

利用 X 頻脈衝式微波雷達偵測近岸碎波位置

李明靜¹ 呂珍謀² 賴泉基³ 李明憲⁴

摘要

本文利用脈衝式都卜勒微波雷達於台北縣貢寮鄉福隆村雙溪河口，進行近岸波浪之觀測。由於同一測線上，雷達回波會因雷達照射區域內目標散射物之特性不同而有不同的特徵，利用此特性，分析雷達回波之雷達截面積、都卜勒頻率偏移量、都卜勒頻帶寬度於測線上之不同特徵，便可對近岸波浪進行觀測。文中利用各測線上觀測所得的結果內插出雷達掃描的範圍，並將各測線上出現不同特徵處與現場實地的環境相互對照，最後將各測線上產生最大雷達截面積與最大都卜勒頻率偏移之位置依次連接，便能將近岸海域中波浪發生碎波之位置，直接標定於空間座標系統中。結果顯示，此系統適合於量測近岸碎波帶之範圍，藉此可進一步了解近岸區海氣交互作用，同時對現場調查人員及儀器設備而言，較無發生意外之顧慮。

關鍵詞：都卜勒微波雷達、都卜勒頻率偏移量、雷達截面積、碎波

1. 前言

波浪碎波的過程在海面與空氣間的交互作用、表面波浪的消散、近岸區域產生流動…等現象中，均扮演著一個重要的角色。波浪在碎波後，於碎波帶內形成暗流，即所謂的沿岸流。舉凡戰爭期間兩棲部隊之登陸作業；於近岸從事海上活動時，人員被離岸流沖至外海而慘遭滅頂的意外；沙灘海岸上，沿岸漂沙受沿岸流之運送，可使附近港口淤塞，而無沙源補給之處，則發生波浪淘沙現象，而造成海岸侵蝕，此範圍內所有浮游物如船舶、舢板、浮水、油跡、污染物、淺海魚群、熱污染後之污水…等問題，皆與波浪之碎波有關。因此碎波的位置在海洋環境科學、港灣工程、海岸工程、淺海養殖、海濱休閒…等領域上都占有舉足輕重的地位。

以往，曾經有各種不同的方式成功地進行碎波的觀測，如測量學上的角度距離交會法、海面高程量測法(sea surface elevation measurement)及空泡率量測法(void fraction measurement)，但一般而言，遙

測才是對於觀測碎波在空間上分布問題中，比較可行的技術，其中錄影觀測是最常用的遙測技術，如 Monahan (1971)、Stockdon and Holman (2000)等等學者都曾以觀測海面上白浪(whitecaps)的產生做為判斷碎波的依據。其他尚有應用紅外線量測、水下聲學、合成孔徑雷達影像(synthetic aperture radar, SAR)、微波雷達等技術觀測碎波。然而，錄影觀測易受天候或環境變數影響外，其他方法因受量測機制的問題，大多研究範圍侷限在深海碎波觀測。故本研究應用脈衝式都卜勒微波雷達遙測系統，藉由大範圍且即時地進行現場的觀測作業，理解波浪在雷達回波訊號上的變化，進而偵測碎波於近岸區發生的位置，期望可正確地偵測出碎波帶發生的範圍與現象，進而做為探討近岸區海氣交互作用研究之依據。

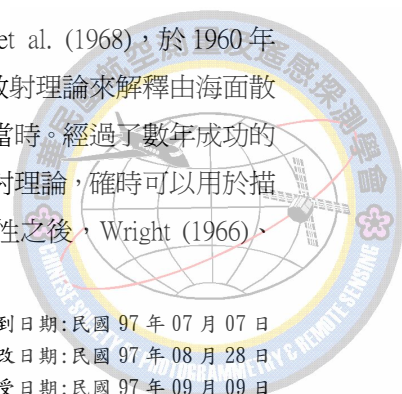
Wright (1968)及 Bass et al. (1968)，於 1960 年代，以首度引用複合表面散射理論來解釋由海面散射的微波特性，而名聞於當時。經過了數年成功的研究，證明出複合表面散射理論，確時可以用於描述海表面所散射的微波特性之後，Wright (1966)、

¹致遠管理學院電機工程學系助理教授

²成功大學水利及海洋工程學系副教授

³成功大學水利及海洋工程學系研究教授

⁴成功大學水利及海洋工程學系研究生



Wright and Keller (1971)及 Plant and Wright (1979)，於實驗波浪水槽的研究中，證明了結合複合表面散射理論與布拉格散射理論可以更明確地描述從海面回散的微波特性。Larson and Wright (1975)、Plant and Wright (1977、1980)及 Lee (1977)，更於風浪水槽中，觀察到回波的都卜勒頻譜中，會經常性地出現布拉格共振線，並利用此現象來研究風浪的機制，如風浪的成長、相位速度、風浪間的交互作用等。

經由賴泉基 (1998)及李明靜 (2003)共同研究下，進一步以實驗驗證顯示，在河川中，雷達回波都卜勒頻譜同樣存在著布拉格共振現象，且因河川水面波紋為公分級尺度，因此發展了現今使用的波長為 3.2 公分之 X 波段的脈衝式都卜勒微波雷達系統，且微波的頻率約為 9.36GHz。

Jessup (1990)及 Jessup et al. (1991)提出分成兩部分的詳細的研究報告，關於將海表面由碎波引起的微波散射，利用各種明顯區別的條件來量化此一散射的微波，而第一部份中主要的目標是調查由碎波所回散之微波的特性及來源，並且判斷使用微波的量測方法來辨識各別的碎波事件，是否可為一個可靠的量測法。而第二部分則利用第一個部份中，最可靠的方案提出風與波浪狀態的關係。第一個部份中，同時利用微波量測與錄影的方式來驗證所得之碎波事件。

Haller and Lyzenga (2003)提出以正規化之雷達截面積(Normalized radar cross section, NRCS)來偵測碎波，並與錄影的記錄做比對，顯示當最大 sea spikes 發生時，碎波事件比對的相關性 r^2 值可高達 0.97。

2. 微波雷達偵測碎波位置之原理

脈衝式都卜勒微波雷達偵測碎波位置之原理，為雷達向目標物發射電磁波，而目標散射物體在測線上的雷達回波中會因雷達波束照射區域內，散射性質的不同，而產生不同的回波特性，利

用此一方法，即可偵測碎波在實際海面上的位置。雷達電磁波入射水表面的情形，如圖 1 所示，當雷達發射之電磁波入射水面時，若水面波波長為入射之電磁波波長的 $n/2$ 倍時，因雷達波與水面波間的交互作用產生了布拉格散射，此時之水面波可稱為布拉格共振波。將回波訊號以頻譜分析處理之後，於回波的都卜勒頻譜中產生布拉格共振。

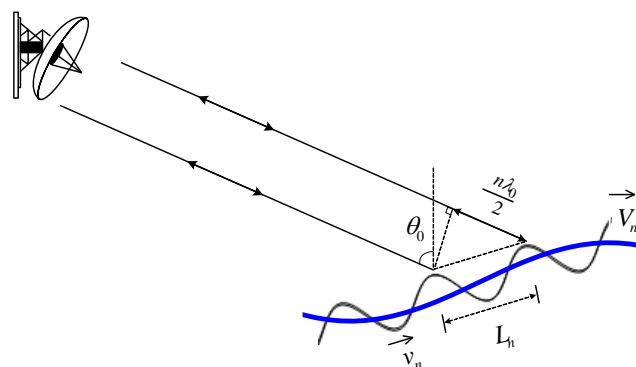


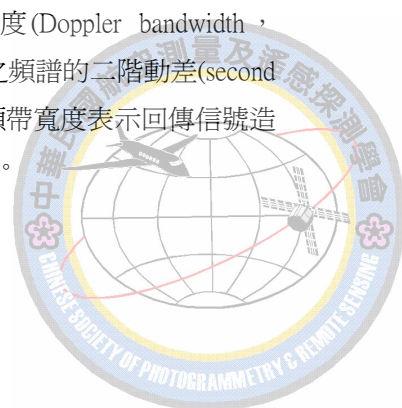
圖 1 雷達波入射水面布拉格共振波示意圖

2.1 雷達回散信號的特性

由雷達所發射之電磁波，經由水表面散射而由天線所接收的回散信號，會經由快速傅立葉轉換(Fast Fourier transform, FFT)的方法，進行頻譜分析的計算。而回波信號的特性則與其能量頻譜中的動差(moment)有關，因此若要對回波的信號加以分辨，就必需各別估計其能量頻譜的動差。

首先定義頻譜中的零階動差(zeroth moment)，零階動差即為由目標物體所散射回的回波功率，與目標物的強度有關。將頻譜能量以零階動差做正規化，則此正規化頻譜的一階動差(first moment)即為平均都卜勒頻率偏移(Doppler frequency shift, DFS)，而都卜勒平均偏移量則與雷達波束照射區域內散射物質(scatterer)的功率權重視線移動速度(power weighted line-of-sight velocity)有關。

