

集成式高頻雷達波浪與風向量測性能初探

黃郁軒¹ 賴堅戊^{2*} 吳立中³ 呂宜潔¹ 黃清哲⁴

¹財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心佐理研究員

²財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心副研究員

³國立成功大學近海水文中心助理研究員

⁴國立成功大學水利及海洋工程系教授兼近海水文中心主任

摘要

本研究旨在探討 TOROS 平台維運之 CODAR SeaSonde 不同頻段的雷達系統，由原廠軟體所分析出之波浪與風向訊息，並與鄰近雷達測站之波浪資料浮標之風波訊息進行比對，以瞭解集成式高頻雷達之波浪與風向量測特性，並以 2018 年 9 月間山竹颱風通過呂宋海峽前後 168 小時內之數據，對系統產出波浪與風向的品質與性能進行初探，在掌握雷達觀測特性下使用適當頻率的海洋雷達進行海態觀測，已具有一定的可靠度。建議未來可就偏差的可能來源，即 1) 觀測區域海態均質性；2) 系統參數設定優化；3) 降低無線電干擾、提升雷達訊號品質；以及 4) 海態反演分析方法的研發等面向進行探討，以提升雷達觀測可靠度。

關鍵詞：高頻海洋雷達、都卜勒譜、波浪觀測、風向觀測、環台岸基海洋雷達系統

Preliminary study on measurement performance of Waves and Wind Direction with Compact-type Radar

Yu-Hsuan Huang Jian-Wu Lai^{*} Li-Chung Wu Yi-Chieh Lu Ching-Jer Huang

^{*} Associate Researcher, Taiwan Ocean Radar Institute, National Applied Research Laboratories

ABSTRACT

This study aims to explore the wave and wind direction information from CODAR SeaSonde in different frequency bands, and compare with the metocean information from adjacent data buoy. In order to understand the wave height and wind direction measurement characteristics of the compact-type high-frequency radar, we conducted a preliminary study on the quality and performance of the system's output wave and wind direction within 168 hours before and after the typhoon Mangkhut passed through the Luzon Strait in September 2018. After understanding the characteristics of radar observations, the use of ocean radars with appropriate frequencies for sea state observation has a certain degree of reliability. In order to improve the reliability of radar observation, it is suggested to study in the following directions: 1) sea state homogeneity in the observation area; 2) optimization of system parameter settings; 3) reduction of radio interference, improvement of radar signal quality; and 4) sea State inversion analysis method, etc..

Keywords: HF radar; Doppler spectral; Wave Observation; Wind Direction Observation; TOROS

一、前言

高頻地波雷達(High Frequency surface wave radar)是近年快速發展用以觀測大範圍海流、波浪和

風力的陸基遙感探測技術之一。在 40 年的發展過程中，該技術被認為是監測近海環境的有力工具。

在目前商售的 HF 雷達系統中，主要係有兩種類型的接收天線來確定後向散射信號的方位角來向，

例如 CODAR SeaSonde 集成式雷達(compact-type radar)的交叉環 (cross-loop)和 WERA 的天線陣列(phase array)系統,他們分別使用方向辨識(Direction Finding)和波束成形(Beam Forming)的方式進行訊號來向的演算分辨。在我國,前者已有台灣海洋科技研究中心所建立的 TOROS 環臺岸基海洋雷達觀測網(Taiwan Ocean Radar Observing System; TOROS)及海軍官校/台大海研所所建置的台灣東北海域海流觀測網(Surface Currents Observation North East of Taiwan; SCONET),用於長期表面海流觀測等科研工作。與交叉環系統相比,後者之天線陣列使得沿岸的用地需求達到數百公尺,但是其訊噪比及方向定位精度較為優異,如港灣技術研究中心於台北港所建置的 WERA 系統,因此能提供更好的二階回波信息,反演波浪場的分辨率也相對較高。

有鑒於波浪資訊對於船隻航行安全、海岸防災及工程設計的重要性,本研究旨在探討 TOROS 平台維運之 CODAR SeaSonde 不同頻段的雷達系統,由原廠軟體所分析出之波浪與風向訊息,並與鄰近雷達測站之波浪資料浮標之風波訊息進行比對,以瞭解集成式高頻雷達之波浪與風向量測特性,並以 2018 年 9 月間山竹颱風侵台前後 7 日內之數據,統計目前系統產出測波與測風向性能進行初探。

