

微波雷達遙測技術應用於近岸海域之海流監測

吳立中¹、賴堅戊²

摘要

遙測領域中的微波雷達觀測技術是近年來被廣泛應用於海洋流場監測之重要工具。目前國際間的研究大多聚焦於外洋流場監測之議題，本文則探討微波雷達於近岸海域觀測海流之結果。透過雷達遙測結果可發現於近岸較複雜地形附近之海流具有明顯之空間非均勻性。相較於單點一維度時間域的現場量測與二維度大空間尺度的衛星遙測，岸基微波雷達可針對海表面進行三維度時空合域的監測，是解析近岸時空變異之流場特徵極具潛力的工具。

一、前言

「海流」可定義為在海洋中的水體朝著一定的方向和速度運動之現象。海流對於全球變遷扮演著關鍵角色。透過水體的流動可有效傳遞熱量、鹽度和養分，影響了地球的氣候和生態系統，也進而促進了漁撈產業之發展。也因為透過海水體流動可產生動能，海流能發電也成為近年再生能源發展的其中一環。然而產生海水體流動的成因相當多元。受到潮汐、空間中溫鹽的差異、風吹拂海表面等環境因子之影響，皆會驅動海水流體之運動。影響臺灣周遭海域之海流特徵與主要成因複雜。全球第二大洋流-綿延數千公里的黑潮就由南往北流經臺灣東部海域。臺灣海峽與臺灣北海岸海域則因潮汐與地形之作用，產生較明顯週期性的潮流。此外，季節風也會造成海流之變化。臺灣於冬季時常受到東北季風之影響，季風所造成的風趨流會隨風速變化，流速相對並不規則。

相較於外海，海水流經近岸水域時所產生的變化又更為複雜。依據流體力學之理論，海水流體與固體地形交互作用後，就會造成流體一定程度之變化。再加上近岸水域波浪破碎後所產生的紊流，更加深了近岸流場特徵的複雜程度。學界對於海流的物理現象至今仍持續探討中。除了利用水槽試驗或是數值模式來取得特定時空位置的水動力特性之外，現場的海流觀測仍是釐清海流特徵的重要關鍵。隨著科技之進步，

已有不同的海流觀測方式以及儀器陸續被發展出，並實質應用在觀測作業中。當前在現場觀測領域中，不論是單點式或是剖面式流速儀，皆已大量在水下觀測作業。

隨著海洋遙測技術的持續進步與發展，國內外許多學者開始投入海洋遙測技術之發展。雖然各種不同的海流遙測的技術相繼被提出，但其原理大多是透過發送主動式電磁波，電磁波經過具有海水流動之海表面再後向散射回到電磁波接收端。透過解析所接收到的電磁回波訊號，藉此計算出電磁波所經過海面之流場特徵。發展海流遙測技術之優點包含有：

1. 遙測屬於空間域的觀測，可獲得較現場單點觀測更大範圍的海流資訊；
2. 遙測設備設置於陸地上(如圖 1)，安裝較為簡便且容易，維護成本亦較低，相當適合作為長期海況監控作業之設備；
3. 可有效減低海洋外力對雷達設備造成的影響，免除海上作業之風險；
4. 可日夜不停地取得空間範圍海流參數之優勢。
5. 相較於海上現場觀測，微波雷達架設於岸邊，提供穩定電力即可在時間上持續觀測空間域的海面狀況，兼具時空合域觀測之優勢 (Doong et al., 2018)。

上述幾點說明了發展近岸海流遙測技術是必要且有價值的方向之一。在各種海表面流場之雷達遙測技術中，使用高頻雷達(High frequency radar)測流可較不受到夜間光源不足以及降雨影響的限制，且能進

1 國立成功大學近海水文中心副研究員

2 國家海洋研究院海洋產業與工程研究中心研究員

行觀測半徑可達百公里等級之海流觀測，是目前國際間使用的主流的海流遙測技術之一。高頻雷達的流場解算原理主要是偵測布拉格波(Bragg wave)受海表面速度影響所產生的都卜勒頻率偏移(Crombie, 1955; Stewart and Joy, 1974)，再根據頻率偏移量反算出海面流速。

