111-022-7D06 IOT-110-H2C006

應用雷達技術於海象觀測作業 化之校修與維運



交通部運輸研究所

中華民國 111 年 3 月

111-022-7D06 IOT-110-H2C006

應用雷達技術於海象觀測作業 化之校修與維運

著 者:錢樺、李俊穎、林受勳、陶瑞全、魏世聰、李政達

交通部運輸研究所

中華民國 111 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料



應用雷達技術於海象觀測作業化之校修與維運 著 者:錢樺、李俊穎、林受勳、陶瑞全、魏世聰、李政達 出版機關:交通部運輸研究所 址:105004 臺北市松山區敦化北路 240 號 批 網 址: <u>www.iot.gov.tw(</u>中文版>數位典藏>本所出版品) 話:(04)2658-7200 雷 出版年月:中華民國 111 年 3 月 印刷者: 版(刷)次冊數:初版一刷 50 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資訊組•電話:(02)2349-6789 國家書店松江門市: 104472 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話: (02) 2518-0207 五南文化廣場: 400002 臺中市中山路 6 號•電話: (04)2226-0330

GPN:1011100139 ISBN:978-986-531-368-5(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。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱:應用雷達技術於海象觀測作業化之校修與維運								
國際標準書號(或叢刊號)	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號					
ISBN 978-986-531-368-5(平裝)	1011100139	111-022-7D06	IOT-110-H2C006					
本所主辦單位:港研中心	合作研究單位:國立	中央大學	研究期間					
主管: 蔡立宏	計畫主持人:錢樺	自 110 年 2 月						
計畫主持人:李俊穎	:李俊穎 研究人員:陶瑞全、魏世聰							
研究人員:林受勳、李政達	地址:桃園市中壢區	中大路 300 號	- 110 12 / 1					
聯絡電話:04-2658 7200	聯絡電話:03-422715	1 #65670						
傳真號碼:04-2657 1329								

關鍵詞:海洋高頻陣列雷達,海氣象參數,波束合成演算法,多重訊號演算法

摘要:

本計畫之目標為建立一套高頻雷達資料處理及瀏覽系統,發展應用高頻雷達觀測臺灣海峽 中部之海氣象資訊技術。本研究執行內容包含精進雷達訊號分析技術及解算最佳海氣象量值、 雷達資料品質評估、雙雷達系統整合與驗證及建立海況資料展示系統。

本計畫於都卜勒距離譜之訊號方向定位技術使用波束合成演算法與多重訊號演算法,雨種 方法在估算徑向速度方面效果都很好,但多重訊號演算法的不確定性要大於波束合成演算法。 本計畫使用調整之 ImageFOL 來取得都卜勒距離譜之一階峰與二階峰的範圍來計算海氣象參數 ,其結果比其他研究之方法更加合適。本研究建立第 1~3 級產品之資料品質評估平臺,使用都 卜勒距離譜演算風波流等海氣象參數方法,並將演算結果與實測資料做比對。本研究徑向流速 演算結果良好,建議以波束合成演算法演算流場為優先;波浪參數經比例係數調整後,結果與 現場量測一致;波譜演算方面發現傳遞函數對頻譜的修正有很好的作用;低於 10 公尺/秒之風速 演算結果不確定性較大,風向估算方面目前存在偏差,若臺中港雷達南站資料品質提升與更多 實測資料能進行比對,對演算精準度會有所幫助。本計畫於資料庫與展示介面建置部分,海流 與波浪高度產品經過作業化品管與驗證,並初步完成展示系統的建置,提供臺中港港務分公司 港灣環境資訊,做為決策應用與規劃設計使用,以及提出未來之即時資訊傳遞系統規劃與資訊

出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式			
111年3月	194	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 團體及學校可函洽本所免費贈閱;私人及私營機關團體可按定價價 購。			
備註:本研究之結論與建議不代表交通部之意見。						

I

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

TITLE: Application of ra- observation	dar technology to the calibration and maintena	ance of operational mariti	ime meteorol	logy
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-368-5(pbk)	PROJECT UMBER IOT-110-H2C006			
DIVISION: Harbor & Ma DIVISION DIRECTOR: PRINCIPAL INVESTIGA PROJECT STAFF: Shou- PHONE: (04) 2658-7200 FAX: (04) 2656-0661	PROJECT FROM Febr	PERIOD ruary 2021 nber 2021		
RESEARCH AGENCY: I PRINCIPAL INVESTIGA PROJECT STAFF: Duy- ADDRESS:, Taiwan, R.C PHONE: (03)4227151 ex	NATIONAL CENTRAL UNIVERSITY ATOR: Hwa Chien Ioan Dao, Shih-Tsung Wei D.C. t.65670			

KEY WORDS:

OTH HIGH-FREQUENCY RADAR, MARITIME METEOROLOGICAL PARAMETERS, BEAMFORMING ALGORITHM, MUSIC ALGORITHM

ABSTRACT:

The aim of the present project is to establish processing and browsing system of high-frequency radar signal data to develop a technology of monitoring maritime meteorological information in the central Taiwan Strait by using OTH High-Frequency radar signals. The tasks of this project include the refinement of radar signal analysis techniques and the determination of the optimal sea state values, the evaluation of radar data quality, the integration and verification of dual radar systems, and the establishment of a sea state data display system.

As the direction finding technology for signals of Doppler-range spectrum in this project, the beam-forming algorithm and the multiple signal (MUSIC) algorithm are used, both of which performed well in estimating radial speeds, except that the latter had larger uncertainty than the former. The adjusted ImageFOL is also used to acquire the range of the first- and second-order peaks of the Doppler-range spectrum to determine the maritime meteorological parameters; the results proved more suitable than the methods of other studies. This study establishes a data quality platform for level 1-3 products to ensure the quality of data computation. A method of using Doppler-range spectrum to calculate the maritime meteorological parameters is also established, with the algorithmic results compared with in-situ data. As the radial speed algorithm performed well in this study, it is recommended to set priority on flow field by beam-forming algorithm. The wave parameters, when adjusted with proportion coefficients, turned out to be consistent with in-situ measurements. In wave spectrum algorithm, the modifications to spectrum by transmission function were found to work well. Where uncertainty existed in the algorithmic results of wind speeds below 10 m/s, there were deviations in wind direction estimation. The accuracies of algorithms would improve, if the data quality at the south Radar of Taichung Port increases and is compared with more in-situ data. The project has completed the construction of database and display interface, put the products of current and wave heights to operational quality control and verification, as well as the preliminary phase of implementation of display system to provide harbor environmental information for use by Taichung Port branch of TIPC in decision and planning. Also given is the recommendation to plan on a real-time information transmission system in the future and the construction of hardware environment.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE						
March 2022	194	200						
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.								

應用雷達技術於海象觀測作業化之校修與維運

中文摘要I
英文摘要II
圖目錄VI
表目錄XI
第一章 緒論1-1
1.1 計畫背景1-1
1.2 計畫目的與研究範圍1-3
1.3 主要工作目標與執行分項1-4
第二章 精進雷達訊號分析技術及解算最佳海氣象量值2-1
2.1 高頻陣列雷達背景與現況2-1
2.2 觀測資料說明:都卜勒距離譜2-6
2.2.1 第 0 與 1 級產品說明2-6
2.2.2 訊號方向定位技術(DOA)2-13
2.3 海表參數分析方法2-22
2.3.1 海流分析方法2-26
2.3.2 波浪分析方法2-28
2.3.3 方向波譜分析方法2-31
2.3.4 風場分析方法2-38

目 錄

第三章 雷達資料品質評估	3-1
3.1 第1級產品品管	3-2
3.1.1 都卜勒頻譜訊噪比品管	3-2
3.1.2 船舶雜訊移除品管	3-9
3.2 第2級產品品管3	-20
3.2.1 徑向流速品管3	-20
3.2.2 波浪參數品管3	-21
3.2.3 風參數品管3	-23
3.3 第 3 級產品品管3	-24
3.3.1 流場品管3	-24
3.3.2 風、波場品管3	-27
第四章 雙雷達系統整合與驗證	4-1
4.1 第1級產品:都卜勒距離譜演算結果	4-2
4.1.1 臺中港雷達北站	4-2
4.1.2 臺中港雷達南站	4-8
4.2 第2級產品:海氣象參數演算結果4	-14
4.2.1 徑向流速結果與比較4	-14
4.2.2 波浪參數結果與比較4	-23
4.2.3 方向波譜結果與比較4	-29
4.2.4 風場結果與比較4	-33
4.3 第 3 級產品:雙雷達系統之海氣象參數演算結果4	-37

4.3.1 流場結果與比較4-37
4.3.2 波場結果與比較4-38
4.3.3 風場結果與比較4-39
第五章 建立海沉資料展示系統5-1
5.1 高頻雷達資料庫與展示規劃5-2
5.2 即時資訊傳遞系統規劃5-8
5.2.1 資訊傳遞網路通訊協定 MQTT5-9
5.2.2 雷達現場站及中控資料展示站的 MQTT 通訊架構5-10
5.2.3 MQTT 主題(topic)設計5-11
5.2.4 MQTT 資料格式定義5-14
5.3 資訊硬體環境建置建議5-15
5.3.1 虛擬機備份伺服器5-19
5.3.2 磁碟陣列建置建議5-19
5.3.3 港研中心遠端中控站虛擬客體機建置建議5-20
第六章 結論與建議6-1
參考文獻參-1
附錄一、期中審查意見及辦理情形說明表
附錄二、期末審查意見及辦理情形說明表

圖目錄

圖	1.1	離岸風電潛力場址圖1-1
圖	1.2	計畫區域示意圖1-4
圖	2.1	HTCN 高頻天線陣列海洋雷達外觀現況2-2
圖	2.2	HTCN 雷達站內部設置與更新2-4
圖	2.3	HTCS 雷達天線現場設置圖
圖	2.4	HTCS 系統控制箱2-5
圖	2.5	臺中港前八支天線元觀測的 I/Q 訊號時間序列圖
圖	2.6	雷達訊號處理流程圖2-8
圖	2.7	I訊號與對應Q訊號進行第一次的傅立葉轉換所得之16個接 收天線之距離時間譜圖2-10
圖	2.8	將圖 2.7 複數時序列對橫坐標時間進行第二次的傅立葉轉換得 到 16 個接收天線之都卜勒距離譜2-12
圖	2.9	使用 M 個均勻線性陣列接收天線計算訊號定位示意圖2-14
圖	2.10	傳統波束合成演算法之流程圖
圖	2.11	MUSIC 演算法計算海流徑向速度流程圖2-20
圖	2.12	HTCN 站之天線視軸與理想計算角度2-21
圖	2.13	HTCN 站之 A(θ)相位結果2-21
圖	2.14	電磁波之雙反射效應示意圖
圖	2.15	流體動力耦合係數示意圖
圖	2.16	由都卜勒距離譜一固定距離之一階、二階峰範圍示意圖2-25

圖	2.17	兩個雷達站觀測之徑向海流分量幾何形狀及其與東西向和南	与北
		向速度分量 u 和 v 的關係2	2-26
圖	2.18	布拉格加權函數圖2	2-29
圖	2.19	雷達觀測方向相關之波向分佈圖2	2-40
圖	2.20	消除方向性混淆之示意圖2	2-42
圖	3.1	都卜勒頻譜示意圖	.3-2
圖	3.2	都卜勒頻譜與船舶回波(紅圈)示意圖	.3-6
圖	3.3	都卜勒距離譜與船舶回波(黑圈)示意圖	.3-6
圖	3.4	使用與不使用品質評估一階訊噪比和徑向速度差異比較	.3-8
圖	3.5	平均二階訊噪比和示性波高圖	.3-9
圖	3.6	由船舶回波所引起之不準確示性波高之差異比較	3-10
圖	3.7	沿著(a)都卜勒分格和(b)範圍單元的功率譜與回歸曲線3	3-12
圖	3.8	船舶探測和海洋表面流的資料處理流程	3-13
圖	3.9	二維移動平均法之視窗分析圖	3-14
圖	3.10	不同大小的二維移動平均線對常態分佈偏差之偏度和峰度的 化趨勢	勺變 3-15
圖	3.11	都卜勒距離譜使用平滑法之範例	8-16
圖	3.12	移除船舶雜訊流程圖	8-17
圖	3.13	使用船舶雜訊移除方法測試圖	3-18
圖	3.14	移除船舶回波之都卜勒距離譜的結果	3-19
圖	3.15	移除船舶回波之都卜勒距離譜的另一範例結果	3-19
圖	3.16	對顯示了三年風速資料(從 2018 年到 2020 年)柱狀圖	3-23

圖	3.17	臺中雷達系統的 GDOP 圖3-25
圖	3.18	本研究經 GDOP 設置理想之演算流場區域和網格點
圖	3.19	本研究經 GDOP 設置理想之演算風、波場區域和網格點3-27
圖	4.1	實測比對儀器與位置4-1
圖	4.2	HTCN 所有天線之都卜勒距離譜4-4
圖	4.3	經波束合成演算法之 HTCN 每 10 度之都卜勒距離譜4-7
圖	4.4	HTCS 所有天線之都卜勒距離譜4-10
圖	4.5	經波束合成演算法之 HTCS 每 10 度之都卜勒距離譜4-13
圖	4.6	在各種海況下識別都卜勒距離譜一階分量方法的比較。4-17
圖	4.7	波束合成演算法估算之表層海流徑向速度4-18
圖	4.8	經 MUSIC 演算法由 HTCN(左圖)和 HTCS(右圖)估算之表層海 流徑向速度例子。4-19
圖	4.9	不同演算法與現場量測資料比較之徑向海表流速圖。4-21
圖	4.10	不同演算法於固定點隨時間的海流逕向流速散點圖。4-22
圖	4.11	波束合成與多重訊號演算法徑向海流空間相關性分佈圖4-23
圖	4.12	示性波高圖4-23
圖	4.13	HTCN 平均與峰值波浪週期圖4-24
圖	4.14	雷達演算和現場測量在不同季節之示性波高 30 天的比較 4-25
圖	4.15	雷達演算和現場測量在不同季節之平均週期的 30 天比較 4-25
圖	4.16	雷達演算和現場測量之波峰週期在不同季節的 30 天比較4-26
圖	4.17	波浪平均與峰值週期經比例係數與微小參數校正圖4-27
圖	4.18	示性波高(a)、平均週期(b)和波峰週期(c)相互比較圖4-29

VIII

圖	4.19	在冬季季風、颱風情況下,高頻雷達演算和現場測量取得波譜 的5天比較4-30
圖	4.20	雷達演算之波譜與現場量測資料之間的相關係數4-31
圖	4.21	平均週期和峰值週期之比較圖
圖	4.22	風速與(a)一階波峰總能量和(b)示性波高的關係4-34
圖	4.23	從 HTCN 和 HTCS 站得出的風場圖4-35
圖	4.24	雷達演算與現場量測之風速比較圖4-35
圖	4.25	使用公式(4.2)演算風速與現場量測風速比較圖
圖	4.26	演算風向與現場量測風向比較圖4-37
圖	4.27	波束合成演算法與多重訊號演算法合成流場圖4-38
圖	4.28	雷達演算波場 Hs、Tm 和 Tp 結果圖4-39
圖	4.29	雷達演算風場結果圖4-39
圖	5.1	資料庫設計與關聯性5-4
圖	5.2	新站點建置頁面示意圖5-7
圖	5.3	維護記錄輸入畫面示意圖5-7
圖	5.4	資料展示畫面示意圖5-8
圖	5.5	實體主機主伺服器及備援伺器運作時同時間啟用狀態架構圖
圖	5.6	實體主機主伺服器及備援伺器運作時同時間啟用狀態示意圖
圖	5.7	虛擬主機主伺服器及備援伺服器設置關係示意圖。5-17
圖	5.8	Proxmox 系統管理頁面二部伺服器所組成之叢集示意圖5-18

圖	5.9	proxmo	x 備伤	分管理	頁面	毎部	虛擬	客體	設定因]定時	間備伯	分示意圖	
					•••••		•••••				•••••	5-19)
圖	5.10	磁碟陣	列連:	結主梭	送並打	計載虛	扈擬機	後示意	圖)

表目錄

表 2-1	臺中港雷達參數	2-3
表 3-1	一階峰訊噪比門檻值	3-4
表 3-2	二階峰訊噪比門檻值	3-5
表 3-3	船舶雜訊之品管門檻值	3-7
表 3-4	徑向流速品管門檻值彙整表	3-21
表 3-5	波浪參數品管門檻值彙整表	3-22
表 3-6	風參數品管門檻值彙整表	3-24
表 4-1	使用於波束合成演算法之 HTCN 參數表	4-5
表 4-2	使用於波束合成演算法之 HTCS 參數表	4-11
表 4-3	使用 ImageFOL 方法所需之參數與數值	4-14
表 4-4	MUSIC 演算法之基本參數表	4-19
表 5-1	資料關聯特性整理	5-2
表 5-2	資料庫記錄項目整理	5-3

第一章 緒論

1.1 計畫背景

海氣象資訊在眾多海洋工程課題中是必不可少的,涉及海洋船舶 航行、海上救難、海岸管理、漏油事件、海岸侵蝕、海上結構設計、海 洋活動支援及海岸過程了解(Fujii, Heron et al. 2013, Rubio, Mader et al. 2017)。全球約有 12 億人生活在海岸 150 公里範圍內(Roarty, Cook et al. 2019),會受到與海洋對應的惡劣天氣條件的影響,如熱帶氣旋、季風 降雨等,因此需要完善的海岸監測技術來監測沿海區域的海況,以確保 人安與物安。



(參考來源:經濟部能源局)

圖 1.1 離岸風電潛力場址圖

在臺灣,因應離岸風力發電開發,國家積極發展潔淨能源作為備源 用電使用(參考圖 1.1 離岸風電潛力場址圖),為支持與強化離岸風電與 後線電力系統,隨著遙測技術的發展,海洋觀測逐步突破,觀測範圍、 觀測密度逐漸加大,透過這些觀測資料的蒐集與分析,可長期穩定的提 供即時觀測資料供各界運用,引領港埠監測系統的智慧升級,進一步推 動智慧海象監測技術發展,提升航管效能,增進即時航安維持,並降低 海上危害。

傳統的浮標風波流觀測方式,涵蓋面積小,致使資料可應用性較為 受限,且系統維護不易,為了提供高空間和時間解析度的測量,於1955 年研發沿海高頻雷達技術(Crombie,1955),經過四十多年的發展,具備 了體積小巧、安裝維護方便、與現場觀測(in-situ)相比性價比高的特點, 也可以在嚴苛的天氣條件下取得海洋表面參數。與衛星及現場實測相 比,高頻雷達測距可達200公里,並提供觀測海域內之海流、波浪和風 的測量,空間解析度(1-6公里)和時間解析度(每小時或以上)都非常高。 目前全球約有400個高頻雷達站正在運作,並蒐集即時的海洋表面海 流,其中約140站於亞洲太平洋區域持續運作(Roarty,Cook et al., 2019)。 目前單站高頻陣列雷達系統已可提供風波流的演算資訊。

臺灣高頻雷達網的建立專案始於 2009 年。目前,臺灣共安裝 25 個高頻雷達系統,環臺岸基海洋雷達測流系統(Taiwan Ocean Radar Observing System, TOROS)國家實驗研究院臺灣海洋科技研究中心運營 的雷達站 19 座,海軍學院管理 2 座,港研中心4 座(分別為臺北港 2 座與臺中港 2 座)。這些系統大多主要用於繪製海洋表層海流圖,在波 浪監測方面的應用還很有限。另外一方面,臺灣島是全球受強颱風襲擊 最頻繁的地區之一,這意味著在極端颱風條件下從高頻雷達海面回波 中取得波譜資訊仍是一重要研究課題。

2018 年 11 月下旬,在臺中港北部安裝了一套由 16 個接收天線組成的陣列式高頻雷達(LERA MK-III)系統,用於長期監測臺灣海峽中部的海況。該系統中心頻率為 27.75MHz,頻寬為 300kHz,可以測量距離 海岸線 40 公里範圍內的海況參數,空間解析度為 500m。經過兩年的

1-2

時間,現階段已由 2019 年研究成果中獲取徑向之波流資料,其與實測 值具有良好相關性且取得不錯的研究成果,目前系統穩定運作,性能良 好,因此 2021 年9月安裝了第二座高頻陣列雷達站,位置於臺中港南 部。由於過去研究僅有單站徑向系統,因而未能完整分析港區及鄰近海 域之流場變化,且作業化分析需進一步開發研究,預期在雙雷達觀測的 情況下,觀測資料經過分析整合可以得到海面洋海流(u、v 分量)、波浪 (方向譜)、風向等,可提供管理者和工程人員的重要資訊。然而資料的 處理與整合更為複雜,且高頻雷達產品的資料品質評估也是值得關注。 為提升高頻雷達觀測技術,掌握高頻雷達產品、資料品質、資料處理系 統,我們提出了本研究方案,開發臺中港雙高頻陣列雷達系統的監測分 析技術,以完善臺中港海洋監測系統。

本計畫承續 2017-2020 年辦理之「離岸風電海下工程技術研發計 畫」所完成臺中港 (離岸風電預組裝基地港)相關環境調查及航安技術 研發工作之階段成果,於 2021 年為重新檢討,從原「基礎環境建構」 提升到「智慧環境監測應用」層次,研提「臺灣綠色能源港智慧環境監 測技術研發(1/4)」計畫,以研發綠色能源港智慧環境監測技術,營造綠 色潔淨運輸環境等目標。

1.2 計畫目的與研究範圍

本計畫前期針對徑向之海洋雷達表面波浪與流速觀測與特性分析, 無法全面描述空間特性,為精進提升研究成果,於2021年9月新增雷 達南站,以南北雙站聯立方式解析空間波流場。

本計畫之目標為建立一套高頻資料處理及瀏覽系統,以監測臺灣 海峽中部之海氣象資訊。計畫範圍示意如圖 1.2 所示,以臺中港為中心, 兩座港研中心建置之高頻陣列雷達分別為北站(High-Frequency Taichung North, HTCN)與南站(High-Frequency Taichung South, HTCS), 有效觀測範圍 40 公里,雷達觀測涵蓋範圍即為計畫研究區域,計畫目 標之雙雷達參數整合之研究區域則為二座雷達觀測範圍之交集區域。



Longitude [^oE]

圖 1.2 計畫區域示意圖

(HTCN 為高頻陣列雷達北站, HTCS 為南站, 觀測範圍 40 公里)

1.3 主要工作目標與執行分項

本計畫主要工作目標如下所示:

1. 精進往昔學者處理方法,改善雷達訊號辨識與分析技術:

依據臺中港環境條件、調校雷達系統頻率與頻寬至最佳狀態,探討 相關硬體規格及精度需求,分析雷達訊號與雜訊分離,並精進演算 法改善雷達訊號分析技術,提供船舶航行與進出港所需完整海氣象 資訊。 2. 估算與優化雷達回波演算方式,解算最佳海氣象量值:

藉由南北雙站聯立方式解析空間波流場,解算實際海面之波、流量 值,並與底碇式潮波流儀量測值驗證比對,提供能符合臺中港需求 發展與航行安全之海氣象觀測資訊。

開發雷達波觀測資料自動分析技術,以實現作業化雷達觀測:

引入海洋雷達南站系統,藉由南北雙站運作減少觀測盲區,提高解 析空間波流場之精度,進一步完善聯立解析的演算法與分析港區與 鄰近海域之波流場,並配合臺中港港務發展需求,實現訊號分析半 作業化之階段性目標。

4. 品質評估:

建立自動化分析與品管程序,評估整體工作流程下所得成果之精度, 並以實地觀測成果進行品質驗證,並做為後續管理決策行動建立參 考依據。

根據以上四項計畫需求,本計畫擬定以下四項執行分項。根據計畫 需求第1項,需要精進雷達都卜勒距離譜一二階峰取得的方法,此部 分會於工作執行分項1說明;依據計畫需求第1與第4項,需建立完 整之雷達資料品質評估,將雷達訊號與雜訊分離,並將0~3級的雷達 產品進行妥善的品質管理,此部分會於執行分項2描述;計畫需求第2 項會於執行分項1說明高頻雷達獲取海流、波浪、風等參數方法,比對 驗證結果於執行分項3說明;計畫需求第3項南北雙站整合會與比對 結果一起於執行分項3呈現;最後為提供臺中港發展與航行安全之完 整海氣象資訊,於執行分項4說明建立海況資料展示系統之成果。

於第二章說明高頻陣列雷達背景現況、觀測資料-都卜勒距離譜及 海表參數分析方法,第三章說明雷達資料演算過程所需之資料品質管 理程序,第四章呈現單、雙站演算與比對的結果,最後第五章為海況資 料展示系統成果與說明。工作執行分項規劃如下四大項所示,詳細內容 陳述如後續第二至第五章。 1. 精進雷達訊號分析技術及解算最佳海氣象量值:

為從高頻雷達的都卜勒頻譜中獲取海流、波浪、風等參數資訊,利 用現有的方法先建立訊號分析處理程序,並精進演算法改善雷達訊 號分析技術,對各參數估計方法與實測資料比較進行性能評估。

2. 雷達資料品質評估

品質管理程序,提升高頻雷達資料品質。資料品質參數(data quality value)是雷達產品不確定性的重要依據,同時以品質指標(quality indexes)協助指出導致雷達測量誤差之來源。

3. 雙雷達系統整合與驗證

南站完成後,整合南北雙站雷達資料,減少觀測之盲區,對於海流 資料採最小平方法進行合併,將波浪及海表風資料整合,實現雙雷 達處理模式,並與實測資料進行比對。

4. 建立海沉資料展示系統

建置一個資料處理和瀏覽的平臺,呈現高頻雷達回波中取得的海流、 波浪和風的資訊,實現作業化雷達觀測。

第二章 精進雷達訊號分析技術及解算最佳海氣象量值

為達成計畫目標與需求,本計畫第一步為精進雷達訊號分析技術, 即利用現有的方法先建立訊號分析處理程序,並精進演算法改善雷達 訊號分析技術,從高頻雷達的都卜勒頻譜中獲取海流、波浪、風等參數 資訊,並解算出最佳的海氣象量值,經過雙站雷達整合計算後,將各參 數估計方法與實測資料比較進行性能評估。

本章會先介紹高頻陣列雷達背景與現況、說明觀測資料-都卜勒距 離譜,並描述解算海氣象量值之研究方法,其解算海氣象參數之結果與 實測資料比對述如第三章呈現。

2.1 高頻陣列雷達背景與現況

雷達早期發展主要之應用為目標物探測。常用於民用航海的微波 雷達(波長為公分等級),其發射電磁波在大氣中傳遞路徑為直線,受地 球表面曲率限制,海面目標物探測距離與雷達架設高程有關,因此,一 般難以探測超越海平面外的目標物,僅能進行視距內的探測。高頻(High Frequency,波長為公尺等級)電磁波的傳遞,在海氣交界面會產生重複 性的反射與折射,使電磁波得以沿者海洋表面的曲面前進,探測視距外 的目標物。高頻雷達可以提供海岸帶(距海岸線 200 公里以上)的海流、 波浪和風的測量,空間解析度(1-6 公里)和時間解析度(每小時或以上) 都非常高。目前全球約有 400 個高頻雷達站正在運作,並蒐集即時的 海洋表面海流,其中約 140 站位於亞洲太平洋區域(Roarty, Cook et al. 2019)。目前單站高頻陣列雷達系統已可提供風波流的演算資訊。隨著 遙測技術的發展,海洋觀測逐步突破,觀測範圍、觀測密度逐漸加大, 透過這些觀測資料的蒐集與分析,可長期穩定的提供即時觀測資料供 各界運用,進一步推動智慧海象監測技術發展。

本計畫開發臺中港雙高頻陣列雷達系統的監測分析技術,以完善

2-1

臺中港海洋監測系統。臺中港雙高頻陣列雷達系統採用的雷達為夏威 夷大學研製的低成本高頻雷達(Least-Expensive Radar, LERA),其特點 為採用現行商用電子市場可獲得的元件整合而成,無需開發專屬零組 件,因此,一方面系統架構非常具有彈性,可隨消費電子產業快速進步, 可以不斷改進更新提升性能;另一方面,相較於商業化的產品,成本可 以非常低廉,所有規格不會被綁死。且架構開放,資訊透明,提供國內 相關產學參與的機會。如圖 2.1 為該雷達建置於臺中港北側海岸外觀。



圖 2.1 HTCN 高頻天線陣列海洋雷達外觀現況

本計畫所使用的高頻雷達,其規格與主要設定如表 2-1。目前設定 每 30 分鐘觀測一次,此觀測時距可以調整。每次觀測時,由四支天線 組成的發射陣列,向海面連續發射中央頻率為 27.75MHz 的高頻電磁 波,其訊號為線性調變的連續 chirp 訊號(FMCW), chirp 訊號的頻寬為 300kHz (國家通訊傳播委員會所核定的頻寬為 500kHz,考量環境訊號 雜訊,目前採用 300kHz),每段 chirp 訊號時間長度設定為 0.2166 秒, 每次觀測發射 8192 次 chirp, 共耗時約 29.5 分鐘,可估計流速的解析 度為 2.75 cm/s。

項目	設定	
觀測時間 Observation frequency	Every 30 mins	
	HTCN: 27.9 MHz	
雷達發射頻率 Radar frequency	HTCS:27.6 MHz	
雷達頻寬 Bandwidth	300 kHz	
發射天線 Transmitting antennas	4 (rectangular array)	
接收天線 Receiving antennas	16 (linear array)	
主方位 Main Bearing	296 (Deg., WWN)	
最大範圍 Maximum Range (km)	40 km (up to 80 km)	
空間解析度 Range resolution	500 m	
方位角分辨率 Azimuthal resolution	5 deg	
啁啾訊號時間長度 Chirp length	0.21666 sec	
啁啾頻率 Sampling frequency	740 Hz	
啁啾樣本數 Number of samples per chirp	1280	
最小啁啾數 Number of minimum chirps (NCHIRP)	8192	

表2-1 臺中港雷達參數

於計畫期間 2019 年 3 月邀請臺中港高頻陣列雷達站的主要建立者 之一的夏威夷大學 Pierre Flament 教授,指導本計畫團隊持續改善臺中 港高頻陣列雷達站之訊號品質,期間增加並改善雷達站冷卻設備,提升 雷達系統的穩定性,更新 Dtacq AD system 的 32 組 channels,增加每支 天線(16 支天線)I 跟 Q 的訊號品質,雷達站內部設置與更新如圖 2.2 所 示。臺中港雷達屬持續發射與接收電磁波,接收之資料品質相較於一般 微波雷達更為穩定。



圖 2.2 HTCN 雷達站內部設置與更新

(更新項目 D-tacq AD 設備與改善冷卻系統)

本計畫前期針對徑向之海洋雷達表面波浪與流速觀測與特性分析, 無法全面描述空間特性,為精進提升研究成果,規劃於2021年新增雷 達南站(如圖 1.2 之 HTCS),以南北雙站聯立方式解析空間波流場。觀 測範圍為雙雷達觀測範圍重疊部分的海域,觀測範圍內之網格解析度 取決於雷達之頻寬,根據國家通訊傳播委員會所核定的頻寬與環境雜 訊考量,目前空間解析度為500公尺,單站雷達量測之流場為徑向速 度,雙站雷達則可合成 u、v 分量之流場。

2021 年 9 月底,臺中港第二個高頻雷達站 HTCS 建置完成,HTCS 站的配置和設置參數與 HTCN 相似。4 個發射天線以一矩形建置,矩 形的長度和寬度分別為電磁波波長 λ/2 和 λ/4。接收天線有 16 個,以 線性陣列方式排列,相鄰兩個接收天線之間的距離為 5 公尺,雷達天線現場設置如圖 2.3 所示。為了避免 HTCN 和 HTCS 相互干擾,HTCS 發射頻率設定為 27.6MHz,頻寬為 300kHz,而 HTCN 的發射頻率則改為 27.9MHz,頻寬一樣為 300kHz。HTCS 站的其他參數與表 2-1 所示的 HTCN 站的參數相同。HTCS 站之系統控制箱如圖 2.4 所示。



圖 2.3 HTCS 雷達天線現場設置圖 (左圖,為發射天線;右圖,為接收天線)



圖 2.4 HTCS 系統控制箱

2.2 觀測資料說明:都卜勒距離譜

2.2.1 第 0 與 1 級產品說明

高頻雷達以時序表示的背向散射訊號做為輸出,為第0級產品 (level 0)。都卜勒距離譜(Doppler-Range Spectrum)則為高頻雷達的第1 級產品,是高頻線性調變雷達最主要的觀測結果產品,本計畫使用高頻 雷達所求之所有參數包括船舶訊號、表面海流、波浪,都是從都卜勒距 離譜中反演算得來的。

都卜勒距離譜求得之過程,是將天線所接收的回波訊號及發射訊 號進行混頻與降頻,可得到中頻訊號間的頻率差值,由於頻率經線性調 變,因此頻率差值大小與 chirp 訊號內的時間位置有關,從而可用以作 為指標估計電磁波傳波某距離所需的時間,作為距離的標定依據。目前 的頻寬 300 kHz 所對應的徑向解析度為 500 m。實際作業上,雷達系統 中的每一支接收天線感應到的回波訊號經電路混頻(降頻之後)之後以 複數形式的 I、Q 紀錄,表示電磁場實部與虛部,並以採樣頻率 740 Hz 類比數位轉換器記錄為離散時間序列,如圖 2.5 所示。



圖 2.5 臺中港前八支天線元觀測的 I/Q 訊號時間序列圖

每一個 chirp (長度 0.2166 秒)中有 160 個時序列離散樣本點,該時 序列經第一次的傅立葉轉換可得到 80 個正以及 80 個負的距離元上的 傳立葉係數,其中距離的負值不具物理意義,而每一組正距離元上傳立 葉係數都可計算對應的振幅與相位,每一個距離元解析度為 500 公尺, 因此探測範圍目前為 40 km。

回波強度 (震幅)與相位可分別由 I、Q函數求得,考慮同一距離 元上所反射的 I、Q呈現時間的週期性震盪,此為受波浪散射與反射造 成回波訊號與波浪上之海流造成的都卜勒頻偏(單位時間的相位變化), 如圖 2.6 (al.a2)第一支天線的 IQ 訊號,將每一個 chirp 訊號對整齊排 列,縱軸為每一個 chirp 訊號的時間,總長為 0.2166 秒,橫軸表示不間 斷持續發射 chirp 訊號的觀測時間長度, 總長為 29.5 分鐘, 圖上的顏色 的 I & Q 訊號的強度,強度隨時間的震盪為受波浪影響所致。將 I 訊號 與對應的Q訊號,在縱軸方向進行第一次的傅立葉轉換,將縱軸由時間 軸,轉換為頻率軸,由於 chirp 為線性調變訊號,可再將頻率找到對應 的距天線元距離。本圖只繪出前 40 公里的資料。其中負值的距離不具 物理意義,可捨棄或用作系統內部雜訊討論用。圖上畫的是每一個距離 元上的顏色為訊號強度(I/Q 的絕對值),實際上是複數型態的傅立葉 係數,如圖 2.6 (b)所示之距離時間譜(Range-Time Spectrum)。據此,進 一步再對於複數時序列對橫坐標時間進行第二次的傅立葉轉換,得到 對應於都卜勒頻偏上的回波強度之都卜勒譜,代表在不同都卜勒頻偏 下的雷達回波強度。每一個接收天線上每一個距離元上都可以計算出 都卜勒譜,亦稱交叉頻譜(Cross spectra),兩者合併起來成為一個三維的 譜,稱為都卜勒距離譜,是高頻線性調變雷達最主要的觀測結果產品, 如圖 2.6(c),縱軸為頻率對應的距天線元距離,橫軸為都卜勒頻偏,顏 色為回波強度,譜上可清楚見到兩個能量的峰值,稱之為一階峰,是海 面波浪布拉格散射下的結果。圖中接近 0 頻對應固定物之反射能量並 沒有很強的能量反應,原因為發射天線為相控陣列天線,透過其相位控 制之破壞性干涉,達到天線間往陸地方向發射之能量相互抵消所致。

為了取得海氣象參數,海流、海浪和風參數是從都卜勒距離譜計算 而來的,這些海氣象參數便是高頻雷達系統的第1級產品。因此,將時 間序列資料轉換為都卜勒距離譜訊號處理的過程是非常重要的。高頻

2-7

雷達訊號處理流程如圖 2.6 所示,訊號處理流程的順序是從(a)到(c)。 本計畫將採用該流程取得高頻雷達海洋回波的都卜勒距離譜。



圖 2.6 雷達訊號處理流程圖

基於 16 個接收天線的 I 和 Q 訊號,通過圖 2.6 流程圖則可以得到 16 個距離時間譜和都卜勒距離譜,如圖 2.7、圖 2.8。這些天線之都卜 勒距離譜便是後續處理訊號方向定位(Direction of Arrival, DOA)技術之 輸入資料。



4000

Number of chirps

2000

6000

8000

Range-time spectrum (Ant 2) (dB) 40 (2021/10/10 01:30 UTC) 40 30 20 20 Distance [km] 10 0 0 -10 -20 -20 -30 -40 -40 4000 6000 8000 2000 Number of chirps





Number of chirps

Range-time spectrum (Ant 6) (dB) 40 (2021/10/10 01:30 UTC) 40 30 20 20 Distance [km] 10 0 C -10 -20 -20 -30 -40 -40 8000 2000 4000 6000 Number of chirps







