

「發展合成孔徑雷達干涉技術於測
繪領域應用先期規劃」(NLSC-98-13)
委託辦理案期末報告

計畫主持人：吳究

國立中央大學太空及遙測研究中心教授

共同主持人：謝嘉聲

國立高雄應用科技大學助理教授

執行單位：國立中央大學

委託單位：內政部國土測繪中心

中華民國99年6月24日

中文摘要

合成孔徑雷達干涉測量是傳統雷達技術之延伸應用，主要係藉由同一目標物在兩個不同衛星位置上雷達回波訊號之相位差來獲取地表三維資訊。近年來，雷達干涉技術常見歐美國家應用於地震、冰川移動、火山監測、地貌分類等相關領域。其優勢為可以連續的獲得高密集點位、大面積高程及地表變形資料，且雷達衛星具有資料處理迅速、影像容易取得、經濟效應高等特點，因此雷達干涉測量在地表資訊獲取上扮演著越來越重要的角色。

由於台灣多山、多植被的特性，要利用雷達干涉技術獲取高精度的地面高程數據及地表變形資訊有其先天上的限制。本研究以先期性的應用及發展此技術為主體，先將台灣中部地面覆蓋物與干涉成果的關係作一描述比較，再將此技術應用於集集地震的地表變形偵測。在數值地形模型產製方面，因山區之地形變形效應（前波縮短、疊置、陰影等）影響，導致山區之干涉精度不明顯，其同調性較低，所產生之數值地形模型均方根誤差值較大；而在集集地震變形偵測方面，因台灣中部地區繁密的植被覆蓋及地震引起的變動產生不相關，使得斷層東邊地區因低相關而無法偵測變動情形，但斷層西邊則因地勢較平坦且變動量較小，因此以雷達干涉技術可清楚的偵測其變化情形。

因雷達干涉測量處理的步驟較多，過程複雜不易了解，大多研究團隊均以套裝軟體進行處理。本研究則以公用程式為主(DORIS及SNAPHU)，期使有興趣及需求的使用者廣泛應用。

最後，由於雷達訊號在空間上與時間上的不相關性，限制了雷達干涉技術無法更廣泛的應用。而永久散射體雷達干涉技術，係利用追蹤分散的點目標，能有效克服時間以及空間上不相關的限制；因此，本研究將此項技術應用在所選取的研究區域內，以期能更清楚的了解地表變化的時空演變。

Abstract

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is an extended application of traditional radar technique, it makes used of the phase difference of radar echoes at two different satellite positions to extract the 3D information of the surface. In recent years, InSAR was applied in many study fields such as earthquake, moving glacier, volcano monitoring and ground feature classification in Europe and United State. The characteristics of InSAR include to monitor the change of elevation and ground deformation, to acquire the large scale and highly tight spatial point data, continuous measurements at different time, easily and fast retrieval the image data, high economic benefits etc. It play a more and more important role in remote sensing for the extraction of surface information.

On account of many high mountain areas and vegetable cover areas in Taiwan, it is difficult to extract the high precision DTM and deformation information of the ground surface. In this study, preliminary application and development of InSAR technology as the main work, first in central Taiwan and interfering in the ground cover for a description of the relationship between the outcome of comparison, and then used it to Chi-Chi earthquake surface deformation detection. On the DTM generation, the results reveal that the interferogram was not significant and image coherence was low in mountain area, because they influenced by the relief displacement (foreshortening, layover, and shadow), these cause the root mean square error (RMSE) of DTM was unexpected. On the other hand, we detect the Chi-Chi earthquake's deformation by

Differential InSAR (DInSAR) technique. In central Taiwan due to dense vegetation cover and changes in the earthquake did not produce relevant, making the east regions of fault due to low correlation can not detect changes in the situation, but the west of fault is more flat, the amount of change is small. Therefore, radar interferometry can clearly detect the deformation of surface.

As the processes of InSAR are complicated and difficult to be understood, most of the team are processing software package. To effectively promote the applications of DInSAR, this study mainly applies the public programs (DORIS & SNAPHU) to modeling the processes.

Finally, temporal and spatial decorrelations of radar signal have prevented InSAR technique from more frequent utilization. An advanced InSAR processing technique that tracks the signals of discreted point-wise targets called Persistent Scatterers Interferometry (PSInSAR) Technique was herein applied to our research area in order to better understand the deformation patterns. Thus the PSInSAR method allows us to know the deformation of these discrete points that were minimally affected by decorrelation of radar signals through time.

目 錄

第一章 前言.....	1
第二章 文獻回顧.....	6
2.1 雷達衛星簡介.....	6
2.2 測繪領域之發展.....	17
2.3 合成孔徑雷達發展趨勢概述.....	18
2.4 雷達干涉測量於測繪領域之發展.....	21
2.4.1 國外部分.....	21
2.4.2 國內部分.....	25
第三章 InSAR 與其它遙測領域技術比較分析.....	29
3.1 GPS 發展趨勢.....	31
3.2 LiDAR 發展趨勢.....	33
3.3 InSAR 與其它技術之比較.....	35
3.3.1 InSAR 技術之優劣勢與限制條件.....	35
3.3.2 InSAR 與其它技術比較分析.....	39
第四章 干涉合成孔徑雷達理論介紹.....	41
4.1 InSAR 模式.....	41
4.2 InSAR 原理介紹.....	43
4.3 DInSAR 原理介紹	45

4.4 誤差來源分析.....	51
4.5 影響雷達干涉結果之參數.....	54
第五章 雷達干涉處理流程.....	56
5.1 基線計算.....	56
5.2 影像套合.....	58
5.2.1 初步套合.....	58
5.2.2 精密套合.....	61
5.3 產生初步干涉圖.....	61
5.4 地球曲率改正.....	62
5.5 全相位回復.....	63
5.6 相位至高程轉換.....	64
5.7 計算三維變形量.....	65
第六章 實驗與成果.....	68
6.1 開放源碼簡介.....	68
6.1.1 Doris 簡介.....	68
6.1.2 SNAPHU 簡介.....	72
6.2 InSAR 產製 DTM.....	76
6.2.1 ERS 影像測試.....	77
6.2.2 ENVISAT 影像測試.....	96
6.3 DInSAR 地表變遷偵測.....	111
6.3.1 清境、廬山地區變遷成果分析.....	111

6.3.2	921 地震變遷成果分析.....	116
6.4	PSInSAR 原理、步驟與成果.....	124
6.4.1	原理與步驟.....	124
6.4.2	實驗成果.....	127
6.5	綜合分析.....	132
第七章	利用 InSAR 辦理 DTM 之產製及輔助現有資料進行 局部更新的產能、作業經費、人力需求及利用 DInSAR 快速 偵測地表顯著變動區域等規劃報告.....	141
7.1	衛載式 InSAR 於 DTM 產製及輔助更新之應用—應用 InSAR 技 術辦理 DTM 更新可行作法評估、作業流程設計及更新頻率探 討.....	141
7.1.1	DTM 更新可行作法評估.....	141
7.1.2	作業流程設計.....	143
7.1.3	更新頻率探討.....	144
7.2	InSAR 於變遷分析應用—研析利用 InSAR 偵測地表顯著變動區 域之作業經費、效益，以及適用此方法之地形、地貌.....	145
7.2.1	作業經費規劃.....	145
7.2.2	效益.....	149
7.2.3	適用地區.....	150
第八章	InSAR 於測繪領域應用之初步策略報告.....	154

8.1 概述.....	154
8.2 應用.....	155
8.3 未來建議之策略方向.....	159
第九章 工作期間及進度.....	166
第十章 結論與建議.....	168
10.1 結論.....	168
10.2 建議.....	169
參考文獻.....	171
附錄一 雷達干涉測量相關名詞英中對照.....	178
附錄二 參考文獻摘要綜整.....	183
附錄三 教育訓練相關資料.....	198
附錄四 研討會發表文章摘要.....	200

圖目錄

圖 2.1 台灣地區 ERS-1/2 攝像地面涵蓋示意圖.....	8
圖 2.2 RADARSAT-1 攝像模式幾何示意圖.....	11
圖 2.3 ENVISAT 衛星攝像模式示意圖.....	14
圖 2.4 ALOS PALSAR 衛星攝像模式示意圖.....	16
圖 4.1 重複軌道干涉模式示意圖.....	42
圖 4.2 雷達干涉幾何示意圖.....	43
圖 4.3 雷達差分干涉幾何示意圖.....	48
圖 5.1 基線各項參數幾何關係示意圖.....	56
圖 5.2 初步套合自動化流程圖.....	60
圖 5.3 地形效應幾何關係示意圖.....	63
圖 5.4 差分干涉技術處理流程.....	67
圖 6.1 DORIS 結合 SNAPHU 軟體進行干涉處理之流程圖.....	71
圖 6.2 1996/3/6 日 ERS-1 及 1996/3/7 日 ERS-2 SLC 影像.....	79
圖 6.3 研究區 (軌道編號為 #232&3123) 之雷達影像圖.....	79
圖 6.4 誤差向量圖(960306_960307).....	85
圖 6.5 同調性圖(960306_960307).....	86
圖 6.6 初步干涉圖(960306_960307).....	87
圖 6.7 地球曲率改正後干涉圖(960306_960307).....	89

圖 6.8 經 DEM 改正後干涉圖(960306_960307).....	89
圖 6.9 全相位回復干涉圖(960306_960307).....	90
圖 6.10 InSAR 產製之 DTM 圖(960306_960307).....	91
圖 6.11 農航所之 DTM 圖.....	91
圖 6.12 InSAR 與農航所之 DTM 較差圖.....	92
圖 6.13(a) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (一)	94
圖 6.13(b) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (二)	94
圖 6.13(c) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (三)	95
圖 6.13(d) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (四)	95
圖 6.13(e) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (五)	96
圖 6.14 2007/09/06 及 2007/11/15 ENVISAT SLC 影像.....	96
圖 6.15 研究區(軌道編號為 #2232&3123)之雷達影像圖.....	97
圖 6.16 誤差向量圖(070906_071115).....	102
圖 6.17 同調性圖(070906_071115).....	103
圖 6.18 初步干涉圖(070906_071115).....	104
圖 6.19 地球曲率改正干涉圖(070906_071115).....	104
圖 6.20 經 DEM 改正後之干涉圖(070906_071115).....	105
圖 6.21 全相位回復干涉圖(070906_071115).....	105
圖 6.22 InSAR 產製之 DTM 圖(070906_071115).....	106

圖 6.23 農航所之 DTM 圖.....	106
圖 6.24 InSAR 與農航所之 DTM 較差圖.....	107
圖 6.25 e-GPS 衛星追蹤站點位分布圖.....	108
圖 6.26 研究區 (軌道編號為 #416&3123) 之雷達影像圖.....	112
圖 6.27 同調性圖(040131_080504_081115).....	113
圖 6.28 初步干涉圖(040131_080504_081115).....	113
圖 6.29 地球曲率改正干涉圖(040131_080504_081115).....	114
圖 6.30 全相位回復圖(040131_080504_081115).....	114
圖 6.31 DInSAR 之干涉圖(040131_080504_081115).....	115
圖 6.32 研究區 (軌道編號為 #232&3123) 之雷達影像圖.....	116
圖 6.33 同調性圖(960306_960307 & 990506_991028).....	117
圖 6.34 初步干涉圖(960306_960307 & 990506_991028).....	118
圖 6.35 地球曲率改正干涉圖 (960306_960307 & 990506_991028).....	118
圖 6.36 變遷干涉圖(960306_960307 & 990506_991028).....	120
圖 6.37 變遷成果與斷層帶套疊圖(960306_960307&990506_991028).....	120
圖 6.38 初步干涉圖(99/05/06_99/09/23).....	122
圖 6.39 經地形效應改正後之干涉圖(99/05/06_99/09/23).....	122
圖 6.40 初步干涉圖(99/07/15_99/10/28).....	123
圖 6.41 經地形效應改正後之干涉圖(99/07/15_99/10/28).....	123

圖 6.42 永久散射體示意圖.....	125
圖 6.43 研究區（軌道編號為 #232&3141）之雷達影像圖.....	129
圖 6.44 各時期影像與主影像的相位變化.....	129
圖 6.45 永久散射體的後選點分布圖.....	130
圖 6.46 建立的 Denaunay 三角網網形.....	131
圖 6.47 PS 變遷成果之年變化量.....	131
圖 7.1 DTM 產製流程圖.....	143

表目錄

表 1.1	繳交項目與對應章節一覽表.....	4
表 2.1	ERS-1/2 酬載之 SAR 系統規格.....	7
表 2.2	JERS-1 酬載之 SAR 系統規格.....	9
表 2.3	RADARSAT-1 酬載之 SAR 系統規格.....	10
表 2.4	RADARSAT-2 酬載之 SAR 系統規格.....	12
表 2.5	ENVISAT 酬載之 SAR 系統規格.....	13
表 2.6	ALOS PALSAR 酬載之 SAR 系統規格.....	16
表 2.7	雷達衛星相關參數一覽表.....	17
表 3.1	InSAR 技術之優劣勢及限制條件.....	39
表 3.2	DInSAR 與其它技術之各項比較表.....	40
表 5.1	干涉技術處理不同應用之適用垂直基線長度對照表.....	57
表 6.1	DORIS 開放源碼與商用軟體簡介與比較一覽表.....	74
表 6.2	利用精密軌道資料計算影像對之各項成像幾何參數值.....	80
表 6.3	套合後相關參數統計表(960306_960307).....	82
表 6.4	利用精密軌道資料計算影像對之各項成像幾何參數值.....	98
表 6.5	套合後相關參數統計表(070906_071115).....	99
表 6.6	e-GPS 各衛星追蹤站之高程較差表.....	109
表 6.7	Diapason 變遷研究所使用之 SAR 影像表.....	121

表 6.8	PSInSAR 使用的影像資訊.....	128
表 6.9	DTM 產製(InSAR)所使用測試影像相關資料一覽表.....	132
表 6.10	變遷分析(含 DInSAR)所使用測試影像相關資料一覽表..	134
表 6.11	DTM 產製及變遷分析之相關成果與限制條件一覽表.....	137
表 7.1	適用影像分析表(括弧內為配分).....	153
表 9.1	預期完成與實際執行之工作項目對應之甘特圖.....	166

第一章 前言

地表資訊為人類掌握地盡其利的重要工作，如何有效地、快速地獲得土地資訊則為發展測量技術之關鍵課題。目前地表探測之技術繁多，然因各種不同技術之特性與限制，使其運用層面也不盡相同，其中以遙感探測技術獲取地表資訊最受重視。最主要原因係為以遙測方式獲取土地資訊具有涵蓋面積廣、高密集點位、連續式測量、成像時間迅速、花費較低廉以及資料易於取得等優勢，且隨著太空科技之發展，繞行固定軌道之衛星更具長期監測之能力。

雷達測量相對於航空攝影測量而言，算是一個較新生代的遙測科技，它使用波長 1 mm ~ 1 m 的微波波段作為探測波，其中當波長小於 2 cm 時，雲對雷達波會有明顯的干擾；當波長大於 4 cm 時，則雷達波幾乎不受雲、雨的阻擾，可提供地面清晰的資料[Henderson and Lewis, 1998]。而在各種不同的雷達測量方法中，合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar; SAR)影像係藉由雷達天線主動發射並接收其地表反射訊號來探求地表資訊，除可穿透雲、雨、濛、霧外，亦具有全天候監測能力，使其在遙測領域中對於地表資訊的快速獲取與相關的科學研究上，扮演著越來越重要的角色[陳鴻緒，2001]。

而偵測地表變形的測量方法很多，如地面測量、航空攝影測量、全球

衛星定位(Global Positioning System; GPS)、空載光達(Light Detection And Ranging; LiDAR)等，皆可用來研究變形前後的地貌變化。以上這些方法皆必須先行測出測區內的測點坐標，之後再比較分析不同時間所測得的坐標值來計算變形量；或是由不同時間測區資料模型之套合來分析變形量及變形方向。但是地面測量與 GPS 測量的缺點都必須到達實地才能施測，且受天候限制；而航空攝影測量與 LiDAR 雖然不必到達實地，但缺點是易受天候的限制。而遙測學上另有一項以合成孔徑雷達干涉技術(Interferometry SAR; InSAR)及合成孔徑雷達差分干涉技術(Differential InSAR; DInSAR)來產製數值地形模型(Digital Terrain Model; DTM)與變形量測的方法，若與上述方法比較起來，雷達干涉測量即可克服以上之缺點，如不必到達實地即可施測、受雲和霧的影響量小、提供大範圍的量測資訊、節省較多的人力物力、可較快速得到突發的地表起伏變化（如山崩、地震）及緩慢的地表起伏變化（如地層下陷）等。

InSAR 係利用同一地區不同時間所拍攝之兩幅影像進行干涉處理，可產生高精度之 DTM，其主要概念為解算影像像對中，對應像元間雷達回波訊號之振幅(Amplitude)與相位(Phase)，並回復(Unwrapping)影像像對之間的相位差，即可獲得大面積之 DTM[Gabriel *et al.*, 1989；Zebker *et al.*, 1994；Hanssen, 2001]。而進一步利用 DInSAR 更能精確地量測地表變形量。尤其在 1999 年 9 月 21 日集集大地震期間，使用 DInSAR 技術測得之地表變形

量，已做為地質學家深入了解其地震及斷層之進一步資訊，對其它學域亦是貢獻良多。

近年來，由於台灣之快速經濟發展及社會型態之變遷，加上原本就地狹人稠，山坡地之開發已勢所難免，每逢豪雨將造成嚴重土石流而引起山崩發生；且超抽地下水導致地層下陷，每逢大雨必造成淹水等情形發生。以上所提及之現象皆可利用 SAR 影像資料，以差分干涉技術來研究山崩、地層下陷及地震前後之地貌變化，以協助建立事前防災、事後救災之必要資訊[呂建興，2001]。

而進行干涉處理需繁複步驟始可生成影像，雖然有許多套裝軟體可做為生成之工具，但大部分人員皆不了解其干涉理論，如此研究即失去意義。故本案同時兼顧軟體產出與理論研究之考量下，結合開放源碼(Open Source)，如 DORIS、ROI、SNAPHU[Chen and Zebker, 2000]等，與自行設計程式來進行干涉成果之輸出與展示，研究對象則以歐洲的 ERS-1/2(European Respiratory Society)、ENVISAT(ENVIroment SATellite)或日本的 ALOS(Advanced Land Observing Satellite)之 SAR 影像對進行測試。

依本計畫契約內容之期末報告須繳交項目如下：

1. 文獻綜整回顧比較。
2. 清境、廬山地區變遷研究成果與分析。

3. DTM 產製之成果評析與更新之可行性分析。
4. 撰擬 InSAR 於測繪領域或遙測領域之應用、發展方向分析報告。
5. 撰擬利用 InSAR 快速偵測地表顯著變動區域之作業經費、效益，以及適用此方法之地形、地貌等報告。
6. 撰擬利用 InSAR 辦理 DTM 之產製及輔助現有資料進行局部更新的產能、作業經費、人力需求等報告。
7. InSAR 於測繪領域應用之初步策略報告。
8. 辦理教育訓練（6 小時）。
9. 繳交研討會或國際期刊乙篇以上之論文稿件。

本團隊已依合約內容及所需繳交項目進行實驗測試與報告撰寫，詳如表 1.1。

表 1.1 繳交項目與對應章節一覽表

繳 交 項 目	對 應 章 節	備 考
文獻回顧	第二章	目前所蒐整之文獻電子檔已燒錄光碟片併期末報告繳交
InSAR 與其他遙測領域技術比較分析	第三章	
雷達干涉理論介紹	第四章	
雷達干涉各項處理流程	第五章	
1. 開放源碼公用軟體簡介	第六章第一節	
2. DTM 產製之實驗結果	第六章第二節	
3. 清境、廬山地區與 921 大地	第六章第三節	

震地區之實驗成果與分析		
4. PSInSAR 原理與成果分析 DTM 產製之成果評析與更新之可行性分析	第六章第四節	
5. 衛載式 InSAR 於 DTM 產製及輔助更新之應用—應用 InSAR 技術辦理 DTM 更新可行作法評估、作業流程設計及更新頻率探討	第七章第一節	
6. InSAR 於變遷分析應用—研析利用 InSAR 偵測地表顯著變動區域之作業經費、效益，以及適用此方法之地形、地貌	第七章第二節	
InSAR 於測繪領域應用之策略報告	第八章	
干涉相關名詞中英對照	附錄一	
所蒐整文獻摘要綜整	附錄二	
辦理教育訓練相關資料	附錄三	
研討會或國際期刊論文摘要	附錄四	

第二章 文獻回顧

本章節首先針對雷達衛星之演進發展做一簡介，接下來將 InSAR、DInSAR 於測繪領域發展之相關文獻區分國外、國內進行綜整分析探討，並分別以定性與定量方面做說明，以供後續研究者參考。

2.1 雷達衛星簡介

美國 SEASAT 衛星發射升空，揭開了 SAR 時代的序幕。SEASAT 為美國 JPL/NASA(Jet Propulsion Laboratory/National Aeronautics Administration)第一個以雷達影像來研究地球的太空任務，於 1978 年 6 月 28 日發射，但於同年 10 月 10 日後因電路系統故障而停止運作。其上裝置有一 HH 極化、L 波段之合成孔徑雷達，可產生帶寬 100 km、視角 $20^{\circ} - 26^{\circ}$ 及距離與方位解析力皆為 25 m 的影像。

80 年代太空梭成像雷達(Shuttle Imaging Radar; SIR)的兩次飛行試驗(SIR-A、SIR-B)以及美國和歐洲等少數開發國家的空載 SAR 系統的發展，奠定了雷達遙感發展的基礎。繼 SIR-A(1981)與 SIR-B(1984)之後，美國 JPL 之 SIR-C 與德國太空中心 DLR、義大利太空中心 ASI 之 X-SAR 所共同合作的國際雷達影像任務(Imaging Radar)於 1994 年開始運作，稱為 SIR-C/X-SAR，它是世界上第一個多頻、多極化之衛載雷達。

1991 年歐洲太空總署發射裝置 VV 極化(即雷達波垂直發射垂直接收)、C 波段合成孔徑雷達系統之 ERS-1 衛星，在 ERS-1 之早期任務中(1991–1995 年)，使用者可選擇重複週期為 3 天、35 天或 168 天之 SAR 影像對。而在 1995 年 ERS-2 發射後，其與 ERS-1 所組成的協力式任務(Tandem Mission)，可提供僅相差一天的影像對，此任務主要目的是希望藉此獲得全球的地表 SAR 觀測資料，並能在縮短資料時間間隔之情形下，增廣其大地監測應用領域，但 ERS-1 已於 2000 年 3 月停止運作。

表 2.1 ERS-1/2 酬載之 SAR 系統規格

波長	5.6 cm(C-band, VV 極化)
側視系統	右側視系統(right-looking)
衛星高度	785 km
軌道重返週期	35 天
降交模式經過台灣時間	10:30 A.M.
解析度	25 m
影像中心入射角	23°
影像大小	約 100 km × 100 km

ERS-1 與 ERS-2 衛星皆為太陽同步衛星，飛行高度為 785 km，通過台灣上空時間為上午 10 點 28 分及晚上 10 點 20 分，軌道與赤道傾斜角為 98.5°，繞地球一圈週期約 100.6 分鐘，一天可轉 14.3 圈，目前軌道是以每

35 天週期通過同一地區，全球共有 501 個軌道。表 2.1 為 ERS-1/2 之 SAR 系統規格，圖 2.1 則為台灣地區 ERS-1/2 攝像地面涵蓋示意圖，詳細資料請參考 <<http://earth.esa.int/ers/>>。

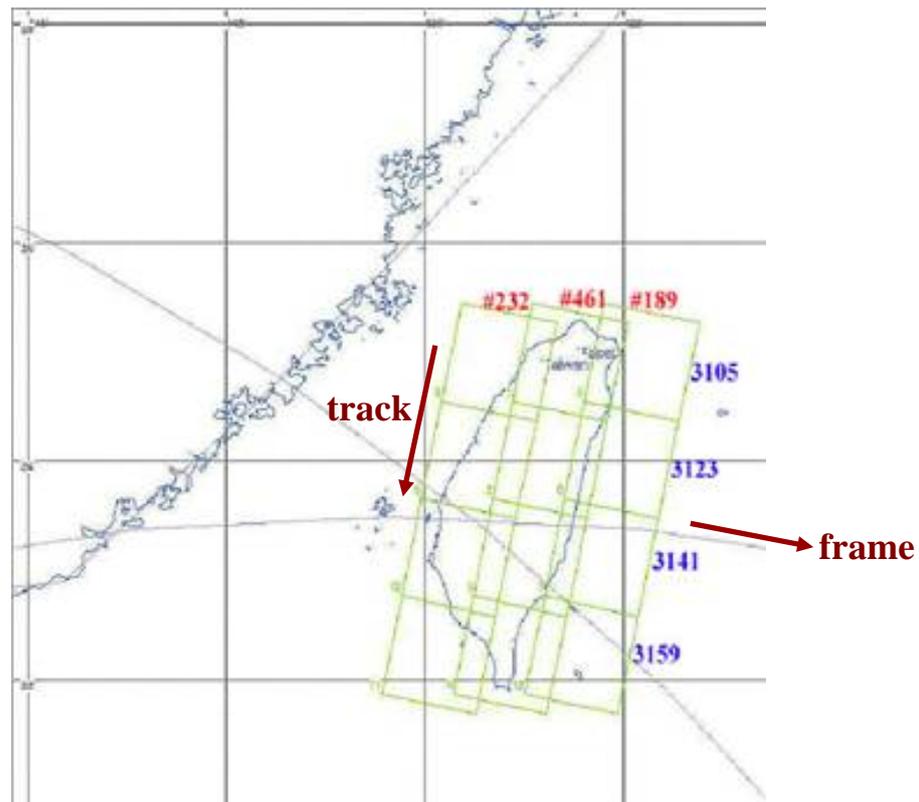


圖 2.1 台灣地區 ERS-1/2 攝像地面涵蓋示意圖

日本國家太空發展署於 1992 年 2 月 11 日發射 JERS-1(Japanese Earth Resources Satellite)衛星，其裝置兩個光學感測器與一個 HH 極化（即雷達波水平發射水平接收）、L 波段之合成孔徑雷達。此衛星為人類從空間觀測地球開闢了一個新的資料來源。這顆太陽同步極軌衛星的軌道平均赤道高度為 568 km，傾角為 97.7° ，重複週期為 44 天，

