



# 航海雷達應用於海面波流監測可行性之探討

吳立中<sup>1</sup> 高家俊<sup>1</sup> 董東璟<sup>2</sup> 莊士賢<sup>3</sup>

## 摘 要

航海雷達為普及性的商業產品，常見被應用於船隻導航目的。由於航海雷達回波中隱藏著海面波紋之特徵，透過高速回波訊號擷取技術與影像分析技巧，可獲取海表面特徵之訊息，具有作為遙測海洋波浪與流工具的潛力。本文之目的為探討航海雷達觀測波流之可行性，利用現有商用航海雷達進行改裝，發揮其作為海洋觀測工具之能力，並運用小波轉換(Wavelet transform)數學方法分析雷達影像時系列，獲得非均勻(non-homogeneity)波流場中波浪及海流在空間上的分佈資訊。經由現場實測結果驗證發現，初步證實了航海雷達確實具有觀測海況之能力，為未來極具發展潛力的工具。

關鍵字：航海雷達；波浪觀測；海表面流；小波轉換

## 壹、前 言

海洋是孕育生命起源的搖籃，也是人類生存發展之憑藉。台灣地區四面環海，近年來隨著氣候變遷的現象逐漸明顯，其所可能引發之相關岸邊災害，包括了：海岸侵蝕、海岸溢淹、海堤損毀等，已成為近海禦潮防災工作上的一大考驗。近岸環境首要面對的是巨大險惡的海洋環境外力，包括波流等外力是海堤工程設計以及海岸侵蝕等議題所必須考慮的因素，此等環境外力一方面受氣象變化萬千影響，具有高度之隨機性；另一方面受地形地貌影響，具有強烈的地域性，是一個複雜的物理現象，至今在學理上仍無法全盤精確掌握其物理特性，增加海岸禦潮防災的不確定性。

波浪與海流調查為掌握海洋環境的關鍵，調查結果也是海岸防災工作的重要依據。為能獲取穩定且準確的海洋環境資料，學界已陸續發展出一些觀測的方法，其可分為直接的現場(in-situ)觀測與間接的遙測(remote sensing)兩類。其中遙測屬於間接的量測方法，透過光學、微波或其它方式量測海面的粗糙度，再利用數學上的轉換方法計算遙測影像波浪譜，進而從影像譜中分析出海況值(Doong, 2002)。

近幾十年來，由於遙測技術發展迅速，許多雷達

測波之相關研究相繼被提出，其中衛星酬載之合成孔徑雷達(Synthetic aperture radar, SAR)通常被用來從事大尺度海洋科學研究。SAR 在大尺度、時變性低的海洋環境現場研究上具有相當高的優勢，然而由於衛星觀測同一區域之重現期(return period)太長，目前較難以達到作業化海況監測(monitring)之目標。自 60 年代開始，利用船用航海雷達進行波浪觀測之技術逐漸受到學界以及業界之重視。航海雷達原應用在近海障礙物監測，因此在航儀上的海面波浪回波被視為雜訊予以濾除。經研究發現，海水面之雷達回波隱含有海況資訊於其中，具有作為船上監測海況設備的潛力。將航海雷達設備安裝於岸邊(Young et al., 1985)，連續對同一海域進行監測，不但具「空間面」的觀測功能，還可取得連續時間系列波浪資料。除可解決觀測重現期之問題，又可免除海上作業的困難以及儀器流失的風險，為未來相當有潛力之測波工具。

由於利用航海雷達影像觀測海況的技術目前在國際學界間尚屬研究階段，仍有議題需要被討論與釐清。本研究的目標為探討其作為波浪與海流監測工具的可行性。為達成此目標，本文探討雷達訊號的擷取以及分析方法，藉以從雷達訊號中分析出波浪與海流等重要海況資訊，並討論觀測結果的準確性。