二、雷達風波量測原理

2.1 海洋雷達反演風波資訊方法

有關高頻地波雷達反演波浪訊息最早由 Barrick (1971) 基於 Rice (1951)的理論對電磁波之二階回波特性進行分析討論,並由 Barrick and Weber (1977a, b)、Lipa and Barrick (1980, 1986a)、Holden and Wyatt (1992)及 Lipa and Nyden (2005)等陸續對相位陣列和集成式雷達建立其數學模型,基本上海洋雷達回波都卜勒譜中之有關風、波、流等海象資訊的訊號如圖 1 所示,並依照 Heron and Rose (1986)、Fernandez 等人 (1997) 以及 Heron and Marrone (2010) 基於 Longuet-Higgins 等人 (1963) 所提出對海面風場的心型分佈(cardioid distribution)的假設,發展出由高頻雷達回波訊號反演海面風向與波浪資訊的理論依據,如圖 2 中所示。當風向與朝向測站傳遞之海面波浪同向時,回波頻譜呈現如圖 2 (左)所示,正頻能量較負頻能量大的現象,

當風向與波向成直角,則如回波頻譜呈現圖 2 中之正負頻之一階峰能量較為對稱之分佈,而當風向與朝向測站傳遞之海波背離時(圖 2 右)則負頻之一階峰能量較強。圖 2 (下)的後向散射訊號都卜勒譜顯示接近(+)和遠離(-)中的每種情況的布拉格峰值相對值,而 θ° 則表示風和接近的波浪方向間的角度。

有關海面波的反演, Lipa and Barrick (1986b)、Lipa and Nyden (2005)和 Lipa 等人(2018)為克服集成式雷達因為接收天線數較陣列雷達少,而使得在方向辨識上的先天劣勢,因此提出觀測角度範圍之單一距離單元內海態均質(homogeneous)的假設前提下,提供了 CODAR SeaSonde 高頻地波雷達系統反演波浪訊息的處理方法,按以下四步驟進行分析:

步驟 1: 分離一階和二階區域,然後使用 Pierson-Moskowitz (P/M) 波能模型定義的風浪頻譜模型分析一階區域在布拉格波數處之海波頻譜。此時進行風向分析,以利定義譜的峰值。

步驟 2: 使用 P/M 波譜模型分析二階雷達頻譜,假設該模型適用於整個雷達頻譜。分析雷達交錯譜,以指出是由朝向岸際雷達或遠離雷達的波浪主導。當是由朝向雷達傳遞之波浪主導時(向岸),海岸線會限制海波的來向角,亦可由使用者設定波向角的限制;如果二階回波訊號顯示海波是朝遠離雷達方向傳遞(離岸),則假定它們遵循風向,這亦可在步驟 1 中從一階雷達頻譜確定;

步驟 3: 將風波之理論都卜勒譜對實際之雷達海洋回波進行參數最佳擬合,以推算風浪譜之參數。在此步驟,二階頻譜由一階頻譜進行了正規化,以利消除由天線增益,路徑損耗等多重未知因素所導致的誤差;

步驟 4: 重複步驟 1-3,利用連續 7 個連續交錯譜,分析推算統計平均之波浪參數值。

2.2 海洋雷達反演風波資訊的限制

運用高頻地波雷達一、二階回波訊號進行風波流訊息觀測時,必須注意當海面波高過大或海流速度很大時,造成回波頻譜發生飽和現象(如圖 3 例所示)而導致海面海流、波高能量無法分離而估算錯誤。有關各頻段海洋雷達之飽和極限波高。Lipa and Nyden (2005)認為飽和譜發生之波高 H_{sat} (m)與雷達系統所使用的無線電頻率 f (MHz)之關係,可寫成

$$H_{sat} (m) = \frac{300}{\pi f_r} \quad (1)$$

而 Chen 等人(2013)則提出

$$0.15 \leq \frac{\pi f_r H_{sat}}{150} \leq 1 \quad (2)$$

目前國內各單位運作、發展中的高頻海洋雷達使用之頻帶介於 4MHz 至 38MHz 間，當雷達系統應用於海態量測時，建議可參考圖 4 選擇雷達系統或設定觀測限制，以維系統效能與觀測可信度。

