

應用航海雷達於空間波場觀測之研究(2/3) -空間波流場之分析

吳立中¹ 董東璟² 高家俊³ 曾鈞敏⁴

摘要

海洋環境複雜多變，除了理論推演與模擬試驗外，觀測是研究海洋問題的重要方法之一。本文應用航海用 X-Band 雷達系統進行空間波場及流場觀測之研究，探討從雷達影像時序列中計算空間波流場的方法，並利用現場實測的波浪以及海流資料進行比對，藉以瞭解從雷達回波影像序列中計算空間波場及流場結果之準確度。計算雷達影像序列所得之波浪參數，與現場資料浮標之量測結果比對後發現兩結果之差異最大可達 9%，判斷造成差異的原因之一是因為資料浮標屬於單點量測，雷達則屬於空間中大範圍的觀測，在近岸海域的觀測結果容易受到海域非均勻性的影響，而與現場單點量測結果有較明顯之差異。利用雷達影像序列計算空間流場之結果與 GPS 漂流浮標的流速及流向量測結果比對後發現，兩者流速差異平均為 0.09m/sec，流向差異平均為 5.9 度。為能分析非均勻海域之空間波場以及流場特性，本文提出具有分析非均勻訊號的工具-小波轉換，作為分析雷達波場影像的工具，藉以研究近岸波場之非均勻特性。

WAVE AND CURRENT FIELDS EXTRACTED FROM MARINE RADAR IMAGES

Li-Chung Wu Dong-Jiing Doong Chia-Chuen Kao Chung-Min Tseng

ABSTRACT

Commercial Xband marine radar which original used for ship navigation purpose is now developed as a remote sensing technique for ocean wave and current measurements. This paper presents the coastal wave and current distribution extracted from marine radar image sequences. The spatial wave and current results from radar are verified by Data buoy and GPS drifting buoy. The result shows that the average difference between current measurement by radar and GPS drifting buoy is around 0.09 m/s. In addition, it is found that the properties of coastal wave and current are non-homogeneity. By this study, the idea of applying a non-homogeneous image spectrum analysis method to derive the spatial wave and current fields is essential.

一、緒論

隨著陸地資源的逐漸匱乏，海洋中所蘊含的豐富資源，已漸漸成為人類生存發展所需仰仗的重要憑藉。然而海洋所造成的災害亦不容輕忽，不論風

災、巨浪、暴潮，常常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。由於波浪及海流等海洋環境外力之特性是一種複雜的物理現象，為能全盤掌握海洋的特性，須要仰賴準確的海況觀測資訊。

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

1. 國立成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生
2. 國立成功大學近海水文中心博士後研究員
3. 國立成功大學水利及海洋工程學系教授
4. 經濟部水利署水文技術組科長

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影響，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。

近年來，雷達(Radar)遙測技術已漸漸被廣泛的應用在海況遙測的領域中，Young et al.(1985)曾利用三維傅立葉轉換分析 X-band 雷達所得之雷達子影像時序列，藉以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。此法適用於分析空間均勻性(homogeneous)海域的雷達影像。本研究所觀測之區域為近岸海域，由於近岸海域容易受到地形之影響，波浪特性可能具有較明顯的非均勻性(non-homogeneity)，若利用傅立葉轉換分析非均勻波場影像序列，是利用一個平均的結果來代表整個波場之特性，不一定能表現出整個非均勻波場中不同區域之間，海況特性的差異性，亦無法突顯出雷達應用在空間波場以及流場觀測之優勢。

本研究利用航海用 X-Band 雷達映像序列進行空間波場及流場分析之研究，研究從雷達影像序列中計算空間波流場的方法，並利用現場實測的波浪以及流場資料進行比對，藉以瞭解從雷達回波影像序列計算空間波場以及流場結果與現場浮標實測結果之差異以及適用性。

