

高頻雷達徑向資料品管流程之研發

Development of Quality Control Process for High Frequency Radar Radials

呂宜潔* 賴堅戊 黃郁軒 吳季莊
財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心科技研究中心

摘要

高頻雷達可提供大範圍、全天候的表層海流逐時觀測資訊，全世界已有數個高頻雷達測流網，如美國整合海洋觀測系統(Integrated Ocean Observing System, IOOS)、歐盟海洋觀測系統(European Global Ocean Observing System, EuroGOOS)以及我國由台灣海洋科技研究中心營運之環臺岸基海洋雷達系統(Taiwan Oceans Radar Observing System, TOROS)等。然而這些雷達資料中仍包含環境或人為造成的影響，如電離層隨日夜變化造成海態回波訊號框定不易，又或者無線電頻率未妥善管制導致的干擾，以及參數設定導致資料品質在時間或空間上的不理想，因此近五年間各觀測網都致力開發品質管理程序(Roarty et al., 2014; Haines et al., 2017)，以提升高頻雷達遙測表面海流觀測之可靠度。

在這個新的品管機制中，我們發展了三個主要程序分別為1) 判斷檔案之檔頭、檔尾及資料格式與內容之完整性，以排除雷達系統硬體與分析軟體運作不正常之可能性；並利用頻譜分析或調和分析了解雷達量測的流速是否符合觀測區之歷史潮流特性，並檢視所量測到的海流資料是否符合常態分佈；2) 基於取樣定理計算各格點有效資料產出率，以確保此格點的資料能有效展現其潮流變化情形；3) 統計其平均值與標準差，以檢出偏差過大或過小的資料，確保資料在時間與空間的連續性與合理性。

最後，本研究將品管前後的雷達觀測表面流速與錨碇浮標等侵入式觀測所得之近表面流速進行比對，結果顯示，此一品管程序除了可更精準框定雷達回波速度範圍亦有效剔除異常資料，提高雷達遙測與侵入式觀測所得流速之間的相關係數且降低方均根誤差。我們相信，此一利用統計方法動態決定品管流程中門閾值的機制，更適合用於流場速度差異大的台灣週遭海域雷達測流網。

關鍵字：高頻雷達；資料品管；動態門閾值

一、前言

高頻雷達主要透過與海表面重力波之布拉格共振及其後向散射回波訊號中的頻率變化，從回波譜圖中框定一階峰範圍並利用都卜勒頻移關係式推估載在重力波上之徑向海流速度，並透過重疊觀測區之多測站構築合成海流觀測網，由於其具有遠距、範圍大及低成本等優點，近年被廣泛使用於海流觀測。

但因海洋雷達為使用無線電波傳遞之觀測儀器，在台灣地區有時會受到自然界電離層日夜變化的影響、鄰近國家未妥善協調與管理電台之無線電頻率、電子儀器故障或是人為設定疏失因素等影響，造成干擾甚至資料紀錄中斷，進而導致資料在時間或空間上的不完整。

近五年間各觀測網都致力開發品質管理程序，Roarty et al. (2014)提出對大西洋中部的高頻雷達之檢核清單，對徑向資料進行不同一階峰設定、角度與合成時間，以改進高頻雷達觀測網的資料；Haines et

al. (2017)利用direction-finding(DF)產出的非速度v訊息的direction of arrival(DOA)做為雷達系統的品管。

財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心之環臺岸基海洋雷達系統(Taiwan Oceans Radar Observing System, TOROS)係由4-24MH高頻雷達系統所組成，根據各區域之觀測設備可產出0.5至10公里解析度之流場，提供大範圍、全天候的表層海流逐時觀測資訊，除了可用於海難搜救(Breivik et al., 2012)與海洋污染物之擴散模擬(Rogowski et al., 2015)，對於環境變遷造成的海洋變動亦提供了科研重要的長期監測資訊。

