

航海雷達在觀測海洋波浪與流之開發

吳立中¹ 李汴軍² 高家俊³ 董東璟⁴ 郭純伶⁵

摘要

航海雷達是商業產品，通用使用來做為船隻導航目的。然而，航海雷達的回波中亦隱藏著海面特徵，透過高速回波訊號擷取技術與影像分析技巧，可以將商用雷達更新成海況觀測的設備，作為遙測海洋波浪與流的工具，降低直接到海上工作的風險性。國際上已有幾個類似的系統，本文所報告者為國內成功大學所自行發展之系統，其特色是影像解析度高且具有分析非均勻波場的功能。經由現場實測結果驗證發現，本文之雷達海象觀測系統具有正確之觀測結果。

一、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。就台灣地區而言，因為陸上資源有限，限制了經濟發展的規模與型式，促使了海上活動的蓬勃發展。由於位處亞熱帶區域，平均每年都有超過 3 個颱風侵襲臺灣，其所引發之風災、巨浪與暴潮，造成海上或岸邊結構物之破壞及沿岸居民生命財產嚴重的損失。波浪及海流等海洋環境外力是一個複雜的物理現象，至今在學理上仍無法全盤掌握其特性，往往還需要準確且即時的海況觀測資訊來確保海上活動的安全。

海況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。現場量測是將量測儀器放置於海水中，藉由量測海水的物理變化，來計算出波浪與海流等外力的特性。間接的遙測則是讓觀測儀器對目標物進行影像攝取或是以量測電磁波回波特性之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，獲得觀測目標物的特性。由於遙測並不需要將觀測儀器直接放置於海上進行量測，可避免儀器遭受到海洋環境外力的破壞，即使在惡劣的海況之中，遙測仍可提供寶貴的波浪資訊；此外遙測可針對觀測區域進行大範圍空間中的量測，可快速且廣泛的獲得海面波場資料，是近年

來學界所致力發展的觀測技術之一。

依據電磁波原理，微波僅能穿透海水數釐米，因此其散射或反射的電磁波可充分表現出海表面波浪的動態特性，若輔以海氣交互作用的機制，可以從雷達回波訊號計算波浪與海流(Gangeskar, 2002)等海氣象參數。遙測的儀器根據所使用的電磁波段不同，而有不同的觀測果效，Mattie & Harris(1978)曾利用各種頻率範圍的雷達波來觀測波浪，分析結果發現 X-Band 雷達適合用於波浪之觀測。Young(1985)從 X-Band 雷達影像計算出能譜，並與實測資料比較，結果顯示雷達系統和分析方法所產生的結果與傳統儀器的結果一致。

近幾十年來國際上研究早已證實雷達具有觀測海面特徵的能力，當前國際上已發展出商用的 X-Band 雷達觀測海象系統，如德國之 WaMoS 系統與挪威之 MIROS 系統，然而，其關鍵技術被視為商業機密而不公開，對於作業或研究上有特殊需求時難以解決，本文介紹由成功大學近海水文中心自民國八十九年開始研發的 X-Band 雷達海象觀測系統。

二、雷達觀測海象之系統硬體

X-Band 雷達觀測海象系統的硬體設備主要包含幾個部份，分別是雷達、訊號擷取單元、控制與分析單元，如圖 1 所示，因考慮到觀測系統應用在航行船隻時，須同步取得即時的船隻所在位置以及船首方向等資訊，可加裝 GPS 以及電羅經等設備。整個系統的觀測作業流程如圖 2 所示，透過雷達天線接收海表面的電磁回波，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