主要應用於國土調查、農林漁業、環境保護、災害監測等方面，但 JERS-1 已於 1998 年 10 月 12 日停止運作。表 2.2 為 JERS-1 酬載之 SAR 系統規格，詳細資料請參考 <<http://www.eorc.jaxa.jp/JERS-1/en/index.html>>。

表 2.2 JERS-1 酬載之 SAR 系統規格

波長	5.6 cm(L-band, HH 極化)
側視系統	右側視系統(right-looking)
衛星高度	568 km
軌道重返週期	44 天
降交模式經過台灣時間	10:30 – 11:00 A.M.
影像中心入射角	35°
解析度	18 m
影像大小	約 75 km × 75 km

1995 年加拿大太空總署與美國合作發射 RADARSAT-1 遙測衛星，由於可調式入射角的設計，使得衛星能在不同軌道上獲取同一地區的影像。如此設計縮短了影像獲取的時間週期，提高了即時應用的能力。以亞洲地區而言，其週期約為三天，相對於 ERS-1/2 約一個月的週期，在機動性上較為優異。

RADARSAT-1 衛星所酬載之 SAR 系統，目前有 25 種不同影像模式可供選擇，入射角提供可調式設計由 10° 變化至 60°。在解析度方面，提供了 10 m

到100 m的影像資料。至於一幅影像大小，則隨著以上條件不同而改變。小至50 km × 50 km，大到500 km × 500 km。此外在影像資料的供給上，RADARSAT-1亦有不同層級的影像處理速度與即時性服務方式。

由於RADARSAT-1影像有多重選擇性，可針對不同地區、不同目的來選取所需要之影像。同時，亦可依影像時效的需求來選擇不同速度層級之服務。因此RADARSAT-1之SAR影像提供了較豐富、較適時的資訊來加以應用。表2.3為RADARSAT-1酬載之SAR系統規格，圖2.2為RADARSAT-1攝像模式幾何示意圖，詳細資料請參考

<http://radarsat.space.gc.ca/asc/eng/csa_sectors/earth/radarsat1/components.asp>

表 2.3 RADARSAT-1 酬載之 SAR 系統規格

波長	5.6 cm(5.3 GHz, C-band, HH極化)
側視系統	右側視系統(right-looking)
衛星高度	798 km
軌道重返週期	24天
解析度	10 m – 100 m
影像中心入射角	10° – 60°
影像大小	約 50 km × 50 km – 500 km × 500 km

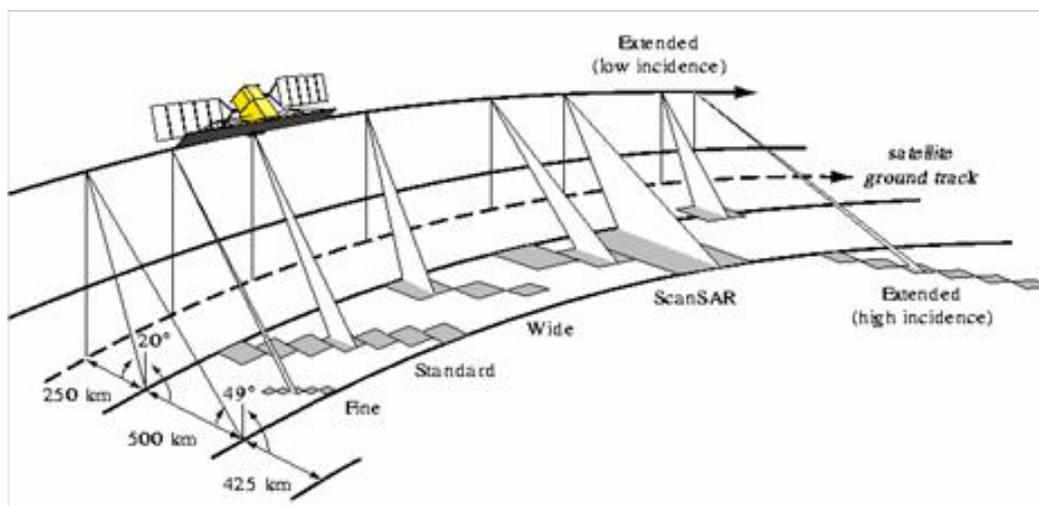


圖 2.2 RADARSAT-1 攝像模式幾何示意圖

RADARSAT-2於2007年12月14日成功發射，設計壽命是7年而預計可達12年。RADARSAT-2 使用C 頻段，主要任務是辨識北美洲、北極洲的冰原和地形及自然資源。它是RADARSAT-1的後續衛星，除延續了RADARSAT-1的拍攝能力和成像模式外，還增加了3 m解析度超精細模式和8 m全極化模式；而且可根據指令在左視和右視之間切換，這不僅縮短了重訪週期，而且增加了獲取立體成像的能力。

除了重訪間隔縮短，數據接收更有保證和圖像處理更加快速外，RADARSAT-2 可以提供 11 種波束模式及大容量的固態記錄儀等。同時，它將用戶提交的時限縮短到 4-12 小時，這些都使 RADARSAT-2 的運行更加靈活和便捷。

RADARSAT-1 與 RADARSAT-2 號雙星互補，加上雷達全天候全天時的主動成像特點，可以在一定程度上緩解衛星數據源不足的問題，並推動

雷達數據在國內各個領域的廣泛應用和發展。表 2.4 為 RADARSAT-2 酬載之 SAR 系統規格，詳細資料請參考<<http://www.radarsat2.info/>>。

表 2.4 RADARSAT-2 酬載之 SAR 系統規格

波長	5.6 cm(5.3GHz, C-band, 可提供 HH、VV、HV、VH、HH&HV、VV&VH 等選項)
側視系統	左右側視系統
衛星高度	798 km(赤道上空)
軌道重訪週期	24 天
解析度	3 m – 100 m
影像中心入射角	20° – 60°
影像大小	約 20 km × 20 km – 500 km × 500 km

NASA與NIMA(National Imagery and Mapping Agency)合作於2000年2月11日發射裝置有X波段與C波段SAR之單軌機雷達干涉儀，稱作SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)，主要係以太空梭掛載SAR收集涵蓋地球北緯60°至南緯56°間的DTM資料，提供近全球陸地的3D資料，其絕對的垂直精度約10 m，在美國境內的空間解析度為30 m，美國以外地區為90 m。此為期11天之任務已於2000年2月22日終止，詳細資料請參考<<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>。

ENVISAT 為歐洲太空總署為延續 ERS-1/2 之地球觀測任務，於 2002 年 3 月所發射之衛星。ENVISAT 為一太陽同步衛星，飛行高度約 800 km，重覆觀測週期為 35 天(同 ERS-1/2)。ENVISAT 上共酬載有 10 個載具，其中包括一合成孔徑雷達系統，名為 ASAR(Advanced SAR)，為多極化雷達。表 2.5 為 ENVISAT 酬載之 SAR 系統規格，圖 2.3 為 ENVISAT 攝像模式幾何示意圖，詳細資料請參考 <<http://ENVISAT.esa.int/>>。

表 2.5 ENVISAT 酬載之 SAR 系統規格

波長	5.6 cm(5.3GHz, C-band, 可提供HH & VV, HH &HV, VV & VH選項)
側視系統	右側視系統(right-looking)
衛星高度	800 km
軌道重返週期	35 天
解析度	25 m
影像中心入射角	15° – 45°
影像大小	約 100 km × 100 km

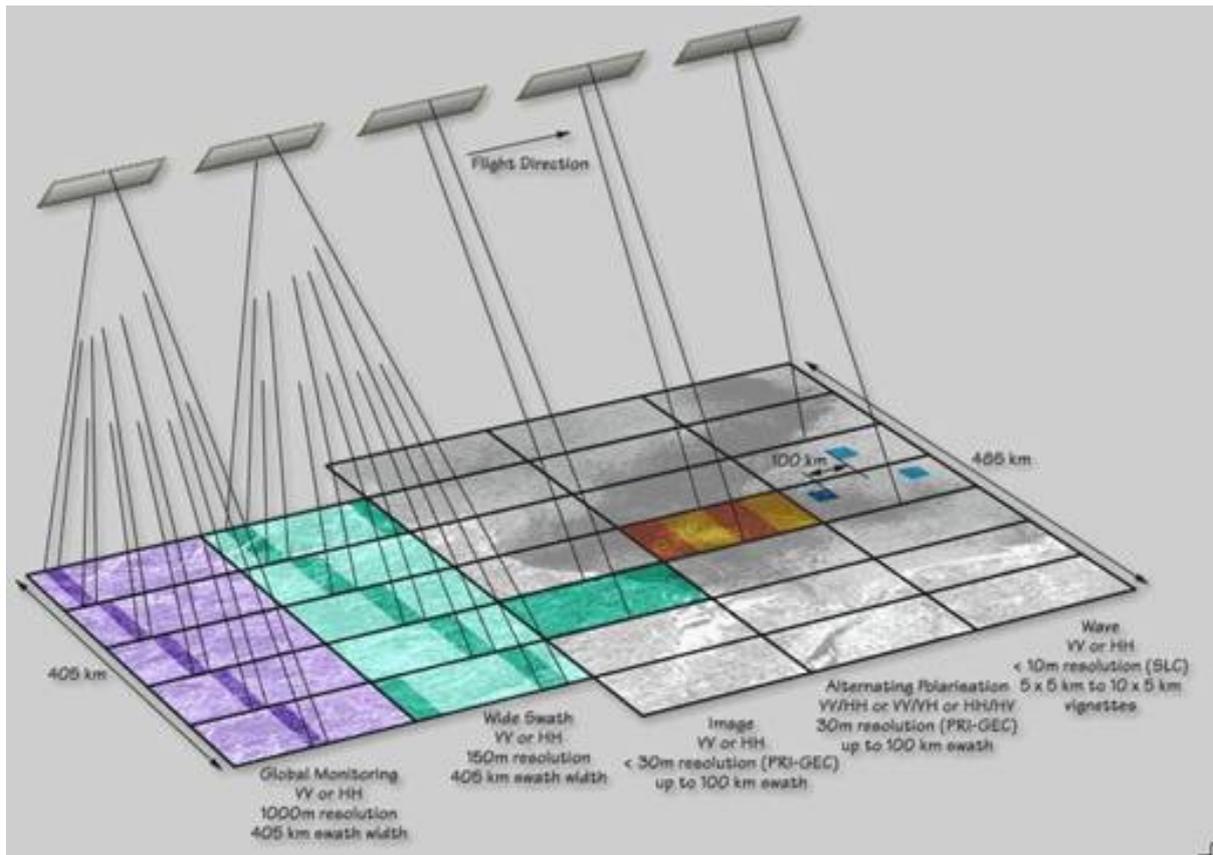


圖 2.3 ENVISAT 衛星攝像模式示意圖

ALOS衛星於2006年1月24日發射成功，並於同年2月16日拍攝第一幅影像。ALOS衛星為日本地球觀測衛星計畫中，負責針對陸地區域進行觀測的衛星，其主要工作為製圖、環境監測、災害監測及自然資源調查等。ALOS衛星為一太陽同步衛星，平均航高691.6 km，軌道與赤道傾斜角 98.2° ，其軌道週期為46天，並可高速處理大量之資料，及提供高精確度之衛星拍攝位置及姿態。ALOS衛星上共有三個遙測酬載儀器，分別為全色態遙感立體測繪儀(Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping; PRISM)，主要用於數位高程測繪；先進可見光與近紅外輻射計(Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2; AVNIR-2)，用於精確陸地

觀測；相位陣列L波段（波長約 19 cm）合成孔徑雷達(Phased Array type L-band SAR; PALSAR)，用於全天時全天候陸地觀測。ALOS衛星採用了高速大容量資料處理技術與衛星精確定位和姿態控制技術，詳細資料請參考<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/index.htm>。

PALSAR為一L波段之主動式雷達影像系統，可獲取全天候影像，其影像可提供製作土地覆蓋分類圖，用來進行環境監測與災害監測等工作，尤其是作物地區與森林監測。PALSAR較1992年JERS-1 L波段SAR雷達影像系統更為先進，可多觀測角與多偏極、全偏極等選項，共提供三大拍攝方式，分別為Fine拍攝方式、ScanSAR拍攝方式、Polarimetric拍攝方式。Fine拍攝方式又可分為高解析單偏極（HH或VV）與雙偏極（HH+HV或VV+VH）方式，其空間解析度分別為7~44 m與14~88 m（依觀測方式而異），跨幅為40~70 km，ScanSAR拍攝方式，可提供大廣域觀測需求，偏極為HH或VV，其空間解析度為100 m，跨幅為250~350 km；Polarimetric拍攝方式屬於實驗性質，可提供全偏極資料，5種觀測角度方式，其空間解析度為24~89 m，跨幅為20~65 km。表2.6為ALOS PALSAR酬載之SAR系統規格，圖2.4為PALSAR攝像模式幾何示意圖。

茲將上述衛星雷達相關參數綜整如表2.7。

表2.6 ALOS PALSAR酬載之SAR系統規格

mode	Fine		ScanSAR	Polarimetric
波長	19 cm (1.3 GHz, L-band)			
側視系統	右側視系統(right-looking)			
衛星高度	682 km			
軌道重返週期	46 天			
極化	HH VV	HH+HV VV+VH	HH VV	HH+HV+VV+VH
解析度	7 – 44 m	14 – 88 m	100 m	24 – 89 m
影像入射角	8° – 60°	8° – 60°	18° – 43°	8° – 30°
影像大小	40 – 70 km	40 – 70 km	250 – 350 km	20 – 65 km

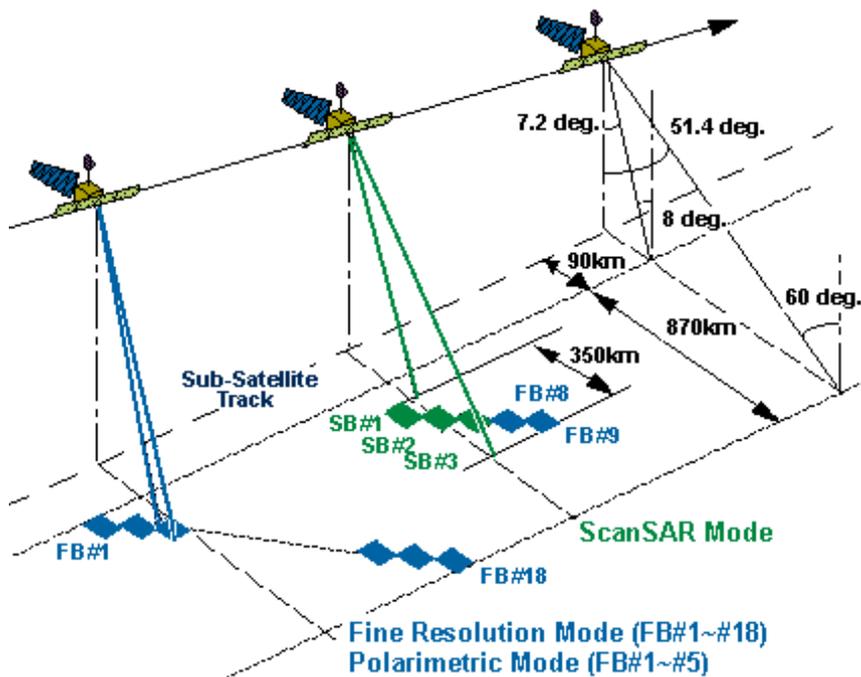


圖 2.4 ALOS PALSAR衛星攝像模式示意圖

表2.7 雷達衛星相關參數一覽表

衛星 參數	ERS-1/2	JERS-1	Envisat	ALOS (PALSAR)	Radarsat-1	Radarsat-2
衛星高度	785 km	568 km	800 km	692 km	798 km	798 km
波長	C band 5.6 cm	L band 19 cm	C band 5.6 cm	L band 19 cm	C band 5.6 cm	C band 5.6 cm
側視系統	右視	右視	右視	右視	右視	左右視
極化	VV	HH	HH&VV、 HH&HV、 VV&VH、	HH、VV、 HH&HV、 VV&VH、 HH&HV &VH&VV	HH	HH、VV、 、HV、 VH、 HH&HV VV&VH
重返週期	35天	44天	35天	46天	24天	24天
解析度	25 m	18 m	25 m	7~100 m	10~100 m	3~100 m
入射角	23°	35°	15°~45°	7.2°~51.4°	10°~60°	20°~60°
涵蓋範圍 km ²	100×100	75×75	100×100	40×70~ 350×350	50×50~ 500×500	20×20~ 500×500

2.2 測繪領域之發展

「測繪」的任務是測定地球形狀、重力場及地面點的幾何位置，以及製作各種地圖。這是大地測量學的任務，也是測繪學的基礎。

從 50 年代末開始形成的衛星大地測量學，突破了以往大地測量的侷限性，建立了全球大地網及全球地心坐標系。到了 19 世紀的測圖方法是在實地上直接測繪地形，按一定的比例繪製成圖。20 世紀 30 年代，用航空攝影測量測繪地圖的方法逐漸完備，形成了攝影測量學。50 年代創立了解析攝影測量的基本理論。60 年代出現了由精密立體坐標量測儀和小型電子計算機組成的解析測圖儀。新興的航太遙感技術，透過影像處理、相片量測、

判讀及計算等過程，可以測定地面點坐標和進行測圖。航空攝影影像也可以通過數位化變換成為大量密集的灰階數字，儲存在磁帶或光碟片上。因此，透過航太遙感和航空攝影技術可以朝自動化製圖之目標邁進。

2.3 合成孔徑雷達發展趨勢概述

1951年6月美國 Goodyear 公司首先提出使用頻率分析方法改善雷達角度解析力的方法，但由於當時雷達的空間解析度較差，遙感應用上還有很大的侷限性；1953 安裝在 DC-3 飛機上的 SAR 系統，得到了第一幅 SAR 影像，為 SAR 原理及發展奠定了良好基礎；直到 1978 年 6 月美國 JPL 發射世界上第一顆載有 SAR 的海洋衛星 SEASAT，該衛星的發射象徵著 SAR 已由太空對地觀測新時代的來臨。

SAR 觀測性能主要是在空間解析力及對地觀測寬度兩方面。高空間解析力一直是 SAR 成像追求的重要目標之一，實現了衛載 SAR 分辨兩個相鄰目標的能力，對於目標的識別及確認十分關鍵。而對地觀測寬度則主要強調兩個面向，一個是有效觀測帶帶寬通常採用 ScanSAR 工作模式，透過距離方向天線波束依次掃描合成較寬的雷達影像，但方位方向解析力會有損失；另一個是一次成像的觀測帶帶寬通常採用多波束的成像方法，在保證一定空間解析力的情況下獲得較寬的雷達影像。所以提高衛載 SAR 的觀測帶寬，對滿足大面積及寬覆蓋的觀測需求（尤其是在環境及災害監視、地

形測繪、國土測量及軍事偵察方面) 非常有意義。從衛載 SAR 系統性能參數變化趨勢來看，越先進的 SAR 衛星，解析力越高、對地觀測帶越寬。

SAR 成像技術的一個最重要的特點就是利用地物的電磁散射波對目標進行成像，但地物的電磁散射除與地物本身特性有關外，還與電磁波的頻率、極化及入射角有著密不可分的關係，利用不同頻率、不同極化、不同入射角的變化，能夠得到更豐富的地物訊息。

因此各國爭相發展多頻段、多極化、多視角的高解析度衛載 SAR 系統，目前衛載 SAR 主要使用 L、C、X 波段，透過目標在不同頻率下的散射性不同，來進行目標的分類及識別。多極化是指 SAR 系統發射及接收的極化方式，主要有 HH、HV、VH 及 VV 等 4 種，利用目標在不同極化條件下有不同散射的特性，可豐富雷達影像的訊息，對發現及識別目標有著重要的作用。多視角則指天線波束方向可變，與解析度、成像模式及觀測帶寬有著密切關係。

由於 SAR 成像存在一個明顯問題，就是對所有地物目標只能產生二維雷達影像，所以轉變為雷達干涉測量(InSAR)及極化雷達干涉測量(POLInSAR)技術為衛載 SAR 之發展重點。因為 InSAR 解決了 SAR 對地物的第三維訊息（高程訊息或速度訊息）之提取，而 POLInSAR 透過極化和干涉訊息的有效組合，可以同時提取觀測物的空間三維之特徵訊息及散射

訊息，為微波遙測、高精度 DTM 及細微變形訊息之提取提供了可行性 [Nafaly, 2004]。

在衛載 SAR 發展過程當中，大型衛星逐漸曝露出一些明顯的缺點，如造價昂貴、維護不易、應急時發射困難及快速反應能力有限等，隨著航空技術的發展，特別是 SAR 天線小型化技術，大大的減少衛星的重量和體積，使性能高、體積小、重量輕和成本低的小型 SAR 研製成為可能，與大型衛星相比實有明顯的優勢。

另外衛載 SAR 已成為現代高科技戰爭獲取軍事情報非常重要的手段，對 SAR 系統之干擾與反干擾問題成為了未來軍事應用中非常重要的問題，且干擾與反干擾將成為各國未來電子戰的重要內容。因此研究干擾技術與抗干擾能力，對保障電子戰中航空情報偵查的訊息優勢，提高衛載 SAR 的生存能力及增強受干擾時的應用效果等具有重大的戰略意義，故已成為未來衛載 SAR 研究的重點[Wu *et al.*, 2007]。

隨著航空遙感技術的發展，衛載 SAR 的技術水平及工作性能不斷的提高，並朝小型化、多功能、多模式的方向發展，不僅提升了衛載 SAR 系統的觀測時效性，遙感數據的完備性，觀測區域的最大化等，還增強了 SAR 解析度及複雜電磁環境下抗干擾、目標識別等能力，且應用範圍不斷擴大，應用效果將更加顯著。

由以上 SAR 之發展趨勢可知，由於 SAR 只能對所有地物目標產生二維影像，因而應用層面受限，進而轉變為可得到三維資訊之 InSAR 及 POLInSAR 之研究領域，本研究則先對 InSAR 於測繪領域應用做先期規劃（含 DInSAR 及 PSInSAR）。

2.4 雷達干涉測量於測繪領域之發展

2.4.1 國外部分

雷達干涉技術誕生於 20 世紀 60 年代末，係利用雷達複數資料的相位來萃取地表的三維資訊，可以得到高精度的地形資料。此技術最早用於行星探測上，如金星的觀測、月球的觀測及金星地表高度的繪製。1969 年 InSAR 技術首由 Rogers 應用於對金星觀測，用來分離金星南北半球的雷達模糊回波[Rogers et al., 1969]；1972 年 Zisk 用 InSAR 技術獲得月球表面的地形數據[Zisk, 1972]。

NASA 於 1970 年成功架設 DC-8 的 SAR 系統進行一連串的研究，Graham 則利用此資料提出了用 InSAR 進行地形測量的原理和技術，首次證明了 InSAR 用於地形測量的可行性，並製作了第一台用於波多黎各境內三維地形測繪的空載干涉合成孔徑雷達，得到地面的高程資訊[Graham, 1974]。1986 年 NASA 於 CV990 飛機上裝載 SAR 系統進行舊金山灣之 DTM 製作，獲得一幅面積約為 11 km × 10 km 之 DTM 資料，其成果與美國地質

調查所(United States Geological Survey; USGS)的等高線圖高程相符[Zebker and Goldstein, 1986]。1988 年 Gabriel 與 Goldstein 以兩個分離軌道的 SIR-B 系統收集了與上述同一區域舊金山灣的資料，成功以單一天線重覆軌跡的方式建立 DTM[Gabriel and Goldstein, 1988]。

Gabriel 等學者首先證實利用 DInSAR 技術可獲得 cm 級的變形量，在其研究中，以三幅 SEASAT 的雷達影像產生出兩幅干涉條紋圖，再以此兩幅干涉圖利用差分干涉技術推求地表的變形量。在處理的過程中，對於產生兩幅不同的干涉條紋圖，都使用相同的處理步驟，以避免產生不同的誤差[Gabriel *et al.*, 1989]。

Massonnet 等則以 ERS 兩幅地震前後的雷達影像產生干涉條紋，利用現有 DTM 資料消除地形效應，使計算後之條紋為僅受地震變動影響之干涉圖，有效的偵測出 1992 年美國加州聖安德烈斷層到卡洛克斷層之間的 Landers 地區 7.3 級地震的變形量。該研究干涉處理的結果得到 cm 級的精度[Massonnet *et al.*, 1993]。1994 年 Zebker 等人利用三幅 ERS 雷達影像，以兩幅干涉條紋圖的差分處理來計算其變形量，該法亦成功的偵測出 Landers 地區的地震變形量。該研究並以 GPS 及 DTM 的地面量測資料來進行比對，得到其變形量的相關係數高達 0.96，比較結果亦得到 cm 級的精度。有了上述的結果後，許多有關地震變形的研究陸續被發表，證實了該技術的實用性。

在地層下陷方面的研究應用中，1997年 Massonnet 等利用 InSAR 技術來偵測加州 East Mesa 地熱區的地層下陷情形。該研究使用四幅 ERS 衛星影像，此四幅影像共可形成六幅干涉圖，該研究利用此六幅干涉圖分別進行短時間間隔及長時間間隔的分析，並與水準測量進行比較，得到相同的下陷結果 (cm 等級) [Massonnet *et al.*, 1997]。其後則有 Strozzi 及 Wegmuller 以 DInSAR 技術對墨西哥河谷及市區全境之下陷進行監測 [Strozzi and Wegmuller, 1999]；及針對美西加州加勒福尼亞莫哈維沙漠的羚羊谷地區、Las Vegas 地區及南義大利那布勒斯 (Napoli) — 佛梅羅 (Vomero) 區域的城市等分別做不同的研究 [Galloway *et al.*, 1998; Amelung *et al.*, 1999; Tesauero *et al.*, 2000]。