二、資料品管發展

徑向資料會因為回波頻譜受到電離層影響、鄰近開發中國家在無線電波頻率使用的管制未能協調，使得本系統在作業化運作上面臨來自電離層反射訊號

及其他環境因素干擾(圖 1)，亦或測站硬體毀損所導致的，以大潭站 2014 年 3 月的平均徑向速度產出率(圖 2)可看出，雷達測流系統並非是在額定的距離、角度範圍內會一定能保持穩定產出的觀測系統。

此外在使用雷達回波推算表面海流的過程中，雷達回波訊號範圍的框選決定了流速和流向準確與否，最大徑向流速限制為頻譜一階峰框訂中最主要的參數，例如 TOROS 建站之初，依 CODAR 原廠預設的參數進行設定，將每一站的限制都設訂為 180 cm/s，但發現在地形束縮的澎湖水道以及黑潮流經的東部海域，由於其流速可能達到 3~4 節，而無法正確框定回波訊號。因此 2014 年起 TOROS 團隊逐一檢討各站觀測範圍的海流特性，利用計算各站逐月的平均值與標準差等統計值，分別給予不同的最大流速限制，藉由統計方法設定最大徑向速度閾值，使得徑向流速觀測可信度大幅提升(賴等人，2015)，並開始著手建立利用統計的方式建立時間與空間中各項動態門閥值，以維持資料合理性與連續性，而有別於其他單位的品管機制使用固定門閥值的品管流程設計邏輯。

三、資料品管標準與作業程序

本品管流程以逐月逐站的方式，檢核徑向資料產出格式與數量、時間與空間三個項目之合理性與連續

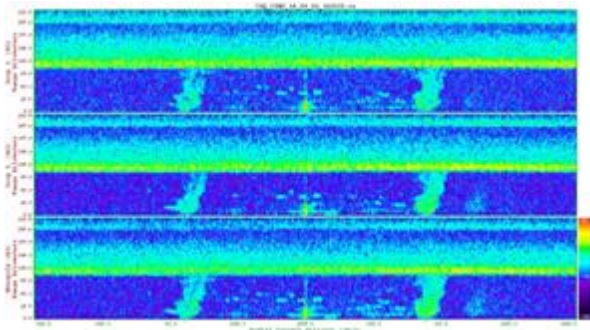


圖 1 雷達回波訊號受電離層影響

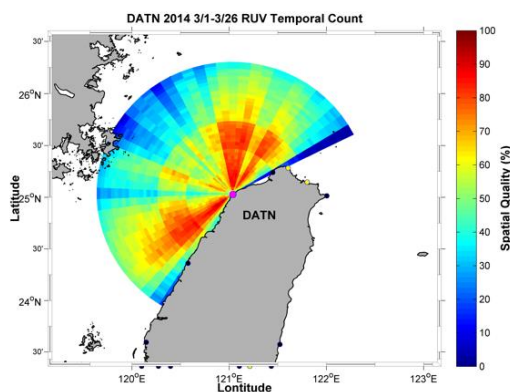


圖 2 徑向資料因干擾或硬體設備影響產出不穩定

性，以提高雷達測流徑向資料之可靠性，在此以 2015 年 01 月北堤(PETI)站之逐時徑向資料為案例，就本研究提擬之品管程序進行說明。

3.1 資料產出合理性

判斷檔案之資料寫入完整性、最低應有格點數、檔頭(Header)、疊合時間(Time Coverage)與資料應有行數等資料格式與內容之完整性。

當測站徑向產出格點數變少時，可能的原因有：海面過於平靜，得不到回波訊號；抑或是周圍環境的雜訊干擾過多，而無法有效的解離出訊號。產出的有效格點數太少對於其解析的流場正確性有所疑慮，為了後續時間與空間統計提供符合條件的樣本數，以及避免徑向速度反演過程中背景噪聲過大導致的徑向速度難以產出等情形，本研究設定至少需要 100 個有效格點產出之標準，以排除雷達系統硬體與分析軟體運作不正常之可能性，後續將在進一步訂定更適當的動態門閥值。此品管項目檢核結果如圖 3，無法通過本次品管之項目對照表如表 1。