都卜勒頻譜頻帶寬度(Doppler bandwidth, DBW)，為以功率正規化之頻譜的二階動差(second moment)開根號，都卜勒頻帶寬度表示回傳信號造成散射質速度變動的範圍。



2.2 雷達照射面積與碎波型態之關係

雷達照射面積與碎波型態之關係雷達的電磁波若由海面上尖銳度較大的波浪或碎波所散射回來，則在雷達回波上會有短延時且突然躍升的情形，稱之為“sea spikes”，如圖 2 所示，圖中為時序列的都卜勒頻譜圖，每條線表每 0.25 秒計算所得的頻譜圖，總共進行 15 秒，圖中所指之處為有極端值產生的地方，其平均都卜勒偏移量約 250Hz(約 2.7m/s)。

Jessup et al.(1991) 進一步提出以 Ku-band(14GHz)連續波雷達所測得之大尺度波浪碎波的強度及其平均都卜勒頻率的方法，來對“sea spikes”進行定量的辨識。對於特定形態的碎波，其散射的幾合是與在雷達電磁波照射區域內隨著碎波波形急速變化的波相有關，如圖 3 所示。圖中，若波峰的前緣面接近雷達照射區 A 時，局部的雷達電磁波入射角會驟減至最小為 θ_A ；若在波峰的後緣面即將通過照射區 B 處時，局部雷達電磁波的入射角 θ_B 則會增加。Jessup et al. (1991) 利用 Ku-band 雷達與錄影影像同時進行的方式來做比較，發現在回波雷達截面積中與波浪波峰尖銳前緣面有關之突然躍升的部份，其波浪最終將瓦解而形成白浪。若波浪的斜率使得雷達電磁波局部的入射角減少至 25° 或更小時，波浪波峰的前緣面將有如鏡面一般，使得入射的雷達電磁波產生鏡射的現象，進而使得碎波在雷達回波的雷達截面積(Radar cross section, RCS)中有突然躍升的 sea spikes。

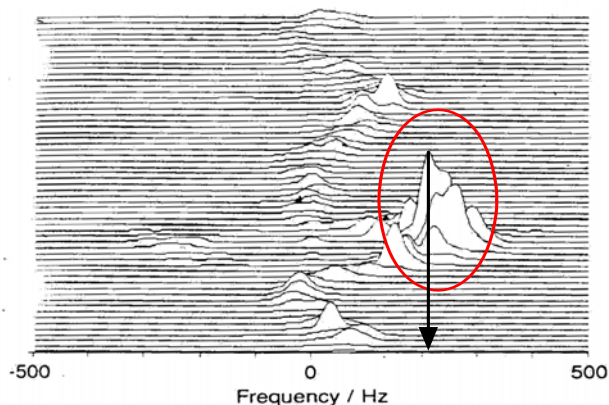


圖 2 回波時序列都卜勒頻譜(Jessup et al., 1991)

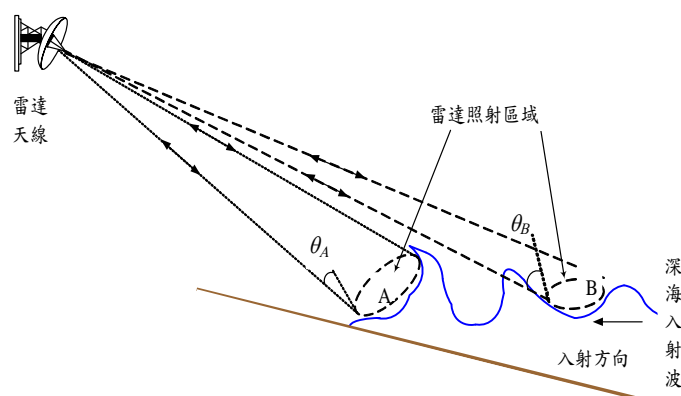


圖 3 波浪局部斜率與雷達照射面積示意圖

2.3 碎波位置的判定

了解碎波在雷達回波的雷達截面積特性之後，再來就是如何判定碎波的發生位置，如圖 4 所示，圖 4(a)為雷達截面積與時間序列的關係，共有 A、B、C、D、E 五個時間點有產生 sea spikes，並標記有各自發生碎波的時間；圖 4(b)為平均都卜勒頻率偏移量與時間序列的關係，圖中標線位置則為碎波後產生白浪的時間；圖 4(c)為都卜勒頻帶寬度與時間序列的關係。

Jessup et al. (1991) 利用圖 4 配合同步錄影之影像來觀測同一測點上，海面上波浪隨著時間變化的情形，並得到下列結論：

由圖 4(a)與(b)中可看出，在回波雷達截面積中 sea spikes 的發生處，幾乎與局部最大之平均都卜勒頻率偏移量同時發生，但局部最大之平均都卜勒頻率偏移量會比較早發生。

由圖 4(b)與(c)中可看出，與雷達截面積中 sea spikes 有相關的最大都卜勒頻帶寬度的發生處，都比雷達截面積中的 sea spikes 還延遲 0.25~0.5 秒發生。

由圖 4(a)與(b)中之白浪發生時間比較可看出，雷達截面積中較大的 sea spikes 發生時，並不全然有白浪的產生。相反地，由圖 4(c)與(b)中之白浪發生時間比較可看出，伴隨著有白浪發生的雷達截面積上之 sea spikes，會與最大的都卜勒頻帶寬度幾乎同時發生。



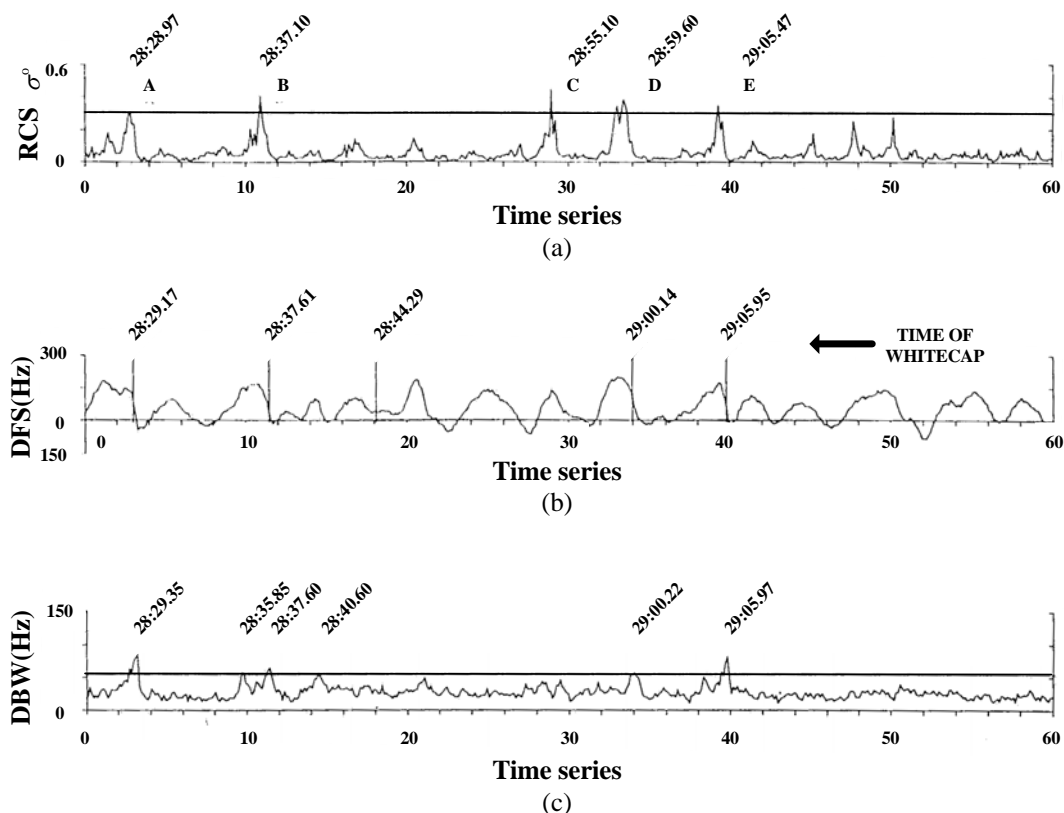


圖 4 碎波處之時序列雷達回波特徵(Jessup et al., 1991)：(a)雷達照射處目標物回波雷達截面積(RCS)隨時間之變化；(b)雷達照射處目標物回波都卜勒頻率偏移量(DFS)隨時間之變化；(c)雷達照射處目標物回波雷達都卜勒頻帶寬度(DBW)隨時間之變化