1 成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生

2 華梵大學環境與防災設計學系副教授

3 成功大學水利及海洋工程學系教授兼近海水文中心主任

4 成功大學近海水文中心博士後研究員

5 經濟部水利署水文技術組副工程師

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。

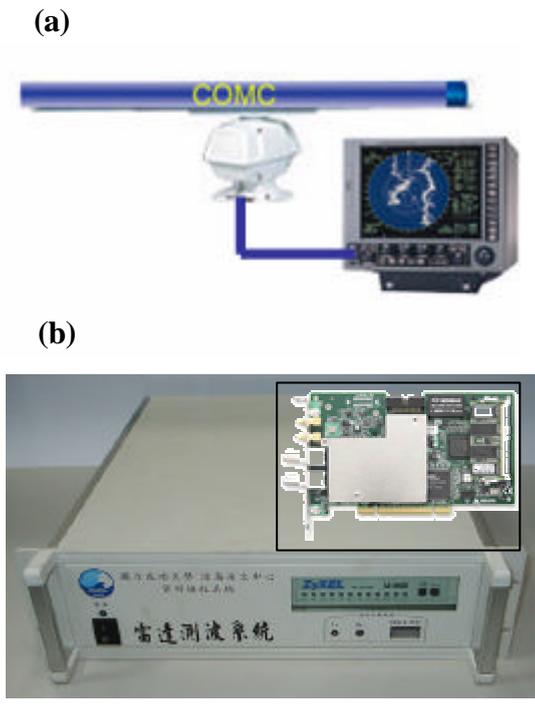


圖 1 雷達系統的組成

(a)X-Band 航海雷達(b)控制系統與影像擷取卡

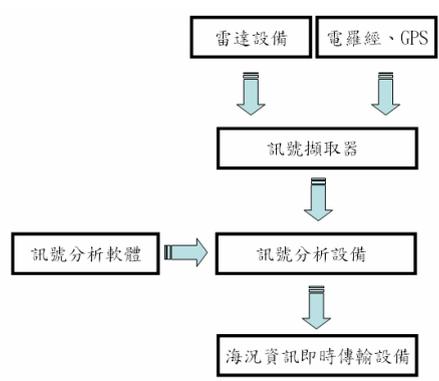


圖 2 雷達觀測海象系統作業流程

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為 3×10^8 m/sec，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測波能力的重要因素。理論上雷達天線轉速愈快，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；至於脈衝波發射頻率的選定，要看所測目標的距離遠近而定，若脈衝頻率過高，雷達所能觀測的距離就相對降低，但過低的脈衝重複頻率則會使雷達影像的側向解析力降低，也是不利的；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，一些常見的商用 X-band 雷達特性如表 1 所示，本研究採用日本 Furuno FR-8251 雷達為測試對象。

表 1 不同商用 X-band 雷達特性之比較

廠牌	型號	天線長度 (ft)	天線轉速 (R.P.M.)	功率 (KW)	脈衝波發射頻 率(Hz)	水平/垂直 射束角度(°)
FURUNO	FR-8251	6.0	36	25	600~2100	1.2/25
	FR-1510	6.0	36	12	600~3000	1.2/20
	FR-1525	8.0	24	25	600~3000	0.9/20
DECCA	Bridge Master E -180	6.0	28	10	785~1800	2.0/24
JRC	JMA-3810	6.0	24	10	500~2000	2.0/30

由雷達回波訊號時序中，如圖 3(a)所示，每一脈衝波代表著空間中雷達天線所指向的每一個方位。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(Δ_r)：

$$\Delta_r = \frac{V_e}{2 \cdot S_r} \quad (1)$$

上式中， V_e 為電磁波的行進速度。根據式(1)可推算出，使用取樣頻率為 20 MHz 的資料擷取卡擷取雷達訊號時，雷達影像之徑向的空間解析度為 7.5m/pixel。至於雷達影像側向的空間解析度(Δ_s)則受到雷達硬體規格之影響：

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

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)，若所使用之雷達脈衝波發射頻率為 2100 Hz，天線轉速為 36 R.P.M時，由上述之數學式可計算出雷達影像中距離雷達 3 km 處任一位置點之側向的空間解析度約為 5 m/pixel。由於後續的影像譜分析方法是架構在卡氏座標的架構下，本研究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成以卡式座標所建構出的影像矩陣，如圖 3(b)及 3(c)所示。本研究以不同的訊號取樣頻率擷取雷達訊號，再轉換成不同空間解析度的雷達影像於圖 4 所示。為了瞭解影像的空間解析度須多精細才適用於海象分析，本文分析不同空間解析度的雷達影像，再與觀測海域中的觀測樁的現場量測結果進行比對，結果如表 2 以及圖 5 所示，結果顯示，當訊號擷取卡速度低於 10MHz 時，雷達影像分析之波浪結果的誤差會偏大，於此獲得一個經驗知欲從雷達訊號分析波浪時，訊號擷取卡速度最好超過 10MHz。

表 2 不同影像空間解析度雷達影像之分析結果與現場結果之比較

AD 卡取樣頻率 (MHz)	空間解析度 (m/pixel)	平均分析誤差	
		波長(m)	波向(°)
2.5	60	222	228
5.0	30	245	44
10	15	24	16
20	7.5	7	8
60	2.5	8	8