本次使用 CODAR SeaSonde 原廠軟體進行波浪與風反演，所使用的波浪分析工具版本整理如表 1。

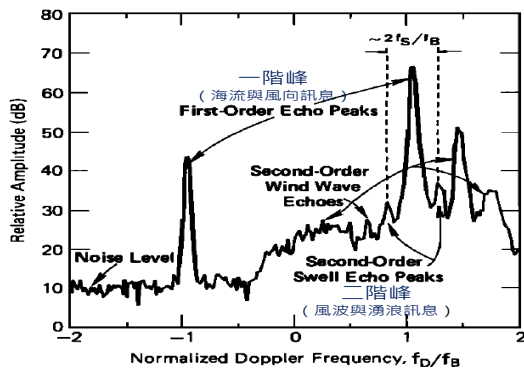


圖 1 雷達回波都卜勒譜中之海象資訊 (改編自 Lipa and Barrick [1980])

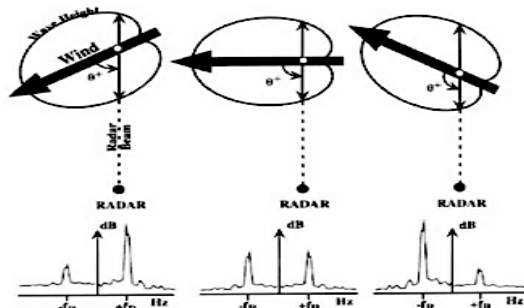


圖 2 基於心型分佈假設之海洋回波波能與風向關係 (摘自 Fernandez et al. [1997])

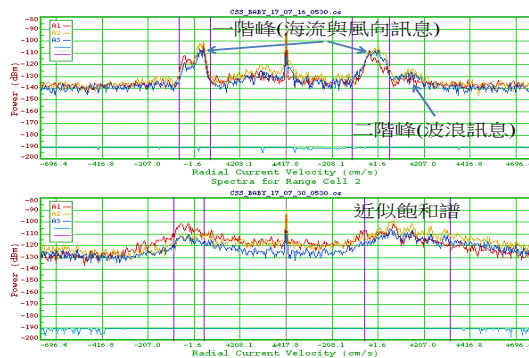


圖 3 回波都卜勒譜一般海況(上)及飽和譜(下)特徵

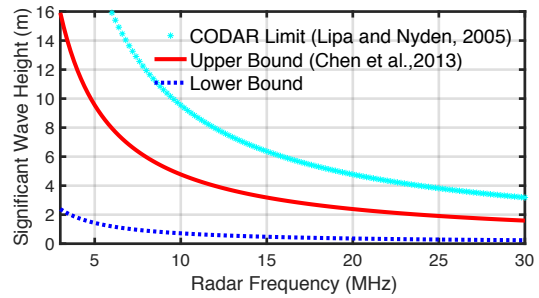


圖 4 高頻頻段(3~30MHz) 之可觀測有義波高範圍

表 1 本研究波浪分析演算軟體版本

SesSonde Wave Tool	Version
WaveModelForFive	11.5.0
SpectraToWavesModel	11.5.0
WaveModelFilter	2.0.0
WaveModelArchiver	12.0.0
AnalyzeSpectra	10.9.3

三、結果與討論

3.1 雷達與浮標觀測資料說明

3.1.1 雷達系統與資料浮標

本研究選取 TOROS 高頻雷達系統位於屏東沿海且鄰近海面上佈放有海氣象資料浮標的測站，包括有鄰近小琉球浮標的 FALA 13MHz 系統和 HOWN MHz 系統；鄰近鵝鑾鼻浮標的 BABY、MABT 13MHz 系統和 NAWN 24MHz 系統；鄰近台東浮標的 SUHI 5MHz 系統等站。各雷達測站參數以及與資料浮標位置空間關係整理如圖 5 及表 2。