相較於高頻雷達適用於大範圍海域的觀測，X-Band 航海雷達的波段則適合在小尺度區域(數公里範圍內)內進行更高解析度的流場觀測。因岸基 X-Band 雷達系統架設於陸地上，可以長時間且穩定地同時觀測海面在時間及空間上的變化，提供豐富之觀測數據，是一種適合的遙測工具。藉由分析 X-Band 雷達的海面回波影像可求得各類之海況參數，諸如：波浪之週期、波長、海表面之流速、流向…等，提供各項海上活動相關資訊。

從 1960 年代起，科學家就注意到微波雷達的回波可反映出一些海表面特徵。亦有研究發現 X-Band 雷達，也就是本研究所使用航海雷達設備之頻段，可呈現出海面波紋之特徵(Ijima and Sasaki, 1964; Mattie & Harris, 1978)。受到此項研究成果之啟發，陸續有不同研究團隊投入相關的試驗與討論。Young et al.(1985)則利用傅立葉轉換解析三維度的 X-band 雷達影像序列中所呈現之波紋，從中擷取海面波譜資訊，再進一步搭配線性波浪理論反推出海表面流場，開啟了從航海雷達影像序列解析海流參數的先河。儘管距離 Young et al.(1985)提出海面雷達影像的分析方法已經超過 30 年，學界仍然持續進行 X-Band 雷達觀測技術的研發。近年來，由於訊號擷取技術的持續發展，高速擷取雷達回波的類比訊號，並以數位形式進行收錄，進而從事海況分析已屬技術可行。國內亦已具備建置獨立自主技術之雷達訊號擷取與分析之能量。



圖 1：岸基微波雷達站

(圖片來源：國家海洋研究院微波雷達站)

二、微波雷達觀測海面流場之原理

雷達設備是以電磁波作為觀測或是偵測目標物之媒介。本研究所使用之 X-Band 航海雷達，其電磁波頻段為 8~12GHz，可換算其對應之波長為 2.50~3.75cm。根據電磁波布拉格散射之機制，X-Band 與海面的微小擾動之間能產生強烈的回波，因而能從中有效成像出海面之波紋特徵。透過分析連續測得之海面波紋影像，可求得海面波紋之影像譜。針對影像譜之分析，學界普遍是利用三維快速傅立葉轉換求得影像時序列的傅立葉係數，再取其絕對值平方可得到雷達影像之影像譜。

$$M(\vec{k}, \omega) = M(k_x, k_y, \omega) = \left| \iiint I_c(x, y, t) \exp[i(k_x x + k_y y - \omega t)] dt dx dy \right|^2 \quad (1)$$

上式中 $I_c(x, y, t)$ 代表雷達影像時序列函數，描述不同時間(t)以及空間(x, y)之雷達回波能量。 $M(k_x, k_y, \omega)$ 為雷達影像譜， k_x, k_y 為雷達影像中成分波之波數， ω 為影像時序列之角頻率。

雷達回波影像經由頻譜轉換後，可獲得海面波浪於角頻率域(Angular frequency domain, ω)以及波數域(Wave number domain, \vec{k})的能量密度分布。根據線性波理論，波浪的角頻率與波數可滿足下列數學關係：

$$\omega = \sqrt{g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d) + \vec{k} \cdot \vec{U}} \quad (2)$$

上式為波浪的分散關係式，其中 g 為重力加速度， d 為水深， \vec{U} 為流場。如圖 2 所示，為影像譜中能量密度分布(圖中不同顏色之等值線所在區域)與波浪分散關係曲面理論(圖中之圓錐曲面)之實際案例。透過計算不同流速條件下之分散關係理論分布與雷達影像實際測得之波數譜能量密度分布(Young et al., 1985)，進行最小二乘法的擬合分析，可求取出與實際測得之影像譜能量密度分布最契合的流速條件。藉此解算出被分析波紋影像區域之流速向量。

