

# X-band 雷達影像應用於解析海面非均勻特徵之研究

吳立中<sup>1</sup> 莊士賢<sup>2</sup> 高家俊<sup>3</sup> 王仲豪<sup>4</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> 國立成功大學海洋科技與事務研究所助理教授

<sup>3</sup> 國立成功大學水利及海洋工程研究所教授

<sup>4</sup> 經濟部水利署水文技術組副工程司

## 摘要

波浪與海流為海洋環境的兩大作用力，且往往是同時存在並交互作用。於近岸海域又受到了地形之影響，致使海面波流場特徵更為複雜。考慮到近岸海域的波流場大多是非均勻的，有必要發展能夠解析非均勻海洋特徵的方法，藉以更合理的描述與討論各種海洋現象。本文目的為探討航海用 X-band 雷達影像之非均勻海面特徵。文中引入適當之海面影像演算法，藉以從中將非均勻海象資訊取出，再透過數值試驗以及實際 X-band 雷達觀測試驗的分析與討論，確認 X-band 雷達影像應用於研究海面非均勻特徵的可行性。

關鍵詞：雷達遙測、非均勻海象特徵

## Study of Inhomogeneous Sea Surface Features Using X-band Radar Images

Li-Chung Wu<sup>\*</sup> Laurence Zsu-Hsin Chuang Chia-Chuen Kao Jong-Hao Wang

<sup>\*</sup> 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 sea surface information, is a potential instrument for the measurement of inhomogeneous ocean environment features. This study tried to study different oceanic parameters from the inhomogeneous image sequences. The presented algorithms are developed based on the Fourier and inverse Fourier transforms. We apply both the numerical simulation and field X-band radar image sequences to test the algorithm and to discuss the inhomogeneous features from sea surface.

Keywords: Remote sensing; X-band radar; Inhomogeneous sea surface features

## 一、前言

對海洋及海岸工程設計、海域災害救援以及其他相關近岸海域活動而言，波浪與海流等海洋環境資訊缺一不可。然而受到海底以及陸域地形之影響，近岸波流等海洋特徵往往具有強烈的非均勻 (inhomogeneous) 特徵。換言之，空間海域內鄰近區域之間的海洋特徵可能會有明顯之差異。學理上，

波浪與流場受到非均勻地形之影響，這兩種海洋外力已呈現出明顯的非均勻特徵。再加上波浪與流場之間的相互作用，致使海域中的海象特徵更趨複雜，如此之現象對於海域環境資訊的解析將更為困難。遙測技術具有「廣景覽要」之特性，能對海面進行大範圍之觀測，透過對海域進行影像光學攝取或是以量測電磁回波特性之方式隔空偵測觀測區域之特性。利用所取得之影像，搭配適當的影像處理方

法，即能從中求取所需資訊，是獲取非均勻海洋環境資訊的極具潛力方法。

隨著海洋遙測技術持續的進步與發展，國內外許多學者開始投入海洋遙測影像的分析及其後續應用等研究議題。經研究顯示，從航海用 X-band 雷達回波資訊當中不但可偵測障礙物，還可從中獲取海況資訊。因航海雷達之觀測半徑超過 10km，對於近岸區域之波浪觀測已經足夠。針對 X-band 雷達影像的海面特徵分析方法，Young et al.(1985)於 1980 年代就提出利用三維傅立葉轉換分析連續的 X-band 雷達影像序列，藉以擷取海面波譜資訊，又因為海表面流的影響對波譜產生都卜勒偏移，可藉由偏移量反推求得海表面波浪與流場，開啓了從 X-band 雷達影像序列分析海面特徵的先河。Young et al.(1985)是利用最小二乘法的原理求取海面流速向量，Rune Gangeskar(2002)則嘗試在誤差平方和的計算法中，以頻率和波數所對應的能量值進行加權，再取最小的變數值可得最佳的流速向量，使分析方法更為完整。Senet et al.(2001)則研究發現雷達的觀測頻率會影響到流場計算的準確度，並嘗試透過蒙地卡羅的模擬方法討論如何改進流場觀測的準確度。在國內，台灣大學(王，1999)與港灣技術研究中心合作進行雷達系統之建置，為國內發展此一觀測技術之先驅。台灣海洋大學(尹等，2005)的研究團隊也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。高雄海洋科技大學團隊則針對 X-band 雷達監測油污技術進行過相關之研究與討論。上述之研究雖已證實 X-band 雷達應用於海洋領域之可行性與價值，但在波浪演化過程的條件下，特別是淺化過程或是非均勻波流交互作用場的特徵則仍有待更多的研究與討論。

