

發展微波雷達於海況觀測之研究

Development of Radar Technique to Sea-State Monitoring

吳立中*、董東璟**、高家俊***、張國強****

摘要

海況觀測是瞭解海洋的方法之一，微波雷達為近代新興的海況遙測工具之一，本文目的在於探討利用微波雷達觀測海況之準確性。從現場試驗研究結果得知，微波雷達觀測影像品質會受到降雨以及風速風向等外在氣象因子之影響，本研究透過資料品質管並依據風速風向資料對雷達影像分類，分別率定不同氣象條件之雷達回波訊號，分析結果顯示此處理方法可使雷達測波之準確度提昇至 50 公分。

一、前言

近年來由於陸地資源的逐漸飽和，人類活動逐漸趨向海岸地帶甚至海洋，然而惡劣的海況可能會對海域活動造成安全上的威脅，為了提昇海洋活動的安全性，瞭解海洋、掌握海況是必要的工作之一。

為能掌握實際海況，觀測(observation)是最直接的方法。受到風、波、流等外力以及鹽份侵蝕的影響，海上現場環境監測作業的困難度遠高於陸上環境監測。為能掌握海洋環境的觀測之關鍵技術，國立成功大學近海水文中心致力於發展作業化以及自動化的海氣象監測系統，並協助政府建立與操作海氣象監測網；提供即時海氣象資訊，做為海氣象預報以及禦潮防災之應用。

海況觀測方法可分為現場(in-situ)直接觀測及間接的遙感探測(remote sensing)兩種方式，現場觀測取得單點的真值(ground truth)，而遙測是獲得廣大範圍內之海面特性。遙測是不和目標直接接觸，而是以攝取或是量測電磁回波特性，隔空偵測觀測區域之特性。遙測波浪的技術可以分為電磁波與光學兩種方式。由於微波波段(波長介於 0.1~100 公分)之電磁波僅會穿透海水數釐米，因此其反射或散射的回波可表現出海水表面的動態特性，雷達(Radar)即是一種以電磁波作為觀測媒介的工具。海面雷達回波主要是受到兩種物理機制的影響，其一為鏡面反射(Specular reflection)，當海水面的粗糙程度愈大，代表海浪的起伏愈明顯，即海況惡劣的情況下，雷達波的反射效果會愈明顯；另一種雷達回波機制為布拉格散射(Bragg scattering)，當海

面波長(λ_s)與雷達波之波長(λ_r)滿足 $\lambda_s = \lambda_r / (2 \cos \theta)$ 的關係時(θ 為雷達波之掠角)，會產生強烈之回波量，藉由觀測海域中不同位置點所對應的雷達回波強度，可求得空間波場影像，再根據海氣交互作用機制，則可從雷達回波影像計算出描述海況特性之參數。

利用微波雷達監測海況為近海水文中心近年來研發的海象監測技術之一，為能掌握技術與國際同步研究，近海水文中心與德國研究單位交流研究，目前已發展出自動化的微波雷達海況監測系統。本文之目的為應用近海水文中心雷達海況監測系統從事現場測試，探討從雷達影像中求取波浪資訊的方法，以及雷達觀測結果之準確性，藉以瞭解此海況遙測系統之特性。

二、國內外利用雷達觀測海況之研究

近幾十年來，由於雷達技術發展迅速，許多雷達測波之相關研究相繼被提出，本文從衛星酬載雷達以及陸域雷達兩類來說明前人之研究概況。

2-1 衛星酬載雷達於海況觀測之研究

藉由衛星酬載之合成孔徑雷達(Synthetic aperture radar, SAR)通常被用來從事大尺度海洋科學研究，如對於內波(Hsu et al., 2000)、波流交互作用、海面油污、浮冰等研究。至於 SAR 應用在波浪觀測上的研究相對地較少，如 Kuo et al. (1999)、林等(2000)均利用分散關係式(Dispersion relation)來計算 SAR 影像的方向譜，而 Doong et al. (2003)則探討應用 SAR 於近岸波場觀測之

* 國立成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生

** 國立成功大學近海水文中心博士後助理研究員

*** 國立成功大學水利及海洋工程學系教授兼近海水文中心主任

**** 經濟部水利署水文技術組簡任工程師

相關問題。基本上，SAR 在大尺度、時變性低的海洋環境現場研究上具有相當高的優勢，然而由於衛星觀測同一區域之重現期(return period)太長，有時為一天，有時達數天，難以達到海況監測(monitring)之目的。

