼頭。

(3) 12 號碼頭。

2. 參考歷年運技中心於花蓮港港池共振研究與相關研討論文，曾有 1 方案檢討是否於花蓮港港形底部(#7、#12 碼頭)設置通水箱涵的方案，讓能量能透過此箱涵予以遲滯消散。因 #7 碼頭與 #12 碼頭後線基地均有大排，是有機會透過拓寬大排斷面的方式，以此發揮一定程度的消能功效，規模也較小，故提請本案考量在消能設施的選擇方案方面，有無機會就此一併納入研究。

3. 本案模型的平面佈置目前仍以花蓮港現有港形為基礎，做為規劃配置可行的消能設施方案，如有其他港形變化的空間，是否可考慮 #10 至 #16 碼頭間設置具消能設施的擋浪堤，於內部研究案內先有最初步的探討，臺灣港務股份有限公司亦於 114 年起提編 2,500 萬元預算辦理「花蓮港港池共振削減方案暨可行性評估」。

4. 有關新東堤 0k+000~0k+500 港側規劃設置消能設施，如設施方案為通用型之鼎形塊或林克塊，臺灣港務股份有限公司可從 114 年度預算內優先試拋，以利驗證。

(二) 第 5 案，長週期波斷面模型試驗(2/3)：

1. 本案為評估選定花蓮港內港 1 座碼頭，探討更新為消能碼頭，並規劃於第 3 年期規劃設置束縮航道的消能斷面或設施，以削減長週期波波能，並建立模型。請問選定花蓮港內港 1 座碼頭探討更新為消能碼頭，是否也做斷面模型？

2. 內港碼頭的選擇建議優先考量 #7 與 #12 碼頭。

3. 未來消能碼頭仍須有靠泊需求，即消能碼頭仍需安裝防舷材與繫船柱，故建議設施方案的評估要納入此實務需求。

(三) 第 12 案：花蓮港碼頭波高預測模式作業化研究

1. 據悉花蓮港在通告港內船隻避湧的決策判斷，除運技中心建置的「花蓮港區靜穩展示」系統外，亦仰賴觀察 CCTV 鏡頭對準外港堤口

水尺的刻度觀測值，本研究成果預期提出建置 113 年度花蓮港碼頭波高預測模式，提供未來 2 日於#9、#17、#25 等 3 處之波高預測值，建議其模擬值時間尺度宜在小時以內，以爭取監控中心決策時間與航商移泊時間。

- 2.建議系統所呈現的波高預測值可參考監控中心發佈通告所採之警戒值，同目前系統根據預測波高所作出的紅黃綠 3 色燈號告警

六、國立成功大學董東璟主任（書面意見）

- (一)提送之 15 項計畫均有其重要性與必要性，予以支持。
- (二)關於「商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究」計畫，建議本案產出應確定能符合利害關係者(stakeholder)的需求。
- (三)關於「馬祖港福澳碼頭設計水位之探討」計畫，各潮位參數之定義(算法)宜和相關機關(如中央氣象署)一致或有所說明(若定義不同)。
- (四)關於「臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)」計畫，第 1 年度水下無線通訊現場測試是否有訂相關達成指標以評估其妥善率？第 2 年度工作標題註明要建置，但工作項目內容似乎僅為建置評估，現場海洋狀況與實驗室不同，建議測試妥當後始開始進行建置。
- (五)關於「花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)」計畫，建議有系統且完整地蒐集並說明過去數十年來關於花蓮港港池不穩度之相關研究成果或作為，以給予本計畫清楚之定位。
- (六)關於「長週期波斷面模型試驗(2/3)」計畫，計畫第 2 年和第 3 年仍在進行文獻蒐集，建議重點工作著重在水動力分析與改善試驗研究，此外，長波試驗條件如何定義，應有明確說明。
- (七)關於「智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)」計畫，計畫中的 VDES 等船舶通訊技術發展是如何達到船舶監控預警的應用，請詳細說明。此外，「預警」之標的為何？建議更明確闡述。
- (八)關於「臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)」計畫，應特別著重在觀測結果正確性的探討。
- (九)關於「海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)」計畫，如何整合管理不同觀測系統、測站型式、儀器類別等，建置符合運技中心需求之管理系統應有妥善規劃。
- (十)關於「港區水下巡查技術初探(2/3)」計畫，取得之水下影像如何進

