

連續小波轉換應用於遙測影像之分析— 海底地形之解析

吳立中¹ 莊士賢² 董東璟³ 高家俊⁴

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國立台灣海洋大學海洋環境資訊系助理教授

⁴國立成功大學水利及海洋工程研究所教授

摘要

近岸水深資訊是海洋科學研究的基石，也是船隻航行、海洋工程以及各種海上活動的重要依據。本研究嘗試利用具有分析非均勻訊號的高維連續小波轉換理論作為遙測影像的分析工具，從中求取影像波浪譜，再從影像波浪譜中反算出觀測區域的水深值。透過模擬與實際遙測影像分析結果以及分析理論本身之特性，本研究從中歸納出小波分析演算法應用於波場影像解析水深資訊之適用條件，並進而提出改進分析結果準確度的可行方法。

關鍵詞：小波轉換、海域水深、X-band 雷達影像

Continuous Wavelet Transform for Remote Sensing Image Analysis — Bathymetry Estimation

Li-Chung Wu^{*} Laurence Zsu-Hsin Chuang Dong-Jiing Doong Chia Chuen Kao

^{*} Project-Appointed Assistant Research Fellow, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

ABSTRACT

Bathymetry is the basis of oceanography, coastal engineering, and navigation. In addition to the sounding measurement, remote sensing is another way to obtain water depth information from broad coastal zones. The continuous wavelet transform is applied to analyze the remote sensed images in this study, so as to obtain more accurate and reasonable water depth. Simulated and also natural images were analyzed to test the algorithm and to present quantitative results of theoretical studies. Now we could evaluate the feasibility of continuous wavelet transform on analyzing the remote sensing wave image.

Keywords: Wavelet transform; Bathymetry; X-band radar images

一、前言

台灣四面環海，許多經濟活動發生在近岸海域，如航運貿易、魚撈養殖、離島工業等，海岸地區的土地也漸漸朝向高度利用與發展。然而台灣周圍附近暗礁星羅棋布，對於航行的船隻是一大威脅。船隻擱淺所造成的傷害往往並非只是單純船隻的損壞，其所造成海洋生態的影響，往往比船隻的

損失更為嚴重。掌握淺海區域的海底地形除可有效減少船隻航行災害，更有助於掌握波浪以及海流等重要海洋外力的特徵。因波浪傳遞至近岸後，底床地形之影響會導致波浪的變形與淺化，直至波浪破碎。除波浪外，近岸海域的海流也會受到地形的影響。受到水深的影響，台灣環海流況在各海域會有各種不同的變化。欲瞭解近岸海域的流況，掌握海域的地形變化為其先決條件。由於海底地形是影響

多種海洋外力的重要因子，當前學界所使用的波浪以及海洋數值模式中，海域水深地形檔的輸入為其數值模擬海洋參數所必備的步驟。欲改善數值方法推算波浪、水位以及流場之準確度，精準的水深資料是不可或缺的，尤其是近岸海域的水深資料直接影響模式於陸地邊界附近區域的計算。因近岸底床地形的資訊對於海洋工程乃至於海洋科學領域極為重要，水深量測技術的研發與改進一直是學界所致力發展的技術之一。目前常見的海洋地形調查設備多是透過聲波進行量測。出海現場量測水深的優勢為能獲取極為準確的水深資訊，可符合特定區域工程或是軍事之高精度且準確水深資訊的需求，然而海上作業所需花費的時間、人力以及物力極為龐大。此外，受到海岸漂砂與侵蝕的影響，海底地形並非永久恆定，再加上水下聲波傳遞易受到海水鹽度、溫度以及壓力的影響，觀測區域海水的物理參數都必須被精準掌握。為此，學界一直致力於發展不同的水深量測技術。

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，對於海水深度資訊獲得為一極具潛力的方法(Tucker and Pitt, 1991)。透過遙測設備，無須出海作業即能取得大範圍海域的水深資訊。若能將此一技術作業化，除能有效降低出海現場觀測的人力以及物力之成本，也能減少海洋外力對作業船隻所造成的風險。目前國際學界已發展出將航海 X-band 雷達架設於岸邊，對海面進行作業化觀測之方法。相較於現場出海作業之量測方式，移動式的雷達觀測方法能在極短的作業期間即能掌握台灣環海所有近岸海域的水深值，為一極具潛力的觀測方法(Young et al., 1985)。往昔的研究多將海洋遙測影像假設為均勻(homogeneous)的海面影像，並採用被分析影像為均勻性前提所發展出的方法進行譜轉換，其分析所得之影像譜實際上為整個遙測影像波數譜的平均值。然而自然界的訊號常存在有非均勻的特性，近岸海域的波浪亦不例外。為能從分析非均勻影像訊號中分析得到合理且準確的水深資訊，本研究引入非均勻訊號分析理論-小波轉換。研究目標聚焦於高維小波轉換理論應用在分析海洋遙測影像之研究，藉以從中計算出底床地形的資訊。透過小波轉換的非定常訊號的解析能力，可將整張遙測影像分解為不同的子影像，每一塊子影像區域的波

