

應用航海雷達於空間波場觀測之研究(1/3) -降雨對雷達回波之影響

高家俊¹ 吳立中² 董東璟³ 楊曜存⁴

摘要

觀測是瞭解波浪特性的重要方法之一，其中航海用 X-band 雷達是相當具有潛力的波浪觀測儀器。本文使用 X-band 航海雷達進行觀測空間波場之研究，由於 X-band 航海雷達的波長為 3.2cm，因此降雨所造成影響便不可忽略。以 X-band 航海雷達進行波浪觀測時，是利用海面的回波訊號經由波譜計算的方法獲得相關的波浪參數，而回波訊號的特性會直接影響到後續波譜分析的結果，本文研究目的為探討降雨對於雷達回波的影響，研究雷達影像中雨水雜訊率除的方法，藉以提升波浪計算的準確度。本文首先針對觀測資料進行是否受降雨影響的判斷，嘗試利用回波影像的統計特性-平均值與差異係數作為判斷標準，再進一步利用濾波方法濾除雷達影像中的降雨雜訊。從分析結果中發現，利用影像的統計特性-平均值與差異係數可有效區分降雨及非降雨的觀測資料，其準確率達九成五以上；本文進一步以頻域濾波的方式來濾除降雨對回波影像所造成的雜訊，分析結果發現約有 2 成的降雨雷達影像資料可轉變為有效的觀測資料。

Observation of Spatial Wave Field by Marine Radar(1/3) - Influence of Rainfall Elements to Wave Analysis from Marine Radar Images

Chia-Chuen Kao Li-Chung Wu Dong-Jiing Doong Yao-Tsun Yang

ABSTRACT

Ocean waves features are random and dependent on meteorological, hydrological, oceanographic and topographical factors. Remote sensing techniques have become quite popular for ocean wave measurement applications. The X-band 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 influence of rainfall elements to wave analysis from marine radar images. In order to differentiate between the radar images with rain noise and without rain noise. Mean value and variation coefficient of radar signals are proposed in this study. It is found that the degree of accuracy is higher than 95%. It is also proposed frequency domain filtering to filter the rain noise which occur in radar images. It is found that there are about 16% radar images with rain noise can be filtered successfully.

一、緒論

台灣四面環海，人們的許多活動，諸如航運貿易、魚撈養殖、岸邊及海上工程等，皆與海洋息息相關，不管是海岸地區的發展或是海上活動，均需要面對變化紛紜的海洋環境。在各種海洋環境特性中，波浪是影響最大且最為複雜的因子之一，有關波浪發生、演變與衰減的機制複雜，影響因素眾多，

-
1. 國立成功大學水利及海洋工程學系教授
 2. 國立成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生
 3. 國立成功大學水利及海洋工程學系博士後研究
 4. 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士

除了採用理論解析、模式推算與物理模型試驗之外，觀測是瞭解波浪特性的重要方法。

波浪觀測方法可分為直接的現場觀測(in-situ measurement)與間接的遙感探測(remote sensing)兩種方式。現場觀測是將觀測儀器直接接觸海水獲得波浪資料，間接的遙測則是觀測儀器不與海水直接接觸，經由對目標物進行影像攝取或是以量測電磁波回波特性之方式隔空偵測目標區域之特性，透過所拍攝之影像或是由電磁波回波所組成之影像，搭配適當之影像處理方法，就可以獲得觀測目標物之特性。由於遙測並不需要將觀測儀器直接放置於海上進行觀測，可避免儀器遭受到海洋環境外力的破壞，即使在惡劣的海況之中，遙測仍可提供寶貴的波浪資訊；此外相較於現場觀測的單點量測，遙測可針對觀測區域進行大範圍空間中的量測，可快速且廣泛的獲得海面波場資料。

遙測波浪的技術主要可分為雷達與光學兩種方式，其中雷達觀測可不受日夜的限制，針對觀測區域進行全天候觀測。目前常見之雷達觀測技術包括了：合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)、高頻雷達與航海雷達，其中 X-band 航海雷達的回波特性，除了能反映出海上船隻或障礙物外，也能反映出海面上波浪的變化情形，若將雷達放置於岸邊或海上平台等地點，可持續觀測大範圍空間上的波浪變化，是相當具有觀測潛力的波浪觀測儀器。因此本文採用 X-band 航海雷達作為波浪觀測之工具。