行分析、解讀，為計畫成敗關鍵，建議可引入 AI 判識技術。

- (十一)關於「運技中心網頁資訊安全現況分析與探討」計畫，支持目前辦理方案。
- (十二)關於「商港能見度告警機制探討」計畫，目標是要提出告警機制，抑或告警標準，建請釐清。
- (十三)關於「花蓮港碼頭波高預測模式作業化研究」計畫，建議確認計畫目標為預測某幾個碼頭的波高？統計模式用以預測局部地區特性，是否具有足夠能力，需稍加留意。
- (十四)關於「評估 SCHISM 於港區波浪模擬可行性」計畫，運技中心原已有 TaiCOMS 模式可用來進行風浪模擬、潮汐和水動力模擬，引入 SCHISM 模式之定位為何？建請詳細考慮。
- (十五)關於「馬祖海氣象特性分析」計畫，建議著重在 Mike21 HD 模式的海流模擬結果之驗證。
- (十六)關於「評估 FUNWAVE 模式於港內波浪模擬可行性」計畫，建請強化模擬結果之驗證。

柒、結論：

感謝委員提供本所自行研究計畫之專業建議，請案關同仁將委員意見納為執行計畫重要參採依據，俾以達到成果實際應用目的，以及提升研究成果之廣度及實用性。

捌、散會：中午 12 時 40 分

單位	簽名
交通部運輸研究所 運輸技術研究中心	陳劍玲
	羅冠廷
	洪維育
	傅怡釗
	蔣敏玲
	黃茂仁
	林有騰
	許義宏
	李政達
	蔡世瑜
	林夏和
	陳冠廷
	曹勝強
	劉清彬

附錄四

工作會議紀要

113年6月工作會議紀要

會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科113年自行研究計畫第1次工作會議

時間：113年6月25日(星期二)上午10時00分至16時30分

地點：本所運輸技術研究中心3樓會議室

主持人：李俊穎 科長

彙整：廖慶堂

出席者：如後附簽到表

主辦單位：本所運輸技術研究中心第二科

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一) 商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究

1. 蒐集國內外風力觀測技術相關文獻。
2. 分析螺旋槳式風速計與超音波式風速計之量測差異。
3. 蒐集我國商港因強風事件封港之資料。

(二) 馬祖港福澳碼頭設計水位之探討

1. 馬祖地區暴潮資料文獻蒐集進度報告。
2. 馬祖地區海氣象設備維運作業情形摘要說明。
3. 馬祖地區南竿福澳港潮位資料統計分析報告。

(三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)-水中無線通訊設備海域測試

1. 臺灣港群波流觀測系統更新、建置及遷移。
2. 水中無線通訊設備海域測試規劃。

(四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)-消能措施方案評估

1. 港灣消能措施文獻蒐集與回顧。
2. 花蓮港平面水工模型建置優化。
3. 花蓮港內消能設施研擬及佈設規劃。

(五) 長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改善

研究初探

1. 消能碼頭及結構物文獻與資料蒐集研讀。
2. 選定標的碼頭位置及規劃消能碼頭型式。
3. 進行港灣內長週期波作用下斷面試驗前置作業。

(六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)-海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用

1. 特高頻資料交換系統 (VDES)發展現況說明。
2. 臺灣周圍海域船舶資料蒐集與交通流分析進度。
3. 海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用規劃情形。

(七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

1. 進行海洋雷達波浪觀測應用相關文獻回顧。
2. 辦理波浪資料品管與檢核工作，報告波浪品管之作業情形。
3. 進行海洋陣列雷達設備維護與保養作業，辦理陣列雷達站架高工作。

