

航海雷達應用於近岸淺水區海象觀測之研究

吳立中¹ 高家俊² 王仲豪³ 王良生¹ 陳秋份¹

¹國立成功大學近海水文中心

²國立成功大學水利及海洋工程學系

³經濟部水利署水文技術組

摘要

改裝後的船用 X 波段(X-band)雷達是近年常見的海象遙測設備。利用 X 波段雷達設備所攝取之海面波紋影像，搭配適當的影像處理以及波浪理論，可從中估算出波浪與海流等參數，是一種極具潛力的海洋環境監測技術。然而當前針對 X 波段雷達觀測技術所提出的影像分析方法大多是以線性波理論為基礎，近岸淺水區域的波浪受到水深地形影響，其非線性特徵會較明顯，進而影響到海象參數估算之準確度。本研究針對 X 波段雷達技術應用於近岸淺水區海象觀測之結果進行檢討，嘗試釐清觀測區域的水深條件對於波浪估算所造成之影響，並進而提出可行之改善技術。

關鍵字：X 波段雷達，近岸水域，海象觀測

一、前言

海象觀測資料為海洋工程、防災預警、國土保護、生態保育、遊憩管理以及船艦航行等海上或岸邊活動所不可缺少的基礎資訊。海象觀測方法可分為直接的現場量測(in-situ measurement)與間接的遙感探測(remote sensing)兩種方式。現場量測是將儀器放置於海水中，藉由量測海水的物理變化，取得海洋環境的特性。由於能獲取精準的環境資訊且具有高度自動化以及作業化的優勢，現場量測一直都是海洋環境觀測技術的主流。諸如：海上資料浮標、觀測樁、底碇式測計以及岸邊的潮位觀測站等，皆為當前學界所廣為被使用的作業化海岸現場調查工具。現場量測方式能精準紀錄海洋水文現象隨時間的變化特徵，也確實提供了海洋工程研究與應用領域所需要的資訊。然而在檢討某些海洋現象時，舉凡：波浪淺化、碎波、群波、波能傳遞以及海上漂流物的移動路徑等研究議題時，除了需要海洋參數的時間資訊外，也需要考慮到其空間特徵。然而若要透過單點現場量測技術來取得大範圍海域空間資訊，其所耗費之人力物力成本將會非常龐大。近年來，隨著航空以及航海科技的蓬勃發展，海洋遙測技術已逐漸被重視以及廣泛應用。學界也開始積極發展海洋遙測技術，藉以協助偵測水文現象的空間特徵。海洋遙測是讓觀測儀器對目標水域進行光學影像攝取或是透過量測電磁波回波特性的方式隔空偵測目標區域之特性。透過所拍攝之影像或是由電磁回波所組成之影像，搭配適當之影像處理方法，可獲得觀測目標物的特性。

相較於現場觀測，非接觸式海洋遙測技術具有「廣景覽要」之特性，能對海面進行大範圍之觀測，是目前海洋學界所積極發展的技術之一。現有各種非接觸式觀測技術中，X 波段(X-band)之岸基雷達技術則具有於近岸進行連續觀測的能力。如圖 1 所示，在電