接著由於徑向流速是透過雷達回波訊號框定產出的，所以在資料品管的第二步，我們利用頻譜分析或調和分析，了解本次雷達量測的流速是否符合觀測區域的歷史潮流特性(如圖 4)，並使用柯-史單一樣本檢定 (The Kolmogorov-Smirnov Test) 檢視所量測到的海流資料是否符合常態分佈(如圖 5)，若檢定未成立則進行數據轉換使符合常態分佈。本次品管之海域屬半日潮及混合潮之混合潮區，基於取樣定理，採樣頻率需大於最高頻率的 2 倍，因此本研究設定各格點有效資料產出率須大於 1/6 方可納入計算，以確保此格點的資料能有效展現其潮流變化情形(如圖 6)。透過上述資料產出合理性的品管流程得以確保排除雷達系統硬體與分析軟體運作不正常之可能性。

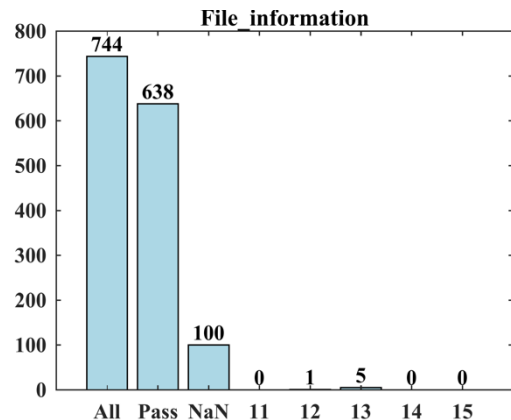


圖 3 資料產出合理性檢查結果

表 1 無法通過資料產出合理性之標記對照表

| 無法通過資料產出合理性檢核之標記對照表 | |
|---------------------|-----------------|
| 標註 | 對應內容 |
| NaN | 無此筆資料。 |
| 11 | 此筆資料寫入不完整。 |
| 12 | 此筆資料產出格點少於設定值。 |
| 13 | 此筆資料檔頭不完整。 |
| 14 | 此筆資料疊合時間不滿足設定值。 |
| 15 | 此筆資料欄位不符合設定值。 |

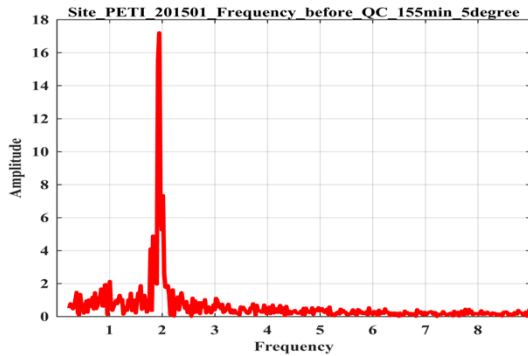


圖 4 利用頻譜分析了解量測到的雷達資料是否符合觀測區域的歷史潮流特性

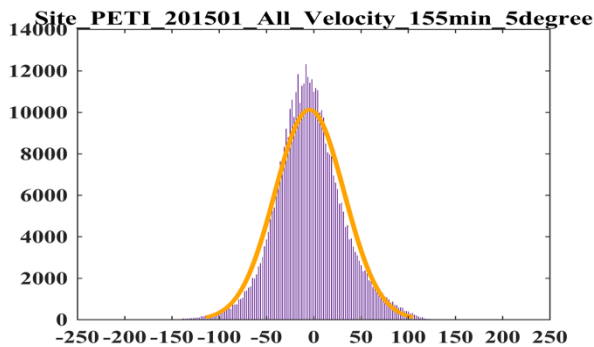


圖 5 檢視雷達資料是否常態分佈

3.2 時間連續性與合理性檢驗

在自然界中物理量變化多是循序漸進的，在時間變化上應具有連續性，當觀測結果在某段時間內有巨大的變化，則可視為異常值加以移除或標記。本研究假設海流流速在同一個位置不會突然變化甚大，故設定流場在時間的連續性上當 $|V_t - V_{t-1}| > 54 \text{ cm/s}$ 且 $|V_t - \bar{V}| > |V_{t-1} - \bar{V}|$ 時則刪除 V_t 的資料，通過此項品管的結果如圖 7。接著透過統計的方式計算各格點該月之平均值與標準差，當 $V_t > \bar{V} + 3 \times \sigma$ 或 $V_t < \bar{V} - 3 \times \sigma$ 表示該格點的值已超出當月該得點的合理範圍內，故刪除 V_t 的資料，通過此項品管的結果如圖 8。