(八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)-系統建置

1. 現有測站資源盤點狀況說明。
2. 海氣象觀測作業數位管理系統委外開發進度說明。
3. 上次工作會議後修正情形說明。

(九) 港區水下巡查技術初探 (2/3) -水下無人載具測試分析

1. 進行港埠設施分析及測試機型探討。
2. 進行港區水下巡查項目探討。
3. 進行港區 ROV 水下定位測試規劃。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究

1. 討論螺旋槳式風速計與超音波式風速計在不同風速下之差異及風向不確定性。。
2. 討論不同年期之超音波式風速計之實驗結果。

(二) 馬祖港福澳碼頭設計水位之探討

1. 馬祖地區暴潮相關報告、迴歸分析資料可信度討論。
2. 馬祖地區歷年潮位資料基準校正方式討論。

(三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)-水中無線通訊設備海域測試

1. 臺灣港群波流觀測站建置概況及本年度現場作業期程討論。
2. 討論水中無線通訊設備實際海域測試規劃。

(四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)-消能措施方案評估

1. 建議評估花蓮港內消能設施型式佈設方式及考量其它方案。
2. 討論花蓮港平面水工模型建置內容。

(五) 長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改善研究初探

1. 討論標的碼頭選定方式之評估方式與結果。
2. 評估新消能碼頭型式設計型式之可行性。

(六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)-海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用

1. 蒐集國外 VDES 資料等相關船舶航行安全通訊技術。
2. 辦理芳苑燈塔 VDES 系統之天線移置作業。
3. 整合交通部航港局提供的船舶 AIS 動態資訊。

(七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

1. 討論海洋陣列雷達波浪觀測相關文獻。
2. 比較雷達站品管檢核資料情形。
3. 6月5日出席國家海洋研究院「113年第1次海洋雷達願景工作會議」，討論海洋雷達合作與應用服務推廣事宜。
4. 配合臺中港務分公司「臺中港北側淤沙區漂飛沙整治第四期工程」施工需要，於北側雷達站進行架高作業。

(八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)-系統建置

1. 現有測站資源盤點之討論。

2. 既有電子表單資料批次上傳之討論。

3. 系統委外開發進度及建議事項之討論。

(九) 港區水下巡查技術初探 (2/3) - 水下無人載具測試分析

1. 港區水下巡查作業之無人載具分析說明。

2. 港區水下設施之巡查方式說明。

3. ROV 水下定位測試方法討論。

貳、主要結論

(一) 商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究

1. 針對螺旋槳式風速計與超音波式風速計之量測不確定性問題，後續可與氣象署氣象儀器校正實驗室合作進行風洞試驗。

2. 為確保風力量測標準及數據品質，後續可向氣象署大氣觀測組瞭解現行風力編報之解算方式，以求一致性。

(二) 馬祖港福澳碼頭設計水位之探討

1. 建議持續針對馬祖地區暴潮資料文獻進行蒐集工作。

2. 馬祖地區歷年潮位資料基準校正方式建議利用調和分析結果，可降低人為校正所造成長週期水位變化消失之程度。

(三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (1/2) - 水中無線通訊設備海域測試

1. 請依規劃期程督導廠商，使本年度波流觀測系統現場相關作業能如期如質完成。

2. 本年度將於實際海域執行水中通訊系統測試，請注意作業期間海況變化，以維人員安全。

(四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)-消能措施方案評估

1. 須確實掌握花蓮港試驗地形及平面水工模型鋪設進度。

2. 於執行試驗過程中，應滾動檢討港內消能設施型式。

(五) 長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改善研究初探

1. 斷面試驗地形及水工模型建置案，需掌握採購規劃時程。

2. 加速進行新消能碼頭型式設計的定案，以免延誤試驗進程。

(六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)-海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用