本文將研究目的聚焦於利用 X-band 雷達研究海表面的非均勻海洋特徵。利用三維傅立葉轉換與二維逆傅立葉轉換作為非均勻影像分析理論基礎，解析 X-band 雷達所測得之海面遙測影像，從中研究非均勻波、流以及海域地形於海面影像中所呈現出的特徵。研究重點是透過現場雷達監測，並引入適當之影像分析方法，藉以從中研究非均勻海象特徵，再透過與數值試驗以及現場實驗之比較與討論，確認 X-band 雷達影像應用於研究海面非均勻特

徵的可行性。

## 二、理論分析

本研究所採用影像分析方法之核心為影像訊號的譜轉換以及其逆轉換過程。透過能譜分析，協助釐清能譜中不同能量密度所對應之波浪特徵。再引入線性波理論，從不同的波浪特徵反演出流場以及水深特徵。最後透過能譜的逆轉換，將上述分析結果轉換至空間域。相關分析理論詳述如下。

### 2.1 譜轉換理論

由於雷達觀測資料為包含時間以及空間資訊的海表面影像時序列，為了從三維度的雷達資料中取出波浪資訊，必須建立一套影像時序列的分析方法。本文藉由三維傅立葉轉換以及二維逆傅立葉轉換作為分析影像之基礎。因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，而波浪譜又可藉由回波影像的影像譜(image spectrum)分析得到，因此如何正確計算影像譜是從事波浪遙測重要的工作之一。本研究中影像譜的方法是利用三維快速傅立葉轉換求得影像時序列的傅立葉係數[式(1)]，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，其為雷達影像求取波浪特性的重要媒介。

$$S(k_x, k_y, \omega) = \iiint g(x, y, t) \times \exp[-i(k_x x + k_y y - \omega t)] dt dx dy \quad (1)$$

上式中  $g(x, y, t)$  代表雷達影像時序列函數， $k_x, k_y$  為雷達影像中成分波之波數(wavenumber)， $\omega$  為影像時序列之角頻率。如式(1)所示，雷達影像時序列經三維傅立葉轉換後所得到的影像序列譜結果包含有訊號的波數以及角頻率的資訊於其中。從海面雷達影像經傅立葉轉換後，固定某一角頻率條件後所輸出的二維影像波數譜。由於本文所討論的數位化影像的分析結果，因此影像波數譜所呈現的是離散之能量分布。將離散的能量點由大至小進行排序，並將其中較大的離散能量予以保留，剩餘能量微弱的部分以及不屬於波浪分散關係之部分將予以濾除。將上述經由濾波處理後的波數譜再透過二維逆傅立葉轉換：

$$I(x, y) = \iiint S(k_x, k_y) \times \exp[i(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y \quad (2)$$

影像譜經二維逆傅立葉轉換後將轉回空間域，即可獲得上述之譜能量於空間域之分布。透過上述的步驟，選取不同角頻率條件下的二維影像波數譜，再透過上述的方法重覆進行分析，藉以求取不同頻率條件的空間波場分布。然而由於雷達並非直接接觸海面作量測，雷達所得資料為某空間範圍內海表面雷達回波之強弱，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同於實際海面之波譜，但兩者之間可互相轉換。Borge et al.(2004)曾利用下式 Modulation Transfer Function(MTF)將影像譜  $S(k)$  轉換成實際海況之波數譜  $S'(k)$ ：

$$S(k) = k^{-\beta} \times S'(k) \quad (3)$$

上式中  $\beta$  為率定係數，可透過與現場觀測資料進行同步率定。透過上述之步驟以及數學關係，可求取出非均勻空間波場中不同區域的波浪特徵，進而掌握大範圍海域中不同區域的波浪特性。

