

# X-band 雷達監測近岸海底地形的季節性變遷 -以七股瀉湖海岸為例

吳立中<sup>1</sup> 莊士賢<sup>2</sup> 陳云瑄<sup>2</sup> 孫永大<sup>3</sup> 王心怡<sup>4</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學 近海水文中心

<sup>2</sup>國立成功大學 海洋科技與事務研究所

<sup>3</sup>海軍大氣海洋局

<sup>4</sup>正修科技大學 土木與空間資訊系

## 摘要

海域水深資訊是海洋研究探索的基石，也是船艦航行、軍事登陸演習以及各種近岸活動的重要依據。遙測技術具有廣景覽要之特性，能對海面進行大空間範圍之觀測，對於長期監測大範圍水深資訊為一極具潛力的方法。本研究利用 X-band 雷達監測不同季節七股瀉湖外之近岸底床地形。從分析結果發現，近岸淺水區域存在有與岸線大致平行的潛末沙洲，且潛末沙洲的位置會隨著季節移動。從研究結果初步確認了雷達具有監控近岸海底地形季節性變遷的優勢，將有助於後續檢討更長時間尺度海底地形變化之研究工作。

關鍵詞：X-band 雷達、卡爾曼濾波、近岸海底地形

## Seasonal Variation of Nearshore Bathymetry based on Marine X-band Radar Measurements-Case Study of Qigu Coast

Li-Chung Wu\* Laurence Zsu-Hsin Chuang Yun-Hsuan Chen Yung-Ta Sun Hsin-Yi Wang

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

## ABSTRACT

Coastal bathymetric information is the cornerstone of ocean research and exploration, and it is also an important basis for ship navigation, military landing exercises, and various nearshore activities. Remote sensing has the characteristics of wide-view viewing, which can make large-scale observations of sea surface, and with potential on long-term monitoring of large-scale bathymetric information. In this study, marine X-band radar measurement was used to monitor the nearshore bathymetry outside the Qigu Lagoon and we discussed seasonal variation of nearshore bathymetry. From the results, there are submerged bar parallel along with the shoreline in the shallow water, and the positions of submerged bar will move with the seasons. After analyzing radar images observed from different seasons, the seasonal variations of coastal bathymetry and sand bar locations are confirmed. In our future studies, we will focus on the issue of annual variations of coastal bathymetry.

Keywords: X-band Radar; Kalman Filter; Nearshore Bathymetry

臺灣地處西太平洋東亞島弧鎖鏈中樞，扼控南海至東北亞海域交通要衝，在戰略上具相當重要的地位，因此海洋環境情資的掌握，有迫切之需求。從軍事面向觀之，海洋環境攸關海軍作戰成效甚

巨，其重要性不亞於空軍對氣象的依賴，陸軍對地形、地略的認知與運用。

如圖 1 所示，臺灣西側為臺灣海峽，其地形較平坦，平均水深約 60m，最大水深則可達 100 米以

上。東部海域因面臨太平洋，其坡度較陡峻，坡度急遽下降至 4,000 公尺以下，其中琉球海溝更超過 6,000 公尺，東部陡立岩岸和西部平原地形形成明顯對比。掌握海底地形除可有效減少船隻航行災害，亦可對登陸演習任務提供更明確的環境資訊。

海洋地形環境調查為海洋開發利用的基石，目前常見之海洋地形調查設備多是透過聲波進行量測。由於聲音是水下傳遞最有效的能量形式，也是水下探測的重要手段(郭，2001)。透過船艦搭載聲納設備出海量測水深的優勢為能獲取極為準確的水深資訊，可符合特定區域工程或是軍事之高精度且準確水深資訊的需求；然而海上作業所需花費的時間、人力以及物力極為龐大，且海上現場作業必須面對複雜多變的海洋環境，增添海上作業的風險。遙測科技具有廣景覽要的優點，且可透過岸邊設站的方式進行隔空探測，減緩直接出海作業的風險。本研究改裝航海用 X-band 雷達天線等硬體設備，搭配所研發之雷達影像分析技術，可從海面波場影像訊號中解算出近岸地形水深。此一技術之優點在於能夠快速有效掌握近岸的地形水深特徵，可藉此更有效落實海岸工程規劃、近岸低窪區溢淹預警及防治，甚至是登陸演習之前置規劃與準備工作。