雷達觀測系統是藉由發射機產生電磁波訊號，並經由天線將雷達波脈衝朝海面上發射，然後量測經海面反射的雷達回波的訊號特性，進而從所獲得的訊號推算出波浪的相關資料。由雷達觀測的基本原理可知，雷達波在大氣傳遞過程中的衰減程度，以及海面目標物回波反射量的大小，都將影響到往後分析資料的結果，因此在分析資料處理上，就不得不將這些會影響分析結果的外在條件加入考慮。

雷達波在傳遞過程中的衰減程度，主要決定於傳播路徑中是否有阻礙物的存在，本文是利用雷達進行波浪觀測，因此主要是討論存在於雷達到海面之間的阻礙物，而主要常見在傳遞路徑會有影響的氣候因素有大氣當中水氣凝結物(包括雨

滴、霧、靄、雲、雪、雹...等)。本文所使用的 X-band 航海雷達是屬於微波雷達(microwave radar)中的一種，微波雷達在遙測基本上不受氣候條件影響，也就是微波雷達具有穿透雲層、煙霧與雨的功能，但在實際運用的結果發現雨對於微波傳輸的影響重要，當微波的波長小於 4cm 時，雨的影響就不可忽略的。由於 X-band 航海雷達的波長為 3.2cm，降雨所造成的影響便不可忽略。

過去已有許多學者將雷達遙測技術運用在不同領域的觀測上，發現到電磁波在傳遞上確實會受到降雨雜訊影響，造成遙測資料無法進行分析，甚至是使得遙測資料分析上產生錯誤的結果，也有部份學者進一步針對這些降雨因素與雷達回波之間的關係做探討，然而在利用航海雷達觀測波浪的研究上，少有學者特別針對降雨雜訊的影響問題進行討論。為了使雷達觀測系統能更適用在各種不同的狀況之下，必須先探討雷達波在整個傳遞過程上會受到的那些降雨因素影響，進而瞭解這些降雨因子對訊號對傳遞上的影響機制，才能有效的降低氣象因子對於雷達影像分析波浪的影響。

本文的研究目的是在現有雷達影像分析波浪的方法中考慮降雨因素的影響，以求得更精確的波浪資訊。基於上述目的，本文先瞭解雷達測波的基本原理，從中瞭解到外在因素對於波浪觀測的影響機制，並將研究重點集中於如何在資料分析中考慮降雨因素的影響，同時運用實測資料的分析結果作驗證，針對分析結果作一探討與建議，以作為日後航海雷達影像分析上的參考。

二、降雨對雷達回波的影響

2.1 雷達測波的基本原理

對運用雷達進行波浪觀測而言，其基本觀測原理為發射機產生某一特定頻率的電磁波訊號，經由天線將電磁波能量朝海面發射出去，當所發射訊號遇到海面波浪時，就會有部份電磁波受到阻礙而產生回波，而海面回波(sea clutter)經由天線被接收機收到，透過對回波加以數位化處理，並進一步處理分析，便可獲得目標的相關資訊。雷達回波與海面波浪的回波特徵，主要以鏡面反射(specular

reflection)與布拉格共振(Bragg resonance)的回波訊號為主。

鏡面反射的發生主要決定於目標物的斜率或坡度，當目標物的坡度與雷達波前進方向的相對位向角為 90° 時，回波的反射量最大，也就是當波浪前進的面與雷達波前進方向之間垂直時，所產生的雷達回波量會比其它相對位向角來的大。另外，除了兩者之間的角度外，當海面上的波高越高時，波浪的反射面積越大，此時的反射量也會比小波高時來的大。

