

應用 X-band 雷達於分析海面流況之研究

林家豐¹ 高家俊² 董東璟³ 張育璋⁴

摘要

X-band 雷達的高解析度在近岸海表面流場的觀測具有很大的潛力，本文利用 X-band 雷達影像來推算海表面流場，在實際應用之前對觀測區域的海表面流場均勻性和觀測時間的定常性必需先加以討論，此外在子影像大小和子影像時序列張數的選取，也會影響到推算流場的結果，本文研究發現以 128*128pixels 的影像區域均勻性較高，在一筆資料連續 64 張影像的觀測時間內，海表面流場符合定常性，在影像大小的選取以 128*128 pixels 和 64*64pixels 較為適合，影像時序列張數至少需連續 16 張以上才可使推算海表面流速結果在各別平均差值可在 0.02 公尺/秒以下，相當於 7% 的誤差，海表面流向平均差值大約為 2.5°，可達到較穩定的結果。

A study of sea surface current by X-band radar images

Chia-Feng Lin Chia-Chuen Kao Dong-Jiing Doong Kevin-Chueng

ABSTRACT

X-band nautical radar has high resolution and potentiality near sea-shore. In this study, we apply X-band radar image sequences to estimate sea surface current. The homogeneity of sea surface current fields and the stationary during observing time in observing area are discussed here. The choice of subimage size and the number of subimages would influence the result of sea surface current field from radar image sequences. We found that it's higher homogeneity of observing area by using 128*128 pixels image. The sea surface current fields accords stationary during observation time of 64 sequent images. In addition, it is also found that choosing the size of image is comparatively suitable with 128*128 pixels and 64*64 pixels, and the number of the subimages is needed at least more than 16 subimages, it can enable estimating the result of approximately 0.017 m/s on sea surface current velocity average difference, and approximately 2.5 degree on sea surface current direction average difference. It can reach more steady result.

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，海岸地區的土地漸漸朝向高度利用與發展，不管是海岸地

區的發展或是海上的種種活動，均需要面對變化紛紜的海洋環境，而表面流場是海洋環境中最主要的參數之一，在海洋觀測的研究領域裡，海象(波浪、潮汐、水流)、地象(水深、地形、岸線)等資料的調查量測，皆屬重要，而其中流場的流速與流向更為不可或缺的項目之一。許多有關海岸工程、海洋物理、化學、生態及海域污染質的流向及分佈，另外如操船模擬試驗，海域災害救援…等，都需有詳細的海流資料為參考，可知流場觀測的重要性。

海面流場的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

-
1. 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士班研究生
 2. 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
 3. 國立成功大學水利及海洋工程學研究所博士後研究員
 4. 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士班研究生

sensing)兩種方式，現場觀測是將觀測儀器直接接觸海水獲得流場資訊，又可分為固定式的海流儀定點觀測法 (Eulerian type) 及移動式浮標追蹤法 (Lagrangian type) 兩種，前者常用的儀器如 ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) 通常置放於海床上或資料浮標的底部，可觀測垂直剖面的流場資訊，後者常用於漂流浮標，在漂流浮標裡置放一 GPS，利用衛星定位法同時記錄時間，則可推算出表面流場。但現場觀測有維修不易、時常需花費較多的維修費的缺點。

遙感探測是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觀測區域之特性，透過所拍攝之影像或是由觀測電磁波回波之影像，搭配適當之影像處理方法，就可以獲得觀測目標物之特性。遙感探測的技術可分為光學與雷達，光學的技術如空照觀測 (airborne image)，觀測時受到日夜變化的限制，且花費相當昂貴，雷達觀測流場的技術不受到日夜變化的限制，目前常見的包括：高頻雷達和 X-band 雷達，高頻雷達如 CODAR (Coastal Ocean Dynamics Radar)，通常適用於觀測數十公里較大範圍的流場，解析度為 0.3 公里到 3 公里 (Barrick, 1977)，而 X-band 雷達的回波特性，不但可偵測障礙物，也能反映出海面上波場的資訊，進而推求流場資訊，X-band 雷達在空間上的解析度最佳為 2.5 公尺，觀測範圍 5 公里，可得到高解析度的近岸流場的資訊，是一個相當具有近岸流場觀測潛力的儀器，故本文採用 X-band 雷達為流場觀測之工具。