2-2 陸域雷達觀測海況之研究

同樣利用電磁波與波浪交互作用之原理，若把雷達放置在陸地上，如岸邊或海上平台，甚至是船上，雷達發射並接回電磁波以獲得海況二維影像，同時由於雷達不停地轉動，再獲得時間的資訊，亦即陸域雷達收集了海面不停地變化影像，可說是三維的觀測。

最早將雷達應用在海況觀測研究的為 Young et al.(1985)。他們根據一連串的海面雷達影像來決定三維能譜，以分散關係式為濾波器分離回波影像中的波浪訊號與雜訊，藉以求取波浪資訊。這個方法至今仍被採用，如德國 GKSS 研究中心即以此發展出一套雷達測波系統(Borge et al.,1999)，Doong(2002)也以此方法從事雷達影像分析，並探討利用雷達測波的不確定性(uncertainty)。下表 1 簡要地列出目前國際上常見的雷達海況觀測研究概況，包含了衛載的和陸域的雷達系統。

表 1 目前常見之雷達監測海況系統綜整[節錄自 Doong(2002)]

Instruments	System	Instrument	Working range	Resolution	Measurements	
Marine radar	WaMoS	Marine radar, X-Band 9.41GHz, $\lambda = 3 \text{ cm}$	5.0 km	Azimuth resolution 1.0° Range resolution 8.5m Temporal resolution 2.5 s for 32rpm/2.5m radar	Wave, current	GKSS, Germany
	WAVEX	Marine radar, X-Band 9.41 GHz, $\lambda = 3 \text{ cm}$	5.0 km	Azimuth resolution 1.0° Range resolution 8.5m Temporal resolution 2.5 s for 32rpm/2.5m radar	Wave	MIROS Company, Norway 1996-
HF radar	CODAR (SeaSonde)	HF radar, 24-27 MHz $\lambda = 11 \text{ m}$	40-70 km	Range 1-3 km (min. 300m)	Current, wave	NOAA, US
	OSCR	HF radar, 27 MHz $\lambda = 11 \text{ m}$	40 km	1.0 x 1.0 km	Current, wave	Miami University, US
Altimeter	TOPEX -POSEIDON	Altimeter	Global, Repeat period is 10days	10 cm	Sea level Wave height	NASA, US, 1992-
Satellite SAR	ERS-1/2 (with altimeter)	SAR/ C-Band (5.3 GHz) Altimeter/ K Band(13.8GHz)	Global, 100km wide strip, Repeat period 35days	26 m (Image mode) 10 m (Wave mode) 10 cm (Altimeter)	Wave, Wind	ESA, EU ERS-1 1991-1999 ERS-2 1995-
	ENVISAT	ASAR/C-Band (5.3 GHz)	Global, 400 km wide swath, Repeat period 35days	26 m (SAR Image model) 10 cm (Altimeter)	Wave, Wind	ESA, EU 2002-
	RADARSAT	SAR/ C-Band	50 - 500 km wide swath, 50 km	10 - 100 m, 10 m for Fine mode	Wave, wind	CSA, Canada 1995-

三、發展 X-Band 雷達於近岸波浪之觀測

3-1 雷達海況監測系統架構

微波雷達海況監測系統包含訊號擷取設備、分析設備以及資料傳輸設備三個部份(如圖 1)，為了將雷達原始訊號引出，將之數化後用電腦分析，近海水文中

心使用 20MHz 的高速取樣器擷取雷達訊號，分析成波場影像後如圖 2 所示，其空間解析度為 7.5m/pixel。透過影像分析以及波浪理論可求取海況波譜參數，搭配資料傳輸系統，將觀測結果由雷達架設地點即時傳輸回監控單位進行確認。

