

115-018-7E18
MOTC-IOT-114- H2CA001g

臺中港海洋陣列雷達訊號應用 分析(3/3)-船舶觀測分析



交通部運輸研究所
中華民國 115 年 3 月

115-018-7E18
MOTC-IOT-114- H2CA001g

臺中港海洋陣列雷達訊號應用 分析(3/3)-船舶觀測分析

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 115 年 3 月

GPN : 1011500220

定價 200 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析. (3/3) : 船舶觀測分析 / 李政達, 林受勳, 羅冠顯, 李俊穎, 李江澤, 陳天時著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 115.03

面 ; 公分

ISBN 978-986-531-757-7(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

115001865

臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(3/3)-船舶觀測分析

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 115 年 3 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 46 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：104472 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：400002 臺中市區中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1011500220 ISBN：978-986-531-757-7 (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(3/3)-船舶觀測分析			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-531-757-7 (平裝)	政府出版品統一編號 1011500220	運輸研究所出版品編號 115-018-7E18	計畫編號 MOTC-IOT-114-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114年1月 至114年12月
關鍵詞：陣列雷達、波束合成、船舶偵測、機器學習、YOLO			
摘要： <p>隨著極端氣候事件發生頻率增加，以及港區與航道船舶活動日益複雜，港灣航行安全管理面臨更高之即時監測與風險掌握需求。為提升港區船舶監測能力並補足既有監控系統之不足，交通部運輸研究所自 107 年起於臺中港建置海洋陣列高頻雷達系統，持續發展海流、波浪及船舶觀測等應用技術。本年度做為臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析系列計畫之最後一年，研究重點聚焦於船舶偵測與航跡分析方法之建立與驗證。</p> <p>本計畫由原始雷達接收訊號處理出發，透過取樣、濾波與雜波抑制技術，降低一階布拉格散射所造成之海雜波干擾，並結合波束成型技術重建距離與方位角二維空間域圖譜，以強化船舶回波於空間域中之可視化表現。進一步透過輪廓線擷取、回波中心定位及連續圖譜分析方法，推估船舶位置與航跡變化，建立由雷達訊號處理至船舶回波辨識與航跡判釋之分析流程。此外，為驗證分析成果之可靠性，本計畫以雷達偵測結果與船舶自動識別系統(AIS)軌跡資料進行比對。結果顯示，雷達推估之船舶位置與航跡走向，與 AIS 資訊具有良好一致性，顯示本計畫所建立之船舶偵測與航跡分析方法，已具備應用於港區船舶監測之可行性與穩定性。此外，本計畫亦初步導入 MATLAB 環境下之 YOLOv4 深度學習架構，針對雷達距離與方位角空間亮度分布圖進行船舶辨識測試，結果顯示機器學習方法初步具備辨識船舶目標之可行性，可做為後續智慧化應用之基礎。</p> <p>研究成果顯示海洋陣列高頻雷達可做為港區船舶監控之輔助觀測工具，未來可持續整合雷達、AIS 與機器學習技術，發展智慧化港灣船舶監測與航安管理應用，強化我國商港營運安全，並支援海域治理及港航數位轉型等政策推動。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
115 年 3 月	238	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 (3/3) –Vessel observation and analysis			
ISBN(OR ISSN) 978-986-531-757-7 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011500220	IOT SERIAL NUMBER 115-018-7E18	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-114- 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 2025 TO December 2025
KEY WORDS: Radar array, Beamforming, Ship Tracking, Machine learning, YOLO			
ABSTRACT :			
<p>As the frequency of extreme weather events continues to increase and vessel activities in port areas and navigation channels become increasingly complex, harbor navigation safety management is facing greater demands for real-time monitoring and risk awareness. To enhance port vessel monitoring capabilities and address the limitations of existing surveillance systems, our institute has deployed an ocean array high-frequency (HF) radar system at Taichung Port since 2018, and has continuously developed application technologies for ocean current, wave, and vessel observations. This year marks the final phase of the Taichung Port Ocean Array Radar Signal Application Analysis project series, with the primary focus on the establishment and verification of vessel detection and trajectory analysis methods.</p> <p>This project starts from the processing of raw radar received signals. Through sampling, filtering, and clutter suppression techniques, the interference caused by first-order Bragg scattering from sea clutter is reduced. In combination with beamforming techniques, two-dimensional spatial domain maps of range and azimuth are reconstructed to enhance the visualization of vessel echoes in the spatial domain. Furthermore, vessel positions and trajectory variations are estimated through contour extraction, echo center localization, and sequential spatial map analysis methods, thereby establishing an analytical workflow from radar signal processing to vessel echo identification and trajectory interpretation. In addition, to verify the reliability of the analysis results, radar-based vessel detection outcomes were compared with Automatic Identification System (AIS) trajectory data. The results indicate that the radar-estimated vessel positions and trajectory directions are in good agreement with the corresponding AIS information, demonstrating that the vessel detection and trajectory analysis methods developed in this project are feasible and stable for port vessel monitoring applications. Moreover, this project also preliminarily introduces the YOLOv4 deep learning framework within the MATLAB environment to conduct vessel recognition tests based on radar spatial intensity maps of range and azimuth. The results show that the machine learning approach has preliminary feasibility for identifying vessel targets and can serve as a foundation for future intelligent applications.</p> <p>The research outcomes demonstrate that ocean array HF radar can serve as a supplementary observation tool for port vessel monitoring. In the future, continued integration of radar, AIS, and machine learning technologies can support the development of intelligent harbor vessel monitoring and navigation safety management applications, strengthen the operational safety of commercial ports in Taiwan, and support broader maritime governance and port digital transformation policy initiatives.</p>			
DATE OF PUBLICATION March 2026	NUMBER OF PAGES 238	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	VII
表目錄	XI
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	1-8
1.3 研究項目	1-9
1.4 研究架構	1-12
1.5 預期成果	1-13
第二章 文獻回顧	2-1
2.1 歷年成果說明	2-1
2.2 高頻雷達船舶觀測文獻回顧	2-4
2.2.1 線性波束成型船舶追蹤技術研究文獻回顧	2-4
2.2.2 非線性波束成型船舶追蹤技術研究文獻回顧	2-10
2.2.3 近 2 年港灣船舶追蹤技術研究文獻回顧	2-14
2.3 本計畫文獻回顧及運用情形	2-39
2.4 臺中港使用者需求訪談情形	2-41
第三章 船舶辨識與航跡分析方法	3-1
3.1 繪製作二維空間域圖譜	3-3
3.2 輪廓線定位	3-6
3.3 二維空間域圖譜調整參數	3-9
3.4 運算資料長度	3-11

3.5 距離與場型效應之修正	3-12
3.6 連續圖譜定位船舶位置	3-14
3.7 二維距離角度圖船舶航跡	3-16
3.8 船航跡船舶航行速度和方位之計算	3-17
3.9 AIS 資料原則	3-18
第四章 應用機器學習於船舶辨識分析初探	4-1
4.1 資料來源與標註方式	4-2
4.2 訓練資料格式準備與前處理流程	4-5
4.3 網路架構與訓練設定	4-6
4.3.1 訓練結果與收斂說明	4-7
4.4 閾值與非極大值抑制案例應用情形	4-8
4.5 小結	4-10
第五章 研究分析與探討	5-1
5.1 實際測試與分析	5-2
5.2 調適性偵測法測試與軌跡比對結果	5-6
5.3 小結	5-10
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	6-3
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

附錄五、AI-Ready Data 詮釋資料框架指標指引(第一版).....	附錄 5-1
附錄六、人工智慧基本法.....	附錄 6-1

圖目錄

圖 1.1 行政院數位國家・創新經濟發展方案(106-114 年).....	1-1
圖 1.2 交通部運輸部門因應氣候變遷調適與防災需求之 3 大政策方向	1-2
圖 1.3 國科會與環境部發行國家氣候變遷科學報告(2024)	1-4
圖 1.4 氣候變遷調適政策	1-4
圖 1.5 國家減碳新目標	1-5
圖 1.6 船舶溫室氣體排放目標	1-6
圖 1.7 臺灣海域 114 年海洋雷達建置現況.....	1-8
圖 2.1 臺灣首座海洋陣列雷達	2-1
圖 2.2 netCDF 4.0 格式.....	2-2
圖 2.3 凱米颱風臺中港風湧浪觀測分析情形	2-2
圖 2.4 108 年海洋雷達觀測船舶偵測技術開發情形	2-3
圖 2.5 不同雷達形式偵測範圍示意圖	2-5
圖 2.6 調適性偵測法流程	2-9
圖 2.7 雷達頻譜船舶回波訊號	2-9
圖 2.8 高頻海洋陣列雷達海象與船舶能譜特徵.....	2-10
圖 2.9 帶拒濾波示意圖	2-14
圖 2.10 雷達與 AIS 資料時間不同步與資料遺漏情形示意圖.....	2-15
圖 2.11 雷達與 AIS 資料時間對齊及軌跡處理流程圖.....	2-16
圖 2.12 船舶軌跡球面最短路徑插值方法示意圖	2-16
圖 2.13 雷達與 AIS 軌跡差分轉換後之機率分布重構圖.....	2-17
圖 2.14 最近鄰搜尋之軌跡索引與雷達軌跡軌跡候選位置示意圖	2-18
圖 2.15 原始 AIS 與雷達資料案例處理情形.....	2-19
圖 2.16 YOLOv5-DS 深度學習船舶偵測方法示意圖.....	2-24
圖 2.17 AIS 輔助目標標註流程與處理情形示意圖.....	2-25

圖 2.18 DS-YOLOv5s 偵測模型整體網路結構.....	2-26
圖 2.19 C3 網路模組與 C3-DSCT 改良模組示意圖	2-28
圖 2.20 動態蛇形卷積(DSConv)取樣機制概念圖	2-28
圖 2.21 特徵加權模組運作示意圖	2-29
圖 2.22 不同模組配置之消融實驗結果比較圖	2-31
圖 2.23 雷達時頻分析與非固定虛警率作法流程	2-32
圖 2.24 雷達時頻圖經同步擠壓轉換處理前後之比較圖	2-33
圖 2.25 時頻圖之三角形閾值法二值化處理	2-35
圖 2.26 AIS 船舶訊號特徵重建與分類	2-36
圖 2.27 時頻脊線與 AIS 資料目標進行比對情形	2-36
圖 2.28 KNN 與 DT 決策樹混淆矩陣驗證結果	2-37
圖 2.29 非固定虛警率門檻篩選情形	2-38
圖 3.1 船舶辨識與航跡分析方法流程	3-3
圖 3.2 距離與方位角二維空間域回波強度分布圖	3-3
圖 3.3 距離與方位角二維空間域回波強度分布之極座標分布圖	3-4
圖 3.4 連續二維空間域圖譜之船舶回波角度位移變化	3-5
圖 3.5 製作輪廓線與定位回波中心 0 ~ -80 度	3-7
圖 3.6 製作輪廓線與定位回波中心 0 ~ +80 度	3-9
圖 3.7 白噪增益參數 δ 對二維空間域圖譜解析度與回波集中度影響	3-10
圖 3.8 運算資料長度 np 對二維空間域圖譜呈現效果影響	3-12
圖 3.9 距離衰減與天線場型校正前後之圖譜比較	3-13
圖 3.10 未執行距離衰減及天線場型校正背景扣除船舶定位追蹤結果	3-15
圖 3.11 未執行距離衰減及天線場型校正原始背景船舶定位追蹤結果	3-15
圖 3.12 執行距離衰減及天線場型校正原始背景船舶定位追蹤結果	3-16
圖 3.13 二維距離角度圖船舶航跡圖	3-17

圖 3.14 船航跡船舶航行速度和方位	3-18
圖 4.1 YOLO 模型研究演進過程示意圖	4-2
圖 4.2 MATLAB 提供之 Image Labeler 工具	4-4
圖 4.3 Image Labeler 工具標註情形	4-4
圖 4.4 訓練損失值隨迭代次數及訓練回合數之變化曲線	4-7
圖 4.5 閾值設定的案例應用情形低閾值、高閾值	4-9
圖 4.6 本計畫 YOLOv4 訓練流程架構	4-10
圖 4.7 YOLOv4 的網路架構圖	4-11
圖 5.1 運研所臺中港海洋雷達示意圖	5-1
圖 5.2 運研所臺中港 AIS 船舶軌跡示意圖	5-1
圖 5.3 嘉泰號號示意圖	5-2
圖 5.4 黃金凱瑟琳號示意圖	5-3
圖 5.5 嘉泰號 AIS 軌跡與雷達偵測情形	5-4
圖 5.6 黃金凱瑟琳號 AIS 軌跡與雷達偵測情形	5-5
圖 5.7 於 2019 年 8 月 31 日上午 3 時觀測案例原始資料	5-6
圖 5.8 二維移動平均扣除後之都卜勒距離譜殘餘訊號分布圖	5-7
圖 5.9 殘餘訊號中近岸與一階布拉格干擾區域之移除結果	5-7
圖 5.10 調適性門偵測檻圖	5-8
圖 5.11 調適性偵測法結果圖	5-8
圖 5.12 調適性偵測法與 AIS 軌跡比對結果	5-9
圖 6.1 技術發展路徑圖	6-4

表目錄

表 1-1 臺中港海洋雷達系統規格表	1-9
表 2-1 時頻圖 16 項特徵函數表	2-33
表 2-2 本計畫海洋雷達文獻回顧與運用情形彙整表	2-39
表 3-1 AIS 船舶類別編碼表	3-19
表 4-1 MATLAB R2023b 與 YOLO 架構表	4-2

第一章 前言

1.1 計畫背景與目的

我國具備深厚工業與資通訊技術基礎，面對數位經濟與物聯網 (Internet of Things, IoT) 時代來臨，加速關鍵技術研發與系統整合，建構完善產業與技術生態體系，已為產業與科研發展重要方向。在此趨勢下，透過海洋陣列雷達等先進感測系統蒐集海面即時環境資訊，並結合數位化資料處理與分析技術，業提升港航監測能力與支援智慧化應用之關鍵，雷達技術不僅可強化海域海氣象資訊獲取與掌握船舶動態，亦有助於建構跨系統整合之智慧監測架構發展，符合數位經濟時代產業創新與科技發展之方向。因此，行政院為推動國家長期發展願景，聚焦於藍色國土之治理、強化海域安全與永續發展，面對日益增加海域防災與應變需求，推動數位國家·創新經濟發展方案(106-114 年)與智慧國家 2.0 綱領(114-117 年)，前後政策相互銜接，以落實各級政府資料治理，建構跨域整合、提供與量身打造且無所不在智慧政府服務體系，並透過智慧科技、智慧產業、智慧治理及智慧共融等主軸，提升公共服務之智慧化與韌性，爰此，透過數位科技導入、跨域資料整合與智慧化分析，強化海域監測、風險預警與即時決策能力，發展為海域治理與港埠管理重要方向。如圖 1.1 所示。



圖 1.1 行政院數位國家·創新經濟發展方案(106-114 年)

除此之外，交通部亦於 2020 運輸政策白皮書，明確指出運輸部門因

應氣候變遷調適與防災需求之 3 大政策方向，包括(1)強化災害風險管理機制，確保運輸與港埠設施整體安全性、(2)提升跨域聯防與調適能力，增進設施與系統之抗災韌性、以及(3)導入先進科技技術，強化防災預警資訊之即時蒐集與迅速傳遞能力(如圖 1.2)。隨著商港船舶密度提高與極端氣候事件發生頻率增加，以致港區船舶航行安全與即時監控需求顯著攀升，需強化海洋觀測與應用技術能量，並持續整合國內既有之海洋雷達觀測資源，共同建構「臺灣海洋雷達觀測網」，支援多元海域管理與應用情境，對此，海洋委員會邀集各單位分工執行，國家海洋研究院(以下簡稱國海院)為增進民眾海洋遊憩安全、促進海洋產業發展為目標，投入微波雷達與甚高頻於近岸與港灣應用之研究；交通部中央氣象署(以下簡稱氣象署)則為海象環境監測與防災服務為核心，持續研發陣列式與微波雷達硬體與觀測效能之改善；而運輸研究所(以下簡稱運研所)聚焦於國際商港與重要航道範圍，提升港區船舶航行安全與運輸效率為核心，投入船舶辨識與追蹤技術研發，偵測超視距大型船舶動態，補足既有船舶監控系統之不足問題。



圖 1.2 交通部因應氣候變遷調適與防災需求之 3 大政策方向

因此，於時勢所趨向與實務需求雙重驅動下，運研所結合雷達遙測技術與主動式船舶偵測分析方法，發展商港航運之數位轉型，強化港灣智慧監測與災害防救應變資訊能力，相關成果除可支援部屬機關於海象監測、航安管理與港區作業安全等政策推動需求外，亦可提供國內航港相關單位作為輔助港區船舶調度、航管決策與整體營運安全管理之重要技術依據。

綜上，所述隨著極端氣候事件頻率增加與海域利用強度提升，建立

完善且具即時性的海洋監測體系，已成為我國海域治理與防災應變之重要方針，且政府近年積極推動數位治理與跨域資料整合，透過導入先進遙感技術，強化海域環境監測範圍、增加航行安全管理與災害預警能力，本計畫發展的海洋陣列雷達技術已可即時掌握海象變化與船舶初步動態，對於提升港區監控效能與支援決策具關鍵性意義，爰此，分別就(一)氣候變遷因應對策、(二)國家能源政策與港航轉型發展與(三)臺中海洋陣列雷達發展近況，探討政策推動現況與未來發展。

(一)氣候變遷因應對策：

依據國家科學及技術委員會與環境部發行的「國家氣候變遷科學報告 2024」研究報告，如圖 1.3 所示，近世紀以來，全球氣候系統已呈現明確持續暖化之趨勢，由 1850 年工業化觀測至今長期氣候資料指出，全球平均地表溫度已顯著上升，特別係近二十年暖化速率顯著加快，該研究指出 20 世紀後期以來的全球暖化主因係人為活動所排放之溫室氣體增加，包含：二氧化碳、甲烷與氧化亞氮等影像造成氣候變動，導致全球表面增溫，世界氣象組織 (World Meteorological Organization, WMO) 根據彙整六個國際氣候資料集的分析結果，於 2024 年正式紀錄全球平均地表氣溫較 1850–1900 年工業化前平均值溫差 1.55°C (誤差 $\pm 0.13^{\circ}\text{C}$)，高出全球管制溫度 1.5°C 的門檻，創下全球歷史紀錄，以致於全球不斷觀測到極端高溫事件發生、極端降雨與乾旱事件，以及海洋暖化與海平面持續上升等現象，對自然生態系統、人類經濟活動造成嚴重衝擊，因此，東亞地區發生氣候變遷特徵改變，降雨型態重新分布，以及極端天氣事件頻繁增加，臺灣位處西北太平洋與東亞季風交會帶，對氣候變遷特別敏感，故根據國家氣候變遷科學報告 2024 資料顯示，臺灣近數十年平均氣溫持續上升，高溫日數增加、冷日減少，且日夜溫差與季節長度亦出現改變，降雨方面，時空分布已明顯發生改變，豐枯交錯現象由為明顯，逐漸朝向短延時強降雨的型態，極大提供治水難度，此外，臺灣海域近岸與周邊海域海溫亦持續上升，伴隨海平面上升與海洋酸化趨勢，已對沿海低窪地區、港埠設施、生態系統與漁業資源造成潛在威脅，面對極端氣候事件增高，強降雨、熱浪、

乾旱與颱風複合型災害風險險峻，臺灣國土治理將面臨更高之不確定性與挑戰。



資料來源：國科會與環境部

圖 1.3 國家氣候變遷科學報告 2024

有鑑於此，國發會順應國際趨勢推動國家氣候變遷調適政策綱領，如圖 1.4 所示，全面提升臺灣應對氣候變遷的調適能力，強化與減緩調適作法，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，並因應氣候變遷挑戰，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，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

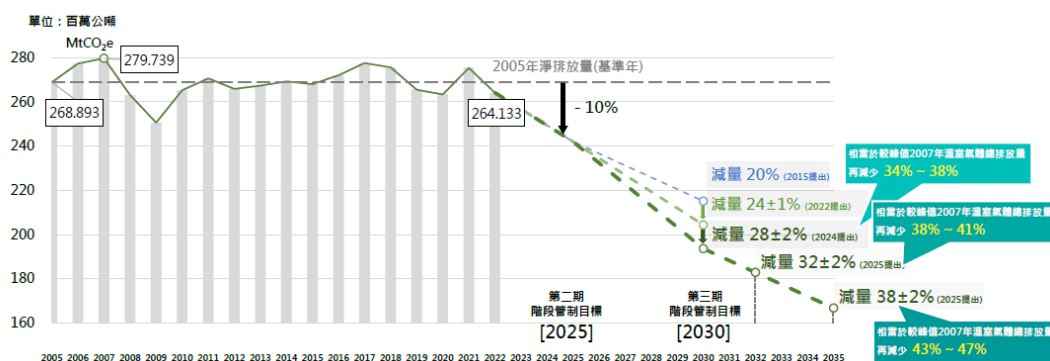
圖 1.4 氣候變遷調適政策

鑑於 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、而後2023年聯合國氣候峰會(COP28)更進一步強調，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，爰此，為因應全球氣候變遷趨勢與國際減碳要求，呼應全球思考全球行動在地的趨勢，臺灣亦積極響應國際減碳的實際行動，同步推動相關法規與政策，以確保符合全球發展方向。

(二)國家能源政策與港航轉型發展：

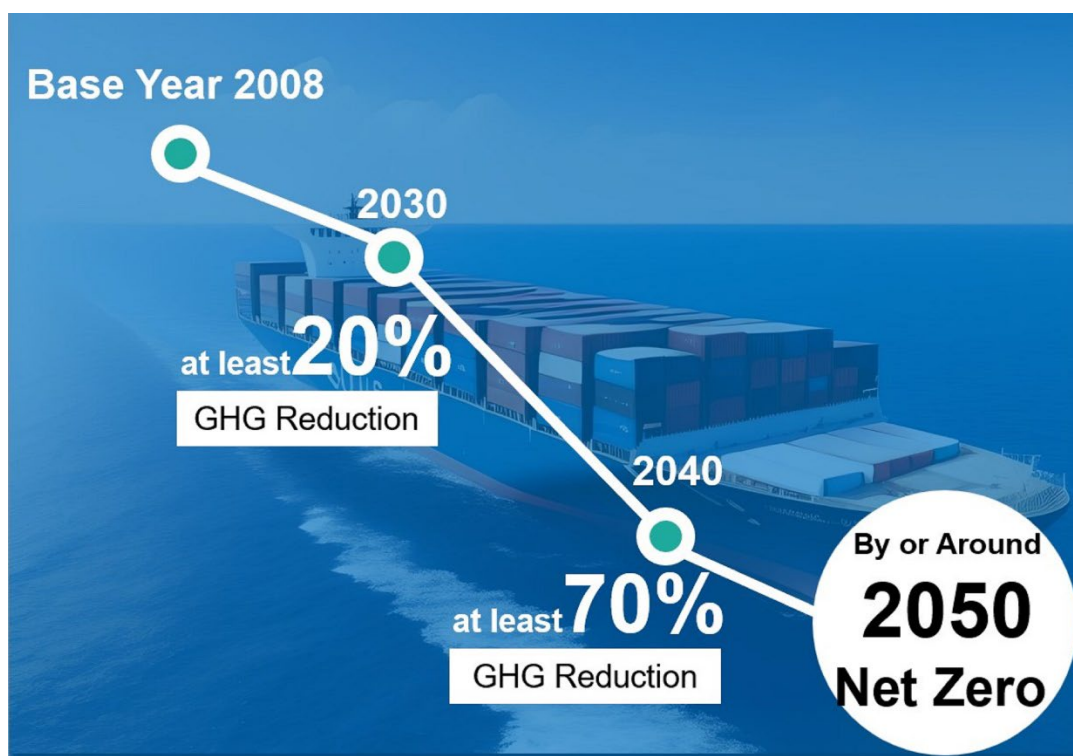
隨著全球氣候變遷的日益加劇，國際社會對於溫室氣體減少排放量的壓力逐年升高，為回應此趨勢，臺灣政府近幾年陸續提出「2050 淨零轉型策略」與「十二項關鍵戰略」等政策，而賴清德總統114年1月23日國家氣候變遷對策委員會第3次委員會議發布國家自訂貢獻行動(Nationally Determined Contributions 3.0)簡稱 NDC 3.0，訂定臺灣國家減碳新目標將朝向121年整體減碳幅度達 $32\pm 2\%$ 、127年整體減碳幅度達 $38\pm 2\%$ ，做為臺灣減碳方案新目標，後續於114年2月7日舉辦第三期溫室氣體階段管制目標(草案)公聽會，啟動社會對話與徵詢公眾意見，經歷關鍵戰略、公聽參與、法制建構三階段演進，行政院終於114年5月6日通過第三期溫室氣體階段管制目標(115~119年)，使溫室氣體控管進入有目標、有期程、有監測的跨部門治理，並要求運輸部門設定119年減量20%的具體目標，未來將加速推動6大部門，包括經濟部能源、製造部門、內政部住商部門、農業部農業部門、交通部運輸部門與環境部環境部門，推行20項減碳旗艦計畫，強化氫能供應鏈、替代燃料與碳管理等多元面，如圖1.5所示。



資料來源：114年1月23日國家氣候變遷對策委員會第3次委員會議

圖 1.5 國家減碳新目標

隨著巴黎協定之實施，臺灣做為高度依賴海運的島嶼經濟體，雖已逐步回應國際脈動，然而，促使運輸部門加碼減碳力道，對於航運碳減量的布局仍是緩不濟急，顯示實務執行面卻仍面臨挑戰。由於海運約占全球貿易總量之 80%，其碳排放控制對全球氣候變遷策略具有舉足輕重的地位，航運業做為全球經濟命脈，其碳排放量占比不容忽視，為此，國際海事組織 (International Maritime Organization, 簡稱 IMO) 於 2024 年舉行的海洋環境保護委員會 (Marine Environment Protection Committee, 簡稱 MEPC) 第 82 屆會議 (簡稱 MEPC 82)，通過最新溫室氣體 (Greenhouse Gas, 簡稱 GHG) 戰略目標，訂定以 2008 年為基準，2030 年前減排 20%、2040 年前達到 70%，並於 2050 年實現淨零排放的長程目標，如圖 1.6 所示；在此背景之下，IMO 強調需大幅提升船舶碳效率，使環境接近友善程度，因此，碳強度指標 (Carbon Intensity Indicator, 簡稱 CII) 至少降低 40%，以及提高零碳燃料佔比約 5~10%，凸顯國際航運已朝向結構性能源轉型邁進。



資料來源：IMO 與 CR 財團法人驗船中心

圖 1.6 船舶溫室氣體排放目標

有鑑於此，面對 2050 淨零之挑戰，臺灣未來於低碳航運轉型，將面臨未來新興替代能源的導入與港航轉型，牽涉港務基礎設施建置與調整等，皆是臺灣港埠與航運業轉型之目標。

(三)國家整合海洋雷達觀測網：

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 4 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)，惟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)，觀測成本過高，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，我國海洋觀測面臨(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、(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，1980 年興起海洋雷達觀測近岸海流、波浪與海洋表面風，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 HTCN)，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 2 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、氣象署、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 14 座、微波雷達站 21 座與機動雷達系統 4 套，已構築臺灣周遭經濟海域及沿海近海遠近交織之海氣邊界層環境特性的海洋雷達監測網絡，如圖 1.7 所示。

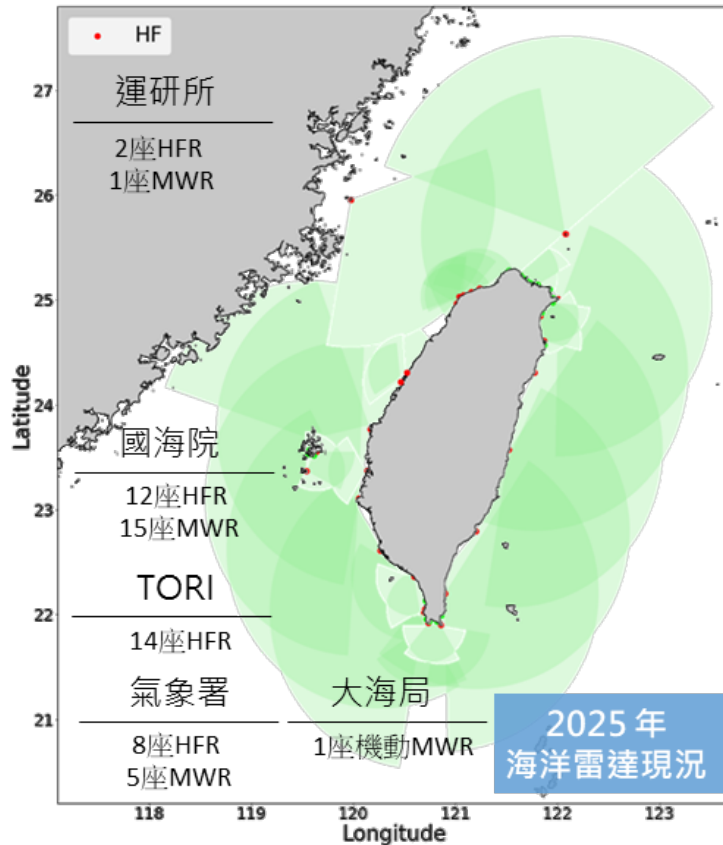


圖 1.7 臺灣海域 114 年海洋雷達建置現況

隨著臺灣積極推動離岸風電與能源轉型、國家能源政策與港航轉型已刻不容緩，面對港區與航道的安全挑戰日益加劇，風電場與商船航道交錯，航行風險不斷增加，而極端氣候變遷，亦迫使得港區航安管理更具挑戰性，此刻正處於國家整合海洋雷達觀測網構築階段，因此，建立陸運與港灣設施的防災資料數據，加強智慧環境與船舶監測，利用智慧化數據，並推動防災技術發展，以滿足交通部暨部屬機構防災的需求，本計畫發展海洋雷達遙測技術，維持港區與風電場的航行安全，確保臺灣在能源轉型過程中海運穩定性與效率。

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，觀測與監測臺中港區鄰近周邊海域海氣象與偵測海域船舶，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 1-2 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：文獻回顧、船舶辨識與航跡分析方法、應用機器學習於船舶辨識分析初探、研究比較分析等 4 項，各項目工作要點分述如下：

(一) 文獻回顧：

回顧歷年海洋陣列雷達之研究成果，並彙整國內外高頻雷達於海流、波浪及船舶觀測相關之研究發展脈絡，概要說明運研所 107 年建置臺中港海洋陣列雷達系統以來，歷年分別針對海流、波浪與船舶等不同應用主題所累積之研究成果，包含雷達訊號處理、演算法發展、資料品管流程，以及實測驗證結果，藉以說明本計畫之研究基礎與技術延續之情況；其次，回顧高頻雷達於船舶偵測與追蹤之相關文

獻，追溯至早期以都卜勒距離譜與線性波束成型為主要的研究方法，並整理 CODAR SeaSonde 與 WERA 等系統於船舶回波辨識、雜波抑制、固定虛警率偵測及航跡關聯等技術之發展，做為理解高頻雷達船舶偵測理論基礎之重要參考；此外，近年研究趨勢亦回顧非線性波束成型技術(如 Capon 與 NC-Capon)於距離方位角空間域能量之應用，探討其相較傳統頻域分析能有效抑制旁波瓣、提升空間解析度及改善船舶定位穩定性方面之優勢；最後，彙整近 2 年港灣船舶追蹤技術之最新研究成果，包含：雷達與 AIS 資料整合、時頻分析方法，以及深度學習應用於船舶偵測之相關文獻，藉由比較不同研究在方法設計、資料處理與應用情境上的差異，掌握現階段船舶偵測技術之發展趨勢，並做為後續研究方法選擇與分析架構建構之依據。

(二)船舶辨識與航跡分析方法：

本計畫第三章探討船舶辨識與航跡分析方法，主要針對高頻海洋陣列雷達於港區船舶偵測與追蹤之應用進行分析，由原始雷達資料處理、船舶回波辨識、航跡萃取至驗證評估之完整技術流程，藉以探討運研所建構的船舶偵測方法，是否可真實於實際港灣環境中落地使用；自定時讀取雷達資料開始，說明船舶辨識與航跡分析方法流程，透過多尺度取樣與濾波抑制一階布拉格海雜波，並結合波束形成技術之二維空間域圖譜，強化船舶回波於距離與方位角空間的可視化效果，因此，透過二維空間域圖譜，能更直覺觀察船舶回波的空間分布與能量變化，能做為後續目標定位與追蹤分析之基礎；其次，二維空間域圖譜中回波亮度受限於雷達發射場型、距離衰減及波束旁瓣影響等問題，依然能透過輪廓線擷取與分區定位方式，萃取可能對應船舶之回波中心位置，本計畫探討不同參數設定，例如參數、運算資料長度等，對於圖譜解析度與回波強度表現影響，藉此釐清解析度與亮度間之取捨關係，朝向建立適用於不同距離與方位角區域之參數設定原則，更進一步地，探討距離衰減與天線場型效應之修正方式，比較是否執行距離與場型校正，探討是否移除隨時間變化不顯著訊號，對於分析船舶回波顯示與定位結果

之影響，並檢視不同處理策略可能造成之偵測差異。

(三)應用機器學習於船舶辨識分析初探：

本計畫辦理應用機器學習於船舶辨識分析初探，於前期計畫之雷達船舶辨識與航跡分析的成果基礎上，初創嘗試機器學習方法，評估深度學習於雷達距離方位角空間亮度分布圖之船舶辨識可行性，該章節並非以建立高精度定位模型為目標，而係做為應用機器學習於研究資料型態判斷之探索，重點在於驗證其可運行性與基本辨識能力，探索以 MATLAB Image Labeler 工具進行船舶目標之矩形標註，並以 MATLAB 原生支援之 YOLOv4 架構，並以 csp-darknet53-coco 預訓練骨幹進行影像分析學習，利用單一船舶目標類別進行訓練與降低模型複雜度，訓練過程針對錨點設定、最佳化方法與批次正規化等參數進行調整，並透過訓練損失函數之收斂情形，初步評估模型之訓練穩定性與可行性，所獲得的初步成果，說明於現階段資料量與研究範圍下，YOLOv4 模型已具備於 MATLAB 環境中穩定運行與基本船舶辨識之能力，惟尚未進行系統性消融實驗與效能比較，後續研究可透過擴充資料集與消融實驗分析，檢驗模型架構與各模組設定對於辨識效能之影響，做為未來深化研究與技術精進之依據。

(四)研究比較分析：

研究比較分析主要利用運研所於臺中港北防沙堤所量測之雷達資料，結合 AIS 船舶動態資訊，進行船舶偵測、定位與航跡比對分析，透過實際觀測案例，驗證高頻海洋陣列雷達於港灣海域船舶監測之可行性與穩定性。結果分析顯示，本計畫所建構之船舶偵測方法於日夜不同觀測條件下皆具備良好辨識能力，能有效因應弱回波與背景雜訊較為複雜之情境。此外，調適性船舶偵測法於實際雷達資料之應用，透過背景能量估計、殘餘訊號萃取與調適性門檻設定，增進船舶訊號於環境雜訊分離的能力，所偵測結果與 AIS 航跡進行分析比對，效果顯著，具備良好應用潛力，有機會為海洋雷達觀測網，未來港區提供船舶監控與智慧航安輔助之基礎。

1.4 研究架構

本計畫之核心的研究議題，係探討海洋陣列雷達於臺中港船舶偵測應用之可行性，並進一步評估結合機器學習方法進行雷達船舶辨識之成效，評估現階段資料量，進行標註資料，是否已具備基本船舶辨識能力，並以雷達原始資料於二維空間域圖譜進行船舶可偵測評估，此外，為增加船跡之可靠度，探討 AIS 資料與雷達船舶距離誤差與方位誤差，提高船跡判釋之準確度，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、與氣候變遷因應對策與國家能源政策與港航轉型發展，以及說明海洋雷達觀測網發展近況與臺中海洋陣列雷達之基本資料。

第二章：本章回顧歷年海洋陣列雷達相關研究成果，彙整國內外高頻雷達於海流、波浪及船舶觀測之研究發展脈絡，並概述運研所自 107 年建置臺中港海洋陣列雷達系統以來，於雷達訊號處理、演算法發展、資料品管及實測驗證等面向所累積之研究成果，說明本計畫之研究基礎與技術。另回顧高頻雷達於船舶偵測與追蹤之相關文獻，包含早期以都卜勒距離譜與線性波束成型為主之方法，以及 CODAR SeaSonde 與 WERA 系統於船舶回波辨識、雜波抑制與航跡關聯等技術發展。進一步整理近年非線性波束成型技術於距離方位角空間域能量影像應用優勢，並彙整近兩年雷達與 AIS 整合、時頻分析及深度學習應用於船舶偵測之研究成果，供後續研究參考。

第三章：本章針對高頻海洋陣列雷達於港區船舶辨識與航跡分析方法之應用進行研究，3.1 小節說明繪製作二維空間域圖譜情形，3.2 小節輪廓線定位作法，3.3 小節說明二維空間域圖譜參數調整情形，3.4 小節探討運算資料長度的影響，3.5 小節距離與場型效應之修正作法，3.6 小節利用連續圖譜定位船舶位置，3.7 小節二維距離角度圖船舶航跡分析，3.8 小節船舶航跡船舶航行速度與方位之計算方式。

第四章：本計畫初步探索機器學習於船舶辨識之可行性，利用既有雷達船舶辨識與航跡分析成果，嘗試以深度學習方法分析空間亮度分布圖，驗證 MATLAB 環境下可運行與判斷目標物基礎辨識之能力，非建立高精度模型，計畫中採用 MATLAB Image Labeler 進行船舶標註，並以 YOLOv4 與 coco 預訓練骨幹進行學習，初步結果顯示模型具備穩定運行與基本船舶辨識能力，後續可透過擴充資料集與消融實驗進行比較分析。

第五章：研究分析與探討，綜合討論海洋陣列雷達之實際觀測資料，結合 AIS 船舶動態資訊，進行船舶偵測、定位與航跡之比對分析，並透過實測案例與調適性偵測法驗證高頻海洋陣列雷達於港灣船舶監測之可行性與應用潛力。

第六章：結論與建議，綜合計畫研究成果提出結論與建議，做為後續研究應用參考依據。

本計畫之研究邏輯係先由政策需求與臺中港海洋雷達建置背景出發，回顧高頻雷達船舶偵測、波束成型、AIS 比對及深度學習應用等相關文獻，進而建立雷達二維空間域圖譜、輪廓線定位與航跡分析方法。於此基礎上，本計畫進一步探索機器學習於雷達影像船舶辨識之可行性，並透過實際觀測案例與 AIS 軌跡比對，驗證海洋陣列雷達應用於港區船舶觀測之可行性與後續智慧化發展潛力。

1.5 預期成果

- (一)本計畫連續定時觀測海面船舶，提供航行管理單位與港務公司港區船舶觀測資料，做為船舶進出港與船舶作業應用參據。
- (二)持續發展高頻海洋陣列雷達監測技術，投入船舶偵測技術模組功能開發，提升港航單位技術能力，並強化與相關單位應用及互惠合作。
- (三)增進海洋陣列雷達觀測成效，除可廣泛蒐集海洋環境之波浪與海流資料以外，亦持續開發船舶偵測技術及相關雷達產品，穩定產出平面海面船舶觀測資訊。

(四)本計畫透過相關文獻回顧與討論，確立運研所高頻海洋陣列雷達技術定位，以及跨部會合作「海域安全監控應變資訊與技術發展先導計畫」研究之方向。

第二章 文獻回顧

本計畫文獻回顧主要探討臺中港鄰近海域的海氣象觀測技術，運研所利用 107 年已於臺中港建置的海洋陣列雷達系統，如圖 2.1 所示，以及美國巴里克(Barrick)1972 年提出雷達之海面散射理論與分析原理，於 112 ~114 年進行臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析之系列研究，運研所前期相關研究計畫分年探討海流觀測分析(1/3)、波浪觀測分析(2/3)與船舶觀測分析(3/3)等訊號應用分析技術，歷年成果說明及相關文獻回顧整理如下。

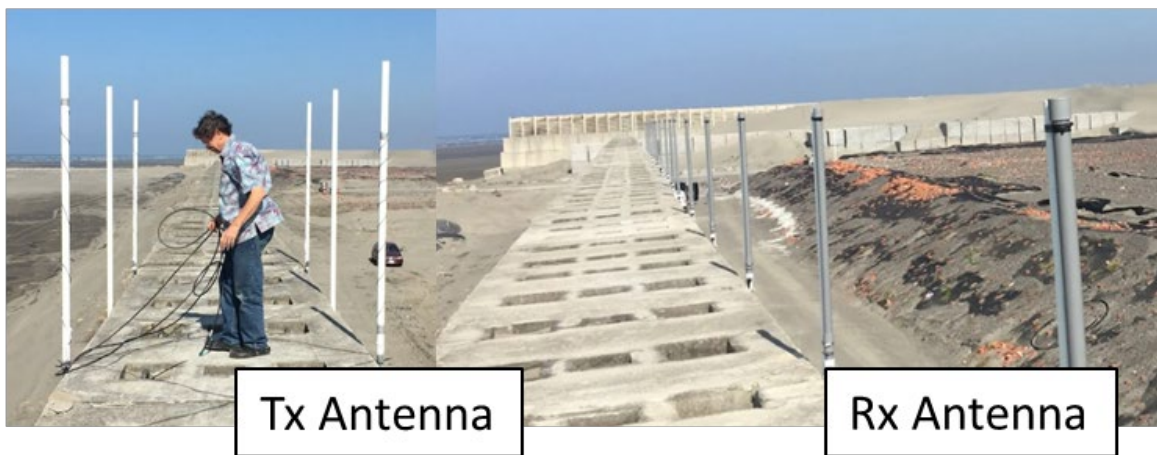


圖 2.1 臺灣首座海洋陣列雷達

2.1 歷年成果說明

(一) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(1/3)海流觀測分析

探討運研所雷達 netCDF 4.0 格式導入情形，如圖 2.2 所示，並建立 0 級、1a 級、1b 級品管流程，明確定義資料來源與可應用之情況，另為避免雷達船舶雜訊污染流場訊號，計畫品管中進行船舶雜訊之移除，並使用多種證明手段驗證雷達海流之正確性，包括：漂流浮標軌跡驗證比對、運研所底碇式流速儀比對、氣象署資料浮標比對、探討颱風情境下不同演算法一致性之比較。112 年度研究結果顯示雷達海流產品能穩定觀測，導入美國 IOOS QARTOD Test 201、203 等品管作為後，有助於評估雷達資料品質與可靠程度，颱風極端事件探討小犬颱風以外其他颱風事件，杜蘇芮與海葵期間海流演算法結果一致性較高。

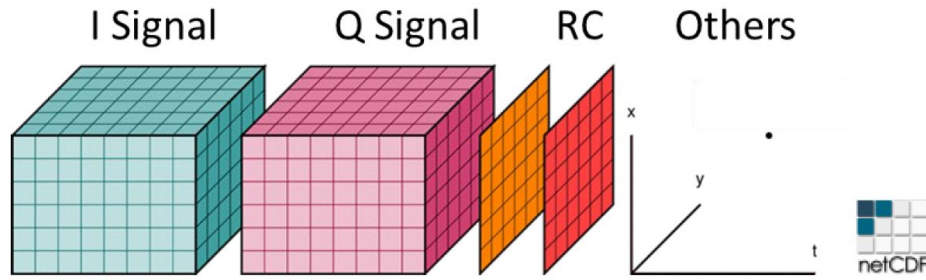


圖 2.2 netCDF 4.0 格式

(二) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(2/3)波浪觀測分析

探討運研所雷達觀測物理機制，結果顯示波浪觀測較海流複雜，都卜勒距離譜二階峰受環境、設備、雜訊影響極大，波浪高度與週期皆存在相當大的變異性，驗證比對 113 年度運研所底碇式波流儀之波浪資料，冬季季節風期間相關係數介於 0.836 至 0.890 之間，但夏季季節風期間、設備穩定度面臨巨大挑戰，相關係數明顯由高度相關降為中度相關，顯示運研所雷達系統需進行校修與維護，藉以改善天線硬體與海面雜訊之情形，此外，雷達波浪的方向波譜已能觀測不同頻帶之波浪，例如：凱米颱風期間，高頻 0.2Hz 至 0.3 Hz 的風浪，以及低頻 0.05 Hz 至 0.15 Hz 的深水湧浪，如圖 2.3 所示，但雷達波浪產品相較於海流產品較不穩定，颱風期間波浪週期偏差大，112 年度研究結果表示波浪演算法與解析技術仍需改良後才適合投入其他研究課題使用。

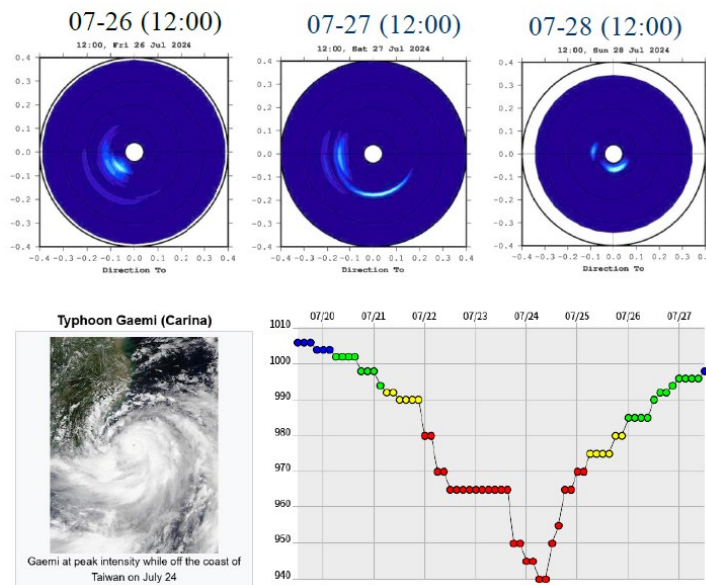


圖 2.3 凱米颱風臺中港風湧浪觀測分析情形

而言，雷達海流觀測已進入成熟應用階段，而雷達波浪仍屬技術精進與驗證深化情況，後續仍需持續投入研發與系統優化，以支援港區海氣象環境監控與提升防災決策等實務應用。

2.2 高頻雷達船舶觀測文獻回顧

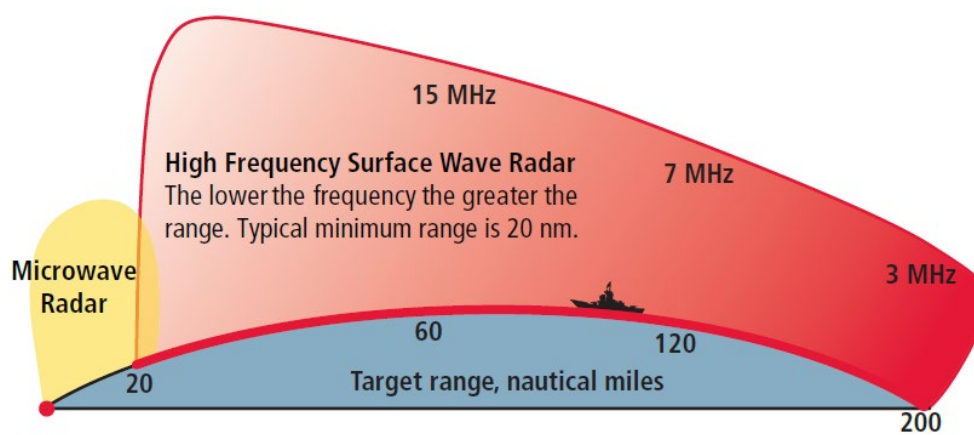
針對港灣船舶之雷達偵測與追蹤，高頻陣列雷達相關研究已累積相當豐富之文獻成果，早期研究多聚焦於距離都卜勒(Range-Doppler, 簡稱RD)頻譜特性分析，透過頻域訊號處理與線性波束成型技術，探討船舶回波於海面雜波背景之可辨識性，並逐步發展出各式門檻判定、雜訊抑制與目標關聯方法，形成早期船舶追蹤之主要研究脈絡，此類研究奠定高頻雷達應用於船舶偵測之理論基礎，亦為後續相關技術發展提供重要參考。關於距離都卜勒(RD)多見於雷達與訊號處理領域之相關文獻，然而，部分海洋科學研究領域當中，亦常將其稱為都卜勒距離(Doppler Range, 簡稱DR)，鑑於運研所過去研究撰寫多稱為都卜勒距離，本計畫仍維持一致表達方式。都卜勒距離船舶偵測之核心方法，困難限制存在海雜波、船舶雷達散射截面積之高度變異，表示高頻雷達連續追蹤情況，可能面臨解析度與穩定性不足等問題。因此，近幾年研究開始引入非線性波束成型與空間域分析觀點，嘗試以雷達偵蒐目標之基本特性，藉由多接收通道訊號，直接建構距離與方位角之空間分布資訊，藉以提升船舶回波訊號之定位能力，以及可視化效果，成為另一支線重要之研究方向。

基於上述文獻發展脈絡，本文獻回顧將以過去研究成果分為 2 類加以回顧：第 2.2.1 小節回顧傳統港灣船舶追蹤文獻，著重於以不同雷達系統都卜勒距離譜與線性波束成型為主之偵測方法，第 2.2.2 小節回顧非線性波束成型船舶追蹤技術研究，說明其理論基礎與應用特性，以呈現高頻雷達船舶偵測技術，藉由頻域分析向空間域成像發展之研究演進，第 2.2.3 小節回顧近 2 年港灣船舶追蹤技術研究文獻，掌握現階段關於船舶偵測技術發展之潮流趨勢。

2.2.1 線性波束成型船舶追蹤技術研究文獻回顧

探討港灣船舶追蹤與海流海象訊號分析，多數研究係利用實施線性傅立葉(Fourier)波束成型(Beamforming)方法，將雷達回波訊號處理

成都卜勒距離譜訊號並進行探討，一般而言，主動雷達目標物偵測距離與海氣象觀測距離與雷達頻率相關，雷達自身頻率越低，表示電磁波長越長，能偵測目標物距離越遠，但卻需要犧牲空間解析度，意思表示為空間解析度變差，舉例來說，微波雷達頻率範圍常見為 1GHz~40GHz 與高頻雷達頻率範圍 3~30MHz 相比，微波雷達波長較短能傳遞的距離較近，工作範圍大約幾公里至幾十公里，反觀高頻雷達波長較長能傳遞的距離較遠，工作範圍大約數十至數百公里，不同頻率與雷達觀測範圍示意圖，如圖 2.5 所示。



資料來源：Raytheon 公司

圖 2.5 不同雷達形式偵測範圍示意圖

海洋雷達港灣船舶追蹤歷史需要追溯到 41 年前英國伯明罕大學 Ponsford(1984)接受英國海軍部水面武器研究所(Admiralty Underwater Weapons Establishment, 簡稱 ASWE)委託，探討船舶偵測與追蹤、波束成型、訊號處理與定義雷達技術等支援英國海軍部需求等研究，提出高頻雷達進行船舶偵測之概念，亦發現船舶回波於都卜勒距離譜中存在特別明顯之訊號，因此，Ponsford 為最早證實高頻雷達具備船舶偵測能力的人，並成為第 1 位系統性討論高頻雷達偵測船舶回波特性和可行性之專家。

傳統傅立葉波束成型屬於非自適應之線性方法，實作簡單且計算效率高，然而其角度解析度有限，且常伴隨顯著的旁瓣效應，容易造成目標模糊。傅立葉波束成型方法是基本的線性演算法，其回波反演計算方程式如(2.1)~(2.4)所示：

$$B(\mathbf{k}) = \mathbf{e}^+ \mathbf{R} \mathbf{e} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{e} = [e^{jk \cdot D1} \quad e^{jk \cdot D2} \quad \dots \quad e^{jk \cdot Dn}]^T \quad (2.2)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \dots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} \dots & R_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ R_{N1} & R_{N2} \dots & R_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$R_{ij} = \langle R_i R_j^* \rangle \quad (2.4)$$

其中，B 值又稱為亮度值(brightness)， $k=2\pi/\lambda$ 是波束成型的方向波數， λ 是雷達波長。向量 \mathbf{e} 是波束成型之權重函數，D1 到 Dn 是接收天線的座標位置。矩陣 R_{ij} 是天線 i 與天線 j 訊號之共變異函數運算，矩陣 \mathbf{R} 就是由各天線兩兩配對之共變異運算所組成， N 參數是接收天線數目。符號「T」、「*」、「+」及「...」分別代表矩陣轉置(transpose)、複數共軛(conjugate)、共軛轉置(conjugate+transpose)、資料點平均計算，以及 $k \cdot Dn$ 是內積運算(inner product)。

為使後續文獻回顧更接近不同雷達系統與技術的對照性，以下將依雷達系統來源與研究方法特色，分為下列 3 類加以說明：回顧(一)關於 CODAR SeaSonde 雷達系統之船舶偵測研究，整理其於都卜勒距離譜中對船舶回波特徵、雜波抑制與偵測流程之相關探討；回顧(二)關於 WERA 雷達系統之船舶偵測研究，說明其於自適應門檻設定、固定虛警率偵測與航跡關聯等方法上的研究成果；回顧(三)關於國內較著名船舶偵測研究方法，說明其針對高頻雷達實際觀測環境所提出之偵測流程與方法，做為後續研究方法比較與分析基礎。

(一)關於 CODAR SeaSonde 雷達系統之船舶偵測研究

關於 CODAR SeaSonde 雷達系統已有多位學者探討都卜勒距離譜之典型特徵加以探討，並整理不同雷達回波之態樣，海面雜波(sea clutter)主要集中於一階布拉格峰線附近，陸地雜波(land clutter)通常出現於零值都卜勒附近固定距離位置，然而，船舶回波(ship echoes)常呈現非固定、可移動的能量峰，電離層回波(ionospheric echoes)常出現於較遠距離且具寬頻之特性，例如：Fernandez et al. (2001)，即以 CODAR SeaSonde 系統為例，詳細描

述上述各類回波於都卜勒距離譜上的分布型態與特徵。一般而言，較靠近雷達的近岸海域，大型貨船的雷達回波訊號強度超過海面雜波訊號，但隨距離增加，雷達訊雜比(SNR)會逐漸降低，直到持續降低至船舶雷達回波訊號被海面雜訊淹沒為止，經由 Laws et al. (2011) 案例研究顯示，偵測船舶需要注意濾除海面雜波，此外，Barrick (1972) 提及海面雜波訊號衰減與距離 3 次方成反比衰減，Ponsford et al. (1984) 提到船舶回波訊號衰減與距離 4 次方成反比衰減，因此，若不濾除海雜訊訊號，都卜勒距離譜將不利於辨識來自遠方之船舶訊號，Laws et al. (2011) 建議偵測漁船或大型貨船時，最適合頻譜所需之最小訊雜比(SNR)約為 15 dB。

後續 Ponsford(2010) 提出估算船舶在自由空間條件下雷達散射截面積(RCS)經驗公式，該公式為船舶排水量與雷達頻率的相關公式，如(2.5)式所示：

$$\sigma = 52 \times F \times D^{3/2} \quad (2.5)$$

其中， σ 為雷達截面積(單位： m^2)， D 為船舶排水量(單位：千噸)， F 為雷達頻率(單位：MHz)，藉此公式估算船舶排水量、雷達頻率與雷達散射面積之相對關係。

後續 Roarty et al. (2010) 以 CODAR SeaSonde 雷達系統為基礎，提出一套中型與大型船舶之都卜勒距離譜之偵測流程，其方法為先採用二維中值濾波器(2-D median filter)與無限脈衝響應濾波器(Infinite Impulse Response, 簡稱 IIR 濾波器)，估算與抑制都卜勒距離譜中的背景雜訊水平，並透過不同時間尺度的平均處理，建立穩定背景雜訊之參考場，其中，IIR 濾波器概念與特性，可以參考 1996 年 Orfanidis 所整理之數位訊號處理理論。在完成背景雜訊估計後，研究單極天線計算之訊雜比做為判斷依據，並要求至少同時滿足正交迴路天線的顯著回波反應，以降低單天線可能造成之虛假警報，再透過上述條件下，選定都卜勒距離譜中的局部極大值，並標記為潛在目標候選點，最後再設定高於背景雜訊值約 6 至 9 dB 之門檻，藉由固定虛警率(Constant False Alarm Rate, 簡稱 CFAR)演算法判定是否為船舶回波。

(二)關於 WERA 雷達系統之船舶偵測研究

德國漢堡大學所開發之 WERA 高頻地波雷達系統之相關研究，Dzvonkovskaya and Rohling (2006)，以及 Dzvonkovskaya et al. (2008)針對高頻雷達都卜勒距離譜中背景雜波隨頻率變化的特性，採用傳統曲線回歸分析方式，建立與都卜勒距離譜頻率相關的自適應訊號強度門檻，做為潛在船舶目標初步篩選之依據。在此基礎上，研究結合 Neyman-Pearson 二元假設之檢定準則，分析有無目標的固定虛警率(CFAR)偵測演算法，目的於控制虛警機率的前提下，提升目標偵測的可靠度。經自適應訊號強度門檻化與固定虛警率(CFAR)處理後，都卜勒距離譜頻率與雷達方位角域的局部峰值點即被視為目標候選位置。此外，為因應目標追蹤過程可能產生的定位不確定性，Dzvonkovskaya et al.(2009)進一步引入控制距離門(Gating Ftatistical Distance，簡稱 GFD)做為目標關聯與追蹤閘控之判斷指標，如(2.6)式所示：

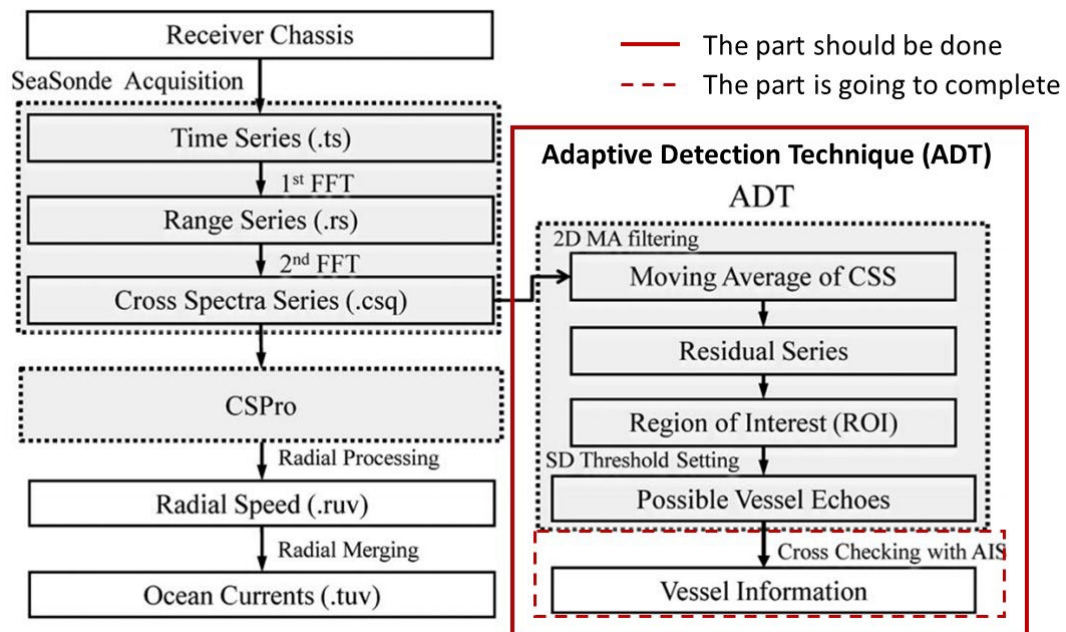
$$d^2 = \left(\frac{R_p - R_0}{\sigma_R}\right)^2 + \left(\frac{\theta_p - \theta_0}{\sigma_\theta}\right)^2 + \left(\frac{V_p - V_0}{\sigma_V}\right)^2 \quad (2.6)$$