由於地形起伏及地貌之間的關係，限制了 InSAR (DInSAR) 發展的技術，且兩者會造成訊號回波的不穩定，較早的想法是希望該地區能有穩定的訊號來源，而角反射器恰能提供此特性，故出現了以架設角反射器來輔助 InSAR (DInSAR)。但因角反射器製作的成本過高，學者們開始尋找自然界中具有與角反射器特性相同的物質，如此則可在低成本的情況下，進行大範圍的偵測。自此之後陸續由一些學者提出永久散射體 (Persistent Scatterers; PS) 的演算法 [Colesanti *et al.*, 2003; Crosetto *et al.*, 2005; Lyons and Sandwell, 2003; Werner *et al.*, 2003]，演算法都在強調每幅影像中永久散射體必須具有良好的同調性。在此基礎上，加拿大的 Atlantis Scientific 公司

開發了以同調性為基礎 (Coherence Target Analysis) 之軟體 EarthView InSAR PRO，該軟體透過在時間上同調性比較高的及相位穩定的目標點 (Coherence Target Points)，來分離各種誤差相位，從而獲取變形相位，此種簡化的方法由Mora等人所提出[Mora *et al.*, 2003]。

德國 DLR 的 Bert M. Kampers 博士發展了 STUN(Spatial-Temporal Unwrapping Network) [Kampers, 2006]，該方法的主要特點是假設變形隨時間變化，且由此假設建立函數模型和隨機模型，並在此基礎上利用加權之最小二乘估計器進行最佳的參數估計和變形量的提取。此法針對舊金山的 Bay、德國Berlin 以及San Andreas 南部等地區進行測試，獲得因地殼變動而導致緩慢變形的實驗成果，並與實地量測相符；然而採用形變隨時間變化之時間相位實用模型來確定PS 點，僅對於人工建築物較多的區域有比較好的成果，對於人工建築物數量較少且存在大變形的區域（如滑坡、泥石流等），則會出現無法有效提取PS 點的情況。

美國 Stanford 大學地球物理系[Hooper *et al.*, 2004]採用相位空間相關性結合的措施來辨識 PS 點，該法不需要先驗知識，可以在任何地形區域提取 PS 點（而非僅存在於都會區），通過對加拉帕哥斯群島上的 Alcedo 火山進行實驗，並結合水準測量、GPS 測量以及電子測距(EDM)對變形結果進行分析，發現其變形偵測與實地測量之成果具有 68%的高相關性。而後 Hooper 發布用於永久散射體實驗的程式（針對大形變區域適用）供給有興

趣的研究人員免費使用，並命名該方法為 StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) [Hooper, 2009]。

另外在雷達干涉測量應用中，干涉相位求解是持續研究改善的重要工作，由於雷達系統本身和誤差傳播的影響，所蒐集到的原始訊號會因為雜訊而失真。以往學者已經提出一些演算法用於消除雜訊並改善相位品質，但這種消除雜訊的方式都是基於某種假設，故不能完全適用於各個地區。自從新一代的偏極合成孔徑雷達衛星發射之後，由於其每個像元的散射元素資料是由兩個散射矩陣或散射向量（也就是空間中的兩個天線）所構成，它能加強天線收到訊號間的同調性、並減少雜訊進而改善相位資訊[Xiong et al., 2008]，目前已有相當多學者投入偏極雷達干涉量測。

2.4.2 國內部分

1997 年台灣地區第一次利用衛載合成孔徑雷達干涉技術來建立數值高程模型（網格式 $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ ）。實驗資料分別為 1996 年 3 月 6 日與 7 日之 ERS-1/2 之影像，基線長約 78 m、水平夾角約 -20.4° ，實驗地區為台灣中步地區範圍由鹿港海濱、彰化地區至南投山區，其中包括海面、平原、山地和一獨立山脈（八卦山脈，高度約 450 m）。其實驗結果與農航所之網格式 DTM($40\text{ m} \times 40\text{ m}$)比較，水平方向控制在 0.1 個像元以內，當所有可計算的像元皆列入統計時（約為一個 $60\text{ km} \times 40\text{ km}$ 的區域），其高程 RMSE

為 22.5 m，如僅對平原地區比較時，RMSE 為 20 m[廖子毅，1997]。

2001 年陳鴻緒等利用 ERS 資料與 SAR 干涉技術在台灣台北縣都會區求定 DEM，並與實驗區航測 DEM 進行比較，共有 93,850 個共同格點，兩者高程差之 RMS 為 23.73 m，其中有 86% 的點高程差在 20 m 以內之點位分布與正射相片對照，可發現高程差與地表種類有著相關性，在建物密集的區域其高程差較大，約 5 ~ 20 m，而在無建物或植被覆蓋區域其高程差較小，約在 5 m 之間[陳鴻緒，2001]。

2003 年林紀綱等利用 NASA/JPL 空載 InSAR 測定台灣中部地區（包含台中、南投、嘉義等縣，涵蓋平地及高山地形）的 DEM 成果分析，研究成果顯示，TOPSAR_DEM 的高程走勢大致與參考 DEM 者吻合，但兩者之間仍存在著顯著的系統偏差及粗差，系統偏差呈現非線性的分布，隨機偏差的 RMS 值在平地區域較小，約 1 ~ 5 m，實驗區總面積約 2,016 km²，參考點數約 120 萬點，粗差發生之比例約為 1.26%，無法計算出的高程比例約為 6.37%（整體平均）或 18.22%（高山區）[林紀綱，2003]。

在台灣地區，因高低起伏的地形及稠密的植物，不易產生良好的干涉圖，但仍有部分研究成功使用 DInSAR 技術有效偵測出台灣地區地表的變形量，研究成果包括集集地震同震變形[Pathier *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2004; Chang *et al.*, 2004b]、屏東地區地層下陷[Chang *et al.*, 2004a]及台南台地的抬

升[Fruneau *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2006]等。

Suga 等人以 DInSAR 技術對 1999 年發生之集集大地震之變位趨勢及變化量進行完整且豐富之研究，並將其成果與現地之精密測量及 GPS 做比較，皆可證明該法於地表變形偵測之適用性[Suga *et al.*, 2001；陳卉瑄，2001；謝嘉聲，2006]。Chang 等人於台灣西南屏東平原地區將 GPS 變形模擬差分干涉圖與雷達差分干涉圖比較，在雷達視距方向的比較結果，其中誤差最大值約為 5 cm 左右[Chang *et al.*, 2004a]。

在地層下陷方面，Liang 等人以 DInSAR 技術偵測台灣西海岸之地層下陷[Liang *et al.*, 2003]；張中白等人針對東港沿海地區、桃園工業區之地層下陷做研究[張中白等，2002]；呂建興對台灣中部都市地區地貌變化研究，皆可獲得與運用傳統監測方式相同趨勢的結果[呂建興，2001]。

張中白等以 DInSAR 技術量測台灣地殼變形研究，將台灣北、中、南、東及主要活動斷層地區做一完整報告。在所有的研究區中，特別是東部地區，由於山區較多，植被濃密，造成雷達的同調性較差，所以雷達差分干涉的結果都相對很差，由於這是 DInSAR 技術先天上的限制，目前的方法較難克服，本案將發展永久散射體差分干涉雷達測量(Permanent Scatterers InSAR; PS-InSAR)，來解決目前的困難，期能更了解台灣各地區的活動斷層情形[經濟部中央地質調查所，2006]。

由以上文獻可知，雷達干涉測量於 DTM 產製之應用方面，大部分僅做定性方面之描述，如視覺上觀察干涉條紋與地形走勢一致，則可認定為成果不錯；而在定量方面，因缺乏地真資料（目前僅為農航所 40 m 解析力之網格 DTM），故較無法進行比較。以台灣而言，因多山多植被，不易獲得可進行干涉之影像對，在山區部分幾乎都不做探討，故所做之研究大都以平地區域為主，RMSE 約為 20 m；而雷達干涉測量於變形量研究方面，在定性部分，因地表有變化的區域在視覺上即可由干涉環中清晰辨識，在定量部分，因差分干涉理論完整，且配合地真資料（如水準資料或 GPS 解算之高程資料），已皆可達 cm 等級，這已從一些地層下陷及 921 地震之數據中得到驗證，可作為爾後應用層面判斷之依據。

因此雷達干涉技術之流程與操作步驟漸有一致的看法，文獻發表也有豐碩的成果。然而 DInSAR 技術在台灣地殼變形的研究上，應仍算在起步階段，且前人之研究成果大都使用套裝軟體，對於合成孔徑雷達影像無法確實掌握每個環節，且難以針對個別狀況或特殊需求進行專案處理。因此本案將利用開放源碼 DORIS 及 SNAPHU 之各項模組，結合本團隊開發之 PSInSAR 變遷分析程式，來完成台灣地區的變遷與 DTM 更新評估等作業。

第三章 InSAR 與其它遙測領域技術比較分析

進入 21 世紀，人類實現了地面及空中、甚至太空即時觀測地球及快速處理觀測的結果，測繪的區域也從區域性擴大到全國性、甚至全球性。這些進展也直接或間接的衝擊到地球科學領域的應用，活斷層辨識及監測也是目前重要的研究課題。

InSAR(DInSAR)技術可提供大區域及高精度之 DTM 與地表變形量，其精度理論上可分別達到 m 級與 cm 級，雖然目前大都以衛載數據為主要研究對象，但空載 SAR 的體積小、重量輕、造價低、機動性強，為一項新概念的空中對地觀測手段。

InSAR(DISAR)技術主要應用於光學遙感影像難以獲得的地區進行地形測量（如熱帶雨林、火山、極地等地區），以建立高精度之 DTM，而廣泛應用於地震災害監測、地表變形及位移的監測、火山監測與災害評估、地層下陷監測及林業、冰川、海洋等領域。不論應用於何種領域，不外乎在於 DTM 產製與地表變形方面，以下將分述之。

一、DTM 產製研究：

InSAR 技術利用 SAR 複數影像中含有的相位訊息，透過干涉處理來獲取目標的三維資訊，因此用於製作地形圖、生成 DTM 是自 InSAR 技術研究與應用以來的主要應用領域。InSAR 技術所測得地形地貌之精度由於成

像幾何及干涉影像而有較大的波動，精度好的可達 m 級，研究結果表明，InSAR 技術用來獲取 DTM 是非常有效的，特別是在人煙稀少、環境惡劣的地區，InSAR 技術更是一種有效的監測手段。

二、地表變形研究：

利用 InSAR 技術獲取 DTM 本身就能發現地表的變化，如土石流的沉積，三角洲的演變等，差分干涉技術(DInSAR)在去除地表的效應後，可以雷達波長量級來測量微弱的地表物理運動。DInSAR 還可以更深入應用於土地動力學的其他方面，如火山學、氣候地貌學、沙漠地形和土壤遷移、海岸過程和侵蝕、災害風險估計和自然災害監測（如地震滑坡）等。這些地表物理運動有可能是斷層地區的隆起和彎曲，地震引起的殘餘位移、地層的沉降等，對於它們的觀測地震、火山爆發、山體滑坡等災害發生做出事先預報，減少災害對人民生命財產的損失。

此外，由於海洋佔地球的 70% 以上，蘊藏著人類賴以為生的重要資源，而海面上的天氣狀況往往非常惡劣，常使光學遙感監測海況帶來極大困難，SAR 是進行海洋觀測最理想的工具之一，透過 InSAR 技術，不僅可以探測到海面上船舶運動的速度與向，而且可以觀測到多種海洋動力學現象以及海底地形變化而引起的海面波浪的差異等。而在城市三維建模、考古、全球變化研究、水系的河道特徵及河流演變、湖泊的環境與演化、地下水

與土壤水分方面，InSAR 皆有成功的應用。

作為 SAR 技術的新發展，InSAR 充分利用了雷達回波的相位訊息，不僅可以建立高精度、大面積的 DTM，而且還可以利用 DInSAR 監測地面 mm 量級的微小變形，其應用範圍相當廣泛，是一種非常具有挑戰性的空間對地觀測技術，就 InSAR 技術本身來說，演算法及處理軟件、硬件設備等方面皆已臻成熟，但精度方面仍需進一步改進，如 SAR 解析度之提升，衛星軌道參數精度的提高、衛星的優化、DTM 精度的提高等，如能改進以上項目之相關條件，則可提升干涉測量之精度，對活斷層與地殼變動的時空辨識大有助益。

獲取地表高程的方法很多，除 InSAR 外，水準測量、GPS、LiDAR 等均可利用各自的特性獲得高程，本章節僅針對 GPS、LiDAR 等現代技術目前發展之狀況做一簡介，並與各項技術之優劣做一比較。

3.1 GPS 發展趨勢

GPS 的相對定位一直是控制測量與地殼變動監測所採用的方法，隨著儀器的精良、觀測技術的改進、系統誤差模式的完善、數據處理理論與方法的精進，以 GPS 監測網為例，在相對定位精度上已朝向 0.001 ppm 邁進。

近代的觀測及處理技術已朝向網路化、即時化的動靜定位模式，GPS 監測網除了有若干固定的追蹤站做為監測的基準站之外，更加入許多即時

動態定位(Real Time Kinematic, RTK) 之測站。這可機動地、短時間地佈設於活斷層或地殼變動敏感地帶，進行「epoch-by-epoch」解算，以獲得一系列隨時間變動的點位 3D 坐標。當配合時間序列分析時亦得獲得地表連續變動之信息。這種 GPS 監測網還可在適當地點建立若干虛擬衛星站，以增強測站觀測環境的 GPS 幾何圖形強度因子(GDOP)，提高定位精度與成功率/妥善率。若能採用網路來傳輸觀測資料，遂可建置成為即時定位之框架。

用 GPS 來監測板塊運動和地殼變形的精度，水平方向變形可達到 1 ~ 2mm/yr，垂直方向可達 2 ~ 4mm/yr，基線測量相對精度可達 0.001 ppm，這一精度足可用來監測大區域的地殼變動[Bock, 1998]。

內政部國土測繪中心為建構「e-GPS衛星基準站即時動態定位系統」，特委託成功大學衛星資訊研究中心進行系統規劃設計及軟體開發，研究案的若干成果均採用虛擬基準站(Virtual Base Station,VBS) 之RTK定位測試結果。

由 VBS-RTK 之定位精度分析成果得知，當虛擬基準站 VBS 與移動站(Rover)位置相距在 500 m 之內時，以 VBS 定位技術進行移動站之 RTK 定位解算，其精度可符合平面精度中誤差應小於(含) 3 cm 以及高程精度中誤差應小於(含) 6 cm 之要求。由各虛擬基準站與移動站之 RTK 基線每筆連續觀測資料之 VBS-RTK 解算成果得知，在 X, Y, Z 坐標向量之解算

精度分別介於 $\pm 5 \sim 12 \text{ mm}$ 、 $\pm 8 \sim 15 \text{ mm}$ 以及 $\pm 4 \sim 8 \text{ mm}$ ，顯示出以 VBS 定位技術進行移動站之 RTK 相對定位，可獲得穩定、可靠之成果[內政部國土測繪中心, 2006]。

3.2 LiDAR 發展趨勢

空載 LiDAR 可獲取高時空分辨力的地球空間資訊，在邁入 21 世紀時提供一種全新的手段，目前以 LiDAR 所製成的數值高程模型，在解析度、精確度、方便性與去除因建物與樹木遮蔽等方面，將是最符合各種地質與地形研究應用的要求，未來在地形測繪及高時空區域性地殼變形監測發展潛力無窮。

LiDAR 為利用雷射光束測距原理進行掃瞄式測距之系統。主要可以包含以空載及地面兩種系統，空載光達係以航空器為載台，結合雷射系統、GPS、與慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)，將三部分技術整合，獲取資料經解算後，即可獲得地形地物之(X, Y, Z)三維坐標，也使得地形高程測量作業快速而準確，而能進一步分析應用。空載光達技術的發展，源自 1970 及 1980 年代美國太空總署(NASA)的研發，因應 GPS 及 INS 發展，使得精確的即時定位定姿態方法得以實現。

以 LiDAR 所製成的數值地形，在解析度、精確度、與數據獲取效率等方面均有很高效果，而且在特定情形下，可以濾除建物與樹木等對地形面

的遮蔽或干擾，故空載光達技術已成為地形研究應用的重要工具。約從1995年開始商業化，此類系統之精度可達 15 cm 以內。同時，在森林覆蓋地區具有相當穿透率，可有效測得地表高程及地面高。空載光達技術自2002年引進國內後，獲取陽明山、新竹、大坑、九份二山、與草嶺潭等測區之數據，供各界進行應用探討後，空載光達技術在獲取大面積精確數值地形上的效率已獲得證實，國內亦將陸續產出這種高精度的數值地形。

空載雷射掃瞄儀之應用面及潛在應用甚多，其所測得者為數值表面模型(Digital Surface Model, DSM)，應用分類(Classification)技術將這些原始數值資料，移除建物、人造物、覆蓋植物等第一回波點雲測點即可得DTM，並同時得到地面覆蓋物的高度。應用層面包括建物的萃取、建立三維城市模型、森林樹高、材積估計、生物量估算及電力線與下方植生間距測繪等之作業。

數值地形不只可用於描述與展示三維的地形，亦易於推衍各種地表地形參數，如：坡度、坡向、曲率、剖面、集水區、水系等，可用於地質災害分析、水文分析與模擬、土壤侵蝕研究、以及其他生態環境之模擬與分析等。近年來利用新興的技術，國內在活動斷層與構造地形等地質災害研究方面已有相當的進展。此類新興的技術包括大地測量、衛星遙測、地理空間資訊系統與活動構造定年等。

3.3 InSAR 與其它技術之比較

3.3.1 InSAR技術之優劣勢與限制條件

InSAR之特點在於利用雷達的相位資料，形成地形（變形）的干涉圖，再透過相位差來確定地面點的高程或變形。如與GPS等遙感技術相比，有以下之優勢：

（一）涵蓋範圍大，資料獲得方便且快速

InSAR技術進行地面變形監測的範圍可以覆蓋全球，與其他變形監測方法（如GPS侷限在一點或某一區域）是完全不同的。

（二）成本低不需建立監測網

GPS進行地面變形監測的一個重要條件就是要是先建立監測網，並要有事先測量的參考點；而應用InSAR技術則不需要建立監測網，雖然InSAR測量得到的每一個點位變化量不如GPS測量所得到的成果精確，但相較於GPS外業需耗費大量的人事費，其成本較低的特點對於災情的掌控及災害範圍的評估有很大的作用。

（三）可獲得某一地區連續的地表變形資訊

GPS監測所得到的地面變形是離散的，而InSAR所得到的是連續覆蓋的面，對分析地面變形分布及發展規律是非常有用的。

（四）可監測潛在或未知的地表變形

對於火山等地區，目前尚無法精確掌握它們的確切位置或噴發時間，難以事先安排GPS測量，然而InSAR不需至現地進行測量，可長期監測潛在或未知的地表變形。

(五) 具全天候且不受雲層及晝夜影響

InSAR受大氣分子散射的影響很小，因此InSAR波長可不受天氣的影響，具有全天候的優點；另InSAR是以主動方式成像的，可晝夜工作，具有全天時的優點，可彌補光學影像在時間及空間上的成像盲區。

(六) 一定的穿透能力

InSAR波長較長，因此對介電常數較小的乾燥沙漠及土壤有較大的穿透深度，能提供其他遙感技術無法獲取的信息，對於揭示地下目標比可見光、紅外線遙感優越。

(七) 提取DTM的精度高、速度快

InSAR技術利用影像數據中的相位部分，可以精確的測定地面微小的位移變化，提取DTM的精度也可以達到 m 級；利用DInSAR技術進行地表的垂直變形信息的提取，其精度已達到了 cm 級，其應用已經國內外的期刊中驗證。

除了優勢之外，亦有其不足之處，如下：

(一) 系統本身因素導致干涉圖質量下降

由於基線長度及軌道不平行導致的空間相關性降低；雷達成像的幾何侷限性，即對高山地區及建物密集區成像時存在不可避免的雷達波束疊置及陰影現象。

（二）地面植被及溼度的影響

由於植被生長及溼度變化引起的地表反射特性變化，導致干涉相位在時間上的相關性降低，會對結果產生很大的影響。

（三）大氣條件的影響

大氣條件變化導致時間及空間干涉相位的延遲，是影響SAR技術應用亟待解決的問題之一。

隨著InSAR技術水平的不斷提高及雷達系統設計及優化方面的改進，以上較不利的因素會逐步減弱或消除。

至於InSAR技術之限制條件有以下幾項

（一）必需為複數影像：SAR 影像的格式很多，以往在測繪領域之空間綜

合定位方面，皆以振幅影像為研究對象；但處理 InSAR 影像需同時包含振幅及相位資訊的複數影像才可作為干涉之用。

（二）地表資訊保存需具備相關性：若地表在兩幅影像取樣期間變化太大，

致使影像的相位間沒有相關性，則無法進行干涉處理。此種現象如水面、近海岸線的潮汐、成長快速的農業區等，這些現象會破壞干

涉圖中的條紋型態，稱為不相關或不同調，要確定處理的影像中是否有這些現象，藉由同調性圖來了解變化情形。

- (三) 相位變化值符合要求：在干涉設定條件中，鄰近像元間的相位變化值不得超過 2π ，當變化值超過這個值，像元間就會產生不相關現象。例如地震所產生的變形量太大，超過這個臨界點，就無法在干涉圖上顯示出來。
- (四) 不確定值(Ambiguity)：在判讀雷達與地表的距離值時，實際上是不確定的。由於影像中僅保存相位的分數值，整數部分就是不確定值，也就是全相位回復要計算的整數值。回復最簡單的方法就是沿著一條路徑計算條紋數，雖然目前已有許多自動的方法可以進行全相位回復，但是無法確保最終的結果都是正確的。
- (五) 需具有良好之同調性：因為雷達為側視成像，訊號發射的角度與地面交互作用後，接收的角度必需能接收反射的訊號，才能記錄訊號時間及強度值，因此，如因地面為光滑平面，而產生鏡面效應，或因地形的坡度無法有效反射訊號，則會缺乏有效訊號，無法產生同調現象。

由以上所述，將InSAR技術之優劣勢及限制條件統整如表3.1。

表3.1 InSAR技術之優劣勢及限制條件

技術 項目	InSAR技術
優 勢	<ol style="list-style-type: none"> 1. 具全天候且不受雲層及晝夜影響 2. 涵蓋範圍大，資料獲得方便且快速 3. 具有一定的穿透能力 4. 可獲得某一地區連續的地表變形資訊 5. 可監測潛在或未知的地面變形 6. 監測成本較低，不需建立監測網 7. 提取DTM的精度高（平地）、速度快
劣 勢	<ol style="list-style-type: none"> 1. 系統本身因素導致干涉圖質量下降 2. 受地面植被及溼度的影響 3. 受大氣條件的影響
限制條件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 必需為複數影像 2. 地表資訊保存需具備相關性 3. 相位變化值符合要求 4. 不確定值(Ambiguity)需掌握 5. 需具有良好之同調性

3.3.2 InSAR與其它技術之比較分析

根據以上所述，可大致歸納出各項技術之優缺點：DInSAR可計算地表變形量，優點為可大範圍監測且為高精度之測量結果，缺點為易受到地形與氣候的影響，導致精度降低；GPS之優點為可快速得到精確的三維坐標，缺點為高程精度較水準測量為低；LiDAR之優點為大範圍高密度資料點且

垂直方向的精度高，缺點為取得之資料量大，電腦無法進行大區域的處理。

其DInSAR與其它遙測技術之各項比較如表3.2。

表3.2 DInSAR與其它技術之各項比較表

技術 項目	DInSAR	GPS固定站	LiDAR	水準測量
單次 作業範圍	大	小	大	小
單次 作業時間	短	中	短	長
解算時間	長	中	中	短
專業需求	高	高	高	中
時間解析度	35天（以 ERS為例）	1天	不定	1年
垂直變化量 精度 （相對精度）	cm 級	cm 級	dm 級	mm 級

第四章 干涉合成孔徑雷達理論介紹

4.1 InSAR 模式

在 InSAR 資料獲取中，依接收天線位置之幾何關係不同，可將其分為橫軌式干涉(Across-track Interferometry)、沿軌式(Along-track)干涉及重複軌道式(Repeat-track)干涉等三種模式[Gens and van Genderen, 1996]。

橫軌式干涉模式需同時裝置兩個雷達天線系統在同一機載平台上，且兩天線所構成的直線方向與飛行方向相互垂直。在單一軌跡模式中，此兩個天線是同時裝載也同時運作，運作的實例有 TOPSAR 系統及 SRTM 系統。此種模式只要全相位回復(Phase Unwrapping)能成功的完成，即可獲得高程資料，但無法有效的分辨地形斜坡與飛機傾斜所引起的誤差。在衛載系統中，則因為衛星飛行較穩定，誤差影響量較小。

沿軌式方式同橫軌式模式，亦須同時裝置兩個雷達天線系統在同一機載平台上，但其差異為雷達天線的幾何配置不同，其雷達天線所構成的直線方向與飛行路徑一致。因為天線的配置方式與橫軌式的方式不同，所以接收訊號產生的相位差主要來源為物體瞬間的變動量。由於物體移動將導致天線接收訊號產生都普勒(Doppler)位移的效果，所以利用都普勒的原理可推算出物體的變動量。但是在該模式中，天線無法分辨固定物體的訊號。而沿軌式模式所產生的相位差主要係因物體相對於感測器移動所致，且飛