圖 2.7 I 訊號與對應Q訊號進行第一次的傅立葉轉換所得之 16 個接 收天線之距離時間譜圖







圖 2.8 將圖 2.7 複數時序列對橫坐標時間進行第二次的傅立葉轉換得 到 16 個接收天線之都卜勒距離譜
每一個接收天線的都卜勒距離譜是全向性的,並沒有指定方位,要 能探測方位,必須做訊號方向定位(Direction of Arrival, DOA)技術,用 於估計不同方位角方向的海況參數。DOA 有兩種方式分別是參考 Schmidt(1986)的多重訊號演算法(Multiple Signal Classification, MUSIC) 以及參考 Bhuiya et al.(2012)的波束合成(Beam forming)演算法,其中波 束合成演算法計算利用高頻陣列雷達進行觀測之文獻被廣為使用, 波束合成演算法計算利用到多支天線接收的相位差進行波束合成,天 線陣列中天線元的數量決定了方位角的解析度。16 支天線元的陣列, 方位角的解析度約為 8 度,經計算調整後以方位角解析度 5 度做後續 資料演算。

為估計高頻雷達背向散射的訊號方向定位(DOA),人們開發許多方法,如最小平方法(least square method)(Lipa and Barrick, 1983)、定向法 (direction-finding methods)(O. Schmidt, 1986; Barrick and Lipa, 1997)和波 束合成演算法 (Capon, 1969; Teague, 1986; Godara, 1997; Helzel, Kniephoff et al., 2006; Bhuiya, Islam et al., 2012)。對於空間掃描,多重 訊號演算法時常用於確定來自 CODAR 的背向散射訊號之方位角方向 (O. Schmidt, 1986; Barrick and Lipa, 1997; Kirincich, de Paolo et al., 2012)。 對雷達陣列系統,通常使用波束合成演算法來取得不同方位角方向的 都卜勒距離譜(Wyatt, Venn et al., 1986; Gurgel, Antonischki et al., 1999, Wyatt, Green et al., 2006)。與交叉環形天線(cross-loop antenna)相比,陣 列可以提供更多的相位分辨訊號的細節,經常於波場(wave-field)觀測 時使用。為求海氣象參數,本研究參考傳統的波束合成演算法與多重訊 號演算法進行測試。

2.2.2 訊號方向定位技術(DOA)

1. 波束合成演算法(BF)

波束合成演算法參考 Teague (1986)、Helzel 等(2006)、Bhuiya 等 (2012)。對於一個由 M 個接收天線組成的高頻雷達陣列系統,接收天

線以相同的距離線性間隔,接收全向性訊號形成空間頻譜,如圖 2.9 所 示。



圖 2.9 使用 M 個均勻線性陣列接收天線計算訊號定位示意圖(Bhuiya 等, 2012)

如上圖,d是每個接收天線之間的距離,並被限制為電磁波的半波 長, θ_i 為來自訊號 i 的入射角。入射訊號以 c 的速度在一段距離 D 上 傳播,假設訊號源Si(t), $1 \le i \le d$,第 M 個天線在時間 t 收到的所有 訊號可以表示為(Bhuiya 等, 2012):

$$x_m(t) = S_i(t) \sum_{i=1}^d e^{j(M-1)\mu_i} + n_M(t), for M = 1$$
(2.1)

公式(2.1) 可表示為:

$$x = AS(t) + n(t) \tag{2.2}$$

其中,x 為所有訊號總合,S 是由 M 個接收天線之資料列向量(data column vector),n 是天線的雜訊,A 是導引矩陣(steering matrix),包括 天線陣列反應特定方向的導引向量(steering vector)。此概念是一接收陣 列天線於一段時間內追蹤量測一特定方向之能量。當導引方向與背向 散射訊號的方位一致,可量測到最大能量,並得以估算 DOA。在此情況下,高頻雷達陣列系統可以被視為一個電子陣列(electronically array), 可設計一權重向量 w,將接收天線接收到的資料進行線性組合,形成一 組輸出訊號 Y(t)。

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{M} w_i^* x_i(t) = w^H X(t)$$
(2.3)

陣列系統之總平均輸出能量於 K 取樣數(snapshots)下可表示為:

or

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

$$P(w) = w^H R_{xx} w$$
(2.4)

其中w_i為ith個反射訊號源之權重,*表示共軛複數,H為向量之共軛轉 置矩陣,R為輸入訊號之協方差矩陣,w_i的值在應用不同的波束合成演 算法時會有所不同。

於傳統的波束合成演算法,選擇具有掃描角(scanning angle) θ 之導引向量 $A(\theta)$ 作為權重向量。

$$w = A(\theta) \tag{2.5}$$

將公式(2.5)代入公式(2.4),將譜的輸出能量作為 DOA 的函數,表示如下:

$$P(\theta)_{BA} = A(\theta)R_{xx}A(\theta)^{H}$$
(2.6)

產生最大輸出能量之方位即為所求之訊號來源的方向。

為了從接收天線之都卜勒距離譜中提取不同方位之都卜勒頻譜,使 用傳統的波束合成演算法如下流程圖圖 2.10 所示。



圖 2.10 傳統波束合成演算法之流程圖

然而,傳統波束合成演算法的最大缺點是嚴重的副波辦效應 (sidelobe effect)和產生較粗的角度解析度。關於波浪測量的空間掃描, 方位解析度的值計算如下(Gurgel 等,1999):

$$\Delta \theta = \lambda / D \quad (radian) \tag{2.7}$$

其中,λ是雷達波長,D是接收天線陣列的總長度。HTCN站的接 收天線陣列的總長度為15×4=60公尺,無線電波長λ=10.8公尺,方位 角解析度大約為10°。

由等向放射體(isotropic radiator)所組成之陣列天線電場場型 (electric field pattern)可表示為(https://electronics.stackexchange.com/ questions/288530/uniform-linear-array-ula-beamwidth-and-angularresolution-using-fft):

$$|E(\theta)| = \left| \frac{\sin[N(\pi d/\lambda)\sin\theta]}{\sin[(\pi d/\lambda)\sin\theta]} \right|$$
(2.8)

其中,N是接收天線的數量,d是接收天線之間的間距。為了找到波束 寬度(3dB),上式應等同於 $1/\sqrt{2}$,並求出 θ ,其結果為 $0.89\frac{\lambda}{D}$ 。應用公 式(2.8)來計算海流和海浪測量,現在 HTCN 站的方位角解析度大約為 9°。

2. 多重訊號演算法(MUSIC)

高頻陣列雷達系統最重要的是提供更好的空間解析度的都卜勒距 離譜來進行波浪的估算。從都卜勒距離譜中,可以通過布拉格峰和理論 值之間不同的都卜勒偏移量來估算海流的徑向速度。然而使用傳統的 波束合成演算法,徑向速度的角度解析度並不是非常精細。

Schmidt(1979)提出 MUSIC 演算法開創新的空間譜估計演算法,促進了特徵結構類演算法的興起和發展,成為空間譜估計理論體系中的標誌性演算法。過去計算方向波譜的方法包括傅立葉級數、最大概似法(Capon MLM),最大熵法(MEP)等演算法都是針對陣列接收資料協方差矩陣進行直接處理,而 MUSIC 演算法的基本思想則是對任意陣列輸出資料的協方差矩陣進行特徵分解,從而得到與訊號分類相對應的訊號子空間和與訊號分量相正交的噪聲子空間,然後利用這兩個子空間的正交性構造空間譜函式,通過譜峰搜尋,檢測訊號來源。MUSIC 演算法特性對於接收天線位置、增益(gain)、訊號相位誤差非常敏感。

MUSIC 演算法可根據天線導引向量和所有接收天線上的測量訊號 形成的協方差矩陣來確認空間中的訊號;通過天線場型的所有訊號方 位投射到該訊號空間(signal space)上來確定最可能之訊號方位。MUSIC 演算法確定的訊號空間是 M 空間(M 為接收天線的數量)的 K 維(K<M-1)子空間。天線流形(antenna manifold)的各點按方位投射到訊號空間上, 根據天線場型對訊號空間投射量決定了訊號來源之方位。

MUSIC 演算法會依據資料之相關矩陣來進行調整,根據公式(2.1、 2.2),代表第 M 個天線在時間 t 收到的總訊號(包括雜訊),假設不同的 訊 號 是 不 相 關 的 , x 的 相 關 矩 陣 可 以 寫 成 (comm.utoronto.ca/~rsadve/Notes/DOA.pdf):

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^{\mathrm{H}}]$$
$$\mathbf{R} = \mathbf{E}[\mathbf{A}SS^{\mathrm{H}}\mathbf{A}^{\mathrm{H}}] + \mathbf{E}[\mathbf{n}\mathbf{n}^{\mathrm{H}}]$$
$$\mathbf{R} = \mathbf{A}P\mathbf{A}^{\mathrm{H}} + \sigma^{2}\mathbf{I}$$
$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{S} + \sigma^{2}\mathbf{I}$$
(2.9)

其中,"H"為共軛轉置,I代表天線陣列 M×M 的單位矩陣,P是雷達 訊號的自動相關矩陣。

$$P = \begin{bmatrix} E[|S_1|^2] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E[|S_2|^2] & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & E[|S_M|^2] \end{bmatrix}$$
(2.10)

訊號協方差矩陣 \mathbf{R}_S 是一 M 級(rank M)的 N×N 矩陣,因此有 N-M 個對 應於零特徵值之特徵向量,特徵向量 \mathbf{q}_m 表示如下:

$$\mathbf{R}_{S}\mathbf{q}_{m} = \mathbf{A}P\mathbf{A}^{\mathrm{H}}\mathbf{q}_{m} = 0$$
(2.11)
$$\mathbf{q}_{m}{}^{\mathrm{H}}\mathbf{A}P\mathbf{A}^{\mathrm{H}}\mathbf{q}_{m} = 0$$

$$\mathbf{A}^{\mathrm{H}}\mathbf{q}_{m} = 0$$
(2.12)

or,

公式(2.11) \mathbf{R}_s 的所有 N-M 個對應於零特徵值的特徵向量(\mathbf{q}_m)都與所有 M 個訊號導引向量正交,此為 MUSIC 的基礎。 \mathbf{Q}_n 為這些特徵向量之 N×(N-M)矩陣。MUSIC 繪製之偽頻譜(pseudo-spectrum)表示為:

$$P_{\text{MUSIC}(\theta)} = \frac{1}{\sum_{m=1}^{N-M} |\mathbf{A}^{\text{H}}(\theta)\mathbf{q}_{m}|^{2}} = \frac{1}{\mathbf{A}^{\text{H}}(\theta)\mathbf{Q}_{n}\mathbf{Q}_{n}^{\text{H}}\mathbf{A}(\theta)}$$
(2.13)

由於組成 \mathbf{Q}_n 的特徵向量與訊號導引向量正交,當 θ 為訊號方向時,分

母為零,因此估計的訊號方向是偽頻譜中之 M 峰值。然而訊號協方差 矩陣 \mathbf{R}_s 是不可使用的,我們最多只能期望能夠估計出 \mathbf{R} 這個訊號協方差 矩陣,關鍵是 \mathbf{Q}_n 中的特徵向量可以從 R 的特徵向量中估算出來。對於 任何特徵向量 $\mathbf{q}_m \in \mathbf{Q}$:

$$\mathbf{R}_{S}\mathbf{q}_{m} = \lambda \mathbf{q}_{m}$$

then,
$$\mathbf{R}\mathbf{q}_{m} = \mathbf{R}_{S}\mathbf{q}_{m} + \sigma^{2}\mathbf{I}\mathbf{q}_{m}$$
$$\mathbf{R}\mathbf{q}_{m} = (\lambda + \sigma^{2})\mathbf{q}_{m}$$
(2.14)

R_S的任何一個特徵向量也是 R 的一個特徵向量,其對應的特徵值為λ + σ^2 。讓**R**_S =**Q**Λ**Q**^H,因此:

 $\mathbf{R} = \mathbf{Q}(\mathbf{\Lambda} + \sigma^2 \mathbf{I})\mathbf{Q}^{\mathrm{H}}$

$$\mathbf{R} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} \lambda_1 + \sigma^2 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 + \sigma^2 & \vdots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & \lambda_1 + \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & \sigma^2 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \sigma^2 \end{bmatrix} \mathbf{Q}^{\mathrm{H}}$$
(2.15)

基於上述特徵分解,我們可以將特徵向量矩陣 Q 劃分為一個對應 M 個 訊號特徵值 M 列之訊號矩陣 \mathbf{Q}_s ,和對應於雜訊特徵值(σ^2)的一個 (N-M)列之矩陣 \mathbf{Q}_n 。對應於雜訊特徵值(σ^2)的 N×(N-M)特徵向量矩陣, 與對應於零特徵值的 \mathbf{R}_s 的特徵向量矩陣完全相同。這就是公式(2.13)中使用的矩陣。 \mathbf{Q}_s 定義了訊號子空間,而 \mathbf{Q}_n 定義了雜訊子空間。

可以發現兩個觀察結果:一、**R**的最小特徵值是雜訊特徵值,並且 都等於 σ^2 ,例如區分訊號和雜訊特徵值(等同於訊號和雜訊子空間)的 一種方法是確定小特徵值的數量是相同的。二、根據Q的正交性, \mathbf{Q}_s $\perp \mathbf{Q}_n$ 。根據上述最後兩個觀察結果,我們看到所有的雜訊特徵向量都 與訊號導引向量正交。考慮 θ 的函數表示如下:

$$P_{\text{MUSIC}(\theta)} = \frac{1}{\sum_{m=M+1}^{N} |\mathbf{A}^{\text{H}}(\theta)\mathbf{q}_{m}|^{2}} = \frac{1}{\mathbf{A}^{\text{H}}(\theta)\mathbf{Q}_{n}\mathbf{Q}_{n}^{\text{H}}\mathbf{A}(\theta)} \quad (2.16)$$

其中 \mathbf{q}_m 是(N-M)雜訊特徵向量之一。如果 θ 等於其中一個訊號的 DOA, $\mathbf{A}(\theta) \perp \mathbf{q}_m$,分母相同為零。因此 MUSIC 將函數 $P_{MUSIC}(\theta)$ 的峰值識別 為到達方向。

為了實現 MUSIC 演算法計算海流徑向速度方向,方法的流程表示 如圖 2.11 所示:



圖 2.11 MUSIC 演算法計算海流徑向速度流程圖

根據 HTCN 站的接收天線的安排,可以計算出導引向量如下:

$$A(\theta) = \exp(i(np_x + mp_y))$$
(2.17)

其中, $p_x = 2\pi \times dx \times sin(\phi)cos(\theta)$, $p_y = 2\pi \times dy \times sin(\phi)sin(\theta)$, ϕ 為陣列 之垂直方向並與水平波(horizontal waves)呈 90°, θ 為給定之方位角, dx、 $dy \times n$ 和 m 定義如下:

dy = 0,

 $\begin{aligned} dx &= [-7.5 \ -6.5 \ -5.5 \ -4.5 \ -3.5 \ -2.5 \ -1.5 \ -0.5 \ 0.5 \ 1.5 \ 2.5 \ 3.5 \ 4.5 \ 5.5 \ 6.5 \ 7.5]^* (d/\lambda). \\ n &= [-7.5 \ -6.5 \ -5.5 \ -4.5 \ -3.5 \ -2.5 \ -1.5 \ -0.5 \ 0.5 \ 1.5 \ 2.5 \ 3.5 \ 4.5 \ 5.5 \ 6.5 \ 7.5] \end{aligned}$

其中 d 為相鄰之接收天線間的距離,λ為電磁波波長。HTCN 站之天線 視軸(boresight)與理想計算角度如圖 2.12 所示,HTCN 雷達視軸為 296 °,HTCS 站則為 293.5°:



圖 2.12 HTCN 站之天線視軸與理想計算角度



圖 2.13 HTCN 站之 A(θ)相位結果 (θ 為 -90°~90°, 藍線為實部,紅線為虛部)

A(θ)相對於不同的雷達觀測方向的值如圖 2.13 所示,其中 0°表示 HTCN 站的視軸。根據雷達資料的協方差矩陣和天線系統的導引向量 便可估算出徑向速度方向。

2.3 海表參數分析方法

自 1955 年,高頻雷達已成為海洋研究工具來測量海洋表面參數及 相關資訊(Crombie 1955)。現今全球設置了數百座高頻雷達站,該技術 被廣泛運用於監測沿海地區上層海洋的動態(Roarty, Cook et al. 2019)。 為了從高頻雷達背向散射訊號中測量海況參數,人們發展了許多理論 來描述高頻雷達散射截面積(radar-cross section)與海洋表面波參數之間 的關係,如 Hasselmann(1971)、Barrick(1971, 1972)、Gill and Walsh(2001)、 Voronovich and Zavorotny(2017)以及 Hardman(Hardman, Wyatt el, 2020) 的研究。其中,Barrick 的理論被廣泛用於單站雷達(monostatic radar)情 況。因此,本研究將 Barrick 的方法作為基本理論進行介紹。

高頻雷達都卜勒距離譜是高頻雷達系統的一級產品(level 1),根據 散射理論,呈現高頻波段的電磁波與海洋表面波相互作用所產生的背 向散射能量分佈。一般來說,高頻雷達海面回波的都卜勒頻譜由一階分 量 $\sigma(1)$ 和高階分量(二階) $\sigma(2$)之和表示(Lipa and Barrick 1986)。在這裡 一階項代表了電磁波和波浪之間的交互作用,其波浪波長是基於布拉 格定律(Bragg's Law) 之入射電磁波的二分之一(Barrick 1972)。一階峰 值的強度與波浪傳播(接近或遠離) 相對於雷達沿雷達波束的位置有關。 高階項則受雷達波與成對(或更多)海洋表面波產生的雙反射效應 (double bounce effects)(Barrick 1972)所影響,示意如圖 2.14 所示。原理 依據 Barrick(1972),電磁波於海表波浪之交互作用後之結果,此方法於 monostatic(單站雷達)與 bistatic(雙站雷達)兩種條件下計算方式不一樣, monostatic 為發射天線與接收天線距離接近,bistatic 則為發射與接收天 線距離遙遠之情況,以本計畫高頻雷達適用 monostatic 條件,Barrick 在物理光學(physical optics)範疇,應用邊界微擾理論(boundary perturbation theory) (Rice 1951),於高頻電磁波在 monostatic 條件下與

2-22

海浪的交互作用,提出了兩種方程式來表示都卜勒頻譜分量和方向波 譜之間的關係(Lipa and Barrick 1986):

$$\sigma^{(1)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_2=\pm 1} S(-2m_2 \mathbf{k}_0) \,\delta(\omega - m_2 \omega_B) \tag{2.18}$$

$$\sigma^{(2)}(\omega) = 2^{6} \pi k_{0}^{4} \sum_{m_{1},m_{2}=\pm 1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(m_{1}\boldsymbol{k}_{1}) S(m_{2}\boldsymbol{k}_{2}) \times |\Gamma|^{2} \delta(\omega - m_{1}\omega_{1} - m_{2}\omega_{2}) dp dq$$
(2.19)

 $m_2=\pm 1$ 為都卜勒頻移ω的符號。 k_0 為電磁波的波數向量,取決於 k_0 的大小,S(.)為海洋表面波的頻譜。 $\omega_B = \sqrt{2gk_0}$ 為布拉格頻率(Bragg frequency),δ為階梯函數。 $k_1 n k_2$ 為兩個的波浪向量,具有都卜勒頻 移頻率(Doppler shift frequency) ω_1 , ω_2 、大小 k_1 , k_2 和方向 θ_{k_1} , θ_{k_2} 表示 在座標系 p-q 平面上,並滿足布拉格共振條件(Bragg resonance condition) $k_1 + k_2 = -2k_0$ 。Г為總耦合係數,示意如圖 2.15 所示,黑 線表示 k_1 、 k_2 的峰線,紅線表示 k_B ,二階峰線(k_B)連接 $k_{1,2}$ 最大相長 和相消干涉的點,如峰線和波谷相交,由波浪成分(k_1,k_2)呈現二階都卜 勒頻譜,通常為流體力學項 Γ_H 及電磁項 Γ_{EM} 之和(Lipa and Barrick 1986), 公式如下所示:

$$\Gamma_{EM} = \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{(\boldsymbol{k}_1 \cdot \boldsymbol{k}_0)(\boldsymbol{k}_2 \cdot \boldsymbol{k}_0)}{k_0^2} - 2\boldsymbol{k}_1 \cdot \boldsymbol{k}_2}{\sqrt{\boldsymbol{k}_1 \cdot \boldsymbol{k}_2} + k_0 \Delta} \right]$$
(2.20)

$$\Gamma_{H} = \frac{-i}{2} \left[k_{1} + k_{2} + \frac{(k_{1}k_{2} - \boldsymbol{k}_{1}, \boldsymbol{k}_{2})(\omega_{d}^{2} + \omega_{B}^{2})}{m_{1}m_{2}\sqrt{\boldsymbol{k}_{1}, \boldsymbol{k}_{2}}(\omega_{d}^{2} - \omega_{B}^{2})} \right]$$
(2.21)



圖 2.14 電磁波之雙反射效應示意圖(Hilmer, 2010)。

公式(2.21) Δ=0.011 - 0.012i為標準化海水阻抗值(Lipa and Barrick, 1986)。



圖 2.15 流體動力耦合係數示意圖(Hilmer 2010)。

布拉格理論是基於水和波浪的非線性流體動力學和電磁方程的微 擾理論擴展發展而來。微擾理論之微小參數中具有有限的收斂半徑, 其中之一是 k_0h_{rms} , k_0 是雷達空間波數, h_{rms} 是均方根粗糙度波高。當 此微小參數為 1 時理論則失效(Lipa 和 Barrick, 1986; Wyatt, 1995; Lipa 和 Nyden, 2005)。基於此飽和限制,建議最大示性波高 Hs 為 H_{sat} = $2/k_0$ 。在極端情況下,當波浪大於飽和極限時,波浪高度的估計 結果會被低估。

為了較好理解高頻雷達散射截面積的特點,利用 Barrick 的理論進行都卜勒頻譜模擬(Lipa and Barrick, 1982;Lipa and Barrick, 1986)。以上方程式是以微擾法為基礎,其微小參數(smallness parameter)為海浪的波

高乘上電磁波之波數,此無因次參數必須足夠小,對於擾動計算不會過 於偏差,因此此計算對於海浪之波高有一定限制,不能過大。上述方程 之一階解對應一階峰值,峰值大小與波浪的方向波譜有關,方向波譜於 一方向上能量越大,乘上 delta function(階梯函數),便會產生一階峰。

透過上述瞭解都卜勒距離譜之原理,如何取得一階峰與二階峰的 範圍來計算是一重要環節(如圖 2.16 所示),其應用困難的地方包括二 階峰能量太弱不易辨識及一階峰頻段與二階峰重疊。根據 Lucy Wyatt 辨識一、二階峰的方法是取一 constant 定值做計算,此計算方式缺乏對 不同觀測環境影響做出相對之應變,因此本計畫使用影像學-集水區分 水嶺劃分法(ImageFOL)來區分一階峰與二階峰,其優點可根據不同觀 測環境修正參數,使具有自調適特性,可適用於各種海象資料,相關說 明與結果會於 4.2 節呈現。



圖 2.16 由都卜勒距離譜一固定距離之一階、二階峰範圍示意圖(Shen, W., Gurgel, K.W., et al., 2012)

高頻雷達用於觀測海表海流已有數十年的應用(Paduan and Washburn, 2013)。根據布拉格散射理論,一階峰值代表了高頻雷達發射電磁波會與相比半波長的波浪作用,稱為布拉格波(Bragg Wave)。本計畫雷達波波長約 10.81 公尺,布拉格波約為 5.4 公尺,意為一階峰能量主要來自此布拉格波產生之回波訊號,都卜勒頻偏值受此布拉格波上的海流移動而影響。在無海表流的情況下,布拉格波的徑向速度(radial velocity)等於理論值,可表示為: $V_P = V_B = \lambda \times \omega_B^T/2 \circ V_P$ 是一階峰的徑向速度, V_B 和 ω_B^T 分別為布拉格波的徑向速度和都卜勒頻率。而海表流的存在,改變了一階波峰的位置,其徑向速度可表示為: $V_P = V_B + V_{curr}$ 為表層流的速度,即海表流的徑向速度。也就是說,海表流的徑向速度將根據一階峰的都卜勒頻移來做計算,並表示為:

$$V_{curr} = \frac{\lambda}{2} (\omega_B - \omega_B^T) = \frac{\lambda}{2} \Delta \omega$$
(2.22)

ω_B為一階峰的實際位置。 V_{curr} < 0和 V_{curr} > 0的情況則描述海 表流沿雷達觀測方向遠離與接近。所以估計海表流的徑向速度,需要確 定一階峰的 DOA 以及都卜勒頻率。

根據 Gurgel(1994)或 Paduan 和 Washburn(2013),表層海流向量的 東西(u)和南北(v)分量可以通過測量徑向速度圖 2.17 估計如下。



圖 2.17 兩個雷達站觀測之徑向海流分量(v_{r1}和v_{r2})幾何形狀及其與東 西向和南北向速度分量 u 和 v 的關係

$$u \cos\theta_1 + v \sin\theta_1 = v_{r1}$$

$$u \cos\theta_2 + v \sin\theta_2 = v_{r2}$$
 (2.23)

υ_{r1}和υ_{r2}是來自兩個雷達站觀測之徑向流速,角度 θ1 和 θ2 是從東向逆時針測量的。當來自兩個站點的υ_r方向變得更加平行時,υ_r雷達測量誤差會通過幾何精度衰減因子(geometric dilution of precision, GDOP)被放大。如兩個站點量測之υ_r近乎平行,不易計算與υ_r方向正交的表面流速分量。如果只有兩個站點的資料,那麼在連接兩個站點的線附近的海流向量,由於其誤差較大,通常不顯示。

如果海面上的一個點位於 n=3 個或更多雷達的覆蓋區域內,那麼 u和v可以從線性最小二乘法解中得到,該方程組以矩陣形式表示為:。

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \cos\theta_n & \sin\theta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{r1} \\ \vdots \\ v_{rn} \end{bmatrix}$$
(2.24)

Or

$$\mathbf{A}.\,a=b\tag{2.25}$$

根據 Paduan 和 Washburn(2013),繪製 u 和 v 的空間解析度取決於 所選擇的網格間距 d_g 和公式(2.24)中額外增加的 n。 d_g 的值通常於最高 發射頻率(~45MHz)是 0.5 公里,中間頻率(25-12MHz)是 2-3 公里,較 低頻率(~5MHz)是 5-7 公里。尤其是測向雷達(direction-finding radars), 經常會產生 v_r 的覆蓋缺口,通過納入距網格點指定距離 d_r 內的 v_r 值來 增加 n,形成公式(2.24)中的矩陣。 d_g 的值通常是 1-5 公里,較高的發 射頻率對應較小的 d_g ;然而,由於角間隔隨著射程的增加而增加,在最 遠射程上可能會使 d_g >5 公里。另外,u & v 估計的區域受到 GDOP 值 的限制,建議小於 3.5(Wyatt 等,2018)。在此計畫中,為了獲得更精細 的流場解析度,我們使用 GDOP 小於 5.0 的 1.1 公里(0.01 度)的網格間 距。 為測量示性波高、週期等波參數,發展了許多由理論、經驗和統計 組成的方法。1977年,Barrick首次提出從都卜勒距離頻譜中獲取示性 波高和平均週期的經驗方法。根據波參數和二階能量總合與一階功率 總合的比值,建立了經驗公式。也有取得示性波高的修訂方法被提出 (Maresca and Georges 1980, Heron, Dexter et al. 1985, Heron and Heron 1998)。最終,Heron 及 Heron (1998)為 Barrick 的公式提供一經驗係數 scaling factor ξ=0.551 和去掉背景雜訊 N,提供誤差最低以估計波高來 呈現 Barrick 經驗公式。

1977年,Barrick 推導出均方根波高 hrms、能量、功率的關係,包含了二階能量總合與一階功率總合的比值,並提出估算 hrms 的經驗公式,由都卜勒頻譜得出(公式 2.26),以及 Heron 及 Heron (1998)提出之公式 2.27 如下:

$$h_{rms} = \frac{1}{k_0} \left(\frac{2 \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(2)}(\omega) / w(\omega/\omega_B) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega} \right)^{1/2}$$
(2.26)

$$h_{rms} = \frac{\xi}{k_0} \left(\frac{2 \int_{S} (\sigma(\omega) - N) / w(\eta) d\omega}{\int_{F} (\sigma(\omega) - N) d\omega} \right)^{1/2}$$
(2.27)

 ω 為都卜勒頻率, $w(\omega/\omega_B)$ 為加權函數圖 2.18, 由各方向標準化耦 合係數的平均值計算出來的(Barrick, 1977), 得到示性波高, 波高的均 方根誤差(RMSE)於 $k_0h_{rms} > 0.3$ 約為 22.7%。而 Barrick 的理論是建立 在討論水與波的非線性流體力學和電磁方程的微擾理論延伸發展來的 (Rice, 1951),這個理論在微小參數具有限的收斂半徑, 其參數包括雷 達波波數(radar spatial wavenumber) k_0 、表面振幅(surface amplitude) h、 $k_0h(Wyatt, 1995)$ 。當微小參數統一時, 理論就會失效(Wyatt, 1995)。 基於飽和條件, 高頻雷達獲得的最大示性波高受 $H_{sat} = 2/k_0$ (Lipa and Nyden 2005, Wyatt, Green et al. 2011)限制。當實測波高大於飽和條件的 情況時, 雷達所估計的波高會被低估。在這種情況下,應選擇較低的雷 達頻率(Lipa and Barrick 1986, Lipa and Nyden 2005, Wyatt, Green et al. 2011)



圖 2.18 布拉格加權函數圖(Barrick, 1977)。

波浪週期計算引用 Barrick(1997)方程式如下:

$$T_m = \frac{2\pi}{\omega_B} \left(\frac{\int_{0,1}^{1,\infty} \sigma^{(2)}(\omega) / w(\eta) d\eta}{\int_{0,1}^{1,\infty} |\nu - 1| \sigma^{(2)}(\omega) / w(\eta) d\eta} \right)$$
(2.28)

上式積分的極限範圍可為 $0 \sim 1$,亦可以是 $1 \sim \infty$ 。 η 為除以布拉 格頻率後的標準化都卜勒頻率。實測資料顯示,平均週期的殘差標准誤 差 (Residual Standard Error,RSE)於 $k_0 H_{rms} > 0.3$ 約為 12.4% (Barrick 1977)。

本計畫中,式(2.27)、(2.28)將應用在單一雷達情況或只有一個都卜 勒頻譜資料的位置。

根據 Barrick (1977)和 Young(1995),可以從加權二階邊帶之一估計 波峰週期非定向頻譜,公式如下所示:

$$T_{p_{(m)}} = \frac{\int_{0,\omega_B}^{\omega_{B,\infty}} \sigma_{w(m)}^{(2)}{}^{n}(\omega)d\omega}{\int_{0,\omega_B}^{\omega_{B,\infty}} |\omega - \omega_B| \sigma_{w(m)}^{(2)}{}^{n}(\omega)d\omega}$$
(2.29)

其中σ_{w(m)}是通過將邊帶 mth 處的加權函數除以 m=1、2、3 和 4 得到的加權二階頻譜,n 是加權指數,建議到 5 (Young 和 Verhagen, 1996)。用於峰值週期計算的二階頻譜的都卜勒頻率範圍與用於平均週 期估計的相同。通常使用都卜勒頻譜的主導側進行反演計算,除非兩個 布拉格峰相差小於 3 dB,則使用兩側的平均值作計算(Alattabi 等, 2019)。

根據布拉格推導,深水區之示性波高估算公式如下:

$$H_s \simeq 4.004 h_{rms} = 4.004 \sqrt{\frac{2}{k_0^2} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(2)}(\omega) / w(\eta) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega}}$$
(2.30)

基於原始波浪理論,示性波高也可從一維波譜中估計出來,公式如下所 示:

$$\int_0^\infty S(f)df = \frac{\alpha(f)}{0.5k_0^2 \int_{-\infty}^\infty \sigma^{(1)}(\omega)d\omega} \int_{-\infty}^\infty \sigma_w^{(2)}(\omega)d\omega \qquad (2.31)$$

其中, α(f)為每個波段頻率的連接係數(Gurgel 等, 2006; Alattabi 等, 2019)。公式(2.31)最後一項可表示如下:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{w}^{(2)}(\omega) d\omega$$
$$= \int_{-\infty}^{-\omega_{B}-\Delta\omega} \sigma_{w}^{(2)}(\omega) d\omega + \int_{-\omega_{B}-\Delta\omega}^{0} \sigma_{w}^{(2)}(\omega) d\omega \qquad (2.32)$$
$$+ \int_{0}^{\omega_{B}-\Delta\omega} \sigma_{w}^{(2)}(\omega) d\omega + \int_{\omega_{B}+\Delta\omega}^{\infty} \sigma_{w}^{(2)}(\omega) d\omega$$

or,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \sigma_w^{(2)}(\omega) d\omega = E_{w(1)}^- + E_{w(2)}^- + E_{w(3)}^+ + E_{w(4)}^+$$
(2.33)

 $E_{w(1)}^{-}, E_{w(2)}^{-}, E_{w(3)}^{+}, E_{w(4)}^{+}$ 是四個二階邊帶的加權能量;減號和加號表示 這些邊帶的位置(Alattabi 等, 2019)。波浪頻率f和雷達都卜勒頻率 ω 之 間的關係可表示為 $f = |\omega - \omega_B|$ 。從公式(2.31)中,可以利用雷達和實 地測量的同步資料來確定連接係數,以計算出估計的雷達修正波浪頻 譜。

在此計畫中所有反演方法都是為了從 HTCN 站的 1 級產品中估算 出示性波高、週期和頻譜。於資料處理過程,波浪頻率範圍在 0.05-0.5Hz。 同時,在我們的程式中,為資料品值管理設置了 10dB 的門檻值,這意 味著只有當二階都卜勒頻譜訊噪比大於給定的門檻值時才能計算波浪 參數,否則以 NaN 值取代無效資料,並且不會有進一步波浪參數之品 管。之後估算結果將與現場資料進行比較,以評估該方法的準確性和雷 達系統的性能。

2.3.3 方向波譜分析方法

方向波譜是描述海洋波浪在頻率方向域的能量分佈,用來描述海 面波在頻率域和方向域的特徵和其能量。為從高頻雷達背向散射訊號 中取得方向性的海面波頻譜,有許多方法如(Wyatt 1990, Howell and Walsh 1993, Hisaki 1996, Hashimoto and Tokuda 1999, Lukijanto, Hashimoto et al. 2011, Shahidi and Gill 2020)。而 Wyatt, Hashimoto & Tokuda, Howell & Walsh 的方法被廣泛用於高頻雷達海回波中取得方向 波譜。

依據 Howell 的理論,將二階分量的雙重積分對海洋波譜進行線性 化,形成一個只有一個積分的新方程,然後用傅立葉級數來描述波譜的 特徵。再利用奇異值分解法(singular value decomposition)求得最小二乘 (least-squares sense)的反演結果。單個雷達站能只得到頻率譜,而在雙 雷達情況下,則可以得到方向波譜。Howell 的反演方法可參考(Howell

2-31

1990, Howell and Walsh 1993) •

Hashimoto 和 Tokuda 的研究中,提到方向波譜E(f, θ),是假設為頻率和方向的函數,可以將其視作方向 $0 \sim 2\pi$ 和頻率 $f_{min} \sim f_{max}$ 的指數分段常函數(exponential piecewise-constant function)。在此基礎上,採用貝氏定理(Bayesian method)解決反演問題。相互比較(intercomparison)結果表明,這種方法在單峰(mono-)和雙峰(bi-model)的方向波譜中都有很好的效果(Hashimoto and Tokuda 1999)。由於時間效率問題,必須將頻率空間(frequency space)粗離散化(coarse discretization)。

在Wyatt的研究中,採用了一種模型擬合的方法(model-fitting),使 用 Pierson-Moskowitz(PM)頻譜和 Longuet-Higgins 方向因數來表方向波 譜,並採用 Chahine-Twomey 鬆弛法(relaxation method)和疊代過程得到 波譜的反演解(Wyatt 1990)。該方法提供了雙雷達情況下方向波譜的良 好結果。此外,Lucy Wyatt 還建立了一個商務軟體,用於從都卜勒頻譜 資料中取得方向波譜。

利用上述三種方法和現場測量結果進行方向波譜估計的比較 (Atanga and Wyatt 1997, Hashimoto, Wyatt et al. 2003)表明, Furies 和 Bayesian 方法都得到良好的結果。

在此研究中,我們將採用參數方法(parametric method),即傳立葉級數(Howell and Walsh, 1993),從雙雷達系統的都卜勒頻譜中估算出方向波譜。波浪方向和波譜將與現場波浪資料進行比較。傅立葉級數法表示如下。