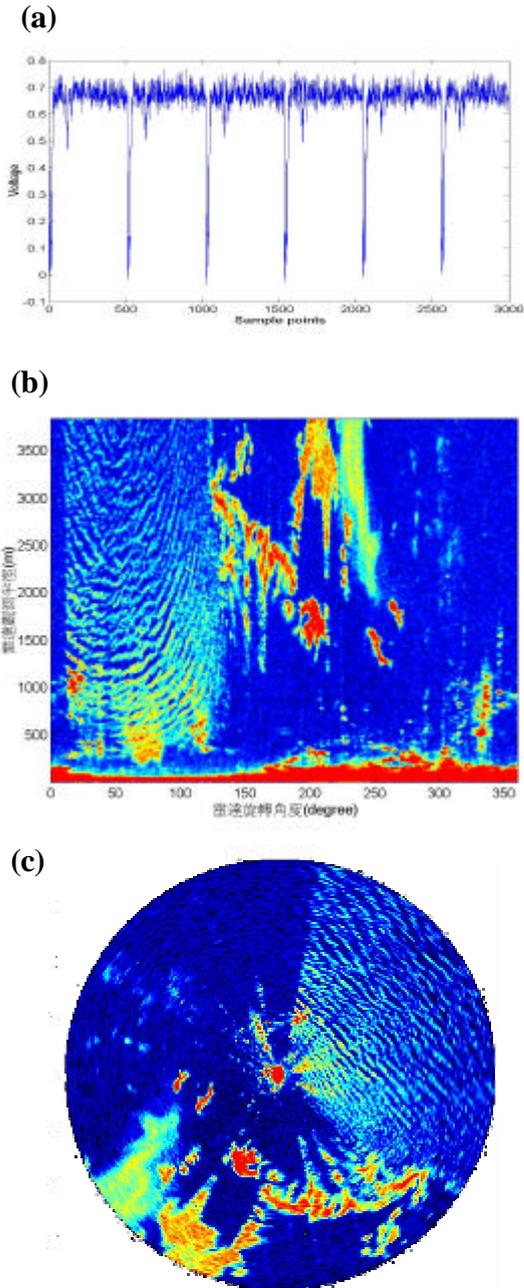


圖 3 雷達訊號轉換為空間影像過程。(a)原始回波訊號時序；(b)回波訊號所形成之影像(極座標系統)；(c)經座標轉換後所獲得的影像(卡氏座標系統)