因此，綜合以上幾點若欲以雷達來判定碎波的位置，必需找出局部平均都卜勒頻率偏移之最大值，再與雷達回波中的雷達截面積相對應比較，若同時伴隨著有較大的 sea spikes 發生時，則表示該處即為碎波或是波形極尖銳的位置。另外，若有最大的都卜勒頻帶寬度發生時，則表示該處有白浪產生。

3. 觀測設備與方法

3.1 雷達設備

雷達依雷達波發射形式通常可分為脈衝雷達(Pulse Radar)與連續波雷達(Continuous-wave, CW)，前者最大的優勢在於其可同時偵測多個目標。本文使用之雷達為一 X 頻脈衝式都卜勒微波雷達，其規格如表 1 所示。

3.2 實驗地點與方法

本文主要的目的是將脈衝式都卜勒微波雷達應用在偵測近岸發生碎波的位置，因此觀測地點需選擇於海岸附近，另考慮於冬季時期，台灣東部海岸受到強烈的季風影響，風浪特性較為明顯，故選擇以台北縣貢寮鄉福隆村雙溪出海口之福隆海水域場做為本文觀測之地點。

福隆地區位於雙溪河出海口，有著內河外海的獨特地形，如圖 5 所示。雙溪上游之泥沙，被帶至福隆附近時，受到一東南走向、綿延 3 公里的天然沙嘴阻隔，因水流不大，無法切割沙嘴，並未直接入海，因此在出海口沉澱堆積，區分了波濤不興的雙溪出海口(內河)及福隆外海，而其間有一座連接內河與外海的拱橋。

由於脈衝式都卜勒微波雷達系統具有可即時量測大範圍流場的優點，其最大量測距離可達 2



公里。爲了得到大範圍完整的流場資訊，因此於雷達測線的視線方向上，應盡量避免存在有不必要的結構物，故雷達天線應架設於所欲量測範圍附近內之制高點處，另一方面也爲了量測的準確性，測量時天線之俯角應盡可能小於 10° 。

本文所選擇的天線架設位置爲龍門河濱公園內，一處靠近出海口，且位於該區域間位置最高的觀海涼亭。由 GPS 所得之座標爲東經 $121^\circ 56'28.08''$ 、北緯 $25^\circ 01'15.12''$ ，如圖 6 所示。圖 6(b) 爲觀海亭天線架設情形，圖 6(a) 爲由觀海亭處所觀察到沙嘴處的情況，圖 6(c)、(d) 則爲拉近相機鏡頭所觀察到局部沙嘴與波浪間相互作用情形，雷達天線距水面的垂直高度約爲 16 公尺。

由於近岸附近之水流會受到複雜的波浪碎波影響，且又位於雙溪河出海口處，不但直接受到雙溪河流動的影響，更受海水潮汐的作用，因此整個近岸附近之流況顯得更爲複雜，若欲增加量測的精度，則必須選用多條測線來進行觀測作業。另外，又需考慮雷達系統量測的即時性，若選用過多的測線，會使得整個觀測作業的時間增長，故不宜選取過多的測線來進行量測。爲了兼顧以上兩點之考量，我們選擇使用 10 條測線，且設定爲每 16 個脈衝取一次平均，以正東方爲 0° 劃分測線，依次爲 50° 、 45° 、 40° 、 35° 、 30° 、 25° 、 20° 、 15° 、 10° 、 5° ，每條測線距離解析度設定爲 15 公尺，其最大量測距離爲 1 公里，如圖 7 所示。

表 1 脈衝式都卜勒微波雷達詳細規格表

Transmitted power 傳輸功率	-----6 Watts
Frequency 頻率	-----9.36 GHz
Wavelength 雷達波長	-----3.2 cm
Pulse Length 脈衝長度	-----25、50、100、200 nsec
Range Resolution 距離解析度	-----3.75、7.5、15、30 m
Pulse Repetition Period (PRP) 脈衝重複週期	-----25.6 μ sec
A/D Sample Frequency 擷取頻率	-----20 Mhz
Output Low Pass Filter Bandwidth 低頻濾波頻寬	-----20 Mhz
Number of Pulse Coherently Added 同步發送脈衝數	-----16、32、64
Digitizer 數位取頻器	-----12 bits
Antenna Gain 天線增益	-----33 dB
Two-Way Half-Power Beamwidth 半功率雷達波束角	----- 2.6°





圖 5 觀測地點—雙溪出海口福隆海水域場

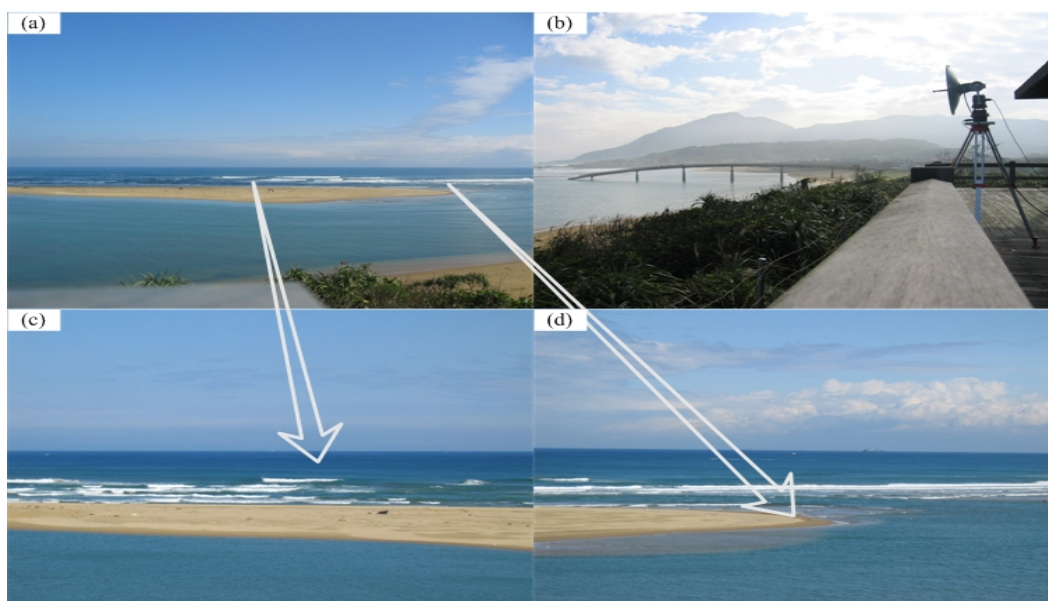


圖 6 龍門河濱公園觀海亭天線架設情形

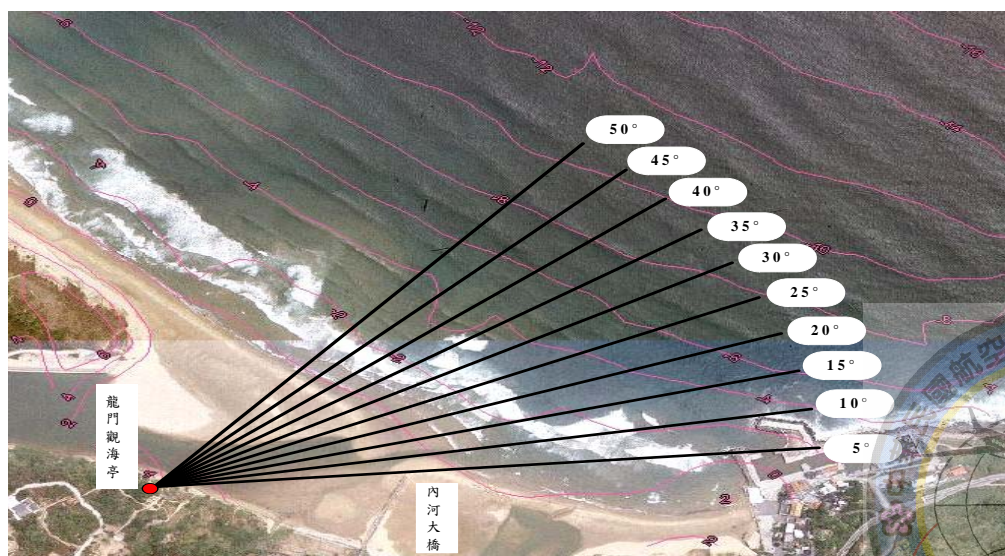
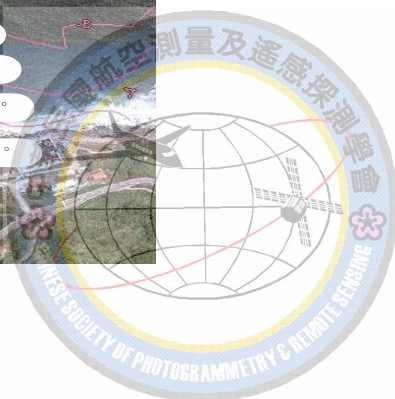