3.3 空間合理性檢驗

海流為面而非點的資料，同理在空間變化上亦保持其合理性，故本研究以該格點作為中心，與其鄰近點組成一九宮格，當中心點為於邊界時，則延伸另一側，補滿為九宮格之型態，並增加其在時間前後共 27 個點，如圖 9，探討其在空間上之合理性。首先為了後續統計之合理性，本研究制定若資料量少於 9 筆者則刪除 V_t 的資料，通過此項品管的結果如圖 10。接著先刪除 27 筆資料中之最大值與最小值再進行統計，以得到更合適的門閥，當 $V_t > \bar{V}_{3 \times 3} + 3 \times \sigma_{3 \times 3}$ 或 $V_t < \bar{V}_{3 \times 3} - 3 \times \sigma_{3 \times 3}$ 表示該格點當下的值已超出該空間的合理範圍內，故刪除 V_t 的資料，通過此項品管的結果如圖 11。透過上述檢核步驟，各品管機制刪除比例如圖 12，標記對照表如表 2。

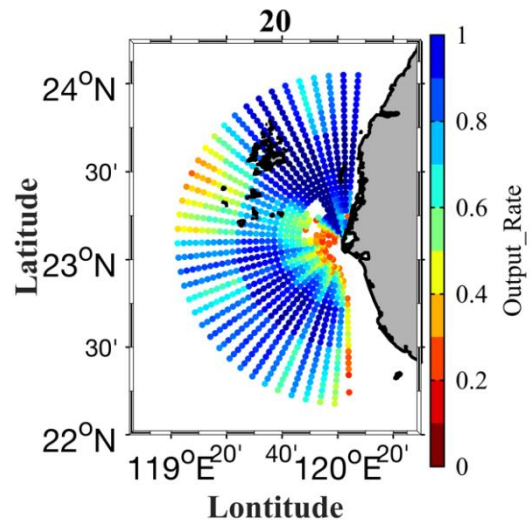


圖 6 通過產出率標準之有效資料百分率

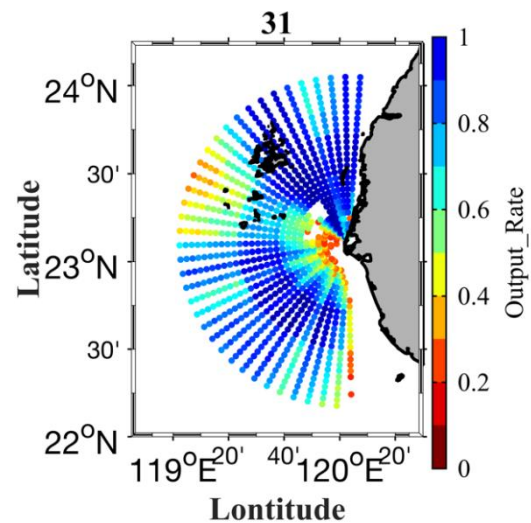


圖 7 通過時間連續性之有效資料百分率

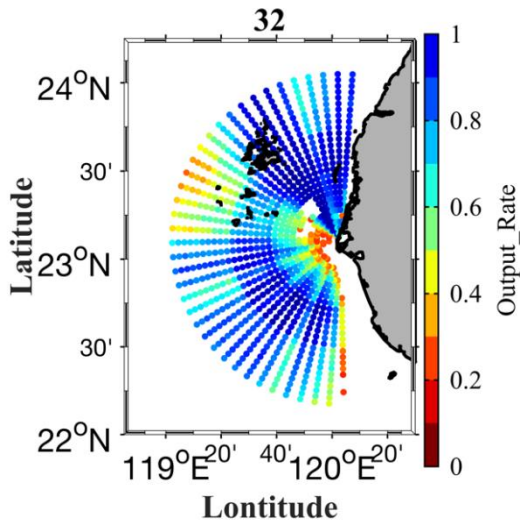


圖 8 通過時間合理性之有效資料百分率

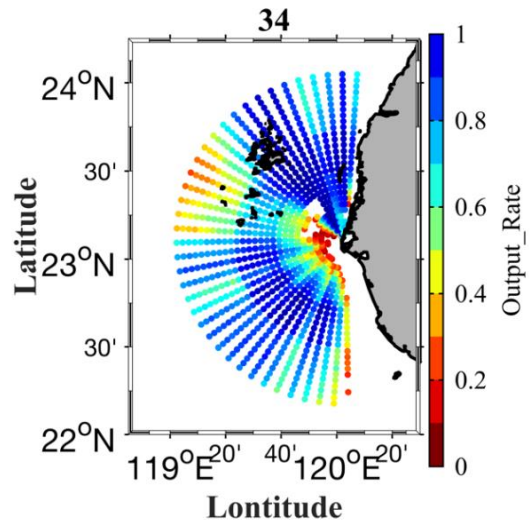


圖 11 通過空間合理性取樣之有效資料百分率