二、波浪與流場的計算

不論是從雷達影像序列中分析波浪或是海流的資訊，都必須先求出雷達影像序列譜。雷達影像序列譜包含波浪與雜訊能量，因為雷達影像序列譜描述雷達回波能量與波數(\bar{k})、角頻率(ω)之關係，當此關係式符合波浪理論的分散關係式(Dispersion relation)所描述者，即視為波浪訊號，反之則屬於雜訊。波浪理論的分散關係式描述波浪運動時，波浪波數與頻率應遵守的規則，如式(1)所示。

$$\omega = \sqrt{g\bar{k} \left[\tanh(\bar{k}d) + \bar{k} \cdot \bar{U} \right]} \quad (1)$$

式中 d 為觀測海域之水深， \bar{U} 為表面之流場。雷達回波包含波浪與背景雜訊，藉由此一方法，可從影像譜中分離波浪訊號及雜訊，進而求出雷達影像序列的訊噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)。Borge et al.(1999)研究顯示海面示性波高(H_s)與雷達影像的訊噪比存在相關性，其數學關係如式(2)所示。

$$H_s \propto \sqrt{\text{SNR}} \quad (2)$$

利用雷達影像序列計算海面流場，是透過計算雷達影像序列譜與分散關係式之間的關係來求得，圖 1 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(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，即可反推出海面之流速(Gangeskar,2002)，其數學關係如式(3)所示：

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum E k_x^2 & \sum E k_x k_y \\ \sum E k_x k_y & \sum E k_y^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum E \left(\omega - \sqrt{g\bar{k}} \right) k_x \\ \sum E \left(\omega - \sqrt{g\bar{k}} \right) k_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

上式中， U_x 及 U_y 為流速 \bar{U} 在 x 及 y 方向的分量， k_x 及 k_y 為波數 \bar{k} 在 x 及 y 方向的分量， E 為影像序列譜的能量。

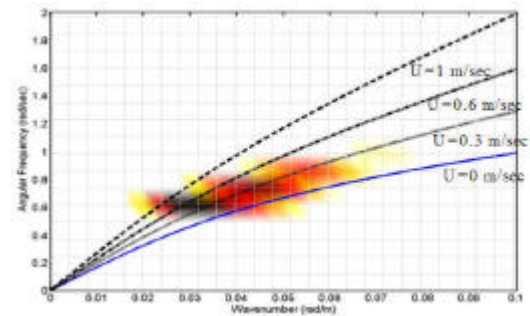


圖 1. 分散關係曲線與雷達影像序列譜之間的關係

三、波場及流場分析結果探討

3.1 觀測資料來源說明

為能瞭解利用雷達系統觀測波流的準確度，現場試驗是一重要的方法。本文於台灣鵝鑾鼻海域進

行現場試驗，試驗區域的地理位置如圖 2 所示，所使用之雷達系統是由國立成功大學近海水文中心所研發，該套系統除可架設於岸邊進行長期間作業化之海況觀測，亦成功改裝成移動式的系統，可依據試驗需求，迅速將系統移動至目的地進行觀測，如圖 3 所示。本文試驗之現場實測波浪資料為成功大學近海水文中心於鵝鑾鼻海域佈放的資料浮標(如圖 4 所示)所觀測得。鵝鑾鼻資料浮標距岸邊 3 公里，水深 45 公尺處，獲取該海域波浪以及氣象等觀測結果，藉由加掛 ADCP 可獲得浮標所在位置點之海流資訊。此外，如圖 5 所示的 GPS 漂流浮標被本文應用來量測大範圍的海表面流資訊，藉以瞭解雷達系統測流結果與現場實測整個空間域海流結果之差異。