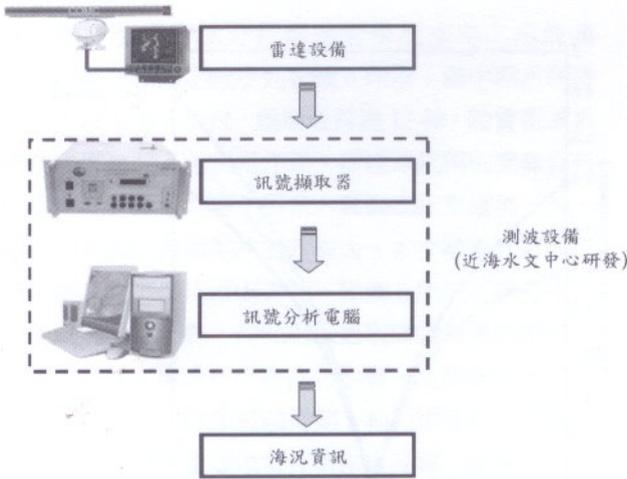


圖 1 雷達海況監測系統架構

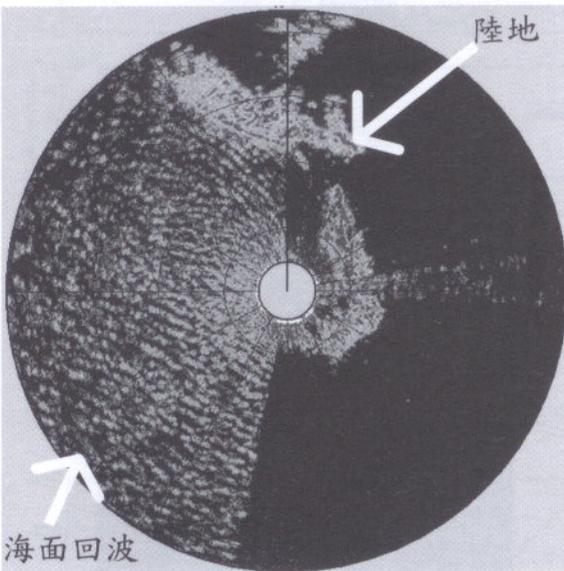


圖 2 雷達回波影像

3-2 雷達影像譜分析

波浪譜(wave spectrum)是描述波浪能量在頻率域及傳遞方向上的工具，也是計算海況參數的依據，波浪譜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雷達遙測的重要研究內容。

傳統分析影像譜是利用三維快速傅立葉轉換方法(吳等, 2003)。但由於本研究觀測範圍位於近岸海域，具有高度的非均勻(non-homogeneous)特性，傳統的傅立葉分析可能導致偏大的誤差(Doong et al., 2003)。為了解析出海浪訊號的非均勻特性，本文選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，來求得影像時序列在不同空間域與時間域所對應之頻率特性，其數學表示式如式(1)所示。

$$S(a, r, \bar{b}) = a^{-3/2} \iiint f(\bar{z}) \cdot \psi^* \left(\frac{\bar{z} - \bar{b}}{ar} \right) d^3 \bar{z} \quad (1)$$

上式中函數 ψ^* 為小波母函數之共軛複數，小波母函數有多種不同之類型，式(2)為三維 Morlet 小波母函數之數學表示式，其中 \bar{k}_0 為小波母函數之波形震盪個數。

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

三維小波轉換之分析結果為尺度參數(a)、位置參數(\bar{b})以及旋轉參數(r)之函數，其中尺度參數與被分析訊號的頻率有關，位移參數與被分析訊號的位置有關，旋轉參數與被分析訊號的方向有關。因此可將小波轉換分析影像時序列之結果 $[S(a, r, \bar{b})]$ 轉換為影像時序列訊號中，在不同空間位置與時間的譜資訊 $[S(x, y, t, k_x, k_y, \omega)]$ 。藉由小波轉換之分析結果，可解析出不同時空條件下近岸海域之海況特性。

3-3 濾波方法

在雷達系統進行觀測時，來自遠距離之回波可能非常微弱，因此需要以放大器將訊號放大，以達到可辨識之程度，但訊號放大的同時，從雷達天線所收到之外來背景雜訊亦無可避免的被放大，從事雷達影像分析必須將波浪訊號與雜訊分離。波浪理論中的分散關係式描述波浪運動時，波數與頻率應該遵守的規則，其數學式如(3)式，式中 d 為觀測海域之水深， \bar{U} 為表面之流場。圖3左側說明分散關係式描述之波浪的波數(\bar{k})、頻率(ω')關係，而表面流速對頻率與波數之間關係的影響如圖3右所示。

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} + \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (3)$$

利用小波轉換求得之雷達影像譜包含波浪與雜訊能量，在數學上，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。此種利用波浪學之分散關係式為濾波工具的方法於 Borge et al.(1999)、Doong(2002)均曾被使用。

