

# 應用岸基測波雷達於方向波譜觀測之研究

吳立中<sup>1</sup> 董東璟<sup>2</sup> 高家俊<sup>3</sup> 莊士賢<sup>4</sup>

## 摘要

海洋環境相當複雜，除了理論與試驗的研究之外，觀測是研究海洋問題重要的方法之一。利用一般安裝在漁船上的航海雷達來從事海況遙測是一種兼具了時間與空間解析度的新興技術，藉由分析所獲得的影像序列可求得該海域的各式海況參數，包含波高、週期、表面流等。由於雷達測波屬於間接的觀測方式，為能了解雷達測波的準確度，本文利用雷達測波與資料浮標同時觀測並進行比較，分析結果顯示雷達與現場資料浮標波高平均差值則在 0.3m 以內，尖峰週期平均差值小於 1.0sec，經由現場觀測試驗結果發現降雨是造成雷達影像分析誤差的原因之一。

## Application of Nautical Radar to directional wave spectrum measurement

Li-Chung Wu Dong-Jiing Doong Chia Chuen Kao Laurence Zsu Hsin Chuang

## ABSTRACT

Understanding of ocean environment is essential to the sustainable development in coastal zones. Observation is performed to increase the knowledge of ocean environment. Wave measurement methods are categorized as in-situ measurement and remote sensing techniques. The nautical radar which has capability to capture the temporal and spatial wave information, is the potential instrument for wave measurement. This paper aims to study the error of wave statistics between nautical radar and in-situ data buoy results. The bias of significant wave height is less than 0.3m and the less than 1.0sec for peak wave period. It is found that rain is one of the reason for the accuracy of radar wave monitoring equipment.

## 一、緒論

台灣四面環海，許多經濟活動發生在海岸地區，如航運貿易、魚撈養殖、離島工業等，海岸地帶之土地逐步朝高利用率發展。不論是海岸地區的發展或是海上活動，均需要面對紛紜多變的海洋環境，海洋環境中的風、波、流、溫、鹽等環境資訊具有高度的隨機性，所造成之災害常危及人民的生命財產之安全，例如颱風所引起之波浪，造成海上

或海岸結構物之破壞、海水倒灌以及海岸侵蝕，造成了沿岸居民居住的安全與國土流失等問題。除了海洋災害的問題之外，海洋環境污染之議題也受到了關注，多數的海洋污染源皆會隨著風、波、流等海洋外力的影響而產生擴散以及漂移的現象，若能瞭解海洋環境，可以事先掌握污染源的移動特性，減低海洋環境污染對人類的影響。近年來海洋永續發展之議題逐漸在國際間受到重視，許多跨國性組織相繼成立，為推動海洋資源保護而努力。面對海洋災害的侵襲以及海洋環境破壞所造成之問題，必須持續不斷地瞭解週遭的海洋環境，藉以確保海上活動的安全、加強海洋環境的保護。

1. 國立成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生
2. 國立成功大學水利及海洋工程學系博士後研究
3. 國立成功大學水利及海洋工程學系教授
4. 國立成功大學近海水文中心副主任

在各種海洋環境外力當中，波浪是最複雜的因子之一，潮汐和海流受天體運動及地球自轉的影響，其變化在時間上具有一定的規律性，海浪因受到氣象條件的影響，其變化極不規律。為能掌握波浪的特性，除了理論解析、模式推算以及物理模型試驗之外，波浪觀測(wave observation)是瞭解波浪特性的方法之一，波浪觀測的結果，是研究波浪特性的參考，也是理論計算及模型試驗驗證結果的依據。

波浪觀測方法可分為直接的現場(in-situ)觀測以及間接的遙感探測(remote sensing)兩種。現場量測是將觀測儀器直接接觸海水獲得波浪資料，間接的波浪遙測為觀測儀器和海水面直接接觸，而是透過光、聲波或是發送電磁波的方式隔空偵測觀測區域的變化，進而分析目標物特性的一種觀測技術。由於觀測儀器無須直接放置於海水中進行觀測，於惡劣之海況中可避免儀器遭受到海洋環境外力之破壞。此外相較於現場儀器的單點量測，遙測可獲得整個觀測區域的空間資訊，在波浪觀測領域中逐漸受到重視。遙測波浪的技術可以細分為雷達與光學兩種遙測方式，其中雷達觀測可不受日夜之限制，全天候進行觀測。目前常見之雷達觀測技術包括了：合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, 簡稱 SAR)、高頻雷達以及航海用雷達。其中航海雷達原是用於偵測海上船隻及障礙物，經研究發現，從雷達回波資訊當中不但可偵測障礙物，更能反映出海面波浪之變化，若將雷達固定架設於岸邊(稱為岸基雷達)，可持續觀測大範圍空間面上的波浪變化，是相當有潛力的波浪觀測儀器。Mattie & Harris(1978)就曾利用各種頻率範圍的雷達波來觀測波浪，分析結果發現 X-band 雷達適合用於波浪之觀測，此一觀測結果加強了本研究使用 X-Band 航海雷達觀測波浪之依據。

