

臺灣附近海域及港區船舶排放量對空氣品質 影響預測系統

吳義林	國立成功大學環境工程學系教授
賴信志	長榮大學科技工程與管理學系副教授
蔡德明	崑山科技大學資訊傳播系助理教授
楊榮元	國立成功大學環境工程學系研究助理
賴力瑋	長榮大學科技工程與管理學系研究助理
蔡立宏	交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
李俊穎	交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔣敏玲	交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

摘要

本研究使用臺灣海域船舶自動辨識系統(Automatic Identification System, 以下簡稱 AIS), 進行臺灣周遭航行船舶之空氣污染物的影響評估, 依據 AIS 即時船舶排放量和行政院環境保護署(以下簡稱環保署)自動監測設施 CEMS(Continuous Emission Monitoring Systems)固定污染源的排放, 並搭配預測係數, 針對特殊日期(如農曆新年和颱風期間)進行排放量校正, 以估算未來 48 小時排放量, 並透過三維網格空氣品質模式 CMAQ-ISAM(Community Multi-scale Air Quality model - Integrated Source Apportionment Method)模擬海域和主要商港船舶排放對臺灣周遭環境空氣品質的影響。空氣品質預測模擬使用的排放量分為海域及陸域兩個部分, 其中預測未來 48 小時內海域船舶排放量的相對誤差和絕對誤差分別小於 10%和 30%。使用前述建立之 AIS 及 CEMS 排放量, 搭配空氣品質指標使用 CMAQ-ISAM 模組預測未來 48 小時之空氣品質, 其準確率約為 80%。

研究成果可供交通部航港局、臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司)或環保署在研擬港埠及沿岸地區空污對策之參考, 使之符合國際海事組織與歐

洲海港組織規範, 以提升港口形象並確保環境永續發展。

一、前言

世界各國經濟活動互動頻繁且合作密切, 船舶肩負貨物在國際間交流的重任, 伴隨而來的空氣污染物排放問題也愈形嚴重, 再加上港內運輸工具船舶、裝卸設備與重型卡車等污染排放問題, 已不容忽視。國內港埠地區空氣污染物排放, 長期以來未被列入環保管制項目重點, 但依據 TEDS(Taiwan Emission Data System)、REAS(Regional Emission inventory in ASia)與 HTAP(Hemispheric Transport of Air Pollution)等國內外研究顯示, 港區空氣污染物排放量對該區域污染排放總量的佔比頗高, 尤其硫氧化物(SO₂)與氮氧化物(NO_x)最為顯著。本研究希望透過船舶排放量對空氣品質影響預測系統, 掌握船舶排放之重要影響因子, 並提供即時排放量與預測資料, 做為交通部航港局及港務公司滾動檢討, 修正空污防制政策及措施之重要依據。

二、文獻回顧

根據環保署全國空氣污染物排放清冊(TEDS10)顯示港埠相關活動於 105 年之懸浮微粒(PM_{10})、細懸浮微粒($PM_{2.5}$)、硫氧化物(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、非甲烷碳氫化合物(NMHC)與一氧化碳(CO)排放量佔全國排放量之比例分別為 2.28%、4.26%、26.2%、8.72%、0.21%與 0.51%，所以港埠相關活動排放 SO_2 、 NO_x 與 $PM_{2.5}$ 等污染物之比例已有一定程度之影響。

依據 TEDS10.0 版資料顯示，港埠相關活動排放除了硫氧化物排放比例稍微降低，但依舊佔了全國排放比例約 4 分之 1，而 NO_x 與 $PM_{2.5}$ 等污染物排放則皆有增加。

依據「空氣品質模式模擬規範」將空氣品質模式分為高斯擴散模式、軌跡模式及網格模式三種，其分類的考量依據與排放量的規模有關係，對於中大型規模排放量，其影響範圍及程度均較大，故需要考慮遠距傳輸的效應及光化學污染物產出對空氣品質的影響，因此必須使用較為複雜的軌跡模式或網格模式。

網格模式(Models-3/CMAQ)是目前較完整的三維網格空氣品質模式之一，該模式以 One atmosphere 的概念模擬分析各種空氣污染物於大氣中的傳輸、反應與沉降等，所以包含原生性與衍生性空氣污染物種，同時也包括氣相、液相與固相的作用程序。

三、研究方法

為建立臺灣周遭海域船舶航行對本島沿岸及港域空污預測模式，本研究採用 CMAQ(Community Multi-scale Air Quality model)三維網格模式模擬原生性與衍生性污染源影響臺灣之案例解析。其中 CMAQ 模擬使用之船舶污染物

排放量，透過 AIS 抓取船舶航行之軌跡訊息，利用 AIS 所提供之船舶即時動態，如船速、座標、航行狀態等資訊，搜尋勞式資料庫中同一條船的引擎功率及最大船速等參數，最後套用洛杉磯港提供之船舶排放量計算公式，即可建立船舶之排放量資料。研究執行流程如圖 1，採用自動化排放量計算模組，加上排放量預測機制以預測未來 48 小時之船舶排放量，其中臺灣地區排放量以 TEDS 排放清冊所提供之點源、面源、線源與生物源等本土污染源排放量，搭配每日 CEMS 之 48 小時預測資料。

前面兩者所述之污染物預測排放量，搭配三維網格氣象模式 WRF(Weather Research and Forecasting Model)所產生之風場資料，應用 CMAQ 模式模擬預測未來 48 小時內臺灣鄰近海域、主要港口以及海域分區船舶污染排放對臺灣本島的空氣品質影響。