場理論上具有一定程度之均勻性，再進而從各子影像中求解水深值，藉以描繪出觀測海域的水深資訊。

二、理論介紹

遙測屬於間接觀測的技術，需搭配適當的影像處理以及分析技術才能將觀測區域的水深資料提取出。有研究(Leu et al., 1999)提出利用波譜水深法進行影像分析，利用該法求取水深的原理是透過海面遙測影像同時計算深水區以及淺水區域的影像波數譜。根據線性波理論，波浪由深水往淺水區域傳遞過程中，波浪之頻率 ω 恆定，而波數 k 因水深變化產生變形。進而透過分散關係式(考慮流場無明顯影響的頻帶)求取淺水區之水深 d ：

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (1)$$

上述之波譜水深法可較不受海水的水質影響，對於濁度較大海域之水深求取為一可行之方法。應用該法計算水深的前提為波浪傳遞至淺水的過程中，其頻率 ω 恆定不變。不同水深條件下，頻率 ω 以及波數 k 之間的關係如圖 1 所示。

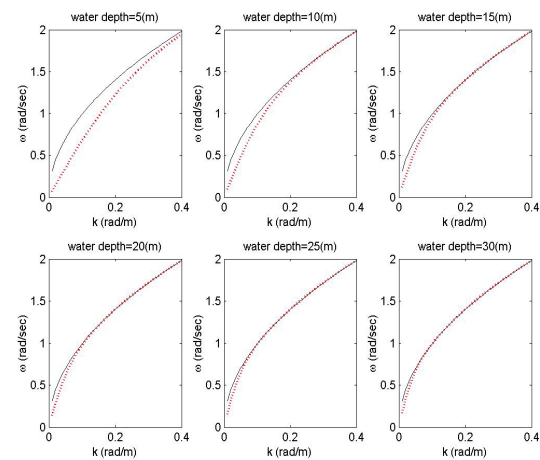


圖 1 水深值對分散關係曲線的影響

從上述的分析方法可發現，此法計算水深的關鍵在於準確的波數以及頻率資訊，而這些資訊可透過合適的譜轉換理論分析波場影像取得之。本研究採用高維度之小波轉換理論進行影像之譜轉換。小波轉換理論之方程式如下所示(Antoine et al., 2004; Mujica, 1999)：

$$S(\bar{b}, \theta, a) = C_{\psi}^{-0.5} \left\langle \psi_{\bar{b}, \theta, a} \middle| s(\bar{x}) \right\rangle \quad (2)$$

其中 $s(\bar{x})$ 為被分析之影像函數， ψ 為小波母函數， $S(\bar{b}, \theta, a)$ 為影像經小波轉換後之結果。本研究選用之小波母函數為 Morlet 函數：

$$\psi(\bar{x}) = e^{-0.5|\bar{x}|^2} \cdot e^{i(\bar{k}_0 \cdot \bar{x})} - e^{-0.5|\bar{x}|^2} \cdot e^{\left(-0.5|A^{-1}\bar{k}_0|^2\right)} \quad (3)$$

上式中的參數 $\bar{k}_0$ 為小波母函數於傅立葉空間的中心位置，其主導著小波母函數於空間域(space domain)的波形震盪數； $\bar{b}$ 為小波函數於空間域的位移因子，控制小波函數在被分析影像序列空間域的移動量； θ 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(4)所示：

$$r_{-\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad 0 \leq \theta < 2\pi \quad (4)$$

式(3)中的參數 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空間頻率，亦即海浪的波數(wavenumber)。由於式(2)經小波轉換所求得之小波譜為尺度參數 a ，位移參數 $\bar{b}$ 以及方向參數 θ 之函數，並非波譜資料所提供的波浪頻率 ω 以及波數 k 。不同參數之間的轉換關係如下：

$$\bar{k}_n = \bar{k}_0 / ar_{-\theta} \quad (5)$$

$$\bar{b} = \bar{x} \quad (6)$$

透過式(5)及式(6)的數學關係，可將式(2)的小波轉換分析結果轉換成為影像譜(image spectrum)，藉以描述波場影像中頻率、波數與波場影像能量之間的關係。透過分析所得結果，再導入式(1)的分散關係，從中反算出海底水深的資訊。