為了從高頻雷達截面的二階波譜中取得方向波譜,公式(2.19)的二 維非線性積分通過偏離布拉格頻率進行標準化,並通過去除變數上的 狄拉克 detal 函數(Dirac detal function)進行簡化(Lipa 和 Barrick, 1982), 二階譜表示如下:

$$\sigma^{(2)}(\omega) = 2^8 \pi^2 k_0^4 \int_0^{\theta_{\rm L}} |\Gamma|^2 J_t \{ S(k_1, \alpha_1) S(k_2, \alpha_2) + S(k_1, -\alpha_1) S(k_2, -\alpha_2) \} k_1^{3/2} d\theta_1$$
(2.34)

$$\begin{split} & \not{\mu} \not{\phi} , \\ & \omega - m_1 \omega_1 - m_2 \omega_2, k_2 \ge k_1 \\ & k_2 = \sqrt{k_1^2 + 4k_1 k_0 \cos\theta_1 + 4k_0^2} \\ & \theta_2 = \arcsin(k_1 \sin\theta_1 / k_2) + \pi \\ & J_t = \left| \frac{\omega_1}{\sqrt{k_1}} + \frac{g d k_1^{3/2} \operatorname{sech}^2(k_1 d)}{\omega_1} + m_1 m_2 \sqrt{k_1} (2k_0 \cos\theta_1 \\ & + k_1) \left(\frac{\omega_2}{k_2^2} + \frac{g d \operatorname{sech}^2(k_2 d)}{\omega_2} \right) \right|^{-1} \\ & \alpha_t = \theta_t + (1 - m_t) \pi/2 \end{split}$$
 \end{split} (2.35)

$$\alpha_1 = \theta_1 \pm (1 - m_1) \pi/2$$

 $\alpha_2 = \theta_2 \pm (1 - m_2) \pi/2$

角度α₁和α₂為散射波向量m₁k₁和m₂k₂的方向, Γ是耦合係數,由公式 (2.21)和(2.22)計算得出,d是測量點的水深。通過劃分對應之一階峰能 量使二階雷達截面的每個都卜勒半部進行標準化,線性化的二階方程 表示如下:

$$\sigma_N^{(2)}(\omega) = 4 \int_0^{\theta_L} \frac{|\Gamma|^2 J_t}{S(2k_0, (1+m_2)\pi/2)} \{S(k_1, \alpha_1)S(k_2, \alpha_2) + S(k_1, -\alpha_1)S(k_2, -\alpha_2)\} k_1^{3/2} d\theta_1$$
(2.36)

公式(2.36)存在由兩個波數譜乘積的非線性問題,Howell 和 Walsh(1993)使用表達式解決公式(2.37)中的非線性問題(Hasselmann, 1971;Lipa和Barrick,1982),其中建議對於接近布拉格頻率的頻率, 第二散射波k2近似等於布拉格波向量,這些波通常位於波浪頻譜的飽 和區域。另外,當 $k_2 \approx -2k_0$ 時, $\theta_2 \approx \pi$,因此頻譜與布拉格波的頻譜關係如下:

$$S(k_2, \alpha_2) \approx S(k_2, -\alpha_2) \approx S(2k_0, (1+m_2)\pi/2) \left(\frac{2k_0}{k_2}\right)^4$$
 (2.37)

將(2.37)代入(2.36),線性化的二階方程表示為:

$$\sigma_N^{(2)}(\omega) = 2^6 k_0^4 \int_0^{\theta_{\rm L}} \frac{|\Gamma|^2 J_t}{k_2^4} \{ S(k_1, \alpha_1) + S(k_1, -\alpha_1) \} k_1^{3/2} d\theta_1 \qquad (2.38)$$

其中, Jt 是 delta 函數變換和限制所需的雅可比(Jacobian)行列式, θ_L 是第一波向的限制。根據 Howell 和 Walsh(1993),公式(2.38)可作為 $1.1\omega_B < |\omega| < 1.4\omega_B 和 0.6\omega_B < |\omega| < 0.9\omega_B$ 時雷達頻譜的良好近似值。

$$\begin{aligned} \theta_{\rm L} &= \pi \text{ when } |\omega| \leq \omega_B \sqrt{2} \end{aligned} (2.39) \\ \text{and} \quad \theta_{\rm L} &= \pi - \cos^{-1} (2/(\omega/\omega_B)^2) \text{ when } |\omega| > \omega_B \sqrt{2} \end{aligned}$$

將波數譜 $S(k, \alpha)$ 轉換為方向波譜 $E(f, \alpha)$ 表示如下:

$$h^{2} = \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} E(f,\theta) df d\theta = \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} TS(k_{1},\theta_{1}) dk_{1} d\theta_{1}$$
(2.40)

將公式(2.40)取代(2.38),表示如下(Howell 和 Walsh, 1993; Hashimoto 和 Tokuda, 1999):

$$\sigma_N^{(2)}(\omega) = \int_0^{\pi} C(\omega, \theta_1) \{ E(f, \alpha_1) + E(f, -\alpha_1) \} d\theta_1$$
(2.41)

其中,

$$C(\omega, \theta_1) = \frac{2^6 k_0^4 |\Gamma|^2 J_t T k_1^{3/2}}{k_2^4}$$
(2.42)

$$T = \frac{g \tanh(k_1 d) + g k_1 d \operatorname{sech}^2(k_1 d)}{4\pi k_1 \sqrt{g k_1 \tanh(k_1 d)}}$$

對於雙雷達系統,第一和第二雷達系統的二階積分方程系統表示為 (Howell 和 Walsh, 1993):

$${}_{1}\sigma_{N}^{(2)}(\omega) = \int_{0}^{\pi} C(\omega,\theta_{1})\{E(f,\phi+\alpha_{1}) + E(f,\phi-\alpha_{1})\}d\theta_{1}$$

$${}_{2}\sigma_{N}^{(2)}(\omega) = \int_{0}^{\pi} C(\omega,\theta_{1})\{E(f,-\phi+\alpha_{1}) + E(f,-\phi-\alpha_{1})\}d\theta_{1}$$
(2.43)

其中2φ是兩個雷達觀測方向之間的角度。

另一方面,方向波譜可以用傅立葉級數表示:

$$E(f,\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \{a_n(f)\cos(n\theta) + b_n(f)\sin(n\theta)\}$$
(2.44)

一維波譜僅代表波能作為頻率函數的分佈,相當於二維波譜 E(f,0)對角度的積分:

$$E(f) = \int_{0}^{2\pi} E(f,\theta) d\theta = 2\pi a_0(f)$$
(2.45)

將公式(2.45)代入(2.44),並將數列擴大到 n=2 得到,雙雷達系統的二階 積分方程呈現為:

$${}_{1}\sigma_{N}^{(2)}(\omega) = 2\sum_{n=0}^{2}\int_{0}^{\pi} C(\omega,\theta_{1})m_{1}^{n}\{a_{n}(f)\cos(n\phi) + b_{n}(f)\sin(n\phi)\}\cos(n\theta_{1})d\theta_{1}$$

$${}_{2}\sigma_{N}^{(2)}(\omega) = 2\sum_{n=0}^{2}\int_{0}^{\pi} C(\omega,\theta_{1})m_{1}^{n}\{a_{n}(f)\cos(n\phi) - b_{n}(f)\sin(n\phi)\}\cos(n\theta_{1})d\theta_{1}$$
(2.46)

將 E(f, θ)的離散化方案應用於(2.46),雙雷達情況下的積分方程可以被 近似為代數方程:

$${}_{1}\sigma_{N}^{(2)}(\omega_{(j=1:J)}) = 2\sum_{j=1}^{J}\sum_{n=0}^{\infty} \{a_{n}(f)\cos(n\phi) + b_{n}(f)\sin(n\phi)\} \int_{\theta_{1}(\omega_{j})} C(\omega,\theta_{1})\cos(n\theta_{1})d\theta_{1}$$

$${}_{2}\sigma_{N}^{(2)}(\omega_{(j=1:J)}) = 2\sum_{j=1}^{J}\sum_{n=0}^{\infty} \{a_{n}(f)\cos(n\phi) - b_{n}(f)\sin(n\phi)\} \int_{\theta_{1}(\omega_{j})} C(\omega,\theta_{1})\cos(n\theta_{1})d\theta_{1}$$

$$(2.47)$$

其中J是當波頻在 0.1ω_B - 0.4ω_B範圍內時都卜勒頻段的總數,將積分 方程(2.47)以離散形式表示,所考慮的所有都卜勒頻率值的代數方程可 以以矩陣形式重寫為:

$$\mathbf{C}x = \sigma \tag{2.48}$$

其中,C是一個核矩陣(kernel matrix), σ 是資料向量對應於標準化的二階雷達截面積,x是一向量解,由J波段波浪頻率的傅立葉係數組成。 C、x和 σ 的細節表示如下:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_J \end{bmatrix} \text{ with } x_j = \begin{bmatrix} a_2 & a_1 & a_0 & b_1 & b_2 \end{bmatrix}$$
(2.49)

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_1 \end{bmatrix} \text{ with } \sigma_i = \begin{bmatrix} 1 \sigma_N^{(2)}(\omega_{i(1-1-1)}) \\ 1 \sigma_N^{(2)}(\omega_{i(1-1)}) \\ 1 \sigma_N^{(2)}(\omega_{i(1-1)}) \\ 1 \sigma_N^{(2)}(\omega_{i(1-1)}) \\ 2 \sigma_N^{(2)}(\omega_{i(1-1)}) \end{bmatrix}$$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} r_1 & -r_2 & r_3 & -r_4 & r_5 \\ s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & s_5 \\ s_1 & -s_2 & s_3 & -s_4 & s_5 \\ r_1 & -r_2 & r_3 & r_4 & -r_5 \\ s_1 & s_2 & s_3 & -s_4 & -s_5 \\ s_1 & -s_2 & s_3 & s_4 & -s_5 \\ r_1 & r_2 & r_3 & -r_4 & -r_5 \end{bmatrix} \text{ with }$$

$$(p_1, q_1) = 2 \int_{\theta_1(i,j,L)} C\cos(2\theta_1) d\theta_1 \quad \text{ for } L = (1, -1)$$

$$(p_2, q_2) = 2 \int_{\theta_1(i,j,L)} Cd\theta_1 \quad \text{ for } L = (1, -1)$$

$$(p_3, q_3) = 2 \int_{\theta_1(i,j,L)} Cd\theta_1 \quad \text{ for } L = (1, -1)$$
and,
$$(r_1, s_1) = (p_1, q_1) \cos(2\phi)$$

$$(r_2, s_2) = (p_2, q_2) \cos(\phi)$$

$$(r_3, s_3) = (p_3, q_3)$$

$$(r_4, s_4) = (p_2, q_2) \sin(\phi)$$

$$(r_5, s_5) = (p_1, q_1) \sin(2\phi)$$

-1 和 1 為 m₁ 和 m₂ 表示二階邊帶的位置。

為了計算公式(2.48)中的向量x,可以用擬反(Pseudoinverse)矩陣方 程的方法解決最小化歐氏向量範數(Euclidean vector norm) $\|\sigma - \mathbf{C}x\|_2^2$ 的線性最小二乘法的問題。

$$x = C^+ \sigma \tag{2.50}$$

其中,矩陣C⁺是C的擬反矩陣,或稱 Moore-Penrose 廣義逆(Moore-Penrose generalized inverse)。 依照奇異值分解 (Singular value decomposition)的方法,核心矩陣可以表示為:

$$\mathbf{C} = U \begin{bmatrix} \Sigma & 0\\ 0 & 0 \end{bmatrix} V \tag{2.51}$$

其中, U和 V 是 m×n 和 n×n 正交矩陣, Σ 是對角矩陣, diag(μ 1, μ 2,..., μ n), μ 1 \geq μ 2 \geq \geq μ n 是C的奇異值。假設只保留了前 r 個奇 異值, μ r+1 = μ r+2 = = μ n = 0, r 等於 Σ 的等級。同時, 在計算擬反 矩陣C⁺之前,所有小奇異值都被設置為零, C⁺可以被認定為:

$$\boldsymbol{C}^{+} = \boldsymbol{V} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}^{-1} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \boldsymbol{U}^{T}$$
(2.52)

參數 r 應該接近於矩陣C的等級值,從公式(2.50)中計算出傳立葉 級數的係數,為了完成這個過程,在做逆向問題之前必須仔細選擇適當 的 r 值。在得到傳立葉級數係數的解決方案後,方向波譜就可產生。同 時,通過將這些傳立葉係數擬合到心形模型(cardioid model)中,可以確 定平均波向和方向性擴散(Howell 和 Walsh, 1993)。這項技術在模擬和 實際的雷達資料中都得到了實現,估算的結果於第四章描述。

2.3.4 風場分析方法

根據(Shen, Gurgel et al. 2012)),從高頻雷達都卜勒頻譜估計表層風 速是一重要挑戰,高頻雷達耦合(couple)的布拉格共振波浪(resonant ocean waves)比微波長很多(約 5-12 公尺),因此需要更長的時間來回應 表層風況變化。為了從高頻雷達回波中取得表層風速資訊,提出了許多 利用一階頻譜(Stewart and Barnum 1975, Shen, Gurgel et al. 2012, Zhou, Wang et al. 2017)和利用二階頻譜(Maresca and Georges 1980, Dexter and Theodoridis 1982, Green, Gill et al. 2009)估計風速的方法。從一階峰值 估計風速,偏差估計較小,但風速範圍有限(Shen, Gurgel et al. 2012); 而從二階峰估計的風速範圍擴大到風況,但其不確定性變大,根據 Wei Shen(2011),區分高風速與中低風速的門檻值設定為10m/s。因此,從 高頻雷達回波估計風速值,在中低風速時應採用一階峰值反演風速,而 在高風速時可應用現有的二階方法。

為了從一階頻譜估計風速,用擬合的方式估計函數的經驗參數,這 些參數代表了一階功率和當地風速之間的關係。之後,利用估計的經驗 參數於計算另一地點的風速。為了從二階頻譜中取得風速,採用了 Dexter 和 Theodorides 的方法(Dexter and Theodoridis 1982),如:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.26 \tanh\left[\left(\frac{T_p}{U_{10}}\right)^{3/2} \cdot \frac{(3.5g)^2}{10^2}\right]$$
(2.53)

g 為重力加速度,Hs 為示性波高,由都卜勒頻譜用 Barrick 的經驗 公式估算(Barrick,1977),TP 為尖峰週期,由平均週期 Tm01 得出,Tm01 也由 Barrick 的經驗公式估算(Barrick,1977)。根據 Dexter 和 Theodorides 的分析,在 JONSWAP 實驗條件下(Hasselmann et al., 1973),TP 與 Tm01 的關係為: $f_{m01} \simeq 1.25f_p$ 。應用初始猜測 U10 重複(疊代)計算來求解式 (2.53)。

在都卜勒距離譜的正負值都有位於布拉格頻率之一階峰值,來自 於具有共振波長的波,並描述該波正在向雷達靠近或遠離,稱為布拉格 波(Barrick,1972)。圖 2.19 是雷達波束關係中波向分佈的一個例子,彩 色的心形曲線表示與各種擴散寬(spreading widths)有關的方向擴散,以 Longuet-Higgins 參數 s 來量化。OP1和 OP2表示與布拉格波遠離與接近 雷達點有關的兩個一階峰值的強度。OP1和 OP2之間的比率與主波方向 有關,也與方向擴散寬度有關。隨著方向擴散的縮小(s 增加),這個比 率對雜訊變得敏感。



圖 2.19 雷達觀測方向相關之波向分佈圖。

在高頻波段, 布拉格波的長度位於短波長範圍內, 在風場的影響下 迅速反應方向變化(Long 和 Trizna, 1973)。這意味著布拉格波的方向可 以被認為是與當地風同向的, 對兩個一階峰的能量比很敏感, 如下公式 所示:

$$r = \left(\frac{\sigma^{(1)}(+\omega_B)}{\sigma^{(1)}(-\omega_B)}\right)$$
(2.54)

其中, $\sigma^{(1)}(+\omega_B)$ 和 $\sigma^{(1)}(-\omega_B)$ 分别是接近和遠離的布拉格峰能量的強度,由以下公式表示:

$$\sigma^{(1)}(-\omega_B) = 2^6 \pi k_0^4 S(2k_0) G(\theta_N - \alpha_w) \sigma^{(1)}(+\omega_B) = 2^6 \pi k_0^4 S(-2k_0) G(\pi + \theta_N - \alpha_w)$$
(2.55)

其中, θ_N 是雷達觀測方向, α_w 是布拉格波的方向,G(.)是風浪的擴散 函數。將公式(2.55)替換成(2.54),r值確認為(Stewart 和 Barnum, 1975):

$$r = \left(\frac{G(\pi + \theta_N - \alpha_w)}{G(0 + \theta_N - \alpha_w)}\right)$$
(2.56)

公式(2.56)描述擴散函數公式下,兩個一階峰的能量比與風向之間的關係。另一方面,一個常見的方向性因素模型,稱為心形模型(cardioid model),表示為(Longuet-Higgins 等, 1963:

$$G(\theta_N - \alpha_w) = A\cos^{2s}\left(\frac{\theta_N - \alpha_w}{2}\right)$$
(2.57)

其中A是標準化常數,將公式(2.57)替換成(2.56),r表示如下:

$$r = \tan^{2s} \left(\frac{|\theta_N - \alpha_w|}{2} \right) \tag{2.58}$$

風向表示如下:

$$\alpha_{w} = \theta_{N} \pm 2\tan^{-1}(r^{1/2s})$$
(2.59)

這裡土增益表示演算風向之混淆項(ambiguity)。

理論上當海浪與雷達波束平行傳播時,r的值可以是無限的,然而 實際是有限的,當r的絕對值超過25dB時,波向被認為是與雷達波束 的方向平行(Huang等,2004)。簡化公式(2.59),擴散因子的值被假設為 常數(Fernandez等,1997;Essen等,1999;Paduan等,1999;Heron和 Prytz,2002)。根據Longuet-Higgins等(1963)的建議,測試了改變擴散 因子對波浪方向的影響(Huang等,201)。敏感性測試的結果顯示,當 r=±25dB,s=2時,估計波向的最大誤差可以達到約20°。並參考Heron 和 Prytz(2002)Huang等(2004)反演風向的方法。通常是用雙雷達情況下 的資料來獲取同一地區的海況參數,通過使用各種方法,如非線性解釋 法(nonlinear-interpretation method)求解公式(2.59),以估算出波浪方向和 擴散因子。

另一方面,為了反演單個雷達站的風向,可以假設高頻雷達系統在 27.75MHz 下工作時,與電磁波相互作用的布拉格波的擴散參數等於 2(Heron 和 Prytz, 2002; Huang 等, 2004)。使用 Huang 等提出的簡單 方法從三個相鄰的方位估計風向(Huang 等, 2004),這些研究假設在一 小片海域內的穩定海況下,表面風向在空間上是均勻或緩慢變化的,這 意味著在間隔較近的電磁波散射點(radio scatter points)之間風向是連續 的,相鄰單元的實際風向之差的總和應該是零或接近零。如圖 2.20 所 示,A、B、C和D單元處於四個相鄰的雷達波束方向。根據公式(2.59), 每個單元有兩個可能的風向。A 單元的風向為φ_{A1}和φ_{A2}, B和C單元 的風向以此類推,B 單元的風向與相鄰單元的風向之差的總合定義如 下:



圖 2.20 消除方向性混淆之示意圖

Δφ_{ijk}最小的φ_{Bi}值被視為 B 單元的正確風向,以這種方式 C 單元 的風向也可以通過對 B 和 D 單元使用公式(2.60)來找到,以此類推。這 減少了因錯誤推斷 B 單元的真實風向而產生的累積誤差的可能性。這 種技術從最近的單元開始,依次應用於整個雷達觀測範圍。

在此計畫我們應用這兩種方法來估計雙雷達系統觀測範圍之風向, 估算結果與現場資料進行了比較,現場資料是由臺中港燈塔頂部的風 速儀量測,比較結果將在第四章呈現。

第三章 雷達資料品質評估

經過第二章說明高頻陣列雷達背景現況、觀測資料-都卜勒距離譜 及海氣象參數分析方法後,本章節說明雷達資料演算過程中所需之資 料品質管理程序。高頻雷達訊號對無線電背景雜訊干擾敏感(Kirincich, 2017),須安裝在腹地大且平坦、背景雜訊低、遠離電力系統及人口密 集的地區,要找到一個合適的安裝地點並不容易。此外,由於無線電頻 率、無線電通信、電離層效應等干擾,對都卜勒距離譜的品質、海流、 波浪、風參數估計都有影響。因此,高頻雷達的品質評估是非常重要的 一環。

雷達資料演算的過程依序會面臨需要品管之步驟,同時讓管理者 瞭解資料處理後可能造成的情況。資料處理過程中,將利用資料品質評 估平臺(data quality platform)評估 1~3 級產品的資料品質。首先於建站 時,必須先確認硬體規格與環境噪音是否符合架站之觀測條件,並於硬 體系統加入一些降低與濾除雜訊之過濾器,另外在架設過程中,確保雷 達收發天線之增益值與調整,以上設備與量測工作可視為高頻雷達品 管控制的第0級產品(雷達原始資料)品管。

第 1 級產品品管是由接收到雷達訊號至都卜勒距離譜的產出過程 之資料品質管理。其資料品質取決於方法上的誤差。亦將計算一階及二 階部分的訊噪比 (SNR),用於呈現頻譜資料的品質,此外,為了減少 都卜勒距離譜演算海氣象參數的不確定性,還需要從海面回波資料中 識別和刪除船舶回波。以下 3.1 節第 1 級產品品管以一階及二階訊噪比 品管及船舶雜訊品管分別說明。

第 2 級產品品管是由都卜勒距離譜至海氣象參數的演算品管。在 第 2 級產品包括徑向速度、頻譜資料及向量化(polar grid)海表資訊產 品(海流、波浪、風向),必須先根據訊噪比良好之都卜勒距離譜計算出 海洋參數 (Barrick 2005a; de Paolo 和 Terrill 2007; Wyatt 2005)。海流 估計品質與一階峰值特徵相關,而波浪參數的品質則與兩者頻譜分量 (spectra components)相關(Barrick, 1977; Heron and Heron, 1998),計算海 氣象參數過程參考一些品管方法移除海流徑向速度、示性波高、週期、 風速等的離群值(outlier values) (Kirincich 2017; Lipa and Nyden 2005; Wyatt 1995a)。

第3級產品為網格化(mesh grid)海表資訊產品,是由第2級產品整合而來,因此3級產品品質受2級品質和積分方法的誤差所影響。

此章節會聚焦於主要品管重點:第1~3級產品品管,參考前人文 獻、了解雷達訊噪比的建議值和評估量測海洋參數之能力範圍,建立資 料品質評估平臺並進行測試,再利用經驗門檻值控管,以提升雷達資料 演算海氣象參數之資料品質。

3.1 第1級產品品管

3.1.1 都卜勒頻譜訊噪比品管

1. 文獻回顧



圖 3.1 都卜勒頻譜示意圖。

海面上的海流、波浪和風的參數演算方法是根據高頻雷達資料之 波譜和都卜勒頻譜之間的關係,具有足夠大的訊噪比的頻譜分量才能 得到海洋表面測量的準確結果,如圖 3.1 所示,紅點是一階峰值,綠線 表示一階區域,藍線表示二階部分,黑色虛線和實線代表背景雜訊和平 均功率譜的值。因此,首先查閱文獻資料了解所需之都卜勒頻譜訊噪比 之品管要求。

根據 Barrick 研究(Barrick 2005a),從雷達回波中提取表面海流時, 一階峰的訊噪比必須超過 13dB。Tony De Paolo & Eric Terrill (de Paolo and Terrill 2007)提到,發現多重訊號演算法(Multiple Signal Classification, MUSIC)的技能指標(skill metrics)在訊噪比為 11-12dB 和更低的時候會 下降。此外,在(Li et al. 2017; Tian et al. 2020; Tian et al. 2017)中使用 了 10dB 的值。在另一個方面,Kirincich(Kirincich 2017)在使用 MUSIC 演算法(Schmidt 1986)後,使用平均都卜勒頻譜 5dB 來尋找一階峰值 的位置。對於波束成形演算法從陣列高頻雷達系統的背向散射資料中 提取都卜勒距離譜,Wang 和 Gill (Wang and Gill 2016)建議一階峰的 最小訊噪比值為 10dB。如果一階峰值訊噪比高於 15dB,那麼在 Bartlett 波束成形情況下的誤差似乎是隨機的,並與訊噪比或雷達頻率關係不 明顯。因此本研究先以一階訊噪比 10dB 的值作為識別和分離一階頻譜 成分與無線電背景雜訊的基本門檻值。

其次,為了從高頻雷達都卜勒頻譜中估計波參數,需要評估二階訊 噪比的門檻值。從文獻回顧中,Wyatt 提到,在都卜勒頻譜的二階部分, 波的測量需要至少 10dB 的訊噪比 (Wyatt, 2005),而當二階的訊噪比 大於 15dB 時,則可計算方向波譜 (Wyatt, 2000);另外,當二階分量的 訊噪比大於 35dB 時,波參數的估計結果也很好 (Wyatt 等, 2011)。在 Ramos (2009)建議二階訊噪比至少需要 11dB。Alattabi 等(2019)、 Chen(2013)、Lopez(2016)使用了 10dB 的值,並建議使用 5dB 作為預定 門檻值來判斷輸出資料是否有效 (Cai, 2019)。因此本研究以二階訊噪 比 10dB 作為一個參考值,根據其訊噪比評估二階都卜勒頻譜的品質。

為了估計布拉格波向以及風向,許多文獻研究了兩個一階峰的比

率和雷達對波角度之間的關係(Huang 等,2004;Huang 等,2012;Long 和 Trizna,1973),表示兩個一階峰之間的比率直接影響到風向估計的 準確性。如果布拉格波的擴散函數(spreading function)被假定為心形模 型(cardioid model)(Lipa 和 Barrick 1986a;Long 和 Trizna 1973),上述 比率在0到無窮大的範圍內;Huang 等(2012)的研究指出,這個比率在 0到 25dB 的範圍內;Kirincich (2016)Sech 模型適合描述風場驅動下 的短波傳播。這意味著都卜勒頻譜資料中,存在著上述比率的極限範圍。

基於文獻回顧的資訊,我們將提出評估都卜勒頻譜訊噪比的初始 門檻值。詳細情況於下一節介紹。

2. 初始品管參數

為了建立評估都卜勒頻譜訊噪比的品質控制平臺,每個訊噪比的 品值範圍分為3個不同的等級:好、中、差。其中,都卜勒頻譜訊噪比 的良好水準意味著後續對於海流、海浪和風的演算結果更具信心。對於 中等水準,海洋參數的計算仍然具有中等程度的信心。對於較差的水準, 表明可靠性確實很低,不應該計算海洋參數。根據文獻回顧,表 3-1 表 示評估一階峰訊噪比門檻值,二階峰訊噪比的門檻值於表 3-2 中所示。

Features	Value (dB)	Evaluation
SNR of the first-order peak, SNR ⁽¹⁾	< 10	Poor
	10 - 15	Intermediate
	> 15	Good
The absolute value of two first-order peak ratio, r LR	> 20	Poor
	10 - 20	Intermediate
	< 10	Good

表 3-1 一階峰訊噪比門檻值

Features	Value (dB)	Evaluation
SNR of the second-order peak, SNR ^(p2)	< 7	Poor
	7 - 15	Intermediate
	> 15	Good
SNR of averaged second- order component, SNR ^(Av2)	< 5	Poor
	5 - 10	Intermediate
	> 10	Good

表 3-2 二階峰訊噪比門檻值

船舶回波在都卜勒頻譜上的存在是不可避免的(圖 3.2)。對於小型 海洋交通工具,如漁船,船舶回波通常可以忽略不計。然而,在大型港 口,如臺中港,輪船或長度達數百公尺,寬度達數十公尺的油輪,其船 舶回波是不可忽略的,即使它們離港口還有 30 公里。因此,船舶回波 很容易混入二階頻譜分量,影響波場的估算。根據 Wyatt 等(2011)的討 論,二階峰通常比一階峰低 20-30dB,但如果存在能量大於一階峰能量 的二階分量,那可能是由船舶回波或其他主動干擾源所引起的異常值。 由於船舶的運動,船舶回波在許多不同的都卜勒頻率下混入二階分量 (圖 3.3)。為了評估二階峰是否包含船舶回波或干擾,參考 Wyatt 等 (2011)與本研究長期資料之經驗建立,我們根據以下兩個論據判斷:(1) 船舶回波將為二階頻譜分量提供能量,該能量可能等於或高於布拉格 峰的能量。(2)船舶回波使一階峰值周圍的二階邊帶的平均能量大於一 階頻譜本身的平均能量。根據以上觀點,我們提出兩個額外的門檻值來 評估二階分量是否有其他干擾和船舶回波,這些門檻值顯示在表 3-3 中。 假設某個二階分量不符合表 3-3 的標準,將被排除在計算過程之外。假 設我們能識別並消除所有船舶回波和所有源雜訊,基本上就不需使用 表 3-3 中的門檻值。



圖 3.2 都卜勒頻譜與船舶回波(紅圈)示意圖



圖 3.3 都卜勒距離譜與船舶回波(黑圈)示意圖
Features	Value	Evaluation
The percentage of 2^{nd} -order peaks which are greater than the 1^{st} -order peaks, r_{p21}	> 10 %	Poor
	1.0 – 10 %	Intermediate
	< 1.0 %	Good
The ratio between average 1 st -order over averaged 2 nd - order, r _{Av12}	< 5 dB	Poor
	5 – 10 dB	Intermediate
	> 10 dB	Good

表 3-3 船舶雜訊之品管門檻值

基於表 3-1~3-3 的標準,我們提出了在計算波浪參數之前評估都卜 勒頻譜品質的方法。因此,波浪參數的標準由以下四個單獨的指標組合 而成。

$$\begin{bmatrix} SNR^{(1)} & SNR^{(Av2)} & r_{p21} & r_{Av12} \end{bmatrix}^{T}$$

對上述向量有三項品管標準,如下所示:

- 如果上述四個因子中的一個被評價為差等,都卜勒頻譜將被評 價為差等,該波參數將被認為是無效的。
- 如果有兩個以上的因子處於良好水準,都卜勒頻譜將被評價為 良好水準。並且,波浪參數的計算具有較高的可靠性。
- 其餘情況下,都卜勒頻譜被定為中等水準,依然會用來計算波 浪參數,但可靠性將被標註為中等水準。

若同時滿足第1、2項,波參數依然視為無效值。綜上所述,我們 提出了高頻雷達1級產品的品質控制平臺的門檻值,這個品質控制平 臺的初始值有依據我們自己處理臺中港雷達北站大約兩年的雷達資料 的經驗來設定。然而當我們擁有足夠的雙雷達系統的資料、更多的現場 實驗和不同地點的實測資料時,這些資料將用來評估高頻雷達系統的 性能和驗證高頻雷達2、3級產品,上述品管的門檻值可能需要再重新

審視及調整。

3. 品管測試結果





(b)





(c)

(d)

圖 3.4 使用與不使用品質評估一階訊噪比和徑向速度差異比較

為了確認品質評估平臺的效果,圖 3.4 呈現一階訊噪比和徑向速度 圖,(a)和(c)顯示一階訊噪比和徑向速度的全部範圍,(b)和(d) 顯示了表 3-1 中品質評估平臺的一階訊噪比和徑向速度圖。從圖中可 以看出,依垂直海岸線方向由雷達位置的徑向速度擴展到離雷達站 30 公里以上,可信度很高。然而南北兩側則呈現低訊噪比,兩邊的徑向速 度的可信範圍很短,由此可知確實存在副波瓣效應(Sidelobe effect)的影響。



圖 3.5 平均二階訊噪比和示性波高圖。

圖 3.5 顯示了平均二階訊噪比和示性波高的圖,(a)顯示經由品質 評估平臺的平均二階訊噪比品管結果,(b)經平均二階訊噪比品管後之 雷達推導示性波高示例圖。可以看出品管後波浪參數的範圍比海流參 數的範圍更短,這是由於二階分量的能量受雙反射效應而明顯減少所 致。

3.1.2 船舶雜訊移除品管

1. 文獻回顧

如上一節提到船舶回波會增加二階頻譜的能量,並降低雷達推導 出的波浪參數的可靠性。圖 3.6 清楚地表明船舶回波對波高估算結果的 影響。在一些文獻中,都卜勒頻譜會被預設為是乾淨無其他船舶訊號干 擾的,不會提出消除船舶回波的方法,然而這是處理高頻雷達資料的商





(a)

(b)

圖 3.6 由船舶回波所引起之不準確示性波高之差異比較(黑圈為船舶 訊號影響)。(a)為二階峰值訊噪比,(b)雷達演算之示性波高圖。

高頻雷達已長期被應用於沿海地區以及港口附近的海洋監測,與 船舶自動辨識系統(Automatic Identification System, AIS)並行,高頻雷達 和微波雷達系統可以讓管理者主動監測海上交通工具,如漁船、油輪和 集裝箱船等,開發了許多方法來從高頻雷達都卜勒頻譜中識別船舶回 波,如回歸法(regression methods)(Dzvonkovskaya 等,2008; Dzvonkovskaya和Rohling,2006)、小波變換分解法(wavelet transform decomposes)(Jangal 等,2008),二維移動平均法(2D-moving average) (Chuang 等,2015)以及平滑技術。

對於回歸法,通常使用多項式曲線來描述能譜相對於距離或都卜 勒頻率的變化,並加入一個調適性門檻值(Dzvonkovskaya 和 Rohling 2006)來識別局部峰值,這些峰值可能是船舶回波或其他干擾。固定錯 誤警報率過濾法(Constant False-Alarm-Rate, CFAR)方法被用來測試不 同的訊號之統計量,並與不同門檻值進行比較(Dzvonkovskaya 等,2008; Roarty, 2010)。CFAR 門檻值的計算值通常是基於 Neyman-Pearson 準 則,有一個固定的誤報概率和一個最大的目標探測概率 (Dzvonkovskaya和Rohling,2006)。這種方法需要對每個都卜勒分格 (bin)和範圍單元(range cell)進行回歸,導致耗時的問題。小波變換分解 法使用小波係數來分離波浪和目標物 (Jangal 等,2008),此方法需對 資料進行多次分解和重建後將船舶回波將從海回波中被過濾掉,然而 此方法很複雜,其結果取決於母小波特徵。二維移動平均法使用平滑窗 (window)於多幅交叉頻譜使用二維移動平均,再將交叉頻譜扣除二維 移動平均過之頻譜,求得殘餘訊號(Residual signal),再使用不同倍數的 標準偏差值加上平均值做為門檻加以過濾,通常是標準差的2或3倍, 如果任何殘餘值大於門檻值可能是船舶回聲,此方法計算速度很快。然 而,平滑窗的大小需要根據偏度(skewness)和峰度(kurtosis)統計來定義 (Chuang 等,2015)。相同地,其他的平滑技術在使用前也需要定義一 個給定之平滑窗。於本研究應用三種技術,即回歸技術、二維移動平均 技術和平滑技術來識別和去除船舶回波。

2. 船舶雜訊移除方法

(1)回歸法:

為了從高頻雷達的海回波中探測船舶的位置,Dzvonkovskaya 和 WERA 團隊提出了一種調適性的船舶探測方法(Dzvonkovskaya 和 Rohling 2006;Gurgel 和 Schlick 2010)。該方法可以由一階背向散射造 成的強干擾環境中探測到船舶,並控制誤報概率。在這種方法中,基於 傳統的曲線回歸分析(Kendall, 1967)給出了一個在距離和都卜勒方面 的調適性門檻值。回歸曲線為二次多項式或三次多項式函數 (Dzvonkovskaya 和 Rohling 2006),在文獻中,作者用 95%的置信度 來尋找範圍單元和都卜勒分格的峰值,T = max(Ta,R,Ta,D) (Dzvonkovskaya 等,2008;Dzvonkovskaya 和 Rohling 2006),如果任何 訊號高於門檻值就可以被認為是峰值的可能。CFAR 演算法被應用於檢 查可能目標在範圍、都卜勒頻率和方位角方向的正確性。然而,於本研 究中沒有必要應用 CFAR,因為我們不需要確認船隻的正確位置,只需 要去除船隻回波及其相關能量。 本研究中我們只做範圍單元的回歸,以減少耗時的問題。對於每個 特定都卜勒頻率的頻譜曲線,將使用3個不同的2到4階的曲線回歸 來尋找最適合的回歸模型。任何殘餘值,也就是真實頻譜功率和估計值 之間的差異,如果超出90%的置信度以及大於模型曲線約5dB就可被 找到。我們試圖從都卜勒距離譜圖中刪除所有船舶回波和定義峰值周 圍的能量。



圖 3.7 沿著(a)都卜勒分格和(b)範圍單元的功率譜與回歸曲線 (Dzvonkovskaya 和 Rohling, 2007)。

(2)二維移動平均法:

Chuang 等(2015)提出了使用二維移動平均法來偵測船舶回波的 調適性偵測法(Adaptive Detection method),該方法的窗大小可以根據峰 度和偏度估計結果的敏感性測試來選擇。圖 3.8 為調適性偵測法之資料 處理流程,據此得到偵測區域內時間序列之殘餘訊號。根據標準差的倍 數(1.5σ、2σ、2.5σ和 3σ)選擇一個調整值作為門檻值。



圖 3.8 船舶探测和海洋表面流的資料處理流程 (Chuang 等, 2015)。

此研究使用二維移動平均濾波器作為尋找船舶回波的工具。為了 選擇窗的大小做了統計,範圍從3到15,都卜勒分格從5到50,這些 窗用於評估相應殘餘序列之長條圖的峰度和偏度。根據統計結果,選擇 10×40的窗作為二維移動平均濾波器。而2o值被用作調適性門檻值, 用於檢測不同方位角方向的都卜勒距離譜圖中的船舶回波。最後,如果 任何峰值的殘餘值高於門檻值,船舶回波和相關能量將被刪除。 作為選擇二維移動平均濾波的視窗大小為例,以下說明選擇 10x40 的視窗大小原因。首先,如下圖左上角顯示了含有船訊號之都卜勒距離 譜,而右上角圖顯示了視窗大小為 10x40 的二維移動平均的結果。我 們使用不同的視窗 (m=2 到 20, n=4 到 100) 來測試窗口的大小,其 中,m和n分別代表用於平滑之距離和都卜勒頻率之值。然後,計算 偏度和峰度值,並顯示於下側兩圖。



圖 3.9 二維移動平均法之視窗分析圖

可以看出,當 m>10 時,偏度的值幾乎與 n 的值相同。另外,當 n>40 時,峰度值與 m 的值變化不大。在上圖中可以看到固定的 m(m=10) 和不同的 n (n=2-100) 的偏度和峰度值。



