

台中港海域海洋環境監測之應用研究

計劃主持人：簡仲璟 研究員
協同主持人：吳基 助理研究員
參與人員 楊怡芸 行政助理

台中港海域海洋環境監測之應用研究

目 錄

目錄	i
圖目錄	iii
表目錄	vi
一、前言	1
二、衛星資料之簡介	2
2.1 合成孔徑雷達影像	2
2.1.1 簡介	2
2.1.2 天線訊號之特性	2
2.1.3 掃描幾何	3
2.2 SAR 訊號處理方法	4
2.2.1 斜距壓縮處理	4
2.2.2 匹配濾波器	4
2.2.3 參考函數及取視窗	9
2.2.4 方位壓縮處理	10
2.2.5 都卜勒變化及脈波壓縮	10
2.3 準確度及幾何形變與校正	12
2.3.1 解析度	12
2.3.2 處理過程之誤差	14
2.3.3 相對運動及都卜勒計算	14
2.3.4 浮訊鎖定及自動聚焦	15
2.3.5 模稜	16
2.3.6 斜距遷移	16

2.3.7 各種幾何上的誤差	17
2.3.8 衰減及雜訊	17
2.4 幾何校正及地圖座標套疊	19
2.4.1 地理像元位置	19
2.4.2 位置方程式	19
2.4.3 Geocoding 處理法	21
2.4.4 地形造成的變形	23
2.5 法國史波特衛星簡介	23
三、海洋波譜	30
四、海洋波譜分析系統	36
4.1 系統簡介	36
4.2 影像選取模組	38
4.3 影像區塊設定	40
4.4 波場分析	42
4.5 系統需求	52
五、分析結果	53
六、結論	73
參考書目	74

圖 目 錄

圖 2.1	、 sinc 函數圖	25
圖 2.2	、 側視合成孔徑雷達之幾何示意圖	25
圖 2.3	、 鳥鳴波的自相關函數	26
圖 2.4	、 利用都卜勒平移來計算衛星相對速度之空間幾何示意圖	26
圖 2.5	、 GEI(geocentric equatorial inertial)座標系統	27
圖 2.6	、 合成孔徑雷達衛星影像幾何校正流程圖	28
圖 2.7	、 合成孔徑雷達衛星影像與地形之關係	29
圖 4.1	、 應用程式啟動圖示	36
圖 4.2	、 系統啟動之歡迎視窗	36
圖 4.3	、 分析系統主控制視窗	37
圖 4.4	、 選取影像進行分析	38
圖 4.5	、 影像說明資料	39
圖 4.6	、 影像涵蓋範圍	39
圖 4.7	、 全幅影像展示，並同時顯示台灣	40
圖 4.8	、 在全幅影像上之區塊位置設定游標	41
圖 4.9	、 可利用下拉式選擇功能，選擇所需之區塊寬度及高度	42
圖 4.10	、 顯示之選取影像區塊	42
圖 4.11	、 截止波長設定為 $\frac{2\pi}{4\Delta k}$ 時之遮罩函數	43
圖 4.12	、 對選取之影像區塊進行波場分析之結果(關閉陸地自動過濾 選項)	45
圖 4.13	、 對選取之影像區塊進行波場分析之結果(開啟陸地自動過濾 選項)	45
圖 4.14	、 波譜顯示工具視窗	46

圖 4.15	、在選取區塊影像上產生選取游標，由使用者設定位置	46
圖 4.16	、系統畫出選定之範圍並提示使用者確定之	47
圖 4.17	、系統產生之波譜	48
圖 4.18	、顯示之波譜所對應區域影像	48
圖 4.19	、修正波場之位置選取	49
圖 4.20	、修正過程	50
圖 4.21	、經人工後之修正波場	51
圖 4.22	、系統提供之波場儲存對話窗：波長部份	51
圖 4.23	、系統提供之波場儲存對話窗：波向部份	52
圖 5.1	、SPOT 衛星影像(1993/12/08)	54
圖 5.2	、SPOT 衛星影像(1993/12/08)波場分析結果	54
圖 5.3	、SPOT 衛星影像(1996/01/30)	55
圖 5.4	、SPOT 衛星影像(1996/01/30)波場分析結果	55
圖 5.5	、SAR 衛星影像(1995/01/07)	56
圖 5.6	、SAR 衛星影像(1995/01/07)波場分析結果	56
圖 5.7	、SAR 衛星影像(1995/07/05)	57
圖 5.8	、SAR 衛星影像(1995/07/05)波場分析結果	57
圖 5.9	、SAR 衛星影像(1995/12/17)	58
圖 5.10	、SAR 衛星影像(1995/12/17)波場分析結果	58
圖 5.11	、SAR 衛星影像(1995/12/27)	59
圖 5.12	、SAR 衛星影像(1995/12/27)波場分析結果	59
圖 5.13	、SAR 衛星影像(1996/01/31)	60
圖 5.14	、SAR 衛星影像(1996/01/31)波場分析結果	60
圖 5.15	、SAR 衛星影像(1996/02/01)	61
圖 5.16	、SAR 衛星影像(1996/02/01)波場分析結果	61

圖 5.17 、 SAR 衛星影像(1996/02/24).....	62
圖 5.18 、 SAR 衛星影像(1996/02/24)波場分析結果.....	62
圖 5.19 、 SAR 衛星影像(1996/02/25).....	63
圖 5.20 、 SAR 衛星影像(1996/02/25)波場分析結果.....	63
圖 5.21 、 SAR 衛星影像(1996/04/10).....	64
圖 5.22 、 SAR 衛星影像(1996/04/10)波場分析結果.....	64
圖 5.23 、 SAR 衛星影像(1996/04/11).....	65
圖 5.24 、 SAR 衛星影像(1996/04/11)波場分析結果.....	65
圖 5.25 、 SAR 衛星影像(1996/04/13).....	66
圖 5.26 、 SAR 衛星影像(1996/04/13)波場分析結果.....	66
圖 5.27 、 SAR 衛星影像(1996/05/16).....	67
圖 5.28 、 SAR 衛星影像(1996/05/16)波場分析結果.....	67
圖 5.29 、 SAR 衛星影像(1996/05/18).....	68
圖 5.30 、 SAR 衛星影像(1996/05/18)波場分析結果.....	68
圖 5.31 、 SAR 衛星影像(1996/05/19).....	69
圖 5.32 、 SAR 衛星影像(1996/05/19)波場分析結果.....	69
圖 5.33 、 SAR 衛星影像(1997/05/01).....	70
圖 5.34 、 SAR 衛星影像(1997/05/01)波場分析結果.....	70
圖 5.35 、 SPOT 衛星影像在不同 FFT 視窗尺寸下之分析結果.....	71
圖 5.36 、 SAR 衛星影像在不同 FFT 視窗尺寸下之分析結果.....	72

表 目 錄

表 5.1、報告中用於分析之影像.....	53
-----------------------	----

台中港海域海洋環境監測之應用研究

摘 要

本計劃主要目的是發展及建立衛星影像海洋波譜處理系統。衛星影像於海洋波譜之推求，其分析方法及應用領域日趨成熟及普遍，本計劃即針對衛星影像的資料特性，發展一海洋波譜推求的分析方法，同時將衛星影像之存取、分析方法及結果展示，整合成一個系統，以供使用者可實際使用。系統之主要特性包括：

- 衛星資料之存取及展示
- 研究區之選擇及非研究區（如陸地）之切除
- 波譜視窗大小之選擇
- 波譜分析及修正
- 波譜展示
- 結果之儲存

另外配合上述系統於本計畫中採購一套衛星遙測數據影像處理系統（ERDAS IMAGINE 8.2）及相關設備。

一、前言

衛星遙測技術最大特色除可提供涵蓋廣大區域的資料，同時也克服對於海況不佳時，或不易到達的海域的海象觀測。不僅可避免海上作業的困難與危險，又可免除海洋觀測儀器流失的風險，因此衛星遙測技術在海象觀測的輔助應用具極高之安全與經濟效益，值得深入研究。由於衛星遙測屬專門技術，限於本所人力與設備，故本計畫與中央大學太空及遙測研究中心合作辦理，同時進行相關技術的移轉。

本研究主要目的是發展及建立一個衛星影像海洋波譜處理系統。基本上，衛星影像可提供大面積及二維度的資料，因此在海洋波譜的推求上，相較於傳統浮球的量測上具有大範圍及全面性的優點。過去相當多的研究也證明衛星影像的確可提供海面波譜的能力。本研究即利用衛星資料的特性來發展海洋波譜的萃取，同時將資料之存取、分析方法及顯示整合成一系統，以供使用者可直接進入此一系統進行衛星影像海洋波譜之實際分析。另外配合本系統的建立採購一套衛星影像處理系統。

因本計劃所用的衛星資料大部分是 ERS 1/2 的 SAR（合成孔徑雷達）影像[1][2]及 SPOT 的全色態影像，因此在下一節將對這兩種衛星影像作一簡介。接著則介紹 SAR 影像波譜與海面波譜之間的轉變，這節主要是考慮海洋波動可能對雷達影像所造成的影響，其間的轉換相當複雜，在本計劃只做一介紹，但因對實際應用的影響有限，並未將其包含在本計劃所建立的系統中。接著則為本系統的說明，使用方法，實際 SAR 及 SPOT 影像的測試結果。最後則為結論。

二. 衛星資料之簡介

2.1 合成孔徑雷達影像

2.1.1 簡介

雷達探測之所以能發展，是基於以下四個科學方面的原理， 1.) 天線能在精確的方向上發射電磁脈衝， 2.) 可以測出由目標物所散射之衰減回波， 3.) 可以測得發射與接收波之時間差，由此得到與目標物之距離， 4.) 可以以一固定方向之波束掃描，得到一大面積之目標物回波。至於第五個原理則是，對於隱藏著訊號資訊的相位作頻譜分析[3]，能對以上四個物理原則之應用有更大的幫助，合成孔徑雷達(SAR)也就因此而開始發展。

空載合成孔徑雷達影像之解析度約為 3 arc seconds，而衛星合成孔徑雷達影像之解析度約為 0.01 arc second。在訊號中由於目標物與雷達有相對運動而產生之都卜勒平移，可由尖峰功率來得知，在此之前要先知道其相對位置及雷達對目標物的速度，並將回波訊號對一個週期時間作積分，此週期就是脈波與下一個脈波之間隔(inter-pulse period, IPP)。

2.1.2 天線訊號之特性

由電磁波之基本理論，可導出雷達天線傳輸及接收的方向圖(directional pattern)，以通過天線之電流密度的傅立葉轉換表示之。將

方形天線中之一均勻電流密度，轉換成 sinc 函數再開根號，可得到一典型的 lobate 方向圖，如圖 2.1 所示。sinc 平方之大小就是偏離中間波束的角度，由 D/λ 的大小決定，其中 λ 為訊號之波長， D 為天線之長度。給定一功率求其角度時，會發現一個與 D/λ 呈反比之值，若選取半功率點(3dB)且以徑度來表示波束寬角度 γ 時，可得到一個近似.886 的比例常數。這些分析與點光源照射在矩形繞射格子所產生的強度圖幾乎一樣，事實上，光學上的類比在合成孔徑雷達處理過程中是十分重要的。

然而對 ERS-1 而言，是將相位的位移視為訊號，也因此使得方向圖上之主束變寬，且斜距(Range)方向上的波束寬也相對地增加，此目的為了使 100 公里之斜距寬度(range swath)上分佈著均勻的功率。由於傳送與接收方向圖是對稱的，因此當兩者用同一天線時，在高功率之輸出脈波與低功率的回波之間可做個雙重切換柵(doplex switch gating)。

2.1.3 掃描幾何

載著雷達之飛機或衛星，以穩定的速度沿著既定嘍軌道運行，隨著載具向前移動，雷達亦沿軌跡方向(azimuth)不斷掃描獲取資訊，雷達天線的波束與載具前進方向垂直，波束並向下側視投射到地面景物。

波束向下投射與地面景物成一橢圓形，此橢圓長軸在斜距方向上，打出之脈波會隨斜距之增加而收到地面點的回波訊號，因此在斜距方向上可提供即時的訊號數位化。側視合成孔徑雷達之幾何示意圖

如圖 2.2 所示，俯視合成孔徑雷達與側視合成孔徑雷達不同的是，俯視合成孔徑雷達在同一傳輸時間會對應兩個回波，分別是在俯視軌跡的左邊及右邊。

2.2 SAR 訊號處理方法

2.2.1 斜距(range)壓縮處理

在斜距方向一個真實的孔徑雷達發出一短且功率高的方形脈波，接著取出回波訊號，對一時間間隔作平均，每個平均值都是地面點之背面散射強度，而斜距也就是天線至目標物之間的距離對應訊號往返所需時間之一半[4]。斜距解析力(range resolution)與脈波波長呈正比，也因此要有較高的之解析力就必須有較短之脈波波長，當然為了使回波訊號夠強，就必須發出高能量之脈波。因此對 SAR 系統而言，就需要極高的功率。

不過，幸運的是訊號處理過程允許使用強度低但較長之脈波，使之仍然可發出足夠之能量來得到回波，也因此不需要很高之功率。雖然有些鄰近點的回波在時間上是重複的，但是在訊號處理上，可藉由脈波之形狀將重疊之訊號分開。事實上在發出脈波時，加入一匹配濾波器可分出訊號中可辨別的組成。因此它們全被壓縮在一個很窄的波形尖峰上。

2.2.2 匹配濾波器

在以下的討論中， f 、 g 、 s 皆為複數且都是時間之函數。 f 的

共軛複數是 f^* ，而其絕對值以 $|f|$ 表之。其中 “:=” 這個符號代表 “定義而來之等號”（也就是此右邊之表示式定義出此等號之左邊）。

有很多方法可得到匹配濾波器(matching filter)，最簡單的方法就是採用 “相關性” 的概念。一個訊號的 “自相關” (auto-correlation) 可由時間延遲的函數來定義之，如下式

$$acf_f := \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)f(t+\tau)dt. \quad (1)$$

其中 τ 為時間延遲， f 為訊號。如果不考慮損耗，則代表平均值之訊號會在零上下變動，當 $\tau = 0$ 時，此積分則代表能量

$$E_f = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt, \text{ 其值為正。}$$

若訊號形狀隨時間改變，經時間延遲後，訊號形狀和原先的不同。當時間延遲越長，自相關函數就越低，亦表示訊號越不相關。在任何時間延遲的情況下，由 Schwartz 不等式可知 $|acf_f| \leq E_f$ 。

要設計一個可辨別的訊號就要選擇一個很窄的自相關函數，當回波訊號與發送的訊號有相關時，也就是經過時間延遲後可得到一個較窄的脈波，以上的處理過程也就是一般所稱的數位化 SAR 處理器。而這個處理過程，並非有直接地相關性，而是一些數學式的處理。

若有一個訊號脈波頻率隨時間而增加，這就是我們一般所稱的線性調頻(Linear Frequency Modulation, FM)脈波，亦稱為鳥鳴波(chirp)。一個無限的鳥鳴波如同 $\sin t^2$ ，除了在時間延遲為零之外，自相關函

數皆為零，而一個有限的鳥鳴波，載波頻率為 f_0 ，持續時間為 T ，頻率變化率為 a ，可表示如下

$$f(t) = e^{i2\pi(f_0t + 0.5at^2)}, 0 \leq t \leq T, \quad (2)$$

其自相關函數十分複雜，算式如下

$$acf_f(\tau) = \Phi(\tau) \cdot (T - |\tau|) \cdot \frac{\sin(\pi a \tau (T - |\tau|))}{\pi a \tau (T - |\tau|)} \quad (3)$$

在此 Φ 是個調和(harmonic)載波，由一個三角波與一個 $\sin c$ 平方的波組成，在圖 2.3 的波形中十分清楚地看出鳥鳴波被壓縮成一個很窄的波形尖峰。在 $\tau = 1/aT$ 附近會出現第一個零值，因此主波束寬是 $2/aT$ ，而半功率寬約為 $1/aT$ 。

鳥鳴波的頻率是(2)式中相位之一次微分，也就是 $2\pi(f_0 + at)$ 所以在持續時間為 T 之脈波中很明顯地可知頻寬為 aT 。脈波壓縮率 T 為除以 $1/aT$ ，即是 aT^2 ，這也就是鳥鳴波訊號中持續時間與頻寬的乘積 (Time-Bandwidth product)，因此若希望得到高解析度就要提高此訊號 (Time-bandwidth product)，由於此訊號隱藏著許多訊息，因此稱之為一高性能訊號(sophisticated signal)。

時間頻寬乘積越高也就表示頻率變化率(a)越大，至於 T 之決定有許多考量，特別是考慮到接收波之需要，也就是增加影像之寬度 (swath)。由於天線無法同時接收與發送訊號，所以脈波傳輸時間相對於 IPP 要很小。以下為 ERS-1 SAR 的參數， $T = 37.1 \mu\text{sec}$ ，頻寬

$a = 15.5\text{MHz}$ ，所以 $aT^2 = 575$ ，理論上 $BT < 1$ ，而 ERS-1 則是 $BT < 2$ 。

濾波器在數學上可以摺積運算表示之，對於一個輸入之 f 函數及脈衝響應函數 h ，我們可得到

$$g(\tau) = f * h := \int_{-\infty}^{\infty} f(t)h(\tau - t)dt \quad (4)$$

此處 “ $*$ ” 表示摺積運算。為了使摺積看起來像自相關函數，設 $h(t) = f^*(-t)$ ，則

$$\begin{aligned} g(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f^*(t - \tau)dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t' + \tau)f^*(t')dt' \\ &= \text{acf}_f(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

在第二個等號設 $t' = t - \tau$ ，因此自相關函數與摺積相同。本質上，匹配濾波器就如同摺積的反函數，對輸入訊號求出近似解。因此我們要解中 $f * h = \delta$ 的 δ ，其中 δ 為 delta 函數。delta 函數的優點是篩選出在某個特定時間的訊號

$$f * \delta = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(\tau - t)dt = f(\tau) \quad (6)$$

這也就是我將式(4)中的 h 稱作脈衝響應函數的原因。

若濾波器將 delta 脈衝當作輸入，則輸出(response)則為 h 。

現在令傳送脈衝是 $f(t)$ ，而回波訊號則每隔 Δt 取樣一次，且十分均勻地在空間上作 $N+1$ 次的取樣，如此一來，天線所觀測的回波為

$$s(t) = \sum_{i=0}^N \alpha_i f(t - i\Delta t) \quad (7)$$

其中 α_i 代表在距離方向散射的程度。當然此斜距(range)與取樣的時間有關。在一般 $\Delta t < T$ 的情況下，要將以上各項疊加起來，而現在將 s 與 h 作摺積如式(5)，再用 δ 來近似 acf_f ，則輸出為

$$\begin{aligned} g &:= h * s = \sum_{i=0}^N \alpha_i h * f(t - i\Delta t) \\ &= \sum_{i=0}^N \alpha_i acf_f(t - i\Delta t) \\ &\approx \sum_{i=0}^N \alpha_i \delta(t - i\Delta t) \end{aligned} \quad (8)$$

