

# X-band 雷達應用於 解析近岸海表面水文特徵之研究

吳立中<sup>1</sup> 高家俊<sup>2</sup> 王仲豪<sup>3</sup> 王良生<sup>4</sup> 陳秋份<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學近海水文中心專案助理研究員

<sup>2</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

<sup>3</sup> 經濟部水利署水文技術組副工程司

<sup>4</sup> 國立成功大學近海水文中心專案工程師

<sup>5</sup> 國立成功大學近海水文中心品保組組長

## 摘要

航海用 X-band(X 波段)雷達具有偵測近岸海表面特徵的能力。往昔 X-band 雷達在海洋工程領域的應用大多著重於遙測海浪以及海流等定量資訊，但此一遙測技術應用於極近岸水域水文現象研究之潛力絕不容小覷。本研究透過 X-band 雷達遙測技術的輔助，解析近岸水域的水文特徵。透過 X-band 雷達設備進行現場海面雷達影像數據之收集，並引入適當影像處理以及分析方法，藉以將瀉湖口附近之水文現象取出，再透過現場其他觀測資料的交互比對與解讀，確認雷達技術應用於監測水文特徵之可行性。

關鍵詞：X-band 雷達、海面水文特徵、近岸海域

## Application of X-band Radar on Coastal Sea Surface Hydrological Features Extraction

Li-Chung Wu\* Chia Chuen Kao Jong-Hao Wang Liang-Sheng Wang Chiu-Fen Chen

\* Project-Appointed Assistant Research Fellow, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

The nautical X-band radar, which has capability to capture the temporal and spatial information of ocean environment, is a potential instrument for the detection of high resolution coastal sea surface hydrological phenomena. The aim of our study is to verify the practicability of X-band radar on detecting different sea surface hydrological phenomena in the surf zone. Different image processing techniques for image analysis are developed and constructed within this study to obtain the significant information from the sea surface. Based on the results from our analysis, we have confirmed that the features of tidal phase within the area of lagoon can be detected by the radar images. In addition, we also extract the information of underwater sand bar from the radar backscattering on the sea surface.

Keywords: X-band radar; Sea surface hydrological phenomena; Surf zone

## 一、前言

近岸海域為海、氣、陸三種環境因子交互作用的區域，範圍雖然不大，當中的各種自然現象卻是十分複雜且與人類的生存發展緊密連結。近數十年

來，隨著遙測技術的蓬勃發展，「海洋遙測」已成為海洋相關學科研究領域探索各種海洋現象的重要工具。遙感探測的技術可分為光學與微波雷達兩種方式。由於部份微波的波段具有穿透雲雨之能力，且不受日夜變化之影響，有助於進行長期穩定的海

洋環境觀測。相較於衛星影像大空間尺度的觀測，陸上的雷達則具有近岸範圍高解析度觀測的能力。以往 X-band 雷達大多是作為船艦航行安全之用，但此一設備應用於海洋現象研究之潛力絕不容小覷。往昔曾有學者利用各種頻率範圍的雷達電磁波來進行波浪觀測，分析結果確認了 X-band 雷達確實適用於海面波紋之觀測(Mattie and Harris, 1978)。Young et al. (1985) 提出利用傅立葉轉換分析三維度的雷達影像序列，開啓了 X-band 雷達觀測波流的先河。在國內，臺灣大學(王, 1999)協助港灣技術研究中心進行雷達系統之建置，為國內發展此一觀測技術之先驅。臺灣海洋大學(翁等, 2011)的研究團隊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，獲得許多豐碩的成果。高雄海洋科技大學則應用 X-band 雷達進行海面油汙的偵測與調查。成功大學則針對近岸海面雷達影像所呈現的非均勻波、流特徵進行研究與探討(Wu et al., 2011)。綜整往昔 X-band 雷達於海洋領域之應用與研究後發現，大多研究著重於海表面波浪、流場以及水深地形等物理參數之觀測，然而將 X-band 雷達應用在極近岸地區，特別是碎波帶以及潮間帶的海表面水文等特徵之研究潛力仍不容輕忽。