圖 7 龍門河濱公園處之測線配置情形



3.3 資料分析

完成一組觀測資料所需的時間前後約 20 分鐘，其中包含設定參數及調整天線方位的時間，因此規劃每 25 分鐘進行一次觀測，共取得 35 筆觀測資料，並分別計算目標物回波之都卜勒頻率偏移量、都卜勒頻帶寬度及雷達截面積於每條測線上的最大值，並計算其在每個雷達波束照射處，所有測線上同一位置的平均值。

由於實測水深地形所測得的資料，其所使用的座標系統為二度分帶新國家座標系統 TWD97 的地理座標系統，所以必需將所有得座標資料轉換成經緯度之後，再與 GPS 所得之座標一同轉換成 GRS80 座標系統，如此才可正確地將 GPS 資料與實測的水深資料投影在同一個座標平面上。座標系統建立之後，於雷達掃描的範圍內建立二維之格網，網格的大小定為 15 公尺 × 15 公尺，即雷達波束於空間上的距離解析度。

網格建立完成之後，將量測資料檔中，每條測線上所記錄的等深線地形及雷達截面積等資料，以線性內差的方式內插至網格點上。將十條測線上各別之最大回波雷達截面積於空間中之連線與最大回波都卜勒頻帶寬度於空間中之連線分別描繪於地理座標系統中，則兩條連線間的位置，即為碎波的發生位置。

3.4 波浪條件

由於福隆海水域場處並無任何氣象站的資料可以引用，因此由中央氣象局申請與福隆海水域場最為接近之測站的觀測資料(龍洞測站)，利用龍洞測站所得之時波資料，反推深海波浪之波高及波長等深海條件，並將所得結果做為福隆海水域場的深海波浪條件。

再者，根據 Battjes (1974) 提出碎波相似參數 (surf similarity parameter, ξ_o)，以判別碎波型態；碎波相似參數可以深海波波高 H_o 來定義之

$$\xi_o = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_o/L_o}} \quad (1)$$

式中， $\tan \beta$ 為底床坡度， L_o 為深海波波長，而碎波型態之判別如表 2 所示。

表 2 碎波相似參數

碎波型態	碎波相似參數 ξ_o
崩波型碎波 (spilling breaker)	$\xi_o < 0.46$
捲波型碎波 (plunging breaker)	$0.46 < \xi_o < 3.3$
湧波型碎波 (surging breaker)	$\xi_o > 3.3$

另外，由「雙溪河口流向變化影響機制及主槽流路長期穩定對策之研究」一研究計劃中的現場調查資料，計算得雙溪出海口福隆海水域場之內灘坡度為 0.015，利用每時段之深海條件與內灘坡度等資料，推算福隆海水域場近岸處的碎波相似參數，計算的結果與龍洞時潮資料列於表 3 中。表中計算所得之碎波相似參數值，均小於 0.46，因此得知現場波浪的碎波型態屬於崩波(spilling breaker)。此類型與 Jessup et al. (1991)所提出適用的碎波型態相符合，故應用脈衝式都卜勒微波雷達系統，來偵測此處海面的碎波發生位置應為可行。

4. 實驗結果分析

4.1 雷達截面積

圖 8 為於 2005 年 01 月 22 號 15 時 20 分所偵測各測線上之雷達截面積隨空間中雷達波束照射處距離的變化曲線。

雷達截面積(RCS)為已知目標物(散射體)向雷達接收天線方向散射電磁波的能力，由此可知回波雷達截面積與目標物有關，且雷達截面積與天線至目標物間距離的四次方成正比。與利用回波能量來做目標物分析的方法比較起來，因雷達所發射電磁波的能量是與天線至目標物間距離的四次方成反比，因此目標物距離越遠，所接收到入射電磁波的能量是相對地非常微弱的，更別提此一微弱電磁波

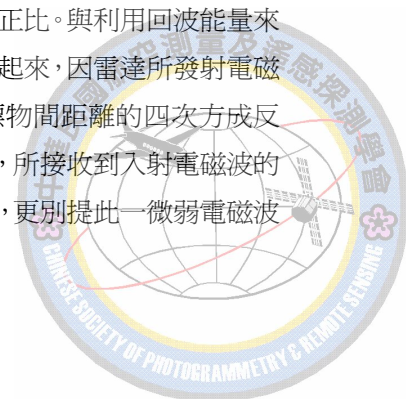


表 3 波浪條件推算

龍洞浮標逐時波浪觀測資料
 位置：25°05'46"N 121°55'24"E； 龍洞遊艇港東南東方 3 公里水深(h)32 米處
 儀器型式：
 觀測時間：10 分鐘
 yyyyymmdd ：西元年月日
 (Hn,Tn,Dn)：當日第 n 時之示性波高，週期及波向
 波高(H)單位：公分；週期(T)單位：0.1 秒；波向單位：度
 時間不連續，表示缺觀測資料。
 時間：2005 年 1 月~2005 年 2 月

yyyy/mm/dd hh:mm	H	T	h	L ₀	H ₀	ξ ₀
2005/01/22 10:00	130	66	32	67.954	131.439	0.108
2005/01/22 12:00	127	65	32	65.910	128.208	0.107
2005/01/22 14:00	144	64	32	63.898	144.836	0.099
2005/01/22 16:00	158	61	32	58.048	158.493	0.091
2005/01/23 10:00	99	51	32	40.576	99.190	0.096
2005/01/23 12:00	139	58	32	52.478	139.267	0.092
2005/01/23 14:00	206	67	32	70.028	206.082	0.087
2005/01/23 16:00	245	70	32	76.440	245.048	0.083

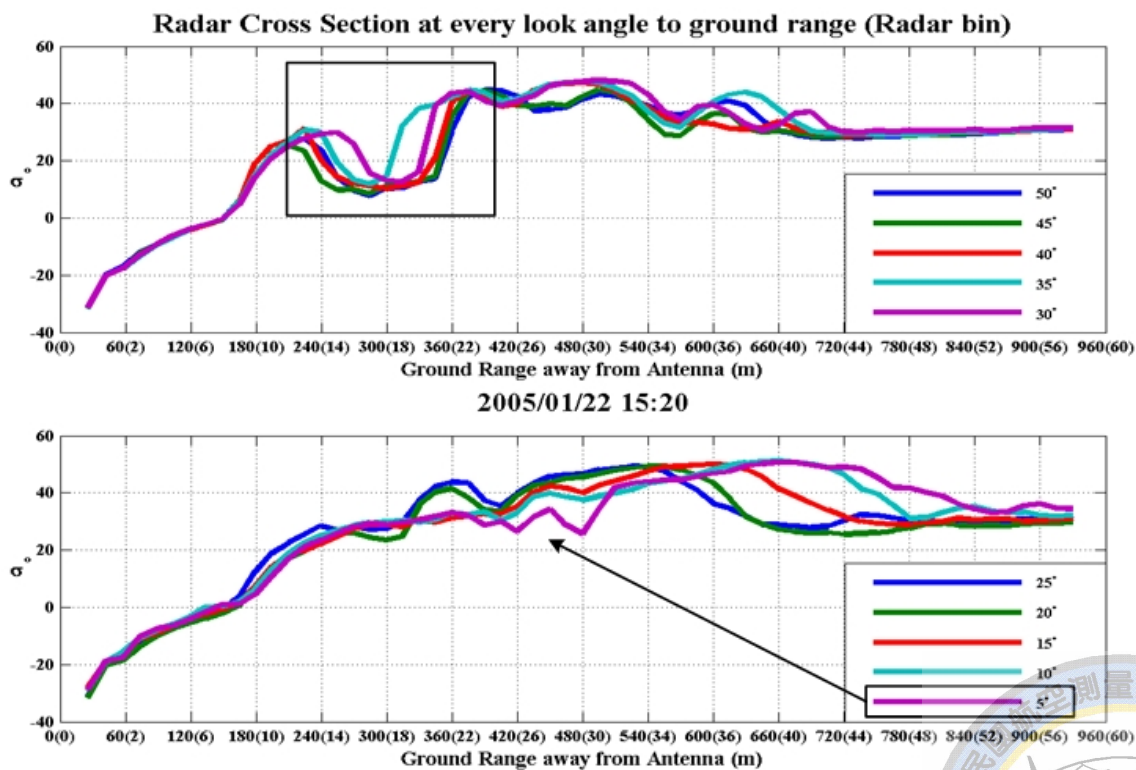
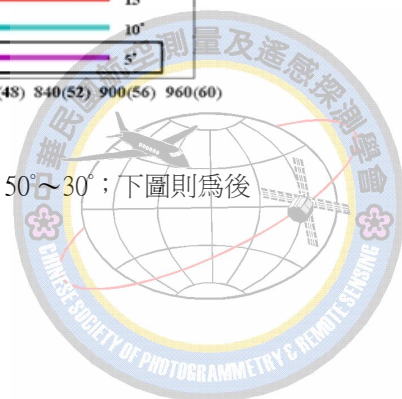