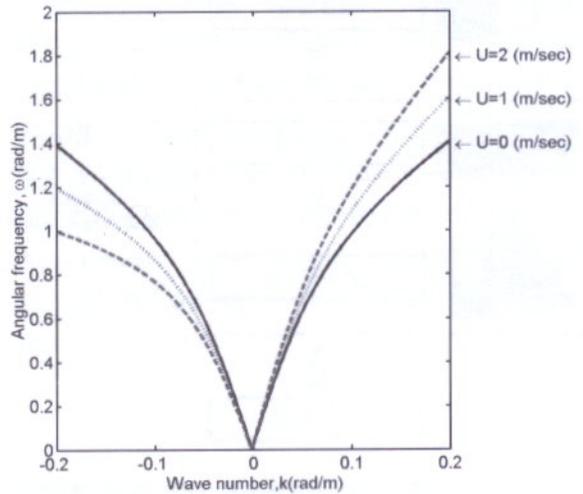
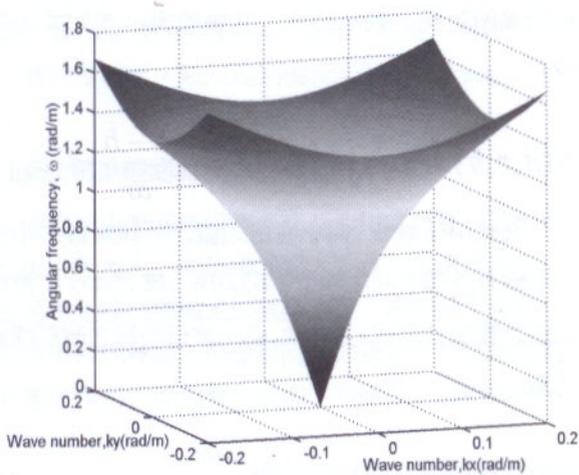


圖 3 分散關係式中波數 (k_x, k_y) -角頻率 (ω) 之關係圖

3-4 海況參數分析

雷達回波包含波浪與背景雜訊，藉由前述方法，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。至於波浪週期、波長以及波向等海況參數可藉由分析雷達所測得之方向波譜求得。

四、結果與驗證

4-1 現場觀測試驗

為探討微波雷達海況監測系統之準確性，本研究於 2003 年 8 月之科羅旺(Krovanh)颱風期間，將雷達系統安裝於墾丁，與水利署之鵝鑾鼻資料浮標從事同步觀測，如圖 4。雷達系統架設於墾丁的海巡署鼻頭安檢站前，其有效觀測範圍約為 5 公里半徑的圓形區域，涵蓋鵝鑾鼻資料浮標(離雷達約 2 公里)，其相關位置如圖 5 所示，測試期間自 8 月 20 日至 24 日止，約有 120 筆數據。



圖 4 近海水文中心於墾丁架設之雷達系統

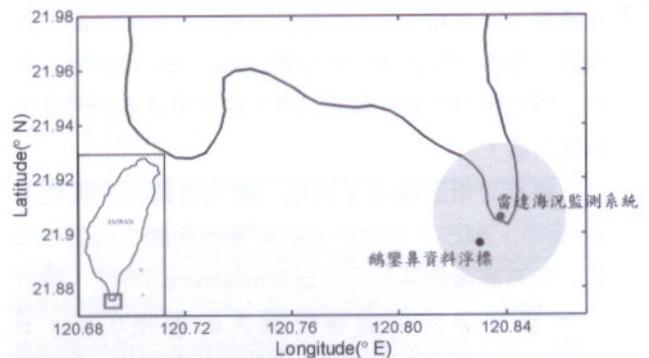


圖 5 雷達與資料浮標放置之地理位置

4.2 觀測結果比較

根據前文方法分析雷達影像所求得之示性波高、週期與波向之時序列如圖 6 所示，圖中顯示測得之波高最大達 5 公尺，週期最長達 12 秒，證實雷達系統在惡劣海況下可正常作業。雷達系統與鵝鑾鼻資料浮標之比對結果如圖 7 所示，其觀測結果趨勢一致，圖 7 中有部份數據點的偏差較大，本文檢查其原因發現影像品質不佳為原因之一，如圖 8 所示，參考中央氣象局之天氣報告，得知影像攝取同時有降雨情形，說明了雷達影像分析受降雨之影響，造成訊噪比之計算準確度降低，從此經驗得知，利用雷達影像從事海況監測研究應考量環境特性對影像品質之影響。