Young (1985) 提出利用三維傅利葉轉換分析連續的 X-band 雷達影像，可以擷取海面波譜資訊，又因為海表面流的影響產生都卜勒效應的關係，使原本海面波譜資訊應該符合線性波理論，產生都卜勒偏移，再藉由波譜資訊產生偏移的量來反推可求得海表面流場，之後陸續有許多學者開始研究利用 X-band 雷達影像來推算海表面流場，如 Senet et al. (1997)、Senet et al. (2001)、Borge et al. (2000)... 等，而一般在研究雷達影像推算流場時，會先假設流場於空間上和時間上分別是均勻性的和定常性，但實際的海面是變化多端的，在不同的空間與時間上，其海面流場皆不同，其中在空間上的均勻性討論中，一個子影像時序列推算求得的流速流向值代表

此影像區域的平均值，選擇不同的子影像大小也將影響到海表面流場推算結果 (Kuo, 1999)，選擇較大的子影像表現在波譜時的解析度較佳，但波場的均勻性也將降低；在時間上的定常性討論中，一筆資料的觀測時間不同即選取子影像時序列的張數不同，也將影響到海表面流場的推算結果，選擇較多的子影像時序列張數，雖然在頻率上的解析度較高，但較不符合時間上的定常性。

本文的研究目的是在探討利用 X-band 雷達影像推算近岸地區海表面流時，流場均勻性和雷達觀測時間內的定常性必須先進行討論，並進一步探討子影像大小以及子影像時序列張數在分析海表面流場的適用性。

二、X-band 雷達之測流原理及特性

2.1 X-band 雷達系統

一套完整的 X-band 雷達測流「系統」應包括下列四個項目：雷達天線、雷達顯示器、回波訊號擷取系統與影像分析系統。其觀測的系統是由發射機產生某一特定頻率的電磁波訊號，並經由天線將電磁波能量朝海面發射，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，以影像的方式儲存，再從影像裡所對應的波場資訊可分析波場和流場的特性，如圖 1 所示。



圖 1 X-band 雷達觀測系統流程圖。

2.2 X-band 雷達影像測流理論

X-band 雷達影像的獲得是藉由雷達天線發射波長為 3 公分的電磁波打向海面，由於海表面上因風吹而產生的水位起伏變化，使電磁波發生回波 (Nieto, 2000)，產生回波的原因，主要是由於鏡面反射和布拉格共振效應 (Young, 1985)，利用接收器以及訊號擷取系統，接收回波訊號和訊號的轉換，把

類比訊號轉成數位的訊號，再把訊號以影像的方式存在電腦裡，以供分析流場用。

Young et al. (1985)證實了利用航海X-band雷達影像是可以擷取海面波譜資訊，其利用三維傅利葉轉換分析連續的雷達影像，如下式(1)所示，

$$|FFT(I(x, y, t))|^2 = E(k_x, k_y, \omega) \quad (1)$$

$I(x, y, t)$ 表示連續的雷達影像， k_x 、 k_y 分別是波數 K 在 x 、 y 方向的分量，經轉換可計算出反應在海表面上的波數譜和頻率譜，而這樣的波數譜和頻率譜在沒有表面流場的情況下，會滿足線性波理論，其方程式如下式(2)所示

$$\omega_0^2 = g|\bar{k}| \tanh(|\bar{k}|d) \quad (2)$$

ω_0 是角頻率， g 是重力加速度， \bar{k} 是波數向量， d 是水深。而在有流的情況下，原始的波數譜和頻率譜會因為流的影響，產生都卜勒偏移(Young, 1985)，其方程式如下式(3)所示，

$$\omega = \omega_0 + \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (3)$$

\bar{U} 是表面流 $\bar{U} = (U_x, U_y)$ ，在不同的流速情況下，X-band雷達影像經傅利葉轉換後的波數譜和頻率譜會有不同的都卜勒偏移，如圖 2 所示。流速向量 \bar{U} 可以利用最小平方法將下式函數最小化求得(Gangeskar, 2002)，

$$J = \sum_{\omega=0}^{\omega_M} \sum_{k_x=-k_{xN}}^{k_{xN}} \sum_{k_y=-k_{yN}}^{k_{yN}} (\Delta\omega)^2 E(k_x, k_y, \omega) \quad (4)$$