力供應正常之情況下，雷達系統即可持續不間斷地觀測大範圍之海表面的波紋特徵。

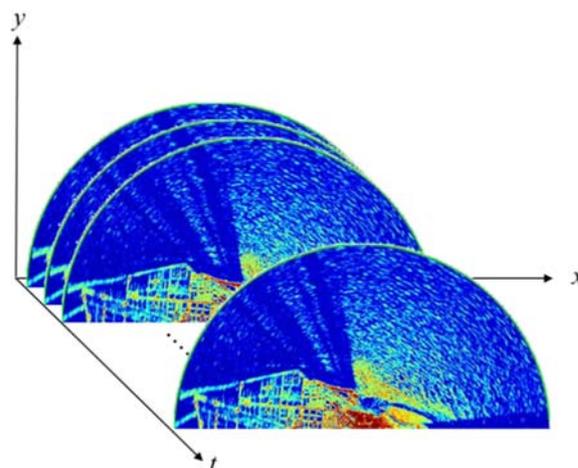


圖 1 雷達觀測影像序列示意圖

針對 X 波段應用於海面波紋觀測之研究，從 1960 年代起，就有研究發現雷達回波可反映出一些海象之特徵(Ijima and Sasaki, 1964)，受到此一研究結果之啟發，後續則開始有學者陸續進行相關的試驗與討論。曾有學者利用各種頻率波段範圍的雷達電磁波來進行波浪觀測，分析結果發現 X 波段雷達確實適用於海面波紋之觀測(Mattie and Harris, 1978)。針對雷達影像中波紋分析之研究，Young et al. (1985)提出利用傅立葉轉換分析三維度的 X 波段雷達影像序列，從中擷取海面波譜資訊，並反推求得海表面波浪與流場，開啟了分析雷達影像序列的先河。在國內，港灣技術研究中心與國立臺灣大學的研究團隊(王, 1999)一同合作，進行雷達系統之建置，為國內發展此一觀測技術之先驅。後期在與港灣技術研究中心的合作下，由國立臺灣海洋大學的研究團隊(尹等, 2005；翁等, 2011)持續投入此領域之技術發展與研究討論，並針對雷達所

得海面影像的統計特徵進行深入之研討，獲得許多豐碩的研發成果。國立高雄海洋科技大學則將雷達應用於海面油污之監測。國立中央大學聚焦於降雨雜訊對 X 波段雷達之影響進行研究(鄭等，2011)。國立成功大學研究團隊除發展自主雷達觀測技術之外(吳等，2004)，也持續聚焦於非均勻海面波紋特徵之研究與解析(Wu et al., 2010；Wu et al., 2011)。

利用 X 波段雷達所測得之時空合域海面影像應用於波流場之觀測極具潛力，但仍有許多議題需要被驗證與檢討。目前利用雷達測得之海面波紋影像推算波浪的基礎大多為線性波理論的分散關係式。根據前人研究，線性波理論僅使適用於 Ursell parameter(U_r)遠小於 1 的條件(McCormick, 2009)：

$$U_r = \frac{H\lambda^2}{2h^3} \quad (1)$$

上式中， H 為海面波高； λ 為海面波長； h 為當地水深。從式(1)可得知在相同的波浪條件下，水深愈淺，Ursell parameter 會愈大，致使波浪的非線性程度增強。在此一條件下，線性波理論的適用性就成為是否能準確推算波浪值的關鍵。有鑑於此，本研究嘗試針對 X 波段雷達技術應用於近岸淺水區海象觀測之結果進行檢討，嘗試釐清水深地形對雷達觀測所造成之影響，再進一步根據分析結果提出可行之改善技術。

二、 理論分析

海面回波影像當中雖含有波浪資訊於其中，但需要先經由適當的影像處理方法從中求得觀測區域之海象參數。為了從三維度的海面回波影像時序列中取出所需資訊，必須建立一套影像時序列的分析方法。因海浪中波長與波向等波浪資訊可經由波浪譜(wave spectrum)計算求得，而波浪譜又可藉由回波影像的影像序列譜分析得到，因此如何正確計算影像譜是從事波浪遙測重要的工作之一。本研究中影像譜的分析方法是先利用三維快速傅立葉轉換求得影像時序列的傅立葉係數[式(2)]，其為一複數函數，取其絕對值平方可得到雷達影像之影像譜，其為雷達影像求取波浪特性的重要媒介。

$$S(\omega, k_x, k_y) = \iiint g(t, x, y) \times \exp[-i(k_x x + k_y y - \omega t)] dt dx dy \quad (2)$$