CODAR 高頻雷達在波浪分析可產出逐時各距離單元(range cell)之波高(Significant Wave Height)、週期(Mean Centroid Wave Period)、波向和風向等分析數據。本次用以與資料浮標觀測之波浪或風的雷達觀測數據，則是資料浮標所處距離單元前後 5 個距離單元內之觀測平均結果進行比對分析。由於資料浮標為定點之觀測結果，與集成式雷達假設觀測單一距離單元內海態均值的觀測結果，而導致分析比對呈現以「面」對「點」的比對，或許因為地形因素影響使得海態比對存在空間分佈差異的因素。

3.1.2 資料比對分析期間

2018 年 9 月間，第 22 號颱風山竹在國際換日線附近生成，向西通過關島、呂宋島北側、香港等地進入廣東，颱風移動過程之中心位置及七級風暴風半徑如圖 6 所示。颱風通過呂宋海峽期間，對於

表 2 海洋雷達觀測參數與資料浮標位置

雷達站 (主頻 MHz)	雷達站 經緯座標	徑向距離 解析(km)	測波限 制(m)	比對浮標 (距離/方位)
FALA (13.482)	120°35'28.68"E 22°21'45.36"N	1.5	0.53 ~ 3.54	小琉球浮標 (25.2/258)
HOWN (4.600)	120°41'11.34"E 22°01'41.70"N	3.75	1.56 ~ 10.38	小琉球浮標 (46.8/312)
MABT (13.425)	120°44'6.42"E 21°55'13.08"N	1.5	0.53 ~ 3.56	鵝鑾鼻浮標 (10.2/102)
BABY (13.400)	120°49'49.98"E 21°55'34.38"N	1.5	0.53 ~ 3.56	鵝鑾鼻浮標 (2.9/178)
NAWN (24.300)	120°45'41.52"E 21°57'34.26"N	0.75	0.29 ~ 1.96	鵝鑾鼻浮標 (9.6/132)
SUHI (4.580)	120°53'39.00"E 22°12'09.00"N	3.75	1.56 ~ 10.42	台東浮標 (62/66)

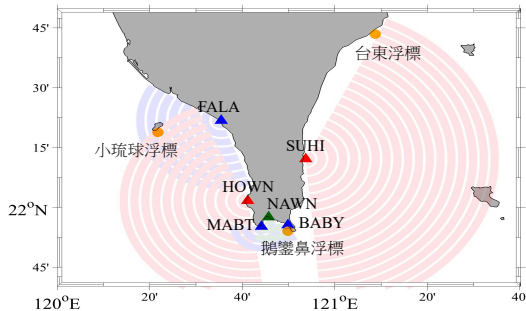


圖 5 本次使用海洋雷達與資料浮標位置關係圖

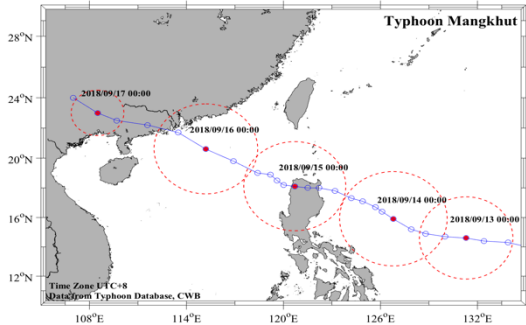


圖 6 山竹颱風路徑圖 (2018 年 9 月 12~17 日)

台灣沿海的波浪和風場造成顯著影響，本研究使用之比對分析資料為 2018 年 9 月 12~19 日間共計 7 日 168 小時之高頻海洋雷達與資料浮標觀測成果。

3.2 波浪觀測結果

在波浪觀測之波高、週期及波向的比對分析結果方面，由於篇幅有限，時間序列之比對分析以枋寮 FALA 雷達站與小琉球資料浮標之結果圖組，如圖 7 所示代表，圖 7 上兩種觀測系統所測得波高之相關係數(CORR)與方均根差異 (RMSD)分別 0.53 與 1.455 (m)，而觀測期間雷達實際能產出資料筆數 (每小時 1 筆) 為 75.59%。