其中 (R_p, θ_p, V_p) 為預測位置，表示距離、方位角與徑向速度， (R_0, θ_0, V_0) 為實際偵測位置，而 σ_R 、 σ_θ 、 σ_V 分別代表距離、方位角與速度的不確定度(變異數)，該閘控技術亦被應用於船舶航跡預測。

(三)關於國內較著名船舶偵測研究方法

國內利用高頻雷達處理船舶偵測較著名方法為莊士賢(2015)調適性偵測法(Adaptive Detection Technique, 簡稱 ADT)，由於雷達回波之環境雜訊非常多，為避免船舶訊號被環境雜訊給掩埋，往往需考量海面雜波與電離層干擾等影響，但這些干擾訊號又非固定門檻，故往往需要一個會移動目標偵測門檻來尋找船舶訊號，否則容易造成船舶偵測之誤判與漏判，調適性偵測法需要將都卜勒距離譜進行二維平滑化，以產生平均背景，再利用原始頻譜扣除平均背景過濾大部分之海表面雜訊，產生頻譜的殘差，再利用殘差標準差尋找背景中可能存在的船舶訊號，此為調適性偵測法原理，其流程圖，如圖 2.6 所示。

此外，莊士賢(2015)所導入的二維移動平均之濾波方式，能對於特定關注區域雷達回波訊號濾除雜訊，直接抑制該區域內的隨機環境雜波，避免將整個雷達頻譜能量進行平滑處理，造成部分微弱之船舶回波訊號減弱，導致船舶可辨識度降低而無法被偵測，此種處理方式會極大減少雷達頻譜能量被稀釋與頻譜特徵發生模糊之現象，讓真正船舶的目標訊號，能在型態不被破壞前提下更加凸顯船舶回波特徵，如圖 2.7 所示。



資料來源：莊士賢(2015)

圖 2.6 調適性偵測法流程

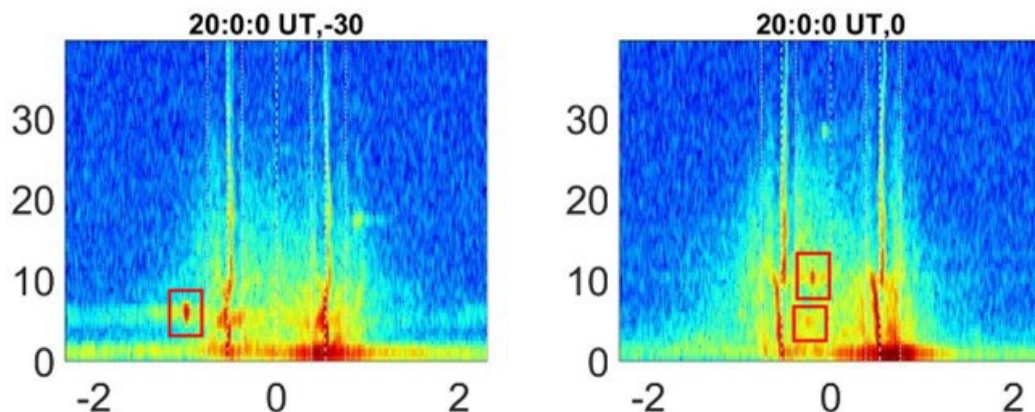


圖 2.7 雷達頻譜船舶回波訊號

然而，莊士賢(2015)調適性偵測法雖能有效提升船舶訊號偵測率，如圖 2.8 所示，但其本質仍屬於經驗訊號加減法之處理方

法，較為依賴門檻值設定、局部濾波與殘差比較等規則判斷，藉此推估雷達回波特徵中是否可能包含船舶訊號，如果環境中存在多重散射之雜訊影響，二維移動平均之濾波方式則仍可能無法抑制波浪二階峰之情形，某種程度上限制其偵測能力，因此，在高度雜訊與複雜散射環境之下，後續研究技術建議轉往更具理論基礎之空間頻率估計方法，例如透過協方差矩陣與最佳化模型等方法，集中船舶能量與保持訊號辨識所需之解析度。

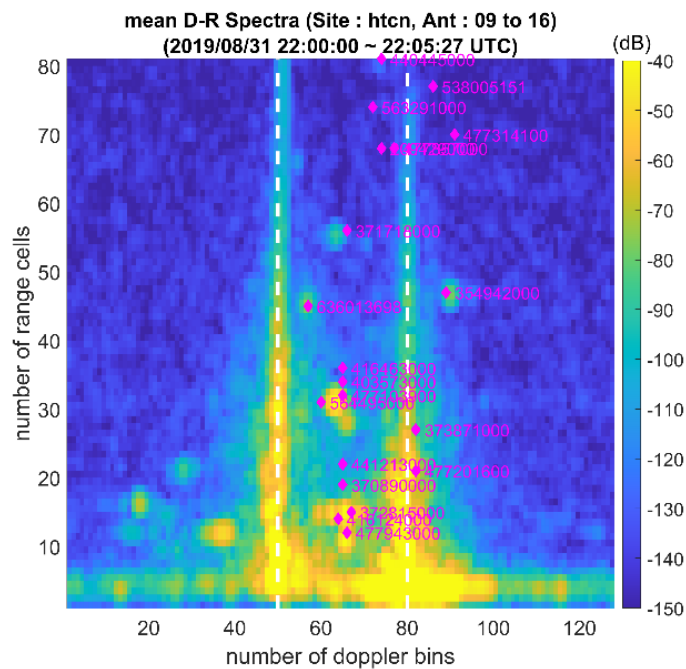


圖 2.8 高頻海洋陣列雷達海象與船舶能譜特徵

2.2.2 非線性波束成型船舶追蹤技術研究文獻回顧

相較於第 2.2.1 小節高頻雷達船舶偵測方法，以都卜勒距離譜做為主要分析基礎，並利用線性傅立葉波束成型法處理雷達回波於不同方位角之訊號，再將時間序列訊號轉換至距離與都卜勒頻率域資料，辨識可能來自船舶之非海洋回波訊號，但常見干擾限制如下：

- (1)海面雜波對於都卜勒距離譜干擾，當高頻雷達回波能量主要集中於一階布拉格頻率附近，其強度同時受到海面粗糙度、風場條件、海水導電度，以及雷達系統設定參數影響，例如雷達發射頻率、發射功率、天線場型與極化方式等多重因素影響，故海表背景雜波於時空皆呈現高度非穩定性情況，使得船舶回波訊號於都

卜勒距離譜中受到海面雜波所掩蔽，此為造成目標物辨識困難的主要原因之一，致使目標物辨識更為困難。

- (2)船舶雷達散射截面積(RCS)高度變異，當高頻波段下，船舶回波強度與船體結構及雷達波長之共振關係密切相關，因此，即使相同噸位或類型船舶，其都卜勒距離譜之回波強度仍可能存在顯著差距，導致固定門檻或判斷標準之偵測結果，其穩定度與一致性不足，例如船舶長度、上層建築、桅杆船艙等幾何特徵，皆可能造成顯著差異。
- (3)高度依賴門檻設定與統計假設，若於實際海域環境中，背景海面雜波與干擾水準往往快速變動，導致過去既有研究多透過曲線回歸模型建立與都卜勒頻率之自適應訊號強度門檻，固定虛警率(CFAR)偵測演算法之目標篩選，需依據經驗頻繁調整門檻參數，若不進行調整容易導致虛警率升高，或對弱訊號船舶產生目標產生遺失。
- (4)頻域分析對於時間窗長度依賴性，源自於都卜勒距離譜分析本質係屬於頻域方法，其結果高度依賴時間序列之長度，故較長的時間窗雖然可以提升頻率解析度，並有助於海流與波浪參數之估計，但對於船舶目標之偵測而言，船舶徑向速度變化反而導致雷達回波能量於都卜勒頻域中變寬，降低偵測之效率，因此，不利於即時性與連續追蹤應用。

綜上所述，都卜勒距離譜船舶偵測方法於海面雜波環境較為複雜時，船舶雷達散射截面積將存在高度變異性，導致即時與連續目標追蹤時面臨明顯挑戰。因此，發展能直接於空間域呈現目標位置，並降低對頻譜門檻與統計假設的依賴，已成為雷達船舶分析之替代方法，為近年高頻雷達船舶偵測技術之重要研究方向，故部分學者單純使用非線性的波束成型法，例如受限制 Capon 波束成型法(norm constrained Capon，簡稱 NC-Capon)可進一步降低雷達波束旁波瓣之回波影響，故對於海面雜訊有較高容忍度，所以可以產出比較沒有混淆且更豐富的頻譜結果(You et. al., 2024)，You(2024)採用多通道高頻岸基雷達接收之時間序列訊號，可將目標物轉換為空間可視化之船舶分布，並利

用波束成型技術建構距離方位角(Range-Angle, RA)之亮度分布圖，相較於傳統以都卜勒距離譜為基礎之船舶偵測方法，距離方位角亮度成像能更直觀地呈現目標於空間域之位置，有助於船舶辨識與追蹤。因此，在船舶偵測方面 NC-Capon 方法產生空間域之回波分布(即空間域圖譜)，能清楚辨識船舶之位置 (Chen et al., 2021)，同時彌補傅立葉方法於生成空間域圖譜生成過程中旁波瓣效應較明顯之問題，由於透過空間域圖譜來檢視船舶回波是相當直接且容易辨識的方式，以下說明 2 種工作方法與分析原理：

(一)方向性最小功率(Capon)波束成型

方向性最小功率波束成型法係非線性的波束成型技術之一，其概念是利用受限制的最小化觀念推算得出最佳的天線陣列權重函數 w (Capon, 1969)提出，故又名 Capon 方法，經由指定方向維持單位增益的條件下最小化輸出功率，達成旁瓣抑制效果，並提升角度解析度，然而，該方法對接收訊號之振幅、相位及天線位置誤差高度敏感，當共變異矩陣接近奇異或尺度不良時，容易產生不穩定或非實際之亮度峰值，數學型式表示，如(2.7)式所示：

$$\min(B(k)=w^+Rw) \text{ 受限於 } e+w=N \quad (2.7)$$

其中，向量 e 如(2.8)式所示， N 是接收天線數目。求解 w 可得

$$w = \frac{R^{-1}e}{e^+R^{-1}e} \quad (2.8)$$

將 w 代入(2.9)式 $B(k)$ 運算式，推導出亮度值計算式為

$$B(k) = 1/ e^+R^{-1}e \quad (2.9)$$

(二)受限制 Capon 波束成型(NC-Capon)

整體而言，NC-Capon 法係為改善 Capon 法缺點而發展出來之方法，由於 Capon 法是基於理想情況所推導出最佳天線權重函數 w ，一旦當雜訊或是天線本身產生接收誤差時， w 就不太適用，因而無法合理產生亮度值，因此，NC-Capon 法針對 Capon 法 w 權重加入一項限制條件(Cox et al., 1987)，以提升 Capon 波束成型於實

際雷達系統中的穩健性(robustness)，並加入對角載入(diagonal loading)與權重向量約束條件限制，以有效抑制權重發散問題，該數學型式表示，如(2.10)式所示：

$$|\mathbf{w}^+ \mathbf{w}| \leq \delta N \quad (2.10)$$

其中 N 係接收天線數目， δ 參數為白噪增益參數，需依資料特性分析後設定之參數，藉以控制權重向量大小，因 δ 為一個可變參數，並非固定常數，其數值需依資料特性與分析結果加以調整，為滿足(2.10)式之限制條件，需取用(2.8)式並採用對角線加值的步驟(diagonal-loading technique)，其表示式為(2.11)式所示：

$$\mathbf{w} = \frac{(\mathbf{R} + \sigma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e}}{\mathbf{e}^+ (\mathbf{R} + \sigma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e}} N \quad (2.11)$$

其中 σ 亦係一個可變參數， \mathbf{I} 是單位矩陣(identity matrix)。當 $\sigma=0$ 時，公式可以退化為原來的 Capon 演算式，若持續增加 σ 值，再計算 \mathbf{w} 權重與檢視是否滿足(2.10)之不等式，滿足條件之後，即可視為最佳的 \mathbf{w} 權重，並將最佳 \mathbf{w} 權重代入(2.7)式的 $B(\mathbf{k})$ 運算式，計算得出各方向之亮度值。NC-Capon 於維持良好角度解析度之同時，顯著降低對於系統誤差與雜訊之敏感度，因此，特別適合應用於海面雜波強烈且陣列誤差難以避免之高頻海洋陣列雷達船舶偵測任務。後續結果顯示，NC-Capon 相較於 Fourier 與傳統 Capon 波束成型，能提供更穩定且清晰之距離方位角(RA)亮度分布，有利於船舶回波之辨識與定位，上述 3 種方法皆透過定義特定方位角之指向向量，對多接收通道訊號加權後，計算其輸出功率，並以共變異矩陣估計該方向之亮度值，另於訊號前處理階段，為降低特定頻率區間內非關注目標所造成之干擾，使用帶拒濾波(band-reject filtering)技術，抑制預先設定頻帶範圍內之訊號能量，有效移除來自環境雜訊、系統性干擾或已知非目標物理機制所形成之頻譜成分，同時保留頻帶之外有效的訊號資訊，故相較於低通或高通濾波，帶拒濾波能更針對特定干擾頻率加以選擇性抑制，避免對於整體頻譜結構造成不必要的平滑或失真，有助於提升後續訊號判讀與目標辨識之穩定性，如圖 2.9 所示。

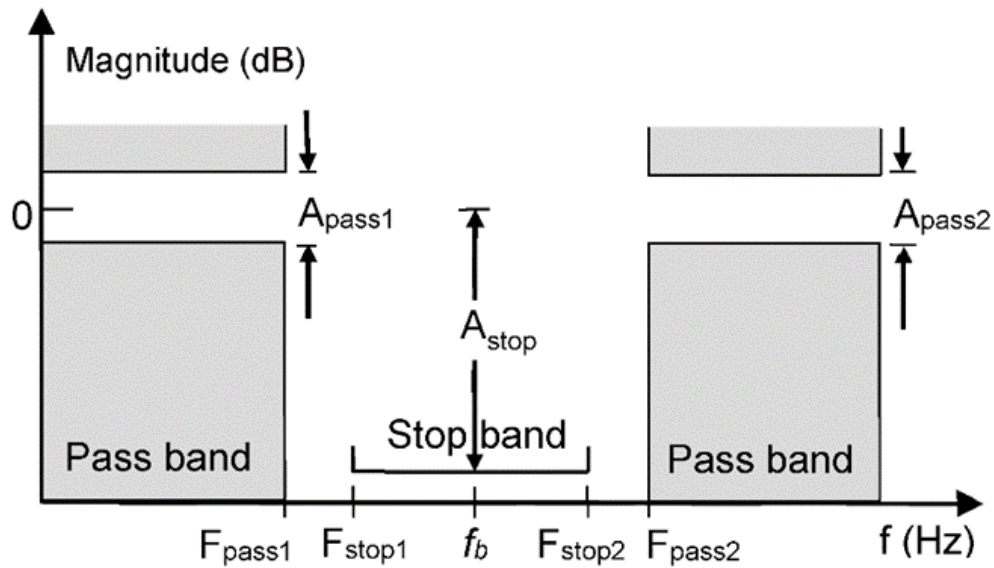


圖 2.9 帶拒濾波示意圖(資料來源：Chen et al., 2021)

舉例來說，高頻海洋陣列雷達都卜勒距離譜回波能量主要集中於海面重力波所產生之一階布拉格散射頻率，通常能量通常顯著高於其他頻率之成分，形成主導性的海面雜波背景，此類頻譜能量分布會隨海況變動而明顯改變，故容易掩蓋鄰近頻帶內之船舶回波訊號，影響目標偵測效能，基於此特性，對於頻率域一階布拉格峰及其鄰近頻率範圍施加帶拒濾波技術，抑制不利於目標辨識之高能量海面雜波，使非布拉格頻率內潛在目標回波特徵於相對乾淨背景中，能更加清晰呈現，進而提升判定目標偵測之可靠性。

2.2.3 近 2 年港灣船舶追蹤技術研究文獻回顧

近年港灣船舶追蹤技術相關研究，出現許多較新雷達訊號與資料處理之分析技術，為使本小節文獻回顧脈絡更為清晰，將依據研究重點與方法分別說明近 2 年回顧的 3 篇文獻研究的內容，第一篇文章為 Xu (2024) 的研究成果，該研究內容著重於雷達觀測資料與 AIS 船舶軌跡比對，並探討於高雜訊與船舶高密度之港灣環境，如何藉由時間與空間一致性處理此 2 種船舶軌跡資訊之對應關係，改善雷達點位與船舶實際航跡品質，提升船舶追蹤分析之可靠程度。第二篇文章為 Huang (2024) 的研究成果，該研究成果係採用時頻分析結合深度學習船舶偵測之核心方法，透過資料導向方式，推動深度學習機器處理高頻雷達回波不穩定所造成之辨識困難，並提升複雜海表面雜訊背景下

船舶目標之辨識能力，進而嘗試發展有別於傳統依賴門檻設定之偵測流程。第三篇文章為 Yang (2025) 的研究成果，該研究成果主要探討港灣場景船舶多目標、應用即時性與實務需求，以及如何維持偵測效能，研究透過時頻分析與非固定虛報率門檻值，兼顧分析穩定度、參數可控性與系統整合性，以達成港灣船舶追蹤之目標，相關回顧如下：

(一) Xu, J., Suo, Y., Jiang, Y., & Yang, Q. (2024). A Fast Algorithm for Matching AIS Trajectories with Radar Point Data in Complex Environments.

該研究探討高流量港區船舶交通管理系統(VTS)對於管理船舶移動與防止碰撞至關重要，過去常見作法係利用 2 套系統分別處理雷達與 AIS 資料，並在資料比對階段進行航跡資訊整合，惟該方法仍存 2 種資料時間延遲與時間不一致情形，例如 AIS 時常出現座標不準確或遺漏情形，又或雷達於複雜環境頻繁產生虛假警報，降低航管穩定性，如圖 2.10 所示，故為解決 AIS 與雷達航跡比對與建立一致性的航行資訊，將成為提升航跡品質之挑戰。

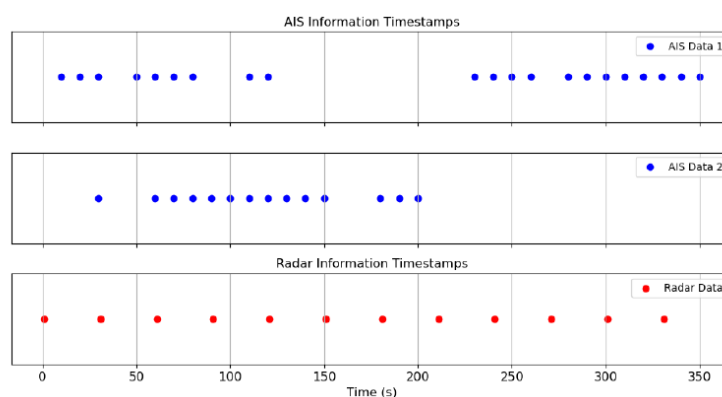


圖 2.10 雷達與 AIS 資料時間不同步與資料遺漏情形示意圖

該研究團隊應用一種直接於雷達圖辨識 AIS 航跡的對應方法，將雷達點位視為一種機率雲，並透過差分轉換(difference transformation)將雷達點位資訊取出，再利用聚類演算法(clustering algorithm)將雷達點位資訊與 AIS 資料對齊比較，達到提供比對航跡之目標，故該研究主要演算流程架構包含：(1)時間統一、(2)機率分布圖重構、(3)關聯後船舶軌跡萃取，如圖 2.11 所示。

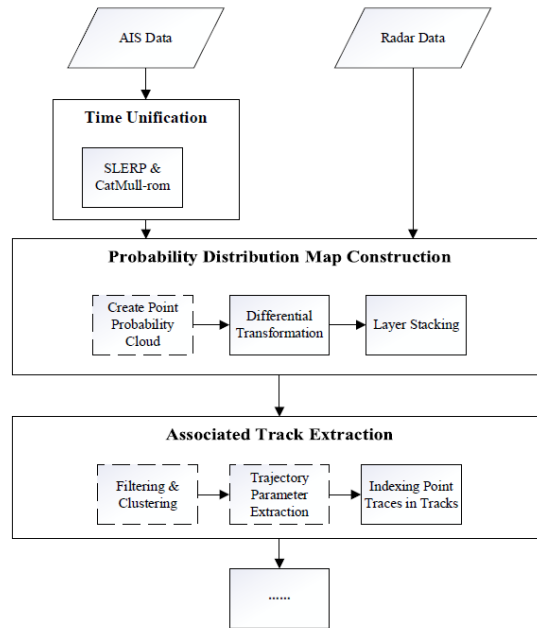


圖 2.11 雷達與 AIS 資料時間對齊及軌跡處理流程圖

(1) 時間統一

為確保 2 套系統時間不同步情況，導致雷達船舶軌跡的時間點時常缺乏比對的 AIS 資訊，故該研究採用 Ken Shoemake (1985) 球面線性插值(SLERP)演算法，以及 Edwin Catmull 與 Raphael Rom (1974) Catmull-Rom 演算法，產生每個雷達掃描時刻對應之 AIS 軌跡位置，該研究建議若 AIS 缺資料視為長時間間隔，建議使用球面線性插值演算法，連續資料視為短時間間隔，建議使用 Catmull-Rom 演算法。更進一步探討長時間缺少船舶 AIS 資訊，無法合理假設船舶平滑軌跡時，船舶更傾向行走最短路徑，惟此作法會產生不合理軌跡折線，故需考慮介於兩者之間的球面最短路徑，如圖 2.12 所示。

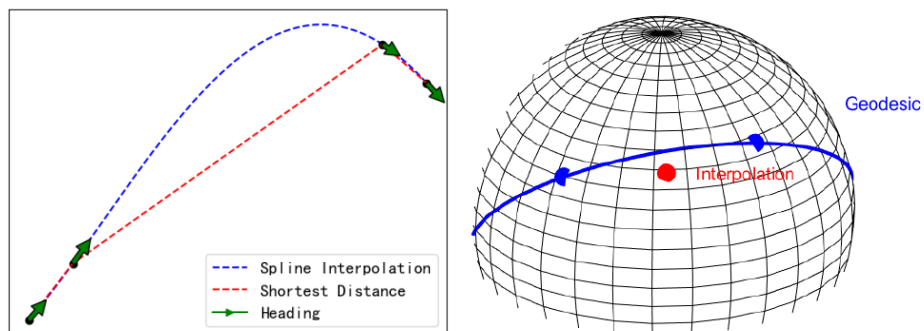


圖 2.12 船舶軌跡球面最短路徑插值方法示意圖

(2) 機率分布圖重構

雷達點雲雜訊較多，且常伴隨虛假警報，因此，雷達軌跡點位容易受到干擾而產生偏移，若直接自離散點中篩選合理點位，所需計算量將相當龐大，該研究假設每個雷達點位可視為不精確位置，故其空間觀測具有不確定性，該研究並未採用演算法處理，僅將雷達與 AIS 位置資訊於不同時間層，進行差分轉換，意指將某個時間點雷達觀測的座標位置減去 AIS 座標位置資訊，使每個不同時間點均以 AIS 船舶位置當作觀察原點，觀察雷達的相對位置，如(2.12)式所示。

$$P_{new,i} = P_{old,i} - A_i \quad (2.12)$$

雷達軌跡點位與 AIS 實際軌跡差分轉換後，雷達軌跡點位機率分布重構圖，如圖 2.13 所示，經由機率雲搜尋所獲得之雷達軌跡可能位置解，仍可能包含多組局部極值，故後續仍需進一步濾波(filtering)與聚類(clustering)，並萃取具代表性之中心位置，做為後續雷達航跡索引之依據。

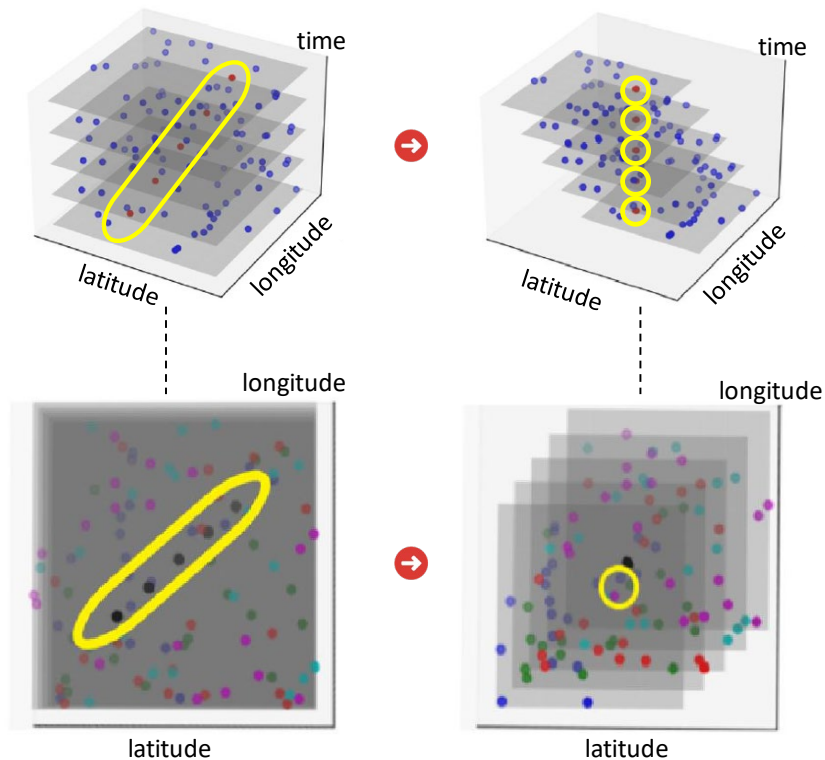
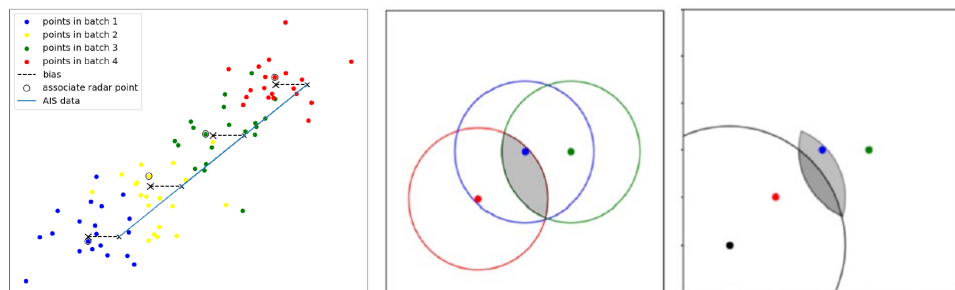


圖 2.13 雷達與 AIS 軌跡差分轉換後之機率分布重構圖

(3) 關聯後船舶軌跡萃取

經前述雷達點雲與 AIS 船舶軌跡之間的關聯分析之後，以及前已進行差分轉換與機率分布分析，辨識與 AIS 航跡具高度一致性之雷達候選位置，並將其視為雷達參考軌跡，在此基礎上，針對各雷達掃描時刻，自原始雷達點雲搜尋與該參考位置距離最近之雷達點位座標，並依時間順序串接，形成對應之雷達船舶軌跡，該研究採用最近鄰(Nearest Neighbor)計算方式進行軌跡索引，如圖 2.14 左圖所示，其目的在於將前階段所獲得之關聯結果做為後續軌跡萃取之依據，並轉化為可用之雷達航跡資料，值得注意的是，此階段所進行軌跡索引，並非傳統意義的雷達航跡初始化或濾波，而係在已完成跨系統的關聯條件，對於雷達點位的時間索引重組。其中最小色跨距圓(Smallest Color-Spanning Circle, SCSC)表示每個時間層表示為不顏色雷達點，3 個色圓交集處為最可能出現之陰影，如圖 2.13 中間圖與中右圖，為機率雲疊加，再用 max-min 搜尋差不多的位置，最後，使用聚類(clustering)尋找到最後色塊中心。



(左圖)最近鄰計算、(中圖)3 色圓雷達點、(右圖)最可能出現陰影

圖 2.14 最近鄰搜尋之軌跡索引與雷達軌跡軌跡候選位置示意圖

該研究經由 AIS 與雷達原始資料處理後之最終船舶航跡萃取結果，如圖 2.15 所示，該圖左上顯示原始 AIS 航跡(紅色叉號)與雷達線狀資料(藍色叉號)於時空未對齊之模擬情形，雷達點色雲尚未對齊前，如該圖中上所示，因此，需先進行時間統一與座標轉換，使 AIS 航跡能對應至各雷達掃描時刻，完成時間對齊後，將雷達點雲與對應之 AIS 航跡疊加，可以觀察到雷達點在真實船舶附近形成結構性分布，同時亦伴隨大量均勻分布雜訊與虛警，

使得僅憑視覺或單一時間層難以辨識航跡真實性。

為消除船舶整體運動對分析之影響，並針對各雷達掃描層進行差分轉換，將同時間之 AIS 位置平移至座標原點，雷達點轉換為相對於 AIS 的位置表示，如該圖右上所示。經歷轉換之後，若雷達點位確實對應同一艘船舶，其於不同時間層中將呈現相對穩定之位置分布，相對地，隨機虛警則難以在不同時間層間維持一致。

於此基礎上，將差分轉換後之雷達點由離散點集合轉換為連續之機率分布圖，如該圖左下所示，此機率分布反映各雷達點位可能於空間之存在性，並藉由多時間層疊加，強化跨層位置分布之一致性，凸顯真實航跡位置，後續再透過設定門檻值 (Threshold)，篩選出所有時間層反覆出現，具有較高出現一致性之高機率區域，而排除僅在少數時間層出現之零星虛警，保留具備跨時間穩定性之候選點位空間。最後針對篩選後之候選點位空間進行聚類分析，如該圖中下所示，針對空間上高度集中候選點位群加以整理，並以主要群集中心做為雷達與 AIS 航跡關聯後之代表位置，該中心位置隨後可用於最近鄰搜尋，原始雷達點雲依據時間順序擷取對應之雷達船舶軌跡，如該圖右下所示，完成整個航跡萃取流程。

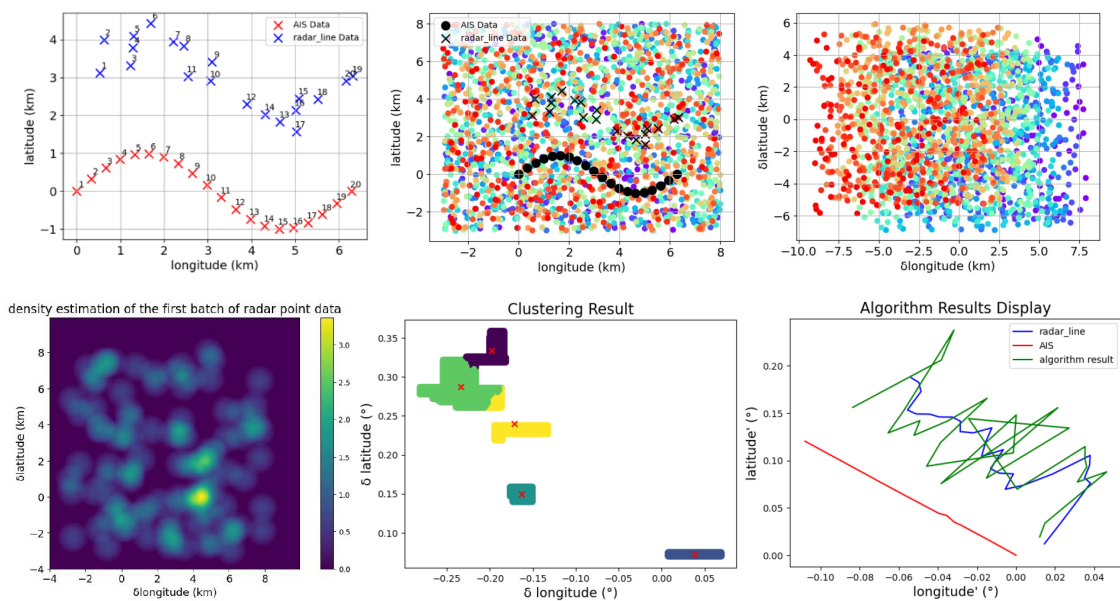


圖 2.15 原始 AIS 與雷達資料案例處理情形

該研究結果顯示聚類演算法經模擬資料驗證，雷達軌跡與時實際雷達軌跡差不多，顯示研究方法不僅能廣泛於干擾下準確辨識目標航跡，且無需嚴格參數調整，該研究表示 AIS 與雷達實測資料可能缺乏真實值，故仍需人工判斷輔助。

(二) Huang, D., Zhou, H., Tian, Y., Yang, Z., & Huang, W. (2024). A Deep-Learning-Based Time-Frequency Scheme for Ship Detection Using HFSWR.

關於海上目標偵測課題，常使用固定虛警率(CFAR)進行偵測，這類方法往往因海面雜訊的不穩定而下降，為解決此問題提出一種基於深度學習的時頻(Time-Frequency, 簡稱 TF)分析方法，用於高頻系統中進行船舶目標偵測，該研究提及高頻雷達因其部署便利、成本低廉，於海岸區域的遙測應用中受到廣泛關注。該研究使用雷達為中國武漢大學電子資訊學院雷達與訊號處理實驗室研發自製的集成式高頻雷達(型號為 OSMAR-SD)，該設備佈建於中國大陸福建省東山縣，雷達工作頻率範圍為 13MHz，觀測範圍 75 公里，空間解析度 2.5 公里，速度解析度 0.0825 m/s，掃頻寬度 60 kHz，相干積分時間(Coherent Integration Time, 簡稱 CIT)為 138.16 秒，脈衝重複時間(PRI) 0.27 秒，CIT 的脈衝數 256 個。該研究方法以 AIS 資訊做為參考基準，蒐集時頻域的資料集加以訓練，該研究所使用新型深度學習模型為 YOLOv5-DS，並將其應用於時頻域的干擾與雜訊抑制，學習後的時頻結果被轉換至都卜勒距離譜進行最終目標識別，研究與實驗結果顯示，此方法對於資料集具有有效性與穩定性方面均呈現良好效果。

過往以來，雷達船舶偵測以固定虛警率(CFAR)為研究主流，但係建立在假設海面雜訊統計穩定前提，因此，基本原理概利用目標單元周圍之參考單元，估計背景雜訊能量，並依據自適應調整偵測門檻判斷目標是否存在，至今已累積許多版本固定虛警率(CFAR)，最早提出的是 a.單元平均固定虛警率(簡稱 CA-CFAR)，係利用計算參考單元平均雜訊能階設定門檻，使用於雜訊均勻情況下能效良好，然而，當背景雜訊呈現非均勻特性時，其偵測效能容易明顯下滑，故為改善平均固定虛警率(CA-CFAR)於複雜背

景的限制，後續研究針對雜訊估計方式提出多種改良方案，例如 b. 引入排序統計的概念的固定虛警率(簡稱 OS-CFAR)，透過選取特定序位參考單元估計雜訊水準，使於非均勻雜訊環境中相較平均固定虛警率(簡稱 CA-CFAR)更加穩定。此外，c. 可變指數固定虛警率(簡稱 VI-CFAR)則整合不同固定虛警率(CFAR)，利用計算參考單元 2 階或更高階統計量，根據雜訊背景特性自適應選擇合適的偵測策略，減少或維持均勻背景下低效能之損失，並於多目標或雜波邊緣情境加強表現，因此近年來，因應高度非均勻之環境條件，亦有學者提出 d. 一階差分固定虛警率(簡稱 FOD-CFAR)與 e. 二階差分固定虛警率(簡稱 SOD-CFAR)，藉由差分運算強化對雜訊變化的敏感度，然而，實際上高頻雷達船舶回波會被海面雜訊干擾，船舶目標因與海面之複雜交互作用，產生都卜勒頻偏，而出現固定虛警率(CFAR)偵測效能下降之問題，對船舶偵測之穩定執行造成影響，對此，若能研究發展高頻雷達目標偵測，採用時頻分析方式，便能完整保留目標結構之特徵，形成幾何連續性之脊線結構，相較於傳統都卜勒距離譜分辨方式更加穩定，雖然實際雜訊環境可能因為能量起伏造成脊線斷裂不連續，但不影響參數估計，故逐漸為人所接受。

往昔研究主要為(1)深度學習模型於船舶目標偵測之應用、(2)高頻雷達船舶偵測之深度學習網路、(3)高頻雷達模型基礎之時頻偵測方法等相關研究，分述說明如下：

(1) 深度學習模型於船舶目標偵測之應用

隨人工智慧技術的快速發展，促使深度學習方法廣泛應用於各類場景，包括物件或目標偵測、影像超解析度、地表變化偵測，以及海面船舶偵測等偵測任務，研究顯示深度學習模型，能有效提升複雜背景之偵測效能，例如：Wu (2023)等人針對小型紅外線目標偵測重新設計網路結構，並導入互動式跨注意力機制以強化特徵表徵；Li (2024)等人提出結合低秩表徵(Low-Rank Representation, 簡稱 LRR)與深度學習之方法，使模型能有效分離背景雜訊，並擷取隱含於高雜訊環境之目標訊號，鑑於船舶於海事運輸與海域監測重要性增高，近年來亦有越來越多研究嘗試將

深度學習技術應用於船舶目標偵測問題。

Sun (2021) 等人提出結合雙向特徵融合與角度分類的改良 YOLOv5 模型，提升高解析度合成孔徑雷達(簡稱 SAR)影像中多尺度與密集分布船舶的偵測效能。Li (2023) 等人則透過部分注意力機制與淺層特徵重建網路，有效強化小尺寸船舶 SAR 影像特徵表徵，另外，其他研究提出非監督式 SAR 船舶偵測方法，結合影像分割與跨尺度網路架構，能於多個 SAR 資料集內展現良好偵測準確度，值得注意並加以應用。

(2) 高頻雷達船舶偵測之深度學習網路

近年以深度學習為基礎高頻雷達船舶偵測方法，多半應用都卜勒距離譜做為主要分析對象，並針對雷達回波於都卜勒距離影像呈現形態特徵進行辨識。Wu (2021) 等人提出一種兩階段深度學習偵測架構，結合固定虛警率(CFAR)與分類器以於雜波與干擾區域中辨識船舶目標，此外，Zhang (2021)、Zhang (2022)與 Zhang (2023) 等人則分別透過 AdaBoost 演算法與階層式二元分類架構，其中，AdaBoost 演算法為集成式學習方法，為一種集成式學習方法，係透過逐步提高錯誤樣本之權重，將多個弱分類器加權整合為強分類器，以提升辨識效能，此類方法可提升都卜勒距離譜之船舶偵測效能，並降低計算複雜度。

然而，以傳統都卜勒距離譜為主的深度學習，實務應用面仍然面臨 2 項關鍵限制，其一，為都卜勒距離影像多經影像化處理後之結果，故無法直接對應原始雷達頻譜，目標參數需透過額外座標轉換取得，進而影響後續目標關聯與追蹤效能。其二，為現有資料集多仰賴人工標註或規則式合成資料，前者成本高昂，後者則難以充分描述船舶回波訊號不平穩特性，使資料與實際量測情境存在落差。基於上述限制，文獻指出，若能於深度學習網路設計中同步納入目標參數估測機制，並引入 AIS 做為實測資料之標註輔助，則有助於兼顧單影格與跨影格之偵測需求，進一步提升高頻雷達船舶偵測深度學習網路之實用性與整體效能。

(3) 高頻雷達船舶偵測之深度學習網路

時頻偵測方法係建立在一項基本假設之上，即目標尺寸遠小於高頻雷達之距離解析單元，且於相干積分時間(CIT)內，目標仍維持於同一距離單元中，不會移出該距離單元之假設之上，基此，過去已提出多種模型驅動之時頻偵測方法，用以提升非平穩目標物之可辨識性，該早期研究指出重分配類時頻分析方法對於機動目標具有良好表現；其後亦有研究提出強雜訊背景時時頻偵測架構，但多侷限於單一目標情境，或仰賴傅立葉轉換等需經驗調整參數技術。

此外，為因應多目標偵測需求，Cai (2021)等人後續研究結合同步萃取轉換與影像處理技術，意即以擷取目標脊線，並在參數估測上展現優於固定虛警率(CFAR)表現，其改良版本亦透過分類器依虛警率進行判決；然而，此類模型導向的時頻偵測方法普遍需要大量經驗參數設定，而且在長相干整合時間條件下，目標能量波動易造成脊線斷裂，進而影響參數萃取穩定度，換句話說，高頻波段常伴隨密集雜訊與干擾，若僅使用單一接收通道，或受限於波束條件，亦將影響船舶偵測之實務應用效能，該研究將多接收通道所提供的空間資訊納入時頻偵測流程，並以深度學習物件偵測網路取代傳統脊線追蹤機制，直接於時頻平面以邊界框方式進行目標辨識，並利用設定信賴門檻偵測，再結合後處理方法進行參數估測，形成一具可控性之端點到端點時頻偵測之架構，提升高頻雷達船舶偵測能力。

綜上所述，傳統深度學習多數應用於都卜勒距離譜船舶偵測課題，以及時頻偵測方法分析高頻雷達船舶回波訊號，卻未將兩研究概念相結合，故該研究方法論將結合 YOLOv5 深度學習分析高頻雷達回波之時頻訊號，可藉由深度學習訓練將複雜時頻圖影像資料進行特徵判斷，該研究方法具體流程包含：(1)資料前處理、(2)AIS 輔助資料集建立、(3)應用於目標脊線偵測的深度學習模型與(4)偵測結果轉換，架構流程圖，如圖 2.16 所示。

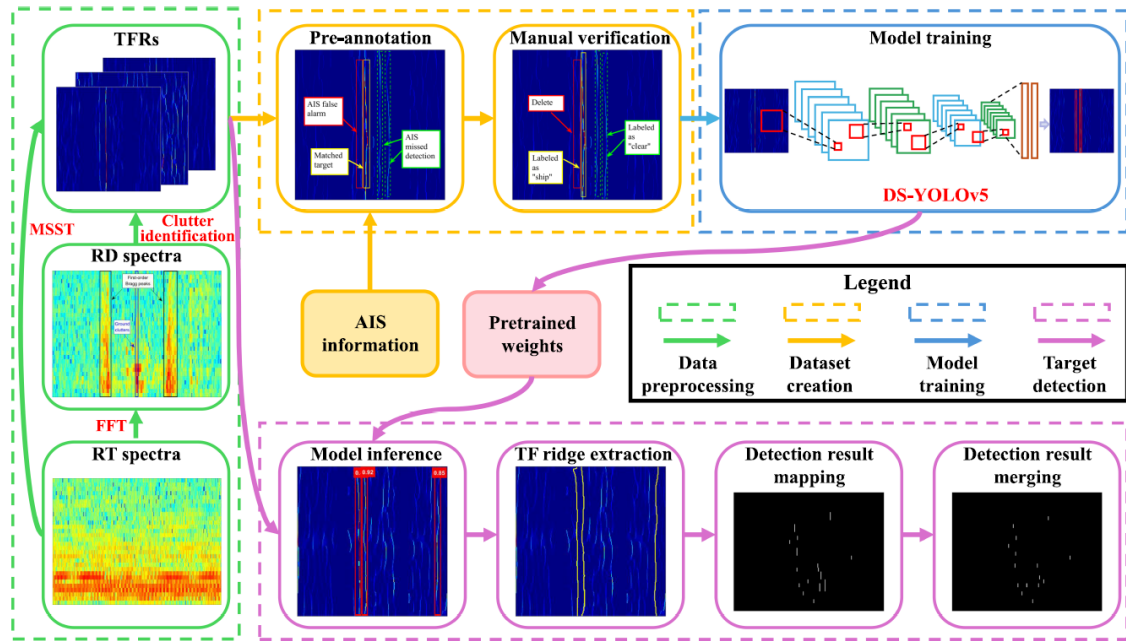


圖 2.16 YOLOv5-DS 深度學習船舶偵測方法示意圖

(1) 資料前處理

資料前處理階段，該研究首先對原始高頻地波雷達(HFSWR)觀測資料進行篩選，將遭受強烈無線電干擾(Radio Frequency Interference, 簡稱 RFI)污染資料予以刪除，確保後續分析之資料品質。緊接著利用都卜勒距離譜分析，辨識一階布拉格峰與陸面雜波與海面雜波等高能量干擾之成分，並將其對應之時頻能量加以抑制，以降低雜波對目標回波特徵的影響；最後，針對各距離解析單元進行時頻分析，將雷達回波時間序列轉換為時頻表示(Time-Frequency Representation, 簡稱 TFR)，並整合多接收通道所提供的資訊形成多通道時頻資料，同時進行正規化處理，以產生適合做為後續深度學習模型訓練之輸入資料集。

(2) AIS 輔助資料集建立

AIS 輔助資料集建立階段，該研究引入 AIS 資訊輔助目標標註方法，發展一套半自動化的資料標註流程，如圖 2.17 (左圖)所示。首先將 AIS 所提供之船舶位置與速度資訊轉換至雷達座標系，並映射至對應之都卜勒距離與時頻平面，以建立雷達量測資料與 AIS 資訊之空間與動態之關聯。接著利用轉換後的 AIS 資訊於時頻圖產生候選目標區域，並以矩形邊界框方式進行預標註

(pre-annotation)，再標示可能存在船舶回波之時頻結構，最後針對 AIS 誤報、漏報及回波不完全對應等情形進行人工檢核(manual verificaiton)與修正，調整邊界框以完整涵蓋實際目標結構，並移除非目標樣本，藉此建立高品質與適用於深度學習模型訓練驗證之高頻雷達時頻資料集，如圖 2.17(右圖)所示。

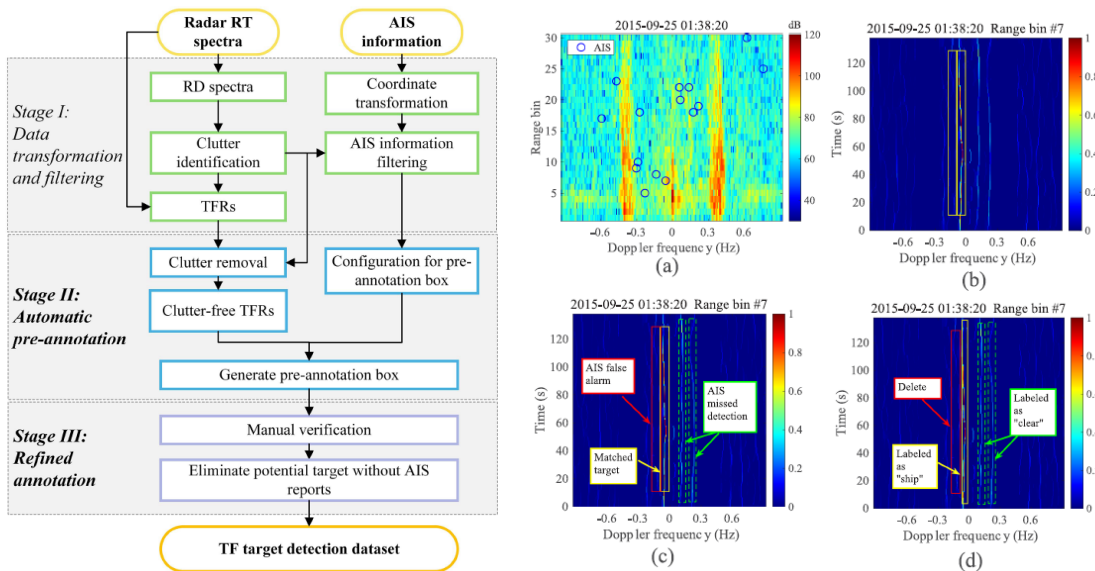


圖 2.17 AIS 輔助目標標註流程與處理情形示意圖

(3) 應用於目標脊線偵測的深度學習模型

關於目標脊線偵測之深度學習模型，該研究將時頻脊線偵測問題重新定義為物件偵測(object detection)之任務，並採用 YOLOv5 為基礎之深度學習架構進行模型建構，其核心概念並非直接進行時頻脊線之逐點追蹤，而是於時頻圖中尋找合適之矩形邊界框，以包絡潛在目標脊線，做為後續參數估測之依據，做為後續參數估測的依據。此外，為充分利用高頻雷達多接收通道所提供之空間資訊，研究探討不同接收通道所產生之時頻特徵圖，使模型得以同時學習時間、頻率與空間維度之關聯性。該研究所採用之改良版 YOLOv5 為其核心技術，稱之為 DS-YOLOv5s，整體深度學習網路結構可分為 a.特徵萃取(Backbone)、b.特徵融合(Neck)、c.目標偵測輸出(Head)，如圖 2.18 所示。

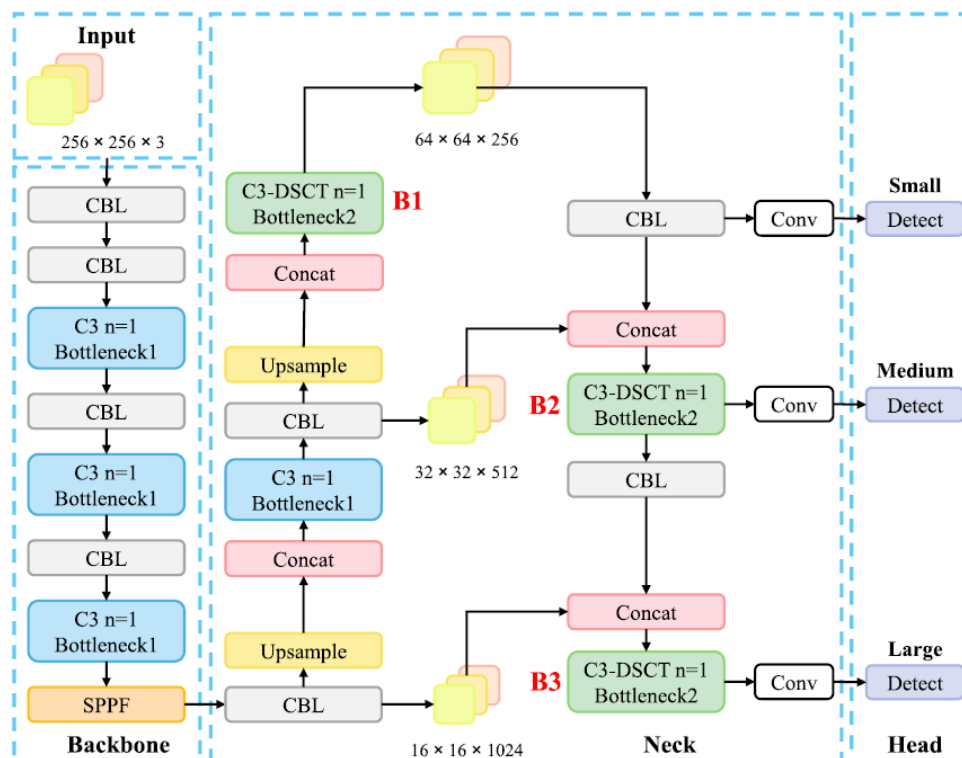


圖 2.18 DS-YOLOv5s 偵測模型整體網路結構

a. 特徵萃取(Backbone)

經由時頻圖萃取具代表性的多尺度特徵，深度學習模型需要輸入尺寸為 $256 \times 256 \times 3$ 個關聯資訊，其內包含時間、頻率與空間資訊，利用卷積模組擷取局部特徵，卷積模組為基礎多層 CBL(Convolution + Batch Normalization + SiLU)與 Bottleneck 單元逐步進行特徵擷取，並引入 CSP(Cross Stage Partial, 簡稱 CSP) C3 結構降低計算量、提升特徵辨識效率與維持深度學習梯度傳遞之穩定性，並配合 SPPF(Spatial Pyramid Pooling - Fast, 簡稱 SPPF)模組使模型能同時捕捉局部與全域的時頻結構特徵，如圖 2.18 中 Backbone 虛線框所示。

整體而言，特徵萃取目的在於引導模型學習時頻平面中具有連續性、延展性且呈細長形態的目標脊線結構，使船舶回波於時頻圖呈現典型特徵，該典型特徵能透過多尺度特徵中識別，使得模型於雜訊干擾背景下，保留船舶的關鍵結構資訊，做為後續特徵融合與目標定位之基礎。

b. 特徵融合(Neck)

特徵融合模組主要功能在於融合不同層級的多尺度特徵，保留高階資訊與低階結構，提升模型對目標尺度變化之適應能力，該研究沿用 YOLO 架構常見特徵金字塔結構方式融合，透過上採樣(Upsample)與特徵拼接(Concat)操作，將高階特徵回傳，並對應相對尺度低階特徵進行整合。整體而言，特徵融合層會以 3 組不同解析度之特徵圖，分別標示為 B1、B2 與 B3，其空間尺寸依序為 64×64 、 32×32 與 16×16 ，此 3 個尺度分別對應小尺度、中尺度與大尺度之時頻目標，使模型能同時涵蓋適應短時、低能量的局部時頻脊線之片段，以及包括跨時較長或範圍較寬之目標脊線，如圖 2.18 中 Neck 虛線框所示。

該研究多尺度特徵融合機制，不僅能補足單一尺度特徵描述時頻脊線之不足，同時也能提升模型對不同長度、彎曲程度與能量分布目標脊線辨識之穩定性，為後續目標偵測輸出奠定基礎。考量船舶回波於時頻圖呈現細長、彎曲特徵，且該特徵可能因為雜訊或干擾而出現局部中斷之脊線結構，因此，該研究為進一步導入改良版的 Bottleneck 卷積模組與機制，強化模型對於延展性結構目標特徵之擷取能力，以及定位之穩定性，故該研究將原本 C3 網路模組改良為 C3-DSCT 網路模組，其中 C3-DSCT 網路模組的殘差子模組(Bottleneck2)動態蛇形卷積(DSConv)模組能有效降低因目標彎折或能量不連續所造成之特徵流失問題；特徵加權模組(Triplet Attention)從時間、頻率與通道(接收天線) 3 個維度建模，建議特徵之間的關聯性，判斷何維度特徵較為重要，促使模型同時注意時頻結構之整體連續性與特徵資訊，使用批量特徵正規化層(Batch Normalization, 簡稱 BN) 增加模型深度網路訓練穩定與提升收斂效率，而 SiLU 即為活化函數層，目的是為提供平滑、非線性特徵，如圖 2.19 紅色框虛線為該研究所加入改良之計算模組。

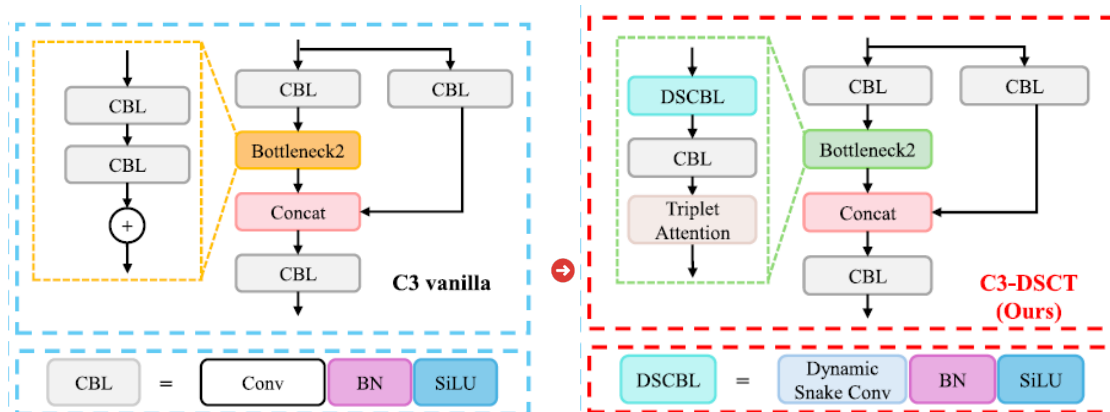


圖 2.19 C3 網路模組與 C3-DSCT 改良模組示意圖

動態蛇形卷積(DSConv)的取樣機制主要用於處理細長且彎曲之目標結構，相較於傳統卷積神經網路(CNN)多以固定卷積核處理規則網格資料，無法有效面對不規則數據結構，此時便需要動態蛇形卷積(DSConv)解決。動態蛇形卷積(DSConv)可沿單一方向加入可學習之偏移量 Δ ，使卷積核能沿著目標結構動態調整取樣位置，並藉由雙線性內插估算位置值，從而有效擷取時頻平面中細長且彎曲之脊線特徵，如圖 2.20 所示。

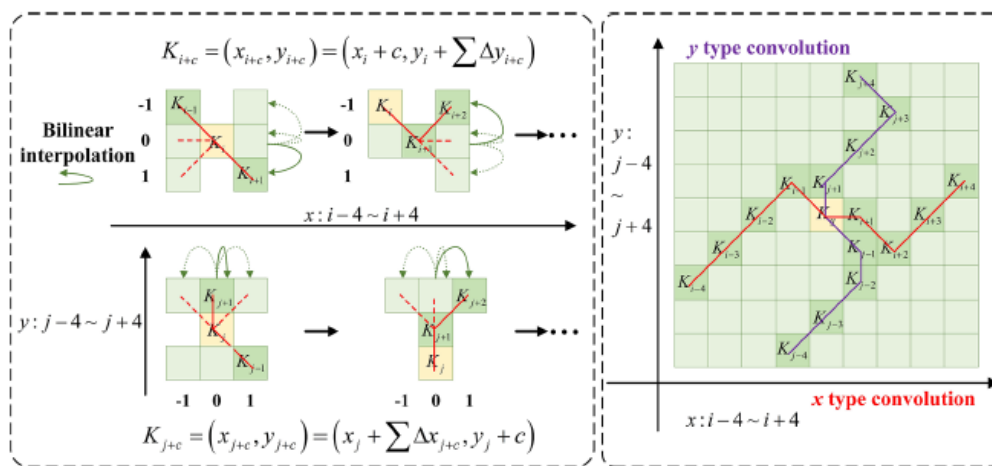


圖 2.20 動態蛇形卷積(DSConv)取樣機制概念圖

標準蛇卷積的座標集合為 3×3 的二維卷積核 K ，如(2.13)式與(2.14a)、(2.14b)式，由於運算形狀並不固定，而是類似蛇形路徑，此設計更能捕捉曲線與非直線結構。

$$K = \{(x_c - 1, y_c - 1), (x_c, y_c - 1), \dots, (x_c + 1, y_c + 1)\} \quad (2.13)$$

$$K_{i+c} = (x_{i+c}, y_{i+c}) = (x_i + c, y_i + \sum_i^{i+c} \Delta y) \quad (2.14a)$$

$$K_{i-c} = (x_{i-c}, y_{i-c}) = (x_i - c, y_i + \sum_{i-c}^i \Delta y) \quad (2.14b)$$

至於 YOLOv5 模型所使用特徵加權模組(Triplet Attention)運作，係透過 3 個平行分支分(C、W、H)別在「通道-頻率」、「通道-時間」及「時頻平面」學習注意力權重，並加以融合，強化模型對時頻脊線結構之辨識能力，如圖 2.21 所示。