三、小波演算法之驗證

為瞭解小波轉換理論應用於解析海底地形的可行性以及分析結果之準確度，本報告使用各種水深條件所模擬出的波場影像來進行分析與驗證。圖 2 為本研究所模擬的其中一個波場案例。波場是根據分散關係式進行模擬，其中的水深隨 Y 方向改變之。於影像沿著 Y 方向有四種不同的水深條件，由深入淺的變化。從圖 2 沿 Y 方向所切選的波場剖面如圖 3 所示。由該圖可看出因水深變化所產生的波

形變化。本研究透過小波轉換分析圖 2 的模擬波場，分析所得之波數(wavenumber)結果如圖 4 所示。由該圖可看出波數隨著 Y 方向改變，說明了小波轉換理論應用於分析非均勻波浪訊號的可行性。透過圖 4 計算所得之波數值搭配式(1)的分散關係式計算所算得之水深如圖 5 的圓圈記號所示，圖 5 的直線則為模擬波場時所給定的水深條件理論值。由圖 5 的分析結果可看出，透過小波轉換分析水深所得之結果與理論值相近，理論值與計算值之間的差異應可透過提高波場影像解析度的方式改善之。由圖 5 的分析結果亦可看出水深轉換區域之水深計算結果並不理想，這是因為訊號之滲漏現象(leakage)，會發生於分析訊號之邊界區域。

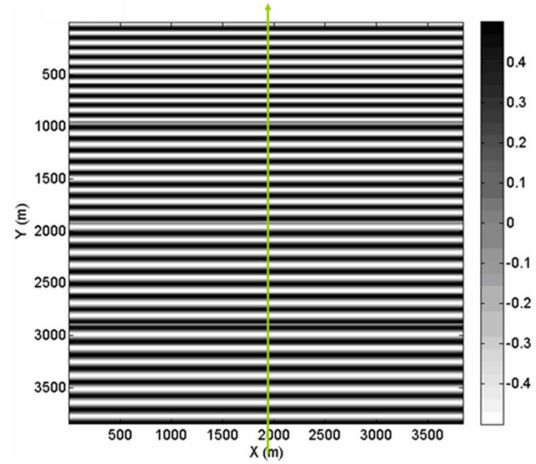


圖 2 本研究模擬之波場影像

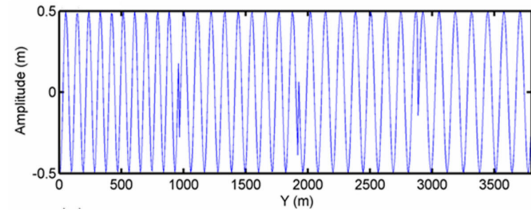


圖 3 沿圖 2 波場箭頭方向之水位剖面

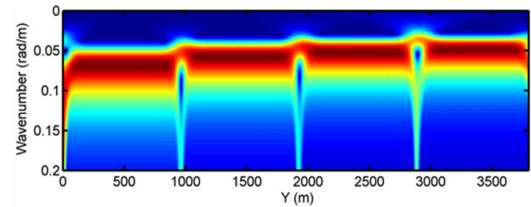


圖 4 從圖 3 水位剖面計算所得之波數分佈

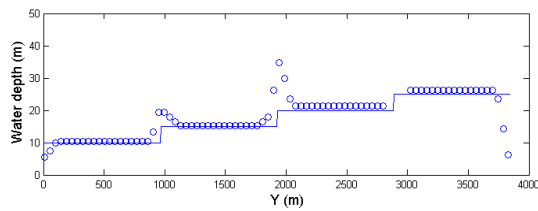


圖 5 模擬波場之水深驗證結果

四、實測雷達影像分析

4.1 台東成功海域之案例分析

為了解小波轉換應用於實際遙測影像之分析結果，本報告選用雷達觀測海面所得波場影像作為被分析資料，期能藉此了解小波轉換對於分析實測雷達觀測資料結果之特性。所分析資料為台東縣成功鎮附近海域之雷達影像資料，其波場分布如圖 6 所示。本報告選取圖 6 中方框區域的影像進行小波分析，分析結果如圖 7 所示。結果顯示於近岸最淺水區域之水深計算不出結果，而離岸深水區計算所得之水深並沒有超過 35 米。這是因為利用式(1)的分散關係式進行水深計算時，式中 $\tanh(kd)$ 為演算之關鍵。當 kd 值過大時， $\tanh(kd)$ 值會趨近於 1。因此當水深過大時，並無法透過分散關係式進行有效的水深資訊解析。淺水區域的水深解析特徵將於後文討論之。