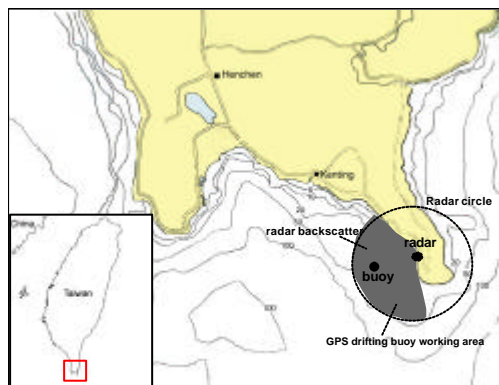


圖 2. 本文現場試驗之地理位置示意圖

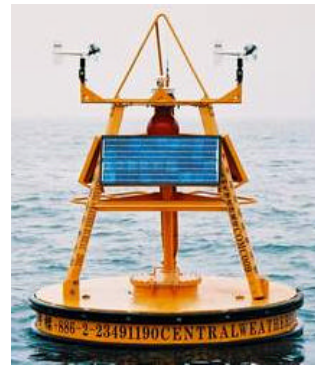


圖 4. 海氣象資料浮標



圖 5. GPS 漂流浮標



圖 3. 移動式雷達觀測系統

3.2 雷達影像波流資訊的分析結果

分析雷達影像所獲得的波浪以及海流結果與現場實測分析結果之差異如表 1 所示以及圖 6 所示。判斷造成雷達觀測結果與現場浮標量測結果之間差異的一個主要因為資料浮標量測是針對單一位置點進行海況之量測，雷達則是屬於大範圍空間「面」的觀測。理論上在近岸海域，易受到地形以及水深的影響，海域中的波浪及海流的變化會較深海更為急遽，導致在雷達觀測區域內的海況特性並非均勻無變化的，因此大範圍的雷達回波影像所分析出的單一波浪或海流結果有時並不能完全表現出整個近岸海域複雜多變的海況特性，進而導致浮標單點的海況分析結果與利用雷達觀測大範圍海域的海況結果之間有一定程度的差異。

表 1 雷達系統與資料浮標測流結果之比對

	雷達	浮標	誤差
波長(m)	171	185	14 (8.2%)
波向(°)	146	158	12 (8.2%)
波高(m)	2.91	3.24	0.33 (11.3%)
週期(sec)	10.3	11.2	0.9 (8.7%)
流速(m/s)	0.32	0.18	0.14 (44.0%)
流向(°)	321	340	19(5.9%)

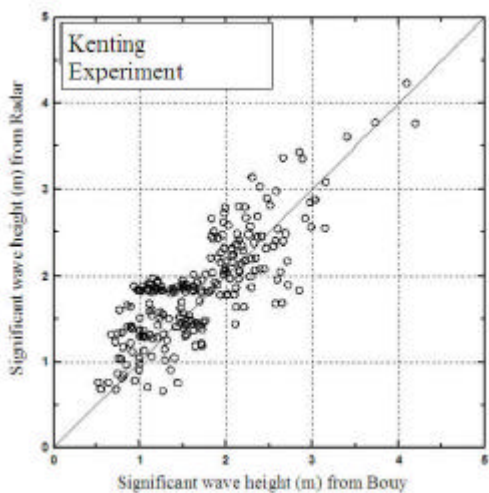


圖 6. 浮標與雷達測得波高結果之比對

為能瞭解從雷達影像序列計算所得波場以及流場在空間海域中的演變特性，本篇論文從原雷達影像中切選出較小區域的子影像序列進行計算，分析結果如圖 7 以及圖 8 所示，從空間波場的分析結果可看出明顯的波浪繞射現象，該影像為颱風侵台期間於台灣鵝鑾鼻海域所獲得之雷達影像。分析不同雷達子影像序列所獲得之波高分佈範圍為 2.7m ~ 3.1m；而波向的變化範圍為 127° ~ 192°。空間流場計算結果顯示，該海域的流場在空間中演變的範圍為 0.15m/s ~ 0.3 m/s，而相對應的流向變化範圍為 302° ~ 351°。由雷達影像計算所得的空間波場與流場分佈結果發現，本文分析案例屬一空間非均勻波場及流場之雷達影像，而同一時間利用浮標觀測所得觀測區域中浮標所在位置點之波高測值為 3.2m，週期為 11.2sec，流速為 0.21m/sec。案例分析結果顯示，利用雷達影像序列分析波流資訊時，須考慮到雷達影像非均勻性之影響。