本文嘗試利用雷達遙測技術的輔助，解析近岸水域的水文特徵。透過 X-band 雷達觀測技術進行現場海面雷達影像數據之收集，並引入適當影像處理以及分析方法，藉以從中將極近岸水域之水文現象提取出，再透過現場實驗之交互比對與解讀，確認雷達監測水文特徵之可行性。

## 二、研究方法

海表面影像分析是從雷達影像中取得相關水文資訊的重要手段。本文嘗試發展海面雷達影像之強化以及分析演算法，進一步透過實測影像的分析結果檢討各種影像分析方法做為取得所需水文資訊的實用程度。

### 2.1 海面影像特徵強化方法

影像強化之目的是透過處理目標影像，使其結果能較原先的影像更為適用(Gonzalez, 2002)。本文嘗試強化 X-band 雷達影像中水文特徵。所使用的影像增強方法為空間域影像強化。令所分析的影像函

數為  $f(\vec{x}) = f(x, y)$ ，其 Laplacian 轉換為：

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (1)$$

由於所分析之雷達影像皆為離散形式的數位影像，上式必須被離散化。在  $x$  方向以及  $y$  方向的偏微分可表示如下：

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y) \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y) \quad (3)$$

透過結合上述兩式，式(1)可表示為：

$$\nabla^2 f = [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y) \quad (4)$$

透過上述數學式進行空間域的影像強化方法如下：

$$g(x, y) = f(x, y) - \nabla^2 f(x, y) \quad (5)$$

上式中， $g(x, y)$  為影像強化後之新影像函數。因 Laplacian 為一導數運算式，透過此法能突顯影像中灰階不連續處(謬, 2004)，藉以強化出影像中隱含的資訊。

### 2.2 影像結構張量分析方法

張量(tensor)是一種可表示純量、向量或其他張量之間線性關係之函數。結構張量(structure tensor)則是利用影像梯度來呈現影像局部區域的結構特徵，可以藉由張量場辨識出影像中的不同結構。針對影像函數  $g(\vec{x}) = g(x, y)$ ，其結構張量內之成就是透過影像函數之偏微分而得：

$$J_{xy} = \int_{-\infty}^{\infty} h(\vec{x} - \vec{x}') \frac{\partial g(\vec{x}')}{\partial x} \frac{\partial g(\vec{x}')}{\partial y} d\vec{x}' \quad (6)$$

上式中， $h(\vec{x} - \vec{x}')$  為一加權視窗函數；二維度影像的結構張量則可表示為：

$$J_{xy} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{xy} & J_{yy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

針對上式之結構張量，其方向向量(orientation vector,  $\vec{o}$ )、同調性(coherence,  $C$ )以及其方向角(orientation angle,  $\theta$ )之數學關係可表示如下：

$$\vec{o} = \begin{bmatrix} J_{yy} - J_{xx} \\ 2J_{xy} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = \frac{(J_{yy} - J_{xx})^2 + (2J_{xy})^2}{(J_{yy} + J_{xx})^2} \quad (9)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{o_y}{o_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2J_{xy}}{J_{yy} - J_{xx}}\right) \quad (10)$$

同調性的意義為方向向量(orientation vector)長度與梯度向量(gradient vector)長度之間的比值，數值會介於 0~1 之間。透過分析結構張量的同調性，可以求取影像的方向資訊。同調性之數值為 0 代表沒有明顯之方向結構；數值為 1 則代表影像具有明顯之方向結構。

### 三、現場實驗之布置

為確認上述研究方法實際應用於現場分析的效果，本研究透過於臺南七股海域所取得之現場實測海面 X-band 雷達影像資料進行案例分析。為能掌握觀測海域的海洋環境特徵(觀測海域的水深地形條件)，作為相關研究分析的依據，本研究也透過相關研究文獻取得研究區域之水深地形特徵(經濟部水利署第六河川局，2011)。



圖 1 現場實驗布置(右圖)與雷達影像套疊圖(左圖)