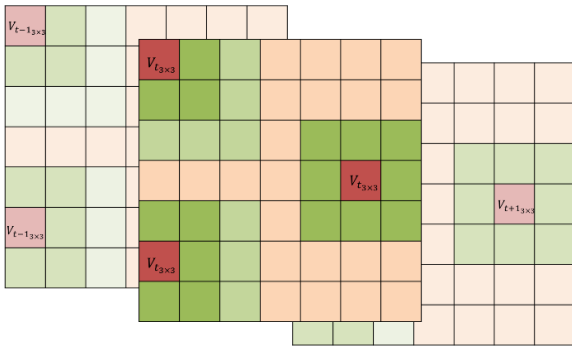


圖 9 時間與空間取樣示意圖

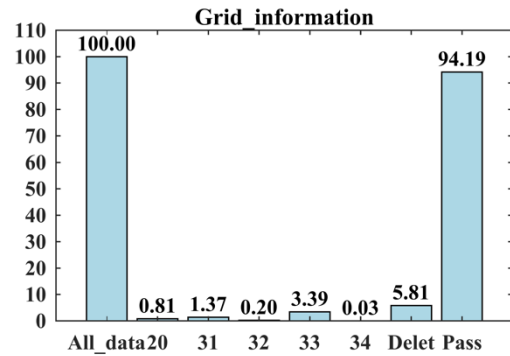


圖 12 經過各項品質管制刪除百分率

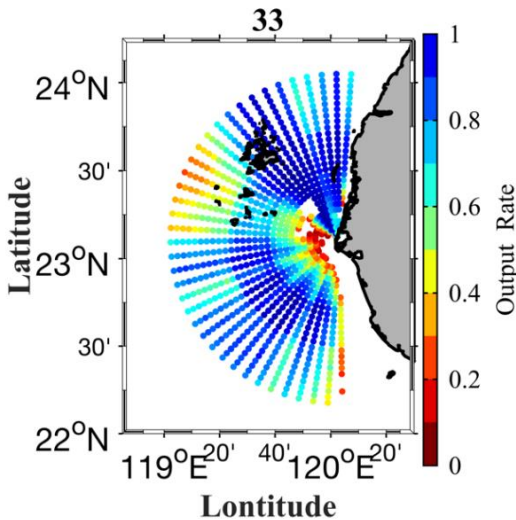


圖 10 通過時間與空間取樣之有效資料百分率

表 2 無法通過品質管制流程之標記對照表

| 無法通過資料時間與空間檢核之標記對照表 | |
|---------------------|--|
| 標註 | 對應內容 |
| 20 | 此格點產出率不符合設定值 |
| 31 | $ V_t - V_{t-1} > 54 \text{ cm/s}$ 且 $ V_t - \bar{V} > V_{t-1} - \bar{V} $ |
| 32 | $V_t > \bar{V} + 3 \times \sigma$ 或 $V_t < \bar{V} - 3 \times \sigma$ |
| 33 | 時間與空間九宮格中有效 $V_{3 \times 3 \times 3}$ 數量小於 9 個 |
| 34 | $V_t > \bar{V}_{3 \times 3 \times 3} + 3 \times \sigma_{3 \times 3 \times 3}$ 或 $V_t < \bar{V}_{3 \times 3 \times 3} - 3 \times \sigma_{3 \times 3 \times 3}$ |

