

時空合域影像於求取海面波流資訊之應用

吳立中¹、莊士賢²、許朝敏³、王仲豪⁴、高家俊⁵

摘要

海面連續影像序列(時空合域影像)提供了時間域以及空間域的海表面特徵資訊,是極具後續發展潛力的海洋環境資料。本文討論利用 X 波段雷達所測得之海面影像序列作為解析海表面特徵之可行性。透過適合的影像分析技術解析出海面波浪於頻率域之能量分布特徵,進而求取出波浪以及海面流場等資訊。本文進一步藉由台灣西南海域兩座 X 波段岸基雷達站所測得海面遙測影像資料的分析結果,確認了 X 波段雷達觀測技術以及影像分析方法應用於海面波浪及海流資訊求取之可行性。

一、前言

海洋遙測技術具有「廣景覽要」之特性,能對海面進行大範圍之觀測,是目前海洋學界所積極發展的技術之一。利用遙測設備所攝取之影像,搭配適當的影像處理方法,從中求取所需資訊,對於海洋環境資訊的獲得為一極具潛力的方法。現有海洋遙感探測的技術可區分為光學與微波兩種方式,兩者皆可獲得空間域中大範圍的海洋資訊。由於微波具不受日夜變化影響之優勢,有助於進行長期穩定的作業化觀測。依據電磁波原理,某些波段範圍的電磁波,如 X 波段(X-band),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水表面的動態特性。現有各種雷達觀測技術中,X 波段之岸基雷達影像具有可於近岸範圍進行高解析度連續觀測的能力,在電力正常之情況下,即可持續不間斷地觀測大範圍之海表面特徵,屬於一種兼具時間(一維度)與空間(二維度)特性的三維度觀測技術(圖 1)。

學界於 1960 年代起即已開始投入海洋三維度遙測影像的分析及其後續應用等研究議題。經研究顯示(Young, et al.,1985),從航海用 X 波段雷達回波資訊當中不但可偵測障礙物,還可從中獲取時空合域的海面特徵資訊。因航海雷達對海面特徵之有效觀測範圍可達數公里,對於近岸區域之觀測已經足夠。Young et al.(1985)提出了利用三維傅立葉轉換分析時空合域海面遙測影像,可擷取出海面波譜資訊,又因為海

表面流的影響對波譜產生都卜勒偏移(Doppler shift),可藉由偏移量反推求得海表面流場,開啟了從海面雷達影像序列求取波流場的先河。在國內,王(1999)協助港灣技術研究中心進行 X 波段岸基雷達遙測系統之建置,為國內發展此一觀測技術之先驅。尹等(2005)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。吳等(2003)以及莊等(2009)則提出了 X 波段雷達影像序列的分析方法,藉以探討時空合域海面遙測影像所存在的非定常特徵。

利用 X 波段雷達所測得之時空合域海面影像應用於波流場之觀測極具潛力,但仍有許多議題需要被驗證與檢討。本文探討利用時空合域海面遙測影像分析海象特徵之可行性,並透過現場試驗確認該技術應用於波流觀測之準確程度,期能作為後續海岸工程、海岸保護、海洋保育及海域管理等後端應用之基礎。

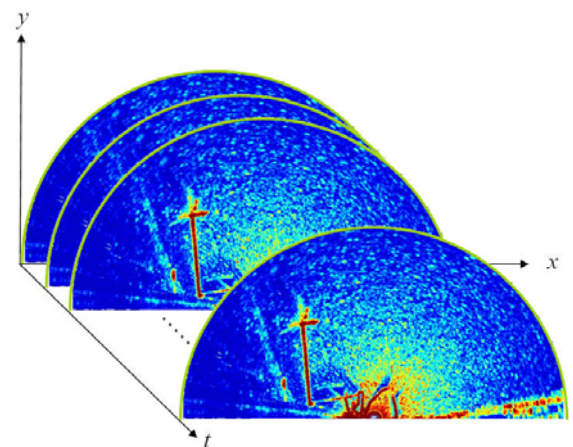


圖 1 時空合域海面雷達影像序列

- 1 國立成功大學近海水文中心專案助理研究員
- 2 國立成功大學海洋科技與事務研究所助理教授
- 3 財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心助理研究員
- 4 經濟部水利署副工程師
- 5 國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心主任