本研究所使用之雷達資料為經濟部水利署於臺南七股北堤岸邊所設置之 X-band 雷達資料。雷達系統之布置以及影像涵蓋區域(虛線框所圈選之範圍)如圖 1 所示。研究中使用 42r.p.m.之雷達天線(23° 6.7900' N, 120° 3.1378' E)，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 20m，波場影像之觀測半徑則為 4.5km。距離七股瀉湖口約 5km 處設有經濟部水利署七股資料浮標站；距離瀉湖口約 20km 處則設有經濟部水利署四草潮位站，透過收集這些測站的同步觀測資料，可取得雷達觀測期間該海域之風、波、潮、流等資訊。這些現場資料是作為後端檢討相關水文現象之重要依據。

### 四、海面回波影像之解析

本研究透過將連續影像序列對其時間域進行積分，有效將海表面影像的重力波特徵移除，藉以解析海面影像中所測得的其他物理量：

$$g(x, y) = \int f(t, x, y) dt \quad (11)$$

上式中， $f(t, x, y)$  為連續雷達影像序列函數； $g(x, y)$  為積分後之空間影像函數。本研究透過前述之海面影像特徵強化方法對  $g(x, y)$  進行影像強化，藉以更有效辨識出海面雷達影像中所呈現之水文特徵。

#### 4.1 瀉湖口雷達影像之解析

如圖 2 所示，為高潮與低潮時期所測得之不同雷達影像案例。從影像案例中可初步辨識出高潮與低潮期間的回波強度有明顯之差異。這樣的現象主要是因為低潮期間觀測海域的水深將變淺，致使波浪發生淺化的機率增高，也致使海表面的波浪尖銳度(波陡)變大，因而造成電磁波鏡面反射的機率增加。此外，近岸海浪碎波之後，也是造成強烈海面回波(sea spike)的主要原因。Melief et al. (2006) 指出約有八成的強烈海面回波(sea spike)與碎波(breakers)或是海面白帽(whitecaps)事件相符合。海浪碎波現象一直是海岸工程非常關注的議題之一。由於碎波會改變海面粗糙度，進而造成強烈的海面回波，是故能透過 X-band 雷達進行有效之偵測。

本研究測得之雷達影像如圖 2 中選取四組不同位置(#1,#2,#3 以及#4)，並切選出相同面積的雷達子影像(sub-image)，各自計算子影像內之回波平均值。其中#1 以及#2 的子影像所在區域為碎波帶之外，也是一般在進行海面波、流分析所使用的雷達影像區域。#3 的子影像所在區域則位於碎波帶內。由於海浪碎波造成海面粗糙度的改變，造成此一區域的雷達回波非常強烈。除了#3 子影像所在的區域之外，#4 子影像所在的區域也同樣位於碎波帶之內。此外，#4 子影像所在區域為瀉湖入潮口(tidal inlet)區域。由於入潮口同時受到波、潮、流以及地形的共同作用，#3 與#4 區域的海面回波特徵十分複雜。相對的，此區域的雷達回波影像也提供了許多寶貴的近岸環境資訊。

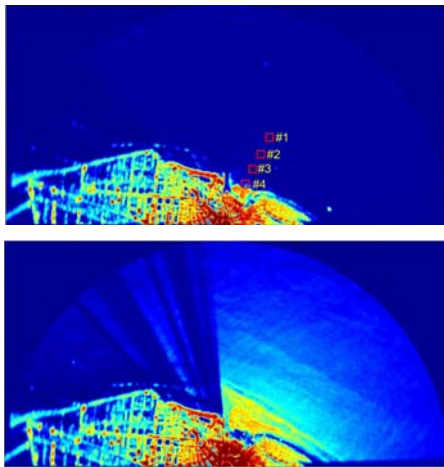


圖 2 近岸海域高潮(上圖)與低潮(下圖)時測得之雷達影像案例

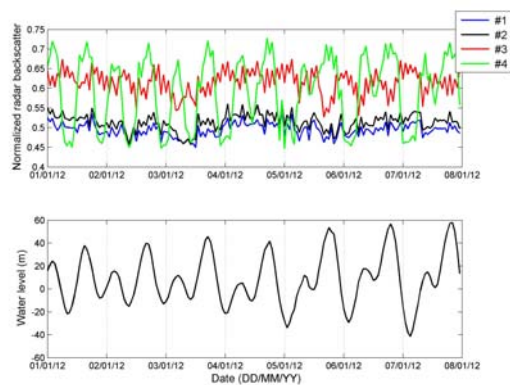


圖 3 不同位置影像回波平均值(上圖)與現場四草潮位站潮汐資料之時序列(下圖)