圖 3.10 不同大小的二維移動平均線對常態分佈偏差之偏度和峰度的 變化趨勢

上圖中代表不同大小的二維移動平均線對常態分佈偏差之偏度和 峰度的變化趨勢,我們可以選擇合適的視窗大小來檢測和消除船舶回 波。然而有限的例子下,需要在未來進行更多的驗證。

對於選擇 2o 值的門檻值的原因為,利用此門檻值在估算波浪參數 之前,從都卜勒距離譜中去除所有船舶回波和其周圍相關的能量。 (3) 平滑法:

許多平滑技術被應用於處理海洋和船舶回波,其中 Kirincich(2017) 研究提到一個適當尺度的平滑盤(smoothing disk)可以用來平滑海面回 波並突顯訊號之微小變化。若小區域之變化量大於門檻值,可應用分水 嶺轉換(watershed transform)找尋目標物之範圍。此平滑法過濾過程加入 速度尺度對平滑長度尺度(smoothing length scale)的影響,在此研究中使 用了 20 公分/秒的速度尺度(velocity scale),由於都卜勒距離譜資料的 都卜勒頻率解析度為 0.0022 赫茲(2048 個都卜勒分格中的 4.6 赫茲), 平滑長度尺度的值為 16,應用這種平滑技術來識別每個都卜勒分格的 船舶回波。如圖 3.11 都卜勒距離譜使用平滑法之範例, (a)顯示的是 HTCN 站在方位 296°的都卜勒距離譜;(b)表示都卜勒分格 1033 處之 頻譜功率。黑色實線和黑色菱形代表了每個範圍單元的頻譜功率,紅色 的線表示使用平滑技術的平滑曲線。從圖中使用此平滑法的例子可以 看到,與參考曲線相比,代表船舶的回波值能明顯的找到。



圖 3.11 都卜勒距離譜使用平滑法之範例。

本研究我們測試上述三種方法:回歸法、二維移動平均法、平滑法, 以瞭解這些方法的優勢和局限性,再將最佳方法使用到海氣象參數演 算流程中。

3. 船舶品管流程



圖 3.12 移除船舶雜訊流程圖

圖 3.12 為移除船舶雜訊之流程圖,流程根據以下四個步驟:

第1步:計算給定的都卜勒頻譜功率的參考值(對於每個都卜勒 分格或整個都卜勒距離譜圖),並確定都卜勒頻譜和參考值之間的殘餘 值。

第2步:比較殘餘值和給定門檻值,找到船舶回波的潛在峰值,並 刪除所有潛在的峰值及其峰值周圍區域。

第3步:恢復一階區域的原始頻譜功率。

第4步:對都卜勒距離譜圖上的空白區域進行插值,並保存新的 都卜勒距離譜。 4. 品管測試結果

為了檢查上述三種方法的效果,本研究使用一消除船舶回波的例 子,結果顯示在圖 3.13。圖 3.13(a)為原始的都卜勒距離譜,(b)、 (c)、(d)分別顯示了使用不同方法去除船舶回波和周圍區域後的都卜 勒距離譜。看起來這三種方法都能很好地去除船舶回波,然而小部分海 面回波也被移除,但狀況並不嚴重。回歸和平滑技術的主要問題是耗費 時間,其中二維移動平均技術可以克服這個缺點。據此我們將二維移動 平均法作為預設之消除船舶回波的方法。



圖 3.13 使用船舶雜訊移除方法測試圖。(a)為原始的都卜勒距離 譜,(b)、(c)、(d)分別顯示了使用不同方法去除船舶回波和周圍區 域後的都卜勒距離譜。

根據圖 3.12 的移除船舶雜訊流程圖,我們逐步從都卜勒距離譜中 去除船舶回波。結果顯示在圖 3.14 和 3.15 中。



圖 3.14 移除船舶回波之都卜勒距離譜的結果。(a)原始都卜勒距離 譜,(b)、(c)和(d)顯示消除船舶回波的 2~4 步驟。此都卜勒距離譜為 HTCN 站 296°方位。



圖 3.15 移除船舶回波之都卜勒距離譜的另一範例結果。(a)原始都卜 勒距離譜,(b)、(c)和(d)顯示消除船舶回波的 2~4 步驟。此都卜勒距 離譜為 HTCN 站 326°方位。

上述三種方法:回歸法、二維移動平均法、平滑法都可以用來去除 都卜勒距離譜圖中的船舶回波。本研究我們建議將二維移動平均技術 作為預設方法,以減少耗時問題。

3.2 第2級產品品管

3.2.1 徑向流速品管

根據 Kirincich(2017)、Mantovani 等(2020)研究,用高頻雷達技術測 量海洋表面海流之最大速度取決於雷達的電磁波頻率,25.5MHz 高頻 雷達系統計算海流徑向速度的最大門檻值設定為 100 公分/秒。此門檻 值亦參考美國 California 的 Coastal Observing Research and Development Center(CORDC)手冊 HFRNet RTV Processing & Q.C.與 Lipa, B. and D. Barrick (1983),門檻值需經由 3 個月以上之經驗校正,而本研究之門檻 值有經 2 年左右之觀測資料做確認而設定,因此於本研究使用 100 公 分/秒作為門檻值來限制一階峰值的區域,並過濾掉徑向速度的異常值。 此外,徑向速度的品質評估是根據一階都卜勒頻譜的訊噪比來表示的, 其訊噪比 > 5 dB。

從高頻雷達資料的都卜勒頻譜中演算海洋表面流的最大徑向速度 不應該有理論限制,根據 NOAA 的 the Manual for Real-Time Quality Control of High Frequency Radar Surface Current Data,他們提到「美國 西海岸海域的最大總速度門檻值為1公尺/秒,東岸海域為3公尺/秒。 該門檻值必須因地區而異。例如,灣流的存在決定了東海岸的門檻值更 高」(p-14)。這一討論在 QA/QC Manual for Coastal HF Radar - Indian Coastal Ocean Radar Network (ICORN)中也有提及。這意味著最大徑向 速度的門檻值必須根據研究區的實際海流速度來設置,而這一點在文 獻報告中沒有明確表述。此外研究發現,AWAC 所記錄的表層洋流的 最大速度不超過 120 公分/秒,而在研究區域,99%以上的資料都小於 100 公分/秒。 參照 Kirincich (2017)、Mantovani 等 (2020),我們決定使用 100 公分/秒作為最大徑向速度的公分值,並限制一階峰值的面積。通過波 束合成或 MUSIC 演算法得到的每個徑向速度都要與門檻值進行比較, 如果超過最大徑向速度,就會被刪除。同時,在計算過程中,將估計的 當前速度與門檻值進行比較,以去除異常值。

另外本研究使用波束合成演算法和 MUSIC 演算法的兩種方法來 估算徑向流速。在 MUSIC 方法中有三個主要的設置參數:(1)使用天 線之理想場型;(2)計算上最多使用 4 個解;(3) MUSIC DOA 的峰值 門檻值為 0.5,被用來識別徑向速度的方向。第四章將比較這兩種方法 的估計結果以評估估計徑向速度的不確定性。

Features	Value
Maximum radial velocity	100 (cm/s)
Minimum 1st-SNR	5 (dB)
The peak threshold for the MUSIC DOA peak finder	0.5

表 3-4 徑向流速品管門檻值彙整表

3.2.2 波浪參數品管

示性波高、平均週期、尖峰週期和波譜在內的波參數是由一階和二 階波譜計算出來的,雷達推導出的波浪參數的品質評估受到多都卜勒 頻譜成分的訊噪比影響,如果都卜勒頻譜的訊噪比超出了品質控制平 臺的範圍,那麼波參數的值必須濾除。 Barrick 的理論是基於水和波的非線性流體力學和電磁學方程的微 擾理論展開的(Rice, 1951),這個理論之微小參數有一有限的收斂半徑, 參數之一為雷達波數 k0 和表面振幅h 的乘積,即 k0h (Wyatt, 1995b), 當微小參數為一的時候,理論就變得無效(Wyatt, 1995b)。基於此飽和限 制,高頻雷達技術獲得的最大有效波高受到 Hsat=2/k0 的限制(Lipa 和 Nyden 2005; Wyatt 等, 2011)。如果實測波高大於飽和值,波高的估計 值就會被低估,建議使用較低的雷達頻率(Lipa 和 Nyden 2005; Lipa 和 Barrick 1986; Wyatt 等, 2011b)。此外,Barrick(1977)的研究表示,當 k0hrms > 0.3 時,示性波高估計的誤差可以被接受,這意味著雷達推導 出的波高的局限性受雷達工作頻率的影響,並於 0.15 < k0hrms < 1 的 範圍內 (Barrick 1977; Wyatt 1995a)。對於 27.75MHz 的雷達工作頻率, 示性波高範圍是 0.52 公尺到 3.44 公尺,在估算波高和實測波高之間存 在校正係數 (Barrick, 1977),這個值取決於雷達增益、海況和雷達與波 浪的角度。

為了估算波週期以及波譜,我們參考 Hashimoto and Tokuda (1999)、 Howell and Walsh (1993)設定波頻率的範圍,根據 Wyatt 等(2011a)的研究,在處理 HTCN 站的雷達資料時,波頻取值範圍為 0.05-0.5 Hz。這意味著平均波週期和尖峰週期被限制在 2 到 20 秒的範圍內。

Features	Value
Minimum 2nd-SNR	5 (dB)
Variable range of Hs	0,52 - 3,44 (m)
Range of wave frequency	0,05-0,5 Hz
Range of wave period	2 - 20 (s)

表 3-5 波浪參數品管門檻值彙整表

3.2.3 風參數品管

風速(U10)可以從一階高頻雷達都卜勒頻譜(Shen 等,2012; Stewart 和 Barnum,1975; Zhou 等,2017),以及二階頻譜(Dexter 和 Theodoridis,1982; Green 等,2009; Maresca 和 Georges,1980)估算。 從一階波峰演算風速,估計誤差很小,但由於布拉格共振波的飽和,風 速的範圍有限(Shen 2011; Shen 等,2012)。但在高風速條件下,利用 二階多普勒頻譜的訊號則可以擴大U10的估計範圍。這意味著使用一 階峰的風速反演方法適用於低、中度風速,而現有的二階方法的應用則 適用於高風速。根據 Wei Shen(2011),區分高風速與中低風速的門檻值 設定為10 m/s。

高風速條件下,風速演算準確性取決於波浪參數的準確度和 JONSWAP模型(Dexter 和 Theodoridis,1982)下Hs、Tp和U10之間 的關係,這意味著 JONSWAP 頻譜模型條件下的最大風速,即15公尺 /秒左右(Hasselmann 等,1973;Hasselmann 等,1973),可以作為U10 最大範圍的參考值。此外,研究區的歷史風速資料也是一個很好的參考 (圖 3.16)。從圖 3.16 來看,30 公尺/秒的最大值也可以作為從高頻雷 達都卜勒頻譜推導出的U10 的門檻值。



圖 3.16 對顯示了三年風速資料(從 2018 年到 2020 年)的柱狀圖 (a)和累積分佈函數(b)。風速是由位於臺中港破浪水頭的綠燈塔 頂部的風速儀測量的。

對於風向演算品管方面,其不確定性取決於三個來源:一階峰值識別的偏差,計算雷達波束和風向之間角度的方法的誤差,以及消除混淆 (ambiguity)問題。在雙雷達系統中,混淆問題可以被忽略。然而幾何精 度衰減因子條件 (GDOP) (Barrick 2005b; Chapman 等 1997)對於估 計風向至關重要。在此項目中,兩個一階峰值比率的三個門檻值被用作 評估風向品質的起始值。這個門檻值在 3.1 節的(b)部分中提到。為了解 決從單一雷達資料估計的風向的不確定性角度問題,可參考一種較簡 單的方法 (Huang 等, 2004),但此篇研究沒有提出給定的門檻值來過 濾估計結果。

Features	Value	Note
Variable range of wind speed	0 - 30 (m/s)	
	(For: 0 -10 m/s)	(high uncertainty)
	(For: 10 - 30 m/s)	(intermediate)
Maximum wind speed	30 (m/s)	

表 3-6 風參數品管門檻值彙整表

3.3 第3級產品品管

3級產品是由兩個以上的高頻雷達站之2級產品整合而成。因此, 3級產品的品質受到2級產品的品質、集成方法的誤差以及單站雷達站 及提供雷達測量的網格點之間的幾何條件的影響。

3.3.1 流場品管

對於雙雷達系統,海流的 u 和 v 分量是由兩處高頻雷達站的徑向速 度計算出來的,根據 Barrick(2005b)、Chapman 等(1997)建議,必須注 意幾何精度衰減因子 (GDOP) 的變化。 幾何精度衰減因子(geometric dilution of precision, GDOP)反應了從 兩個雷達站測量之徑向流速取得流場向量準確性的影響,此與每個不 同點位的雷達之間的角度有關。本研究參考 Chapman 等(1997), GDOP 值可以分別計算海流向量的 u(GDOP 東)和 v(GDOP 北),公式如下所 示:。

$$GDOP = \sqrt{\frac{2}{\sin^2(\theta)}}$$
(3.1)

其中, θ 是兩個雷達之電磁波於掃測區域位置的交角, 即 $\theta = \theta_1 - \theta_2$, 需注意此假設建立在兩個雷達的誤差是相同的($\sigma_{1a} = \sigma_{2a}$)(Wyatt 等, 2018),因此此公式並不精確但也提供了一個可能的誤差指標。臺中港 附近高頻雷達的 GDOP 空間分佈如圖 3.17 所示,在該圖中,藍色實線 表示 GDOP \leq 3.5 的位置(23.8° $\leq \theta \leq$ 156.2°),藍色虛線表示 GDOP \leq 5.0 的位置(16.4° $\leq \theta \leq$ 163.6°)。根據許多文獻(Cook 和 Shay, 2002; Shay 等, 2007; Robinson 等, 2011; Wyatt, 2018),當 GDOP 對應於 30° < $\theta <$ 150°約為 3.0 時,是良好資料品質的一個合理範圍。



圖 3.17 臺中雷達系統的 GDOP 圖。

由於 HTCN 和 HTCS 站之間的距離很短(大約 12 公里),GDOP=5 被用來作為確定流場測量的區域邊界,另外地球徑度 0.01x0.01 度(約 1.1 公里)的網格間距將被用來表示流場,如圖 3.18 中所示藍色點代表 本研究理想之演算流場區域和網格點。

為了計算流場 u 和 v 分量,對資料品質管理的條件設置如下:(1) GDOP ≤ 5 ;(2)一階峰的訊噪比大於 5.0dB;(3)徑向速度計算流場之 搜索窗的半徑為 r=0.01× $\sqrt{2}$ (度);(4)最大流速的門檻值 T=150cm/s; (5)平滑技術的視窗大小為 3×3;(6) u 和 v 速度都是由一個或兩個雷達 站的可用徑向速度計算的。



圖 3.18 本研究經 GDOP 設置理想之演算流場區域和網格點

3.3.2 風、波場品管

在本計畫使用 GDOP=3.5 來作為確定波浪和風測量的區域邊界。 另外地球徑度 0.01x0.01 度(約 1.1 公里)的網格間距將被用來表示雙雷 達系統的波場,圖 3.19 所示紅色點代表本研究理想之演算波場區域和 網格點。



圖 3.19 本研究經 GDOP 設置理想之演算風、波場區域和網格點

本研究之雙雷達系統估算方向波譜和10米風速的測量結果依據上 圖範圍設置,當滿足以下條件條件時,將計算出定向波譜:(1)HTCN和 HTCS 兩站之都卜勒頻譜二階峰訊噪比不低於10dB;(2)計算波場之搜 索窗的半徑為r=0.01×√2(度);(3)波浪頻率分量的上下限分別為0.05Hz 和 0.5Hz,波峰週期範圍為2-20秒;(4)波浪平均週期和峰值的最大值 為12和15秒,而Hs低於6公尺。

第四章 雙雷達系統整合與驗證

由第二章說明可知,海表參數可透過單一雷達站取得,而雙雷達系統可以取得海流分量(東西向、南北向)、波浪參數(方向波譜),並改善海表觀測的不確定性,這也意味著南北兩具雷達產品須在同一空間中進行整合。

對於海表資訊的整合,海流分量是基於最小平方法由徑向速度計 算而得(Gurgel 1994, Paduan and Washburn 2013),而徑向速度由兩雷達 系統同時同地點取得,並只有兩者皆有徑向速度測量值時可計算。對於 波浪觀測,方向波譜的估計可由兩雷達觀測重疊區域得出;其於僅有單 一雷達覆蓋的範圍,仍可得波浪頻譜、波高、週期資訊,因都卜勒頻譜 的缺乏,波向與傳遞係數(spreading factor)則被忽略。對於風的觀測, 風向與風速可透過任一雷達觀測範圍得到,然而其不確定性可能不完 全一致。



圖 4.1 實測比對儀器與位置

整合後所得之海氣象參數,將與實測資料進行比對,實測比對之儀

器位置如圖 4.1 所示,臺中港高頻陣列雷達北站代號為 HTCN 與南站 代號為 HTCS,實測資料採用由中央氣象局營運的圓盤式波浪浮標或微 型資料浮標數據,設置於 HTCN 站以南約 20 公里,水深約 20 公尺處。 其每小時測量波浪、風向、氣溫、海水溫度等參數,自動記錄並傳送到 中央氣象局;在臺中港口附近設有聲學都卜勒海流剖面儀(Acoustic Doppler current profiler, ADCP),或稱聲學底碇潮波流儀(Acoustic Waves and Currents sensor, AWAC),於北緯 24°18.199',東經 120°28.916',水 深 30 公尺,用於監測臺中港外的海況;風向測量方面,在臺中北防波 堤口綠燈塔頂端(北緯 24°17.980',東經 120°29.188') 之 6 號觀測站(代 號:#6)設置風向風速計。這些資料將用來評估由 LERA 系統回波所估 計的海流、波浪及風的不確定性。

4.1 第1級產品:都卜勒距離譜演算結果

4.1.1 臺中港雷達北站

臺中港高頻雷達北站之所有接收天線資料演算之都卜勒頻譜結果 如圖 4.2 所示。從圖中可看出 HTCN 站的接收天線都卜勒距離譜是乾 淨的,從都卜勒距離譜中可以清楚地看到一階和二階頻譜的存在。而於 ±0.48Hz 存在訊號干擾,透過檢視波束合成演算法的功率,當峰值頻譜 與 HTCN 站的孔徑相比處於-75°時,發現±0.48Hz 的雜訊干擾來自南 方,但干擾源為何還需再評估判斷。這種干擾在 25 公里觀測範圍內並 不強烈,但影響徑向速度的演算結果。這種雜訊的強度是隨時間變化的, 我們在提取方位角都卜勒頻譜後才能手動去除這種干擾。

4-2



Doppler frequency (Hz)









-40 -2 -1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5 2 40



(dB) 10

0

-10

-20

-30

-40

-50

-60

-70

(dB) 10

0

-10

-20

-30

-40

-50

-60

-70

(dB) 10

0

-10

-20

-30

-40

-50

-60 -70

(dB) 10

0

-10

-20

-30

-40

-50

-60

-70

圖 4.2 HTCN 所有天線之都卜勒距離譜

使用於波束合成演算法及改善雷達的訊噪比之 HTCN 參數如表 4-1 所示,經波束合成演算法計算之結果如圖 4.3 所示。從結果可以看出, 不同方位角都卜勒距離譜是乾淨的。θ 在-60° 到 60° 範圍內的都卜勒距 離譜中可以識別出一階和二階頻譜,在|θ|>70° 時,頻譜能量較弱且成 份相互混淆。根據 Grugel 等(1999)的建議,θ 的絕對值應低於 60°,以 避免出現副波瓣效應。經過三年 HTCN 的資料取得與測試過程中顯示, HTCN 站硬體的運作表現是良好的。

Probject	Function	Probject	Function
The radar boresight	296 (Deg., WWN)	Azimuthal resolution	5 deg
The distance between two adjactent receiver antennas	4 (m)	The antenna for beamforming algorithms	01 to 16
Range resolution	500 (m)	Overlaping	75 %
Number of rangecells	80	Number of segments	13
Doppler bin resolution	0.0022 (Hz)	Bearing angle (degree)	293.5 ± 60
Number of Doppler bins	2048	The technique of azimuthal resolution	Beamforming algorithm

表4-1 使用於波束合成演算法之HTCN参数表















圖 4.3 經波束合成演算法之 HTCN 每 10 度之都卜勒距離譜

4.1.2 臺中港雷達南站

臺中港高頻雷達南站之所有接收天線資料演算之都卜勒頻譜結果 如圖 4.4 所示。從圖中可以清楚地看到雜訊干擾對從 HTCS 的 16 個接 收天線的背向散射資料中取得之都卜勒距離譜有很大影響。在都卜勒 距離譜中雖然可以看到一階和二階頻譜的存在但不清楚。在±0.48Hz 處 仍然存在與 HTCN 站類似的雜訊干擾;15 號天線的干擾非常明顯,嚴 重影響頻譜的分析,其原因可能與 16 號天線的電纜連線品質不好有關; 01-08 號天線的都卜勒距離譜比 09-16 號天線的要乾淨;09-16 號天線 的干擾可能與接收訊號盒的內部風扇有關。為了避免 15 號天線雜訊的 影響,目前我們只用前 14 號天線使用波束合成演算法演算 HTCS 站不 同方位之都卜勒距離譜。此外,由於 09-14 號天線的干擾,必須再將都 卜勒距離譜上的雜訊進行人工過濾。

目前南站的雜訊相較北站較大,二階訊號較弱,對於 HTCS 站的 雷達訊號品質還需持續改善。我們需要與建置雷達廠商專家討論,讓他 們瞭解雷達的情況之後,再制定雷達的改進方案。







圖 4.4 HTCS 所有天線之都卜勒距離譜

使用於波束合成演算法及改善雷達的訊噪比之 HTCS 參數如表 4-2 所示,經波束合成演算法計算之結果如圖 4.5 所示。從結果可知目前 還存在許多雜訊干擾與問題需要一步一步改善,其中可以發現二階頻 譜強度很弱,就算當臺中浮標記錄到 3.9 公尺之示性波高時亦是如此。 對於 HTCS 的資料,當一階分量的訊噪比足夠大時,都卜勒距離譜適 用於估算海洋表面流場的徑向速度,對於波浪測量,由於二階分量的低 訊噪比,波浪參數估計的不確定性可能很大。因此未來對 HTCS 硬體 系統進行校準以提高資料品質是必要。在此計畫中,我們仍然會試圖處 理 HTCS 站的資料,以提供表面海流、波浪和風的結果。

Probject	Function	Probject	Function	
The radar	293.5 (Deg.,	Azimuthal	5 deg	
boresight	WWN)	resolution		
The distance		The antenna for		
between two	- ()			
adjactent receiver	5 (m)	beamforming	01 to 14	
antennas		algorithms		
Range resolution	500 (m)	Overlaping	75 %	
Number of	80	Number of compute	12	
rangecells	80	Number of segments	13	
Doppler bin	$0.0022 (II_{-})$	Bearing angle	202.5 ± 60	
resolution	0.0022 (HZ)	(degree)	293.3 ± 60	
Number of	2048	The technique of	Beamforming	
Doppler bins	2040	azimuthal resolution	algorithm	

表4-2 使用於波束合成演算法之HTCS参数表









-1 -0.5 0 0.5

Doppler frequency (Hz)

1 1.5 2

-2 -1.5







圖 4.5 經波束合成演算法之 HTCS 每 10 度之都卜勒距離譜

4.2 第2級產品:海氣象參數演算結果

4.2.1 徑向流速結果與比較

1. 一、二階峰之辨識

為了估計海流徑向速度或波參數,確定一階和二階分量的區域是 非常重要的。在此計畫中,我們使用了 Kirincich(2017)提出的原型 ImageFOL 方法用於識別都卜勒距離譜上的一階峰值區域。為了估計不 同方位角方向之都卜勒距離譜上的波參數,我們使用調整之 ImageFOL 方法。

ImageFOL 方法(Kirincich, 2017)的原型由都卜勒距離譜預處理 (pretreatment)、製造者控制分水嶺劃分(maker-controlled watershed segmentation, MCWS)和影像處理過程三個模組組成。該方法的特點是 採用單一、全球相關(globally relevant)的平滑長度尺度(smoothing length scale),以減少使用者定義的參數數量。Kirincich 證明這種方法有能力 將布拉格能量修正為一階峰的合理區域,使後續有關測向(directionfinding)的結果可以得到很大的改善。ImageFOL 方法中,每個方位角的 都卜勒距離譜將被視為一個圖像來識別一階區域。

為了應用此方法需要三個基本參數,即一階分量的最小訊噪比,高 頻雷達系統可能測量到的最大流速,以及第三個是平滑長度尺度,其目 的是平滑船舶的回波訊號。表 4-3 列出了 Kirincich(2017)中使用的參數 與數值。

Center frequency of			
the transmitter	27.75	vel_scale (m/s)	0.2
(MHz)			
Number of	2048	max_vel (m/s)	1.2
Doppler bins	Ooppler bins		

表 4-3 使用 ImageFOL 方法所需之參數與數值
Radial velocity resolution,v_incr (m/s)	0.012	SNR_min of the first-order components (dB)	5
complicating issues	Highly variable surface current, variable waves, strong background noise, severe sea- state generated by winter monsoons.	smoothing length scale N = vel_scale/v_incr	16

為了估算波的參數,必須確定一階和二階頻譜分量並將其分離。本 研究開發了一種簡單的技術來仔細檢測兩個頻譜分量之間的界線,以 提波參數演算的準確性。理論上,都卜勒頻譜上的一階分量相對於一定 的方位角,在布拉格頻率附近有單一的能量峰值,在現實中當有變化的 表面流或在複雜的波場中,會出現多峰或加寬的一階分量。最初的 ImageFOL 方法只為識別一階峰值而設計,目的是提高表面流徑向速度 估算的準確性。對於更精確的找到一階和二階頻譜之間界線,該方法需 要進行一些修改,因為當在較為惡劣的海況條件下,一階和二階區域會 重疊並有將部分二階區域劃入一階範圍的傾向。

圖 4.6 是使用常數門檻值(constant threshold)T=0.05Hz 和 ImageFOL 方法識別不同海況下的都卜勒距離譜一階分量的結果。圖 4.6 (a)和(b) 分別說明了嚴重海況(Hs=3.86 公尺)和平靜海況(Hs=0.78 公尺)下的都 卜勒距離譜。黑線代表使用常數門檻值方法檢測的區域,白線代表原始 ImageFOL 方法 (Kirinchich, 2017)。與圖(b)的平靜海況相比從圖(a)中 可以看出,原始 ImageFOL 的結果對一階區域的範圍進行了過度辨識, 這導致低估了示性波高和週期。為了消除此問題,我們提出了簡單的解 決方案。 首先,利用 ImageFOL 的結果,將都卜勒頻率的上、下限設定為搜索窗(search window),通過對加寬的一階分量中 25%的實質性峰值 (substantial peaks)進行加權平均,在這個窗中計算出都卜勒頻率的幾何中心。最後,在上述幾何中心的基礎上,尋找頻譜成分的最小值,將此最小值作為一二階峰的界線。

圖 4.6 顯示了由三種不同方法估算的一階分量區域,圖(a)為嚴重 海況(Hs=3.86公尺),(b)為平靜海況(Hs=0.78公尺),黑線代表使用 常數門檻值方法的檢測區域,白線代表原始ImageFOL方法(Kirinchich, 2017),紅線代表目前調整之ImageFOL方法。圖(a)顯示本研究所提出 的 ImageFOL 方法與常數門檻值方法的結果略有不同,而與原始 ImageFOL 方法的結果則有很大不同,這可能是受二階分量的強烈能量 影響。另一方面,圖(b)顯示 ImageFOL 和常數門檻值方法檢測到的面 積也有很大差別,前者提供了一個超過預期結果的區域,而後者則提供 了一個低估的結果。調整之 ImageFOL 方法的應用結果顯示,它在校正 一階區域的成果是有效的,其結果相對接近於期望值。

總的來說,本研究所提之方法對於決定一階區域的結果比現有方 法的結果更合適。首先,在較平靜海況下,複雜的表面流強烈地影響了 布拉格峰區域的擴展;其次,由於背向散射訊號和布拉格波訊號的混合, 低頻段的波成分的不穩定性很明顯。在低波浪條件下,新方法的表現比 現有其他方法更好。本計畫中我們使用了所提出的方法來檢測 HTCN 和 HTCS 站的都卜勒距離譜資料之都卜勒頻譜成分。

4-16



圖 4.6 在各種海況下識別都卜勒距離譜一階分量方法的比較。

2. 雷達演算海流徑向速度

波束合成演算法之結果:

關於從方位角都卜勒距離譜資料中識別都卜勒頻譜成分的方法, 可以計算出平均一階峰的位置與理論布拉格頻率之間的都卜勒頻偏。 我們可以從左邊和右邊的都卜勒頻偏中得到徑向速度,平均值被用來 代表徑向速度的值。圖 4.7 為從 HTCN 和 HTCS 站估算的徑向速度的 結果。黑色箭頭表示正在接近或遠離雷達站的海流方向,顏色表示徑向 速度的大小。測量時間為 2021 年 10 月 11 日 20 時(UTC)(2021 年 10 月 12 日 04 時 LT)。圖 4.7 顯示,當海流從北方進入雷達站並從這些站 轉入南方區域時,從兩個雷達站檢索到的徑向速度趨勢是一致的。由於 HTCS 站的一階都卜勒頻譜峰值的訊噪比比 HTCN 站低,較遠距離 (r>24km)的徑向速度具有很高的不確定性。



圖 4.7 波束合成演算法估算之表層海流徑向速度,HTCN(左圖)和

HTCS(右圖)。

MUSIC 演算法之結果:

為了提高波束合成演算法估算的徑向速度的方位解析度,本研究 也採用了 MUSIC 演算法,這是一種常用的測向技術方法,用於檢索臺 中港入口附近(大約1°)的海面流徑向速度。此外,這種方法還為繪製 海面流場圖提供了更高解析度的徑向速度結果。為了用 MUSIC 演算法 估計徑向速度,採用了區域 ImageFOL 方法來決定一階分量的區域。 MUSIC 演算法之基本參數的設置如

表 4-4 所示, MUSIC 演算法估算的徑向速度結果如圖 4.8 所示。 測量時間為 2021 年 10 月 11 日 20 時 (UTC) (2021 年 10 月 12 日 04 時 LT)。

The type of antenna manifold	Ideal		
The maximum solution	4		
The final azimuthal resolution of the radial velocities	1°		
The peak threshold for the MUSIC DOA peak finder	0.5		

表 4-4 MUSIC 演算法之基本參數表





流徑向速度例子。

圖 4.8 顯示,用 MUSIC 演算法估算的徑向速度結果與用波束合成 演算法估算的結果相似,然而用 MUSIC 演算法估計的徑向速度的有效 範圍比用波束合成演算法估計的要短,這是因為雖然一階分量的訊噪 比主要取決於接收天線的品質和海況,但波束成形演算法可能在各種 方位角方向為提取的都卜勒距離譜上的分量提供更強的訊噪比。為了 評估兩種方法估算的徑向速度的不確定性,對比結果如下所示。

3.徑向流速結果比較

為了評估估算徑向速度的不確定性,在圖 4.9 中顯示了從 HTCN 資料估算的徑向速度和由 AWAC 記錄的三個時間序列資料比較圖。在該圖中,黑點表示 HTCN 至 AWAC 方向之 AWAC 徑向流速大小,藍點和紅點表示由波束合成演算法和 MUSIC 演算法估算的徑向速度結果, 觀測時間為(a) 2019/01/17 12:00 至 2019/01/20 12:00, (b) 2019/01/24 12:00 至 2019/01/31 00:00 (c)2019/02/26 00:00 至 2019/03/10 12:00。

從圖中比較結果發現,兩種方法在估算徑向速度方面效果都很好。 但兩種方法的徑向速度結果都有低估的趨勢。這是因為雷達系統測量 水深λ/4 π的流速(Dao, Chien 等, 2019),其中λ是布拉格波的波長, 這意味著若雷達頻率為 27.75MHz,測得的流速代表了 0 至 0.43 公尺 水深處的特徵,這比 AWAC 測量水流剖面的單元尺寸(2 公尺)要小。此 外從結果可以發現,使用 MUSIC 演算法的雷達演算徑向速度的不確定 性要大於波束合成演算方法。



圖 4.9 不同演算法與現場量測資料比較之徑向海表流速圖。

為了進一步評估徑向流速速度的不確定性,估算結果與現場資料 進行了散點圖的比較,如圖 4.10 所示。在該圖中,左圖與右圖分別顯 示了波束合成演算法和 MUSIC 演算法與 AWAC 測量的比較結果,觀 測時間由 2019/01/16 至 2019/03/11。

我們發現於誤差指數評估方面,波束合成演算法方法比 MUSIC 演

算法表現得更好。這是因為在 MUSIC 演算法中使用了理想的天線場型 而不是真實情況之天線場型。另外資料的協方差矩陣是敏感的,總是隨時間發生變化。因此使用 MUSIC 演算法的徑向速度結果確實存在不確 定性。然而,單一的現場測量資料不足夠全面評估空間域中徑向速度的 準確性,因此使用更多的現場測量來評估徑向速度產品的估計偏差是 未來改進演算資料品質的重要工作。



圖 4.10 不同演算法於固定點隨時間的海流逕向流速散點圖。

由波束合成演算法和 MUSIC 估算之徑向速度的相關係數圖見圖 4.11,左圖是根據 2019/01/17 至 2019/03/11 的觀測時間計算的,右圖是 根據 2020/01/16 至 2020/04/07 的觀測時間計算的。結果發現,上述兩 種方法的估算結果在空間上具有良好的一致性,但在 2019/01/17-2019/03/11 和 2020/01/16-2020/04/07 這兩個不同期間,徑向速度的空間 形態發生了變化。在 2019/01/17-2019/03/11 期間,只安裝了 8 個接收天 線,而在 2020/01/16-2020/04/07 期間(直到現在)完整安裝了 16 個接收 天線。協方差矩陣對 MUSIC 演算法估算的徑向速度的結果很明顯有很 大影響,然而這兩種 DOA 方法估算結果都不錯並有很好的一致性,平 均結果可用於表示臺中港附近的海面流徑向速度分佈。



圖 4.11 波束合成與多重訊號演算法徑向海流空間相關性分佈圖

4.2.2 波浪參數結果與比較

圖 4.12 和圖 4.13 顯示了估算示性波高、平均週期和波峰週期的空 間分佈。在圖 4.12 中,左圖是使用 HTCN 站的都卜勒距離譜資料,在 沒有比例係數(scaling factor)或ξ_{Hs}=1 的情況下,雷達推算的 Hs 圖,右 圖是使用 HTCS 站的資料的 Hs 分佈,可以看出由於二階頻譜的低訊噪 比,從 HTCS 站推導出的 Hs 的有用範圍比 HTCN 站的短,雷達推導 的 Hs 存在著不均匀的分佈,這可能與估算 Hs 時沒有考慮電磁波與波 浪間的角度對於示性波高估算結果的影響有關。



圖 4.12 示性波高圖,分別顯示在 (a) HTCN 和 (b) HTCS

由於從 HTCS 資料中取得的二階都卜勒頻譜的訊噪比很低,我們 只顯示從 HTCN 站的都卜勒距離譜中推導出的波浪平均和峰值週期圖。 這些雷達演算波浪週期如圖 4.13 所示。從結果可以發現有明顯的不均 勻波浪週期在空間上分布,此與現實情況是不太相符的,據此需要評估 雷達並修正波浪週期的不確定性。





和(b) HTCN 峰值波浪週期圖

為了評估雷達計算波浪參數的不確定性包括示性波高、平均週期 和波峰週期,雷達估算與現場量測的波浪參數之時間序列資料顯示在 圖 4.14 至圖 4.16。圖 4.14、圖 4.15、圖 4.16 分別呈現了四個月的 Hs、 Tm 和 Tp 的時間序列圖,分別呈現四個季節(春季(a)、夏季(b)、冬季(c) 和秋季(d))。在每個圖中,黑色實線表示現場波浪資料,藍點表示用原 始比例係數($\xi_{Hs}=1,\xi_{Tm}=1,\xi_{Tp}=1$)估計的波浪參數。通過使用一年的資 料,確定了波浪參數的比例係數,其值為 $\xi_{Hs}=0.786,\xi_{Tm}=0.896,$ $\xi_{Tp}=0.965。通過使用這些修正的比例係數,雷達調整後的資料在圖中$ 以紅點顯示。



圖 4.14 雷達演算和現場測量在不同季節之示性波高 30 天的比較。



圖 4.15 雷達演算和現場測量在不同季節之平均週期的 30 天比較。



圖 4.16 雷達演算和現場測量之波峰週期在不同季節的 30 天比較。

從上圖可以發現,與使用以前的比例係數相比,使用目前的比例係 數,Hs、Tm 和 Tp 的結果與現場量測結果一致,這意味著比例係數可 能因雷達頻率、當地條件和使用的系統而有所變化。另外,從示性波高 結果可以看出,在峰面和颱風通過時,波浪條件發生了明顯和快速的變 化,雷達於波高方面捕捉到波浪的快速增長,然而 Tm 和 Tp 的估計結 果都存在偏差,特别是在鋒面通過的時間段(圖(d)),原因是在給定雷達 方位,由單站雷達站都卜勒距離譜估算 Hs 主要取決於雷達觀測方向與 波浪方向之間的角度,而波浪平均週期和波峰週期的比例係數則受微 小參數的影響(Wyatt, 1995)。雷達估算的波浪週期對波浪短波來說是 高估的,對長波或湧浪來說是低估的,此結果表示,雷達估算波場還存 在著誤差。在本研究中,我們嘗試用一種新的波浪週期比例係數方法來 校準波浪週期。初步結果之一是,波浪週期的比例係數與微小參數呈非 線性關係,而且可以用冪函數來描述,如下圖所示,其中(a)和(b)顯示 了使用冪律的波週期比例係數和微小參數(c=k₀h)之間的關係。(c)和 (d)顯示了使用傳遞函數校準的平均週期和ξ_{Tm} 作為 ς 的函數,分別與 現場測量的比較。同樣,(e)和(f)顯示了兩個校準的波峰週期和實測波