再利用非連續的篩選特性，其中 g 為非連續的時間數列，其值為 α_i ， $g_i := g(i\Delta t) = \alpha_i, i = 0, 1, \dots, N$ (9)

然而這只是個近似的形式來表示一行影像(image line)。

2.2.3 參考函數及取視窗(reference function and windowing)

為了能有效地計算出 g ，所以經由傅立葉轉換，將其轉至頻率域，此時摺積則變為乘法。

$$F\{h*f\} = F\{h\}F\{f\} \quad (10)$$

轉換過後之脈衝響應函數 $F\{h\}$ ，也就是所稱的頻率響應函數，計算如下。

$$F\{f^*(-t)\} = (F\{f\})^* \quad (11)$$

在 SAR 之處理過程中，這就是所謂的參考函數。因此濾波器的流程為，先經過傅立葉轉換，再乘上參考函數，最後經逆傅立葉轉換回來。

經鳥鳴匹配濾波器後，一個理想的點源回波之輸出亦如同圖 2.3 所示，很明顯地，一個系統解析能力與主瓣寬窄之程度、主瓣振幅比及主、旁瓣距離有關。對 ERS-1 而言，斜距方向，脈波寬度約為 $0.13 \mu\text{sec}$ ，與第一旁瓣距為 $0.10 \mu\text{sec}$ ，而其相對振幅為 0.21，至於斜距方向取樣率為 18-96MHz，取樣間隔為 $0.053 \mu\text{sec}$ ，也就是大約等於主、旁瓣距之一半。這告訴我們，成功地壓縮脈衝會使旁瓣有重疊，而且一個像元與鄰近像元之間影像強度會有相當程度的模稜 (ambiguity)。

以下舉例一個模稜函數 (ambiguity function)，其是將訊號波形之自相關做個歸納，且藉由目標物解析能力來辨識脈波壓縮處理之成功與否。

為了減小旁瓣的模稜，對回波訊號加權是很有趣的方法。當然也可在頻率域上完成，而且還可以更方便將之併入參考函數。在減小旁瓣時，要將主瓣寬度最小化，這個動作也就決定了加權函數，經由一

些近似法可得到一個 window function , $W(f) = \alpha + \beta \cos(2\pi f / B)$, 其中 B 為頻寬, 且 $\alpha + \beta = 1$, 最常使用的是 Hamming windows , 其 $\alpha = 54$ 。

2.2.4 方位壓縮處理

真實的孔徑雷達要藉由較小的頻寬來得到方位解析度, 此時需要較長的天線, 因為頻寬與天線大小呈反比而與波長呈正比。ERS-1 的頻寬約為 3° , 雖然很小, 但是在地表的足跡(footprint)約為 5 km 。脈波重複頻率 (PRF) 為 1680Hz 時, 介於 2 個脈波之間之波來足跡只有 4m 。然而雖然在方位資訊的取樣點有很高的解析度, 但同一目標物的回波訊號, 卻分佈在許多取樣點上。所以在鄰近的目標誤會有重疊之現象。因此訊號的處理就與斜距方向相同, 將之積分成為一各壓縮脈波。

2.2.5 都卜勒變化及脈波壓縮

在這要處理的問題是將回波訊號依不同的位置而分辨出來, 也就是找出波束經過目標物所產生之變化, 而這段時間稱作同調積分時間 (coherent integration time) 。

依各訊號由移動的天線接收, 頻率會改變, 這就是所謂的都卜勒平移。頻率平移 f 與發出與接收點之相對位置有關

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR}{dt} \quad (12)$$

其中 λ 為傳送波之波長。而 R 是目標至天線之距離。在圖 2.4 中,

R_0 是衛星距目標物最短距離，此時 $t=0$ ，且 R_0 與軌跡方向垂直。若衛星之軌道速度為 V ，忽略地球自轉，由 Pythagorean 公式可知

$$R^2 = R_0^2 + (Vt)^2 \quad (13)$$

將上式對 t 微分得

$$\begin{aligned} 2R \frac{dR}{dt} &= 2V^2 t \\ \frac{dR}{dt} &= \frac{V^2}{R} t \end{aligned} \quad (14)$$

由於軌道路徑不是直線，因此以上是個近似法，而小角度之誤差近似約為 $(5 \text{ km footprint}) / (7150 \text{ km orbit radius}) < 0.0007 \text{ radian}$ 。

因此為求得更精確，訊號之都卜勒頻率變化如下

$$f = f_0 + f_D = f_0 - \frac{2}{\lambda} \frac{V^2}{R} t \quad (15)$$

就如同線性 FM。由於足跡對 R 來說十分小， R 相對而言為常數，所以在鳥鳴脈波中，回波訊號會在同一個地方被取出來。因此在斜距固定的情形下，沿著軌跡方向取樣，訊號的相位會相同，由於 V^2/R 與時間無關，軌跡方向之訊號變化像一鳥鳴波，也因此斜距方向所採用的脈波壓縮技術也可用於此。至於 ERS-1，其足跡為 5km。而最小距離 R_0 為 845 公里，我們可得

$$1 \leq \frac{R}{R_0} \leq \sqrt{1 + \left(\frac{5}{845}\right)^2} = 1.000018 \quad (16)$$

在此我們有做個假設，令(12)式中波長為常數，不過，事實上頻寬為 15.5MHz 之鳥鳴波的頻率是呈線性變化的。而實際上，在方位 SAR 處理過程中，利用鳥鳴匹配濾波器可以得到很好的結果。

2.3 準確度及幾何形變與校正

2.3.1 解析度

在討論訊號處理方法中，我們知道，要得知散射強度與影像中某個特定點之關係必須藉由訊號處理。因此，一張影像之空間解析度的好壞；可由精確度(accuracy)得知，也可由此評斷其訊號處理之優劣。

有許多因素造成訊號的誤差，不過有一點很重要的是，斜距並非直接影響解析度之因素，由理論上也可知 SAR 的辨別能力與其高度無關。而由前一章可得知

$$\gamma = \lambda / L \quad (17)$$

因此在斜距中 R 之方向上之足跡 L_{eff} 為

$$L_{\text{eff}} = \gamma R = \lambda R / L \quad (18)$$

而先前研究之重大突破則是發現 L_{eff} 的長度可代表移動雷達的有效孔徑。當目標物還在波束中，天線移動的距離就是有效長度，也就是在這個時間內發出的脈波對此目標物的訊息皆有貢獻。若有效長度越長，則得到的資訊就越多。為了有效得知整個過程中相位之平移，將(17)式中之長度乘以兩倍，可得有效頻寬

$$\gamma_{eff} = \lambda / 2L_{eff} \quad (19)$$

接下來就可計算出方位解析度。

$$\rho_z = \gamma_{eff} R = \frac{\lambda R}{2L_{eff}} = \frac{\lambda R}{2 \frac{\lambda R}{L}} = \frac{L}{2} \quad (20)$$

以上可用於其他應用。從地球上之 Arecibo 雷達(波長為 70cm)觀測金星，利用類似 SAR 之 delay-都卜勒技術。對脈波中相位做訊號處理可辨別出行進之時間延遲及由地球、金星間相對運動造成之都卜勒平移，對兩個半小時的時間做積分，在斜距為 40 萬公里的情況下，可得到半公里之解析度，此時角度解析度約為 5×10^{-3} arc seconds。

在 2.1.1 節中，我們得知 BT 對影像中目標物辨別能力之影響。對方位處理而言，訊號持續時間就是同調積分時間。等於 $R\lambda / LV$ ，而此時間乘上都卜勒頻變率 f_R 就等於頻寬，再由(15)式就可得 $BT = 2\lambda R / L^2$ 。

我們當然希望由很曉得天線就可得到很好的解析度，但是發現在處理的過程中卻和天線大小息息相關。而且在得到適當的影像大小及避免模稜(ambiguities)時，也發現寬度(swath width)、脈波長度、天線大小及 PRF 皆相互限制。

2.3.2 處理過程之誤差

為了正確地校正回波訊號，需要十分準確的時間，此時就要靠當地穩定的震盪器(STALO)，其可到 0.5 微秒的精確度而相位值可維持

在 $\pi/4$ 以內。

在前面章節中已經介紹了許多進似及簡化的假設，也因此訊號處理的過程就更需要作校正了。做重新取樣(resampling)的動作是為了得到地面等間隔之空間取樣。當取樣頻率約為 18.96MHz 時，斜距上之空間間隔約為 7.9m，這也就表示地面之空間間隔約為 18~24m，而在內插重新取樣後，一個像元的大小約為 12.5m。

2.3.3 相對運動及都卜勒計算

我們知道由載波頻率及鳥鳴率可算出參考函數。對斜距處理而言，這些參數可由發出訊號之特性得知；然而對方位處理而言，則須由(f_D 及 f_R)來決定，也就是所謂的都卜勒史跡(Doppler history)[5]。 f_D 是波束中心經過目標物時的頻率，其與衛星與目標物之相對速度有關，若我們有精確的軌道資料及地球運轉資料，則可以準確的 f_D 及 f_R 估計出這兩個參數，不過相對速度受衛星位置而影響，而且偏角(yaw)、傾角(roll)及仰角(pitch)並不易精確的估計出來。

2.3.4 浮訊鎖定(clutterlock)及自動聚焦(autofocus)

先將由影像資料本身得到的參數，當做初始猜測值，再去評斷其影像品質，最後估算出最佳影像品質。而都卜勒中心頻率也就由方位頻譜得到，這就是所謂的浮訊鎖定，其中零點所在位置的頻率就是 f_D 。

在(15)式中可看出，頻率隨時間呈線性變化，因此將同調積時間間分呈連續的間隔並計算每個間隔中之回波能量，就可得到頻譜。

算出都卜勒中心頻率後，將之微分就可得知都卜勒頻變率，不過，若相對速度之資料來源不可靠時，還需要由資料來求得以上參數。此時就需要用到自動聚焦這個技術了，由於錯誤的都卜勒頻變率會使不同觀點(looks)影像在回波處理的技術中產生錯誤，因此影像會顯得模糊，就像攝影時未調好焦距一般。此時將不同觀點影像進行後方交叉相關運算，用來修正 Doppler Rate，在重複前述步驟，就可估算出最佳之 Doppler Rate。

在實際應用上，Alaska SAR Processor(ASP)利用浮訊鎖定以得到 f_D ，再用第四章所描述的方位，算出目標物的位置，由以上就可將偵測器與目標物之相對速度計算出來，再經二次微分就得到 Doppler Rate

$$f_R := -\frac{2}{\lambda} \frac{d^2 R}{dt^2} \quad (21)$$

2.3.5 模稜(ambiguity)

由於 SAR 是處理非連續訊號，因此都卜勒頻譜的寬度受限於取樣率。對於方位處理而言，方位位置與都卜勒頻率有關，而天線圖(如圖 2.1)的旁瓣測得的是足跡外目標物之回波能量，我們認為這些能量相對於主瓣而言會較低，可是在某些情況下卻有著很高的能量，甚至取代了主瓣中較弱的回波訊號。

2.3.6 斜距遷移(Range Migration)

由(16)式中可看出在方位積分時間內斜距的變化很小，不過卻足

夠對目標物移動一個像元以上，其中 $R - R_0$ 最大值約為 15m，因此最大位移量約為兩個像元，這就是所謂的斜距彎曲(range curvature)效應。

在斜距上有較大的平移量是由於地球自轉，而在方位上我們做較簡單的分析，假設衛星與目標物之相對運動只在衛星軌跡方向，這是由於衛星的傾斜角約為 98.5 度，其軌道有一半是由南向北觀測(ascending)，另一半則是由北向南(descending)，地球是向東旋轉，而大小為 $V_e = \omega_e R_e \cos \zeta$ ，其中 $\omega_e = 7.229 \times 10^{-5} \text{ rad/sec}$ 為恆星角速度， R_e 為地球半徑，由緯度 ζ 來決定。對 ERS-1 而言，最北為 84.58 度，而 $V_e = 0.0434 \text{ km/sec}$ ；若在赤道， $V_e = 0.46 \text{ km/sec}$ 。

地球旋轉增加了 SAR 與目標物之相對運動，而相對速度所造成的平移會使得都卜勒中心頻率改變，這些在斜距方向上的平移稱之斜距行走(Range walk)效應。

以上斜距行走及斜距彎曲效應之貢獻稱之為斜距遷移效應[6]。用於彌補以上效應之處理方法，則是沿著平面上彎曲的軌道路徑重新取樣。這些路徑則是由決定 SAR 與目標物相對運動之幾何參數計算出來。

2.3.7 各種幾何上的誤差

若將衛星高度視為固定是錯誤的，由於地球面與軌道面之中心不同，且地球在軌道與極區之半徑差了 21 公里，而地表之地形起伏可相差數公里，至於衛星高度也可相差約 100 公尺，這使得影像的行與列不成直角，可造成約 0.1%的誤差。ERS-1 的 $e = 1.165 \times 10^{-3}$ ，也就

是說經過半個週期，速度變化不會超過 0.23%，而在這期間約有 200 個影像，所以可忽略之。

由於地球自轉，方位之像元間隔會隨斜距而改變，且東西方向之速度隨緯度而增加。在接近極區最遭的情況下，誤差仍小於 0.1%。

2.3.8 衰減及雜訊

(1) 雷達方程式

有許多因素造成影響 SAR 的回波功率，例如發出波之功率、天線增益、波長、雜訊等...。因此有人提出信雜比 (SNR)。

$$SNR = A \frac{\overline{P} \sigma^0 \rho_r}{R^3 \lambda V} \quad (22)$$

A 包括了天線幾何及接收器之熱雜訊這兩個因素，對 SAR 而言，A 是常數。而 \overline{P} 為傳輸之平均功率， λ 為波長， R 為斜距， V 為衛星速度， ρ_r 為地面斜距方像解析度， σ^0 為背面散射係數。

(2) 斑駁及多觀點處理

對遙測影像雷達而言，像元大小必定比波長大，也就是一個像元中含有很多散射點。由於隨機過程，造成回波訊號的擾動，使得同一目標物的回波經處理後有不同調(incoherent)現象存在，此一現象將造成影像的斑駁效應。由(20)式，可知 ERS-1 之足跡(foot print)為

$$\frac{\lambda}{L} R = \frac{\lambda R}{2\rho_z} = 1.9km \quad (23)$$

統計上 σ^0 的計算可藉由降低空間解析力做平均來減少斑駁。或者也可在成像後以影像處理方法做。若考慮計算上的效率，則使用多觀點平均法來減低斑駁效應較好。

(3)熱雜訊(Thermal Noise)

在所有的電子系統都會有這種背景雜訊，會使影像強度產生偏差，可藉由測量與資料訊號之雜訊功率將其移除，但是仍會降低信雜比。

(4)輻射校正

由雷達方程式可知訊號強度和斜距有很大的關係，而其他影響訊號之因素也與斜距、入射角或天線增益圖有關，此外，接收器之雜訊及其他系統之增益(gains)及損失(losses)都要考慮進來。內部校正是一些工程上的工作，而外部校正是觀測已知回波特性之地面目標物，在衛星經過之處架上三角反射器也就是為了這個目的。校正後之結果為一函數，其為斜距之函數，用來校正像元之強度，此函數記錄在影像檔案之檔頭中。

2.4 幾何校正及地圖座標套疊

2.4.1 地理像元位置

SAR 影像的影像產品做過一次幾何校正，可視為一張有高解析度之地圖。不過這與大地座標(經度、緯度)的解釋不同，縱使衛星的位置及速度有很高的準確度，但是其姿態卻無法很正確的得知。若衛星

指向有一點點誤差，卻可能造成在地表很大的位移。已 ERS-1 而言，偏角(yaw)0.1 度以內的誤差卻可造成地面位置一公里的誤差。

2.4.2 位置方程式

SAR 是主動式雷達，對於至目標物的斜距及回波之都卜勒史跡，提供了很準確地訊息，因為這些與準確的衛星與地表座標有關。

參考圖 2.5，考慮一個以地心為圓心之卡氏座標系統，x 軸指向春分點，xy 平面就是赤道面，而 z 軸指向北，由右手定則可將之定義出來。此座標系統稱之 GEI(geocentric equatorial inertial)，而地球自轉軸之小振動會造成春分點的小小的移動(相對於恆星)，不過對我們的時間尺度而言，可將之視為固定的。

在此參考座標中地球自轉一個恆星日之週期為 23.93447 小時，角速度為 $(0,0,\omega_e)^T$ ，其中 $\omega_e = 7.2292115 \times 10^{-5} \text{rad/sec}$ 。在地球上一個固定點(目標物)之座標為 $(x_r, y_r, z_r)^T$ ，而 x_r 、 y_r 、 z_r 要滿足下式

$$\frac{x_T^2 + y_T^2}{(R_E + h)^2} + \frac{z_T^2}{R_P^2} = 1 \quad (24)$$

$h = h(x_r, y_r, z_r)$ 為當地之高度，而 $R_p = (1-f)(R_e + h)$ ，其中 $R_E = 6378.138$ 公里， $f = 1/298.255$ 。若考慮到地形校正，會發現地表起伏很難定義的。也因此最好的方法就是假設一個固定影像高度 h 。後來角對當地變化做校正。至於地形函數，已經有詳細的資料，若以非連續的形式表示則為數值地形模型(DEM)。

目標物也隨地球而轉動，其速度為

$$\mathbf{V}_T = \vec{\omega}_e \times \mathbf{R}_T \quad (25)$$

而由影像檔案之檔頭可得知衛星之位置與速度，因此在第 i 列的像元至感測器之向量為

$$\mathbf{R}_{ij} = \mathbf{R}_s(t_{ij}) - \mathbf{R}_T \quad (26)$$

斜距 R 為 (x_r, y_r, z_r) 的函數

$$R = R(x_T, y_T, z_T) = |\mathbf{R}_{ij}| \quad (27)$$

也就是

$$|\mathbf{R}_{ij}|^2 = R_{ij}^2 \quad (28)$$

令 $R_{ij} := (x, y, z)^T$ ，其中 $x := x_s - x_T$ 、 $y := y_s - y_T$ 、 $z := z_s - z_T$ 則

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (29)$$

將之對 t 微分

$$\dot{R} := \frac{dR}{dt} = \frac{xx + yy + zz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (30)$$

由於 $(x, y, z)^T = \mathbf{R}_s - \mathbf{R}_T$ 且 $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) = \mathbf{V}_s - \mathbf{V}_T$ ，再由 2.2.1 節中的(12)