上式中 $g(t, x, y)$ 代表雷達影像時序列函數， k_x, k_y 為雷達影像中成分波之波數(wavenumber)， ω 為影像時序列之角頻率。影像時序列經三維傅立葉轉換後所得到的影像序列譜結果包含有訊號的波數以及角頻率的資訊，也就是波浪於頻率域(frequency domain)以及波數域(wave number domain)的能量密度分布。此一分布理論上應符合下式之數學關係：

$$\omega = \sqrt{g|\bar{k}| \tanh\left(\frac{|\bar{k}|h}{\omega}\right)} + \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (3)$$

上式為線性波之分散關係式，其中 $\bar{k} = (k_x, k_y)$ ； \bar{U} 為流場。圖 2 描述了海流與水深對波浪分散關係式造成的影響。圖 2(a)為深水且無海流影響的波浪分散關係，可看出其能量分布於 k_x 與 k_y 方向呈現對稱之分布。當波浪與海流之間交互作用的情況下，如圖 2(b)所示，海流會影響波浪高頻之能量分布，若是單一方向的海流，將造成波浪於 k_x 與 k_y 方向的能量分布不對稱。至於水深的影響，乃是淺水條件下，海底床摩擦力對波浪能量的影響變得不可忽略。從圖 2(c)可看出，水深會影響波浪低頻之能量分布。

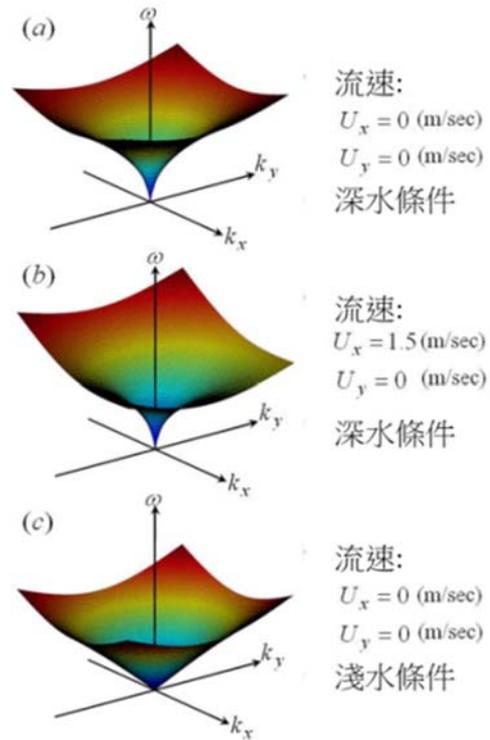


圖 2 海流與水深對波浪分散關係之影響

針對利用雷達影像時序列計算海面波高(H_s)之研究，Seemann et al. (1999)指出觀測海域之有義波高(H_s)與雷達影像序列譜訊噪比的平方根(signal to noise ratio, SNR)呈線性之關係，可以藉由此率定式來推求示性波高 H_s ：

$$H_s = A + B\sqrt{R} \quad (4)$$

式(4)中 A 、 B 為率定係數，可透過現場實測波高的率定來求得， R 為影像序列譜中訊號與背景雜訊能量之比值：

$$R = \frac{\sum S(\omega_s, \bar{k}_s) \Delta\omega \Delta\bar{k}}{\sum S(\omega_b, \bar{k}_b) \Delta\omega \Delta\bar{k}} \quad (5)$$

式(5)中 $S(\omega_s, \bar{k}_s)$ 為能譜中符合式(3)波浪分散關係的能量密度； $S(\omega_b, \bar{k}_b)$ 為能譜與式(3)不一致的能量密度； $\Delta\omega$ 與 $\Delta\bar{k}$ 則分別為能譜中角頻率與波數的解析度。由於此一波高推算法的依據為訊號的訊噪比，因此在本文中稱之為 SNR method。