峰週期的比較。可以看出,通過使用新的波週期校準方法,雷達修正的 週期不確定性明顯降低。



圖 4.17 波浪平均與峰值週期經比例係數與微小參數校正圖

比較丹娜絲颱風和利奇馬颱風期間的波高(圖 4.16(b)),雷達演算資 料與現場量測資料相當一致。對於丹娜絲颱風來說,誤差最大的時間是 2019 年 7 月 17 日 12:00 LT-17:00 LT 的峰值期間,與颱風眼到雷達區 的最近距離相吻合,如圖 4.14(b)所示,AWAC 測得的波高為 3 米左右, 微小參數為 0.8,使用新校準的比例係數最大偏差達到了 50%。對於 2019 年 8 月 8-11 日的利奇馬颱風,波高的偏差比較小。這兩種情況的 差異可能表示,波場中湧浪的存在將影響高頻雷達都卜勒頻譜的強度, 並可能在波高測量中產生關鍵作用。對於 Tm 和 Tp 的結果,在現場量 測資料和雷達演算資料中都可以發現振盪的特徵,而且 Tm 和 Tp 訊號 的這些變化是同相位的。然而,在丹娜絲颱風和利奇馬颱風期間的高峰 期,最大週期被低估了。以上結果顯示,估計的波浪參數與海上單一地 點的現場資料是一致的。

上述討論是持續 30 天之特定時間進行評估,為了擴大樣本量以評 估雷達演算波參數的不確定性,本次比對採用了 2019 年至 2020 年 385 天的連續同步雷達和 AWAC 資料。在經過資料品質管理後,產生了約 6800 筆資料。如圖 4.18 所示,(a)、(b)和(c)分別顯示了雷達演算與 AWAC 資料之間的示性波高、平均週期和波峰週期的散點圖,藍點表示所有資 料點,紅線是所有資料之回歸線。示性波高之誤差指標相關係數(r)、均 方根誤差(RMSE)分別為 0.96、0.24 公尺,平均週期之 r、RMSE 為 0.68、 0.75 秒,波峰週期 r、RMSE 為 0.49、1.42 秒。根據 Alattabi 等(2019) 回顧並總結許多文獻之誤差指數,與本研究的誤差指數相比結果是接 近的,甚至結果更好。目前的雷達資料品質和演算對於單點的波浪參數 是可以接受的,亦表示本研究之演算流程是成功的。

4-28



圖 4.18 示性波高(a)、平均週期(b)和波峰週期(c)相互比較圖。

4.2.3 方向波譜結果與比較

方向波譜是高頻雷達資料演算中一重要波浪資訊,為了說明在不 同海況下雷達演算波譜情況,我們選擇了兩種天氣情況,包括冬季季風 和颱風的情況。

為了決定傳遞函數值(transfer function values),本研究使用第二章 中的公式(2.31)於雷達演算波譜,圖 4.19 顯示了 AWAC 位置之波譜估 算結果。圖中(a)和(b)圖分別呈現東北季風與颱風情況下雷達演算波譜 的 5 天時間序列資料,(c)和(d)圖呈現 AWAC 記錄之現場量測波譜。 為了重新確定波譜傳遞函數,(e)和(f)圖顯示了雷達估算波譜與現場量 測之波譜比率。在兩種天氣條件下,雷達演算波譜與現場量測波譜之 間的相關係數如圖(g)和(h)所示。





圖 4.19 在冬季季風、颱風情況下,高頻雷達演算和現場測量取得波 譜的5天比較。

圖 4.19 左側圖顯示了 2020 年初東北季風通過時的結果。在(a)和 (c)兩幅圖中可以看出強風引起的波譜強度的迅速增加。圖(c) AWAC 的 資料中,峰值頻率的下移是很明顯的,但是在(a)圖雷達演算結果中並 不明顯。另外在圖(c)中,資料的頻譜寬度較窄,而在圖(a)中,低頻成 分被高估,頻譜寬度較寬。 圖 4.19 右側顯示了 2019 年丹娜絲颱風影響下的情況,在圖(b)和 (d)中可以清楚地看到颱風所帶來的波高峰值。同樣,在圖(d)AWAC 資 料中可以看到伴隨著波高峰值的波頻降低,但在圖(b)的雷達資料中並 不明顯,表示雷達演算頻譜高估了頻譜寬度。

雷達量測波譜與現場量測資料的比值可以看作是傳遞函數的倒數。 圖 4.19 (e)和(f)顯示了兩種海況情況下傳遞函數的時間變化情況。為了 確定傳遞函數,參考 Gurgel 等(2006)、Alattabi 等(2019),如圖 4.20 雷 達演算之波譜與現場量測資料之間的相關係數所示,圖(a)黑色陰影部 分每個波頻分量上,現場頻譜與估算頻譜之比的概率密度分佈,黑色虛 線是估算頻譜和現場量測頻譜之間的相關係數值;圖(b)顯示了目前的 傳遞函數和過去文獻的比較,紅線顯示的是使用 Gurgel 等的公式(2006) 從目前的工作雷達頻率(27.75MHz)平均轉移到 48MHz 雷達頻率的傳遞 函數的反演,虛線和藍線顯示的是 Alattabi 等(2019)發表之雷達頻率為 48MHz 時淺水和深水區域的傳遞函數。



圖 4.20 雷達演算之波譜與現場量測資料之間的相關係數

圖 4.20(a)中顯示了所有波段的雷達估算頻譜與現場量測資料之間 的機率分佈,陰影越深表示出現的概率越高,在此基礎上,可以相應地 確定不同頻率下比率的平均值和中值,分別用紅線和藍線表示。這兩條 曲線可以被看作是傳遞函數。紅線和藍線的最大值為 0.365Hz,這反應 了電磁波耦合係數在 $\pm \omega_B \sqrt[4]{23}$ 處的奇異點(singularity)特性的影響。另外 可以注意到,在0.12 Hz < fi < 0.4 Hz 的範圍內陰影點雲的分佈較窄, 其中紅線和藍線很一致。在這個頻譜範圍內,由於二階頻譜的訊噪比比 湧浪、風浪的頻譜要好,所以傳遞函數的可信度更高。在其餘的頻帶中, 紅線和藍線之間的偏差增加。

在圖 4.19(g)和(h)為雷達演算和現場量測之間的頻譜功率密度的時 間序列的相關係數,與圖 4.20 圖(a)中使用一年的資料相比,與波浪頻 率有關的相關係數顯示為黑色虛線,除奇異點外,大部分頻譜帶的相關 係數都大於 0.6,但在頻率低於 0.10 赫茲時,相關係數開始下降。這一 結果與傳遞函數的特性相吻合。

傳遞函數的相關研究不多,本研究之傳遞函數特性與 Alattabi 等 (2019)的結果進行了比較,後者是從 48MHz 的特高頻(VHF)雷達系統 取得。為了將傳遞函數值轉換為雷達工作頻率的相同基礎,應用了 Grugel 等(2006)提出的調整公式。圖 4.20(b)顯示了比較結果,其中紅線 表示本研究中傳遞函數的倒數,而虛線和淺藍色虛線分別代表 Alattabi 等在淺水和深水條件下的結果。圖中顯示了兩個傳遞函數的相似特性, 兩項研究的峰值都出現在 0.075Hz 左右,且變化趨勢幾乎相同,在數值 上則略有不同。這意味著傳遞函數對不同雷達頻率、雷達硬體製造和天 氣條件是獨立的。目前提出的傳遞函數在頻譜範圍內延伸到 0.5Hz,並 呈現隨頻率增加而下降的趨勢,當波頻從 0.265Hz 增加到 0.50Hz 時, 如果暫時忽略電磁波奇異點特性的影響,傳遞函數從 0.673 下降到 0.086。

如果應用上述傳遞函數進行分析, 雷達依此演算之波參數與使用 比例係數的波參數結果是一致的。波譜經過傳遞函數之調整,可改善波 高與波浪週期, Alattabi 等 (2019)已經證明了傳遞函數在校準波高方 面成效,並改善了風浪和湧浪在波段方面的不確定性。然而他們的傳遞 函數只是從幾個選定的時期估計。本研究傳遞函數是由兩年內的實測 和估算頻譜之間的比率計算出來的,發現估算之傳遞函數的意義與波 浪平均週期的比例係數相似。有助校準波頻域的頻譜功率。通過添加傳 遞函數,與使用方程 (2.27)估計的結果相比,波週期的不確定性可以

4-32

得到改善。我們發現,傳遞函數對頻譜的修正有很好的作用,修正後的 結果也與通過比例係數修正後計算的波參數結果相近。

上述討論可以在下圖中得到證明,其中平均週期和峰值週期的相 互比較分別顯示在圖(a)、(b)、(c)和(d)、(e)、(f)。



圖 4.21 平均週期和峰值週期之比較圖

圖(a)顯示了實測 Tm 和沒有經驗比例係數或傳遞函數的估計 Tm 之間的相互比較,而圖(b)和(c)顯示了分別使用比例係數(ξ_{Tm}=0.896) 和傳遞函數的估計平均週期與測量平均週期的比較。在下面的三個圖 中,(d)、(e)、(f)面板分別顯示了不使用比例係數(ξ_{Tp}=0.965)、添加了傳 遞函數的估計平均週期與實測 Tp 之間的相互比較。不難看出,比例係 數或傳遞函數有助於減少波浪週期估計的偏差,但改善並不明顯。

4.2.4 風場結果與比較

根據 Shen(2011),從布拉格頻率的頻譜能量中反演最大風速是存在

極限的,對於 27.68MHz 頻率之雷達可演算之最大風速大約是 9 公尺/ 秒,這與臺中港的雷達頻率相似。因此我們需要對可以從一階或二階都 卜勒頻譜估計的風速範圍進行分類。另外為了從一階分量中估計布拉 格峰的能量,需要使用雙雷達系統的資料。

圖 4.22 為風速和一階都卜勒頻譜的總能量與示性波高之間的散點 圖。在圖(a)橫軸表示風速範圍,縱軸表示一階總能量值。可以看出,當 風速達到近 10 公尺/秒時,一階總能量增加,且變得飽和。另一方面, 圖(b)顯示當風速小於 10 公尺/秒時,示性波高值緩慢增加,而當風速超 過 10 公尺/秒時,示性波高值明顯變化。因此可以用 9 公尺/秒的門檻 值來區分將從一階或二階頻譜中計算出的風速。



圖 4.22 風速與 (a) 一階波峰總能量和 (b) 示性波高的關係。

根據圖 4.22 (b),於 AWAC 的位置對應的風速為 9 公尺/秒,平均 Hs、Tm 和 Tp 分別為 1.05±0.49 公尺、4.2±1.0 秒和 5.6±1.8 秒。據此將 門檻值設置為:

$$\begin{cases} U_{10} = f([\sigma^{(1)}]) \text{ when } \text{Hs} \leq \overline{\text{Hs}} \& \text{Tm} \geq \overline{\text{Tm}} + \sigma(\text{Tm}) \\ U_{10} = f(\text{H}_{S}, \text{T}_{\text{m}}/\text{T}_{\text{P}}) \text{ others} \end{cases}$$
(4.1)

然而如圖(b)所示,第一階峰值的能譜需要從 MUSIC 演算法而不是 波束合成演算法的輸出結果中提取。我們應用公式(4.1)的第二種情況 來計算單個雷達站之風速,如圖 4.23 為一計算風場之例子,左圖是利用 HTCN 站都卜勒距離譜經調整之比例係數演算波參數來計算 U₁₀ 風場,右圖則是 HTCS 站演算的 U₁₀。



圖 4.23 從 HTCN 和 HTCS 站得出的風場圖分別顯示 (a) 和 (b)。

為了評估使用公式(2.53)演算風速的不確定性,雷達演算與現場量 測之風速比較的散點圖如圖 4.24 所示。其中風速是由雷達測得的 Hs 和 Tp 與第 4.2.2 節中的新比例係數計算出來的。



圖 4.24 雷達演算與現場量測之風速比較圖

可以看出這種方法的誤差不高,現場量測之風速是臺中港綠色燈 塔上測量的,風速計的高度應該是離海面20公尺,因此參考結果的不 確定性很低。另外,與Tm相比Tp的估計誤差較大。雷達演算之波峰 週期在平靜海況下會高估,在海況不好的情況下則會低估,這直接影響 比較結果。

我們嘗試使用其他的演算風速模型進行測試,如下所示:

$$H_{s} = aU_{10}^{2} + b$$

with a = 0.005062, b = 0.7524, r = 0.82 (4.2)

風速比較的結果如圖 4.25 所示,結果發現,大於 10 公尺/秒的演 算風速與現場量測風速相當,其不確定性也得到了改善。然而,低風速 帶的風速不確定性很大,仍然需要改進。目前我們提供了基於第二章方 法的風速結果,在未來若能取得更多現場量測資料作為校正,並且雙雷 達系統的雷達資料品質良好時,將可進一步研究利用高頻雷達回波演 算風場,提升演算品質。



圖 4.25 使用公式 (4.2) 演算風速與現場量測風速比較圖

圖 4.26 為雷達估算風向(藍點)和現場量測風向資料(黑點)的時間序列比較。結果發現風向算的偏差仍然很大。目前單一雷達站的風 向演算方法有著很高的不確定性,如果經過雙雷達系統的改善與演算, 這個問題可以得到改善。



圖 4.26 演算風向與現場量測風向比較圖

4.3 第3級產品:雙雷達系統之海氣象參數演算結果

4.3.1 流場結果與比較

為了從雙雷達系統的都卜勒距離譜資料中整合出流場,在 GDOP=5的區域內,使用了 0.01x0.01 度(約 1.1 公里)的間隔網格來表 示流場,計算之相關說明如 3.3.1 節所述。

估算海洋流場的空間分佈圖結果呈現如圖 4.27 所示,其中圖(a)顯示的是由波束合成演算法計算徑向速度合成之流場圖,圖(b)是由 MUSIC 演算法估算之流場圖。



圖 4.27 波束合成演算法(左圖)與多重訊號演算法(右圖)合成流場圖

根據圖 4.27,其結果在距離海岸線 20 公里以內的近場洋面海流幾 乎沒有差別。對於遠場洋流,由於缺乏 MUSIC 方法的徑向速度資料, U&V 速度的不確定性可能比使用波束合本研究建議以波束合成演算法 之徑向速度估算臺中港外之海洋表面流場為優先。

4.3.2 波場結果與比較

為了從雙雷達系統的都卜勒距離譜資料中整合出波浪參數圖,在 GDOP=3.5 的區域內,使用了 0.01x0.01 度(約 1.1 公里)的間隔網格來表 示波場。為了結合 HTCN 和 HTCS 兩個站的都卜勒距離譜估算的波浪 資料,採用加權法(weighted method)繪製波浪參數分佈圖,包括示性波 高、平均週期和波峰週期,計算之相關說明如 3.3.2 節所述。

Hs、Tm和Tp的結果分別顯示在圖4.28的(a)、(b)和(c),可 以看出波場圖與從單個雷達站推導出的波參數圖相比是合理的。



圖 4.28 雷達演算波場 Hs(a)、Tm(b)和 Tp(c)結果圖

4.3.3 風場結果與比較

風場的網格間隔與波場的網格間隔相同。雷達演算風場的例子如 圖 4.29 所示,當時在圓規颱風產生的風場控制下,臺中浮標記錄的風 速約為17公尺/秒,風向為東北風。與圖中結果相比,雷達演算之風速 略微高估,但在方向方面則是合理的。如果對波浪資料進行校準,並計 算出方向波譜,雷達演算風場的結果應能更為準確。



The map of Wind Field

圖 4.29 雷達演算風場結果圖

本計畫除了主波向和方向波譜尚未取得良好的演算成果外,其餘 項目皆完成。另外,波浪參數的不確定性需要通過與不同地點的現場測 量進行校準來提高。由於缺乏用於結果評估的現場資料,以及 HTCS 站 的背向散射訊號存在明顯干擾,我們無法完成這部分的校準。目前研究 的成果仍可以很好地代表由海面流、波浪和風組成的海況情況。

第五章 建立海沉資料展示系統

為實現作業化雷達觀測,本計畫建置一個資料處理和瀏覽的平臺, 呈現高頻雷達回波中取得的海流、波浪和風的資訊。原始資料將被上傳 到港研中心的資料中心,以進行資料處理,並設計一顯示即時海況的介 面。此外,高頻雷達資料將被分為多個級別的產品,並上傳至伺服器或 雲端硬碟,以存取、共用或進行後續處理。

隨著網際網路的迅速發展,Web應用框架(Web application framework)更廣泛地應用於人機介面控制(Human machine interaction)。 自90年代開始流行以LAMP(Linux, Apache, MySQL and PHP)等系列解 決方案包(Solution Packages)建構服務伺服器,MVC(Model, View and Controller)等一系列的結構模組化設計,新穎且輕量的框架紛紛登場, 能夠高效率地協調前端與後端的開發。

雷達資料分布於時間與空間上,為將資料視覺化(Data visualization) 多會導入 Web GIS(Geographical Information System)技術服務,雖然各 種相關 API(Application Programming Interface)可做應用,但要將雷達海 氣象資料有效率地呈現並供使用者檢索查詢,系統設計不僅止於前端 的函式呼叫(Invocation)。

從雷達系統硬體的訊號輸出,開始了後端軟體的工作範疇,資料流 程(Data flow)從資料擷取與分析運算、資料庫架構的配置與匯入及後續 自動化作業等,是整體系統最為關鍵的部分。而 Web 前端使用者介面 (User Interface)的設計不外乎是以 Html、Javascript 和 CSS 為基礎的工 作,在實行系統即時監控與介面互動等功能時,需要前、後端軟體的協 調設計,以達到盡可能提升使用者體驗(User Experience)的目標。

雷達系統的開發、研究及維運,相當適合採用開放且模組化的軟體 架構,在任何環節的調整與修改都能針對獨立的程序,使系統依然保持 彈性與穩定。

5-1

5.1 高頻雷達資料庫與展示規劃

記錄資料依照記錄來源類型可分類人為記錄與觀測自動產出兩種, 人為記錄的資料如建站記錄、設站基本資訊、維護記錄、雷達運作參數 設定值、決定子影像大小與個數等,此部份記錄對於資料運算及雷達站 狀態查詢有重要的影響,觀測自動產出資料包含 Level0 雷達觀側原始 資料、 Level1 都卜勒距離譜、Level2 風波流等運算資料。於規劃資料 庫的設計時,需先了解進入資料庫之資料特性及資料之間的關聯性,並 透過妥善的資料儲存規劃,達到資料儲存的完整性與後續查找資料之 便利性,資料關聯特性之整理如表 5-1 所示。

	• 站名、站碼、設置記錄、位置
新站建置基本資料	• 訂定作業參數
	• 決定子影像數目、範圍
维谨作業可能的	 硬體設施調整:位置、高度、角度調整、 維菲記錄
冲吸作未了肥的	下吸已步
調整項目	 運作參數改變:子影像變更、作業時間調整
觀測資料	• Level 0, Level 1, 每個站(站碼)的 IQ 資 料及 DR 譜時序列。
	• Level 2 每個子影像的風波流分析結果時 序列

表 5-1 資料關聯特性整理

IQ 及二維資料(如 DR spectrum)以檔案的型式儲存,檔案類型可為 NetCDF 或一般圖檔,並賦與檔名命名規則,可方便後續目錄檢索與人 為查找。 本計畫規劃五種資料庫記錄項目,資料庫記錄項目設計規劃整理 如表 5-2 所示。站點記錄為雷達站基本資訊;維護記錄則為雷達站隨時 間地點有參數經過更動時,所需要記錄之資訊;透過子影像與觀測記錄 (時間、品管參數等)結合與計算,取得單站資料並記錄,其五項資料類 型相互關聯,需有效的規劃與連結。資料庫設計與關聯性如圖 5.1 所示。

1	站點記錄	•	必要:站碼、中文名、維護單位
1.		•	選擇:英文名
	維護記錄	•	關聯:站點(需有站點)
		•	必要:位置(經緯度)、高度、時間、dR、dThita
2.			等雷達参數
		•	選擇:雖然僅關連維護(必包含站點)即可,
			站點似乎被重覆關聯,但後續可較有效率的
			進行特定的檢索條件或增加程式可讀性
3	子影像記錄	•	關聯:站點及維護(需有站點及維護記錄)
5.		•	必要:邊界、中心點位
	觀測記錄	•	關聯:站點、維護
4.		•	必要:時間、檔案資料主要檔名、品管參數
		•	選擇性:人工品管參數
	單站資料記錄	•	關聯:站點、維護、觀測、子影像
5.		•	必要:徑向流速、波浪參數(HS、Dir、 T01,
			T02、Tp)、風速風向

表 5-2 資料庫記錄項目整理



圖 5.1 資料庫設計與關聯性

經過資料庫之設計與關聯性的安排後,逐一建構每一項資料庫之 匯入與匯出,下面條列資料庫匯入與匯出建構上所需要的及應注意之 原則:

- 人為設置的資料需要人機"圖形"介面(匯入):
 透過人力的輸新站建置、維護記錄。
- 例行觀測所自動產出的資料需要程式介面(即 API)(匯入):
 程式分析完後匯入觀測記錄、風波流記錄、子影像記錄。
- 用於資料展示介面的資料查詢程式介面:
 預想查詢展示情境,設計資料檢索功能。
- 常用資料匯出匯入功能製作操作介面:
 視需要建置常用的資料匯出轉存功能。
- 地理資料存取原則:

資料庫系統的選擇與規畫應儘量確保地理資料可以有效的進行地 理資訊相關整合應用。

本計畫資料展示部分規劃為伺服器與使用者端分離的架構,伺服器檢索資料,使用者端展示資料,優點為使用者不需要到硬體前操作即可以網頁的方式展示資料,此 web server/clinet 的方法則需注意伺服器端與使用者端之間架構的連結,以此計畫來說,可將雷達回波強度值事先繪製好圖形,由伺服器直接擷取後傳至使用者端。另外在使用 web server 部份,可考慮符合 WEB GIS 的方式呈現資料,若能做到符合 GIS 的標準,雷達資料將不是唯一的資料來源,展示端可加入同樣符合 GIS 的標準,web browser 也不是唯一的展示端,很多其他能使用 GIS 的平台也可將此觀測資料直接做應用。

在本計畫為達成符合 Web GIS 的方式呈現資料, 需具備二基本要件, 一為雷達資料伺服器所回傳的具地理資訊的資料需符合 GIS 規範, 二為使用者端要能透過 web browser 呈現伺服器傳來的 GIS 資料。地理 資料通常是地理空間上的點、線、面所產生的各式資料, Geometry types 指的即是點(Point)、線(LineString)、面(Polygon), 符合可處理地理資 訊的資料庫(或其延伸),通常需將地理資料以 Geometry types 的方式儲 存於資料庫中以便進行幾何運算,而非以經、緯度的方式儲存,以本計 畫雷達資料而言是符合其地理資料之特性,可以符合 GIS 規範之資料 來儲存與應用。

若儲存資料格式為文字格式,一般使用 JSON,而 GeoJSON 是一種基於 JSON 的地理空間數據交換格式,GeoJSON 定義了幾種類型 JSON 對象以及它們組合在一起的方法,以表示有關地理要素、屬性和 它們的空間範圍的數據。不過是針對 Geometry types 的 JSON,遵循 JSON 的語法和格式,其解析方式和 JSON 完全相同。若儲存資料格式 為圖形資料,可以點陣圖(Rasters)或 NetCDF 的方式儲存,如果資料具 有地理座標(經、緯度)則附上座標資訊。NetCDF 的優點在於資料繪製 呈現方面較容易調整,但於展示過程需注意在伺服器端必須先形成圖像,再傳至前端,若為 Rasters 則比較省伺服器的效能,因此此部份需 考量用戶端使用伺服器的狀況,若伺服器效能不足、來不及提供大量使 用者需求形成圖像傳至前端,則 NetCDF 較為不合適,因此若於未來有 資料開放的需求,使用者眾多的狀況以 Rasters 為佳。

軟體架構方面採用網頁型式操作系統,可多人同時操作,使用者端透過可執行 javascript 的瀏覽器連線,不需額外安裝軟體即可進行操作, 可運行於封閉網路中。可能之伺服端所需軟體條列如下:

- 作業系統: UBUNTU 20.04。
- 網頁伺服器: Nginx 1.18 + Django 3.2.2。
- 資料庫: PostgreSQL 12.6+延伸格式 PostGIS 3.0.0。
- 科學運算軟體: Python3.9, GDAL 3.2.3, NetCDF 4。

使用者端只需要 Web Browser:

- Javascripts: Openlayers 6.5, jquery 3.6.0, Chart.js 2.0 •
- CSS 版面:採用自適應的 Bootstrap 5 CSS 編排。

圖 5.2~圖 5.4 為本計畫建構之資料維護與展示介面,相關技術架構 包含資訊傳遞架構與供資料展示用硬體建置建議架構將於 5.2 節~5.3 節說明,圖 5.2、圖 5.3 為測站維護相關參數與資訊,每個新建置之測 站皆需建立維護資料,並記錄於資料庫中供後續操作維護參考。圖 5.4 為資料展示畫面,可展示觀測獲得之波場、風場與流場,並可根據時間 軸選取所需之時間點進行查詢與展示。

5	Add sites Django site admin	× +		• - • ×
<	→ C ▲ 不安全 19	2.168.10.91/xb	and/admin/raster/sites/	′add/ 🛛 🗣 🔂 🗄
			WELCOME, DJADMIN. VIEW SITE / CHANGE PASSWORD / LOG OUT	
	AUTHENTICATION AND AUTHO	DRIZATION	Add oitop	
	Groups	+ Add	Add sites	
	Users	+ Add	Name:	台中港北站
	RASTER		Name en:	
	Maintains + Add		a. d.:	LITEN
	Measurements	+ Add	Code:	nton
	Sitess	+ Add	Operator:	港海技術研究中心
	Sub image defines + Add			
«	Wave current datas	+ Add		Save and add mother Save and continue editing SAVE

圖 5.2 新站點建置頁面示意圖

	3 Add maintain Django site adm	× +				•	-		×
<	- → C 🔺 不安全 192	.168.10.91/xb;	and/admin/raster/maintain/a	idd/	20	*	0	医疫病式	1
					WELCOME, DJADMIN. VIEW SITE / CHANGE PA				Â
	Home - Raster - Maintains - Ad	dd maintain							
	AUTHENTICATION AND AUTHOR	IZATION	Add maintain						
	Groups	+ Add	Additionitant						
	Users	+ Add	Site:	台中港北站_HTCN 🗸 🥕					
	RASTER		Datetime:	Date: 2021-05-25 Today I					
	Maintains	+ Add		Time: 08:40:45 Now @					
	Measurements	+ Add		Note: You are 8 hours ahead of server time.					
	Sitess	+ Add	Longitude:	120 523154					
	Sub image defines	+ Add	congrade.						
	Wave current datas	+ Add	Latitude:	24.309854 🗘					
			Number of channels:	16					1
			Number of antenna:	8					
		Gain:	10						
«			Bandwidth(kHz):	300					
			雷蓬面向角,整數值(度):	0					
			観測最大距離(km):	40					
			天線團距(m):	4.1					
			Note:						
				Sa	ve and add another Save and continue edit	ing	SAV	ε	ļ

圖 5.3 維護記錄輸入畫面示意圖



圖 5.4 資料展示畫面示意圖(圖為波高場展示圖)

5.2 即時資訊傳遞系統規劃

為了能夠掌握現場雷達測站的系統運作狀態,常見的手段可以分 為被動監控及主動通知(站在被控端即現場雷達測站的立場而言)。要達 成被動偵測功能,必需在被監控端安裝狀態監控程式,並接受主控端的 請求以便回應狀態,被動監控的缺點是無法掌握即時的狀態,只能透過 定時的請求後才能得到資訊,如果為了時效性而頻繁的請求狀態回報 則往往有過多的相同狀態請求導致網路資源的浪費。主動通知則是被 監控端可定時主動通知主控端目前狀態,或根據事件,如任務執行開始 /結束時,通知主控端以便主控端掌握現場狀態。因此本規劃建議採用 的方式為現場測站主動回報狀態至主控端,讓主控端掌握現場狀況。

5.2.1 資訊傳遞網路通訊協定 MQTT

被控端與主控端間的訊息傳遞可以透過網路(TCP/IP)上的各式通 訊協定如(FTP、HTTP、HTTPS、TELMET、IMAP、SMTP、POP、SNMP、 SSH、MQTT…等)進行。其中 MQTT 是於 1999 年由 IBM 公司的 Dr. Andy Stanford-Clark 和 Arcon 公司的 Dr. Arlen Nipper 所提出的通訊協 定。當時為了在有限的網路頻寬和及極輕量的電力需求前提之下,提供 石油管線感測器和人造衛星之間一個輕量、可靠的二進制通訊協定。 2014 年十月, MQTT 正式變成一個開放的 OASIS 國際標準 (Organization Advancement Structured Information Standards, 資訊標準 架構促進會)。

MQTT 通訊協定進行定義了兩種網路實體:訊息代理(message broker)與客戶端(client)。訊息代理用於接收來自客戶端的訊息(發佈 者,publisher)並轉發至目標客戶端(訂閱者,subscriber)。MQTT 是一種 為了物聯網(IoT)而設計的輕量級協定,相比於 HTTP 的標頭採用文字 述,MQTT 的標頭採用數字編碼,整個長度只佔 2 位元組,後面即接 續訊息的主題(topic)和內容(payload)。MQTT 客戶端可以是任何執行有 MQTT 程式庫並通過網路連接至訊息代理的裝置,例如微型控制器或 大型伺服器。即時資訊傳遞系統,就是在訊息發佈者(Publisher) 發 佈訊息時能立即通知所有訂閱者(Subscriber)。MQTT 控制訊息最小只 有 2 位元組的資料。最多可以承載 256 Mb 的資料。共 14 種預定義 的訊息類型用於:連接客戶端與代理、斷開連接、發布資料、確認資料 接收、監督客戶端與代理的連接。

資訊的傳輸是透過主題(topic)管理的。發布者有需要發佈的資料時,其向連接的訊息代理發送攜帶有資料的控制訊息。代理會向訂閱此 主題的客戶端分發此資料。發布者不需要知道訂閱者的資料和具體位 置;同樣,訂閱者不需要組態發布者的相關資訊。關於資訊主題的定義, 攸關訂閱者能否方便訂閱的取得所需主題,將於下一節討論。

5.2.2 雷達現場站及中控資料展示站的 MQTT 通訊架構

如前節所述,MQTT 為求輕量化傳輸,其客戶端僅分為資訊發佈 者及接收者,二者間透過訊息代理做為資訊的仲介層。訊息除 2 位元 的檔頭資料,即接續著包含主題(topic)及內容(payload)的資訊。MQTT 的檔頭並無法確定發送端及接收端的身份,實務上是透過主題的定義, 讓發佈者表明身份或讓接收者得知對方身份。

圖 5.5 為建議之雷達現場及中控站的 MQTT 通訊架構,訊息代理 程式是一個伺服器,發佈者及訂閱者則透過 MQTT 函式庫開發程式。 由於 MQTT 已經是一個開放的 OASIA 國際標準格式,因此絕大多數 的主流程式語言均有程式庫支援 MQTT 通訊協定。

例如本計畫執行時的主要資料分析及網站後端程式語言所採用的 Python,其 MQTT client 端程式庫為 paho-mqtt, paho-mqtt 由 Eclipse 基 金會維護,其程式庫除支援 Python 外,亦支爰 Java、C++等。網頁前 端語言 JavaScript,則可透過 WebSockets 介面,WebSockets 已經是 HTML5 規範項目之一,因此近幾年的主要網路瀏覽器均有支援。

代理伺服器有開放源始碼的則有 EMQ、HiveMQ、VerneMQ、 ActiveMQ、Mosquitto 等。其中 ActiveMQ 由 Apache 基金會維護, Mosquitto 由 Eclipse 基金會維護,其餘則屬於商業公司。由於 ActiveMQ 是純 JAVA 程式寫程, 需在 JAVA 的平臺上執行,因此本計畫建議選擇 Mosquitto 做為訊息代理伺服器。

5-10


圖 5.5 實體主機主伺服器及備援伺器運作時同時間啟用狀態架構圖

5.2.3 MQTT 主題(topic)設計

MQTT 主題本質上是一個 UTF-8 編碼的字串。MQTT 訊息代理透 過主題過濾器將訂閱者訂閱的主題表示式(用於表示一個或多個主題) 與來自訊息發佈者所發佈的資料主題進行篩選,主題符合訂閱規則的 即送往訂閱者。

預先定義好的主題資源,可以確保資料發佈來源及屬性。良好的主 題資源規則有助於訂閱相關的主題。

主題與主題過濾器命名規則:

- 1. 所有的主題名和主題過濾器必須至少包含一個字元。
- 2. 主題名和主題過濾器大小寫視為不同。即 RADAR 與 Radar 為 不同的主題名。

- 3. 主題名和主題過濾器可以包含空格。HFRADAR 是合法主題名。
- 主題名或主題過濾器以前置或後置斜槓 / 區分。/radar 和 radar 是不同的。
- 5. 只包含斜槓 / 的主題名或主題過濾器是合法的。
- 6. 主題名或主題過濾器不能包含 null 字串(Unicode U+0000)。
- 主題名或主題過濾器是 UTF-8 編碼字串,除了不能超過 UTF-8 編碼字串長度限制之外,主題名或主題過濾器的層級數量沒有 額外限制。
- 主題保留字串包含(/#+\$),透過這些字串進行主題過濾或主題其功能:
- 9. 主題層級分隔符號 "/":

斜槓("/" U+002F)用於分割主題的每個層級,為主題名提供 一個分層結構。分隔符號結構化主題名設計。如果存在分隔符 號,它將主題名分割為多個主題層級。例如:aaa/bbb、aaa/bbb/ccc 和 aaa/bbb/ccc/ddd 這樣的消息主題格式,是一個層層遞進的關 係,可通過多層萬用字元同時匹配兩者,或者單層萬用字元只 匹配一個。

10.多層萬用字元"#":

#字元號("#" U+0023)是用於匹配主題中任意層級的萬用字 元。多層萬用字元表示它的父級和任意數量的子層級。

例如,如果用戶端訂閱主題 ihmt/hfradar/htcn/#,它會收到使用 下列主題名發佈的消息:

ihmt/hfradar/htcn

ihmt/hfradar/htcn/measurements

ihmt/hfradar/htcn/status/ups

因為多層萬用字元包括它自己的父級,所以 ihmt/# 也匹配單獨 的 ihmt 主題名, ihmt/hfradar/htcn/# 也可以匹配 ihmt/hfradar/htcn。

單獨的多層萬用字元 # 是有效的,它會收到所有的應用消息。 多層萬用字元必須單獨指定,或者跟在主題層級分隔符號後面。 多層萬用字元必須是主題篩檢程式的最後一個字元。因此, ihmt/hfradar# 和 ihmt/hfradar/#/measurements 都是無效的多層 萬用字元。

11.單層萬用字元"+":

加號("+" U+002B) 是只能用於單個主題層級匹配的萬用 字元。例如, ihmt/hfradar/+ 匹配 ihmt/hfradar/htcn 和 ihmt/hfradar/htcs, 但是不匹配 ihmt/hfradar/htcn/status。同時, 由於單層萬用字元只能匹配一個層級, ihmt/+ 不匹配 ihmt 但 是卻匹配 ihmt/。

在主題篩檢程式的任意層級都可以使用單層萬用字元,包括第 一個和最後一個層級,可以在主題篩檢程式中的多個層級中使 用它,也可以和多層萬用字元一起使用,+、+/hfradar/#、 ihmt/+/htcn 都有有效的。在使用單層萬用字元時,單層萬用字 元佔據篩檢程式的整個層級,ihmt+ 是無效的。

12.以 \$ 開頭的主題

服務端不能將 \$ 字元開頭的主題名匹配萬用字元(#或+)開 頭的主題篩檢程式, 訂閱 # 的用戶端不會收到任何發佈到以 \$ 開頭主題的消息,訂閱 +/monitor/Clients 的用戶端也不會收 到任何發佈到 \$SYS/monitor/Clients 的消息。服務端應該阻止 用戶端使用這種主題名與其他用戶端交換消息,用戶端注意不 能使用 \$ 字元開頭的主題。 服務端實現可以將 \$ 開頭的主題名用作其他目的。,例如 \$SYS/ 被廣泛用作包含伺服器特定資訊或控制介面的主題的 首碼。訂閱 \$SYS/# 的用戶端會收到發佈到以 \$SYS/ 開頭主 題的消息, 訂閱 \$SYS/monitor/+ 的用戶端會收到發佈到 \$SYS/monitor/Clients 主題的消息,如果用戶端想同時接受以 \$SYS/ 開頭主題的消息和不以 \$ 開頭主題的消息,它需要同 時訂閱 # 和 \$SYS/#。

根據以上規則,透過 MQTT 做為通訊協定使用,需事先透過主題 階層設計以明確定義資訊發送端的身份,由於區分大小寫,因此為避免 困擾建議一律使用大寫(或小寫)做為主題字串。主題可透過階層由大至 小區分所屬單位、測站類別、站碼、觀測及系統狀態...等。

5.2.4 MQTT 資料格式定義

MQTT 訊息包含主題(topic)及訊息載體(payload), 5.2.3 描述透過 主題定義資料發送者身份,以及訂閱者依需求或目的可針對相關主題 訂閱。訊息內容則通常存於訊息載體中。MQTT 的訊息載體理論上最 大可到 256Mb,實際運作則需視網路環境及伺服器處理能力而定。