假設在深水的情況下， $\tanh(|\bar{k}|d) \approx 1$ ，這裡的 $\Delta\omega = \omega - \sqrt{g|\bar{k}|} - k_x U_x - k_y U_y$ ，上式的函數經推導可得出 U_x, U_y 的解，如下式(5)，

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum E k_x^2 & \sum E k_x k_y \\ \sum E k_x k_y & \sum E k_y^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum E(\omega - \sqrt{g|\bar{k}|}) k_x \\ \sum E(\omega - \sqrt{g|\bar{k}|}) k_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

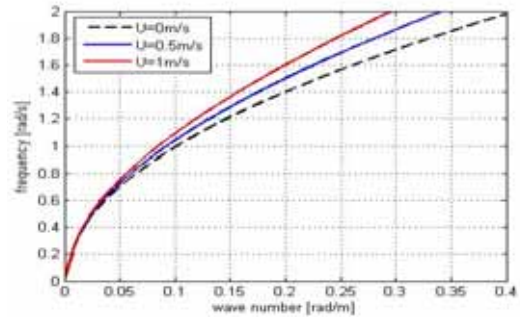


圖 2 因為有海表面流使得波數譜和頻率譜產生卜勒偏移。

2.3 影響 X-band 雷達影像之測流因素

在運用雷達影像進行流場分析時，會影響流場分析結果的因素包括被分析雷達影像的特性及、雷達回波特性。影像的特性是一個影響分析結果的因素，如何選擇合適的影像特性將在後面章節做深入探討。在雷達回波特性上，雷達產生回波後經訊號轉換最後結果透過雷達影像，而在訊號接收及轉換過程中會產生雜訊的存在，本文將雜訊定義為凡與海面回波無關的訊號(吳, 2003)，不管是外在所產生的背景雜訊，亦或是雷達本身在訊號處理上所產生的雜訊，對於後續流場分析上都會有影響(楊, 2004)。

過去學者在處理影像中雜訊的相關問題時，大多採用濾波方式來降低雜訊對影像分析的影響，移動平均法可降低影像中雜訊的問題，並使影像的譜分析結果較為平滑(高, 1996；呂, 1998)。移動平均是屬於空間低通濾波中的一種，利用對影像中各點的像元值進行空間迴旋計算，其數學表示式如式(6)：

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b W(s, t) f(x+s, y+t) \quad (6)$$

其中 $g(x, y)$ 為濾波後的影像的像元值； $W(s, t)$ 為濾波時所採用的遮罩，其意義近似於處理影像的加權函數，遮罩大小為 $(2a+1) \times (2b+1)$ ；而 $f(x, y)$ 為所輸入的影像像元值。楊(2003)，建議採用 3×3 的移動平均作為降低隨機雜訊的方法。

某些雜訊的因素將對雷達影像進行譜分析去計算流場時有很大的影響，移除這些雜訊對於後續譜

分析是很重要的步驟，因為雷達影像經傅立葉轉換成三維的波數頻率譜，分散關係式濾波法適合做濾波處理(Gangeskar, 2002)，考慮在深水的情況下，分散關係式濾波法被定義成式(7)，

$$E_D(k_x, k_y, \omega) = \begin{cases} E, & |k| \in [B_n, B_p] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中 } B_n = \frac{(\omega - \frac{\Delta\omega}{2} - U_{\max} \frac{\omega^2}{g})^2}{g} - \sqrt{2} \frac{\Delta k}{2}$$

$$B_p = \frac{(\omega + \frac{\Delta\omega}{2} + U_{\max} \frac{\omega^2}{g})^2}{g} + \sqrt{2} \frac{\Delta k}{2}$$

Δk 是波數的解析度， $\Delta\omega$ 是頻率的解析度，當 B_n 為負值則令 $B_n = 0$ ，在未知流速流向時，濾波處理時需要較寬濾波頻帶，濾波頻帶大小的選擇決定於假設的 U_{\max} ，圖 3 為 $U_{\max} = 2$ 公尺/秒的濾波處理示意圖，圖中白色部份視為雜訊全部去除，保留灰底部份視為波場資訊。