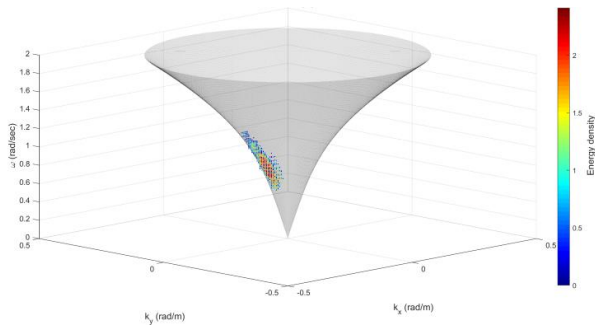


圖 2：影像譜中能量密度分布與波浪分散關係曲面之關係

三、雷達監測場域說明

本研究選用的觀測資料來自於國家海洋研究院於臺灣東北角的龍洞四季灣所建置之微波雷達站，其影像觀測案例如圖 3 所示。從圖 3 可確認雷達觀測範圍內之海岸線並不平直。依據流體力學之理論，崎嶇不平的海岸地形易造成流經之流體產生更為複雜之變化。圖 3 亦顯示，於雷達天線之南側非常接近海岸線處設置有中央氣象署之龍洞資料浮標。該資料浮標下方設置有聲學都卜勒流速剖面儀(ADCP)，其觀測之流速資料可作為與微波雷達所測得流場結果之比對依據。由於資料浮標下方的 ADCP 音鼓至海面之距離約為 1.5m，而 ADCP 音鼓到第一層流速量測的盲區距離約為 2m。透過龍洞資料浮標所取得最接近海表面的流速資料距離海面約為 3.5m。相較於透過龍洞資料浮標所取得流速之水層深度，微波雷達影像解所解析海流之有效深度則取決於流速深度剖面的形狀以及被分析的海洋波長(Lund et al., 2015)。所分析的海洋波長越短，其對應所解析出的海流有效深度就越淺，也就是離海面愈接近。根據本研究解析流場所選用的成分波長，其對應之流場有效深度在 6m 以內。

國家海洋研究院龍洞四季灣雷達站每次啟動作業時會連續擷取 128 張海面回波影像，相鄰雷達回波影像之時間差與雷達天線設備之轉速有關。該站所使用的雷達天線轉速為 48rpm，也就是每分鐘 48 轉。因此獲取 128 張海面回波影像序列所需時間約為 3 分鐘。以海面波浪週期為 6 sec 來估算，3 分鐘內在時間域所能記錄到的波浪數量約為 30 組，若僅考慮時序列，使用 30 組波浪資訊進行分析，其結果之統

計代表性恐有不足。然而航海雷達設備具有描述海面特徵在空間變化之能力。本研究從雷達觀測到的全幅回波影像中切選出固定尺寸的子影像。子影像的尺寸為 128 pixels*128 pixels。本研究所使用雷達影像的空間解析度為 7.5 m/pixel，換算出雷達子影像的擷取範圍約為 1 km*1 km。根據線性波理論，6sec 波浪的波長應不會超過 60m，換言之，雷達子影像空間範圍內應可記錄到至少有 16 組波浪。整合雷達影像所記錄到的時間域(25 組)與空間域(16 組)波浪資訊應可獲取足夠統計代表性之波浪資訊。學界亦已確認透過時空合域雷達影像資料應用於解析海洋水文參數的可行性(Nieto Borge and Guedes Soares, 2000)。