MQTT 的訊息載體所承載的資料可以是二進位如圖檔或是字串。 通常測站本身需即時傳送的觀測資料或系統狀態都是屬於字串,為了 方便後續應用,針對此類字串格式的資料,建議採用 JSON (JavaScript Object Notation)。JSON 雖然是以 JavaScript 語法為基礎,但可獨立使 用,且許多程式設計環境均有相關套件可讀取 (剖析, parse) 並產生 JSON。

JSON 的資本資料類型如下(摘自 Wiki):

數值:十進位數,不能有前導0,可以為負數,可以有小數部分。

還可以用 e 或者 E 表示指數部分。不能包含非數,如 NaN。不區分整 數與浮點數。JavaScript 用雙精度浮點數表示所有數值。

字串:以雙引號""括起來的零個或多個 Unicode 碼位。支援反斜槓 開始的跳脫字元序列。

布林值:表示為 true 或者 false。

值的有序列表 (array): 有序的零個或者多個值。每個值可以為任意類型。序列表使用方括號[,]括起來。元素之間用逗號,分割。形如: [value, value]

物件(object):若干無序的「鍵-值對」(key-value pairs),其中鍵是 數值或字串。建議但不強制要求物件中的鍵是獨一無二的。物件以花括 號{開始,並以}結束。鍵-值對之間使用逗號分隔。鍵與值之間用冒號: 分割。

null 類型:值寫為 null。

使用 JSON 最大的好處是採用 ASCII 編碼,人眼即可判讀,同時 其格式即為 JavaScrip 物件,目前主流網頁瀏覽器(Web browser)即可處 理,非常適合用於網頁開放。做為數值資料來說,時間是一個重要的資 料型別,在 JSON 的資料格式中建議以 ISO 8601 作為時間格式字串, 其表示法為" yyyy-mm-ddTHH:MM:SS.SSSZ",其中秒數可以取整數、 Z 代表 UTC)。

5.3 資訊硬體環境建置建議

根據雷達中控站的需求規劃,至少需要的功能或服務包含:關聯式 資料庫(以下簡稱資料庫)、網站主機、訊息代理伺服器、網頁基礎圖資 服務、訊息訂閱及歸檔、資料分析處理、資料重分析處理…等。同時, 需要有備援機器安裝相同的應用軟體,以便主要機器發生故障時可以 接續運作。其運作架構如圖 5.6 所示,以此種方法建構的伺服器包含有 所有的應用軟體,雖然運作方法較為單純,但往往其中一個服務項目或 程式運作發生異常需要重新啟動時,需要整台機器重新啟動,這將導致 所有服務中斷。此外,備援伺服器無法同時開機提供服務,任何主伺服 器上面所做的更動較不易同步至備援伺服器中。

如果將這些服務拆分成獨立運作的機器,那麼針對異常的服務,只 要重新啟動該機器即可,其餘服務仍然在線上運作。虛擬化技術服務即 為在一台主機硬體 上建構出多台虛擬客體機的技術。每一台虛擬客體 機猶如一台獨立運行的電腦,彼此不會互相干擾。若將二部伺服器建立 叢集,則虛擬客體機即可隨時在二部伺服器中遷移(Migrate),如圖 5.7 所示,平時主伺服器與備援伺服器可分擔執行所需服務,當某一伺服器 出現硬體異常時,也可將所有服務遷移至另一伺服器中執行。虛擬主機 主伺服器及備援伺服器設為一個叢集時,虛擬客機可隨時於二部伺服 器相遷移(migrate),可選擇將所有虛擬客機同時啟用於單一伺服器中, 或分散於二部伺服器提高設備使用率,而且可依須求隨時調配。



圖 5.6 實體主機主伺服器及備援伺器運作時同時間啟用狀態示意圖



圖 5.7 虛擬主機主伺服器及備援伺服器設置關係示意圖

本節所提虛擬化技術指的是從單一實體的硬體系統上,建構出多 重模擬環境或專用資源。透過「虛擬機管理器」(hypervisor)建立數個各 自獨立的硬體環境,也就是俗稱的「虛擬機器」(VM)或稱為客體(guest machine),而執行虛擬機管理器的電腦則稱為主體(host machine)。

虛擬機管理器主要可以分為二大類,分別為原生型虛擬機管理器 及寄居型虛擬機管理器。原生型虛擬機管理器可直接在宿主的硬體上 安裝執行,其安裝過程如同安裝作業系統一般。寄居型虛擬機管理器則 執行在作業系統上,其安裝過程類似於安裝一種應用程式/軟體。

原生型虛擬機管理器其執行效率較高,較適合用於實際環境。市面 上常見的有商業授權的:VMware 的 vSphere、微軟的 Hyper-V,以及 開放源始碼的 KVM 及 Xen 等。其中 KVM 全名為核心基礎虛擬機器 (Kernel-based Virtual Machine),其核心實作為 Linux 核心模組,亦即可 以讓 Linux 系統轉換為 Hypervisor,提供 Linux 系統一個完全虛擬化解 決方案。目前主流 Linux 發行版本均具有 KVM 套件,亦即可在硬體支 援的情形下,讓 Linux 建置虛擬客體機。此種運作方式非常類似寄居型 虛擬機管理器。也有專門的虛擬機器理器,如 Proxmox Virtual Environment(簡稱 PVE 或 Proxmox,以下簡稱 Proxmox)。Proxmox 是一個開源的伺服器虛擬化環境 Linux 發行版。Proxmox 基於 Debian,使用基於 Ubuntu 的客製化核心,包含安裝程式、網頁控制台和命令列工具。本計畫所用虛擬機管理器即為 Proxmox。圖 5.8 為 proxmox 系統管理頁面,由圖中可以知道此為二部伺服器所組成之叢集,上面共有 9 個虛擬客體機,其中有七台處於開機狀態,二台處於關機狀態。

🗙 vm-Proxmox Virtual Environm X +						
← → C ☆ ▲ 不安	全 192.168.10.25) :8006/#v1:		contentImages:::7::2	☆ 👶 無痕模式 更新 ⋮	
🗶 PROXMOX Virtual Environment 6.3-2 Search						
Server View V	Virtual Machine 10	6 (front-end2)) on node 'vm'	▶ Start 🕐 Shutdown ∨ 🖉 Migrate >_	Console v More v 🕢 Help	
Datacenter (drtk)	Summary	Add ~	Remove Edit	Resize disk Move disk Revert		
102 (front-end)	>_ Console	Cons Mem	iory	4.00 GiB		
PBSTPA (pve2)	Hardware	Proc	essors	2 (1 sockets, 2 cores)		
Se local (pve2)	Cloud-Init	BIO:	5	Default (SeaBIOS)		
Iocal-lvm (pve2)	Options	Uisp	lay	Default		
~ ≣⊳ vm	Task History		I Controllor	Vieto SCSI		
100 (pfSense)	 Monitor 	© CD/	VD Drive (ide2)	none media=cdrom		
103 (DB-U20.04)	🖺 Backup	- Hard	Disk (scsi0)	local-zfs.vm-106-disk-0 size=100G		
104 (ihmt-tph)	ta Replication	≓ Netv	vork Device (net0)	virtio=C6:D1:FC:02:7B:BD,bridge=vmbr1,firewall=1		
105 (mosquitto) 106 (front-end2) 107 (LineOffice)	 Snapshots Firewall 					
Grueback Grueback	Permissions					
Tasks Cluster log						
Start Time ↓ End T	îme N	ode	User name	Description	Status	
Jun 25 17:13:31	🖵 vr	n	root@pam	VM/CT 107 - Console	*	
Jun 25 05:28:59 Jun 25	5 05:29:02 vr	n	root@pam	Update package database	ОК	
Jun 25 05:28:05 Jun 2	5 05:28:11 pv	/e2	root@pam	Update package database	ОК	
Jun 24 18:54:49 Jun 24	4 19:09:55 vr	n	root@pam	VM/CT 107 - Console	OK	
Jun 24 17:04:56 Jun 24	4 17:13:59 vr	n	root@pam	VM/CT 109 - Console	OK _	

圖 5.8 Proxmox 系統管理頁面二部伺服器所組成之叢集示意圖

5.3.1 虛擬機備份伺服器

虛擬機備份機制採用 Proxmox Backup Server(下以簡稱 PBS),PBS 是專門用於備份虛擬機,容器和物理主機的備份軟體。它是為 Proxmox 虛擬環境平臺專門最佳化的,可通過命令列和 Web 用戶介面讓安全地 備份和複製數據。跟 Proxmox 一樣,PBS 也是作為一個作業系統存在、 所以需要透過 ISO 安裝。安裝完成後的操作與 proxmox 系統管理畫面 整合。如圖 5.9 所示,為虛擬客體機的備份設定示意圖。

🗙 vm - Proximox Virtual Environm X +												
← → C 公 ▲ 不安全 192.168.10.250.8006/#v1:0:18:4:2:=contentImages:::7:21												
Create VM Create VM Create VM Create VM Create VM Create VM					😚 Create CT	👌 roo	t@pam 🗸					
Server View ~	Datacenter											🚱 Help
Datacenter (drtk)	Q Search	A	dd Re	move Edit	Job Detail Run now	Star	Storage	O Some g	uests are not co	vered by any bac	kup job.	Show
108 (VM 108)	Summary			All	Wednesday, Saturday	03:00	PBSTPA	102,106,104	1,108			
PBSTPA (pve2)	Cluster			All	Monday	00:00	PBSTPA	100,105,107	7			
local-lvm (pve2)	(ng) Ceph											
∨ 🛃 vm	Storage											
100 (pisense)	Backup											
103 (DB-U20.04)	Replication											
104 (ihmt-tph)	Permissions	-										
106 (front-end2)	Lusers											
107 (LineOffice)	API Tokens	5										
PBSTPA (vm)	🖀 Groups											
Sel local (vm)	Pools											
I local-lvm (vm)	🛉 Roles											
	a Authentica	tion										
	~				· ·							_
Tasks Cluster log												
Start Time ↓ End Tim	ne	Node	User na	me	Description					Status		
Jun 25 17:13:31	<u>ب</u> ب	/m	root@pa	am	VM/CT 107 - Console					014		
Jun 25 05:28:59 Jun 25 Jun 25 05:28:05 Jun 25	05:29:02 \	vm ove2	root@pa	am	Update package database					OK		
Jun 24 18:54:49 Jun 24	19:09:55 v	/m	root@pa	am	VM/CT 107 - Console					ок		
Jun 24 17:04:56 Jun 24	17:13:59	/m	root@pa	am	VM/CT 109 - Console					ОК		-

圖 5.9 proxmox 備份管理頁面每部虛擬客體設定固定時間備份示意圖

5.3.2 磁碟陣列建置建議

建議未來港研中心中控站需配有二部外接磁碟陣列,連接介面為 USB,因此,連接的磁碟陣列的主機需再透過 Network FileSystem (NFS) 或 Server Message Block / Common Iternet File System (SMB/CIFS)的方 式,透過網路供其餘主機掛載使用。連接方式如圖 5.10 所示,磁碟陣 列透過 USB 介面連至主機,主機以 USB 儲存池的方式分割適當大小 提供備份伺服器、檔案伺服器及網頁基礎圖資服務等擬擬機掛載後,再 由掛載之虛擬機以網路服務的方式與其餘虛擬機共享。一共有二部磁 碟陣列,因此類似圖 5.10 的接法共需二部伺服器,分別接一部 USB 磁 碟陣列。磁碟陣列透過 USB 介面連至主機,主機以 USB 儲存池的方式 分割適當大小提供備份伺服器、檔案伺服器及網頁基礎圖資服務等擬 機掛載後,再由掛載之虛擬機以網路服務的方式與其餘虛擬機共享,實 際需視情況安全調整。



40TB磁碟陣列

圖 5.10 磁碟陣列連結主機並掛載虛擬機示意圖。

5.3.3 港研中心遠端中控站虛擬客體機建置建議

根據 5.2 節所述的資料即時通訊服務,建議採用以下硬體:

(1)2U 機架式架構。

(2) CPU: Intel Xeon Gold 系列 16 核心 2.3GHz 兩顆。

(3)記憶體 128 GB。

(4)SAS 硬碟 300 GB x 4。

(5)作業系統: Linux 64bit。

(6)含鍵盤滑鼠

並需要下列功能或服務,關聯式資料庫(以下簡稱資料庫)、網站主 機、訊息代理伺服器、網頁基礎圖資服務、訊息訂閱及歸檔、資料分析 處理、資料重分析處理。在虛擬架構下,建議將服務分散至不同虛擬機, 使得每部虛擬機的功能單純,方便後續維護。此外將這些服務透過虛擬 客體機執行最大的好處是主要硬體及備援硬體可以同時上線,成為類 似熱備援的狀態,一方面充分利用硬體資源,另一方面可解決冷備援主 機的資訊過舊,與線上主機相差太大導致真正遇到狀況時無法即時上 線替換的問題。

每台客體機及其擔負摘要功能說明如下:

VM1 主資料庫: 關聯式資料庫,主要存儲單點或向量形式的資料, 由於觀測資料大部份均具有地理座標,因此可支援幾何查詢較佳, PostGIS 即為本計畫預計採用之方案。所需作業系統為 UBUNTU,主 要套件為 PostgreSQL 伺服器及 PostGIS 延伸格式。

VM2 網站主機:網站主要用途為提供人機介面,供人員瀏覽雷達 圖資及運作狀態。網站開發分為前、後端,前端通常負責與使用者互動, 主要呈現後端所送達的資訊,並蒐集使用者操作需求送至後端。後端則 負責將使用者需求連線至資料庫或相關服務擷取資訊後送至前端。作 業系統為 UBUNTU,主要套件為科學運算軟體(Python)、後端服務 (Django)、網站服務(Nginx)、關聯式資料庫用戶端。

VM3 訊息代理:主要用途為 MQTT 訊息代理,雷達現場站可透過 MQTT 將訊息送至 MQTT 代理伺服器,使用者再依需要至代理伺服器 訂閱相關訊息。例如網頁開發者透過 JAVA SCRITPT 訂閱訊息後,在 網頁開啟的狀態下,即可即時的接收現場機器傳送回來的訊息。作業系 統為 UBUNTU,主要套件為 Mosquitto。

VM4 網頁地圖服務: 雷達中控站採用的操作介面大量使用

Openlayers 做為圖層套疊及圖資呈現,除了呈現雷達本身產出的資料之 外,尚需基礎圖資如地形、空照圖等方可使呈現更加直觀。由於局內網 無法連線至外部網路使用現呈的底圖服務,因此需在內網建立網頁地 圖服務器(Web Map Service),以便提供基礎圖資。作業系統為 UBUNTU, 主要套件為科學運算軟體 PYTHON、GDAL(a translator library for raster and vector geospatial data formats),柵格和向量地理空間資料格式的轉 換器程式庫), Nginx or Apache, Django。

VM5 訊息訂閱、入庫及歸檔:由於現場測站隨時有可能有資料需要匯入關聯式資料庫或歸檔,這些作業通常是背景自動處理,如果與其他服務併在一起,常常因為其作業更動需要而重開機導致資料擷取中斷。專門的資料匯入虛擬機則可避免此類問題。同時資料取得後發佈一份至國立中央大學備援中控。作業系統為 UBUNTU,主要是套件為科學運算軟體 PYTHON、MQTT 使用者端程式庫。

VM6 檔案交換伺服器:此虛擬機主要需安裝在外接磁碟陣列上的 主機,透過主機將 USB 儲存池的空間分割一個區塊給此檔案交換伺服 器掛載,然後再以 NFS(或 SMB)的方式共享磁碟。其餘虛擬機器即可 視需要透過 NFS(或 SMB)掛載。作業系統為 UBUNTU,主要是套件為 NFS 伺服器。

VM7 虛擬機備份伺服器:雖然每個節點的虛擬化管理主機即可針 對其上的虛擬客體機進行備份,但主要備是備份在本機硬體中,透過 Proxmox Backup Server 即可集中備份並管理所有節點的虛擬機。 Proxmox Backup Server 本身即為作業系統,安裝完即可

VM8 開放街道地圖(OSM, Open Street Map):開放街圖是一個建 構自由內容之網上地圖協作計劃。如果要在局內網使用 OSM 做為基礎 圖資之一,則只要安裝 OpenStreetMap 圖磚伺服器即可。唯一的差別 是隨著時間愈久,圖層資料無法更新,如要維持資料版本,可每年重新 安裝一次即可。此為選項之一,需視實際運作狀況再行決定是否安裝。 作業系統為 UBUNTU,同時需要關聯式資料庫 PostgreSQL 及 PostGIS 延伸格式。VM1 資料庫所存資料為觀測資料,此處所需資料庫雖然也 可與 VM1 併用,但為了後續 OSM 資料更新時影響觀測資料,因此將 OSM 運行所需套件以一部虛擬機進行。

第六章 結論與建議

本計畫希冀輔助交通部航港局及臺中港務分公司,提供更完整 的服務,做為各單位管理船舶進出港區的參考依據,亦提供港灣設施 施工條件之參考標準,目標為建立一套高頻資料處理及瀏覽系統,以 監測臺灣海峽中部之海氣象資訊。為達成計畫目標與需求,本研究規 劃工作執行分為四大項:精進雷達訊號分析技術及解算最佳海氣象 量值、雷達資料品質評估、雙雷達系統整合與驗證、建立海況資料展 示系統,未來各單位面對災害發生時,能適時掌握海氣象現況,做為 決策應用,本計畫研究成果之結論與建議彙整如下:

- 本計畫中說明海氣象參數包括海流、波浪、方向波譜與風等演算方法,本研究採用傳統的波束合成技術來提取不同方位的都卜勒頻譜,以估計徑向速度、波參數、風速及其方向。另外也採用了多重訊號 演算法,以更精細的角度解析度提取徑向速度,兩種方法提供了合理的海表面流徑向速度結果。根據雷達資料和 AWAC 在臺中港入 口附近記錄的現場測量海流資料,採用時間序列和散點比較來評估從 HTCN 站的雷達資料中估算的徑向速度的偏差,結果發現兩種 方法在估算徑向速度方面效果都很好,但多重訊號演算法的不確定 性要大於波束合成演算法。
- 2. 本計畫使用調整之ImageFOL來取得都卜勒距離譜之一階峰與二階 峰的範圍來計算海氣象參數,與常數門檻值方法及原始 ImageFOL 方法進行比較,結果發現本研究所使用之調整的 ImageFOL 方法對 於決定一階區域比其他方法更加合適。
- 3. 本研究建立在海氣象參數演算前之第1級產品(都卜勒距離譜)品管, 其品管由四個單獨指標組合而成,包括一階峰、二階峰訊噪比門檻 值及兩者間船舶雜訊之訊噪比門檻值,如果有兩個以上的因子處於 良好水準,都卜勒頻譜將被評價為良好水準,波浪參數的計算具有 較高的可靠性。經品管後測試演算海流結果,依垂直海岸線方向由

雷達位置的徑向速度擴展到離雷達站 30 公里以上,可信度很高。 然而南北兩側則呈現低訊噪比,兩邊的徑向速度的可信範圍很短, 由此可知確實存在副波瓣效應(Sidelobe effect)的影響;經品管後測 試演算波浪參數結果,波浪參數的範圍比海流參數的範圍更短,這 是由於二階分量的能量受雙反射效應而明顯減少所致。船舶雜訊移 除品管方面測試回歸法、二維移動平均法和平滑法來識別和去除船 舶回波,三種方法結果良好,考慮演算效率之需求,本研究我們建 議將二維移動平均技術作為預設方法,以減少耗時問題。

- 4. 根據雷達估算波浪參數和 AWAC 獲得現場量測波浪資料的比較, 發現雷達演算結果表現非常好。此外存在雷達測得的波浪參數與現 場測量資料之間的比率,此比例係數可能因雷達頻率、當地條件和 使用的系統而有所變化,經過波浪參數比例係數調整後,Hs 的結 果與現場量測結果一致。然而,由於缺乏大量現場量測資料,對估 計結果的評估仍然是有限的。目前這些比例係數可被應用於校正都 卜勒距離譜估算波參數。
- 5. 由於 HTCS 站的訊號品質較差,因此先根據 HTCN 站的結果繪製 空間分布之波參數,繪製結果表明,在計算過程中仍然存在著空間 分佈不均的問題需要解決,這個原因與雷達電磁波與波浪間的角度 有關。在單一雷達站的情況下,這一部分需要在未來進行改進。對 於雙雷達系統的現有資料,空間分布不均匀的問題可以得到解決, 報告中呈現雙雷達資料繪製波場的一個案例,其結果合理。
- 6. 本研究之雷達演算波譜與現場量測資料作比較,演算波譜與現場測量資料的比值可以看作是傳遞函數的倒數,比較結果發現大部分波 浪頻譜帶的相關係數都大於 0.6,但在頻率低於 0.1Hz 相關係數開 始下降,結果與傳遞函數特性吻合,傳遞函數對頻譜的修正有很好 的作用。
- 為了從雷達海回波資料中繪製風場圖,目前採用示性波高和週期反 演風速的方法。然而對於低於10公尺/秒的低風速,其結果的不確

定性很大。另外,多重訊號演算法計算之一階波峰的功率可以幫助 減少低風速下U10的估計偏差。風向估算方面仍然與現場量測資料 有所偏差,目前雷達站單一風向演算方法有著很高的不確定性,如 果經過雙雷達系統的改善與演算,這個問題可以得到改善。

- 8. 本計畫於資料庫與展示介面建置部分,海流與波浪高度產品經過作業化品管與驗證,並初步完成展示系統的建置,提供臺中港港務分公司港灣環境資訊,做為決策應用與規劃設計使用。
- 9. 臺中港雷達南站於 2021 年 9 月建置完畢,但由於訊號干擾的影響, 該站的資料品質比較差需要校正,目前暫時使用 1 至 14 號天線的 資料。根據 HTCN 和 HTCS 站資料估算的徑向速度實例,在 GDOP <5.0 和網格間距為 0.01×0.01 度的條件下,計算出海洋表面 流場 u 和 v 分量,結果建議以波束合成演算法估算流場為優先。
- 10. 建議未來可於雷達雙站觀測覆蓋範圍內提供實測資料如漂流浮標 等,分析不同 GODP 位置之徑向速度、波參數等,對於雷達演算 海氣象參數之準確性有所幫助。
- 11.本計畫於資料庫與展示介面建置部分,現階段已初步完成展示系統的建置,並提出未來之即時資訊傳遞系統規劃與資訊硬體環境建置 建議,其中包含虛擬機備份伺服器、磁碟陣列建置、遠端中控站虛擬客體機建置建議等。
- 12.本計畫順利執行並完成預期工作項目,包含精進往昔學者處理方法, 改善雷達訊號辨識與分析技術,估算與優化雷達回波演算方式,解 算最佳海氣象量值,開發雷達波觀測資料自動分析技術,以實現作 業化雷達觀測,並且將資料與演算結果進行品質管理與評估。

參考文獻

- Alattabi, Z.R., Cahl, D., & Voulgaris, G. (2019). Swell and Wind Wave Inversion Using a Single Very High Frequency (VHF) Radar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 36, 987-1013
- Atanga, J. N. and L. R. Wyatt (1997). "Comparison of inversion algorithms for HF radar wave measurements." IEEE Journal of Oceanic Engineering 22(4): 593-603.
- Barrick, D. (1972). Remote sensing of sea state by radar. Ocean 72 -IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment.
- 4. Barrick, D. and B. Lipa (1997). "Evolution of Bearing Determination in HF Current Mapping Radars." Oceanography 10.
- Barrick, D. E. (1971). "First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 20(1): 2-10.
- Barrick, D. E. (1972). Remote sensing of sea state by radar. Ocean 72 -IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment.
- 7. Barrick, D. E. (1977). "Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra." Radio Science 12(3): 415-424.
- 8. Barrick, D. (2005a). SeaSonde power to range. In. http://www.codaros.com/Manuals/Informative/
- Barrick, D.E. (2005b). Geometrical dilution of statistical accuracy (gdosa) in multi-static hf radar networks. In. CODAR reference document
- Bhuiya, S. N., F. Islam and M. Matin (2012). "Analysis of Direction of Arrival Techniques Using Uniform Linear Array." International Journal of Computer Theory and Engineering 4: 931-934.

- Cai, L., Shang, S., Wei, G., He, Z., Xie, Y., Liu, K., Zhou, T., Chen, J., Zhang, F., & Li, Y. (2019). Assessment of Significant Wave Height in the Taiwan Strait Measured by a Single HF Radar System. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 36, 1419-1432
- 12. Capon, J. (1969). "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis." Proceedings of the IEEE 57(8): 1408-1418.
- Chapman, R., Shay, L., Graber, H., Edson, J., Karachintsev, A., Trump, C., & Ross, D. (1997). On the accuracy of HF radar surface current measurements: Intercomparisons with ship-based sensors. Journal of Geophysical Research, 1021, 18737-18748
- Chen, Z., Zezong, C., Yanni, J., Lingang, F., Gengfei, Z (2013). Exploration and Validation of Wave-Height Measurement Using Multifrequency HF Radar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 30, 2189-2202.
- Chuang, L., Chung, Y.-J., & Tang, S. (2015). A Simple Ship Echo Identification Procedure With SeaSonde HF Radar. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12, 1-5
- Cook, T. M. and L. K. Shay (2002). "Surface M2 tidal currents along the North Carolina shelf observed with a high-frequency radar." Journal of Geophysical Research: Oceans 107(C12): 15-11-15-12.
- Crombie, D. D. (1955). "Doppler Spectrum of Sea Echo at 13.56 Mc./s." Nature 175: 681.
- Dao, D.-T., H. Chien, J.-W. Lai, Y.-H. Huang and P. Flament (2019). Evaluation of HF radar in mapping surface wave field in Taiwan Strait under winter monsoon. OCEAN's 2019-Marseille: 1-7.
- De Paolo, T., & Terrill, E. (2007). Skill Assessment of Resolving Ocean Surface Current Structure Using Compact-Antenna-Style HF Radar and the MUSIC Direction-Finding Algorithm. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology - J ATMOS OCEAN TECHNOL, 24

- Dexter, P. E. and S. Theodoridis (1982). "Surface wind speed extraction from HF sky wave radar Doppler spectra." Radio Science 17(03): 643-652.
- Dzvonkovskaya, A., Gurgel, K., Rohling, H., & Schlick, T. (2008). Low power High Frequency Surface Wave Radar application for ship detection and tracking. In, 2008 International Conference on Radar (pp. 627-632)
- 22. Dzvonkovskaya, A., & Rohling, H. (2006). Target Detection with Adaptive Power Regression Thresholding for HF Radar.
- 23. Dzvonkovskaya, A.L., & Rohling, H. (2007). HF radar ship detection and tracking using WERA system. In, 2007 IET International Conference on Radar Systems (pp. 1-5)
- Essen, H. H., K. W. Gurgel and T. Schlick (1999). "Measurement of ocean wave height and direction by means of HF radar: An empirical approach." Deutsche Hydrografische Zeitschrift 51(4): 369-383.
- 25. Fernandez, D. M., H. C. Graber, J. D. Paduan and D. E. Barrick (1997)."Mapping wind directions with HF radar." Oceanography 10(2): 93-95.
- 26. Fujii, S., M. L. Heron, K. Kim, J. W. Lai, S. H. Lee, X. Wu, X. Wu, L. R. Wyatt and W. C. Yang (2013). "An overview of developments and applications of oceanographic radar networks in Asia and Oceania countries." Ocean Science Journal 48(1): 69-97.
- 27. Gill, E. W. and E. J. Walsh (2001). "High-frequency bistatic cross sections of the ocean surface." Radio Science 36(6): 1459-1475.
- Godara, L. C. (1997). "Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations." Proceedings of the IEEE 85(8): 1195-1245.
- Green, D., E. Gill and W. Huang (2009). "An Inversion Method for Extraction of Wind Speed From High-Frequency Ground-Wave Radar Oceanic Backscatter." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47(10): 3338-3346.

- 30. Gurgel, K. (1994). Shipborne measurement of surface current fields by HF radar. Proceedings of OCEANS'94.
- Gurgel, K. W., G. Antonischki, H. H. Essen and T. Schlick (1999). "Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing." Coastal Engineering 37(3): 219-234.
- Gurgel, K. W., H. H. Essen and S. P. Kingsley (1999). "High-frequency radars: physical limitations and recent developments." Coastal Engineering 37(3): 201-218.
- 33. Gurgel, K. W., H. H. Essen and T. Schlick (2006). "An Empirical Method to Derive Ocean Waves From Second-Order Bragg Scattering: Prospects and Limitations." IEEE Journal of Oceanic Engineering 31(4): 804-811.
- 34. Gurgel, A.D.I.K.-W., & Schlick, T. (2010). HF Radar WERA Application for Ship Detection and Tracking 1. In
- Hardman, R. L., L. R. Wyatt and C. C. Engleback (2020). "Measuring the Directional Ocean Spectrum from Simulated Bistatic HF Radar Data." Remote Sensing 12(2).
- 36. Hashimoto, N. and M. Tokuda (1999). "A Bayesian Approach for Estimation of Directional Wave Spectra with HF Radar." Coastal Engineering Journal 41(2): 137-149.
- Hashimoto, N., L. R. Wyatt and S. Kojima (2003). "Verification of a Bayesian Method for Estimating Directional Spectra from HF Radar Surface Backscatter." Coastal Engineering Journal 45(2): 255-274.
- Hasselmann, K. (1971). "Determination of Ocean Wave Spectra from Doppler Radio Return from the Sea Surface." Nature Physical Science 229: 16.
- Hasselmann, K., P. Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., E. Cartwright, D., Enke, K., A Ewing, J., Gienapp, H., E. Hasselmann, D., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W., & Walden,

H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). In (pp. 1-95)

- 40. Helzel, T., M. Kniephoff and L. Petersen (2006). WERA: Remote ocean sensing for current, wave and wind direction. 2006 IEEE US/EU Baltic International Symposium.
- Heron, M. L., P. E. Dexter and B. T. McGann (1985). "Parameters of the air-sea interface by high-frequency ground-wave Doppler radar." Marine and Freshwater Research 36(5): 655-670.
- 42. Heron, M. L. and A. Prytz (2002). "Wave height and wind direction from the HF coastal ocean surface radar." Canadian Journal of Remote Sensing 28(3): 385-393.
- 43. Heron, S. and M. L. Heron (1998). "A Comparison of Algorithms for Extracting Significant Wave Height from HF Radar Ocean Backscatter Spectra." Journal of Atmospheric and Oceanic Technology - J ATMOS OCEAN TECHNOL 15.
- 44. Heron, S. F. and M. L. Heron (1998). "A Comparison of Algorithms for Extracting Significant Wave Height from HF Radar Ocean Backscatter Spectra." Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 15(5): 1157-1163.
- 45. Hilmer, T. (2010). Radar Sensing of ocean wave heights. Master.
- Hisaki, Y. (1996). "Nonlinear inversion of the integral equation to estimate ocean wave spectra from HF radar." Radio Science 31(1): 25-39.
- Howell, R. and E. J. Walsh (1993). "Measurement of ocean wave spectra using narrow-beam HE radar." IEEE Journal of Oceanic Engineering 18(3): 296-305.
- Howell, R. K. (1990). An algorithm for the extraction of ocean wave spectra from narrow beam HF radar backscatteer. Masters Thesis (Masters), Memorial University of Newfoundland.

- 49. Huang, W., Gill, E., Wu , S., Wen, B., Yang, Z., & Hou, J. (2004). Measuring surface wind direction by monostatic HF ground-wave radar at the eastern China Sea. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29, 1032-1037
- Huang, W., Gill, E., Wu, X., & Li, L. (2012). Measurement of Sea Surface Wind Direction Using Bistatic High-Frequency Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50, 4117-4122
- Jangal, F., Saillant, S., & Helier, M. (2008). 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, 552-556
- 52. Kendall, M.G., A. Stuart, J. K. Ord (1967). The advanced theory of statistics. London: Charles Griffin and Company Ltd
- 53. Kirincich, A. (2016). Remote Sensing of the Surface Wind Field over the Coastal Ocean via Direct Calibration of HF Radar Backscatter Power. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 33, 1377-1392
- 54. Kirincich, A. R., T. de Paolo and E. Terrill (2012). "Improving HF Radar Estimates of Surface Currents Using Signal Quality Metrics, with Application to the MVCO High-Resolution Radar System." Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 29(9): 1377-1390.
- 55. Kirincich, A. (2017). Improved Detection of the First-Order Region for Direction-Finding HF Radars Using Image Processing Techniques. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 34, 1679-1691
- 56. Li, C., Wu, X., Yue, X., Zhang, L., Liu, J., Li, M., Zhou, H., & Wan, B. (2017). Extraction of Wind Direction Spreading Factor From Broad-Beam High-Frequency Surface Wave Radar Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55, 5123-5133
- 57. Lipa, B. and D. Barrick (1983). "Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data:

Application at ARSLOE." IEEE Journal of Oceanic Engineering 8(4): 226-253.

- Lipa, B. and D. E. Barrick (1986). "Extraction of sea state from HF radar sea echo: Mathematical theory and modeling." Radio Science 21(1): 81-100.
- 59. Lipa, B. and B. Nyden (2005). "Directional wave information from the SeaSonde." IEEE Journal of Oceanic Engineering 30(1): 221-231.
- 60. Lipa, B. J. and D. E. Barrick (1982). Analysis methods for narrow-beam high-frequency radar sea echo. L. Wave Propagation.
- Lipa, B. J. and D. E. Barrick (1986). "Extraction of sea state from HF radar sea echo: Mathematical theory and modeling." Radio Science 21(1): 81-100.
- 62. Longuet-Higgins, M., D. E. Cartwright and N. D. Smith (1963). Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. Ocean Wave Spectra, proceedings of a conference, Easton, Maryland, Prentice-Hall.
- Long, A., & Trizna, D. (1973). Mapping of North Atlantic winds by HF radar sea backscatter interpretation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 21, 680-685
- 64. Lopez, G., Conley, D. C., & Greaves, D. (2016). 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, 245-261
- 65. Lukijanto, L., N. Hashimoto and M. Yamashiro (2011). "VERIFICATION OF A MODIFIED BAYESIAN METHOD FOR ESTIMATING DIRECTIONAL WAVE SPECTRA FROM HF RADAR." Coastal Engineering Proceedings 1(32).
- 66. Mantovani, C., Corgnati, L., Horstmann, J., Rubio, A., Reyes, E., Quentin, C., Cosoli, S., Asensio, J.L., Mader, J., & Griffa, A. (2020).

Best Practices on High Frequency Radar Deployment and Operation for Ocean Current Measurement. Frontiers in Marine Science, 7

- 67. Maresca, J. W. and T. M. Georges (1980). "Measuring rms wave height and the scalar ocean wave spectrum with HF skywave radar." JGR Oceans 85: 2759-2772.
- N. Bhuiya, S., Islam, F., & Matin, M. (2012). Analysis of Direction of Arrival Techniques Using Uniform Linear Array. International Journal of Computer Theory and Engineering, 4, 931-934
- Paduan, J. D., R. Delgado, J. F. Vesecky, Y. Fernandez, J. Daida and C. Teague (1999). Mapping coastal winds with HF radar. Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement (Cat. No.99CH36331).
- 70. Paduan, J. D. and L. Washburn (2013). "High-frequency radar observations of ocean surface currents." Ann Rev Mar Sci 5: 115-136.
- Ramos, R.J., Graber, H. C., & Haus, B. K (2009). Observation of Wave Energy Evolution in Coastal Areas Using HF Radar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26, 1891-1909
- Rice, S. O. (1951). "Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces." Communications on Pure and Applied Mathematics 4(2-3): 351-378.
- 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 (2019). "The Global High Frequency Radar Network." Frontiers in Marine Science 6(164).
- 74. Robinson, A. M., L. R. Wyatt and M. J. Howarth (2011). "A two year comparison between HF radar and ADCP current measurements in Liverpool Bay." Journal of Operational Oceanography 4(1): 33-45.

- Rubio, A., J. Mader, L. Corgnati, C. Mantovani, A. Griffa, A. Novellino, C. Quentin, L. Wyatt, J. S.-S., J. Horstmann, P. Lorente, E. Zambianchi, M. Hartnett, C. Fernandes, V. Zervakis, P. Gorringe, A. Melet and I. Puillat (2017). "HF Radar Activity in European Coastal Seas: Next Steps toward a Pan-European HF Radar Network." Frontiers in Marine Science 4(8): 1-20.
- Schmidt, R. (1986). "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 34: 276-280.
- 77. Shahidi, R. and E. Gill (2020). "A New Automatic Nonlinear Optimization-Based Method for Directional Ocean Wave Spectrum Extraction From Monostatic HF-Radar Data." IEEE Journal of Oceanic Engineering: 1-19.
- Shay, L. K., J. Martinez-Pedraja, T. M. Cook, B. K. Haus and R. H. Weisberg (2007). "High-Frequency Radar Mapping of Surface Currents Using WERA." Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 24(3): 484-503.
- 79. Shen, W. (2011). An algorithm to derive wind speed and direction as well as ocean wave directional spectra from HF radar backscatter measurements based on neural network. In. Hamburg: Universität Hamburg
- Shen, W., K.-W. Gurgel, G. Voulgaris, T. Schlick and D. Stammer (2012). "Wind-speed inversion from HF radar first-order backscatter signal." Ocean Dynamics 62(1): 105-121.
- Stewart, R. H. and J. R. Barnum (1975). "Radio measurements of oceanic winds at long ranges: An evaluation." Radio Science 10(10): 853-857.
- Teague, C. (1986). "Multifrequency HF radar observations of currents and current shears." IEEE Journal of Oceanic Engineering 11(2): 258-269.