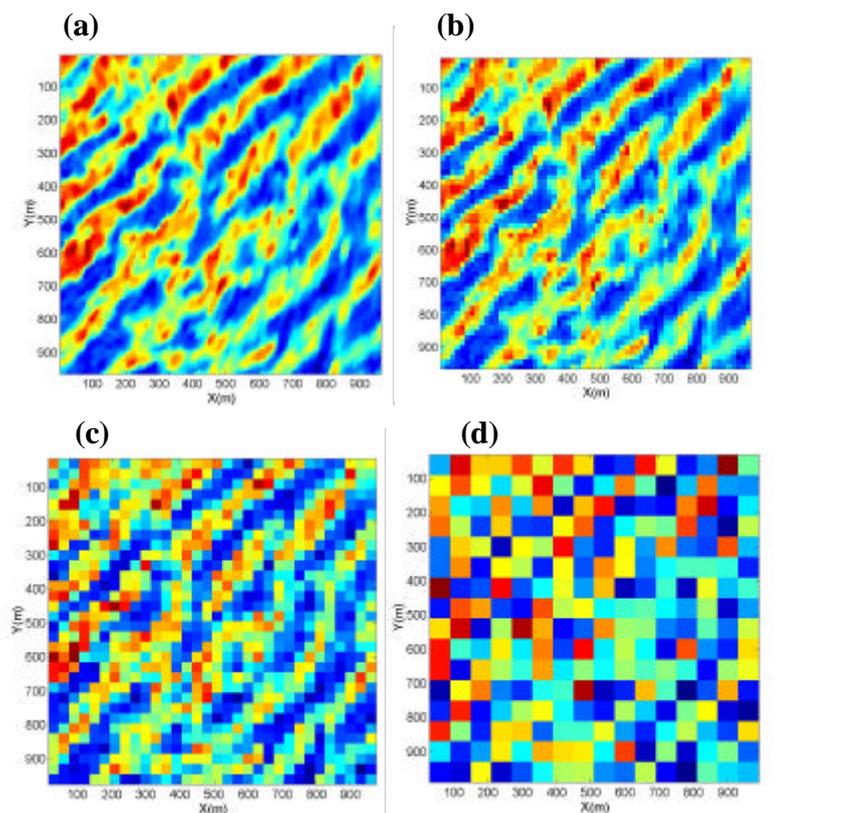


圖 4 不同頻率取樣所得到的雷達影像

- (a).取樣頻率 20 (MHz), 影像空間解析度 7.5 (m/pixel)
- (b).取樣頻率 10 (MHz), 影像空間解析度 15 (m/pixel)
- (c).取樣頻率 5 (MHz), 影像空間解析度 30 (m/pixel)
- (d).取樣頻率 2.5(MHz), 影像空間解析度 60 (m/pixel)

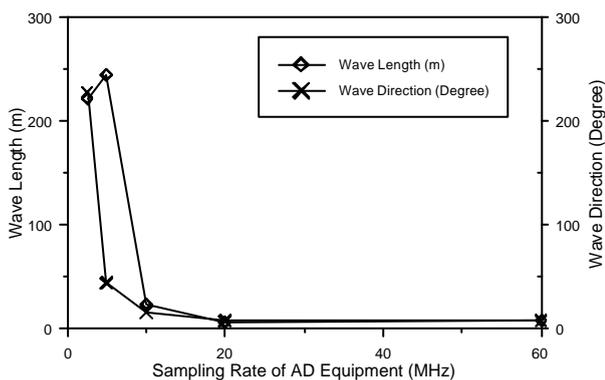


圖 5 不同影像空間解析度雷達影像之分析結果與現場結果

三、雷達影像分析理論

雷達海況技術相對於現場量測,具有描述海況於空間中變化之能力,由於海面的資訊隱藏在影像灰度

值矩陣中,形同無數個單點觀測儀器同時進行觀測,各自取得不同位置點之海況,對於描述非均勻海域之海況特性,是一種有利之工具。雷達影像雖含有海況資訊於其中,但需要先經由適當的影像處理方法分析影像以求得觀測區域的譜,再計算出波浪與海流等參數。

3-1 雷達影像序列的前處理

本研究使用 X-band 航海雷達進行觀測空間波場之研究,當電磁波的波長小於 4cm 時,電磁波不易穿透,由於 X-band 航海雷達的波長為 3.2cm,因而在雨天進行觀測時,雷達影像會出現斑點雜訊,當降雨強度大的情況下,海面回波影像幾乎會被雨水雜訊所覆蓋,而無法從影像中辨識出波浪的特性,如圖 6 所示,進而造成後續海象分析結果的誤差產生,因此在分析雷達影像序列之前,需要對降雨及未降雨的影像進行分類。

降雨影像在統計特性上主要有以下兩個特性：
 (一)、造成回波影像的回波強度增強，相對的平均回波強度也較未降雨時刻來的大；(二)、降雨會造成像元間的變動不規則，導致影像灰度值的變動範圍比未降雨影像像元值的變動範圍小。楊(2004)提出以影像灰度值的平均與差異係數作為判斷影像是否受到降雨雜訊影響的標準。雷達影像平均值、差異係數的分佈特性如圖 7 所示，可看出兩統計參數具有不同的分佈區域，依據雷達影像的統計參數在分佈上的差異，決定出門檻值(threshold)，作為判斷資料是否受到降雨的影響，分析結果證實同時以平均值與差異係數作判斷，可有效將降雨及非降雨的資料作區分，其準確度達 96%。

