

## X-band 雷達於近岸水深量測精度之改良

莊士賢<sup>1</sup> 吳立中<sup>2</sup> 孫永大<sup>3</sup> 黃瓊珠<sup>4</sup> 鍾育仁<sup>5</sup> 蔡昀展<sup>6</sup> 鄭仁杰<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授

<sup>2</sup> 國立成功大學近海水文中心副研究員

<sup>3</sup> 海軍大氣海洋局局長

<sup>4</sup> 國立成功大學海洋科技與事務研究所海洋資訊分析與管理研究室主任

<sup>5</sup> 中華民國海軍軍官學校助理教授

<sup>6</sup> 國立成功大學海洋科技與事務研究所博士生

<sup>7</sup> 國立成功大學海洋科技與事務研究所碩士生

### 摘要

航海用 X-band 雷達除了作為船艦導航設備，近年來也廣泛應用於海洋環境參數的連續監測，例如：波浪、表面流、海上油污、漂流物等之時空變異資訊；本文則是根據雷達的原理與機制，利用 X-band 雷達回波影像來推算近岸水深。雷達回波影像可以顯示海表面的亮暗相間之波紋特徵，據此得以計算主要成分波的波數及對應之波相位速度，再利用波浪分散關係式可解算出造成波相位速度改變的主因——水深。本文採用成功大學近海水文中心協助水利署設置於台南七股瀉湖邊的雷達站之回波影像序列資料，利用 Wu et al. (2017) 提出的演算法進行近岸水深的解算，再搭配中值濾波的選用，來濾除水深異常值。由水深解算結果與第六河川局實測水深之比較，顯示水深 1m 到 12 m 範圍內的水深誤差平均值幾乎等於 0；但水深小於 1m 處的波浪非線性作用複雜，因此水深誤差偏大。以 X-band 雷達進行水深量測之優勢是能進行即時且連續地觀測，即使在天候不佳狀況下，也能提供遠端監控服務，因此能長期、持續地自動監測近岸地形之時空變化，以協助權責單位有效地掌握海岸變遷現況。

關鍵詞：X-band 雷達、近岸水深量測、希爾伯特轉換、海岸遙測

## Measurement Accuracy Improvement of Nearshore Bathymetry Surveys using marine X-band Radar

Laurence Zsu-Hsin Chuang\* Li-Chung Wu Yung-Ta Sun Chiung-Chu Huang

Yu-Jen Chung Yun-Chan Tsai Ren-Jie Zheng

\* Associate Professor, Department of Institute of Ocean Technology and Marine Affairs, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

In addition to being used as ship navigation equipment, nautical X-band radar has been widely used in recent years for continuous monitoring of marine environmental parameters such as waves, surface currents, marine oil pollution, drifting materials, etc. In this paper, X-band radar echo images, observed by a radar station located at the side of Qigu Lagoon in Tainan, are used to estimate the nearshore water depth. The radar echo image can display the light and dark ripple characteristics of the sea surface. Based on this, the wavenumber and the corresponding wave phase velocity of the main wave components can be calculated, and then the wave dispersion relation can be applied to solving the water depth, which is the main cause of the change of wave phase velocity. The algorithm proposed by Wu et al. (2017) is used to calculate the near-shore water depth, and then an appropriate median filter

is chosen to filter out the outliers in water depth data. The comparison between the water depth derived by the radar and the measured water depth of the Sixth River Bureau shows that the average value of water depth error in the water depth range of 1 m to 12 m is almost equal to 0; however, the water depth error at a water depth of less than 1 m is large, which is complicated by the nonlinear effect of the wave.

Keywords: X-band radar; nearshore bathymetry measurement; Hilbert transform; coastal remote sensing

## 一、前言

台灣位於高山型海島的地形特性，限制了文化、經濟、與遊憩等活動多集中於沿海平原地區，無論是航運安全亦或是水產養殖經濟均與海域(水深)地形資訊息息相關，如何有效且確實地掌握持續變化的海岸地形情報，同時建立自主研發的即時觀測系統，對於海岸安全實有重要的研發價值。

運用遙測技術於海洋與海岸觀測已是近年來的國際趨勢，其觀測空間範圍大、時間解析度高，可配合任務快速且即時地投入感興趣場域進行監測，是一有效與經濟的觀測手段，可改善現有觀測技術的不足處，且能與接觸式觀測資料進行比對與互補。