圖 8 雷達截面積於空間中之變化；上圖為前五條測線的變化情形，其測線角度為 50°~30°；下圖則為後五條測線的變化情形，其測線角度為 25°~5°



又由目標散射物身上反射至天線端的回波能量。因此，利用回波雷達截面積來進行分析，對整個雷達掃描範圍內所有位置，均可進行明確地計算。

Jessup et al., (1990)提出，由於碎波或是波形尖銳度極高的波浪，因鏡射的效應，使得其雷達的回波於回波雷達截面積中有突然躍升的情形發生，稱之為 sea spikes，利用此現象即可偵測實際海面上，雷達測線上發生碎波的位置。因此，圖 8 中若於測線上有突然躍升的現象出現，則表示該位置處，波浪的波形尖銳，為可能發生碎波之位置。

觀察各測線上回波的雷達截面積，隨時間的變化情形，可歸納出下列共通的特點：

在測線上與雷達天線之地面距離 240~360 公尺間，回波雷達截面積有一明顯的下降區間，探究其原因為，雷達截面積只與目標散射質有關，利用雷射測距儀，量測圖 6 中天線位置至沙嘴間的距離約 280 公尺，由於測線上 240~360 公尺間雷達波束所照射到的目標物為沙嘴，其他部份皆為水面，由於水與沙的表面粗糙特性明顯不同，故當雷達波束照射區域內之組成物為沙洲時，其在測線上所偵測得之回波雷達截面積便產生下降的現象。

最後一條測線，也就是測線角度為 5° 的測線，在空間上距離雷達天線約 360~480 公尺處，其回波的雷達截面積變化情形與其他九條測線相比較，有明顯不同。量測由天線位置至內河大橋間的距離約 380 公尺，由於最後一條測線的雷達波束，會於 360~480 公尺處遇到內河大橋，因橋體本身的結構與水體不同，因此於 360~480 公尺間，雷達截面積上才會有此明顯的差異。

4.2 都卜勒頻率偏移

圖 9 為於 2005 年 01 月 22 號 15 時 20 分所偵測各測線上的回波都卜勒頻率偏移隨空間中雷達波束照射處距離的變化曲線。

都卜勒頻率偏移量(DFS)所代表的另一個意義便是，若以同一種波段，波長相同的雷達來偵測目標物，所測得的都卜勒頻率的偏移量便可換算成目

標散射物質相對於雷達接收天線的接近或遠離的視線移動速度。

由於造成波浪發生碎波的原因甚為複雜，其一，因波浪由深海傳遞至淺海時，由於海底底床的變化，使得深海入射波浪的波長 L 變短，波高 H 增高，因此波形之尖銳度漸增。於近岸處時，會因波峰水分子流速等於波浪的相位速度或其他複雜的因素，使得波形無法保持而向前傾倒成為碎波。

因此，根據前述理論說明，圖 9 中，局部最大都卜勒頻率偏移量便是海面上可能發生碎波之位置。比較回波都卜勒頻率偏移變化曲線與後五條測線之回波都卜勒頻率偏移變化曲線，如圖 9 所示，可明顯地發現兩者於空間中的變化趨勢有很大的差異。上半部前段五條測線於空間中之變化情形，其趨勢於五條測線間大致呈平行的狀態；然而，後段五條測線變化之趨勢卻有往測線遠端偏移的情形。由圖 10 中可看出，由於前段五條測線配置的方向，正好與當時季節風浪的入射方向正交，而後段五條測線所配置之方向依序則與當時季節風浪之波向線間所夾的角度越來越大，故分析所得的結果顯示，隨著測線方向與波向線間的夾角越大，相同的變化趨勢便會越往測線的遠端偏移。

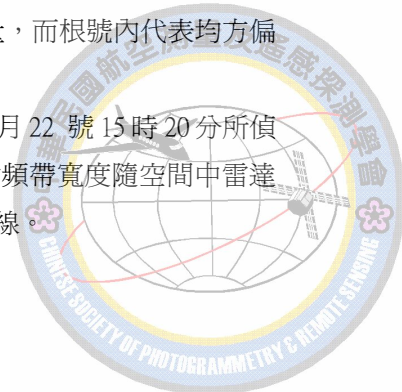
4.3 都卜勒頻帶寬度

都卜勒頻帶寬度(DBW)在雷達回波訊號處理上的定義為，以功率正規化後之回波頻譜的二階動差(second moment)之平方根，若以數學式來表示則如下式所示。

$$DBW = \frac{PRF}{1024} \sqrt{\frac{\sum_{m=-512}^{512} (m - \bar{m})^2 S_m}{\sum_{m=-512}^{512} S_m}} \quad (2)$$

其中 PRF 為雷達的脈衝重覆頻率， m 為頻譜中頻率的指標， \bar{m} 為頻譜中發生平均頻率的指標， S_m 為正規化頻譜的量，而根號內代表均方偏差(mean-square deviation)。