## 2.2 海表面資訊之反演

本文透過波浪分散關係式計算流場與水深條件。透過式(4)的波浪分散關係式，可利用頻率  $\omega$  以及波數  $\bar{k}$  值解析出遙測影像區域的流場條件：

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} + \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (4)$$

上式中，可透過雷達影像時序序列中獲得角頻率  $\omega$  以及波數  $\bar{k}$  的資訊，然而上式中除了流場  $\bar{U}$  之外，還有一項未知數  $d$ ，亦即水深之條件。如圖 1 所示，為流速與水深條件對分散關係曲線的影響。從圖中可發現，流速對於波浪的影響主要位於高頻項(包含高角頻率項以及高波數項)的區域，因此可透過選取高頻區域的頻譜以及波數譜進行分析，藉以在水深條件未知的情況下求取流場資訊。此一方法是以最小二乘法為基礎，所獲得的方程式則可直接用來計算流速的  $x$  和  $y$  分量，再經方向轉換可以得到海面流的大小和方向。先假設在深水的條件下，有兩個曲線分別為式(5)以及(6)：

$$y_i : (\omega = \sqrt{gk})_i \quad (5)$$

$$\hat{y}_i : (\omega = \sqrt{gk} + k_x u_x + k_y u_y)_i \quad (6)$$

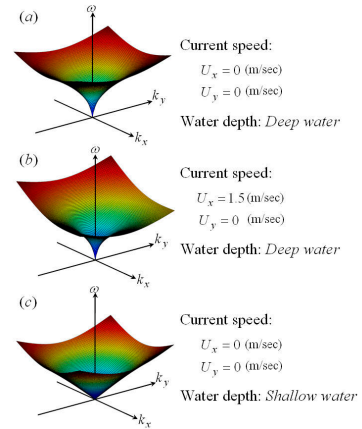


圖 1 海流與水深對波浪分散關係之影響

由於水深  $d$  以及流速  $\bar{U}$  對於波浪分散關係曲線的影響分別是在低頻帶以及高頻帶。因此在進行水深分析時，則針對分散關係式的低頻帶區域進行計算，藉以避開海面流對波浪分析曲線之影響，進而獲得準確的水深資訊。透過將雷達影像時序序列中選取低頻帶條件的角頻率  $\omega$  以及波數  $\bar{k}$  值，一同帶入式(4)中，藉以求得水深資訊。

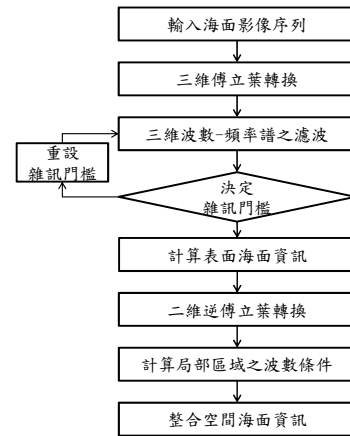


圖 2 演算分析流程

## 2.3 非均勻影像分析流程

本文以 Senet et al. (2008)以及 Flampouris et al. (2008)所提出的影像分析方法為基礎，發展非均勻 X-band 雷達影像解算技術。分析流程如圖 2 所示，首先針對波場影像序列進行三維傅立葉轉換，將波場影像訊號轉換至頻率域。針對分析波場影像所獲得之影像波數頻率譜進行濾波以及訊號處理(Senet et al., 2008)，將屬於波浪特徵的訊號與雜訊予以分離，並針對不同頻率條件解析波數譜內的波浪特

徵。透過引入波浪分散關係式解算濾波後的影像波數頻率譜，分別針對低頻以及高頻的波數頻率譜進行分析，求取對應之水深以及流場特徵。針對不同頻率條件波數譜解算後之結果再進行逆傅立葉轉換，藉以從中解析出不同波浪條件於空間中的分布特徵。最後整合所有分析結果，求取出空間域的海表面特徵。