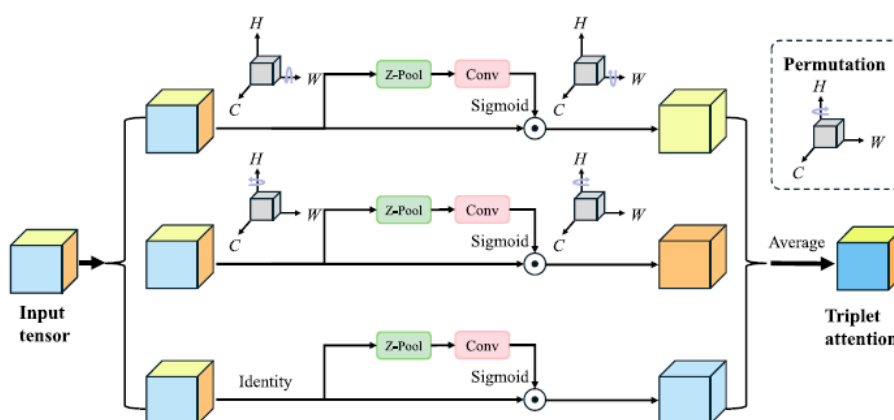


圖 2.21 特徵加權模組運作示意圖

深度學習模型最終將偵測結果以邊界框形式呈現於時頻圖上，並框選潛在目標位置，搭配信賴分數做為偵測控制之依據，相較於傳統以時頻圖二值化後再進行脊線連結與補值的方法，該研究所提出之物件偵測策略不要求時頻脊線訊號需完整且連續，即使部分脊線缺失，仍可透過深度學習後邊界框所涵蓋區域進行後處理與參數估計，大幅提升參數估計對於雜訊、干擾與脊線斷裂情形之容錯能力，使整體偵測與參數估計於實際海洋環境應用更為穩定。

(4) 偵測結果轉換

偵測結果轉換階段，該研究利用訓練完成之深度學習模型於時頻圖進行目標推論，並依據預設之信賴門檻篩選潛在目標邊界框，並於各邊界框所涵蓋之時頻區域內萃取對應之目標脊線，根據其能量分布估計代表性都卜勒頻率，隨後結合目標所在之距離解析單元與所推估之都卜勒參數，時頻圖偵測結果能映射並轉換至都卜勒距離譜，產生符合雷達應用需求之目標描述。最後針對

距離遷移或都卜勒效應所造成之多筆偵測結果進行處理，以提升目標定位結果。

該研究已驗證各改良模組於時頻脊線偵測之實際貢獻，所設計的系統性之逐步消融實驗，其實驗結果如圖 2.22 所示，該圖以(1)橫向比較不同模型架構、(2)縱向比較不同目標難度情境，用以分析各模組對模型特徵表徵能力之影響。

(1)橫向比較不同模型架構，由左至右依序為 a.原始時頻表示(TFR)、b.實際輸入模型之多通道(TF)、c.原版 YOLOv5s、d.導入動態蛇卷積(DSConv)之 YOLOv5s、e.導入特徵加權模組(Triplet Attention)之 YOLOv5s，及 f.同時整合動態蛇卷積與特徵加權模組之 YOLOv5s，整體結果顯示隨著模型結構逐步改良，其對時頻目標脊線之辨識能力亦隨之提升。測試結果顯示，原始 YOLOv5s 於時頻域細長且能量分散的目標脊線回應不明顯，容易受到雜訊干擾，當導入動態蛇卷積時，該模型貼合細長與彎曲結構，顯示處理細長彎曲脊線幾何形態方面具明顯優勢；相較之下，面對低訊雜比或多目標情境，仍可能產生不可預期之背景雜訊，導入特徵加權模組之 YOLOv5s 模型，測試能有效抑制非目標區域與強化關鍵特徵，但其對於高度彎曲或局部中斷的脊線結構，其空間連續性仍不足，因此，只有當動態蛇卷積與特徵加權模組同時整合於 DS-YOLOv5s 模型時，方能於不同情境中展現出最佳表現，動態蛇卷積 (DSConv)負責貼合脊線的幾何形態，至於特徵加權模組(Triplet Attention)則強化時間、頻率與通道間的整體關聯性，故於時頻脊線方向形成連續且穩定特徵，亦能有效抑制背景雜訊，並於多目標交錯的複雜場景中保留各目標之獨立結構，此結果顯示 2 個模組功能具有互補性。

(2)縱向比較不同目標難度情境，該實驗涵蓋強目標、弱目標及多目標 3 種難度逐步提升之情境，測試結果顯示高訊雜比情境下，多數模型皆能辨識目標脊線，且於低訊雜比與多目標情境中亦能穩定呈現完整脊線結構，顯示該研究 DS-YOLOv5s 深度學習模型對於實際海洋雷達複雜環境具有良好效果。

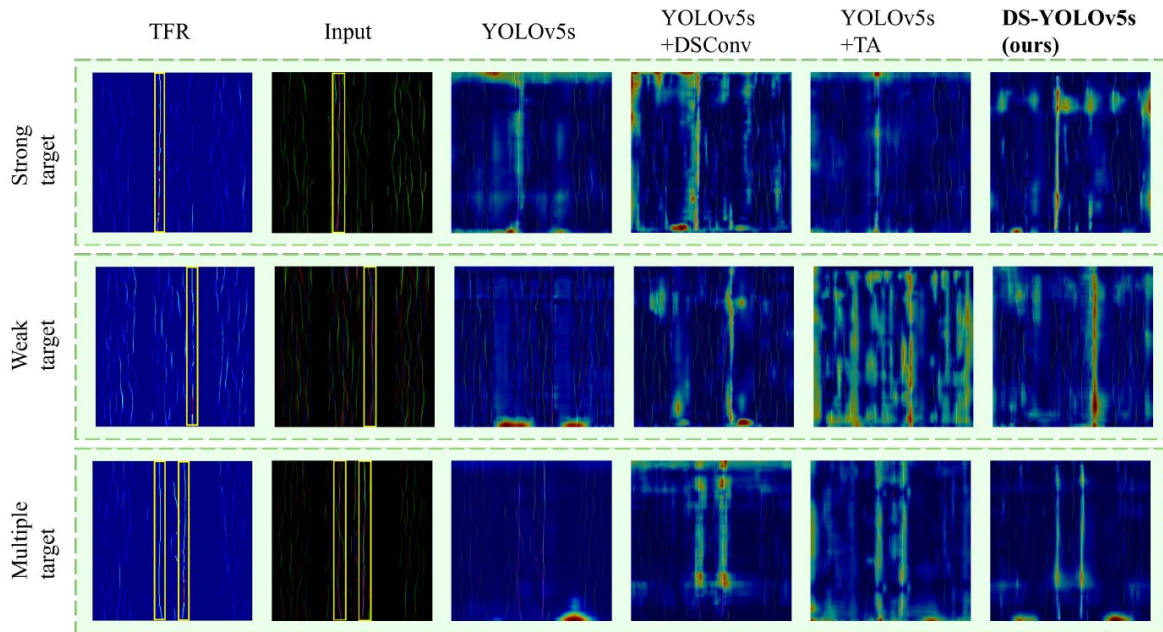


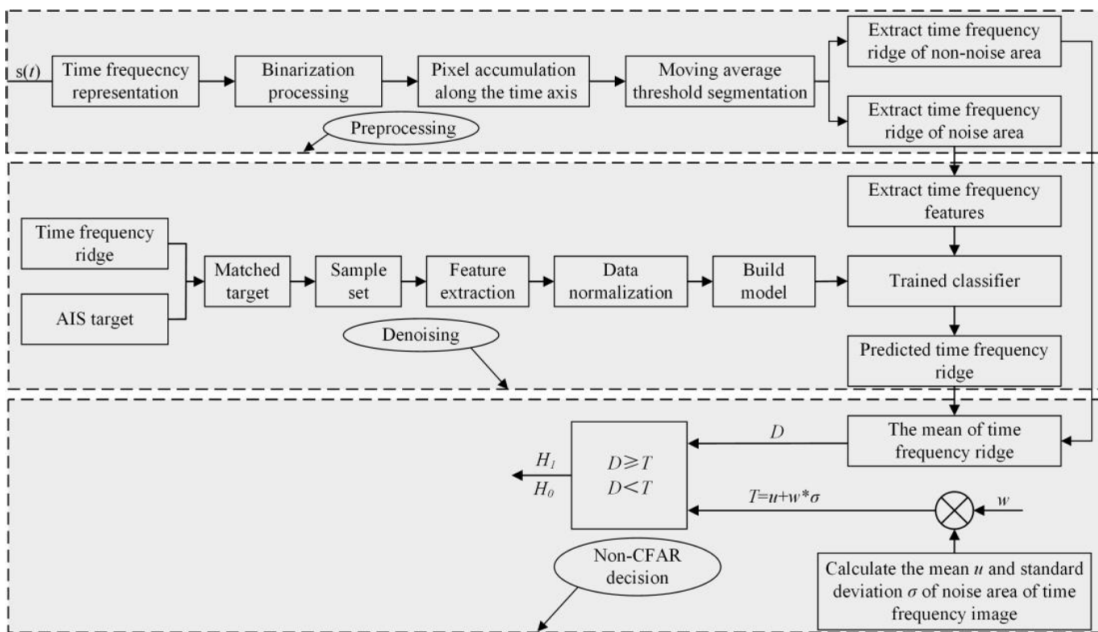
圖 2.22 不同模組配置之消融實驗結果比較圖

綜合上述結果，該研究驗證動態蛇卷積與特徵加權模組各自具有效果，唯有兩者結合時，模型於強目標、弱目標與多目標情境下顯著提升目標偵測之效能。執行分數比較方面，相較於 YOLOv5 基準模型，該研究 DS-YOLOv5 於 F1 執行分數提升了 15.3%，且平均精度亦提升了 5.63%，此外，探測距離與既有固定虛警率(CFAR)方法相比，亦可提升 2.27% ~8.17%距離，顯示該研究對航跡之量化分析結果於準確度與效率具有優勢，為高頻雷達船舶偵測提供一種有效且高效之解決方案

(三) Yang, Z., Zhou, H., Tian, Y., Liu, G., Zhang, B., Qin, Y., Li, P., & Huang, W. (2025). Cascaded Detection Method for Ship Targets Using High-Frequency Surface Wave Radar in the Time–Frequency Domain.

該研究與第(二)篇文獻採用相同集成式高頻雷達系統(OSMAR-SD)，並設置於中國大陸福建省東山縣進行觀測，該雷達工作頻率範圍為 13.15MHz，觀測範圍 75 公里，空間解析度 2.5 公里，速度解析度 0.0825 m/s，掃頻寬度 60 kHz，雷達偏向穩定長距離觀測，較不擅長高解析與近距離掃描工作，雷達每 0.54 秒完成 1 次掃描，適合中遠距離穩定船舶目標偵測，以及結合 AIS 進行統計分析。該研究提及小型集成式天線船舶訊號訊雜比很低，船舶訊號微弱容易被海面雜波覆

蓋，因此，常見固定虛警率(CFAR)演算法失效，故於雜訊區域幾乎無法辨識船舶，所以本研究採取處理方式為將原始時間域訊號之雷達回波，透過短時傅立葉轉換(Short-time Fourier Transform, 簡稱 STFT)與同步擠壓轉換(Synchrosqueezed Transform, 簡稱 SST)方法取得船舶能量脊線，再對能量脊線分析雜訊與非雜訊，進行監督式學習以實現去雜訊之目標，最後透過非固定虛警率門檻決策設計篩選出船舶資訊，採用非固定式門檻係根據時頻影像中噪聲區域之平均值與標準差，自適應調整偵測門檻，此種設計可以避免窗函數遭受其他非噪聲干擾或影響導致門檻抬升之問題，因此，對於較低訊雜比船舶目標亦具有較佳之檢出能力，該研究主要包含 3 個架構(1)時頻轉換與影像處理、(2)利用 AIS 建置船舶訊號特徵與雜訊分類器、(3)非固定虛警率門檻篩選，如圖 2.23 所示。



資料來源：Yang 2025

圖 2.23 雷達時頻分析與非固定虛警率作法流程

(1) 時頻轉換與影像處理

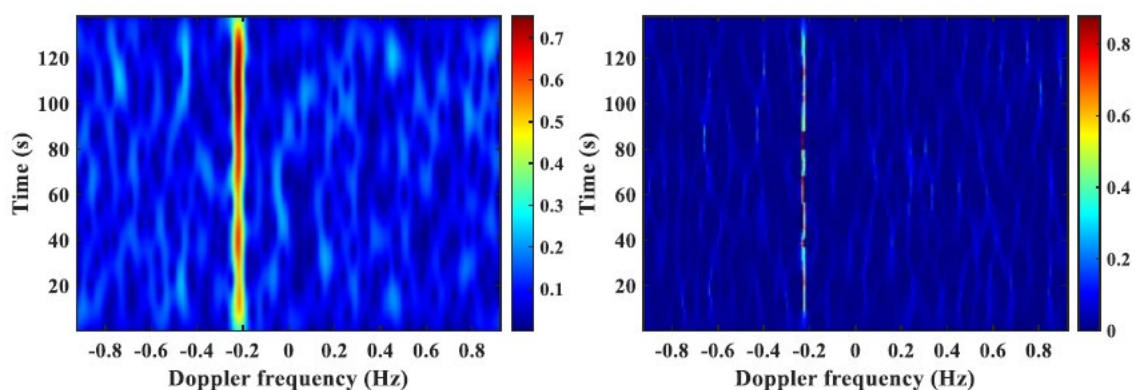
將雷達回波訊號進行時頻轉換，根據海森堡不確定性原理，短時傅立葉轉換後，時頻能量集中程度會受到限制，導致船舶能量脊線發散，短時傅立葉轉換公式，如(2.15)式所示：

$$\text{STFT}(t, \omega) = \int x(\tau) g(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.15)$$

為解決短時傅立葉(STFT)轉換後能量不集中之模糊狀態，Daubechies (2011)提出小波分析中同步擠壓轉換(SST)方法，該方法係將能量重新處理分散於時頻區域，並將其重新分配至對應的瞬時頻率位置，如(2.16)式所示：

$$SST(t, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} STFT(t, \omega) \delta(\eta - \omega_x(t, \omega)) d\omega \quad (2.16)$$

其中， $SST(t, \eta)$ 為目標回波訊號， $STFT(t, \omega)$ 為處理前回波訊號， $\delta(\eta - \omega_x(t, \omega))$ 表示為同步擠壓運算子，將原始訊號拆分為無數小段的傅立葉切片，再將能量沿時間積分起來，便得到時頻圖(time frequency image，簡稱TF image)，時頻譜內船舶訊號不再係都卜勒距離譜常見之點目標，而是連續或間斷之線狀訊號，如圖 2.24 所示。



(左圖) SST 處理前與(右圖) SST 處理後

圖 2.24 雷達時頻圖經同步擠壓轉換處理前後之比較圖

此外，為後續去除雜訊，本研究將時頻圖訊號轉為可提供使用 a~p 共 16 個特徵函數，如表 2-1 所示。

表 2-1 時頻圖 16 項特徵函數表

編號	特徵函數	目的
a	平均絕對值 (Mean absolute value)	用於雷達目標偵測中，時頻圖回波訊號平均振幅可做為目標訊號強度的主要指標。
b	縱橫比 (Aspect ratio)	用以船舶雷達截面及觀測角度的變化，時頻脊線可能呈現連續或間歇的型態

c	峰度 (Kurtosis)	用以描述沿著時頻脊線之資料分布尖銳程度，對於常態分布而言，其峰度值約為 3，較高的峰度表示分布較為尖銳，而較低的峰度則代表分布較為平坦
d	偏態 (Skewness)	用以量化時頻脊線振幅分布的不對稱性
e	變異數 (Variance)	反映訊號能量分散的程度，可用以區分目標、雜波與雜訊
f	平均振幅變化 (Average amplitude change)	定義為相鄰取樣點之振幅差的平均值，用以反映時頻脊線的變化程度與訊號複雜度。
g	峰值因子 (Peak factor)	定義為峰值振幅與均方根(RMS)值之比，用以指示訊號中是否存在脈衝成分。
h	標準差比 (Ratio of standard deviations after bisection)	為時頻脊線全段的標準差與二分之一時頻脊線的標準差比值。
i	均值比 (Ratio of bisected means)	均值比為將時頻脊線係數依整體平均值分為上半與下半集合之平均值，上下半集合平均值的比值。
j	絕對標準差差值 (Absolute standard deviation of differences)	此指標類似於均方根，但係由相鄰時頻振幅差值的標準差所推導而得來。
k	積分比 (Integral ratio)	積分比將積分值代表時頻脊線的總能量，用以比較該能量與其周圍(不包含脊線)時頻區域能量比值。
l	最大峰度 (Maximum kurtosis)	最大峰度為正規化之四階中心動差，Peng (2019)提出用以描述包含時頻脊線之時頻區域內振幅分布的形態特性，常用於判斷隨機變數是否服從常態分布。
m	Renyi 熵 (Renyi entropy)	Renyi 熵(Renyi entropy)熵為 Shannon 熵的推廣形式，Baraniuk (2001)用以量化在給定階數 α 下目標訊號於時頻平面中

		的能量集中程度。 R_α 數值可反映 TF 能量集中的品質，較小 R_α 表示時頻能量較為集中(該研究設定 $\alpha=2$)
n	正規化三階 Renyi 熵 (Normalized third order Renyi entropy)	-
o	時頻域梯度 (Gradient in the TF domain)	時頻域梯度將雷達回波於時頻域中視為一張二維影像。
p	影像熵 (Image entropy)	影像熵各像素之梯度依序計算並加總，最後透過取平均值獲得平均梯度特徵。

由於目標脊線較長、持續時間與能量集中特性，反觀雜訊呈現不規則分布，且持續時間較短、能量較為微弱，故影像處理部分採用 Zack (1977) 三角形閾值法進行二值化處理，此方法利用背景雜訊像素佔多數、目標像素佔少數之分布特性，自動選取背景與目標分界之灰階值做為閾值，如圖 2.25 所示。

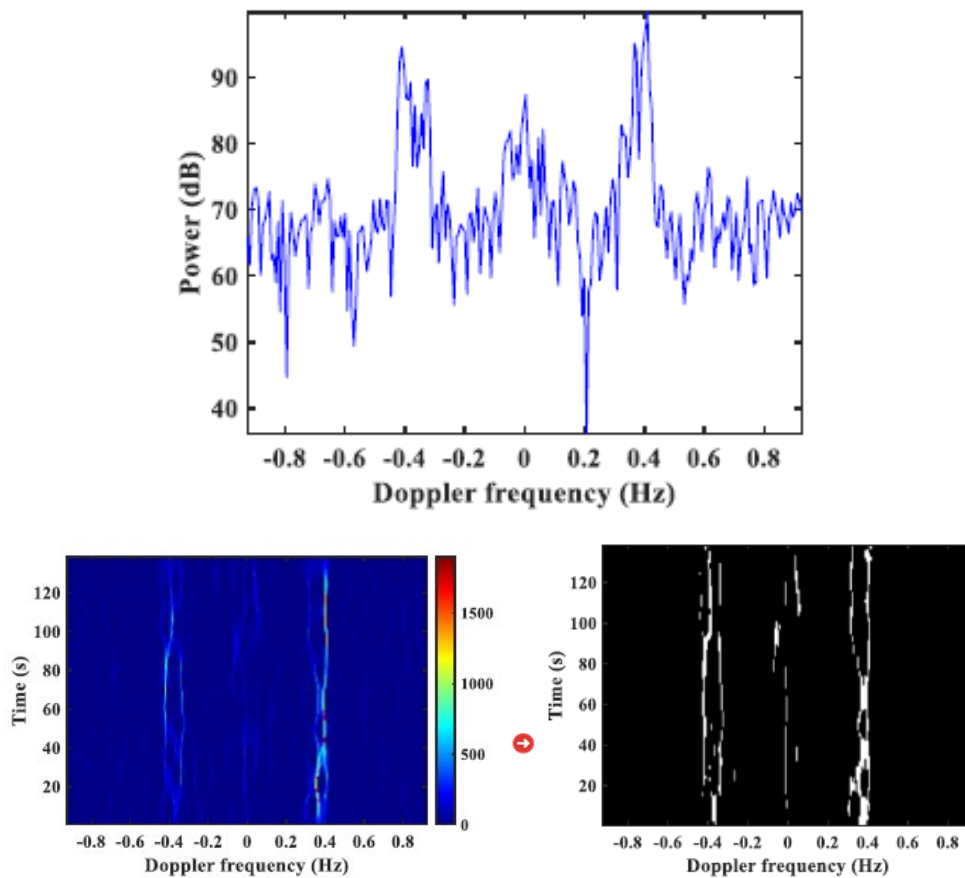


圖 2.25 時頻圖之三角形閾值法二值化處理

(2) 利用 AIS 建置船舶訊號特徵與雜訊分類器

都卜勒距離譜雜訊區域為 3 倍尖峰頻率以外定義為雜訊，但該研究所應用時頻圖方法，並未明確定義雜訊頻率，故該研究利用數萬多筆 AIS 船舶地理資訊特徵，反運算套疊至都卜勒距離譜，藉此可分析與辨識雜訊區域與非雜訊區域所對應之頻率範圍，如圖 2.26 所示。

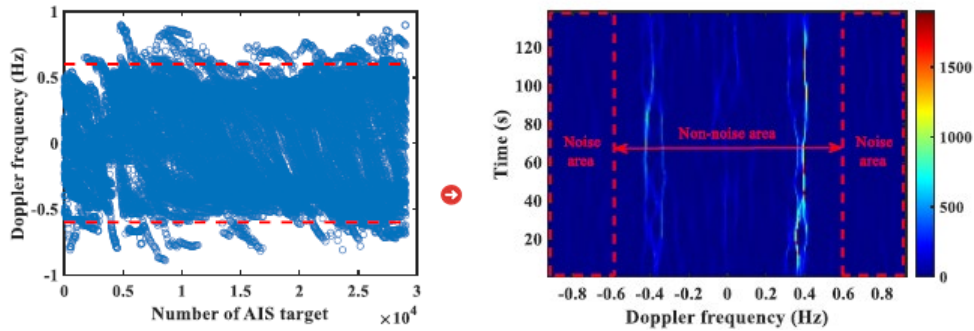


圖 2.26 AIS 船舶訊號特徵重建與分類

該研究所取得時頻脊線與 AIS 資料目標比對，若時頻脊線與 AIS 資料匹配，當雷達目標與 AIS 目標距離誤差絕對值小於或等於一個距離區間，且速度誤差絕對值小於或等於 4 個都卜勒區間時，則判斷為匹配，匹配落於雜訊區域內標記為「+1」，其餘未匹配與時頻脊線落於雜訊區域內標記為「-1」，標記後會產生 2 種態樣，即強分離與弱分離。強分離表示不同類別間界線明確，弱分離則表示類別間之區隔較不明顯，如圖 2.27 所示。

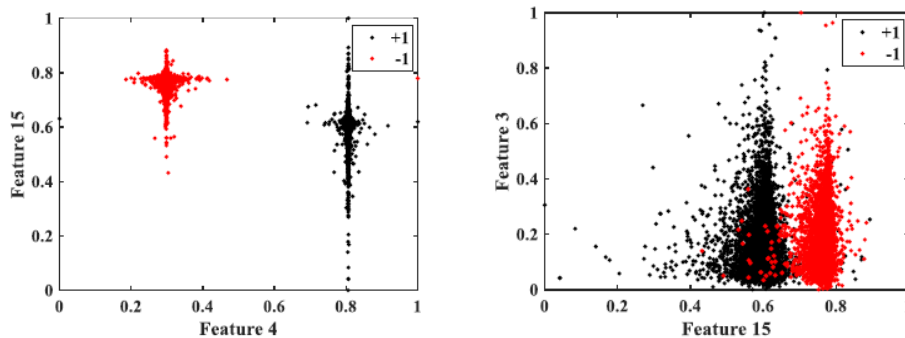


圖 2.27 時頻脊線與 AIS 資料目標進行比對情形

完成樣本訓練後，再利用 Mu (2019) 支援向量機器(Support Vector Machine, 簡稱 SVM)、Li (2023) 決策樹(Decision Tree, 簡稱 DT)與 Halder (2024) K 最近鄰(K-Nearest Neighbors, 簡稱 KNN)與 Wan (2023) 類神經網路(Neural Network, 簡稱 NN)，並根據混淆矩陣驗證結果，建

立監督式學習分類器，該研究雜訊區域內目標時頻脊線與雜訊分類準確率超過 99%，該研究未說明選定何種單一分類器做為最終方案，但已驗證 KNN、DT、SVM 與 NN 四種分類器成效均為有效，且差異非常小，其中 KNN 與 DT 混淆矩陣驗證結果，如圖 2.28 所示，顯示採用時頻特徵 a~p 時頻特徵函數具有可分辨性，已能足夠分辨船舶目標訊號。

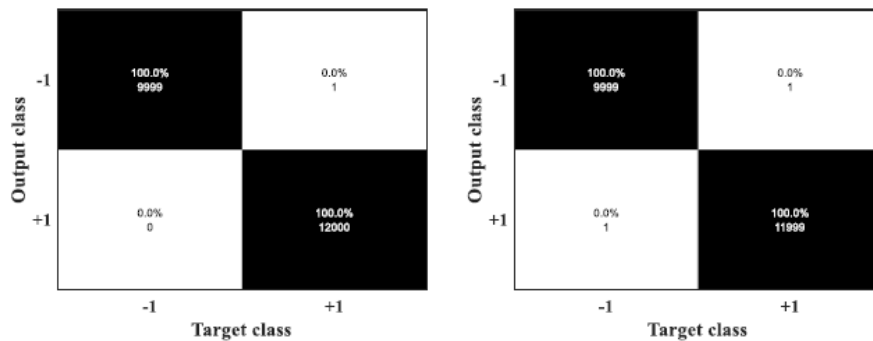


圖 2.28 KNN 與 DT 決策樹混淆矩陣驗證結果

(3) 非固定虛警率門檻篩選

時頻圖雜訊之統計特性會隨時間變化，其雜訊平均值 μ 與雜訊標準 σ 差亦會有所不同，透過設定雜訊變化之閾值 ω ，可決定自適應閾值，提升雷達偵測器之抗干擾能力，該研究提出之非固定虛警率偵測方法，係利用時頻圖雜訊之平均值與標準差計算，藉此偵測閾值 T ，並搭配調整係數 ω 值，整理計算式為 $T = \mu + \omega\sigma$ ，偵測過程若時頻脊線平均能量大於或等於決策閾值 T ，則判定時頻脊線為真目標，否則判定為假目標，該研究結果顯示當雜訊功率固定時，隨著 ω 值增加，偵測閾值隨之提高，可增強雷達目標之偵測效能，但同時會降低弱目標偵測能力，此外，對於雜訊區域內不同固定虛警率決策機制，於不同版本的偵測方法於虛警率與偵測閾值設定有所差異。該研究討論多個版本之固定虛警率，為求公平比較探討 CA-CFAR、OS-CFAR、TM-CFAR、CML-CFAR、VI-CFAR、FOD-CFAR、SOD-CFAR、BVI-CFAR 與本研究 TF-Non-CFAR，該研究顯示雜訊區域目標匹配的辨識率，非固定虛警率門檻方法可達 36.2%，其餘雜訊區域目標匹配的辨識率均未達 2%，顯示所提出時頻非固定虛警率偵測方法最能夠適應雜訊變化。

舉例來說，該研究選擇雷達回波訊雜比(SNR) 3.49 dB 案例進行測試驗證，該案例訊雜比遠小於 Laws et al. (2011)建議最適合偵測之漁船與大型貨船頻譜的最小訊雜比 15 dB，透過 Yang(2025) 雷達時頻分析與非固定虛警率作法，進行時頻轉換與影像處理、船舶訊號特徵與雜訊分類，以及非固定虛警率門檻篩選，能有效分辨出船舶目標，如圖 2.29 所示，成功解決傳統滑動視窗為基礎固定虛警率門檻之方法，傳統方法容易受到左右參考單元樣本影響，導致偵測閾值升高，造成船舶目標遺漏失效，該研究亦驗證時頻圖方法將都卜勒距離譜之點位目標延伸為一條脊線，使該船舶動態速度變化得以被觀測有效化。

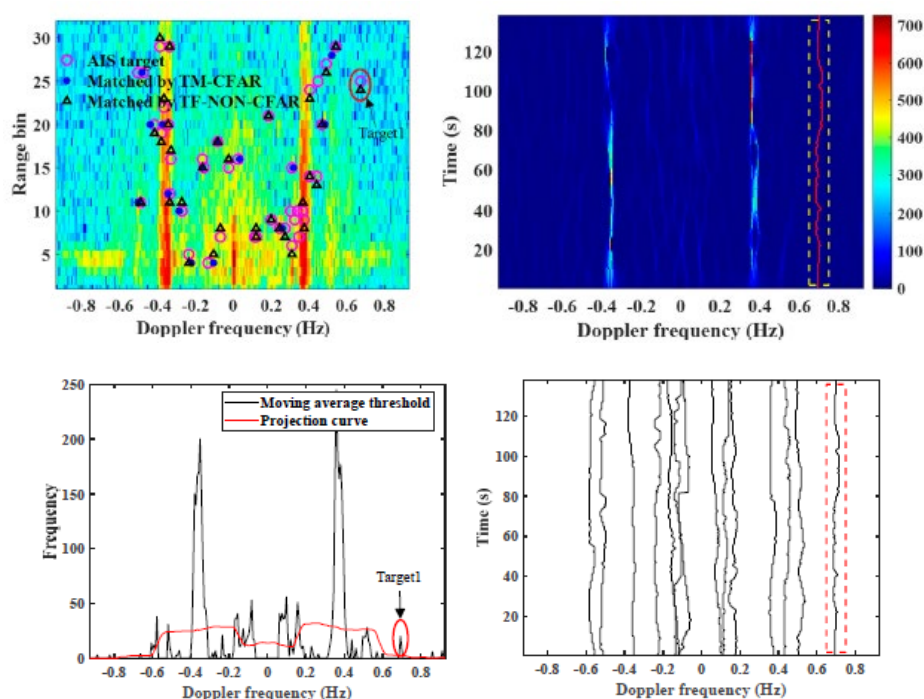


圖 2.29 非固定虛警率門檻篩選情形

該研究結果為所提雜訊抑制模型於海雜波區域有效加強高頻雷達偵測船舶目標之能力與穩定度；然而，當海雜波干擾程度升高時，對船舶目標之分類表現仍相對受限。其主要原因係海雜波區域內，船舶目標訊號常與海雜波混合，使有效特徵不易分辨，進而影響分類結果，建議未來針對雷達回波訊號之訊號特性，採用 Lu (2024)所提出之另一類非監督式學習之生成對抗網路(Generative Adversarial Networks, 簡稱 GANs)與 Yu (2024)擴散模型(Diffusion Models)，藉以改善船舶目標與海雜波混合情形之辨識限制。

2.3 本計畫文獻回顧及運用情形

本計畫回顧並彙整高頻海洋陣列雷達應用於船舶觀測與偵測之相關研究成果，內容涵蓋早期高頻雷達船舶回波特性和基礎研究、傳統以都卜勒距離譜與門檻判定為核心之偵測方法，以及近年導入時頻分析、航跡關聯與深度學習等新興技術之研究進展。透過前述文獻回顧，可較清楚掌握高頻雷達船舶觀測技術之發展脈絡與研究演進重點，並做為後續相關分析與方法比較之基礎。為利瞭解各項研究之差異與適用性，本計畫彙整如表 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
Ponsford (1984); Barrick (1972)	探討高頻雷達於都卜勒距離譜中之船舶回波特性和偵測可行性	高頻地波雷達回波分析、都卜勒距離譜特徵判讀	證實船舶回波可於都卜勒距離譜中辨識，奠定高頻雷達船舶偵測之理論基礎	本研究已採行
Fernandez et al. (2001)	分析 CODAR SeaSonde 雷達各類回波於都卜勒距離譜之分布特性	都卜勒距離譜回波分類與特徵分析	系統性整理海雜波、陸雜波、船舶回波與電離層回波之頻譜特性	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
Laws et al. (2011)	探討船舶回波與海雜波隨距離衰減對偵測效能之影響	訊雜比(SNR) 分析與距離衰減模型比較	指出船舶偵測需滿足最低訊雜比條件，否則遠距目標易被海雜波淹沒	本研究概念已採行。
Roarty et al. (2010)	建立 CODAR SeaSonde 雷達船舶偵測流程	中值濾波、IIR 濾波器與背景雜訊估計、固定虛警率 CFAR	可於都卜勒距離譜中標記潛在船舶回波，但高度依賴門檻設定	本計畫尚未採行，建議納入後續研究評估

Dzvonkovskaya & Rohling (2006) ; Dzvonkovskaya et al. (2008, 2009)	提升 WERA 雷達於複雜雜訊環境下之船舶偵測與追蹤穩定度	自適應訊號門檻、CFAR、距離門閾控	能改善船舶追蹤穩定性，但仍仰賴頻域假設與參數調校	本研究概念已採行，108 年亦投入使用。
莊士賢 (2015)	改善高頻雷達船舶回波於雜訊背景下之可辨識性	調適性偵測法與二維移動平均、背景殘差分析	可有效抑制部分海雜波並提升偵測率，惟對複雜散射環境仍有限	本研究概念已採行，持續使用中。
Xu et al. (2024)	解決雷達點位與 AIS 航跡時間與空間不一致問題	差分轉換、機率分布圖、聚類分析、最近鄰搜尋	能於高雜訊環境下建立雷達與 AIS 對應航跡，提升追蹤可靠度	本計畫尚未採行，利用差分轉換、機率分布圖、聚類分析、最近鄰搜尋，納入後續研究評估
Huang et al. (2024)	發展高頻雷達船舶偵測之深度學習時頻分析方法	時頻轉換、YOLOv5-DS 深度學習模型、AIS 輔助標註	在複雜雜訊環境下較傳統 CFAR 具穩定偵測表現	本計畫雖然尚未採行利用時頻轉換與 YOLOv5-DS 深度學習模型，建議納入後續研究評估，但已降版本初探 YOLOv4 做為船舶偵測的可行性，詳見第 4 章。
Yang et al. (2025)	兼顧港灣船舶偵測之即時性與穩定性	時頻分析、非固定 CFAR 門檻	在多目標與雜訊變動環境下可維持一定偵測效能	本計畫尚未採行，利用時頻分析、非固定 CFAR 門檻，建議納入後續研究評估。
Chen et al. (2021) ; You et al. (2024)	發展非線性波束成型於船舶空間定位之應用	Capon 、 NC-Capon 波束成型、RA 亮度成像、帶拒濾波	可直接於空間域呈現船舶位置，降低對頻域門檻之依賴	本研究已採行初步可行，並持續研究進行。

2.4 臺中港使用者需求訪談情形

為瞭解港區船舶監測實務作業需求及現行系統限制，本計畫已於 115 年 1 月 22 日赴臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司(簡稱港公司)船舶交通服務中心進行訪談與需求調查，實地掌握港區船舶監控作業流程、資訊來源、系統運作瓶頸及未來輔助功能需求，做為研究船舶監測技術定位、系統功能規劃及後續應用情境分析之參考依據，訪談項目包括：服務對象與服務範圍所涉及之航行安全與管理需求、港公司與航港局系統之差異分工，系統操作瓶頸與改善空間，未來若導入輔助系統時應優先補強之功能。綜整訪談結果需求歸納如下：

- (1) 臺中港船舶交通服務中心目前配置 X-Band 與 S-Band 2 種雷達系統，惟系統使用時僅能選擇其中 1 種波段雷達系統進行掃描，整體觀測範圍約為 15 至 20 海浬；其監控核心仍以臺中港港區範圍內船舶交通服務為主，對港外特定區域之延伸監測能力有限。
- (2) 臺中港船舶交通服務中心系統係由海圖、微波雷達影像及 AIS 圖層共同建構而成，海圖更新頻率每年更新 1 次，系統平台已經具備基本多源資訊整合功能。
- (3) 依據實務作業經驗，當 AIS 船舶資訊與微波雷達資訊未顯示於同一空間位置時，塔臺人員會綜合研判港區動態，再輔以雷達圖資做為判斷依據，顯示船舶監控作業仍存在多源資料定位不一致之問題。
- (4) 港公司與航港局現行系統尚未完成即時連線，雙方系統各自獨立運作，船舶資料亦未能直接交換；若遇特殊事件，主要仰賴電話聯繫進行協調，顯示目前港區船舶監測與應變支援機制，在跨系統整合及跨機關聯防方面仍有明顯改善空間。
- (5) 港區交通服務除關注船舶動態以外，更重視惡劣天候、海流條件及浪高等海象資訊，尤其是 LNG 船舶進出港管制與引水作業，均依賴海氣象條件做為安全判斷依據，顯示未來如能將船舶智慧化監測技術與海象資訊加以整合，將更符合港區實務需求。
- (6) 臺中港港區外南側臺電放流口及錨泊區以外海域，雖非既有商港管理範圍，惟該等區域仍具延伸監測需求，未來若雷達觀測系統監測範圍得以有效延伸，則有機會做為跨機關合作基礎，擴展至海巡等單

位之海域監控應用。

- (7) 未來新興監測技術方面，港區正逐步建置不明船舶入侵偵測系統，顯示未來監測技術發展方向，係以建構輔助監控及預警工具為主，以彌補現行系統平台功能不足。

第三章 船舶辨識與航跡分析方法

隨著港航升級與航運之蓬勃發展，海域空間使用量日益頻繁，商港船舶進出港班次增加，亦使海域安全管理與船舶救援應變需求相對提高。為維護港航海域安全，除需持續辦理海洋觀測，支援港區及鄰近海域波浪場與流場之即時監測外，如何有效掌握海域船舶動態資訊，亦為港航發展與海域安全管理之重要課題。

本章將說明船舶辨識與航跡分析方法，以檢驗船舶追蹤目標檢測之技術流程，本計畫分析方法，包含時頻譜分析結合 Capon method、二維空間域圖譜結合 AIS，以及調適性偵測法(ADT)等方法，於技術定位上並非互相取代，而係分屬不同層次之船舶監測技術。其中，時頻譜分析結合 Capon method 主要著重於原始雷達訊號之前端解析、雜波抑制與目標特徵強化，可提升船舶訊號於複雜海雜波背景下之可分辨性，做為前端基礎訊號與特徵處理之重要技術；二維空間域圖譜方法則著重於空間域目標表徵、位置定位、航跡擷取亦可結合 AIS 資料做為目標比對與輔助驗證，並可進一步做為人工智慧模型訓練與辨識之輸入資料；至於調適性偵測法(ADT)則屬傳統偵測方法，具備較高可解釋性與實測驗證基礎，適合做為現階段案例測試與方法比對之依據，爰此，總括不同層次之技術方法可視為上層訊號處理、中層空間域分析與智慧化辨識、以及下層傳統驗證基準等技術分類，共同構成船舶監測技術之整體發展架構。

船舶辨識與航跡分析方法流程，如圖 3.1 所示；此流程圖主要說明高頻雷達船舶偵測與航跡分析流程，從原始雷達資料讀取開始，透過多層級濾波與波束形成技術，逐步抑制海雜波、強化船舶回波，接著進行回波中心定位與時間連續性判斷，並建立船舶航跡，並與 AIS 資料比對，以評估雷達偵測與定位精度，做為後續系統優化與調校依據。

- (1) 定時資料讀取：船舶辨識分析流程的第一步是每 30 分鐘讀取一個雷達資料檔案，做為後續分析的基本單位。
- (2) 多尺度取樣與濾波：船舶辨識分析系統會擷取不同數量的資料點，分別進行濾波處理，其目的在於利用不同時間與頻率尺度有效抑

制一階布拉格散射所造成的海面雜波，同時保留具移動特性的非海洋回波訊號之船舶。

- (3) 產生二維空間域圖譜：完成前處理作業後，船舶辨識分析系統，進一步執行波束形成分析，將雷達回波資料轉換為二維的平面空間位置圖譜，可直觀呈現目標在距離與方位角上的空間分布情形，有助於辨識回波能量較強的區域及潛在船舶目標，同時達成標示優化影像效果，使船舶回波在空間域中更加清晰，提升後續判讀與分析之可靠程度。
- (4) 強回波區中心定位：於二維空間域圖譜中，系統會針對強回波區域進行中心定位，擷取可能對應船舶的候選目標位置，做為後續追蹤分析的基礎點。
- (5) 連續空間與時間相關性分析：藉由整合多個時間點之回波中心位置，分析其在空間上的連續性與時間上的演變趨勢，以判斷該回波是否符合持續移動船舶之行為特徵，或僅為短暫出現之靜止目標或雜訊。
- (6) 航跡定義與運動參數計算：對於判定為移動船舶之目標，系統利用其連續回波中心位置建立船舶航跡，並據此估算航向與移動速率，完成雷達端之船舶追蹤結果，目前雷達站每 30 秒產出一幅二維空間域圖譜，本計畫單一船舶目標計算 5 分鐘內約 10 個計算點頭尾點的位移差獲得船舶速度，方位則利用反正切函數(\arctan)，去計算頭尾點的位移差獲得船舶行進方向。
- (7) AIS 資料比對與誤差估算：尋找時間戳記附近的 AIS 資訊，並將雷達推估之船舶位置與航跡兩者進行比對，據以估算距離與方位之定位誤差，進而量化雷達船舶偵測與定位結果。
- (8) 系統優化：上述比對結果做為船舶航跡分析模組建置與雷達系統參數調整與改進之重要依據，形成持續優化之閉環處理流程。

本計畫流程係由定時讀取高頻雷達資料開始，透過濾波方式有效抑制海面雜波，並結合波束形成技術產生二維空間域圖譜，以強化船舶回波影像，再藉由回波中心定位與時間連續性分析，辨識移動船舶並建立其航跡，進一步計算航向與移動速率，再透過與 AIS 資料比對，評估船

船定位誤差，並做為雷達系統調校與偵測效能優化的重要依據。

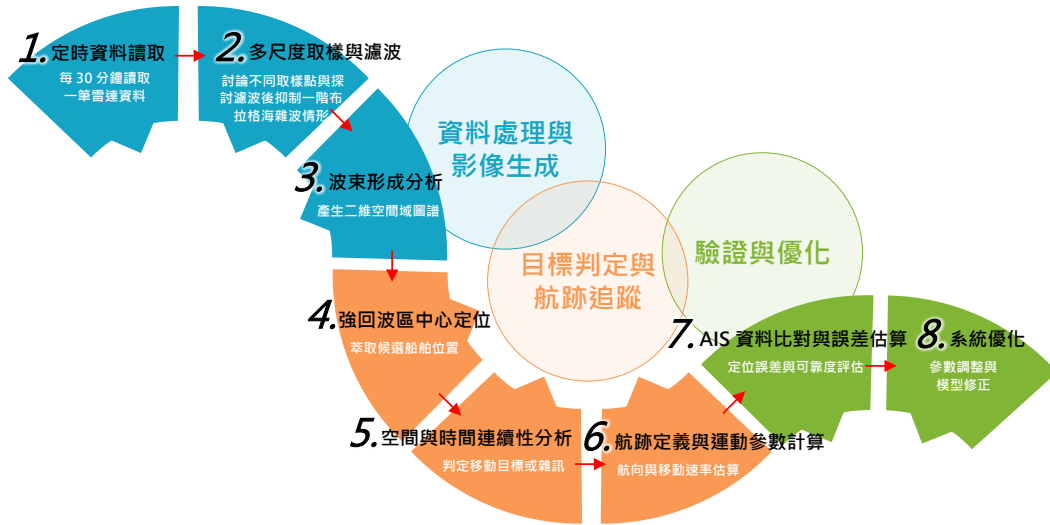


圖 3.1 船舶辨識與航跡分析方法流程

3.1 繪製作二維空間域圖譜

本計畫每次分析取用 128 點原始資料，時間長度約 28 秒。波束成型範圍介於 -80° 到 80° 之間，每 1° 執行一次，故每 161 個波束方向的反演回波。二維空間域圖譜案例，如圖 3.2 所示，圖中橫座標表示為角度，色階為相對強度值 dB，平面圖形式較能清楚觀察近距離之雷達回波強度，而圖 3.2 的另種表示方式為極座標系統的表示方式，如圖 3.3 為所示。

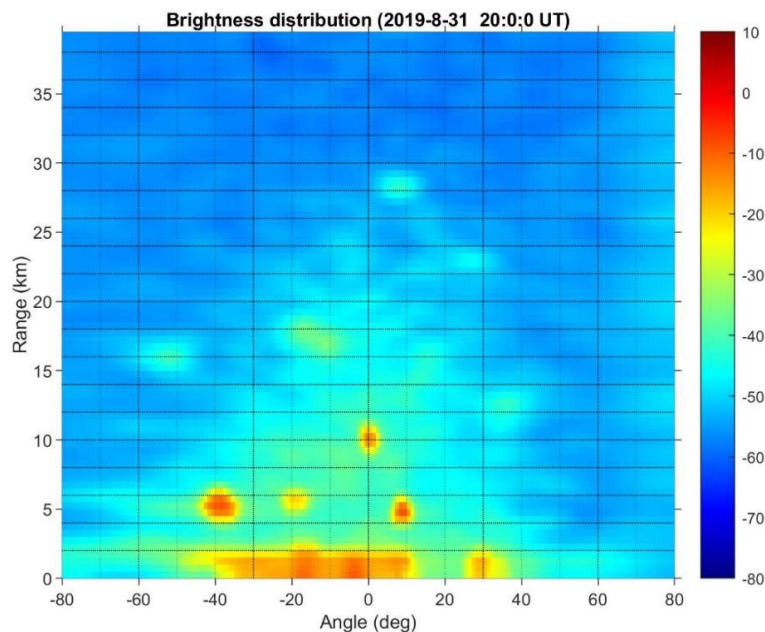


圖 3.2 距離與方位角二維空間域回波強度分布圖

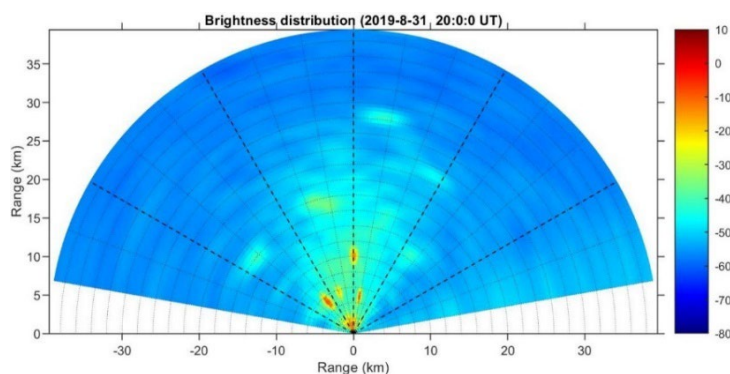


圖 3.3 距離與方位角二維空間域回波強度分布之極座標分布圖

海洋流場對應之一階雷達回波已經過帶拒濾波進行去除，但仍有不少殘餘雜訊被保留下來，比較值得注意的是 2 公里近距離場的回波較強，此部分可能受到堤防或來自旁波瓣的陸地回波影響，導致回波訊號較為強烈，未來可進一步討論如何消除干擾，避免影響圖譜之能量平均結果。

若忽略近岸 2 公里內的回波，如圖 3.2 所示，可見一些較周圍明亮之亮度區塊，這些亮度區塊便可能是船舶回波之訊號。利用連續二維空間域圖譜中心，可以觀察到這些亮度區塊的些微移動，如圖 3.4 所示，三張連續二維空間域圖譜，其中箭號指示的那艘船隻，經由 $\sim 9^\circ$ 位置移動到 $\sim 14^\circ$ 位置。

本計畫二維空間域圖譜的亮度強度其實受到雷達波發射場型與 16 支接收天線收集的回波訊號，進行波束成型合成為一幅圖譜後，於大角度時的功率會降低之影響，也會因為發射功率與回波距離變遠而降低弱化，原則可藉由已知的理論模式來補償，但是仍需要視實際需要操作，以避免過度補償，造成虛假訊號的產生。

理論的海洋回波強度與距離的關係是三次方反比，而船舶等目標物回波強度與距離則是呈現四次方反比，故同樣是雷達回波訊號海面回波保留的訊號比較多，船舶訊號幾乎被距離四次方反比衰減掉了，基於亮度強度於方位角與距離方向上的不均勻衰減特性，若直接以全域固定門檻或未經校正之強度值進行目標判定，將容易造成遠距離或大方位角區域之船舶回波被低估，甚至完全淹沒於背景雜波之中，為降低雷達場型與距離衰減效應對空間域圖譜判讀影響，二維空間域圖譜中引入分區處理與強度正規化等機制，具體作法係考量波束成型後回波強度隨方位角

增加而逐步下降之特性，先將整體空間域依方位角劃分為多個子區間，並於各子區間內分別估算其代表性強度分布，再將回波強度重新套疊至統一的相對尺度的圖譜。此作法可有效消除不同方位區之間，由天線場型與輻射功率差異所造成的系統性偏差，使各區域之回波強度具可比性。

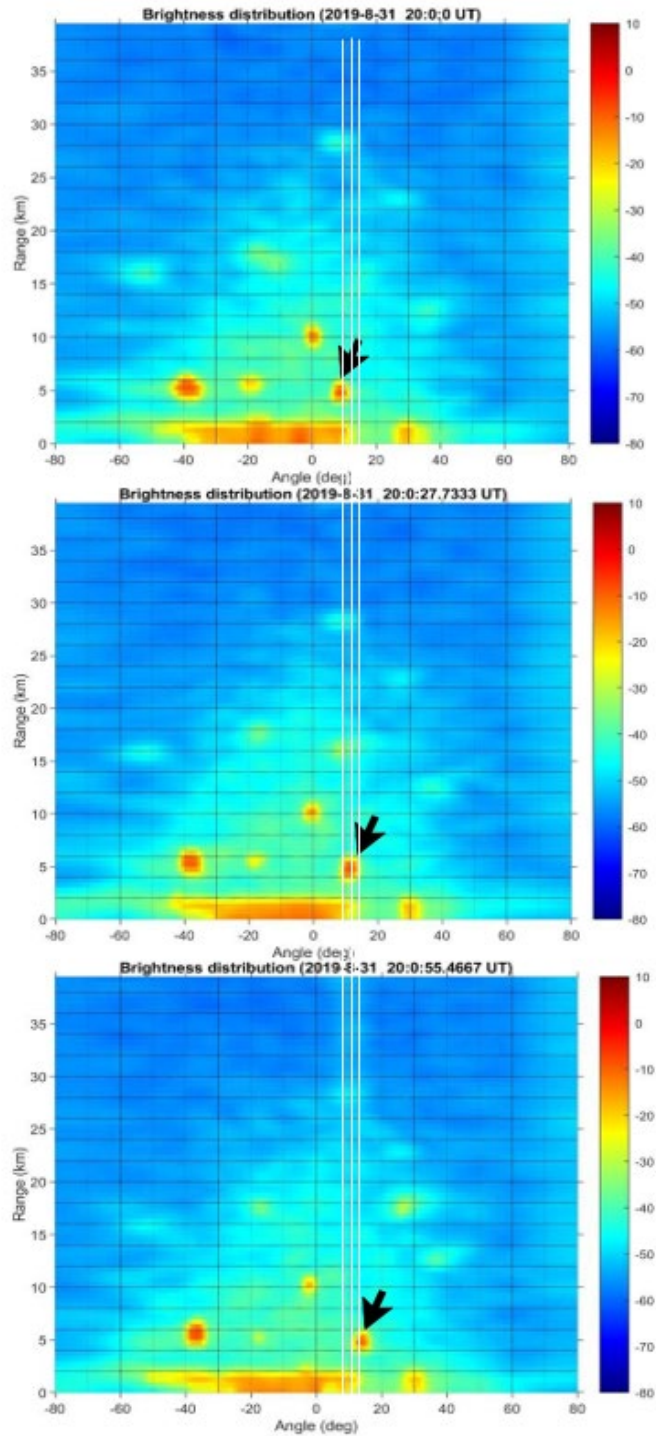
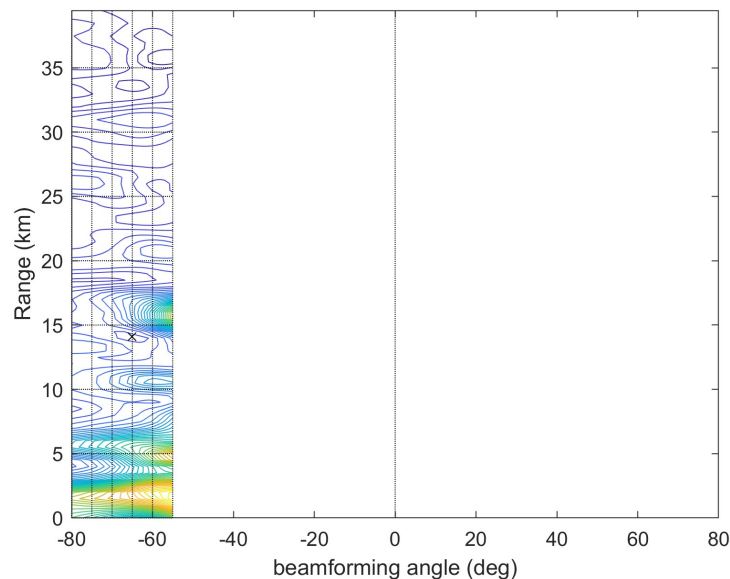


圖 3.4 連續二維空間域圖譜之船舶回波角度位移變化

因此，取用距離的次方來補償強度需要再檢視補償效果，以免海洋的殘餘回波被過度放大，波束場型的補償也須要注意是否過度補償，理論上發射波束與接收場型於大角度功率大幅下降，而實際觀察二維空間域圖譜可見回波強度於大角度時，並未如理論上的數值般下降，因此，不能以理論上的數值來補償。此外，圖 3.2 與圖 3.3 分析情形皆有移除隨時間不變或幾乎不變的成分訊號，但該訊號也有可能為幾乎靜止的船舶或海上目標物之回波值得討論。

3.2 輪廓線定位

有關第 3.1 小節提到圖 3.2 亮度強度深受雷達波發射場型與波束成型於大角度時功率降低影響，本計畫為能盡量可能取得船舶回波的位置，二維空間域圖譜將依角度切分成為 8 個部份來分別執行定位程序，其處理過程，如圖 3.5(左側)、圖 3.6(右側)所示，圖形是以圖 3.2 的二維空間域圖譜為例，製作輪廓線和定位回波中心，定位如符號 × 所示。例如：此案例中的(-80°, -55°)區間只定位出一個中心點(左上圖)，(-5°, 25°)區間則有六個中心點(右上圖)。這些中心點是已通過峰區和峰谷篩選所保留下來的中心點，保留下來的中心點做為後續時空連續性之判斷資料，將會進一步篩除不確定是船舶回波的那些中心點，詳如 3.4 節所述。



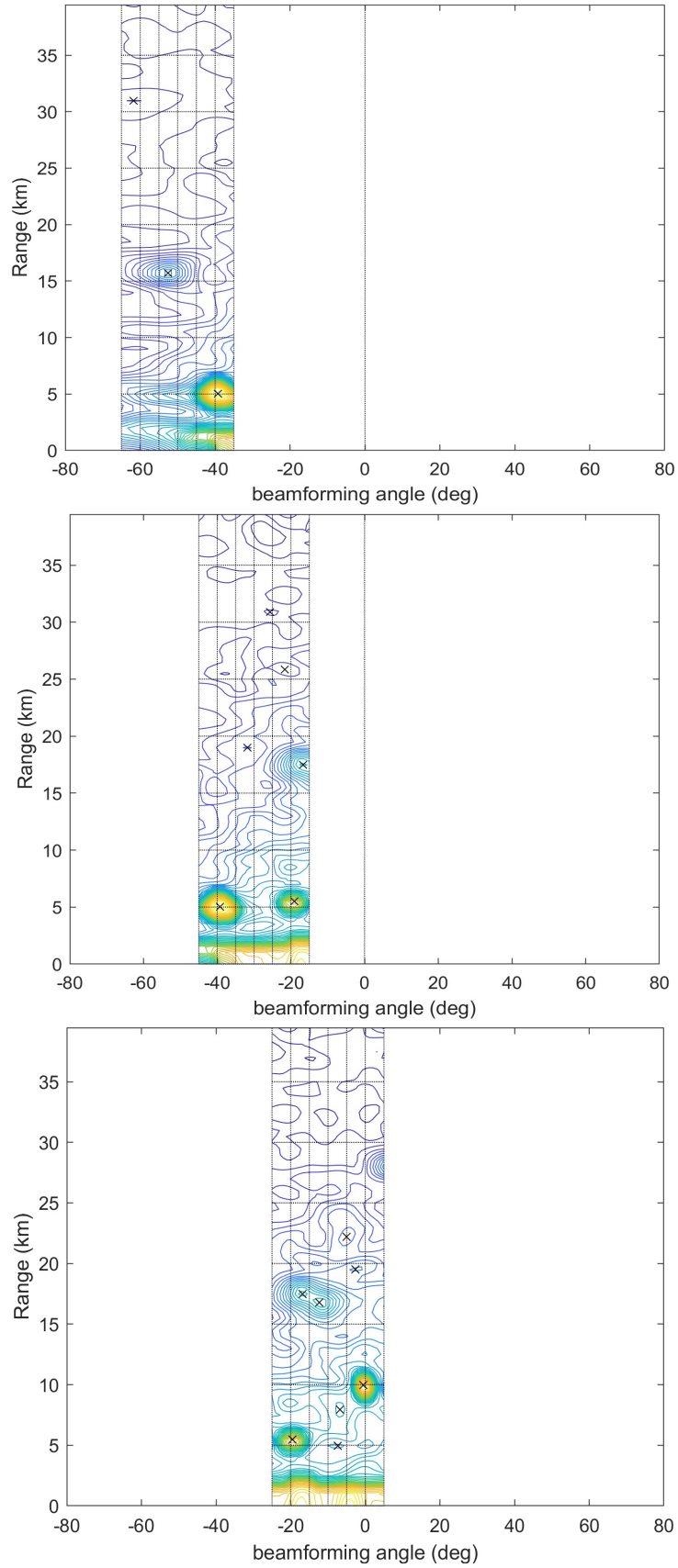
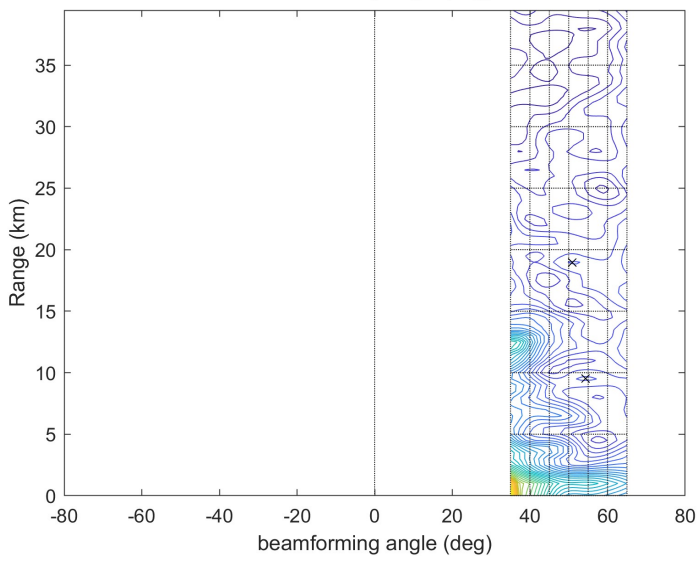
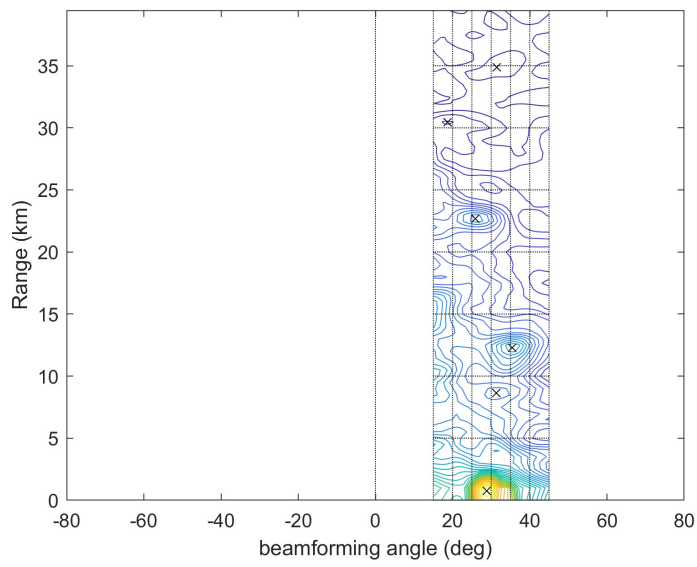
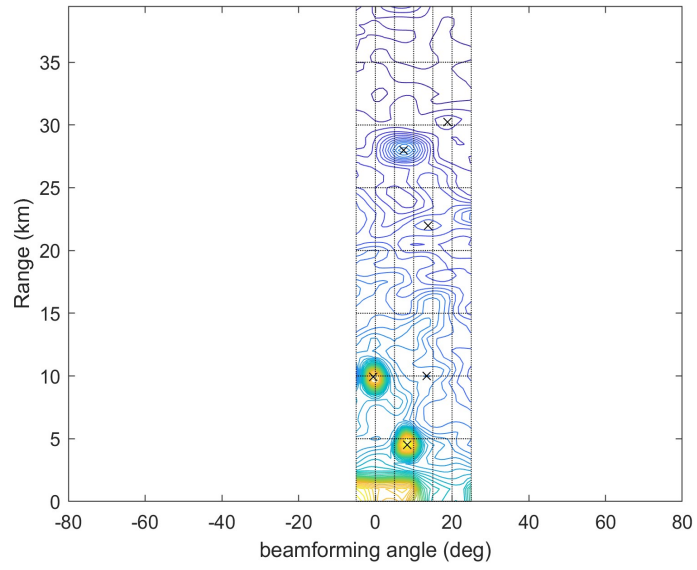