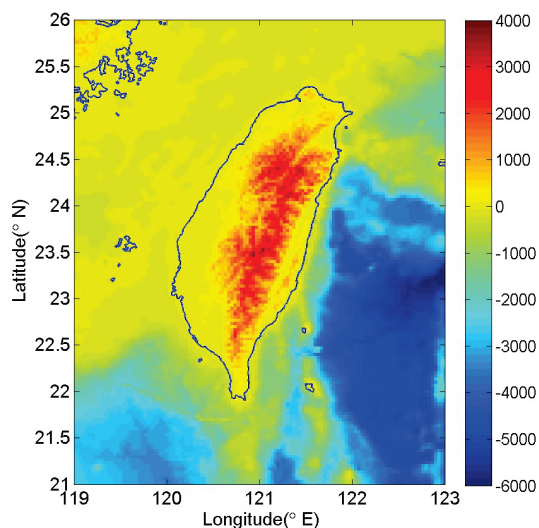


圖1 臺灣周圍海域之底床地形特徵

然而根據往昔調查，近岸淺水區域的水深地形常會因為一場颱風或是一段季風期的影響而造成改變。透過本研究發展之雷達觀測技術，預期能掌握海岸地形之變遷現象，有助於評估觀測區域海底地

形的長期變化趨勢。在國際間，荷蘭的研究團隊就曾在養灘工程後利用雷達持續監控海岸地形的長期間變化(Gawehn et al., 2020)。本研究則聚焦於近岸地形季節性變遷之議題，因此蒐集同一海域於不同季節所監測之雷達影像進行海底水深地形之分析與解算，嘗試透過所透過不同時期之地形水深資料來釐清海底地形隨季節變遷之特徵。

## 二、X-band 雷達監測技術檢討

利用航海雷達監測海底地形之關鍵在於透過雷達影像所呈現之海面波紋特徵，可進一步透過波浪在淺水區受底床影響所產生演變的機制，反算出觀測區域之水深值。讓雷達影像能呈現海面波紋之關鍵主要是受到兩種物理機制的影響：其一為鏡面反射(specular reflection)，當海面起伏大或波浪大時，大曲面之海面類似鏡面，雷達波射向鏡面產生反射。另一種雷達回波機制為布拉格散射(Bragg scattering)。當波動在週期性結構的介質中或沿著浪狀的介面傳遞時，會與介面的幾何形狀或介質的物理結構產生共振而導致強烈的回波。

前述討論為雷達成像海面波浪之學理機制，更詳細的說明請參考 Doong et al. (2018)。在實務上，為能達到航海雷達監測海底地形之目標，則需整合下列三項關鍵技術：1. 雷達硬體改裝技術；2. 高速訊號取樣技術；3. 波紋影像分析技術，整合後的系統如圖 2。本研究所採用之主動式 X-band 雷達，其電磁波頻率約為 9 GHz，日夜均可進行觀測，是適合從事海洋觀測之設備。電磁波的發送與接收都藉由雷達天線設備來進行。經現場測試發現，其有效的海面波紋觀測範圍至少有數公里。

X-band 雷達若僅是作為船艦導航行用途時，須濾除影像中的海面波紋特徵，並透過螢幕上顯示船隻影像；但對海洋環境參數之監測任務而言，則需獲取因海面波動產生之雷達回波訊號，進行後續處理。本研究所分析之海面回波雷達影像來自於高速取樣，也就是類比轉換為數位化(analog to digital)的雷達訊號。為能確保不易發生影像取樣失真(aliasing)，雷達訊號透過高速取樣，以 20MHz 的取樣頻率擷取雷達訊號，所對應雷達影像空間徑向解析度為 7.5m/pixel。



圖2 雷達監測系統之硬體架構

### 三、分析方法討論

受限於電磁波無法有效穿透水體，從雷達所測得海面回波影像主要是呈現海面波浪之時空特徵，並無法透過電磁回波直接呈現出底床地形特徵。為能從雷達影像解析出近岸地形，需搭配能合理描述波浪在淺水區演變特徵之數學理論，從中解算出地形水深資訊(Wu et al., 2017)。