三、 實驗布置說明

為確認本文方法實際應用於現場分析的效果，本文透過經濟部水利署於臺南七股海域的現場實測海面 X 波段雷達影像資料進行案例分析。雷達系統之佈置以及影像涵蓋範圍分別如圖 3 以及圖 4 所示。本研究使用 42r.p.m.之雷達天線，亦即雷達影像頻率(frame rate)為 0.7Hz，每次觀測使用 128 張雷達影像時序序列進行分析。雷達天線之架設高度約距海平面 20 公尺，波場影像之觀測半徑則為 4.5 公里。距雷達站西南方 5 公里處，則設有經濟部水利署的海氣象資料浮標，其水深約為 17 公尺，可作為雷達觀測結果比對之用。

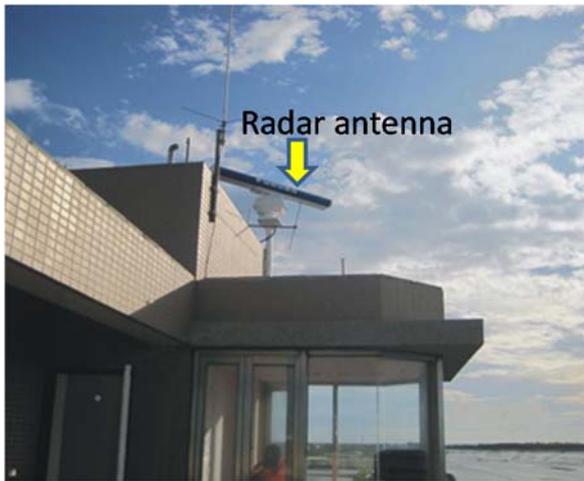


圖 3 本研究雷達系統之布置

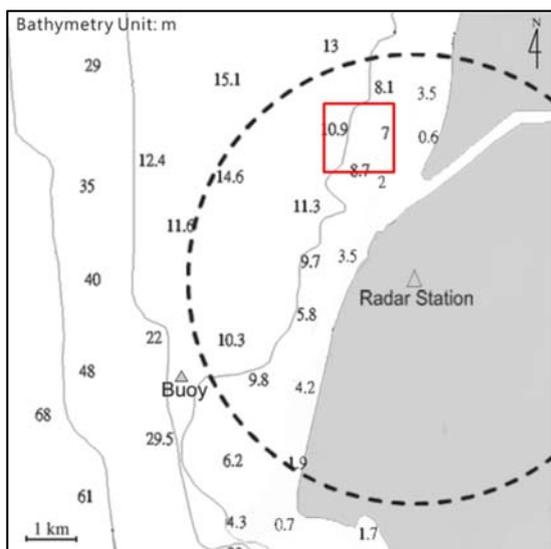


圖 4 雷達影像涵蓋範圍

四、 資料分析與討論

為釐清不同水深條件對雷達影像分析所造成的影響，本文嘗試從大範圍的雷達影像中切選出不同水深區域的子影像。如圖 5 所示，本文切選出子影像 (A)、(B)、(C) 三組不同水深條件的子影像。子影像 (A)、(B)、(C) 所在區域的平均水深分別為 11 公尺、9 公尺、6 公尺。

本文透過譜轉換分析 (A)、(B)、(C) 三區域的海面波影像序列，如圖 6 所示，圖中的等值圖為影像序列譜中能量密度於頻率域以及波數域的分布。為能確認影像序列譜分析結果與線性波理論之間的關聯性，本文於圖 6 中標示出對應水深條件下的波浪分散關係。圖中三條曲線分別為線性波分散關係以及 modified cnoidal model 與 modified composite model 兩種非線性波理論 (Svendsen and Buhr Hansen, 1976; Hedges, 1976) 所描述的角頻率-波數之間的數學關係。分析結果顯示，當水深愈淺時，影像譜的能量密度分佈會愈偏離線性波之分散關係。此外，水深愈淺時，影像譜的能量密度與非線性理論的 modified composite model 分散關係愈接近。從式(4)以及式(5)可得知，從雷達影像計算波高的關鍵在於如何正確的區分出影像譜中的能量與雜訊。往昔利用線性波浪分散關係來區分能量與雜訊的方式較適用於深水條件之雷達影像案例。若採用線性波理論分析淺水條件之雷達影像，其所估算的波高結果將可能產生明顯之誤差。為避免淺水區域波高計算的誤差，本文改採用影像譜中固定頻帶 (ω_i) 的能量來做為波高計算的依據：