圖 3.5 製作輪廓線與定位回波中心 0 ~ -80 度 (中心以×符號表示)



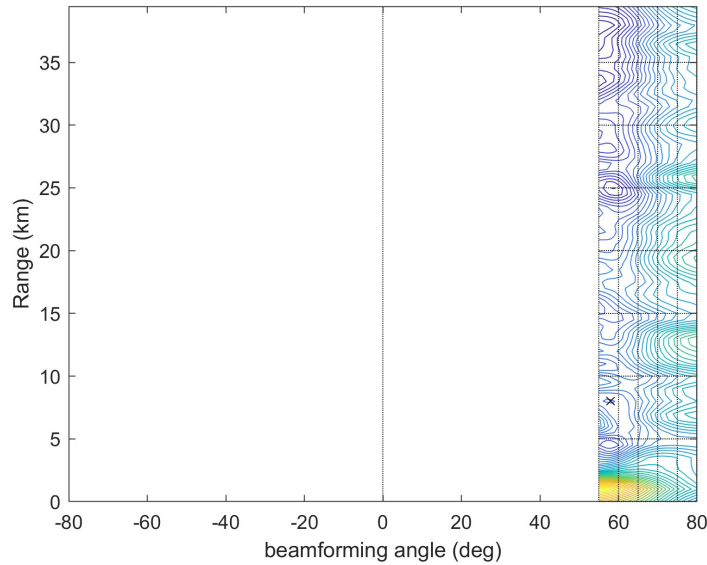


圖 3.6 製作輪廓線與定位回波中心 0 ~ +80 度 (中心以×符號表示)

3.3 二維空間域圖譜調整參數

二維空間域圖譜的分析須要設定白噪增益參數 δ ，其設定值可能會影響產出的二維空間域圖譜之效果。本計畫比較白噪增益參數 δ 為 2、5、10 探討圖譜的變化，經觀察當參數 δ 值增加，圖譜解析度有提高的趨勢，船舶能量訊號更集中，邊緣更加清晰，顯示本研究演算法能有效抑制雜訊，因此，參數 δ 值的變化對不同特性之目標區域產生差異化影響，如圖 3.7 所示，參數 δ 值由小到大變化。

研究分析結果當參數 δ 值越大，可能產出不穩定或不真實的圖譜造成虛假，而且整個圖譜強度也會隨之降低，亦不利於回波較弱的目標區域的定位，舉例來說，於雷達回波較弱且位於較遠距離或較大方位角的目標區，圖 3.7 當中符號①位置所示，當參數 δ 值偏大時，演算法雖能提升解析度，但雷達回波能量卻因正規化與雜訊抑制而顯著降低，導致該類弱目標在圖譜中變得不明顯，甚至可能無法有效辨識；相反地，當參數 δ 值較小時，雖然解析度較低，但能保留目標自身較高的亮度強度，有助於弱回波目標的定位與辨識，爰此，相對於回波本身較強且位於較近距離與小方位角的目標區，反觀圖 3.7 當中符號②位至所示，即使參數 δ 值提高，雷達回波強度仍足以支撐目標顯現，此時採用較大的參數 δ 值可有效抑制旁瓣並提升空間解析度，使目標輪廓與位置更為清晰。

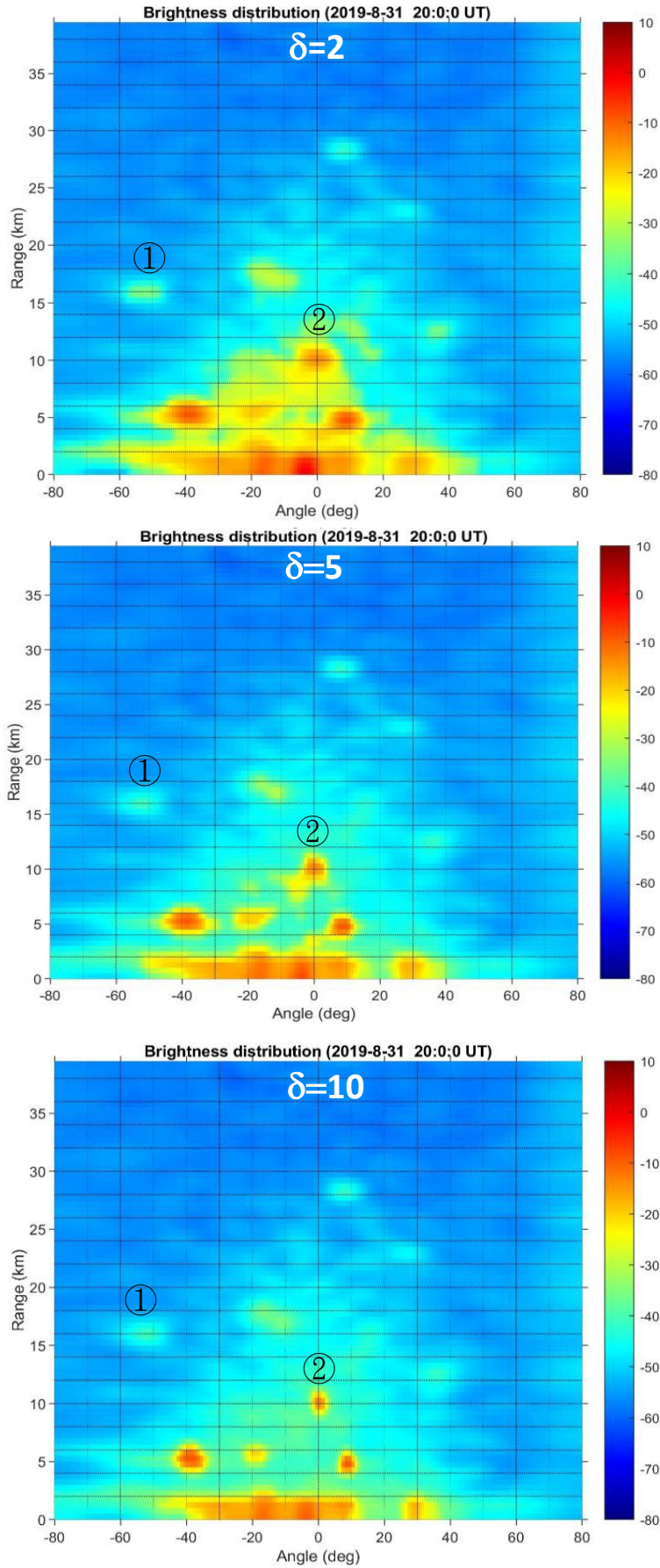
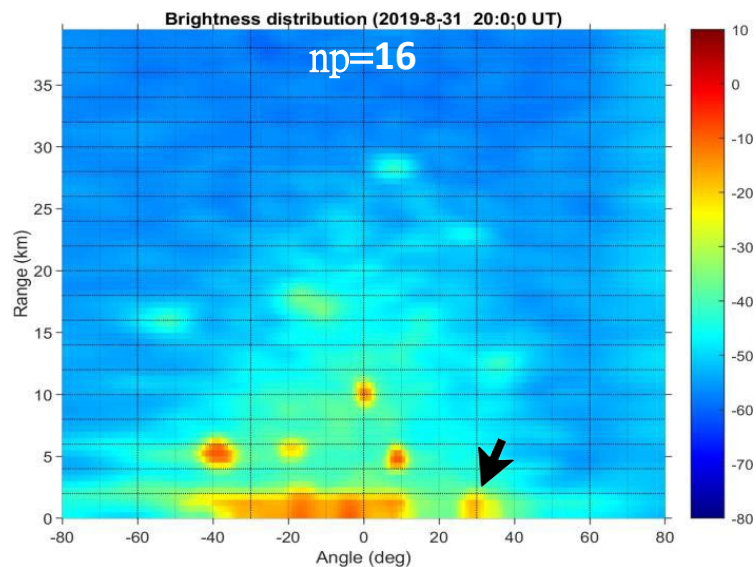


圖 3.7 白噪增益參數 δ 對二維空間域圖譜解析度與回波集中度影響

總括而言，參數 δ 值的選擇實際上反映了解析度與亮度強度之間的取舍關係，理想情況下，參數 δ 值可依據目標所在的距離與方位角進行調整，較近距離與小角度範圍對於目標物的回波比較強烈，此時建議可設定較大的參數 δ 值以提高解析度(現階段分析設定採用 $\delta=10$)，對於遠距離與大角度區域，建議可採用較小的參數 δ 值以維持回波亮度。

3.4 運算資料長度

由於多數船舶處於持續移動狀態，雷達回波分析時所採用的時間資料長度不宜過長，否則目標在空間上的位移將導致能量分散，影響定位與影像穩定性，因此，於有限觀測時間內，目標移動距離已超過系統空間解析單元，導致回波能量跨越多個解析區塊，並產生擴散稀釋，此項現於使用二維空間域圖譜判斷船舶回波時都需要被考量，因此，目前以 30 秒資料為一計算測試，依據臺中雷達的取樣參數，128 取樣點約對應 28 秒長度，後續就以 128 取樣點計算一個結果。實務執行運算時，128 取樣點也可以再切分成 16 點與 32 點產出一張短時間窗之圖譜，再分別平均 8 張與 4 張圖譜，此為非同相積分的概念，可有效增強在該時間尺度內位置變化不大的船舶回波影像，那些變化較大的殘餘海洋回波則可能會進一步被壓制下來。此分析結果之比較如圖 3.8 所示，其實不容易看出其差異，未來需要統計數值的比較，例如清晰度、變異值等統計特徵，不過有些地方仍可看出其些微差異，例如位於 30° 附近、2km 內的色塊(箭號所指)，取 16 點且平均 8 張圖譜之運算下，其色塊確實有比較收斂且凸顯出來。



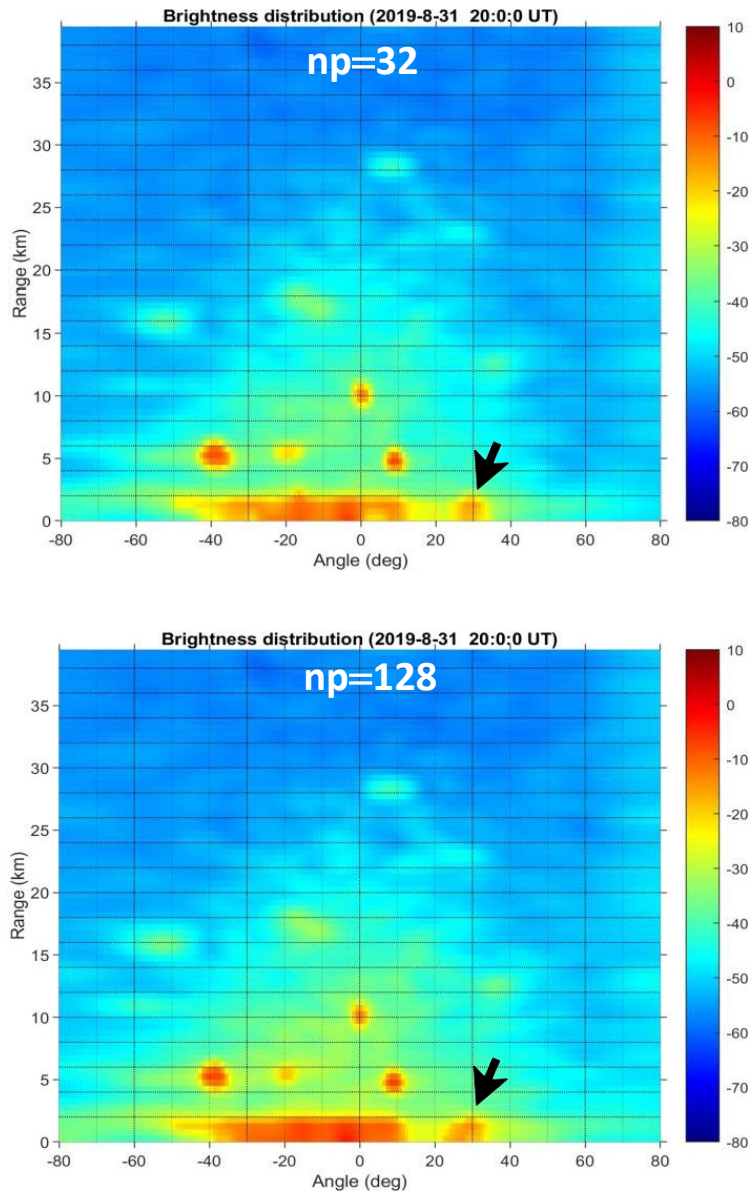


圖 3.8 圖運算資料長度 np 對二維空間域圖譜呈現效果影響

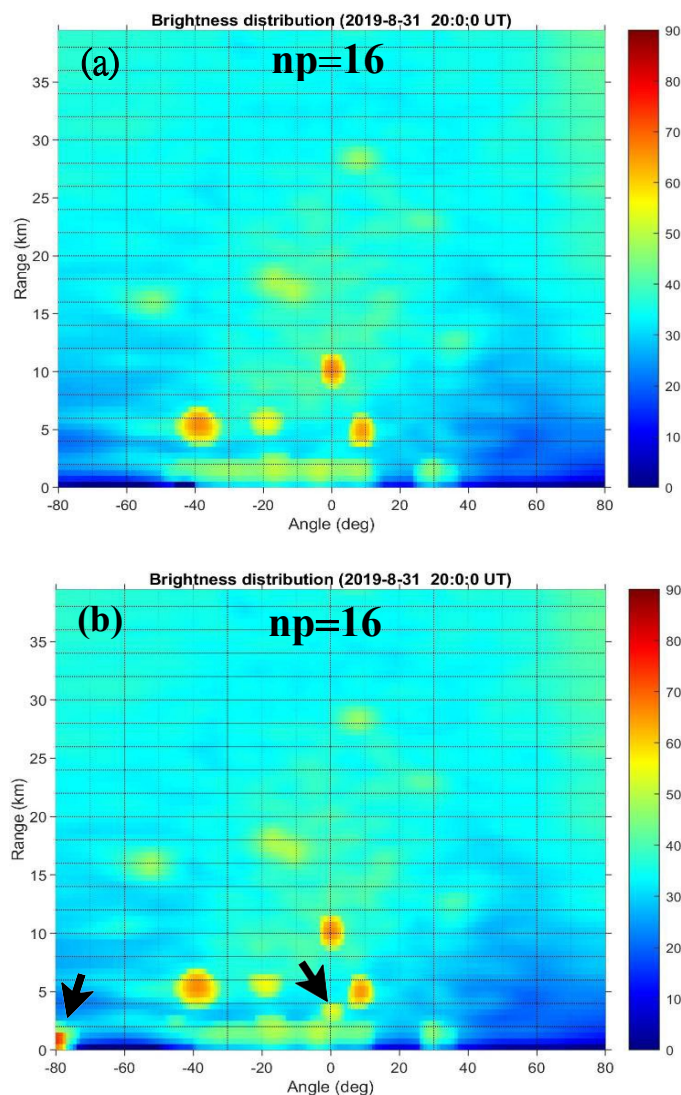
3.5 距離與場型效應之修正

由於二維空間域圖譜的亮度值受到雷達波發射場型與波束成型在大角度時的功率會降低之影響，也會因為發射功率和回波等隨距離降低而弱化，本小節呈現相關的分析結果。為避免過度校正，經過測試之後，距離取其 2 次方補償，角度採用一高斯函數補償，其標準偏差為 60° ，大於 60° 之後維持以 60° 補償之，圖 3.8(長度參數 $np=16$)補償結果，色階提升到 0~90 dB，如圖 3.9(a)因補償關係，補償結果顯見到於遠距離的背景強度提高，但近距離強度值相對減弱。

圖 3.9(a) 所示之二維空間域圖譜，處理過程透過剔除隨時間變化不

顯著之訊號，以降低固定背景回波對分析結果之影響。然而，此類近似時間不變的訊號可能包含實際存在之目標回波，極有可能為移動速度極慢或處於定錨狀態之船舶，其對應的都卜勒速度接近為零，故處理過程將其視為靜態訊號移除。

圖 3.9(b) 顯示保留隨時間不變訊號後，二維空間域圖譜相較於圖 3.9(a) 出現明顯差異，其中兩處色塊變化尤為顯著，特別是箭號標示。左下角色塊推測為陸地回波，因其位於距離約 4 公里，而方位角接近 0° 之色塊，則可能對應於移動緩慢或定錨船舶所產生之回波訊號。



長度參數 $np=16$ ，(a)修正後、(b)修正前

圖 3.9 距離衰減與天線場型校正前後之圖譜比較

3.6 連續圖譜定位船舶位置

關於利用連續圖譜判斷船舶位置之原理，目前分析方式是取連續的 5 幅二維空間域圖譜，並以中間幅為目標圖譜，由於雷達單位距離誤差設定為 500m，角度誤差則依距離而改變，1km 以內為 10° ，1km 之外逐漸依距離增加而降低至 1° 為標準。

(1) 未執行距離與場型校正：

如圖 3.10 所示，為未進行距離衰減與天線場型校正的二維空間域分析，但已先行扣除隨時間變化不顯著之訊號，該圖顯示之二維空間域圖譜代表該時刻的即時分析結果，而黑點則為往前回溯約 5 分鐘內之船舶定位結果，其中黑點尺寸越大，代表其對應時間越接近當時刻的結果。

此外圖 3.10 已剔除距離 2km 內的近岸圖譜定位，2km 之外有幾艘船舶定位與追蹤效果較為顯著，可辨識出數艘船舶，其定位與追蹤效果相對明顯，並可觀察到連續的移動軌跡，例如標示為 ①、②、③……等之目標區域。相對地，部分僅呈現零星分布的定位點，仍需透過前後相鄰之二維空間域圖譜進行比對，或持續累積後續圖譜之定位結果，方能判斷其是否具有連續移動行為及未來的運動趨勢。

造成零星定位結果的可能因素包括：(a)船舶回波可能因船舶姿態變化或海浪起伏等影響，於短時間內未被穩定接收，導致在 5 分鐘分析時窗內僅於少數時刻被觀測到、(b)當船舶之徑向速度落入一階布拉格波頻帶的濾除範圍時，其回波訊號將被一併移除，需待船舶徑向速度脫離該頻帶後，回波才會再次出現、(c)短時存在於海波回波可能因濾除不完全，或追蹤判斷條件尚未臻完善，而被誤判為目標並保留下來。除此之外，除具明顯移動行為之船舶外，標示為 ⑤ 之目標於 5 分鐘內的位移極小，故其定位結果在空間呈現黑點聚集與重疊的現象。

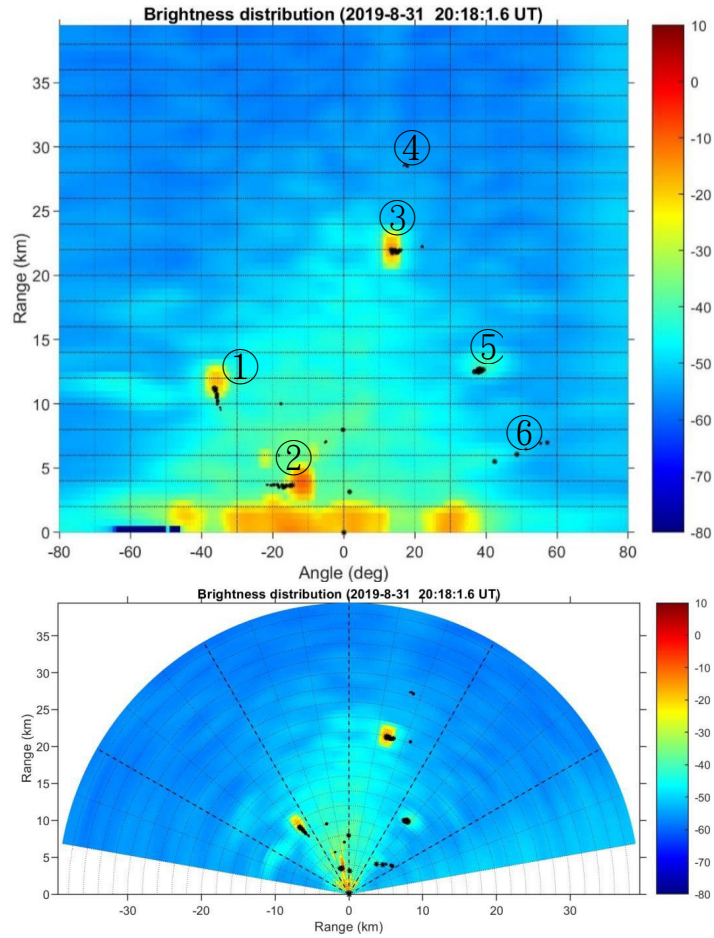


圖 3.10 未執行距離衰減及天線場型校正背景扣除船舶定位追蹤結果

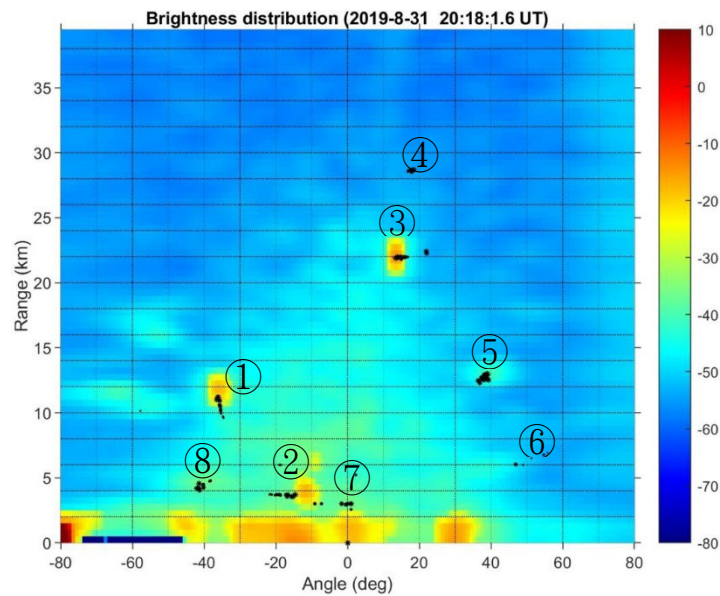


圖 3.11 未執行距離衰減及天線場型校正原始背景船舶定位追蹤結果

如圖 3.11 所示，為未扣除直流訊號之分析圖譜。與圖 3.10 比較，可明顯觀察到新增標示為⑦與⑧之兩個目標物。此差異顯

示，於前處理階段移除隨時間變化不顯著之訊號時，可能同時剔除了部分實際存在之目標回波。由於隨時間變化不顯著之訊號除可能來自系統性雜訊外，亦可能對應於航向變化極小、航速接近零之船舶，或其他相對靜止之海上目標物，因此，在船舶偵測與追蹤應用中，隨時間變化不顯著之訊號是否具有一定之保留價值或全面移除仍需審慎評估。

(2) 執行距離與場型校正：

圖 3.12 與圖 3.11 為相同資料，僅差異再有無執行距離與天線場型校正，並保留隨時間變化不顯著之訊號，圖 3.12 為有執行，因此，其色標尺度提高至 0~90 dB。與圖 3.9 比較，可明顯觀察到新增⑨號目標物之顯示，然而，原本可辨識之⑥號目標物則未能呈現。此結果顯示，距離與場型校正對於目標顯示之影響仍需進一步檢驗與評估。

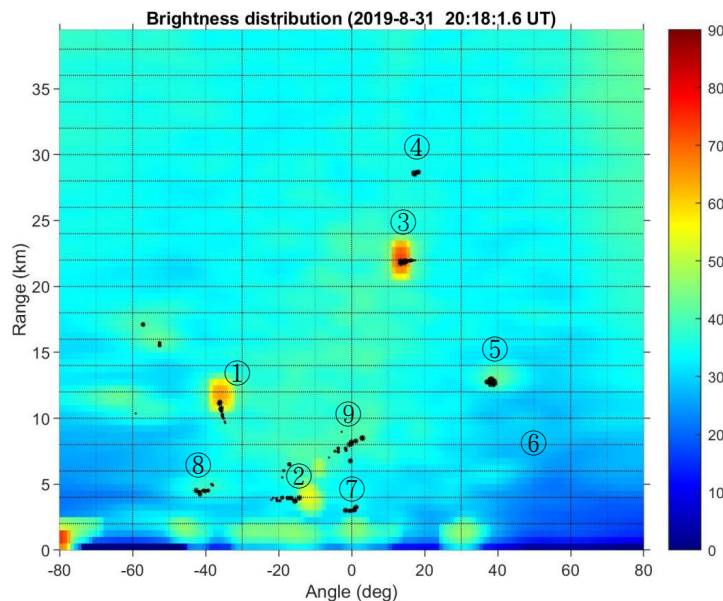


圖 3.12 執行距離衰減及天線場型校正原始背景船舶定位追蹤結果

3.7 二維距離角度圖船舶航跡

將最後之船舶辨識分析結果，彙整 30 分鐘內所有距離方位角之空間亮度分布圖，其整合結果如圖 3.13 所示。於定位過程中，進一步考慮船

船位置於時間與空間上的連續性，以及雷達回波於相鄰距離格點間可能產生之能量洩漏效應，藉此篩選出較可能對應於實際船舶之輪廓中心。為進一步驗證定位結果，亦將本計畫蒐集之 AIS 航跡資料疊加於圖中，其中紅色與黑色虛線分別代表向南與向北航行之船舶。

然而，仍可發現部分船舶或目標未能被雷達成功偵測，或因回波強度偏低而難以辨識，這類目標多半位於較遠距離，或處於雷達主波束之外側方位角。雷達回波強度與目標之雷達散射截面積(RCS)密切相關，而雷達散射截面積(RCS)會受到船舶尺寸、姿態與相對入射角等多項因素影響，因此，當船舶穿越雷達波束時，其回波強度隨方位角變化而呈現明顯起伏。

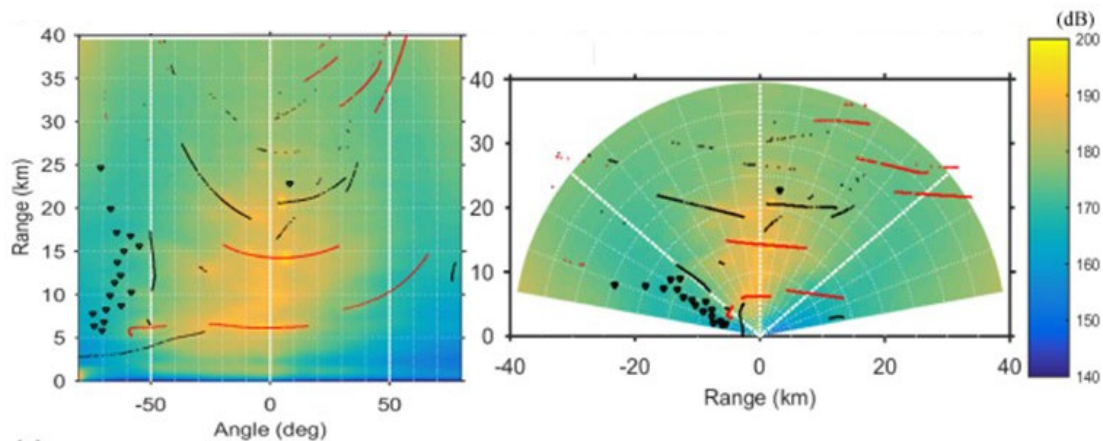


圖 3.13 二維距離角度圖船舶航跡圖

3.8 船航跡船舶航行速度和方位之計算

本計畫依據臺中雷達的取樣參數，每次計算 128 取樣點對應約 28 秒長度，故以 30 秒資料為一筆計算單元 $[(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), \dots, (X_n, Y_n)]$ ，換句話說，資料於不中斷情況下理想情況便是每分鐘產出 2 筆船舶座標點，5 分鐘 10 筆資料 $[(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_{10}, Y_{10})]$ ，並以最後船舶座標點 (X_{10}, Y_{10}) 做為計算的參考位置，找到 5 分鐘前第 1 筆資料的船舶座標點 (X_1, Y_1) ，並利用頭尾座標計算位移量差 $d_x = X_{10} - X_1$ ，與 $d_y = Y_{10} - Y_1$ ，除以時間差 ($dT = 5$ 分鐘) 便能獲得船舶的平均速度，如(3.1)式所示，方位則利用反正切函數(\arctan)去計算頭尾點的位移差獲得船舶行進方向，如(3.2)式所示，如圖 3.14 所示，上方數字為速度，下方數字為行進方向。

$$V_i = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} / dT \quad (3.1)$$

$$\theta = \tan^{-1}(d_y/d_x) \quad (3.2)$$

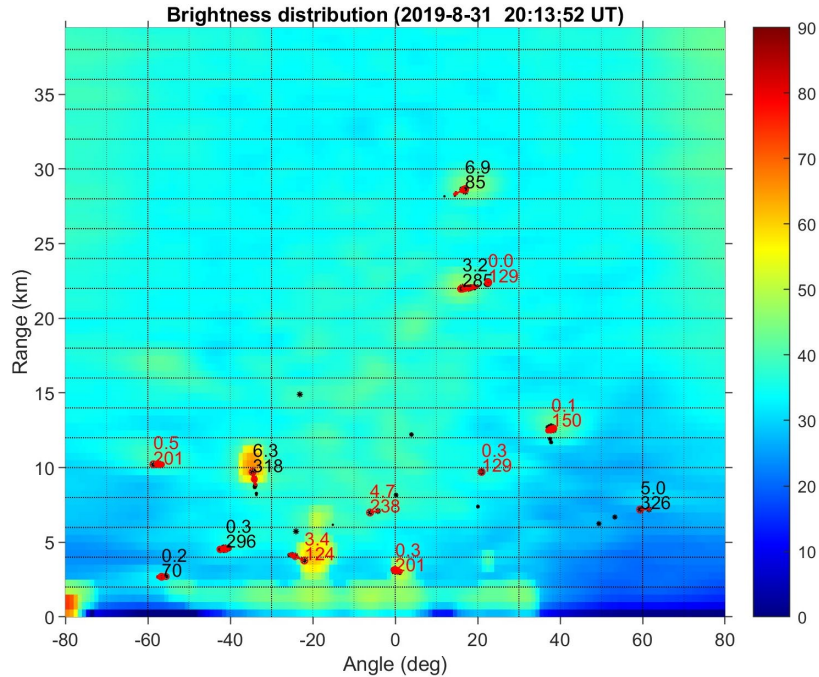


圖 3.14 船航跡船舶航行速度和方位

3.9 AIS 資料原則

AIS 系統具備導航、助航及船舶動態資訊傳輸功能，除可提供船舶識別、位置、速度及航向等基本資訊外，亦可進一步應用於海上交通流分析、事故與異常行為判斷、偏航與擱淺預警、歷史軌跡回溯、做為海事案件調查、船舶監控及避碰決策等領域應用。AIS 發報機係透過頻率 VHF 的頻道廣播船舶資訊，同時接收周邊他船訊息，其中靜態資訊的船舶水上識別碼(Maritime Mobile Service Identity, MMSI)為船舶辨識之重要欄位，能用於確認船舶身分，與掌握船舶之基本辨識資訊；動態資訊之船位報告(Position Report)中則包含經緯度、對地速度(Speed over Ground, SOG)、對地航向(Course over Ground, COG)、船艏向(Heading, HDG)及訊息傳送時間標記等參數，為本計畫雷達偵測結果比對驗證之重要依據。本計畫使用 AIS 資料，主要取自於船位報告之動態資訊，包含 MMSI、經度、緯度、對地速度(SOG)、對地航向(COG)、船艏向(HDG)、船舶種類代碼(Ship Type)，以及訊息時間戳記等欄位。透過 AIS 船舶類別編碼表顯示，如表 3-1 所示，船舶種類代碼可做為船型判別之輔助資訊，例如：客輪(Passenger, 60~69)、貨船(Cargo, 70~79)、油輪(Tanker, 80~

89)、漁船(Fishing, 30)、遊艇(Pleasure craft, 37)、高速船(High Speed Craft, HSC, 40~49)、港勤船(Port Tender, 53)等，有助於後續區分客船、貨船、油輪、拖船、漁船等船舶性質，當雷達偵測到目標後，能搭配 AIS 船型資訊，判斷不同船型是否具有不同回波特性或追蹤特徵。

表 3-1 AIS 船舶類別編碼表

編碼	船舶種類
0	無法取得或未設定 (Not available, default)
1-19	保留給未來使用 (Reserved for future use)
30	漁船 (Fishing)
31-32	拖帶作業船 (Towing)
33	挖泥或水下作業船 (Dredging or underwater ops)
34	潛水作業船 (Diving ops)
35	軍用船 (Military ops)
36	帆船 (Sailing)
37	遊艇或休閒船 (Pleasure craft)
50	引水船 (Pilot Vessel)
51	搜救船 (Search and Rescue vessel)
52	拖船 (Tug)
53	港勤船 (Port Tender)
54	防污染作業船 (Anti-pollution equipment)
55	執法船 (Law Enforcement)
56-57	地方船舶保留碼 (Spare - Local Vessel)
58	醫療運輸船 (Medical Transport)
59	非戰鬥船舶 (Noncombatant ship according to RR Resolution No. 18)
60-69	客船 (Passenger)
70-79	貨船 (Cargo)
80-89	油輪或液貨船 (Tanker)
90-99	其他類型 (Other Type)

另需要注意部分，AIS 資料更新頻率並非固定不變，而係與船舶航行狀態及航速密切相關。依據 ITU-R.M.1371 規定，船舶於錨泊或停泊狀態，且航速不超過 3 節時，AIS 資料約每 3 分鐘回報 1 次，當航速介於 2 至 14 節時，約每 10 秒更新 1 次，期間若船舶發生航向改變，則可縮短為約 3.3 秒更新 1 次；若當航速介於 14 至 23 節時，則約每 6 秒更新 1 次，期間若有航向改變，則可縮短為約 2 秒，但當航速大於 23 節時，無論是否改變航向，更新頻率均約為每 2 秒 1 次。由此可知，AIS 資料的回報時間間隔會隨船速與操船狀態改變，因此，計畫雷達資料與 AIS 資料進行比對時，需要將時間同步及更新頻率之差異納入考量。在時間同步方面，AIS 訊息時間採用 UTC(Coordinated Universal Time, UTC) 世界協調時間，因此，AIS 資料與雷達系統觀測時間，以及資料庫紀錄時間將統一轉換至相同時間基準後，再進行資料時間之匹配與分析，以避免時區設定、系統時間差異或資料寫入延遲造成時間偏移之現象，時間性之處理原則，2 種不同性質資料比對時，係以雷達偵測時間為基準，於設定之容許時間視窗內搜尋相鄰 AIS 船位資料，並以最接近該時刻之 AIS 訊息做為配對依據，再輔以對地速度(SOG)、對地航向(COG)、船艏向(HDG)及航跡連續性進行合理性檢核，以提升配對結果之一致性與可靠性。

考量 AIS 資料可能受到通訊遮蔽、訊號遺失、更新率不足、設備異常、人為關閉或船端輸入錯誤等因素影響，本計畫於使用 AIS 資料之前，需要先進行資料品質篩選與異常值檢核，其處理原則包括：保留具有有效 MMSI 碼、有效時間戳記、經緯度及基本動態資訊之資料，剔除座標缺值、重複報文，以及明顯超出研究範圍之異常船位；檢查航跡連續性，排除短時間內出現不合理之大幅位移、速度突增或航向劇烈跳變之異常跳點；另對於長時間未更新、訊號中斷或疑似人為關閉 AIS 設備之資料，則不納入精度驗證樣本，以降低異常資料對分析結果之干擾，因此，比對所呈現之雷達與 AIS 一致性結果，應解讀為雷達偵測結果相對於 AIS 資料之吻合程度，而非對船舶真實位置或航跡之絕對精度判定，因為 AIS 雖具有一定應用價值，但仍可能因為回報間隔差異、訊號漏失、設備狀態與人為因素，導致不確定性，仍有改善空間，應避免實務應用上過度解讀系統效能。

第四章 應用機器學習於船舶辨識分析初探

第三章所建立二維空間域圖譜與船舶回波定位流程，提供可視化之雷達影像資料來源；本章則進一步探討該類雷達影像是否具備導入機器學習自動辨識之潛力，做為未來智慧化船舶偵測模組之前期探索。因此，傳統船舶偵測研究以門檻判斷或等值線輪廓分析為核心的方法，雖然已能於多數情境當中偵測具顯著的回波特徵目標，但一旦海面觀測環境紛紜，導致海雜波結構複雜，目標回波能量偏弱，或多艘船舶同時出現以致於回波相互重疊情況時，僅仰賴固定或經驗式參數設定，往往難以同時兼顧偵測穩定性與辨識完整性，此限制亦突顯傳統方法於高度非線性與多變環境的調適仍有進步空間。

近年來，機器學習與深度學習方法，因其具備自動學習特徵表示與非線性判別能力，逐漸被應用於影像辨識領域，對於雷達目標偵測領域下亦能適用，充分展現出機器學習於複雜背景多目標辨識之潛力。相較於傳統演算法需明確定義特徵與判斷規則，深度學習模型僅需要透過監督式學習方式，便可讓電腦程式輔助學習影像辨識，並達成識別影像於目標在不同尺度、能量分布與背景條件的差異，從而獲得研究人員所需的影像資訊，提供另種補足既有方法限制之可能途徑。基於上述背景，本章探討，並非以建立完整且高精度之船舶定位模型為目標，而是做為一項應用機器學習於船舶辨識的初步探索，故本章研究重點在於確認深度學習方法於本研究資料型態中的可運行性與基本辨識能力，並初步觀察其在多目標情境下的表現特性與潛在限制。

本計畫選用 YOLOv4 作為船舶目標偵測模型，其主要原因在於本研究人員使用開發與測試採用 MATLAB R2023b，依據 MATLAB 官方深度學習工具箱之支援範圍，原生訓練與推論流程僅能支援 YOLOv2 至 YOLOv4 架構，如表 4-1 所示，對於後續版本，如 YOLOv5 以後之模型，需額外仰賴 PyTorch 或 ONNX 轉換機制，增加系統整合與實作難度，爰此，本計畫選擇於 MATLAB YOLOv4 架構進行船舶辨識初探研究，如圖 4.1 所示；相較之下，若選擇 YOLOv5 及其後續版本雖在效能上有所提升，但其主要實作環境為 PyTorch，需另外安裝 PyTorch 程式，或透過 ONNX 或其他轉換方式才能於 MATLAB 中使用，並非 MATLAB

原生支援架構，可直接使用 PyTorch 環境下的 YOLO，或直接使用能直接支援更高版本的 Python 程式語言，因此，不納入本計畫研究範圍之內。

表 4-1 MATLAB R2023b 與 YOLO 架構表

項目	MATLAB R2023b
YOLOv1	不支援
YOLOv2	支援
YOLOv3	支援
YOLOv4	支援
YOLOv5 以上	需額外仰賴 PyTorch 或 ONNX 轉換機制

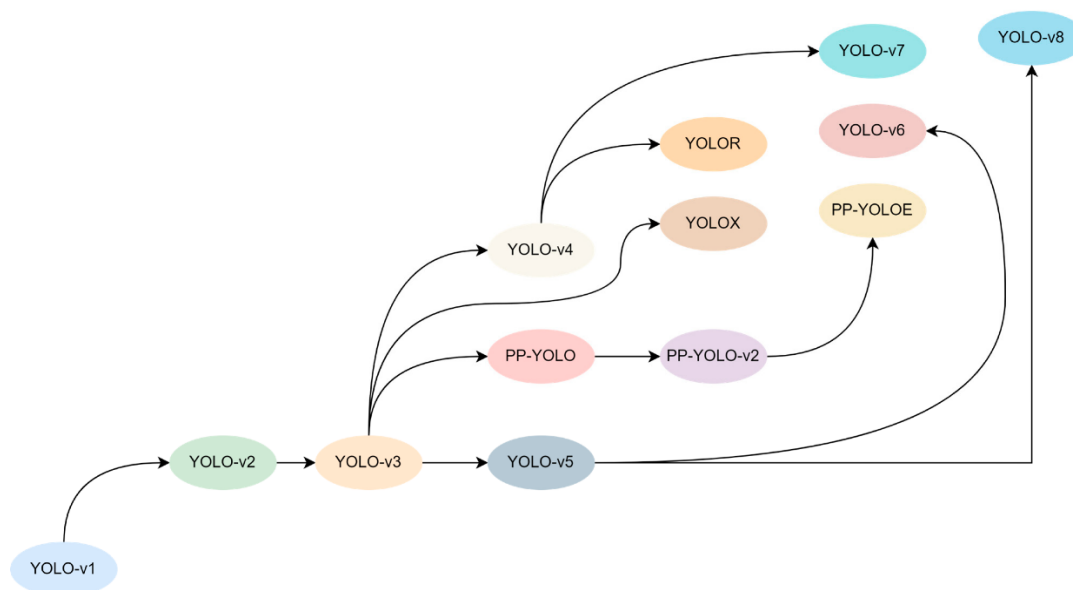


圖 4.1 YOLO 模型研究演進過程示意圖(資料來源:Feng Xiao 2023)

4.1 資料來源與標註方式

本計畫使用之影像資料為雷達量測結果轉換之距離方位角(RA)空間亮度分布圖，影像格式為 JPG，該類影像以二維平面方式呈現雷達回波於距離與方位角空間之能量分布情形，用以雷達觀測範圍內船舶或非海洋回波與海洋雜波的特性。於目標類別設定上，本(114)年度計畫目標聚焦於船舶目標之偵測與定位，因此，僅定義單一目標類別 ship，以避免

多類別設定對模型訓練造成不必要之複雜度，並使訓練結果能專注於船舶回波特徵之學習，本小節資料來源與標註處理方式，分述說明如下：

(1)樣本選取作業：

本計畫以具可辨識船舶回波特徵之距離方位角(RA)空間亮度分布圖做為主要資料來源，並優先參酌連續圖譜變化及 AIS 資訊，輔助判釋船舶目標之位置與移動合理性，對於回波過弱、邊界不清、受強雜波嚴重干擾，或難以明確判定是否屬船舶目標之影像，原則列為待確認或排除樣本，以降低資料不確定性對模型訓練之影響，提升資料集之可用性；另外，為避免樣本過度集中於少數明顯目標，亦儘可能納入不同距離、不同方位及不同時段之船舶影像，以增加資料集之代表性。

(2)資料清洗作業：

本計畫針對已標註影像進一步檢查是否存在重複樣本、標註框明顯偏移、框選範圍異常、類別標記不一致或影像品質不佳等情形，視需要進行人工修正或剔除，以維持訓練資料之正確性與整體品質，惟現階段資料清洗品質仍有持續精進空間，後續將進一步強化資料清洗作業流程，後續資料清洗之作業流程亦將持續精進資料前處理、雜訊排除、標註準則建立及品質檢核機制，逐步完善高品質雷達船舶訓練資料集之建置，以做為提升人工智慧模型辨識效能、穩定性及後續實務應用能力之基礎。

(3)標註作業：

標註作業係使用 MATLAB 提供之影像標註(Image Labeling)工具進行，如圖 4.2 所示，該工具於 ROI 標籤定義設定畫面支援矩形(rectangle)、多邊形(polygon)、點(point)、線段(line)與像素級(pixel-level)等多種標註型態，如圖 4.3 所示，透過選擇不同的標註方式(Label Type)，以配合不同的人工智慧模型訓練需求；然而，考量後續採用之深度學習模型為以物件偵測為核心之 YOLO 架構，其輸入標註格式以矩形邊界框為主，並以人工監督式學習包覆主要船舶回波亮區、避免納入過多背景雜訊為原則，標註完成後，並進行人工檢視與必要修正，以降低因標註偏差所造成之

模型學習誤差。本計畫統一採用矩形標註方式進行船舶目標之標記，此做法可在標註效率與模型需求之間取得良好平衡，同時確保標註資料能直接對應至後續模型訓練之流程。

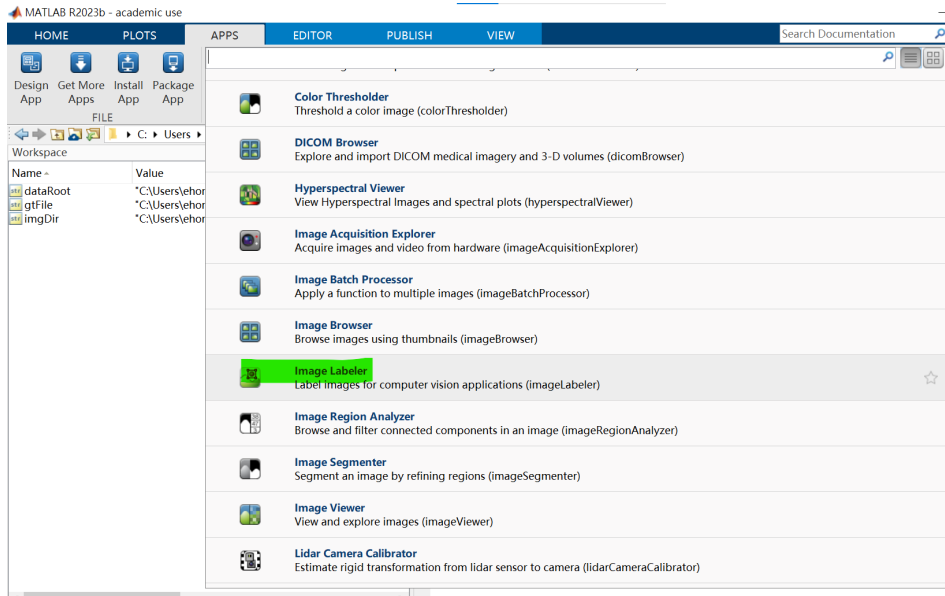


圖 4.2 MATLAB 提供之 Image Labeler 工具

其中圖 4.3 採行做法，每張 RA 空間亮度分布圖，凡可辨識之船舶回波目標，皆以矩形框標註其空間範圍，若同一影像中存在多艘船舶，則分別建立多個矩形進行標記。標註完成後，所有標註結果將儲存為 MATLAB 之 groundTruth 資料結構，內含影像來源資訊、目標類別定義以及對應之邊界框座標，做為後續資料轉換與模型訓練之前處理基礎。

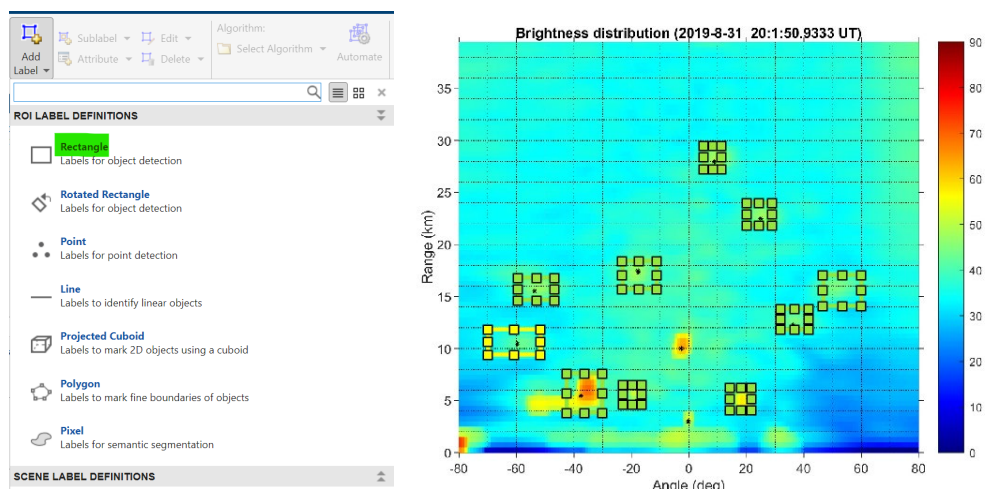


圖 4.3 Image Labeler 工具標註情形

上述完成標註與品質檢核之資料，後續再配合資料格式轉換、影像資料庫(imageDatastore)建立及前處理函式設定，做為 YOLOv4 模型訓練之輸入資料。透過先行辦理樣本篩選、資料清洗與標註品質控管，可使後續模型訓練更能反映船舶目標特徵，並降低雜訊樣本對模型收斂與辨識結果之干擾。

4.2 訓練資料格式準備與前處理流程

由於 MATLAB 深度學習工具箱對於物件偵測模型之訓練資料格式具有明確與嚴格規範，因此，訓練資料在進入模型前，必須透過適當之資料整合與前處理，本計畫於訓練階段曾遭遇多次資料格式不符所導致之錯誤，因此，本小節將完整說明訓練資料之組成方式與資料前處理架構，以確保影像資料與標註資訊在進入模型前具有一致之格式與尺寸。

(一)在影像資料部分，所有距離方位角(RA)空間亮度分布圖，首先以 imageDatastore 方式進行讀取，意即統一管理影像檔案路徑與批次讀取方式管理，影像在進入訓練流程前，皆需調整為模型所需之固定輸入尺寸。標註資料以 4.1 小節所建立之 groundTruth 物件中擷取。其中 groundTruth 內部以表格形式儲存每張影像對應之目標標註資訊，包含矩形座標與類別名稱，將其轉換為可與影像資料同步讀取之標籤資料結構，並與 imageDatastore 結合形成訓練用資料集。

(二)MATLAB 物件偵測模型在訓練時，對於回傳格式具有明確要求，必須回傳下列 3 個欄位，若資料集任 1 筆資料未依格式回傳或格式維度不一致，將導致訓練程序即時中斷。：

(1)輸入尺寸(inputSize)=[H,W,N]，分別表示為高度 416 素數、寬度 416 素數、N 為 3 通道表示 RGB (此設定)，N 若等於 1 表示為原生灰階(非此設定)。

(2)盒子(boxes)= N×4 之矩形框座標矩陣，格式為[x,y,w,h]

(3)標籤(labels)=N×1 之類別標籤向量，對應每個標註型態之目標類別，N 意即表示為該影像所標註之船舶數量。

為符合上述規範，本計畫設計一套前處理流程(preprocessPair)，於

資料讀取階段同步完成影像縮放與標註座標轉換，該流程首先將原始影像重新調整至指定輸入尺寸，並依影像縮放比例同步修正標註矩形的位置與寬高，使標註結果仍能正確對應於縮放後之影像空間，同時需要確保標註標籤數量與順序保持一致。以避免因資料格式不符而造成之訓練錯誤。

4.3 網路架構與訓練設定

本計畫之船舶目標偵測模型採用 YOLOv4 架構，選用卷積神經網(CNN) 網路骨幹(backbone)的 csp-darknet53-coco 預訓練模型，進行船舶辨識模型之再訓練，此為一種監督式學習架構與遷移學習之方式，藉由保留其對一般影像特徵之抽象能力，並重新調整高層特徵以符合本研究之船舶偵測需求。

訓練上將目標類別設定單一類別 ship，以降低模型訓練之複雜度，並使模型能專注於學習雷達空間亮度分布圖的船舶回波之關鍵特徵。考量不同資料集之目標尺度分布差異，本訓練未直接沿用原始預訓練模型之預設定，而是根據訓練資料矩形標註之實際尺寸分布，若利用模型學重新估計錨點(anchor) 數量需要較完整的資料數據，本訓練測試以快速可控的 K-means 統計方式，以涵蓋適合船舶大小尺寸，採用錨點設定值為 9 進行分群，以兼顧不同距離與尺度船舶回波之偵測需求。模型訓練採用隨機梯度下降法(Stochastic Gradient Descent with Momentum, SGDM) 做為最佳化方法，相關訓練參數設定如下：初始學習率設定為 10^{-4} (並視收斂情形調整至 10^{-3} 比較)，最大訓練回合數(MaxEpochs)設定為 30，以平衡模型收斂與過度擬合之風險。於模型建置與訓練過程中，亦觀察到部分與 MATLAB 深度學習框架相容性相關之限制。初期訓練嘗試中，若直接沿用預設之 Batch Normalization 設定(簡稱 BN)，此設定就係文獻回顧提及 BN 為批量特徵正規化層，用以增加模型深度網路訓練穩定與提升收斂效率，但模型在小批次資料條件時容易出現統計量不穩定，導致訓練中斷或失效。為改善此問題，將 BN 批量特徵正規化層設定為移動平均(moving)，以確保輸入影像之數值分布平順化使訓練穩定性。綜合而言，本計畫成功建構一套可穩定訓練之 YOLOv4 船舶偵測模型，相關設定亦反映實際建置過程對訓練穩定性與框架相容性問題。

4.3.1 訓練結果與收斂說明

為評估 YOLOv4 船舶偵測模型之訓練行為與收斂情形，本計畫記錄並分析訓練過程中之損失函數(loss)變化，以瞭解模型於訓練資料學習之趨勢。受限於本計畫可取得標註雷達距離方位角空間亮度分布圖之影像數量，故訓練資料規模相對有限，模型訓練總疊代數量為 120 次，訓練 30 個回合，由訓練結果可觀察到損失函數於訓練初期即快速下降並趨於穩定，顯示模型雖然於樣本數量有限條件下仍具備基本擬合能力。然而，此收斂結果主要反映模型對訓練資料的記憶，後續仍需透過更多樣本或其他驗證方式評估其泛應用性的效能，如圖 4.4 所示，顯示模型於訓練階段中，訓練損失值隨訓練迭代次數(iteration)及訓練回合數(epoch)之變化曲線。

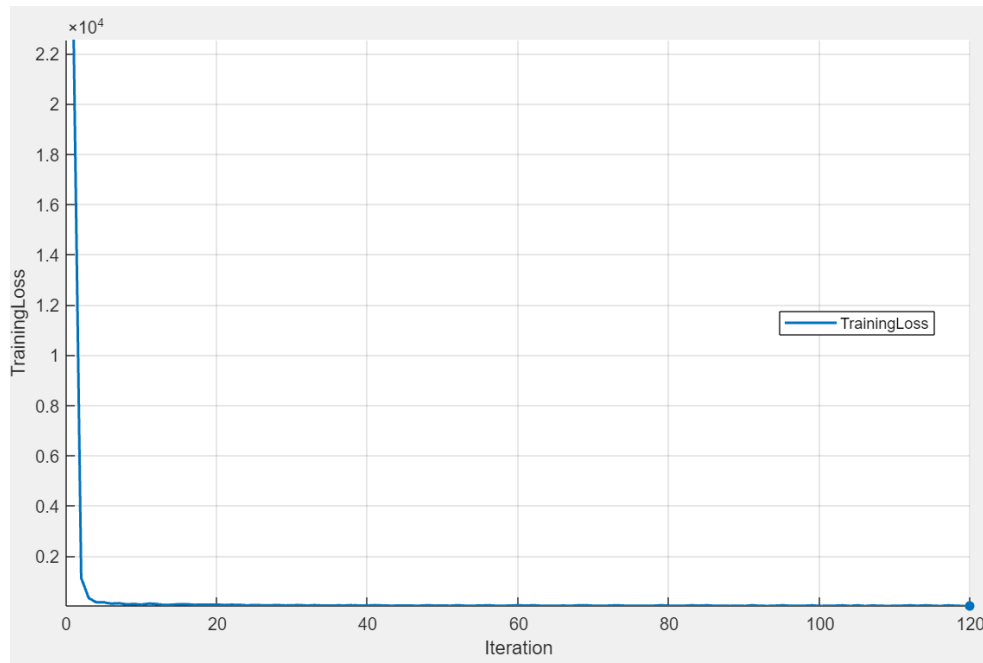


圖 4.4 訓練損失值隨迭代次數及訓練回合數之變化曲線

由訓練曲線可觀察到，模型在訓練初期損失值下降幅度較為顯著，顯示遷移學習初始權重能有效協助模型快速捕捉距離方位角空間亮度分布圖船舶回波之基本特徵，隨著訓練進行，損失值下降趨勢逐漸趨緩，並於後期呈現相對穩定狀態，顯示模型已逐步收斂。

初步結果顯示，隨著訓練回合數 5 次、10 次、15 次、20 次、25 次與 30 次增加，模型於訓練資料訓練損失值持續下降，代表模型已具備對現有訓練樣本進行有效擬合之能力。值得一提的是，已現有資料量

的訓練損失之收斂，並不必然代表模型具有良好之泛應用化的能力，仍需要進一步探討模型是否可能產生過度擬合(overfitting)現象，因此，本訓練過程中之收斂行為視為模型可行性與訓練穩定性之初步驗證，而非最終效能指標，建議後續透過獨立測試資料、實際案例比對或其他輔助評估方式，檢視模型於不同觀測情境下之實際偵測表現。

4.4 閾值與非極大值抑制案例應用情形

完成模型訓練後，本訓練進一步進行船舶目標之推論與後處理，以將模型輸出之候選偵測結果轉換為可解讀之最終船舶定位資訊。此階段使用 MATLAB 提供之 detect 函式，將訓練完成之 YOLOv4 偵測模型套用於測試影像，並輸出每張影像可能之船舶候選框，以及其對應類別與信賴度分數。推論時可透過設定閾值(Threshold)參數，控制模型輸出之最低置信度門檻。

- (1) 閾值代表模型對於目標存在之信心程度下限，如圖 4.5 所示；當閾值設定較低時，模型將保留較多低置信度之候選框，有助於降低遺漏偵測之風險，但同時也可能增加誤報數量。反之，若閾值設定較高，則可有效抑制低信賴度之偵測結果，使輸出結果更為保守，但可能犧牲相對弱回波或邊緣目標之偵測能力。因此，閾值設定需在偵測完整性與誤報控制之間取得平衡。
- (2) 由於模型於案例應用情形時，可能於同一目標位置產生多個重疊之候選框，本計畫後續使用非極大值抑制(Non-Maximum Suppression, NMS)，做為後處理步驟，以合併或移除高度重疊之偵測結果。實作結果有效控制候選框間之重疊容許程度。
- (3) 重疊閾值(OverlapThreshold)定義為兩個候選框之重疊比例門檻，當設定值較低時，僅允許重疊程度較小之候選框同時存在，將使結果趨於保守，有效合併多重偵測但可能導致相近目標被錯誤合併。相反的較高重疊閾值則允許更多重疊框共存，有助於保留密集或近距離目標之偵測結果，但也可能增加重複框出現的機率。