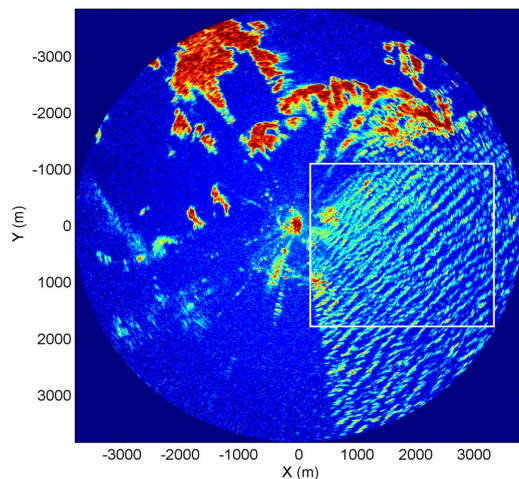


圖 6 X-band 雷達實測波場影像

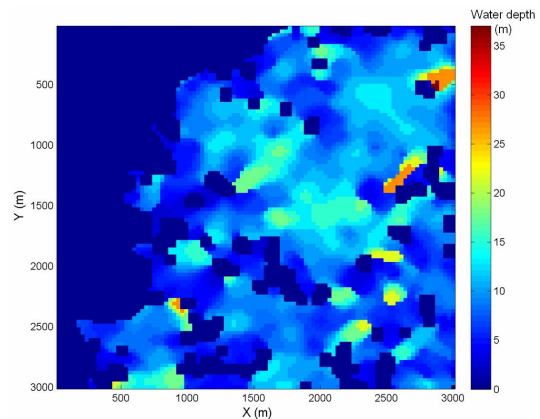


圖 7 從圖 6 影像方框區域所計算水深之結果

4.2 台東市外圍海域之案例分析

除了台東成功海域的雷達影像分析之外，本文於民國 99 年 5 月於台東海岸地區進行雷達觀測之現場試驗，試驗位置位於台東市區外圍之海岸地區，雷達所在之位置為(121°9'9.27"N, 22° 44'37.65"E)。於台東海岸所測得之雷達影像則如圖 8 所示。為確認雷達實際應用於現場水深量測之果效，此一觀測試驗搭配有現場的聲學量測設備。實驗所使用之現場測流設備如圖 9 所示，在海上船隻裝設聲納以及 GPS 等設備，可獲取海上不同位置的水深實測值。現場實測水深的試驗軌跡如圖 10 所示，現場水深量測結果則如圖 11 所示。由圖 10 與圖 11 可看出量測之範圍主要在台東市海岸線附近之水域，此一區域的水深範圍在 30m 以內。本文進一步透過前述之雷達影像分析方法進行波場影像中水深資訊的解析，水深分析結果如圖 12 所示。從分析結果可發現到，於水深小於 4m 的區域，從雷達影像分析所得之水深與現場實測水深有明顯之差異。這應是因為從雷達影像解算水深的核心為波浪分散關係式。由於波浪於淺水區域受淺化之影響致使波長變短，受限於雷達影像本身的空間解析度，對於過短波長的波浪並無法較有效的解析，進而影響淺水區域水深量測的準確度。從圖 11 的結果也可發現到，從雷達影像中計算水深資訊的解析度低於現場觀測，這是受到波浪分散關係式中波數解析度不足的影響。透過數值方法提升小波影像譜於頻率域的解析度，應能有效解決水深資訊解析度偏低的現象。