針對雷達觀測水深資訊之研究，主要是先透過雷達觀測海面波浪之特徵，再透過海面波浪資訊反算出海域水深值。因雷達所使用的電磁波頻率會影響觀測海面波浪之品質，Mattie & Harris (1978) 曾利用各種頻率範圍的雷達電磁波來掃描海面，分析結果發現 X-Band 雷達頻段，適合用於觀測海面波動特徵，開啟 X-Band 雷達海洋監測的歷程。因 X-band 雷達具有機動、即時、涵蓋大範圍、日夜均可觀測，且較不受天氣影響的優點，可於定點針對固定空間進行全天候觀測，能夠即時和長時間連續性地取得海岸帶資訊，以達到監測海岸帶變遷，強化海岸安全之目的。

Young et al. (1985)則提出利用傅立葉轉換(Fourier transform)分析 X-band 雷達影像序列，從中擷取海面波動的能譜資訊，因海表面流的存在會對波譜產生都卜勒偏移，可藉由偏移量反推求得海表面波浪與流場，因此，能譜資訊可以作為解析波流場之演算核心，開啟了分析雷達影像序列的先河。另外雷達除了觀測波浪之外，也用於測量距離、水深等之用，Bell (1999) 利用 X-band 雷達觀測海面所獲得之影像序列，並引入波浪分散關係式，進一步依據波浪理論解算出海域水深資訊，從此 X-Band

雷達也應用於海岸帶水深之量測。但近岸地區的水深反演算會因波浪非線性而產生較大誤差，Flampouris et al.(2011) 因此嘗試引入非線性理論，作為水深反演算技術之數學理論核心。然而從其研究結果發現，利用非線性理論所能改善水深之準確度有限，且需要現場實測浪高作為非線性波浪理論之修正基礎，在實務上並不易達成。

Wu et al. (2017) 研發 X-band 雷達影像解算近岸地形水深之技術，從中改進水深解算結果之空間解析度。本研究延用該文提出的水深演算法，並加以改良，再藉由七股雷達站的雷達回波資料，推算台南七股海域的近岸水深，然後與水利署第六河川局實際觀測資料比對，以呈現水深量測精度的改善效果。相對於近岸水深的傳統量測方式，本研究使用 X-Band 雷達掃描約 5 公里半徑的海面，一次量測僅須 3 分鐘，可以節省許多人力、時間的成本。

## 二、研究方法

### 2.1 X-band 雷達水深量測之機制

X-band 雷達原本為船艦導航之設備，經過改裝與系統整合後可作為近岸水深量測的核心硬體元件。X-band 雷達之布拉格散射的波長條件約為 1.5cm，剛好是風吹拂海表面初期所產生的毛細波(capillary wave)，因此相對於其他波段雷達，X-band 雷達於海面能有較好回波散射效果。由於海面波浪朝向雷達那一面會發生強烈之回波；反之，波浪背面因無法有效反射回波，致使海面的雷達回波影像呈現亮暗相間的波紋特徵。對這些波紋特徵進行分析，能進一步解析出海表面波浪、流場、及水深地形等資訊(Wu et al., 2008；Wu et al., 2010；Wu et al., 2011)。

本研究使用的 X-band 雷達觀測系統為國立成功大學近海水文中心自行研發之設備，位於七股雷達站，每次觀測期間會擷取 128 張連續海面回波影

像的時序列訊號。觀測所需時間與航海雷達天線轉速有關，本研究採用的雷達天線轉速為 42 rpm，因此雷達系統約每 1.43 秒可獲取一張雷達影像，因此擷取 128 張連續海面回波影像所需時間約 3 分鐘，雷達回波影像之空間解析度為 7.5 m/pixel。圖 1 為本研究採用 X-band 雷達於近岸水深量測之流程圖，其中一連串的处理步驟會在下文進一步說明。