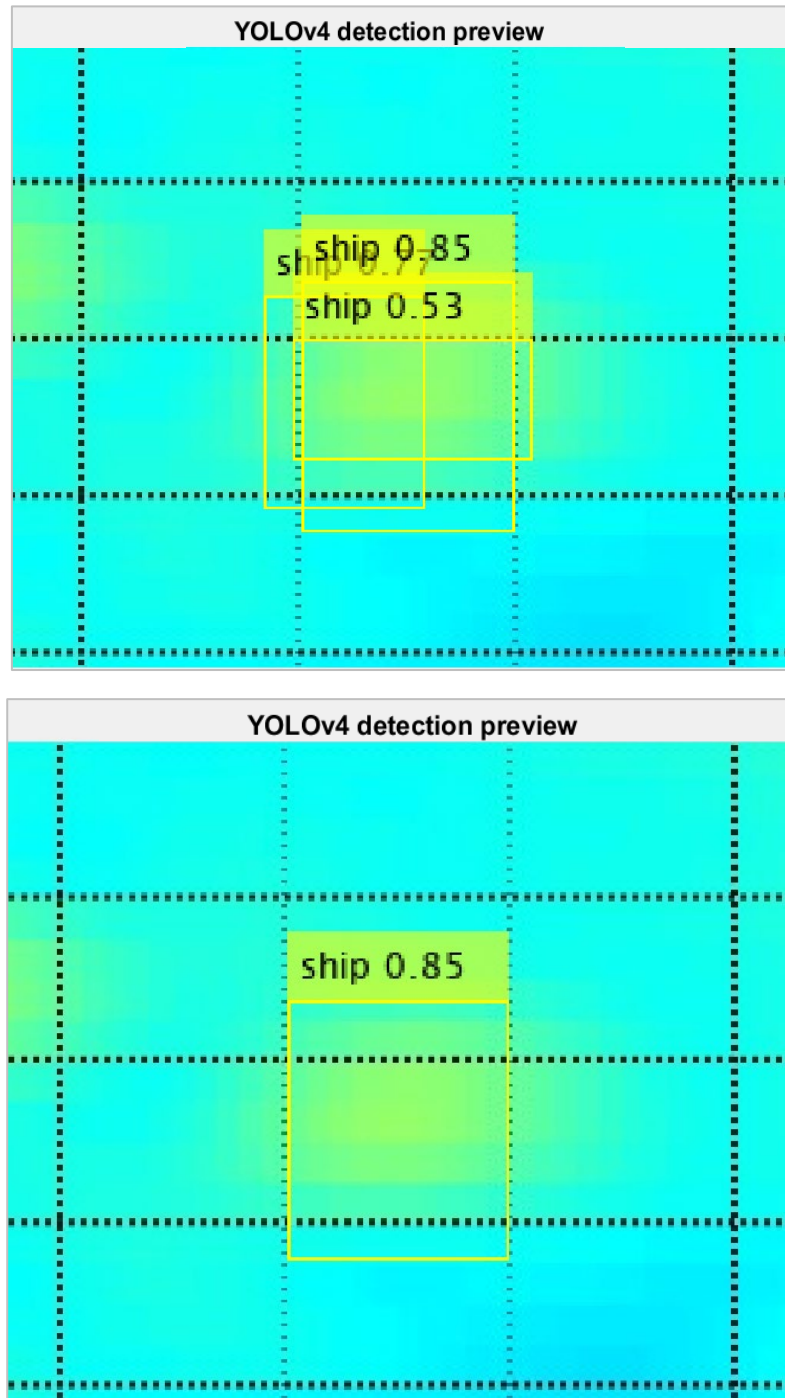


圖 4.5 閾值設定的案例應用情形低閾值、高閾值

綜合而言，推論階段之閾值(Threshold)、非極大值抑制(NMS)與重疊閾值(OverlapThreshold)共同決定最終船舶偵測之結果，透過雷達距離方位角空間亮度分布之特性，進行多組參數測試，選擇能兼顧弱目標保留與誤報抑制之設定，可做為後續偵測結果分析之基礎。

4.5 小結

綜合上述小節訓練流程，如圖 4.6 所示，由初步結果可知本計畫已成功建構一套可於 MATLAB 環境下穩定運行之 YOLOv4 船舶偵測模型，並確認其在雷達距離方位角空間亮度分布圖資料型態，已具備基本的學習能力與目標辨識可行性。然而，本階段研究重點僅為模型整體流程之可行性驗證與訓練穩定性的觀察，尚未針對各網路模組或訓練設定集進行系統性的消融實驗(ablation study)分析。值得注意的是，為驗證所建構模型架構與各組成模組之完整性與有效性，相關研究通常會透過消融實驗，逐步移除或替換特定模組，以評估其對整體模型效能之影響，例如本計畫第 2.2.3 小節所回顧近 2 年港灣船舶追蹤技術研究文獻，Huang(2024)使用消融實驗討論 YOLOv5 版本各骨幹網路或特徵融合結構等模組，以釐清模型收斂行為與偵測效能之實際貢獻，換言之，消融實驗不僅是效能比較工具，更是一種驗證模型設計合理性與訓練策略有效性的重要方法論手段。

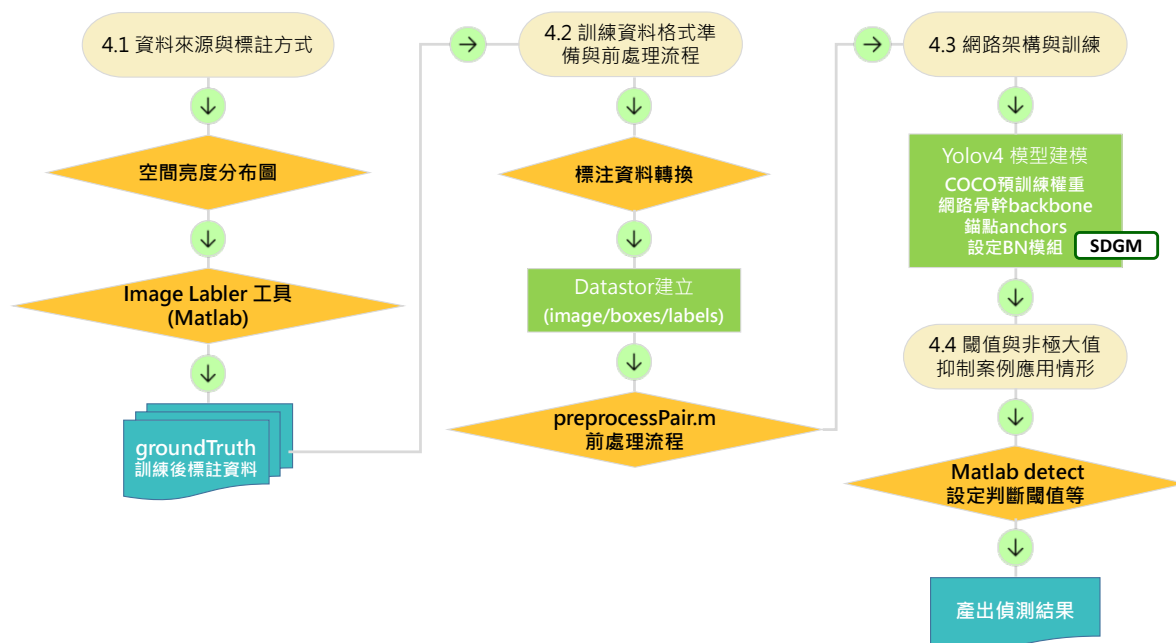


圖 4.6 本計畫 YOLOv4 訓練流程架構

從理論的角度看待機器學習網路架構，完整 YOLOv4 網路結構需自行實施各項模組與方法，如圖 4.7 所示，研究開發人員入門上限的門檻很高，例如 CSPDarknet、PANet 與多尺度偵測頭(Head)的深度學習框架等，但若使用 MATLAB 所提供之 YOLOv4 高階介面，它已將複雜的網

路設計與訓練流程高度封裝，使研究人員能專注於資料建構、特徵設計與應用層問題，換句話說，MATLAB 已經封裝 YOLOv4 絕大多數底層網路結構與訓練流程，便可解決數十層的運算邏輯工作，屬實為實用級 API 版本之機器學習，無需從頭開始摸索，大幅降低使用者的應用難度，值得研究人員推廣使用。

總結來說，基於本研究現階段以應用機器學習應用的初步探索為目標，但後續相關消融實驗的規劃與執行能讓整體模型適應待解決課題，適合納入未來做為模型優化與方法深化的重要依據，故後續研究將使用運算力更高的電腦設備，以及更完整型態更豐富的資料進行，將使模型架構調整空間更加明確，未來研究可透過系統性消融設計，進一步探討各模組與參數設定對模型的穩定性。

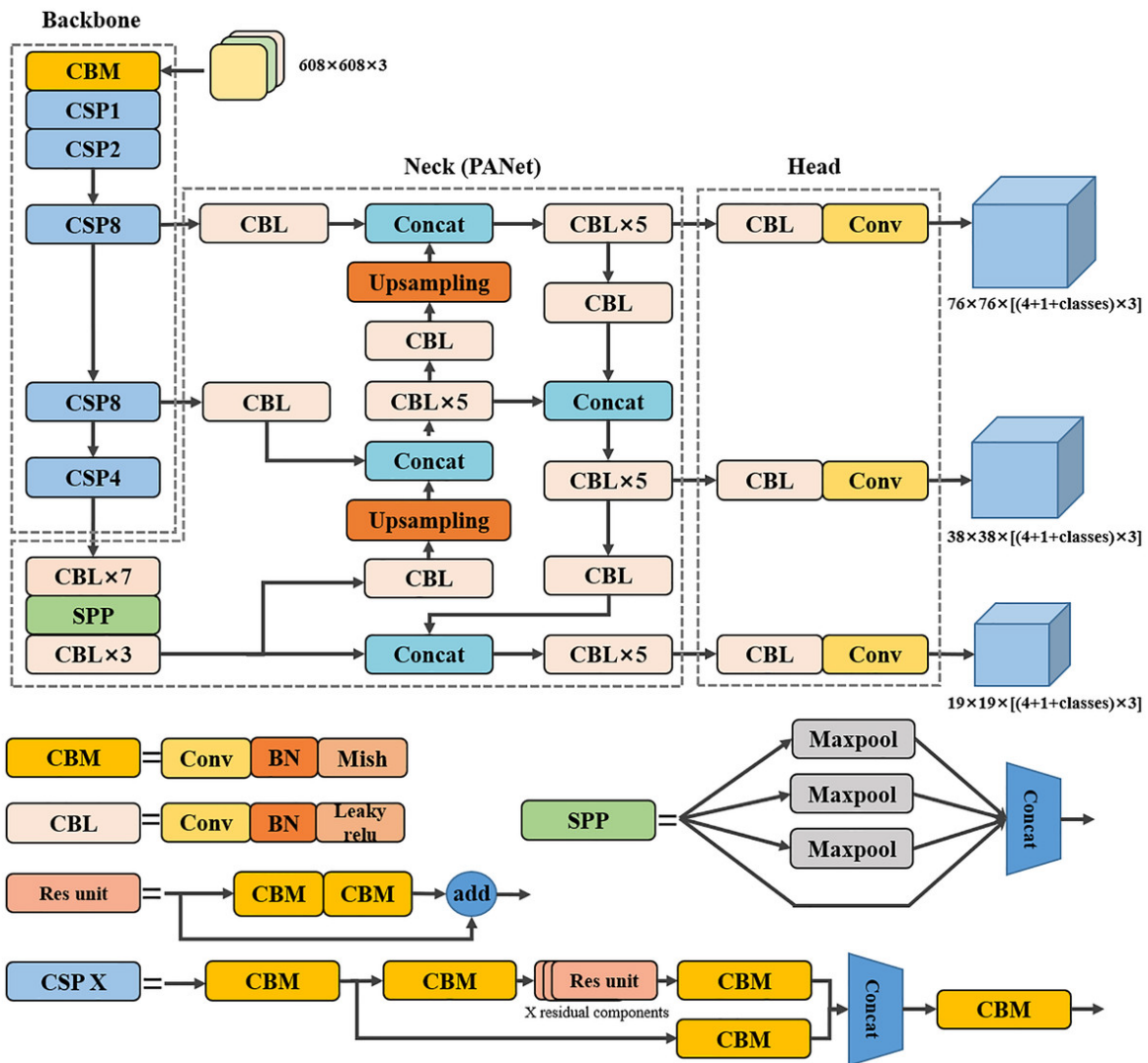


圖 4.7 YOLOv4 的網路架構圖(資料來源: Wei 2023)

第五章 研究分析與探討

本計畫使用之雷達為臺中港海洋陣列雷達站，一座坐落於北防沙堤建置的海洋陣列雷達站，又稱為臺中港海洋雷達北站，一座於臺中火力發電廠放流口建置的第 2 座海洋陣列雷達站，又稱為臺中港海洋雷達南站，如圖 5.1 所示；研究分析使用運研所架設 AIS 船舶資訊進行探討，根據 AIS 船舶動態數據可以識別船隻類型，由 AIS Message Type5 可解碼出船舶種類，例如：客輪、貨船、油輪...等共有 99 種分類代碼，得以篩選特定船舶進行監控與航管各項統計，如圖 5.2 所示，本章研究分析與探討主要為臺中港海洋雷達北站。

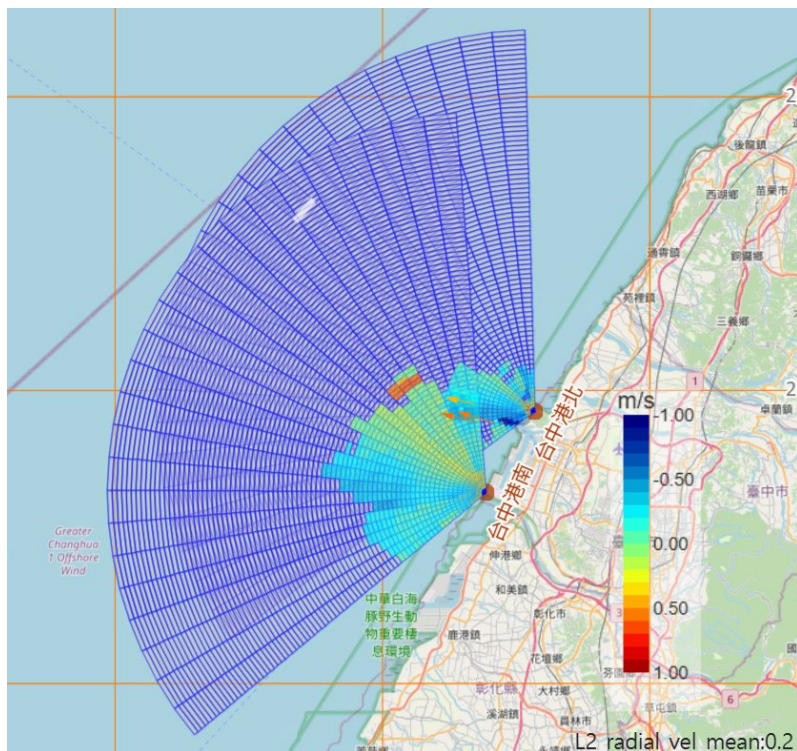


圖 5.1 運研所臺中港海洋雷達示意圖



圖 5.2 運研所臺中港 AIS 船舶軌跡示意圖

5.1 實際測試與分析

本計畫於實際測試與分析過程中分別於 2019 年 1 月 17 日下午 23:00 與 2019 年 1 月 18 日上午 07:00，偵測到嘉泰號(JIA TAI)與黃金凱瑟琳號(GOLDEN KATHRINE)目標案例，分別代表大型與中型散裝貨船。測試期間，兩艘船舶皆於研究海域內航行，其航跡與回波訊號可於分析時段中清楚辨識。經由本計畫所建構之船舶偵測與定位分析流程，均可於雷達資料中成功擷取其對應之船舶目標，並與 AIS 船舶位置資訊呈現良好對應關係，顯示本方法於不同尺度散裝船舶之偵測上具備可行性與實務應用潛力，船舶資訊如下：

- (一)嘉泰號(JIA TAI)為 2011 年建造之散裝貨船，船籍登記於香港，IMO 編號為 9643790，MMSI 為 477167300，呼號為 VRJQ3。該船總噸位為 22,458 噸，載重噸數約 35,112 噸，屬中型散裝貨船。船體全長約 179.88 公尺，最大船寬約 28.8 公尺，具備穩定之貨物承載能力與區域性航線運輸彈性。依據 AIS 資料顯示，其船舶類型為貨船，目前狀態仍為現役，持續投入散裝貨物運輸作業，如圖 5.3 所示。



資料來源:Marine Traffic

圖 5.3 嘉泰號號示意圖

- (二)黃金凱瑟琳(GOLDEN KATHRINE)為 2015 年建造之散裝貨船，船籍登記於香港，IMO 編號為 9701322，MMSI 為 477699500，呼號為 VRNW7，該船總噸位為 93,237 噸，載重噸數達 182,486 噸，屬於大型散裝貨運船舶，船體全長約 291.9 公尺，最大船寬約 45

公尺，具備良好的貨艙容量與長距離航行能力，依據 AIS 資料顯示，其船舶類型為貨船，目前狀態為在役，持續投入國際散裝貨物運輸作業，如圖 5.4 所示。



資料來源:Marine Traffic

圖 5.4 黃金凱瑟琳號示意圖

以嘉泰號為例，如圖 5.5，其於原始雷達都卜勒距離譜中之船舶回波訊號並不明顯，目標特徵易受海雜波與背景雜訊影響而難以直接辨識。然而，經由本計畫所建構之資料前處理、頻譜分析與船舶偵測流程後，該船舶目標得以自雷達資料中有效萃取，並成功重建其航行軌跡。進一步與 AIS 船舶位置資訊進行比對，如圖 5.5 黑色為 AIS 圓點為雷達，結果顯示雷達偵測結果與實際船舶航跡具有良好一致性，於 2019 年 1 月 17 日下午 23:00 出現在臺中港出海口，船舶資訊成功追蹤，驗證本研究方法於夜間低可視度或弱回波條件下，仍具備船舶偵測能力，如圖 5.5 所示。進一步以黃金凱瑟琳號為例，於隔日 2019 年 1 月 18 日上午 07:00 之雷達觀測資料中，亦可成功辨識其船舶回波特徵。雖然該時段之都卜勒距離譜中，船舶目標訊號相較於海雜波背景仍屬弱回波型態，但經本研究所採用之資料處理與船舶偵測流程後，仍可於分析結果中清楚擷取其對應之船舶位置與航行軌跡。與 AIS 船舶航跡進行比對後，顯示雷達偵測結果與實際船舶位置具有良好一致性，如圖 5.6 所示。

綜合上述案例結果顯示，海洋陣列高頻雷達船舶偵測與定位於不同觀測時段下皆能有效運作，無論於夜間回波較弱或背景雜訊較為複雜之情境，抑或白天航行情形較為頻繁之時段，皆可成功自雷達資料中擷取船舶目標，並與 AIS 船舶航跡呈現良好對應關係。此結果顯示本研究方

法不受日夜差異之顯著影響，具備跨時段之穩定船舶偵測能力，適用於長時間連續之海域船舶監測作業。

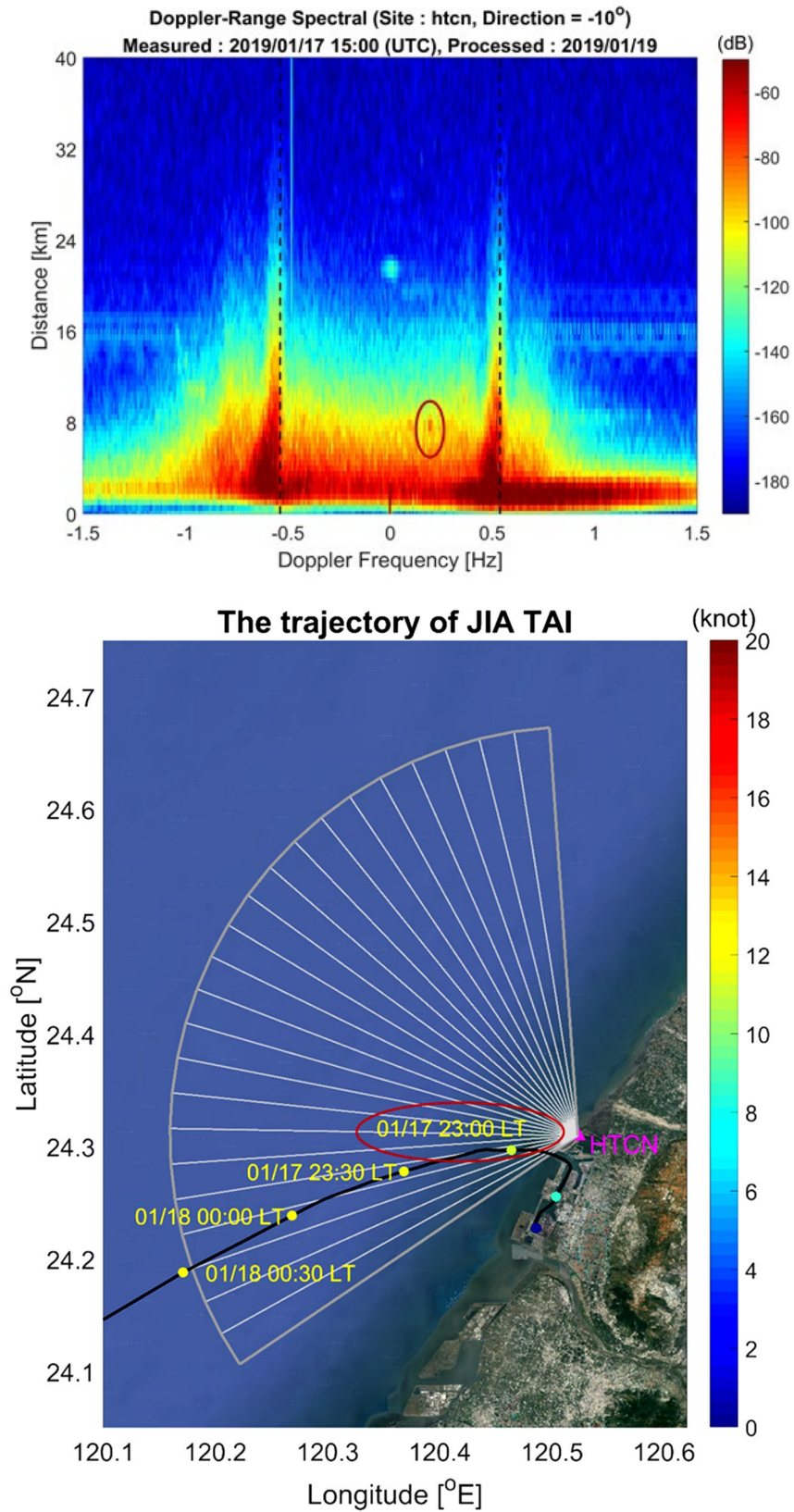


圖 5.5 嘉泰號 AIS 軌跡與雷達偵測情形

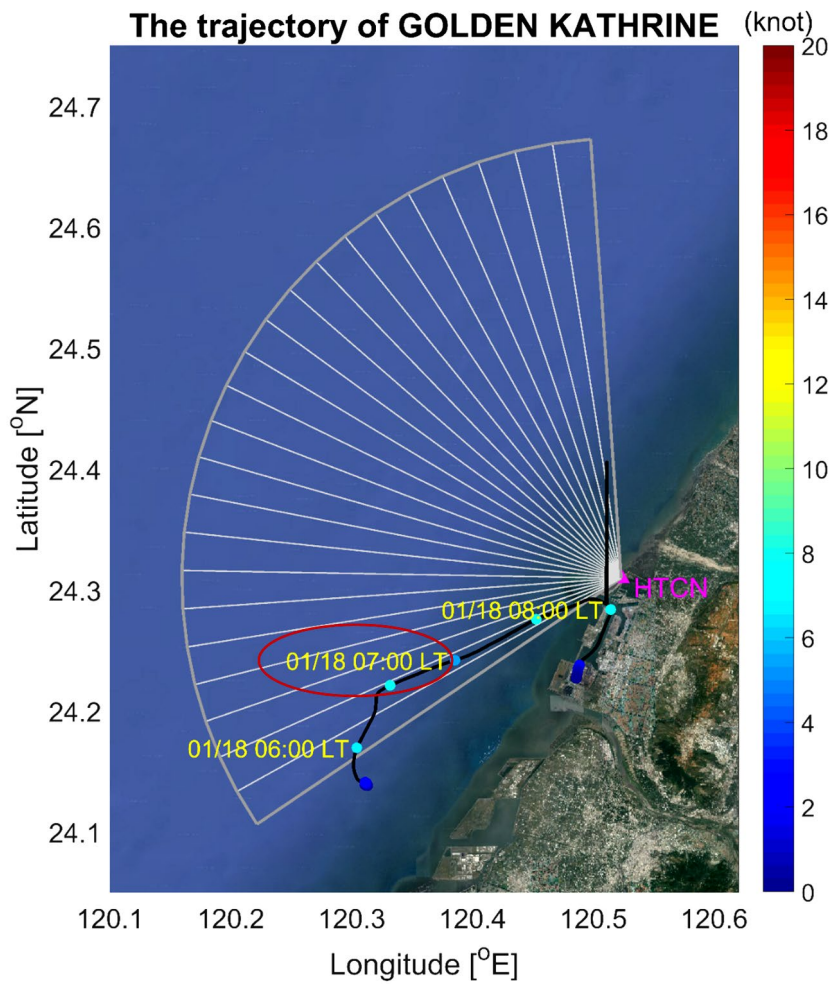
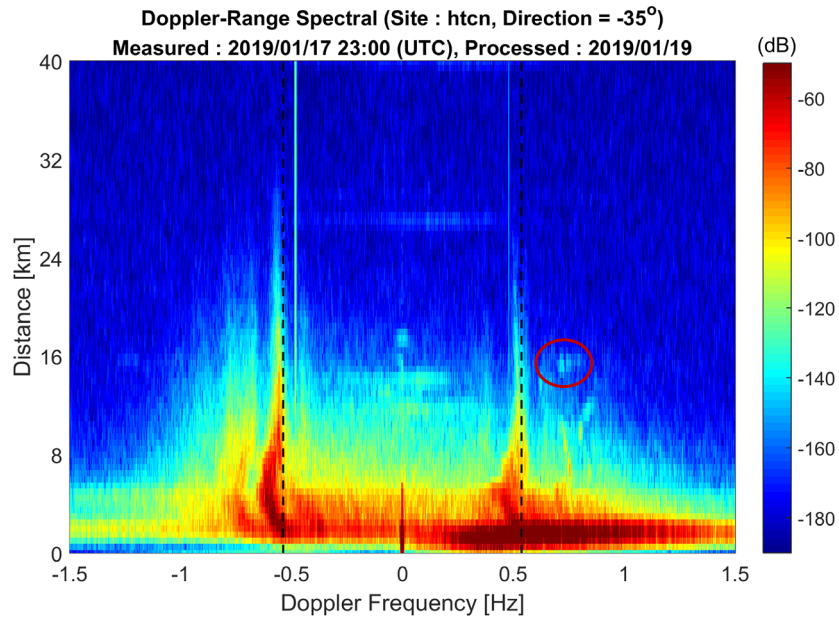


圖 5.6 黃金凱瑟琳號 AIS 軌跡與雷達偵測情形

5.2 調適性偵測法測試與軌跡比對結果

本計畫以 2019 年 8 月 31 日上午 3 時，運研所海洋陣列雷達之實際觀測資料，做為調適性船舶偵測法之案例測試。該圖為未經任何偵測演算法處理之前之都卜勒距離譜，呈現原始雷達回波能量於距離與都卜勒頻率空間中的分布情形，如圖 5.7 所示，案例用於計算之時序資料長度為 55 秒，距離向共包含 81 個距離單元(range cells)，對應最大觀測距離約為 40 公里；頻率向則設定為 256 個頻率單元，其頻率範圍介於 -2.3 Hz 至 2.3 Hz。由圖 5.7 可見，原始頻譜中仍存在顯著之背景能量與海雜波訊號，船舶回波特徵並不易直接辨識，顯示在未經處理情況下，需仰賴後續之調適性偵測方法以進一步萃取潛在船舶目標。

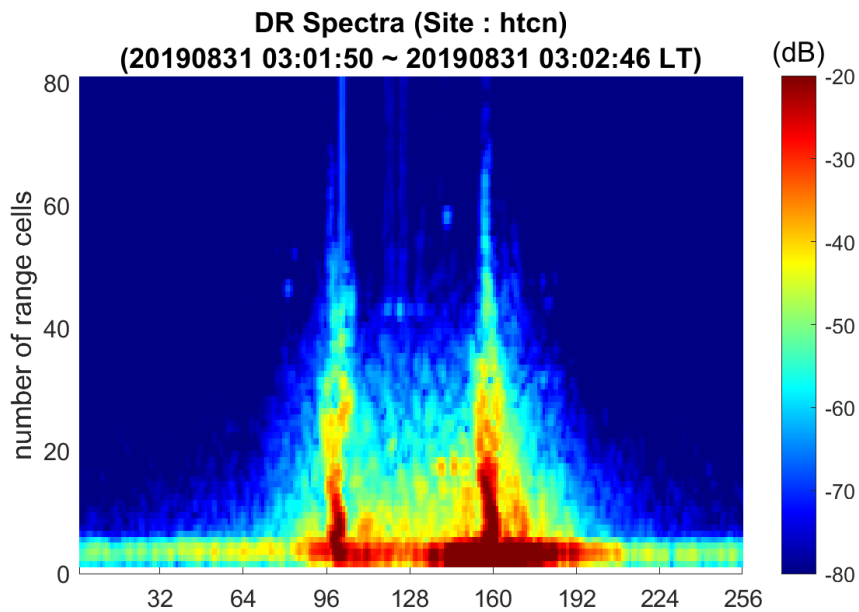


圖 5.7 於 2019 年 8 月 31 日上午 3 時觀測案例原始資料

調適性偵測門檻圖處理方式先將多幅雷達交叉頻譜套用二維移動平均進行平滑處理，以估計背景能量分布情形，接著將原始交叉頻譜扣除其對應之二維移動平均結果，以去除大尺度且隨距離與頻率緩慢變化之背景成分，並保留局部能量突增之訊號特徵，如圖 5.8 所示，該圖顯示為處理後所得到的殘餘訊號分布(Residual Signal)，其中多數背景雜訊已被有效抑制，僅剩少量離散能量點與條帶狀結構，此殘餘訊號可能對應於船舶回波或其他非背景型目標，做為後續調適性偵測與目標篩選之重要依據。

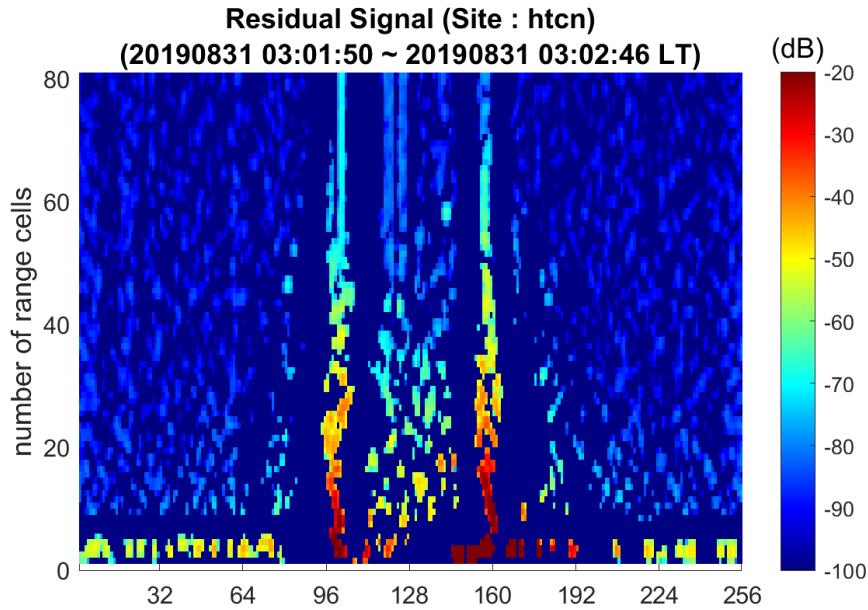


圖 5.8 二維移動平均扣除後之都卜勒距離譜殘餘訊號分布圖

此外，距離雷達約 0~4 公里之近岸區域，以及接近頻率單元約 100 與 160 附近(此為引索單位非頻率 Hz)，仍存在顯著之殘留訊號。0~4 公里之近岸區域取除主要源於近岸堤防等固定目標與環境干擾所造成之回波影響，後者則對應於一階布拉格波散射所形成之高能量干擾區域。上述殘留訊號屬於背景雜訊成分，並非本研究欲偵測之船舶回波訊號，因此，處理過程直接將該等區域加以排除，避免干擾對船舶偵測結果造成影響，如圖 5.9 所示。

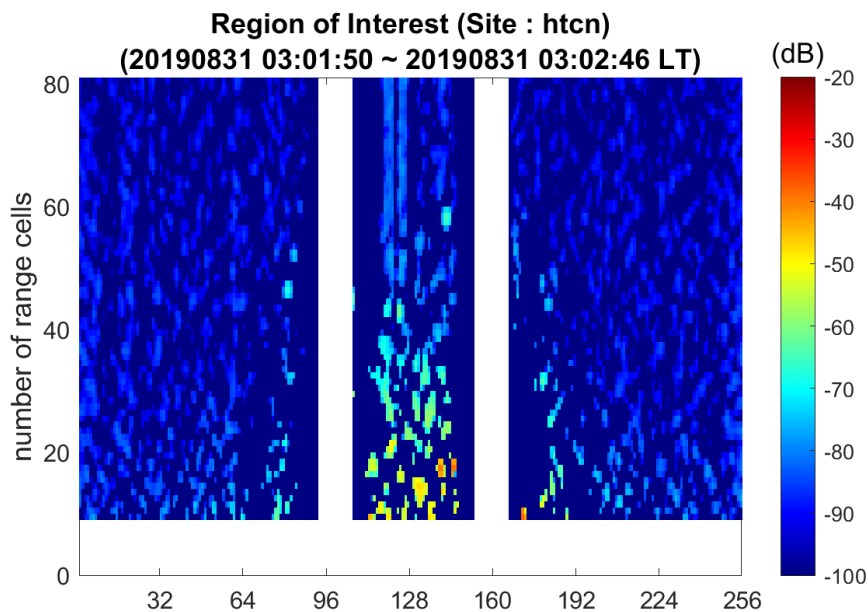


圖 5.9 殘餘訊號中近岸與一階布拉格干擾區域之移除結果

將處理過的殘餘訊號依據莊(2015)所提出之調適性門檻設定方式，以殘餘訊號之平均值加上不同倍數之標準偏差門檻進行過濾。莊(2015)所提出當門檻設定為平均值加上 2.5 倍標準偏差時，可在雜訊抑制與目標保留之間取得較佳平衡，基於該研究結論，亦採用 2.5 倍標準偏差，以獲得調適性偵測門檻圖，如圖 5.10 所示，將原始雷達圖譜與調適性偵測門檻圖相減，取大於 0 者，即可獲得偵測結果圖，如圖 5.11 所示。

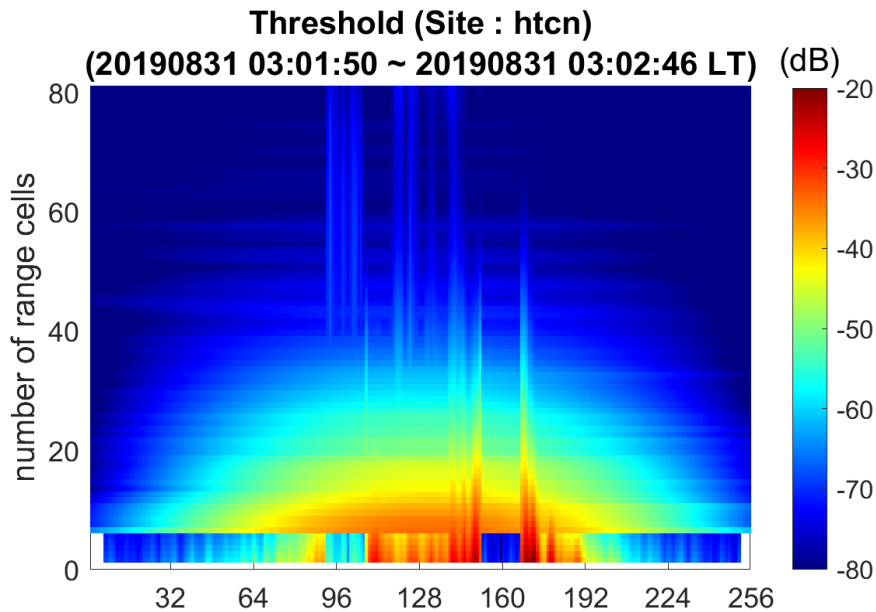


圖 5.10 調適性門偵測檻圖

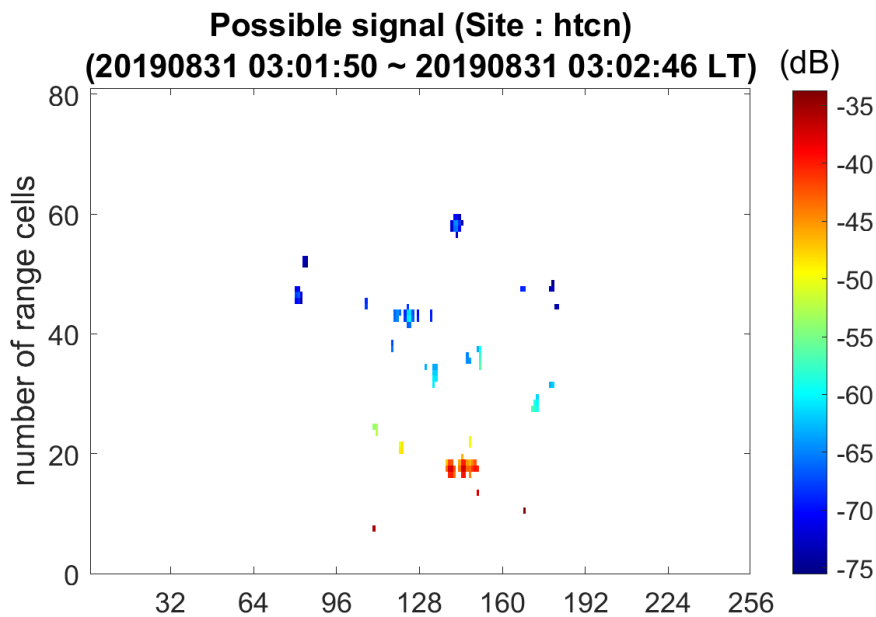


圖 5.11 調適性偵測法結果圖

調適性偵測法與 AIS 軌跡比對結果，如圖 5.12 所示，該圖黃色點表示經適性偵測法與調適性船舶偵測法所萃取之所有可能船舶位置，洋紅色點則為同一時間尺度下之 AIS 船舶位置，旁列洋紅色數字為船名呼號 (MMSI) 為船舶海上識別碼，黑色線條為依 AIS 資料所重建之船舶航行軌跡。經由比對結果可觀察到，雷達偵測所得之可能船舶位置多數分布於 AIS 船舶航跡附近，且與對應之 AIS 船舶位置呈現良好空間一致性，顯示，雷達偵測方法能確實有效捕捉實際航行船舶之位置資訊。

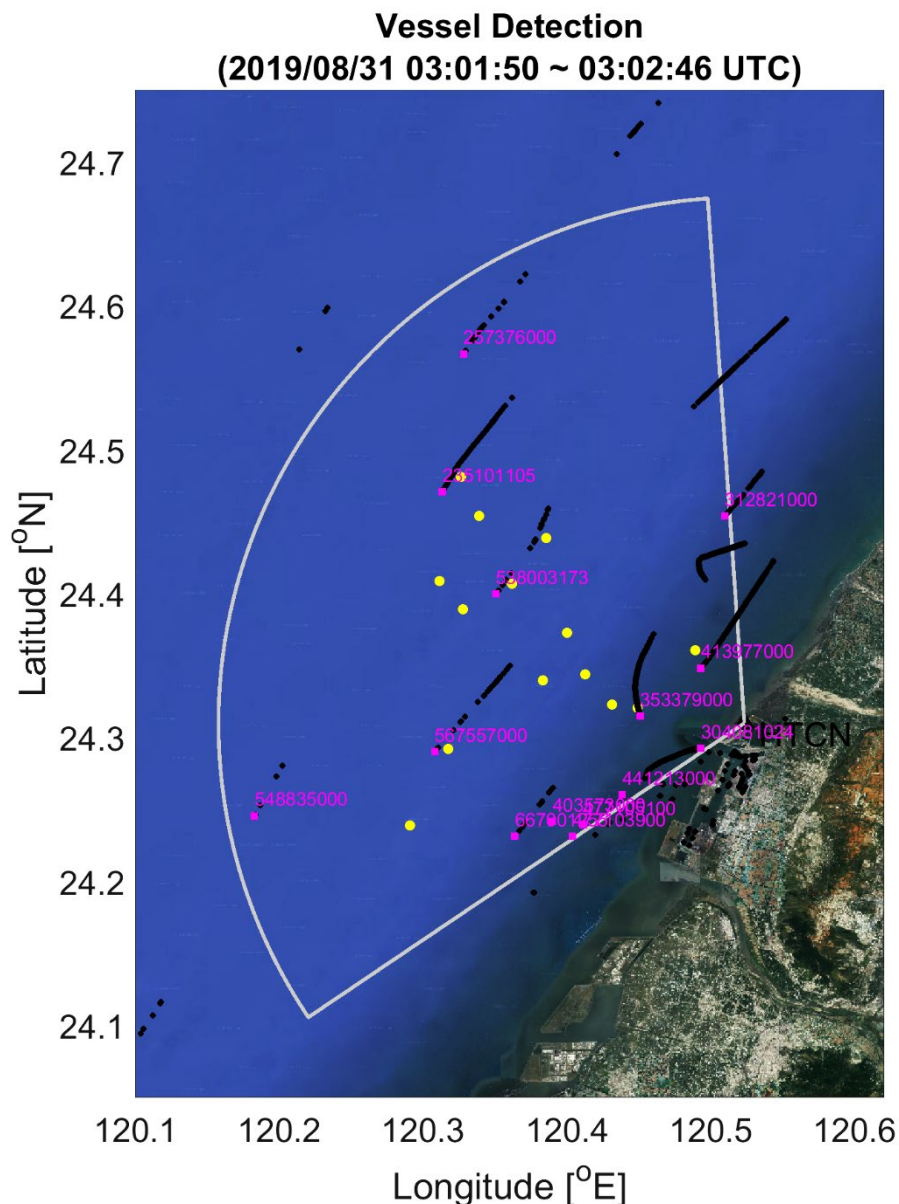


圖 5.12 調適性偵測法與 AIS 軌跡比對結果

進一步觀察，部分黃色點未完全與 AIS 航跡重疊，推測可能與 AIS 回報間隔、雷達量測解析度差異，或者不是 AIS 船舶，可能為短暫雜訊

回波，惟整體而言，偵測結果與 AIS 資料之空間對應關係明確，驗證調適性偵測法於實際海域船舶監測應用具備良好可行性。

5.3 小結

綜合本章實際測試與分析結果可知，調適性偵測法已可有效應用於港灣海域船舶目標之偵測、定位及航跡判釋，且由嘉泰號及黃金凱瑟琳號等案例與 AIS 資料比對結果顯示，雷達偵測所得之船舶位置、航行軌跡及航跡方向，均與實際船舶動態具有良好對應關係。此外，調適性偵測法對於一階能量譜峰干擾亦具備良好去除效果，顯示其做為船舶偵測方法，具備一定之可靠程度。

上述結果與第三章所採二維空間域圖譜、輪廓線定位及連續圖譜追蹤等方法所得成果，具有相互印證與互補之意義，說明本計畫目前所建立之船舶監測流程，已兼具空間域分析與頻譜域驗證之基礎。整體而言，第五章係以調適性偵測法為基礎，透過實測案例與 AIS 資料進行驗證及綜合分析，已進一步確認海洋陣列高頻雷達應用於港灣船舶監測之可行性與應用潛力；至於第四章所探討之機器學習方法屬於後續自動化辨識之延伸方向，現階段仍屬初步可行性驗證，後續可在此驗證基礎上，進一步擴充標註資料與模型驗證流程，持續朝向雷達、AIS 與人工智慧整合之方向發展，逐步建構智慧船舶監測系統，提升其後續應用價值與服務效益。

第六章 結論與建議

面對全球氣候變遷與極端氣候事件發生機率持續增加，建立淨零轉型，邁向永續臺灣之政策架構，已逐步形成短、中、長期的整體政策目標；爰此，港航發展勢須配合國家能源轉型與淨零排放政策進行調整，除傳統運輸與物流功能外，亦逐步轉型為離岸風電建設與運維之重要基地、綠色航運走廊之關鍵節點，以及新興替代能源(例如：綠氫、綠氨與綠色甲醇等)潛在供應或轉運平台。在此趨勢下，港航系統所面臨之環境風險與營運挑戰日益複雜，故為強化運輸系統韌性，已成為交通部當前之重要施政課題，運研所亦應對海洋環境變化與港航功能轉型需求，持續精進海洋觀測與監測技術，以支撐港航安全、能源設施維運及航運管理之決策，促進港航發展與國家安全，能持續朝向可永續發展目標邁進，故本計畫年度成果致獲以下結論與建議：

6.1 結論

- (一)文獻回顧致獲結論，針對雷達與 AIS 資料於時間解析度不一致所造成之船舶遺漏問題，透過引入軌跡差分轉換與最鄰近距離計算之方法，可有效建立雷達與 AIS 航跡之對應關係，進而由雷達機率雲中萃取出合理且連續之船舶航跡。
- (二)本計畫由原始雷達資料處理開始，整合多尺度取樣、雜波抑制、波束成型及二維空間域圖譜建構等步驟，並結合輪廓線定位與連續圖譜追蹤技術，成功建立一套具備實際運作可行性之船舶定位與航跡萃取分析流程。
- (三)研究結果顯示，二維空間域圖譜中之距離衰減修正、天線場型校正，以及是否移除隨時間變化不顯著之訊號，皆會顯著影響船舶回波顯示效果與定位穩定性，顯示港區船舶偵測作業須依實際觀測環境，審慎選擇適當之資料處理策略。
- (四)承上，本計畫二維空間域圖譜之分析結果可知，當調整參數 δ 由2提高至5與10，圖譜整體空間解析度呈現提升趨勢，船舶能量分布更為集中，目標邊緣亦趨於清晰，顯示所採用演算法具備良好之雜訊抑制能力與空間解析效果；此外，比較不同運算資料長度之短時間

窗圖譜結果顯示，相較於 32 點資料，以 16 點資料形成之短時間窗在目標輪廓呈現上更為清晰，較有助於船舶回波特徵之判讀。

- (五) 調適性偵測法對於雷達偵測所受一階能量譜峰干擾能有效去除，偵測結果與 AIS 船舶資料比對，結果顯示雷達所推估之船舶位置與航跡方向，與 AIS 資訊具有良好一致性，調適性偵測法確實為可靠的判斷方式之一。
- (六) 無論夜間回波較弱或背景雜訊較為複雜之情境，或於白天航行情形較為頻繁之時段，調適性偵測法皆可由雷達資料中成功擷取出船舶目標，並與 AIS 船舶航跡呈現良好對應關係，顯示本方法不受日夜差異之顯著影響，具備跨時段之穩定船舶偵測能力，適用於長時間連續之海域船舶監測作業。
- (七) 本計畫於既有雷達船舶辨識成果基礎上，初步導入 MATLAB 環境下之 YOLOv4 深度學習架構，證實其可於距離方位角空間亮度分布圖中穩定運行，並具備基本船舶目標辨識能力，為後續深化機器學習應用奠定基礎，然而，研究驗證成果與實務可部署系統仍存在差距，需要持續投入研究，方為解決跨域泛化應用能力之問題。
- (八) 本計畫成果可做為後續發展雷達、AIS 與機器學習整合之智慧船舶監測系統基礎，支援臺中港乃至其他商港之智慧航安、港區管理與海域治理應用。

6.2 建議

- (一) 有關海洋高頻雷達之船舶偵測，現可行方法包含：傳統都卜勒距離譜分析、空間域 Capon 處理方式、調適性偵測法及時頻脊線處理方式等，雖皆具備一定分析能力，惟各方法皆存在其適用限制，尚難以涵蓋所有觀測情境，建議後續研究持續針對不同方法之適用性與限制條件進行系統性討論與比較。
- (二) 文獻回顧顯示，時頻脊線特徵相較於傳統都卜勒距離譜之點位表示，在目標判讀上具有較佳之直觀性與辨識潛力，建議後續船舶目標偵測研究可以將時頻脊線特徵納入分析與探討。
- (三) 根據文獻回顧，深度學習中之動態蛇卷積可更靈活捕捉影像中之曲

線或非直線結構，建議後續雷達時頻脊線相關研究，可以嘗試導入 YOLOv5，並結合動態蛇卷積模組進行訓練，後續亦能安排消融實驗探討各模組對偵測效能之貢獻，亦可嘗試非固定虛報率門檻之偵測策略，以因應多目標與高雜訊情境，提高時頻脊線之辨識能力。

- (四)有關船舶回波強度與船舶尺寸大小與雷達波長共振密不可分，且由於雷達散射截面積存在高度變異性，建議後續視需求納入評估研究與分析。
- (五)後續研究建議針對弱回波、小型船舶或定錨船舶等情境，優化現有船舶偵測與航跡萃取方法，以提升整體辨識成功率與連續追蹤能力；此外，回波強度補償是否有助於定位與追蹤，是否產生過度擬合影響判斷，建議後續研究亦能納入探討。
- (六) MATLAB 已高度封裝 YOLOv4 之底層網路結構與訓練流程，整體架構穩定且具可行性，使用者無需自底層模型開始建構，即可進行相關應用，大幅降低深度學習導入門檻，建議相關研究人員可加以推廣與應用。
- (七)建議持續累積雷達船舶影像標註資料，透過擴充資料量與多案例訓練，驗證深度學習模型於船舶辨識的效能，以利未來導入智慧化分析工具或自動化監測系統之基礎。
- (八)建議配合離岸風電、低碳航運及極端氣候因應等政策方向，持續深化海洋雷達於港區與航道安全監控之應用，確保我國港航系統於能源轉型過程中具備足夠韌性與安全性。

6.3 成果效益與後續應用情形

- (一)本計畫致力於不斷改進臺中港海洋陣列雷達訊號應用，並持續進行定時海洋表面波浪、海流觀測與船舶偵測之研究，以提供港區不間斷的遙測資訊，為航管單位與港務公司決策應用提供參考數據。
- (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，協助國家海洋研究院整合國家海洋雷達觀測網，以及促進雷達技術發展、應用與交流，有助於海洋遙測領域持續進步，並擴大資料共享與船舶航安、港灣防災及海域治理等應用。

- (三)本計畫後續將針對船舶辨識之研究課題，進行多年期研究，進一步精進高頻海洋陣列雷達船舶辨識技術，補充港區感測與建立特定水域預警工具，並應用於港口交通服務系統(VTS)或智慧港灣平台，將持續朝向補充監測、異常預警、盲區補強及 AIS 失聯情境支援等方向，評估其系統整合方式與管理效益。
- (四)本計畫技術發展路徑係以「先驗證、後擴充、再作業化」為原則，如圖 6.1 所示，故於本(114)年度先聚焦於雷達影像解析、單目標偵測與案例探討，確認海洋陣列雷達用於船舶觀測之可行性；115 年度進一步發展船舶訊號特徵模型、濾波技術改良及影像辨識優化，提升目標辨識穩定度；116 年則朝多目標偵測、異常行為探討與示範場域建構推進；未來再結合船舶自動辨識、威脅評估與監控整合平台，逐步達成系統穩定運行與作業化應用，惟相關技術發展仍須配合資料累積、演算法驗證結果及實務需求持續檢討，後續將採滾動修正方式精進路徑內容。



圖 6.1 技術發展路徑圖

參考文獻

1. Xu, J., Suo, Y., Jiang, Y., & Yang, Q. "A Fast Algorithm for Matching AIS Trajectories with Radar Point Data in Complex Environments.", *Remote Sensing*, 16(23), 2024, p. 4360.
2. Huang, D., Zhou, H., Tian, Y., Yang, Z., & Huang, W. "A deep learning-based time-frequency scheme for ship detection using HFSWR." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18, 2024, pp. 2718-2736.
3. Yang, Z., Zhou, H., Tian, Y., Liu, G., Zhang, B., Qin, Y., ... & Huang, W. "Cascaded Detection Method for Ship Targets Using High-Frequency Surface Wave Radar in the Time–Frequency Domain." *Remote Sensing*, 17(15), 2025, p. 2580.
4. Barrick, D. "Remote Sensing of Sea State by Radar." *Ocean 72 - IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment*, 1972.
5. 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.
6. Capon, J. "High-resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis." *Proceedings of the IEEE*, 57(8), 1969, pp. 1408-1418.
7. Ponsford, A. M., Kumar, K., and Shearman, E. D. R. "Feasibility study of HF ground-wave radar for the tracking of ships." prepared for Admiralty Surface Weapons Establishment (ASWE) by the University of Birmingham, 1984.
8. Cox, H., R. Zeskind, and M. Owen, "Robust adaptive beamforming." *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 35, 1987, pp. 1365–1376.
9. Orfanidis, S. J. "Introduction to Signal Processing." 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 1996.
10. Ponsford, A. M. "Surveillance of the 200 nautical mile exclusive economic zone (EEZ) using high frequency surface wave radar (HFSWR)." *Can. J. Remote Sens.*, 27(4), 2001, pp. 354–360.
11. Fernandez, D. M., Vesecky, J. F., Barrick, D. E., Teague, C. C., Plume, M. M., and Whelan, C. "Detection of ships with multi-frequency and CODAR SeaSonde HF radar systems." *Can. J. Remote Sens.*, 27(4), 2001, pp. 277–290.
12. Dzvonkovskaya, A. L. and Rohling, H. "Target detection with adaptive power regression thresholding for HF radar." in *Proc. CIE Int. Conf. Radar*, 2006, pp. 1–4.

13. Dzvovkovskaya, A., Gurgel, K.-W., Rohling, H. and Schlick, T. "Low power high frequency surface wave radar application for ship detection and tracking." in Proc. Int. Conf. Radar, 2008, pp. 627–632.
14. Dzvovkovskaya, A., Gurgel, K. W., Rohling, H. and Schlick, T. "HF radar WERA application for ship detection and tracking." *Eur. J. Navigat.*, 7(3), 2009, pp. 18–25.
15. Vesecky, J. F. and Laws, K. E. "Identifying ship echoes in CODAR HF radar data: A Kalman filtering approach." In Proc. OCEANS MTS / IEEE SEATTLE, 2010, pp. 1–8.
16. Roarty, H., Barrick, D., Kohut, J. and Glenn, S. "Dual-use of compact HF radars for the detection of mid-and large-size vessels." *Turkish J. Elect. Eng. Comput. Sci.* , 18(3), 2010, pp. 373–388.
17. Laws, K., Vesecky, J. and Paduan, J. "Predicting the capabilities of ship monitoring by HF radar in coastal regions." In Proc. OCEANS MTS / IEEE KONA, 2011, pp. 1–5.
18. Chuang, L. Z., Chung, Y. J., and Tang, S. T. "A Simple Ship Echo Identification Procedure With SeaSonde HF Radar." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(12), 2015, pp. 2491–2495.
19. Hashimoto, T., Nishimura, K. and Sato, T. "Adaptive sidelobe cancellation technique for atmospheric radars containing arrays with nonuniform gain." *IEICE Trans. Commun.*, 99(B), 2016, pp. 2583–2591.
20. Chen, J.-S., Lai, J.-W., Chien, H., Wang, C.-Y., Su, C.-L., Lin, K.-I., Chen, M.-Y. and Chu, Y.-H. "VHF radar observations of sea surface in the Northern Taiwan Strait." *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 36 (2), 2019, pp. 297–315.
21. Chen, J.-S., D.-T. Dao, and H. Chien, "Ship echo identification based on norm-constrained adaptive beamforming for an arrayed high-frequency coastal radar." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 59(2), 2021, pp. 1143–1153.
22. Cai, J., H. Zhou, W. Huang, and B. Wen, Ship detection and direction finding based on time-frequency analysis for compact HF radar. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 18(1), 2021, pp. 72–76.
23. Chen, J. S., Wang, C. Y., & Chu, Y. H. "Measurement of aspect angle of field-aligned plasma irregularities in mid-latitude E region using VHF atmospheric radar imaging and interferometry techniques." *Remote Sensing*, 14(3), 2022, p. 611.
24. You, Z. X., Dao, D. T., Lee, C. D., Tsai, L. H., & Chien, H. "Evaluation of Norm-Constrained Capon Method on Improving Doppler Peak Localization of Antenna-

- Arrayed High-Frequency Coastal Radar." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 41(11), 2024, pp. 1029-1045.
25. You, Z. X. and Hashiguchi, H. "Evaluation of the norm-constrained Capon beam-former used with radar imaging in retrieving the aspect angle of mid-latitude E region field-aligned plasma irregularities in the Doppler-frequency domain." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63, 2025, pp. 1-12.
 26. Dzvonkovskaya, A., Rohling, H. "Target Detection with Adaptive Power Regression Thresholding for HF Radar.", 2006.
 27. Dzvonkovskaya, A.L., and Rohling, H. "HF Radar Ship Detection and Tracking Using WERA system". In *2007 IET International Conference on Radar Systems, 2007* , pp. 1–5.
 28. Essen, H. H., Gurgel, K. W. and Schlick, T. "Measurement of Ocean Wave Height and Direction by Means of HF Radar: An Empirical Approach." *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 51(4), 1999, pp. 369–383.
 29. Fujii, S., Heron, M. L., Kim, K., Lai, J. W., Lee, S. H., Wu, X., Wu, X., Wyatt, L. R. and Yang, W. C. "An Overview of Developments and Applications of Oceanographic Radar Networks in Asia and Oceania Countries." *Ocean Science Journal*, 48(1), 2013, pp. 69–97.
 30. Gurgel, K. W., Essen, H. H. and Kingsley, S. P. "High-frequency Radars: Physical Limitations and Recent Developments." *Coastal Engineering*, 37(3), 1999, pp. 201–218.
 31. Gurgel, K. W., Essen, H. H. and Schlick, T. "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.
 32. Gurgel, A. D. I. K. W., & Schlick, I. H. R. I. T. "HF radar WERA application for ship detection and tracking. " *European journal of navigation*, 7(3), 1996, pp. 18–25.
 33. 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.
 34. Kendall, M.G., Stuart, A. and Ord, J. K. "The Advanced Theory of Statistics." London: Charles Griffin and Company Ltd , 1967.
 35. Lipa, B. and B. Nyden, "Directional Wave Information from the SeaSonde." *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(1), 2005, pp. 221–231.