式可得

$$f_D = -\frac{2}{\lambda R} (R_s - R_T) \cdot (V_s - V_T) \quad (31)$$

因此得知斜距 $R_{i,j}$ 後，SAR 處理器就可將某一像元之 f_D 求出。

2.4.3 Geocoding 處理法

geocoding 最終的目的就是轉到地面位置，也就是將資料套入 UTM 或立體像對[7]。先用位置方程式(location equation)算出每個像元的 GEI 座標，在轉換至地理座標，就可繪製成影像，可表示如下：

$$(i, j) \leftrightarrow (R, f_D) \leftrightarrow (x, y, z) \quad (32)$$

$$(x, y, z) \leftrightarrow (R_e, lat, long) \quad (33)$$

$$(lat, long) \leftrightarrow (X, Y) \leftrightarrow (p, q) \quad (34)$$

其中 ij 為像元位置， R 及 f_D 為斜距及都卜勒中心頻率， (x, y, z) 為 GEI 座標， R_e ， lat ， $long$ 為當地地球半徑及地理座標， X, Y 是東西及南北距離(公尺)， p, q 是 geocoded 影像之像元位置。然而求解位置及轉換方程式，非常的耗費計算時間。若影像有輕微的扭曲，在 geocoding 過程中使用 2 個簡單的 2 維轉換法-幾何修正及幾何旋轉，先選擇一個座標系統，得知其感測器及地表的關係，接著對於 2 個座標系統做雙線性轉換，得到幾何修正之影像，最後是旋轉的轉換，將

一般座標投影於地圖座標上，在此令 r 為地面斜距方向之距離，而 S 為地面上軌道方向之距離，其轉換如下

$$(R, f_D) \leftrightarrow (r, s) \quad (35)$$

$$(r, s) \leftrightarrow (X, Y) \quad (36)$$

(36)式是對影像做旋轉，使 y 軸正向朝北，此時會產生一個旋轉之 β 角，而 β 的求法是在(32)~(34)式中取 2 個斜距相同之點 (i_1, j_1) ， (i_2, j_2) ，而他們有不同之 (x, y) 座標， $\beta = \arctan(\Delta Y / \Delta X)$ 。

現在我們可由(32)(33)(34)(36)式得知 (i, j) 與 (r, s) 之轉換，先將輸入影像之四個角落的像元轉換到 (r, s) ，再將影像平均地分成許多方形小區域(sub-blocks)，約 50×50 像元，再次將各小區域之角落像元轉至 (r, s) ，重複以上步驟直到處理完整個影像。

結合雙線性內插及旋轉分析式最有效的轉換法，再將結果轉為三個一維之重新取樣步驟，如圖 2.6 所示。

2.4.4 地形造成的變形

由於影像雷達為側視的，故可以由斜距來區別。若是俯視雷達，則斜距 R 與地面座標斜距 r 會有不連續現象。由幾何上可算出 $dR/dR = R_c/(R_c + H) \sin \theta$ ，其中 θ 為入射角，因此地面斜距方向的解析度在 $\theta = 0$ 時是無窮大，我們可由圖 2.7(a)看出，在直角三角形中， $\Delta r = \Delta R / \sin \theta$ 。所以入射角要夠大才能得到合理的斜距解析度，但也不能太大而使得背向散射太弱。因此要考慮影像寬度、斜距回波之模

稜及希望有較強之回波，來選擇 SAR 之入射角，大約在 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。而圖 2.7(b)說明當目標物在大地水準面上高度 h 處，會在地面斜距方向產生位移， $\Delta r = h / \tan \phi$ 。

2.5 法國史波特衛星(SPOT)簡介

SPOT 是一個太陽同步衛星，平均航高 832 公里，通過赤道的時間為當地時間上午 10 點 30 分，通過台灣上空約為 10 點 45 分。軌道與赤道傾斜角 98.77° ，繞地球一圈週期約 101.4 分，一天可轉 14.2 圈，每 26 天通過同一地區，SPOT 衛星一天內所繞行的軌道，在赤道相鄰兩軌道最大距離 108.6 公里，全球共有 369 個軌道 (Track)。

1986 年 2 月法國成功的發射第一顆 SPOT 衛星 (SPOT 1)，1990 年 1 月間再發射第二顆 SPOT 2，兩顆衛星相距 180 公里，同時負責接收的工作，9 月底再次成功的發射 SPOT 3 衛星。

SPOT 衛星上有兩套 HRV (High Resolution Visible) 感測器，每一套具多光譜態 (XS) 及全色態 (Pan) 兩種能力。多光譜之三個波段分別為 綠光段 (XS1: $0.5 \mu\text{m} - 0.59 \mu\text{m}$)，紅光段 (XS2: $0.61 \mu\text{m} - 0.68 \mu\text{m}$) 與近紅外光段 (XS3: $0.79 \mu\text{m} - 0.89 \mu\text{m}$)。全色態的波長範圍在 $0.51 \mu\text{m} - 0.73 \mu\text{m}$ 。每一個 HRV 之每一波段皆有 6000 個電荷耦合裝置 (CCD)。其中全色態對應之每一個 CCD 對應一個像元。多譜態每一像元由兩個 CCD 之資料平均相加而組成。每一 HRV 之總視角 (Total Field of View) 為 4.25° 。在垂直往下看對應之地面寬度為 60Km (此時 PAN 之像元為 10 公尺，XS

之像元為 20 公尺)。每一 HRV 且可在 ± 27 度內移動，以作傾斜拍攝。在 27 度時其地面寬度約為 80 公里，此時之 PAN 之像元約為 15 公尺，XS 之像元約為 27 公尺)。在 ± 27 度內共有 91 個角度位置，每一角度位置為 0.6 度。SPOT 之其傾斜能力使得 SPOT 可在其目標左右各 400 餘公里內選擇，欲觀測 60 至 80 公里範圍可利用此一功能對一特定地區增加觀測次數。

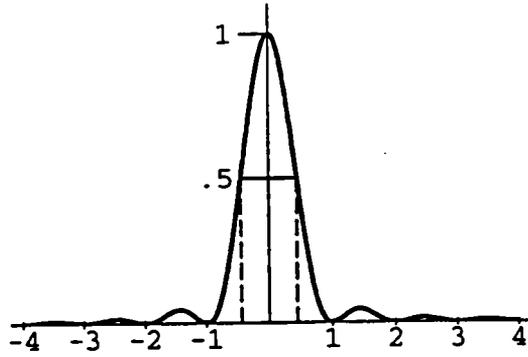


圖 2.1、sinc 函數圖

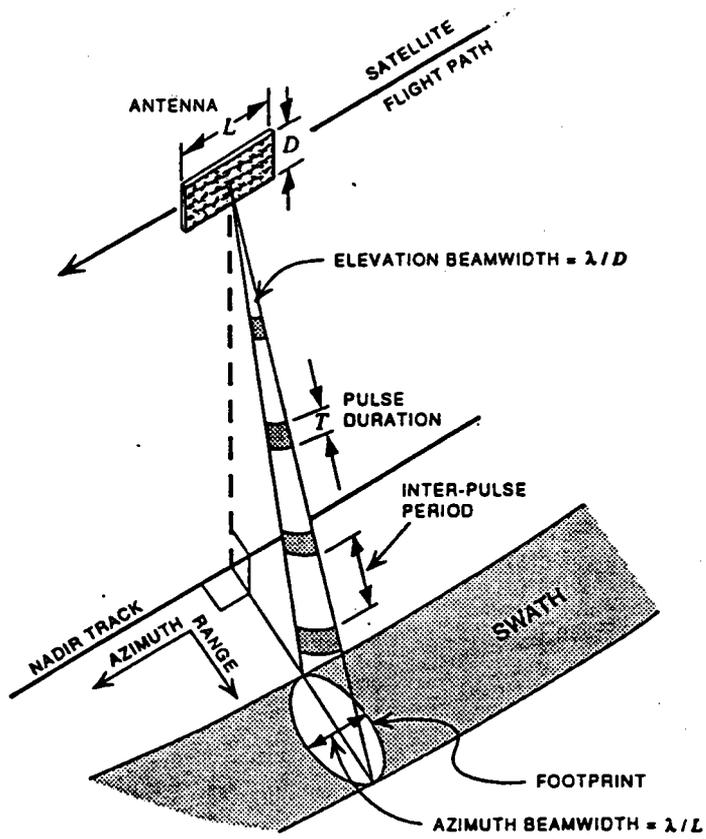


圖 2.2、側視合成孔徑雷達之幾何示意圖

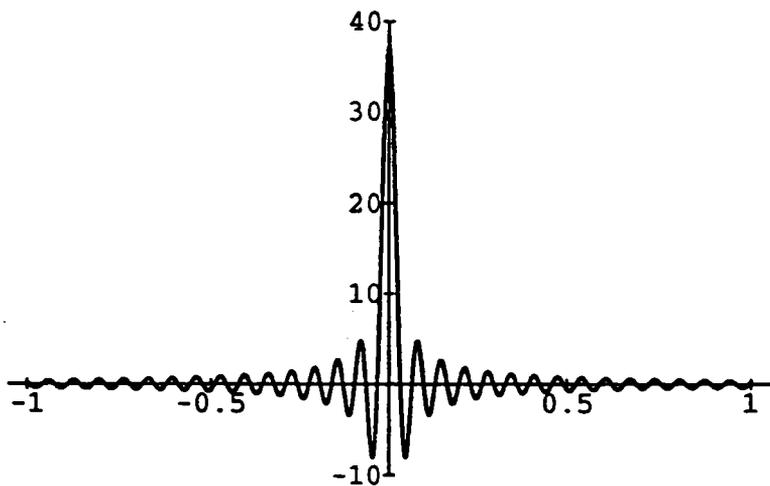


圖 2.3、鳥鳴波的自相關函數

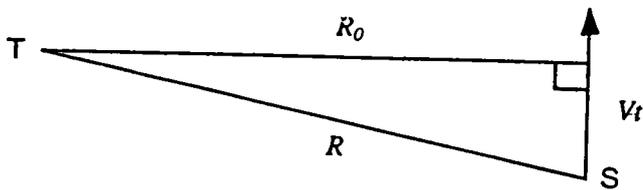


圖 2.4、利用都卜勒平移來計算衛星相對速度之空間幾何示意圖

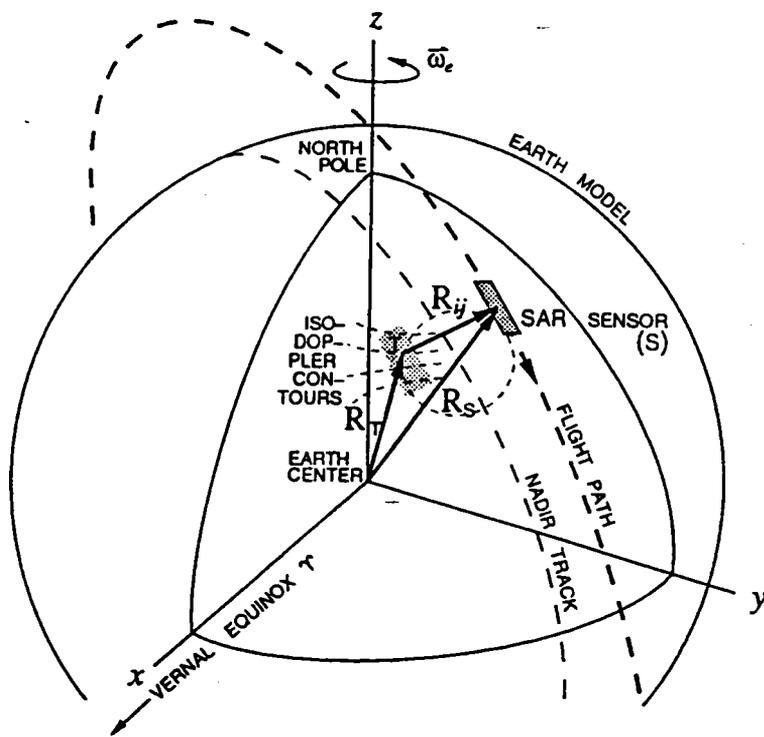


圖 2.5 、 GEI(geocentric equatorial inertial)座標系統

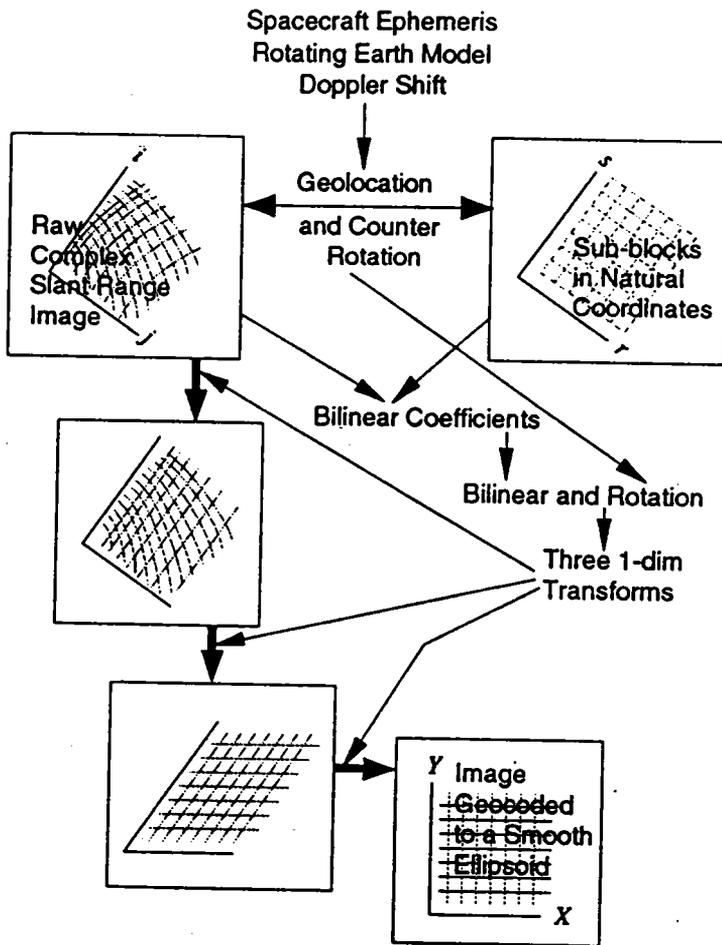


圖 2.6、合成孔徑雷達衛星影像幾何校正流程圖

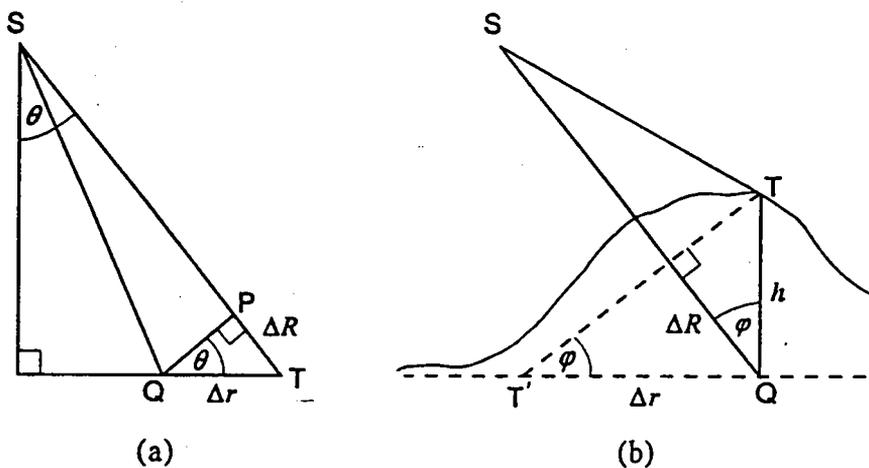


圖 2.7、合成孔徑雷達衛星影像與地形之關係：(a)在直角三角形中， $\Delta r = \Delta R / \sin\theta$ 。所以入射角要夠大才能得到合理的斜距解析度。(b)說明當目標物在大地水準面上高度 h 處，會在地面斜距方向產生位移， $\Delta r = h / \tan\phi$ 。

三. 海洋波譜

海洋波譜到 SAR 影像波譜間的轉換 $P(\vec{k}) = \Phi(F(\vec{k}))$ 由 Hasselmann & Hasselmann[8] 可得知，海洋波譜 $F(\vec{k})$ 與 SAR 影像波譜 $P(\vec{k})$ 的轉換關係可由-積分轉換式並可以級數展開如下：

$$P(\vec{k}) = e^{-kx^2 \xi'^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=2n-2}^{2n} (kx\beta)^m P_{nm}(\vec{k}) \quad (1)$$

其中

k_x 為方位方向之波數

β 為斜距對 SAR 載具速度的比值

P_{nm} 為軌道速度共變異函數與雷達截面積調變函數乘積之傅立葉轉換

n 代表輸入波譜之非線性座標

m 為速度彈跳(Velocity Bunching) β 之非線性程度

$e^{-kx^2 \xi'^2}$ 為一非線性因子，決定於海面散射元上之方位位移量

$$\xi'^2 = \beta^2 \langle u_r^2 \rangle = \beta^2 \iint |T_k^v|^2 F(\vec{k}) d\vec{k} \quad (2)$$

其中

$\langle \dots \rangle$ 為取樣平均， u_r 為波浪軌道速度之輻射分量；而 T_k^v 為距離-速度之轉換函數

$$T_k^v = -\omega(\sin\theta \frac{k_y}{|k|} + i \cos\theta)$$

ω 代表長波之角頻率， θ 為入射角， k_y 為長波在距離方向之波數。

由觀測量 $P(\vec{k})$ 反求 $F(\vec{k})$ 可藉由(1)式利用疊代法，並適當地利用 FFT 獲得。標準之方法係先定義一成本函數(cost function)再將此一函數最小化。成本函數含有三個誤差項。

模擬與觀測 SAR 波譜之差。

初始假設與反衍波譜之差；此一項可視為一平滑項，主要為解決 180° 之方向模稜，並對 SAR 波譜中高於截止方位波數遺失部分加以內插。

模擬與觀測 SAR 波譜在高波數區域之差。

因此，成本函數可寫成如下式

$$J = \int [P(\vec{k}) - \hat{P}(\vec{k})]^2 P(\vec{k}) d\vec{k} + u \int \frac{[F(\vec{k}) - \hat{F}(\vec{k})]^2}{[B + \min\{F(\vec{k}), \hat{F}(\vec{k})\}]} d\vec{k} + \eta \frac{[\alpha \lambda_{cl}^2 + \hat{\lambda}_{cl}^2]^2}{\max\{\lambda_{cl}^4, \hat{\lambda}_{cl}^4\}} \quad (3)$$

其中

$\hat{F}(\vec{k})$ 為初始假設波譜

$\hat{P}(\vec{k})$ 為觀測 SAR 影像波譜

$P(\vec{k})$ 表由最佳匹配 $\hat{F}(\vec{k})$ 所計算得到的 SAR 影像波譜

λ_{ci} , $\hat{\lambda}_{ci}$ 分別表示模擬 SAR 影像波譜與觀測 SAR 影像波譜之方位截止長度。權重值 u 必須選擇夠小 ($u = 10^{-3} \hat{P}_{\max}^3$) 使得初始假設的波譜對最後的解不致有太大影響。但 u 亦不能太小，它必須要能夠大來解決 180° 的方向模糊問題並決定 SAR 影像波譜上由於截止波數造成資訊遺失部分之波譜形式。另一權重值 $\eta = 0.5 \cdot 10^5 [\int \hat{P}(\vec{k}) d\vec{k}]^3$ 必須適當的選擇使得(3)式中二，三項的大小皆相等。最後，(3)式中，第二項分母有一常數 $B = 10^{-4} \hat{F}_{\max}$ 必須引入，始分母不致出現零。