錨碇浮標之 ADCP 所測得之近表面流速，進一步推算投影至測站方向之速度分量並與雷達量測所得之徑向速度進行比對，並統計分析雷達與錨碇浮標之相關性 (Correlation) 與均方根誤差 (Root Mean Square Deviation) 做為本雷達系統品質及本研發工作成果的量化指標。

搭載 ADCP 之錨碇浮標以近乎定點的方式持續觀測海流速度剖面，本研究以 2014 年 9 月至 2015 年 2 月共

四、測流驗證品質管制成果驗證

有關雷達徑向觀測資料比對及品質管制程序的驗證，本研究僅先以兩個具有 ADCP 觀測海流資料的錨碇浮標當做現場實測資料 (Ground Truthing) 來源。並將

計6個月間之水利署彌陀及臺東錨錠浮標所測得逐時近表面流速分別與北堤PETI、旗后CIHO測站及小野柳SHIA、旭海SUHI測站進行品管前後之徑向速度比較，比較結果整理如表 3所示。由表中可發現，除了旭海SUHI與臺東浮標的相關係數為0.1且均方根誤差56.76cm/s，比對結果並不理想；其餘三個比對組的結果顯示，雷達測流與錨錠浮標測流之相關係數介於0.64~0.75之間，而均方根誤差則介於19.05~41.48 cm/s。有關以CODAR和錨錠浮標之比對，Emery et al. (2004)、Lorente et al. (2014)及 Rohrs et al. (2015)報導中，其相關係數介於0.17~0.83，均方根誤差介於0.085~31.0cm/s，其中同樣使用5MHz系統的Lorente et al. (2014)，其相關係數介於0.49~0.65，均方根誤差介於11.55~16.37cm/s，因此我們認為TOROS雷達測流品質與單點錨錠浮標的表現應屬中上水準。

探究其錨錠浮標測流與雷達測流間產生差異的原因，可由觀測系統差異著手，如本研究使用之雷達為徑向距離單元解析度3.75公里、角度解析5度之5MHz系統，觀測之空間意涵與單點錨錠浮標不同，再者本次使用的錨錠浮標屬於近岸浮標，以錨錠浮標5公里搜索半徑內之徑向速度平均值來與錨錠浮標所得流速進行比較，將有採納之徑向速度數值之空間分佈與數量的問題影響兩個不同觀測系統間對流速意義的差別，如圖 13中繪出彌陀與臺東浮標分別與鄰近之雷達觀測徑向速度之空間位置關係，紅色圓圈代表設定被採納用來與錨錠浮標進行比對的雷達徑向速度採納範圍，此外，當近岸地形較複雜，將影響海流在空間中的均一性(homogeneity)，也使得兩者之間的相關性很難完全一致，這也可以進一步說明為什麼雷達測流與位於平直海岸的彌陀浮標較相關，而與位於蜿蜒的台東市外海之臺東浮標相關性較差。

表 3 雷達測流品管成果與錨錠浮標測流比對

| 統計值 比對組 | 品管前 (重算) | | 品管後 | |
|------------|----------|-------|------|-------|
| | 相關係數 | 均方根誤 | 相關係數 | 均方根誤 |
| PETI /彌陀 | 0.67 | 26.11 | 0.69 | 25.15 |
| CIHO /彌陀 | 0.75 | 19.03 | 0.75 | 19.05 |
| SHIA /臺東 | 0.63 | 41.10 | 0.64 | 41.48 |
| SUHI /臺東 | 0.11 | 57.26 | 0.10 | 56.76 |
| 整體平均 | 0.54 | 35.88 | 0.55 | 35.61 |