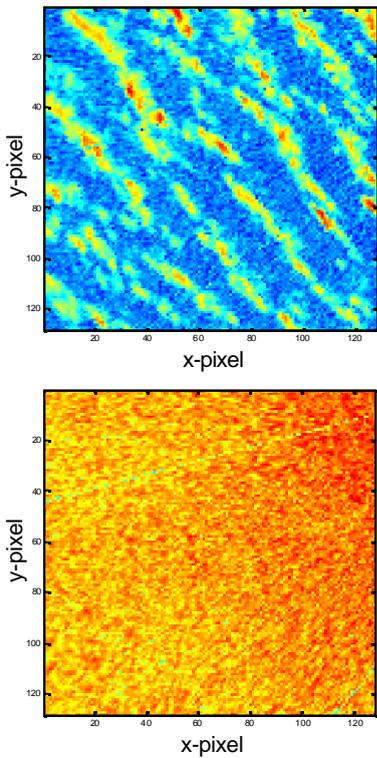


圖 6 未降雨(圖上)及降雨(圖下)時所測得知雷達影像

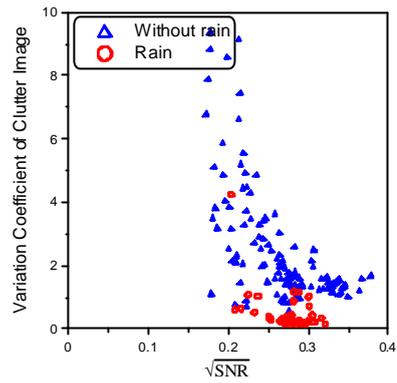
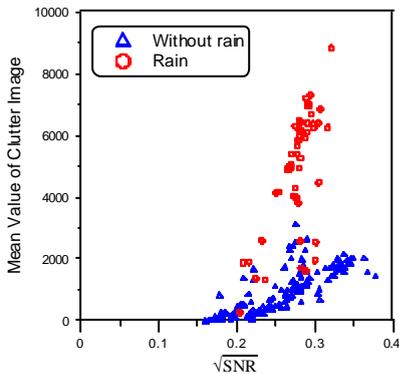


圖 7 未降雨及降雨影像的平均值(圖上)及差異係數(圖下)之分佈範圍

3-2 雷達影像譜分析

海浪中波長與波向等波浪資訊係經由波浪譜(wave spectrum)計算求得，波浪譜又可藉由雷達回波影像的影像譜(image spectrum)分析得到，因此如何正確計算影像譜是從事海況遙測重要的工作之一。目前常見分析影像譜的方法是利用快速傅立葉轉換求得影像時序的傅立葉係數，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。由於本研究觀測範圍位於近岸海域，大部分的波場在近岸區域因受到淺化的影響，具有較高的非均勻(non-homogeneous)特性，傅立葉分析可能導致偏大的誤差(Doong et al.,2003)。為了解析出非均勻波場的特性，吳(2002)、董(2002)與 Doong et al.(2003)均利用具有分析非均勻性訊號的小波轉換(Wavelet transform)為計算雷達影像譜之工具。小波轉換原理乃藉由不同尺度、位置與方向之小波母函數與被分析訊號進行積分計算，來求得影像時序 $f(\vec{z}) = f(t, x, y)$ 在不同時間域(t)與空間域(x, y)所對應之頻率特性，其數學表示式如式(3)所示。

$$S(a, \mathbf{q}, \bar{b}) = \iiint f(t, x, y) \cdot \mathbf{y}_{a, \mathbf{q}, \bar{b}}^*(t, x, y) dt dx dy \quad (3)$$

其中 t, x 以及 y 代表雷達影像序列的時間域及空間域。 $\mathbf{y}_{a, \mathbf{q}, \bar{b}}(\vec{z}) = \mathbf{y}_{a, \mathbf{q}, \bar{b}}(t, x, y)$ 稱為小波函數，為小波母函數 $[\mathbf{y}(\vec{z})]$ 經過尺度伸縮(a)、旋轉(\mathbf{q})以及位置移動(\bar{b})後所得到的函數， $\mathbf{y}_{a, \mathbf{q}, \bar{b}}^*$ 則為 $\mathbf{y}_{a, \mathbf{q}, \bar{b}}$ 的共軛複數。小波母函數與小波函數之間的關係定義如下：

$$y_{a,q,\bar{b}}(\bar{z}) = a^{-1.5} \cdot y[a^{-1}r_q^{-1}(\bar{z} - \bar{b})] \quad (4)$$

上式中 r_q^{-1} 為 r_q 的反矩陣， r_q 的定義如下：

$$r_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q & \sin q \\ 0 & -\sin q & \cos q \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(4)中的小波母函數 $[y(\bar{z})]$ 並非唯一，只要滿足式(6)的關係，便可成為小波母函數：

$$c_y = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{y}(\bar{s})|^2}{\bar{s}} d\bar{s} < \infty \quad (6)$$