1. 國立成功大學 近海水文中心

2. 國立台灣海洋大學 海洋環境資訊系

3. 國立成功大學 海洋科技與事務研究所

## 貳、航海雷達測波之基本原理

雷達波射向海面會產生回波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。一般而言，海況愈惡劣之情況下，雷達波的反射效果會愈明顯。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之回波。

最早將雷達應用在海況觀測研究的為 Young et al.(1985)，該研究根據一連串的海面雷達影像來決定三維能譜，以分散關係式為一濾波原則，將雷達回波影像中的波浪訊號與雜訊進行分離，藉以從影像的波浪訊號中求取波浪資訊，這個方法至今仍被採用，並引導後續德國、挪威等國家之研究單位相繼投入作業化岸基雷達測波之研究(Neito et al., 2000)。

## 參、航海雷達觀測海象之流程

航海雷達觀測海象的作業流程如圖 1 所示，透過雷達天線接收海水面的電磁回波，利用雷達訊號擷取設備，將雷達原始訊號引出，再將其數化後，用電腦搭配所研發的雷達訊號分析軟體分析訊號中所含有的海象資訊，再搭配資料傳輸系統，將觀測結果由雷達架設地點即時傳輸回給遠端的資料使用者。

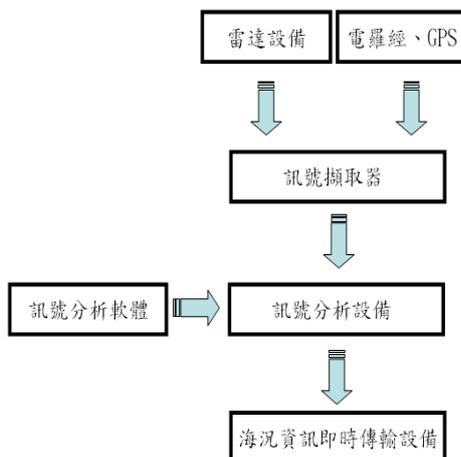


圖 1 雷達觀測海象系統作業流程

雷達之基本組成中的觸發電路每隔一段時間產生一作用時間很短之觸發脈衝送至發射機。發射機在觸發脈衝控制下產生一具有固定寬度之脈衝訊號，並將訊號送至雷達天線，天線再將脈衝之能量聚成束集中朝一方向，每隔一固定時間，就發射一次脈衝波。相鄰兩脈衝波發射時間之間隔，天線則接收脈衝波經由外在環境反射所得到之回波。電磁波之行進速率與光速相同，距離雷達愈遠處，其回波就會愈慢返回到雷達天線，也因此可藉由雷達訊號時序列中不同時間之變化計算出雷達回波的空間位置。

商用航海雷達種類繁多，不同規格雷達相對其特性會有所差異，理論上雷達天線轉速、功率、脈衝波發射頻率以及電磁波的水平與垂直射束角度都是影響雷達觀測波流能力的重要因素。雷達天線轉速愈快，代表雷達觀測的時間解析度愈佳，就愈能完整的描述波浪在時間域的變化特性；雷達功率愈強，相對能夠觀測的範圍也就愈大；電磁波的射束水平方向愈窄，則所獲得的雷達回波影像則愈精細。

由雷達回波訊號時序列中，如圖 2 所示，為雷達回波訊號(Video)的擷取結果。雷達的回波是構成雷達影像的關鍵。雷達每隔一段時間會發射一脈衝波，相鄰兩脈衝波之間即為觀測區域的回波訊號。圖 3 為雷達船艏向訊號(Heading)的擷取結果，雷達的船艏向訊號是決定雷達天線方位所需的重要資訊，雷達天線旋轉至船艏向時，訊號會產生一方波訊號。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。雷達回波訊號的擷取是透過高速取樣的資料擷取設備進行雷達訊號的數位化，取樣頻率( $S_r$ )決定了雷達影像徑向的空間解析度( $\Delta_r$ )：