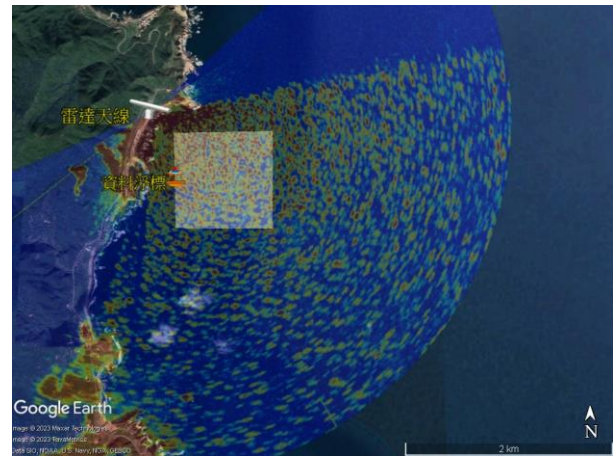


圖 3：本研究使用之微波雷達影像案例
(底圖來源：GoogleEarth)

四、雷達影像解算流場結果說明

如圖 4 與圖 5 所示，為透過雷達解算流場與現場資料浮標所加掛 ADCP 測得流速之比對結果。如前段所述，透過雷達影像解算流場時會選取空間範圍約為 1 km*1 km 的子影像進行分析。在非常靠近岸邊的水域易受到陸地雷達回波與海面碎波所產生雷達回波之干擾，進而影響海流之分析結果。資料浮標所在位置離岸約 300 公尺，為避免所分析的雷達子影像會受到鄰近陸域的雜訊干擾，本研究將要與 ADCP 資料比對所使用之雷達子影像位置移至相對較為外海，輸出位置點標示於如圖 3 的方框。

從圖 4 與圖 5 流速時序列可看出，無論是 ADCP 或是雷達解算出之流速都呈現一天約 2 次的周期性變化，與潮汐波動之週期性相近。為進一步確認當地

海流與潮汐之關聯性，圖 4 與圖 5 也呈現出同步潮汐時序列。潮汐資料來自於中央氣象署的龍洞潮位站，其位置位於龍洞南口遊艇港內，距離龍洞資料浮標約五百公尺。在無其他環境條件的干擾之下，潮流與潮位之週期性波動理論上會有約 90° 的相位延遲(半日潮情況下的相位延遲約 3 小時)，最低潮與最高潮時的潮流速度會最小。而在介於滿潮與乾潮之間時段的潮流速會較大。由於本研究之環境條件非常靠近岸邊，在複雜地形的影響下，潮流與潮位之間的相位延遲關係更為複雜。從比對結果可發現，在龍洞海域的東西向流速與潮位之間的相位延遲較不明顯。而南北向流速(絕對值)發生時間點約為滿潮及乾潮過後約 1~2 小時內。此外，龍洞海域之岸線大致呈現南北走向。因海水流體受到陸域地形的影響，從圖 4 與圖 5 流速時序列可確認南北向流速明顯大於東西向之流速。

由於雷達遙測具有提取空間域觀測資訊的優勢，本研究進一步檢討大範圍海域內不同位置雷達子影像獲得之流場結果。如圖 6 與圖 7 所示，分別為漲潮與退潮期間之雷達影像所解析出的空間流場結果。從圖 6 漲潮期間的空間域海流分析結果顯示，位於較外海區域的海流大致呈現向北流動之趨勢。然而在較為近岸區域的海流特徵則呈現出複雜之流況。龍洞海域之岸線並非平直，有多處為岬角地形，於龍洞資料浮標附近之海岸線有略為內縮，呈現出類似灣域之地形。從圖 6 之空間流場分析結果可發現，龍洞資料浮標南側水域之海流於漲潮期間之流速明顯較外海流速微弱，且流向大致是朝向西南向。圖 7 則為退潮期間的空間域海流分析結果，顯示位於較外海區域的海流大致呈現向南流動之趨勢。值得注意的是，於龍洞資料浮標北側水域之海流明顯較外海流速微弱，且流向大致是朝向東南向。綜整圖 4~圖 7 的時間與空間海流分析結果可確認，受到潮汐的作用，海流在時間域已呈現出非常常(non-stationarity)之特徵。再加上受到地形之影響，近岸流場的空間非均勻性(inhomogeneity)亦相當明顯。