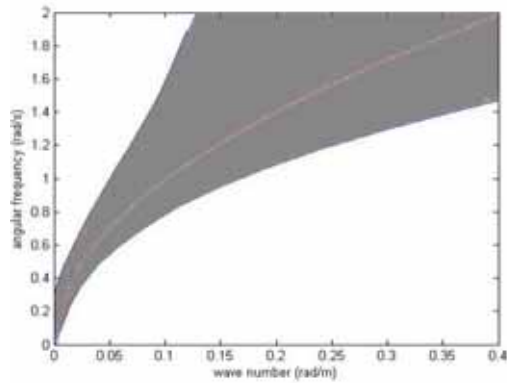


圖 3 $U_{\max} = 2$ 公尺/秒的濾波處理示意圖。

三、探討 X-band 雷達影像之測流均勻性

利用連續的雷達子影像可以推算出表面流場，而一般通常會先假設在觀測時間內波場在空間上是符合均勻性的(Seemann, 1997; Hatten, 2000; Dankert, 2003)，推算出來的表面流場結果代表在所選取影像區域內的海表面流場資訊平均值，但實際上海面流

場並不是完全均勻的，海面上複雜的波、流與大氣的交互作用，使得海面流場在大範圍內不會是完全均勻的，故在推算海表面流場時，在子影像大小的選取則顯的重要，子影像選取過大雖然在波數譜解析度較高，但空間上的均勻性降低，且推算時間也相對較長，子影像選取過小，雖然均勻性相對較高，推算時間較快，但所含空間波場資訊不足，在波數譜解析度較低。

3.1 資料來源

本文採用國立成功大學近海水文中心於台灣南端鵝鑾鼻附近岸邊架設的X-band雷達所觀測得到的雷達影像，其位置圖如下圖 4，觀測時間是 2003 年 7 月 30 日 18 時到 7 月 31 日 22 時，每兩小時觀測一筆資料，擷取的空間範圍為半徑 3 公里，空間解析度是 7.5 公尺，天線週期是 1.7 秒。

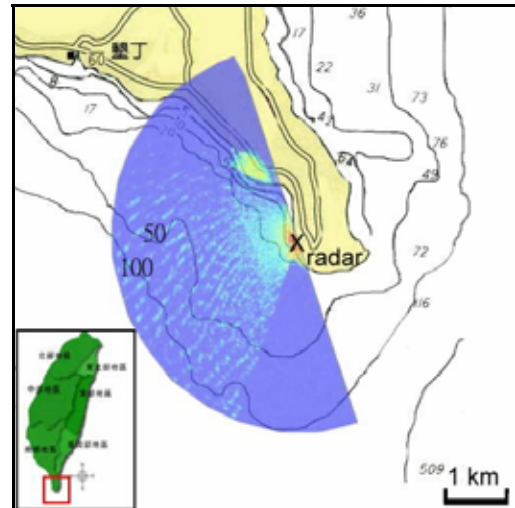


圖 4 X-band 雷達架設於鵝鑾鼻海域的位置圖。

3.2 流場均勻性之探討

海表面流場可由連續的雷達子影像時序列推算出，而推算出來的表面流場結果代表在所選取影像區段內的流場資訊平均值，所以選取均勻性的資料，是推算海表面流場前的前置作業。本文所在探討資料的均勻性時，分別以 $256*256$ pixels 和 $128*128$ pixels 的區域相對於實際海面範圍是 $1920*1920$ m 和 $960*960$ m，在區域內以固定間隔切出多個 $64*64$ pixels 的子影像大小去推算出流速和流向的結果，如圖 5(a)和圖 5(b)，每一點的流速和流向代表以此點為中心向外取 $64*64$ pixels 推算出

來的平均值。256*256 pixels的區域裡流速的標準差為 0.06 公尺/秒，變異係數為 30%，128*128pixels的區域裡計算得到流速標準差為 0.015 公尺/秒，變異係數為 5%，發現海表面流場在 128*128pixels內的均勻性較高。