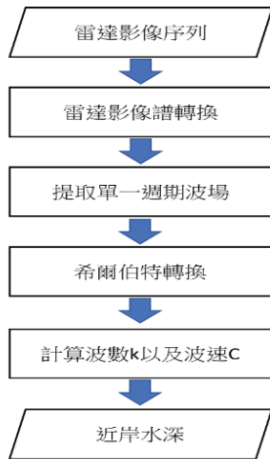


圖 1 X-Band 雷達影像量測近岸水深之分析流程

## 2.2 雷達回波影像校正

雷達回波時序列訊號中的每一脈衝波代表著空間中雷達天線所指向的每一個方位角(azimuth)，而相鄰脈衝波之間的訊號則代表著在空間中某一方位上，距離雷達不同遠近之位置所返回的回波強度(吳等，2015)。雷達訊號原本是以極座標呈現雷達回波狀況，而後續的影像分析方法卻是在笛卡兒座標下所發展，因此須針對雷達回波資料進行預處理 (pre-processing)。

先將極座標轉換成二維笛卡兒座標，並利用空間線性內插的方法，將原始極座標的雷達回波影像轉換成以笛卡兒座標所建構的規則格網點之影像矩陣。在笛卡兒座標下，經內插後的雷達影像解析度則設定與雷達影像的徑向空間解析度一致，然後以雷達天線位置之 TWD97 二度分帶座標做為空間位置的參考點，據以解算出影像內不同像素位置的實際地理座標。此程序是將雷達影像矩陣訊號轉換為二度分帶平面座標系統，可清楚顯示雷達探測範圍內各地理座標位置處的回波強度(圖 2)。

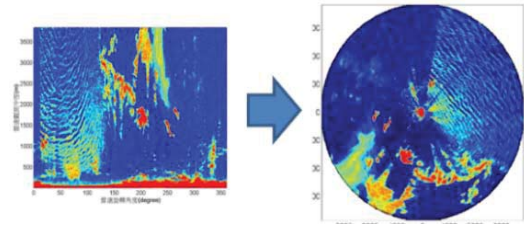


圖 2 雷達回波影像座標轉換

## 2.3 雷達影像譜轉換

根據線性波理論，當波浪由深水水域向淺水水域傳遞時，其波浪頻率  $\omega$  保持恆定，波數  $k$  則受到水深  $d$  的影響而產生變動，也就是說波浪行進之相位速度會隨著水深淺化而改變，因此透過波浪之分散關係式(dispersion relation)可進一步反算淺水區之水深。

海浪中的波長、角頻率、波數等波浪資訊可由雷達之影像譜分析取得，因此先將雷達影像時序列訊號進行快速傅立葉轉換(FFT)，獲得每個像素位置的頻譜資訊。然後逐一選定一個感興趣的頻率值  $f_a$ ，此  $f_a$  值通常是選擇週期大於 7s，因為波浪週期較長時，雷達影像裡的波形較為清晰，方便後續有足夠資訊進行水深量測。再以  $f_a$  為頻率閾值對頻譜進行傅立葉濾波，隨後進行傅立葉反轉換(IFFT)，便可得到單一週期波(single-period wave)之波場影像時序列圖。

第二步驟利用希爾伯特轉換(Hilbert transform)將單一週期波之波場影像時序列資料進行三維頻譜轉換，可將包含時間及空間變異的海面訊號轉換成包括角頻率與波數的三維能譜，並利用每個位置之角頻率、波數資訊解算對應的波浪相位速度。波場影像之空間尺度可分為  $x$ 、 $y$  兩個維度，如果針對波場影像中沿著  $x$  方向的每個訊號序列進行希爾伯特轉換，定義如下：

$$H\{I_{\text{filter}}(x, y_m)\} = I_{\text{filter}}(x, y_m) * (1/\pi x) \quad (1)$$

上式的  $I_{\text{filter}}$  代表經傅立葉濾波後的影像強度； $y_m$  代表第  $m$  列；符號\*代表函數之摺積(convolution)運算。根據希爾伯特轉換理論，波場影像的指定列之局部相位(local phase)可透過原始訊號與希爾伯特轉換後的關係求得：

$$\phi_x(x, y_m) = \arctan\left(\frac{H\{I_{\text{filter}}(x, y_m)\}}{I_{\text{filter}}(x, y_m)}\right) \quad (2)$$