圖 11 為於 2005 年 01 月 22 號 15 時 20 分所偵測各測線上的回波都卜勒頻帶寬度隨空間中雷達波束照射處距離的變化曲線。



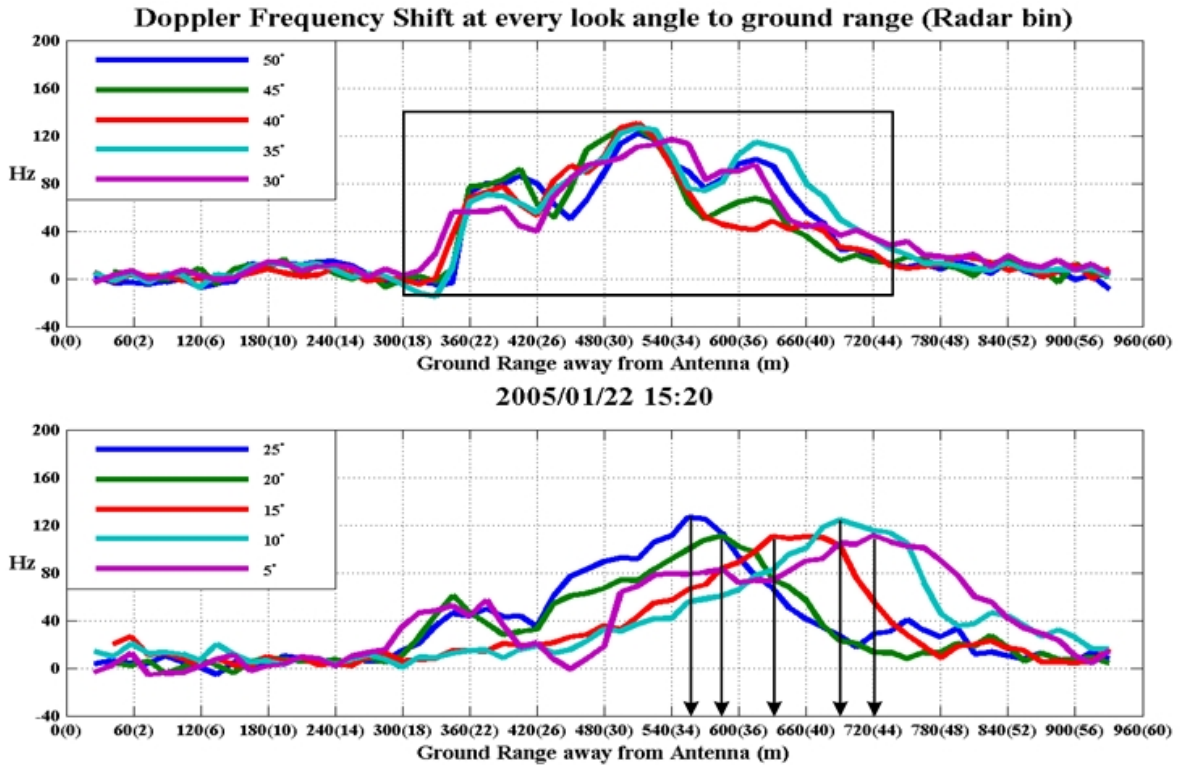


圖 9 都卜勒頻率偏移於空間中之變化；上圖為前五條測線的變化情形，其測線角度為 50°~30°；下圖則為後五條測線的變化情形，其測線角度為 25°~5°

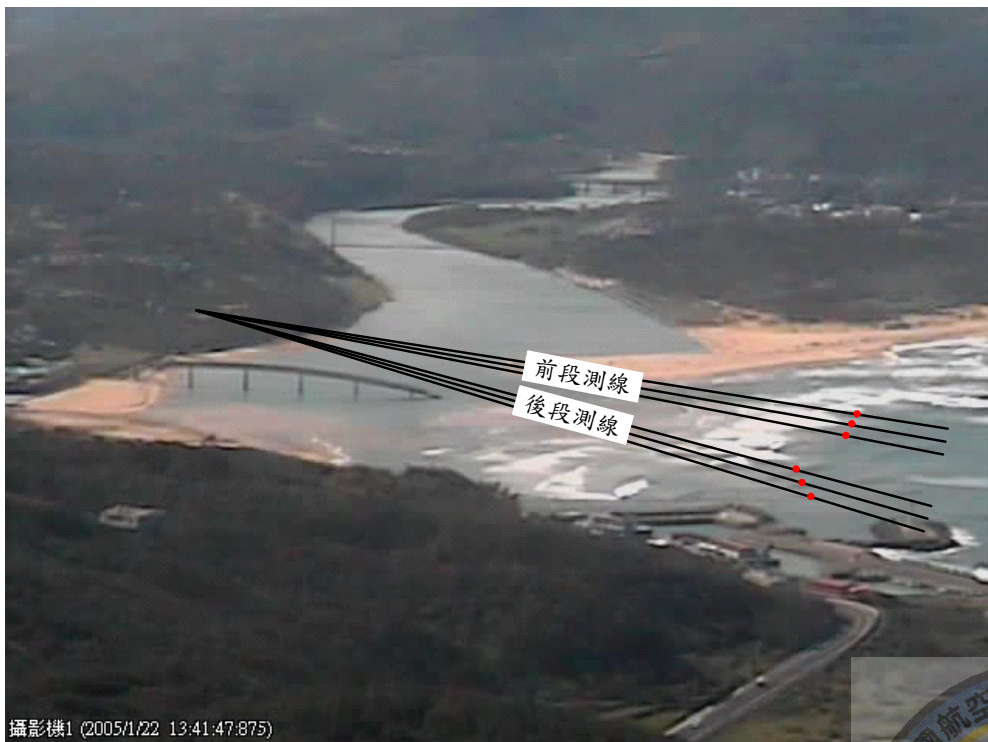


圖 10 測線方向與波浪方向之關係示意圖



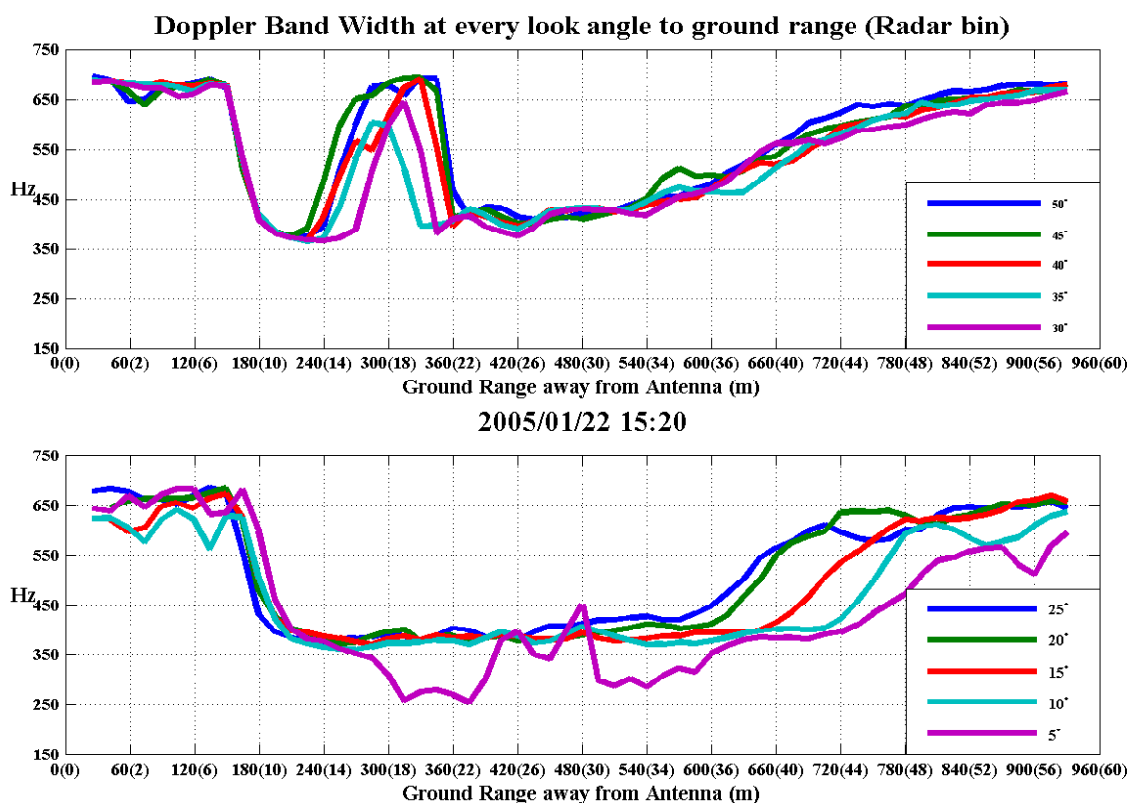


圖 11 都卜勒頻帶寬度於空間中之變化；上圖為前五條測線的變化情形，其測線角度為 50° ~ 30° ；下圖則為後五條測線的變化情形，其測線角度為 25° ~ 5° ，其餘各時段的回波都卜勒頻帶寬度變化曲線圖

回波都卜勒頻帶寬度的意義即為與平均都卜勒頻率偏移的均方根偏差，若與平均都卜勒頻率偏移量的均方根偏差量越大，表示該區域內的流動情況非常複雜，並沒有固定的平均頻率偏移量，可能為速度變化很大或固體界面的位置，與現場之狀況進行比對，可知於測線上回波都卜勒頻帶寬度之量測值極大處，顯示該處為碎波後，由於空氣大量混入水中攪亂水流，而使得水面產生白色浪花的地方。此外，在測線上 240~360 公尺間的回波都卜勒頻帶寬度有一很明顯躍升現象，由現場的影像，圖 6 中可看出，由於沙嘴之近岸處，約 180~240 公尺間，水面流動狀態平穩，因此，此區間內之都卜勒頻帶寬度量測值很小，一旦跨越了沙嘴處，即 240~360 公尺處，海面上波浪碎波後於此處產生極為複雜的作用，使得該位置四處都是白色的浪花，於沙嘴上就近觀察到的波浪作用情形，顯示此處因水面的流動狀態非常地紊亂，而造成回波都卜勒頻帶寬度量測值極大。

4.4 碎波發生位置

綜合前面所描述的各種分析結果，我們將各測線上發生最大回波都卜勒頻率偏移之位置與各測線上發生最大回波雷達截面積之位置於回波雷達截面積格網圖中連接起來，繪於地理座標系統中，如圖 12 所示，圖中，X、Y 座標分別表示為地理座標中的 E、N 座標，而綠線為各測線上最大回波都卜勒頻率偏移之連線，藍線則為各測線上最大回波雷達截面積的連線，色階條為用來映射圖中回波雷達截面積在空間中的分布情形，另外於底圖上套上沙嘴步行可及未碰到水面的邊界、內河大橋的邊界還有實測的水深地形圖，圖 12 則為於 2005/01/22 15:20 之實測資料的分析結果。

將各測線上最大回波都卜勒頻率偏移之位置與各測線上發生最大回波雷達截面積之位置之連線繪製於回波雷達截面積格網圖中，其主要的目的



是爲了使分析結果能於雷達掃描的範圍中清楚地表現出來，如此圖中之海面上發生碎波之位置便可一目了然。經過前面各節對各測線上於現場所量測得目標物回波之雷達截面積、都卜勒頻率偏移及都卜勒頻帶寬度探討後，可利用各測線上之最大回波雷達截面積及最大回波都卜勒頻率偏移量於空間中的連線來標定碎波發生的位置，以下則針對所觀測得之結果來進行討論。

圖 13 爲各時段分析所得之海面上碎波發生位置圖，圖中可看出，各測線最大回波都卜勒頻率偏移的連線(綠線)，相對於灘線而言，會比各測線最大回波雷達截面積的連線(藍線)還提前發生。於深海波浪條件變動不大的情形下，兩條連線於空間中的間距，不會超過該時刻的深海波波長。由於發生

最大回波都卜勒頻率偏移的位置，表示該位置處於瀕臨碎波的位置，即波浪之波形達安定界限，但波浪不全然因此而發生碎波；另外，發生最大回波雷達截面積的位置，表示該處海表面之波浪其波峰前緣斜率極大，使得雷達所入射的電磁波產生鏡射的效應，因此，結合此兩個結果可知，碎波發生的位置即於此區間之內。

於圖 13 中，觀察碎波發生位置與海底地形之間的關係，大致上碎波發生處的水深約在 2~3 公尺之間，且與等深線平行，不過於內河大橋外側由於地形比起在沙嘴外海處之地形還要平緩，因此由圖中可發現碎波發生位置，相對於灘線而言，會延後發生於更靠近灘面且碎波水深比他處還要小。