線性波浪之分散關係式是當前最普遍被應用作為描述海面波浪受淺水區地形影響之數學關係式(Young et al., 1985)：

$$\omega = \sqrt{g|\bar{\mathbf{k}}| \tanh(|\bar{\mathbf{k}}|h) + \bar{\mathbf{k}} \cdot \bar{\mathbf{U}}} \quad (1)$$

其中波浪角頻率  $\omega$  及波數  $\bar{\mathbf{k}}$  值可解析出遙測影像區域的水深值  $h$ 。式(1)中含有兩項未知數-水深  $h$  及流速  $\bar{\mathbf{U}}$ 。理論上透過單一組分散關係式無法解析出兩項參數，但水深  $h$  以及流速  $\bar{\mathbf{U}}$  對於分散關係曲線的影響分別是在低頻帶以及高頻帶。依據週期愈長的波浪愈會受到深水條件之底床影響的物理機制，在進行水深計算時，應針對分散關係式的低頻項，也就是長週期波進行分析與計算，方可獲得所需之水深資訊。

儘管透過 X-band 雷達所測得之海面波紋影像搭配上上述數學關係可解算出觀測區域之水深資訊，然而依據本文團隊之前導研究結果發現，從雷達解算之原始水深結果與現場船測水深資料之間在局部觀測區域存在有明顯的誤差值(莊等，2019)。透過中值濾波技術可消除一定程度之雷達水深異常值。然而從解析出的單一小時水深結果中仍可發現具有一些歧異點，也就是雷達解算水深結果之異常值。有鑑於此，本研究團隊將連續數小時的水深觀測結果進行潮汐修正後，進而利用卡爾曼濾波器來統合逐時的水深資料，並藉此去除每一次觀測結果中的雜訊(陳等，2020)。

卡爾曼濾波器為匈牙利數學家卡爾曼所提出之方法(Kalman, 1960)。該法在演算過程中，若取得新的觀測資料，就會結合當時的預報值和觀測資料估

算其誤差協方差(error covariance)，並同時對誤差協方差進行分析和預測。卡爾曼濾波器主要是由一些數學公式所構成的遞迴演算方法，能有效的評估資料過程中的狀態，並且將誤差降至最低。可針對過去、現在甚至是未來的狀態進行估測。卡爾曼濾波器的演算過程包括了預測與校正兩種階段。針對預測階段，濾波器會使用前一時刻狀態的估計，對當前狀態進行估計。針對校正階段，濾波器則利用對當前時刻狀態的觀測值改進在預測時刻獲得的預測值，藉此獲得一個更準確的估計值。整體資料分析流程簡述如下：

1. 利用  $t-1$  時刻的資料，加上變化量，預估出  $t$  時刻的資料。
2. 利用  $t-1$  時刻的誤差協方差，配合前述所預估  $t$  時刻的結果，預估出  $t$  時刻的誤差協方差。
3. 權重值可由前述之步驟2中的  $t$  時刻的誤差協方差與測量誤差協方差，經計算而求得。
4. 利用所預估出的  $t$  時刻結果與  $t$  時刻的測量資料，進一步搭配權重值(Kalman gain)，更新  $t$  時刻結果。
5. 利用權重值更新  $t$  時刻的誤差協方差。

整體而言，卡爾曼濾波器假設每一個時刻的雜訊與其他時刻雜訊之間都互相獨立。只要能掌握前一時刻的估計值與當前時刻的觀測值，儘管觀測數值含有雜訊於其中，仍可透過卡爾曼濾波方法計算出當前狀態的估計值，經過每次的遞迴演算可讓估計值離動態系統狀態更為接近。

### 四、觀測案例說明

本研究透過臺南七股潟湖外側海域所取得之現場實測海面 X-band 雷達影像資料進行分析與研究。此海域冬季期間之波浪多來自偏北向，作用歷時長，沿岸流挾帶急水溪等河川之入泥沙南下，漂沙則以冬季波浪造成之往南漂沙為優勢。夏季期間，本區海域受颱風及西南氣流之影響，故海岸漂沙主要沿著海岸由南往北輸送，但作用時間較短(經濟部水利署第六河川局，2012)。此外，在致災型天氣侵襲該海域期間，離岸沙洲往往是防護後方水域與陸域之關鍵。由於此海域鄰近曾文溪河口，曾文溪的輸砂特性對鄰近海岸的地形變化明顯。颱風波浪來襲時則可能會發生地形大幅改變，使得沙洲地