其中 $\hat{y}(\bar{s})$ 小波母函數 $[y(\bar{z})]$ 在頻率域的關係，亦即小波母函數經傅立葉轉換後之結果。本研究則選用前人曾用來分析海浪訊號的 Morlet 小波母函數作為分析 X-band 雷達影像序列之用，其函數之數學式如下所示：

$$y(\bar{z}) = y(t, x, y) = e^{ik_0\bar{z}} e^{-\frac{1}{2}|A\bar{z}|^2} \quad (7)$$

$$\hat{y}(\bar{s}) = \hat{y}(w, k_x, k_y) = (\det B)^{0.5} \cdot e^{-0.5[(s-s^*)B(s-s^*)]} \quad (8)$$

其中矩陣 $A = \text{diag}[1, \mathbf{e}_1^{-0.5}, \mathbf{e}_2^{-0.5}]$ ，且 $\mathbf{e}_1 \geq 1$ 、

$\mathbf{e}_2 \geq 1$ ，矩陣 $B = A^{-1}$ ， \bar{k}_0 為小波母函數的波形震盪個數， s^* 為函數 $\hat{y}(\bar{s})$ 的質心位置。從式(3)中可發現小波轉換的分析結果並非直接就是影像譜，而是 a 、 q 以及 \bar{b} 等參數的分析結果。上述參數與影像譜之間存在一關係式：

$$\begin{bmatrix} w \\ k_x \\ k_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w^*/a_t \\ (k_x^* \cos q - k_y^* \sin q)/a_r \\ (k_x^* \sin q + k_y^* \cos q)/a_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式中， w 、 k_x 以及 k_y 為影像譜的定義域， w^* 、 k_x^* 以及 k_y^* 為 $\hat{y}(\bar{s})$ 於 w 、 k_x 以及 k_y 定義域的質心， a_t 及 a_r 分別為小波母函數於時間域以及空間域的尺度參數。

為瞭解本文方法是否適用於分析波場影像，本文以數值模擬影像序列進行三維小波轉換分析波場影像方法正確性的驗證。本研究模擬波浪受淺化影響之波場，如圖 8 所示，為時序列中某一時間點的空間波場，波浪從影像的 B 區域以起始波長=100(m)之條件往 A 區域傳遞，因受到波浪淺化之影響，A 區域波浪的波長會變短。本文首先利用傳統傅立葉轉換方法對整個波場進行分析，分析結果如圖 9 所示，描述整個波場於空間頻率域的平均值，其能量分佈(圖中黑色的區域)在波長分佈在 50~100(m)之間，確實與所模擬的波場條件符合，然而從此一結果並無法得知 A 區域的波長是 50(m)還是 100(m)。本文進一步用小波轉換分析相同的波場序列，小波轉換可針對整個波場的任一位置進行細部分析，本文選擇圖 8 波場影像的 A 區域及 B 區域進行分析，分析結果如圖 10 所示，顯示 A 區域及 B 區域可各別描述出波場影像中局部區域的波浪特性，突顯出小波轉換應用在分析如波浪淺化等非均勻波場影像的優勢。