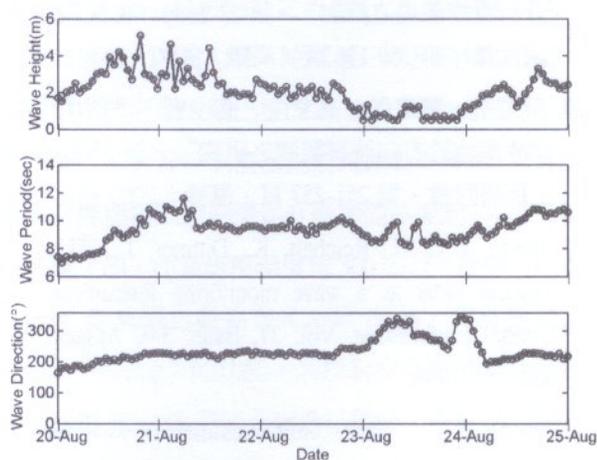


圖 6 科羅旺颱風期間雷達監測系統所測得之海況

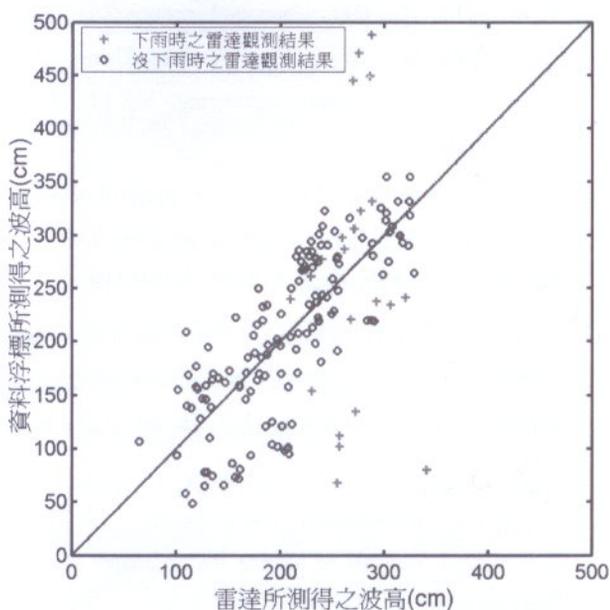


圖 7 雷達海況監測系統與資料浮標波高比對圖

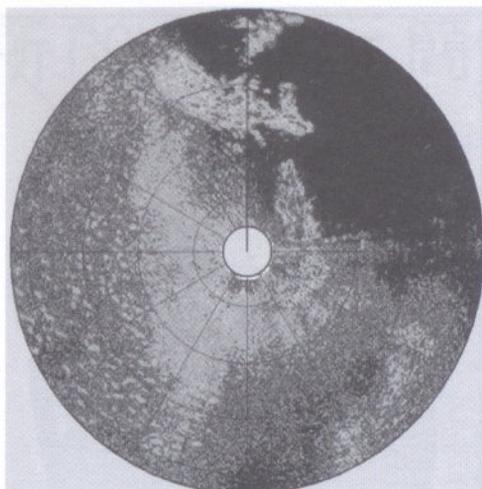


圖 8 降雨時之雷達影像

4.3 觀測結果之探討

為了探討降雨對雷達觀測之影響，本文將雷達觀測資料中有雨水雜訊影響的資料移除，結果顯示雷達所測得示性波高的準確度(以 95%信賴區間為準確度之判斷標準)約為 100 公分，如圖 9。檢討影響準確度之可能原因，除了降雨影響之外，本文認為尚有風的影響，雷達波高率定關係(3-4 節)受風速、風向影響，因此本文進一步根據風速、風向資料對雷達影像進行分類並重新率定。利用修正的率定關係所得之結果與資料浮標的比較結果如圖 10，結果顯示考慮降雨及風等氣象因子之影響所分析之雷達波高，其準確度可提升至 50 公分(圖 10 之 95%信賴區間為 48.4 公分)。