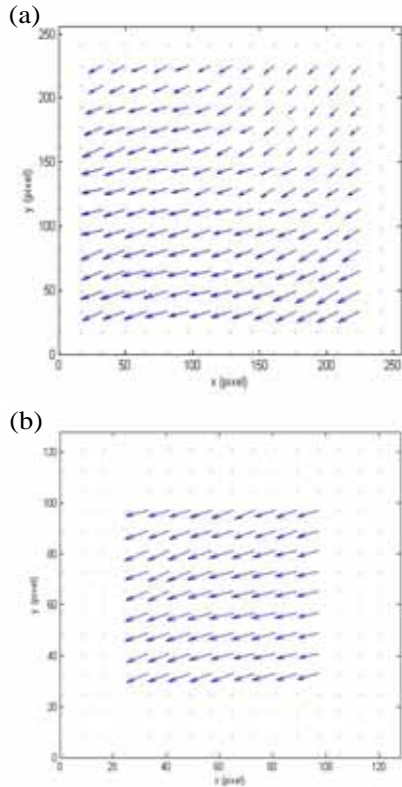


圖 5 (a)256*256pixels 內的海表面流場變化；
(b)128*128pixels 內的海表面流場變化。

3.3 子影像大小的選取

X-band雷達在推算海表面流場時，在子影像大小的選取也將對結果造成影響，子影像選取過大或過小都不適合來推算海表面流場，故在推算海表面流場前選取一個合適的子影像大小將是一個重要的前置作業。本文將不同的子影像大小列於表 1。圖 6(a)為不同的子影像大小所推算出來海表面流速的結果，除了在第二點資料較特別外，128*128 pixels影像和 64*64pixels影像的海表面流速平均差值大約為 0.03 公尺/秒，32*32pixels影像推算出來的海表面流速與 128*128 pixels影像和 64*64pixels影像推算出來的海表面流速平均最大差值到 0.13 公尺/秒；下圖 6(b)為不同的子影像大小所推算出來海表面流向

的結果，128*128 pixels影像和 64*64pixels影像的海表面流向平均差值大約為 13°，除了在第二點和第十三點資料可能因為當時流速甚小，使得推算流向誤差較大，32*32pixels影像推算出來的海表面流速與 128*128 pixels影像和 64*64pixels影像推算出來的海表面流向平均最大差值到 30°。32*32 pixels影像比 128*128 pixels影像和 64*64pixels影像在推算海表面流場有較大差異，可能的原因是 32*32 pixels影像經傅利葉轉換成波譜後，在波數譜的解析度較低，造成在利用最小平方方法去推算都卜勒偏移量有較大的誤差。

表 1 討論不同子影像大小的對象

子影像大小 pixels	實際空間範圍 公尺 x 公尺	推算海表面流場適用性
256x256	1920 x 1920	選取區域很大，在空間上的均勻性較低，本文不予討論。
128x128	960 x 960	進行討論
64x64	480 x 480	進行討論
32x32	240 x 240	進行討論

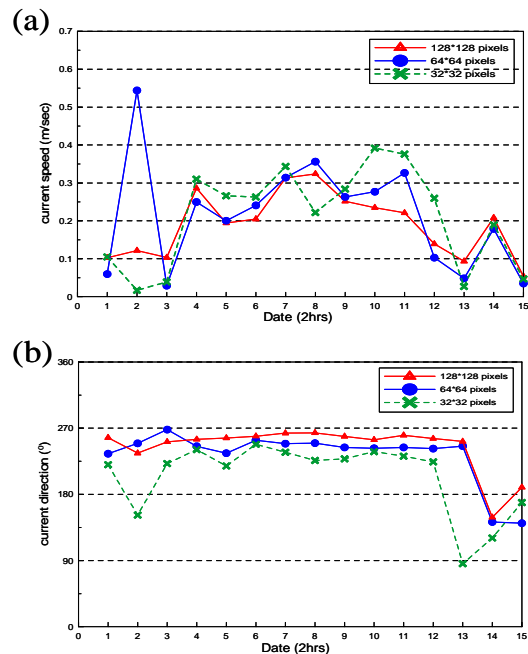


圖 6 (a)不同子影像大小推算流速結果；(b) 不同子影像大小推算流向結果。

四、探討 X-band 雷達影像之測流定常性

海表面流場可由連續的雷達子影像時序列推算出，一般通常會先假設在觀測時間內波場在短時間內是符合定常性的(Seemann, 1997)，推算出來的表面流場結果代表在所擷取觀測時間內的流場資訊平均值，然而實際上海面流場是會隨著時間變化，故在推算海表面流場時，在子影像時序列張數的選取則顯的重要，子影像時序列張數選取過多，雖然在頻率譜解析度較高，但時間上不符合定常性，子影像時序列選取過少，雖然較符合定常性，但在頻率譜解析度較低。