二、X 波段雷達觀測原理與硬體技術簡介

雷達天線設備中的觸發電路每隔一段固定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後，集中朝一方向發射出去。雷達波發射後，經由外在環境之影響會產生不同強度之回波，其中受到海水面影響產生回波的機制有兩種：當海面波浪之波形較陡時，會使雷達所發射之電磁波與波浪之間產生鏡面反射之效應；此外當雷達入射波長與海面波長呈現特定之比例關係時，雷達回波會較為強烈，此即布拉格散射(Bragg Scattering)之現象。由於電磁波之行進速率固定(以光速行進)，距離雷達愈遠處之回波就會愈慢返回到雷達天線，因此可藉由雷達訊號時序中不同時間之變化判斷出空間中不同位置之雷達回波強度。

上述為雷達作業以及電磁波成像之原理，然而為能達到海象觀測作業化之目標，還必須整合下列三項核心技術：

(i). 雷達硬體改裝技術

海象觀測所用之雷達設備與現有多數船艦所搭載之雷達設備相同，但這些商用雷達皆作為船艦導航用途。為能將其應用於海象觀測，有必要進行部分硬體之改裝以及功能之調整。

(ii). 高速訊號取樣技術

因 X 波段雷達所擷取的回波訊號為類比式(Analog)資料，不易分析與保存，必須透過資料擷取與數位化轉換技術以使回波訊號轉換為電腦可辨識、儲存以及分析的數位值。

(iii). 影像分析技術

時空合域影像分析技術是從雷達回波影像獲得海況資訊的核心，分析對象可囊括海面波浪與流場的資訊。此項技術為本文討論之重點，將於後節詳述之。

三、時空合域影像序列之分析方法

相對於現場量測(in-situ measurement)，時空合域影像序列具有描述海面特徵空間變化之能力。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，各自取得不同位置點之海洋特徵，對於描述非均勻海域之特性，是一項有

利之工具。海面回波影像當中雖含有波浪資訊於其中，但需要先經由適當的影像處理方法從中求得觀測區域之波浪值。

為了從三維度的海面回波影像資料中取出所需資訊，必須建立一套影像時序列的分析方法。因海浪中波長與波向等波浪資訊可經由波浪譜(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。影像譜的方法可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。

$$S(k_x, k_y, \omega) = \iiint g(x, y, t) e^{-i(k_x x + k_y y - \omega t)} dt dx dy \quad (1)$$

上式中 $S(k_x, k_y, \omega)$ 為影像譜， $g(x, y, t)$ 代表影像時序列函數，含有時間以及空間資訊於其中； k_x, k_y 為雷達影像中成分波之波數(wave number)； ω 為影像時序列之角頻率。如式(1)所示，影像時序列經三維傅立葉轉換(3-D Fourier transformation)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。關於影像中波浪資訊的求取，Borge et al.(1999)已針對 $S(k_x, k_y, \omega)$ 與波浪參數(波譜、波高、週期等)之間的關係進行詳盡之介紹與討論。由於雷達並非直接接觸海面作量測，透過雷達所得之 $g(x, y, t)$ 為觀測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同於實際海面之波譜，但兩者之間可互相轉換。Alpers(1983)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 $S'(k)$ ：

$$S(k) = k^{-\beta} \times S'(k) \quad (2)$$

上式中 β 為率定係數，可透過與現場觀測資料進行同步率定。時空合域影像經由上述轉換後，可獲得波浪於頻率域(frequency domain)以及波數域(wave number domain)的能量分布。此一能量分布已被前人推導出數學關係：

$$\omega = \sqrt{g|\bar{k}| \tanh\left(\frac{|\bar{k}|d}{4}\right) + \bar{k} \cdot \bar{U}} \quad (3)$$