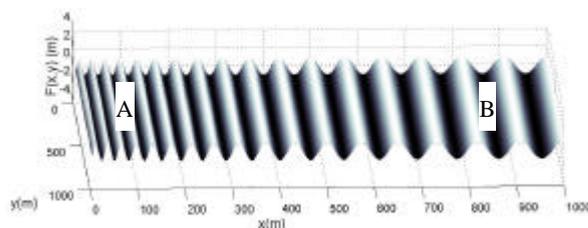


圖 8 本研究所模擬之波浪淺化之非均勻波場影像

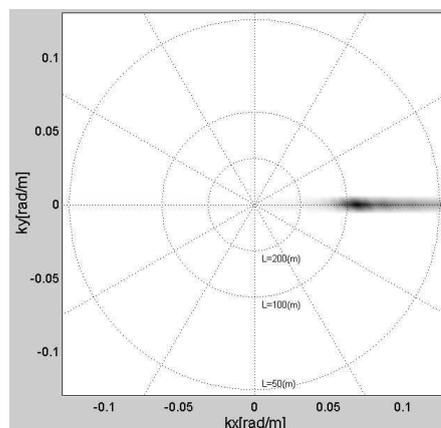


圖 9 利用傅立葉轉換分析非均勻波場之結果

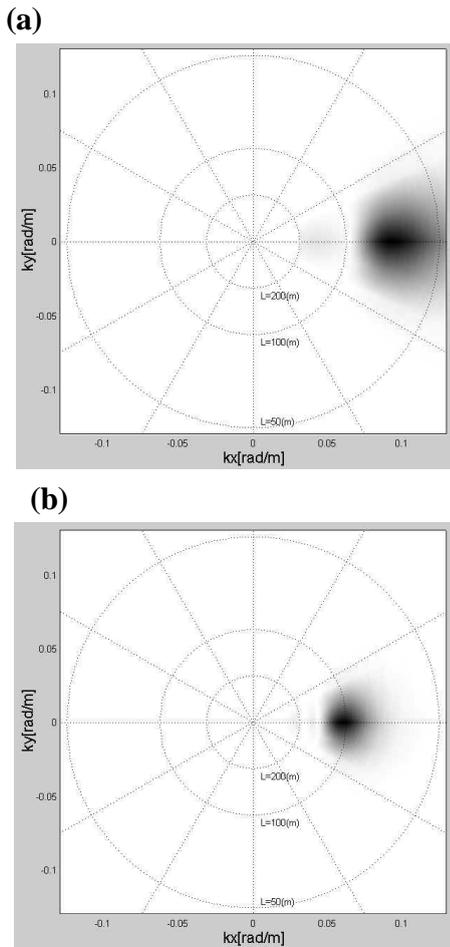


圖 10 利用小波轉換分析非均勻波場之結果。

- (a)小波轉換分析圖 7 中 A 區域的結果；
 (b)小波轉換分析圖 7 中 B 區域的結果

四、波浪與流場的計算

利用雷達影像序列計算海面流場,是應用了波浪理論中的分散關係式(Dispersion relation),其描述波浪運動時,波數與頻率應該遵守的規則,其數學式如式(10)所示,式中 d 為觀測海域之水深, \bar{U} 為表面之流場。圖 11 為實測雷達影像譜,描述實測波場中波數與頻率的關係,說明了在不同海面流速情況下,分散關係式描述之波浪波數(\bar{k})與角頻率(ω')之間的關係,因實測波場中有流速的存在,會受到都卜勒效應的影響,導致實測與理論的波數與頻率關係會有偏差,藉由實測與理論之間的偏差量,可反推出海面之流速。

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} + \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (10)$$

雷達影像譜包含波浪與雜訊能量,因為雷達影像譜描述雷達回波能量與波數、頻率之關係,當此關係式符合分散關係式所描述者,即視為波浪成份,反之則屬於雜訊。雷達回波包含波浪與背景雜訊,藉由此一方法,從影像譜濾除雜訊後,示性波高與雷達影像的訊噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)存在相關性, Borge et al.(1999)研究結果顯示 $H_s \propto \sqrt{SNR}$, 實際作業時,藉由雷達系統與資料浮標等系統進行同步觀測以率定兩者間之係數,爾後利用雷達影像之訊噪比即可計算浪高。

不同之波浪觀測方法均有其適用條件或應用上之限制,雷達測波技術也有其適用範圍或限制, Seemann et al. (1999)提出定性上的結論,由於測波雷達原理係接收海面粗糙反射之雷達波強弱來解析波浪,觀測海域之風速必須夠大、波高夠高且波浪週期夠長始滿足該觀測方法之條件。本研究認為在新觀測技術或方法推展之前,必須瞭解觀測結果之準確性。為能確切掌握 X-band 雷達觀測海象結果之特性,本研究以先後在龍洞、成功、鵝鑾鼻、東港、七股等海域利用 X-band 雷達進行海象之觀測。為了率定雷達測波系統,雷達架設地點都選擇鄰近有現場觀測站的位置,利用水利署、中央氣象局以及觀光局在雷達觀測海域所設置的現場測站所測得之海況資料作為真值(ground truth),與雷達測波結果進行率定以及驗證。

本文探討雷達測波之準確性,將同步觀測資料區分成波高大於 2 米與小於 2 米之資料集合,探討雷達測波在觀測大浪(波高大於 2 米)與小浪(波高小於 2 米)時之準確程度如何,本文以信賴區間範圍代表觀測成果之準確性,分析結果如圖 12 所示,其中 H_s 表示現場量測之波高, $CI95$ 表示波高分佈的 95% 信賴區間。從波高比對結果發現雷達測波所得之波高的準確性在 49~67 公分之間,平均約為 55 公分左右,其中在大浪時雷達測波誤差略大,約為 67 公分,對於 1~2 米間的小波,雷達測波之準確性約為 50 公分。