4.1 資料來源

採用的資料觀測時間是 2004 年 10 月 24 日 18 時到 10 月 26 日 6 時，每兩小時觀測一筆資料，擷取的空間範圍為半徑 3 公里、角度 180°，空間解析度是 7.5 公尺，天線週期是 1.7 秒。

4.2 流場定常性之探討

海表面流場可由連續的雷達子影像時序列推算出，而推算出來的海表面流場結果代表在所擷取觀測時間內的流場資訊平均值，所以選取符合定常性的資料，是推算海表面流場前的前置作業。本文所使用的 X-band 雷達天線的週期是取 1.7 秒，每筆資料在 109 秒內一共擷取連續 64 張影像，在探討資料是否符合定常性時，以連續 32 張為一影像時序列，在每筆連續 64 張影像裡取不同起始點的影像時序列，推算出海表面流速和海表面流向的結果，海表面流速標準差為 0.003 公尺/秒，變異係數為 0.01%，如圖 7(a)，海表面流向標準差為 1.3°，如圖 7(b)，呈現相當一致的結果，故海表面流場在觀測一筆共 64 張連續影像的時間內可視為定常性。

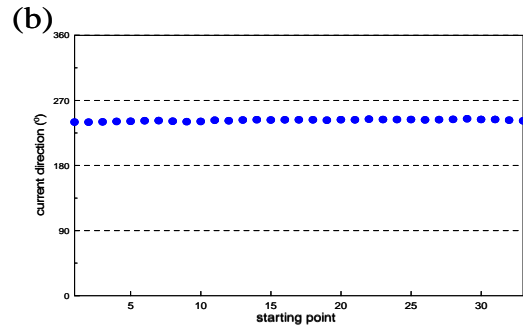
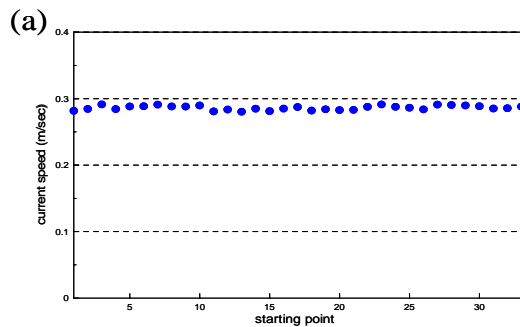
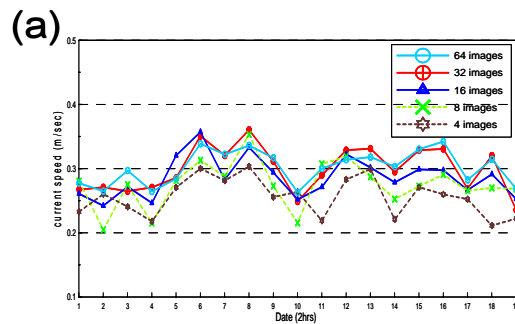


圖 7 (a)不同影像序列起點推算海表面流速結果；(b)不同影像序列起點推算海表面流向結果。

4.3 連續子影像時序列張數選取

X-band雷達在推算海表面流場時，根據前面的討論結果，在雷達觀測時間 109 秒內可視海表面流場是定常性的，故選取子影像時序列張數在 64 張以內，海表面流場的定常性問題可解決，但考慮推算海表面流場所需時間，子影像時序列張數愈少所需時間愈短，但是相對的在頻率譜上的解析度會降低，故選取一個合適的子影像時序列張數將是一個重要的前置作業。圖 8(a)為不同的子影像時序列張數所推算出來海表面流速的結果，在子影像時序列張數 16 張以上的海表面流速平均差值大約為 0.017 公尺/秒，相當於 6%的差異，差異甚小，而子影像時序列張數不足 16 張的海表面流速最大差值到 0.1 公尺/秒，相當於 30%左右的差異；圖 8(b) 為不同的子影像時序列張數所推算出來海表面流向的結果，在子影像時序列張數 16 張以上的海表面流向平均差值大約為 2.5°，而子影像時序列張數不足 16 張的海表面流向最大差值最大到 16°。子影像時序列張數不足會導致誤差較大的原因，主要可能是因為在頻率譜上的解析度較低所引起的。