此外，訊號的局部波數則可透過訊號局部相位的空間微分求得：

$$k_x(x, y_m) = d\phi_x(x, y_m)/dx \quad (3)$$

利用前述式(1)到式(3)的計算流程可求得單一週期波之波場影像中沿著  $x$  方向前進的局部波數；同樣地，波場影像中沿著  $y$  方向的局部波數也可經由相同的步驟求得  $k_y(x_m, y)$ ；因此可得到二維的局部波數  $\vec{k} = (k_x, k_y)$ 。再選定前述不同的感興趣  $f_d$ ，可求得任一特定週期波之角頻率  $\omega_{fd}$  (如式(4))，進而獲得雷達影像序列經時頻轉換後之三維能譜(如圖 3)。

$$\omega_{fd} = 2\pi f_d \quad (4)$$

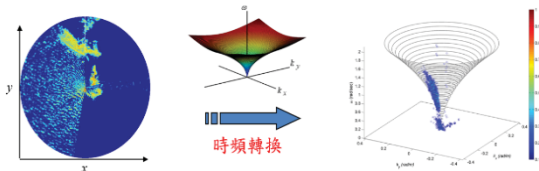


圖 3 雷達影像序列的時頻轉換

## 2.4 近岸水深演算

透過三維能譜之分析，波場每個位置的局部波相位速度  $C_i$  可由式(5)之波浪理論計算求得：

$$C_i = (2\pi f_d) / |\vec{k}(x, y)| \quad (5)$$

由於海底地形水深會直接影響波浪傳遞過程的相位速度，依據波浪分散關係式(6)，我們可從每個位置處的波浪行進速度資訊反算出該位置的水深值：

$$d = (L_0/2\pi)(C/C_0)\tanh^{-1}(C/C_0) \quad (6)$$

上式的  $L_0$  與  $C_0$  分別為深水區波浪的波長與相位速度，可根據線性波理論式(7)與式(8)，透過波浪週期  $T (=1/f_d)$  推導出：

$$L_0 = gT^2/2\pi \quad (7)$$

$$C_0 = gT/2\pi \quad (8)$$

## 三、結果與討論

本研究以水利署設置於七股瀾湖邊的海巡署北堤安檢所大樓上的七股雷達站之觀測資料進行分析，該雷達系統是由成功大學近海水文中心協助設立、操作與維護。本文分析的雷達資料是七股雷達

站於 2015 年 3 月 25 日 16 時掃描 3 分鐘的原始資料，經上節理論解算出的近岸水深地形的等深線如圖 5。

為確認水深資料的正確性，本文選用水利署第六河川局於 2015 年 4 月 16 日到 2015 年 4 月 28 日的現場調查水深資料(如圖 6)作為比對，由圖 5 與圖 6 的比較，可見二者的水深變化趨勢相當雷同。雷達回波影像的每一個像素解析度約為 7.5 m，但經由上述演算方法推算水深時，每個計算格點的間距是內插至 1m，因此圖 5 可看到同一水深線在空間上的細微變化。

圖 7 是將近岸空間上的每一個座標點對應在圖 5 上的水深值當作  $y$  軸之變數，以及相同座標點對應在圖 6 上的水深值當作  $x$  軸之對應變數，並對此散布圖內的所有水深點做線性迴歸。迴歸線的斜率是 0.992，相當接近 1，且  $R^2=0.843$ ，表示二者在空間上的水深值變化相當一致。而迴歸線在  $y$  軸的截距代表二者存在一水位差值(1.34 m)，這是因潮位基準不一，以及實測時間不同的潮汐差異所致。

此外，圖 7 上可發現許多離群值(outlier)，顯示雷達訊號推算水深的原始估計值具有局部異常值。本研究因此先將圖 5 空間內的所有水位值扣減 1.34 m，再選用中值濾波來濾除異常值。經過測試後發現中值濾波器採用 0.0012 度(約 101.78 km x 0.0012 度  $\approx$  120 m)的視窗大小進行異常值濾除後的二者水深相關性最高(圖 4)；而修正後的迴歸線斜率為 0.99993，更接近 1，且  $R^2=0.9208$ 。圖 8 是將圖 5 做水位基準修正及中值濾波後的水深估算值之等深線分布。

圖 9 是將雷達推算水深經修正後的結果(圖 8)與現場實測數據(圖 6)相減後之差異值分布，結果發現兩者差值大多在 -1m 到 1m 以內，除了外海以及近岸處表現較差以外，其他水深處估算結果與實測資料相當符合；近岸處則因波浪非線性作用複雜，因此存在較大的誤差。