由於雷達觀測所得資料為兼顧了觀測區域時間以及空間資訊的雷達影像時序列(image sequences)。經由分析雷達影像時訊列資料可獲得觀測區域的「方向波譜」。「方向波譜」可用來描述波浪能量在頻率域及傳遞方向上之分佈，提供上述研究之重要資訊之一。而經由計算分析頻譜之特性又可求得波浪之波向與週期等重要參數。除了波向與週期外，藉由分析雷達影像時序列的資料，還能

夠求得觀測區域的波高資訊。雷達觀測波浪雖具有極高之價值，但目前測波雷達觀測技術尚屬研發階段，關於雷達回波與真實海浪之關係，尚未完全釐清，需要進一步去研究與探討。因此，本文之研究目的為利用現場實測資料的比對，探討雷達影像時序列分析結果之特性，藉以瞭解雷達測波之特性，提供準確的波浪資訊。

## 二、利用雷達影像時序列萃取波浪資訊的方法

由於雷達觀測資料為包含時間以及空間資訊的影像時序列，為了從三維度的雷達資料中萃取出波浪資訊，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作為分析影像譜之工具，並對影像譜進行雜訊濾除的工作，最後再從中分析得方向波譜以及相關的波浪參數，而相關之分析理論敘述於下。

### 2.1 影像譜分析理論

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。目前常見分析影像譜的方法是利用快速傅立葉轉換求得影像時序列的傅立葉係數[請參考式(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。雷達影像譜為藉由雷達影像求得波浪特性的重要媒介。

$$S(k_x, k_y, \omega) = \left| \iiint g(x, y, t) \exp[i(k_x x + k_y y - \omega t)] d\omega dk_x dk_y \right|^2 \quad (1)$$

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(wave number)， $\omega$  為影像時序列之角頻率。

### 2.2 影像譜雜訊濾除之方法

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，在雷

遠測波領域中，對雜訊之定義為凡與海面回波無關之訊號均視為雜訊，若雜訊過強，重要的訊號資訊將被遮蔽住。因此，有效的濾除雷達影像序列中的雜訊是獲得準確波浪參數的重要因素之一。

為了有效濾除雷達影像序列中的雜訊，Borge et al.(1999)研究利用消散關係式作為一濾波器將背景雜訊濾除，以得到海浪回波之影像譜。由影像譜當中可以獲得波數 $(k_x, k_y)$ 與角頻率 $\omega$ 之間的關係，然而由於受到雜訊的影響會造成計算所得的影像譜並不正確。從線性波理論得知，海面波浪參數的關係可藉由消散關係式描述之，如式(2)所示，為消散關係式所描述不同海浪參數間之關係，其中 $d$ 為觀測海域之水深， $\bar{U}$ 為海表面之流場。為了求解式(2)之關係，可利用疊代的方法，給定不同的海表面流速條件 $(\bar{U})$ ，來推算角頻率 $(\omega')$ 。

$$\omega' = \sqrt{gk \tanh(kd) + k \cdot \bar{U}} \quad (2)$$

$$S'(k_x, k_y, \omega) = \begin{cases} S(k_x, k_y, \omega) \Rightarrow \text{if } \omega = \omega' \\ 0 \Rightarrow \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

若是影像譜 $S(k_x, k_y, \omega)$ 所得之 $\omega$ 與散關係式推算而得之 $\omega'$ 相等，代表著該波數與角頻率之間的關係符合線性波理論，影像譜 $S(k_x, k_y, \omega)$ 為波浪訊號所求得，予以保留。若是影像譜 $S(k_x, k_y, \omega)$ 所得之 $\omega$ 與散關係式推算而得之 $\omega'$ 不一致，代表著影像譜 $S(k_x, k_y, \omega)$ 並非是由海面波浪回波訊號所計算得，乃是雜訊影響所造成的，將予以濾除[請參考式(3)]。