$$\Delta_r = V_e / (2S_r) \quad (1)$$

上式中， $V_e$  為電磁波的行進速度。至於雷達影像側向的空間解析度( $\Delta_s$ )則受到雷達硬體規格的影响：

$$\Delta_s = \frac{1}{P \cdot T_r} \cdot (2\pi R) \quad (2)$$

上式中  $P$  為雷達的脈衝波發射頻率(Hz),  $T_r$  為雷達天線旋轉一圈所需時間(sec),  $R$  為雷達的觀測範圍, 亦即雷達的觀測半徑(m)。由於後續的影像譜分析方法是架構在卡氏座標的架構下, 利用座標轉換以及空間線性內插的方法, 將原始極座標的雷達影像轉換為卡式座標所建構出的影像矩陣, 如圖 4 所示。

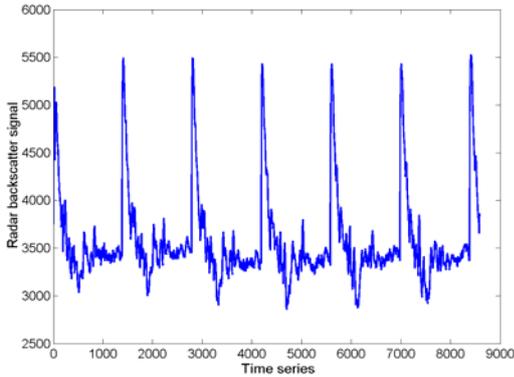


圖 2 原始雷達回波訊號(Video)時序列

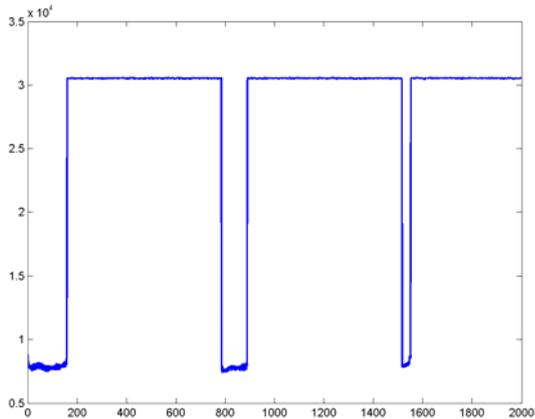


圖 3 原始雷達船艏向訊號(Heading)時序

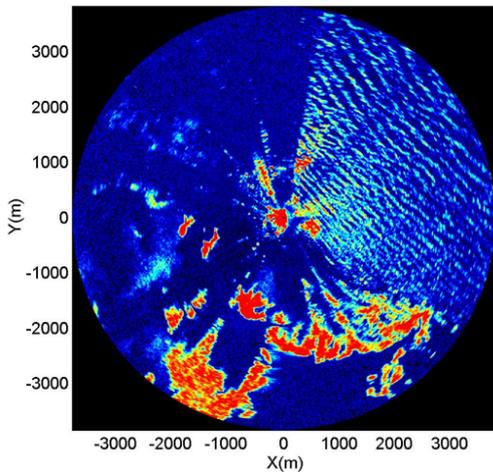


圖 4 組合雷達 Video 以及 Heading 訊號所獲得之雷達影像

## 肆、雷達影像分析程序之建立

海雷達影像具有描述空間海面變化之能力, 由於海面的相關資訊皆隱藏在影像灰度值矩陣中, 形同無數個單點觀測儀器同時進行觀測。雷達觀測所得之雷達影像當中雖含有波浪與海流資訊於其中, 但需要先經由適當的影像處理方法分析影像以求得波浪與海面流資訊, 關於雷達影像之分析程序如圖 5 所示。