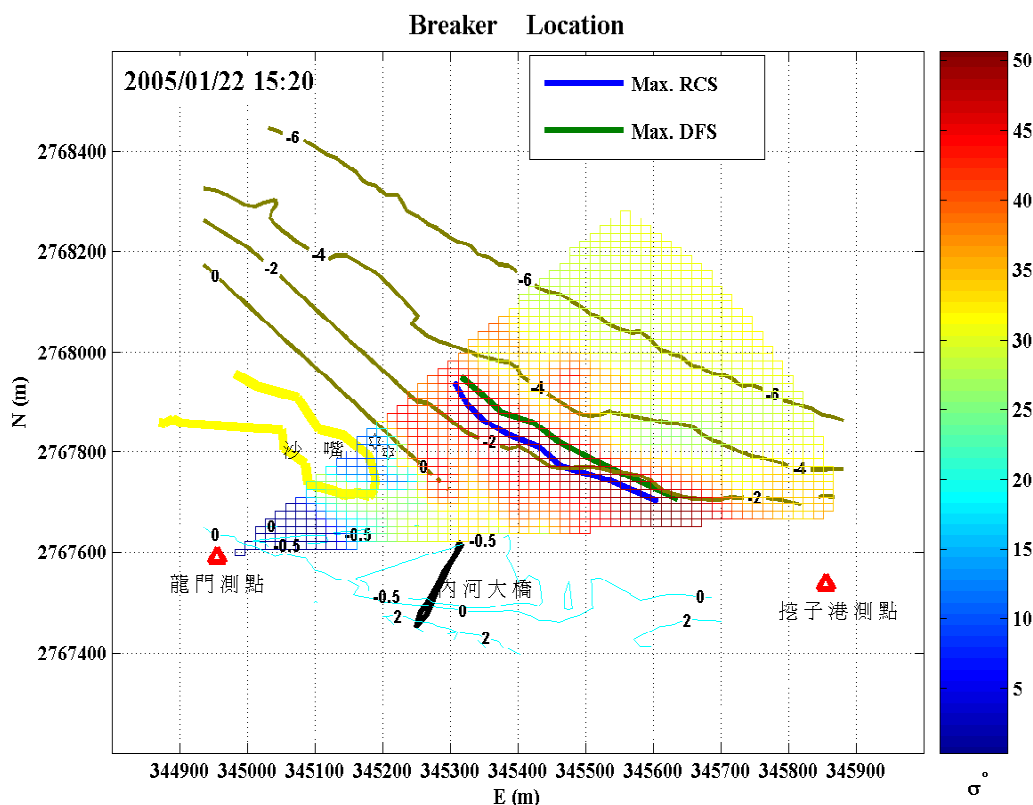
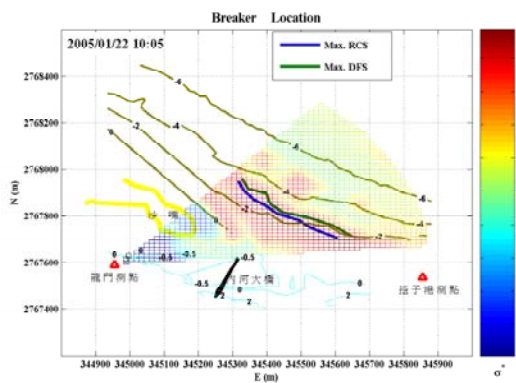
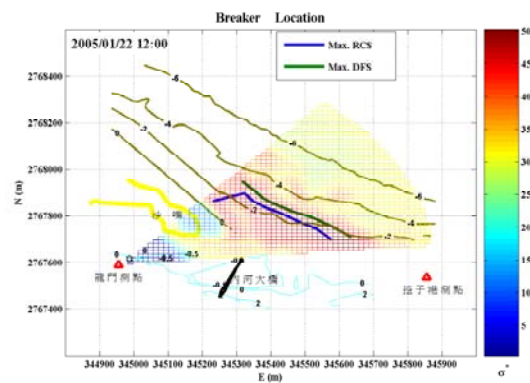