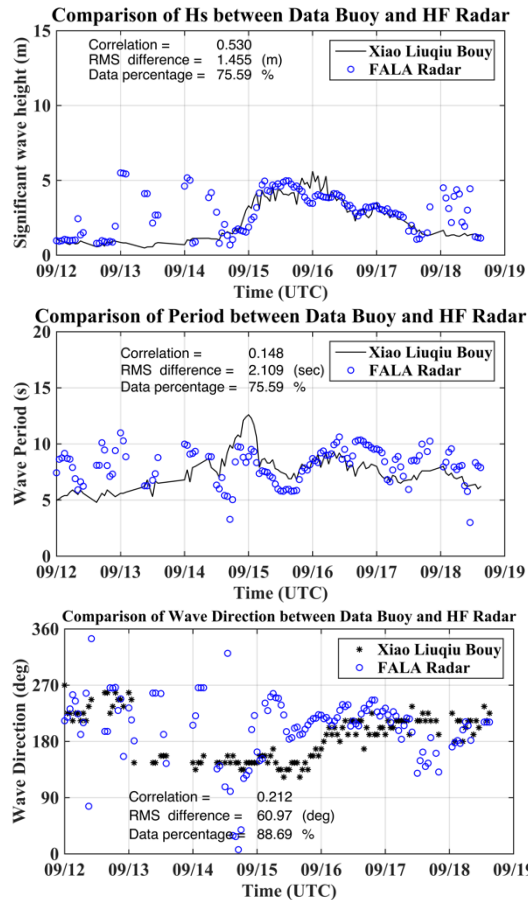


圖 7 雷達與浮標觀測波高 (上)、週期 (中) 和波向 (下) 之時間序列比較與統計 (以 FALA 雷達站與小琉球浮標為例)

由於雷達測波依頻率而有不同限制，因此將各測站之比對結果，依蒲氏風級分為小浪以下、小浪至巨浪以及巨浪以上等三級，將各雷達與鄰近浮標觀測之波高、週期與波向比對之相關係數與方均根差異統計結果，分別整理如表 3~表 5。

綜觀上述圖表可知，5MHz 系統在小浪以上具有一定的觀測能力，而 13MHz 系統則對大浪以下之觀測可信/靠度較為一致。此外，觀察圖 8 與比對分析結果可發現，雷達觀測區內布拉格共振波波向若為朝向雷達前進 (即正頻二階峰能量主導) 則觀測可靠度較佳，顯示集成式雷達波浪反演法，對不同波候方向效果不同，仍有改進空間。推估海洋雷達與資料浮標觀測的偏差可能來自 1) 觀測代表區域的不同; 2) 系統參數設定仍需最佳化; 3) 無線電頻率的干擾; 以及 4) CODAR 海態反演之分析程式仍有改進空間等。

表 3 雷達與浮標觀測波高比對之相關與差異統計

波高比對		5 MHz		13 MHz			24 MHz
		HOWN	SUHI	FALA	BABY	MABT	NAWN
1-3級 < 1 m	CORR	-	0.689	-0.058	-0.01	-0.001	-0.296
	RMSD	-	3.920	2.206	2.324	2.285	1.708
4-7級 1 ~ 6 m	CORR	-0.27	0.625	0.601	0.433	0.215	0.296
	RMSD	1.939	2.561	1.157	1.490	2.041	1.825
8級~ > 6 m	CORR	--	0.724	--	0.100	-0.96	-0.95
	RMSD	--	1.076	--	3.099	1.251	5.176
不分級	CORR	-0.27	0.729	0.530	0.405	0.398	
	RMSD	1.939	2.502	1.455	1.735	1.735	

表 4 雷達與浮標觀測週期比對之相關與差異統計

週期比對		5 MHz		13 MHz			24 MHz
		HOWN	SUHI	FALA	BABY	MABT	NAWN
1-3級 < 1 m	CORR	--	0.518	-0.10	0.029	-0.150	0.246
	RMSD	--	4.137	2.885	2.695	2.990	1.849
4-7級 1 ~ 6 m	CORR	0.617	0.755	0.243	-0.270	0.488	-0.480
	RMSD	2.067	2.183	1.830	3.342	2.643	4.829
8級~ > 6 m	CORR	--	0.433	--	-0.88	-0.820	0.100
	RMSD	--	0.699	--	6.521	4.867	6.175
不分級	CORR	0.617	0.670	0.148	-0.280	0.199	-0.180
	RMSD	2.067	2.217	2.109	3.367	2.811	4.199