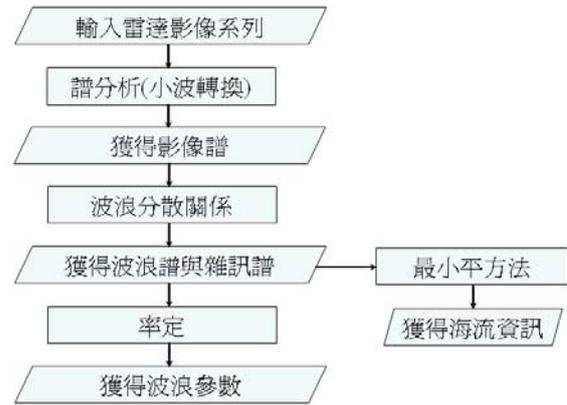


圖 5 雷達影像分析之程序

### 4.1 雷達影像譜分析方法之建立

在影像分析方面, Young et al.(1985)應用三維傅立葉轉換分析航海雷達所得之影像時序列  $f(\vec{x}, t)$ , 求得雷達影像序列譜; 並透過分析影像序列譜進一步求取觀測海域的波浪以及海流等參數。傅立葉轉換視波浪在空間上具有均勻性(homogeneity), 用一個空間上的平均結果表現整個波場之特性。在近岸海域受地形之影響, 波浪與海流都具有明顯的非均勻性(non-homogeneity)(吳等, 2005), 可透過其他的數學分析方法來突顯雷達應用在空間波場以及流場觀測之優勢。利用具有解析非均勻性訊號能力的小波轉換(Wavelet transform) 做為分析雷達影像系列之工具, 並可將小波轉換之分析結果轉換為不同時間以及空間域的能譜, 相關數學理論介紹如下:

考慮一時空合域之波流場共存之影像序列  $s(\vec{x}, t)$ , 其包含了時間與空間之訊號, 假設其數學關係之存在如式(3)所示, 則影像時序列  $s(\vec{x}, t)$  的傅立葉轉換可表示如式(4), 此即影像時序列訊號於傅立葉空間的表示式(莊等, 2007)。

$$\|s\|^2 = \iint |s(\bar{x}, t)|^2 d^2 \bar{x} dt < \infty \quad (3)$$

$$\hat{s}(\bar{k}, \omega) = (2\pi)^{-1.5} \iint s(\bar{x}, t) e^{-i(\bar{k} \cdot \bar{x} - \omega t)} d^2 \bar{x} dt \quad (4)$$

上式中  $\omega$  為角頻率； $\bar{k}$  為空間角頻率，其物理意義為空間訊號  $\bar{x}$  所對應之頻率域，於影像分析領域被稱為空間頻率，應用於波浪領域即為海浪的波數 (wavenumber)。影像時序列  $s(\bar{x}, t)$  的時空合域小波轉換則可表示如式(5)：

$$S(\bar{b}, \tau, \theta; a, c) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \langle \psi_{\bar{b}, \tau, \theta; a, c} | s(\bar{x}, t) \rangle \quad (5)$$

式(5)中  $C_\psi$  為小波函數的容許條件 (Antoine et al., 2004)。將式(5)展開可得：

$$S(\bar{b}, \tau, \theta; a, c) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \iint a^{-3/2} \times \psi^* \left( a^{-1} c^{-1/3} r_\theta (\bar{x} - \bar{b}), a^{-1} c^{2/3} (t - \tau) \right) s(\bar{x}, t) d^2 \bar{x} dt \quad (6)$$

其中  $\psi^*$  為小波母函數  $\psi$  的共軛複數； $\tau$  為小波函數於時間域 (time domain) 的位移因子，乃控制小波函數在被分析影像序列時間域的移動量； $\bar{b}$  與  $\tau$  的物理意義相似，為小波函數於空間域 (space domain) 的位移因子，乃控制小波函數在被分析影像序列空間域的移動量； $\theta$  為小波函數的旋轉因子，控制小波函數在空間域的旋轉，其與小波函數旋轉量  $r_\theta$  的數學關係如式(7)所示； $a$  為尺度因子，控制小波函數的尺寸，於訊號分析領域可用來分析訊號的頻率； $c$  為速度轉換因子，可偵測時空訊號中某一物件的移動速度。

$$r_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad 0 \leq \theta < 2\pi \quad (7)$$