布拉格散射(Bragg scattering)效應是 Crombie 在 1955 年經由海面回波散射訊號的能譜，探討單純雷達波與海面波浪交互作用的物理機制，發現當波浪之波長與雷達波波長滿足 $\lambda_w = \lambda_r / (2 \cos \theta)$ 的關係式[其中 λ_w 為海面波浪之波長， λ_r 為雷達波之波長， θ 為雷達波的掠角(Grazing angle)]，所接收到的海面回波會特別強烈，因而確立了布拉格散射效應。以本文所採用的 X-band 航海雷達(頻率為 9.8GHz)而言，雷達波的波長為 3.2cm，假設雷達波的掠角為 30 度時，對波長為 1.85cm 的波浪會產生布拉格散射，而這樣長度的波浪主要是海面上的毛細波(capillary wave)，也就在海面處風吹拂生成的微小振幅波、雨滴撞擊海面所產生的水面振盪或者是在波峰處波浪的碎波，都會使訊號回波增強。

在運用雷達進行波浪觀測時，主要是間接利用海面波浪的回波特性來判斷出相關的波浪參數，因此所獲得的回波資訊受到許多外在因素的影響，使得回波訊號與波浪之間不再滿足原有關係而這些對訊號回波特性的影響，將會使觀測資料無法進行分析，或是資訊分析結果的不正確的負面影響。

2.2 降雨對回波的特性的影響

有關降雨對雷達回波影響的研究，主要開始於海面上的降雨會干擾雷達量測風速的準確性，Moore et al.(1979)開始研究海面上降雨對散射計(scatterometer)觀測結果的影響，發現雷達回波受降雨會產生嚴重的影響，而降雨率(rain rate)與雨滴大小(droplet size)將支配影響程度的大小。Moore et al.(1997)利用 SIR-C/X-SAR 的衛星資料來計算雨量，這篇文章考慮兩種降雨對電磁波的影響特性來計算降雨量：一是利用降雨會造成回波強度增強的特性，由回波強度來推算降雨；另一為電磁波在大

氣傳遞時會受到雨滴阻礙而產生衰減，由訊號的衰減程度來判斷降雨強度。

運用雷達在進行波浪觀測時，電磁波透過大氣傳遞至海水面，電磁波受到海面波浪的阻擋產生部份的訊號回波，波浪產生的回波再經由大氣的傳遞回到雷達，將回波訊號經過處理與分析後，便可獲得當時海面上的波浪狀況。

雷達所發射的電磁波在大氣中傳遞時，大氣條件會對雷達波產生衰減及產生天氣回波之效應。根據研究結果顯示(熊，1991)，對頻率為 9.8GHz 的航海雷達而言，大氣中的氣體對雷達波僅有極輕微的衰減作用，因此在於大氣衰減的探討上，本文集中在大氣中水汽對雷達波影響之研究。

在大自然常見降水型態包括了：霧、雨、雹及雪等現象，對台灣地區而言，降雨是最常見的降水型態。台灣地區平均每年的降雨日數為 152 天，其中包括了梅雨季節、夏季的颱風及冬季的東北季風，這些氣候現象都會產生降雨的天氣型態，因此將雷達運用在台灣海域的波浪觀測上，降雨是一個不可忽略的氣象因素。

降雨在雷達電磁波傳遞上佔一個很重要的影響因素，不管是在於大氣回波或是訊號衰減上，降雨的影響都是不可忽略的。X-band 航海雷達的電磁波波長為 3.2cm，前人(謝，1997)已經說明在這樣的觀測波長下，降雨影響為不可忽略，隨著降雨強度的增強、雨滴大小的變大，降雨所產生的影響更有可能佔整個回波的主導地位，對於波浪觀測上，實是一個必須重視的問題。出有關降雨在雷達測波的影響上，可歸納出以下幾點現象：(1).大氣中雨滴的存在會導致電磁波在傳遞時產生大氣回波，而這些因雨而產生的回波會隨著降雨強度的改變、雨滴大小的變化，對整體回波產生不同的影響，嚴重的情況是造成雷達電磁波無法傳遞至海面，使雷達無法進行波浪觀測，失去了運用雷達測波之目的。(2).大氣中雨滴粒子的存在會對電磁波產生衰減與散射，而這部份的影響會導致電磁波的強度衰減，失去其原本在距離上的觀測能力，導致觀測範圍縮小。(3).雨滴在撞擊水面後，會產生環波、冠狀水柱、水柱、穴洞與二次撞擊等現象，而這些對導致原本平靜的海面粗糙度變大。由海面波浪的回波特性討論上可知道，在運用雷達觀測波浪上，海面的粗糙