### 2.3 影像譜與波數譜之間的關係

經過濾波後之 3-D 影像譜 $S'(k_x, k_y, \omega)$ ，再對影像譜之角頻率積分以獲得觀測區域之二維影像譜[請參考式(4)]。由於雷達並非直接接觸海面作量測，雷達所得之資料為某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)將影像譜轉換成實際海況之波數譜，其關係請參考式(5)。

$$S'(k_x, k_y) = 2 \int_0^{\omega_c} S'(k_x, k_y, \omega) d\omega \quad (4)$$

$$S(k_x, k_y) = k^{-\beta} \times S'(k_x, k_y) \quad (5)$$

上式中 $\beta$ 為經驗係數，與雷達影像之成像機制有關。

### 2.4 方向波譜之分析方法

式(5)所得為海浪之波數譜與雷達影像譜之間的關係，而海浪波數譜與海浪方向波譜間可以利用式(6)~式(8)的關係式進行至轉換，其中 $\theta$ 代表波浪之方向， $f$ 代表波浪之頻率，為波浪週期之倒數。

$$S(k, \theta) = S(k_x, k_y) \cdot \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{k_x}{k_y} \right) \quad (7)$$

$$S(f, \theta) = S(k, \theta) \frac{dk}{df} \quad (8)$$

為了能獲得式(8)中的數學微分關係，本文利用呂(1998)以簡化的深海波浪傳遞分散關係式(dispersion relationship)來計算式之，其數學關係如式(9)所示。

$$\frac{dk}{df} = \frac{4\pi \sqrt{gk \tanh(kh)}}{\left[ gk \tanh(kh) + kgh \sec^2(hk) \right]} \quad (9)$$

經由以上步驟所獲得之方向波譜描述波浪能量在頻率域及傳遞方向上之分佈，經由波譜理論的計算，即可從中求得波長、週期、波向等波浪參數。

### 2.5 利用雷達影像時序列分析波高之方法

除了可利用雷達影像時序列分析出觀測海域的方向波譜資訊外，雷達影像時序列還可以用來計算海面之波高 $(H_s)$ ，Seemann et al. (1999)指出觀測海域之有義波高 $(H_s)$ 與信噪比的平方根(signal to noise ratio, SNR)呈線性之關係，可以藉由此率定式來推求雷達影像的波高。

$$H_s = A + B\sqrt{\text{SNR}} \quad (10)$$

式(10)中 $A$ 、 $B$ 為經驗係數，可以最小平方求得，而信噪比(SNR)為訊號與背景雜訊能量之比。



### 3.2 分析雷達影像所得波高之結果

本文利用前文所述方法，分析雷達影像，藉以球出觀測海域之波高值。由分析結果發現，雷達影像之訊噪比(SNR)與現場實波高之間的關係(請參考圖 6)如式(11)所示。

$$H_{Radar} = 1.27 + \sqrt{SNR} \times 0.005 \quad (11)$$

由式(11)可發現，藉由該數學式之關係計算雷達訊造比所獲得之波高皆大於 1.27(m)，探討造成此一現象之原因發現，利用雷達影像的訊造比計算準確波高的條件為，由觀測海域所獲得到之雷達影像中需要有明顯之波紋(請參考圖 7 中，方框所圈選之區域)，而觀測海域之雷達影像中的明顯與否，會受到海面實際波高之影響，當海面波高愈大時，雷達波在海水面的波峰處所產生之雷達回波會愈強烈，因而能在雷達影像中產生明顯之波紋，而這些波紋也就是雷達影像中所隱含的波浪資訊。從前人研究(Hessner et al., 1999)中得知，利用航海用雷達作為波浪觀測儀器，其波高之觀測範圍需大於 1.0(m)。此外，由於本文所分析資料為颱風期間之雷達觀測結果，此一觀測期間，在現場由鵝鸞鼻資料浮標實測得之有義波高值大多在 1.3(m)以上，使雷達影像的訊噪比(SNR)與現場實測波高之間的率定關係受到影響。為了能使雷達觀測範圍能達到 1.3(m)以下，需要有更多的觀測資料以進行率定工作。

利用雷達影像訊噪比(SNR)以及式(12)之關係，所計算獲得之波高值與現場實測波高之間的關係如圖 8 所示，結果顯示兩者之間的相關係數為 0.65，而兩種觀測方法所獲得到的波高之間的差值最大為 1.4(m)，波高差取絕對值後之平均為 0.3(m)。由圖 8 的結果中亦看出了，當現場實際波高較小(波高小於 2m)時，雷達觀測所得波高值會較資料浮標觀測所得到之波高值低；而當現場實際波高值較大(波高大於 2m)時，雷達觀測所得波高值會較資料浮標觀測所得到之波高值大。分析雷達影像獲得之波高值與現場實測波高之時率列關係如圖 9 所示，本文在圖 9 的波高比對中加入了德國雷達測波系統 (Wave Monitoring System)在同一時間、同一觀測海域所進行的波高率定結果。分析結果發現，本文分析雷達影像所得之波高與現場實測波高值較接近，顯示分析雷達影像時序列後得到之波高