行的偏斜與俯仰亦會影響相位差值，所以必須先進行相位差的率定才能獲得絕對的速度值。

重複軌道干涉模式如圖4.1所示，其中 X 、 Y 、 Z 為一直角坐標系統， H 為航高、 r 為斜距、 θ 為視角、 A_1 、 A_2 為獲取地表資訊時天線之空間位置。該模式的載台僅配置一個天線故需利用載具飛行同一區域兩次的方式進行干涉處理。因取像位置會有些微不同，為能精確進行干涉處理，在獲取影像瞬間的實際位置必須準確的計算，因此該法較適合飛行穩定的衛載系統，如ERS、ALOS及RADARSAT等衛星。

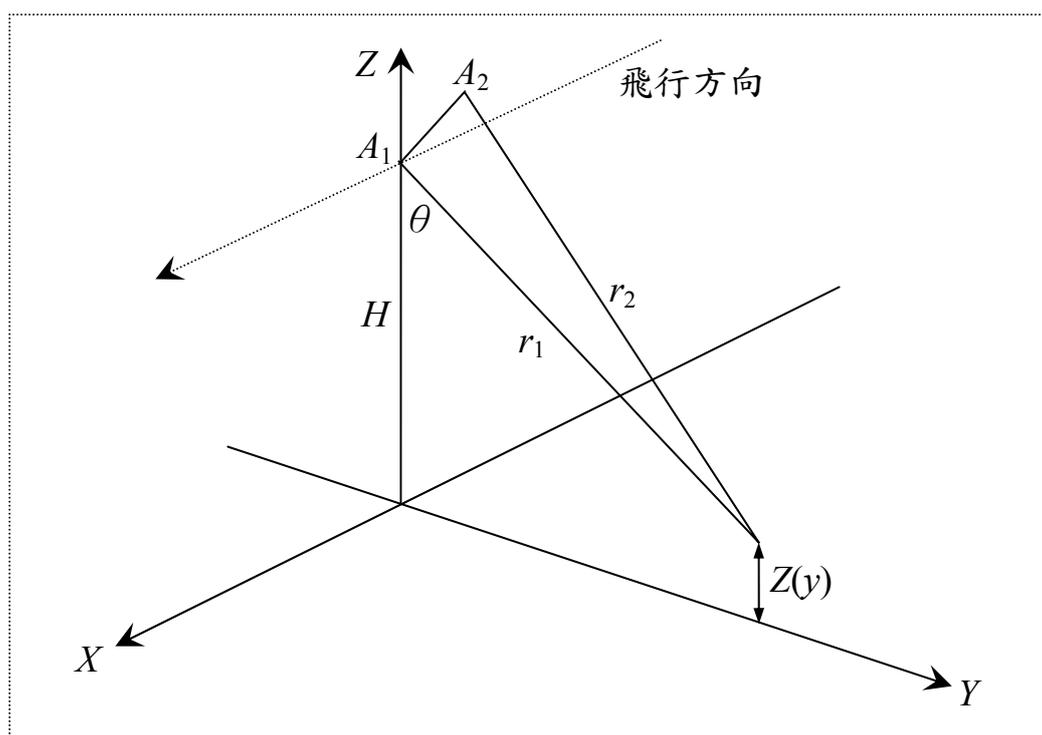


圖 4.1 重複軌道干涉模式示意圖

此模式是利用載台通過相同區域時的位置幾乎一樣，可重複拍攝同一地區二次，以僅有些微變化的特性來獲取影像對。以此模式進行干涉處理

僅需一個天線，且須有較精確的飛行路徑，因此較適合衛載 SAR 感測器，且由於衛星位於大氣稀薄的軌道上，亦可穩定的沿軌道飛行，故本案所採用之雷達干涉模式為重複軌道式干涉模式。

目前較成功的是歐洲太空總署所發射的 ERS-1/2 衛星，特別是針對干涉處理設計的協力式任務，任務中兩顆衛星拍攝同一地區前後僅差一天，有許多結果良好的干涉產品。在重複軌道的干涉模式中，要獲得適合的干涉資訊最主要的必需符合三項條件：地形的散射情形沒有改變、穩定的幾何關係及在訊號的移動補償中，SAR 的處理器必須保持相位的一致性。

4.2 InSAR 原理介紹

雷達干涉技術利用不同時間或不同位置的雷達天線所獲得的兩幅或多幅複數影像，藉由相位差來獲取地表三維資訊。InSAR 之簡單幾何關係圖

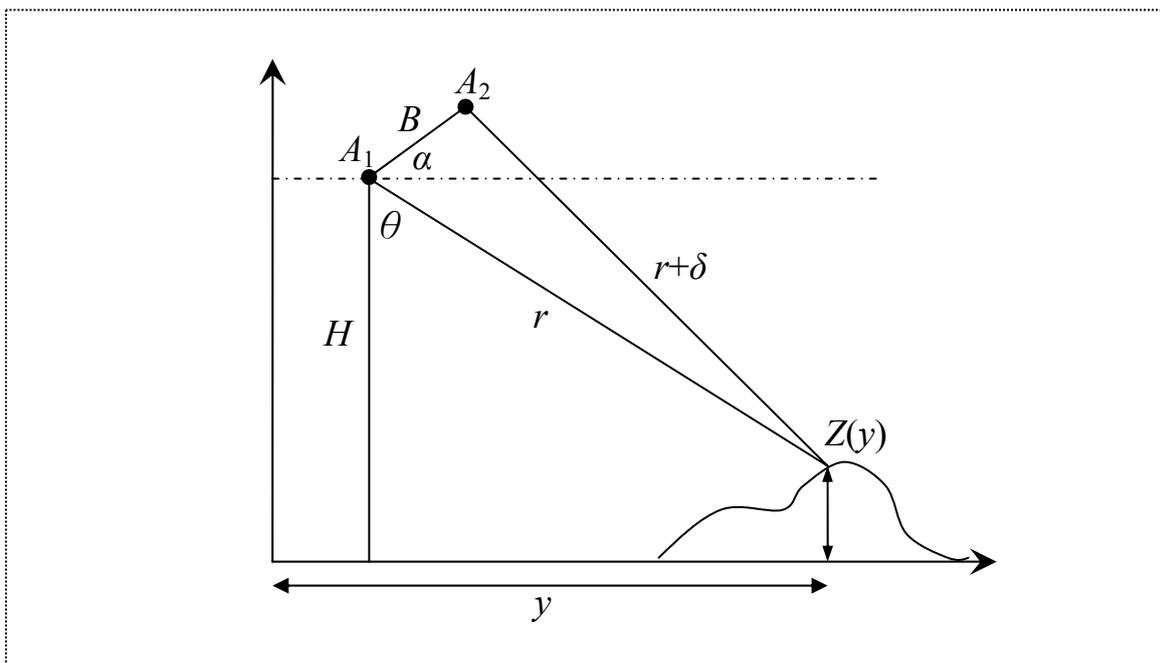


圖 4.2 雷達干涉幾何示意圖

如圖 4.2 所示，其中 A_1 、 A_2 為獲取地表資訊時天線的空間位置， B 為兩天線間之距離(基線)， H 為航高， θ 為視角， r 為第一個天線至地面點的距離， δ 為第二個天線至地面點的距離與 r 的距離差值， α 為基線與水平線的夾角。

由兩個天線所接收的同一地面點訊號的相位差值為 φ ，根據相位差所代表的意義為兩個相同頻率正弦量的相位之差，即 $(2\pi r/\lambda)$ 與 $(2\pi(r+\delta)/\lambda)$ 之差，也就是距離差值乘以 $(2\pi/\lambda)$ ，可以下式表示：

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta \quad (4.1)$$

因雷達成像方式為由發射點發射，經待測點折返至接收天線，故其訊號傳播之路徑差為 2δ ，代入上式可得接收訊號時其產生之相位差值為：

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\delta = \frac{4\pi}{\lambda} \delta \quad (4.2)$$

則距離差值為：

$$\delta = \frac{\lambda\varphi}{4\pi} \quad (4.3)$$

在圖 4.2 可知， $\angle A_2A_1Z = 90^\circ - \theta + \alpha$ ，依三角餘弦定律可得：

$$(r + \delta)^2 = r^2 + B^2 - 2rB \cos(90^\circ - \theta + \alpha) = r^2 + B^2 - 2rB \sin(\theta - \alpha) \quad (4.4)$$

經推導後

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{(r + \delta)^2 - r^2 - B^2}{2rB} \quad (4.5)$$

則

$$r = \frac{\delta^2 - B^2}{2[B \sin(\theta - \alpha) - \delta]} \quad (4.6)$$

由圖 4.2 知

$$Z(y) = H - r \cos \theta \quad (4.7)$$

則可得點位之高程值為：

$$Z(y) = H - \frac{\left(\frac{\lambda\phi}{4\pi}\right)^2 - B^2}{2\left[B \sin(\theta - \alpha) - \left(\frac{\lambda\phi}{4\pi}\right)\right]} \cos \theta \quad (4.8)$$

在雷達干涉的處理技術中，只要確定軌道的參數值，航高、視角、基線及基線與水平線的夾角等資料，再配合雷達波長即可計算點位的高程值。

4.3 DInSAR 原理介紹

DInSAR 是建構在兩張不同時期的干涉圖上，其中一張干涉圖為地形對，代表地表高程；另一張干涉圖為變形對，變形對資料包含地形效應及地表變形效應。將兩張干涉圖進行差分的處理，可以移除變形對中的地形效應，得到的結果為僅因地表變形而造成的相位差值。地形資料的獲得因採用的資料來源不同而有不同的處理方法，可分為三種[Zebker, 2000]，分述如下：

1. 二軌跡法(Two-pass Differential Interferogram)

此法以既有的 DTM 模擬成第一張干涉圖，當作地形對；另外選擇在兩張影像拍攝期間發生地表位移變形的 SAR 影像對產生第二張干涉圖，作為變形對。將兩幅干涉圖差分處理後即可得到地表變形量。在此模式的差分干涉處理中，DTM 的品質將影響干涉處理結果的好壞，處理的技巧在於要將雷達影像與 DTM 所產生的地形影像精確套合。此法的限制是 DTM 的精度及雷達系統的雜訊[Gabriel and Goldstein, 1988]。

2. 三軌跡法(Three-pass Differential Interferogram)

此法選用三張 SAR 影像，假設第一張影像（主影像）與第二張影像（次影像一）拍攝期間地表沒有變形情況發生，由此兩張 SAR 影像產生得干涉圖當作地形對；而地表變形發生在第二張影像及第三張影像拍攝期間，此時由第一張影像與第三張影像（次影像二）產生的干涉圖當作是變形對，此干涉圖同時包含了地形效應及變形量所造成的相位值，將兩張干涉圖進行差分處理，可計算出地表變形量的相位值，再轉換成實際的變形量。此種方法的優點在於不需現有的 DTM 資料，也不必擔心 DTM 的品質，再加上兩幅影像都計算至同一參考坐標系統，不用再進行套合處理。但相對的，因此法必須將地形對進行全相位回復的處理，在處理的過程中容易引起錯誤，且以干涉圖當地形對會有許多地方因相關性不好而沒有干涉條紋，導

致處理的問題與困擾[Massonnet and Feigl, 1998]。

3. 四軌跡法(Four-pass Differential Interferogram)。

此法是選用四張 SAR 影像，由第一張影像（主影像一）及第二張影像（次影像一）形成第一張干涉圖作為地形對，此影像對在拍攝期間無地表變形產生。地表變動的情形發生在第三張影像（主影像二）及第四張影像（次影像二）拍攝期間，由此兩張影像形成之第二張干涉圖作為變形對，再將兩幅干涉影像做差分處理，可以得到因地表變形而產生的相位值。

在變遷分析中，不論使用二軌跡法、三軌跡法或四軌跡法進行變遷分析，理論上結果都應相同。但因變遷分析最重要的就是地形對一定要準確，只要地形對選擇適當，變遷成果亦應較佳。但因二軌跡法、三軌跡法及四軌跡法究竟何者為佳，各學派尚有爭議，就做法來看，二軌跡法直接選用已知之 DTM 做為地形對應是較準確的；三軌跡法因先選擇一幅主影像當作基準，分別與變遷時間前後之影像做為地形對與變形對，可免除再一次影像套合之步驟；至於四軌跡法因先選擇變遷前之兩幅影像做為地形對、變遷後之兩幅影像做為變形對，則必需再多做一次影像套合之步驟。故不論使用二軌跡法、三軌跡法或四軌跡法進行變遷分析，只要地形對計算準確，變遷成果則會較佳。

DInSAR 是用來量測地表微小移動的技術，即利用不同時期產生的干涉

圖中移除地形效應後，得到純粹因變形所產生的相位干涉圖，依文獻報告中之成果記載，此技術可提供至 cm 級的相對精度[Gabriel *et al.*, 1989; Massonnet *et al.*, 1993; Chang *et al.*, 2004a]。DInSAR 量測地表位移量的方向並非為垂直方向，而是沿著雷達視距方向的變動量，幾何示意圖如圖 4.3 所示。

由圖 4.3 可知，假設 A_1 、 A_2 影像視為沒有差異的影像，則由 A_1 與 A_2 兩天線位置所獲得的影像可形成地形干涉對，另假設地表變形發生在 A_1 及 A_3 拍攝期間，則 A_1 與 A_3 的影像則可形成變形干涉對，變形量產生於 A_3 影像內，故計算的原理為利用 A_1A_3 的變形對資料移除由 A_1A_2 地形對的地表資訊，即可獲得因地表變動導致斜距方向變化所產生的干涉相位值。

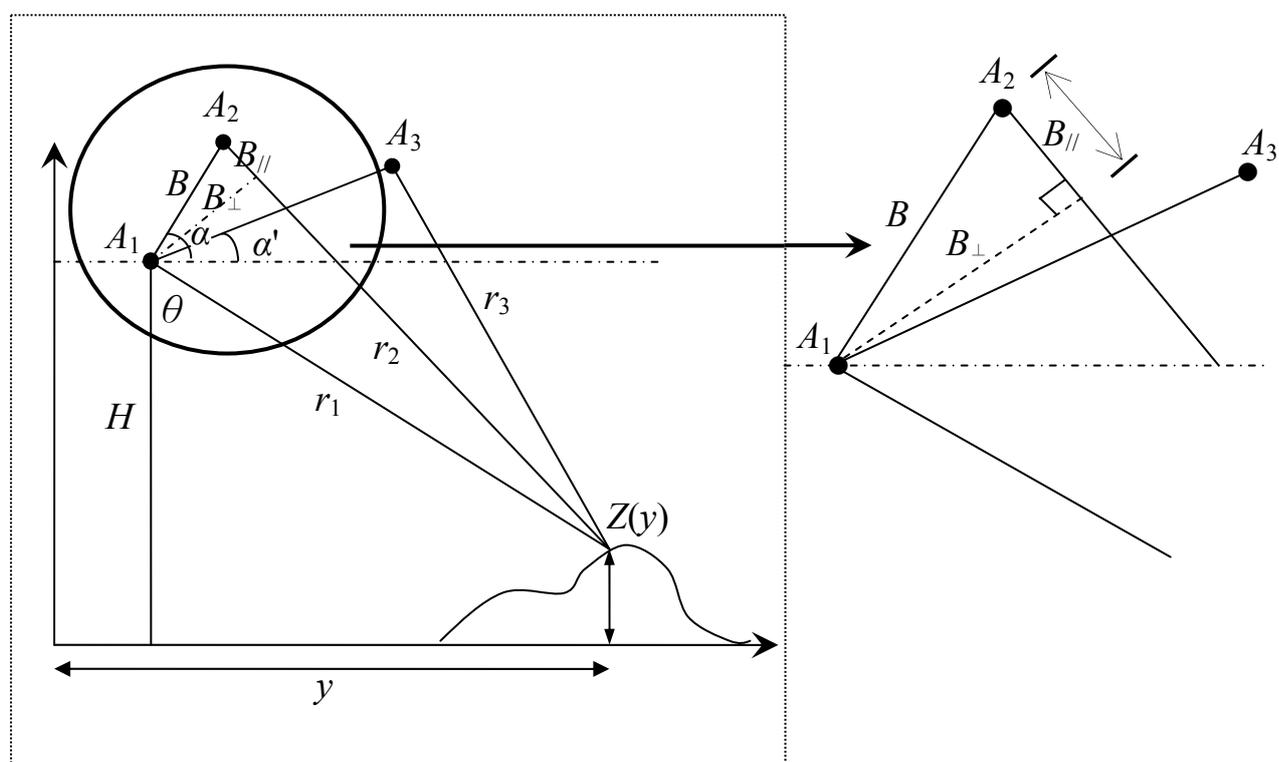


圖 4.3 雷達差分干涉幾何示意圖

因 $\delta = r_2 - r_1$ ，且在 $\angle A_1A_2Z$ 的三角形中可知：

$$r_2^2 = r_1^2 + B^2 - 2r_1B \cos(90^\circ - \theta + \alpha) = r_1^2 + B^2 - 2r_1B \sin(\theta - \alpha) \quad (4.9)$$

移項後可得：

$$\begin{aligned} r_2 - r_1 &= \frac{-2r_1B}{(r_1 + r_2)} \sin(\theta - \alpha) + \frac{B^2}{(r_1 + r_2)} \\ &\cong -B \sin(\theta - \alpha) + \frac{B^2}{2r_1} \end{aligned} \quad (4.10)$$

因 $r_1 \gg B$ ，

$$\delta = -B \sin(\theta - \alpha) = -B_{//} \quad (4.11)$$

由(3.2)式，地形對的相位差值可以表示為：

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{//} \quad (4.12)$$

而變形對所產生的相位差值除因高程所產生的路徑差值外，還包含有因變動所產生的距離差值，故可描述如下：

$$\varphi' = -\frac{4\pi}{\lambda} [r_1 - (r_3 + \Delta r)] = -\frac{4\pi}{\lambda} (B_{//}' + \Delta r) \quad (4.13)$$

式中 φ' 為變形對影像的相位差值， $B_{//}'$ 為變形對基線的平行分量， Δr 為地表變動導致斜距方向變化。

因由式(4.12)可知 $-(4\pi/\lambda) = \varphi / B_{//}$ ，代入式(4.13)可得：

$$\varphi' = \frac{\varphi}{B_{//}}(B_{//}' + \Delta r) = \varphi \frac{B_{//}'}{B_{//}} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (4.14)$$

因地形對與變形對均需經過平坦化之處理（將於下一章節做清楚介紹，在此先套用處理公式），其地形對與變形對經平坦化處理後之相位差值 φ_f 與 φ_f' 分別如下：

$$\varphi_f = \frac{4\pi}{\lambda} B[\sin(\theta - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)] \quad (4.15)$$

$$\varphi_f' = \frac{4\pi}{\lambda} [B' \sin(\theta - \alpha') - B' \sin(\theta_0 - \alpha') + \Delta r] \quad (4.16)$$

其中 θ_0 為第 1 個像元點位的視角。令 $\theta - \theta_0 = \delta\theta$ ，則式(4.15)可表示為：

$$\varphi_f = \frac{4\pi}{\lambda} B[\sin(\theta_0 - \alpha + \delta\theta) - \sin(\theta_0 - \alpha)] \quad (4.17)$$

令 $\theta_0 - \alpha = \beta$ ，則

$$\varphi_f = \frac{4\pi}{\lambda} B[\sin(\beta + \delta\theta) - \sin \beta] \quad (4.18)$$

因 $\delta\theta$ 值很小，

$$\sin(\beta + \delta\theta) = \sin \beta \cos \delta\theta + \sin \delta\theta \cos \beta \cong \sin \beta + \delta\theta \cos \beta \quad (4.19)$$

故可將(4.18)改寫成：

$$\varphi_f = \frac{4\pi}{\lambda} B[\sin \beta + \delta\theta \cos \beta - \sin \beta] = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\theta \cdot B \cos \beta \quad (4.20)$$

令地形對基線在第 1 個像元方向的垂直分量為 $B_{\perp_0} = B \cos(\theta_0 - \alpha) = B \cos \beta$ ，

則式(4.20)可表示為：

$$\varphi_f = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\theta \cdot B_{\perp_0} \quad (4.21)$$

同理可得

$$\varphi_f' = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\theta \cdot B_{\perp_0}' + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (4.22)$$

其中 B_{\perp_0}' 變形對基線在第 1 個像元方向的垂直分量。

亦可將 φ_f' 表示成下式：

$$\varphi_f' = \varphi_f \frac{B_{\perp_0}'}{B_{\perp_0}} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (4.23)$$

透過式(4.23)，已知地形對與變形對的垂直基線值及兩者之相位差值，則可計算變動量在雷達視距方向的變形量。

4.4 誤差來源分析

在 DInSAR 處理中，訊號從發射到接收的過程中，每一個過程都可能引起誤差，所以必須先對誤差來源進行分析，就干涉結果的相位差值而言，可能包含的影響量如下[Pathier *et al.*, 2003]：

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_{te} + \Delta\varphi_{oe} + \Delta\varphi_{dc} + \Delta\varphi_n \quad (4.24)$$

其中

$\Delta\varphi_d$ ：地表變形量

$\Delta\varphi_a$ ：大氣影響量

$\Delta\varphi_{te}$ ：因地形產生的誤差

$\Delta\varphi_{oe}$ ：因軌道產生的誤差

$\Delta\varphi_{dc}$ ：因幾何及時間產生的不相關

$\Delta\varphi_n$ ：因雜訊及處理產生的不相關

以上 $\Delta\varphi_d$ 為地表變形量投影在雷達視距方向的變形量分量，每一週期 2π 代表的位移量為 $\lambda/2$ ，由於雷達成像相位 2π 模組化的特性，所以實際變形的整數值為未知數，要回復整數值必須依賴像元的成像品質與週遭像元的關係，若要求品質須達一定水準， $\Delta\varphi_{dc}$ 與 $\Delta\varphi_n$ 就要降低[Massonnet *et al.*, 1998]，因為 $\Delta\varphi_{dc}$ 與 $\Delta\varphi_n$ 會影響影像像元間的同調性。另在選擇影像對時，會盡量要求較短的空間與時間基線，因為可減少 $\Delta\varphi_{te}$ 與 $\Delta\varphi_{dc}$ 的影響量。

在干涉圖的形成過程中，影像的成像幾何、感測器的特性及處理的過程會產生同調性的影像，可預估影像干涉結果的良窳，但卻無法表示獲得干涉資料的品質，例如影響最大的 $\Delta\varphi_a$ 與 $\Delta\varphi_{oe}$ 在同調性的影像中就無法有效的表現出來[Hanssen, 2001]。因此在探討誤差來源時，除以同調性影像來顯示影像獲取期間的相關性外，還要探討軌道及大氣誤差的影響量，才能更準確的顯示干涉結果的精確度。另從干涉圖的結果中可進行不同誤差來源的分析[Pathier *et al.*, 2003]，包含：

一、大尺度的誤差

此誤差在干涉途中會產生明顯多餘的平行或垂直的干涉條紋，誤差來

源可能為軌道誤差 $\Delta\varphi_{oe}$ 及大氣誤差 $\Delta\varphi_a$ ，甚至可能為此兩種誤差之結合。另外 $\Delta\varphi_{ie}$ 也會引起大比例的誤差，但此類誤差在不同的干涉圖中都位於同一地區，且其影響量會隨基線值的長短而改變，基線愈短其影響量愈小。在實際的處理過程中，使用 DEOS(Delft Institute for Earth-Oriented Space Research)的精密軌道資料已較精確，但仍含有軌道誤差，所以仍必須進行軌道微調處理，才能確保干涉結果的正確性。

二、中尺度的誤差

此誤差在干涉途中會產生不規則的影響，例如原來平滑的干涉條紋突然有不規則變動，此類誤差來源可能為大氣影響或局部特殊地形變動，基本上排除軌道誤差的影響，因為中比例誤差與軌道不相關。此類變動主要在不同的干涉圖間顯示不同的結果，所以此類的影響量主要來源為大氣影響量 $\Delta\varphi_a$ 。因此假設中比例誤差在位置及影響量均為隨機的，且與地表的變形會結合在一起，所以在判讀分析上很難加以區分，且其他類別的中比例誤差就很容易分別，如位於河床上的相位值，由於大氣中水蒸氣的含量較大，所以在河流區有不同的相位變化。

三、小尺度的誤差

相位值在鄰近像元間有快速且巨大的改變，且該像元為低相關性像元，此種誤差來源可能為 $\Delta\varphi_{dc}$ 與 $\Delta\varphi_n$ ，表示有雜訊影響。

4.5 影響雷達干涉結果之參數

一、基線

當所選取影像對的基線值太長時，鄰近像元的相位值變化可能超過 2π ，會引起全相位回復計算的誤差；若選擇的基線太短時，則因幾何結構不佳，對地形變化的靈敏度較差。因此基線長度是形成干涉條件的重要限制因素。以 ERS 為例，DTM 產製所使用影像對之垂直基線長度約為 150 ~ 300 m；地表變遷偵測所使用影像對之垂直基線長度約為 30 ~ 70 m。但若所選擇之影像對無法滿足以上之適用基線長度時，原則上以不超過臨界基線長度為宜，而臨界基線長度於各影像對中皆不相同，如要以數值表示，建議臨界基線長度不超過 1,500 m [Jung *et al.*, 2007]。

二、大氣效應

如果影像獲得時間的大氣分布相當均勻，其影響量是可以忽略的，但若大氣的分布為不均勻或前後取樣時間的大氣條件差別太大（如取樣前為晴天，取樣後則為雨天，則稱大氣條件差異較大），就必須將大氣的影響效應剔除。且大氣會影響訊號折射效果，導致像元在套合處理時產生誤差，會產生相位的差異，故大氣效應亦應考量。

三、處理過程

干涉處理過程中每個步驟的作業要求需相當嚴格，如有些微的疏忽，就會影響結果甚鉅。因此要確保處理過程的正確，才能獲得良好的精度。

處理過程中影響結果最大的就是全相位回復，因為計算回復值都是整數的波數值，所以只要處理過程有誤，產生的誤差量將影響全幅影像。

四、影像資料同調性

雷達干涉處理的必要條件就是要有干涉效應，若無法進行干涉處理，此現象就稱為影像不相關。當成像的幾何不同時，接收的訊號值就會不同，所以當基線超過一定量時，同一地面像元在兩幅影像的散射值就沒有相關性，此種因基線太長所產生的不相關就稱為基線不相關；當兩幅影像的取像時間不同，因地面條件的改變所產生的不相關則稱為時間不相關。