1. 有關船舶 VDES 或 AIS 訊號，可針對研究特定區域，自行接收訊號解碼使用。

2. 透過與丹麥 Sternula 討論國際 VDES 發展趨勢，藉以學習其系統架構。

(七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

1. 有關高頻雷達波浪資料品管與檢核部分，建議持續辦理品管作業，以維持海氣象資料之正確性。

2. 本年度報告書章節規劃尚屬合宜，惟主要研究項目之研究內容建議持續檢討。

(八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)-系統建置

1. 本案於建置階段之測站資料建檔，或驗證測試與完成後階段之維護紀錄填報，皆賴同仁配合協助進行。建議於系統提供好用及易用之功能，以增加同仁協助配合意願。

2. 測站維護時資料中斷之時間區間，建議於維護紀錄呈現。

(九) 港區水下巡查技術初探 (2/3) -水下無人載具測試分析

1. 港區水下巡查項目之檢測方法可再進行評估。

2. 水下無人載具之定位方式可再進行補述。

會議簽到表

會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科 113 年度自行研究計畫第 1 次工作會議

時間：113 年 6 月 25 日(星期二)上午 10 時 00 分

地點：本所運技中心 3樓會議室

主持人：李俊穎科長 李俊穎

出席單位	簽名	
第一科科長	賴瑞璽	
第三科科長	林雅雯	
第二科		
	黃茂信	
		顏麗香
	羅冠群	郭淑芬
	洪維麟	陳天吟
	李欽豪	李之鴻
	柯振平	陳孟宏
	曹勝傑	劉淑敏
	陳子仁	許師瑜
	林受文	許義宏
	邱慶堯	孫通遠

113年8月工作會議紀要

會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科113年自行研究計畫第2次工作會議

時間：113年9月2日(星期一) 10時至16時30分

地點：本所運輸技術研究中心3樓會議室

主持人：李俊穎 科長

紀錄：廖慶堂

出席者：如後附簽到表

主辦單位：本所運輸技術研究中心第二科

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一) 商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究

1. 蒐集國內外風力觀測技術相關文獻。
2. 探討最大瞬間風速與3秒移動平均法之差異，以及平均風向之計算方法差異。
3. 主要商港紊流強度計算及風速機率模型繪製。

(二) 馬祖港福澳碼頭設計水位之探討

1. 馬祖地區海氣象設備維運及建置辦理進度說明。
2. 馬祖地區南竿福澳港潮位資料統計分析報告。

(三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)-水中無線通訊設備海域測試

1. 臺灣港群波流觀測系統建置情形說明。
2. 波流觀測系統於凱米颱風期間災損報告。
3. 水中無線通訊設備執行進度說明。

(四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)-消能措施方案評估

1. 花蓮港平面水工模型及消能設施建置。
2. 二廠棚天車操作平台故障修復進度說明。
3. 消能設施佈設方案評估。

(五) 長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改善研究初探

1. 3種消能碼頭型式規劃完成。
2. 進行港灣內長週期波作用下斷面試驗準備工作。
3. 進行空水槽斷面試驗。

(六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)-海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用

1. 特高頻資料交換系統 (VDES)發展現況。
2. 臺灣周圍海域船舶資料蒐集與交通流分析。
3. 海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用。

(七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

1. 辦理波浪資料品管與檢核工作，報告波浪品管之作業情形。
2. 進行波浪資料交互驗證工作，探討凱米颱風海象觀測分析。
3. 進行海洋陣列雷達設備維護與保養，完成架高作業驗收核付。

(八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)-系統建置

1. 海氣象觀測作業數位管理系統第一版測試狀況說明。
2. 海氣象觀測作業數位管理系統資料建置狀況說明。
3. 上次工作會議及委外契約期中審查後修正情形說明。

(九) 港區水下巡查技術初探 (2/3)-水下無人載具測試分析

1. 進行港區水下巡查作業之無人載具分析。
2. 進行港區水下巡查項目探討。
3. 進行港區 ROV 水下定位測試。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究