### 三、模擬影像測試

為能確認上述理論與分析方法之可行性，本文透過模擬影像進行測試分析與檢討。透過分析模擬的海洋遙測影像(Goda, 1999; Goda, 2000; Horikawa, 1988; Tucker, 1991) 為一簡易且有效的方式。由於模擬的海表面影像可自行控制波浪、流場以及水深等條件複合影響下所產生的影響，有助於後續討論不同波浪海況以及底床地形條件下，應用理論的實用性與準確性。

根據上述之理論，本文模擬一不規則水深之波場影像，其相關起始件如下：有義波高=1 m，對應之平均週期=5 sec，起始波向=45 度。水深則為由影像北邊界起始水深條件為 20m，並由北往南水深線性變淺，至影像南邊界水深為 5m。波場的左半部受到流速=1.0 m/sec 由南向北之流場影響。影像之解析度模擬條件與後續所使用之雷達影像案例一致，影像空間解析度為 7.5m/pixel，影像序列之時間解析度為 1.4sec。從圖 3 的模擬結果可看出波場左半部因受到與波浪行進方向相反之流場影響，波長較右半部波場略短；波向產生折射；波能也略為提高。考慮到數值波場模擬時，模擬波浪傳遞至邊界後，可能會從另一邊的邊界再重覆出現的不合理現象，本文僅使用圖 3 虛線所框選的區域進行後端的波場影像分析工作。

從影像波數頻率譜的分析結果可發現到不同波浪特徵於波數頻率域所產生之能量。如圖 4 所示，為低角頻率條件之波數譜分析結果。可發現不同方向以及波數條件之能量密度分布於該波數譜內。這是非均勻空間波場中不同水深條件所造成的不同條件的波浪特徵。從圖 5 的高角頻率條件之波數譜分析結果則可發現，不同流速條件所造成的波浪能量特徵會呈現於波數譜之中。這是由於本研究所分析的波場為給定非均勻流速條件與波浪交互作用後所

產生的波場特徵，也因此能透過波數譜之中辨識出不同的海面流影響所產生的波浪特徵。

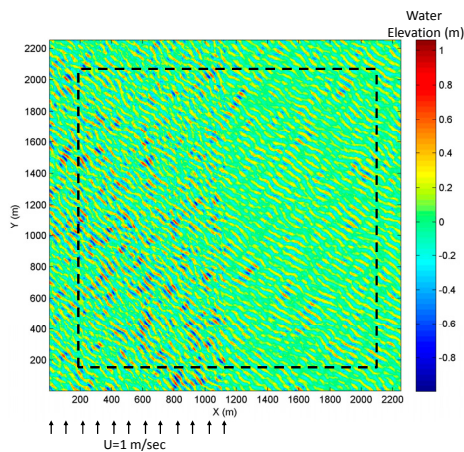


圖 3 本研究所模擬之波場

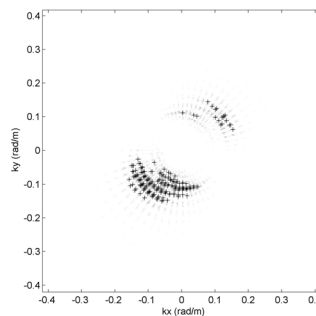


圖 4 低角頻率條件之波數譜分析結果

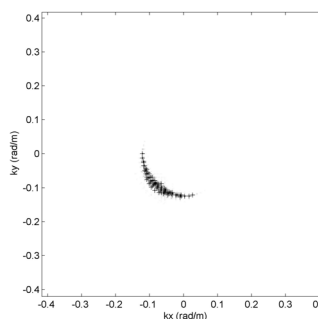


圖 5 高角頻率條件之波數譜分析結果

本文進一步根據波浪分散關係式進行流場之解算，藉以針對不同波浪特徵進行流場解算。針對不同流速解算結果之波數譜進行逆傅立葉轉換，求解不同流速條件之空間分布。如圖 6 以及圖 7 所示，分別為無流速條件以及流速=1m/sec 所演算之波場分布結果，顯示不同流速條件於波場內之空間分布