以上所述之任何一個參數都會影響干涉結果的精度，因此要確保各項參數都在可控制的範圍之內，才能產生良好的干涉結果。

第五章 雷達干涉處理流程

干涉技術處理結果可產生高精度地表高程資訊及變形資料，故每個步驟都必需謹慎的處理，以免影響結果的精度。有關干涉圖產生及差分干涉處理流程之主要處理程序如下：首先選擇合適的雷達影像對，並從影像對中產生地形對與變形對，每一個像對都需要進行套合處理，套合完成的像對就可以計算干涉圖。由於原始干涉圖包含有因不同距離差所產生的相位量測誤差，所以須執行平坦化的處理，再將干涉圖的軌道誤差移除，產生與地形相對應的干涉圖。最後將干涉圖進行全相位回復處理後，可產生與實際高程相對應的雷達坐標干涉圖，再透過斜距轉換計算及坐標定位產生DTM，也可將變形對移除地形對產生變形量的干涉圖，各項流程詳述如後。

5.1 基線計算

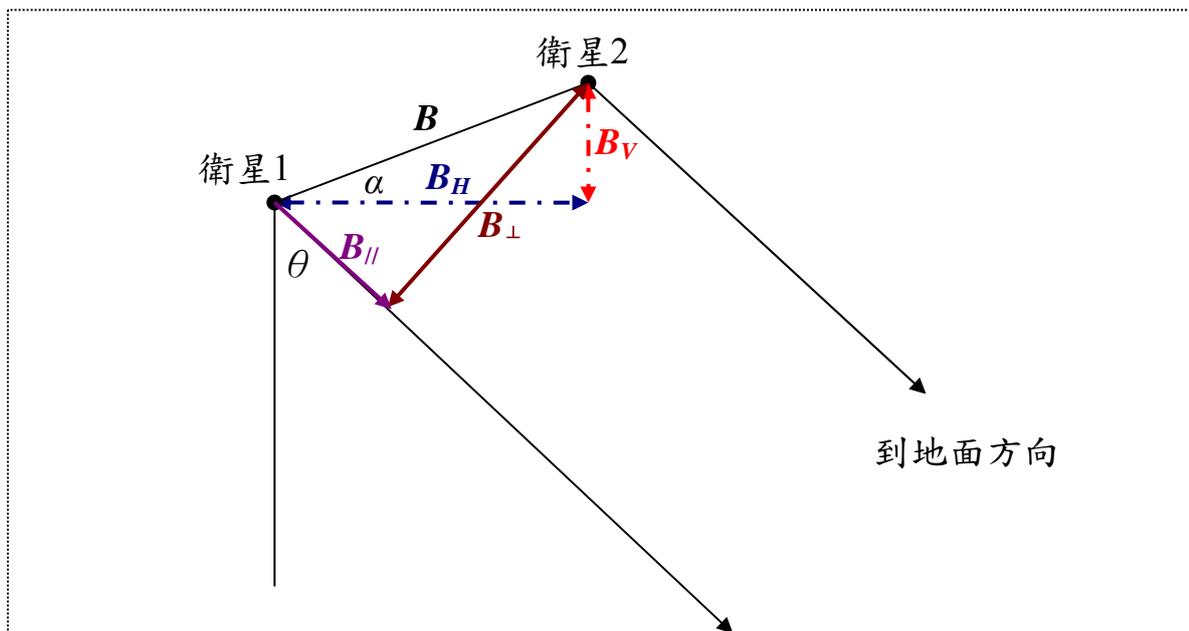


圖 5.1 基線各項參數幾何關係示意圖

由圖 5.1 知，依不同的基準，基線可以用兩種不同的分量來表示，以地面參考點為基準，可將基線區分為水平分量及垂直分量，稱為水平基線(B_H)與垂直基線(B_V)；另一以雷達視距方向為基準，可區分為平行分量($B_{//}$)與垂直分量(B_{\perp})，各項幾何參數間之轉換式如下：

$$B = \sqrt{B_H^2 + B_V^2} = \sqrt{B_{\perp}^2 + B_{//}^2} \quad (5.1)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{B_V}{B_H}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{B_{\perp}}{B_{//}}\right) + \theta - \frac{\pi}{2} \quad (5.2)$$

$$B_H = B \cos \alpha, \quad B_V = B \sin \alpha \quad (5.3)$$

$$B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha), \quad B_{//} = B \sin(\theta - \alpha) \quad (5.4)$$

基線的計算方法有許多種，可以利用精密軌道資料、現有的 DTM 及量測控制點來計算基線值。因基線是干涉成像幾何中相當重要的幾何元素，代表拍攝同一地面點時兩衛星的空間相對位置，不同的基線值適合不同的應用處理，以 ERS 為例，適合應用情形如表 5.1[Solaas, 1994]。

表 5.1 干涉技術處理不同應用之適用垂直基線長度對照表

項次	應用目的	垂直基線長度
1	數值地形模型	150 ~ 300 m
2	表面變遷偵測	30 ~ 70 m
3	表面特徵移動	0 ~ 5 m

5.2 影像套合

一般套合處理包含計算兩張影像的轉換係數及重新取樣。其主要處理步驟為：確定干涉像對的主影像與次影像、利用統計方法尋求影像對應點位、計算轉換參數及將次影像轉換至主影像坐標。雷達影像因為隨機性的斑駁(Speckle)，使主影像的特徵在次影像上未必是特徵，且因為地物背向散射係數的敏感性，使地物在兩張影像上可能有不同的輪廓，故無法以一般的特徵匹配方法來進行套合。為了使套合的精度達到次像元的精度，處理流程分為初步套合與精密套合。在初步套合方面，計算初始位置的程序中，可以利用人工點選或是藉由影像的成像幾何自動計算影像的對應點位；而在精密套合方面，目前較常用的方法為利用振幅影像計算交叉相關值的方法，係以相關係數值的波峰來決定影像對應像元的位移量，此法可在單一觀點雷達影像上達到 $1/20$ 個像元的精度。

針對初步套合與精密套合，分述如下：

5.2.1 初步套合

5.2.1.1 人工點選

因雷達的成像模式不同於一般的光學影像，所以利用人工點選的方式選點時，由於一般的地形地物較難分辨，通常會選擇影像中的亮點或是人工建物的特徵點（如橋墩、角反射器），亦可選取道路交叉點或是建物的直

角轉彎點，利用這些較易辨識的點位，來計算兩影像間初步套合的轉換模式。

5.2.1.2 自動計算

在計算初估位置的程序中，藉由影像的成像幾何自動計算影像的對應點位。其步驟如下：

1. 計算主影像中心的成像時間，並利用該時間推求精密軌道的空間位置。
2. 以該軌道位置及主影像的成像幾何，計算主影像成像像點的地面坐標。
3. 以此地面點坐標配合次影像的成像幾何，計算次影像像元的空間位置。
4. 依空間位置計算與地面坐標距離值，再以光速公式計算斜距像元時間；

另以次影像的精密軌道資料，求出其對應成像的方位像元時間。

5. 利用方位像元時間及斜距像元時間計算出對應像元方位值及斜距值。
6. 利用主影像及次像對應的像元值，即可計算影像的初始轉換模式。

流程圖如圖 5.2。

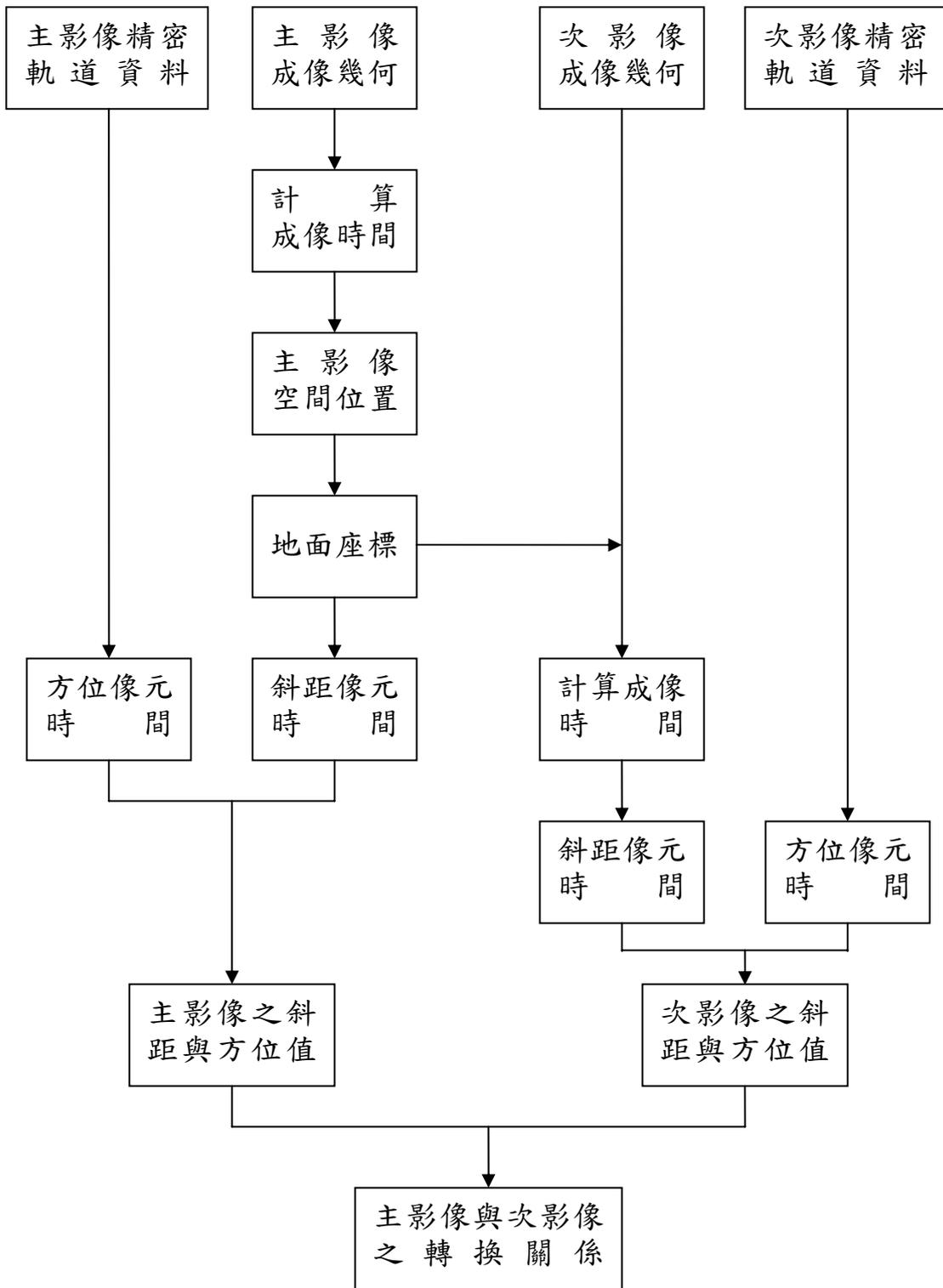


圖 5.2 初步套合自動化流程圖

5.2.2 精密套合

目前較常用的方法為利用振幅影像計算交叉相關值的方法，係以相關係數值的波峰來決定影像對應像元的位移量，此法可在單一觀點雷達影像上達到 1/20 個像元的精度。

為滿足選取控制點能涵蓋全幅影像，可依需求數量先將兩影像中重疊區域分為若干個網格點。為避免所選擇的區域為均調區或是海洋等無法匹配的區域，可將此區域予以遮蓋，以免產生套合誤差。再將每個網格點所選取之鄰近像元成為一區塊(Patch)，而後以兩區塊的灰階亮度(Power)計算快速傅立葉轉換(FFT)後的最大相關值來計算區塊位移量，藉以決定該中心點位像元為控制點的轉換函數，如果控制點的量測精度不佳，就以誤差值錯剔除之。待全幅影像所有控制點點位之轉換函數皆求出後，再以多項式來定義兩影像間的轉換關係，此多項式的參數則使用所有控制點以迴歸方法求得，最後將次影像重新取樣至主影像[Franceschetti and Lanari., 1999]。

5.3 產生初步干涉圖

計算影像中每一個像元的相位差值以形成干涉條紋圖，方法為將主(Master)複數影像與次(Slave)複數影像的共軛像點相乘而得。公式如下：

$$I = M \cdot S^* \quad (5.5)$$

其中“*”為共軛複數。

經影像相乘後可得到相位的干涉圖，然而，因雷達影像成像時，其方位方向與斜距方向的解析力不同，為便於習慣性的表示方法，會將影像的方位方向以多觀點處理，多觀點處理之主要過程為在複數影像中指定一固定大小的視窗，將視窗內的像元以摺積(Convolution)方法計算其平均值，再將所得到新的平均值替代原始影像，經過此種多觀點處理後，干涉圖內就可以有效降低雜訊；且可使得產生影像的結果其斜距方向與方位方向的比例接近 1:1，以方便影像呈現方式為人眼習慣的判讀方式。以 ERS 為例，其斜距方向與方位方向的解析力比例為 1:5，所以最常用的多觀點處理比例為 1:5 或 2:10。

5.4 地球曲率改正

初步產生干涉圖時，因地面點與感測器間距離的不同會引起不同的距離差值，故干涉圖的資訊中仍含有此距離差所產生的相位差值。因此必須將此類距離差予以去除，才能正確的反映地面高程對應的相位值。

地球曲率改正的處理如圖 5.3 所示，地面點 P 至天線 A_1 之距離會隨著與第一個像元的距離增加而增加，由圖中可知 $r_2 > r_1$ ，此項因點位位置不同引起的距離差值亦會反應在量測的相位值中，因此要計算純因地形高度引起的相位差就必須將此項影響量剔除。

因雷達影像涵蓋成像範圍達 100 km，地球之橢球效應會影響斜距的計

算結果，故為精確計算距離差，應加入橢球模式來計算，計算的結果為相對於橢球參考面的高程值。

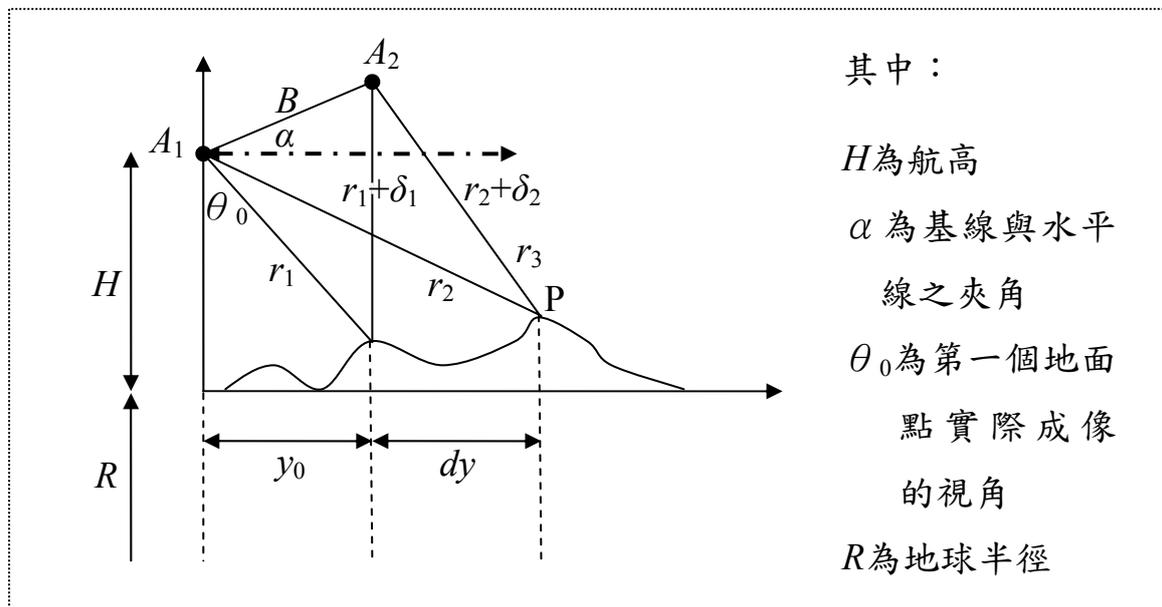


圖 5.3 地形效應幾何關係示意圖

如以橢球模式計算，因雷達影像在獲取地面資料時會受點位高程值及點位與雷達的地面距離所影響，其中第一個點位高程值引起的距離差為 $B_{//} = B \sin(\theta_0 - \alpha)$ ，隨著距離的增加，距離差值則變為 $B_{//}' = B \sin(\theta - \alpha)$ ，因此要計算增加的值可以直接將兩者相減，再配合距離差與相位值的關係即可得平坦化後的相位差值 φ_{flat} [Madsen *et al.*, 1998]：

$$\varphi_{\text{flat}} = -\frac{4\pi}{\lambda} B [\sin(\theta - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)] \quad (5.6)$$

5.5 全相位回復

因干涉圖的相位值為經過模組化的處理，所以相位值只對應於 2π 或 $-\pi$

至 $+\pi$ 之內，因此要計算點位的實際相位值，就必須加入每一相位量測中相位載波的整數波數值，用來解決實際要加回多少波數問題之技術，稱為全相位回復。

全相位回復的方法很多（如畸點隔離法、路徑導引法及最小範數法等），其中最小二乘法利用回復後的相位梯度值與估計的相位梯度值間誤差的平方和最小的方法，來決定每一個像元相位值是否要加入整數值。實際上直接確定此整數值是困難的，故通常採用迭代的方法，即計算空間相鄰兩點的相位差，由前一個相位差來解算下一個相位差，直到收斂為止，此時所得到的整數值即為解答。同時為求整幅影像計算的速度，所以可將影像轉換至 FFT 頻率域以加速計算的效率[Ghiglia and Romero, 1994]。

5.6 相位至高程轉換

經全相位回復處理後的干涉圖可以完整的呈現相位值，但其對應的值並非實際地面的高程或變形量，仍須配合成像的幾何關係，才可將該目標點位的相位值回推至實際的地面高程值或變動量。

從干涉圖的相位資訊計算地面高程的方法，可以相位差值配合成像的幾何參數來計算點位的高程值，其中各項幾何參數值（如雷達波長、航高、視角、基線及基線與水平線的夾角等）需相當精確，此計算結果仍維持在雷達坐標系統下。

在轉換計算的程序中，因衛星是協議的地球坐標系統(Conventional Terrestrial System; CTS)，而地面點位的坐標值通常是以大地水準面為基礎的地區直角坐標、或是以經度、緯度及橢球高來表示的地理坐標系統。因此計算高程轉換時，會有高程值位於不同參考面的問題。

當以衛星的成像幾何來計算地面資訊時，其計算的模式是架構於 CTS 坐標系統中，計算的高程值為相對於參考橢球的高程值，如果要與一般的地面高程值來比較，則需將兩者轉換至雷達坐標系統。經本程序計算之後，可以計算相對於參考橢球的高程值，且影像的坐標系統為斜距方位方向的雷達坐標系統。

雷達坐標系統與地區坐標系統有很大的差異，雷達影像坐標系統是方位方向與斜距方向坐標，地區坐標系統則為東西向坐標，所以必須將坐標做適當的轉換，才能獲得正確的地面坐標值。

5.7 計算三維變形量

由於雷達干涉偵測的變形量僅在雷達視距方向，無法計算至實際的三維變動量，因此有學者提出昇交 (Ascending，指衛星由軌道最南端往北方飛行) 及降交 (Descending，指衛星由軌道最北端往南方向飛行) 影像干涉對，配合以振幅影像量測的平面變形量，根據多個影像成像角度來計算三維的變形量。由此推算的變形量雖能反映地表的三維變動結果，但根據

Fialko 等(2001)於美西 California 東部 (高程約 200 m) 所做的研究成果與 GPS 變形量比較，在東西、南北、上下三個方向的精度分別為 4.9 cm、20.5 cm、5.9 cm，在南北方向量測精度較差。

由於多角度法計算三維變形量，必須要有地表變動前後的上升及下降影像對，但在許多地區卻無法同時取得，且此法根據 Fialko 所做的研究成果得知，在南北方向精度較差，所以本案提出以 GPS 水平方向精度較高的特性當成約制條件，來推算實際垂直變動量。

綜上所述，InSAR 及 DInSAR 產製 DTM 與地表變形之流程圖如圖 5.4。

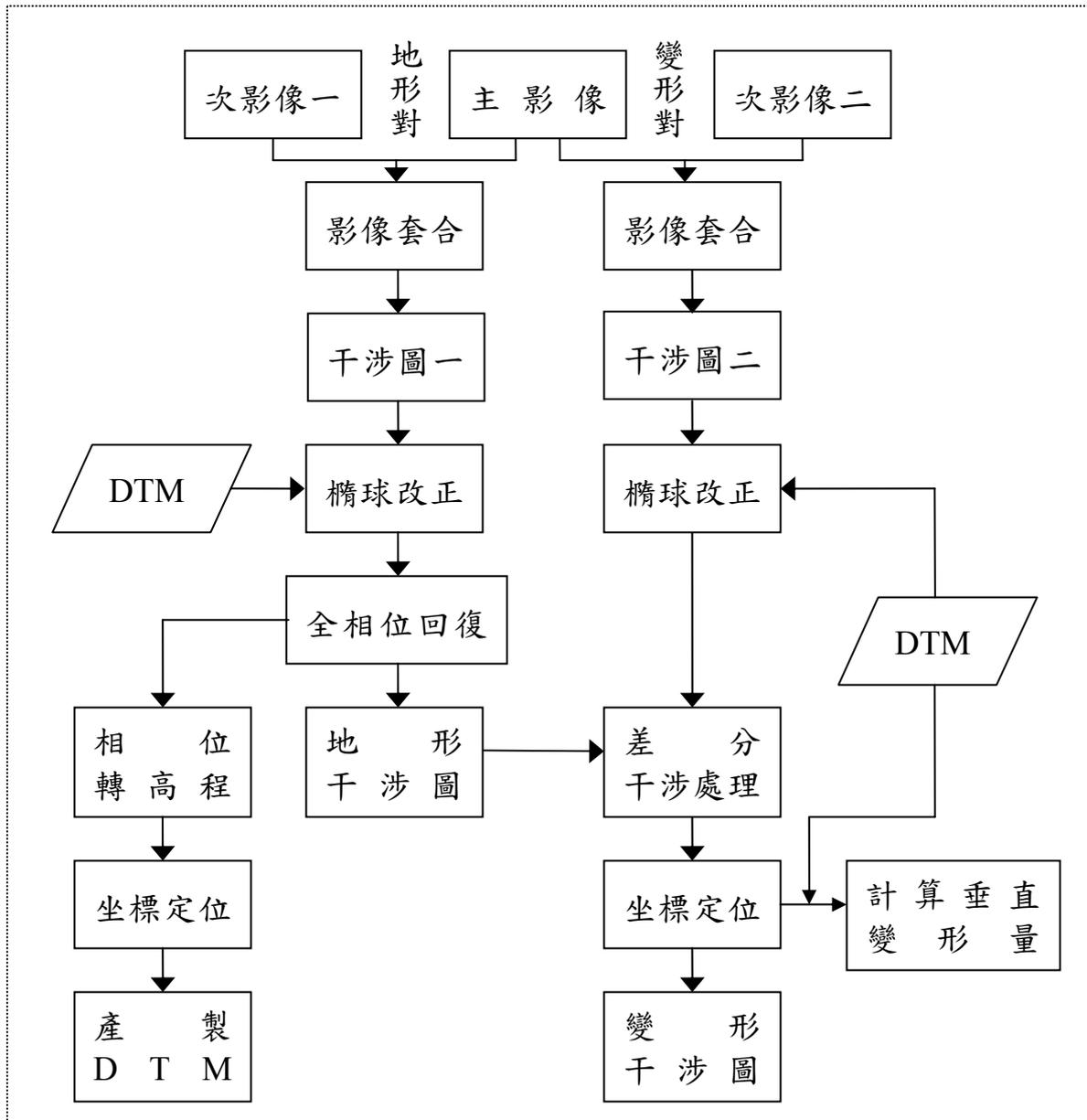


圖 5.4 差分干涉技術處理流程

第六章 實驗與成果

本團隊所使用的免費開放源碼為 DORIS 及 SNAPHU，故本章首先將針對此兩種軟體做一簡介，接著依契約內容進行 DTM 產製及清境、廬山地區變遷成果與分析。在 DTM 產製方面，測試區選擇中西台灣地區做為研究對象，而在地表變遷方面，因清境、廬山得到的成果不佳，重新選擇 921 大地震之區域進行研究，部分成果並與 Diapason 所得到的成果進行比較，最後則引進 PSInSAR 技術於中台灣進行初步測試，並獲得相關成果。

6.1 開放源碼簡介

6.1.1 DORIS 簡介

本研究以荷蘭 Delft 大學所發展的開放源碼 DORIS(Delft Object-oriented Radar Interferometric Software)進行干涉步驟的處理，並以 Stafford 大學所發展的 SNAPHU(Statistical-cost Network-flow Algorithm for PHase Unwrapping)進行全相位回復的處理。

DORIS 是一套以 C++ 語言所編寫的開放源碼，專用於以雷達干涉技術生成數值高程地形與地表變化偵測，使研究人員免除使用昂貴的商用套裝軟體，亦可進行干涉處理的操作。

由於 DORIS 最初是發展自工作站級電腦的 Unix 作業系統上，而後經轉移至相容 Unix 作業系統的个人電腦中，如：linux 與 Mac OSX 等作業系