率定關係較符合台灣實際之海況特性。為了能獲得更準確之波高值，還需要更豐富的資料來進行率定。

由圖 9 的兩種觀測方法所獲得之波高時序列可看出，觀測期間波高差異最大的時段，是發生在 8 月 22 日到 8 月 23 日這一段期間。此一觀測時期之雷達影像如圖 10 所示，在觀測海域所獲得之雷達影像因受到雜訊之影響，而無法辨識出影像中的波紋。探討造成影像雜訊之原因，是由於觀測環境中的雨滴所造成。由前文之探討得知，海面波高與雷達影像之訊噪比(SNR)成正比之關係，而所謂訊噪比乃是訊號與背景雜訊能量之比值，當觀測環境正處於降雨的條件下，雷達波會受到大氣中雨滴的影響，而在雷達影像中呈現出雜訊，觀測海域中的雜訊變大，會使雷達影像的訊噪比值降低，導致利用雷達影像計算所得到的波高會有低估的情況發生。

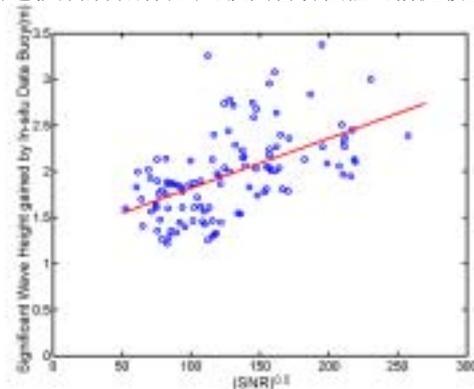


圖 6 雷達影像序列之訊噪比與實測波高間之關係

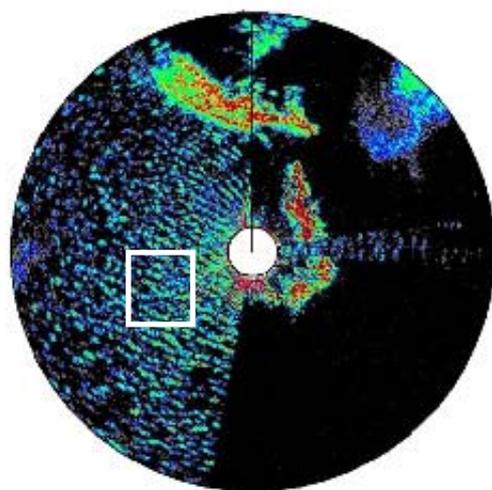


圖 7 墾丁香蕉灣附近雷達影像

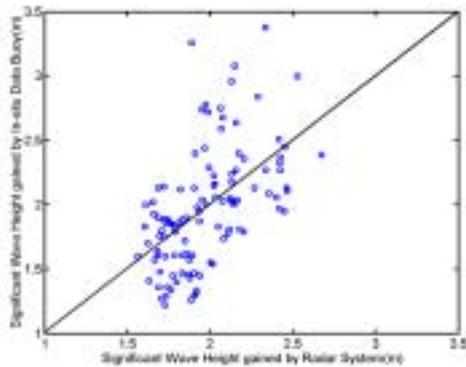


圖 8 分析雷達影像時序列所獲得之波高與現場實測波高間之關係

#### 四、結論與建議

藉由航海用的雷達影像求得波浪訊息是相當具有潛力的測波方法之一，本文利用實測的雷達資料，進行分析探討，粹取出影像中波浪的資訊(包括：方向波譜以及波高)，並與現場資料浮標所觀測的資料進行比對探討，從中獲得以下幾點結論與建議：

1. 藉由比對雷達影像所獲得之方向波譜與資料浮標的方向波譜發現，分析雷達影像所得到之方向波譜在方向分布上較同一觀測時刻資料浮標的方向波譜集中。
2. 本文以科羅旺(Krovanh)颱風侵襲期間，鵝鸞鼻海域之雷達影像分析結果與同一時刻的鵝鸞鼻資料浮標觀測結果進行比對分析，結果顯示兩種觀測方式所獲得之主波向相差最大值= 42(度)，主波向差值的平均= 13(度)。
3. 利用雷達影像訊噪比(SNR)計算波高的結果與現場實測波高值之間的相關係數為 0.65。而兩種觀測儀器(測波雷達與資料浮標)所求得波高之間的差值最大為 1.4(m)，波高之間差值取絕對值後之平均為 0.3(m)。
4. 利用雷達作為波浪觀測工具時，當觀測環境正處於降雨的條件下，雷達波會受到大氣中雨滴的影響，而在雷達影像中呈現出雜訊，觀測海域中的雜訊變大，會使雷達影像的訊噪比值降低，而導致利用雷達影像計算所得到的波高會有低估的情況發生。建議後續可研究探討如何濾除雷達影像中因雨水所造成雜訊，藉以提升雷達觀測波浪之精度。