$$H_s = A' + B' \times \sum_{\omega_i = \omega_j}^{a_i} S_{\omega_i}(\bar{k}) \Delta\bar{k} \quad (6)$$

式(6)中 A' 、 B' 為率定係數，可透過現場實測波高的率定來求得。如圖 7 所示， $S_{\omega_i}(\bar{k})$ 為頻帶 ω_i 所對應的二維影像譜， ω_i 以及 ω_u 則分別為影像序列譜角頻率條件的下邊界與上邊界。由於此一方法是計算影像譜中不同角頻率條件切片(slice)的能量，本文稱之為 Slice method。為確認式(6)應用於淺水雷達影像推算波高的可行性，本文利用研究區域附近七股資料浮標所測得之現場波高資料作為真值(ground truth)，檢討從雷達影像推算波高之準確度。如圖 8 所示，為利用 SNR method 與 Slice method 從雷達影像估算波高值與現場浮標實測波高之比對結果。從圖 8 的結果可發現到，當分析水深愈淺區域的雷達影像時，SNR method 所測得波高之誤差就愈大。相較於 SNR method 的分析結果，從 Slice method 分析結果可確認在淺水區域影像之分析結果仍然能維持穩定的波高估算準確度，證實了 Slice method 應用於淺水區域影像波高分析的可行性。