統上。若需要運行在視窗作業系統上，則需另外安裝於如：CygWin 等虛擬軟體，藉由模擬方式運行於視窗作業系統中。

DORIS 是一套功能強大的干涉影像生成軟體，其模組化的操作步驟，可以了解成像的步驟運行及參數的設定；並由於原始碼的公開，可針對研究的目的自行替換或修改成更適宜的演算法則。且在 DORIS 的執行過程中，所有輸入的參數、輸出的數據與生成的影像皆無檔頭資料，而可直接以文字或二進位格式讀取；如此除可直接獲得如：數據內容、影像大小或檔案格式等檔案狀態外，亦可隨時另以其他工具進行處理與修改。此外，DORIS 發展團隊提供了豐富的使用手冊及交流討論區，可讓使用者快速的獲得解答與經驗分享。相較於圖形化操作介面完整的商用套裝軟體，雖可於短時間熟悉軟體及產生結果，卻無法進一步了解干涉演算過程與內涵。

在 DORIS 干涉處理流程可區分為四大區塊，依序為原始檔案處理、影像套合、干涉影像生成及最終成果獲得等。目前 DORIS 提供了影像套合、干涉影像生成及最終結果獲得三個區塊的原始碼，而無原始檔案處理的區塊，故 DORIS 無法直接處理原始格式檔案，僅能處理已經由聚焦(Focus)處理後的 SLC(Single Look Complex)格式影像。

所謂聚焦處理，簡單的說就是雷達波束反射回來時，信號將被疊加，而形成焦距誤差，當聚焦準確時，焦距誤差應為 0，如不為 0，則將進行相應之聚焦調整動作，直到聚焦誤差趨近於 0 為止。而 SLC 格式說明如下：

每種雷達影像之攝像大小不同，以 ERS 為例，SLC 之影像寬度固定為 4,912 個像元(Pixel)，長度則有不同的掃描線(Line)。一般進行影像處理時，需具備有 Data Set File、Leader File 及 Volume File 三項資料檔案，概述如后：(1) Data Set File：資訊包含檔案記錄方式、儲存格式、成像時間、衛星參數與橢球參數等資料；(2)Leader File：資訊包含檔案描述記錄檔、資料設定摘要記錄檔、地圖投影資料記錄檔、衛星平台位置記錄檔、雷達輻射計資料記錄檔、雷達輻射計補償資料記錄檔及參數設定過程資料細節記錄檔等；(3)Volume File：資訊包含記錄成像時間（與 Data Set File 所指的成像時間相同，在此僅重複記錄）、處理單位、聚焦方式等資料。

第二個部分主要是執行影像套合，其過程中，將執行基線計算、初步套合、精密套合與方位方向濾波，最後將可獲得作為影像轉換的套合參數與消除地表曲率相位資訊的參考相位資料。在進行基線計算的過程中，需要運用到精密軌道(Precise Orbit)參數作為衛星位置的計算，可自 Delft 大學 DEOS(Delft institute for Earth-Oriented Space research)研究中心提供的精密軌道資料獲得。由於 2008 年以後，DEOS 研究中心未將精密軌道資料放置該網站下，則無法取得精密軌道資料。

第三個部分主要是執行干涉影像生成，此步驟依序執行重新取樣、距離方向濾波、干涉影像演算、去除地表效應及相位濾波等步驟，此階段將可生成干涉影像、同調性的影像及參數。重新取樣時，先以上述步驟所得之套合參數對次影像進行重新取樣運算，以獲得與主影像相同的幾何坐

標，再與主影像進行干涉運算。為使全相位回復能順利解算，當進行干涉步驟時會同時進行多觀點(Multi-look)處理，使得影像中相位得以更趨平滑。

第四部分則是進行全相位回復、斜距至高程轉換與產製數值地形模型。由於 DORIS 尚未發展全相位回復的模組，當要進行全相位回復時需另以其他方式來完成。本計畫利用 SNAPHU 軟體進行全相位回復處理，其餘之處理皆使用 DORIS 下所有的模組。

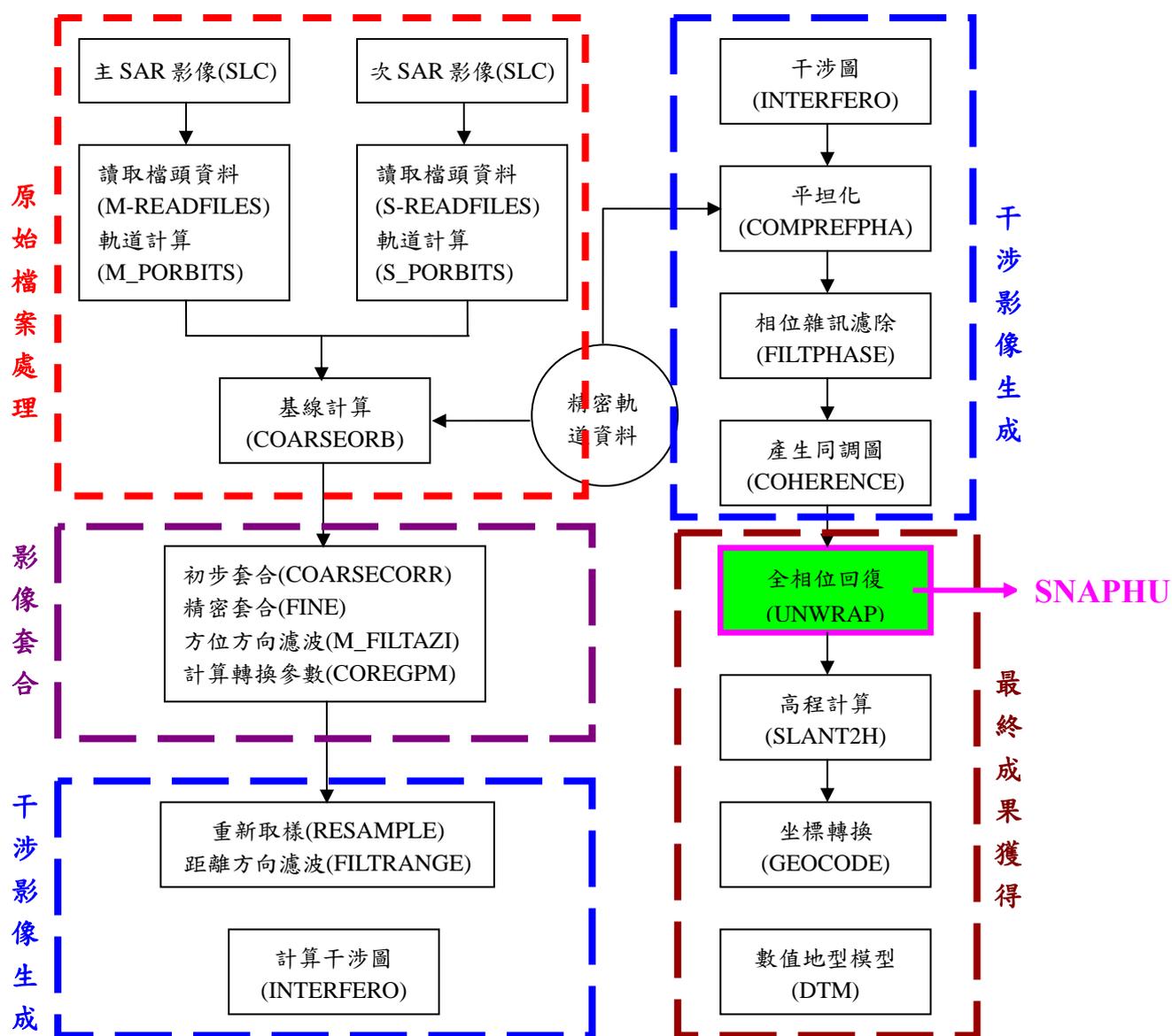


圖 6.1 DORIS 結合 SNAPHU 軟體進行干涉處理之流程圖

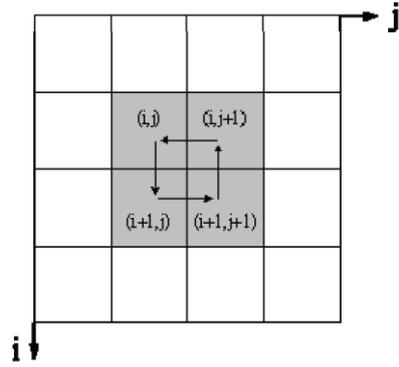
DORIS 的操作是依靠紀錄有執行指令、係數與路徑等參數的文字指令檔案 (DORIS 稱為 Card) 所驅動。進行干涉處理之初，DORIS 會依照指令卡上的指令路徑個別讀取主、次影像的各項格式檔案，並生成主、次影像資料的成果檔案(Result file)，另於基線計算步驟時則另行生成記錄干涉資訊的成果檔案。此後當運算運進行時，每個模組將會讀取先前產生的相關數據進行運算，並於成果檔案末端補上運算所得結果，其模組名稱與運作流程如圖 6.1。

6.1.2 SNAPHU 簡介

SNAPHU(Statistical-cost Network-flow Algorithm for PHase Unwrapping) 是由 Ghiglia 以及 Pritt 於1998年開發的開放源碼，它是由 Chen, C. W. and Zebker, H. A. [Chen and Zebker, 2002] 提出的演算法理論衍生出來的程式。這套程式最後一個版本為1.4.2，發行於2003年2月，它是由 C 語言 (GCC 編譯器) 建構而成，可在各種Linux的環境下運作；運行的方式可以分為兩種，一種是建立讀取的表單，並讓程式載入此表單上的資訊，而另一種則是直接在終端機上輸入執行的參數。

這套演算法主要分為兩個步驟：

第一步是利用畸點 (該點的特性與鄰近點有顯著的不同) 與統計的方式分割出許多的小塊，並利用這些小塊的特性 (相關係數) 分配權重。



$$\begin{aligned}
 r(i, j) = & \text{Round}\left[\frac{\phi(i+1, j) - \phi(i, j)}{2\pi}\right] + \\
 & \text{Round}\left[\frac{\phi(i+1, j+1) - \phi(i+1, j)}{2\pi}\right] + \\
 & \text{Round}\left[\frac{\phi(i, j+1) - \phi(i+1, j+1)}{2\pi}\right] + \\
 & \text{Round}\left[\frac{\phi(i, j) - \phi(i, j+1)}{2\pi}\right]
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

其中Round[]為[]內的值取四捨五入後取最接近的整數。

由(6.1)式得到 $r(i, j)$ 有三種可能1、0、-1，然後用統計分類的方式將這些點連線以分割小塊，再依照不同小塊的內部特性給予不同的權。

第二步是利用最小二乘的公式計算每個像元的相位值，以達到全相位回復的目的。

$$\phi = ((\mathbf{WP})^T \mathbf{WP})^{-1} (\mathbf{WP})^T \mathbf{Ws} \tag{6.2}$$

(6.2)式是熟悉的最小二乘法，其中 \mathbf{P} 是由第一步驟中得到的數值，只有1、-1、0三個值， \mathbf{W} 則是設計的權重，可依據距離倒數來給予，而 \mathbf{s} 則是約化觀測數據。

$$\text{當 } \frac{\sum_{\text{all } i,j} |\phi_{i,j}^{k+1} - \phi_{i,j}^k|^2}{\sum_{\text{all } i,j} |\phi_{i,j}^{k+1}|^2} \leq \varepsilon \text{ 時就可以得到所要的 } \phi, \varepsilon \text{ 符號代表門檻值之意。}$$

這套程式除了包含這種理論外，也包含了不使用統計分塊而單獨使用最小二乘的方法，並由於它是免費的公用軟體，目前在市面上的開放源碼（如DORIS, ROI_PAC 等）在處理全相位回復的步驟時都會用到。

以上為本案處理各項工作項目所使用的開放源碼，並針對其功能及原理做一介紹，此外也有許多商用軟體亦可處理雷達干涉成果，如Diapason、VEXECL、GAMMA等，已將此商用軟體與開放源碼列表比較，如表6.1。

表 6.1 DORIS 開放源碼與商用軟體簡介與比較一覽表

軟體名稱	簡 介	價 格	可讀取之影像、格式及網站
DORIS (由荷蘭 Delft 大學所發展)	DORIS 是以模組化的方式設計，可了解成像步驟運行及參數設定，且在執行過程中，相關參數設定在一個表單，只需一個指令即完成干涉成果。所有輸入參數、輸出數據與生成的影像皆無檔頭資料，可直接以文字或二進位格式讀取資料；DORIS 提供了影像套合、干涉影像生成及最終結果獲得三個區塊的原始碼。	免費	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用影像資料： 複數資料(SLC) 2. 可讀取之衛星影像： 含ERS、ENVISAT、JERS、RADARSAT、ALOS等資料 3. 可結合全相位回復程式(SNAPHU)及軌道處理程式GETTOB) 4. 網站： enterprise.lr.tudelft.nl/doris

<p>ROI_PAC(由美國 Berkley 大學所發展)</p>	<p>ROI_PAC採模組化方式設計，每項流程設定參數完成後，才進行下一個流程，直到所有流程結束為止。流程包含選擇研究區、讀取SAR影像資料、精密軌道資料下載、引入DTM、設定參數檔案、及最終檢查結果等。</p>	<p>免費</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用影像資料： 原始資料(Raw) 2. 可讀取之衛星影像： 含 ERS、ENVISAT、JERS、RADARSAT、ALOS 等資料 3. 網站： www.openchannelfoundation.org
<p>Diapason(由法國太空署 CNES 所發展)</p>	<p>數據資料輸入後即可自動完成差分干涉，使用者可以使用交談方式和參數調整執行所有的處理步驟。</p>	<p>第一年約 50 萬 每年使用授權約 20 萬</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用影像資料： 原始資料(Raw)及複數資料(SLC) 2. 可讀取之衛星影像： 含ERS、ENVISAT、JERS、RADARSAT、ALOS、TerraSAR-X等資料 3. 網站： www.altamira-information.com
<p>ENVI (由RSI (Research Systems Inc.)所發展)</p>	<p>ENVI軟件，結合最新的光譜影像處理和影像分析技術，使用交談式及人性化界面，採下拉式選單進行處理。</p>	<p>約 60 萬</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用影像資料： 原始資料(Raw)及複數資料(SLC) 2. 可讀取之衛星影像： 含ERS、ENVISAT、JERS、RADARSAT等影像 3. 網站： www.rsinc.com/envi
<p>VEXCEL 3DSAR (由VEXCEL 公司所發展)</p>	<p>Vexcel 具有專業的遙感數據管理系統，包含了八大軟件，僅 PHASE 軟件為 SAR 干涉測量處理器。PHASE 是一個獨立的軟件系統，能夠生成 DEM 和 mm 等級的地</p>	<p>100~120 萬左右</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用影像資料： 複數資料(SLC) 2. 可讀取之衛星影像： 含ERS、ENVISAT、JERS、RADARSAT等影像 3. 網站： www.vexcel.com

	表變形位移圖。軟件採模組化方式設計，包含影像套合、產生干涉圖、全相位回復及最終產製 DTM 等流程。每項流程設定參數完成後，才進行下一個流程，直到所有流程結束為止。		
GAMMA (由瑞士 GAMMA 公司所發 展)	GAMMA 是以模組化的方式處理，包含四大塊模組，分別為模組化 SAR 處理器 (MSP)、InSAR 處理器 (ISP)、DInSAR 和幾何糾正處理器 (DIFF&GEO) 及土地應用工具 (LAT) 等，提供交談式和參數讀取直接由命令行輸入即可優化處理完成。	每項模 組 80 萬 左右	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用影像資料： 原始資料(Raw)及複數資料(SLC) 2. 可讀取之衛星影像： 含ERS、ENVISAT、JERS、RADARSAT、SIR-C等資料 3. 網站： www.gamma-rs.ch/

6.2 InSAR 產製 DTM

本團隊原將規劃測試ERS及ALOS兩種影像，且ERS已取得（含採購）約60幅影像、ALOS已採購約10幅影像，但因ALOS影像尚有部分技術問題尚待克服，故未能進行干涉處理，原因說明如下：

- 一、ALOS衛星使用的波段是L-band，此波段理論上可以穿透植被直達地表，故為未來亞洲多植被區試驗發展的一項主力。但由於其衛星資料較新，各地的格式並沒有妥善的統一，造成每一個處理站所產出的

SLC產品也不一致。也就是說CEOS(Committee on Earth Observation Satellites)資料格式中，不同的處理站有不同的處理方式，資料格式自然也就不同。

二、 DORIS最新的版本釋出於2009年6月17日，在這個一版本中僅僅加入了部分ALOS模組提供測試，依據Delft大學開發部成員敘述<參考http://tech.groups.yahoo.com/group/doris_users/message/3972>，目前的DORIS僅能處理ESA及JAXA的ZDP('zero doppler' geometry)的資料，其它的格式資料會於下一個版本釋出。

三、 在測試的過程中也發現到DORIS格式自動偵測模組對於中央大學太空及遙測研究中心製作出的資料並不能完全符合。

以上說明即是造成本次ALOS資料不能使用的主要原因，故將以ENVISAT影像取代ALOS影像進行測試。以下將以ERS及ENVISAT兩種影像進行DTM產製之測試與評析。

6.2.1 ERS 影像測試

自2001年6月以後，ERS-2數據開始工作於ZGM(Zero Gyro Mode)模式(Meadows, 2002)，在此模式下，對衛星高度的控制大大減少，導致不同時間獲取的ERS-2數據之間都普勒中心差距很大，進而導致頻譜的偏移，

造成相關性降低，因此 2001 年 6 月以後的 ERS 數據資料將以別的方法解決，或以其它衛星影像進行地表高程與變形之研究。

另 Delft 大學 DEOS 已於 2008 年 1 月終止提供 ERS 影像之精密軌道資料，此對 DORIS 執行干涉處理的過程中，包含基線計算、影像套合、消除地球曲率及坐標轉換等步驟，皆需依賴精密軌道資料而言，勢必造成很大的衝擊。

基於以上說明，本研究選擇 2001 年以前 ERS 影像進行 DTM 產製研究。

6.2.1.1 實驗影像

本研究所使用的影像資料為中央大學太空及遙測研究中心所生產之 1996 年 3 月 6 日之 ERS-1 (主影像) 及 1996 年 3 月 7 日之 ERS-2 SLC 影像 (次影像) 進行測試 (如圖 6.2)，其中主影像之大小為 $28,929 \times 4,912$ 個像元，次影像之大小為 $28,902 \times 4,912$ 個像元。而影像的像元解析度在斜距方向(Range)為 7.9 m，方位方向(Azimuth)為 3.9 m，影像涵蓋範圍以中西台灣之整幅影像 (約 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$) 為研究區域，軌道編號為 #232(Track)&3123(Frame)。影像中包含台中、彰化地區，中間部分為平原區，平原中有兩處隆起分別為大度山及八卦山，右邊部分為較高山區，左邊部分為台灣海峽，位置示意圖如圖 6.3。

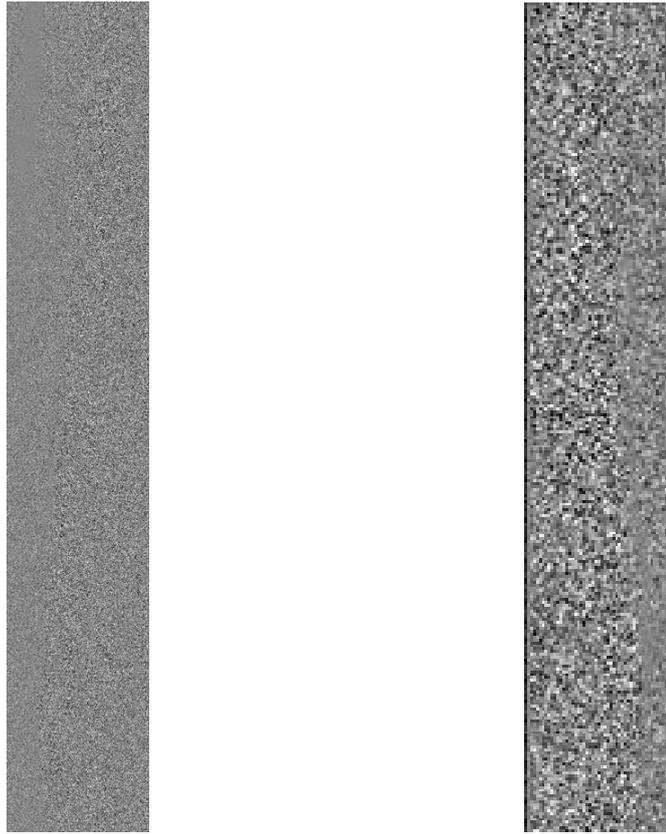


圖 6.2 1996/3/6 日 ERS-1 及 1996/3/7 日 ERS-2 SLC 影像

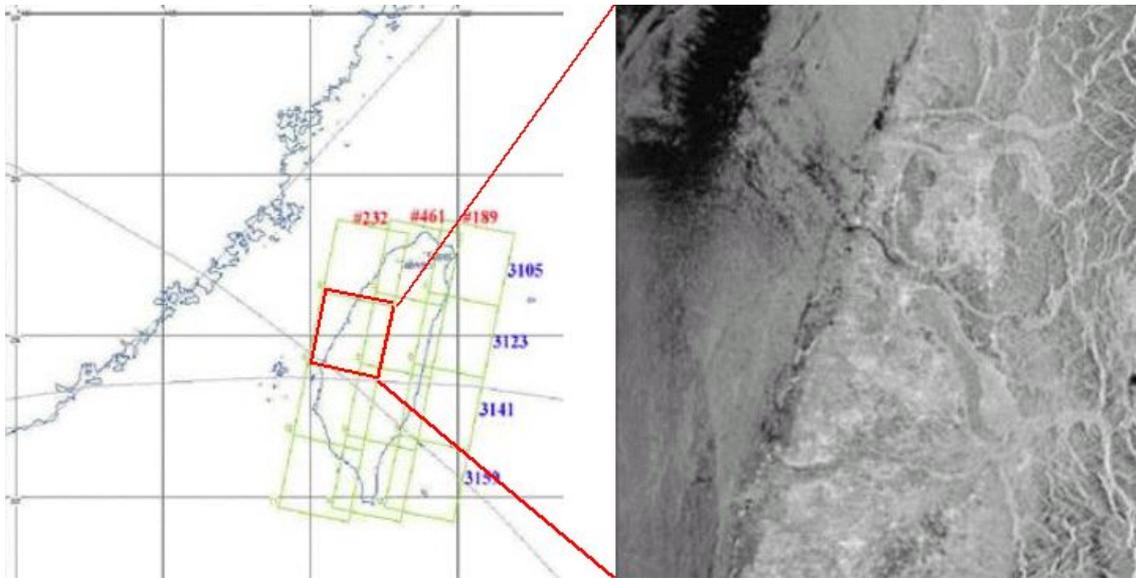


圖 6.3 研究區（軌道編號為 #232&3123）之雷達影像圖

因影像成像時衛星軌道在台灣右側，所以靠台灣東部為近距點，西邊

為遠距點，以近距點之像元處理至遠距點，故影像的東西方向與現有的地理坐標相反；且此影像對為降交軌道，所以在方位方向的取樣順序為由北而南與地面坐標相同，故在影像判讀時，會有左右顛倒的情形。

6.2.1.2 基線計算

表 6.2 利用精密軌道資料計算影像對之各項成像幾何參數值

項目	計算值
時間間隔	一天
衛星高度	786532.4 m
衛星速度	7128.2 m/s
基線長度	81.4 m
基線平行分量 $B_{//}$	-51.3 m
基線垂直分量 B_{\perp}	-62.8 m
基線水平分量 B_H	-76.9 m
基線垂直分量 B_V	26.0 m
α 值	161.3°
θ 值	20.6°
近距點之 θ 值	23.3°
高程未定值	150.7 m

本研究以 Delft 大學所提供的精密軌道資料來計算衛星影像的精確位置，再以各幅影像位置計算像對間之幾何參數，如基線水平分量 $B_{//}$ 及垂直分量 B_{\perp} 、基線與水平線之夾角 α 等。其 1996 年 3 月 6 日之 ERS-1 影像及 1996 年 3 月 7 日之 ERS-2 影像對（以下稱之為 1996_0306/0307）之各項成

像幾何參數計算值如表 6.2。

由表 6.2 中可看出，本測試影像之基線值為 81.4 m，基線垂直分量 B_{\perp} 為 51.3 m，表示此影像對符合表 5.1 之適用性（300 m 以下），故以此影像對進行後續干涉處理。

6.2.1.3 成果展現

(1) 影像套合

首先將兩幅主、次影像輸入，主要目的是將主、次影像的振幅與複數影像進行套合工作，DORIS 可先行計算出相對點位初始線列及像元方向之位移量為(242, 6)，並可選擇預設控制點數（200 個點）及設定輸出之門檻（相關係數大於 0.4），則可計算出套合結果之各項數據如表 6.3，其中線列向_L 與像元像_S 表示其影像線列與像元方向之坐標，位移量_L 與位移量_S 表示其線列與像元方向與初始線列及像元方向之位移量之差值。誤差評估_L 與誤差評估_S 表示其影像套合後主、次影像線列與像元方向位移量之差值。中誤差_L 與中誤差_S 表示其影像套合後線列與像元方向之中誤差值。另經由表 6.3 所展示之誤差向量圖（如圖 6.4）可知，無論在線列方向或像元方向之位移量皆很小，最大僅 0.26 個像元，表示套合結果符合預期。

表 6.3 套合後相關參數統計表(960306_960307)