式(5)的  $\psi_{\bar{b}, \tau, \theta; a, c}$  稱為小波函數或小波子函數， $\psi$  則被稱為小波母函數，兩者之間的關係如式(8)所示。

$$\psi_{\bar{b}, \tau, \theta; a, c}(\bar{x}, t) = a^{-3/2} \times \psi \left( a^{-1} c^{-1/3} r_\theta (\bar{x} - \bar{b}), a^{-1} c^{2/3} (t - \tau) \right) \quad (8)$$

從式(8)可看出，小波函數為不同  $\tau$ ,  $\bar{b}$ ,  $\theta$ ,  $a$ ,  $c$  等參數作用的小波母函數所衍生而來。小波轉換發展至今，許多不同類型的小波母函數已被提出，不同小波母函

數的特性及應用範圍皆不盡相同，其中 Morlet 小波母函數已被成功地應用於海洋訊號的分析，且其理論發展至今已趨成熟。又因其函數振盪型式與波浪訊號類似，適用於描述波浪在局部空間與局部時間的變化，故本研究中須進行之小波轉換皆採用 Morlet 小波母函數。三維 Morlet 小波母函數於時空域及其對應之頻率域 (小波母函數經傅立葉轉換後所得之函數，亦即小波母函數於傅立葉空間的表示式) 的表示式如式(9)與式(10)，

$$\psi(\bar{x}, t) = \left[ e^{i\bar{k}_0 \cdot A^{-1} \bar{x}} \cdot e^{-0.5|A^{-1} \bar{x}|^2} - e^{-0.5|A^{-1} \bar{x}|^2} \cdot e^{-0.5|\bar{k}_0|^2} \right] \times \left[ e^{i\omega t} \cdot e^{-0.5t^2} - e^{-0.5t^2} \cdot e^{-0.5\omega_0^2} \right] \quad (9)$$

$$\hat{\psi}(\bar{k}, \omega) = \left[ e^{-0.5|A\bar{k} - \bar{k}_0|^2} - e^{-0.5(|A\bar{k}|^2 + |\bar{k}_0|^2)} \right] \times \left[ e^{-0.5|\omega - \omega_0|^2} - e^{-0.5(\omega^2 + \omega_0^2)} \right] \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} \varepsilon^{-0.5} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中， $A$  為 usual anisotropy matrix， $\varepsilon \geq 1$ 。參數  $|\bar{k}_0|$  與  $\omega_0$  為小波母函數於傅立葉空間 (小波母函數經傅立葉轉換後所得之函數) 的中心位置，也控制著小波母函數的波形震盪程度。從式(9)及式(10)可看出，如果參數  $|\bar{k}_0|$  與  $\omega_0$  的值夠大的話，兩式括號內的第二項都會趨近於零，亦即上述兩式可簡化成式(12)與式(13)，



$$\psi(\bar{x}, t) = \left[ e^{i(\bar{k}_0 \cdot A^{-1} \bar{x})} \cdot e^{-0.5|A^{-1} \bar{x}|^2} \right] \cdot \left[ e^{i\omega_0 t} \cdot e^{-0.5t^2} \right] \quad (12)$$

$$\hat{\psi}(\bar{k}, \omega) = \left[ e^{-0.5|A\bar{k} - \bar{k}_0|^2} \right] \left[ e^{-0.5|\omega - \omega_0|^2} \right] \quad (13)$$

由於波場受流速及流向的影響產生了變形，致使在不同流速及流向條件下會造成不同的波場條件。利用小波轉換理論分析流場的原理即是透過解析波場的變形，從中反演出流速以及流向的資訊。為能有將出波場與流場分離出，需先掌握波場之特性。根據小波轉換的數學關係[式(8)]，小波母函數  $\hat{\psi}$  與小波函數  $\hat{\psi}_{\bar{b}, \tau, \theta; a, c}$  於傅立葉空間中存在如下之關係：

$$\hat{\psi}_{\bar{b}, \tau, \theta; a, c}(\bar{k}, \omega) = a^{3/2} \cdot \hat{\psi}(ac^{1/3} r_{-\theta} \bar{k}, ac^{-2/3} \omega) \cdot e^{-i(\bar{k} \cdot \bar{b} + \omega \tau)} \quad (14)$$