1. 討論颱風期間平均風速與最大風速之差異。
2. 討論風速機率模型及強陣風比例之呈現方式。

(二) 馬祖港福澳碼頭設計水位之探討

1. 馬祖地區潮位資料可信度討論。
 2. 馬祖地區歷年潮位資料基準校正方式討論。
- (三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)-水中無線通訊設備海域測試
1. 臺灣港群波流觀測系統配置規劃。
 2. 水中無線通訊設備控制器處理邏輯討論。
- (四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)-消能措施方案評估
1. 建議評估花蓮港內消能設施型式佈設方式及考量其它方案。
 2. 討論花蓮港平面水工模型建置優化內容。
- (五) 長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改善研究初探
1. 討論造波機控制及波高計資料擷取電腦之設置問題。
 2. 評估消能碼頭斷面水工模型試驗規劃期程。
- (六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)-海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用
1. 蒐集國外 VDES 資料等相關船舶航行安全通訊技術。
 2. 完成芳苑燈塔 VDES 系統不斷電系統架設。
 3. 完成臺灣周圍海域船舶資料蒐集與交通流繪製。
- (七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析
1. 討論雷達站品管檢核資料情形。
 2. 討論凱米颱風海象觀測分析情形。
 3. 探討波浪與海流資料交互驗證工作。
- (八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)-系統建置
1. 海氣象觀測作業數位管理系統第一版問題處理情形之討論。
 2. 海氣象觀測作業數位管理系統資料建置情形之討論。
 3. 港灣季刊投稿內容之討論。
- (九) 港區水下巡查技術初探(2/3)-水下無人載具測試分析

1. 港區水下巡查之無人載具定位方式說明。
2. 港區水下設施之使用儀器巡查方式說明。
3. ROV 水下定位測試方法討論。

貳、主要結論

(一) 商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究

1. 考量臺灣港務公司針對颱風期間風力量測之防災應變需要，建議可增加颱風事件之分析內容。
2. 風速機率模型圖之展示方式可清楚看出各月份之風力趨勢，建議可再調整各月份之圖形顏色呈現，以利閱讀。

(二) 馬祖港福澳碼頭設計水位之探討

1. 加速進行馬祖地區歷年潮位資料基準校正工作。
2. 建議開始著手進行港灣季刊投稿文章初稿撰寫工作。

(三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)-水中無線通訊設備海域測試

1. 波流觀測站颱風災損修復請依規劃期程辦理，各港觀測站仍請持續監控，確保觀測系統正常運作。
2. 水中無線通訊設備控制器，需於無人職守狀態自動處理資料傳遞延遲或錯誤等情況，控制器處理邏輯編寫及測試需謹慎留意。

(四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)-消能措施方案評估

1. 須確實掌握花蓮港試驗地形及平面水工模型鋪設進度。
2. 於執行試驗過程中，應滾動檢討港內消能設施型式。

(五) 長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改善研究初探

1. 斷面試驗地形及水工模型建置案，須儘快如期如質完成。
2. 斷面地形及水工模型設置完成後，應依期程加速進行消能碼頭斷面水工模型試驗，以免延誤後續工作及報告書撰寫進程。

(六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)-海氣象資訊於船舶監控

預警系統之應用

1. 提早規劃針對後續於航港局智慧航安監控船「航港1號」上架設船舶 VDES 相關事宜。
2. 整理有關特高頻資料交換系統 (VDES)本所測試站之接收訊號發展及國際標準制定情形，以利投稿使用。

(七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

1. 有關南側雷達站波浪訊號品質較差，請儘速安排人員前往排查，並應建立快速檢查機制，以維持海氣象資料之正確性。
2. 本年度報告書章節規劃尚屬合宜，惟主要研究之平面波浪特性，建議持續分析探討。

(八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)-系統建置

1. 本案擇日邀同仁一同測試運作，以利發現其他待修正部分。
2. 須持續按步測試並盤點問題，將問題彙整交由開發單位一次處理。並持續定期召開工作會議討論測試與修正情況。
3. 開發完成後須再執行系統弱點掃描。