- 83. Tian, Y., Tian, Z., Zhao, J., Wen, B., & Huang, W. (2020). Wave Height Field Extraction From First-Order Doppler Spectra of a Dual-Frequency Wide-Beam High-Frequency Surface Wave Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 58, 1017-1029
- 84. Tian, Y., Wen, B., Tan, J., & Li, Z. (2017). Study on Pattern Distortion and DOA Estimation Performance of Crossed-Loop/Monopole Antenna in HF Radar. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 65, 6095-6106
- Voronovich, A. G. and V. U. Zavorotny (2017). "Measurement of Ocean Wave Directional Spectra Using Airborne HF/VHF Synthetic Aperture Radar: A Theoretical Evaluation." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 55(6): 3169-3176.
- 86. Wang, W., & Gill, E.W. (2016). Evaluation of Beamforming and Direction Finding for a Phased Array HF Ocean Current Radar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 33, 2599-2613
- 87. Wyatt, L. (1990). "A relaxation method for integral inversion applied to HF radar measurement of the ocean wave directional spectrum." International Journal of Remote Sensing 11(8): 1481-1494.
- Wyatt, L., B. W. Green, A. Middleditch, M. D. Moorhead, J. Howarth, M. Holt and S. Keogh (2006). "Operational Wave, Current, and Wind Measurements With the Pisces HF Radar." IEEE Journal of Oceanic Engineering 31(4): 819-834.
- Wyatt, L., J. Venn, G. Burrows, A. Ponsford, M. Moorhead and J. V. Heteren (1986). "HF radar measurements of ocean wave parameters during NURWEC." IEEE Journal of Oceanic Engineering 11(2): 219-234.
- Wyatt, L. R. (1995). "High order nonlinearities in HF radar backscatter from the ocean surface." IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation 142(6): 293-300.

- 91. Wyatt, L.R., Liakhovetski, G., Graber, H. C., & Haus, B. K. (2005). Factors Affecting the Accuracy of SHOWEX HF Radar Wave Measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 22, 847-859
- 92. Wyatt, L. R., A. Mantovanelli, M. L. Heron, M. Roughan and C. R. Steinberg (2018). "Assessment of Surface Currents Measured With High-Frequency Phased-Array Radars in Two Regions of Complex Circulation." IEEE Journal of Oceanic Engineering 43(2): 484-505.
- 93. Wyatt, L. R. (2019). "Measuring the ocean wave directional spectrum 'First Five' with HF radar." Ocean Dynamics 69(1): 123-144.
- Wyatt, L. R., J. J. Green and A. Middleditch (2011). "HF radar data quality requirements for wave measurement." Coastal Engineering 58(4): 327-336.
- Young, I. R. (1995). "The determination of confidence limits associated with estimates of the spectral peak frequency." Ocean Engineering 22(7): 669-686.
- 96. Young, I. R. and L. A. Verhagen (1996). "The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Part 1. Total energy and peak frequency." Coastal Engineering 29(1): 47-78.
- 97. Zhou, H., C. Wang, J. Yang, Y. Tian and B. Wen (2017). "Wind and Current Dependence of the First-Order Bragg Scattering Power in High-Frequency Radar Sea Echoes." IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters PP: 1-5.

附錄一、期中審查意見及辦理情形說明表

交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質) ☑期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱:應用雷達技術於海象觀測作業化之校修與維運 執行單位:國立中央大學

參與審查人員	執行單位說明	本所計畫執行單
及其所提之意見		位審查意見
(一) 國立中山大學 李忠潘委員		
1. 以都卜勒原理測量風速及流	海流與風皆可經由都卜勒距離	1.本案期中報告
速,必須假設空氣及水中,具	譜之一階峰計算而得,而一階峰	修正稿及审查
有與風及流等速移動的物體,	能量主要來自電磁波對其半波	意見研提處理
而其雪達反射波的頻率偏移	長波浪作用之布拉格散射,本計	情形答覆意見
一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	畫雷達波波長約 11 公尺,對波	表,初步審查
才肥用為風迷及流迷推井之	長 5.5 公尺左右之波浪會產生強	符合契約工作
用。本計畫所用的笛瑾波波長	烈回波訊號。如委員所說,此雷	項目要求與會
約11m,則在測量的海域,可	達觀測系統確實存在觀測條件	議結論規定。
有此等物體存在?	限制,若浪太小,海面回波強度	2. 承辦單位將廣
	小訊號微弱,若浪太大則演算結	續督導計畫內
	果會偏離理論解析值,對於雷達	容執行,文陳
	觀測之環境限制會於期末報告	閱後擬存查。
	中補充說明,謝謝委員指教。	
2. 建議以專節說明,以都卜勒原	於期末報告第二章專節補充說	1.本案期中報告
理利用雷達反射波測量風速,	明以都卜勒原理利用雷達反射	修正稿及審查
流速,及波浪的原理。	波測童風速,流速,及波浪之原	意見研提處理
	埋,謝謝 安貝廷議。	情形 行形 各復 意見
		衣,初步番鱼
		村合契約 上作
		坝日安水 與曾
		我 给 确 观 火 。 う 五 竝 留 ム 收 唐
		2. 承班 平 但 府 质
		領目守可重门
		合扒11,又休 朋么好方本。
(一) 國力出功十歲 於上堅禾昌		风夜揪竹豆。
	长 14 竺崎4	1 十 安 田 中 却 म
1. 期屮報告需有工作進度追蹤	小 1.4 即增加期十進及說明興險 計, 並太第上音诺左曲由淮亞針	1. 伞杀别十報告
興檢討,然後才是各工作項的	可、业がおハ早備九期十建侵結	防止 何 人 番 笪 音 月 皿 坦 虐 囲
內容與進度之說明,述及前者	册·九成之上作的谷佃逃。 金平 胡生之撰官方士 俞太阳 士 超上	心 几 例 俠 处 垤 善 书
之文字(第六章)建議應在第一	11.1 一 一 拱 向 刀 八 冒 /	日,10合復忌兄 表,初步審查

參與審查人員		本所計畫執行單
及其所提之意見	執行単位説明	位審查意見
章集中更明確說明;後者雖分	與方式,加強文章之完整性。謝	符合契約工作
敘於數章,但各段說明的完成	謝委員指教。	項目要求與會
度與可閱讀性稍嫌不足,文字	(1)將文章格式重新確認與調整;	議結論規定。
段落之連接整合及語意之表	修正統一以西元年表示;於	2. 承辦單位將賡
達或有前後順序不赏、重複、	p.2-16 式(4)、(5)修正為式	續督導計畫內
武矛盾。撰寫方式(特別是第	(2.5)、 (2.6) ,於 p.2-19 式(6)修 工 为 $t(2.7)$ 、 t 大 六 軟 幼 泥	谷轨行,又陳
一音) 讓人學得早詳名語音的	止為式(2.1), 補允义獻缺漏· n21 诺本 Poarty Cool at al	別伎擬仔宣。
平) 磙八見行龙阳夕阳忘时	p.2-1 補元 Koarty, Cook et al., 2019、n 3-19 補充 Coastal	
拼凑,一段西个走众间里, 机	Observing Research and	
定太複雜,則者定不到一行	Development Center(CORDC)	
字,没逗點就已結束(句點);	手冊 HFRNet RTV Processing	
後者是一段話中塞了幾個觀	& Q.C. 與 Lipa, B. and D.	
念或議題,但相互關係不清、	Barrick (1983), 會於期末報告	
文意不明。介紹理論部分常有	持續補充又獻,謝謝安貝指	
超過半頁文字說明,卻只有一	(2)图 1 2 、 1 1 逆加比例 尺 , 謝謝	
個句點,建議適度分段。報告	(2)回 1.2、4.1 培加比例尺,翻翻	
撰寫的其他缺失:	(3)文章格式重新確認與調整,謝	
(1)行距太大、民國年與西元	谢委員。	
年交雜、內文的圖表號及	(4)將"適性波高"修正為"示性波	
公式編號不對或錯置、仍	高", 謝謝委員指正。	
有數處缺文獻交代。		
(2)地圖上都要有比例尺,才		
能讓讀者粗估距離。		
(3) 圖與表的編號方式應一		
致。		
(4)適性波高→示性波高		
2.第一章:	(1)與(2)工作項目中的「品質評	1.本案期中報告
(1)計畫目的與工作目標不明確,	估」為建立自動化分析與品管	修正稿及审查
例如工作目標 4 是「品質評	程序,以提升雷達資料之品	意見研提處理
估」?	質,四項工作項目依照合約要	情形答覆意見
(2)第1.3節的工作目標與執行分	求羅列。於1.3節增加描述與	表,初步審查
項之對應關係不夠明確。	執行分項之關係,加強說明之	符合契約工作
(3)p.1-2 海岸帶(距海岸線 200	间的崩理性。谢谢安貝指教。 (2) 共 - 1 - 2 生 本 「 主	項目要求與會
公里以上)應是文字誤植,請	(5)於 p.1-2 修止為 向殒笛送测 55 页 達 200 八田, 并提供细调	一 報給 備 規 足 。
修止。 (1)n15 是么一行力「西法齨测	海域內之海流、波浪和国的測	4. 小州干仙 府僚 續督 道計 書 內
▲蓋範圍即為計書研究區	量」,謝謝委員指正。	77日17日日日

參與審查人員 及其所提之意見	執行單位說明	本所計畫執行單 位審查意見
域」,是否應為「二座雷達觀 測範圍之交集區域為計畫研 究區域」?	(4)本計畫研究之海象參數亦包 含只有單站雷達函蓋範圍之 計算如波高、週期、風速等, 依委員建議於 p.1-4 修正為 「雷達觀測涵蓋範圍即為計 畫研究區域,計畫目標之雙雷 達參數整合之研究區域則為 二座雷達觀測範圍之交集區 域」,謝謝委員建議。	容執行,文陳 閱後擬存查。
 3.第二章: (1)整理各分析理論的文獻研究, 卻沒明確交代後續各工作項 採用的是哪一套方法。 (2)圖2.3之橫軸與縱軸之單位? (3)圖 2.4 之圖名中 IQ 訊號應是 I 訊號? (4)圖 2.7 之四個分圖的順序關 係? 	 (1)於期末報告第二章各節補強 說明計畫中各工作項目所採 用之研究理論與方法,謝謝委員指教。 (2)圖 2.3 之橫軸為 range cell,縱 軸為 count 值,已補充修正, 謝謝委員指正。 (3)是的,圖 2.4 修正為「第一支 天線的 I 訊號圖」,謝謝委員 指正。 (4)圖 2.7 之分圖順序補充由(a)至 (d)來標註,謝謝委員指正。 	1.本修意情表符項議承續容閱 案正見形,合目結辦督執援 期稿研答初契要論單導行擬 和發處意審工與定將畫文後 告查理見查作會。廣內陳。
 4.第三章: (1) p.3-7 根據兩個論據判斷二 階峰受船舶影響,此是根據哪 一文獻? (2)圖 3.4 中 color bar 之最大與 最小值皆採用近似的紅色,應 採更能區分的顏色。 5.第四章: 	 (1)判斷二階峰受船舶影響之論 據為Wyatt等人(2011)研究及 本研究之經驗所建立,已於報 告 p.3-6 補充修正,謝謝委員 指教。 (2)謝謝委員指教,會於期末報告 版本檢視所有成果圖,改善顏 色混淆的問題。 	 本區見一個人的 本正見形,合目結辨督執機 本容項義承督教機 之下,容目結辨 等行 有項義承督執機 之重 本案
 (1) 圖 4.2~4.4 是使用集水區分 水嶺法?該法如何應用在此 議題未見說明。圖中採用 present formula,這是哪一公 	 (1)集水區分水嶺法會於期末報 告完整補充說明;圖中 present formula 為使用 Heron 及 Heron(1998)之公式加上式 4.1 	- 不 修正研 程 意 見 形 容 見 形 容 夏 慶 見 一 て 審 査 理 見 査 審 査 雪 野 (初 の の の の の の の の の の の の の の の の の の

參與審查人員	執行單位說明	本所計畫執行單
及其所提之意見		位審查意見
式? 在本章或 p.2-20 的理論	校正之計算結果,於 p.4-2 補	項目要求與會
說明中未見交代。	充說明,謝謝委員指教。	議結論規定。
(2) 為何採用公式(4.1)做回歸校	(2)波浪參數於不同雷達射線與	2. 承辦單位將賡
正? 未說明。	波浪夾角之關係圖(圖 4.6)呈	續督導計畫內
	現 cos function 之關係,故以	容執行,文陳
	此做為回歸校正之依據,於期	閱後擬存查。
	中報告 p.4-5 補充說明,謝謝	
	委員指教。	
6		1.太宰期中報告
	(1) 資料庫設計會參考中心現有	修正稿及塞查
(1)貝什/ 年 改 司 天 古 兴 干 乙 坑 月	架構規劃,謝謝委員建議。	音見研提處理
貝科摩米梅有一致性, 展小升	(2) 資料庫展示無區分內外部不	志儿听视远生
面り倒止,但貝秆摩應儘り肥	同介面, 資料庫權限只限從本	月10日後心儿 去,初出家杏
遵循現有貢料庫的規劃。	機或展示系統允許之帳號使	公 初少番旦
(2) 貢料庫展示規劃應區分內部	用,谢谢委昌建議。	有日天約工作
與外部使用者的不同介面,亚	(3) 俞於後續系統建署後,於期末	項日女 小 丹曾 送什 <u></u> 幼月它。
設定不同使用權限。	出生洋浦站在久佰内穴,谢谢	我 简 珊 观 化 。
(3)表 5-2 將貧料記錄分五項,請	秋日叶延伸儿谷顶门谷 谢谢	2. 承辦单位府廣
清楚說明各項內容,並舉例說	女 貝相叙。	領省等計畫內
明。		谷轨行,又陳
	、」 <i>時</i> 、 守 いい ルールー し いん ユート 、 ルト いん	阅後擬仔查。
7.第六章應是目前已完成進度	於第六草補充期中進度之結論,	1.本案期中報告
的結論,以及檢討待續工作之	增加說明後續參數演具、2與3	修止稿及審查
規劃。	級品管、雙站整合與資料庫工作	意見研提處理
	規劃,謝謝委員指教。	情形答覆意見
		表,初步審查
		符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定 。
		2. 承辦單位將廣
		續督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
(三) 臺灣港務股份有限公司 鍾季	英鳳委員	
1.p.2-17頁,第2.3.1小節,海流分	雷達演算之海流公式依據	1.本案期中報告
析方法中,依據理論有公式可	Paduan and Washburn(2013),透	修正稿及审查
推導,但是否有相關參數需要	過布拉格波受海流移動影響所	意見研提處理
律定? 另表面流旗圖之關係是	量測到之都卜勒頻偏與布拉格	情形答覆意見
不可八七9	波理論速度值之差異計算,可準	表,初步審查
省 引 分 析 (確量測出海流之徑向速度,此方	符合契約工作

<i><i>宋</i> 御</i> 宋 杏 人 旨		木所計書執行留
及其所提之意見	執行單位說明	在審查意見
	法求得海流之過程無參數需要	項目要求與會
	律定。唯目前研究存在雷達射線	議結論規定。
	<u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u></u>	2 承辦單位將庸
	的問題雲要再進一步改善。圖頗	查督道計書內
	表面流的關係可分析,太研究後	交劫行, 文陳
	<i>信</i> 會加強此部份之討論,並於期	間後擬左杏。
	末報生呈現。謝謝季昌指教。	间及现门旦
2 n 2-23百, 第234小箭, 高栢	根據 Shen. W (2011), 區分高風	1. 太宰期中報告
2. p.2 2.5 分 和2.5.7小郎 问须	速與中低風速的門檻值設定為	修正稿及案查
田廷凹波估計風迷值, 任中低	10m/s,於n2-23 百補充說明,謝	意見研提處理
風速採一階峰值反演風速,而	谢季昌指教。	志儿介认远生
在高風速可應用現有二階方		法 ,初步塞查
法,但如何判定何種風速用一		符合契約工作
階或二階?		項月要求與會
		議結論規定。
		2. 承辦單位將春
		續督導計書內
		容執行 ,文陳
		閱後擬存查。
3.p.4-5頁,第4.1小節,圖4.5中波	由於尖峰週期的計算取決於二	1.本案期中報告
主 崩 平 均 调 相 搊 執 相 類 机 新 机 , 伯	階峰中的第二高峰能量的決定,	修正稿及審查
小收田期关目上的行体的人行	此區的決定不確定性較二階峰	意見研提處理
大咋现期左共入了何故了如何	來得高,故尖峰週期與平均週期	情形答覆意見
<u><u></u><u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u></u></u>	結果目前存在差異與較高的不	表,初步審查
	確定性,尖峰週期的計算會於後	符合契約工作
	續計畫持續研究。	項目要求與會
		議結論規定。
		2. 承辦單位將賡
		續督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
4.p.5-11頁,第5.2小節,資料庫	資料庫權限只限從本機或展示	1.本案期中報告
未來資訊安全之控管機制如何	系統允許之帳號使用,若未來需	修正稿及審查
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	調整權限或管理方式,可再與港	意見研提處理
7013	研中心進一步討論,謝謝委員指	情形答覆意見
	教。	表,初步審查
		符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定。

參與審查人員		本所計畫執行單
及其所提之意見	執行単位説明	位審查意見
		2. 承辦單位將賡
		續督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
5.有關各項觀測及計算推導值	經由高頻雷達參數演算與資料	1.本案期中報告
與實務上之驗證要如何去做?	品管等程序之後,演算之海流與	修正稿及审查
	波浪最後會使用 AWAC 資料與	意見研提處理
	之比較驗證; 演算之風參數則使	情形答覆意見
	用綠燈塔之6號關測站風向風速	表 ,初步審查
	計比較,謝謝委員指教。	符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定。
		2. 承辦單位將賡
		續督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
6.海流運用雷達波計算未來如	經由高頻雷達參數演算與資料	1.本案期中報告
何去驗證。	品管等程序之後,演算之海流會	修正稿及審查
	使用 AWAC 資料與之比較,謝	意見研提處理
	謝委員指教。	情形答覆意見
		表,初步審查
		符合契約工作
		坝日安水 與曾 送仙 <u></u> 山田它
		() 承益論規定。
		2. 承辨单位府僚
		領目守可重內
		日本现17 × 11 × 11 × 11 × 11 × 11 × 11 × 11 ×
(四) 國家海洋研究院 超取出禾	3	风夜厥行旦
1,72 第一印把五、「山先小的	▲ h n 2-6 此码立字终正为「此为	1 太安的山把上
1. p. 2-0 用一权灰久,此两次很	你 p·2-0 此权义士修业何 此何	1. 千术切下积百
影響造成的都卜動頻偏」,我	又成瓜服羽共风羽 远成口 砚	· 」 個人留 旦 音員研提處理
所知道都卜勒頻偏來自物質移	勤頻偏,,其影響機制為雷達雷	临形答覆意見
動的速度,是不是可以再詳細	磁波因布拉格散射原理對其半	表,初步審查
說明波浪影響造成都卜勒頻偏	波長波浪產生強烈回波訊號,意	符合契約工作
的機制?	指本計畫雷達波波長約11公尺,	項目要求與會
	強烈回波訊號有一大部分來自	議結論規定。
	波長 5.5 公尺左右之波浪所產	2. 承辦單位將賡
	生,都卜勒頻偏測量值受此波長	續督導計畫內
參與審查人員		本所計畫執行單
---------------------------	------------------------	-------------
及其所提之意見	執行單位說明	位審查意見
	波浪上之海流移動影響。都卜勒	容執行,文陳
	頻偏機制於期末報告 2.3.1 中補	閱後擬存查。
	充說明,謝謝委員指教。	
2.p.2-16 提及 ImageFOL 的 優	ImageFOL 對近飽和譜的功效較	1.本案期中報告
點,不知道對於近飽和譜的功	其他辨識一二階峰的方法更好,	修正稿及审查
动加何?	ImageFOL 方法會於期末報告中	意見研提處理
	補充說明,謝謝委員指教。	情形答覆意見
		表,初步審查
		符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定。
		2. 承辦單位將賡
		續督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
3.按照目前表3-1和表3-2的初始	本研究雷達演算波的標準測距	1.本案期中報告
品管參數,似乎會導致測波和	是流的一半左右,但因現場之外	修正稿及审查
測流的有效距離(範圍)一致,	界雜訊干擾、品管程序的介入,	意見研提處理
幽現行運作的海洋雪達系統測	每次觀測品質不同,品管後之觀	情形答覆意見
" 在 故 野 離 旱 測 法 左 故 野 離 的	測有效距離也會有所不同。對於	表,初步審查
波有效距離天侧加有效距離的	品管程序造成觀測有效距離之	符合契約工作
一丰,个太相同。如来定因為	影響會持續測試、調整,並於期	項目要求與會
品管程序导致测波流之有效距	末報告補充,謝謝委員指教。	議結論規定。
離相同,是否需要再調整程		2. 承辦單位將廣
序?		續督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
4.p.3-12 圖3.6欲說明船舶回波	於 p.3-11 標示圖 3.6 之船舶位置	1.本案期中報告
對波高估算結果的影響,船舶	與影響範圍,謝謝委員指教。	修正稿及審查
位置在哪?影響哪裡?		意見研提處理
		情形答覆意見
		表,初步審查
		符合契約工作
		月日要永與會
		議結論規定。
		2. 承辦単位將廣
		简 留 导 計 畫 內
		谷轨行,又陳
		阅後擬仔查。

參與審查人員	劫行留位说明	本所計畫執行單
及其所提之意見	秋小 平位 00 %	位審查意見
5.p.2-23風場分析方法提及中低	根據 Shen, W.(2011), 區分高風	1.本案期中報告
風速時和高風速時必須分別使	速與中低風速的門檻值設定為	修正稿及审查
用不同的方法進行分析。直至	10 m/s,於 p.2-23 頁與 3.2.3 節補	意見研提處理
p.3-23第3.2.3節風參數品管,仍	充說明,謝謝委員指教。	情形答覆意見
—————————————————————————————————————		表,初步審查
黑乙原肝 化风还和同风还回		符合契約工作
列的门阀值 , 建藏補允詋明?		項目要求與會
		議結論規定。
		2. 承辨单位將廣
		領督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬仔查。
6.p.3-16提及,「根據統計結果,	謝謝委員建議,曾於期末報告中	1.本案期中報告
選擇10x40的窗作為二維移動	補充相關內谷。	修止稿及審查
平均濾波器」,建議把相關分		意見研提處理
析結果納入報告。		情形谷復意見
		表,初步番查
		符合契約工作
		坝日安水 與曾 送仙 <u></u> 山田它
		→ → 部 田 小 均 唐
		2. 承辨单位将度
		領留等計重內
		谷钒行,义陳
7-2 2 21 坦 九 、 5 25 5 201- 支 恆 慶	明世佑会共美国 California 的	见 使 概 行 旦 ° 1 去 安 出 中 却 上
7.p.3-21 掟及, 23.3 MHZ 尚頻留	门槛值参考美國 California 的 Coastal Observing Research and	1. 平亲朔十報百
達系統計昇海流徑向速度的菆	Development Center(CORDC) =	形止 個 人 番 旦 音 目 研 坦 虐 理
大門檻值設定為100公分/秒」,	# HFRNet RTV Processing &	心儿研捉处理
建議補充理論依據描述。	O.C.與 Lipa, B. and D. Barrick	月10日後心儿 去,初步案杏
	(1983),其門檻值需經由3個月	符合契约工作
	以上之經驗校正,而本研究之門	百日要求與會
	檻值有經2年左右之觀測資料做	議結論規定。
	確認而設定,此理論依據於報告	2. 承辦單位將賡
	p.3-19 補充說明, 謝謝委員建議。	續督導計書內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
8.部分文字公式引用有誤相或	委員指出之公式引用有誤植情	1.本案期中報告
無法對昭的咸學, mn 2-20 f	形,於p.2-16式(4)、(5)修正為式	修正稿及審查
	(2.5)、(2.6),於 p.2-19 式(6)修正	意見研提處理
(+ <i>)、(5),</i> p.2-25 式(0) 夺 。	為式(2.7),感謝委員指正。	情形答覆意見

及其所提之意見 私行単位記明 位審查意見 表,初步審查 符合契約工作 項目要求與會 議結論規定。 2.承辦單位將賡 續督導計畫內 容執行,文陳 開後距在本。	參與審查人員	おに留み公司	本所計畫執行單
表,初步審查 符合契約工作 項目要求與會 議結論規定。 2.承辦單位將賡 續督導計畫內 容執行,文陳 閱後疑在本。	及其所提之意見	<u> </u>	位審查意見
符合契約工作 項目要求與會 議結論規定。 2.承辦單位將賡 續督導計畫內 容執行,文陳 開後擬存本。			表,初步審查
項目要求與會 議結論規定。 2.承辦單位將廣 續督導計畫內 容執行,文陳 問後疑在本。			符合契約工作
議結論規定。 2. 承辦單位將賡 續督導計畫內 容執行,文陳 開後擬在本。			項目要求與會
 2. 承辦單位將賡 續督導計畫內 容執行,文陳 問後疑存本。 			議結論規定。
續督導計畫內 容執行,文陳 問後將左本。			2. 承辦單位將賡
容執行,文陳問後與左本。			續督導計畫內
			容執行,文陳
风仅烘行旦			閱後擬存查。
9.部分文字引述文獻的方法是 謝謝委員指正,此部分已於 p.2- 1. 本案期中報告	9.部分文字引述文獻的方法是	謝謝委員指正,此部分已於 p.2-	1.本案期中報告
否在整理一下,如p.2-22根據 18 修正為 Shen, Gurgel et 修正稿及審查	否在整理一下,如p.2-22根據	18 修正為 Shen, Gurgel et	修正稿及审查
(SHEN, GURGEL ET AL., al.(2012)、 p.2-19 修 正 為 意見研提處理	(SHEN, GURGEL ET AL.,	al.(2012)、 p.2-19 修正為	意見研提處理
2012) n 2-24 或 (Fernamdez) Fernandez, Graber et al.(1997)、 情形答覆意見	2012) n 2-24 武 (Fernamdez	Fernandez, Graber et al.(1997) •	情形答覆意見
Crochen et al. 1007. Heren and Heron and Prytz(2002)。 表,初步審查	Curbon et al. 1007 Hanan and	Heron and Prytz(2002) •	表,初步審查
Graber et al. 1997, Heron and 符合契約工作	Graber et al. 1997, Heron and		符合契約工作
Prytz 2002)等 項目要求與會	Prytz 2002)等		項目要求與會
議結論規定。			議結論規定。
2. 承辦單位將廣			2. 承辦單位將賡
續督導計畫內			續督導計畫內
容執行,文陳			容執行,文陳
			閱後擬存查。
10.後向散射、背向散射,是否需 統一修正為背向散射,謝謝委員 1.本案期中報告	10.後向散射、背向散射,是否需	統一修正為背向散射,謝謝委員	1.本案期中報告
要統一中譯名稱? 指正。 修正稿及審查	要統一中譯名稱?	指正。	修止稿及審查
意見研提處理			意見研提處理
[1] 「市北谷復意見」 「市北谷復意見」			情形谷復意見 ま <u> </u>
【			表,初步番查
付合契約上作 五日五十七名			行合契約工作
月日 安水 與 曾 一 并 4 4 4 日 安 水 與 曾			坦日安水與曾
			一 藏 結 論 規 足 。
2. 承辦单位滑廣			2. 承辦単位將廣
領貨等計重內			領留等計重內
合执1, 义体			谷轨11, X床 朋络照方木。
	11、这些中学的二世(十美)中	收"海州边方"放工为"一州边	凤俊妍行旦。
11.週性波局了不住(有我)波 府 週生波同 修正為 不住波 1.本采朔于報言	11. 週性波局了不性(有我)波	府 迥性 波同 修正為 小性 波	1. 平采朔十報百
局? 同 " 砌砌女只相止" 修正侗汉畬里 音目皿坦声珊	局?	10 初初女只相上。	1 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11
[] [] [] [] [] [] [] [] [] []			心儿~~~~ 状处吐 情形
月10合復忌九			月17日復心九 去,初步案杏
【111111111111111111111111111111111111			符合契約工作
11日要求旗合			11日天前一作
議結論規定。			議結論規定。

參與審查人員		本所計書執行單
及其所提之意見	執行單位說明	位審查意見
		2. 承辦單位將曆
		續督導計書內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
(五) 本所港研中心 李俊穎科長		
1. 報告格式請依中心格式調	遵照辦理,謝謝委員。	1.本案期中報告
敕。		修正稿及審查
"正"		意見研提處理
		情形答覆意見
		表,初步審查
		符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定。
		2. 承辦單位將賡
		續督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
2.品管方式除所規劃部分建議	品管方式依委員建議會參考	1.本案期中報告
考量,IOOS QARTOD之QC架	IOOS QARTOD 之 QC 架構, 謝	修正稿及審查
構。	謝委員。	意見研提處理
		情形答覆意見
		表,初步審查
		符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定。
		2. 承辨単位將廣
		領省导計畫內
		谷钒行,义陳
2 却 4 由 + 4 夕 为 5 11 + 4 7	太 期 主 報 生 送 去 卡 安 夕 石 止 陬	见 饭 揪 仟 笪。 1 太 安 田 山 却 从
5. 報告內有許多為評估方法及	尔· 州 不 牧 古 佣 九 个 杀 合 塤 莎 聯 法 积 B 拉 田 古 北 · 쇄 쇄 禾 吕 毋	1. 伞杀别 甲 報告
資料處理探討,建議後續應說	流柱及休用力法, 谢谢安貝廷	修止倘及香鱼
明本案最後各項步驟(完整)流	可找	尼兀ጣ灰处理 居形公寓音目
程及採用方法;如本案雷達之		月17日復心九 去,初出案本
訊號處理流程建議可在附錄中		符合契約工作
加以補述完整。		11日天前一作 11日要求與會
		議結論規定。
		2. 承辦單位將春
		續督導計畫內

<i> </i>		木所計書執行單
及其所提之意見	執行單位說明	本// 計 重 抗 们 平 位 審 查 意 見
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
4. 資料庫內所儲存IQ、DR譜等,	謝謝委員建議。	1.本案期中報告
請先規劃完整檔名,以利儲存。		修正稿及审查
		意見研提處理
		情形答覆意見
		表,初步審查
		符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定。
		2. 承辦單位將賡
		續督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
5.p.2-2所提全球400個高頻雷達	參考 Roarty, H. et al.(2019)統計	1.本案期中報告
站,其運作情形為何?	全球約有400個高頻雷達為穩定	修正稿及审查
	運作且持續收集海流資料之狀	意見研提處理
	態,其中約140站於亞洲太平洋	情形答覆意見
	區域持續運作,於 p.2-1 補充說	表,初步審查
	明,謝謝委員指教。	符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定。
		2. 承辦單位將賡
		續督導計畫內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
6.資通安全考量下對外服務規	本系統有對外介接的功能,未來	1.本案期中報告
劃 ,能否有部分資料對外介接	可再與港研中心協調規劃,謝謝	修正稿及審查
至中心其他系統。	委員指教。	意見研提處理
		情形答覆意見
		表,初步審查
		符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定 。
		2. 承辦单位將廣
		領督导計畫内
		谷轨行,文陳
		阅後擬存查。
7.p.2-3,有關本計畫目前觀測頻	目前於雷達研究測試階段,演算	1.本業期中報告
	海流過程中, 審達訊號經傳立葉	修正稿及审查

參與審查人員	執行單位說明	本所計畫執行單
及其所提之意見		位審查意見
率設定為每30分鐘觀測1次,請	轉換資料長度越長頻率解析度	意見研提處理
問研究團隊觀測頻率有何建	越高,越能解析微小的都卜勒頻	情形答覆意見
議,是否有加密空間。	偏,對於較慢的海流變化辨識越	表,初步審查
	精確,因此 30 分鐘之觀測頻率	符合契約工作
	對海流的演算測試較合適,若未	項目要求與會
	來只有觀測波浪之需求,將觀測	議結論規定。
	頻率調整至10或15分鐘是有其	2. 承辦單位將廣
	可行性的,未來可經由測試調整	領督導計畫內
	來進一步探討,謝謝委員指教。	容執行,文陳
		閒後擬存查。
8. 第3章 p.3-21 有 關 合 作 團 隊 已	回歸法、二維移動半均法、半滑	1.本案期中報告
比較4種方法(回歸法、二維移	法與小波變換分解法等四種移	修止稿及審查
動平均法、平滑法與小波變換	除船舶雜訊的方法, 於測試後網	息兄妍捉处理
分解法) 刪除與回補訊號功率	不回歸法、一維移動平均法、平	11 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 1
譜值,為何二維移動平均法作	<i>浙</i> 法百有很好的結木, 共十以一	衣, 初少香鱼
為預設方式請加以說明,以及	維 初 丁 与 云 前 异 川 托 时 间 取	何 一
加何減小耗時問題。	一位, 成平計 重以此 版 何 損 改 力 注 , 來 捍 升 矣 暫 演 首 之 故 恋 , 謝	· 员日女小兴盲 : 送社論相定。
	谢玉昌指封。	可承辦單位將康
		2. 尔州千位州质 續督導計書內
		容執行,文陳
		閱後擬存查。
(六) 本所港研中心 林達遠研究		
1.執行團隊就單雷達資料,經分	感謝委員肯定。	1.本案期中報告
析校正後,在演算波浪(波高及		修正稿及审查
调期)所得結果良好,特別是船		意見研提處理
船 雜 钥 消 险 品 管 , 有 於 抽 ៉ 加 可		情形答覆意見
h和和机构体的目子有效地增加了		表,初步審查
· 非11王。		符合契約工作
		項目要求與會
		議結論規定。
		2. 承辦單位將廣
		續督導計 畫內
		谷轨行,文陳
<u></u>	人 扒 雨 但 雄 雨 法 次 则 从 M k 体 体	
2.依計畫預定進度時間表,後續	冒 / · 取 付 受 甾 逆 頁 料 後 繼 續 進 行 公 續 工 佑 佰 日 ·	1. 本杀期 半 報告
若取得雙雷達資料後,執行團隊	11 夜頃上11 坂口, 唯貝兀欣司重日桓, 谢谢禾昌。	1 15山向八番鱼 音目研想虚理
須進行各觀測項目參數優化及	口你,刚刚女兄,	心 心 一
檢核工作,請確實掌握進度,以		1710 何 @ 愿 九

參與審查人員 及其所提之意見	執行單位說明	本所計畫執行單 位審查意見
符期程。		表,初步審查 符,到 約 約 約 約 約 約 第 一 第 合 要 求 約 の 約 の 約 の 約 の 約 の 約 の 約 の 約 の 約 の 約

附錄二、期末審查意見及辦理情形說明表

交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質) □期中☑期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱:應用雷達技術於海象觀測作業化之校修與維運 執行單位:國立中央大學

參與審查人員	執行單位說明	本所計畫執行單
及其所提之意見		位審查意見
(一) 國立成功大學 高家俊委員		
1. 本報告基本完成合約內容,應	感謝委員肯定。	感謝委員肯定。
給予肯定。		
2. 請確認報告第六章結論與建	工作項目已經完成,已去除贅	同意執行單位說
議第二行:本計畫"將"規	字,修正為"本研究規劃工作執	明及辦理。
劃,是表示還沒有做嗎?	行 , 感謝妥貝指止。	
3. p.6-2最後一段:請說明"完成	由於方向波譜於高頻處與風向	同意執行單位說
波譜的部分"所指為何?如何	較一致,故提升方向波譜之計算	明及辦理。
用波譜提高風速演算準確	品質應為提尚風向演具之準確,	
性?	住,乚修止,谢谢安貞拍止。	
4. p.6-3第一行:請量化證明雙雷	由於HTCS站之都卜勒距離譜的	同意執行單位說
達系統改善風向演算結果。	干擾影響很大,一階峰值有明顯	明。
	雜訊,不確定性很高。因此,我	
	們尚未完整從雙雷達系統的資	
	料中進行演算風向之評估,此部	
	分評估程序會於未來持續進行,	
	感謝委員指教。	
(二) 國立中山大學 李忠潘委員		
1. 肯定工作內容已如合約所訂。	感謝委員肯定。	感謝委員肯定。
2.利用海面糙度(即波浪)反射的	對於高頻雷達來說,波頻大於	同意執行單位
雷達波,如何克服起浪期(季	0.05Hz 的海浪的能量和週期可	說明。
風)及颱風風域裏的海面白浪	以以較低的不確定性被估算出	
的影響,將是未來可以進步的	來。對於較長的波浪,其訊號混	
地方。	合並受到一階峰值能量的影響	
	(Lucy, 2019),因此準確性較	
	1低。對於孚風或颱風之白很,亚	
	一無經驗解梓日很對甾建後向散	
	射 机 號 强 皮 的 影 智 。 波 很 週 期 定	
	計估海沉的里安因东之一,然而	
	本研究估具波浪週期不確定較	