上式為波浪之分散關係式，其中 d 為水深， \bar{U} 為流場。圖 2 描述了分散關係式中不同海洋參數間的關係，由圖中可看出波浪於頻率域以及波數域之能量會受到海面流場以及水深之影響。圖 2(a) 為深水且無海流影響的波浪分散關係，可看出其能量分布於 k_x 與 k_y 方向呈現對稱之分布。當波浪與海流之間交互作用的情況下，如圖 2(b) 所示，海流會影響波浪高頻之能量分布，若是單一方向的海流，將造成波浪於 k_x 與 k_y 方向的能量分布不對稱。至於水深的影響，乃是淺水條件下，海底床摩擦力對波浪能量的影響變得不可忽略。從圖 2(c) 可看出，水深會影響波浪低頻之能量分布。透過計算不同流速條件下的波數理論分布與雷達影像實際測得之波數譜能量分布，進行最小二乘法的分析，求取出與實際測得之波數譜能量分布最契合的波數理論分布以及其所對應的流速條件。

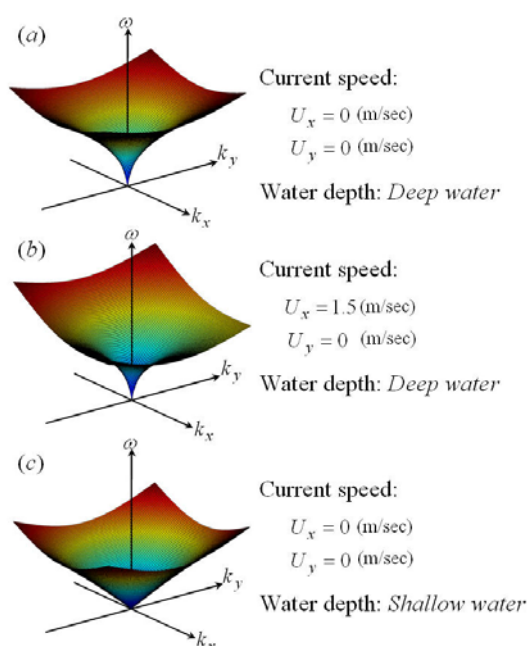


圖 2 海流與水深對波浪分散關係之影響

四、能譜能量分布特徵之討論

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。如式(1)所示，影像序列 $g(x, y, t)$ 經過譜轉換後所獲得之能譜 $S(k_x, k_y, \omega)$ 亦為三個維度。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 3 所示，為其中一實測影像案例的低頻條件下之波數譜能量分布，其波數譜之能量皆集中於較低波數的範圍，其能量分布隨機且不易看出其規律性。這是因為雷達影像序列訊號中含有低頻之雜訊於其中。從圖 3 的結果也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 4 以及圖 5 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 2 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。

由於實測影像資料為數位化的離散數據，因此影像波數譜所呈現的是離散之能量分布。圖 6 的影像波數譜中，將其中的離散能量予以保留，如圖中的三角符號(Δ)所示。再與不同流速條件的分散關係曲線進行比對，找出最符合波數譜能量分布的分散關係條件，進而推算出流場速度。以圖 6 之實測影像序列為例，圖中的較細的圓曲線描述了無流速條件的波浪分散關係；圖中較粗的圓曲線則描述了流速條件 $(U_x, U_y) = (-0.9, -0.5)$ m/sec 的波浪分散關係，其中 U_x 與 U_y 分別代表 x 方向以及 y 方向的流速條件。透過上述之分析方法即可求取出不同案例之海面流場特徵。