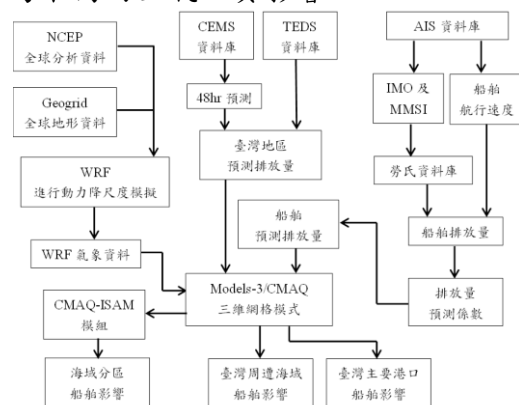


圖 1 研究執行流程

3.1 排放量推估

船舶污染物排放與能量消耗有一定的關係，依據洛杉磯港研究之遠洋船舶排放量推估公式如下：

$$E = \text{Energy} \times EF \times FCF \dots\dots (1)$$

推估公式中，E 為引擎污染物的排放量(g)；Energy 為所需要的能量(kW·

h)；EF 為排放係數(g/kW·h)；FCF 為燃油校正係數(無單位)。

且其中所需要的能量可藉由下列公式推估之：

$$\text{Energy} = \text{MCR} \times \text{LF} \times \text{Act} \dots (2)$$

能量公式中，MCR 為最大引擎動力(kW)；LF 為負載係數；Act 為活動時間(hr)。

船舶航行期間，負載一般介於 20%~80%之間，可藉由以下公式表示之：

$$\text{LF} = (\text{AS} / \text{MS})^3 \dots \dots \dots (3)$$

負載公式中，AS 為船舶實際船速(節)；MS 為船舶最大船速(節)。

3.2 排放量預測係數

排放量預測係數為應用 2013 年及 2016 年計算之船舶排放量為基礎，把兩年之逐日排放量依照對應日期逐日平均，若以 n 代表第 n 日之排放量，則 n+1 日之排放係數即為(n+1)/n。

其中，因春節屬於東亞及東南亞重大節日之一，又臺灣位於東南亞華人居多的區域，每年之春節日期不盡相同，依據 2013 年及 2016 年排放量 NO_x 日平均約為 3,000 噸左右，與春節期間排放量約 2,000 多噸，有明顯之落差，故特別挑出並計算春節期間之排放量預測係數。同時，颱風行進路線千變萬化，當大氣條件有些微的變動，便有可能大幅度的改變颱風侵臺路徑，故為了簡化颱風影響排放量推估的諸多不確定性，所以把排放量預測係數定於颱風警報發布時，便同時啟動颱風影響的預測機制。

排放量推估期間為 2018 年 8 月 17 日至 2020 年 10 月 27 日，推估排放量乘上前述之排放量預測係數，即可獲得未來數日之預測排放量，由於預測時間愈

長則誤差愈大，故採用預測天數最長為期 2 日，即 48 小時之預測結果。將預測結果與實際日期推估之排放量比較差異，統計排放量推估期間其誤差百分比以及絕對誤差百分比，統計結果如表 1 及表 2。

由於預測係數為每日全海域船舶排放量之比值，故當全部船舶採用低硫油時，污染物種每日之預測係數將不至於變動。

表 1 海域船舶排放量預測誤差

預測誤差 (%)		第 1 天	第 2 天
NO _x	平均	-2.8%	-4.1%
	標準偏差	24.2%	32.4%
SO _x	平均	-3.1%	-4.8%
	標準偏差	26.2%	35.4%
PM	平均	-3.0%	-4.4%
	標準偏差	25.4%	34.1%

表 2 海域船舶排放量預測絕對誤差

預測誤差 (%)		第 1 天	第 2 天
NO _x	平均	17.7%	23.6%
	標準偏差	16.7%	22.5%
SO _x	平均	18.9%	25.6%
	標準偏差	18.3%	24.9%
PM	平均	18.5%	24.7%
	標準偏差	17.7%	23.9%

四、空氣品質預測系統

4.1 WRF 氣象模式

WRF 氣象模式使用四層網格把影響臺灣天氣的環境條件包含於模擬範圍中，如圖 2，採用設定以及設定基準如表 3，主要設計範圍是採用環保署空氣品質模式模擬規範規定，需要包含臺灣粗網格 9km 解析度和臺灣北部地區、中部地區、雲嘉地區、南部地區及東部地區細網格 3km 解析度的巢狀網格。

WPS Domain Configuration

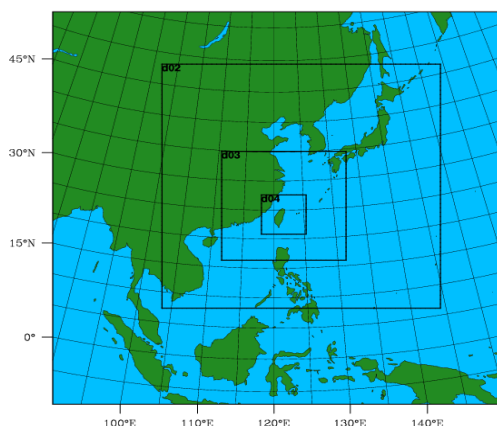


圖 2 WRF 四層網格模擬範圍

表 3 WRF 模式模擬採用的設定基準

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
Grid Size	91 X 91	169 X166	223 X 223	223 X 223
FDDA	Yes	Yes	No	No

4.2 CMAQ 模擬模式

為同時分析原生性與衍生性空氣污染物之影響，本計畫選用之空氣品質模式為 Models-3/CMAQ(Community Multi-scale Air Quality model)，此一模式之最大特色即在「一個大氣」(One-Atmosphere)的觀念，屬於網格模式的一種，此網格模式的特色為使用了多層次網格，模式中各網格之設定基準如表 4，圖 3 則為本研究之 Models-3/CMAQ 模擬分析的區域，其主要的模擬區域為 D4 區(臺灣本島周邊)，網格大小為 3km*3km，而 D3 網格則為 9km*9km，至於 D4 區域的邊界濃度則以 D3 模擬之結果代入，此一網格規劃即為多層次網格。

運用經過美國 NCEP 的初始場建立時，也使用資料四維同化的技術，以期能在更長時間的模擬過程中精確掌握模擬結果，評估模擬結果使用中央氣象局所屬測站觀測值進行評估，並完成 2016 年氣象模式模擬與驗證評估模式性能。