現在對成本函數 J 作最小化，其步驟如下：由初始假設波譜 $F'(\vec{k}) = \hat{F}(\vec{k})$ 計算相對之 SAR 影像波譜 $P'(\vec{k})$ 並設定 $\alpha' = 1$ 。

依據下式可改進估算之波譜 $F(\vec{k})$

$$F^{n+1} = \alpha^n F^n + \Delta F^n \quad (4)$$

$$P^{n+1} = \Phi(F^{n+1}) \quad (5)$$

首先，假設 SAR 影像之頻譜增量 $\Delta P^n = P^{n+1} - P^n$ 可利用準線性 SAR-波浪頻譜關係式中由 ΔF^n 獲得

$$P(\vec{k}) \approx \exp(-kx^2 \xi'^2) P_1(\vec{k}) \quad (6)$$

式乃由(1)式中取 $n = 1$ 得到。

$$P_1(\vec{k}) = \sum_{m=0}^2 (k_x \beta)^m P_{1m}(\vec{k}) \quad (7)$$

$$= |T_{SAR}(\vec{k})|^2 \cdot F(\vec{k}) + |T_{SAR}(-\vec{k})|^2 \cdot F(-\vec{k})$$

其中 $T_{SAR}(\vec{k})$ 代表標準線性 SAR 影像轉換函數，設

$$\delta P^n = W_{-\vec{k}} \Delta F^n(\vec{k}) + W_{-\vec{k}} \Delta F^n(-\vec{k}) \quad (8)$$

其中

$$W_{\vec{k}} = \left| T_{SAR}(\vec{k}) \right|^2 \exp(-k_x^2 \xi'^2) \quad (9)$$

由於 δP^n 與 ΔF^n 為線性關係，因此，代入 J 時， ΔF^n 可由二次最小化程序解出。

現將(4)式代入(3)式，並設定

$$P^{n+1} \approx P^n + \delta P^n, \text{ 且定義}$$

$$u^n = u[B + \min\{F^n, \hat{F}\}]^{-2},$$

$$\eta^n = \eta[\max((\lambda_{cl}^n)^4, \hat{\lambda}_{cl}^4)]^{-1},$$

則成本函數 J 可以 ΔF^n 與 δP^n 表示之，

$$J = \int \hat{P}[\delta P^n - (\hat{P} - P^n)]^2 d\vec{k} + \int u^n [\Delta F^n - (\hat{F} - \alpha^n F^n)]^2 d\vec{k} + \eta^n (\alpha^n (\lambda_{cl}^n)^2 - \hat{\lambda}_{cl}^2)^2 \quad (10)$$

$$\text{令 } \frac{\delta J}{\delta \Delta F^n(\vec{k})} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\delta J}{\delta \alpha} = 0 \quad (12)$$

現在，首先固定 α^n 對(11)式解 ΔF^n .

($\alpha = \alpha^{n-1}, \alpha' = 1$)，則

$$\Delta F_{\vec{k}}^n = \frac{A_{-\vec{k}}[W_{\vec{k}}\Delta\hat{p}_{\vec{k}}^n + u^n\Delta\hat{F}_{\vec{k}}^n] - B_{\vec{k}}[W_{-\vec{k}}\Delta\hat{p}_{\vec{k}}^n + u^n\Delta\hat{F}_{-\vec{k}}^n]}{A_{\vec{k}}A_{-\vec{k}} - B_{\vec{k}}^2} \quad (13)$$

$$\text{其中 } \Delta\hat{p}_{\vec{k}}^n = \hat{P}(\vec{k}) - P^n(\vec{k}) = \hat{P}(-\vec{k}) - P^n(-\vec{k}) \quad (14)$$

$$\Delta\hat{F}_{\vec{k}}^n = \hat{F}(\vec{k}) - \alpha^n F^n(\vec{k}) \quad (15)$$

$$A_{\vec{k}} = W_{\vec{k}^2} + 2u^n \quad (16)$$

$$B_{\vec{k}} = W_{\vec{k}}W_{-\vec{k}} \quad (17)$$

再次，解(12)式，得

$$\alpha^n = \frac{\eta^n \hat{\lambda}_{cl}^2 (\lambda_{cl}^n)^2 + u^n \int F_{\vec{k}}^n [\Delta F_{\vec{k}}^n - \hat{F}_{\vec{k}}] d\vec{k}}{\eta^n (\lambda_{cl}^n)^4 + u^n \int (F_{\vec{k}}^n)^2 d\vec{k}} \quad (18)$$

疊代計算 ΔF 及 α ，使得前後兩次疊代之差值小於一個微量 ε .

俟 $\Delta F_{\vec{k}}^n$ 與 α^n 決定後， F^{n+1} 便可計算出，接著是 F^{n+1} 估算 SAR 影像波譜 P^{n+1} ，並重覆上述疊代程序。為確保數值計算上的穩定性，將 $\Delta F_{\vec{k}}^n$ 之範圍定為 $|\Delta F_{\vec{k}}^n| \leq \min[\hat{F}_{\vec{k}}, \alpha F_{\vec{k}}^n] / 4$ 若

$$\frac{u\Delta F_{\vec{k}}^{n2}}{[B + \min\{F^n(\vec{k}), \hat{F}(\vec{k})\}]^2} \geq 0.25[P^n(\vec{k}) - \hat{P}(\vec{k})]^2 \hat{P}(\vec{k}) \quad (19)$$

最後，因 SAR 系統係觀測單一時刻空間波浪系統之資料，自 SAR

反行之波譜會有一個或數個波浪系統之疊加[9]此可利用幾個參數加以區分。這些參數包括視高(significant wave height) H_s ，平均頻率 \bar{f} 及平均傳播方向 $\bar{\theta}$ 。基本上，反行之波譜可視為波數平面上的山嶽性範疇；亦即一波浪系統可定義為流入一局部峰點的所有頻譜點。倘若一網格點在其周圍的所有點上會有最大的能量，則此點可視為波浪系統之局部峰點。

如依據上述法則區分波浪系統，則可能過於破碎，因此必須加諸一些條件加以連結。這些條件初步定為

1. 兩個波浪系統之峰點如只間隔一網格點，則視為同一系統而加以連結。

2. 分離峰點的”谷點”不夠低，即此谷點之頻譜值高於較小峰值之85%。

3. 兩個波浪系統之頻率擴展(frequency spread) $\overline{\delta f^2}$ 大於兩個峰點之距離平方 Δf^2 ，其中

$$\Delta f^2 = (f_x^{(1)} - f_x^{(2)})^2 + (f_y^{(1)} - f_y^{(2)})^2 \quad (20)$$

$$\overline{\delta f^2} = \overline{(f_x - \bar{f}_x)^2 + (f_y - \bar{f}_y)^2} \quad (21)$$

$$\bar{f}_x = \overline{f \cos \theta} \quad (22)$$

$$\bar{f}_y = \overline{f \sin \theta} \quad (23)$$

$(f_x^{(1)} - f_x^{(2)})$ 及 $(f_y^{(1)} - f_y^{(2)})$ 分別表示兩個波浪系統之峰點。

四、海洋波譜分析系統

4.1 系統簡介

本系統之最終目的在於建立一海洋波譜與波場分析系統，能夠直接讀取原始之衛星影像並進行處理、分析以及展示，並且其使用者界面必須有足夠之親和力，因此本計畫利用 Microsoft 公司的應用程式開發軟體 Visual Basic 4.0[10]與 Math Works 公司的數學計算與展示軟體 Matlab[11]進行系統開發之工作。在本章節中將對計畫中所開發之分析系統進行詳細之說明，並針對實際之衛星影像進行分析。



圖 4.1、應用程式啟動圖示

在系統完成安裝程序後，將出現如圖 4.1 之捷徑圖示。利用滑鼠雙點此圖示後，將直接啟動本分析系統。在啟動本分析系統的同時會啟動 Matlab，並將其縮至最小。在本應用程式啟動後，將出現如圖 4.2 之歡迎畫面：

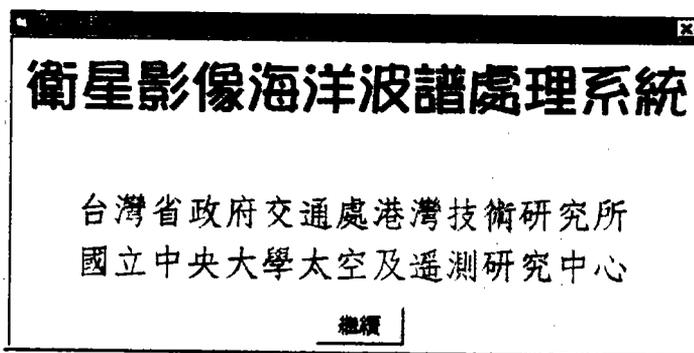


圖 4.2、系統啟動之歡迎視窗

當系統啟動之後將可看到如圖 4.3 之主控制視窗：

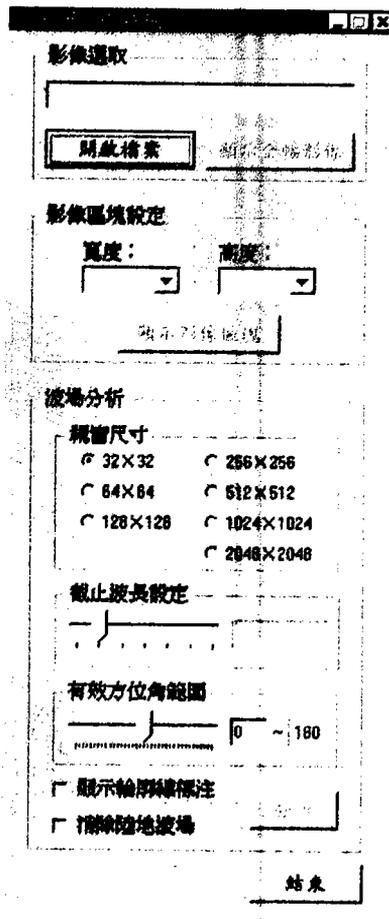


圖 4.3、分析系統主控制視窗

如圖 4.3 所示，本系統可分為三個部份：

1. 影像選取：可在此選擇進行波譜及波場分析之影像。
2. 影像區塊設定：在此可對影像分割，切割出分析之範圍
3. 波場分析：參數之設定與進行分析。

以下各節就上面各部份功能做詳細說明。

4.2 影像選取模組

首先利用滑鼠按下”開啟檔案”之按鈕，將出現如圖 4.4 之檔案選取視窗：

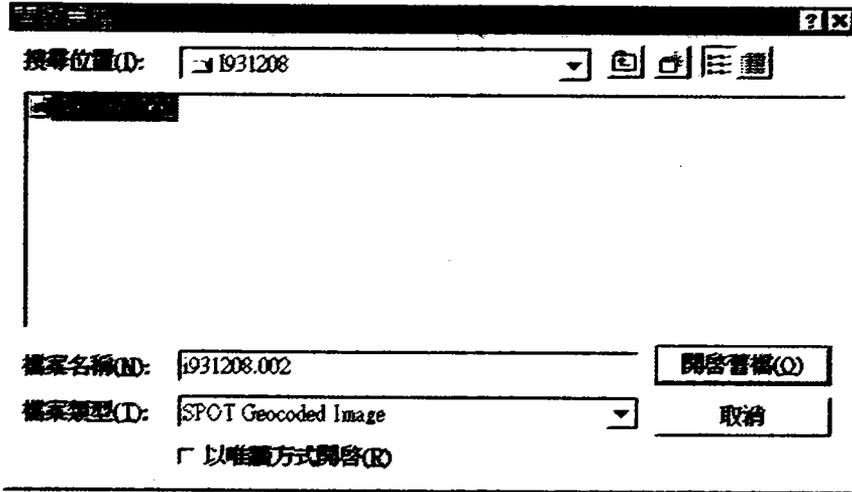


圖 4.4、選取影像進行分析

在選定欲進行分析之檔案後，按下”開啟舊檔”，系統將提供使用者如圖 4.5 之影像說明資料與如圖 4.6 之影像涵蓋範圍。

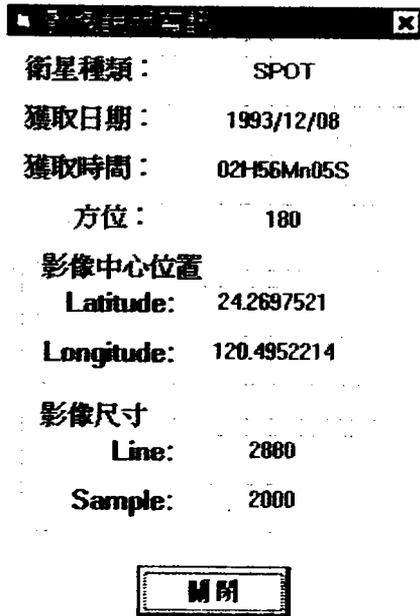


圖 4.5、影像說明資料

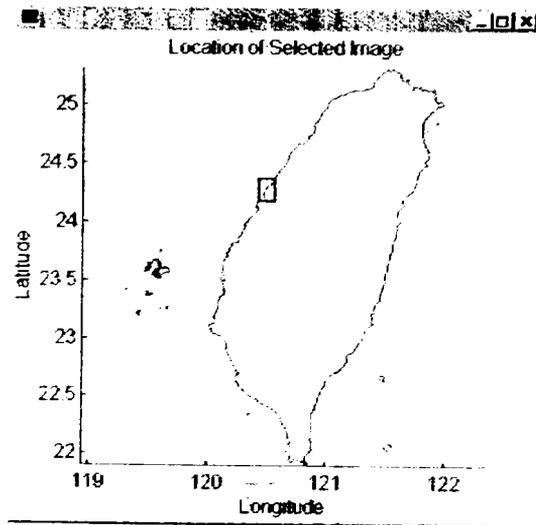


圖 4.6、影像涵蓋範圍

此時按下”顯示全幅影像”後系統將讀取全幅之影像，並展示如圖 4.7 所示：

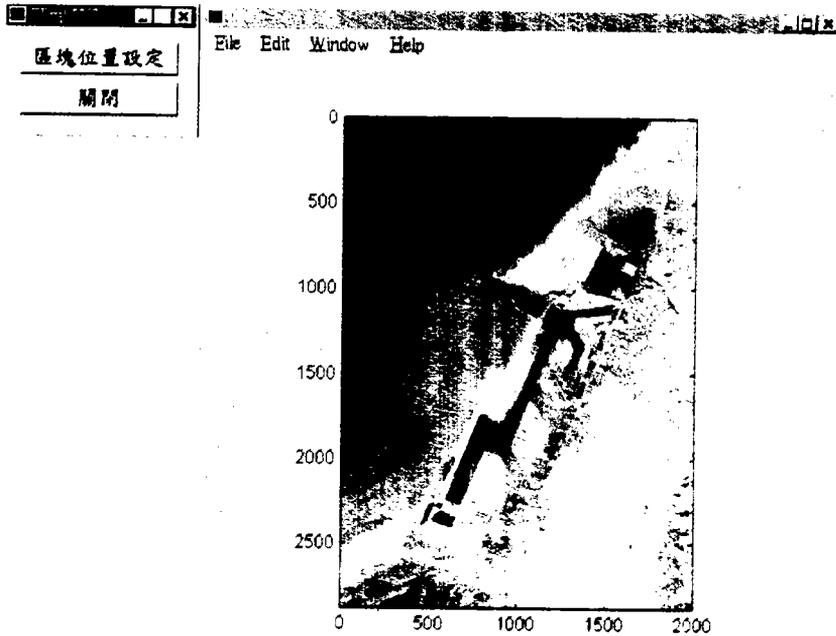


圖 4.7、全幅影像展示，並同時顯示台灣
陸地邊界，左上角為區塊選取控制視窗。

在圖 4.7 之全幅影像展示中，除原始影像之外，還有行政邊界之疊合（圖 4.7 中黃色邊界所示）在大範圍影像之顯示時(如 100 公里 x 100 公里之全幅 SAR 影像)可對影像之空間位置有更進一部之了解。

4.3 影像區塊設定

圖 4.7 左上角部份有一區塊選取控制視窗，在按下”區塊位置設定”按鈕後，在影像上將產生區塊位置設定游標，如圖 4.8 所示：

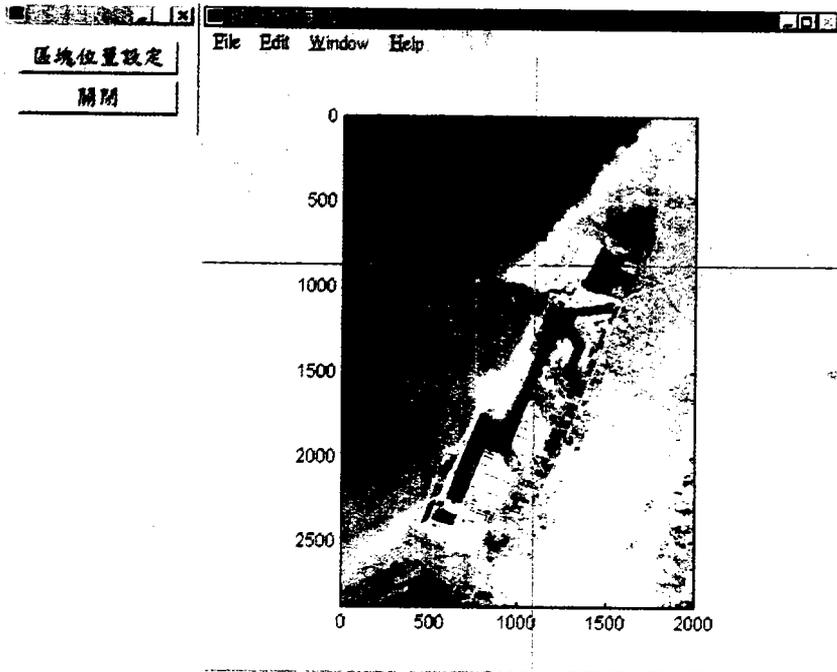


圖 4.8、在全幅影像上之區塊位置設定游標

在此游標所點取之位置即為後續作為分析之影像區塊的中心位置。在點取區塊中心位置後，在全幅影像上將出現綠色之區塊邊界，如圖 4.9 所示，以利確定選取範圍。此時參考圖 4.9 主控制視窗中的影像區塊設定部份中，有影像寬度及高度之設定，此時可利用其下拉式選擇功能，選擇所需之區塊寬度及高度。當高度或寬度有所變化時，全幅影像上之區塊邊界亦會同時更動。