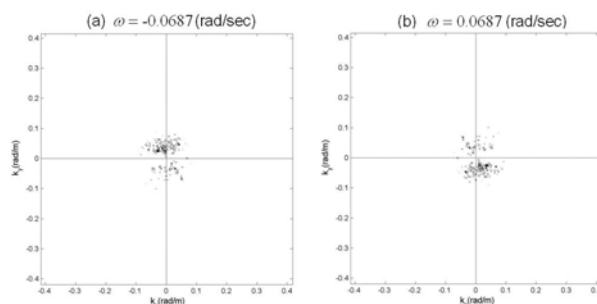


圖 3 低頻條件下之波數譜能量分布

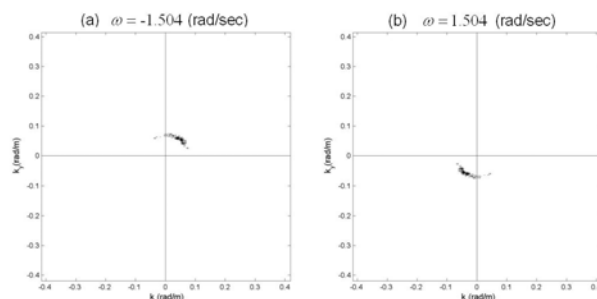


圖 4 高頻條件下之波數譜能量分布

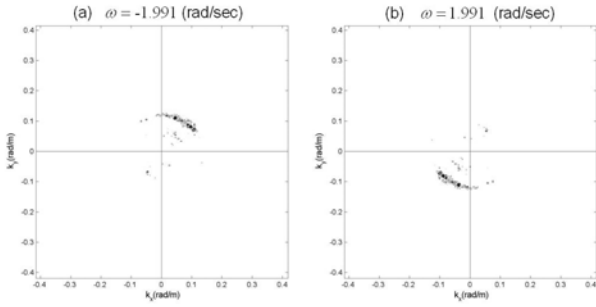


圖 5 更高頻條件下之波數譜能量分布

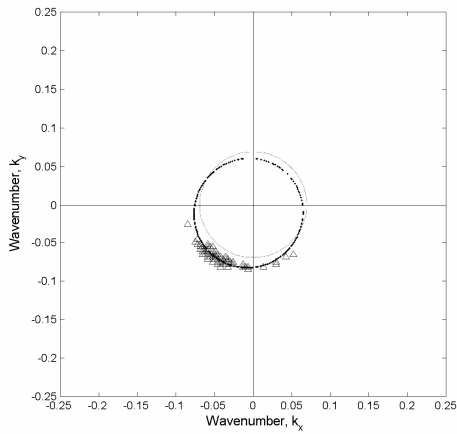


圖 6 譜能量分布與理論分散方程之關係

五、波浪與表面流之分析與討論

為確認 X 波段雷達影像分析波高之效果，本文透過海域的現場資料浮標(水利署所轄七股資料浮標)進行原始觀測資料比對。影像案例則分別來自於台南七股海域以及高雄興達海域的現場實測海面影像序列原始資料。測站地理位置以及觀測範圍如圖 7 所示。文中使用了 2010 年 12 月底到 2011 年 1 月初這段期間的同步觀測原始資料。如圖 8 所示，為兩雷達站與現場資料浮標實測示性波高之比對結果，顯示三種觀測結果之趨勢一致。七股雷達站與現場資料浮標測得波高之間的均方根誤差以及興達雷達站與現場資料浮標測得波高之間的均方根誤差均在約 0.3m 內。但七股雷達站與現場資料浮標之間的相關性(相關係數=0.85)略高於與興達雷達站(相關係數=0.82)的比對結果。由於現場資料浮標站與七股雷達站之地理位置較為接近，其測得波浪之相關係數較興達雷達站之測波結果高確屬合理。

除了波浪之外，因現場資料浮標加掛有剖面流速儀(ADCP)可與七股雷達站之表面海流觀測結果進行

比對。兩者之比對結果如圖 9 所示，分析結果顯示，兩者流速之差異平均值約 0.2m/sec。但在流速較低的條件下，兩者觀測結果之差異會較明顯。因 ADCP 加掛於現場資料浮標底層支架，其所測得之最接近表層之流速為水下約 3m 處之流速。相較於 ADCP，X 波段雷達影像分析所得之流速為實際表層海水面之流速。因量測水深的不同，是造成較低表面流速量測結果差異的其中一項原因。此外，本文所選用的案例為含有冬季東北季風期間之海面影像資料，其中的部分案例含有降雨期間的觀測結果。由於 X 波段之電磁波特性的特性，雨水會於影像中造成雜訊，進而影響分析結果。本文於雷達影像分析過程中雖已有進行過雜訊濾除之步驟，但於降雨過強烈之案例中，影像雜訊仍會影響分析結果之準確度。於分析過程中，並無刻意移除降雨期間之影像案例，這也會是影響某些案例分析結果準確度的原因之一。