點號	線列向_L	像元向_S	位移量_L	位移量_S	相關係數	誤差評估_L	誤差評估_P	中誤差_L	中誤差_P
1	53	873	-0.44	-0.41	0.51	-0.18	0	1.11	0
7	918	994	-0.28	-0.41	0.5	0	-0.03	0.02	0.26
8	918	1814	-0.38	-0.22	0.62	0.06	0.02	0.43	0.24
13	1784	1115	-0.22	-0.44	0.47	0.07	-0.09	0.43	0.76
14	1784	1935	-0.47	-0.22	0.64	-0.01	0	0.08	0.05
18	2649	415	-0.25	-0.66	0.43	-0.11	-0.19	0.61	1.66
19	2649	1235	-0.34	-0.31	0.45	-0.03	0.02	0.18	0.15
20	2649	2056	-0.5	-0.16	0.93	-0.03	0.03	0.22	0.35
24	3514	535	0.03	-0.56	0.5	0.19	-0.12	1.16	1.12
25	3514	1356	-0.16	-0.28	0.58	0.16	0.02	1.08	0.19
26	3514	2176	-0.47	-0.16	0.69	0.02	0	0.14	0
30	4380	656	-0.38	-0.47	0.46	-0.21	-0.06	1.22	0.52
31	4380	1477	-0.34	-0.25	0.43	0	0.02	0	0.18
32	4380	2297	-0.59	-0.12	0.55	-0.09	0.01	0.55	0.12
36	5245	777	-0.28	-0.34	0.67	-0.09	0.04	0.65	0.47
37	5245	1597	-0.38	-0.22	0.85	-0.03	0.02	0.21	0.29
38	5245	2418	-0.5	-0.09	0.6	0.02	0.01	0.14	0.15
42	6110	897	-0.16	-0.38	0.75	0.04	-0.02	0.33	0.27
43	6110	1718	-0.22	-0.22	0.65	0.15	0	1.05	0.04
44	6110	2538	-0.56	-0.06	0.6	-0.02	0.02	0.17	0.17
48	6975	1018	-0.34	-0.31	0.48	-0.12	0.02	0.72	0.16
49	6975	1838	-0.38	-0.12	0.76	0.01	0.07	0.04	0.78
50	6975	2659	-0.56	-0.06	0.43	-0.01	-0.01	0.05	0.09
54	7841	1139	-0.09	-0.25	0.63	0.15	0.05	1	0.52
55	7841	1959	-0.41	-0.12	0.74	-0.01	0.04	0.07	0.46
59	8706	439	0.12	-0.38	0.57	0.20	0.03	1.35	0.32
60	8706	1259	-0.19	-0.28	0.68	0.06	-0.01	0.43	0.07
61	8706	2080	-0.41	-0.09	0.6	0.01	0.04	0.04	0.44
65	9571	559	-0.03	-0.41	0.5	0.07	-0.03	0.43	0.23
66	9571	1380	-0.38	-0.19	0.59	-0.11	0.06	0.76	0.55
67	9571	2200	-0.38	-0.06	0.81	0.05	0.05	0.4	0.54
71	10437	680	-0.09	-0.41	0.78	0.03	-0.05	0.2	0.61
72	10437	1500	-0.28	-0.22	0.75	0	0	0.01	0.03
73	10437	2321	-0.44	-0.03	0.7	0.01	0.05	0.05	0.52
77	11302	801	-0.12	-0.22	0.46	0.01	0.11	0.07	0.96
79	11302	2442	-0.56	-0.03	0.79	-0.1	0.02	0.75	0.24

82	12167	101	0.06	-0.5	0.61	0.04	-0.06	0.28	0.6
83	12167	921	-0.41	-0.31	0.61	-0.26	-0.01	1.78	0.08
84	12167	1742	-0.25	-0.19	0.65	0.06	-0.03	0.43	0.29
85	12167	2562	-0.56	-0.03	0.74	-0.08	-0.01	0.61	0.08
88	13033	221	0.12	-0.53	0.5	0.12	-0.12	0.72	1.07
89	13033	1042	-0.22	-0.19	0.54	-0.06	0.08	0.37	0.8
91	13033	2683	-0.47	-0.06	0.63	0.02	-0.06	0.16	0.67
95	13898	1163	-0.16	-0.28	0.53	0.02	-0.03	0.11	0.32
96	13898	1983	-0.31	-0.09	0.72	0.03	0.02	0.24	0.19
97	13898	2803	-0.56	0	0.7	-0.05	-0.03	0.38	0.35
101	14763	1283	-0.09	-0.22	0.49	0.1	0	0.62	0.01
102	14763	2104	-0.38	-0.09	0.6	-0.02	-0.01	0.15	0.11
103	14763	2924	-0.53	0.03	0.63	-0.01	-0.03	0.04	0.31
106	15628	583	0.03	-0.25	0.41	0.07	0.08	0.4	0.67
107	15628	1404	-0.16	-0.19	0.44	0.05	0	0.27	0.01
108	15628	2224	-0.34	-0.03	0.75	0.03	0.02	0.25	0.24
109	15628	3045	-0.53	0.06	0.73	0.01	-0.03	0.07	0.31
113	16494	1524	-0.28	-0.16	0.53	-0.06	0	0.36	0.03
114	16494	2345	-0.38	-0.06	0.69	0.01	-0.04	0.06	0.39
115	16494	3165	-0.62	0.16	0.95	-0.07	0.04	0.56	0.57
119	17359	1645	-0.34	-0.12	0.74	-0.1	0.02	0.75	0.18
120	17359	2465	-0.31	0	0.77	0.09	0	0.71	0.04
124	18224	945	0	-0.25	0.6	0.09	0	0.6	0.02
125	18224	1766	-0.25	-0.06	0.55	0	0.05	0.03	0.46
126	18224	2586	-0.47	0.03	0.58	-0.05	0	0.33	0.01
127	18224	3407	-0.56	0.19	0.51	0.03	0.02	0.16	0.18
129	19090	245	0.06	-0.5	0.41	0	-0.14	0.01	1.17
131	19090	1886	-0.22	-0.09	0.56	0.05	-0.01	0.32	0.09
132	19090	2707	-0.44	0.03	0.64	0	-0.03	0.03	0.3
133	19090	3527	-0.53	0.16	0.5	0.07	-0.04	0.43	0.35
135	19955	366	0.19	-0.38	0.61	0.14	-0.05	0.99	0.49
136	19955	1186	-0.16	-0.09	0.46	-0.04	0.1	0.24	0.9
138	19955	2827	-0.47	0.09	0.49	-0.02	0	0.12	0.03
139	19955	3648	-0.59	0.19	0.53	0.03	-0.04	0.17	0.34
142	20820	1307	-0.38	-0.19	0.5	-0.25	-0.03	1.5	0.23
143	20820	2128	-0.28	-0.03	0.81	0.02	0	0.16	0.06
144	20820	2948	-0.44	0.09	0.61	0.03	-0.02	0.17	0.25
149	21686	2248	-0.41	-0.03	0.73	-0.09	-0.03	0.7	0.36
154	22551	1548	-0.22	-0.06	0.54	-0.05	0.05	0.35	0.47

155	22551	2369	-0.28	0.06	0.49	0.05	0.03	0.31	0.27
156	22551	3189	-0.72	0.09	0.75	-0.22	-0.08	1.69	0.9
159	23416	849	-0.19	-0.16	0.6	-0.17	0.06	1.18	0.62
161	23416	2489	-0.28	0.06	0.62	0.07	0	0.45	0.03
162	23416	3310	-0.5	0.25	0.6	0.01	0.05	0.08	0.53
165	24281	969	-0.12	-0.22	0.42	-0.09	-0.03	0.5	0.22
166	24281	1790	-0.25	0	0.42	-0.05	0.05	0.3	0.46
167	24281	2610	-0.34	0.09	0.5	0.02	0	0.13	0.04
168	24281	3430	-0.53	0.22	0.59	0	0	0.02	0.05
171	25147	1090	-0.19	-0.09	0.5	-0.14	0.08	0.89	0.7
173	25147	2731	-0.38	0.09	0.55	0	-0.02	0.02	0.22
174	25147	3551	-0.5	0.25	0.67	0.04	0	0.31	0.03
176	26012	390	0	-0.22	0.47	-0.1	0.06	0.63	0.53
178	26012	2031	-0.19	0	0.61	0.04	0	0.25	0.01
179	26012	2851	-0.31	0.12	0.78	0.08	-0.02	0.64	0.24
180	26012	3672	-0.44	0.22	0.59	0.12	-0.06	0.8	0.61
182	26877	511	0	-0.28	0.62	-0.09	-0.03	0.62	0.31
184	26877	2151	-0.19	0.06	0.73	0.05	0.03	0.39	0.35
185	26877	2972	-0.5	0.22	0.72	-0.09	0.05	0.68	0.58
188	27743	631	0	-0.19	0.55	-0.07	0.03	0.48	0.32
190	27743	2272	-0.22	0.03	0.89	0.04	-0.03	0.31	0.33
191	27743	3093	-0.41	0.16	0.65	0.01	-0.04	0.09	0.38
194	28608	752	0.31	-0.12	0.54	0.25	0.08	1.64	0.73
195	28608	1572	0.03	-0.03	0.51	0.14	0.03	0.86	0.24
196	28608	2393	-0.38	-0.03	0.54	-0.11	-0.11	0.68	1.09
197	28608	3213	-0.31	0.22	0.64	0.13	0	0.9	0.04

以上位移量大於或等於 2 者以紅色標註表示，並由上表之位移量即可計算相關數據，其中位移量之最大值 = 0.26；最小值 = 0；平均值 = 0.08；均方根誤差 = 0.06（單位為 Pixel）。

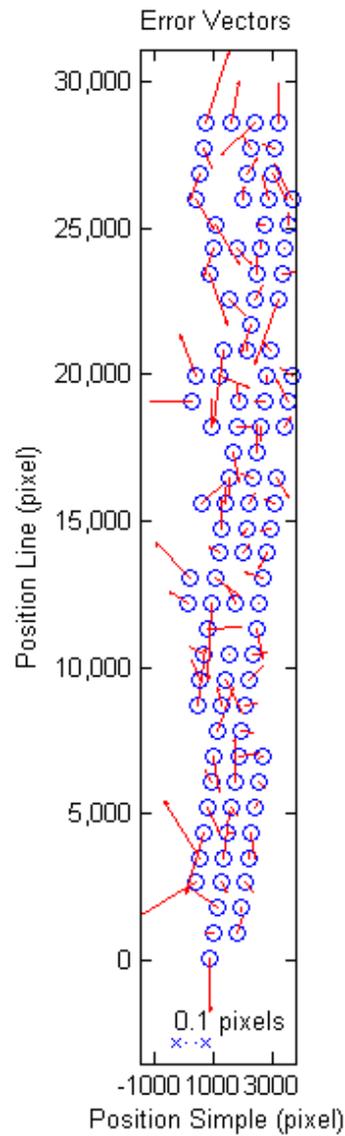


圖 6.4 誤差向量圖(960306_960307)

(2) 同調性圖

在產生干涉圖之前，可先計算兩張影像的相似程度（即同調性），以評估干涉圖產生之品質，當同調性係數趨近於 1 時，表示具高品質之同調性，由同調性（如圖 6.5）可知，海洋區的相關性為 0，在平原地區（高程 50 m 內）呈現灰白色，表示有較佳之相關性，而在山區部分

(高程 200 m 以上) 及植被較多地區則呈現灰黑色，表示植被多寡及地形高度影響影像的相關性，相關性明顯比平原區低，原因可能因為訊號不完整或干擾使得套合誤差過大，難以產生可信賴的干涉條紋。

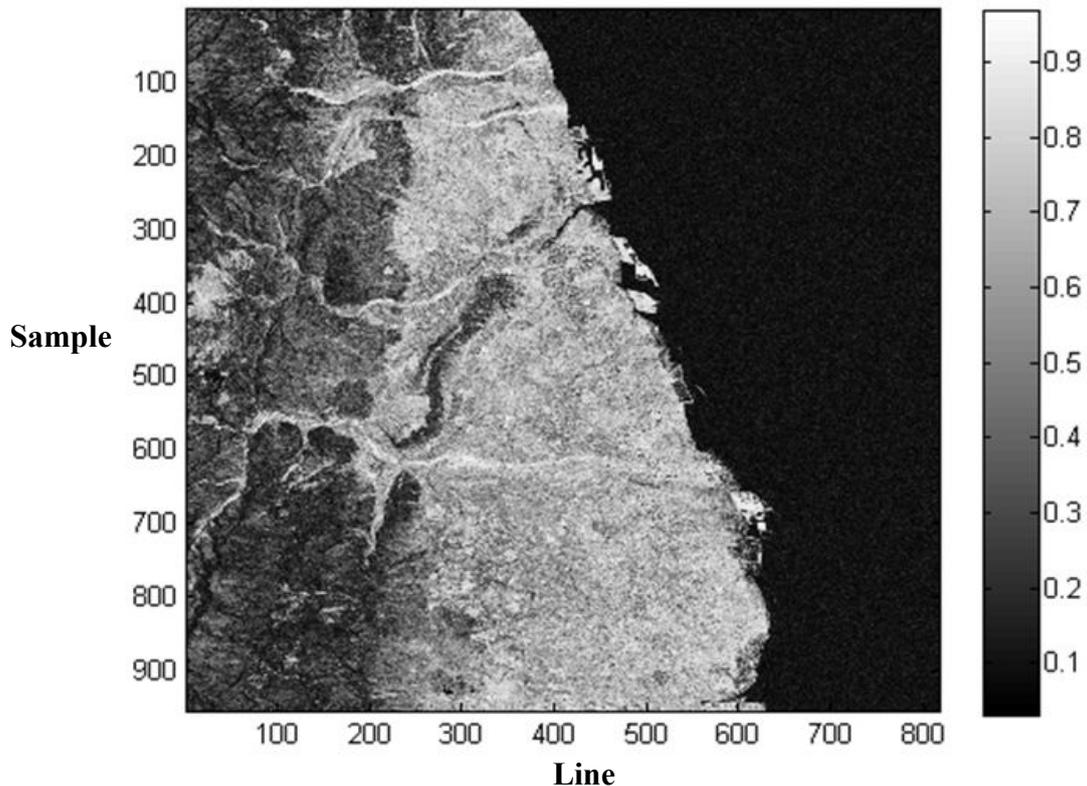


圖 6.5 同調性圖(960306_960307)

(3) 產生初步干涉圖

當兩張複數影像相乘後即可得到相位差，即可得到初步干涉條紋 (Fringes)，如圖 6.6。由圖 6.6 可知，干涉圖之像元值介於 $-\pi \sim +\pi$ 之間，較亮之區域表示干涉結果較佳。由影像的右邊可以看出海面區域有明顯的雜訊，像元間沒有任何的相關性，中間平原區則有干涉條紋，左邊的山區則更有明顯的條紋出現。由此可證實，此一像對有很好的干

涉效果，但除了有干涉效應外，仍無法進行判釋，需進行地球曲率的處理及軌道誤差改正。

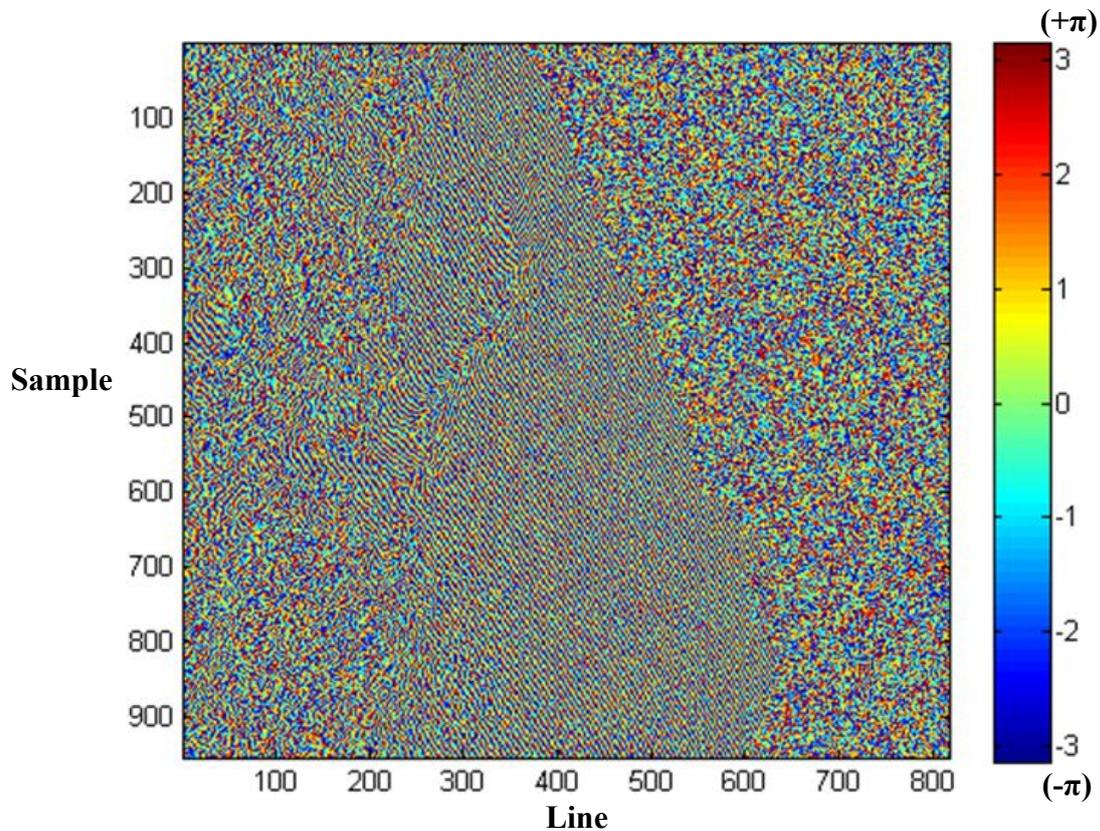


圖 6.6 初步干涉圖(960306_960307)

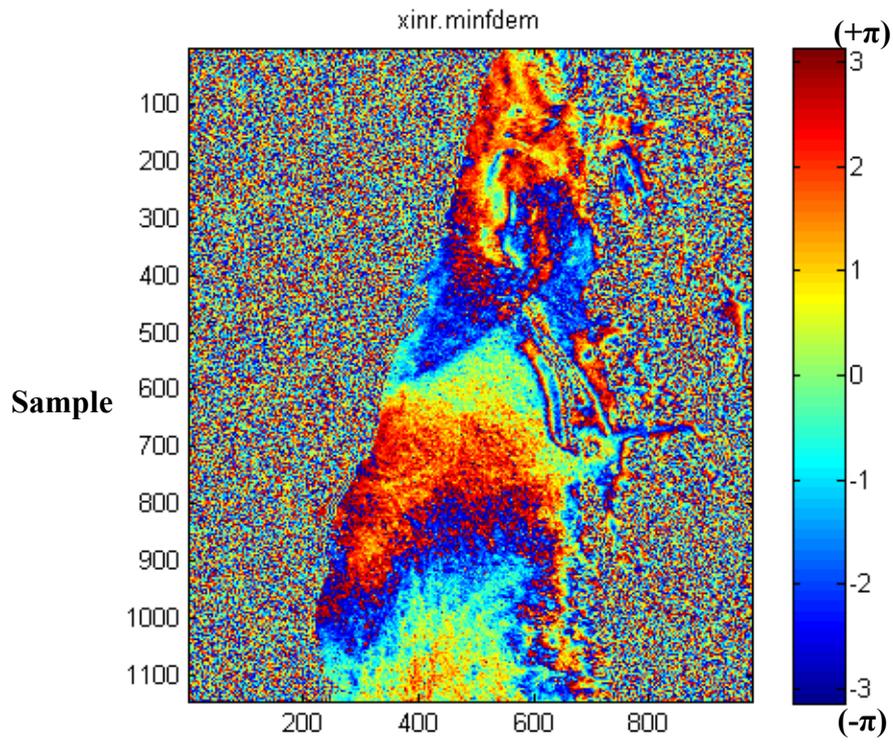
(4) 地球曲率改正後與引進 DEM 改正後之干涉圖

初步干涉圖因尚有許多誤差，首先需進行地球曲率改正。在此直接利用橢球模式之地形效應進行改正，此即為點位與影像軌道旋轉角的距離函數，所以條紋與影像間有一旋轉角的夾角，愈靠近左邊影像其間隔愈密，而靠近右邊之干涉條紋間距則較寬。理論上經地球曲率改正後的條紋應反應地形的效應，也就是顯示在雷達坐標的高程等高線圖，但如有東西向的平行條紋出現，則需進行軌道改正以修正軌道誤差（一般做

法即以地面之控制點修正軌道參數)，目前經地球曲率改正後之干涉圖（如圖 6.7）並無出現東西向之平行條紋，故未進行軌道改正。但為使干涉圖更趨近於地形，在地球曲率改正後引進 SRTM Top DTM 再行改正，所得到的干涉圖如圖 6.8。由圖 6.7 與圖 6.8 中可看出，兩者並無過大差異，故通常將初步干涉圖經過地球曲率改正後，即可進行全相位回復。

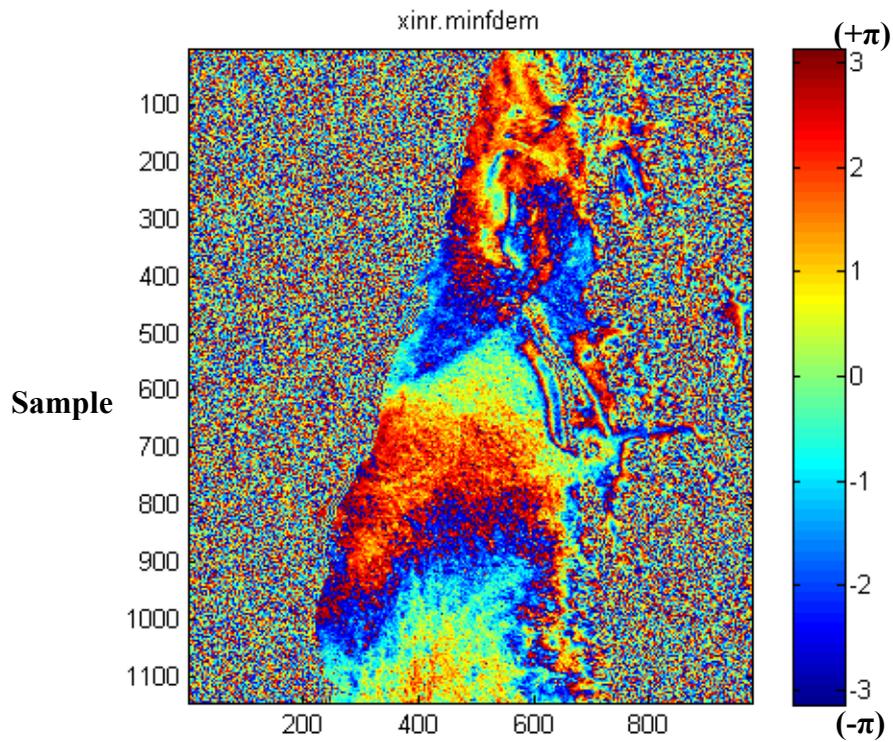
(5) 全相位回復

本研究以 Stafford 大學所開發之 SNAPHU 軟體來進行全相位回復處理，SNAPHU 在處理時必須先指定回復影像的目的，將相關參數輸入後，即可得到全相位回復圖。有關 SNAPHU 的詳細處理方式可參考使用手冊，至於細部設定則將視使用者之目的而定。一般而言，種子點的選取以影像內較重要的區域為主，並選擇干涉效果較好的點（相關性較高），如此可以求出重要區域正確的相位值。如果整幅影像的干涉效果良好，則會整幅都進行全相位回復處理；如果干涉結果有區塊的現象產生，可能要分區塊進行處理；如果整區的干涉效果並不一致，則要視其相關性值來進行處理，通常相關性在 0.3 以下的點位，其相位值的正確性就有待商榷，故依影像狀況，有時會考慮不進行相位回復。因此目前僅使用 SNAPHU 內建參數，即由影像左上角坐標作為回復路徑之種子像元，自動產生全相位回復圖，如圖 6.9。



Line

圖 6.7 地球曲率改正後干涉圖(960306_960307)



Line

圖 6.8 經 DEM 改正後干涉圖(960306_960307)

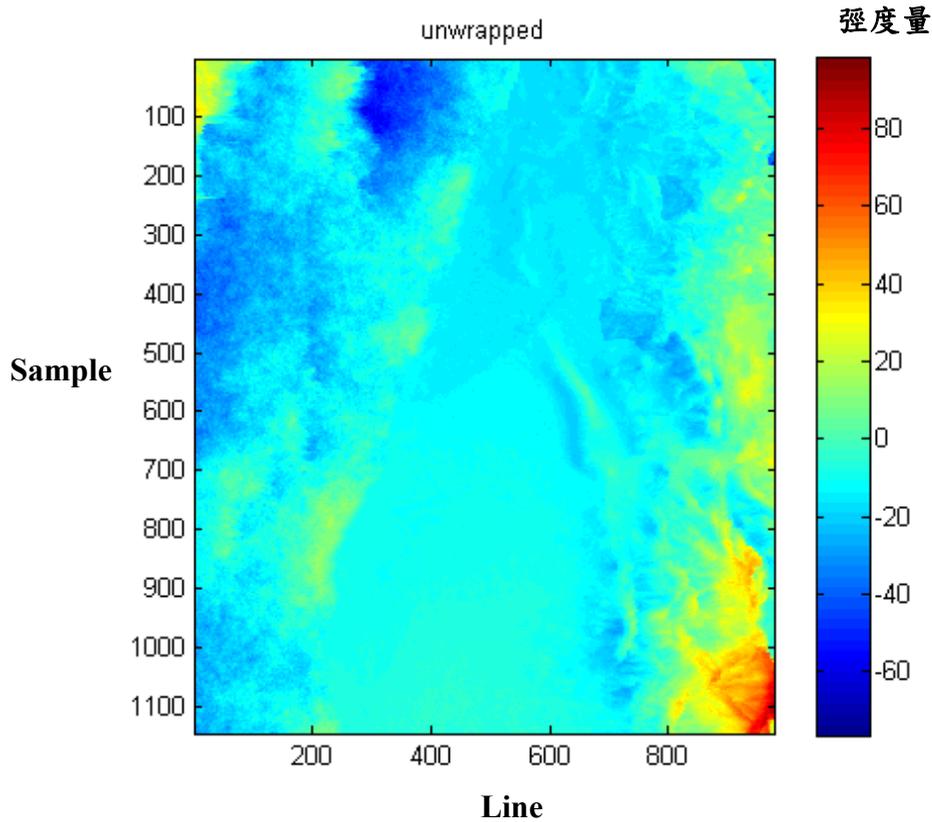


圖 6.9 全相位回復干涉圖(960306_960307)