36. 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.
37. 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.
38. Bhuiya, S. N., Islam, F., & Matin, M. A. "Analysis of direction of arrival techniques using uniform linear array." *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 4(6) , pp. 931–934.
39. Rice, S. O., "Reflection of Electromagnetic Waves From Slightly Rough Surfaces." *Communications on Pure and Applied Mathematics* 4(2-3), 1951, pp. 351–378.
40. 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.
41. Rubio, A., Mader, J., Corgnati, L., Mantovani, C., Griffa, A., Novellino, A., Quentin, C., Wyatt, L. S.-S., J., Horstmann, J., Lorente, P., Zambianchi, E., Hartnett, M., Fernandes, C., Zervakis, V., Gorringer, P., Melet, A. and Puillat, I. "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.
42. Schmidt, R., "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34, 1986, pp. 276–280.
43. 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
44. Shahidi, R., Huang, W., Eric, W., Gill "High-Frequency-Radar Ocean Remote Sensing on the Atlantic's Edge." , *IEEE Canadian Review*, 2020, pp. 18–20.

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-114- H2CA001g

計畫名稱：臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(3/3)-船舶觀測分析

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：	
<p>1.本研究為交通部運輸研究所自107年起持續推動之「臺中港海洋陣列高頻雷達訊號應用分析」系列計畫最終年度成果，聚焦於高頻海洋陣列雷達於港區船舶觀測航跡分析之可行性驗證，研究主題具前瞻性，亦符合我國港灣智慧化與航安管理之政策方向。</p>	<p>感謝委員肯定與支持，運研所長期關注海洋雷達遙測技術之發展與應用，期望持續強化海洋監測能量及其應用效益。本計畫於技術開發與應用規劃過程中，積極與相關單位保持密切合作，以提升研究成果與實務需求之連結性，並促進後續落地應用；未來亦將持續精進相關技術，透過跨領域合作，推動海洋雷達遙測技術於海洋環境監測、航行安全管理及防災減災等面向之應用，期能為國家政策推動及產業發展提供更具實務價值之參考。</p>
<p>2.本計畫自原始高頻雷達接收訊號出發，涵蓋取樣處理、海雜波抑制、波束成型、距離方位角二維圖譜重建、船舶回波辨識、軌跡推估，並延伸至機器學習輔助辨識，分析流程完整且邏輯清楚，顯示研究團隊對海洋陣列雷達系統物理特性與訊號處理方法具充分掌握。尤其針對一階布拉格散射所造成之海雜波干擾進行抑制處理，為高頻雷達船舶觀測中之核心技術難題，本研究能予以明確說明並實際驗證，具高度實務價值。</p>	<p>感謝委員肯定與支持。本計畫相關分析流程與技術內容，係運研所多年持續投入海洋陣列雷達觀測與訊號應用分析所累積之成果；確實布拉格散射所造成之海雜波干擾，為高頻雷達應用於船舶觀測時之核心技術難題，亦是影響船舶目標辨識與定位可靠度之關鍵因素，後續尚有多項技術課題有待突破與精進，將持續強化相關技術與分析方法，並深化與實務應用需求之連結，以提升高頻雷達於港區海氣象觀測及船舶監測之應用效益。</p>
<p>3.報告中以波束成型重建距離方位角二維空間域圖譜，搭配輪廓線擷取與連續圖譜分析推估船舶位置航跡，方法選用合理，亦符合目前國際間HFRadar船舶偵測研究之主流作法。實測結果顯示雷達推估航跡與AIS資料具有良好一致性，證實系統於港區尺度下具備可用精度。然</p>	<p>感謝委員肯定與支持，本計畫於船舶位置與航跡推估方法與分析成果；關於委員所提量化誤差指標，以及不同觀測條件下船舶偵測效能差異分析，確為後續研究精進之重要方向，後續將藉由指標、量化條件分別辦理討論與分析結果補強，除進一步統計位置誤差、航向誤差及速度誤差以外，亦可評估不同距</p>

<p>而，建議後續研究可進一步量化誤差指標(例如：位置誤差、航向誤差、速度誤差之統計分布)，並說明在不同距離、方位角及海況條件下之效能差距，以利實務單位評估系統適用範圍與限制。</p>	<p>離、方位角、海況與目標條件下之系統的表現差異，以更具體掌握高頻雷達系統適用範圍、限制及實務應用情境，做為後續系統優化與推廣應用之參考。</p>
<p>4.本計畫以AIS航跡做為驗證基準，方法正確且具說服力，惟AIS本身亦存在訊號遺失、更新率不足或人為關閉等問題。建議於報告中更明確說明AIS資料品質篩選條件、時間同步方式及異常資料處理原則，並提醒讀者AIS一致性結果並非等同於「絕對真值」，以避免實務應用時過度解讀系統精度。</p>	<p>感謝委員建議，已於本計畫報告中新增第3.9小節，補充說明AIS資料更新特性、資料篩選條件及時間同步方式等內容，並說明雷達船舶軌跡與AIS航跡2種資料於比對驗證時，可能存在船舶座標位置比對上，發生真實位置發生座標定位之偏差，進一步避免使用者實務應用上造成過度解讀系統效能的情形，整理如報告第3-18頁至第3-20頁與第3-19頁表3-1。</p>
<p>5.本研究嘗試將YOLOv4深度學習架構應用於雷達距離方位角影像進行船舶辨識，顯示研究團隊積極朝智慧化方向發展，值得肯定。然而，目前成果屬於「初步可行性驗證」階段，訓練資料規模、類別多樣性與跨域泛化能力仍有限。建議於結論中明確區分「研究驗證成果」與「實務可部署系統」之差距，並提出後續資料擴充、模型驗證與實場測試之具體建議，以避免被誤解為已可直接取代既有監控系統。</p>	<p>感謝委員建議，本計畫採用深度學習架構為時勢所需，智慧化方向發展應用相當多元，非常適合應用在港區的各應用場景，將持續推動與落地應用；本計畫已依建議於報告第6-2頁，第6.1小節，結論(七)補充說明，避免被誤解本計畫深度學習初步可行性驗證之研究成果已經可直接取代既有監控雷達或AIS系統。</p>
<p>6.整體研究成果顯示，高頻海洋陣列雷達於港區船舶監測上具有良好輔助潛力，特別是在夜間、能見度不佳或AIS未回傳情境下。然而，建議後續可更明確說明其在港口交通服務系統(VTS)或智慧港灣平台中的定位角色，例如：做為補充感測、冗餘監控或特定水域預警工具，以協助管理單位理解其導入效益與投資合理性。</p>	<p>感謝委員肯定與支持，某些情況AIS資訊存在丟失或虛假訊息等問題，特別是在夜間、能見度不佳或AIS未回傳情境下，高頻海洋陣列雷達對於港區船舶，提供一個良好的補助效果，有機會鏈入港口交通服務系統(VTS)或智慧港灣平台，提供應用服務。本計畫已依建議於報告第6-4頁，第6.3小節，成果效益與後續應用情形(三)補充說明後續研究路徑與方向。</p>
<p>7.綜合評估，本報告在技術深度、研究完整性及實測驗證方面均達政府研究計畫之良好水準，成果具延續應用與深化發展價值。若能於誤差量化、實務限制說明及系統整合應用層面再予補強，將更有助於未來推動高頻海洋雷達於我國港灣航安</p>	<p>感謝委員肯定與支持，本計畫致力於方法建構、研究完整性及實測驗證等面向之推動，惟如委員所提，於誤差量化、實務限制說明及系統整合應用層面，仍有進一步補強空間，現階段主要受限於案例分析數量仍有限，致使不同距離、方位及觀測條件下等誤差特性，尚待透</p>

<p>管理與智慧化監控之實際落地。</p>	<p>過更多實測案例加以系統性整理與分析，後續如能持續擴充案例數量，將可進一步就船舶定位與航跡比對結果，補充不同條件下之誤差統計分析，更具體呈現系統效能、適用範圍及限制條件。</p>
<p>(二)國立成功大學 莊士賢委員：</p>	
<p>1.第二章「文獻回顧」所整理的相關文獻相當完整，研討內容相當有深度，並具學術價值。</p>	<p>感謝委員肯定，本計畫系統性文獻回顧與內容，後續將採納合適之研究方法與技術，並精進研究內容與應用分析。</p>
<p>2.本計畫針對雷達監測船舶訊號所建立的作業流程，由原始雷達資料處理開始，再整合多尺度取樣、雜波抑制、波束成型及二維空間域圖譜建構等步驟，並結合輪廓線定位與連續圖譜，已成功建立一套具備實際運作可行性之船舶定位與航跡萃取技術。</p>	<p>感謝委員肯定，本計畫雷達監測船舶訊號之作業流程，係建立於過去持續投入與累積之研究成果基礎上，並經不斷改良與優化，以驗證其技術可行性。後續將持續精進實測案例、強化驗證成果分析，據以提升船舶定位、航跡追蹤及系統運作穩定性，並進一步增進後續實務應用價值。</p>
<p>3. 案例分析結果經與AIS資訊比對，顯示本計畫研發的技術不受日夜差異之顯著影響，具備跨時段之穩定船舶偵測能力，適用於長時間連續之海域船舶監測作業。</p>	<p>感謝委員肯定，本計畫所發展之雷達船舶訊號偵測技術，經日夜情境之案例分析，結果顯示本計畫具備穩定之辨識與定位能力，初步驗證其未受日夜差異之顯著影響，能長時間連續性偵測海域船舶，後續將持續累積實測案例，並精進分析方法，以進一步提升系統穩定性及實務應用效益。</p>
<p>4. 本年度計畫目標聚焦於船舶目標之偵測與定位，目前雖僅定義單一辨識目標(類別ship)，然雷達回波訊號中諸多雜訊，要如何準確標記船舶目標，有賴於資料前處理及資料清洗，只有高品質的訓練資料，才能訓練出高效能的AI模型。這部分的討論及作為在報告中較簡略，建議在未來研究中應對此部分進一步深化。</p>	<p>感謝委員建議，本計畫已於報告第4-3頁第4.1小節，針對樣本選取作業、資料清洗作業及標註作業等內容不足加以敘明，後續研究將配合人工智慧模型訓練需求，持續精進委員指導與建議，納入資料前處理及資料清洗流程等深化內容，以逐步提升雷達船舶訓練資料集品質與強化模型辨識效能及穩定性。</p>
<p>5. 此外，AI還可進一步應用於本研究所提之分析流程中的各步驟的方法改良，這也是後續值得深入探討的議題。</p>	<p>感謝委員建議，人工智慧對於重複性工作及互動式應用，確實可提供研究人員於研究過程中更多方法選擇與應用彈性，不僅有助於分析流程各步驟之改良，亦有助於新興方法之嘗試與未知問題之探索，未來將持續應用探討各項議題。</p>

<p>5.目前採用的YOLO之版本太舊，建議未來可選用更新版的YOLO模型，或是其他開源模型。</p>	<p>感謝委員建議，本計畫現階段做為初探，採用 MATLAB 原生支援之 YOLOv4，以利快速驗證資料型態與流程可行性；委員所提更新版模型與其他開源模型之建議，確實更具參考價值，後續亦更值得其他模型納入比較，做為精進方向。</p>
<p>6. 綜觀計畫執行的每階段之研究過程皆相當嚴謹及實在，研究成果豐碩，極具實務應用及學術價值。然目前所提技術在各步驟所採用的方法仍存在其適用限制，使得此技術的泛用性仍有待改良與精進，值得進一步投入研發，以擴展其實務應用的範圍。</p>	<p>感謝委員指導與肯定，本計畫所提各步驟方法仍存在適用限制，如委員所述確為本計畫後續精進之重點，特別是機器學習部分目前亦屬初步導入階段，此技術的泛用性仍有待改良與精進，後續尚待透過資料集擴充、消融實驗與模型比較分析，以進一步提升不同應用場景之適用範圍，後續將依委員意見深化應用至未來研發工作。</p>
<p>(三)國家海洋研究院 賴堅戊委員委員</p>	
<p>1. 建議船舶監測技術的使用者需求盤點，例如詢問臺灣港務股份有限公司瞭解現有技術的不足。</p>	<p>感謝委員建議，本計畫已於115年1月22日拜訪臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司船舶交通服務中心，進行使用者需求盤點，實際瞭解港區船舶交通服務之作業流程、監控範圍、主要資料來源、現行系統限制及未來輔助功能需求，已初步掌握船舶進出港操作瓶頸與改善空間，並已納入本計畫後續研究、系統定位與應用情境分析之重要依據。本計畫已依建議於報告第2-41頁至第2-42頁，新增第2.4小節，補充說明臺中港使用者需求訪談情形。</p>
<p>2. 應儘早建立技術發展路徑圖，包含單目標偵測到多目標追蹤與威脅評估，從驗證可行性至穩定運行等。</p>	<p>感謝委員建議，本計畫已補充技術發展路徑規劃，並持續滾動檢討，做為後續研究推展與系統精進之參考依據，惟相關技術仍需配合場域驗證結果、港區管理需求及系統整合情形逐步調整，後續將持續修正精進，以確保技術發展方向符合實務應用需求。本計畫已依建議於報告第6-4頁，成果效益與後續應用情形(四)補充說明技術路徑與新增圖6.1，完善路徑藍圖。</p>

<p>3. 報告中提及時頻譜(TF)結合Capon method的優勢，也提到二維空間域圖譜(RA)結合AIS和人工智慧的可行性，最後又回到調適性偵測法(ADT)的實測案例驗證，能否補充這3者的關聯性，與未來整合的流程。</p>	<p>感謝委員建議，本計畫已於報告第3-1頁第3章前言補充3項不同層次技術方法之關聯性，以敘明整體技術發展架構；另於報告第6-4頁，「成果效益與後續應用情形(四)」補充說明技術路徑，並新增圖6.1，完善未來整合流程，並說明技術發展之規劃方向，提供應用參考。</p>
<p>4. 數發部已發布AI-Ready Dataset Metadata指引以及國科會人工智慧基本法通過，建議未來將這些指引規範納入AI發展的框架中。</p>	<p>感謝委員建議，參酌數位發展部發布的指標指引及人工智慧基本法之規範精神，後續人工智慧發展不僅需著重於模型建置與辨識技術本身，亦將納入資安安全、資料治理、風險管理、隱私保護、公平性檢視及責任歸屬等面向，將於後續研究計畫中將這些指引規範納入AI發展的框架中，以確保整體框架架構的完整性，並做為後續人工智慧技術發展、驗證及作業化應用之重要依據。AI-Ready Data詮釋資料框架指標指引(第一版)詳如附錄五、人工智慧基本法詳如附錄六。</p>
<p>(四)運研所運輸技術研究中心第一科 賴瑞應科長</p>	
<p>1. 目前系統主要以 AIS 資料做為驗證基礎，建議後續可增加關於「無AIS設備船舶（如小型漁船、非法入侵船隻）」的偵測效能分析。因為港口管理的核心挑戰之一是監控未開啟 AIS的「黑暗目標」。若能詳述雷達如何透過時頻脊線辨識這些目標，將有助於港埠管理單位與海巡單位進行管理與安全執法，補足現有監控系統的死角。</p>	<p>感謝委員建議，船舶自動識別系統(AIS)係海域船舶自動通報與海上交通感知系統，為交通管理或航運管理等之重要研究工具。港口航管或海岸巡防真正棘手情境，卻是無AIS設備船舶或未開啟AIS系統之目標，後續將依委員建議，評估時頻脊線特徵、空間域連續航跡與AIS未匹配目標之分析方式，建立無AIS設備船舶辨識與分析之基礎，做為港埠管理及海巡安全執法應用之參考。</p>
<p>2. 報告提到目前系統每30分鐘讀取1次資料，暫不適合長時間連續監測，港埠管理者需要接近即時（Real-time）的動態資訊。建議後續研究可朝向縮短資料處理延時，實現每1-5分鐘更新1次的船舶軌跡圖。</p>	<p>感謝委員建議。委員所提港埠管理對於即時動態資訊之需求，確實為後續系統應用發展之重要方向。現階段本計畫船舶分析流程係每30分鐘讀取1次雷達資料檔案，確實無法滿足接近即時更新之需求。就目前所知，較具可行性之技術方案為導入MQTT訊息傳輸機制，以縮短資料處理延時，並朝每1至5分鐘或更短時間更新船舶軌跡資訊之方向發展，後續研究將配合系統架構、資料傳輸方式及處理流程之調整，進一步研議其可行</p>

	性與實作方式。
3. 報告指出目前海洋雷達網由多單位（本所、中央氣象署、國家海洋研究院等）共同建構，報告可明確提出與海巡署或中央氣象署進行「資料異地備援」或「多基站資訊融合」的標準作業流程（SOP）建議。	感謝委員建議，資料異地備援方面，目前已具多元備份機制，後續國家海洋研究院亦已建立異地備援機制，以補強資料保存能力與系統韌性。至於多基站資訊融合部分，目前本所、中央氣象署及國家海洋研究院均已投入相關技術發展，惟其關鍵仍在於各單位雷達站間之時間同步，唯有時間同步機制趨於成熟，方能確保座標、速度等相關物理量於整合分析時具有一致性與可靠性，未來如能持續透過跨機關合作共同發展，將有機會逐步建立多基站資訊融合之標準作業流程。
(五)運研所運輸技術研究中心第二科 李俊穎科長	
1. 本計畫提供一套可行性船舶定位分析流程，可提供後續計畫應用參考。	感謝委員肯定，本計畫已逐步建立由原始雷達資料處理、二維空間域圖譜建構、船舶定位、航跡分析至 AIS 比對驗證之分析流程，並初步驗證海洋陣列高頻雷達應用於港灣海域船舶監測之可行性。相關成果可做為後續計畫於船舶監測方法精進、技術整合及應用推展之參考依據，後續亦持續配合實測資料累積與方法優化，提升分析能力與實務應用之效益。
2. 建議第5章加入小結說明，並與前面不同方式的彙整說明。	感謝委員建議，已於報告第5-10頁新增第5.3小節，加入小結說明，針對與前面第三章、第四章不同方式之處彙整說明。
3. 目前適用限制建置後續計畫可再盤點及說明。	感謝委員建議，目前已掌知幾個限制，例如(1)不同方法各有適用條件，尚難涵蓋所有觀測情境、(2)機器學習部分仍屬初步導入，泛用性還要再驗證、(3)資料量、資料清洗、資料品質與標註一致性仍待提升與(4)部分結果與案例探討仍需更多數據與AIS 加以驗證比對確認；後續計畫將持續就相關議題進行系統性整理與分析，逐步建立適用範圍與限制條件之說明基礎，做為未來技術精進與實務應用推展之參考。

(六)運研所運輸技術研究中心第三科 蔣敏玲副研究員

<p>1. 部分圖名建請酌調，如圖名中包含文獻出處，圖片來源等，此可依本所出版品格式標示。</p>	<p>感謝委員建議，已依本所112年12月5日頒布之「交通部運輸研究所出版品管理作業要點」，辦理各圖之圖片來源標示方式修正，並配合本所出版品格式統一調整圖名與出處呈現。</p>
<p>2. 第1.1節提及106-114年數位國家·創新經濟發展方案，目前已更新至114-117智慧國家2.0，建請酌參調整說明內容。</p>	<p>感謝委員建議，已於報告第1-1頁調整第1.1小節內容，加入114-117智慧國家2.0綱領相關說明，以補充106-114年數位國家·創新經濟發展方案之後路徑。</p>
<p>3. 部分圖表內容建議適度放大，增加易讀性，如：圖3.5、圖4.3、圖4.6。</p>	<p>感謝委員建議，已依委員意見於報告第3-5頁、第4-4頁及第4-10頁，圖3.5調整至同頁、圖4.3適度調整版面，以及圖4.6之圖示內容適度放大與調整版面，以提升易讀性與資訊呈現效果。</p>

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期末審查會議

臺中港高頻雷達訊號應用分析(3/3)-

船舶觀測分析



李政達 副研究員

115年1月6日

大綱

- 一、前言
- 二、文獻回顧
- 三、船舶辨識資料分析驗證
- 四、應用機器學習於船舶辨識分析初探
- 五、研究分析與探討
- 六、結論與建議



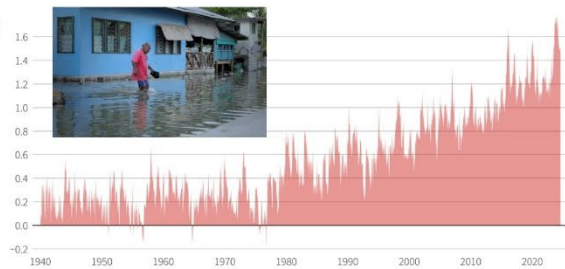
一、背景說明

一、前言 (1/8)



Global temperatures keep climbing

Monthly global average temperatures, compared to the 1850-1900 pre-industrial period. °C



世界氣象組織(WMO) 根據彙整六個國際氣候資料集的分析結果，於2024 年正式紀錄全球平均地表氣溫較 1850-1900 年工業化前平均值高出溫差 1.55°C (誤差±0.13 °C)，全球管制溫度 1.5°C的門檻，並創下全球歷史紀錄

- 第三期溫管目標已於5月6日經由行政院核定
- 從內部推動，串接各淨零辦公室與港航體系
- 建立**淨零轉型，永續臺灣之政策架構**，形成**短中長期具體策略**₃

前言 (2/8)



各級政府資料治理，建構跨域整合

為落實各級政府資料治理，建構跨域整合、主動提供、量身打造、無所不在的服務的一站式政府智慧服務，行政院通過數位國家·創新經濟發展方案（106-114年）。

- 數位科技導入與資料整合
- 主動提供與量身打造且無所不在智慧政府服務體系
- 提升公共治理效能與即時決策能力
- 已為**海域治理**與**港埠管理**重要之一環



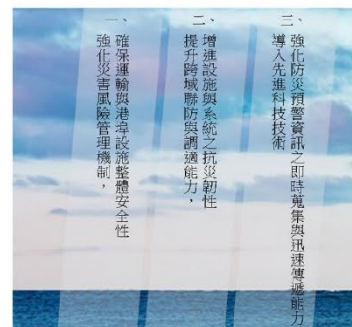
前言 (3/8)



交通部114年施政計畫

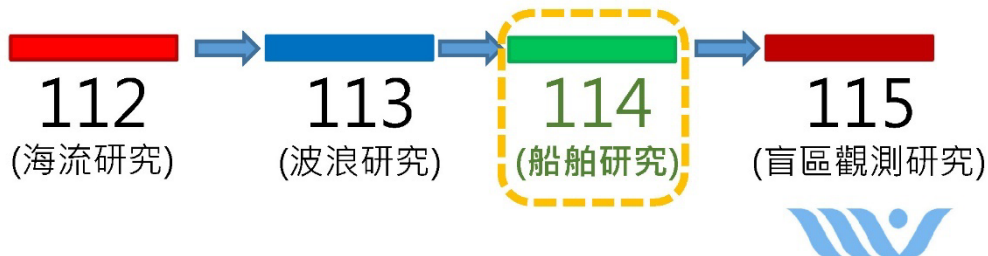
因應全球氣候變遷、極端氣候事件頻繁，以及複合型災害風險提升，強化運輸系統韌性與防災應變能力成為當前重要課題。交通部施政目標聚焦於建構安全且智慧化的交通環境，透過智慧運輸科技、大數據分析與創新防災技術，落實「人本交通、便捷臺灣」之理念。運輸研究所則持續精進智慧化環境監測能力、推動環境災防創新應用，以滿足國家在交通安全及經濟永續發展的需求。

(運輸部門因應**氣候變遷調適與防災**)



前言 (4/8)

- 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 本計畫接續研究海洋陣列雷達觀測，精進之遙測技術，所獲得船舶資訊可做為交通部航港局維持船舶航行安全使用，海氣象資訊可做為船舶進出港區、港灣設計規劃、海事工程、海岸防護之重要參據。



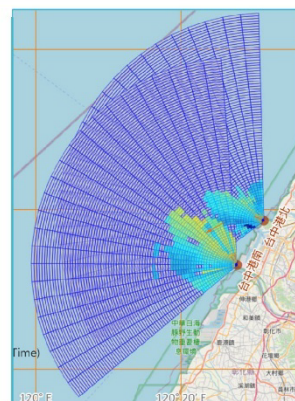
6

前言 (5/8)

臺灣港航永續作法 積極海象偵測與維持航安

1. 強流、橫流、浪湧對進出港安全的影響
2. 極端天氣事件頻率上升(颱風、季風)
3. 改善數值邊界條件，使模式更加精準

傳統海象觀測限制
浮標 / 底碇站：點位、維護成本高

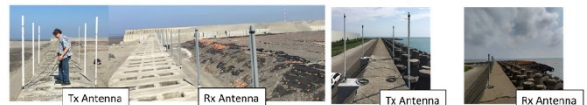


雷達基本資料

- 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

— 2018年11月：北站

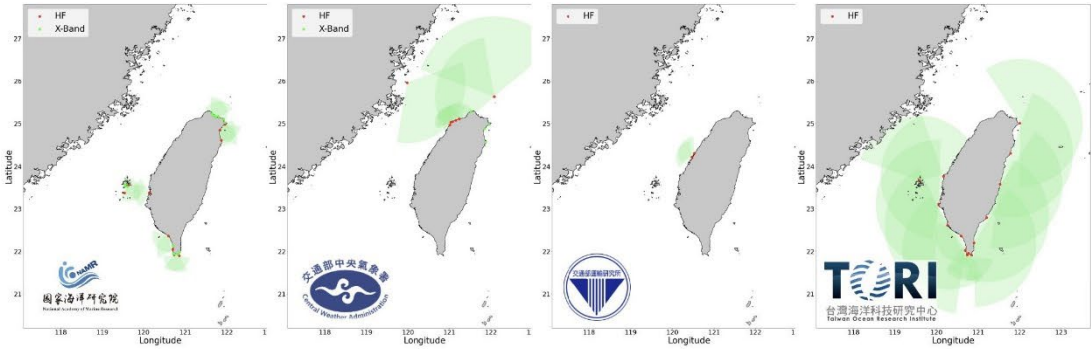
— 2021年9月24日：南站



雷達遙測成為港區即時、連續、廣域觀測的關鍵工具

前言 (6/8)

國家整合海洋雷達觀測網 未整合 (114年現況：海洋雷達分布在各機關構)



共計 27座 (HF 12/ Xband 15)
主要功能為波浪及海流觀測
空間解析度 250~375公尺
時間解析度 20~30分鐘更新

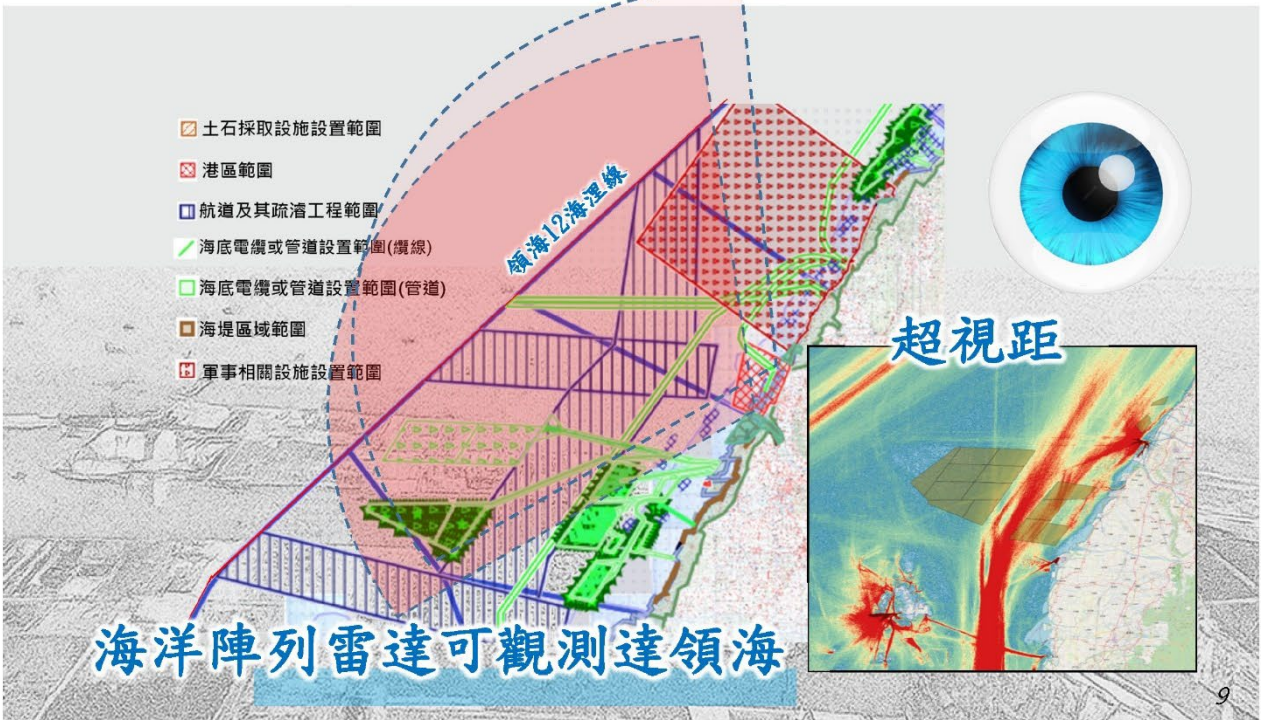
共計 13座 (HF 8/ Xband 5)
主要功能為波浪及海流觀測
空間解析度 250~3,000公尺
時間解析度 3~30分鐘更新

共計 3座 (HF 2/ Xband 1)
主要功能為波浪及船艦觀測
空間解析度 500公尺
時間解析度 30分鐘更新

共計 15座 (HF 15/ Xband 0)
主要功能為海流觀測
空間解析度 1~10公里
時間解析度 30~60分鐘更新

海域安全監控應變資訊與技術發展先導計畫(114-117)

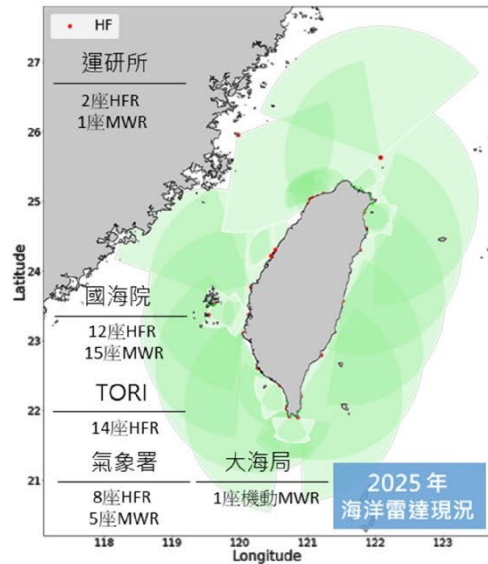
前言 (7/8)



海洋陣列雷達可觀測達領海

前言 (8/8)

- ① 研究範圍：臺中港近岸沿海。
- 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。



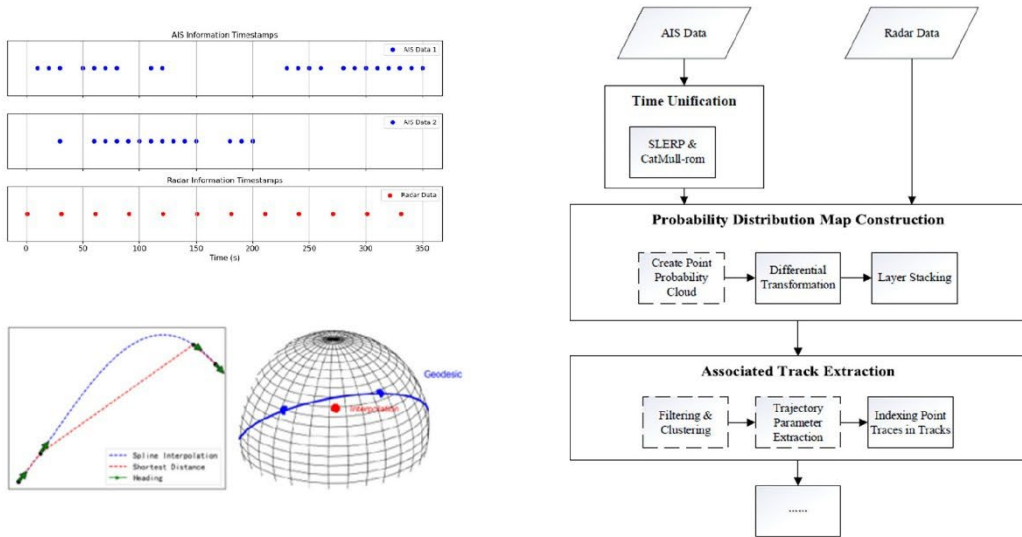
10

二、文獻回顧

11

文獻回顧 (1/11) Xu(2024) 1

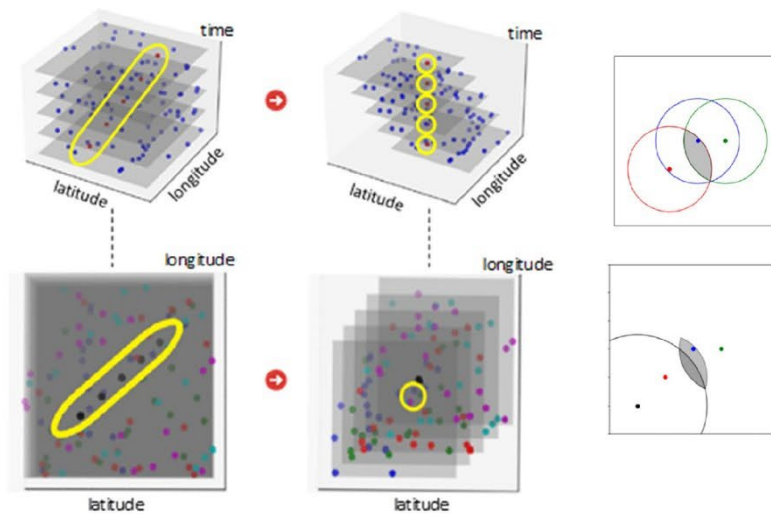
Xu, J., Suo, Y., Jiang, Y., & Yang, Q. (2024). A Fast Algorithm for Matching AIS Trajectories with Radar Point Data in Complex Environments.



12

文獻回顧 (2/11) Xu(2024) 1

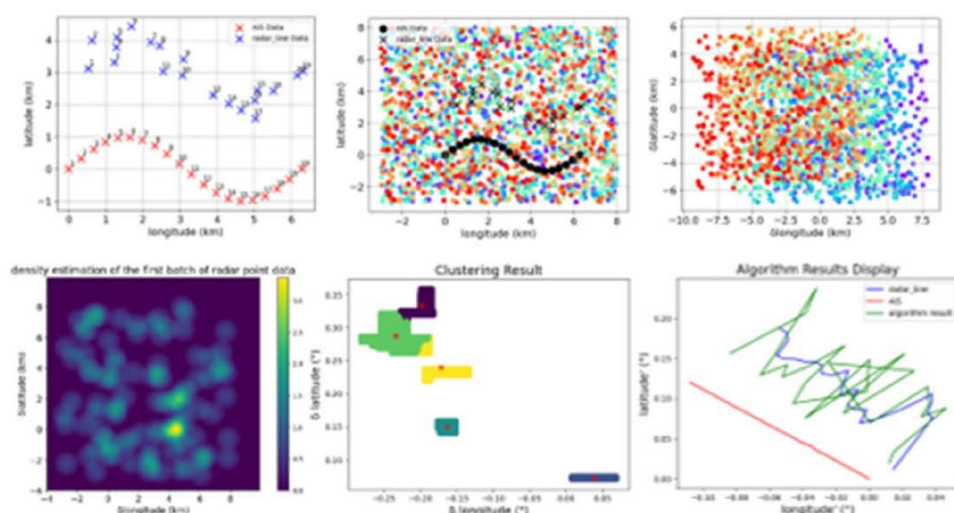
Xu, J., Suo, Y., Jiang, Y., & Yang, Q. (2024). A Fast Algorithm for Matching AIS Trajectories with Radar Point Data in Complex Environments.



13

文獻回顧 (3/11) Xu(2024) 1

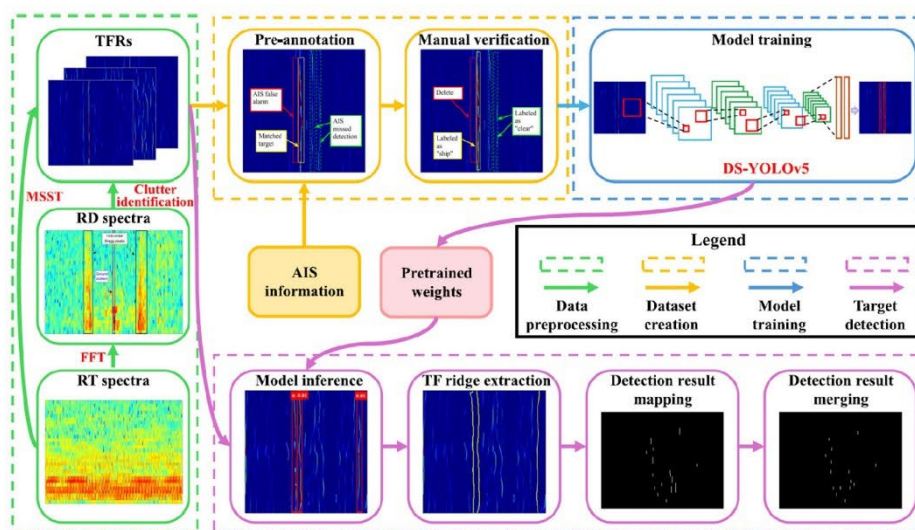
Xu, J., Suo, Y., Jiang, Y., & Yang, Q. (2024). A Fast Algorithm for Matching AIS Trajectories with Radar Point Data in Complex Environments.



14

文獻回顧 (4/11) Huang(2024) 2

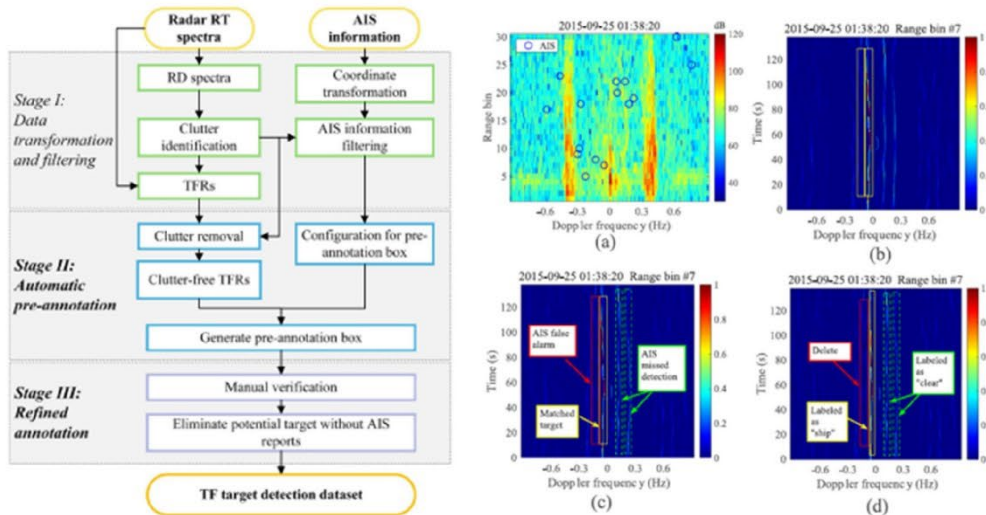
Huang, D., Zhou, H., Tian, Y., Yang, Z., & Huang, W. (2024). A Deep-Learning-Based Time-Frequency Scheme for Ship Detection Using HFSWR.



15

文獻回顧 (5/11) Huang(2024) 2

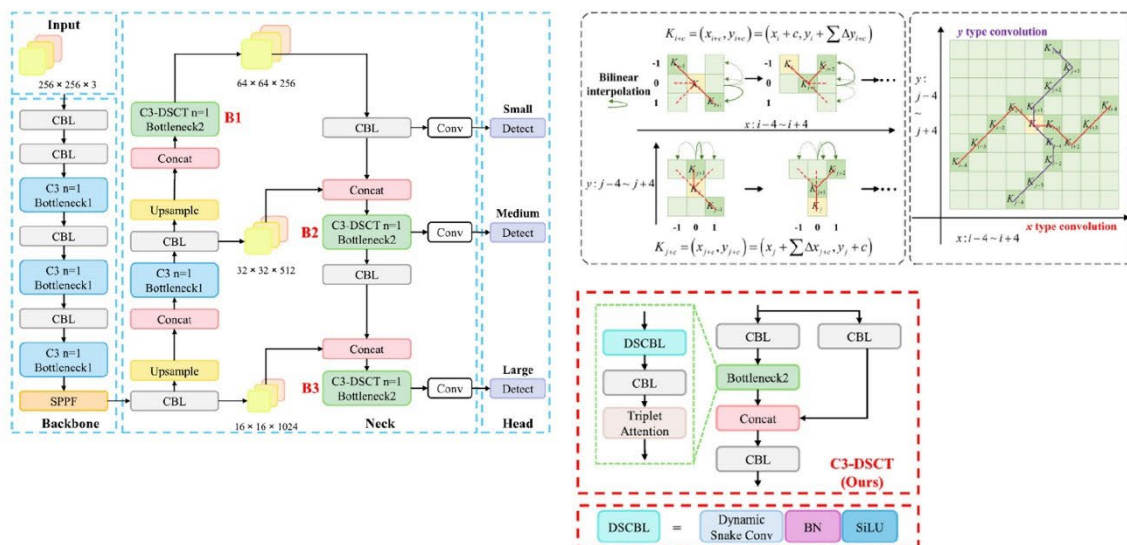
Huang, D., Zhou, H., Tian, Y., Yang, Z., & Huang, W. (2024). A Deep-Learning-Based Time-Frequency Scheme for Ship Detection Using HFSWR.



16

文獻回顧 (6/11) Huang(2024) 2

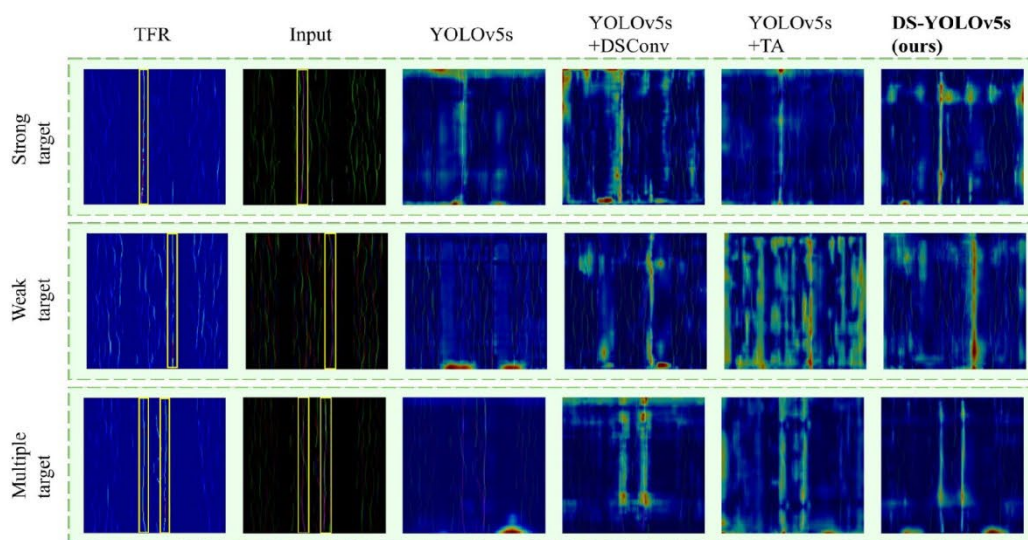
Huang, D., Zhou, H., Tian, Y., Yang, Z., & Huang, W. (2024). A Deep-Learning-Based Time-Frequency Scheme for Ship Detection Using HFSWR.



17

文獻回顧 (7/11) Huang(2024) 2

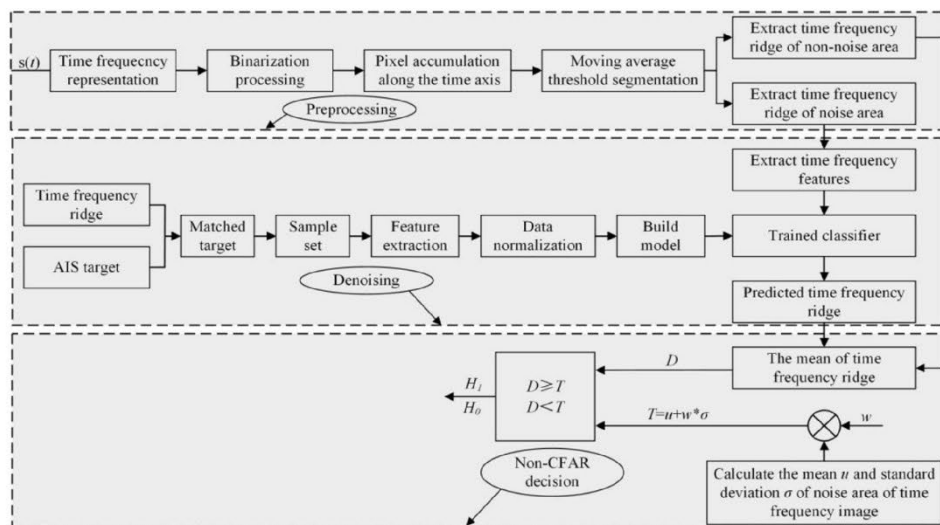
Huang, D., Zhou, H., Tian, Y., Yang, Z., & Huang, W. (2024). A Deep-Learning-Based Time-Frequency Scheme for Ship Detection Using HFSWR.



18

文獻回顧 (8/11) Yang (2024) 3

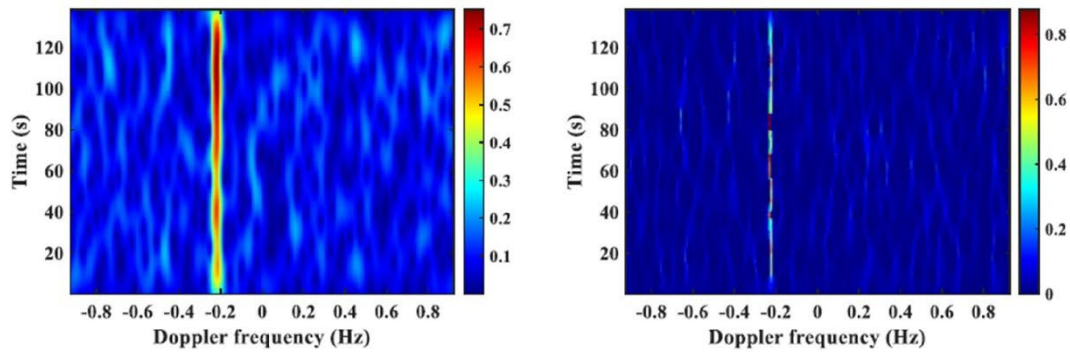
Yang, Z., Zhou, H., Tian, Y., Liu, G., Zhang, B., Qin, Y., Li, P., & Huang, W. (2025). Cascaded Detection Method for Ship Targets Using High-Frequency Surface Wave Radar in the Time-Frequency Domain.



19

文獻回顧 (9/11) Yang (2024) 3

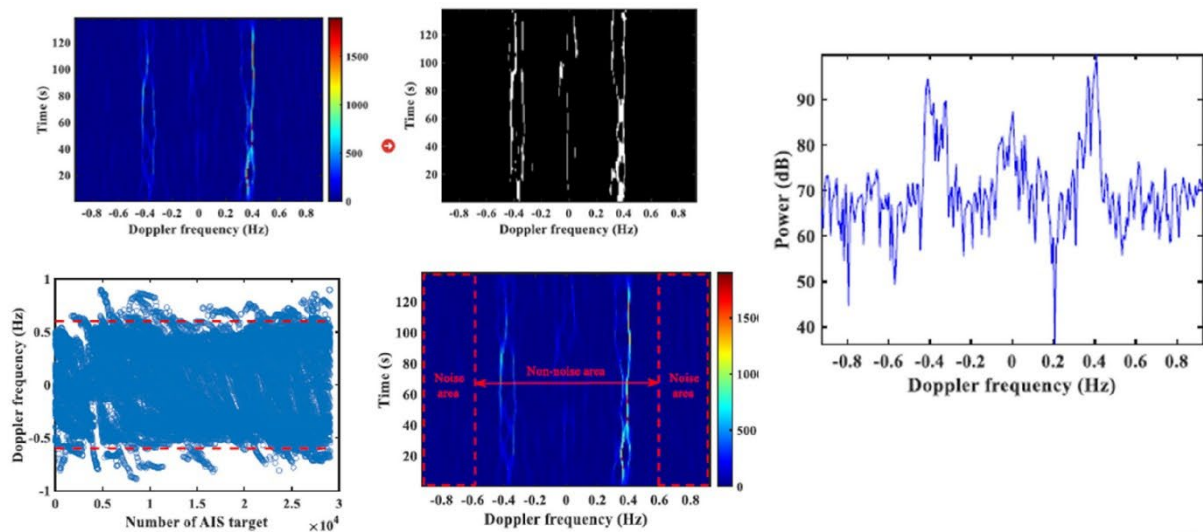
Yang, Z., Zhou, H., Tian, Y., Liu, G., Zhang, B., Qin, Y., Li, P., & Huang, W. (2025). Cascaded Detection Method for Ship Targets Using High-Frequency Surface Wave Radar in the Time-Frequency Domain.



20

文獻回顧 (10/11) Yang (2024) 3

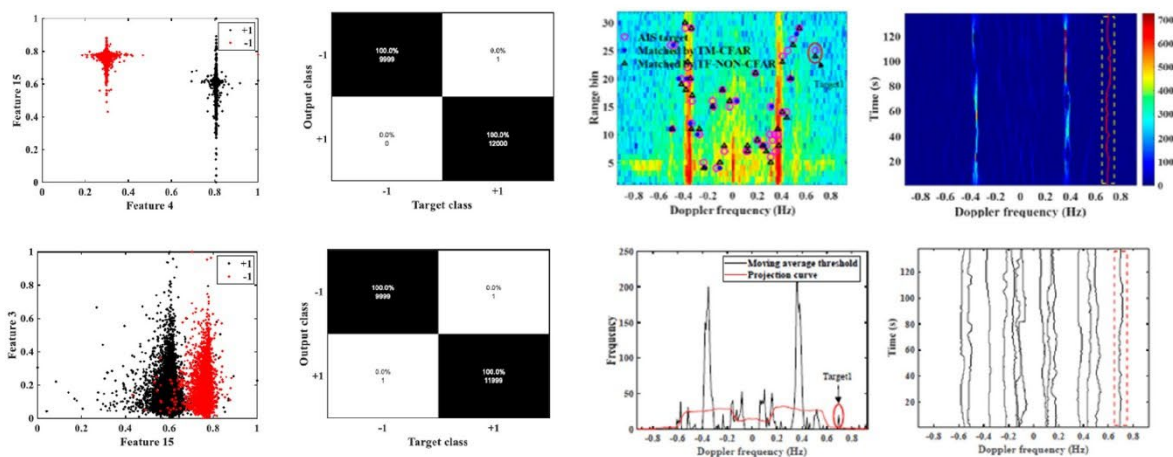
Yang, Z., Zhou, H., Tian, Y., Liu, G., Zhang, B., Qin, Y., Li, P., & Huang, W. (2025). Cascaded Detection Method for Ship Targets Using High-Frequency Surface Wave Radar in the Time-Frequency Domain.



21

文獻回顧 (11/11) Yang (2024) 3

Yang, Z., Zhou, H., Tian, Y., Liu, G., Zhang, B., Qin, Y., Li, P., & Huang, W. (2025). Cascaded Detection Method for Ship Targets Using High-Frequency Surface Wave Radar in the Time-Frequency Domain.