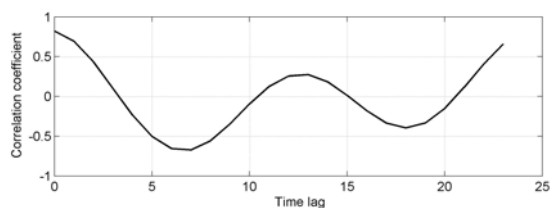


圖 4 現場潮汐資料與#4 子影像雷達回波時序列之相關性分析

本研究嘗試分析連續一星期的雷達影像案例，並與鄰近之經濟部水利署四草潮位站之潮位觀測資料進行比對，如圖 3 所示。分析結果發現電磁波隨時間的變化趨勢與鄰近海域潮位漲落趨勢有關，其中#4 的雷達回波能量震盪特徵與同時間之海面潮汐漲落特徵最為相近。本研究進一步針對現場潮汐資料與#4 雷達回波時序列進行不同延時(time lag)之

相關性分析。分析結果顯示(圖 4)，雷達回波時序列之震盪與潮汐漲落有明顯之相關性，其中於約 12 小時(半日潮)以及 24 小時(全日潮)延時之相關性最強。說明了潟湖潮口水域之雷達影像用於辨識潮汐漲落特徵之可行性。因為潟湖入潮口地區的潮流特徵特別顯著，潮汐的長時間尺度波動，將帶動入潮口地區的水體明顯流動。而漲潮海水隨潮汐進入潟湖以及退潮海水流出潟湖所造成的回波強度有明顯之差異，也造成從入潮口的雷達回波值可偵測出潮汐的波動變化。雖然雷達回波值與潮汐水位高度之間並沒有高度之關聯性，但雷達回波強度波動之相位角與潮汐漲落波動之相位角(tidal phase)卻極為相近，證實了透過潟湖區之雷達回波訊號能有效推算出該水域的潮時資訊。

#### 4.2 潛沒沙丘引起之海面回波研究

除了透過潟湖口之海面雷達回波偵測潮汐漲落之潮時(tidal phase)之外，本文也嘗試透過近岸地區的海面回波特徵研究潛沒沙丘的分布與變遷。因潛沒沙丘具有削減波能之功用，確切掌握潛沒沙丘的分布位置對於海岸保護工作具有一定之助益。低潮期間所測得之海面雷達回波影像，可發現近岸地區的回波呈現規則帶狀之分布(如圖 5 方框所圈選的位置)，此為海浪碎波後所造成的強烈回波。這樣的現象是因為低潮期間觀測海域的水深變淺，致使波浪發生淺化的機率增高，也致使海表面的波浪尖銳度變大，因而造成電磁波鏡面反射的機率增加。上述之淺水碎波現象往往會受到潛沒沙丘之影響。當波浪於淺水區傳遞時，受到不規則底床起伏之影響，波流之交互作用會更為明顯(Alpers, 1984)。當潛沒沙丘的坡面正對著海流，也就是坡面所朝向之方向與流向相反時，流速逐漸增強，此一潛沒沙丘坡面上方海面引起幅散(divergent)現象，海面粗糙度因而變小，造成雷達回波相對較不明顯。同一沙丘的另外一邊坡面，其流速則是逐漸減緩，此一沙丘坡面上方海面引起幅聚(convergent)現象，海面粗糙度因而變大，進而造成雷達回波強度增加。透過此一物理機制，可有效透過海面雷達回波之特徵來偵測淺水地區的潛沒沙丘所在位置。根據經濟部水利署第六河川局(2011)的現場調查結果顯示，七股潟湖口附近區域確實存在有潛沒沙丘，部分沙丘之高度可達數公尺。該報告的觀測結果間接證實了利用