至於旭海SUHI與臺東浮標相關性較低與偏差較大的原因，我們透過回溯檢視旭海雷達觀測比對期間雷達回波譜的訊號品質、一階峰框定等，並未發現有顯

著的異常，進一步觀察方向識別多重訊號分類(Multiple Signal Classification, MUSIC)以及徑向流速產出情形則發現，如圖 13 (右下)旭海站在朝向臺東浮標方位(65度)的資料產出率明顯較鄰近的幾個角度低了40%，顯示天線場型配合MUSIC演算法在此方向角的目標訊號方位到達(direction of arrival, DOA)運算碰上問題，導致解算率低下，甚至有解算之徑向速度正確性的疑慮。此類型觀測品質疑慮，並未納入本此開發流程中，後續將根據CODAR系統產出之Radial Metrics檔中DOA解算紀錄，並配合產出率統計，新增一個對方位角逐一進行檢查的品管流程。

另一方面，回到本文資料品管程序的成效，由表 3中品管後的資料不論是相關係數還是均方根誤差，多較品管前略微改善，根據表中此次統計分析資料(排除SUHI/臺東比對組)再分析顯示，相關係數與均方根誤差約可改善1%，效果雖不顯著，但有效剔除在時間或空間領域的異常值，例如以品管前後相關係數提升最多、均方根誤差降低最顯著的2014年9月以及2014年12月PETI /彌陀之徑向速度比對時間序列圖 14及圖 15可看出，未品管前資料筆數分別為1692及2614筆，經過本品管程序後剔除異常值65及38筆。本研究報導之TOROS新品管機制改善了流速資料的合理性與連續性，可增加對觀測品質的信心。

五、結語

本文報導海洋中心的環臺岸基雷達測流系統資料品管程序，TOROS的品管程序從一開始依循美國CODAR公司手冊與建議，並於2014年間進化為針對各站設定最大徑向速度等一階峰框定參數，並於近年增加動態閾值以及根據徑向速度數據單元的時間、空間合理性與連續性等品管機制，以提高產出流場的合理性與可信度。

根據本研究以錨錠浮標ADCP量測之近表面流速進行尤拉的比對，TOROS雷達測流資料在經過新的品管機制後之相關係數介於0.64~0.75間，均方根誤差介於19.05~41.48cm/s間。比較本研究報導之新品管機制前後之比對結果顯示，相關係數提升平均約0.05，均方根誤差平均降低約2.26 cm/s，相較未品管前得到符合預期的目標，有效剔除在時間或空間領域的異常值，

後續將朝向先將雷達測流資料先進行濾潮後，再代入時空合理性與連續性的品管程序，並將進一步就回波訊號強度以及MUSIC等雷達訊號反演過程中可能導入的訊號識別風險等發展下一階段的品管機制。

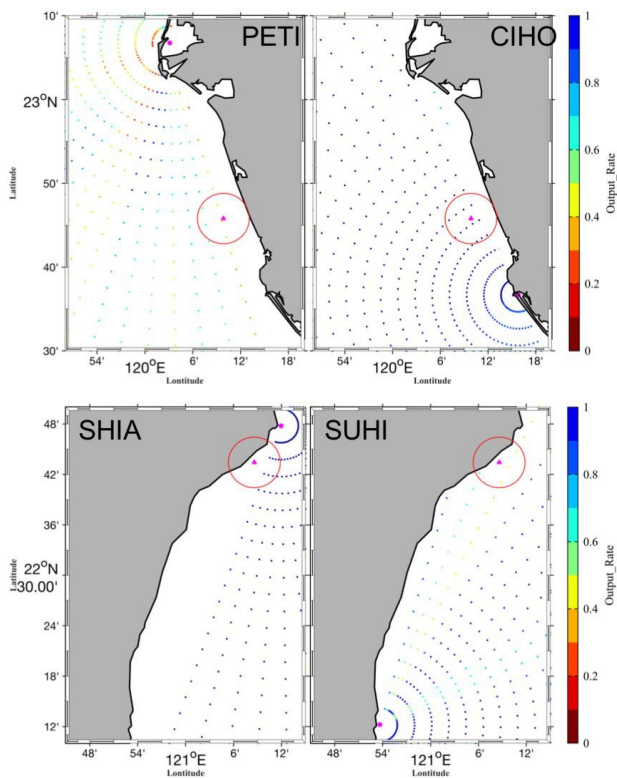


圖 13 雷達站之各徑向單元之資料產出率統計及其對應錨碇浮標之空間關係 (左上：PETI；右上：CIHO；左下：SHIA；右下：SUHI)