圖 10 為實測水深值與雷達推算水深經修正後的結果，依水深條件區分的誤差鬚盒圖，顯示誤差平均僅在水深 0 到 1 公尺及 12 到 13 公尺兩個區間有較大誤差以外，位於水深 1 到 12 公尺範圍內的平均誤差均幾乎等於 0，結果顯示水深推算在這個區域表現非常良好。

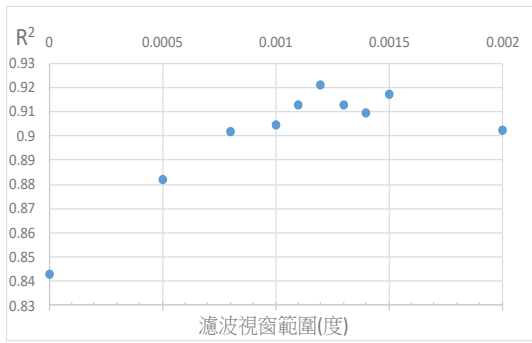


圖 4 中值濾波器的視窗範圍測試

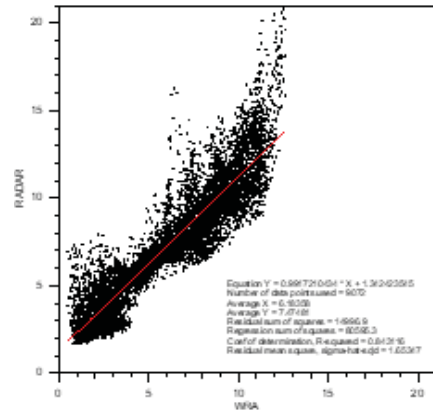


圖 7 近岸水深的實測值與推算值之回歸分析

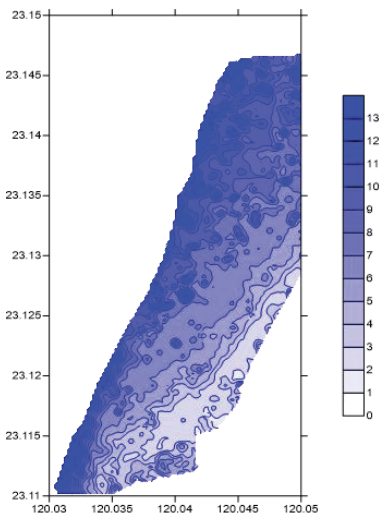


圖 5 雷達影像解算出的近岸水深地形

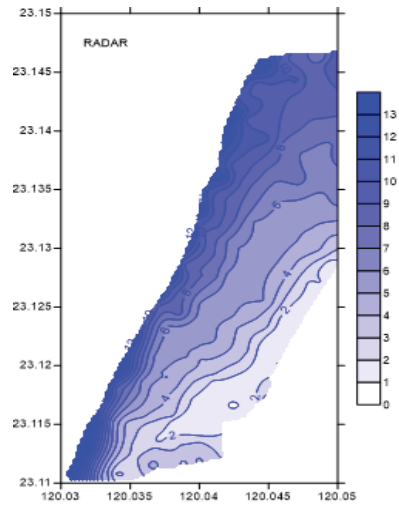


圖 8 雷達影像解算出水深值經修正後的近岸水深

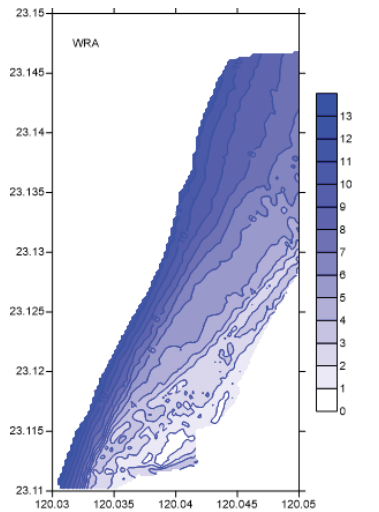


圖 6 第六河川局現場調查的近岸水深地形

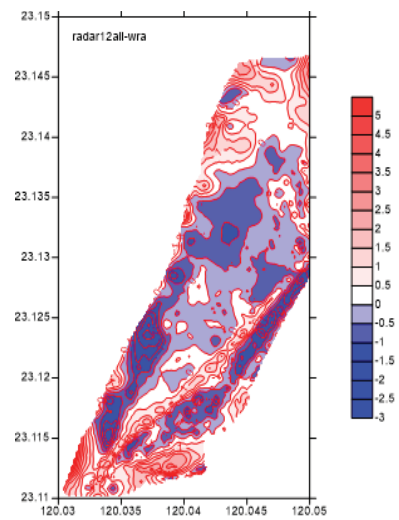


圖 9 實測水深與雷達推算水深之差值

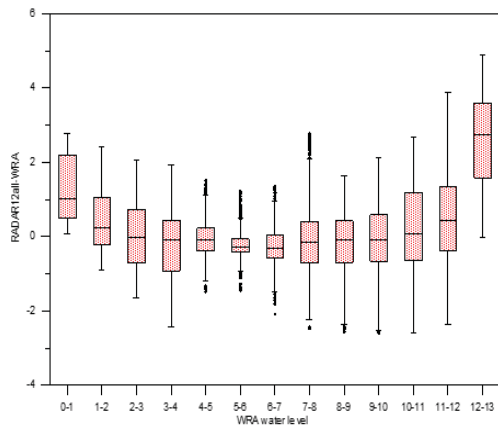


圖 10 實測與推算水深差異值之鬚盒圖

#### 四、結論

本研究是以 Wu et al. (2017)提出的演算法為基礎，將 X-band 雷達回波影像序列透過三維能譜轉換、希爾伯特轉換、及波浪分散關係式，進行近岸水深的解算，再搭配中值濾波的選用，來濾除水深異常值。雷達推算水深經修正後的結果與實測水深之比對顯示水深分布相當一致( $R^2=0.9208$ )，證實 X-Band 雷達量測近岸水深的可行性。依水深條件區分的誤差鬚盒圖顯示水深 1 到 12 公尺範圍內的誤差平均值幾乎等於 0，然而在水深 0 到 1 公尺及 12 到 13 公尺兩個海域卻有較大誤差存在。對於近岸水深誤差的改善，未來將參考 Flampouris et al.(2011)之作法，將非線性理論導入前述的演算方法中，讓近岸水深推算結果更加完善。

本研究顯示 X-Band 雷達只需在岸邊堤防架設，即可取得方圓數公里內的近岸水深地形資訊，且在海況條件惡劣時，更能取得高精度水深資料。此一技術建立將可有效降低水深地形觀測作業的風險，且所需時間小於半小時，可大幅提升水深量測之效率，節省現場實測所耗費的人力及物力。且能夠在颱風過後立即觀測，即時獲取海岸水深資料，提供權責單位儘早進行應變措施及後續海岸保護與防治工作之評估。

#### 謝誌

本研究承蒙科技部計畫編號 MOST 108-2623-E-006-003-D 之經費補助、海軍大氣海洋局的協力執行、及水利署第六河川局的水深資料提供，使本研

究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Bell, P.S. (1999). Shallow water bathymetry derived from an analysis of X-band marine radar images of waves, *Coastal Engineering*, Vol. 37, 513-527.
2. Flampouris, S., Seemann, J., Senet, C., Ziemer, F. (2011). The Influence of the Inverted Sea Wave Theories on the Derivation of Coastal Bathymetry, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 8, 436-440.
3. Mattie, M.G., Harris, D.L. (1978). The use of imaging radar in studying ocean waves, *Proc. 16th Coastal Eng., ASCE*, 174-189.
4. Wu, L.C., Lee, B.C., Doong, D.J., Kao, C.C., Chuang, L.Z.H. (2008). Nonlinear Influences on Ocean Waves Observed by X-band Radar, *Marine Geophysical Researches*, Vol. 29, 43-50.
5. Wu, L.C., Kao, C.C., Yang, W.H. (2010). Sea State Monitoring from a Mobile X-Band Radar System, *Sea Technology*, Vol. 51, No. 7, 40-42.
6. 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*, Vol. 32, No. 23, 8779-8798.
7. Wu, L. C., Doong, D. J., & Wang, J. H. (2017). Bathymetry determination from marine radar image sequences using the Hilbert transform, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(5), 644-648.
8. 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, 1049-1059.