雷達偵測潛沒沙丘分布位置之可行性。

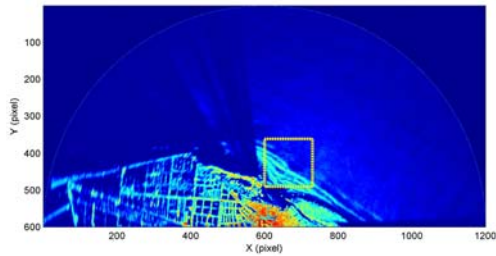


圖 5 海面回波影像所呈現之潛沒沙丘特徵

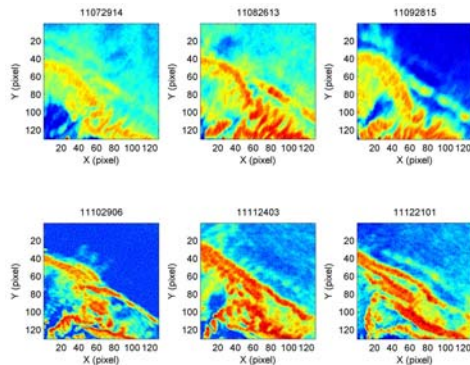


圖 6 低潮期間之近岸海面回波子影像\_1

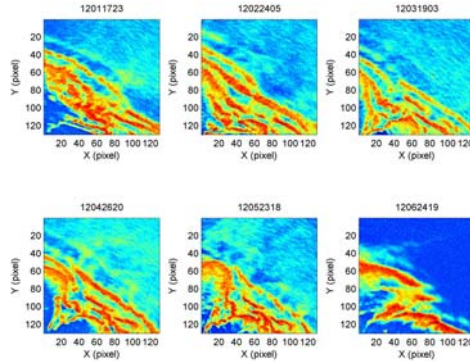


圖 7 低潮期間之近岸海面回波子影像\_2

根據經濟部水利署第六河川局(2011)的現場調查結果也發現，受到海岸地形侵淤現象之影響，潛沒沙丘的高度以及位置都會持續的改變。如圖 6 以及圖 7 所示，為本文研究區域內不同月份的雷達回波影像。圖上之數字為影像觀測時間：西元年(YY)月(MM)日(DD)時(HH)。為能將研究重點聚焦於潛沒沙丘的發生區域，本文僅針對圖 5 內方框所圈選之區域進行討論。為避免漲退潮流向不同所造成強烈雷達回波發生位置之改變，本文僅選取低潮期間之案例進行討論。現場潮汐資料是取自於研究區域

附近四草潮位站之觀測記錄。由於該站設置於 2011 年 9 月份，因此 2011 年 9 月以前的潮汐資訊則來自於中央氣象局所公布潮汐表中安平潮位站的資料。為儘可能在相近的海象環境條件下進行這些雷達回波案例的檢討，本研究所討論案例的海面示性波高多選取在 0.5m~1m 的範圍內，對應週期也都位於 3.5sec~5.5sec 的範圍內。從圖 6 以及圖 7 的雷達回波結果可看出，強烈雷達回波所發生的位置並非恆定不變動，這也說明了潛沒沙丘所在位置的改變。從 2011 年 10 月~2012 年 4 月這段期間的雷達案例可發現，大多的雷達回波案例都呈現出明顯的帶狀特徵。然而 2011 年 7 月~9 月以及 2012 年 5 月~6 月期間的案例則呈現較為零碎片段雷達回波特徵。