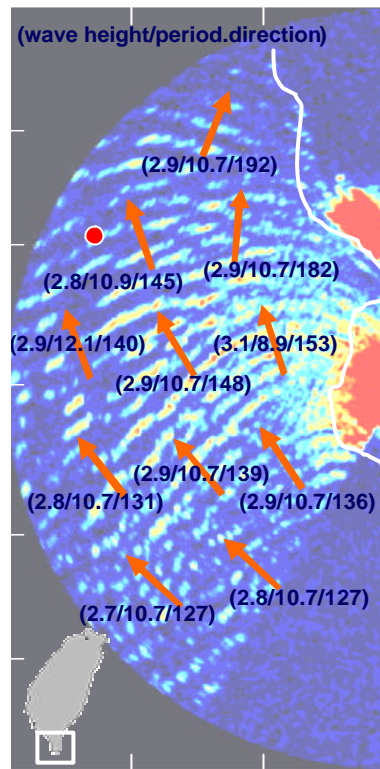


圖 7. 分析雷達影像所得之空間波場結果

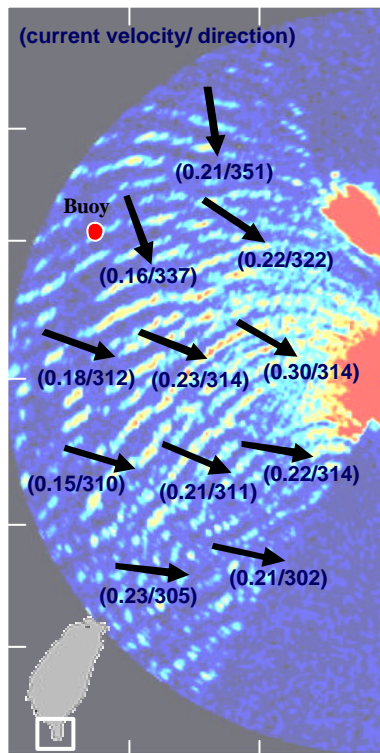


圖 8. 分析雷達影像所得之空間流場結果

為了驗證雷達影像分析空間流場的正確性，除利用資料浮標單點所測得之海流結果進行比對之外，本文亦應用 GPS 漂流浮標來量測大範圍空間域的海表面流場。GPS 漂流浮標是屬於 Lagrange 法測流的設備之一，其試驗範圍如圖 9 所示。藉由漂流浮標上所搭載的 GPS 紀錄漂流浮標受海表面流作用所移動的軌跡以及每一個為位置點的時間，再進一步計算出漂流浮標所在區域的流速及流向。

GPS 漂流浮標與雷達影像序列所計算得之空間流場比對結果如表 2 所示，兩種測流結果都顯示出近岸海域流場確實有明顯的非均勻性，流速及流向會隨著觀測位置的不同而有明顯的變化。此外兩種測流方法所得海表面流速的平均差異為 0.09 m/s，而海表面流速向的平均差異為 5.9°。