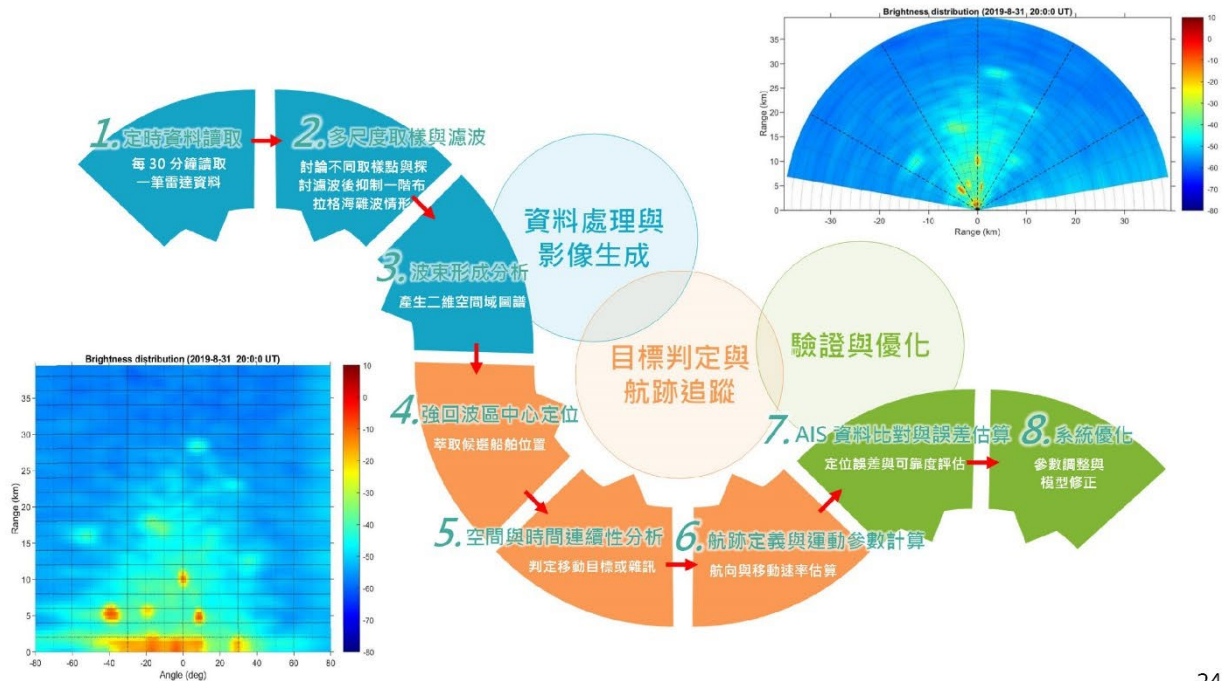


22

三、船舶辨識資料分析驗證

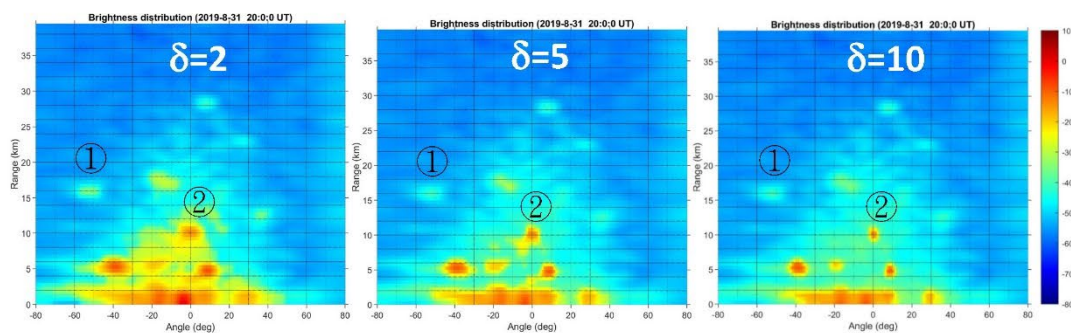
23

船舶辨識資料分析驗證(1/5)



船舶辨識資料分析驗證(2/5)

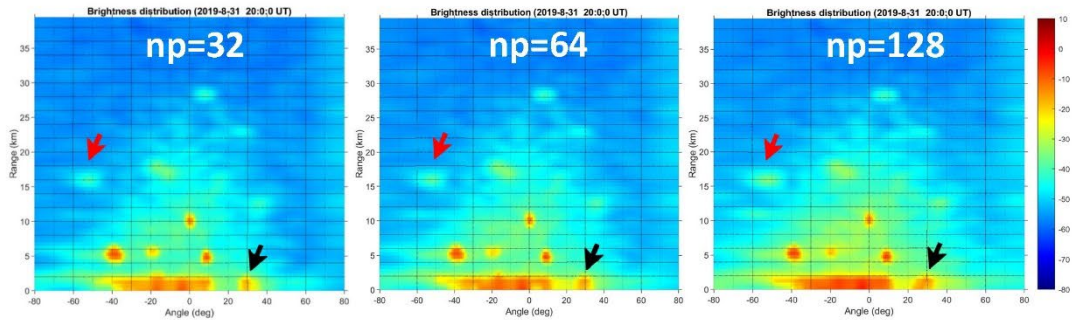
二維空間域圖譜 NC-Capon之 δ 值參數調整



由左而右的圖譜之 δ 值分別為2、5、10。

- δ 值越大，解析度越佳 ②，但是亮度值會下降 ①。
- δ 值與亮度值之間需要取得平衡，目前取 δ 值 10 效果最好

運算資料長度分析

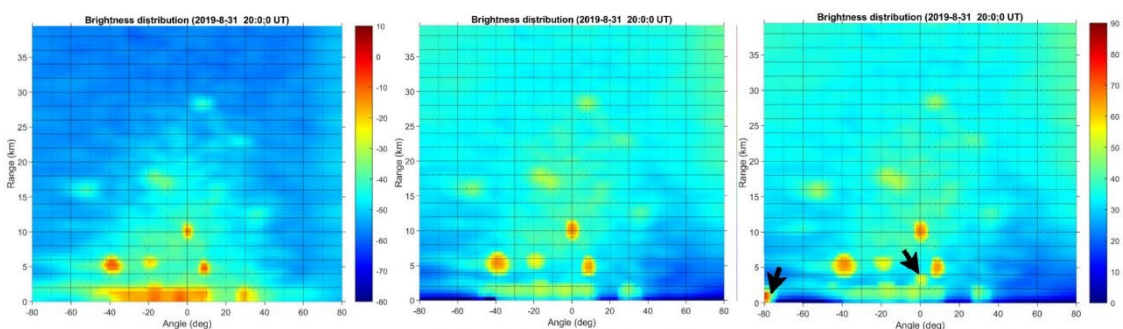


由左而右圖譜每次分別取16、32和128資料點運算之，
平均圖譜數目為8張、4張和1張(δ 值10)

- np=16且平均8張圖譜，似乎有比較清晰的結果

26

距離和場型效應之修正、直流訊號



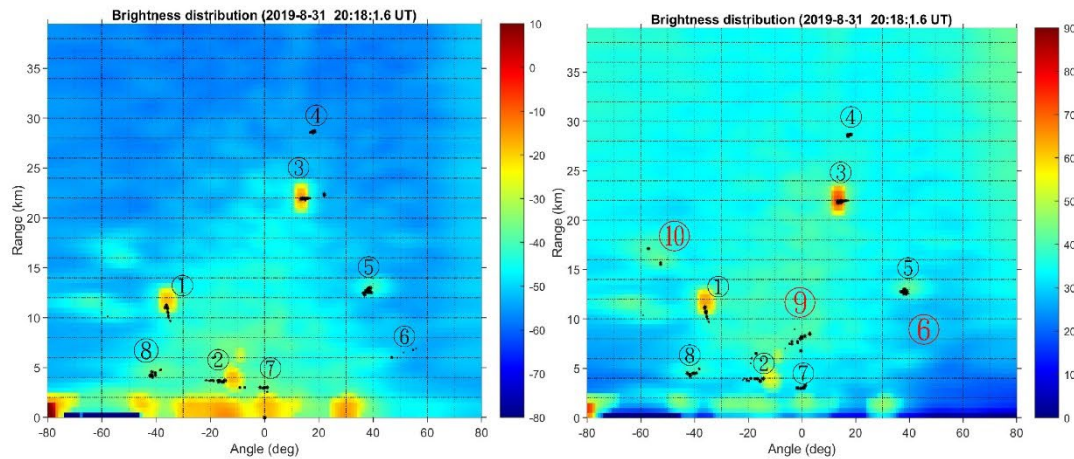
(a) 扣除直流0Hz

(b) 保留直流0Hz

- 距離與場型補償後，距離取其2次方補償，角度則以高斯函數補償，其標準偏差為 60° ，大於 60° 之後維持以 60° 補償之。
- 保留直流訊號之分析結果，箭號指示和二個明顯出現的目標物，中間零度附近應為幾乎不動的目標物。

27

連續圖譜定位船舶位置 (執行距離和場型校正)



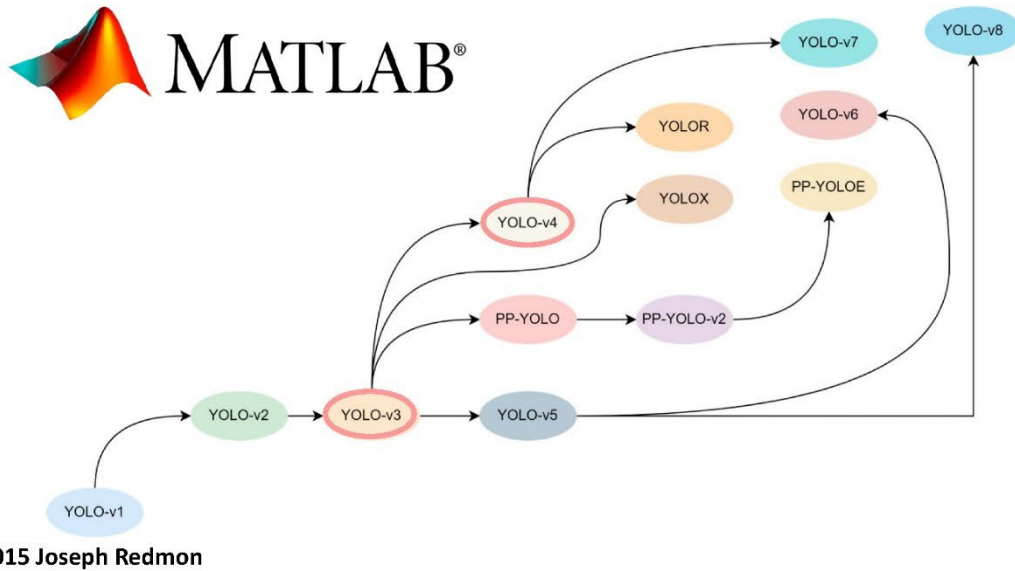
- (左圖) 未執行距離和場型校正、保留直流訊號
- (右圖) 執行距離和場型校正、保留直流訊號。

28

四、應用機器學習於船舶辨識分析初探

29

四、應用機器學習於船舶辨識分析初探 (1/6)

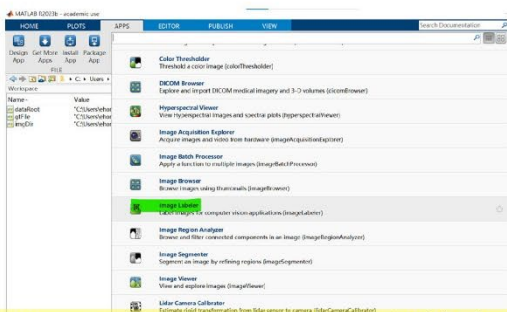


30

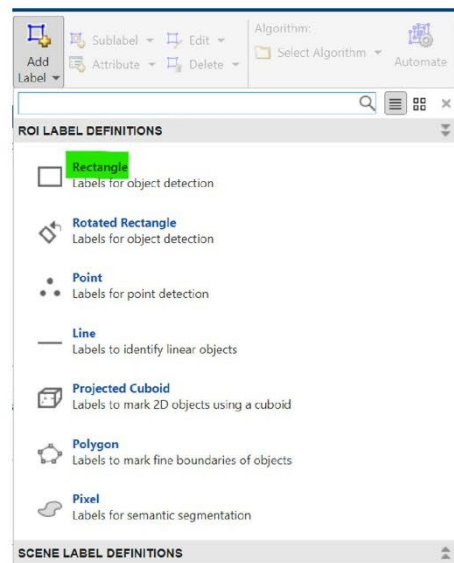
四、應用機器學習於船舶辨識分析初探 (2/6)



項目	MATLAB R2023b
YOLOv1	不支援
YOLOv2	支援
YOLOv3	支援
YOLOv4	支援
YOLOv5以上	需額外仰賴 PyTorch 或 ONNX 轉換機制



1. Image Labeler 工具

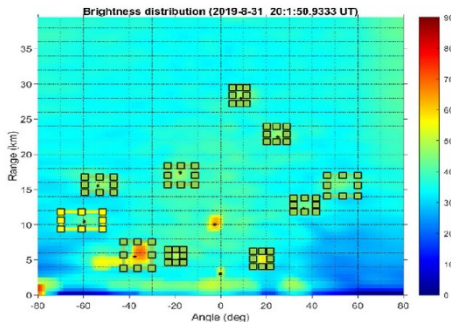


31

四、應用機器學習於船舶辨識分析初探 (3/6)

2. 工具標註

影像在進入訓練流程前，需調整模型所需之固定尺寸



- 前處理流程(preprocessPair)，於資料讀取階段同步完成影像縮放與標註座標轉換

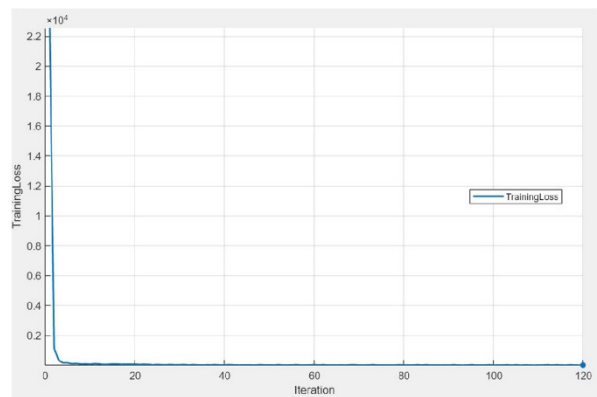
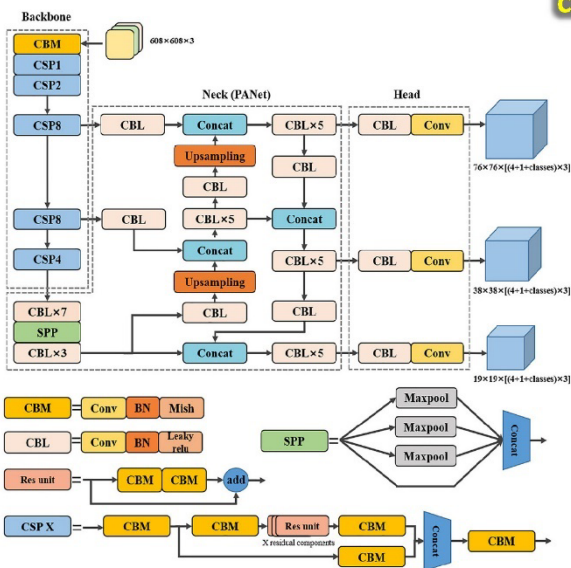
- 輸入尺寸(inputSize)=[H,W,N]，高度416素數、寬度416素數、N為3通道表示RGB (此設定)
- 盒子(boxes)= N×4 之矩形框座標矩陣，格式為[x,y,w,h]
- 標籤(labels)=N×1 之類別標籤向量，對應每個標註型態之目標類別，N意即表示為該影像所標註之船舶數量。

32

四、應用機器學習於船舶辨識分析初探 (4/6)

3. 網路架構與訓練設定

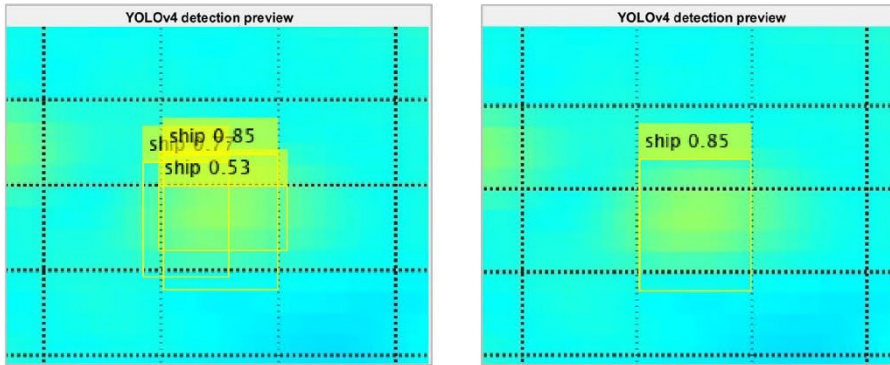
YOLOv4 架構，選用卷積神經網(CNN)網路骨幹(backbone)的csp-darknet53-coco



33

四、應用機器學習於船舶辨識分析初探 (5/6)

4. 訓練後案例應用



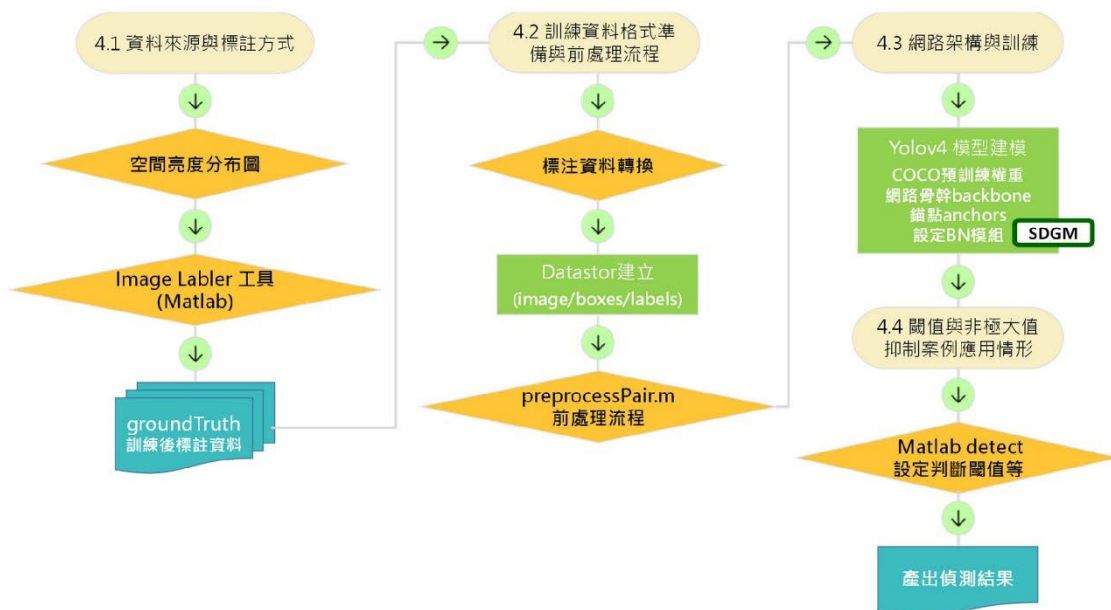
閾值代表模型對於目標存在之信心程度下限，

- 當閾值Threshold=0.3，設定較低時，模型將保留較多低置信度之候選框，有助於降低遺漏偵測之風險，但同時也可能增加誤報數量
- 當閾值Threshold=0.6，篩選條件過去嚴格，便排除潛在船舶。

34

四、應用機器學習於船舶辨識分析初探 (6/6)

5. Matlab機器學習流程

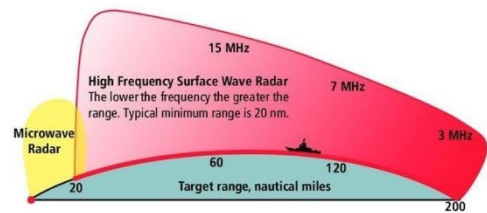
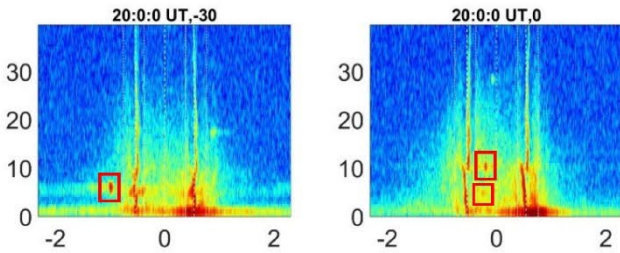
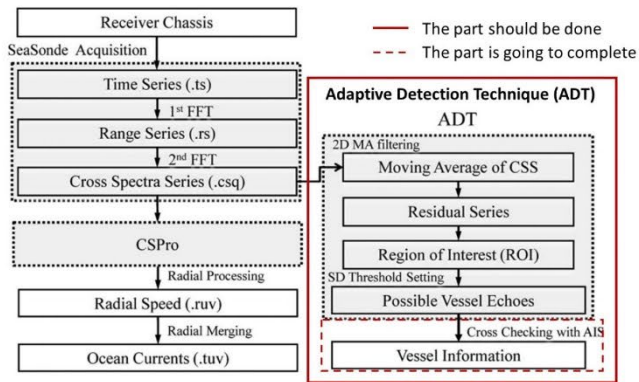


35



五、研究分析與探討

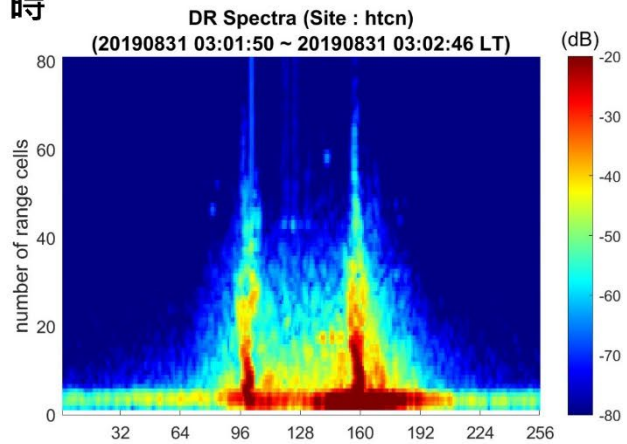
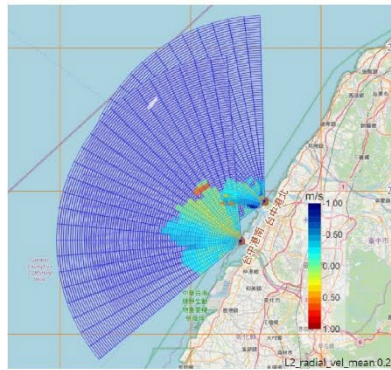
五、研究分析與探討 (1/6)



五、

研究分析與探討 (2/6)

2019年8月31日上午3時

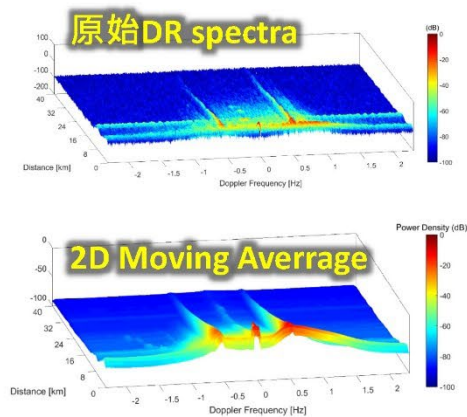
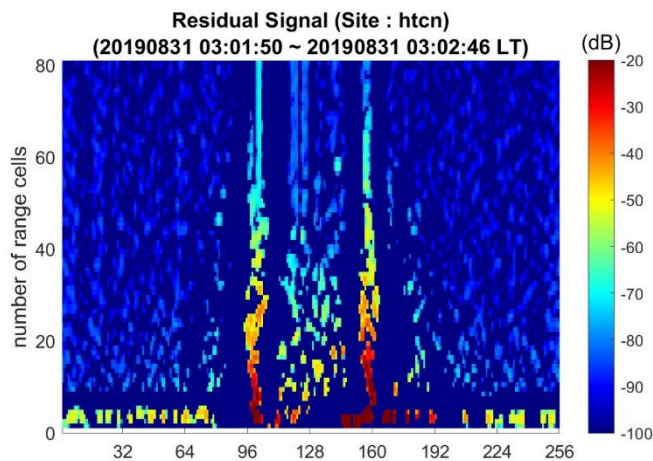


- 案例用於計算的時序資料長度為 55 秒
- 距離向共包含 81 個距離單元，對應最大觀測距離約為 40 公里
- 頻率向則設定為 256 個頻率單元，其頻率範圍介於 $-2.3 \sim 2.3$ Hz

38

五、

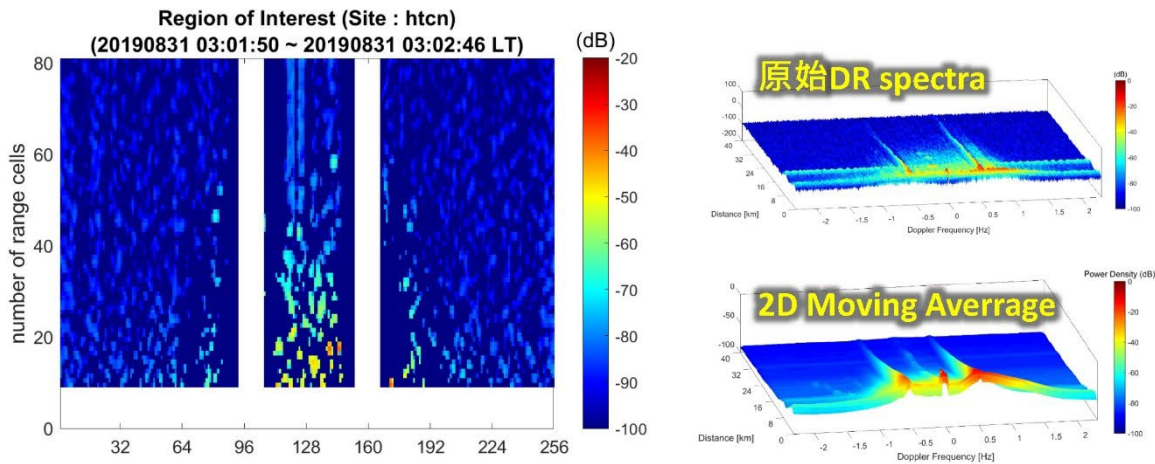
研究分析與探討 (3/6)



- 案例用於計算的時序資料長度為 55 秒
- 距離向共包含 81 個距離單元，對應最大觀測距離約為 40 公里
- 頻率向則設定為 256 個頻率單元，其頻率範圍介於 $-2.3 \sim 2.3$ Hz

39

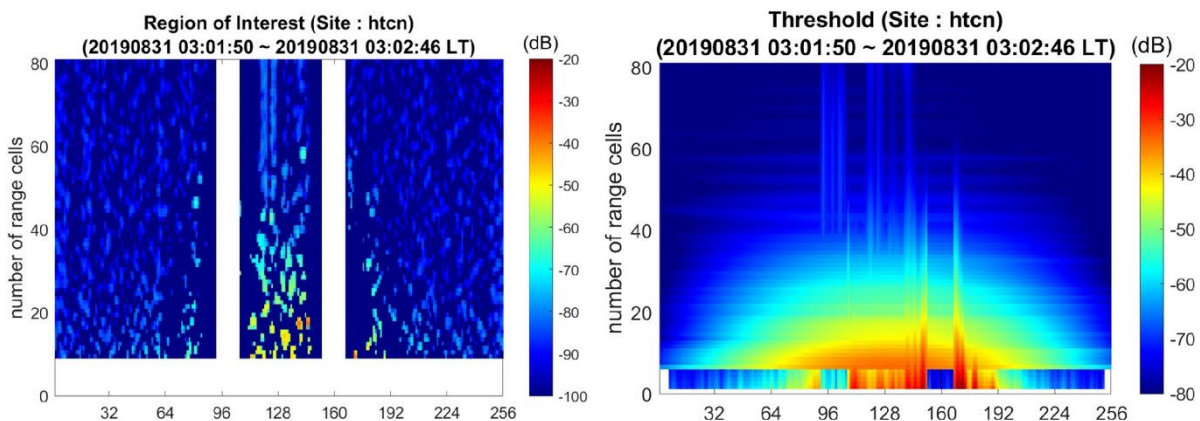
五、 研究分析與探討 (4/6)



- 0 ~ 4 公里之近岸區域取除主要源於近岸堤防等固定目標與環境干擾所造成之回波影響
- 接近頻率單元約 100 與 160 附近(此為引索單位非頻率Hz) , 仍存在顯著之殘留訊號

40

五、 研究分析與探討 (5/6)



- 殘餘訊號依據莊(2015) 所提出之調適性門檻設定方式 , 可在雜訊抑制與目標保留之間取得較佳平衡。
- 殘餘訊號平均值加上2.5 倍標準偏差 → **調適性門偵測閾圖**

41

六、

結論與建議 (1/6)

結論：

- ① 文獻回顧致獲結論，針對雷達與 AIS 資料於時間解析度不一致所造成之船舶遺漏問題，透過引入軌跡差分轉換與最鄰近距離計算之方法，可有效建立雷達與 AIS 航跡之對應關係，進而由雷達機率雲中萃取出合理且連續之船舶航跡。
- ② 本計畫由原始雷達資料處理開始，整合多尺度取樣、雜波抑制、波束成形及二維空間域圖譜建構等步驟，並結合輪廓線定位與連續圖譜追蹤技術，成功建立一套具備實際運作可行性之船舶定位與航跡萃取分析流程。
- ③ 研究結果顯示，二維空間域圖譜中之距離衰減修正、天線場型校正，以及是否移除隨時間變化不顯著之訊號，皆會顯著影響船舶回波顯示效果與定位穩定性，顯示港區船舶偵測作業須依實際觀測環境，審慎選擇適當之資料處理策略。

44

六、

結論與建議 (2/6)

結論：

- ④ 本計畫二維空間域圖譜之分析結果可知，當調整參數 δ 由 2 提高至 5 與 10，圖譜整體空間解析度呈現提升趨勢，船舶能量分布更為集中，目標邊緣亦趨於清晰，顯示所採用演算法具備良好之雜訊抑制能力與空間解析效果；此外，比較不同運算資料長度之短時間窗圖譜結果顯示，相較於 32 點資料，以 16 點資料形成之短時間窗在目標輪廓呈現上更為清晰，較有助於船舶回波特徵之判讀。
- ⑤ 調適性偵測法對於雷達偵測所受一階能量譜峰干擾能有效去除，偵測結果與 AIS 船舶資料比對，結果顯示雷達所推估之船舶位置與航跡方向，與 AIS 資訊具有良好一致性，調適性偵測法確實為可靠的判斷方式之一。

45

六、

結論與建議 (3/6)

結論：

- ⑥ 無論夜間回波較弱或背景雜訊較為複雜之情境，或於白天航行情形較為頻繁之時段，調適性偵測法皆可由雷達資料中成功擷取出船舶目標，並與 AIS 船舶航跡呈現良好對應關係，顯示本方法不受日夜差異之顯著影響，具備跨時段之穩定船舶偵測能力，適用於長時間連續之海域船舶監測作業。
- ⑦ 本計畫於既有雷達船舶辨識成果基礎上，初步導入 MATLAB 環境下之 YOLOv4 深度學習架構，證實其可於距離方位角空間亮度分布圖中穩定運行，並具備基本船舶目標辨識能力，為後續深化機器學習應用奠定基礎。
- ⑧ 本計畫成果可做為後續發展雷達、AIS 與機器學習整合之智慧船舶監測系統基礎，支援臺中港乃至其他商港之智慧航安、港區管理與海域治理應用。

46

六、

結論與建議 (4/6)

建議：

- ① 有關海洋高頻雷達之船舶偵測，現可行方法包含：傳統都卜勒距離譜分析、空間域 Capon 處理方式、調適性偵測法及時頻脊線處理方式等，雖皆具備一定分析能力，惟各方法皆存在其適用限制，尚難以涵蓋所有觀測情境，建議後續研究持續針對不同方法之適用性與限制條件進行系統性討論與比較。
- ② 文獻回顧顯示，時頻脊線特徵相較於傳統都卜勒距離譜之點位表示，在目標判讀上具有較佳之直觀性與辨識潛力，建議後續船舶目標偵測研究可以將時頻脊線特徵納入分析與探討。

47

六、

結論與建議 (5/6)

建議：

- ③ 根據文獻回顧，深度學習中之**動態蛇卷積可更靈活捕捉影像中之曲線或非直線結構**，建議後續雷達時頻脊線相關研究，可以**嘗試導入YOLOv5**，亦能安排**消融實驗探討**各模組對偵測效能之貢獻，亦可嘗試**非固定虛報率門檻之偵測策略**，以因應多目標與高雜訊情境。
- ④ 有關**船舶回波強度與船舶尺寸大小與雷達波長共振密不可分**，且由於**雷達散射截面積存在高度變異性**，建議納入評估研究與分析。
- ⑤ 後續研究建議**針對弱回波、小型船舶或定錨船舶**等情境，**優化現有船舶偵測與航跡萃取方法**，以**提升整體辨識成功率與連續追蹤能力**；此外，**回波強度補償**有助於定位與追蹤，但是否產生過度擬合後續值得研究探討。

48

六、

結論與建議 (6/6)

建議：

- ⑥ **MATLAB 已高度封裝YOLOv4**之底層網路結構與訓練流程，整體架構穩定且具可行性，使用者**無需自底層模型開始建構**，即可進行相關應用，大幅降低深度學習導入門檻，**建議相關研究人員可加以推廣與應用**。
- ⑦ **建議持續累積雷達船舶影像標註資料**，透過**擴充資料量與多案例訓練**，**驗證深度學習模型於船舶辨識的效能**，以利未來導入智慧化分析工具或自動化監測系統之基礎。
- ⑧ **建議**配合離岸風電、低碳航運及極端氣候因應等政策方向，**持續深化海洋雷達於港區與航道安全監控之應用**，**確保我國港航系統於能源轉型過程中具備足夠韌性與安全**。

49

簡報結束 敬請指教



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

會議名稱：114 年度本所運輸技術研究中心第二科及第三科自行研究
計畫專家學者座談會議

時間：114 年 5 月 14 日(星期三) 上午 10 時

地點：本所運輸技術研究中心 2 樓會議室

主持人：蔡立宏主任

紀錄：林英爵

出席單位及人員：如後附簽到表

壹、審查意見：

一、張家豪委員：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

風力限制係船舶進出臺中港重要條件之一，目前航港局訂定之臺中港船舶進港風力管制標準係採用北堤運輸技術研究中心（以下簡稱運技中心）測站及南堤台灣中油股份有限公司（以下簡稱中油公司）測站風力數據之平均值，惟引水人反映中油公司南堤測站之數據並非公開資料，建議改採用南堤運技中心測站。但各測站因設置地點、障礙物、角度不同，測得之風力數據亦不同，如果可透過本研究之校正機制採用運技中心南北堤兩個測站公開資料重新調整風力管制標準，亦可解決引水人因現行中油公司南堤測站資訊沒公開而無法即時判斷及預測風力大小的問題。

(二)澎湖港設計水位之探討：

1. 本研究之範圍界定無敘明清楚，請釐清是否只探討澎湖港碼頭設計水位，抑或有包括蒐集臺北港等 11 個商港之潮位觀測資料並進行分析。
2. 另請確認臺灣港務股份有限公司（以下簡稱港務公司）委託代管測站是否有包含馬祖港及金門港，因目前上述二港係由行政院指定連江及金門縣政府代管。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(2/2)-水中

無線通訊系統建置：

1. 計畫中說明 113 年於基隆港、114 年於高雄港布設無線底碇式波流觀測站外，尚會優先針對易斷纜之港口規劃設置上述測站，目前尚有規劃哪些港口要設置。
2. 臺中港時常有海豚洄游至港區，本案利用聲波無線通訊取代傳輸纜線方式傳送資料，是否對海豚等水下生物聽覺造成影響，這部分可能成為另一個保育課題。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

據瞭解運輸研究所長期研究花蓮港港池靜穩度，本案為 3 年期計畫，今年為第 3 年，簡報亦說明將會研擬包括通水箱涵、消能碼頭及拋石消能設施等改善方案，由於用在港口公共基礎設施之航港建設基金建設經費逐年減少，在資源有限下，建議各方案可納入財務及經濟效益分析，以提供耗費少卻具改善效益之方案予港務公司參考。

(五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

P34-36 本案 3 年期計畫第 2 年(113 年)係選定花蓮港 7 號碼頭規劃改善為消能碼頭型式，第 3 年(114 年)是否亦針對該碼頭之消能碼頭型式予以改良及精進。上述之研究成果是否有可能與第 4 案消能措施方案予以整合，以有效改善花蓮港內港區之水域靜穩度。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討(4/4)-整合船舶智慧航行管理系統：

為了降低我國周邊海域船舶在劇烈海象下發生海難的風險，目前已由航港局協調中央氣象署進行優化災害性天氣及颱風期間近岸 12 浬淨空措施，依據該署新一代劇烈天氣監測系統(QPEplus)客製化逐 3 小時預報資料，規劃我國海域海象監控區域及設定預警閾值，當氣象單位預測劇烈海象即將影響某一海域時，航港局會至少於 12 小時前利用基隆海岸電台 NAVTEX、該局海事中心 AIS 信文廣播推播訊息及各港口 VTS 無線電通報等管道通知該海域警戒區滯留船舶勸離近

岸 12 浬，以確保該等船舶在劇烈海象影響前具有充裕時間可航行至安全水域避風。建議未來也可以研議是否結合目前運輸研究所正在研究的特高頻資料交換系統(VDES)進行船舶資訊傳遞。另外航港局之航港 1 號智慧監控船舶亦可提供運輸研究所做為測試研究使用。

(七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(3/3)-船舶觀測分析：

報告中說明海洋陣列雷達船舶觀測資訊運用將有助於船舶航行安全，由於目前政府亦重視非本國籍船舶於領海內航行之國安問題，想瞭解目前海巡署利用岸際雷達監控近岸 12 浬可疑船舶，如運用海洋陣列雷達是否也可以強化船舶辨識及監控成效。

(八)港區水下巡查技術初探(3/3)-水下無人載具可應用性評估：

本案縱使於港區內水域海流亦非常強勁，是否亦需考量水下無人載具(ROV)抗流能力，以避免影響其檢測及辨識成效。另 ROV 運用面，除可使用於港區水下設施巡查外，當於港區內外沉船海難應變時，抽油業務係為優先處理項目，ROV 是否也可以運用在船體外觀及船艙油櫃探測上，甚至是否也有鑽孔及抽油能力，亦值得研議。

(九)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

本案研究範圍係針對馬祖商港福澳碼頭鄰水區域進行影像辨識作業，由於該港係由連江縣政府經營，而非港務公司經營，建請修正。

(十)智慧港口環境資訊平臺探討：

經航港局中部航務中心分析去年臺中港發生之 5 起海事案件中，部分案件肇因受到風力及海流影響，進出港船舶無法控制航向，導致碰撞防波堤或其他靠泊船舶。本案研究成果倘可提供港務公司建置港區海氣象資訊平臺，利用視覺化及圖形化工具提供即時港區風波潮流等觀測與預測資訊，方便船長或引水人進出港或移泊時可即時參考及判斷，並適切操縱船舶航向及航速，將可降低非人為海事發生風險。

(十一)馬祖海域數值模式建置研究(1/2)-水動力模式研究：

有關研究項目部分，想瞭解如何以生成式 AI 協助蒐集文獻。其他計畫是否也可以利用 AI 蒐集資料？

二、江文山委員：

- (一)商港風力案，測站校正部分，建議考量納入預報數據，相關分析多著重在極端數據。
- (二)港群流的觀測類型包含雷達表面流，底碇與航道水平海流等，各項觀測之間的比較探討。
- (三)航安與海氣象資訊應用案，建議考量探討各項海氣象因子，以利瞭解相項因子的重要性。
- (四)部分港的研究有多個單項各別探討，建議考量整合為一個整合性的計畫，提供更全面的成果。
- (五)花蓮碼頭波高預測，除以波高進行模式訓練以外，建議嘗試以波譜進行訓練，並比較其成果。
- (六)相關研究成果建議再考量對外推廣，以凸顯運技中心的研究能量。

三、林芳如委員：

- (一)大部分計畫與中央氣象署(海象氣候組)業務相關，希望相關成果可與該組交流分享。
- (二)感謝提供花蓮港即時影像監測資料，供中央氣象署發展異常波浪預報系統使用。
- (三)108年起中央氣象署即開始發展 schism-wwm 波潮流耦合模式，目前已作業化運作，並和該署 NWW3 波浪作業模式結果做比較與相關校驗，相關波浪輸出已經可供波浪預報參考使用，相關報告與研究可提供運技中心建置模式參考。簡報內之計算網格範圍很大，未來是只分析花蓮港區或全部？因模式計算需耗費計算資源，建議可再加以評估。
- (四)單一港區如有多個數值模式模擬，可以系集方式呈現，供使用者一起參考。

四、鍾權宏委員：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

1. 本計畫透過商港風力觀測資料檢核、風速測站相關性分析、各商港主要測站校正機制探討，預期完成「商港主要測站之相關性」，與「商港風力資料檢核機制」，應用面在於「建立各港區之風力資料校正係數與方法，提供港務管理單位做為即時資料修正、推估及模擬預測之應用參據」，以及「訂定適用商港風力觀測資料校正機制之作業流程」，做為未來運技中心建立自動化及作業化資料檢核及校正之參考依據。請問本研究未來所提出的各港校正係數值(可能內港1個係數、外港1個係數)，將來應用上是預計哪一種方式：(1)港務單位在取得風速資料數列測值時，乘上該校正係數後，基本上就是信賴可靠的風速資料；(2)各港港務單位須先行參照運技中心112年建立9項風力資料品管程序，剔除異常數據後，在使用本研究所提出的修正係數；(3)運技中心港灣系統呈現的風力數據，即透過本研究所提的修正係數做校正後發布，各港港務單位無需自行檢視或修正。
2. 本研究所提修正係數，未來仍會因各港陸續建立的風速計數量位置與環境差異，而持續滾動調整，所以除此修正係數會持續更新外，使用上會是(3)較務實且充分發揮本研究之成效。

(二)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

1. 本研究根據花蓮港湧浪特性，評估合適之消能方案，並將消能設施布設於花蓮港模型，再接續施以前期探討之湧浪條件量測消能設施布設前後波高變化情形，進行後續數據處理，比對波浪能量削減成果，所以消能方案的選擇將是本研究重要關鍵，建議儘量蒐集相關國外針對長週期波的實務案例，也包含同樣到(3/3)期本次運技中心自行研究案「長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究」的方案結果。

2. 本案前兩期研究期間，花蓮港務分公司與運技中心實務交流期間也提到幾個方案(向)，目前所悉可能方向包括：

(1)#10~#16 碼頭水域，以雙 T 塊堆築擋浪堤，圍築成一有限開口船渠，降低擋浪堤反射波對其他水域之影響。

(2)#7 碼頭與#12 碼頭屬重力式碼頭，改建為消能式碼頭，碼頭後現有大排水溝，可延長水體消能空間。

(3)新東堤 0k+000~0k+500 港側萬代福消波岸壁，增拋 40 噸雙 T 塊，削減正面入港之湧浪能量。

(4)受限航道 400 公尺長，東側為斜坡，西側為鋼板樁岸壁，可評估是否有適當消能設施導入的機會。

(三)FUNWAVE 模式港內模擬探討(1/2)-港區波浪模擬建立：

1. 本研究以花蓮港區為主要研究範圍，依其水深地形、海象條件及港內結構特性進行數值模擬分析，模擬範圍涵蓋港外波浪傳遞至港內的過程，考慮波浪在港內的繞射、反射與消能情形，並針對港區內不同區域(如航道、碼頭等)進行波浪變化的比較與評估。針對以下兩種情境，建議可納入研究案作分析比較：

(1)依據 113 年 10 月 30 日康芮颱風來襲時，運技中心於花蓮港外港所拍攝的最大堤前浪高海氣象紀錄，納入本研究分析其影響。

(2)針對#10~#16 碼頭水域，以雙 T 塊或其他形式堆築擋浪堤，圍築成一有限開口船渠，波浪在港內遭遇此擋浪堤之繞射反射與消能情形，與擋浪堤本身造成反射波對其他水域之影響。

2. 113 年 10 月的康芮颱風，將花蓮港新東堤約 1,200 公尺里程的第三道胸牆打落至港池，接下來的修復工程也將設計打除混凝土塊拋放至港側堤趾，修築增厚成為堤趾保護工，接下來製作約 200 顆 40 噸雙 T 塊，預計嘗試拋放新東堤 0k+000~0k+500 港側萬代福消波岸壁，完成時機預計在 115 年 6 月底，建議運技中心可配合設置相關監測設備，以進行

相關研究分析，或於本案可做部分驗證。

(四)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

1. 進一步優化第2年的新型消能結構物並評估其可行性部分：
 - (1)113年(第2期)的研究方案已針對#7碼頭消能碼頭方案提出試驗結果分析，請問預期本(114)期的優化方向為何？
 - (2)花蓮港形狀似口袋，#7碼頭與#12碼頭都是位於袋底，而#7與#12碼頭後線均有大排水溝，可延長水體消能空間，建議可納入分析評估。
2. 航道消能方案的選擇部分，因航道寬度限制，所以消能方案的選擇上，不宜僅限於拋放預鑄混凝土消波構造(影響有效寬度)，如果國外有不錯的實務案例，縱使工程金額更高(如岸壁改建為消能岸壁)，此在本階段執行研究方案評估上都可納入，未來可行性研究階段再去做財務面的考量。

五、鄭志宏委員：

- (一)本案所提各研究案均非常有價值，非常肯定。
- (二)計畫可跟國內外研究單位或機構合作，如港務公司、工業技術研究院、成功大學、高雄科技大學、航港局、中央氣象署、海洋大學、船舶中心、引水人等交流。
- (三)研究內容包含之前研究案，希望可以公開分享。
- (四)未來商港如有擴建案，包含臺北港、臺中港、高雄港、基隆港，希望可以先研議。
- (五)澎湖水位案，希望可以整合海洋大學之成果一併檢討，並納入LAT高程討論。
- (六)花蓮研究案，希望可以納入管理機制。
- (七)水下無人載具，港務公司有成果可提供分享。
- (八)消能結構物，希望可以帶入港務公司消波式碼頭結構模型，提供消能碼頭反射係數研究。
- (九)馬祖北竿機場跑道刻正要辦理整建加長，可否協助分析海象。

六、蘇仕峯委員：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

1. 各港區風力觀測站校正因子訂定時，可考量未來氣候變遷對極端風力事件的影響。
2. 如何評估測站位置具有代表性？即當初決定設定的位置所獲得的資料是否符合需求。

(二)澎湖港設計水位之探討：

1. 澎湖港設計水位分析時，是否蒐集歷年相關澎湖地區海岸及港灣工程規劃設計之報告，對這些工程規劃使用之設計水位是否有疑慮？
2. 設計水位分析結果，可注意是否有極端水位發生，因為島嶼地貌和臺灣陸地邊界之潮位有所不同。
3. 可應用到交通部觀光署，例如摩西分海等景點。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2)：

水中無線通訊系統建置後，資料傳輸穩定性可與既有有線系統相比。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) -消能措施方案評估：

1. 水工模型試驗結果可結合數值模擬進行驗證，以提高方案適用性。
2. 試驗除了規則波，也要考量真實環境的不規則波。

(五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

長波不易消散能量，但可改變港型地貌，產生不同模態週期振盪，降低波高。

(六)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3)：

1. 雷達訊號應用可比對現場觀測波浪與數值模擬結果。
2. 可積極與相關使用單位技術交流，例如國家海洋研究院。

(七)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

影像辨識系統可針對不同能見度（如濃霧）或夜間進行辨識精度驗證。

(八)花蓮港碼頭波高預測模式作業化成果評估：

9、17、25 碼頭波浪觀測可與港外觀測波高建立關係，

可以不用模擬資料。港外數據進一步和花蓮浮標比對。

(九)花蓮海域海象模擬分析：

1. SCHISM-WWM 與 SWAN 波浪模擬差異性不大，可以檢視模式之控制方程式。SCHISM 模式不適合用於港區波浪，適合於花蓮港近岸波流場。
2. 網域模擬納入黑潮，中央氣象署利用相同模式。

(十)馬祖海域數值模式建置研究(1/2)：

馬祖島嶼礁岩多，地貌複雜，波浪有明顯繞射現象，利用 MIKE21 水動力與波浪模組，如何訂定模式網格邊界潮位條件？（利用 SCHISM-WWM）島嶼下風處繞射效應利用波浪模組能符合需求嗎？

(十一)FUNWAVE 模式港內模擬探討(1/2)：

可利用「花蓮港湧浪遮蔽試驗（3/3）-消能措施方案評估」之試驗結果進行模式驗證。

(十二)114 年度運技中心期刊研討計畫：

1. 建議蒐集近 20 年知名國際期刊有關港灣工程或管理的論文，先瞭解鄰近國家在港灣方面的研究方向與成果。
2. 鼓勵投稿國際期刊，與國際學術機構合作，提升國際能見度與影響力。

(十三)基隆海域風浪模組模擬參數調校探討

SWAN 可與「花蓮海域海象模擬分析」之模擬結果比較，兩位置海象環境特性接近。

貳、結論：

感謝各位委員提供本所相當寶貴之專業建議，請案關業務同仁將委員意見納入參採，以符合實際應用面，並提升研究成果之廣度及實用性。

參、散會：中午 12 時 15 分

會議簽到表

會議名稱：114年度本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

時間：114年5月14日(星期三)上午10時

地點：本所運輸技術研究中心2樓簡報室

主持人：蔡宏宏

紀錄：林英爵

專家學者：

專家學者	簽名
鄭志宏委員	鄭志宏
鍾權宏委員	鍾權宏
江文山委員	江文山
蘇仕峯委員	蘇仕峯
張家豪委員	張家豪
林芳如委員	林芳如

出席單位與人員：

出席單位	職稱	簽名
交通部運輸研究所 運輸技術研究中心	科長	李俊翔
	科長	林雅雯
	科長	賴瑞華

單位	簽名
<p>交通部運輸研究所 運輸技術研究中心</p>	<p>許義宏 林英爵 黃長信 孫達遠 羅冠影 劉煥明 郭濤芬 劉淑敏 盧昕彤 李以廷 陳子健 陳天時 劉清玲 林有騰 傅怡創 顏麗香 蔣敏玲 李亭華 李世琦</p>

林文華

附錄四

工作會議紀要

114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114年度自行研究計畫第1次工作會議

時間：114年6月25日(星期三)上午10時

地點：本所運輸技術研究中心3樓會議室

主持人：李研究員兼科長俊穎

彙整：林英爵

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)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

1. 專家學者座談會意見處理情形。
2. 商港風力觀測資料檢核作業化程式開發成果。
3. 風力測站相關分析測試結果。

(二)澎湖港設計水位之探討：

1. 參考文獻及觀測資料蒐集進度報告。
2. 海氣象設備維運作業情形摘要說明。
3. 設計水位分析方法盤點說明。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(2/2)-水中無線通訊系統建置：

1. 臺灣港群波流即時觀測系統布設概況及運作情形。
2. 水中無線通訊系統建置規劃。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

1. 試驗設備狀況及率定佈設。
2. 消能設施研擬及佈設。
3. 通水箱涵方案初步成果分析。

(五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

1. 應用生成式AI協助搜尋消減波能設施文獻並研讀。
2. 精進消能碼頭型式並以斷面水工模型試驗進行驗證。

3. 規劃窄航道岸壁之消能斷面型式。
- (六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：
1. 特高頻資料交換系統 (VDES)發展現況。
 2. 探討AI 技術於船舶航行安全整合系統。
- (七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：
1. 回顧海洋雷達船舶觀測應用相關文獻。
 2. 蒐集臺中港 AIS 船舶資料。
 3. 分析雷達船舶調適性偵測法程式。
 4. 說明114年第1次海洋雷達願景會議的辦理情形。
- (八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：
1. 現有觀測資料與資料庫盤點狀況之說明。
 2. 海氣象觀測作業數位管理系統精進與開發進度之說明。
 3. 後續工作項目之說明。
- (九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：
1. 進行港區 ROV 水下定位測試數據分析。
 2. 進行港區 ROV 影像獲取及處理技術分析。
- (十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
1. 高解析度攝影機佈設工作情形。
 2. 影像數位化監控系統建置進度說明。
 3. 後續工作項目之說明。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論：

- (一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：
1. 討論風力觀測資料檢核作業化程式及鄰站檢核程序方法。
 2. 討論風力測站相關分析方法及校正機制之後續規劃。
- (二)澎湖港設計水位之探討：
1. 討論澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭之潮汐型態差異性。
 2. 討論設計水位—暴潮位分析方法之選用。
- (三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) -水中無線通訊系統建置：
1. 不同觀測系統配置與即時資料中斷原因。

2. 水中儀器架及離近岸端模組設計。
- (四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) - 消能措施方案評估：
1. 討論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 (3/3) - 消能結構物型式之可行性研究：
1. 目前消能碼頭型式僅有下部結構部分，若加入消能碼頭之上部或為完整結構，建議考量是否會對反射率造成影響。
 2. 窄航道岸壁之消能斷面設置的直立斜板方向，建議評估其方向為向著波流進入內港方向或是背向能得到最好效果。
- (六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) - 整合船舶智慧航行管理系統：
1. 蒐集國外 VDES 資料等相關船舶航行安全通訊技術。
 2. 評估可應用於 VDES 監控與預警之 AI 技術。
- (七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) - 船舶觀測分析：
1. 討論海洋雷達船舶觀測應用相關文獻。
 2. 比較海洋雷達船舶與臺中港 AIS 資料差異。
 3. 探討雷達船舶調適性偵測法程式之辨識情形。
 4. 討論 114 年第 1 次海洋雷達願景會議之後續推動。
- (八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) - 系統精進：
1. 現有測站觀測資料與資料庫盤點狀況之討論。
 2. 委外系統精進優化之進度討論。
- (九) 港區水下巡查技術初探 (3/3) - 水下無人載具可應用性評估：
1. ROV 水下定位測試結果討論。
 2. 水下影像獲取及處理流程說明。
- (十) 港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
1. 影像物件標註及應用討論。
 2. 監控系統測試及操作介面情形說明。
- 貳、主要結論：
- (一) 商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：
1. 風力觀測資料檢核作業化程式，建議可優化檢核結果報表產

出功能，以提供更詳盡的資料檢核資訊。

2. 階段成果投稿部分，後續請配合海工研討會規劃之格式要求，另提供 2 頁摘要文章內容。

(二) 澎湖港設計水位之探討：

針對設計水位—暴潮位分析方法仍以蒐集模型颱風參考文獻為主，建議可嘗試利用實測資料進行暴潮位計算。

(三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) - 水中無線通訊系統建置：

1. 已修復完成之測站請持續觀察，年度維運作業請依規劃期程進行。
2. 離近岸端模組設計，需將後續維運及檢修作業可能面臨之狀況納入考量。

(四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) - 消能措施方案評估：

1. 持續滾動檢討消能設施方案。
2. 於執行試驗過程中，應觀察港內水位抬升變化情形。

(五) 長週期波斷面模型試驗 (3/3) - 消能結構物型式之可行性研究：

1. 窄航道岸壁之消能斷面設置的直立斜板方向，應可一併測試平行岸壁的型式。
2. 應加速進行窄航道岸壁型式設計的定案，以免延誤採購及試驗進程。

(六) 智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) - 整合船舶智慧航行管理系統：

1. 透過 IMO 國際 VDES 發展趨勢，確認相關技術整合架構。
2. 可透過新 AI 技術於減少航安事故及提升港口效率。

(七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) - 船舶觀測分析：

1. 有關雷達船舶調適性偵測法程式之辨識情形，與臺中港 AIS 資料差異，請妥為釐清偵測偏差原因。
2. 由於臺中港南側雷達站訊號品質較差，請協助釐清造成訊號不穩的原因，並安排相關人員進行檢修，以確保資料穩定性與持續性。

(八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：

1. 系統建置原始資料下載功能，下載資料建議加密確保資訊安全。
2. 系統須符合使用者需求，建議開發階段多與相關承辦人員交換意見確認系統功能開發方向。

(九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：

1. 港區水下定位測試分析，可再針對精度誤差進行評估。
2. 影像解析度影響水下目標物檢測能力，未來可再深入研究。

(十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

1. 請向連江縣政府港務處瞭解客運碼頭小白屋之監控影像資料情形，以利納入影像物件數據辨識分析。
2. 建議物件辨識能透過數值量化方式呈現，以利港區管理。

參、散會：下午3時30分。

會議簽到表

壹、會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科 114 年度自行研究計畫第 1 次工作會議

貳、時間：114 年 6 月 25 日(星期一) 上午 10 時

參、地點：本所運輸技術研究中心3樓會議室

肆、主持人：李科長俊穎 李俊穎

伍、出席單位及人員：

出席單位	簽名
第一科科長	賴瑞真
第三科科長	林振豐
第二科	<p>孫建廷 黃茂右 陳孟宏 李心清 羅冠毅 陳天時 柯振宇 許義宏 曹騰浩 李政達 林英爵 林俊仁 蕭宇佑 陳子健 張祐揚 許師瑜 劉淑敏 郭慶芳 洪維高 顏麗香</p>

會議進用餐時間

李俊穎

114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114年度自行研究計畫第2次工作會議

時間：114年8月27日(星期三)上午9時30分

地點：本所運輸技術研究中心3樓會議室

主持人：李研究員兼科長俊穎

彙整：林英爵

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)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

1. 進行高雄港鄰近測站資料蒐集及整理分析。
2. 進行高雄港各測站相關性分析。
3. 運用決策樹回歸模型(屬監督式機器學習模型)與長短期記憶模型(LSTM)進行高雄港風速風向資料補遺之初步測試。

(二)澎湖港設計水位之探討：

1. 參考文獻及觀測資料蒐集進度報告。
2. 設計水位初步成果報告。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(2/2)-水中無線通訊系統建置：

1. 臺灣港群波流即時觀測站修復進度及後續規劃。
2. 水中無線通訊系統執行進度及規劃。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

1. 造波設備狀況說明。
2. 初步試驗成果分析。
3. 規劃改善方案工作期程說明。

(五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

1. 以斷面水工模型試驗進行驗證精進消能碼頭型式。
2. 規劃窄航道岸壁之消能斷面型式。

3. 分析斷面試驗結果及改善提案。
- (六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：
1. 特高頻資料交換系統 (VDES)國際應用趨勢。
 2. 探討AI 技術於船舶航行安全整合系統。
- (七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：
1. 辦理國家雷達觀測網整合分項工作。
 2. 辦理7月4日雙首長平台第3次會議本中心海洋陣列雷達研究成果分享。
 3. 辦理雷達船舶目標訊號檢測、驗證與系統調整改善工作。
 4. 開發雷達原始功率頻譜偵測船舶分析程式。
 5. 辦理雷達南站訊號中斷排除工作。
- (八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：
1. 資訊流與備份範圍盤點說明。
 2. 原始資料及時序列資料備份方法說明。
 3. 系統上版測試結果及後續待修正部分說明。
- (九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：
1. 進行水下影像擷取及處理技術分析。
 2. 進行水下影像品質評估。
- (十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
1. 智慧電子圍籬系統強化進度說明。
 2. 電腦主機規格及採購工作進度。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論：

- (一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：
1. 討論本所代管之高雄港風力測站資料與氣象署測站之差異。
 2. 討論決策樹回歸模型(屬監督式機器學習模型)與長短期記憶模型(LSTM)補遺效果。
- (二)澎湖港設計水位之探討：
1. 檢討設計水位一天文潮預測之準確性及差異性。
 2. 討論設計水位一暴潮位不同分析方法結果差異原因。
- (三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) -水

中無線通訊系統建置：

1. 已恢復即時傳輸及後續預計修復之港口討論。
2. 水中儀器架及離岸端電池桶製作情形。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) -消能措施方案評估：

1. 花蓮港凱米颱風觀測數據分析及現況遮蔽效果探討。
2. 消能設施試驗規劃方案及布設內容。

(五)長週期波斷面模型試驗 (3/3) -消能結構物型式之可行性研究：

1. 窄航道岸壁型式於實際應用上，可採用何種結構形式與材料，建議依斷面試驗結果進行規劃。
2. 建議針對消能碼頭型式精進之型式構造與試驗結果關係，進行更深入的討論。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：

1. 蒐集國外 VDES 資料等相關船舶國際應用趨勢。
2. 評估可應用於 VDES 監控與預警之 AI 技術。

(七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：

1. 討論國家雷達觀測網整合分項工作。
2. 討論雷達船舶目標訊號檢測、驗證與系統調整改善工作。
3. 探討雷達原始功率頻譜偵測船舶分析程式之開發情形。
4. 討論雷達南站訊號中斷排除之後續工作。

(八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：

1. 既有核可之維護紀錄刪除並保存歷程之討論。
2. 增加系統自動化儀表板與異常通知之討論。

(九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：

1. 水下影像擷取及處理方法說明。
2. 水下影像品質評估結果討論。

(十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

1. 電子圍籬功能項目及展示情形。
2. 影像物件辨識成果探討。

貳、主要結論：

- (一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：
1. 本所代管之高雄港風力測站資料與氣象署測站差異討論部分，後續可適時提供氣象署參考。
 2. 本研究所建置之機器學習模型，後續可與實測資料進行驗證測試。
- (二)澎湖港設計水位之探討：
1. 建議再檢視設計水位之天文潮分析方式是否有誤。
 2. 針對設計水位之暴潮位分析方法，建議先行檢視何種分佈較佳再行分析。
- (三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) - 水中無線通訊系統建置：
1. 臺中港底碇式波流即時觀測站修復，請依照所訂時程執行。
 2. 高雄港無線式底碇波流即時觀測系統建置完成後，需詳加留意系統運作情形，以利即時調整。
- (四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) - 消能措施方案評估：
1. 請掌握造波機設備維修及更新相關工作時程，以利後續試驗及分析工作推動。
 2. 波浪條件為 8-30 秒週期規則波，後續分析建議與觀測資料之 8-30 秒間之放大係數進行比較。
- (五)長週期波斷面模型試驗 (3/3) - 消能結構物型式之可行性研究：
1. 精進消能碼頭型式之成效討論，應於期末報告詳細完整呈現。
 2. 待窄航道岸壁模型完成，依規劃期程安排，儘快進行窄航道岸壁之水工斷面試驗。
- (六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) - 整合船舶智慧航行管理系統：
1. 透過國際 VDES 發展趨勢，評估以傳遞天氣資訊相關技術。
 2. 配合 VDES 合作計畫，協助進行實海域訊號實測，注意相關安全防護。
- (七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) - 船舶觀測分析：
1. 有關雷達所偵測船舶回波與實際船舶尺寸之關聯性，請進一

步探討其對辨識準確度之影響，並釐清可能造成偵測偏差之因素。

2. 有關研究報告書章節規劃，第五章標題敘述略顯口語化，建議重新修訂，以提升專業性與報告整體一致性。

(八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：

1. 系統服務對象為現場觀測同仁，須持續由同仁協助回饋及修正。

2. 請於9月份邀集美寶公司及觀測同仁召開工作會議。

(九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：

1. 水下影像增強處理流程，建議可再詳加敘述。

2. 水下影像品質評估結果，未來可再結合港區水下構造物維護管理手冊之設施劣化度判定標準一併探討。

(十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

1. 建議補充辨識貨櫃物件，以利辨識港區貨櫃作業管理。

2. 有關纜繩物件，影像截圖纜繩似乎被視作船體一部分，以及人員在有欄杆內，有無法辨識情形，請瞭解相關可能影響因素並進行改善。

3. 請於9月上旬安排工作會議，以利掌握工作進度。

參、散會：下午4時整。

會議簽到表

壹、會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科 114 年度自行研究計畫第 2 次工作會議

貳、時間：114 年 8 月 27 日(星期三) 上午 9 時 30 分

參、地點：本所運輸技術研究中心3樓會議室

肆、主持人：李科長俊穎 李俊穎

伍、出席單位及人員：

出席單位	簽名
第一科科長	賴瑞華
第三科科長	林雅雯
第二科	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>林英爵</p> <p>黃氏存</p> <p>李以通</p> <p>陳天時</p> <p>劉淑敏</p> <p>林文</p> <p>許義宏</p> <p>顏麗香</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>郭淑芬</p> <p>洪雅商</p> <p>陳子健</p> <p>柯拓宇</p> <p>陳孟宏</p> <p>李心鴻</p> <p>曹騰陽</p> <p>許新瑜</p> <p>張祐楷</p> </div> </div>

會議逾用餐時間 李俊穎

114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114年度自行研究計畫第3次工作會議

時間：114年10月29日(星期三)上午9時30分

地點：本所運輸技術研究中心3樓會議室

主持人：李研究員兼科長俊穎

彙整：林英爵

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)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

1. 進行臺灣港群各測站相關性分析。
2. 高雄港風速風向資料補遺之決策樹回歸模型驗證分析。

(二)澎湖港設計水位之探討：

1. 設計水位成果報告。
2. 港灣季刊投稿文章撰寫進度說明。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(2/2)-水中無線通訊系統建置：

1. 臺灣港群波流即時觀測系統現況。
2. 高雄港水中無線通訊系統建置情形。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

1. 即時系統維運情形及後續修復規劃。
2. 水中無線通訊系統建置進度。

(五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

1. 以斷面水工模型試驗進行4種窄航道側壁之消能功能驗證。
2. 分析斷面試驗結果及研擬改善提案。
3. 規劃期末報告書章節。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討(4/4)-整合船舶智慧航行管理系統：

1. 特高頻資料交換系統 (VDES) 國際應用先導測試。
 2. 探討 AI 技術於船舶航行安全整合系統。
- (七) 臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) - 船舶觀測分析：
1. 報告臺灣陣列高頻海洋雷達遠端檢測標準作業程序手冊專家座談會，故障樹具體作法，進行跨部會合作討論事宜。
 2. 說明雷達系統調整與天線改善注意事項。
 3. 說明分析雷達船舶解算程式與驗證。
 4. 討論如何提升空間圖譜船舶與背景之訊噪比。
- (八) 海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) - 系統精進：
1. 委外勞務契約進度說明。
 2. 時序列資料及原始資料下載與資料蒐集率統計功能說明。
 3. 新增品保標籤管理功能說明。
- (九) 港區水下巡查技術初探 (3/3) - 水下無人載具可應用性評估：
1. 進行水下影像品質評估。
 2. 進行水下無人載具應用性評估。
- (十) 港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
1. 電子圍籬系統介面及功能說明。
 2. 成果報告章節規定說明。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論：

- (一) 商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：
1. 討論臺灣港群各測站相關分析結果。
 2. 討論決策樹回歸模型補遺效果及後續精進方向。
- (二) 澎湖港設計水位之探討：
1. 設計水位調和分析之平均潮位誤差來源探討。
- (三) 臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) - 水中無線通訊系統建置：
1. 即時系統維運情形及後續修復規劃。
 2. 水中無線通訊系統建置進度。
- (四) 花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) - 消能措施方案評估：
1. 試驗設備狀況及率定佈設。
 2. 試驗配置及方案成效分析。