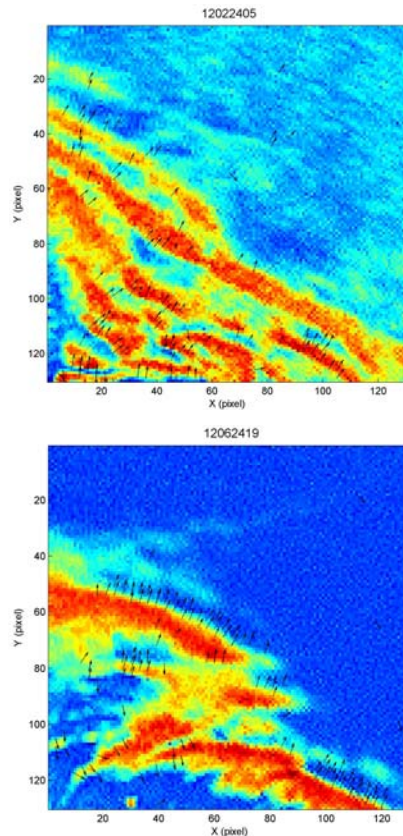


圖 8 影像結構張量之分析結果

圖 8 為上述影像案例中挑選出 2012 年 2 月份以及 6 月份影像的結構張量分析結果。圖上之數字為影像觀測時間：西元年(YY)月(MM)日(DD)時(HH)。透過影像結構張量之分析，可從雷達回波影像中有效定量出潛沒沙丘分布的方向。圖 8 的分析結果中，僅部分區域有呈現出黑色箭頭方向，這是

因為進行影像結構張量時，可透過結構張量的同調性，判斷出影像是否具有明顯之方向結構。本研究僅呈現結構張量同調值大於 0.5 區域的影像方向結構，因此在方向結構不明顯之區域並未呈現出方向結構之分析結果。

## 五、結論

位居水、汽、固體三相交界處的海岸地區，範圍雖然不大，水文現象卻十分複雜。雖然往昔已有許多學者投入此一區域的研究，但目前還未能完整掌握此一區域的水文特徵。X-band 雷達具有提供高解析度海表面時空資訊的能力，對於解析近岸數公尺到將近公里尺度的物理現象，此一遙測技術具有之優勢。然而目前為止還尚未有文獻對此一研究工作進行完整且嚴謹的討論。尤其在極近岸地區，特別是碎波帶以及潮間帶海表面物理過程之解析，仍有待透過 X-band 雷達的高解析度空間觀測之優勢，進行更完整的研究與解析。本研究透過分析瀉湖入潮口(tidal inlet)區域的雷達回波影像，發現電磁波隨時間的變化趨勢與鄰近海域的潮位漲落有明顯之相關性。由於漲潮海水隨潮汐進入瀉湖以及退潮海水流出瀉湖所造成的回波強度有明顯之差異，也造成從入潮口的雷達回波值可偵測出潮汐的波動變化。其中於約 12 小時(半日潮)以及 24 小時(全日潮)延時之相關性最強，說明了瀉湖潮口地區之雷達影像用於辨識潮汐漲落特徵之可行性。除了透過瀉湖口之海面雷達回波偵測潮汐之漲落特徵之外，本文也嘗試透過近岸地區的海面回波特徵研究潛沒沙丘的變化。由於潛沒沙丘坡面上方之海面所引起的幅聚與幅散現象，海面粗糙度因而改變。透過此一物理機制，可有效透過海面雷達回波之特徵來偵測淺水地區的潛沒沙丘所在位置。

## 謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「X-band 雷達應用於解析近岸海表面水文特徵之研究」(編號 NSC101-2221-E-006-046)之研究成果，文中所使用之雷達影像資料以及現場海象觀測資料為經濟部水利署為所有，承蒙國科會經費補助以及經濟部水利署提供相關雷達以及海象研究資料，使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 王冑(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。
2. 繆紹綱(2004)數位影像處理，台灣培生教育出版。
3. 經濟部水利署第六河川局(2011)七股西堤海岸侵蝕防治之研究(2/2)。
4. 翁文凱、周宗仁、尹彰、邱永芳、何良勝(2011)利用海雜波推算推算海面波場特性，海洋工程學刊，第 11 卷，第 1 期，第 31-55 頁。
5. Alpers, W., Hennings, I. (1984) "A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 89, pp. 10529-10546.
6. Gonzalez, R.C., Woods, R.E. (2002) *Digital Image Processing (2nd Edition)*, Prentice Hall, NJ.
7. Mattie, M.G., Harris, D.L. (1978) "The Use of Imaging Radar in Studying Ocean Waves," In: *Proc.16th Coastal Eng.*, ASCE, pp.174-189.
8. Melief, H.W., Greidanus, H., Van Genderen, P., Hoogetboom, P. (2006) "Analysis of sea spikes in radar sea clutter data. Geoscience and Remote Sensing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 44, pp. 985-993.
9. Reeve, D., Chadwick, A., Fleming, C. (2004) *Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice*, Spon Press, NY.
10. 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, pp. 8779-8798.
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, pp. 1049-1059.