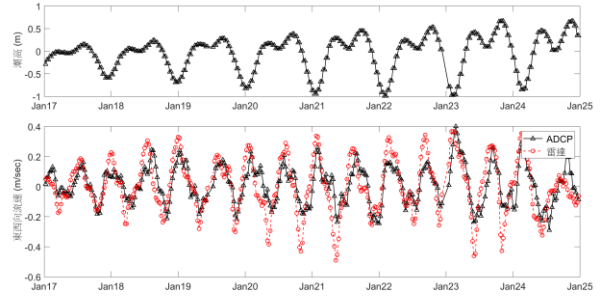


圖 4：雷達與現場 ADCP 觀測之東西向流場資料

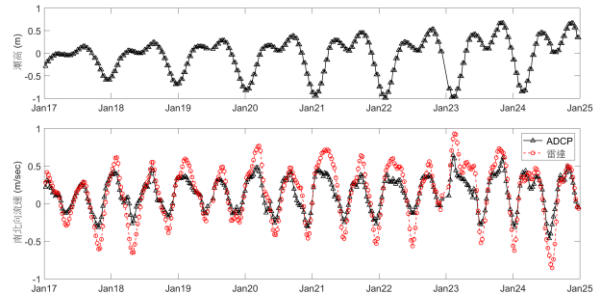


圖 5：雷達與現場 ADCP 觀測之南北向流場資料

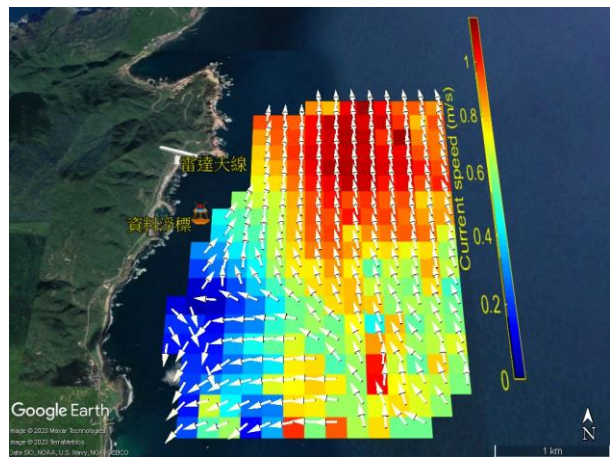


圖 6：漲潮期間由雷達影像所解算出的空間流場案例

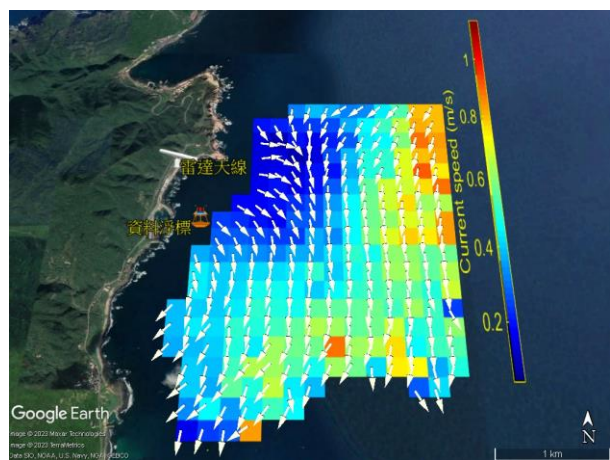


圖 7：退潮期間由雷達影像所解算出的空間流場案例

五、結語

臺灣本身的地理條件相當特殊，除位處熱帶與亞熱帶之間，也座落於全球最大洋與全球最大陸域之間，造成臺灣周圍海域的流場特徵相當複雜多變。海流資料除了一直是多項海洋物理研究課題的重要依據，同時也在各類海上與海岸活動之實務應用上扮演著關鍵之角色。