表 5 雷達與浮標觀測波向比對之相關與差異統計

波向比對		5 MHz		13 MHz			24 MHz
		HOWN	SUHI	FALA	BABY	MABT	NAWN
1-3級 < 1 m	CORR	--	-0.66	0.044	-0.147	0.041	-0.03
	RMSD	--	149.6	63.75	61.94	47.89	82.90
4-7級 1 ~ 6 m	CORR	0.724	0.003	0.194	-0.100	-0.00	0.070
	RMSD	33.14	149.7	60.16	63.16	43.93	112.4
8級~ > 6 m	CORR	--	-0.022	--	NaN	NaN	NaN
	RMSD	--	116.4	--	51.57	28.80	109.8
不分級	CORR	0.724	-0.130	0.212	-0.080	-0.04	0.045
	RMSD	33.14	144.5	60.97	62.69	44.78	103.6

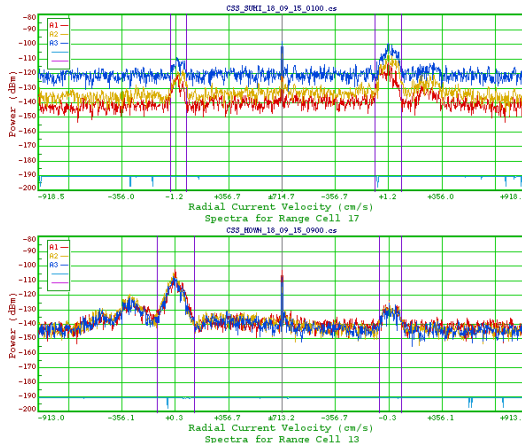


圖 8 布拉格共振波向與雷達交錯譜二階峰能量分佈。SUHI 站測區（上）為正向來波，由正頻二階峰主導；HOWN 站測區（下）波浪則朝離岸方向傳遞，故假設波向與風向一致，並由負頻主導。

3.3 風向觀測結果

在風向觀測的比對分析結果方面，以枋寮 FALA 雷達站與小琉球資料浮標之結果圖組呈現如

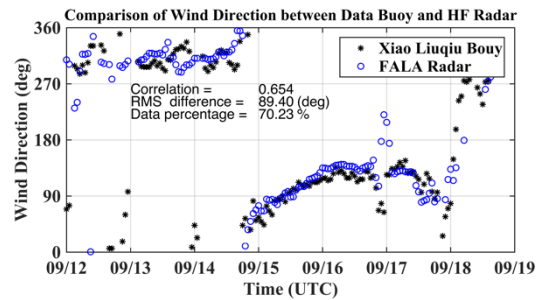


圖 9 雷達與浮標觀測風向之時間序列比較與統計（以 FALA 雷達站與小琉球浮標為例）

表 6 雷達與浮標觀測風向比對之相關與誤差統計

風向比對		5 MHz		13 MHz			24 MHz
		HOWN	SUHI	FALA	BABY	MABT	NAWN
1-3級 < 5.5 m/s	CORR	-0.03	-0.03	0.432	1.000	1.000	-1.000
	RMSD	173.1	114.2	119.2	101.5	194.7	184.0
4-7級 5.5 ~ 17.2	CORR	0.173	0.378	0.875	0.115	0.105	0.405
	RMSD	70.90	136.9	35.02	116.9	190.8	133.9
8級~ > 17.2 m/s	CORR	0.753	0.636	0.835	0.079	0.322	0.677
	RMSD	8.035	115.2	7.948	112.9	185.2	101.2
不分級	CORR	0.167	0.152	0.654	0.100	0.179	0.443
	RMSD	134.9	125.2	89.40	115.9	189.7	128.5

圖 9 所示代表。圖中顯示 FALA 站可成功觀測颱風在最近近台灣的 9 月 15 日前後之風向轉變，與小琉球浮標所測得方向趨勢相近，兩種觀測系統所得波高之相關係數與方均根差異分別 0.654 與 89.4 度。

各測站之風向比對結果，依蒲氏風級分為 1-3 級、4-7 級以及 8 級以上等三級，將各雷達與鄰近浮標觀測之風向比對之相關係數與方均根差異統計結果，分別整理如表 6。