度對於整個回波特性上佔一個很主要的影響因素，因為降雨的影響，會導致原本相同海況下的海面粗糙度變大，相對海面波浪所產生的回波強度也會變強，影響到回波資料的後續分析，產生不正確的分析結果。(4)由於雨滴撞擊水面，導致水面下的水體產生擾動，而水下的擾動會使的水體本身黏滯力變大、水粒子較不易運動，將會將原本存在於水面處微小的重力波產生消滅，導致水面處的波動較平穩、海面粗糙度變小。

降雨對回波的影響上主要有以上四個現象，在降雨時刻，雨滴會同時存在於大氣中與撞擊水面，所以上述的四個現象是同時發生，這也將造成在降雨資料處理上較為複雜且難以分類。由上述之探討得知，降雨的對於雷達波的傳遞與海面上波浪特性的改變，都有深刻的影響，在雷達資料的分析上是不可忽略的重要因素。

三、降雨期間雷達訊號之研究

降雨對回波的影響會以類似雜斑的形式出現在影像之中，而這樣的影響會隨著降雨強度與雨滴大小產生不同的影響，在強烈降雨的情況下，雨滴所產生的回波訊號甚至會成為所有回波訊號中的主要部份(請參考圖 1 與圖 2)，而降雨的回波訊號對後續資料上會產生很大的影響。

實際觀測資料的分析結果如圖 3 所示，從觀測資料與現場實測波高的關係來看，未降雨資料是呈現一個正比的線性關係式而當觀測資料受到降雨影響時，雷達訊號的訊噪比(SNR)與實測波高的關係明顯集中在某一個範圍之內 ($0.2 < \sqrt{SNR} < 0.32$)，而在這樣的範圍內，波高的分佈在 50~500 公分之間，由訊噪比與實測波高的關係可看出，當觀測資料沒有針對降雨作分類時，所計算出的誤差會相當大，所以在觀測資料的分析上，必須先針對降雨影響作分類，才能降低對資料分析的影響。

在降雨資料的處理上，由於降雨及非降雨時刻的影像特性有很大差異，波高的分析結果也有很大的誤差，因此在觀測資料的處理上，本文將先判斷回波影像是否受到降雨的影響，再進一步針對有降雨的影像做降雨影響的降低。