現場的海流觀測方式，如 ADCP，可精準取得接近水表面以及水下不同深度水層的流速資料。相較於現場觀測之方式，微波雷達遙測之優勢則為空間域海流之監測。尤其在近岸流場呈現高度非均勻特徵的情況下，微波雷達可提供空間範圍不同局部區域之流速流向資訊。能更有效呈現出近岸流場因地形或人工結構物影響造成之複雜流況。綜整來看，現場測站觀測海況之時間變化特性，雷達遙測則可著重在觀測海況之空間變化。未來可將現場海流觀測技術與微波雷達遙測技術相互搭配，兩者相輔相成，提供範圍更廣與更多元的海流觀測資料，作為海事工程應用、海岸帶治理規劃、海域遊憩管理等各類海岸活動之使用。

六、參考文獻

1. Crombie, D., Doppler spectrum of the sea echo at 13.56 Mc/s, *Nature*, 175, 681-682 (1955).
2. Doong, D.J., Wu, L.C., and Lai, J.W., Determination of the Spatial Pattern of Wave Directions in the Inhomogeneous Coastal Ocean by Marine Radar Image Sequences, *IEEE Access*, 6, 45762-45771 (2018).
3. Ijima, T., Takahashi, T., Sasaki, H., Application of radars to wave observations, *Proc. Conf. Coastal Eng.*, 10-22 (1964).
4. Lund, B., Graber, H.C., Tamura, H., Collins, C.O., Varlamov S.M., A new technique for the retrieval of near-surface vertical current shear from marine X-band radar images, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(12), 8466-8486 (2015).
5. Mattie, M.G., Harris, D.L., The use of imaging radar in studying ocean waves, *Proc. 16th Coastal Eng.*, ASCE, 174-189 (1978).
6. Nieto Borge, J.C., Guedes Soares, C. Analysis of directional wave fields using X-band navigation radar *Coastal Engineering*, 40(4), 375-391 (2000).
7. Stewart, R., Joy, J., HF radio measurements of surface currents, *Deep-Sea Res.*, 21, 1039-1049 (1974).

8. Young I.R., Rosenthal, W., Ziemer, F. A Three Dimensional Analysis of Marine Radar Images for the Determination of Ocean Waves Directionality and Surface Currents, *Journal of Geophysical Research*, 90, 1049-1059 (1985).

致謝

承蒙國家科學及技術委員會之補助(編號 NSTC 112-2625-M-006-009)以及國家海洋研究院提供觀測資料，使本研究得以順利完成。謹致感謝。

英文摘要

Application of Microwave Radar for Monitoring Coastal Ocean Currents

Li-Chung Wu

Associate Research Fellow
Coastal Ocean Monitoring Center,
National Cheng Kung University

Jian-Wu Lai

Research Fellow
Marine Industry and Engineering Research Center,
National Academy of Marine Research

Abstract

In recent years, microwave radar observation technology within the realm of remote sensing has become widely recognized as a pivotal tool for monitoring ocean currents. While much international research has concentrated on the issues of offshore currents, this paper delves into the findings derived from microwave radar observation of currents in coastal areas. Through radar remote sensing, it becomes apparent that the pronounced spatial inhomogeneity of currents is influenced by the intricate topography of coastal regions. In contrast to singular measurements in the one-dimensional temporal domain and the extensive spatial scale of satellite remote sensing in the two-dimensional domain, land-based microwave radar facilitates a three-dimensional monitoring of the sea surface (integrating the one-dimensional time domain with the two-dimensional spatial domain). This renders it an exceptionally promising tool for comprehensively deciphering the intricate spatiotemporal variability of nearshore flow field characteristics.

作者簡介



吳立中(Li-Chung Wu)，現任國立成功大學近海水文中心副研究員。國立成功大學水利及海洋工程學系博士。專長為海洋遙測、訊號處理、影像分析。



賴堅戍，現任國家海洋研究院研究員。國立成功大學水利及海洋工程學系博士。專長為海洋流體力學與海岸過程、遙測技術以及海岸災害應對策略。