特徵。由於本文所使用的模擬案例為不規則波場，波場模擬過程已經有一定程度的隨機過程，因此分析結果的能量空間分布雖然趨勢與模擬條件符合，但仍有一定程度的誤差。從分析結果初步確認了利用此一方法分析非均勻波場內之流場條件的可行性。

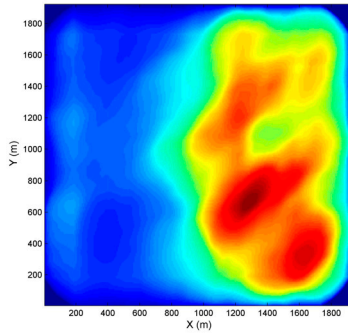


圖 6 無流速條件所演算之波場分布結果

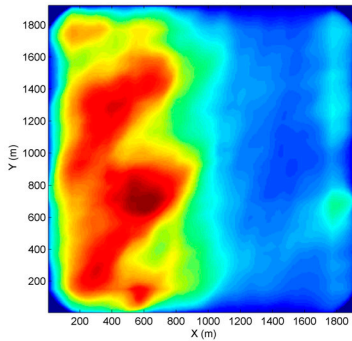


圖 7 流速=1m/sec 所演算之波場分布結果

#### 四、現場實驗佈置

為確認本文方法實際應用於現場分析的效果，本文透過經濟部水利署於台南七股海域的現場實測海面 X-band 雷達影像資料進行案例分析。雷達系統之佈置以及影像涵蓋範圍分別如圖 8 以及圖 9 所示。本研究使用 42r.p.m.之雷達天線(23° 6.7900' N, 120° 3.1378' E)，亦即雷達影像頻率(frame rate)為 0.7Hz，每次觀測使用 128 張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 20m，波場影像之觀測半徑則為 4.5km。

#### 五、雷達影像分析與討論

為了從三維度的海面回波影像資料中求取出所

需資訊，必須建立一套影像時序列的分析方法。本研究從所擷取的雷達影像中取出 256 pixel×256 pixel 的方形子影像，由於影像之空間解析度為 7.5m/pixel，因此實際子影像大小約為 1.9 km×1.9 km。

為能確認實際海面影像分析結果中，波浪於頻率域以及波數域之能量分布特徵，本文嘗試針對不同雷達實測影像序列案例進行分析與討論。為了能展示其能量分布特徵，本文選取出不同頻率條件所對應之波數譜。如圖 8 以及圖 9 所示，為其中一實測影像案例的高頻以及更高頻條件下之波數譜能量分布。從圖 8 以及圖 9 的結果可看出波譜的能量呈現對稱之現象，正頻與負頻帶皆分布有相等之能量。進一步分析能譜中更高頻帶的能量分布，如圖 8 以及圖 9 所示，可發現波數譜的能量分布已呈現規則之圓弧形狀。這與圖 1 的能譜理論一致，說明了透過海面影像序列訊號解析波浪特徵之可行性。

如圖 10 所示，則為從雷達影像中所解析出的非均勻海面流場分析結果，從分析結果可看出海域內不同位置點所計算獲得之流速與流向值雖然趨勢相近，但分析結果中不同位置所計算出的流速與流向值仍會有些許之不同，這應是空間域中流場的非均勻特徵所造成之影響。