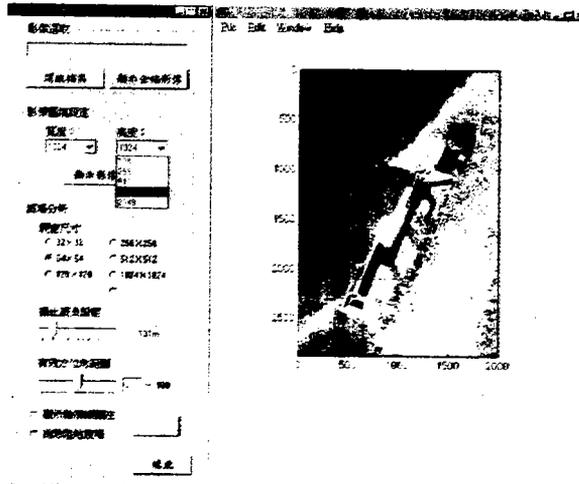


圖 4.9、可利用下拉式選擇功能，選擇所需之區塊寬度及高度

在完成區塊設定後，即可按下”顯示影像區塊”按鈕，讀取所顯示之區塊影像，以利後續之分析。圖 4.10 為選取之影像區塊。

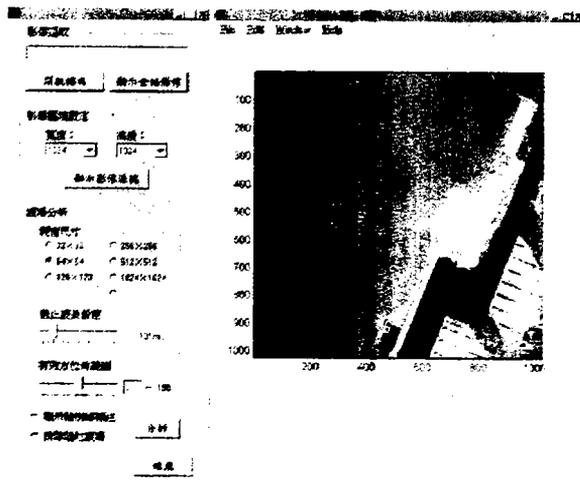


圖 4.10、顯示之選取影像區塊。

4.4 波場分析

在波場分析中有幾個參數必須先加以指定：

1. 波譜計算時 FFT 轉換之視窗大小：在當完成前節之影像區塊位

置時，可使用之最大視窗尺寸即已確定，無法執行之視窗尺寸會變成灰色而無法選取（如圖 4.10 中視窗尺寸 2048x2048 之選項已被自動設定為無法選取）。

2. 截止波長設定：為了避免海面水色變化引起之錯誤，因此在波場計算之過程中需將波長過低之部份濾除，而過濾時所使用之視窗遮罩為 Hanning Function[12]。在系統設中根據不同的視窗大小已有內定值存在，但使用者仍可視其需要改變此截止波長。此截止波長之定義為在此波長上，其波譜振幅經遮罩運算後衰減為原 1/2，如圖 4.11 為截止波長設定為 $\frac{2\pi}{4\Delta k}$ 時之遮罩函數。

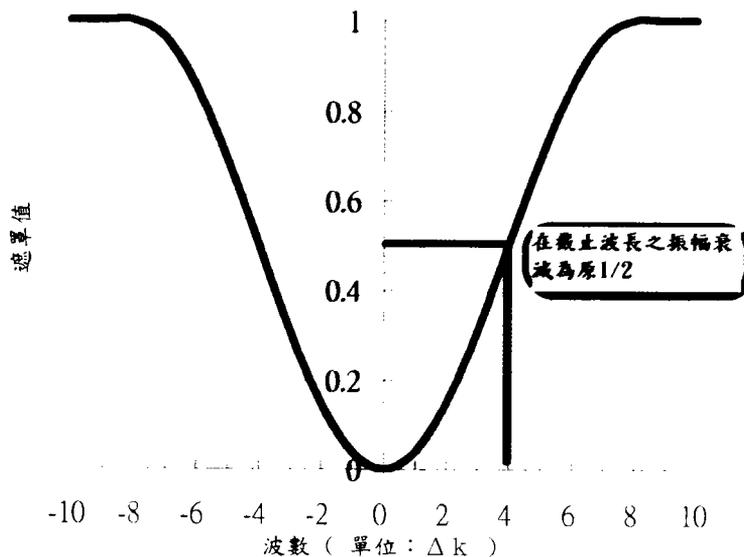


圖 4.11、截止波長設定為 $\frac{2\pi}{4\Delta k}$ 時之遮罩函數

3. 有效方位角範圍：在利用快速傅利葉轉換所得之波譜計算波向時，會有 180 度之模稜，因此使用者必須設定有效之波向方位

角範圍，使得輸出之波向具有整體之一致性。在系統中使用者僅需設定有效方位角之起始值。

- 4.顯示輪廓線標注：在顯示波譜時，決定是否將輪廓線所對應之歸一化(normalized)波譜強度加以標注之。
- 5.消除陸地上之波場：由於本系統中內建有台灣地區之行政邊界(四十萬分之一比例尺之地圖數化產生)，因此可利用空間疊合分析之運算決定此一視窗位置是否在陸地上，唯在本系統中之陸地是以行政邊界加以定義，而非隨時間不斷改變之海岸線，因此有會有部份誤判之情形產生，此時則需以人工加以修正。此外，由於空間疊合分析之運算亦須多餘之計算時間，因此若選取之影像區塊經觀察確定不包含任何陸地之部份時，可清除此一自動過濾之過程，以縮短運算之時間。

在按下”分析”按鈕後，可得如圖 4.12(關閉陸地自動過濾選項)以及圖 4.13(開啟陸地自動過濾選項)之結果。

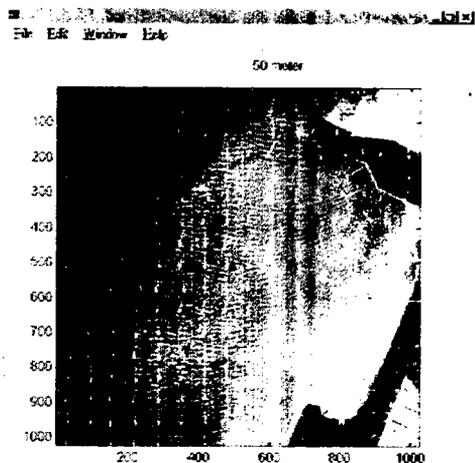


圖 4.12、對選取之影像區塊進行波場分析之結果(關閉陸地自動過濾選項)

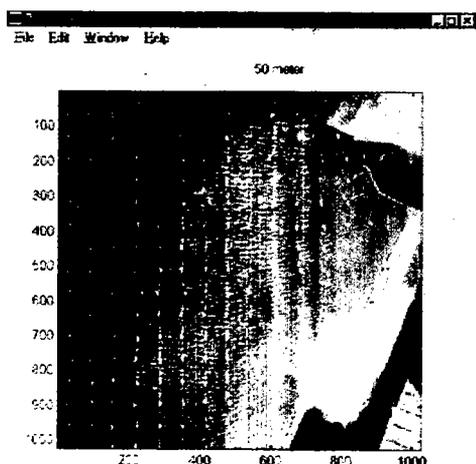


圖 4.13、對選取之影像區塊進行波場分析之結果(開啟陸地自動過濾選項)

在分析完成後，除了直接得到波場外，若使用者有興趣了解某一視窗範圍內之波譜圖時，可利用如圖 4.14 波譜顯示工具視窗來進行波譜之觀察。

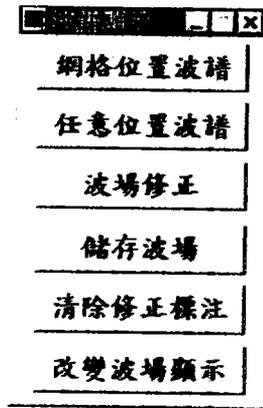


圖 4.14 、波譜顯示工具視窗

其功能分別敘述如下：

- 1.網格位置波譜：可選取按照視窗大小為單位，對選取區塊影像進行等間距分割所得之網格位置上進行波譜觀察，此時系統將先在原選取區塊影像上產生選取游標，由使用者設定位置，如圖 4.15 所示：

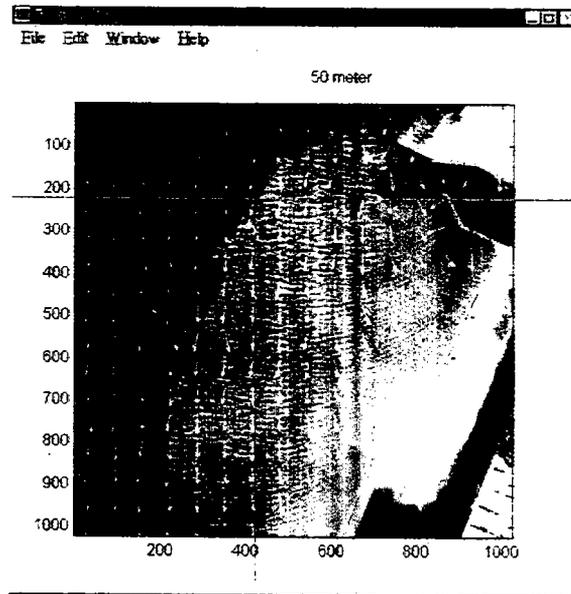


圖 4.15 、在選取區塊影像上產生選取游標，由使用者設定位置

在使用者確定選取之位置後，系統將會畫出選定之範圍並提示使用者確定之，如圖 4.16 所示：

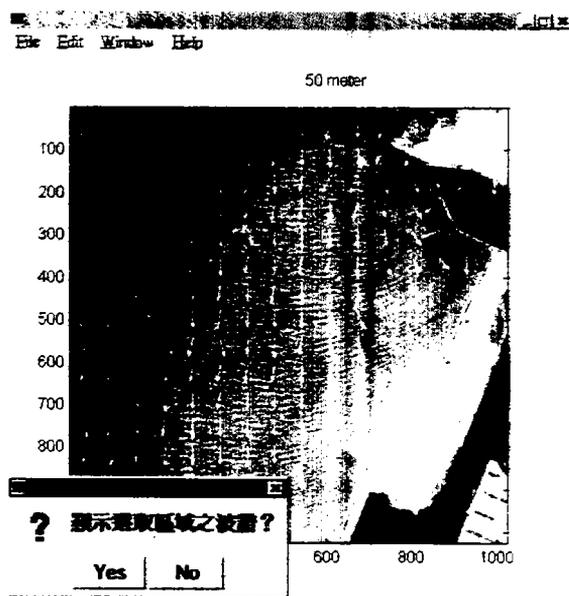


圖 4.16、系統畫出選定之範圍並提示使用者確定之

使用者確定之後，經過計算後，系統產生如圖 4.17 之波譜以及圖 4.18 之顯示之波譜所對應區域影像（在此的影像顯示視窗中具有亮度及對比之調整功能）。

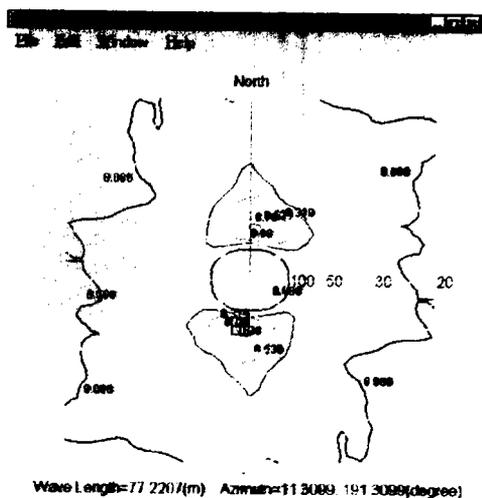


圖 4.17、系統產生之波譜

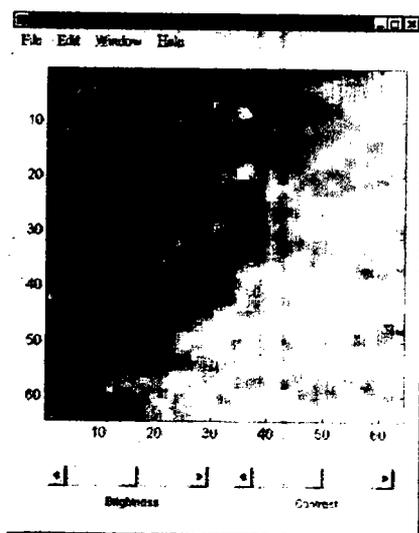


圖 4.18、顯示之波譜所對應區域影像

- 2.任意位置波譜：可對選取區塊影像進行任意位置之波譜觀察，此時系統將同樣的在原選取區塊影像上產生選取游標，由使用者設定位置。在設定完成後系統即提供波譜及對影之影像區塊以供參考。

3.波場修正：由於波場之決定在於對應位置之波譜上能量最大之位置，但由於海面上之波浪可能有各種不同波向與波長之波浪傳遞，因此僅以能量最大所選出之波場可能會與實際之觀察有所出入，因此若能確定能量次大之波浪，其波向與波長較能符合實際之經驗觀察時，可利用波場修正之功能修正波場。圖 4.19 說明修正波場之位置選取，圖 4.20 說明修正之過程，圖 4.21 說明經人工後之修正波場。

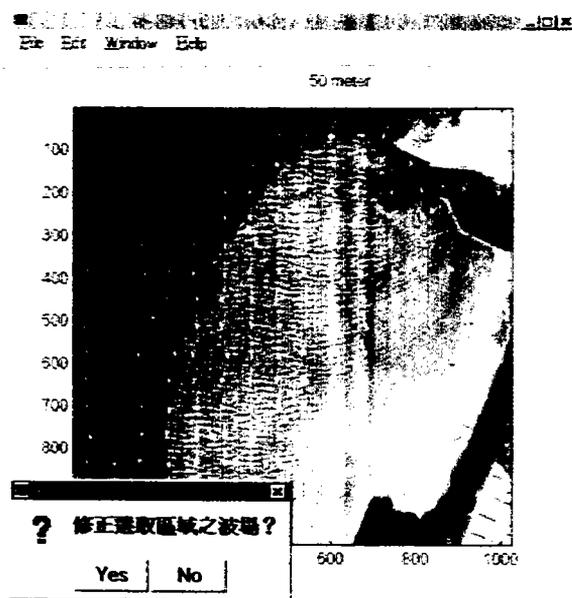


圖 4.19、修正波場之位置選取

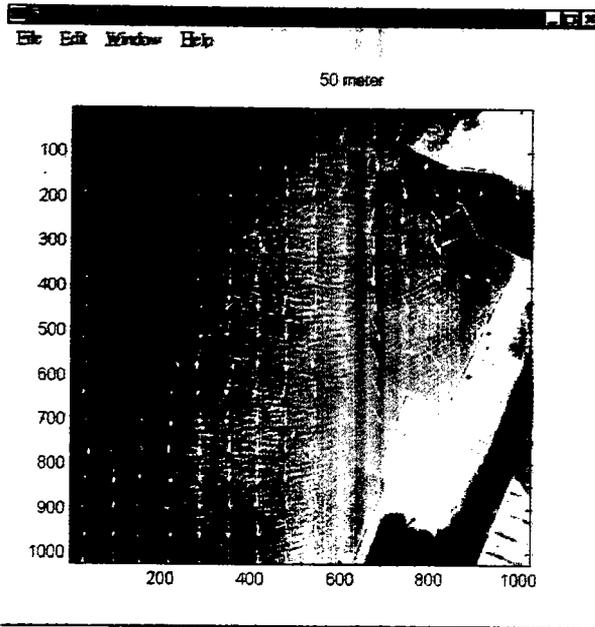


圖 4.21、經人工後之修正波場

4.儲存波場：可將波場的大小與方向加以儲存，以利後續之使用。在系統中將波長與波向部份分別儲存於兩個不同檔案中，使用者可在系統提供之對話窗(如圖 4.22 及圖 4.23 所示)中輸入檔名。所儲存之檔案格式為單準制之科學記號文字檔。

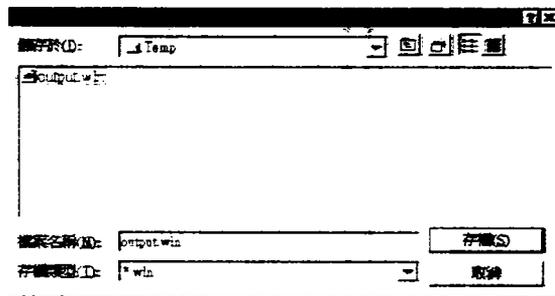


圖 4.22、系統提供之波場儲存對話窗：波長部份

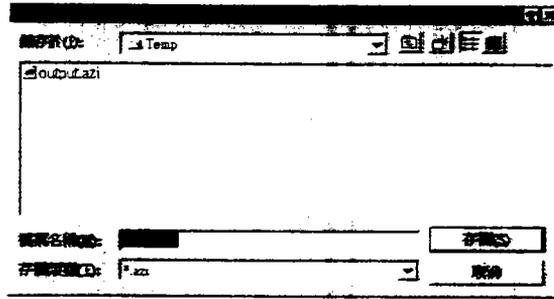


圖 4.23、系統提供之波場儲存對話窗：波向部份

5. 清除修正標注：在系統中為了將有無經過波場修正之向量加以分別，因此將經過修正之波場向量以紅色加以標注。但為了後續出圖之一致性，可利用此一選項，將所有波場向量之顏色調整為同一顏色。
6. 改變波場顯示：使用者可視其需要改變波場向量為隱藏或顯示狀態。

4.5 系統需求

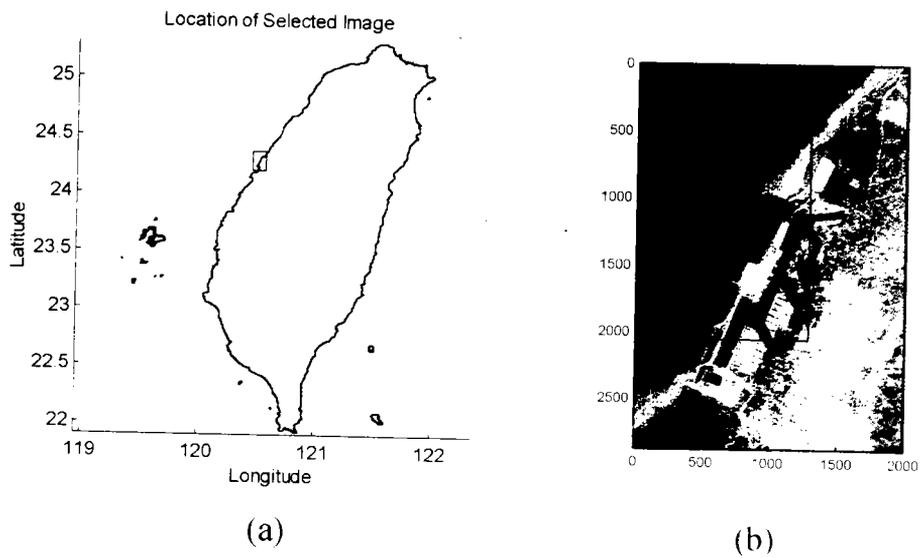
1. Intel Pentium 100 以上或其他同等級並具相容性電腦主機。
2. Windows 95 或 Windows NT 4.0 或以後之作業系統環境。
3. 32MB 以上之隨機存取記憶體(RAM)。
4. 250MB 以上之硬碟空間，此包含主機做資料暫存檔(pagefile)之空間。
5. 解析度可達 1024x768，色彩 256 種以上之顯示卡以及螢幕。
6. Math Works 公司出版之 PC 平台 Matlab 軟體。