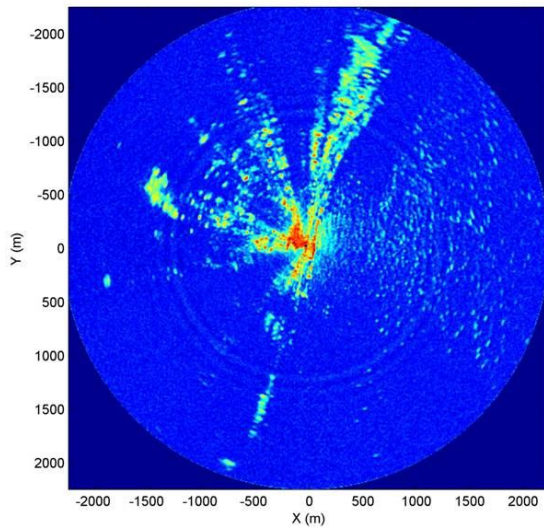


圖 8 台東市外圍海域之雷達影像

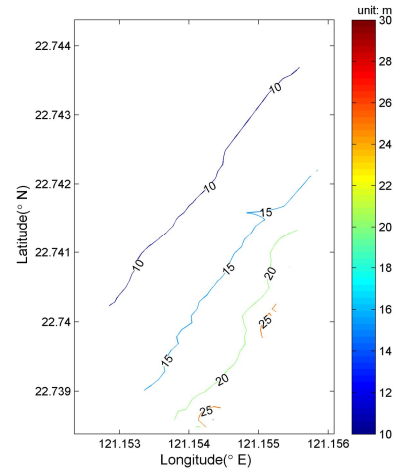


圖 11 現場水深量測結果

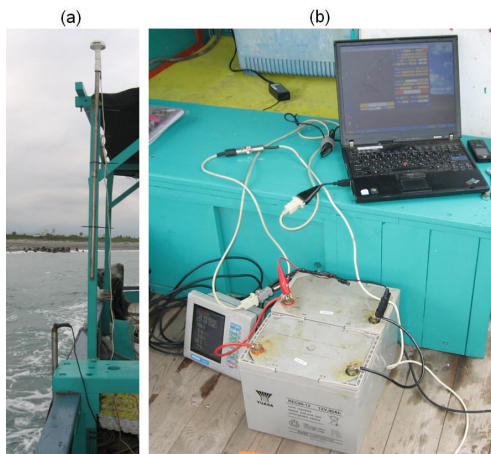


圖 9 現場水深量測系統：(a) 感測器及 GPS 設備；
(b) 供電及展示設備

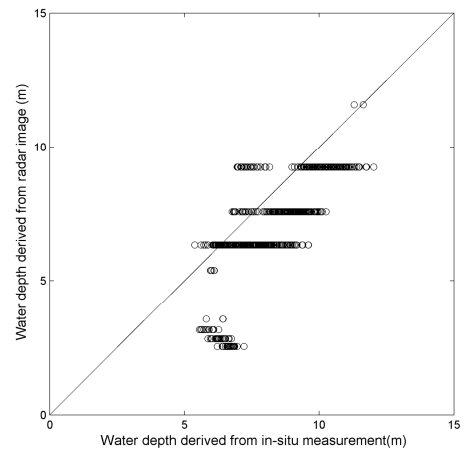


圖 12 不同水深量測結果之比對

五、結論

利用雷達影像獲取海底水深資訊時，適當的譜轉換演算法為核心程序，也是準確計算出水深結果之關鍵。本研究提出應用高維小波轉換理論作為雷達影像譜轉換的演算工具，藉以討論當前所面臨非均勻波場之分析議題。文中提出了小波轉換理論之核心理論以及透過影像譜計算水深的方法，再進而透過所模擬之空間波場進行演算法之驗證與討論。最後再藉由分析實測雷達波場影像，探討本文所提方法之可行性。最後透過實測影像的分析結果以及波浪理論本身之數學特性歸納出本文分析方法所適用的被分析條件。

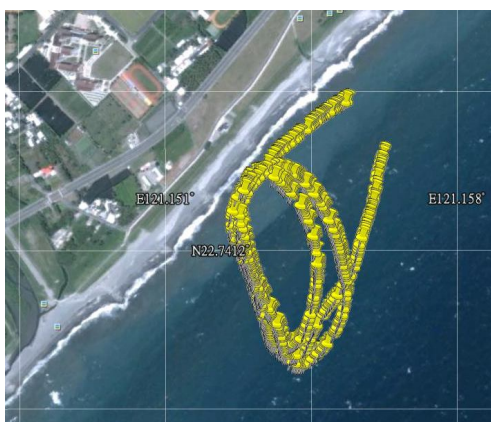


圖 10 現場水深量軌跡(標示點)

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「連續小波轉換應用於遙測影像之分析—海底地形之解析」(編號 NSC 98-2218-E-006-236)之研究成果,承蒙國科會經費之補助使本研究得以順利完成,謹致謝忱。

參考文獻

1. Antoine, J.-P., Murenzi, R., Vanderghenst, P. and Twareque Ali, S. (2004) “*Two-dimensional Wavelets and Their Relatives*,” Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
2. Mujica, F.A. (1999) “*Spatio-temporal Continuous Wavelet Transform for Motion Estimation. Dissertation*,” School of Electrical and Computer Engineering, Georgia, USA.
3. Tucker, M.J. and Pitt, E.G. (1991) “*Waves in Ocean Engineering Measurement, analysis, Interpretation*,” Ellis Horwood Limited, England.
4. Young, I.R., Rosenthal, W. and Ziemer, F. (1985) “A Three-dimensional Analysis of Marine Radar Images for the Determination of Ocean Wave Directionality and Surface Currents,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, pp. 1049–1059.