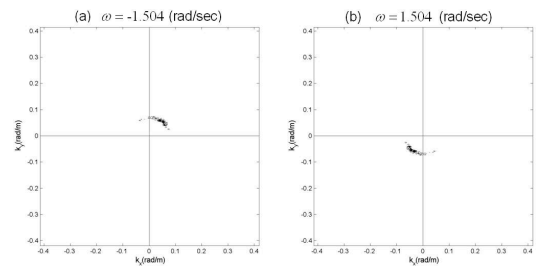


圖 8 高頻條件下之波數譜能量分布

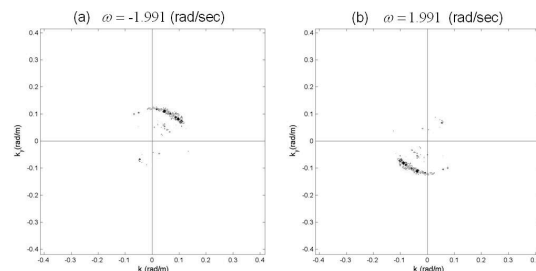


圖 9 更高頻條件下之波數譜能量分布



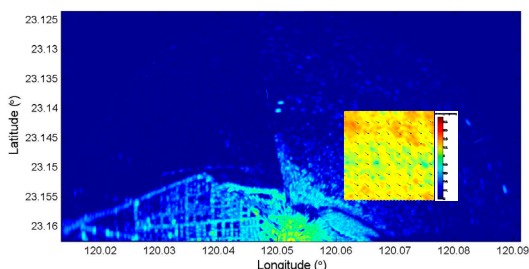


圖 10 非均勻海面流場之分析結果

## 六、結論

波浪與海流為海水面的兩大作用力，自然界的波場與流場往往是同時存在且交互作用。近年來隨著海洋科技的進步，吾人所能獲取的波流資訊已不再僅侷限於海面單一固定點的時序列資料。透過遙測技術能取得兼具空間與時間域的波場影像序列。隨著遙測影像分析技術之進步，透過時空合域影像解析出海面物理特徵的應用已逐漸被海洋界所重視。遙測中的 X-band 雷達技術目前已被國內外不同領域應用於波、流以及海域地形的觀測。然而利用 X-band 雷達影像進行這些參數之偵測屬於近年所持續被發展之新技術，許多之議題仍需被討論與驗證。

本文透過三維傅立葉轉換以及二維逆傅立葉轉換作為分析影像之基礎，從中引入波浪分散關係式，藉以解析海表面的非均勻特徵。為能確認整體研究方法的正確性以及實用性，本文透過數值模擬波場以及實際觀測試驗的比較與討論，確認演算法之果效。雖然透過不規則模擬波場以及雷達影像案例已初步確認此一影像分析技術的可行性，未來還有待更多的案例分析，已釐清影響影像分析果效的各種可能因子。

## 謝誌

承蒙國科會經費(編號 NSC 100-2221-E-006-020)之補助以及經濟部水利署提供雷達原始觀測資料，使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

## 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. 尹彰、翁文凱、周宗仁、林騰威、陳泰宏、邱永芳、何良勝(2005)「應用船用雷達影像分析波

浪資料」, 第 27 屆海洋工程研討會論文集。

3. Borge, J.C.N., Rodriguez, G.R., Hessner, K. and Gonzalez, P.I. (2004) "Inversion of marine radar images for surface wave analysis," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 21, pp. 1291-1300.
4. Flampouris, S., Ziemer, F. and Seemann, J. (2008) "Accuracy of bathymetric assessment by locally analyzing radar ocean wave imagery (February 2008)," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, pp. 2906-2913.
5. Goda, Y. (1999) "A Comparative review on the functional forms of directional wave spectrum," *Coastal Engineering Journal*, Vol. 41(1), pp. 1-20.
6. Goda, Y. (2000) *Random Seas and Design of Maritime Structures*, University of Tokyo press, Japan.
7. Horikawa, K. (1988) *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*, University of Tokyo press, Japan.
8. 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.
9. Senet, C.M., Seemann J. and Ziemer F. (2001) "The near-surface current velocity determined from image sequences of the sea surface," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, pp. 492-505.
10. Senet, C.M., Seemann, J., Flampouris, S. and Ziemer, F. (2008) "Determination of Bathymetric and current maps by the method DiSC based on the analysis of nautical X-Band radar image Sequences of the Sea Surface (November 2007)," *Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 8, pp. 2267-2279.
11. Tucker, M.J. (1991) *Waves in Ocean Engineering Measurement, Analysis, Interpretation*, Ellis Horwood Limited, England.