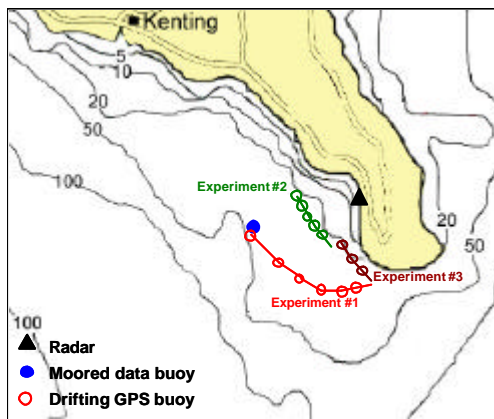


圖 9. GPS 漂流浮標觀測區域示意圖

表 2. 雷達系統與 GPS 漂流浮標測流結果之比對

實驗編號	流速	流向
	(雷達/浮標) 單位: m/s	(雷達/浮標) 單位: degree
#1	0.46 / 0.54	320 / 324
	0.42 / 0.48	315 / 311
	0.40 / 0.42	295 / 292
	0.36 / 0.34	280 / 278
#2	0.35 / 0.60	310 / 323
	0.35 / 0.63	312 / 314
#3	0.29 / 0.30	310 / 322
	0.35 / 0.35	310 / 317
平均值	0.09 m/s	5.9°

四、非均勻雷達影像譜之分析

雷達海況觀測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。

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序列的影像序列譜 (image sequences 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三維傅立葉轉換求得影像時序列的傅立葉係數，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，傅立葉分析可能會導致偏大的誤差 (Doong et al., 2003)。為了解析出非均勻波場的特性，Doong et al. (2003) 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，來求得影像時序列 $f(\vec{z}) = f(t, x, y)$ 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 (4) 所示。

$$S(a, \mathbf{q}, \vec{b}) = \iiint f(t, x, y) \cdot \mathbf{y}_{a, \mathbf{q}, \vec{b}}^*(t, x, y) dt dx dy \quad (4)$$

其中 t, x 以及 y 代表雷達影像序列的時間域及空間域。 $\mathbf{y}_{a, \mathbf{q}, \vec{b}}(\vec{z}) = \mathbf{y}_{a, \mathbf{q}, \vec{b}}(t, x, y)$ 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 (\vec{b}) 後所得到的函數。小波母函數與小波函數之間的關係定義如下：

$$\mathbf{y}_{a, \mathbf{q}, \vec{b}}(\vec{z}) = a^{-1.5} \cdot \mathbf{y}[a^{-1} r_{\mathbf{q}}^{-1}(\vec{z} - \vec{b})] \quad (5)$$

上式中 $r_{\mathbf{q}}^{-1}$ 為 $r_{\mathbf{q}}$ 的反矩陣， $r_{\mathbf{q}}$ 的定義如式 (6)：

$$r_{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \mathbf{q} & \sin \mathbf{q} \\ 0 & -\sin \mathbf{q} & \cos \mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(5)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 $\hat{y}(\bar{s})$ 為小波母函數 $[y(\bar{z})]$ 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(Chien et al., 2002)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：

$$y(\bar{z}) = y(t, x, y) = e^{i\bar{k}_0 \bar{z}} e^{-\frac{1}{2}|A\bar{z}|^2} \quad (7)$$

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

其中矩陣 $A = \text{diag}[1, e_1^{-0.5}, e_2^{-0.5}]$ ，且 $e_1 \geq 1$ 、 $e_2 \geq 1$ ，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(centroid)位置。從式(4)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式(9)之關係。

$$\begin{bmatrix} w \\ k_x \\ k_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w^*/a_t \\ (k_x^* \cos q - k_y^* \sin q)/a_r \\ (k_x^* \sin q + k_y^* \cos q)/a_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

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 10 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 11 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 10 波場影像的 A 區域及 B 區域進行分析，分析結果如圖 12 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。