表 4 CMAQ 模式採用的設定基準

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
Vertical Layer	6	15	15	15
Grid Size	70×80	70×80	70×80	90×135
Aerosol Mod	Aero6	Aero6	Aero6	Aero6
Chemical	CB05	CB05	CB05	CB05

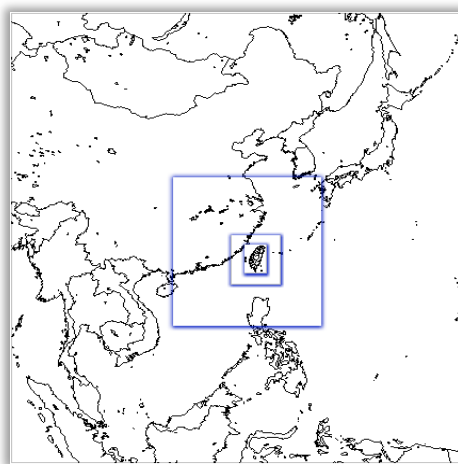


圖 3 Models-3 多層次網格示意圖

4.3 AQI 指標預測結果

統計 2020 年 10 月 8 日至 2020 年 1 月 12 日空氣品質預測期間，空氣品質指標(AQI)預測良好、普通、對敏感族群不健康以及對所有族群不健康之站數加總，預測結果又分為低估、符合及高估的日數，計算符合或高、低估時之百分比。其中低估時總日數為 319 站日，符合日數為 1,962 站日，高估時日數則為 201 站日，百分比率依序為 12.9%、79.0%及 8.1%，預測符合準確率約為 80%，如表 5 所示。

表中顯示空氣品質預測期間，AQI 預測良好時，有較好的結果，而 AQI 預測對所有族群不健康時，則有高估的情形。

表 5 空氣品質預測 AQI 符合比率

	AQI 結果	預測第二天				總和
		良好	普通	對敏感族群不健康	對所有族群不健康	
		0~50	51~100	101~150	151~200	
站數	低估	313	6	0	0	319
	符合	1,252	705	5	0	1,962
百分比	高估	0	141	49	11	201
	低估	20.0%	0.7%	0.0%	0.0%	12.9%
	符合	80.0%	82.7%	9.3%	0.0%	79.0%
	高估	0.0%	16.5%	90.7%	100.0%	8.1%
總站數		1,565	852	54	11	2,482

使用 2020 年 11 月 11 日的排放量來預測第 2 天的空氣品質狀況，預測空品影響範圍主要為臺南至屏東北部一帶，AQI 預測最高為小港站 158，實際觀測值亦在高屏附近有較高的濃度值，AQI 觀測值最高為屏東站 107；其中 AQI 預測良好的測站有 45 站符合觀測值，4 站低估，AQI 普通的測站有 12 站符合、1 站低估、1 站高估，對敏感族群不健康的測站有 3 站符合、6 站高估，對所有族群不健康的測站則有 1 站高估；其中預測值與觀測值的相關係數為 0.763，空間分布則如圖 4。

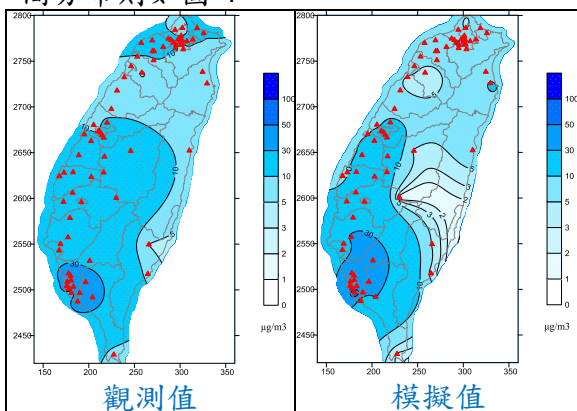


圖 4 2020 年 11 月 11 日空品預測結果

使用 2020 年 11 月 12 日的排放量來預測第 2 天的空氣品質狀況，預測空品影響範圍主要為臺中往南延伸至高雄的臨海區域，AQI 最高為小港站 146，實際觀測值則在高雄、屏東附近以及雲林、嘉義靠近南投部分山區有較高的濃度值，AQI 最高為潮州站 110；其中預

測空氣品質 AQI 指標為良好的測站有 33 站符合觀測值、1 站低估，指標為普通的測站有 32 站符合、1 站低估、4 站高估，對敏感族群不健康的測站則有 2 站高估，對所有族群不健康的測站則為 0 站；預測值與觀測值的相關係數 R 為 0.4822，空間分布則如圖 5。

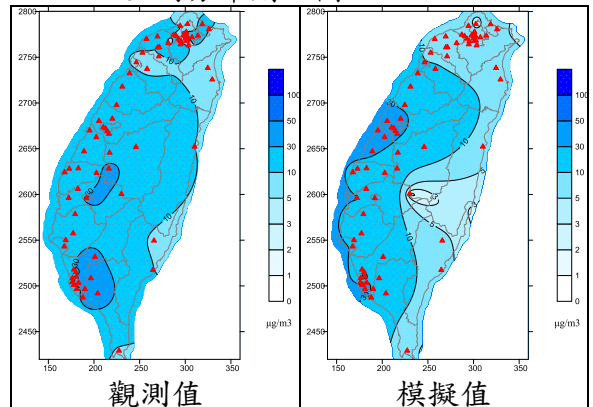


圖 5 2020 年 11 月 12 日空品預測結果

統計空氣品質預測期間，計算模擬值與觀測值的差異(模擬值-觀測值)，逐日把預測第 2 日之全臺 76 個 EPA 測站的誤差值平均，並繪製成如圖 6，期間臺灣本島排放量使用 TEDS 10，模擬值有較接近觀測值的結果，誤差介於-13.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~5.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，平均誤差則為-2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。