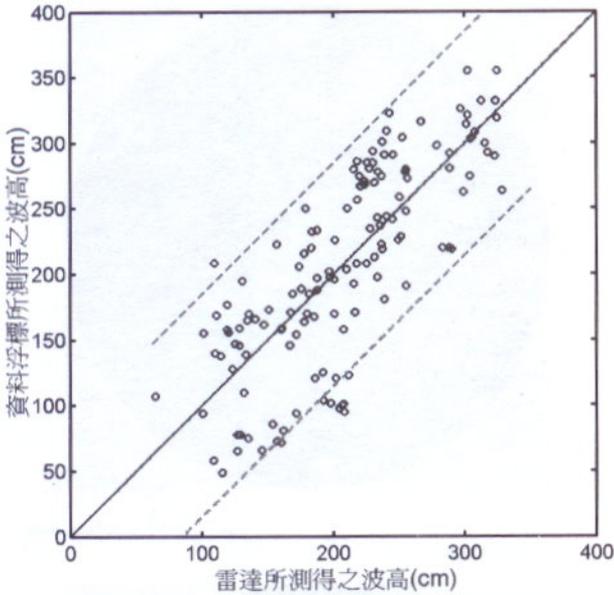


圖 9 移除降雨雷達資料後所得之雷達波高率定結果與實測值之比較

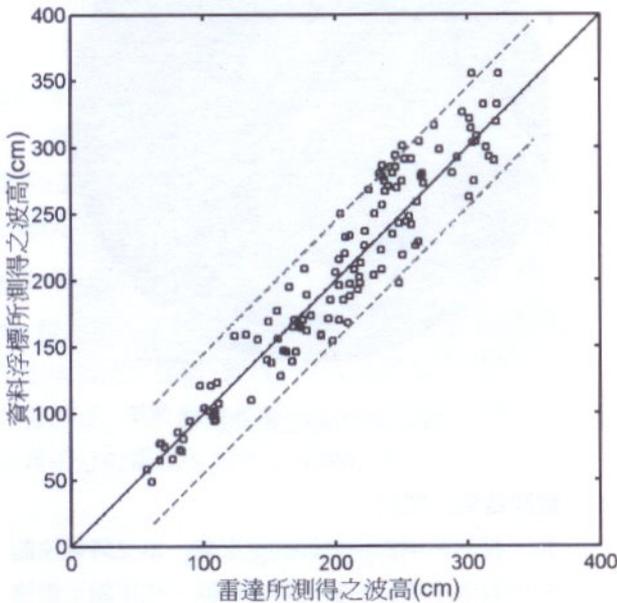


圖 10 考慮降雨及風等氣象因子的雷達波高率定結果與實測值之比較

五、結論與建議

1. 成功大學近海水文中心發展之微波雷達海況監測系統經現場測試後證實具有海況監測之功能，在惡劣之颱風期間亦能作業。
2. 本文研究結果顯示雷達系統之觀測準確性會受降雨及風等氣象因素的影響。
3. 當移除降雨雷達影像，且雷達率定關係考量風速、風向之影響後，雷達測波結果之準確性可提昇至 50 公分。

4. 降雨對雷達回波造成影響，導致觀測結果準確度降低，未來應探討降雨影響觀測結果之程度，並研究濾除雷達影像中雨水雜訊之方法。

六、謝 誌

本研究承蒙國科會補助經費從事雷達影像分析方法之研究(NSC 92-2611-E006-032)、水利署提供鵝鑾鼻海域現場觀測資料以及教育部成大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]. 林鴻鵬、董東璟、莊士賢、高家俊，“衛星影像分析近岸波場之探討”，第 22 屆海洋工程研討會論文集，第 169-176 頁，高雄，2000。
- [2]. 吳立中、董東璟、高家俊、莊士賢，“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，第 251-257 頁，基隆，2003。
- [3]. Borge, J. C. N., Reichert, K., Dittmer, J., “Use of nautical radar as a wave monitoring instrument”, Coastal Engineering, Vol. 37, Issue: 3-4, August, pp. 331-342, 1999.
- [4]. Doong, D.J., “Uncertainty assessment of wave remote sensing”, PhD thesis, National Cheng Kung University, Tainan, Republic of China, 2002.
- [5]. Doong, D.J., Kao, C.C., Chuang, Laurence Z.H., Lin, H.P., “Nearshore Wave Field Analysis Using SAR Images”, China Ocean Engineering, Vol.17, No.1, pp.45-60, 2003.
- [6]. Hsu, M.K., Liu, A.K., Liu, C., “A study of internal waves in the China Seas and Yellow sea using SAR”, Continental Shelf Research, Vol. 20, pp.389-410.
- [7]. Kuo, Y.Y., Leu, L.G., Kao, I.L., “Directional spectrum analysis and statistics obtained from ERS-1 SAR wave images”, Ocean Engineering, Vol. 26, pp. 1125-1144, 1999.
- [8]. Young I. R., W. Rosenthal, and F. Ziemer, “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, 1985.