從上式得知，原先於波數域的  $\bar{k}_0$  會移動至  $\bar{k}_p$ ；原先於頻率域的  $\omega_0$  會移動至  $\omega_p$ ，其間的關係如下所示：

$$\bar{k}_p = \frac{\bar{k}_0}{ac^{1/3} r_{-\theta}} \quad (15)$$

$$\omega_p = \frac{\omega_0}{ac^{-2/3}} \quad (16)$$

透過上述式子，即可獲得小波轉換的尺度因子、速度因子與波浪角頻率  $\omega$ 、波數  $k$  之間的關係。由於雷達系統原始之功用為船隻導航，利用雷達系統進行觀測時，除了海面回波訊號之外，也會接受到其他在於大氣或是海上障礙物的雜訊。若雜訊過強，重要的訊號資訊將被遮蔽住。因此濾除雷達影像序列中的雜訊是獲得準確波浪參數的重要因素之一。為能有效濾除雷達系統所產生之雜訊，Neito et al.(1999)利用分散關係式(dispersion relationship)作為一濾波系統將背景雜訊濾除。海面波浪之運動可藉由分散關係式描述，如式(17)所示：

$$\omega = \sqrt{g|k| \tanh(|k|d)} + \bar{k} \bar{U} \quad (17)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (18)$$

其中  $d$  為水深， $\bar{U}$  為海表面流速。實際雷達影像分析所得波數與角頻率間之關係如圖 6 所示，圖中的曲線

為線性波理論所描述波數與角頻率  $\omega$  之間的關係。若影像譜之能量符合分散關係式之關係，則保留該能量。若影像譜中有能量不符合分散關係式之關係，則認定其為雜訊影響所造成的，將予以濾除。

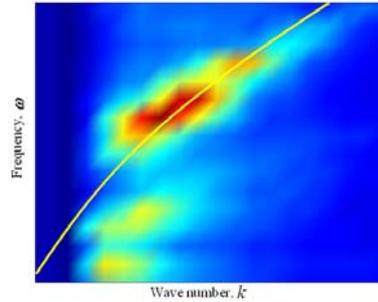


圖 6 分析波場影像所獲得角頻率與波數之間的關係

## 4.2 波浪譜分析程序之建立

經過上述濾波後之 3-D 影像譜  $S'(k_x, k_y, \omega)$ ，再對影像譜之角頻率積分以獲得觀測區域之二維影像譜 [式(19)]。

$$S'(k_x, k_y) = 2 \int_0^{\omega_c} S'(k_x, k_y, \omega) d\omega \quad (19)$$

由於雷達並非直接接觸海面作量測，雷達所得之資料為某範圍內雷達回波之強弱，並非實際海面水位之變化，因此分析雷達影像所獲得之影像譜並不直接等於實際海面之波譜，但兩者之間可互相轉換。Alpers(1982) 曾利用下式 Modulation Transfer Function(MTF)將影像譜轉換成實際海況之波數譜：

$$S(k_x, k_y) = k^{-\beta} \times S'(k_x, k_y) \quad (20)$$

上式中  $\beta$  為經驗係數，與雷達影像之成像機制有關。式(20)所得為波浪之波數譜與雷達影像譜之間的關係，而波浪波數譜與波浪方向波譜間可以利用式(21)~式(22)的關係式進行至轉換，其中  $\theta$  代表波浪之方向， $f$  代表波浪之頻率，為波浪週期之倒數。

$$S(k, \theta) = S(k_x, k_y) \cdot \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (21)$$

$$S(f, \theta) = S(k, \theta) (dk/df) \quad (22)$$

為了能獲得式(22)中的數學微分關係，可利用波

浪傳遞分散關係式(dispersion relationship)來計算式之：

$$\frac{dk}{df} = \frac{4\pi\sqrt{gk \tanh(kd)}}{[g \tanh(kd) + kgd \sec^2(kd)]} \quad (23)$$