3.115 年自行研究計畫規劃說明。

(五)長週期波斷面模型試驗 (3/3) -消能結構物型式之可行性研究：

1. 依據目前斷面試驗初步成果，建議可投稿國際期刊。
2. 建議評估窄航道的實際現況是否能於斷面水槽中完整呈現。
3. 於斷面水槽中進行消能側壁之試驗，造成之三維波流現象應如何進行分析討論，建議審慎評估。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：

1. 蒐集國外 VDES 資料等相關船舶國際應用先導測試。
2. 彙整可應用於 VDES 監控與預警之 AI 技術。

(七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：

1. 討論海洋雷達船舶觀測應用相關文獻。
2. 討論陣列雷達船舶辨識技術評估。
3. 探討船舶辨識資料分析與驗證情形。

(八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：

1. 討論後續如何有效利用精進及定期教育訓練。
2. 討論底碇式波流觀測系統資料搬遷進度與金門港、馬祖港之資料流與備份流程。

(九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：

1. 水下影像品質評估過程討論。
2. 水下無人載具應用性評估結果說明。

(十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

1. 目前成果及未來精進內容探討。
2. 建議可串流馬祖福澳港相關影像，以利評估相關功能運作。

貳、主要結論：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

1. 在各測站相關性分析，建議後續可進一步將靜風區的資料篩除再比較分析結果，另臺北港相關性偏低且具有海陸風等問題，建議後續可進一步分析。
2. 本研究所建置之機器學習模型，在誤差較大的部分，建議可

從風向因子進一步分析。

(二)澎湖港設計水位之探討：

1. 建議釐清調和分析之平均潮位誤差來源是否來自水準點引測。
2. 有關暴潮偏差之計算可考慮利用以往實測資料扣除調和分析而得，不須侷限於模型颱風模擬結果。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) - 水中無線通訊系統建置：

1. 已修復完成之測站請持續觀察，尚未修復之測站請依規劃進度執行。
2. 水中無線通訊系統建置後，請持續觀察並滾動式調整。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) - 消能措施方案評估：

1. 試驗成果宜再確認波高計數據。
2. 內港碼頭改善方案建議採單支波高計進行比較。

(五)長週期波斷面模型試驗 (3/3) - 消能結構物型式之可行性研究：

1. 消能碼頭型式成效之討論，應有具體完整說明。
2. 應依規劃期程安排，如期完成期末報告書。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) - 整合船舶智慧航行管理系統：

1. 針對國際 VDES 發展趨勢，評估後續可發展相關技術。
2. 配合 VDES 整體發展架構，可彙整對應我國各機關執行業務內容，以供參考。

(七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) - 船舶觀測分析：

1. 探討雷達系統調整與天線品管標準能否評估增加訊噪比，以利定量性評估。
2. 建議將海洋雷達船舶軌跡與臺中港 AIS 資料進行案例比較與分析探討。

(八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) - 系統精進：

1. 金門港、馬祖港測站資料流與備份流程，請再持續追蹤確認。
2. 系統持續加強同仁使用率與教育訓練。

(九)港區水下巡查技術初探 (3/3) - 水下無人載具可應用性評估：

1. 水下無人載具可應用性評估結果建議可再詳加敘述。
 2. 影像品質評估過程及目的建議可再進行補充。
- (十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
1. 請於連江縣港務處交流會議中分享本案研究成果，以利瞭解港埠管理單位相關想法及需求。
 2. 請蒐集港務公司戰情中心監控系統或其他相關商業化使用情形，以利參考納入未來精進參考。

參、散會：下午4時10分。

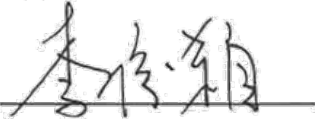
會議簽到表

壹、會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科 114 年度自行研究計畫第 3 次工作會議

貳、時間：114 年 10 月 29 日(星期三)上午 9 時 30 分

參、地點：本所運輸技術研究中心3樓會議室

肆、主持人：李科長俊穎



伍、出席單位及人員：

出席單位	簽名
第一科科長	請假
第三科科長	林雅芝
第二科	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>陳孟忠</p> <p>羅冠勳</p> <p>鄭偉芳</p> <p>蕭安佑</p> <p>林英爵</p> <p>林學文</p> <p>劉淑敏</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>洪維屏</p> <p>李仁鴻</p> <p>柯振宇</p> <p>孫建遠</p> <p>方以廷</p> <p>曹騰龍</p> <p>黃茂介</p> <p>許義宏</p> <p>陳天時</p> <p>張祐樞</p> </div> </div>

會議逾用餐時間



顏震香

附錄五

AI-Ready Data

詮釋資料框架指標指引

(第一版)

AI-Ready Data 詮釋資料框架指標指引

第1版

數位發展部

中華民國114年10月

目 錄

壹、目的.....	1
貳、應用範圍.....	3
參、作業原則.....	4
肆、參考資料.....	5
伍、定義.....	6
陸、核心架構總覽.....	8
(一)可查找性 (Findability) 構面-資料是否易於搜尋識別.....	8
(二)可近用性 (Accessibility) 構面-資料是否可穩定存取近用.....	10
(三)互通性 (Interoperability) 構面-資料是否利於系統整合.....	11
(四)再利用性 (Reusability) 構面-資料是否具持續應用價值.....	13
(五)可信任性 (Trustworthiness) 構面-資料是否具備信賴基礎.....	16
柒、評估流程與作業方式.....	18
(一)使用時機.....	18
(二)資料收集與前處理要求.....	19
(三)指標執行步驟 (自動/AI 輔助/人工)	19
捌、對應國際標準之建議與實務作法.....	26
玖、結語.....	29
拾、參考文獻.....	30
拾壹、附錄-衡量指標檢查表.....	32

圖目錄

圖 1 AI-Ready Data 詮釋資料框架指標構面示意圖	18
---------------------------------------	----

表目錄

表 1 名詞定義表	6
表 2 可查找性構面表	9
表 3 可近用性構面表	11
表 4 互通性構面表	12
表 5 再利用性構面表	15
表 6 可信任性構面表	17
表 7 指標使用時機對照表	18
表 8 資料品質處理建議表	19
表 9 各構面自動化檢核、AI 輔助及人工檢核對照表	20
表 10 相關國際標準對應表	26

壹、目的

順應近年人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 迅速發展趨勢，AI 技術日漸成熟與廣泛應用，已於公私部門帶來變革性的創新，並正重塑各領域的運作模式與服務型態。面對此波科技革新浪潮，國際間亦普遍認為應就 AI 技術研發、應用倫理、資料品質各面向發展需求挹注資源，以建構良善的 AI 生態系。

訓練資料是 AI 模型發展的重要元素，其品質優劣將直接影響模型的效能與應用可靠性。其品質優劣將直接影響模型效能與應用可靠性。不同類型的 AI 模型對資料需求各有差異，例如：監督式學習需仰賴標註一致且具代表性的資料，非監督式學習則依賴資料間的結構特徵，多模態模型則須確保跨語言、影像、聲音等異質資料間的對應與對齊。因此，若缺少關鍵的詮釋資料 (metadata)，可能導致模型訓練失準、偏差擴大或再利用受限。例如，缺乏時間與地理資訊的資料集，將影響模型對時序變化或區域差異的判斷；缺乏資料來源與標註方式的說明，則難以評估其適用性與可信度。強化措施可能包括：透過再加工補充外部來源資料、進行資料標註一致性檢核，或於應用端建立偏差調整機制。

資料之可用性與再利用價值，除仰賴於高品質、結構化與可機器處理 (machine-actionable) 等特性，完善的詮釋資料 (metadata) 亦不可或缺，不僅有助於資料提供方管理資料資源，更能協助資料使用者正確理解資料內容與使用限制。隨著 AI 應用需求日益提升，國際間也持續展開資料適用性討論，例如歐盟提出 FAIR 原則 (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable)，聯合國教科文組織 (UNESCO) 與經濟合作與發展組織 (OECD) 亦強調資料在負責任 AI 發展中的重要角色，倡議資料應具備語意可解釋性與跨域整合能力，以支援 AI 模型訓練與應用。

依據近期國際趨勢見解，世界銀行提出「AI-ready development data」概念，指出資料應能被搜尋、理解、取得與使用，並建立於既有的開放資料及 FAIR 原則之上，同時強調需具備完善的 metadata、治理機制與技術

規格，才能支援 AI 系統與使用者的可信互動 (World Bank, 2023)。此外，美國商務部於「Generative AI and Open Data: Guidelines and Best Practices」文件中，也提出資料發布應兼顧 AI 系統自動擷取與理解的實務需求，以確保政府資料能成為可靠的 AI 訓練基礎 (U.S. Department of Commerce, 2025)。然而，目前國際間對於 AI 訓練資料整備程度尚無具體的衡量指標與技術規範，因此建立明確的詮釋資料框架與評估指標，對於促進 AI 訓練資料使用，具有關鍵意義。

為促進政府資料轉化符合 AI 應用需求，特參考國際間針對資料品質構面、治理趨勢與相關實務經驗，研擬「AI-Ready Data 詮釋資料框架指標指引」（下稱本指引），以評估資料之機器可讀性 (Machine Readability) 與跨資料集整合程度 (Degree of Cross-Dataset Integration)。資料本身具有中立性，其應用風險並非源於資料本體，而是來自特定應用目的下的使用與治理措施，因此，資料使用者應從 AI 應用的生命週期角度審慎評估資料來源、收集目的、結構特性與潛在偏誤，採適當運用。

本指引係為通用性之詮釋資料衡量架構，現階段主要針對結構化資料類型進行設計與描述，期建立標準化的評估準則，促進跨機關、跨領域 AI 訓練資料利用效益，然而各應用領域在資料類型、應用場景等具有相當之差異性，爰各領域主管機關得參考本指引為基礎，進一步發展具領域特性之詮釋資料框架指標，以強化指引落地之可行性。

貳、應用範圍

本指引之應用範圍，為個人、學校、團體、企業或政府機關等資料提供方，可參考本指引內容，完善資料集之詮釋資料，衡量資料作為 AI 訓練使用之整備情形。

參、作業原則

- 一、AI-Ready Data 詮釋資料框架指標涵蓋資料來源之透明度，良好的資料品質，包含標示資料來源、時間範圍及品質管控方式等要素，有助於提升資料可信度。考量訓練資料對於時效與趨勢分析的依賴，具備時序性、可累積性之資料集常態上更具利用價值，資料提供方透過提高更新頻率、明確標註資料時間或資料版本之作法，將有助於 AI 模型掌握時態變化及進行動態學習。
- 二、對外公開之資料內容原則建議採用 UTF-8 編碼格式，資料如儲存於對外可存取的網路空間，並透過 HTTPS (HyperText Transfer Protocol Secure) 協定提供下載服務，以確保資料傳輸的安全性。同時，宜明確闡述詮釋資料的內容及相關外部取得資訊，方便使用者查詢與連結下載。
- 三、資料提供方於資料產出過程，宜適當考量其資料屬性，優先採用結構化格式（如 CSV、JSON、XML 等），並統一欄位命名規則，同時搭配資料詞彙表 (Data Vocabulary) 與欄位說明文件，使資料易於理解與使用；結構化資料建議採用開放格式，或依數位發展部「共通性應用程式介面指引」提供應用程式介面 (API 或 Web Service) 服務，方便各界查詢與取用，達成機器對機器的識別、讀取及利用。
- 四、AI-Ready Data 詮釋資料框架指標可與結構化資料規則搭配，另行建構制定符合各領域需求、機器可讀的詮釋資料欄位，例如全球資訊網協會 (World Wide Web Consortium, 以下簡稱 W3C) 推薦的資料目錄詞彙 (Data Catalog Vocabulary, 以下簡稱 DCAT) 檢核規則，以提升資料的完整性與使用效率。
- 五、為權衡兼顧資料利用與隱私保護，AI-Ready Data 詮釋資料框架指標包含可信任指標的評估，以利瞭解資料產出適用範圍，促進適切合規利用。

肆、參考資料

本指引所採用之通用性詮釋資料標準框架，以行政機關電子資料流通實施要點為基礎，並參考國際廣泛使用之都柏林核心詮釋資料項目(DCMI Metadata Terms) 中基礎的15個核心欄位之描述詞彙，以及 DCAT 之資料詮釋架構類別。

為確保詮釋資料標準框架具備通用性，亦參考國內 TWSMP3.0 詮釋資料標準(使用 ISO/TC211 標準)、國家圖書館與數位典藏詮釋資料的特性、定位與規範的設計架構。詮釋資料欄位填寫內容方面，則參考行政機關電子資料流通詮釋資料及分類檢索規範之分類詞彙和代碼、W3C XSD 資料型態規範、ESIP Data Readiness Cluster 規範、歐盟 FAIR 原則、及國際標準化組織(ISO)所訂定之語言代碼，確保資料集詮釋資料欄位定義明確。

伍、定義

本節列出本指引使用的名詞及其定義，如下表所示。

表 1 名詞定義表

英文名稱	中文名稱	定義
AI-Ready Data	為人工智慧作好準備的資料	經過優化、具備利於人工智慧分析應用特性的高品質資料
Machine Readability	機器可讀性	資料或詮釋資料採用「具有結構、可由軟體自動辨識並萃取特定資料」的檔案格式，使其內容可被自動化流程理解及處理之特性
Degree of Cross-Dataset Integration	資料的跨資料集整合程度	不同資料集之間能互通整合的程度，代表資料集的結構、識別碼、詮釋資料等採用共同標準，使不同資料集無須大量人工處理即可被系統正確理解及合併
Metadata	詮釋資料	描述資料集的資料
Dataset	資料集	可辨識的資料集合
Web Service	網路服務	透過網路提供功能的服務介面
Application Programming Interface	應用程式介面	經定義允許不同軟體或系統之間交換資料與提供功能的程式介面，簡稱 API
Data vocabulary	資料字典	記錄資料欄位名稱、格式、意義與關聯的文件
Findability	可查找性	指資料可被搜尋與識別的能力

英文名稱	中文名稱	定義
Accessibility	可近用性	指資料能被各種使用者和系統無障礙取得的程度
Interoperability	互通性	指資料利於跨平臺系統交換與使用的程度
Reusability	再利用性	指資料得依不同目的、平臺或情境重複使用的程度
Trustworthiness	可信任性	指資料具備可靠來源，於處理過程中保持透明與可追溯，提供偏差預防資訊，且符合隱私保護與倫理規範的程度

陸、核心架構總覽

AI-Ready Data 詮釋資料框架指標涵蓋5大主軸構面、14個面向指標，旨在強化資料結構的邏輯性與實務應用的可行性。本指引各構面所列衡量指標，依其檢核方式區分為「量化」及「量化/質性」2類：

量化：指標可透過數值化方式直接檢測，例如空值數量、更新頻率、欄位完整度等，適合以程式化工具進行自動化檢核。

量化/質性：指標同時具備可量化與需質性審查的面向，例如可信任性構面下隱私及資料保護、偏差預防、透明度等3項指標，可透過量化檢核相關內容是否存在，但仍需檢視質性內容以確認完整性與可理解性，通常需結合自動化檢核與人工審查並行。

本指引另於各構面中指標分類採資料品質相關性分級概念，其係用以區分衡量指標對於資料品質與 AI 應用之影響程度，分為「低」、「中」、「高」3類：

低：對資料品質之影響相對有限，若未明確標示，對整體資料完整性與可理解性影響不大，主要屬輔助性。

中：對資料品質具有中度影響，若能明確標示，將有助於增進資料的可判讀性與可用性，降低使用成本並改善應用效益。

高：對資料品質具關鍵影響，若能明確標示，對於確保資料的完整性、可信度與再利用價值具關鍵作用，為資料品質判斷之核心依據。

上述分類為通用性概念，後續各領域主管機關或資料提供方可依實際需求，與資料使用方共同協作調整分類或評級階層之數量、定義與細緻度，例如擴充為五級（Level 1 至 Level 5），以呈現更細緻的影響程度區分，俾利實務應用，以作為評估資料集是否符合 AI 應用需求的重要依據，其指引架構詳細說明如下：

（一）可查找性（Findability）構面-資料是否易於搜尋識別

發展人工智慧系統與服務的首要步驟，是能有效查找可用於訓練、驗證與測試的資料集。可查找性係指提升資料被使用者及電腦系統搜尋、識別與定位的機會，可透過建置資料目錄、充實詮釋資料內容等措施逐步落實。

在此基礎上，資料本體及其詮釋資料若能具備良好的可搜尋性，將更易於使用者與電腦系統發現與存取。其中，具備機器可讀性的詮釋資料在自動化資料探索與整合過程中扮演關鍵角色，能有效降低搜尋成本，提升資料重複利用的可能性，進而擴大資料價值。以下指標可作為評估資料集「可查找性」的重要依據。其構面下包含完整性（Completeness）、可發現性（Discoverability）等2個面向指標，其衡量指標及驗證方式說明如下：

1、完整性（Completeness）

完整性是指資料屬性欄位應盡量避免空值或缺漏，以確保資料在應用過程中具備足夠的資訊基礎。在詮釋資料完整性層面，可能出現該值不存在、確實存在卻未被記錄或不知該值是否存在等空值情形，可透過自動檢測確認資料的完整性，並以總值數及完整值的比例表示資料的完整性。完整性要求充分填寫各項描述欄位，避免留白或不具一致性的資料正規化，確保使用者或系統能準確理解資料的內容、來源與結構，並應視資料內容適當提供資料集大小，例如資料筆數、檔案數量、欄位數量等。高完整性的資料與詮釋資訊，有助於提升資料的可用性、準確性與在 AI 應用中的訓練價值。

2、可發現性（Discoverability）

可發現性是指能被使用者及電腦系統有效發現。其關鍵在於詮釋資料的描述品質，如描述越清晰且具結構性，資料就越容易被定位與識別，特別是運用標準化控制詞彙、關鍵字及一致命名規則，不僅可提升搜尋準確度，也有助於機器自動處理與比對，進而提升資料在跨系統與跨領域環境中的可查找性。

表 2 可查找性構面表

構面	指標	衡量指標 Metrics	質性/ 量化	計算 方式	資料品質 相關性
可查找性 Findability	完整性 Completeness	資料集中資料為空值的數量	量化	百分比	中
		詮釋資料欄位未填的數量	量化	百分比	中

構面	指標	衡量指標 Metrics	質性/ 量化	計算 方式	資料品質 相關性
	可發現性 Discoverability	在詮釋資料填寫資料集大小	量化/ 質性	二元值	低
		詮釋資料提供資料集名稱/標題	量化/ 質性	二元值	低
		詮釋資料填寫關鍵字欄位	量化	二元值	中
		詮釋資料填寫分類欄位	量化	二元值	中
		詮釋資料填寫資料收集時間區間資訊	量化	二元值	中
		詮釋資料填寫空間資訊	量化	二元值	中

(二)可近用性 (Accessibility) 構面-資料是否可穩定存取近用

當使用者成功查找到所需的資料後，接下來的關鍵就是能否順利取得並使用這些資料。可近用性意指降低使用者存取資料之難度，通常可透過採用開放、免費之存取機制與提供明確存取規範等措施加以推動。

在此基礎上，資料若能具備清楚的存取方式與穩定的下載管道，並搭配適當的認證與授權機制，將能有效降低使用者與系統存取資料的難度。可近用性直接影響 AI 系統獲取資料的效率與應用的可行性，是資料應用流程中的核心環節，以下指標可用於評估資料集在可近用性方面的表現，其構面包含可得性 (Availability) 1 個面向指標，其衡量指標及驗證方式說明如下：

1、可得性 (Availability)

可得性 (Availability) 指的是使用者或電腦代理程式 (如 API 工具等) 是否能在無障礙、無錯誤或無不當限制的情況下，順利存取資料集內容。高可得性代表資料可穩定且持續地被查詢與下載，並附

有清楚明確的授權條件與存取規範，進而有助於提升資料的整體可用性與應用效率。

表 3 可近用性構面表

構面	指標	衡量指標 (Metrics)	質性/量化	計算方式	資料品質相關性
可近用性 Accessibility	可得性 Availability	提供資料下載網址	量化	二元值	高
		資料下載網址可近用	量化	二元值	高
		無需註冊即可下載資料	量化	二元值	中
		詮釋資料提供使用授權資訊	量化	二元值	高
		詮釋資料以受控制詞彙提供授權資訊	量化	二元值	中
		具備應用程式介面 (API) 或網路服務 (Web Service) 近用資料集	量化	二元值	中
		提供近用資料集之 API 說明文件	量化	二元值	中

(三) 互通性 (Interoperability) 構面-資料是否利於系統整合

在實際應用中，資料往往需與其他資料集進行整合，以順利介接至各類分析、儲存與處理的系統或工作流程。互通性意指便利資料與其他資料、應用或工作流程的整合分析、儲存與處理，通常可透過採用通用格式、標準化結構等措施加以推動。

在此基礎上，以下指標可作為評估資料集互通性的依據，其構面包含合規性 (Conformity/compliance)、機器可讀性/可處理性 (Machine readability/processability)、開放性 (Openness) 等3個面向指標，其衡量指標及驗證方式說明如下：

1、合規性 (Conformity/compliance)

合規性是指資料及其詮釋資料是否依循公認的標準規範，涵蓋資料的獲取、發布、描述及格式定義等層面。合規的資料應符合相關技術與語意標準，例如資料中的日期欄位應使用 ISO 8601格式，詮釋資料則應採用如 DCAT 等通用描述架構，以提升資料的一致性與可交換性，並提供資料字元編碼資訊，可透過自動化檢測機制查核資料是否符合標準，並以符合項目數占檢查項目總數的比例（百分比）檢視其合規程度。資料若具備高合規性，不僅有助於確保跨系統或跨平臺環境中的資料正確解析與整合，進一步提升資料可信度，屬於推動資料標準化與國際接軌的核心基礎。

2、機器可讀性/可處理性 (Machine readability/Processability)

機器可讀性/可處理性是指資料集及其詮釋資料是否具備良好的結構與格式，足以被自動化程序正確解析、理解與處理，具高機器可讀性、具明確欄位定義及一致的資料型態，並搭配結構化的詮釋資料，使資料能無需人工介入即可被各類系統或演算法直接使用。此一特性是實現 AI 模型訓練、資料交換與流程自動化的基礎條件。

3、開放性 (Openness)

開放性指資料宜以非專屬格式（如 CSV、JSON、XML 等開放格式）提供，以利資料使用方適當存取應用，並得視實際應用需求提供壓縮檔案，以提升取用效率。高開放性資料有助於降低使用門檻，促進資料流通與創新應用。

表 4 互通性構面表

構面	指標	衡量指標 (Metrics)	質性/量化	計算方式	資料品質相關性
互通性 Inter-operability	合規性 Conformity/ Compliance	資料／詮釋資料的日期格式符合規範	量化	二元值/百分比	中
		資料／詮釋資料的 EMAIL 格式符合規範	量化	二元值/百分比	中
		資料字元編碼符合規範	量化	二元值/百分比	中

構面	指標	衡量指標 (Metrics)	質性/ 量化	計算 方式	資料品質 相關性
	機器可讀性/ 可處理性 Machine readability/ Processability	檔案格式與媒體類 型的可處理性	量化	二元值	高
	開放性 Openness	檔案格式的開放性 與廣泛支援程度	量化	二元值	高

(四)再利用率 (Reusability) 構面-資料是否具持續應用價值

AI-Ready 資料集的核心目標之一，是使資料能在各類人工智慧系統與服務中被重複使用、靈活應用與有效整合。再利用率意指促進資料在不同情境或不同目的下的利用，通常可透過採用明確的授權條款、詳細記錄資料來源與使用限制等措施加以推動。

在此基礎上，若資料能具備清楚、完整且一致的描述，即可於不同平台、工具與應用情境下順利被複製、轉換或組合使用。高度可再使用的資料不僅可支援多元 AI 應用場景，也有助於模型的持續優化、跨任務應用以及知識的累積與延伸。以下指標可用於評估資料集在再利用率方面的表現，其構面包含及時性 (Timeliness)、一致性 (Consistency)、相關性 (Relevance)、可理解性 (Understandability)、可信度 (Credibility) 等5個面向指標，其衡量指標及驗證方式說明如下：

1、及時性 (Timeliness)

及時性指資料集本身及其詮釋資料是否保持更新，並能應對的實務應用需求，避免使用者基於過時資訊進行分析或決策。具備良好及時性的資料，有助於提升 AI 模型的準確性與實用性，特別是在需要反映及時狀態的應用情境中更為關鍵。

2、一致性 (Consistency)

一致性指的是資料與詮釋資料在內容與結構上宜注意保持邏輯一致，避免出現任何相互矛盾的資訊，常見的不一致情況包含資料集內出現重複或衝突的紀錄、詮釋資料中存在多個彼此矛盾的授權聲明，或欄位如「修改日期」早於「建立日期」等邏輯錯誤，資料提供方宜

適度採用自動化資料邏輯檢核機制，分析各欄位內是否僅使用控制詞彙表中包含的允許值、是否有重複資料，並依此計算出含非允許值及重複數值之百分比，並由人工輔以驗證是否具一致性。資料的一致性確保其可信度與可用性的基礎，對於 AI 模型訓練與應用的穩定性至關重要。

3、相關性 (Relevance)

相關性係指資料內容與特定應用目的或任務需求之間的實質關聯程度。高相關性的資料能有效支援特定 AI 任務的目標，例如模型訓練、驗證或部署階段所需之資料需求。依據 OECD 所提出之 AI 系統生命週期治理框架，資料使用者應從系統開發與運作的全生命週期角度，審慎評估資料的來源、收集目的、結構特性與潛在偏誤，確保資料內容不僅符合應用語境，亦能避免在特定階段引入不必要的風險或誤導。例如，在模型設計初期應評估資料是否能代表欲解決的問題情境，在訓練與測試階段則須確認資料是否具備足夠的細緻度與標註品質，以支持預期的技術表現與公平性要求。資料筆數與欄位數確實需視應用脈絡而定，單純數量本身不必然代表品質，惟資料應具備足以支撐任務的適量資訊，另非僅以數量作為品質評估，資料之相關性，應涵蓋資料集內容與應用目的之間的合理對應，就應用情境、治理責任與資料本身特性進行綜合判斷。

4、可理解性 (Understandability)

可理解性指資料及其詮釋資料對使用者而言是否清晰、直觀且易於理解。若資料的結構、內容與說明具備良好的表達與邏輯性，使用者將能迅速掌握資料的意涵與用途，進而提升資料的可用性與應用效率。

資料提供方可透過檢視資料集的標題、欄位命名、關鍵字設定及說明文件的完整性與表達品質，強化資料的可理解性。良好的可理解性有助於使用者快速上手，降低誤用風險，促進資料的流通與再利用。

5、可信度 (Credibility)

可信度指的是資料是否提供使用者判斷資料內容是否真實且可靠的程度。當資料來自明確的來源、具備清楚的背景說明與標註，更容易取得使用者的信任。可信的資料不僅有助於提高 AI 模型訓練的品質，也能強化資料驅動決策的信賴基礎。

為提升可信度，資料提供方宜在詮釋資料中明確揭示資料發布單位、聯繫窗口、資料集擁有者及其職責，並標示資料來源與更新頻率，強化使用者對資料品質與責任歸屬的理解。

表 5 再利用性構面表

構面	指標	衡量指標 (Metrics)	質性/ 量化	計算 方式	資料品質 相關性
再利用性 Reusability	及時性 Timeliness	詮釋資料提供更新 頻率	量化/ 質性	二元值	中
		詮釋資料提供資料 上架日期	量化/ 質性	二元值	中
		詮釋資料提供資料 最近修改日期	量化/ 質性	二元值	中
	一致性 Consistency	在資料／詮釋資料 中非容許值的數量	量化	二元值/ 百分比	低
		不具重複資料	量化	二元值/ 百分比	低
		資料採用一致的計 量單位、資料類型 和參數名稱	量化/ 質性	二元值	高
	相關性 Relevance	資料筆數	量化/ 質性	計數/二 元值	高
		資料欄位	量化/ 質性	計數/二 元值	高
	可理解性 Under- standability	詮釋資料提供資料 集背景目的說明	量化/ 質性	二元值	低
		詮釋資料提供資料 集的資料字典/代 碼手冊	量化/ 質性	二元值	低
	可信度 Credibility	詮釋資料提供聯絡 窗口	量化/ 質性	二元值	低

構面	指標	衡量指標 (Metrics)	質性/量化	計算方式	資料品質相關性
		詮釋資料提供資料集發佈者	量化/質性	二元值	低
		詮釋資料提供用戶回饋和建議的機制	量化	二元值	低

(五)可信性 (Trustworthiness)構面-資料是否具備信賴基礎

人工智慧雖為多個領域帶來顯著效益，其快速發展亦伴隨若干社會關切，包括隱私侵犯與監控風險、行為操控、不透明性以及資料與演算法偏見等問題 (Müller, 2023; United Nations System, 2022)，根據 Gartner 研究與多項國際文獻的建議，在資料應用及 AI 模型開發過程中，資料的來源資訊、描述方式與結構透明度均可能影響結果的可解釋性與信任程度。

可信性意指資料能在來源可靠、處理過程透明可追溯、並兼顧隱私保護與偏差預防等情形下得被使用者信賴，通常可透過揭示來源資訊、建立偏差揭露機制、強化資料透明度與責任歸屬等措施加以推動。在此基礎上，提升可信性可協助資料使用者理解資料特性，評估其代表性與適用性，並依應用脈絡進行必要的判斷與調整。高度可信的資料不僅能降低模型偏差與不當使用風險，也有助於提升 AI 系統的可解釋性與問責性，進而促進資料的負責任應用。

本指引在建構相關詮釋資料框架指標時，除聚焦技術與品質面向外，亦納入資料來源揭露與結構描述的要點，以協助資料使用者理解資料特性，審慎評估其代表性與適用性，並依應用脈絡進行必要判斷與調整，以強化資料應用的適切性與負責任的使用行為。本詮釋資料框架指標建議 AI-Ready 資料集宜涵蓋1份可信性內容說明文件，說明資料在隱私、偏差及透明性等面向的處理與揭露情形，包含以下3個面向：

1、隱私及資料保護 (Privacy and Data Protection)

說明是否涉及個人資料，是否依照個人資料保護法 (以下簡稱個資法) 及其子法或國際間通用資料保護規定 (例如歐盟通用資料保護規則, General Data Protection Regulation, GDPR)，落實相關保護機制與法規遵循措施。

2、偏差預防 (Bias Prevention)

明確揭示資料集中涉及人口變項（如年齡、性別、地區、族群等）之資訊，協助使用者理解資料的代表性與潛在偏誤來源。此舉有助於在資料早期階段即揭露可能影響 AI 模型公平性與判斷結果的結構性問題。同時，建議資料使用者在發展 AI 系統或服務時，應審慎評估資料特性可能帶來的限制與風險，並積極進行偏差識別與緩解措施，降低資料偏差對模型預測結果的影響。

3、透明度 (Transparency)

透明度係指資料集的收集、處理、發布過程是公開且可驗證的，高度透明的資料集能增加使用者的信任，並有助於 AI 系統的可解釋性和可問責性。資料提供方宜清楚說明資料的來源、收集方法、處理流程、更新頻率等資訊，同時建立資料使用追蹤機制，以確保資料的使用符合原始目的倫理與法規規範。

表 6 可信任性構面表

構面	指標	衡量指標 (Metrics)	質性/量化	說明文件
可信任性 Trustworthiness	隱私及資料保護 Privacy and Data Protection	資料經過隱私保護程序之說明	量化/ 質性	因應人工智慧及資料分析技術的快速發展，建議資料提供方 提供1份說明文件 針對資料集於隱私保護、偏差預防及透明度3個構面，提出相應的指標說明，以確保資料的合規使用並降低潛在風險。
	偏差預防 Bias Prevention	偏差預防說明(提供正確描述之資料集內容，包含時間範圍、區域、類型等，減少資料集可能存在的偏差)		
	透明度 Transparency	資料集透明度說明(提供資料的來源、收集方法、處理流程、更新頻率等資訊)		

柒、評估流程與作業方式

為協助資料提供及使用雙方在資料釋出與利用過程中，初步瞭解其資料品質與結構特性是否具備支援 AI 應用之潛力，本節說明 AI-Ready Data 詮釋資料框架指標的評估流程與作業建議。內容涵蓋評估的啟用時機、資料預備要件、執行方法到成果彙整方式，提供一套可資參考之標準作業流程，供機關依實際需求採用與調整，作為資料品質管理與應用準備之輔助工具，進一步推動制度化作業與實務應用之銜接。資料提供方得依領域專業，使用衡量指標檢查表（如附錄）進行各構面下指標逐項評估，俾利落實追蹤資料優化補強歷程，AI-Ready Data 詮釋資料框架指標構面示意圖如下圖1。

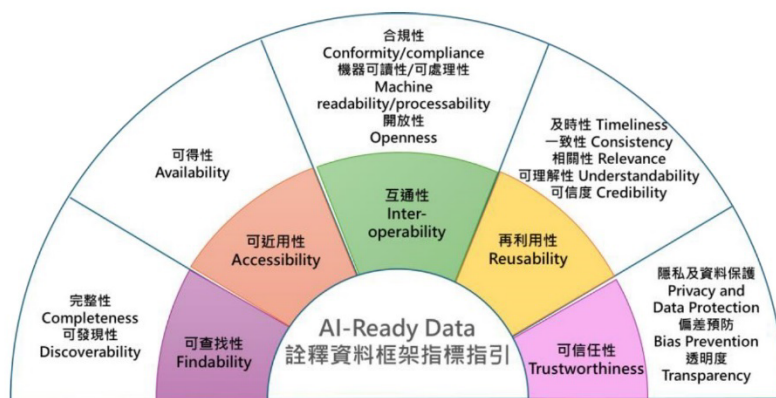


圖 1 AI-Ready Data 詮釋資料框架指標構面示意圖

(一)使用時機

推動 AI-Ready Data 詮釋資料框架指標進行資料評估實務中，清楚界定「何時應進行評估」可導入作為內部流程的一環，避免資料釋出後再補救的效率損失與風險。建議針對以下2情境執行 AI-Ready Data 評估：

表 7 指標使用時機對照表

使用情境	目的	建議頻率	實例情境
資料上架預檢	確保符合 AI 應用基本門檻與品質規範	每次資料上架或更新	資料首次產出、重大內容調整後、例行資料統計

使用情境	目的	建議頻率	實例情境
定期品質盤點	作為資料年度品質管理之依據	每年或每半年一次	年度資料盤點

(二)資料收集與前處理要求

為提升資料的自動檢核效率，需在評估前完成基礎的資料標準化處理，以確保評估結果客觀且具代表性為重要前提。以下為各面向之處理建議：

表 8 資料品質處理建議表

資料面向	資料品質面向	處理建議說明
資料結構與格式	資料欄位	建立清楚命名原則、資料型別、單位一致、欄位定義文件（資料字典）
	編碼規範	使用國際通用之標準編碼（例如 UTF-8 編碼格式、日期使用 ISO 8601 格式等）
資料內容與語意	缺漏值	建立標示缺值（如 NA、null）之標準化處理規則
	控制詞彙	採用控制詞彙（如 Chinese National Standards, CNS）、都柏林核心詮釋資料（Dublin Core Metadata Initiative, DCMI）或自建詞彙表控制描述語意
資料機敏風險	隱私及資料保護	涉及個資資料應提供適當隱私保護措施與保護說明

(三)指標執行步驟（自動/AI 輔助/人工）

本詮釋資料框架指標評估建議兼採自動化檢核、導入 AI 輔助與人工審查等 3 種模式，以提高效率並兼顧評估品質。首先，可搭配自動化檢核工具，進行結構化規則比對、欄位格式檢查、自動欄位對應分析等，以提升可程式化檢核項目之評估效率；其次，針對需進一步優化或補齊之詮釋資料內容，可導入 AI 輔助機制，由 AI 工具先依據預設指令（prompt）產出檢測提示（附帶評估係數或符合指標程度說明），若 AI 輔助評估結果高於使用情境之預設門檻，則完成評估或另採抽樣確認，若 AI 輔助評估結果低

於使用情境之預設門檻，則逐筆續交由人工進行覆核，並衡量建立通案性評估基準；針對語意一致性、描述完整性、可信任性及涉及資料敏感相關內容，建議仍應由專責人員進行審查，以確保資料之正確性與適用性。

表 9 各構面自動化檢核、AI 輔助及人工檢核對照表

構面	指標	衡量指標	自動化檢核建議	AI 輔助建議	人工檢查建議
可查找性 Findability	完整性 Completeness	1. 資料集中資料為空值的數量	可透過 Python 搭配 JSON Schema Validator 或其他套件工具組合，檢核欄位完整程度	導入 AI 輔助產出檢測提示，指出欄位缺漏或完整性狀況	確認 AI 提示是否符合實際資料狀態
		2. 詮釋資料欄位未填的數量			
		3. 在詮釋資料填寫資料集大小			
	可發現性 Discoverability	1. 詮釋資料提供資料集名稱/標題		導入 AI 輔助產出檢測提示，標示標題與關鍵字的可辨識度或缺漏	檢視是否符合專業語境與使用需求
		2. 詮釋資料填寫關鍵字欄位			
		3. 詮釋資料填寫分類欄位			

構面	指標	衡量指標	自動化檢核建議	AI 輔助建議	人工檢查建議
		4. 詮釋資料填寫資料收集時間區間資訊 5. 詮釋資料填寫空間資訊			
可近用性 Accessibility	可得性 Availability	1. 提供資料下載網址 2. 資料下載網址可近用 3. 無需註冊即可下載資料 4. 詮釋資料提供使用授權資訊 5. 詮釋資料以受控制詞彙提供授權資訊（泛指詮釋資料所使用詞彙是透過經整理之受控制的權威詞彙） 6. 具備應用程式介面	可透過網址驗證工具（例如 curl、wget）檢核資料下載是否有效	AI 產出檢測提示，指出 API 或授權資訊是否完整	人工確認授權正確性與近用合理性

構面	指標	衡量指標	自動化檢核建議	AI 輔助建議	人工檢查建議
		(API) 或網路服務 (Web Service) 來近用資料集			
		7. 提供近用資料集之 API 的說明文件			
互通性 Interoperability	合規性 Conformity / Compliance	1. 資料／詮釋資料的日期格式符合規範	可透過自訂正規式表達檢查工具檢核資料描述合理性	AI 產出檢測提示，標示格式異常或不一致之處	人工覆核特殊格式或領域慣例
		2. 資料／詮釋資料的 EMAIL 格式符合規範			
		3. 資料字元編碼符合規範			

構面	指標	衡量指標	自動化檢核建議	AI 輔助建議	人工檢查建議
	機器可讀性/ 可處理性 Machine Readability / Processabil- ity	1. 檔案格式 與媒體類 型的可處 理性	可透過資 料格式驗 證工具檢 查 (如 CSV JSON XML)	AI 產出檢 測提示，指 出格式是否 為常見可處 理類型，以 及應用領域 是否廣泛支 援	人工確認格 式開放性與 實務適用性
	開放性 Openness	1. 檔案格式 的開放性 與廣泛支 援程度			
再利用性 Reusabil- ity	及時性 Timeliness	1. 詮釋資料 提供更新 頻率	可利用時 間設定函 式自動比 對時間戳 記	AI 產出檢 測提示，提 示更新週期 是否與預期 一致	人工判斷檢 查資料提供 歷程合理性 (例如統計 月報應以每 週為更新週 期、資料上 架日期與最 近修改日期 不應為未來 時間等)
		2. 詮釋資料 提供資料 上架日期			
		3. 詮釋資料 提供資料 最近修改 日期			

構面	指標	衡量指標	自動化檢核建議	AI 輔助建議	人工檢查建議
	一致性 Consistency	1. 在資料／詮釋資料中非容許值的數量	可透過資料值檢查工具(例如 Open-Refine、Pandas)，檢核資料空值、重複及一致程度	AI 產出檢測提示，標示數值或單位不一致的情況	人工個案研判確認資料內容是否異常
		2. 不具重複資料			
		3. 資料採用一致的計量單位、資料類型和參數名稱			
	相關性 Relevance	1. 資料筆數	可利用自條件化工具比對資料筆數與欄位數	AI 產出檢測提示，指出資料筆數或欄位與應用需求的匹配度	人工判斷是否符合實際使用場景
2. 資料欄位					
可理解性 Understandability	1. 詮釋資料提供資料集背景目的說明	可透過布林值 (Boolean) 條件自動檢核是否有填寫	AI 產出檢測提示，指出資料筆數或欄位與應用需求的匹配度	人工判斷是否符合實際使用場景	
	2. 詮釋資料提供資料集的資料字典/代碼手冊				
可信度 Credibility	1. 詮釋資料提供聯絡窗口		AI 產出檢測提示，標示聯絡與回饋	人工確認資訊正確性與可追溯性	

構面	指標	衡量指標	自動化檢核建議	AI 輔助建議	人工檢查建議
		2. 詮釋資料提供資料集發佈者		資訊是否完備	
		3. 詮釋資料提供用戶回饋和建議的機制			
可信任性 Trustworthiness	隱私及資料保護 Privacy and Data Protection	1份質性文件針對資料集於隱私保護、偏差預防及透明度提出說明，以利資料合規使用並降低潛在應用風險	可透過布林值 (Boolean) 條件自動檢核是否有填寫	AI 產出檢測提示，指出隱私保護文法、標示資料分布或樣本是否可能偏差、透明度資訊是否完整 (來源、限制、處理方法)	建議人工檢視質性文檔，並依據資料應用目的，確認資料內容是否具代表性且偏誤風險可控
	偏差預防 Bias Prevention				
	透明度 Transparency				

捌、對應國際標準之建議與實務作法

為強化資料品質一致性與跨域整合能力，AI-Ready Data 詮釋資料框架指標參考相關國際資料治理與品質標準，有助於跨平臺、產業間的資料整合與合作，本節整理國際常見資料標準與本指標間的對應關係，供作制度設計與內控規範參考。

表 10 相關國際標準對應表

國際標準	核心內容／規範重點	對應 AI-Ready data 詮釋資料框架指標構面	對應建議與實務作法
FAIR 原則	Findable, Accessible, Interoperable, Reusable 四大原則為資料可被 AI 與人理解與利用之基礎	可查找性、可近用性、互通性、再利用性	導入資料標準欄位（如標題、分類、授權）、標示 API、時間與空間欄位
W3C DCAT (v2)	國際資料集詮釋資料架構標準，支援 RDF/JSON-LD 語意結構	可查找性、可近用性、互通性	使用 dcat:distribution, dct:license, dct:temporal 等標準欄位結構
DCMI Core	Dublin Core Metadata Initiative，定義通用的15個資料描述欄位	再利用性（可理解性、可信度）	使用 title, creator, subject, date, identifier 等欄位描述
ISO 8000	資料品質標準，涵蓋準確性、完整性、一致性、唯一性、語意清晰等八大維度	再利用性（及時性、一致性）、互通性（合規性）	檢查欄位格式、空值、重複紀錄、欄位說明，建立資料一致性與準確性驗證程序

國際標準	核心內容／規範重點	對應 AI-Ready data 詮釋資料 框架指標構面	對應建議與實務作法
ISO/IEC 11179	資料元素管理與語意控制標準，用於定義欄位名稱、單位、定義、值域等	再利用性（可理解性、一致性、可信度）	建立機關層級資料欄位資料字典（Data Element Dictionary），提供欄位定義與屬性說明
GSI 標準	商品與物流資料交換國際標準，如 GTIN、GLN、GPC 等分類與資料格式	互通性（開放性）、再利用性（一致性）	導入 GSI 分類碼、標準欄位命名（如商品條碼）、資料格式（如 EPCIS XML）
ISO 8601	國際日期時間格式標準，例如：YYYY-MM-DD	互通性（合規性）、再利用性（及時性）	日期欄位統一使用 YYYY-MM-DD 或 RFC 3339 格式（如 2024-06-01T12:00:00Z）
ISO 639-1 / 639-3	語言標準代碼，支援多語系資料描述	可查找性、互通性	zh, en, ja 等標準代碼，建議於「資料語言」欄位中統一使用
GDPR / 個資法	歐盟通用資料保護規則（GDPR）及我國個資法，規範個人資料的合法使用與匿名化處理方式	可信任性（隱私保護、偏差揭露、透明度）	資料若涉及個資，需進行隱私強化處理並提供處理說明
ISO/IEC 27001	資訊安全管理標準，強調資料保護、權限控管、存取紀錄	可近用性、可信任性（透明度）	對於 API 存取設立身分驗證、紀錄存取行為，標示授權條款、敏感資料等級
Schema.org / OpenAPI	資料描述與 API 說明標準，支援機器可讀性與自動化發現資料	互通性（機器可讀性）、可近用性、再利用性	提供 OpenAPI 格式說明文件、JSON Schema 定義欄位型態與限制條件

國際標準	核心內容／規範重點	對應 AI-Ready data 詮釋資料 框架指標構面	對應建議與實務作法
ESIP Data Readiness Checklist	評估資料集 AI 可用程度的檢核清單（由美國地球科學資訊合作組織提出）	可查找性、互通性、再利用性（可理解性）、可信性	檢查是否標示來源、分類、欄位說明、資料更新頻率、偏差與使用限制說明

為落實上開標準與建議於實務操作，建議資料集在描述層面採用 DCAT 與 DCMI 的結構化格式，強化詮釋資料的一致性與語意互通性；在欄位屬性管理方面，可對照 ISO/IEC 11179 與 ISO 8000 建立資料字典，明確定義欄位名稱、資料型別、允許值與單位，提升資料一致性與準確性；資料品質評估則可參照 ISO 8000 的八大品質維度與 ESIP Data Readiness Checklist，進行結構完整性與使用適用性的檢核；在格式與語意標準方面，建議全面導入 GSI 商品分類、ISO 8601 日期格式與 ISO 639-1 語言代碼，確保資料格式統一並具備跨域可交換性；最後，在授權與隱私管理上，應審慎對應 GDPR、我國個資法及 ISO 27001 等標準，於資料集中清楚標註授權條款、機敏處理與存取紀錄，以強化資料合規性與使用信任度。

玖、結語

AI-Ready Data 詮釋資料框架指標指引旨在協助政府機關以系統性檢視結構化資料在人工智慧應用中的整備程度，涵蓋資料可查找性、可近用性、互通性、再利用性與可信性等關鍵面向，提供具操作性的衡量準則評估框架，適用範圍不限於開放資料，亦可擴及各類供 AI 訓練應用之結構化資料，協助資料提供方與資料使用方評估及提升資料作為 AI 應用之整備情形。

隨著 AI 技術快速演進，資料型態日益多元，未來的 AI 應用將不僅侷限於結構化資料，更廣泛依賴文字、影像、音訊、影片等多模態資料，以及報告文件、圖像檔案等非結構化內容。本指引為通用性衡量架構，後續可由各領域主管機關參考本指引為基礎，進一步發展具領域特性之詮釋資料框架指標，以強化指引落地之可行性，並可因應 AI 的發展，持續延伸與擴充框架指標，以及鼓勵各機關納入相關資料管理政策，促進跨域資料流通與再利用。

拾、參考文獻

- ESIP Data Readiness Cluster (2022). Checklist to examine AI-readiness for open environmental datasets. Retrieved from <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19983722.v1>
- Fraunhofer FOKUS (2020). Definition and description of data quality indicators and metrics. Data Quality Guidelines. Retrieved from <https://joinup.ec.europa.eu/sites/default/files/solution/documentation/2020-08/PRJ004%20-%20ISA2%20Fraunhofer%20Fokus%20-%20Data%20Quality%20Guidelines%20-%20Deliverable%20B1%20-%20v1.2.pdf>.
- Fraunhofer FOKUS (2020). Recommendations for providing high quality data. Data Quality Guidelines. Retrieved from <https://joinup.ec.europa.eu/sites/default/files/solution/documentation/2020-08/PRJ004%20-%20ISA2%20Fraunhofer%20Fokus%20-%20Data%20Quality%20Guidelines%20-%20Deliverable%20C1%20-%20v1.3.pdf>.
- GO FAIR (2022). FAIR Principles. Retrieved from <https://www.go-fair.org/fair-principles/>
- Greenberg, J. (2024, February 23). AI-Ready Data: Navigating the Dynamic Frontier of Metadata and Ontologies. Metadata Research Center. <https://mrc.cci.drexel.edu/2024/02/23/ai-ready-data-navigating-the-dynamic-frontier-of-metadata-and-ontologies/>.
- Hiniduma, K., Byna, S., & Bez, J. L. (2024). Data Readiness for AI: A 360-Degree Survey (arXiv:2404.05779). arXiv. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2404.05779>.
- Madiaga, T. A. (2019). EU guidelines on ethics in artificial intelligence: Context and implementation. Think Tank, European Parliament.

- [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/640163/EPRS_BRI\(2019\)640163_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/640163/EPRS_BRI(2019)640163_EN.pdf).
- Müller, V. C. (2023). Ethics of artificial intelligence and robotics. The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2023 Edition). In Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.). <https://plato.stanford.edu/cgi-bin/encyclopedia/archinfo.cgi?entry=ethics-ai>.
- Publications Office of the European Union. (2021). Data.europa.eu data quality guidelines. Publications Office of the European Union. Retrieved from <https://data.europa.eu/doi/10.2830/333095>.
- Rotaru, T. Ş., & Amariei, C. (2023). Ethical Issues in Research with Artificial Intelligence Systems. In M. Radenkovic (Ed.), Ethics - Scientific Research, Ethical Issues, Artificial Intelligence and Education. <https://www.intechopen.com/chapters/1127065>.
- United Nations System (2022). Principles for the ethical use of artificial intelligence in the United Nations System. https://unsceb.org/sites/default/files/2022-09/Principles%20for%20the%20Ethical%20Use%20of%20AI%20in%20the%20UN%20System_1.pdf.
- U. S. Department of Commerce. (2025). Generative AI and Open Data: Guidelines and Best Practices. Retrieved from <https://www.commerce.gov/sites/default/files/2025-01/GenerativeAI-Open-Data.pdf>.
- World Bank. (2023, June 26). From open data to AI-ready data: Building the foundations for responsible artificial intelligence. World Bank Blogs. Retrieved from <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/from-open-data-to-ai-ready-data--building-the-foundations-for-re>.

拾壹、附錄-衡量指標檢查表

構面	指標	衡量指標	評估結果
可查找性 (Findability)	完整性 (Completeness)	1. 資料集中資料為空值的數量	
		2. 詮釋資料欄位未填的數量	
		3. 在詮釋資料填寫資料集大小	
	可發現性 (Discoverability)	1. 詮釋資料提供資料集名稱/標題	
		2. 詮釋資料填寫關鍵字欄位	
可近用性 (Accessibility)	可得性 (Availability)	3. 詮釋資料填寫分類欄位	
		4. 詮釋資料填寫資料收集時間區間資訊	
		5. 詮釋資料填寫空間資訊	
		1. 提供資料下載網址	
		2. 資料下載網址可近用	
		3. 無需註冊即可下載資料	
		4. 詮釋資料提供使用授權資訊	
互通性 (Inter-operability)	合規性 (Conformity / Compliance)	5. 詮釋資料以受控制詞彙提供授權資訊	
		6. 具備應用程式介面(API) 或網路服務(Web Service) 來近用資料集	
		7. 提供近用資料集之API的說明文件	
互通性 (Inter-operability)	機器可讀性/可處理性 (Machine readability / Processability)	1. 資料/詮釋資料的日期格式符合規範	
		2. 資料/詮釋資料的EMAIL格式符合規範	
互通性 (Inter-operability)	開放性 (Openness)	3. 資料字元編碼符合規範	
		1. 檔案格式與媒體類型的可處理性	
再利用性 (Reusability)	及時性 (Timeliness)	1. 檔案格式的開放性與廣泛支援程度	
		1. 詮釋資料提供更新頻率	
		2. 詮釋資料提供資料上架日期	
	一致性 (Consistency)	3. 詮釋資料提供資料最近修改日期	
		1. 在資料/詮釋資料中非容許值的數量	
		2. 不具重覆資料	
	相關性 (Relevance)	3. 資料採用一致的計量單位、資料類型和參數名稱	
		1. 資料筆數	
	可理解性 (Understandability)	2. 資料欄位	
		1. 詮釋資料提供資料集背景目的說明	
可信度 (Credibility)	2. 詮釋資料提供資料集的資料字典/代碼手冊		
	1. 詮釋資料提供聯絡窗口		
	2. 詮釋資料提供資料集發佈者		
可信任性 (Trustworthiness)	隱私及資料保護 (Privacy and Data Protection)	3. 詮釋資料提供用戶回饋和建議的機制	
		1份質性文件針對資料集於隱私保護、偏差預防及透明度提出說明，以利資料合規使用並降低潛在應用風險。	
			偏差預防 (Bias Prevention)
	透明度 (Transparency)		

附錄六

人工智慧基本法

人工智慧基本法

中華民國 115 年 1 月 14 日
華總一義字第 11500001671 號

第一條 為建設智慧國家，促進以人為本之人工智慧研發與人工智慧產業發展，建構人工智慧安全應用環境，落實數位平權，保障人民基本權利，增進社會福祉，提升國人生活品質，促進社會國家之永續發展，維護國家文化價值及提升國際競爭力，並確保技術應用符合社會倫理，特制定本法；本法未規定者，適用其他法律之規定。

第二條 本法所稱主管機關：在中央為國家科學及技術委員會；在地方為直轄市、縣（市）政府。

本法所定事項，涉及各目的事業主管機關職掌者，由各目的事業主管機關辦理。

第三條 本法所稱人工智慧，指具自主運行能力之系統，該系統透過輸入或感測，經由機器學習及演算法，可為明確或隱含之目標實現預測、內容、建議或決策等影響實體或虛擬環境之產出。

第四條 政府推動人工智慧之研發與應用，應在兼顧社會公益、數位平權、促進創新研發與強化國家競爭力之前提下，發展良善治理與基礎建設，並遵循下列原則：

一、永續發展與福祉：應兼顧社會公平及環境永續。提供適當之教育及培訓，降低可能之數位落差，使國民適應人工智慧帶來之變革。

二、人類自主：應以支持人類自主權、尊重人格權等人類基本權利與文化價值，並允許人類監督，落實以人為本並尊重法治及民主價值觀。

三、隱私保護與資料治理：應妥善保護個人資料隱私，尊重企業營業秘密，避免資料外洩風險，並採用資料最小化原則；同時在符合憲法隱私權保障之前提下，促進非敏感資料之開放及再利用。

四、資安與安全：人工智慧研發與應用過程，應建立資安防護措施，防範安全威脅及攻擊，確保其系統之穩健性與安全性。

五、透明與可解釋：人工智慧之產出應做適當資訊揭露或標記，以利評估可能風險，並瞭解對相關權益之影響，進而提升人工智慧可信程度。

六、公平與不歧視：人工智慧研發與應用過程中，應盡可能避免演算法產生偏差及歧視等風險，不應對特定群體造成歧視之結果。

七、問責：應確保承擔相應之責任，包含內部治理責任及外部社會責任。

第五條 政府應避免人工智慧之應用，有侵害人民生命、身體、自由或財產，破壞社會秩序、國家安全或生態環境，或偏差、歧視、廣告不實、資訊誤導或造假等違反相關法規之情事。

政府應以兒少最佳利益為原則，人工智慧產品或系統經中央目的事業主管機關會商數位發展部認定為高風險應用者，應明確標示注意事項或警語。

數位發展部及其他相關機關應提供或建議評估驗證之工具或方法，以利各目的事業主管機關辦理前項事項。

前項驗證工具及方式之形成，應徵詢相關利益團體、產業、學者、社會團體及法律專家之意見。

第六條 行政院應成立國家人工智慧戰略特別委員會，由行政院院長召集學者專家、人工智慧相關民間團體及產業代表、政務委員、相關機關首長或代表、直轄市及縣（市）政府首長組成，協調、推動及督導全國人工智慧事務，並訂定國家人工智慧發展綱領。

前項委員會每年至少召開會議一次，並審議國家人工智慧發展綱領；遇突發緊急或重大事件，應召開臨時會議。

第一項委員會之幕僚作業，由國家科學及技術委員會辦理。

第七條 為提升國民對於人工智慧之知識與技能，政府應持續推動各級學校、產業、團體、社會及公務機關（構）之人工智慧與倫理教育，並厚植國民之數位素養。

第八條 政府應落實人工智慧發展政策，並鼓勵產官學界，積極推動人才及技術之跨域合作、交流與基礎設施之建立。

第九條 政府應於財政能力範圍內，寬列預算，採取必要措施，持續確保經費符合推行人工智慧政策發展所需。

第十條 政府應積極推動人工智慧研發、應用及基礎建設，妥善規劃資源整體配置，並辦理人工智慧相關產業之補助、委託、出資、投資、獎勵、輔導，或提供租稅、金融等財政優惠措施，並應設置年度執行成效報告制度，定期對外公布相關成果與評估意見，以作為政策持續推動與資源調整之依據。

第十一條 政府應於人工智慧開發、訓練、測試及驗證新興技術運作之影響時，提供合理使用、扶持及補助措施，並完善人工智慧研發及應用之法規。相關法規之解釋與適用，如與其他法規扞格，在符合本法第四條基本原則之前提下，以促進新技術與服務之提供為優先原則。

為促進人工智慧技術創新及永續發展，各目的事業主管機關得針對人工智慧創新產品或服務，建立或完備人工智慧研發及應用服務之創新實驗環境。

第十二條 政府應致力推動人工智慧相關之國際合作；並基於公私協力原則，積極與民間共同推動人工智慧之創新運用。

第十三條 政府應建立資料開放、共享及再利用機制，以提升人工智慧使用資料之可利用性，並定期檢視與調整相關法令及規範。

政府應致力提升我國人工智慧使用資料之品質與數量，確保訓練及產出結果足以展現國家多元文化價值與維護智慧財產權。

第十四條 各目的事業主管機關會商個人資料保護主管機關，在人工智慧研發及

應用過程，避免不必要之個人資料蒐集、處理或利用，並應促進個人資料保護納入預設及設計相關措施或機制，以維護當事人權益。

第十五條 政府應積極運用人工智慧確保勞動者之勞動權益。

政府應積極弭平人工智慧發展所造成之技能落差，提升勞動參與，保障經濟安全，並落實尊嚴勞動。

政府應就人工智慧利用所致之失業者，依其工作能力予以輔導就業。

第十六條 數位發展部應參考國際標準或規範，推動與國際介接之人工智慧風險分類框架，並應協助各目的事業主管機關訂定以風險為基礎之管理規範。

各目的事業主管機關應視人工智慧應用風險管理之需要，循前項風險分類框架，訂定以風險為基礎之管理規範，並應協助相關產業自行訂定產業指引及行為規範。有第五條第一項所列之情事者，應依法令限制或禁止之。

第十七條 政府應就高風險人工智慧之應用，明確其責任歸屬及歸責條件，並建立其救濟、補償或保險機制。

人工智慧之研發，於實際應用前，不適用前項規定。但其於實際環境測試，或運用研發成果提供產品、服務時，不在此限。

第十八條 政府應依本法規定，檢討所主管之法規與行政措施；有不符本法規定或無法規可適用者，應自本法施行後二年內，完成法規之制（訂）定、修正或廢止，及行政措施之改進。

前項法規制（訂）定或修正前，既有法規未有規定者，由中央目的事業主管機關會商中央主管機關，依本法規定解釋、適用之。

第十九條 政府使用人工智慧執行業務或提供服務，應進行風險評估，規劃風險因應措施。

政府應依使用人工智慧之業務性質，訂定使用規範或內控管理機制。

第二十條 本法自公布之日起施行。