形大幅遷移(吳等, 2012)。經評估後確認, 此一水域是研究進岸地形變遷的理想場域。

本研究每次觀測使用 128 張連續測得之雷達影像時序列進行分析。雷達天線之架設高度約距海平面 20 m, 波場影像之觀測半徑則為 4.5 km。雷達影像涵蓋範圍分別如圖 3 所示。圖中雷達影像觀測區域內所呈現的不規則但重複性條狀特徵乃是海面波浪的波鋒現前緣所造成的雷達回波。

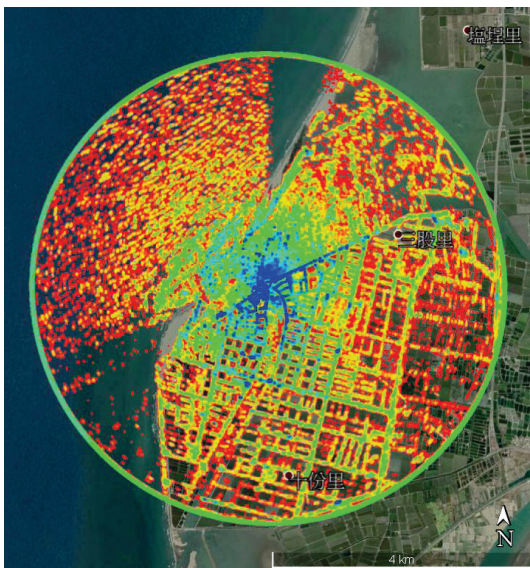


圖3 本研究之雷達觀測案例

從圖 3 影像也可發現在某些海上區域的條狀波紋特徵並不明顯, 這是因為雷達觀測範圍內的部分方位角有受到岸邊阻礙物(防風林)遮蔽雷達波之傳遞所造成之結果。

為能釐清雷達系統於觀測海域不同季節期間之觀測結果, 本計畫於 107~108 年度內的四個季節分別從中選取影像案例進行分析。本研究所使用的雷達觀測案例分別為: 107 年 6 月、107 年 9 月、107 年 12 月、108 年 3 月。為能透過卡爾曼濾波器來統合逐一小時的水深資料, 並藉此去除每一次觀測結果中的雜訊, 每一季節的案例都使用連續 12 小時(每小時觀測約 3 分鐘, 收集 128 張連續雷達影像)的雷達觀測資料進行分析。

## 五、底床地形分析結果與討論

本研究應用卡爾曼濾波改良 X-Band 雷達近岸水深量測誤差, 團隊的相關研究工作已針對改進後

的雷達觀測結果與現場船測資料進行比對與檢討(陳等, 2020), 並已證實導入卡爾曼濾波技術後能有效降低雷達量測水深之誤差。有鑑於此, 本文將研究重點聚焦於雷達觀測不同季節近岸水深結果之比較與檢討。

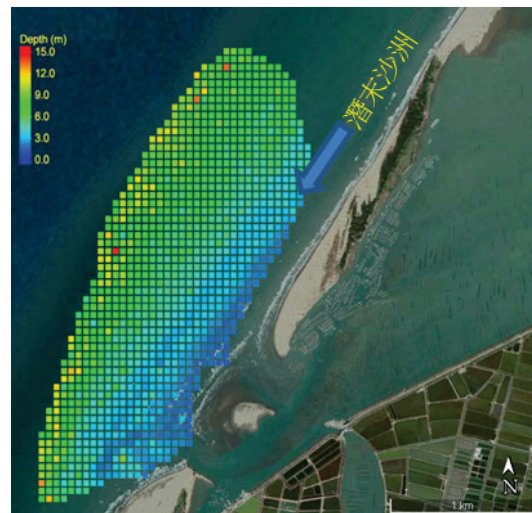


圖4 107 年 6 月份雷達監測水深之結果  
(底圖來源: GoogleEarth)