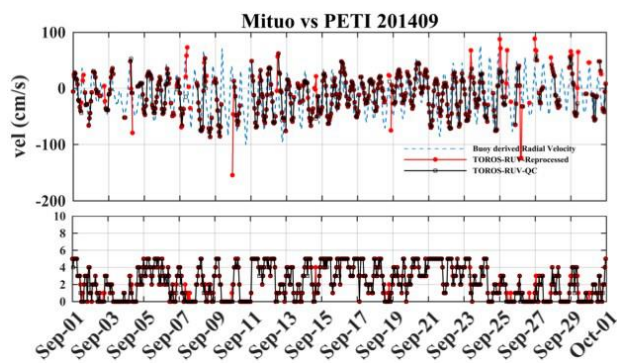


圖 14 2014年9月品管前後PETI/彌陀錨碇浮標時序列

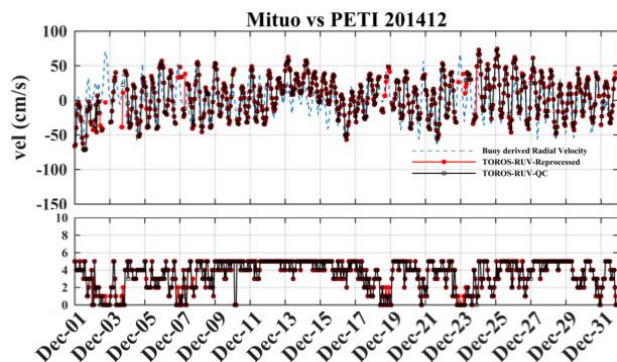


圖 15 2014年12月品管前後PETI/彌陀錨碇浮標比對時序列

六、參考文獻

- Breivik, Ø., A. Allen, C. Maisondieu, and M. Olagnon (2013), Advances in search and rescue at sea, *Ocean Dyn.*, 63(1), 83–88, doi:10.1007/s10236-012-0581-1.
- Haines, S., Seim, H. & Muglia, M. Implementing quality control of high-frequency radar estimates and application to Gulf Stream surface currents. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34, 1207–1224, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0203.1>(2017).
- Hugh Roarty, Michael Smith, Colin Evans, Ethan Handel, Josh Kohut, Scott Glenn (2014), Quality control for a network of SeaSonde HF radars, *IEEE OCEANS, TAIPEI, TAIWAN*.
- Lorente, P., Piedracoba, S., Soto-Navarro, J., Alvarez-Fanjul, E., 2014. Accuracy assessment of high frequency radar current measurements in the Strait of Gibraltar. *J. Operat. Oceanogr.* 7(2), 59–73.
- Rogowski, P.A., Terill, E., Schiff, K., Kim, S.Y., (2015). An assessment of the transport of southern California stormwater ocean discharges. *Mar. Pollut. Bull.*, 90 (1–2), 135–142.
- Johannes Röhrs, Ann Kristin Sperrevik, Kai Håkon Christensen, Göran Broström, and Øyvind Breivik (2015) Comparison of HF radar measurements with Eulerian and Lagrangian surface currents, *Ocean Dynamics*, 65(5), 679–690. <http://sci-hub.tw/10.1007/s10236-015-0828-8>
- 賴堅戈、黃育軒、徐堂家、陳思樺、楊雅兆、吳季莊、陳少華、余昭明、林昆毅、李永緯、呂宜潔 (2015) 103 年度台灣四周海域表層海流觀測年報，財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心。
- 賴堅戈、吳季莊、黃育軒、陳少華、李永緯、徐堂家 (2015) “環台岸基雷達測流系統的徑向資料品管程序,” 104 年天氣分析與預報研討會，台北。