經由以上步驟所獲得之方向波譜描述波浪能量在頻率域及傳遞方向上之分佈，經由波譜理論的計算，即可從中求得波長、週期、波向等波浪參數。

### 4.3 海面波高與流速計算方法之建立

由於上述所計算之波譜能量來自於電磁回波，並非直接從水面量測而得，因此不直接等同於波浪之能量。關於從雷達影像中計算波高的方法，可透過 Seemann et al. (1999)所提出觀測海域之有義波高( $H_s$ )與訊噪比的平方根(root of signal to noise ratio, RSNR)呈線性之關係，可以藉由此率定式來推求雷達影像的波高。至於海面流速的計算則可透過式(17)的分散關係式結合最小平方法的數值技巧從雷達影像譜中計算出流速以及流向。

## 伍、雷達測波系統之現場測試

為能瞭解雷達影像系列分析的可行性以及雷達系統觀測波流的準確度，本文於台灣南部鵝鑾鼻海域進行現場實驗。本研究於 2003 年 8 月之科羅旺(Krovanh)颱風期間，將雷達系統安裝於墾丁，與水利署之鵝鑾鼻資料浮標從事同步觀測。雷達系統的工作頻率約為 9 GHz，測試期間自 8 月 20 日至 24 日止，約有 120 筆數據。近岸海面雷達影像系列分析所獲得之波場結果如圖 7 所示，可看出明顯的波浪繞射現象，為一明顯的非均勻波場。雷達影像中不同區域所獲得波高結果之分佈範圍 2.7m~3.1m；波向的變化範圍  $12^\circ \sim 192^\circ$ 。為能瞭解雷達觀測波浪結果之準確性，本文利用現場鵝鑾鼻資料浮標同步測得的資料進行比對。鵝鑾鼻資料浮標距岸邊 3km (圖 7 之圓點處，座標： $21^\circ 54' 08'' N$ ,  $120^\circ 49' 22'' E$ )，水深 45m 處。本文選取浮標所在區域之波浪分析結果與浮標同步觀測結果進行比對(圖 8)，其 95%信賴區間可達 50 公分。