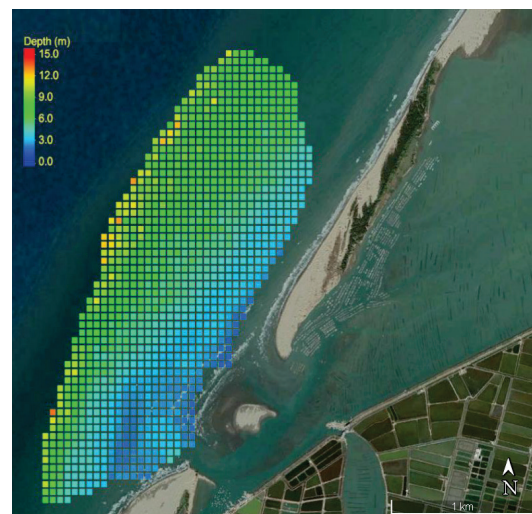


圖5 107 年 9 月份雷達監測水深之結果  
(底圖來源: GoogleEarth)

圖 4~圖 7 為連續四季的雷達監測地形水深結果。從分析結果可發現, 四種季節所呈現的海底地形趨勢頗為相近, 觀測區域內的水深皆大致分布於 1 公尺~15 公尺的範圍內。在靠近潟湖潮口岸邊附近的淺水區域, 其水深最淺可達約 1 公尺。從地形之空間特徵也可發現, 近岸淺水區域存在有與岸線大

致平行的潛末沙洲。潛末沙洲在秋季(9月份)時並不顯著，但到冬季開始又可以明顯被辨識出。

本研究進一步針對垂直海岸方向的地形特徵進行檢討。本研究從圖 7 的虛線標示處擷取出不同季節的地形資料，結果如圖 8 所示。從斷面水深剖面結果可發現，離岸約 500 公尺與 800 公尺處存在有潛末沙洲。從往昔之調查結果(經濟部水利署第六河川局，2014)也可發現此一地形特徵趨勢。本研究進一步檢討不同季節之斷面水深，發現潛末沙洲的位置會隨著季節略為改變。

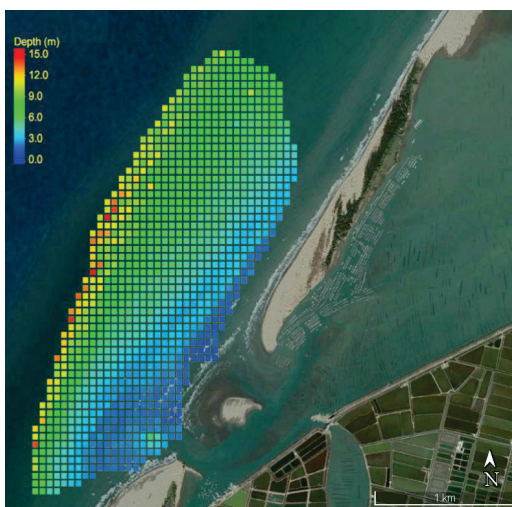


圖6 107 年 12 月份雷達監測水深之結果  
(底圖來源：GoogleEarth)

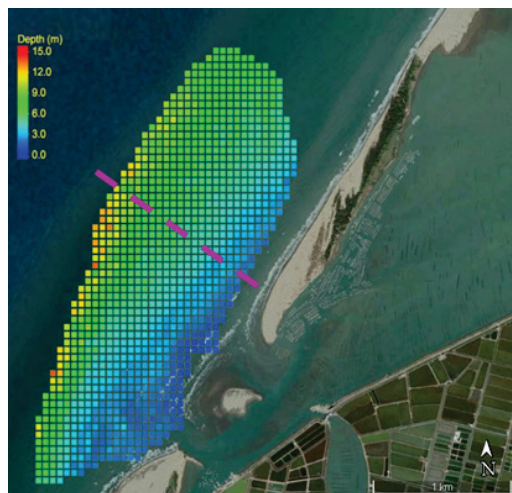


圖7 108 年 3 月份雷達監測水深之結果  
(底圖來源：GoogleEarth)

近岸底床地形以及潛末沙洲位置資訊對於近岸防災預警、工程或是登陸演習等工作的事前評估至

為關鍵。從本研究的研究結果初步確認了長期雷達監測結果有助於掌握近岸海底地形甚至是潛末沙洲位置資訊，本研究後續將更進一步針對更長期的資料進行海底地形年際變化之檢討。