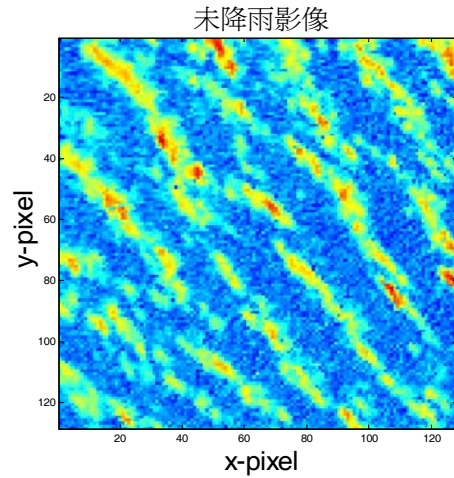


圖 1 非降雨期間的雷達回波影像

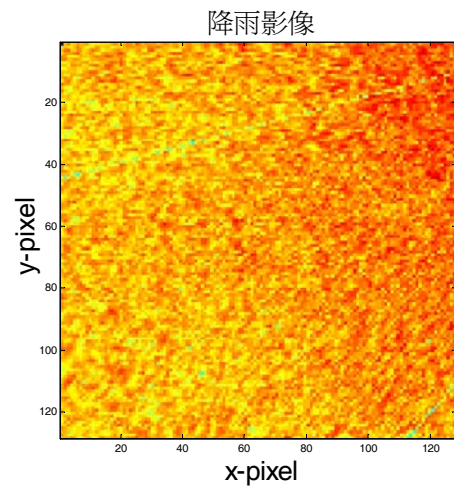


圖 2 降雨期間的雷達回波影像

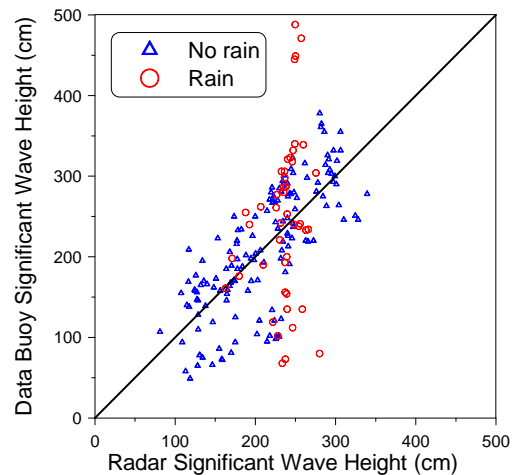


圖 3 降雨及未降雨雷達訊噪比與實測波高關係圖

3.1 區分降雨及非降雨影像的方法

降雨影像在統計特性上主要有以下兩個特性：(一)、造成回波影像的回波強度增強，相對的平均回波強度也較未降雨時刻來的大；(二)、降雨會造成像元間的變動不規則，導致影像像元值的變動範圍比未降雨影像像元值的變動範圍小。根據降雨影像上的統計特性，本文利用影像的統計特性作為降雨影像的分類標準。由於降雨及非降雨影像的平均水準卻相差很大，所以並不太適合直接用變異數或是標準偏差，作為比較資料的分散程度，而在處理相關問題上，多採用差異係數 (variation coefficient) 作為資料的比較依據，而差異係數的定義如(1)式所示，其中 σ_x 為資料 x 的標準偏差， μ_x 為資料的平均值。因此在統計參數的決定上，採用影像的平均值與差異係數作為判斷標準。有關平均值、差異係數與訊噪比的關係，如圖 4、圖 5 所示。由平均值與差異係數跟訊噪比之間的關係圖可看出，在降雨及非降雨的資料中，兩統計參數具有不同的分佈區域，而本文在資料的判斷上便是依據觀測資料的統計參數在分佈上的差異，決定出不同的門檻值 (threshold)，在同時考慮影像的統計參數計算結果，作為判斷資料是否受到降雨的影響。

$$CV = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (1)$$

在觀測資料的判斷結果上，在同時以平均值與差異係數作判斷，可有效將降雨及非降雨的資料作區分，在 50 筆具降雨的資料中，有 48 筆資料可從這個分類方式分離出來，降雨辨別的準確度達 96%。