五、分析結果

在本章中，將以實際之衛星影像（包含 SAR 以及 SPOT 衛星影像）利用此波譜分析系統進行分析，並觀察其分析結果。表 5.1 為本計畫中用於分析之影像，圖 5.1 至圖 5.34 為各影像經分析後之結果。

表 5.1、報告中用於分析之影像

Sensor	Date	Scene Center	
		Latitude	Longitude
SPOT	8-Dec-93	24:16:11	120:29:43
SPOT	30-Jan-96	24:16:11	120:29:43
SAR	7-Jan-95	21:53:02	121:06:53
SAR	5-Jul-95	24:29:05	120:38:13
SAR	17-Dec-95	24:29:23	120:20:52
SAR	27-Dec-95	24:15:54	120:34:22
SAR	31-Jan-96	24:21:43	120:35:56
SAR	1-Feb-96	24:31:48	120:38:13
SAR	24-Feb-96	24:00:21	120:37:28
SAR	25-Feb-96	24:00:39	120:27:35
SAR	10-Apr-96	24:28:26	120:37:22
SAR	11-Apr-96	24:03:46	120:31:48
SAR	13-Apr-96	22:59:52	118:50:49
SAR	16-May-96	24:18:50	120:35:13
SAR	18-May-96	22:59:31	118:50:45
SAR	19-May-96	22:57:43	118:50:27
SAR	1-May-97	22:44:56	120:14:05



(a) 相關位置，(b) 全幅影像及分析區域

圖 5.1、SPOT 衛星影像(1993/12/08)

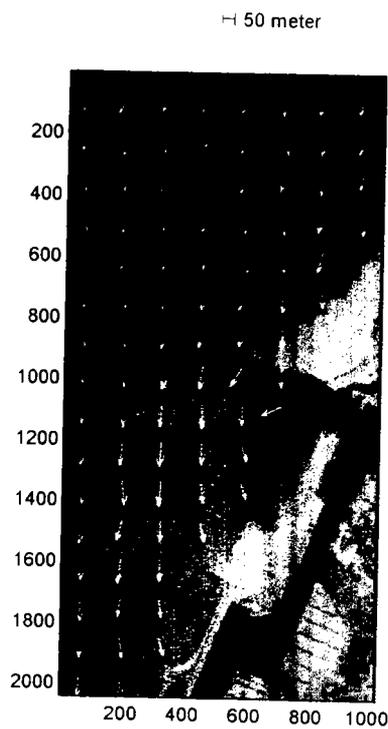


圖 5.2、SPOT 衛星影像(1993/12/08)波場分析結果
(影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)

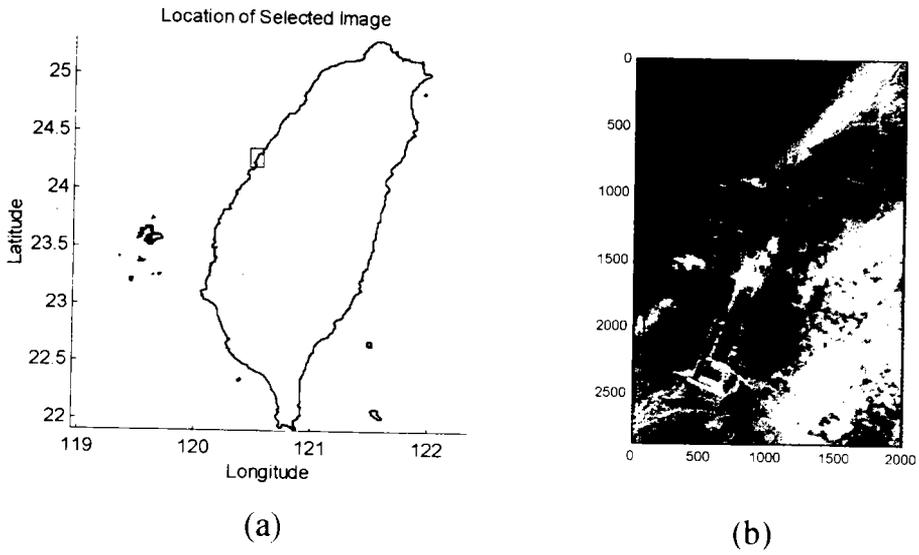


圖 5.3、SPOT 衛星影像(1996/01/30)
 (a)相關位置，(b)全幅影像及分析區域

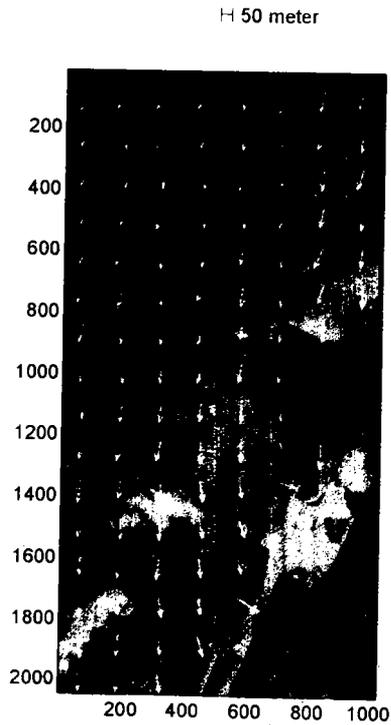
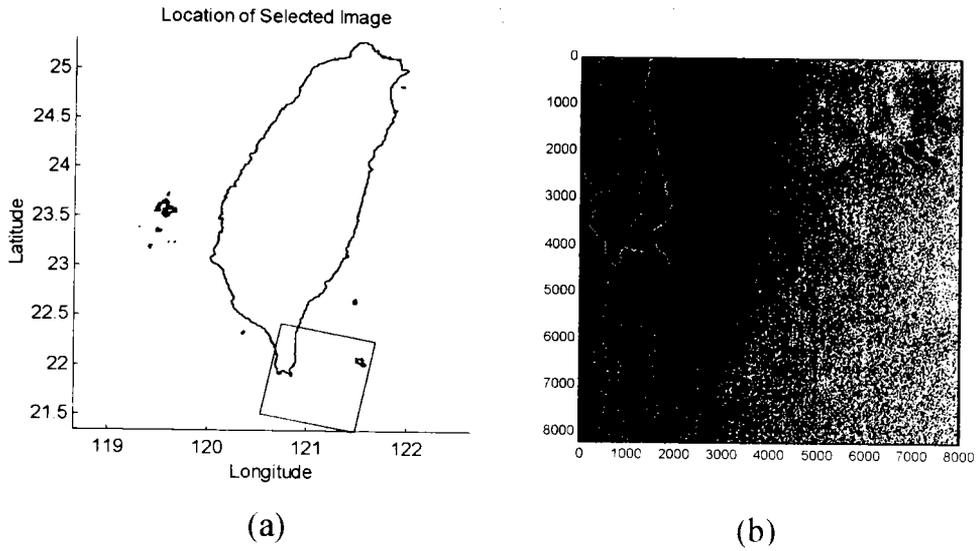


圖 5.4、SPOT 衛星影像(1996/01/30)波場分析結果
 (影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)



(a) 相關位置，(b) 全幅影像及分析區域

圖 5.5、SAR 衛星影像(1995/01/07)

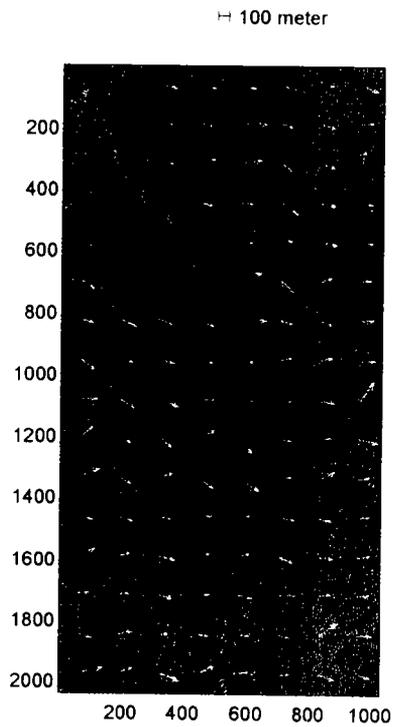


圖 5.6、SAR 衛星影像(1995/01/07)波場分析結果
(影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)

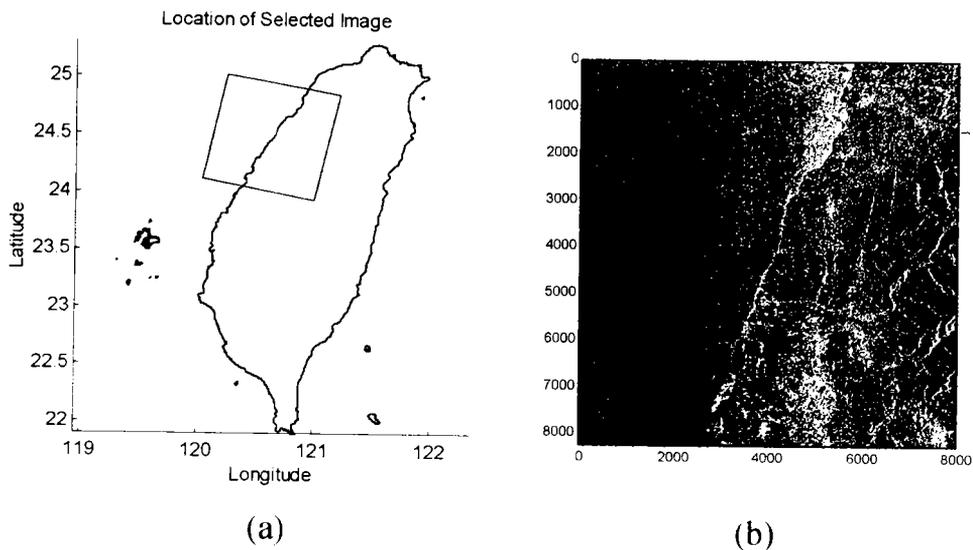


圖 5.7、SAR 衛星影像(1995/07/05)
 (a)相關位置，(b)全幅影像及分析區域

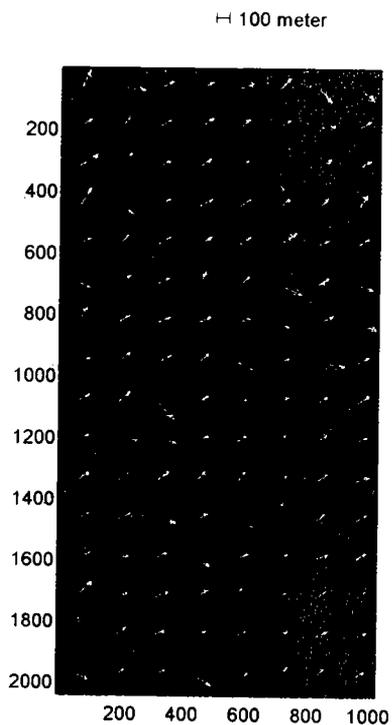
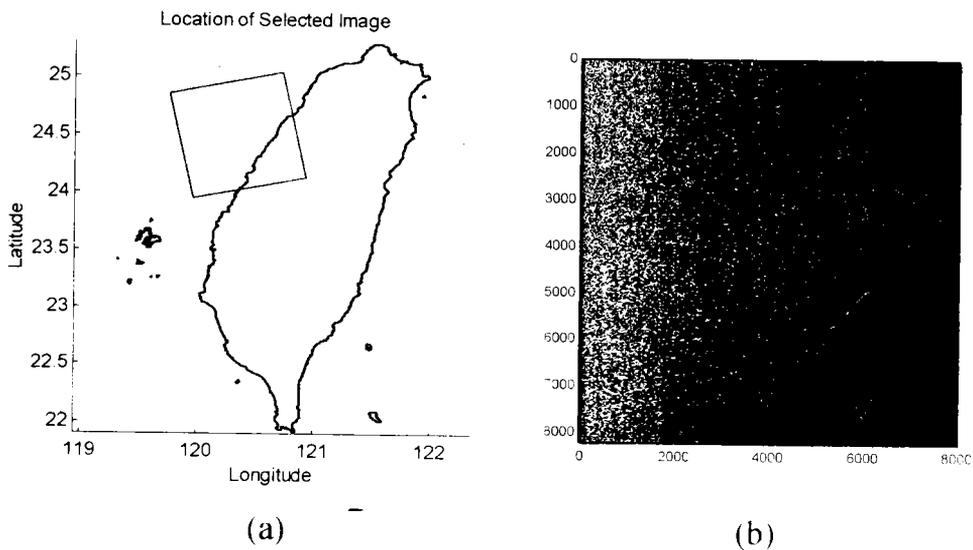


圖 5.8、SAR 衛星影像(1995/07/05)波場分析結果
 (影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)



(a) (b)
 圖 5.9、SAR 衛星影像(1995/12/17)
 (a)相關位置，(b)全幅影像及分析區域

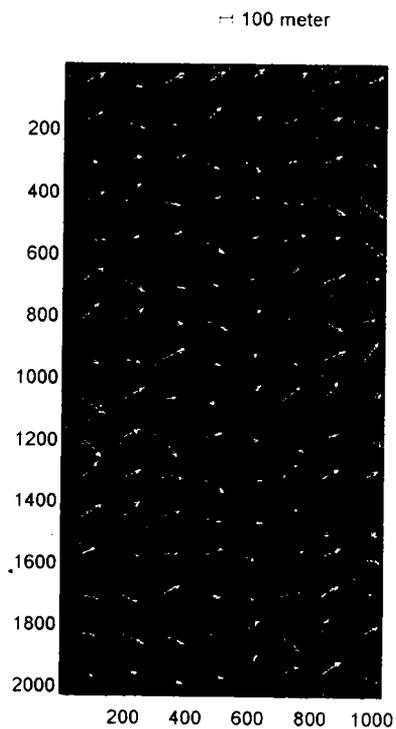
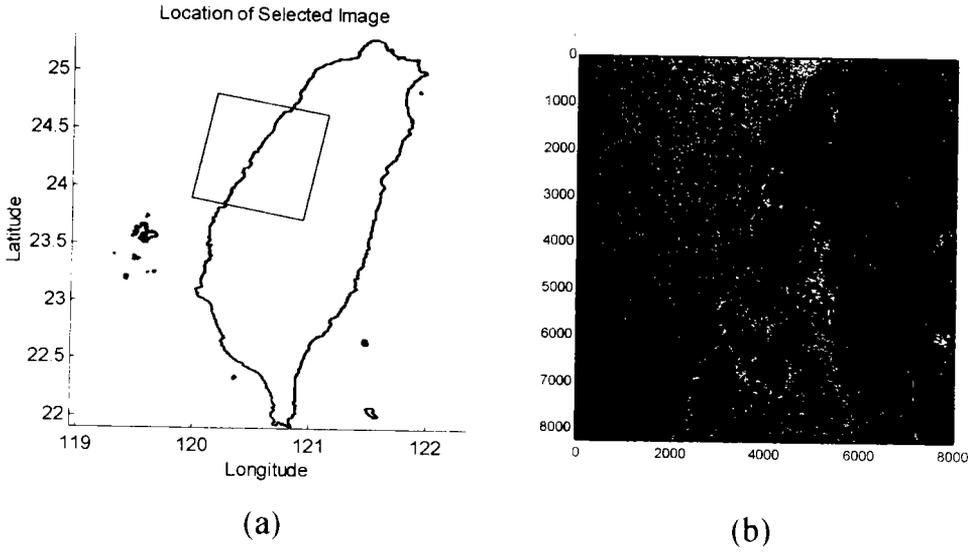


圖 5.10、SAR 衛星影像(1995/12/17)波場分析結果
 (影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)



(a) 相關位置，(b) 全幅影像及分析區域

圖 5.11、SAR 衛星影像(1995/12/27)

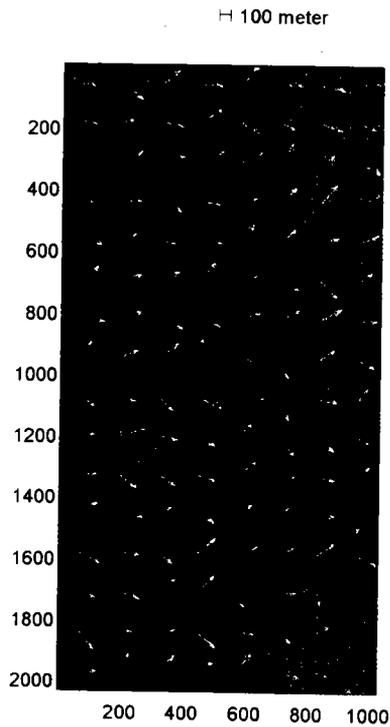
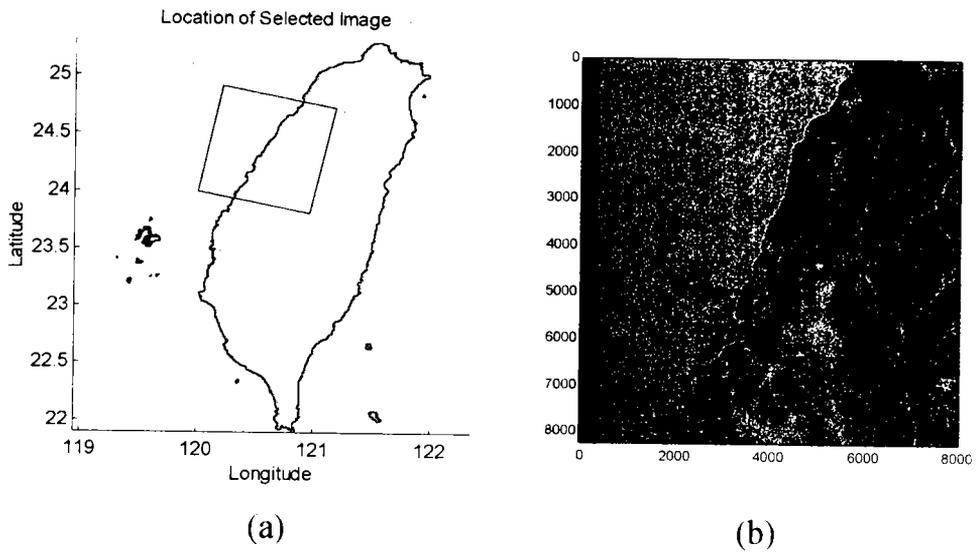


圖 5.12、SAR 衛星影像(1995/12/27)波場分析結果
(影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)