圖 6 2020 年全臺平均模擬值與觀測值的差異

由於預測期間為臺灣地區空氣污染較為嚴重的時期，對於空污嚴重地區之

預測至為重要，因此，未來空品預測將更能有效預測出空污嚴重時的影響狀況。

4.4 海域船舶排放預測

海域船舶污染物排放量依排放量預測機制，預測第 2 日的排放量，並依此排放量使用 CMAQ 模式模擬空氣品質預測情形，再繪出模擬預測之濃度分布情形，以期瞭解污染物擴散情形，如污染物高濃度主要分布區域、或特定區域集中狀況。

圖 7 為 2020 年 11 月 10 日至 2020 年 11 月 12 日海域船舶污染物排放預測第 2 日細懸浮微粒對臺灣本島的影響，3 日預測結果中，影響範圍有由南逐漸往北延伸擴散的趨勢，一直到新竹附近有較高的影響，且高濃度區域由高屏一帶逐漸轉移到臺中地區，此時可進行事先預防的動作，提早因應空污造成的影響。

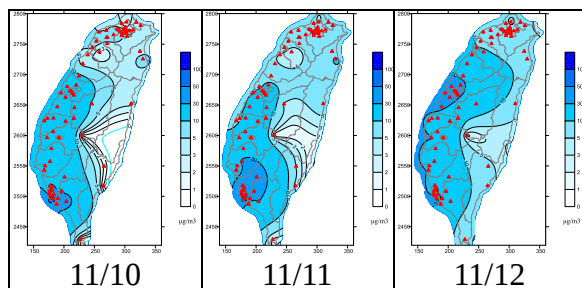


圖 7 海域船舶影響空氣品質預測結果

4.5 區域船舶排放預測

本研究以航港局航政轄區為主，將海域船舶排放量區分為 5 大區域，如圖 8 所示，並使用 CMAQ-ISAM 模組模擬各區域船舶排放對臺灣本島各測站之貢獻比例。

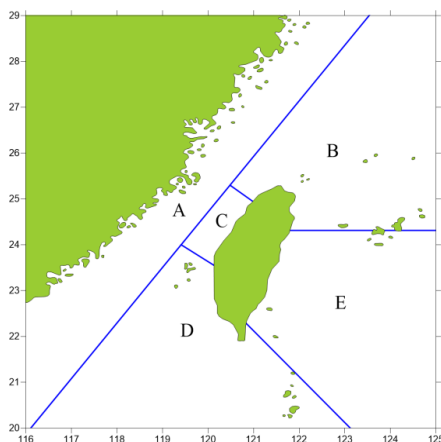


圖 8 海域船舶排放量區域分布

其中預測期間，A 區貢獻比率均為 0%，而 B 區全臺平均貢獻比例介於 0.07% ~ 1.47% 之間，單站貢獻比例最高為 2020 年 10 月 24 日位於三義站的 7.03%；C 區全臺平均貢獻比例介於 0.00% ~ 0.25% 之間，單站貢獻比例最高為 2020 年 11 月 3 日位於臺西站的 1.71%；D 區全臺平均貢獻比例介於 0.00% ~ 2.15% 之間，單站貢獻比例最高為 2020 年 10 月 10 日位於前金站的 8.17%；E 區全臺平均貢獻比例介於 0.01% ~ 0.65% 之間，單站貢獻比例最高為 2020 年 11 月 4 日位於臺東站的 13.57%。

4.6 港口船舶排放預測

同前述區域船舶排放影響，把臺北港、臺中港及高雄港之船舶污染物排放，以 CMAQ-ISAM 模組模擬各港口船舶排放對港口鄰近各測站之貢獻比率，自 2020 年 10 月 8 日以 CMAQ-ISAM 預測未來 48 小時空氣品質與各港區及海域之影響至 2020 年 11 月 12 日期間，結果顯示鄰近臺北港測站之林口、淡水及士林站，其平均貢獻比率依序為 1.62%、0.65%、1.47%，若以淡水站為代表，其貢獻比率介於 0.08% ~ 2.74% 之間，貢獻比率最高發生於 2020 年 11 月 12 日；鄰近臺中港測站之豐原、沙鹿、線西及西屯站，其平均貢獻比率依序為 0.

34%、0.29%、1.33%、0.30%，若以沙鹿站為代表，其貢獻比率介於 0.00% ~ 1.72%之間，貢獻比率最高發生於 2020 年 10 月 13 日；鄰近高雄港測站之前金、前鎮、小港及林園站，其平均貢獻比率依序為 1.72%、3.03%、5.26%、5.37%，若以前鎮站為代表，其貢獻比率介於 0.38% ~ 7.05%之間，貢獻比率最高發生於 2020 年 11 月 12 日。

五、結論

船舶排放量推估期間，預測第 2 日平均誤差 NO_x 、 SO_x 及 PM 依序為 -4.1%、-4.8%及 -4.4%，絕對誤差則依序為 23.6%、25.6%及 24.7%。

若以推估之船舶排放量搭配 TEDS 10，使用 CMAQ 結合 ISAM 預測空氣品質細懸浮微粒($\text{PM}_{2.5}$)結果，並統計預測期間之模擬值與觀測值，其誤差平均為 $-2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2020 年 10 月 8 日開始預測之 AQI 指標符合百分比則約為 80%。

本研究建置了臺灣附近海域船舶及臺灣本島固定污染源之排放量資料，並以建置完成之三維網格 WRF 氣象模式及 CMAQ 空氣品質模式，模擬海域以及港口船舶排放量對臺灣地區之影響，其結果將可作為空氣品質污染嚴重時之急應變措施的依據。