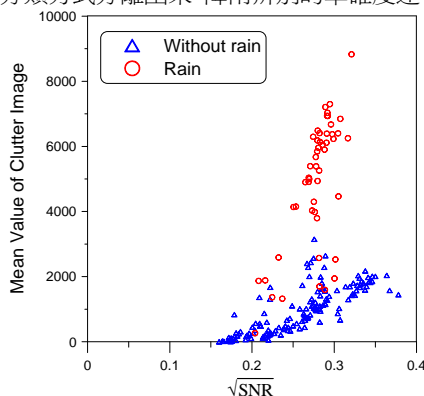


圖 4 觀測資料訊噪比與回波影像的平均值關係圖

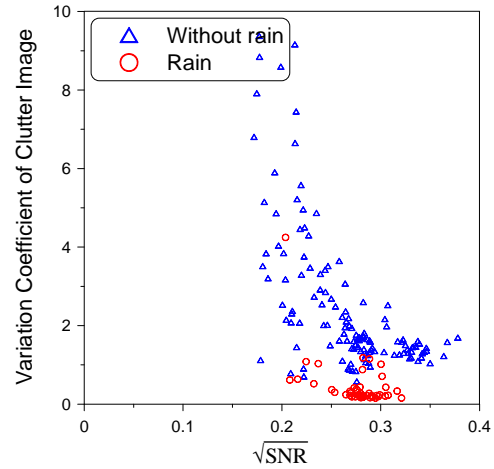


圖 5 觀測資料訊噪比與回波影像差異係數關係圖

3.2 頻域濾波於降低雨雜訊之應用

本文考慮波浪的雷達回波訊號與降雨的雷達回波雜訊在譜分析特性上的差異，希望藉由在空間頻率上兩者間不同的特性，作為降低雨水雜訊的依據。本文採用頻域濾波 (frequency domain filtering) 的方式來濾除雨水雜訊的影響，這個方法主要是利用降雨與波浪特性在空間頻率上的差異，來降低雨水雜訊的影響。頻域濾波在波浪影像的計算上，是將利用航海雷達所觀測的回波影像進行傅立葉轉換，討論在周波數 (wave number) 空間上，波浪與降雨訊號的分佈差異，設定截斷頻率 (cutoff frequency) 來濾除掉降雨的訊號，或者說是保留波浪的訊號，以達到濾波的效果，頻域濾波的步驟如圖 6 所示。

本文在利用頻域濾波濾除降雨雜訊的影響上，是採用一個帶通濾波 (bandpass filter) 的方式進行，在帶通範圍的截斷頻率設定上，主要是依據波浪的特性作判斷，在高頻部份的門檻值決定上，考慮到需要多少個資料點數才能描繪出一個波形的震盪，由前人研究結果 (吳, 2002) 顯示，至少需要 5 個點的資料才能約略表現出一個波形的震盪，依據本文所使用的航海雷達影像在空間解析度為 7.5 公尺進行換算，波長必須要大於 37.5 公尺的情形下，才能有較完整的波形描述，因此在空間頻率域上進行以下設定，當周波數大於 0.18 rad/m 時的資料，無法描繪出波浪的震盪，而予以濾除；在低頻部份的門檻值設定上，考慮到海面上波浪週期的特性，視海面上週期大於 20 秒的波浪在總波譜能量上佔

極小部份的能量，為發生機率極小的波浪條件，利用消散關係式可計算出此時的波長約 624 公尺，大約是在周波數小於 0.01rad/m 的情形，當觀測資料小於此門檻值，也予以濾除。

而在實際降雨觀測資料的分析上，考慮到實際海上波浪的變化情形是連續且平滑的，所以進一步在截斷頻率處設置一過渡區。在周波數空間上，在周波數介於 0.01~0.18rad/m 之間，為整個波譜中主要能量的存在範圍，在低頻部份，由實測資料發現，在周波數介於 0.01~0.034rad/m 之間的範圍內(約波浪週期在 11~20 秒之間)，波譜的能量分佈比例與一般波譜分析結果並不相似，範圍內存在有過多的低頻能量，必須進一步處理此範圍之內的波譜能量分佈，所以將這個範圍的波數空間內視為是一個過渡區，考慮由加權的方式降低此範圍內的能量分佈；在高頻部份，在周波數介於 0.15~0.18rad/m 之間的範圍內視為是一個過渡區，經由修正的濾波器如圖 7 所示。並將降雨時刻的觀測資料帶入上述的濾波方式之中，期望藉由頻域濾波的方式降低雨水雜訊對回波影像的影響，使濾波後的資料也能準確的進行波浪參數推算。

實際的分析結果顯示，發現這樣的濾波方式對於降低雨水雜訊影響的效果並不理想，進一步探討資料觀測時刻的氣候條件，由於所運用的觀測資料主要都是發生在颱風來臨的前後時段，所以觀測資料的時間天氣狀況十分不穩定，加上颱風期間長伴隨有大量的降雨，因此造成分析資料上常是雨水訊號大於波浪訊號的情形，所以進一步考慮分析資料中降雨及波浪之間的能量關係，特別針對觀測資料中，還可判斷出波浪特徵的資料進行濾波，發現在 50 筆觀測中約有 8 筆資料仍可經由波譜判斷出波浪資訊，將此 8 筆資料進行濾波處理後，所獲得的波高計算誤差與為未降雨資料的誤差相近。

由於所分析的觀測資料多在颱風期間，降雨的特性屬於暴雨的狀況，因此在將降雨資料修正的修正成果並不是非常良好，約佔降雨資料的 16%，但是在台灣地區的其它降雨系統中，如東北季風或梅雨季節，這些狀況的降雨強度並不像颱風其間那樣強烈，因此利用更長期的觀測資料進行分析，可望能提高可修正資料的比例。