(a) (b)
 圖 5.13、SAR 衛星影像(1996/01/31)
 (a)相關位置，(b)全幅影像及分析區域

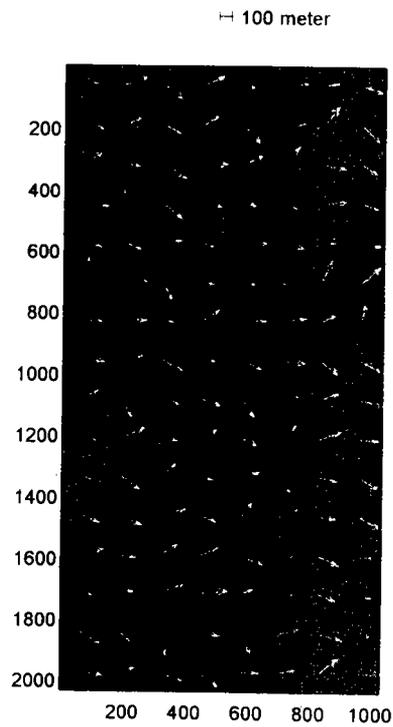


圖 5.14、SAR 衛星影像(1996/01/31)波場分析結果
 (影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)

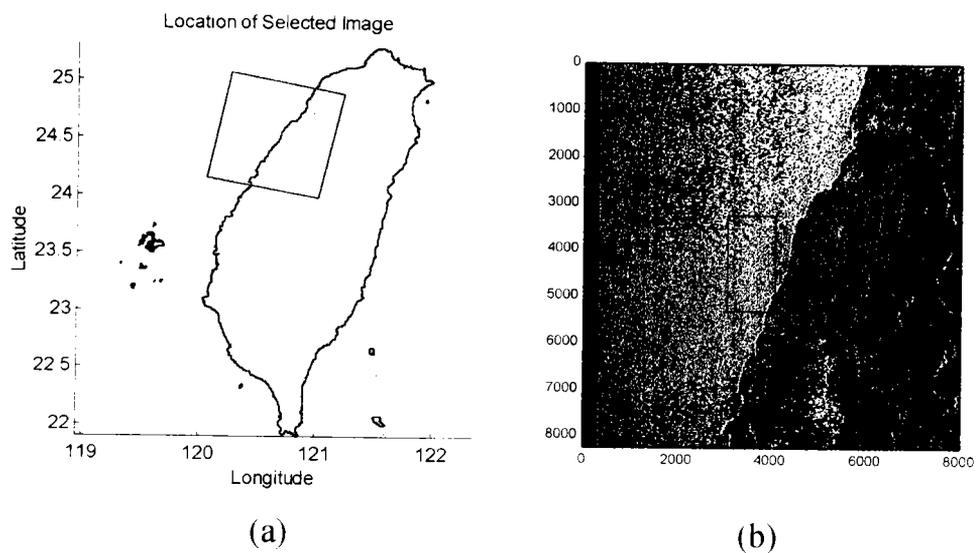


圖 5.15、SAR 衛星影像(1996/02/01)

(a)相關位置，(b)全幅影像及分析區域

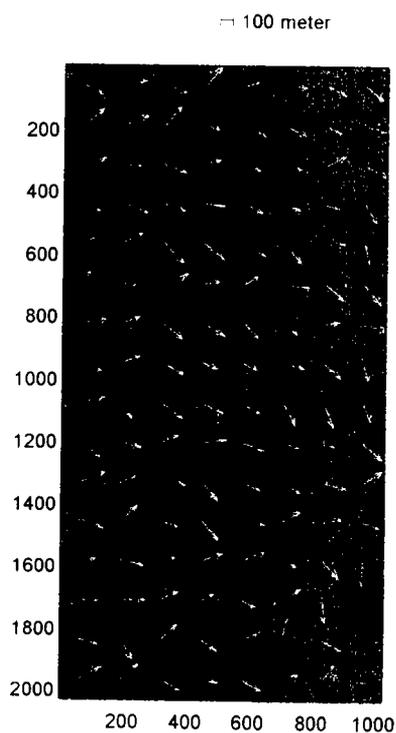


圖 5.16、SAR 衛星影像(1996/02/01)波場分析結果

(影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)

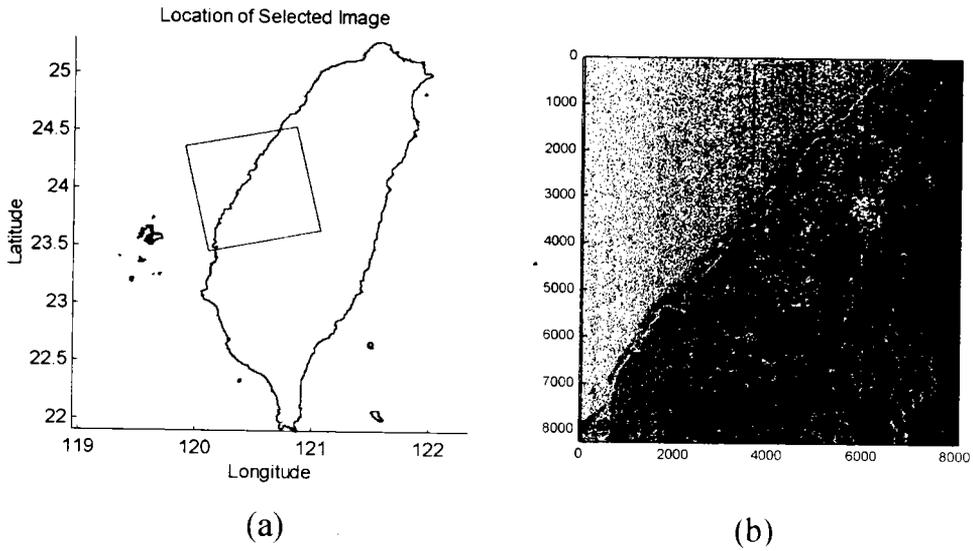


圖 5.17、SAR 衛星影像(1996/02/24)
 (a)相關位置，(b)全幅影像及分析區域

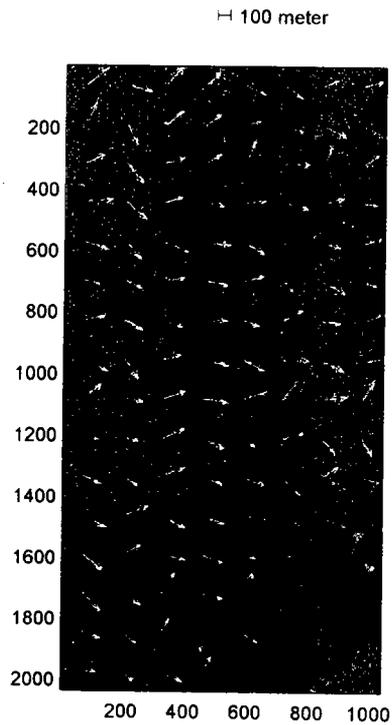


圖 5.18、SAR 衛星影像(1996/02/24)波場分析結果
 (影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)

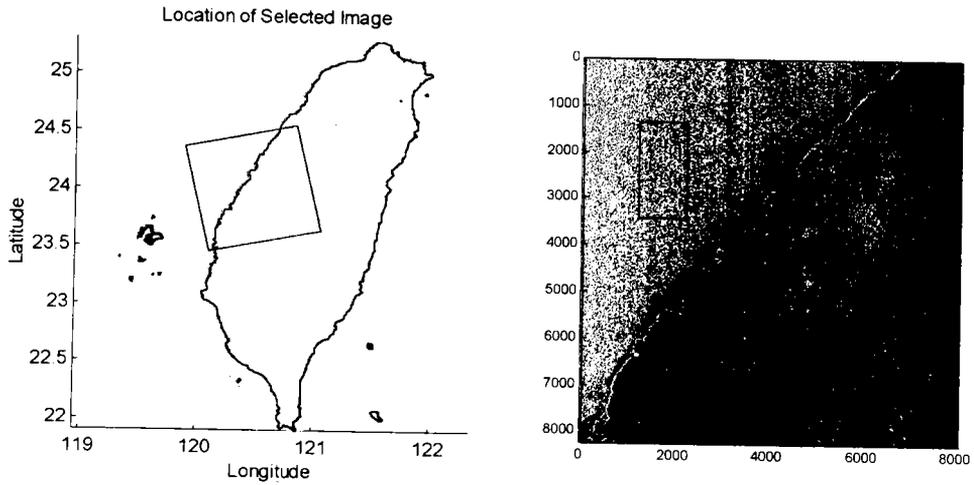


圖 5.19、SAR 衛星影像(1996/02/25)

(a)相關位置，(b)全幅影像及分析區域

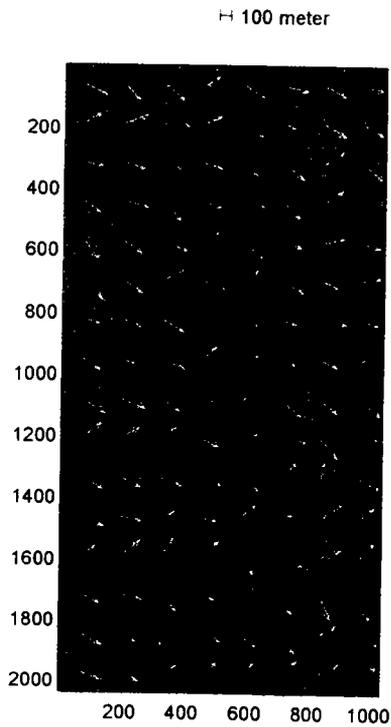


圖 5.20、SAR 衛星影像(1996/02/25)波場分析結果

(影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)

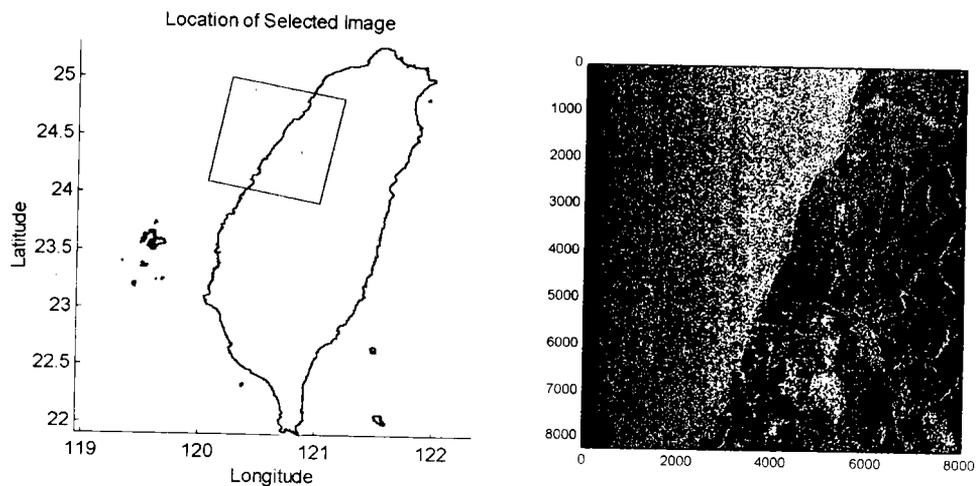


圖 5.21 、 SAR 衛星影像(1996/04/10)

(a)相關位置，(b)全幅影像及分析區域

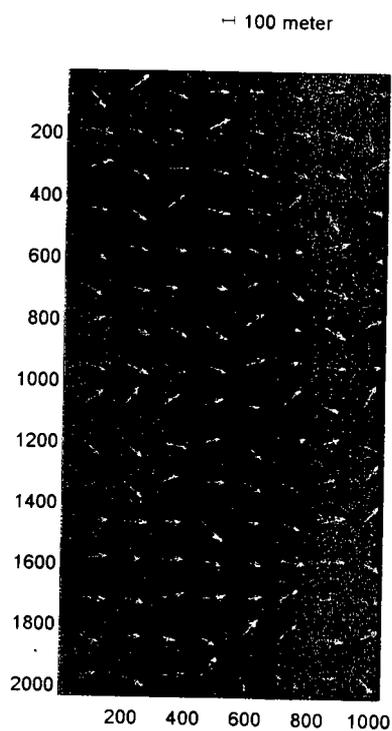


圖 5.22 、 SAR 衛星影像(1996/04/10)波場分析結果

(影像大小 2048x1024 ，視窗大小 128x128)

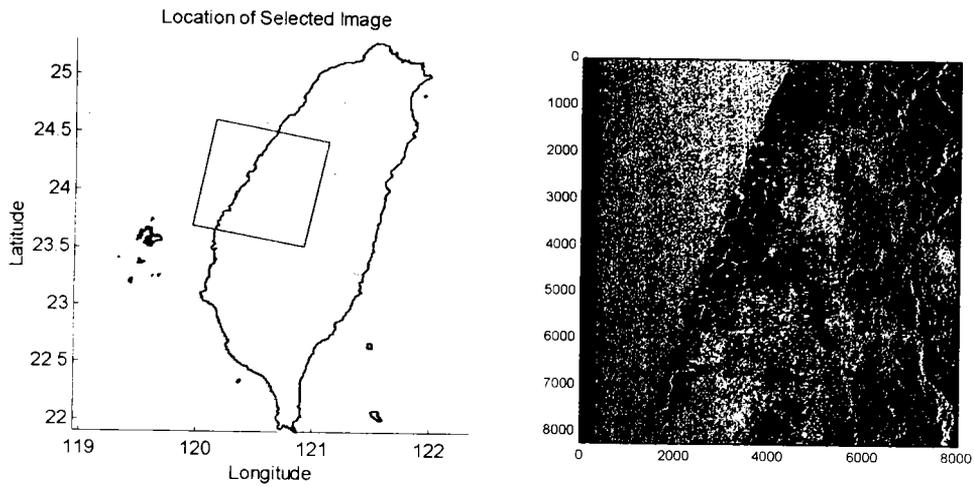


圖 5.23 、 SAR 衛星影像(1996/04/11)
 (a)相關位置，(b)全幅影像及分析區

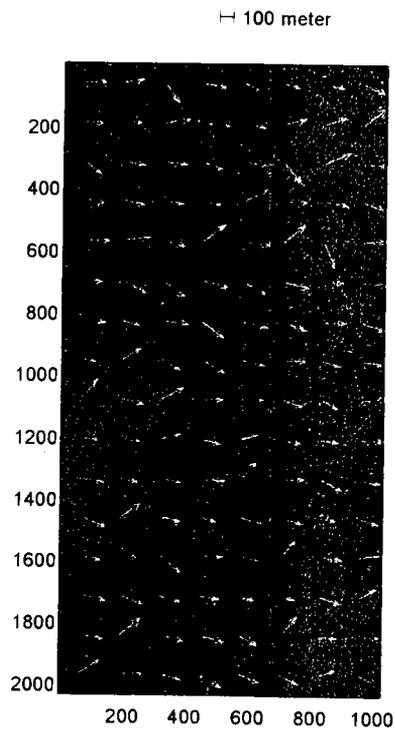


圖 5.24 、 SAR 衛星影像(1996/04/11)波場分析結果
 (影像大小 2048x1024 ，視窗大小 128x128)

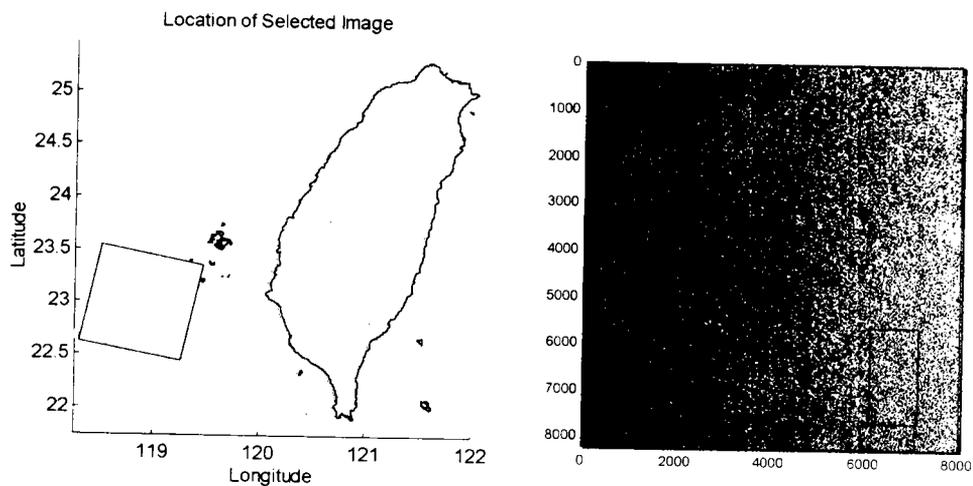


圖 5.25 、 SAR 衛星影像(1996/04/13)

(a)相關位置，(b)全幅影像及分析區

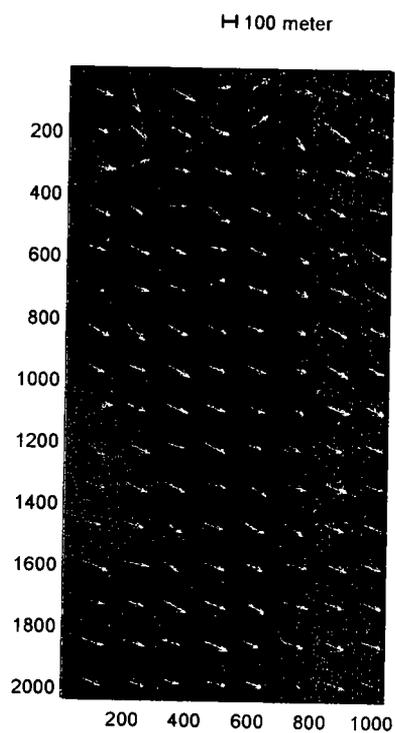


圖 5.26 、 SAR 衛星影像(1996/04/13)波場分析結果

(影像大小 2048x1024 ，視窗大小 128x128)

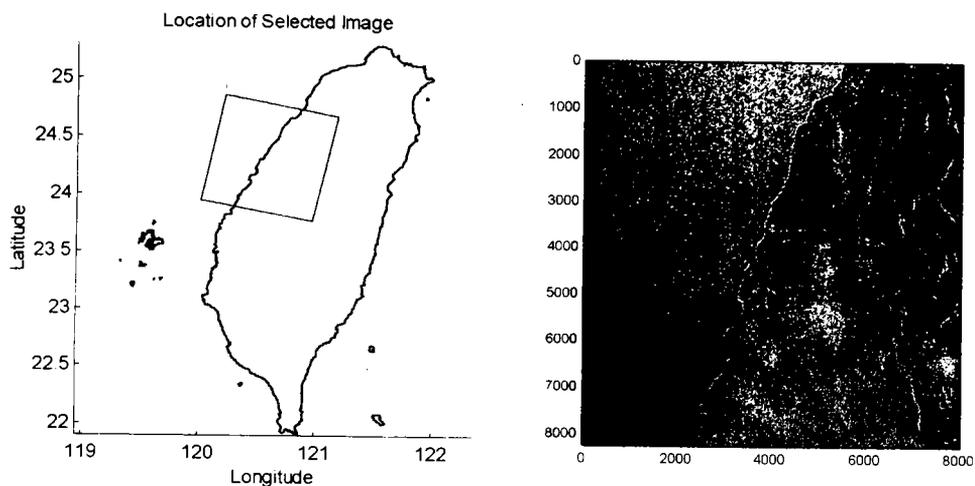


圖 5.27、SAR 衛星影像(1996/05/16)