參考文獻

1. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2015) Port of Los Angeles Inventory Highlights 2015. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
2. Johson, J., Gauss, M., Shulz, M., Jalkanen, J.-P. and Fagerli, H. (2020) Effects of Global Ship Emissions on European Air Pollution Levels, *Atmos. Chem. Phys.*, 20: 11399-11422.
3. Karl, M., Jonson, J., Uppstu, A., Aulinger, A., Prank, M., Sofiev, M., Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Quante, M., and Matthias, V. (2019) Effects of Ship Emissions on Air Quality in the Baltic Sea Region Simulated with Three Different Chemistry Transport Model, *Atmos. Chem. Phys.*, 19: 7019-7053. .
4. Liu, T., Chen, Y.-S. and Chen Y.-T. (2019). Emission of Air Pollutant from Merchant Vessels in the Port of Kaohsiung, *Aerosol and Air Quality Research*, 19: 2341-2351.
5. Matthias, V., Bewersdorff, I., Aulinger, A., and Quante, M. (2009) The Contribution of Ship Emissions to Air Pollution in the North Sea Regions, *Environmental Pollution*, 158: 2241-2250.
6. US EPA (2020) Methodologies for Estimating Port-Related and Goods Movement Mobile Source Emission Inventories. Office of Transportation Air Quality, EPA-420-D-20-001.
7. Wang, X., Shen, Y., Lin, Y., Pan, J., Zhang, Y., Louie, P., Li, M., and Fu, Q., (2018) Atmospheric Pollution from Ships and its Impact on Local Air Quality at a Port site in Shanghai, *Atmos. Chem. Phys.*, 19: 6315-6330.
8. Zhang, Y., Yang, X., Brown, R., Yang, L., Morawska, L., Ristovski, Z., Fu, Q., and Huang, C. (2017) Shipping Emissions and their Impacts on Air Quality in China, *Sci. Total Environ.*, 581-582: 186-198.
9. 行政院環境保護署(2019)，「全國空氣污染物排放量清冊資訊系統」，https://teds.epa.gov.tw/TEDS_10_0.aspx。

臺中港單基海洋陣列雷達波浪及海流觀測之 分析研究探討

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

摘要

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

一、前言

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

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

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



圖 1 臺中港線性陣列雷達海洋現況

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



圖 2 臺中港觀測範圍示意圖

二、研究方法與探討

雷達波具有可在海水與大氣介面間進行傳遞之特性，該介面能量衰減率甚小，可沿著海水表面隨著彎曲的地球表面傳播電磁波，藉由雷達可獲取數平方公里海面的海洋狀態參數分布，探測各項海洋動力學參數，包括海面風速、波高、流速等，本章節將就雷達海象觀測原理、海洋陣列雷達基本資料與雷達電磁理論說明如下。

2.1 雷達海象觀測原理

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

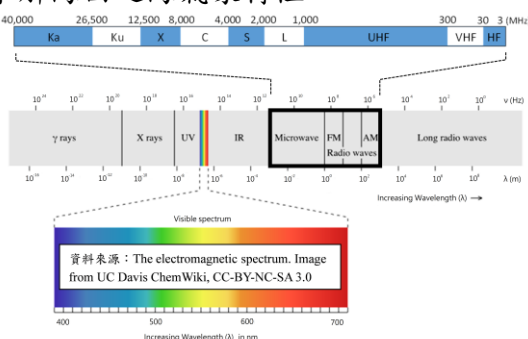


圖 3 訊號分類圖

研究追溯至美國 Barrick, D.E. 任職於國家海洋暨大氣總署(NOAA)研究期間發表之基礎，發展布拉格散射機制的公式與分析與半經驗方法，該方法不僅同時適用於單基或雙基雷達站情況，成功測量海流、風場及表面波，在 Barrick 研究中表面波理論是基於非線性流體動力和水波電磁方程式之攝動理論展開而發展。該文獻已提出許多理論，描述 HF 雷達散射回波的特徵，比如海面雷達回波的都卜勒頻譜 Barrick, D.E. (1972b, 1971b) 提出第一階與第二階的理論，透過計算背景雜訊時，將使用背景散射定律(Background scatter theory)，雷達散射面積(rad/s)等於每單位頻寬分之海表面平均雷達橫截面積，該理論於參數上具有限的收斂半徑，當雷達空間波數與表面振幅的乘積等於 1 時，該理論將失去效用，基此，存在飽和極限，高頻雷達可獲得最大 Hs (有義波高)，有義波高受到 2 倍雷達空間波數倒數的限制，因此，在極端情況下，當波高大於飽和值時，雷達量測有義波高的結果將被低估，原則上計算背景雜訊並加以濾除，後續應用布拉格能量大於平均能量，以確認都卜勒頻譜的平均能量與布拉格波範圍，最後利用第一階與第二階的邊界條件與權重方程式，在第二階訊噪比要大於 3dB 的情況下，再利用 Barrick, D.E. (1977) 所提出的權重係數，估計波高與估計的平均週期。定位入射角(Direction of arrival)，理論上接收天線量測的雷達回波來自四面八方，所接收到的訊號，包含海面初級回波與陸地結構及地表起伏的多重反射，因此，僅藉由單一天線並無法分析出訊號來源的實際方向，但如接收天線排列成線陣列的型式，就能透過海面回波訊號抵達各接收天線的不同時間，分析彼此訊號間的相位差。波束成形(Beam forming)演算技術便是利用蒐集各接收天線的回波訊號與相位差關係，解算來自不同方向之訊號成分，

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

2.2 海洋陣列雷達基本資料

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

表 1 海洋陣列雷達基本資料

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

2.3 雷達電磁理論

雷達電磁理論先由天線接收之複數形式的 I/Q 資料開始說明，I/Q 資料其實是 RF(Radio Frequency)通訊中常見的調變型態，該資料可做為頻率調製、混頻與解碼之基礎，本研究所需之回波強度與相位訊息即可透過 I/Q 函數來求得，I 表示電磁場的實部，Q 表示電磁場的虛

部。每個啁啾(Chirp)訊號時間長 0.2166sec，經過 A/DC(Analog/Digital Converter，類比/數位轉換)以 740Hz 頻率取樣，可以取出 160 個時序離散樣本，經由傅立葉轉換，可用傅立葉係數計算相應距離元的振幅與相位，資料處理後將 8,192 個啁啾進行合併，可得到受波浪影響之 I/Q 週期震盪的雷達回波強度圖，同相位頻道 I 第 9 支天線的回波強度圖，如圖 4 所示。