圖 12 碎波發生位置的標定

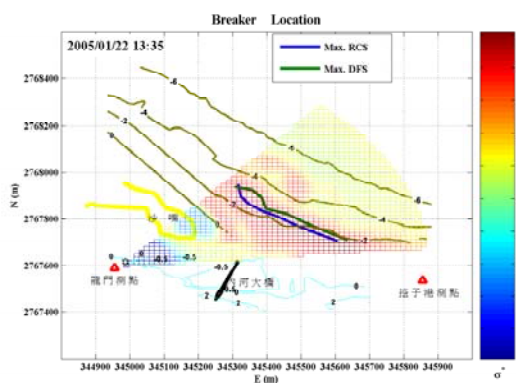




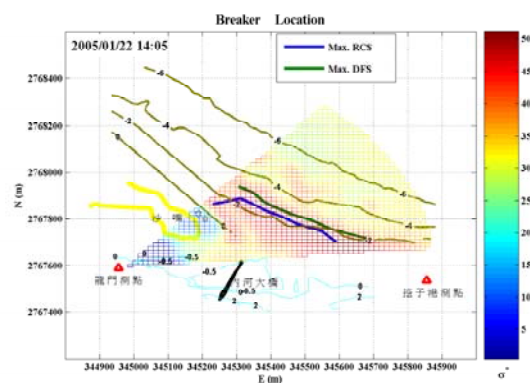
(a)2005/01/22 10:05



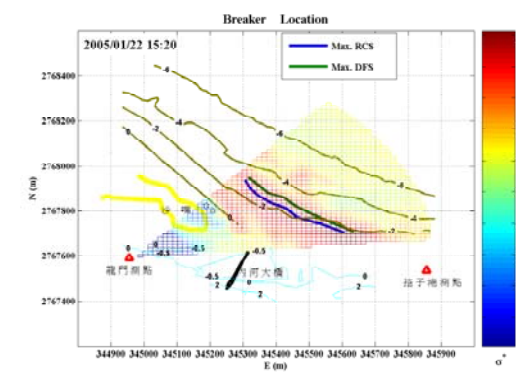
(b)2005/01/22 12:00



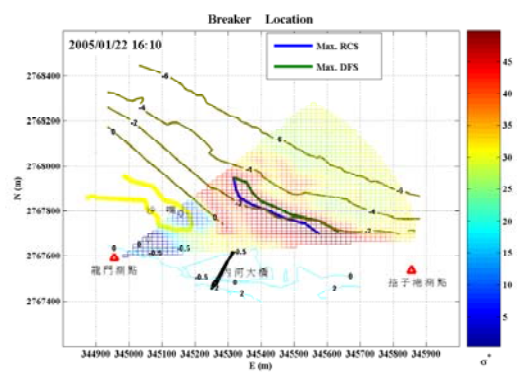
(c)2005/01/22 13:35



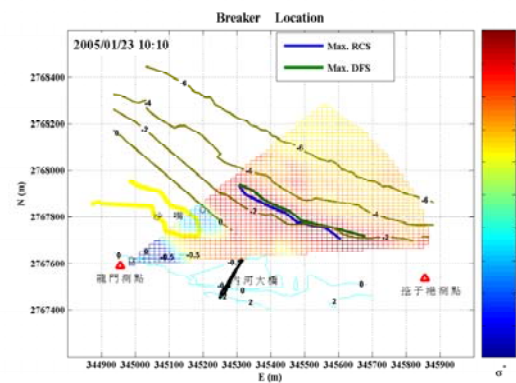
(d)2005/01/22 14:05



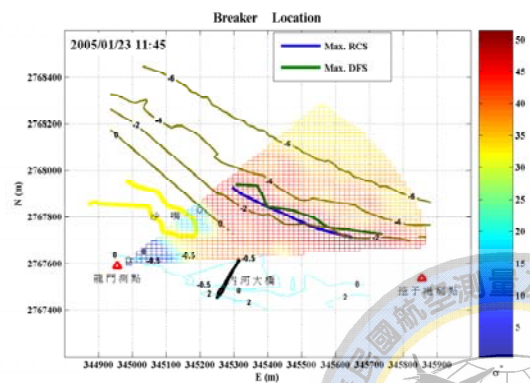
(e)2005/01/22 15:20



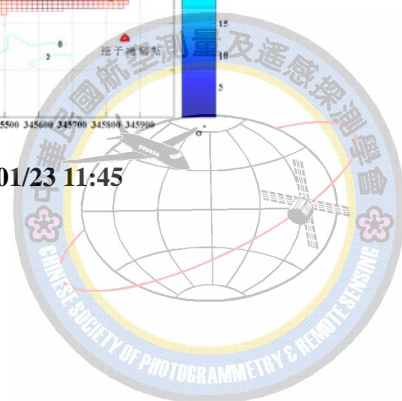
(f)2005/01/22 16:10



(g)2005/01/23 10:10



(h)2005/01/23 11:45



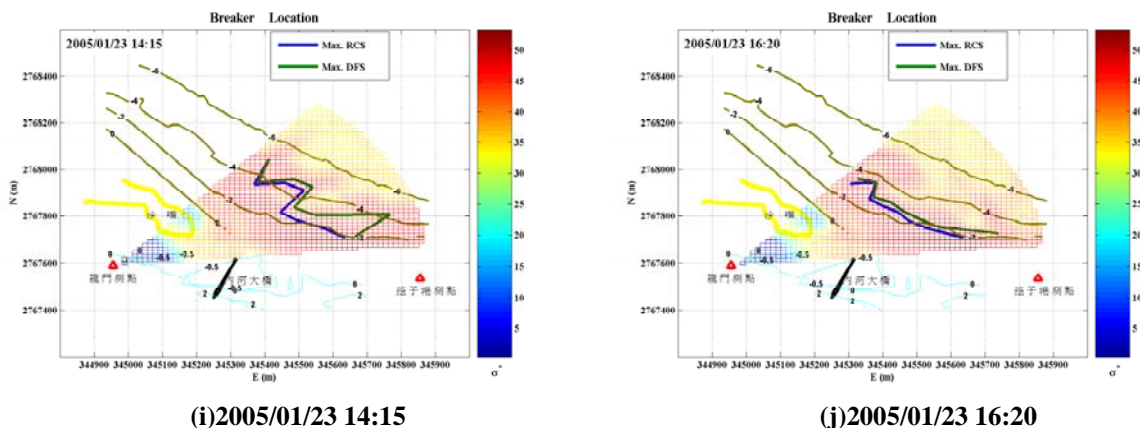


圖 13 碎波發生位置隨時間的變化

5. 結論

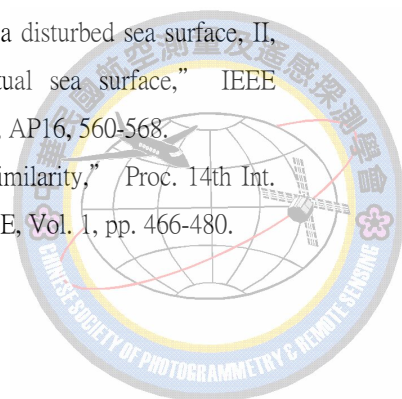
海面上發生碎波之位置在海洋環境科學、港灣工程、海岸工程、淺海養殖、海濱休閒…等各領域上都占有舉足輕重的地位。然而一直以來尚無合適的儀器設備可有效地用來偵測實際發生在海面上的碎波，因此本文嘗試應用脈衝式都卜勒微波雷達系統來進行現場近岸波浪的觀測，下列將就研究的成果及相關的建議來進行討論說明。

1. 將波浪偵測之結果與氣象資料中之深海波浪條件及近岸之地形相互對照後可由各測線上之雷達回波特徵，包括回波雷達截面積、回波都卜勒頻率偏移及回波都卜勒頻帶寬度所分析之結果與現場實地拍攝之影像及相關氣象資料對照之後顯示，應用脈衝式都卜勒微波雷達進行近岸波浪之觀測，可確實由分析結果中，將近岸區域內之水域與周遭地形環境中區分出來。
2. 將各測線之最大回波雷達截面積及最大回波都卜勒頻率偏移之連線，配合 GPS 定位系統所求得之儀器架設位置座標，將分析所得之結果描繪於空間座標系統中，可清楚地標定出海面上實際發生碎波之位置。
3. 當深海波浪條件趨於穩定時，該處波浪之碎波處近乎平行於海底地形之等深線，但若深海波浪條件出現驟變之情形，則海面上之碎波位置，將與海底之地形較無關聯性。

4. 將多條測線所偵測出之結果，配合線性內差之方法，可確實利用測線上單點之結果進而求得整個平面的資訊。
5. 回波都卜勒頻帶寬度之分析結果，由於都卜勒頻帶寬度是與雷達照射區內各點之平均都卜勒頻率偏移之偏差量有關，若於量測的過程中，發現某些地方有變異量極大之處，應即時檢測該位置處是否存在流況極不穩定的流場，若不存在，表示由雷達所發射與接收的電磁波於該處有死角，因此需調整雷達天線的角度，來避免不必要的量測誤差出現。

參考文獻

- 李明靜，2003。「河川表面流速與流量非接觸式量測方法之發展及應用」，博士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所。
- 賴泉基，1998。「應用微波雷達系統於河道水面流速及流量之量測」，經濟部水利處規劃試驗所，國立成功大學水利及海洋工程學系九十年學術研究成果雙邊論文研討會。
- Bass, F. G., I. M. Fuks, A. I. Kalmykov, I. E. Ostrovsky, and A. D. Rosenberg, 1968. "Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface, II, Scattering from an actual sea surface," IEEE Trans. Antennas Propag., AP16, 560-568.
- Battjes, J.A., 1974. "Surf similarity," Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Vol. 1, pp. 466-480.



- Haller, M. C., and D. R. Lyzenga ,2003. "Comparison of radar and video observations of shallow water breaking waves," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 4, pp. 832~844, Apr.
- Jessup, A. T.,1990. "Detection and characterization of deep water wave breaking using moderate incidence angle microwave backscatter from the sea surface," Ph.D. thesis, Mass. Inst. of Technol./Woods Hole Oceanogr. Inst. Woods Hole, Joint Program in Oceanogr. and Oceanogr. Eng., Mass., pp. 344.
- Jessup, A. T., W.K. Melville, and W. C. Keller ,1991. "Breaking Waves Affecting Microwave Backscatter 1. Detection and Verification" , Journal of Geophysical Research, Vol. 96, No. C11, pp. 20547-20559, Nov. 15.
- Larson, T. R., and J. W. Wright ,1975. "Wind-generated gravity-capillary waves: Laboratory measurements of temporal growth rates using microwave backscatter," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 70, pp. 417-436.
- Lee, H. Y. ,1977. "Doppler measurements of the effect of gravity waves on wind-generated ripples," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 81, 225-240.
- Monahan, E.C., 1971. "Oceanic whitecaps" Journal of Physical Oceanography, Vol. 1, pp. 139-144.
- Plant, W. J., and J. W. Wright ,1979. "Spectral decomposition of short gravity wave systems," Journal of Physical Oceanography, Vol. 9, pp. 621-624.
- Plant, W. J., and J. W. Wright ,1980. "Phase speeds of upwind and downwind traveling short gravity waves," Journal of Geophysical Research, Vol. 85, pp. 3304-3310.
- Plant, W. J., and J. W. Wright ,1977. "Growth and equilibrium of short gravity waves in a wind-wave tank," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 82, pp. 767-793.
- Stockdon, H.F. and R.A. Holman ,2000. "Estimation of wave phase speed and Nearshore bathymetry from video imagery," Journal of Physical Oceanography, vol. 105, pp. 22015-22033.
- Wright, J. W. ,1966. "Backscattering from capillary waves with application to sea clutter," IEEE Trans. Antennas Propag., AP-14, pp. 749-754.
- Wright, J. W. ,1968. "A new model for sea clutter," IEEE Trans. Antennas Propag., AP-16, pp. 217-233.
- Wright, J. W., and W. C. Keller ,1971. "Doppler spectra in microwave scattering from wind waves," Phys. Fluids, Vol. 14, pp. 466-473.



Detection of breaking waves using X-band pulse radar in the nearshore region

Ming-Ching Lee¹ Jan-Mou Leu² Chan-Ji Lai³ Ming-Hsien Lee⁴

ABSTRACT

This paper is concerning detection and characterization of wave breaking using X-band pulsed Doppler microwave radar nearby the Shuang-Si estuary at Fu-Long village in Taiwan. Along the same measuring line, as the character of subjective scatterers under the radar illuminated area changes, and the features of radar backscatter will be different. The analysis of radar backscatter involved radar cross section, Doppler frequency shift, and Doppler bandwidth from the sea surface is accomplished. Eventually, the maximum radar cross section and Doppler frequency shift on the same measuring line, connect the position on every measuring line respectively. The radar system was shown the capability to delineate the location of breaking wave clearly and that is sufficient for nearshore events of air-sea interactions to achieve a measurement operation. It's safe and secure for investigators and instruments that they accomplish all detective operation successfully.

Keywords: Doppler microwave radar, Doppler frequency shift, Radar cross section, Wave breaking

¹ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Diwan University

² Associate Professor, Department of Hydraulic & Ocean Engineering, National Cheng Kung University

³ Professor, Department of Hydraulic & Ocean Engineering, National Cheng Kung University

⁴ Graduate Student, Department of Hydraulic & Ocean Engineering, National Cheng Kung University