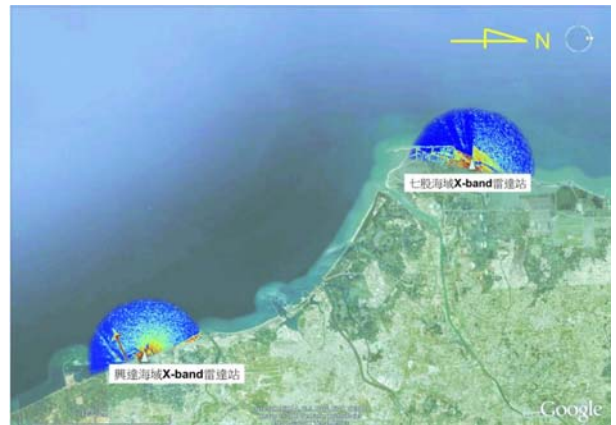


圖 7 X 波段雷達測站位置圖

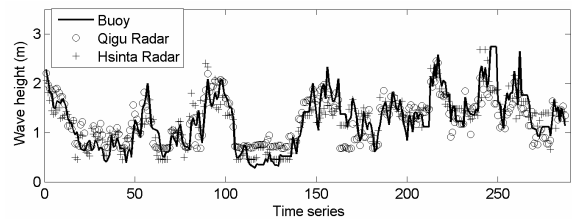


圖 8 波高計算結果

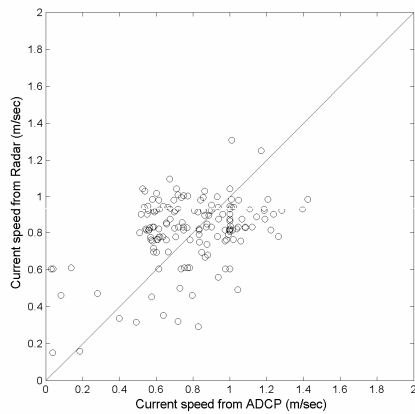


圖 9 七股海域流速計算結果

六、結 論

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。本文討論利用 X 波段岸基雷達測得之海面雷達影像序列資料，應用於波浪以及表面海流資訊求取的可能性。透過實測的時空合域遙測影像之譜分析，確認了海面波浪能量於頻率域的分布特徵及其與理論波浪分散關係式之間的關係。進一步透過與現場資料浮標同步觀測資料的比較，討論了海面影像資料作為波浪以及海流分析的準確度，進而確認了海面的時空合域影像應用於波流計算的可行性。

七、謝 誌

承蒙行政院國家科學委員會以及教育部補助發展雷達觀測技術，財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心以及經濟部水利署原始觀測資料提供，使本文得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

1. 王胄，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. 吳立中、董東璟、高家俊、莊士賢，2003，應用岸基測波雷達於方向波譜觀測之研究，第 25 屆海洋工程研討會論文集，海洋大學，基隆，第 251-257 頁。
3. 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。

4. 莊士賢、吳立中、董東璟、高家俊，2009，時空合域連續小波轉換應用於波流場影像分析—非均勻性波流作用場之解析，第 31 屆海洋工程研討會論文集，國立中興大學，台中，第 745~750 頁。
5. Alpers, W., 1983, Monte Carlo simulations for studying the relationship between ocean wave and synthetic aperture image spectra, J.G.R. 88, pp. 1745-1759.
6. Borge, J.C.N., Reichert, K., Dittmer, J., Use of nautical radar as a wave monitoring instrument, Coastal Engineering, Vol. 37, pp. 331-342.
7. Young, I.R., Rosenthal, W., Ziemer, F., 1985. A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents. J. Geophys. Res. 90, 1049-1059.