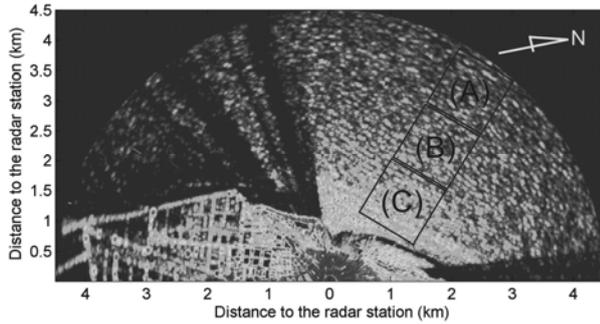


圖 5 被分析雷達子影像之位置

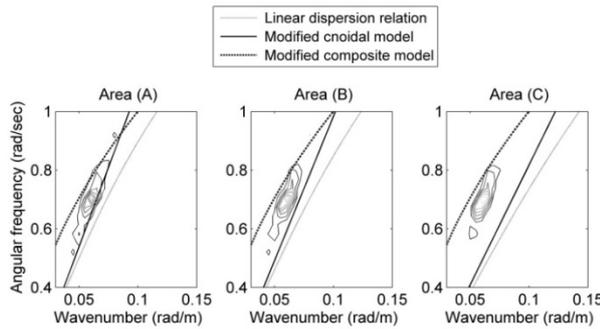


圖 6 不同區域子影像的譜分析結果

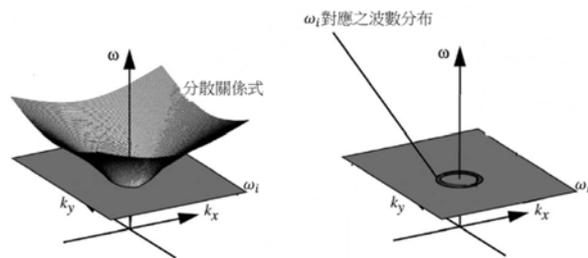


圖 7 能譜中不同 $S_{\omega_i}(\bar{k})$ 之示意圖

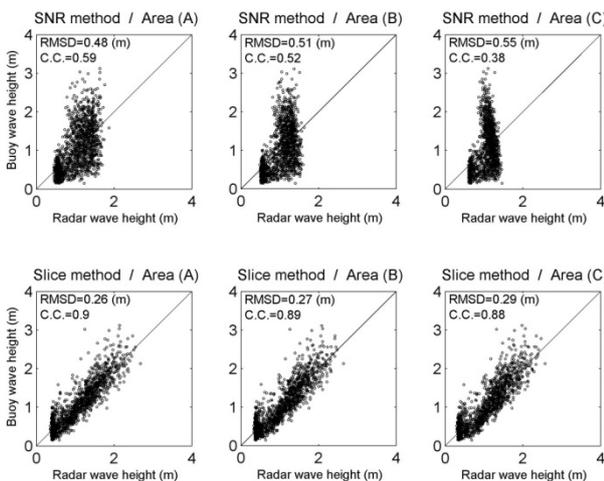


圖 8 不同方法的波高推算結果

五、小結

應用 X 波段雷達觀測波浪為近年國內外所積極

發展海象監測技術之一。許多的研究文獻已證實利用深水地區的雷達影像的訊噪比(SNR)可準確推算出海域的波高資訊。但由於波浪非線性之影響，訊噪比方法並不一定能適用於淺水區域的波高推算。本文透過實測雷達影像之分析，檢討不同水深之影像能譜中的能量分布特徵，並確認訊噪比方法應用於淺水區域影像分析之限制。為能將雷達影像解析波高之技術有效應用至淺海案例，本文提出適用於淺海區域影像分析的方法，並透過與現場實測資料的比對分析，確認本文所提方法應用於淺水影像案例的準確度。

謝 誌

承蒙科技部補助發展雷達觀測技術(NSC 102-2221-E-006 -078 -MY2)，經濟部水利署提供原始觀測資料，使本文得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

- 王青, 1999: 淡水港雷達遙感波浪監測研究(I), 港灣技術研究中心報告。
- 吳立中、董東環、高家俊、張國強, 2004: 發展微波雷達於海況觀測之研究, 海洋及水下科技季刊, 14(1), 55-60。
- 尹彰、翁文凱、周宗仁、林騰威、陳泰宏、邱永芳、何良勝, 2005: 應用船用雷達影像分析波浪資料, 第 27 屆海洋工程研討會論文集。
- 翁文凱、周宗仁、尹彰、邱永芳、何良勝, 2011: 利用海雜波推算海面波場特性, 海洋工程學刊, 11(1), 31-55。
- 鄭皓元、錢樺、許朝敏、曾瓊蓉, 2011: 發展 S-band 低掠角航海雷達於海面波浪觀測之研究, 第 33 屆海洋工程研討會論文集。
- Hedges, T.S., 1976: An empirical modification to linear wave theory, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 61(3), 575-579.
- Ijima, T., Takahashi, T., Sasaki, H., 1964: Application of radars to wave observations, Proc. Conf. Coastal Eng., 10-22.
- Mattie, M.G., Harris, D.L., 1978: The Use of Imaging Radar in Studying Ocean Waves, Proc. 16th Coastal Eng., ASCE, 174-189.
- McCormick, M.E. 2009: Ocean Engineering Mechanics: With Applications, Cambridge University Press.
- Svendsen, I.A., and Buhr Hansen, J., 1976: Deformation up to breaking of periodic waves on a beach, Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering, Honolulu, USA, 477-496.

Wu, L.C., Kao, C.C., Yang, W.H, 2010: Sea State Monitoring from a Mobile X-Band Radar System, *Sea Technology*, 51(7), 40-42.

Wu, L.C, Chuang, L.Z.H, Doong, D.J., Kao, C.C., 2011: Ocean Remote Sensed Image Analysis by the Two-dimensional Continuous Wavelet Transform, *International Journal of Remote Sensing*, 32(23),

8779-8798.

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