(九) 港區水下巡查技術初探 (2/3) -水下無人載具測試分析

1. 港區水下巡查項目之檢測方法優先順序可再進行評估。
2. 水下無人載具之巡查作業時間可再進行補述。

會議簽到表

會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科 113 年度自行研究計畫第 2 次工作會議

時間：113 年 9 月 2 日(星期一)上午 10 時 00 分

地點：本所運技中心 3樓會議室

主持人：李俊穎科長 李俊穎

出席單位	簽名	
第一科科長	賴瑞雄	
第三科科長		
第二科		
	李江澤	
	陳子健	劉淑敏
	黃為行	郭俊芳
	蕭冠銘	洪維麟
	林安以	李政豪
	曹勝仁	許師瑜
	許義宏	葉安佑
	江代堂	林育廷
	陳天時	顏麗香

113年10月工作會議紀要

會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科113年自行研究計畫第3次工作會議

時間：113年10月29日(星期二)上午10時00分至16時00分

地點：本所運輸技術研究中心3樓會議室

主持人：李俊穎 科長

彙整：廖慶堂

出席者：如後附簽到表

主辦單位：本所運輸技術研究中心第二科

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一) 商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究

1. 蒐集國內外風力觀測技術相關文獻。
2. 進行商港強陣風特性分析。
3. 進行颱風事件分析。

(二) 馬祖港福澳碼頭設計水位之探討

1. 馬祖地區海氣象設備維運及建置辦理進度說明。
2. 馬祖地區南竿福澳港潮位資料統計分析及歷年潮位資料修正結果說明。

(三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)-水中無線通訊設備海域測試

1. 波流觀測系統運作情形。
2. 統計年報及研究報告進度。
3. 水中無線通訊設備進度。

(四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)-消能措施方案評估

1. 試驗設備修復及率定佈設。
2. 消能設施研擬及佈設。
3. 觀測資料分析說明。

(五) 長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改善研究初探

1. 進行港灣內長週期波作用下斷面水工模型試驗。
2. 分析斷面水工模型試驗結果及構思改善提案。
3. 開始撰寫期末報告初稿。

(六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)-海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用

1. 特高頻資料交換系統 (VDES)發展現況。
2. 臺灣周圍海域船舶資料蒐集與交通流分析。
3. 海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用。

(七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

1. 辦理波浪資料品管與檢核工作，雷達南站橫向雜訊過高與訊噪比大於10dB，訊號品質不佳與品管改善情況。
2. 進行波浪資料交互驗證工作，探討凱米與山陀兒颱風波浪觀測與方向波譜分析之情形。
3. 進行海洋陣列雷達設備維護與保養，報告於10月8日突發北站電纜線挖掘斷裂改善事件。

(八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)-系統建置

1. 數位管理系統委外建置契約完工說明。
2. 數位管理系統資料持續建置狀況說明。
3. 114年度工作規劃情形說明。

(九) 港區水下巡查技術初探 (2/3)-水下無人載具測試分析

1. 進行港區水下巡查作業之無人載具分析。
2. 進行港區水下巡查項目探討。
3. 進行港區 ROV 水下定位測試數據分析。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究

1. 討論臺中港強風日歷圖之展示方式及應用性。

2. 討論颱風事件之強陣風影響。

(二) 馬祖港福澳碼頭設計水位之探討

1. 馬祖地區潮位資料統計分析結果討論。

2. 馬祖地區歷年潮位資料基準校正方式討論。

(三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(1/2)-水中無線通訊設備海域測試

1. 本年度觀測系統採購案執行情形、災損說明及修復規劃。

2. 水中無線通訊設備控制器處理邏輯測試成果及水密箱體製作。

(四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)-消能措施方案評估

1. 討論花蓮港平面水工模型試驗條件。

2. 討論水工模型改善方案內容。

(五) 長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改善研究初探

1. 討論消能碼頭斷面水工模型試驗之反射率結果。

2. 評估碼頭改善提案方向。

(六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)-海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用