(a)相關位置，(b)全幅影像及分析區

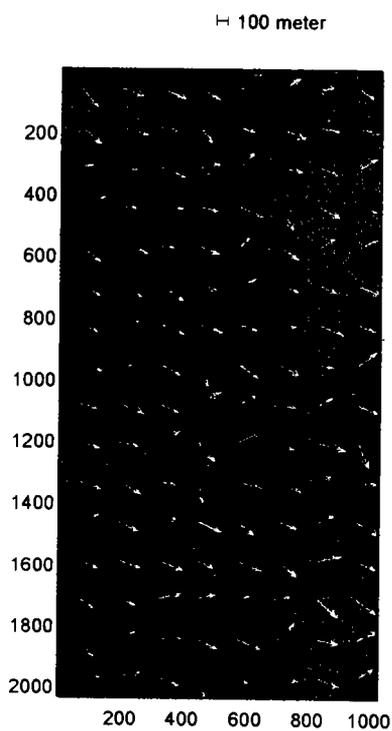


圖 5.28、SAR 衛星影像(1996/05/16)波場分析結果

(影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)

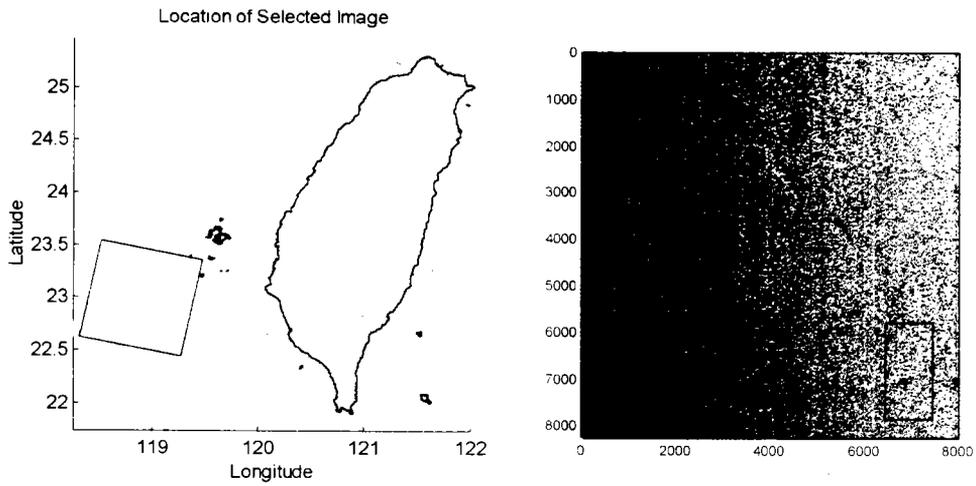


圖 5.29、SAR 衛星影像(1996/05/18)

(a)相關位置，(b)全幅影像及分析區

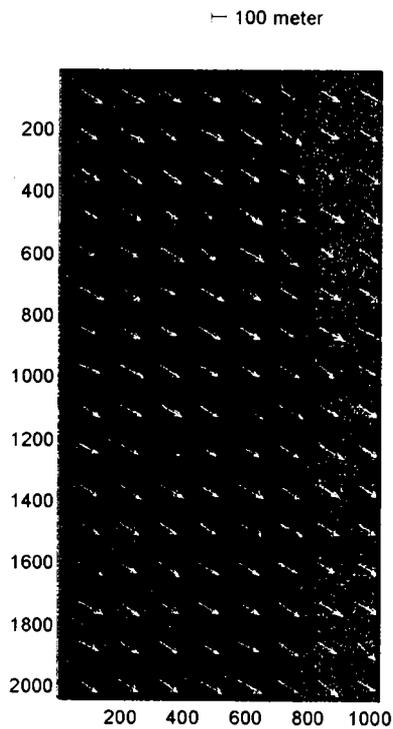


圖 5.30、SAR 衛星影像(1996/05/18)波場分析結果

(影像大小 2048x1024，視窗大小 128x128)

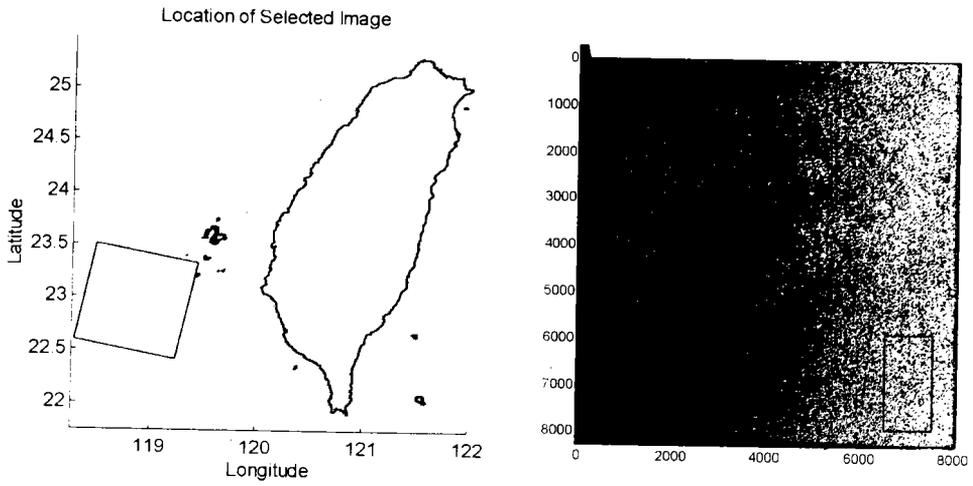


圖 5.31 、 SAR 衛星影像(1996/05/19)

(a)相關位置，(b)全幅影像及分析區

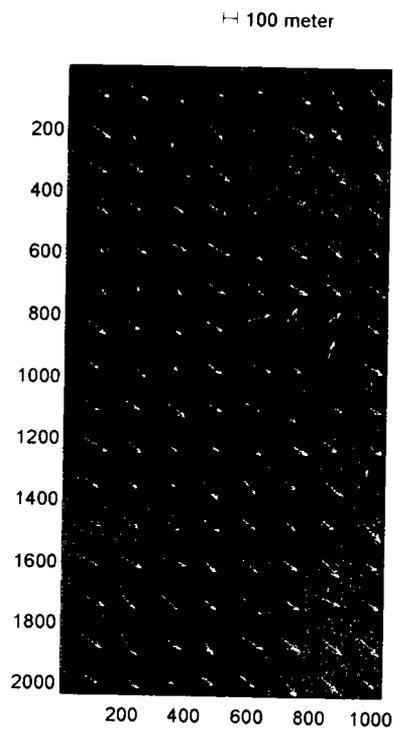


圖 5.32 、 SAR 衛星影像(1996/05/19)波場分析結果

(影像大小 2048x1024 ，視窗大小 128x128)

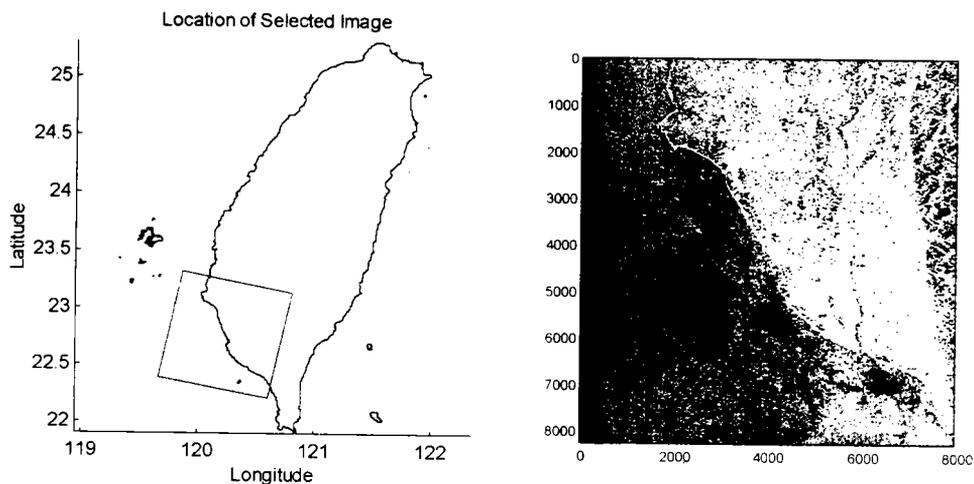


圖 5.33 、 SAR 衛星影像(1997/05/01)

(a)相關位置，(b)全幅影像及分析區

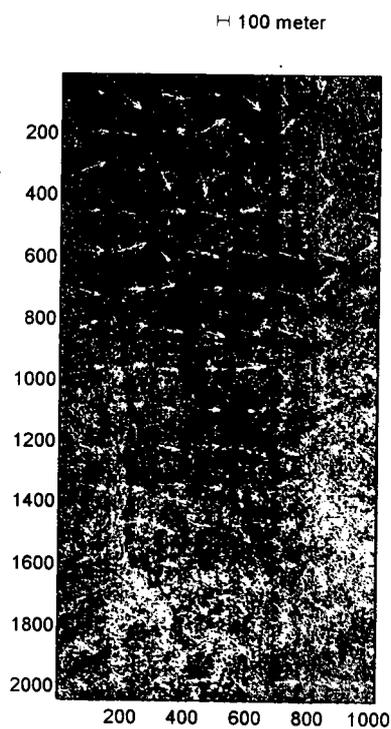


圖 5.34 、 SAR 衛星影像(1997/05/01)波場分析結果

(影像大小 2048x1024 ，視窗大小 128x128)

圖 5.35 與圖 5.36 為利用不同之 FFT 視窗尺寸進行波場分析之結果，由圖中可知，在較小的 FFT 分析視窗時，分析之結果易於顯現局部之變化，因此所得之波場在局部上會有不一致之現象，尤其是當視窗涵蓋之區域有非海面波浪所構成之影像變化時。

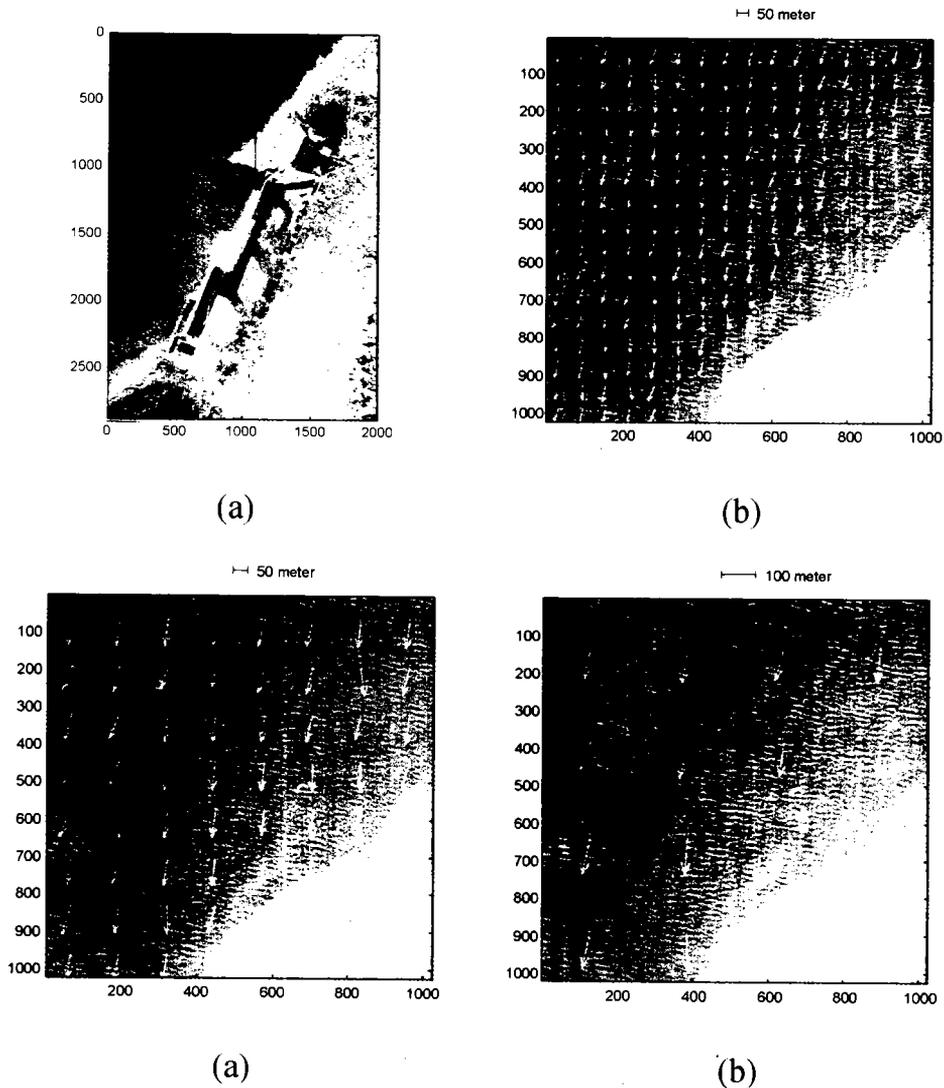
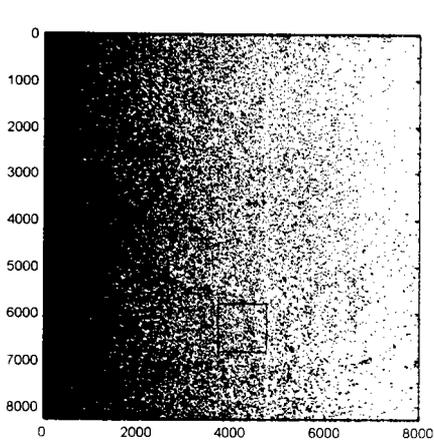
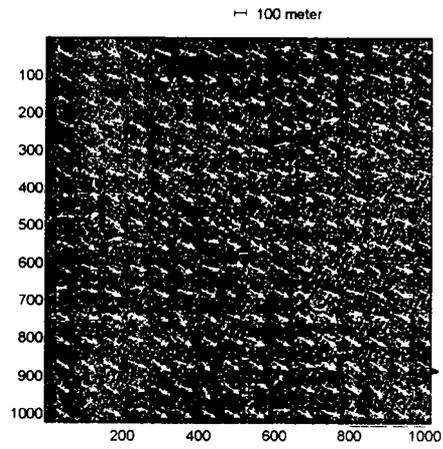


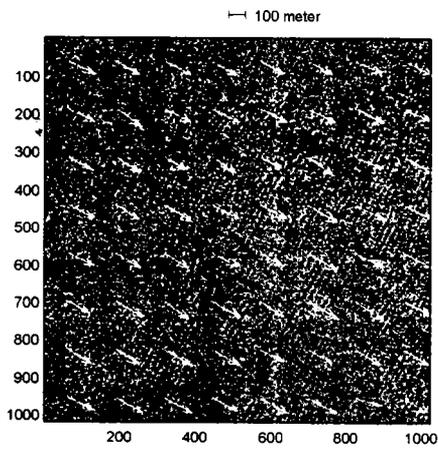
圖 5.35、SPOT 衛星影像在不同 FFT 視窗尺寸下之分析結果：(a)全幅 SPOT 衛星影像(1993/12/08) 及分析區(影像大小 1024x1024)，(b) FFT 視窗 64x64 之波場分析結果，(c) FFT 視窗 128x128 之波場分析結果，(d) FFT 視窗 256x256 之波場分析結果



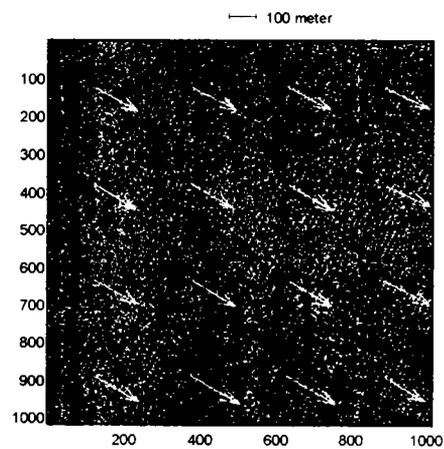
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 5.36、SAR 衛星影像在不同 FFT 視窗尺寸下之分析結果：(a)全幅 SAR 衛星影像(1996/05/18) 及分析區(影像大小 1024x1024)，(b) FFT 視窗 64x64 之波場分析結果，(c) FFT 視窗 128x128 之波場分析結果，(d) FFT 視窗 256x256 之波場分析結果

六、結論

- [1] 由非線性轉換程序之建立，可以改善傳統方法所存在之波向、波長的誤差，以提高準確性。
- [2] 本計劃之主要目的是利用衛星影像來發展海洋波譜之分析，並同時將資料之存取、分析方法及結果展示加以整合，以建立一個可供使用者易於操作之系統。系統之設計及建立主要之著眼點在提供使用者一個可實際操作的環境，使用者從衛星影像之存取、分析、展示、結果修正以及結果輸出均可在本系統完成。本系統經一系列之 SAR 及 SPOT 衛星影像測試後，證明其在實際應用上可達到方便、迅速以及準確之目的。
- [3] 利用與中央大學太空及遙測研究中心之合作研究，並配合衛星遙測數據影像處理系統的採購以達到實際參與演算分析的目標，對於本所有關衛星影像資料的分析水準有所提升。同時對於傳統的海象觀測資料之分析研判與應用也有所助益。

參考書目

1. Pam Vass (EOS), Bruce Battrick (ESA), "ERS-1 System", European Space Agency, 1992.
2. Attema, "The Active microwave Instrument On-Board the ERS-1 Satellite", Proceeding of the IEEE, vol. 79, no. 6, June 1991.
3. Coert Olmsted, Senior Programmer/Analyst, "Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide", July 1993.
4. Curlander, J. C. And R. N. McDonough, "Synthetic Aperture Radar, Systems and Signal Processing", John Wiley & Sons, New York, 1991.
5. 林慶源, "遙測影像之合成口徑雷達影像幾何處理", 國立交通大學控制工程研究所碩士論文, 1996.
6. Kwok, R., J. C. Curlander and S. Pang, Rectification of terrain induced distortions in radar imagery, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", v53, p507-513, 1987.
7. Roth, A., H. Craubner and Th. Bayer, "Prototype SAR geocoding algorithms for ERS-1 and SIR-C / X-SAR images" ,Proc. IGARSS '89.
8. Hasselmann, K. and S. Hasselmann, "On the Nonlinear Mapping of an Ocean Wave Spectrum into a SAR Image Spectrum and Its Inversion", Journal of Geophysical Research, v96, p10713-10729, 1991.
9. Alpers W. and B. Brummer, "Atmospheric boundary layer rolls observed by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1 satellite", J. Geophys. Res., vol. 99, no. C6, p12613-12621, June 15, 1994.
10. Thomas Z., "Visual Basic 4.0 How-To", The Wait Group, Inc., 1995.
11. Math Works Inc., "Using Matlab", Math Works Inc., 1996.
12. Brigham E. O., "The Fast Fourier Transform and Its Applications", Prentice-Hall International, Inc., 1988.