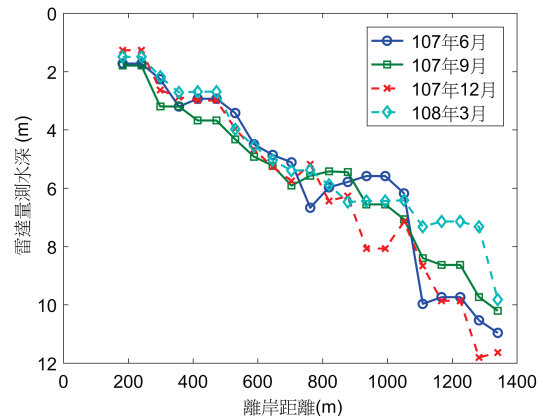


圖8 不同季節雷達監測水深結果之比較

## 六、小結

海底地形資訊攸關海軍之登陸演練、海上救難、航行安全及軍港運維等任務。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模式，對海軍例行任務、救災行動、及各型演練都有重要的參考價值。

自主發展水深遙測技術的優點有：1. 雷達遙測可進行時域及空域的連續觀測，可方便取得大範圍空間域的長期水深變化資訊；2. 雷達系統設置於陸地上，機動性高，維護成本亦較低；3. 減少出海之工作，可降低觀測作業之危險性；4. 發展遙測技術可與國際趨勢並進，並提昇國內觀測技術水平。

往昔已有大量國內外之研究檢討 X-band 雷達遙測水深之準確性，本文團隊也有針對自行研發的系統與技術持續進行研發改進(吳，2015；Wu et al., 2017；莊等，2019)，本研究則聚焦於雷達遙測資料應用於海域地形季節性變遷之研究。從不同季節的雷達監測結果可發現，雖然四種季節所呈現的海底地形趨勢大致頗為相近，但在細節特徵仍有變化。近岸淺水區域存在有與岸線大致平行的潛末沙洲。但沙洲會隨季節產生明顯變化。

相較於現場量測所獲得可視為最正確真值 (ground truth) 之水深資訊，X-band 雷達觀測技術雖然還無法到達與現場量測一樣的觀測精度，但能快速且有效獲得大範圍空間海域的水深資訊，未來可與現場水深量測技術相互搭配，兩者相輔相成，涵蓋「點」與「面」的水深監測以掌握我國近岸海域特性，提供範圍更廣的觀測資料做為各類海事活動之使用。

## 謝誌

本研究承蒙科技部計畫(編號: MOST 109-2623-E-006-002 -D)之經費補助,海軍大氣海洋局的協力執行,經濟部水利署第六河川局的現場船測水深資料之提供,使本研究得以順利完成,謹致謝忱。

### 參考文獻

1. 郭一羽(主編)(2001)海岸工程學,文山出版社。
2. 吳盈志、劉景毅、黃翔瑜(2012)七股潟湖沙洲地形變遷之研究,第34屆海洋工程研討會論文。
3. 經濟部水利署第六河川局(2012)臺南高雄海岸防護標準檢討分析與海氣象觀測系統建置,經濟部水利署第六河川局,計畫報告。
4. 經濟部水利署第六河川局(2014)臺南海岸斷面測量監測計畫(1/2),經濟部水利署第六河川局,計畫報告。
5. 莊士賢、吳立中、孫永大、黃瓊珠、鍾育仁、蔡昀展、鄭仁杰(2019)「X-band 雷達於近岸水深量測精度之改良」,第41屆海洋工程研討會論文。
6. 陳云瑄、莊士賢、吳立中、孫永大(2020)「以卡爾曼濾波改良 X-Band 雷達近岸水深量測誤差」,第42屆海洋工程研討會海報。
7. Doong, D.J., Wu, L.C., and Lai, J.W. (2018) Determination of the Spatial Pattern of Wave Directions in the Inhomogeneous Coastal Ocean by Marine Radar Image Sequences, *IEEE Access*, 6, 45762-45771.
8. Gawehn, M., van Dongeren, A., de Vries, S., Swinkels, C., Hoekstra, R., Aarninkhof, S., and Friedman, J. (2020) The application of a radar-based depth inversion method to monitor near-shore nourishments on an open sandy coast and an ebb-tidal delta, *Coastal Engineering*, 159, 103716.
9. Kalman, R.E. (1960) A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45.
10. Wu, L.C., Doong, D.J., and 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.
11. 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.