1. 完成蒐集國外 VDES 資料等相關船舶航行安全通訊技術。

2. 完成臺灣周圍海域船舶資料蒐集與交通流繪製。

3. 完成第46屆海洋工程研討會投稿。

(七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

1. 討論雷達站品管檢核資料情形，探討9月28日雷達訊號品管改善與雷達原廠溝通檢修之情形。

2. 討論凱米與山陀兒颱風海象觀測分析情形。

3. 探討波浪與海流資料交互驗證工作，實際與 AWAC 進行波浪與海流資料的比對情形。

(八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)-系統建置

1. 數位管理系統資料持續建置狀況之討論。

2. 數位管理系統問題修正建議方案之討論。

3. 數位管理系統浮標儀器管理追蹤之討論。

(九) 港區水下巡查技術初探 (2/3)-水下無人載具測試分析

1. 港區水下巡查之無人載具定位方式說明。

2. 港區水下設施巡查儀器精度說明。

3. ROV 水下定位測試結果討論。

貳、主要結論

(一) 商港風力觀測技術精進及強風特性分析之研究

1. 2024年2起強烈颱風事件對港區之影響極大，建議於期末報告可將相關強陣風分析數據呈現，以提供港務公司參考。

2. 本計畫繪製臺中港強風日歷圖，可清楚看出東北季風期間之強風延續時間及對港口造成之影響，未來可將相關資料提供航港局及港務公司參考應用。

(二) 馬祖港福澳碼頭設計水位之探討

1. 建議將已知基準之歷年潮位資料結合已校正之(原基準偏移)歷年潮位資料進行分析，期獲得保留長周期之結果。

2. 請加速進行港灣季刊投稿文章初稿撰寫工作。

(三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (1/2) -水中無線通訊設備海域測試

1. 颱風後現場勘災，務必謹慎小心，年報及研究報告請依預定期程辦理。

2. 水密箱體入水前，箱體密封性需多加測試，避免因水體滲漏造成控制器短路，影響測試成果。

(四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗(2/3)-消能措施方案評估

1. 2023~2024年波浪觀測資料分析結果，可作為試驗內容基本資料。

2. 加速進行平面水工模型試驗，避免影響試驗進度。

(五) 長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改

善研究初探

1. 應加速進行消能碼頭斷面水工模型試驗。
2. 依期程分析斷面試驗結果及提出改善提案，如期完成報告書撰寫。

(六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討(3/4)-海氣象資訊於船舶監控預警系統之應用

1. 安排規劃後續於航港局智慧航安監控船「航港1號」上架設船舶 VDES 相關事宜。
2. 整理本計畫相關成果，以利投稿港灣季刊使用。

(七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)-波浪觀測分析

1. 有關雷達站10月份訊號品質劣化，請檢討是否發生於山陀兒颱風後，並敬請安排人員巡查解決，後續應評估建立快速檢查機制，以維持海氣象資料之正確性。
2. 有關 HF 雷達波譜部分，波譜外圍特性似乎消失，以及方向上偏移仍有待確認是否為單點與平面觀測間之差異，建議持續分析探討。

(八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究(1/2)-系統建置

1. 系統修正測站資材導致歷程發生衝突等問題，建議系統表單連動保持部分彈性，如即時顯示明確錯誤訊息，減少因人員操作所導致系統問題。
2. 部分測站定義應更為明確，如資料浮標測站含有風速及波流等儀器資料，且需再加以管理其細部儀器之歷程。
3. 港灣季刊請於期限內完成投稿。

(九) 港區水下巡查技術初探 (2/3) -水下無人載具測試分析

1. 港區水下巡查項目之檢測方式，可分別進行效益評估。
2. 水下無人載具巡查拍攝影像，未來可進行後續影像拼接處理。

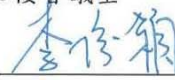
會議簽到表

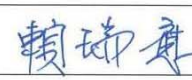
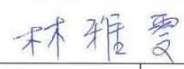
會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科 113 年度自行研究計畫第 3 次工作會議

時間：113 年 10 月 29 日(星期二)上午 10 時 00 分

地點：本所運技中心 3樓會議室

主持人：李俊穎科長



出席單位	簽名	
第一科科長		
第三科科長		
第二科		