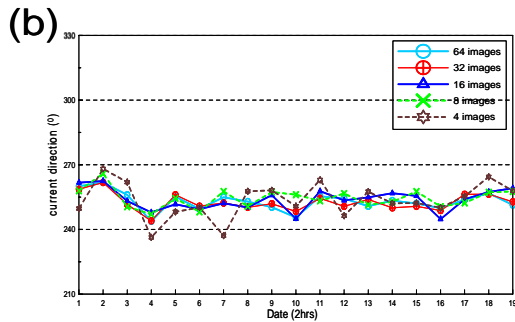


圖 8 (a)不同子影像時序列張數推算海表面流速結果；(b)不同子影像時序列張數推算海表面流向結果。

五、結論

本文在探討利用X-band雷達影像推算近岸海表面流時，海表面流場均勻性和雷達觀測時間內的定常性，並進一步研究子影像大小以及子影像時序列張數在分析海表面流場的適用性，結果發現影像區域選取愈大在海表面流場均勻性愈低，本文選取區域在 128*128 pixels裡可達到變異係數 5%的高均勻性；子影像大小的選取在推算海表面流場時，128*128pixels影像和 64*64pixels影像的海表面流速的平均差值為 0.03 公尺/秒，此兩種影像大小較適合推算海表面流場；海表面流場在觀測一筆資料共連續 64 張影像的時間內海表面流速變異係數為 0.01 %，海表面流向標準差為 1.3°，故在此時間內海表面流場可視為定常性；子影像時序列張數的選取在連續 16 張影像以上時，推算海表面流速結果在各別平均差值在 0.02 公尺/秒以下，相當於 7%的誤差，海表面流向平均差值大約為 2.5°，可達到較穩定的結果。

參考文獻

- 1.鄭育民(2000)"台灣東部近岸海流特性之調查研究"，國立海洋大學碩士論文。
- 2.吳立中、董東璟、高家俊、莊士賢(2003)"應用岸基測波雷達於方向波譜觀測之研究"，第二十五屆海洋工程研討會論文集，251 頁-257 頁。
- 3.高家俊、吳立中、董東璟、楊曜存(2004)"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"，第二十六屆海洋工程研討會論文集，785 頁-791 頁。

- 4.楊曜存(2004)"氣象因子對航海雷達影像分析海面波浪之影響"，國立成功大學碩士論文。
- 5.Borge J.C. Nieto and C.Guedes Soares (2000) "Analysis of Directional Wave Field Using X-Band Navigation Radar," Coastal Engineering ,40 , 375-391.
- 6.Heiko Dankert (2003) "Retrieval of Surface-Current Fields and Bathymtries using Radar-Image Sequences," IEEE , (C)2671-2673.
- 7.Helge Hatten et al.(2000)"Determination of the Sea surface Current Field from the Doppler Shift of the Coherent Radar Backscatter with Grazing Incidence," IEEE , 549-553.
- 8.Huang Min-Chih and Jia-Yuan Chen (1998) "Wave direction analysis form data buoys," Ocean Engineering, Vol. 25, No. 8, pp. 621-637.
9. Jorg Seemann , Friedwart Ziemer and Christian M. Senet (1997)"A Method for Computing Calibrated Ocean Wave Spectra from Measurement with a Nautical X-Band Radar," IEEE , 1148-1154.
10. Rune Gangeskar (2002) "Ocean Current Estimated From X-Band Radar Sea Surface Images," IEEE , Vol.40 , NO.4 , 783-792.
- 11.Yi-Yu Kuo , Li-Guang Leu and I Lang Kao , (1999) "Directional spectrum analysis and statistics obtained from ERS-1 SAR wave images," Ocean Engineering , 26, 1125-1144.
- 12.Young, I.R. and W. Rosenthal (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 ,NO. C1 , 1049-1059