四、結論與建議

4.1 結論

雷達系統頻率選擇與觀測區內波浪特性相依，本研究結果顯示，5MHz 系統在小浪以上具有一定的觀測能力，而 13MHz 系統則對大浪以下之觀測可信/靠度較為一致。

另一方面，雷達觀測區內布拉格共振波向若為朝向雷達前進（正頻二階峰能量主導）則觀測可靠度較佳，顯示集成式雷達波浪反演法及其參數設定對不同波候方向必須盡慎處理。

綜整本次分析結果，推估海洋雷達與資料浮標觀測的偏差可能來自 1) 觀測代表區域的不同；2) 系統參數設定仍需優化；3) 無線電頻率干擾；以及 4) CODAR 海態反演之分析程式仍有改進空間等。

4.2 建議

後續可就以下方向進行探討：1) 根據觀測區域海態均質性假設下與同一距離單元區間之 Hindcast 波浪模式資料比對；2) 根據此次分析結果顯示，開放平直海域的觀測品質較理想，未來可檢討區域之風波與地形特性，挑選適合既有集成式雷達觀測風波資訊的測站；3) 針對觀測系統環境特性，進行波浪分析之參數設定優化；4) 降低無線電干擾、提升雷達訊號品質；以及 5) 海態反演分析方法的進一步研發等議題進行研究，以提升集成式高頻雷達應用在波浪與風向觀測之品質及可靠度。

謝誌

本論文係科技部能源國家型科技計畫「浮動式離岸風機載台及繫纜系統關鍵技術開發與驗證」(MOST-107-3113-E-006-012)之部分研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成，再者，論文使用之山竹颱風路徑資料以及資料浮標觀測資料分別無償取自中央氣象局颱風資料庫及氣象資料開放平臺，謹致謝忱。

參考文獻

1. Barrick, D.E. (1971) Dependence of Second-order Doppler Sidebands in HF Sea Echo upon Sea State. *G-AP International Symposium Digest*, 194-197.
2. Barrick, D.E., and B.L. Weber (1977a) On the Nonlinear Theory for Gravity Waves on the Ocean's Surface, Part I: Derivations. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 7, 3-10.
3. Barrick, D.E., and B.L. Weber (1977b) On the Nonlinear Theory for Gravity Waves on the Ocean's Surface, Part II: Interpretation and Applications. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 7, 11-21.
4. 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.
5. Heron, M.L., and R. Rose (1986) On the application of HF ocean radar to the observation of temporal and spatial changes in wind direction. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 11, 210-218.
6. Heron, M.L., and Marrone, P. (2010) Wind direction manifestation on HF ocean radar echoes. In: *Proceedings of Oceans 2010 IEEE*. From: Oceans 10 IEEE Sydney, 24-27 May 2010, Sydney, NSW, Australia.
7. Holden, G. J., and L. R. Wyatt (1992) Extraction of sea state in shallow water using HF radar. *IEE Proc.-F*, 139, 175-181.
8. Lipa, B.J. and D.E. Barrick (1986a) Tidal and Storm-Surge Measurements with Single-site CODAR. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 11, 241-245.
9. Lipa, B.J., and D.E. Barrick (1980) Methods for the Extraction of Long-period Ocean Wave Parameters from Narrow Beam HF Radar Sea Echo. *Radio Science*, Vol. 15, 843-853.
10. Lipa, B.J., and D.E. Barrick. (1986b) Extraction of Sea State from HF Radar Sea Echo: Mathematical Theory and Modeling. *Radio Science*, Vol. 21, 81-100.
11. Lipa, B.J., and B. Nyden. (2005) Directional Wave Information From the SeaSonde. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 30, 221-231.
12. Lipa, B., M. Daugharty, M. Fernandes, D. Barrick, A. Alonso-Martirena, H. Roarty, J. Dicopoulos, C. Whelan (2018) Developments in Compact HF Radar Ocean Wave Measurement. In *Advances in Sensors: Reviews*, ed. S. Yurish. Vol. 5, 469-495 (2018).
13. Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright and N. D. Smith (1963) Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating bouy. in *Ocean Wave Spectra*, Prentice-Hall, 111-136.