六、謝誌

本研究受國科會支持影像分析方法(NSC93-2611-E006-009)以及水利署提供現場測試資料,教育部成大與中山校際合作計劃支援雷達系統現場測試儀器,在此一併致謝。

七、參考文獻

1. 吳立中, 2002, 二維小波轉換應用於波場影像分析之研究, 國立成功大學碩士論文, 台南。
2. 董東璟, 2002, Uncertainty assessment of wave remote sensing, 國立成功大學博士論文, 台南。
3. 楊耀存, 2004, 氣象因子對航海雷達影像分析海面波浪之影響, 國立成功大學碩士論文, 台南。
4. Borge, J. C., K. Reichert and J. Dittmer 1999. Use of nautical radar as a wave monitoring instrument, *Coastal Engineering*, Vol. 37, pp. 331-342.
5. Doong, D.J., Wu, L.C., Kao, C.C., Chuang, Laurence Z.H., 2003, "Wavelet Spectrum Extracted from Coastal Marine Radar Images", *Proceedings of ISOPE 2003*, pp.258-264, Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30.
6. Doong, D.J., C.C. Kao, L.Z.H. Chuang, H.P. Lin. 2003. Nearshore Wave Field Analysis Using SAR Images, *China Ocean Engineering*, Vol.17, No.1, pp.45-60.
7. Gangeskar, R. 2002. Ocean current estimated from X-band radar sea surface images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 4, pp. 783-792.
8. Mattie, M.G. and D.L. Harris. 1978. The Use of Imaging Radar in Studying ocean waves, *Proc.16th Coastal Eng.*, ASCE, pp.174-189.
9. 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.
10. Young, I. R., W. Rosenthal, and F. Ziemer. 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.

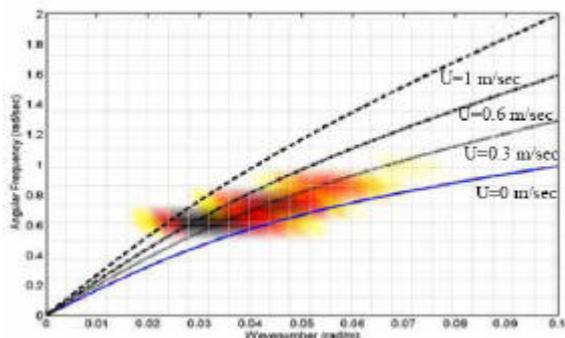


圖 11 雷達影像譜中波數(Wavenumber)-角頻率(Angular Frequency)之關係

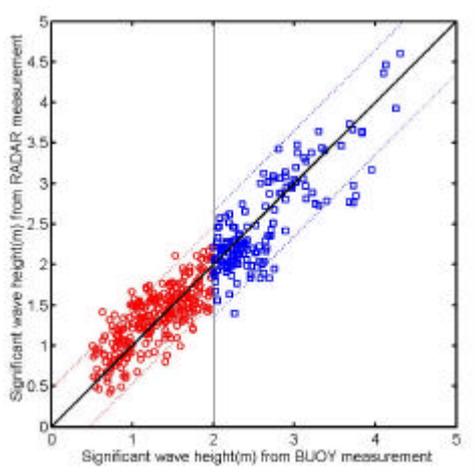


圖 12 雷達觀測波高與現場浪高之關係
(圓圈： $H_s < 2\text{m}$, $CI_{95} = 0.49\text{m}$ ；方塊： $H_s > 2\text{m}$, $CI_{95} = 0.67\text{m}$)

五、結論

從 X-Band 航海雷達回波擷取海況特徵的技術並不難,硬體的關鍵技術在於高速訊號的擷取,影像分析技巧上在於非均勻影像分析方法的建立,除此之外,只剩穩定性與經驗必須加強。國外售價昂貴的商業產品非但無法完全符合需求,維修成本亦高,國內自行發展的雷達海象觀測系統在觀測準確性上、經濟成本上、保養維修上均有一定的水準,甚至超過國外技術,如本文對於近岸非均勻影像的分析技巧與對於降雨影像的判釋與處理等均是引起國外感興趣的技術。國內在海氣象觀測的研發能力並不差,藉由掌握關鍵技術,建立自主技術能力,對於提昇我國在海洋觀測的科技水平是絕對有益處的。