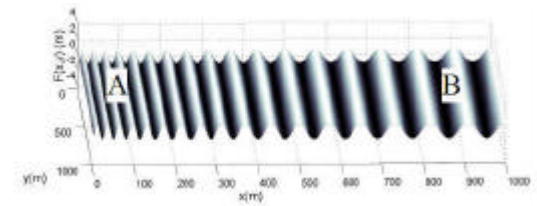


圖 10 本研究所模擬之波浪淺化之非均勻波場影像

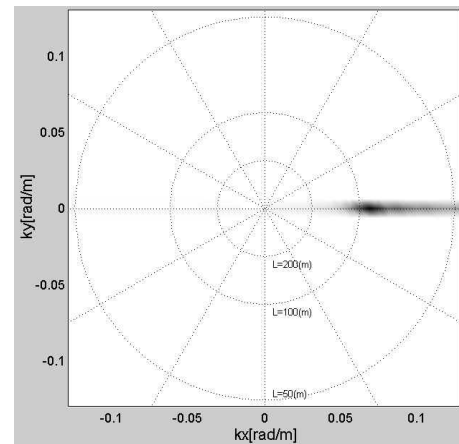
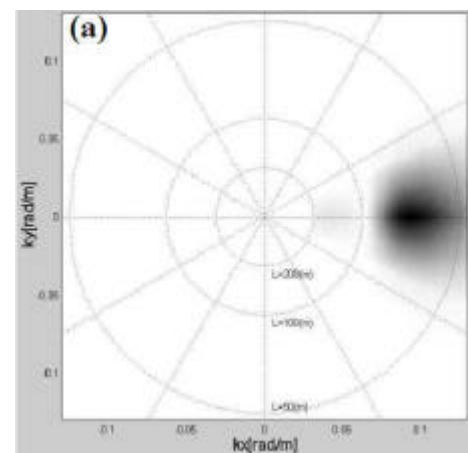


圖 11 利用傅立葉轉換分析非均勻波場之結果



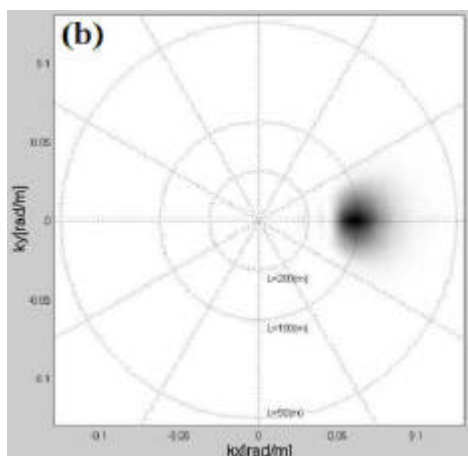


圖 12 本文利用小波轉換分析非均勻波場之結果。
(a)分析圖 10A 區結果；(b)分析圖 10B 區結果

五、結論

X-band 雷達目前已被應用在觀測空間波場以及流場的領域當中。以往雷達影像的分析方法是將雷達觀測區域視為一均勻波場及流場，將分析所得之平均的波浪及海流值用來表示整個海域的波浪及海流特性。為了驗證利用雷達系統觀測海況的準確性，本文利用現場資料浮標以及 GPS 漂流浮標所量測的波浪及海流結果進行比對分析。分析結果發現，利用均勻影像的分析方法來計算雷達影像中所隱含的海況資訊，明顯忽略掉波浪以及海表面流在空間中演變的特性，分析所得結果不一定能完整表現出雷達觀測海域的真實特性。

為能從雷達影像序列中計算出準確的海況資訊，本文提出利用小波轉換作為分析非均勻雷達影像的工具。經由利用模擬影像序列分析發現，小波轉換確實適用於分析非均勻影像序列。

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「應用航海雷達於空間波場觀測之研究(2/3)」(編號為 NSC 93-2611-E-006-009)之研究成果，承蒙國科會之贊助使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

1. Borge, J. C. Nieto, K Reichert and J. Dittmer (1999) "Use of nautical radar as a wave

monitoring instrument," *Coastal Engineering*, Vol. 37, No. 3-4, pp. 331-342

2. Chien, H., C.C. Kao and Z.H. Chuang (2002) "On the Characteristics of Observed Coastal Freak Waves," *Coastal Engineering Journal*, Vol. 44, No. 4, pp. 301-319.
3. Doong, D.J., L.C. Wu, C.C. Kao and Z.H. Chuang (2003) "Wavelet Spectrum Extracted from Coastal Marine Radar Images," Proceedings of ISOPE 2003, pp.258-264, Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30.
4. 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.
5. 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.
6. 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.