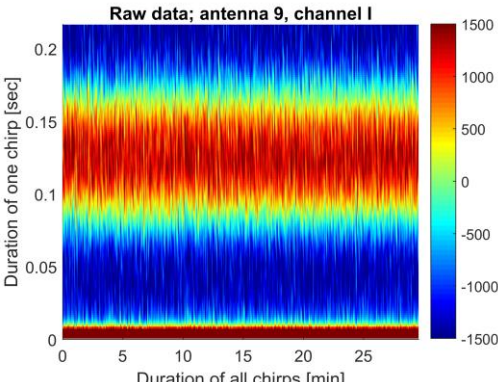
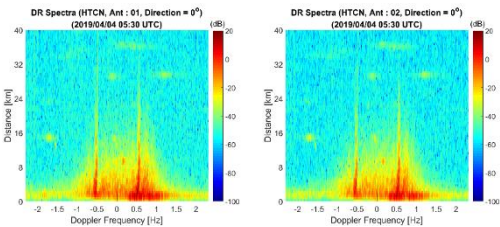


圖 4 雷達回波強度圖

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



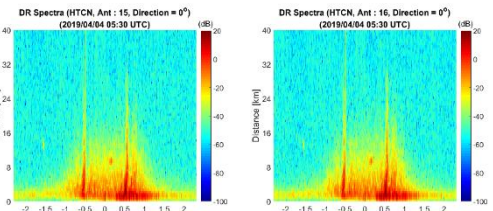
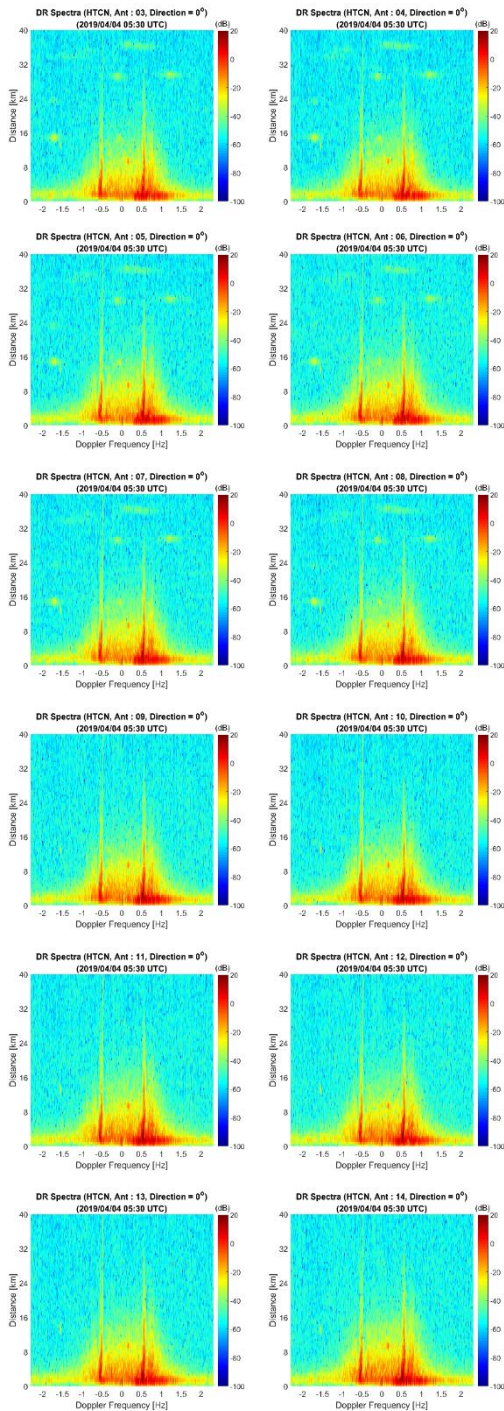


圖 5 都卜勒距離譜(D-R spectrum)

雖然發射天線場型具有指向性發射，但接收天線則係全向性接收，意即來自四面八方的訊號全部接收，利用多天線組的相位差進行波束成形(beam forming)以分析海面流速與波高。

2.3.1 海洋流場之徑向流速(V)

海洋雷達之回波訊號會隨著波浪運動產生都卜勒頻率位移效應，由於布拉格共振波所造成的連續性頻移可紀錄於都卜勒距離譜中，透過分析都卜勒距離譜一階峰頻率位移的差值 f_{current} ，再配合海面波浪波長等於雷達波長的 1/2 之公式(1)，將公式(1)代入電磁波速度公式經過換算，波浪的徑向速度 $V_{\text{radar current}}$ ，即可表示為公式(2)所示。

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

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

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

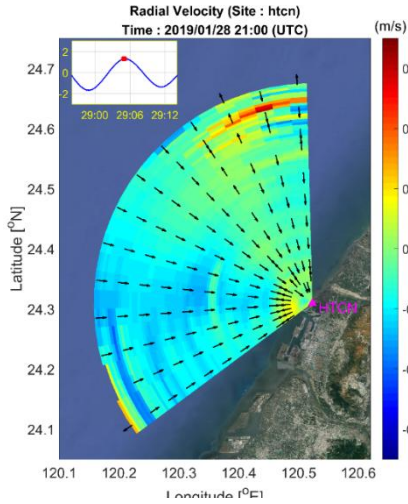


圖 6 雷達觀測流場圖

2.3.2 海面波高(H)與週期(T)