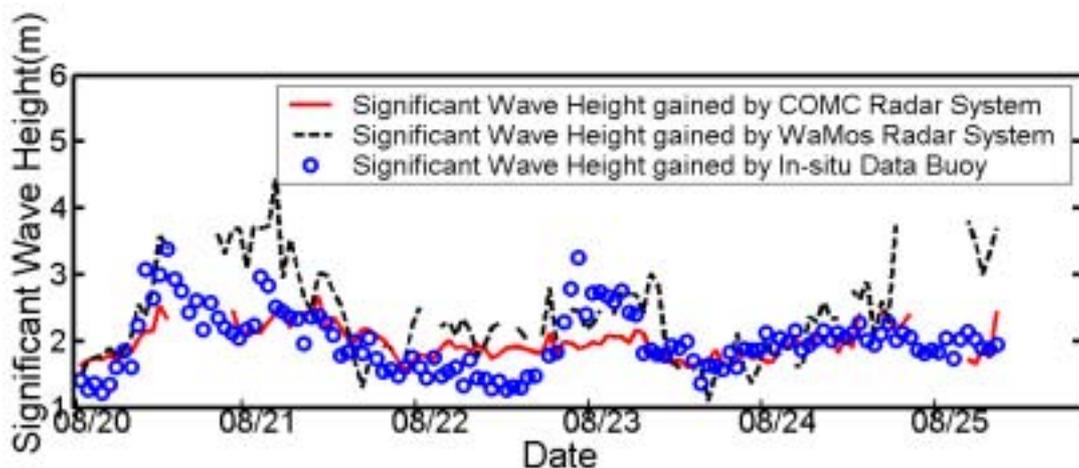


圖 9 墾丁雷達影像分析結果與現場資料浮標實測波浪比對

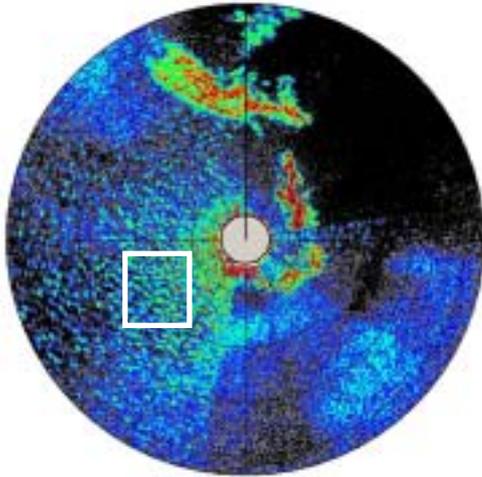


圖 10 降雨條件下之雷達影像

### 謝誌

本論文係行政院國家科學委員會專題研究計畫 (編號 NSC 91-2611-E-006-013) 之研究成果，承蒙行政院國家科學委員會經費之贊助使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

### 參考文獻

呂黎光(1998) "衛星影像應用於波浪能譜分析與近岸水深推算", 國立交通大學博士論。

Alpers, W. (1983) "Monte Carlo simulations for studying the relationship between ocean wave and synthetic aperture image spectra," *J.G.R.*, Vol. 88, pp. 1745-1759.

Borge, J. C., Konstanze Reichert and Jurgen Dittmer (1999) "Use of nautical radar as a wave monitoring instrument," *Coastal Engineering*, Vol.37, pp. 331-342.

Hessner K., Konstanze Reichert and Jurgen Dittmer (1999) "Coastal Application of a Wave Monitoring System Based on a Nautical Radar," *IGARSS 1999*, Vol. 1, pp. 500-502.

Mattie, M.G. and D.L. Harris (1978) "The Use of Imaging Radar in Studing Ocean Waves," *Proc.16th Coasal Eng.*, ASCE, pp.174-189.

Seemann, Joerg, Senet, Christian M., Dankert, Heiko, Hatten, Helge and Ziemer, F. (1999) "Radar image sequence analysis of inhomogeneous water wave," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 3808, pp. 536-546.