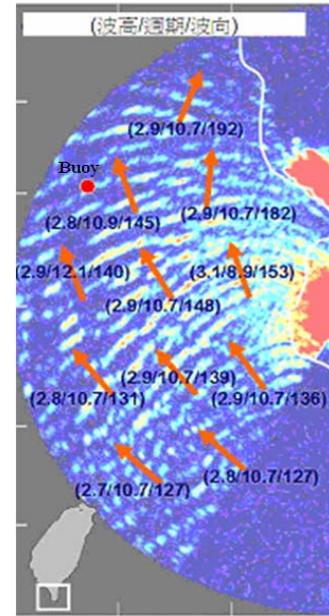


圖 7 雷達觀測所得之空間波場

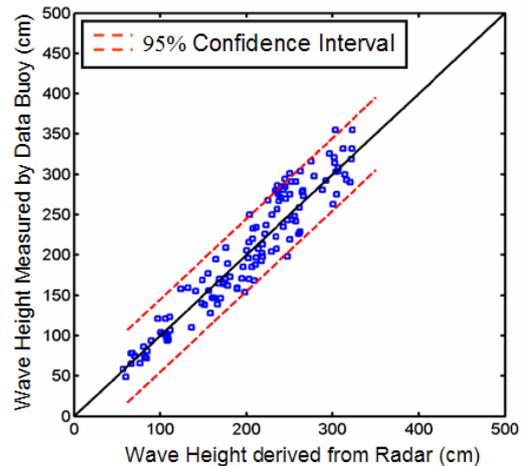


圖 8 雷達與浮標測得波高結果之比對

透過分析近岸海面雷達影像系列所獲得流場結果如圖 9 所示，流速及流向隨著觀測位置的不同而有明顯的變化。顯示出近岸海域流場確實存在明顯的非均勻性。為能瞭解航海雷達測流結果之準確性，本文曾透過 GPS 漂流浮標進行同步現場觀測，並將 GPS 浮標測流結果與雷達觀測結果進行比對。初步分析結果發現浮標與雷達測流結果之間的流速值差異在 15% 以內，波向的差異在 10 度之內。本文後續仍會進行更多的現場試驗及比對。透過更多的樣本資料比對與分析，更完整的掌握航海雷達監測海流之準確程度。

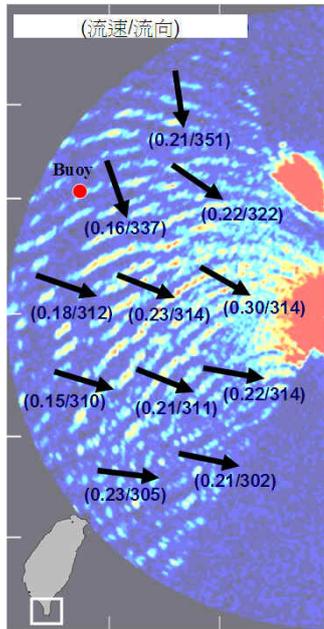


圖 9 雷達觀測所得之空間流場

## 陸、結 語

波浪與海流等自然環境之外力為影響近海禦潮防災工作的一大關鍵。本研究的目標為建立一套航海雷達監測波浪與海流之程序，透過實機測試，並與其他現場實測數據進行比對，探討航海雷達作為波浪與海流監測工具的可行性。

雷達影像的分析技巧上，以小波轉換為數學理論基礎，建構一套非均勻雷達影像系列的分析方法，能更準確且完整地表現近岸海域波浪以及海流在空間上的演變。現場實驗結果證明航海雷達海象觀測系統於海況觀測結果有一定之準確性，對於實際用於從事長期海象觀測作業有極大的發展潛力。

## 謝 誌

本文為經濟部水利署研究委辦計畫（MOEA / WRA / ST-930030）之研究成果，驗證資料之來源為水利署鵝鑾鼻資料浮標之觀測結果，特此感謝。

## 參考文獻

1 吳立中、董東璟、高家俊、曾鈞敏，2005，應用航海雷

達於空間波場觀測之研究，第二十七屆海洋工程研討會論文集，台中。

2 莊士賢、吳立中、董東璟、高家俊，2007，高維小波轉換應用於波場影像的波速與群波速分析之初探，第二十九屆海洋工程研討會論文集，台南。

3 Alpers, W., Hasselmann, K. (1982) Spectral Signal to Clutter and Thermal Noise Properties of Ocean Wave Imaging Synthetic Aperture Radars, *International Journal Remote Sensing* 3, 423–446.

4 Doong, D.J. (2002) Uncertainty Assessment of Wave Remote Sensing, PhD thesis, National Cheng Kung University, Tainan.

5 Nieto, J.C., Soares, C.G. (2000) Analysis of directional wave fields using X-band Navigation radar, *Coastal Engineering* 40, 375–391.

6 Nieto, J.-C., Reichert, K., Dittmer, J. (1999) Use of nautical radar as a wave monitoring instrument. *Coastal Engineering*, Vol. 37, pp. 331-342.

7 Seemann, J., C. M. Senet, H. Dankert, H. Hatten, and F. Ziemer (1999) Radar image sequence analysis of inhomogeneous water wave, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 3808, pp. 536-546.

8 Young, I.R., W. Rosenthal and F. Ziemer (1985) A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents, *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, pp. 1049–1059.