Barrick, D. E.(1972b, 1971b)提出許多海洋雷達的回波理論，有關都卜勒頻譜一階與第二階的理論，如公式(3)與公式(4)所示，計算背景雜訊的時候將使用背景散射定律(Background scatter theory)，雷達散射面積(rad/s)等於每單位頻寬分之海表面平均雷達橫截面積，原則上計算背景雜訊並加以濾除，後續應用布拉格能量大於平均能量，以確認都卜勒頻譜的平均能量與布拉格波範圍，最後利用第一階與第二階的邊界條件與權重方程式，在第二階訊噪比要大於 3dB 的情況下，再利用 Barrick, D. E. (1977)所提出公式(5)、與公式(6)與權重係數，其中參數 K_0 雷達波的波數、 $w(\nu)$ 雷達波於電磁和流體動力的散射效應總耦合情況下的權重係數、 ω 海面波浪的週波率、 ω_B 雷達布拉格週波率、 T_m 平均週期、 σ_1 第一階都卜勒譜、 σ_2 第二階都卜勒，如圖 7 所示。

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

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

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

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

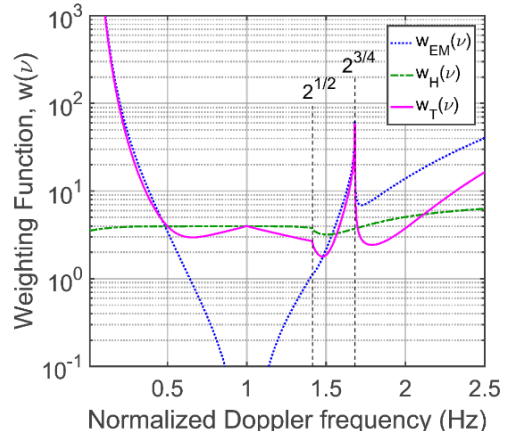


圖 7 權重函數與頻率正規化圖

2.3.3 雷達訊號處理步驟

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

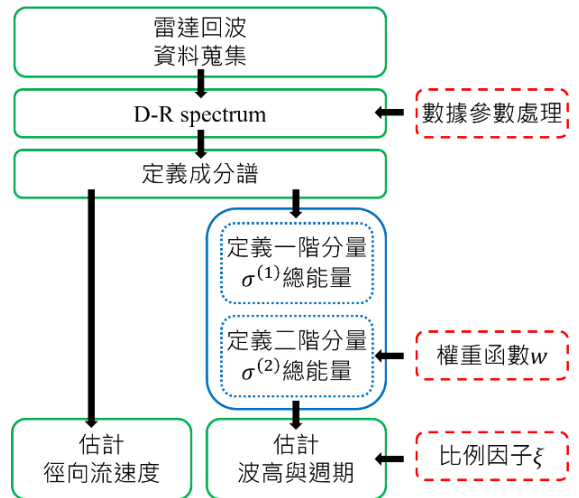


圖 8 雷達訊號處理步驟

三、海氣象觀測成果分析

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

3.1 海面波高(H)與週期(T)探討

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

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

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

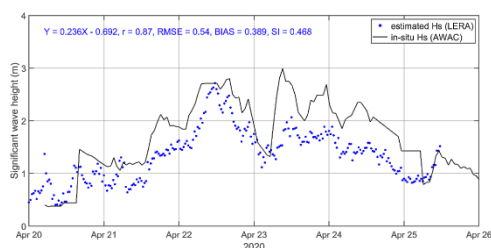


圖 9 波高 109 年 4/20~4/26 比對

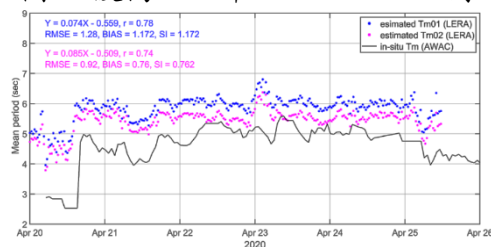


圖 10 週期 109 年 4/20~4/26 比對

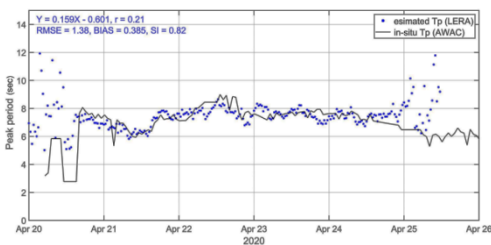


圖 11 尖峰週期 109 年 4/20~4/26 比對

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

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

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

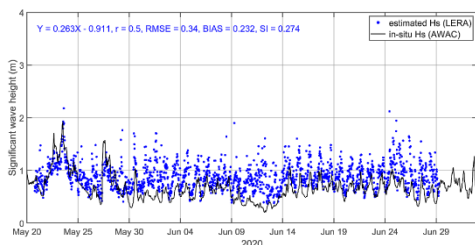


圖 12 波高 109 年 5/20~6/29 比對

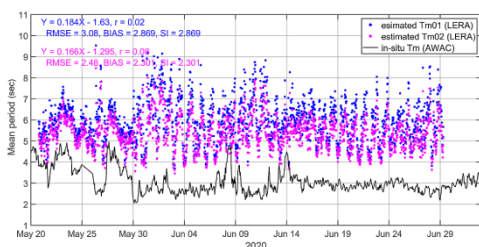


圖 13 週期 109 年 5/20~6/29 比對

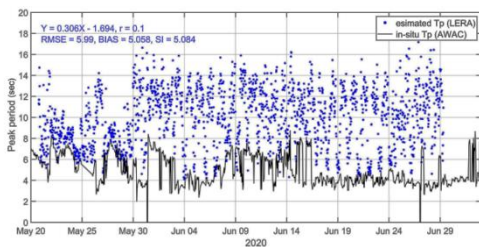


圖 14 尖峰週期 109 年 5/20~6/29 比對

3.2 海流徑向流速(v)探討

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

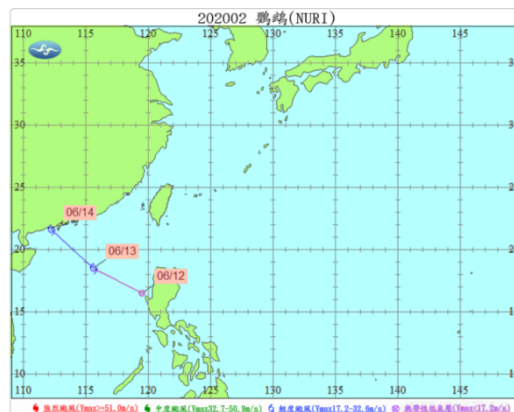


圖 15 鸚鵡颱風路徑圖(資料來源：交通部中央氣象局)