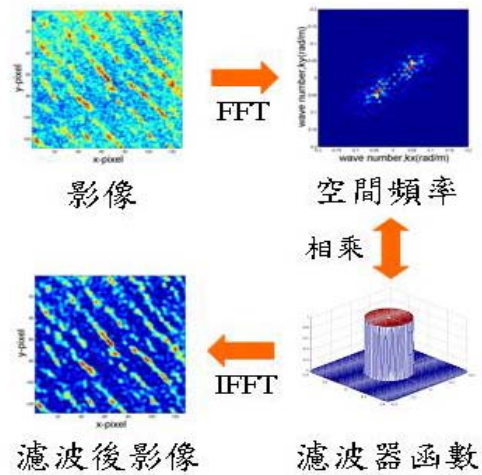


圖 6 頻域濾波流程圖

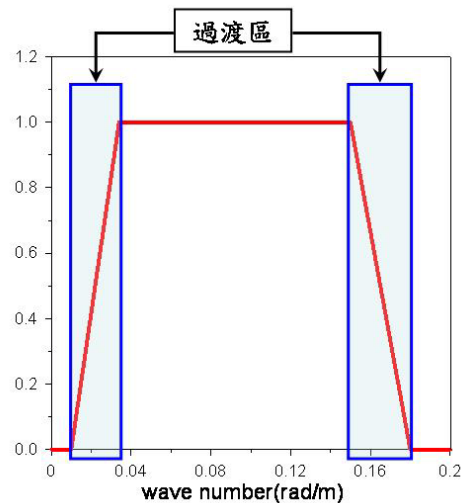


圖 7 修正後濾波器函數

四、結論與建議

本文主要研究降雨雜訊對於航海雷達測波結果的影響，以提升雷達測波的準確度。根據本文的綜合分析與討論後，可歸納得以下幾點結論與建議。

本文在降雨資料的判斷上，利用回波影像的統計參數-平均值與差異係數作為降雨及非降雨資料的判斷標準。在降雨及非降雨的資料中，平均值與差異係數跟訊噪比之間具有不同的分佈區域，本文便是依據觀測資料的統計參數在分佈上的差異，決定出不同的門檻值(threshold)，作為判斷資料是否受到降雨的標準。由資料的判斷結果來看，平均值與

差異係數可判斷影像是否受降雨影響，其判斷準確度可達 90% 以上。

利用頻域濾波的方式降低降雨對回波影像的影響，採用一個帶通濾波器進行濾波，並考慮波譜能量的分佈，在周波數介於 $0.01 \sim 0.034 \text{rad/m}$ 與 $0.15 \sim 0.18 \text{rad/m}$ 之間的範圍內設定一過渡區。由分析結果來看，此分析方法可濾除部份影像中降雨的影響，在降雨資料中，約 16% 的降雨資料轉變為有效的觀測資料。

後續在航海雷達的研究上，可探討利用降雨回波強度或是降雨對於電磁波訊號衰減的特性，進一步將航海雷達運用在計算觀測區域的降雨強度。

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「應用航海雷達於空間波場觀測之研究(1/3)」(編號為 NSC 92-2611-E-006-032)之研究成果，承蒙國科會之贊助使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

- 1.熊雲嵐(1991)"實用船舶雷達"，財團法人徐氏基金會。
- 2.謝金原(1997)"太空微波遙感與探測原理及其運用"，科學知識，第 46 期，17-24 頁。
- 3.吳立中(2002)"二維小波轉換應用於波場影像分析之研究"，國立成功大學碩士論文。
- 4.Crombie, D. D. (1995) "Doppler spectrum of sea echo at-13.56 MHz," *Nature*, 4459, pp. 681-682.
- 5.Long, M. W. (1974) "On a two-scattered theory of sea echo," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-22, pp. 667-672.
- 6.Moore, R. K., Y. S. Yu, A. K. Fung, D. Kaneko, G. J. Dome, and R. E. Werp (1979) "Preliminary study of rain effects on radar scattering from water surfaces," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. OE-4, No. 1, pp. 31-32.
7. Moore, R. K., A. Mogili, Y. Fang, B. Beh, and A. Ahamad (1997) "Rain measurement with SIR-C /X-SAR," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, No. 2, pp. 280-293.