及其所提之意見執行單位說明在所有量低初千 位審查意見及其所提之意見高,未來可以嘗試使用理論反演 的方法來解決,研究海面白浪對 雷達之影響是未來還需進步的 地方,感謝委員指教。高,未來可以貸試範則演高的 (約方法來解決,研究海面白浪對 雷達之影響是未來還需進步的 地方,感謝委員指教。同意執行單位說 明。3. koh 的限制,以本研究的頻率 而言,無法測得波高超過4 m 的波,看看是否考慮比較低頻 的雷達?調整 k。可以改變對觀測波高的 限制,使用較低頻的雷達可以測 終之觀測需求去選擇合適頻率 的雷達是重要的,謝謝委員指 教。同意執行單位說 明。4.建議可以將k。定義為1/波長 (而不是2 π /波長)。波數定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於 2π 弧度。因此,當我們 把 2π 弧度度。因此,當我們 把 2π 弧度度。因此,當我們 把 2π 弧度,這是同意執行單位說 明。4.建議可以將k。定義為1/波長 (而不是 2π /波長)。波數定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於 2π 弧度。因此,當我們 把 2π 弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值 k。,定義為 $2\pi/\Lambda。在高頻段,波長為10-100 公尺的電磁波是一種餘弦波。因此,它們的波數定義如上。感謝委員建議。同意執行單位說說朝委員肯定。(三) 國立成功大學 莊士賢委員之補充與修正。感謝委員肯定。感謝委員肯定。2.部分圖表在內文未提及或未沒。圖表上的參考來源之註記重複的公式(2.13)已修正,補充流統示累出工同意執行單位說明及辦理。$
高,未來可以嘗試使用理論反演 的方法來解決,研究海面白浪對 雷達之影響是未來還需進步的 地方、感謝委員指教。同意執行單位說 明。3.koh 的限制,以本研究的頻率 而言,無法測得波高超過4 m 的波、看看是否考慮比較低頻 的雷達?調整 k。可以改變對觀測波高的 限制,使用較低頻的雷達可以測 得較高的波浪,因此按照當地海 象之觀測需求去選擇合適頻率 的雷達是重要的,潮謝委員指 教。同意執行單位說 明。4.建議可以將ko定義為1/波長 (而不是2 π /波長)。波數定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於2 π 弧度。因此,當我們 把2 π 弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值ko,定義為 $2\pi/心在高頻段,波長為10-100 公尺的電磁波是一種餘弦波。因此,它們的波數定義如上。感謝委員建或。同意執行單位說明。1.工作成果豐碩,期末報告有完整星現計畫工作目標,然仍有以下建議請參酌並進行公要之補充與修正。感謝委員肯定。感謝委員肯定。2.部分圖表在內文未提及或未複。圖表上的參考來源之註記重複的公式(2.13)已修正,補充品代一口記代,這引明,並依港研中心報告之慣用方式呈現,謝謝委同意執行單位說明及辦理。$
的方法來解決,研究海面白浪對 雷達之影響是未來還需進步的 地方,感謝委員指教。 同意執行單位說 明。3.koh 的限制,以本研究的頻率 而言,無法測得波高超過4 m 的波,看看是否考慮比較低頻 的電達?調整 k. 可以改變對觀測波高的 限制,使用較低頻的雷達可以測 得較高的波浪,因此按照當地海 象之觀測需求去選擇合適頻率 的雷達是重要的,謝謝委員指 教。同意執行單位說 明。4.建議可以將ko定義為1/波長。 (而不是2 π /波長)。波數定義為每單位距離的弧度。 波數定義為每單位距離的弧度。 之和不麼。因此,當我們 把2 π 弧度。因此,當我們 把2 π 弧度。因此,當我們 把 $1.$ 工作成果豐碩,期未報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。同意執行單位說 朝。1. 工作成果豐碩,期未報告有完 核。感謝委員肯定。感謝委員肯定。2. 部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記重複的公式(2.13)已修正,補充 記明,並依港研中 心報告之慣用方式呈現,謝謝委「意執行單位 說明及辦理。
雷達之影響是未來還需進步的 地方、感謝委員指教。3.koh 的限制,以本研究的頻率 而言,無法測得波高超過4 m 的波,看看是否考慮比較低頻 的雷達?調整 ko 可以改變對觀測波高的 限制,使用較低頻的雷達可以測 得較高的波浪,因此按照當地海 象之觀測需求去選擇合適頻率 的雷達是重要的,謝謝委員指 教。同意執行單位說 明。4.建議可以將ko定義為1/波長 (而不是2 π /波長)。波敦定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於2 π 弧度。因此,當我們 把2 π 弧度與波長(λ)之間的比 值、意味著波数的值ko,定義為 $2\pi/\lambda$ 。同意執行單位說 明。5.工作成果豐碩,期末報告有完 整星現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。感謝委員肯定。感謝委員肯定。2.部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記重複的公式(2.13)已修正,補充 品號明,並依港研中 心報告之慣用方式呈現,謝謝索同意執行單位 說明及辦理。
地方、感謝委員指教。 3.koh 的限制,以本研究的频率 而言,無法測得波高超過4 m 的波,看看是否考慮比較低頻 的雷違? 調整 ko 可以改變對觀測波高的 限制,使用較低頻的雷違可以測 得較高的波浪,因此按照當地海 象之觀測需求去選擇合適頻率 的雷違是重要的,謝謝委員指 教。 同意執行單位說 明。 4.建議可以將ko定義為1/波長 (而不是2π/波長)。 波數定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於2π弧度。因此,當我們 把2π弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值ko,定義為 2πλ。 在高頻段,波最為10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 同意執行單位說 明。 5.工作成果豐碩,期末報告有完 整星現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 2.部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有 複。圖表上的參考來源之註記 重複的公式(2.13)已修正,補充 圖之14、2.15 說明,並依港研中 心報告之慣用方式呈現,謝謝委 同意執行單位 說明及辦理。
3.koh 的限制,以本研究的频率 調整 ko 可以改變對觀測波高的 同意執行單位說 而言,無法測得波高超過4 m 限制,使用較低頻的雷達可以測 得較高的波浪,因此按照當地海 明。 的波,看看是否考慮比較低頻 得較高的波浪,因此按照當地海 第 4.建議可以將ko定義為1/波長 波數定義為每單位距離的弧度。 同意執行單位說 (而不是2元/波長)。 波數定義為每單位距離的弧度。 同意執行單位說 (而不是2元/波長)。 波數定義為每單位距離的弧度。 同意執行單位說 推立常確成是一種餘弦。因此,當我的情 把2 電弧度與波長(λ)之間的比 個。 (而不是2元/波長)。 在高頻段,波長為10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 個。 (五方成功大學 莊士賢委員 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 1. 工作成果豐碩,期末報告有完 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 2.部介國人及主任 重複的公式(2.13)已修正,補充 「意執行單位 2.部介國人在自然之慣用方式呈現,謝謝委 同意執行單位
而言,無法測得波高超過4 m 的波,看看是否考慮比較低頻 的審違?限制,使用較低頻的雷違可以測 得較高的波浪,因此按照當地海 象之觀測需求去選擇合適頻率 的審違是重要的,謝謝委員指 教。明。4.建議可以將ko定義為1/波長 (而不是2 π /波長)。波數定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於2 π 弧度。因此,當我們 把2 π 弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值 ko,定義為 $2\pi/\lambda$ 。 在高頻段,波長為 10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 議。同意執行單位說 明。1. 工作成果豐碩,期末報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。感謝委員肯定。感謝委員肯定。2. 部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記重複的公式(2.13)已修正,補充 品比同意執行單位 說明及辦理。
的波,看看是否考慮比較低頻 的雷達?得較高的波浪,因此按照當地海 泉之觀測需求去選擇合適頻率 的雷達是重要的,謝謝委員指 救。4.建議可以將ko定義為1/波長 (而不是2π/波長)。波數定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於2π弧度。因此,當我們 把2π弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值 ko,定義為
小成 福祉 化 ビ 外 100 以 K K M (1) 象之觀測需求去選擇合適頻率 的雷達是重要的,謝謝委員指 教。 4.建議可以將k₀定義為1/波長 (而不是2π/波長)。 波数定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於 2π 弧度。因此,當我們 把 2π 弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值 k₀,定義為 2π/λ。 同意執行單位說 明。 (面不是2π/波長)。 K面,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於 2π 弧度。因此,當我們 把 2π 弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值 k₀,定義為 2π/λ。 國意執行單位說 或數定義如上。感謝委員建 1. 工作成果豐碩,期末報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 2. 部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記 重複的公式(2.13)已修正,補充 圖 2.14、2.15 說明,並依港研中 心報告之慣用方式呈現,謝謝委 同意執行單位 說明及辦理。
前面建:的雷達是重要的,謝謝委員指 教。4.建議可以將ko定義為1/波長 (而不是2 π /波長)。波數定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於 2 π 弧度。因此,當我們 把 2 π 弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值 ko,定義為 $2\pi/\lambda$ 。 在高頻段,波長為 10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 議。同意執行單位說 明。(三) 國立成功大學 莊士賢委員 上下作成果豐碩,期末報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。感謝委員肯定。感謝委員肯定。2. 部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有數 個。重複的公式(2.13)已修正,補充 2.14、2.15 說明,並依港研中 心報告之慣用方式呈現,謝謝委同意執行單位 說明及辦理。
教。人4.建議可以將ko定義為1/波長 (而不是2 π /波長)。波數定義為每單位距離的弧度。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於 2 π 弧度。因此,當我們
 4.建議可以將k₀定義為1/波長 (而不是2π/波長)。 (而不是2π/波長)。 (而不是2π/波長)。 (而不是2π/波長)。 (而不是2π/波長)。 (而不是2π/波長)。 (市不是2π/波長)。 (市不量2π/波長)。 (市不量2π/波長)。 (市不量2π/波長)。 (日間前方式呈現,謝謝委 (日間前方式呈現,謝謝委 (日間2m(1)) (日間1) (日間1
 (而不是2π/波長)。 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於2π弧度。因此,當我們 把2π弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值ko,定義為 2π/λ。 在高頻段,波長為10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 議。 1.工作成果豐碩,期末報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。 記示分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記 然而,對於正弦波或餘弦波,波 長相當於2π弧度。因此,當我們 該蘭委員10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 「前數委員肯定。 「「前」」」 「「意執行單位 說明及辦理。
長相當於 2π 弧度。因此,當我們 把 2π 弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值 ko,定義為 2π/λ。 在高頻段,波長為 10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 議。(三) 國立成功大學 莊士賢委員感謝委員肯定。1. 工作成果豐碩,期末報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。感謝委員肯定。2. 部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記重複的公式(2.13)已修正,補充 說明,並依港研中 小報告之慣用方式呈現,謝謝委
把 2π 弧度與波長(λ)之間的比 值,意味著波數的值 ko,定義為 2π/λ。 在高頻段,波長為 10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 議。(三) 國立成功大學 莊士賢委員感謝委員肯定。1. 工作成果豐碩,期末報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。感謝委員肯定。2. 部分圖表在內文未提及或未
值,意味著波數的值ko,定義為 2π/λ。 在高頻段,波長為10-100公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 議。(三) 國立成功大學 莊士賢委員1. 工作成果豐碩,期末報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。感謝委員肯定。2. 部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記重複的公式(2.13)已修正,補充 說明,並依港研中 心報告之慣用方式呈現,謝謝委
2π/λ。 在高頻段,波長為10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 減。 1.工作成果豐碩,期末報告有完 感謝委員肯定。 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。 2.部分圖表在內文未提及或未 重複的公式(2.13)已修正,補充 局意執行單位 說明及辦理。
在高頻投,波長為 10-100 公尺的 電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 議。(三) 國立成功大學 莊士賢委員1. 工作成果豐碩,期末報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。感謝委員肯定。2. 部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記重複的公式(2.13)已修正,補充 說明,並依港研中 心報告之慣用方式呈現,謝謝委 昌壯工
電磁波是一種餘弦波。因此,它 們的波數定義如上。感謝委員建 議。(三)國立成功大學 莊士賢委員1. 工作成果豐碩,期末報告有完 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。感謝委員肯定。2. 部分圖表在內文未提及或未 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記重複的公式(2.13)已修正,補充 說明,並依港研中 心報告之慣用方式呈現,謝謝委 日本工同意執行單位 說明及辦理。
們的波數定義如上。感謝委員建 (三)國立成功大學 莊士賢委員 1. 工作成果豐碩,期末報告有完整呈現計畫工作目標,然仍有以下建議請參酌並進行必要之補充與修正。 感謝委員肯定。 2. 部分圖表在內文未提及或未充分說明;部分公式編號有重複。圖表上的參考來源之註記 重複的公式(2.13)已修正,補充存的說明,並依港研中、公報告之慣用方式呈現,謝謝委員
(三)國立成功大學 莊士賢委員 1. 工作成果豐碩,期末報告有完 感謝委員肯定。 整呈現計畫工作目標,然仍有 感謝委員肯定。 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。 2. 部分圖表在內文未提及或未 重複的公式(2.13)已修正,補充 高表上的參考來源之註記
 (二)國立成功大學 壯士貨安貝 1.工作成果豐碩,期末報告有完 感謝委員肯定。 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。 2.部分圖表在內文未提及或未 重複的公式(2.13)已修正,補充 同意執行單位 說明及辦理。 資。圖表上的參考來源之註記 品比工
 工作成果豐碩,期末報告有完 感謝安貝肯定。 整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。 部分圖表在內文未提及或未 重複的公式(2.13)已修正,補充 后意執行單位 認明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記 認謝安貝肯定。 感謝委員肯定。 局意執行單位 說明及辦理。
整呈現計畫工作目標,然仍有 以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。 2.部分圖表在內文未提及或未 重複的公式(2.13)已修正,補充 充分說明;部分公式編號有重 圖 2.14、2.15 說明,並依港研中 複。圖表上的參考來源之註記 品比工
以下建議請參酌並進行必要 之補充與修正。 2. 部分圖表在內文未提及或未 重複的公式(2.13)已修正,補充 充分說明;部分公式編號有重 複。圖表上的參考來源之註記 品比工
之補充與修正。 2. 部分圖表在內文未提及或未 重複的公式(2.13)已修正,補充 充分說明;部分公式編號有重 圖 2.14、2.15 說明,並依港研中 複。圖表上的參考來源之註記 品比工
 2.部分圖表在內文未提及或未 重複的公式(2.13)已修正,補充 同意執行單位 充分說明;部分公式編號有重 圖 2.14、2.15 說明,並依港研中 複。圖表上的參考來源之註記 ² ² ² ² ³ ³ ³ ⁴ ³ ³ ⁴ ³ ⁴ ³ ⁴ ³ ⁴ ³ ⁴ ⁴ ⁵ ⁴ ⁵ ⁴ ⁵ ⁴ ⁵ ⁵ ⁴ ⁵ ⁵ ⁴ ⁵ ⁵ ⁴ ⁵ ⁵ ⁵ ⁵ ⁵ ⁵ ⁵ ⁵ ⁵ ⁵
充分說明;部分公式編號有重 圖 2.14、2.15 說明,並依港研中 說明及辦理。 複。圖表上的參考來源之註記 品比工
複。圖表上的參考來源之註記 日本工
方式不一致,請依港灣技術研
究中心(以下簡稱港研中心)報
告之慣用方式統一呈現。圖號
與表號的標示方式請用相同
格式呈現。
3. p.1-2第三段提及港研中心有3 由於今年9月港研中心新增臺中 同意執行單位
座雷達站,但文內只說明2座? 港高頻雷達南站,文字已修正為 說明及辦理。
站名HTCN & HTCS 請在第1 4 座, 其中除了本計畫所提之臺
次提及時,顯示英文縮寫之全 甲淹南北兩站尚頻笛運外, 另外

 參與審查人員 及其所提之意見 名。 	執行單位說明 列雷達 WERA 系統 2 座; HTCN 與 HTCS 全名為 High-Frequency Taichung North 與 High- Frequency Taichung South。以上 已於報告中補充說明,感謝委員 指教。	本所計畫執行單 位審查意見
 (1) 表 2-1 中 HTCN 之 radar frequency是27.9,但文字說 明是27.75,下頁又說後續更 改為27.9,但後續章節之成 果說明又變為27.75。 	(1)目前臺中港高頻雷達北站之 電磁波頻率為 27.9MHz,已 將報告內容有誤的部分修 正,謝謝委員指正	(1)同意執行單 位說明及辦 理。
 (2)圖2.6之圖名為流程圖,但圖 中看不出工作流程。其中圖 (c)的頻率為0處應會有相當 大能量去反應雷達掃描範 圍內環境的固定物之反射 能量,但報告中的都普勒距 離譜都不存在此特性,如是 在訊號處理過程已先行去 除,應在報生中約明。 	(2)接近 0 頻對應固定物之反射 能量並沒有很強的能量反應, 原因為發射天線為相控陣列 天線,透過其相位控制之破壞 性干涉,達到天線間往陸地方 向發射之能量相互抵消所致。 圖 2.6 之流程表示方式已改 善,謝謝委員指教。	(2)同意執行單 位說明及辦 理。
(3) p.2-28之波浪參數引用二公 式(2.26 & 2.27),最後是採用 那一公式?原因為何?應敘 明。	 (3)公式(2.26)和(2.27)用於估計 示性波高。公式(2.26)由 Barrick(1977)提出,沒有經 驗參數,而公式(2.27)Heron & Heron(1998)提出了一經 驗比例係數。研究發現,比例 係數是校準雷達的波浪參數 的必要因素,可以更好地與實 測波浪資料擬合,特別是示性 波高。因此我們採用公式 (2.27)。已於修訂報告中修 正,謝謝委員指教。 	(3)同意執行單 位說明及辦 理。
 5.第三章: (1)p.3-1之0級產品也應有資料 品管,例如對系統的正常運 	(1)0級產品品管如硬體系統雜訊 過濾器、降低雜訊設備調整、 收發天線增益量測等屬架設	(1)同意執行單位說明及辨理。

參與審查人員 及其所提之意見	執行單位說明	本所計畫執行單 位審查意見
作之監控也是品管一環。	雷達站時所執行內容。對系統 運作之監控部分包括監測系 統溫度、Dtacq 系統運作、網 路連線品質等,此部分已與開 發團隊持續討論,以增進雷達 系統運作之順利,謝謝委員指 教。	
(2)p.3-7之3項品管標準的項1 與項2如同時滿足,則資料 品質將標註為何?	(2)若滿足第1項,則該波參數則 視為無效值,因此就算同時滿 足第2項,波參數依然視為無 效值,已於修訂報告 p.3-7 增 加說明,謝謝委員指教。	(2)同意執行單 位說明及辦 理。
(3)p.3-11之船舶雜訊去除已提出3種方法,未來或許可採用AIS資料反推算船舶訊號 在都普勒距離譜上的存在位置,並據以確認前述選用的雜訊去除方法之正確性; 或直接用來去除船舶雜訊。	(3)如委員所述,雷達與AIS 資料 可透過雙向整合來改善船舶 偵測與船舶雜訊過濾之準確 性,是未來技術發展的目標之 一,感謝委員的建議。	(3)同意執行單 位說明。
(4)p.3-18之2級產品品管,建議 可先將後續各小節風波流 各項參數的品管門檻先彙 整成一張總表,方便檢視。	(4)已新增彙整表於 p.3-21、22、24,謝謝委員建議。	(4)同意執行單 位說明及辦 理。
 6.第四章: (1)圖 4.1 顯示2個實測站 (AWAC & buoy)都不在雙雷 達所交集覆蓋區域內,建議 未來可將浮標站移至交集 覆蓋區域內,才能用來檢驗 雷達觀測參數之方向性的 正確性。 	(1)若於雷達雙站觀測覆蓋範圍 內提供實測資料,對於雷達演 算海氣象參數之準確性有更 大的幫助,感謝委員的建議。	(1)同意執行單 位說明。
(2)北站與南站都提到正負0.48 Hz 的雜訊干擾,代表為雙 向定速移動目標,來源為何 應有所說明;南站雜訊多、 二階訊號弱,後續要如何改	(2)±0.48Hz 之訊號干擾,透過檢 視波束合成演算法的功率,當 峰值頻譜與 HTCN 站的孔徑 相比處於-750 時,發現± 0.48Hz 的雜訊干擾來自南方, 但干擾源為何還需再評估判	(2)同意執行單 位說明及辦 理。

參與審查人員	劫仁昭公治田	本所計畫執行單
及其所提之意見	<u> </u>	位審查意見
善,應有所建議。	斷;目前南站的雜訊相較北站	
	較大,二階訊號較弱,對於	
	HTCS站的雷達訊號品質還需	
	持續改善,我們需要與建置雷	
	達廠商專家討論,讓他們瞭解	
	雷達的情況之後,再制定雷達	
	的改進方案。以上說明已於修	
	訂報告內補充,謝謝委員指	
	教。	
(四) 臺灣港務股份有限公司 鍾李	英鳳委員	Γ
1.為何南站比北站差主要原因	臺中港雷達站觀測之海域位在	同意執行單位說
為何?未來解決之方案為何?	臺灣海峽潮波共振之腹點位置,	明。
另兩站之儀器規格是否相同?	流場變化非常敏感且複雜,加上	
	南站架設後,還有許多硬體與背	
	景環境造成之雜訊需要移除,以	
	達到更精準之海氣象估算,未來	
	遠需進一步改善; 雷達儀器乃屬	
	相同之硬體設備所建構而成,謝	
	謝委貝指教。	and he is a surface and
2.表 4-1 、 4-2 之 The	具差異為建站時之施工決策,但	同意執行單位說
distanceHTCN 為4m,HTCS	具亚个影響波宋合成演具法之 4.8 归传(1000)	明。
為5m,其差異原因為何?	結末, 根據 Grugel 等人 (1999) ,	
	使用波来合成演具法之合週月 帝初长帝传取为为 Dy 王伯陳列	
	及胜树及值取决於 KX 大颜 [] 约	
	时夜度 $D 以 \alpha \Delta 0 - \Lambda D (M \overline{\alpha}) ,$	
	右 D 增加, Δ0 的值就曾愛小,	
	然而,附個相夠的 KA 九仟之间 的 55 離 5 應 却 温 〕 / う , 對 太 喜 中	
	即连那个愿起迥 1.12,到水 奎干	
	到 2 /2 的 新 图 力 , 些 符 人 雪 達 字	
	势 沉 2 的 轮 四 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	
3展示以虚擬主機交機之方式	本計書建議採用之虛擬機系統	同音執行單位說
是可行,但加里主燃烧空出的	為 Proxmox,具有自動與異地備	明。
(如天災)則虚擬主機資料是不	份之功能,謝謝委員指教。	
仍可回復,此基於資安安全之		
問題,通常採異地備援之方式		
處理。		
4.本研究報告已完成契約規定	感謝委員肯定。	感謝委員肯定。

參與審查人員 及其所提之意見	執行單位說明	本所計畫執行單 位審查意見
之項目,包括調校雷達系統頻		
率及頻寬,改善雷達訊號辨識		
與分析技術改善雷達觀測資歷		
分析技術,可提供正確的海洋		
波浪相關資訊。同時對於各種		
演算法進行評估,選擇出最佳		
之演算方式。		
5.後續修訂之建議:未來實用方	本研究建立一套雷達演算海氣	同意執行單位說
面,建議再與觀測值做多方比	象參數之流程,為能準確提供現	明。
對,以確定其方式可行,進而	地海氣象資訊,如委員所述還需	
取代未來實測。	進行多項實測資料之比對,提升	
	雷達觀測之實用性,於未來還需	
	冉加強,感謝委員建議。	
(五) 國家海洋研究院 賴堅戊委		
1.中央大學錢教授團隊和港研	感謝委員肯定。	感謝委員肯定。
中心李科長等同仁在這項計畫		
的共同投入下,對於海洋雷達		
繁衍風波流的技術,以及在資		
料品管程序上都有新穎、實用		
的成果,對於促進雷達技術的		
海象觀測作業貢獻卓著。		
2.p.3-13提及根據統計結果,選	已於 p.3-14、15 補充說明,選擇	同意執行單位說
擇10 x 40的窗作為二維移動平	10 x 40 的窗作為二維移動平均	明及辦理。
均濾波器,且使用2σ 值當作	濾波器原因,以含有船訊號之都	
調適性門檻。是否可補充相關	卜勒距離譜為例,使用不同的視	
統計過程與結果。	窗 (m=2 到 20, n=4 到 100) 來	
	测试窗口的大小,可以看出,富	
	m>10 時,偏度的值幾乎與 n 的	
	值伯问。力外,备II-40时,峰度 佐南 m 的估戀化工士·粉状選擇	
	值兴 III 的值变化个入,到尔选择	
	20 值的门槛值的冻凶两 州川此	
	都卜勤距離譜中去除所有此的	
	回波和其周圍相關的能量。謝謝	
	委員指教。	
3.p.3-18 提及引用	從高頻雷達資料的都卜勒頻譜	同意執行單位說
Kirincich(2017), Mantovani 等	中演算海洋表面流的最大徑向	明及辦理。

參與審查人員	執行單位說明	本所計畫執行單
及其所提之意見		位審查意見
人 (2020) 研究描出 25.5 MHz	速度不應該有理論限制,根據	
系統之最大徑向速度門檻為	NOAA by the Manual for Real-	
100 cm/s,是否可整理更多的	Time Quality Control of High	
佐證與討論。又同段指出本研	Data,他們提到「美國西海岸海	
究使用100 cm/s 為門檻值來	域的最大總速度門檻值為1公尺	
限制一階峰值的區域,並過濾	/秒,東岸海域為3公尺/秒。該	
掉 經向速度的異常值,有關異	門檻值必須因地區而異。例如,	
计位问述及前六节值 方酬六	灣流的存在決定了東海岸的門	
市值的迥德力法定省增加抽	檻值更高」(p-14)。這一討論	
亚。 1	在 QA/QC Manual for Coastal HF	
	Radar - Indian Coastal Ocean	
	Radar Network (ICORN)中也有	
	提及。這意味著最大徑向速度的	
	門檻值必須根據研究區的實際	
	海流速度來設置,而這一點在文	
	獻報告中沒有明確表述。此外研	
	究發現,AWAC 所記錄的表層洋	
	流的最大速度不超過 120 公分/	
	秒,而在研究區域,99%以上的	
	資料都小於 100 公分/秒。	
	参照 Kirincich(2017) Mantovani	
	· 寺人(2020),我們決定使用 100	
	公分/秒作為取大徑向速度的公	
	分值,业限利一偕唑值的面積。	
	通题波米合成或 MUSIC 演具法 得到的每個派台·迪···································	
	付到的每個徑口还及都安與11	
	后进座, 就会社删除。同時, 左	
	计算调程中, 將估計的堂前速度	
	<u>的</u> 开起往一 水石的留闲远交 <u></u> <u></u>	
	有。	
	此部分說明已於修訂報告中補	
	充,感謝委員指教。	
4.p.3-19指出,對於27.75 MHz	每項觀測儀器皆有其限制,本研	同意執行單位說
的雷達工作頻率,示性油三鎬	究之高頻雷達觀測時,若	明。
周早0.52m 到2.11m。大安政	Hs<0.52 米,則雷達估算之示性	
国天U.32 111 到3.44 111 ° 仕員務	波高會被高估,當Hs>3.44 米時,	
展不時, 若環境波浪小於0.52	則被低估,當此情形出現時,於	
m 或大於3.44m,預定怎麼呈	展示系統上則會額外註記,以讓	

參與審查人員	劫行留位說明	本所計畫執行單
及其所提之意見	秋11 平11 00 91	位審查意見
現?	使用者了解實際可能情形,感謝	
	委員指教。	
5.p.3-19,採用Wei Shen(2011)區	如果我們對不同級別的風速,即	同意執行單位說
分高風速與中低風速的門檻值	大於和小於10公尺/秒的風速分	明。
設定為10m/s,並進而使用不同	開估計,U10的時間序列可能是	
方法推算風速,是否會出現不	不連續的結果。計畫中的解決方	
連續的結果?	紊走建立一個田內種力法重豐 40日は以去贫困, 去注烟贫困中	
	的風迷檢案範圍。任這個範圍內	
	的風迷結木り以根據兩個結木	
	送你不通德结里的問題。日前,	
	内际小迁领 品 个 的 问 这 。 日 前 由 於 独 チ 雪 達 霉 芙 簕 圈 內 不 同	
	位置的實測波浪資料,很難從一	
	階峰值中估計風速。風速是由 Hs	
	的結果計算出來的, Tp 是由二階	
	分量估計出來的,因此,不存在	
	不連續的結果。謝謝委員指教。	
6.採用GODP 成為品管的一環	感謝委員於計畫期間之建議,協	同意執行單位說
對資料品管很重要,謝謝工作	助本研究能有更完整之成果呈	明。
團隊採納。建議未來如果能透	現。也謝謝委員對於 GODP 位置	
過漂流浮標等工具分析不同	之徑向速度校正提供寶貴建議。	
GODP 位置的须向速度绝差		
立从五思理机它站会来。		
X做為进挥設足的参考。	立 広 雨 法 丁 川 川 貝 ル 艮 ナ 北 坂	ロナリクロムい
/.p.4-20提及 27./5MHz 系統	局預留達可以測重水層有效床	同意執行単位說
测得的流速代表了0.43 m 水	及的村街的流还, u-//4/1, m// 元 布拉	明及辦理。
深處的特徵"。請確認是特定	^{- 7} 拉福波的波艮 - 边芯木省田 27 75MHz 系統測得的流速代表	
水深0.43 m 的流速,還是	了0至0.43 米水深之間的特徵,	
0~0.43 m 水深間的特徵。	此部分已於修訂報告修正,感謝	
	委員指正。	
8.p.4-22提及天線場型不是真實	量测方式可透過船載固定功率	同意執行單位說
情形之天線場型。也就是天線	定頻發報器於雷達接收天線監	明。
場刑對海能反演很重要,相言	測之範圍海域以等距半徑行駛	
为王刘内心入穴队主义 心明 教具不能說明娘州陆列王伯从	並發報訊號和記錄,解算接收訊	
4.人口肥叽??冰![1]子?!八隊的 坦刑导测士士。	號進行相位校正,並利用 16 支	
勿 空 里 꼕 刀 氏 °	線性陣列天線之相位差解算方	
	位位角的偏差,謝謝委員指教。	
9.p.4-28最後一段, "本研究之	已修正為"示性波高之誤差指	同意執行單位說
	標相關係數(r)、均方根誤差	明及辦理。

4 4 4 4 4 1 4		上公计专用公理
参照番 查 人 貝 2. 甘 に 坦 ト 正 日	執行單位說明	本所計畫執行単
及共所灰之息兒	(DMSE) 八別 本 0.06、0.24 八日,	业番鱼息兄
缺乏指标…波峰迥期為…,	(MMSE)分別為 0.50、0.24 公人) 平均调期 シェ、RMSF 巻 0.68、	
建議語句要調整更精準、更順	0.75 秋,波峰调期 r、RMSE 為	
畅。	0.49、1.42 秒。" 感謝委員指正。	
10. p.4-29至p.4-32第4.2.3節,似	目前 HTCS 站的都卜勒距離譜含	同意執行單位說
平沒有討論到有關方向波譜較	有大量的雜訊,這意味著很難從	明。
且體的特性。	雙雷達系統之都卜勒頻譜中估	
	計出真實的方向波譜。因此,未	
	來規劃先用模擬的都卜勒距離	
	譜結果來測試,該程式目前正積	
	極開發中,感謝委員指教。	
11. p.4-38 第4.3.2 節波場結果與	单站高频雷達站無法消除演算	同意執行單位說
討論,似乎少了波向訊息的討	波向的榠糊性问题,但目前 UTCS 此幼期上勒斯顿会去上	明。
論。	HICS 站的都下朝起離譜否有入 景的雜却,因此法向及其不確定	
	里的相机,因此及问及共不难足	
	指教。	
12. p.4-39最後一段"本計畫除	目前 HTCS 站的都卜勒距離譜含	同意執行單位說
了…",是否成為獨立小節。	有大量的雜訊,因此方向波譜波	明。
	向及其不確定性的部分還需再	
	評估和討論,此節內容會再持續	
	進行研究,謝謝委員建議。	
13. 部分文字須再留意,如p.6-2	已修正為"目前採用示性波	同意執行單位說
最後一段"目前採用利用",	高"、並且"是性"更正為	明及辦理。
採用/利用其一是不是贅詞,	「一····································	
"是性"應更正為"示性"。		
14. 自主開發品管程序非常適合	目前已參考 NOAA 的手册,內容	同意執行單位說
在地化的運用,有關本案開發	包括高頻即時品質控制手冊硬	明。
之QA/QC 程序是否可參考美	體和軟體部分。目前持續在建立	
國 NOAA "Manual for Real-	自我手册,感謝委員建議。	
Time Quality Control of High		
Frequency Radar Surface		
Current Data" 將各個作業化		
參數的品管門閥值整理成表		
格,甚至可與其他HF Radar 網		
的品管做成比較表。		
(上) 太的洪田山、本份短剑目		
(八) 平川心町下心 子饭积杆衣		

參與審查人員		本所計畫執行單
及其所提之意見	執行単位説明	位審查意見
1. 現階段成果對於波高有較佳	波譜經過傳遞函數之調整,可改	同意執行單位說
表現,若考量4.2.3所提傳遞函	善波高與波浪週期, Alattabi 等人	明及辦理。
數能否有機會改善波浪周期相	(2019)已經證明了傳遞函數在	
腿 , 持 補 试 治 明 。	校準波高方面成效,並改善了風	
例 1 可 1 田 之 1 1 1 1	浪和湧浪在波段方面的不確定	
	性。然而他們的傳遞函數只是從	
	幾個選定的時期估計。本研究傳	
	遞函數是由兩年內的實測和估	
	算頻譜之間的比率計算出來的,	
	發現估算之傳遞函數的意義與	
	波浪平均週期的比例係數相似。	
	有助校準波頻域的頻譜功率。通	
	過添加傳遞函數,與使用方程	
	(2.27)估計的結果相比,波週	
	期的不確定性可以得到改善。此	
	部分已於 p.4-32、33 增加文字與	
	圖的說明,謝謝委貝建議。	
2.建議先依現場波浪依雷達推	使用現場波浪資料推估風速可	同意執行單位說
估風力公式推估風速,可佐助	佐助說明現用 甾 達 推 估 風 速 的	明。
說明現用雷達推估風速的不正	个止確性, 禾米曾参考 安貝建議	
確性。	· 持續補進具演具之华確性, 感謝	
2 上回 4 05 旺 - 0 经 边 校 儿 伙 从	安見指教。 回 4 05(次エルン回 4 07) (次本氏)	ロナリクロクい
3.在圖4.23額不2種演具法所推	· 圖 4.23(修止版之圖 4.27)經宣驗 後十1 如八計算法和十把,倾调	同意執行単位說
估流速流向,尤其在流向上有	後有小部分計并流在有缺,經迥	明及辦理。
整體區域的不同,建議請再補	· 前定福禾如修可报告 p.+-30 //	
述其成因。	小,兵福禾往距離海岸線 20 公 田以內的近提洋西海泊幾亚沒	
	主以内的近场,一回海,几次了及 右美别。對於袁提洋治,由於独	
	为 MUSIC 方法的须向速度资	
	之 MOSIC 力公的在向还没有 料,II&V 速度的不確定性可能比	
	使用波束会成演算法估算經向	
	这 府	
4	硬體監控採 MOTT 資訊傳遞方	同音劫行留位韵
为何9世日廿加措华不远等时	式,可透過網頁方式進行監控,	月念我们千位祝
何门:以八共朱确肥省酒盈监	硬體規格建議如下:	
控硬體連作部分?	(1)2U 機架式架構。	
	(2) CPU: Intel Xeon Gold 系列 16	
	核心 2.3GHz 兩顆。	
	(3)記憶體 128 GB。	
	(4)SAS 硬碟 300 GB x 4。	

參與審查人員	ね /- 四 ハ>> m	本所計畫執行單
及其所提之意見	執行単位説明	位審查意見
	(5)作業系統:Linux 64bit。	
	(6)含鍵盤滑鼠	
	謝謝委員指教。	
5.請補上圖表目錄,且部分圖名	已補上圖表目錄並修正圖 2.15、	同意執行單位說
過長(如圖2.15、3.4、3.5、3.9、	$3.4 \times 3.5 \times 3.9 \times 4.6 \times 5.7 \times 5.10$ 圖	明及辦理。
4.6、5.7、5.10等)請修改。	名過長的問題,感謝委員指正。	
(七) 本所港研中心 林達遠研究		
1.報告p.4-26進行波浪分析結果	估算 Tm 和 Tp 存在偏差,原因	同意執行單位說
比較,經比例參數修正後,在	是在給定雷達方位,由單站雷達	明及辦理。
示性波高(Hs)部分有良好一致	站都卜勒距離譜估算 Hs 主要取	
州 , 做 大 调 扣 部 八 , 血 汰 具 亚	決於雷達觀測方向與波浪方向	
住,惟任迥别印为,恶丽足干	之間的角度,而波浪平均週期和	
写週期(1m)或波峰週期(1p)皆	波峰週期的比例係數則受微小	
有偏差值存在,建議補充說明	參數的影響(Wyatt, 1995)。在	
該偏差值存在之原因。	本研究中,我們嘗試用一種新的	
	波浪週期比例係數方法來校準	
	波浪週期。初步結果之一是,波	
	浪週期的比例係數與微小參數	
	呈非線性關係,而且可以用幕函	
	數來描述。此部分已於 p.4-27 補	
	充,謝謝委員指教。	and he is a sort of the
2.報告第5章,海況資料展示系	禾米建置海沉資料展示系統時 約八千日中送 中村日日 人工 上	同意執行單位說
統,建議將使用介面中文化。	將依妥貝建議元登呈現介面中	明。
	文化, 感謝 安 貝 建 議。	
(八) 本所港研中心 祭立宏主任		
1.本案資料品質之重要性及品	臺中港高頻雷達站之主要建立	同意執行單位說
管方式,除工作團隊規劃所提	者之一的复威夷大学 Pierre	明。
出的部分,建議考量南站之卡	Flament 教授針對南站訊號品質	
車出現與否,跟日夜是否產生	问超徒出計多建議,如安貝所說	
影響差異,做進一步比較探討	巴谷下平兴口仪左共比较寺,业 公 湖甘 巴 哲 之 校 正 屬 温 匡 并 敏	
和確認,找出未來可以解決問	西则, 一口, 一人, 一, 四人, 人, 一, 四人, 一,	
題的方式。	透過越謹慎的審視與調整,後續	
	步驟演算結果品質越好。南站訊	
	號品質的確認與探討確實為未	
	來需要執行的重要項目,感謝委	
	員建議。	