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



圖 16 海洋實測流速資料

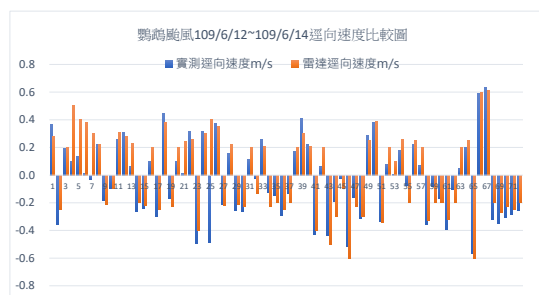


圖 17 海洋逕向速度比較圖

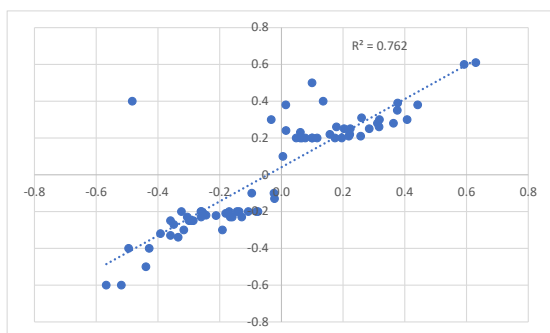


圖 18 逕向速度實測與雷達觀測散佈圖

四、雷達分析之影響成因探討

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

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

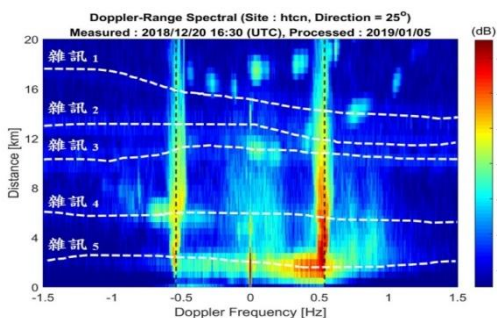


圖 19 雷達 D-R 譜背景雜訊

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

五、結論與建議

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

5.1 結論

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

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

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

5.2 建議

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

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

對於雷達訊號辨識的誤差，可能係雷達訊號重複反射訊號的雜訊造成，建議持續觀察與蒐集長期性的雷達訊號紀錄，以確認訊號來源為海面或者雜訊，長期觀測如確定為固定源訊號，可藉設置濾波器將其剔除，改善都卜勒距離譜之特徵值；此外，雷達資料品質對於高頻雷達的波流參數之評估十分重要，後續應建立雷達品質流程與訊號分類方法，以精進雷達訊號分析技術及解算最佳海氣象資訊。

參考文獻

1.林昆毅、陳少華、楊文昌、梁恩昱、高家俊，「高頻雷達測流系統之建置與天線場型測量之實例探討」，第 34 屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2012 年，763-768 頁。

2.吳立中、湯世燦、黃清哲、高家俊，「SeaSonde 高頻雷達測流演算法之研究」，第 34 屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2012 年，757-762 頁。

3.董東璟、蔡政翰、陳盈智、顏志偉、馬名軍，「應用岸基微波雷達量測近海流空間分布」，航測及遙測學刊，第 18 卷第 3 期，2014 年，193-204 頁。

4.黃郁軒、賴堅戊、吳立中、黃清哲、黃清哲，「集成式高頻雷達波浪與風向量測性能初探」，第 40 屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2018 年，367-372 頁。

5. Duy-Toan Dao、HwaChien、蘇青和、黃茂信、許義宏，「Assessment of phase array HF radar for ocean surface wave monitoring in the Taiwan Strait」，第 41 屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2019 年，352-356 頁。

6.國家實驗研究中心台灣海洋科技中心，103 年度台灣四周海域表層海流觀測年報，2014 年。

7.交通部運輸研究所，海洋雷達應用於海象觀測之探討-應用案例探討，2018 年。

8.交通部運輸研究所，107 年國際商港風波潮流觀測與特性分析，2018 年。

9.交通部運輸研究所，2018 年 12 港域海氣象觀測資料年報，2018 年。

10.Barrick, D. E., "Dependence of second-order Doppler sidebands in HF sea echo upon sea state", IEEE, Antennas and Propagation Society International Symposium, 1971, Vol. 9, p. 194-197.

11. Yuki Haru Hisaki, "Ocean wave directional spectra estimation from an HF ocean radar with a single antenna array: Observation", *Journal of Geophysical Research*, 2011, Vol. 110.
12. Guiomar Lopez, Daniel C. Conley, "Comparison of HF Radar Fields of Directional Wave Spectra Against In Situ Measurements at Multiple Locations", *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7, p. 271.
13. Barrick, D. E., "FM/CW radar signals and digital processing", NOAA Technical report, 1973, ERL 283-WPL 26.
14. Barrick, D. E., "Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra", *Radio Science*, 1977, Vol. 12, No. 3, pp. 415-424.
15. Lipa, B., "Derivation of directional ocean wave spectra by integral inversion of second order radar echoes", *Radio Science*, 1977, Vol. 12, No. 3, pp. 425-434.
16. Lipa, B., D. Barrick, "Methods for the extraction of long-period ocean wave parameters from narrow beam HF radar sea echo", *Radio Science*, 1980, 15 (04), pp. 843-853.
17. Wyatt, L. R., J. J. Green and A. Middleton, "HF radar data quality requirements for wave measurement", *Coast. Eng.*, 2011, 58 (4), pp. 327-336.
18. Roarty, H., Cook, T., Hazard, L., George, D., Harlan, J., Cosoli, S., ... & Grilli, S., "The global high frequency radar network", *Frontiers in Marine Science*, 2019, Science 6, p.164.