(6)DTM 產製

經由全相位回復後即為連續相位，可利用相位轉高程公式直接求得 DTM，但在產製 DTM 之前，需將坐標系統進行定位（一致化）。本案係將坐標統一轉換至 UTM 坐標系統，並內插成 $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ DTM，如圖 6.10，以方便與農航所之 $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ DTM 進行比較，如圖 6.11。因利用 InSAR 技術產製 DTM 是建立於 WGS84 的經緯坐標系統，而農航所製作的 40 m DTM 則是 TWD67 的地理坐標系統，而 WGS84 轉 TWD67 是利用 Molodensky-Badekas 七參數轉換模式（如式 6.3），轉換後是利用 Cubic 的方式進行重新取樣。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^{67} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^{84} - \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}^{84} \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} / (1+S) \quad (6.3)$$

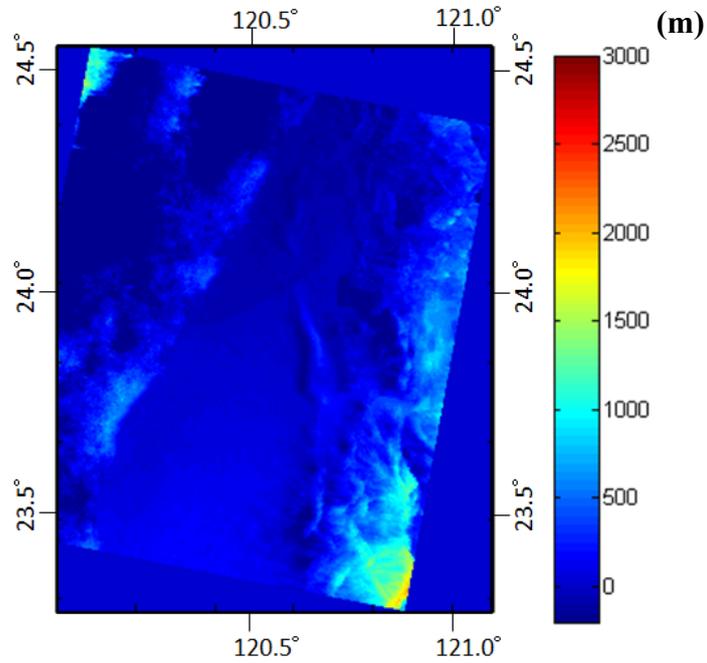


圖 6.10 InSAR 產製之 DTM 圖(960306_960307)

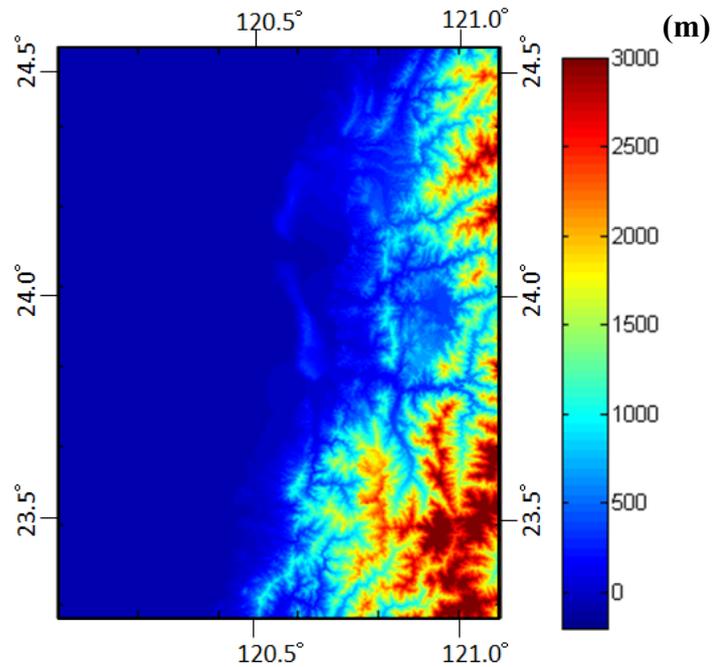


圖 6.11 農航所之 DTM 圖

(7) 成果分析與精度評估

本案所產生之 DTM 先行與農航所之 DTM 進行比較（皆已轉換至經緯度坐標系統，如圖 6.10、圖 6.11），將圖 6.10 的地理方位轉換至與圖 6.11 之地理方位相同，再將圖 6.10 與圖 6.11 之高程進行重疊相減，即可得到圖 6.12 之高程較差圖，圖中被刪去的一角（左下角）為 DTM 沒有提供資料的部分。

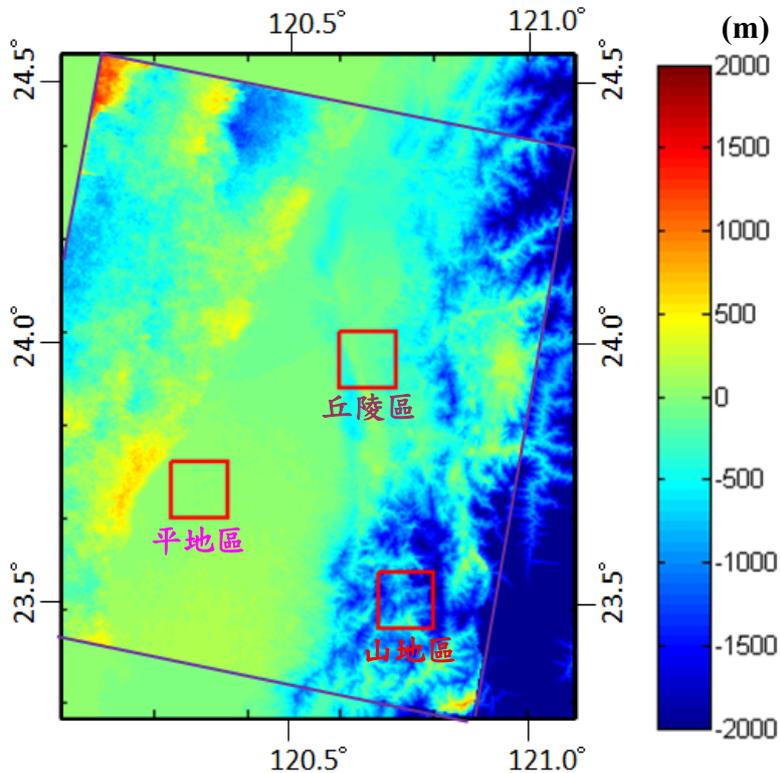


圖 6.12 InSAR 與農航所之 DTM 較差圖

在定性方面：由圖 6.12 中可以看出在平地區 InSAR 產製 DTM 成果與農航所 DTM 大致符合，但越往東方向之 DTM 則差距越大，若再觀察成果與強度影像可發現此區域多山及多植被，其形成之有效干涉條紋較平地為

差，故造成高程差異較大；另在左上角一小部分呈現較不合理現象，此區域為大海，理論上應為趨近於 0，但卻高差在 1,000 m 以上，判斷可能在全相位回復時未針對海面選擇適當之參數加以濾除。

在定量方面：將本研究所得到的 DTM 成果先行移除大地起伏（由交通大學黃金維教授研究團隊提供）後，分別採樣 300×300 個像元大小之平原區（高程 50 m 內）、丘陵區（高程 50 m ~ 200 m）及山地區（高程 200 m 以上），如圖 6.12。之後與農航所 DTM（此為比對基準）進行重疊比對，可得此三區之均方根誤差 RMSE(Root Mean Square Error)分別為 4.8 m、49.4 m 以及 78.8 m。

同時為得到實驗區之最大高程分界，本研究分別選擇五塊區域進行測試，高程由數 m 之平地至 2,000 m 之山區進行 RMSE 計算，以作為後續高程分界之判斷依據。作法上於每塊區域採取 100×100 個像元大小樣本由左至右（由平地至山區）逐次計算，所得到的 RMSE、平均高程及平均同調值如圖 6.13(a)~(e)所示。由以上圖表可知，平均高程愈高，RMSE 愈大，平均同調值也相對降低，故可依據 RMSE 突然變大、及同調值相對變小所對應的高程值，作為本研究之最大高程分界。由圖表可知，高程在 100 m 以內，RMSE 僅數 m，高程在 100 ~ 200 m 之間，RMSE 約 10 ~ 20 m，高程在 500 ~ 600 m 左右，則 RMSE 已達 40 ~ 50 m，故以本研究而言，平地與丘陵及丘陵與山區之最大高程分界分別約為 100 m、500 m 左右。

RMSE(m)	平均高程(m)	平均同調值
2.54	6.64	0.62
3.48	7.69	0.57
2.43	10.61	0.56
2.53	13.36	0.57
1.54	17.23	0.54
3.48	24.50	0.50
3.26	35.24	0.50
2.16	52.14	0.50
3.55	97.88	0.45
9.91	229.60	0.49
15.28	363.12	0.37
91.45	637.46	0.31
87.96	1169.48	0.27
83.92	1188.90	0.25
33.06	1769.20	0.21

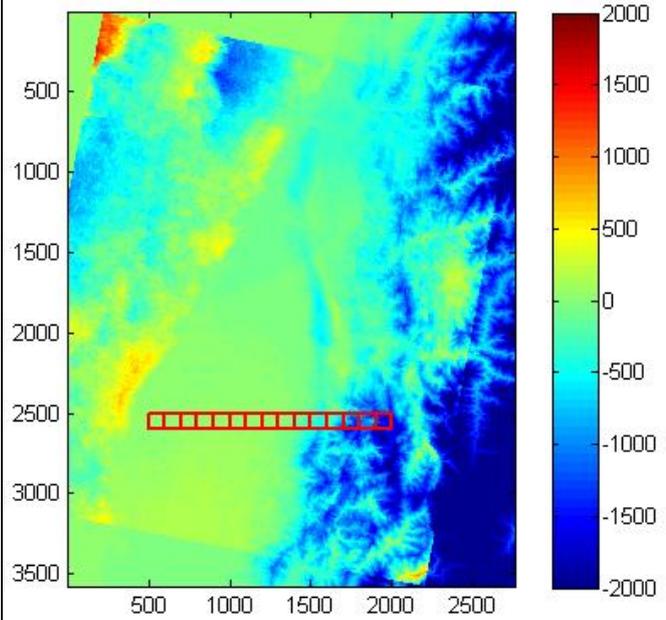


圖 6.13(a) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (一)

RMSE(m)	平均高程(m)	平均同調值
1.99	8.51	0.59
4.39	11.08	0.58
3.19	15.58	0.60
4.16	21.32	0.57
1.90	26.25	0.57
2.56	29.06	0.57
2.78	37.81	0.52
4.74	51.40	0.52
7.82	94.28	0.55
6.64	218.91	0.54
36.29	266.39	0.25
38.54	567.71	0.38
34.64	697.08	0.26
68.05	991.87	0.24
25.64	770.19	0.30

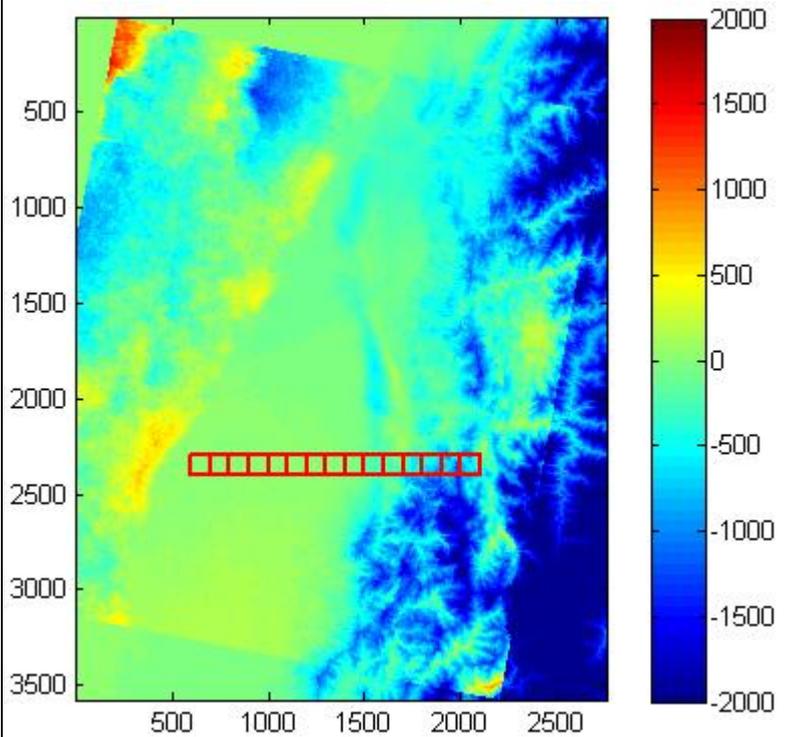


圖 6.13(b) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (二)

RMSE	平均高程	平均同調值
4.46	5.66	0.55
3.75	9.61	0.59
4.82	16.13	0.58
4.83	19.83	0.58
1.20	30.43	0.54
7.08	68.08	0.54
4.60	90.94	0.54
22.73	175.78	0.44
55.29	509.33	0.43
79.39	880.08	0.36
58.36	1114.52	0.26
57.91	1128.81	0.23
77.94	1284.04	0.24
69.29	2101.65	0.24
32.24	1787.47	0.23

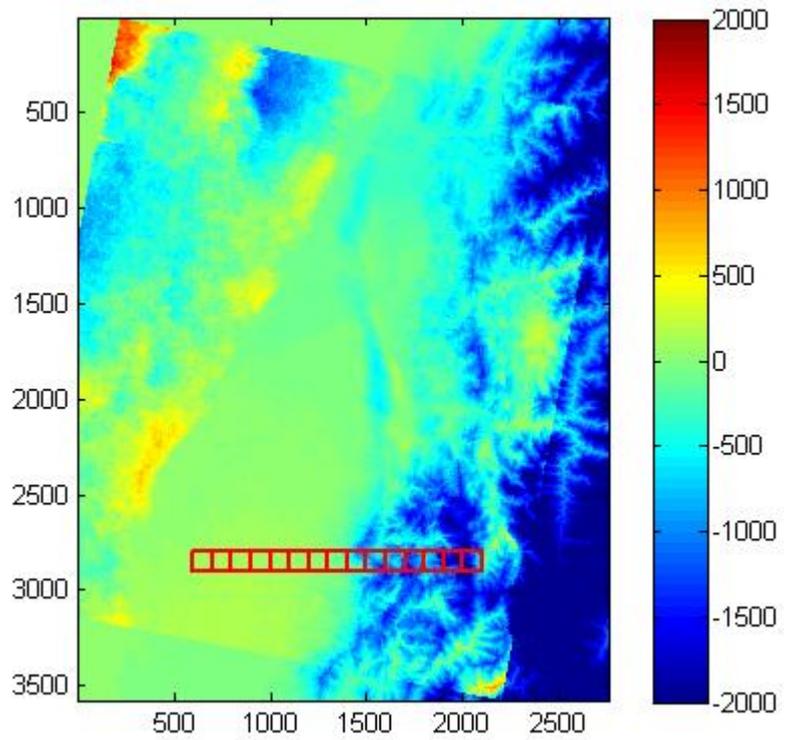


圖 6.13(c) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (三)

RMSE(m)	平均高程(m)	平均同調值
8.52	190.74	0.57
11.09	95.58	0.60
4.03	118.23	0.59
17.32	151.16	0.59
18.57	256.10	0.51
14.50	513.98	0.36
28.44	510.82	0.35
41.90	688.42	0.46
42.25	764.49	0.36
112.38	982.87	0.28
52.48	1034.11	0.28

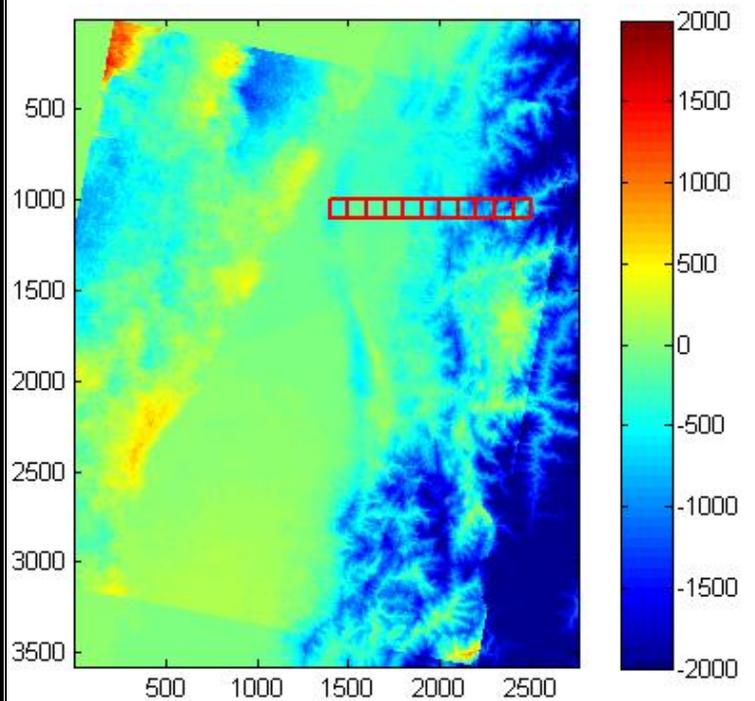


圖 6.13(d) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (四)

RMSE(m)	平均高程(m)	平均同調值
2.07	10.18	0.54
3.57	13.93	0.55
3.93	18.00	0.57
12.93	123.60	0.56
14.75	83.34	0.34
3.75	83.59	0.49
14.04	139.52	0.54
12.92	226.00	0.45
25.07	356.70	0.35
42.25	429.23	0.27
23.87	500.44	0.33
25.01	564.93	0.32
24.13	466.09	0.28

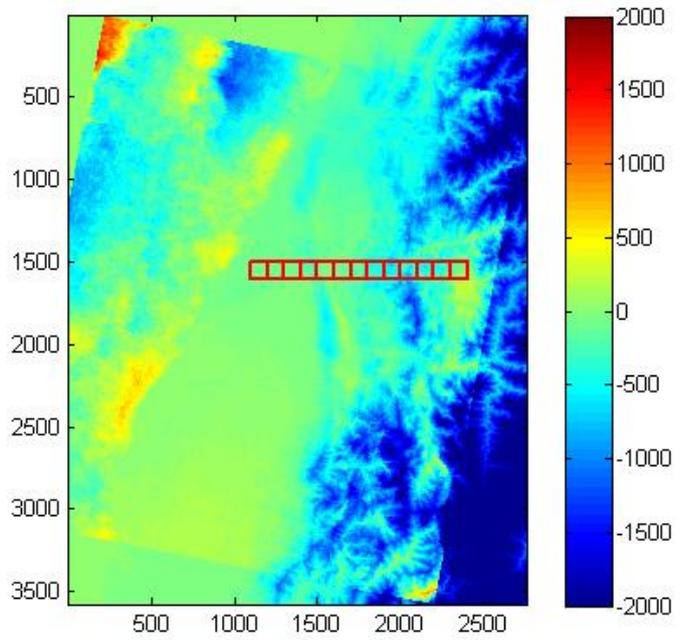


圖 6.13(e) 由平地至山區逐次計算高程分界相關資料圖 (五)

6.2.2 ENVISAT 影像測試

6.2.2.1 實驗影像



圖 6.14 2007/09/06 及 2007/11/15 ENVISAT SLC 影像

本次試驗所使用的影像來源同樣為中央大學太空及遙測研究中心所生產之2007年9月6日之ENVISAT(主影像)及2007年11月15日之ENVISAT(次影像)進行測試(如圖6.14)，其中主影像之大小為 $35,001 \times 5,158$ 個像元，次影像之大小為 $35,000 \times 5,158$ 個像元。而影像的像元解析度在斜距方向(Range)為7.8 m，方位方向(Azimuth)為4.1 m，影像涵蓋範圍與上一個實驗區相同，即中西台灣之整幅影像(約 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$)為研究區域，軌道編號為 #2232(Track)&3123(Frame)，位置示意圖如圖6.15。

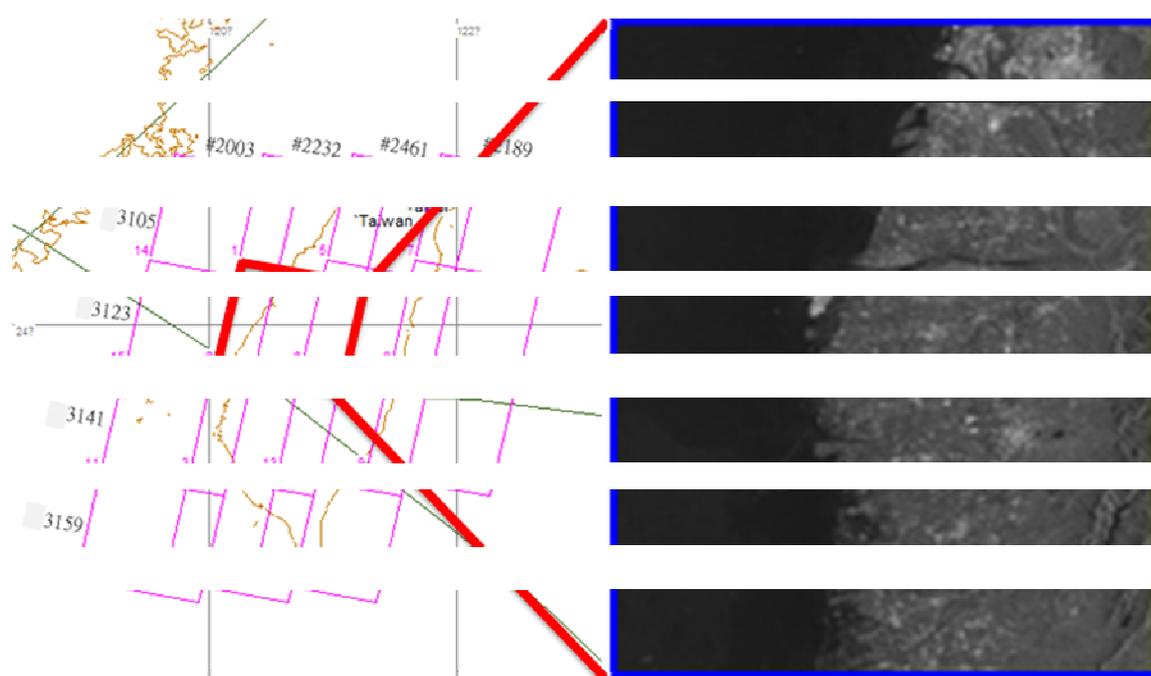


圖 6.15 研究區(軌道編號為 #2232&3123)之雷達影像圖

因影像成像時衛星軌道在台灣右側，且此影像對為降交軌道，所以在影像判讀時同 ERS 影像，會有左右顛倒的情形。

6.2.2.2 基線計算

2007 年 9 月 6 日(主影像)及 2007 年 11 月 15 日(次影像)之 ENVISAT 影像(以下稱之為 2007_0906/1115)之各項成像幾何參數計算值如表 6.4。由表 6.4 中可看出,本測試影像之基線值為 74.8 m,基線垂直分量 B_{\perp} 為 64.8 m,故亦符合表 5.1 中所適用之基線長度,故以此影像對進行後續干涉處理。

表 6.4 利用精密軌道資料計算影像對之各項成像幾何參數值

項目	計算值
時間間隔	70 天
衛星高度	779305m
衛星速度	7286 m/s
基線長度	74.8m
基線平行分量 $B_{//}$	-37.3 m
基線垂直分量 B_{\perp}	64.8 m
基線水平分量 B_H	47.9 m
基線垂直分量 B_V	57.5 m
α 值	50.2°
θ 值	20.2°
近距點之 θ 值	22.8°
高程未定值	-142 m

6.2.2.3 成果展現

(1) 影像套合

首先將兩幅主、次影像輸入，主要目的是將主、次影像的振幅與複數影像進行套合工作，DORIS 可先行計算出相對點位初始線列及像元方向之位移量為(8, 5)，並可選擇預設控制點數(200 個點)及設定輸出之門檻(相關係數大於 0.4)，則可計算出套合結果之各項數據如表 6.5，其中線列向_L 與像元像_S、位移量_L 與位移量_S、誤差評估_L 與誤差評估_S、中誤差_L 與中誤差_S 等皆與 ERS 測試影像案例之說明相同，請參考 6.2.1.3。另經由表 6.5 所展示之誤差向量圖(如圖 6.16)可知，無論在線列方向或像元方向之位移量皆很小，最大僅 0.25 個像元，表示套合結果符合本團隊之預期。

表 6.5 套合後相關參數統計表(070906_071115)

點號	線列向_L	像元向_S	位移量_L	位移量_S	相關係數	誤差評估_L	誤差評估_P	中誤差_L	中誤差_P
1	53	982	7.56	5.31	0.48	-0.18	0.05	1.18	0.49
7	1022	1559	7.78	5.12	0.5	-0.02	-0.03	0.15	0.28
8	1022	2488	8	4.94	0.46	0.13	-0.05	0.8	0.43
12	1991	1208	7.56	5.25	0.45	-0.23	0.05	1.43	0.46
13	1991	2137	7.78	5.03	0.8	-0.08	-0.01	0.68	0.09
18	2960	1785	8.06	5.03	0.43	0.21	-0.06	1.25	0.53
23	3929	1434	7.75	5.34	0.42	-0.09	0.2	0.54	1.78
24	3929	2363	7.91	4.94	0.71	0	-0.04	0	0.44
28	4898	1082	7.75	5.25	0.54	-0.08	0.06	0.55	0.6

29	4898	2011	7.81	4.97	0.61	-0.09	-0.06	0.65	0.63
30	4898	2940	7.97	4.88	0.89	0	0.01	0	0.19
34	5867	1660	8.03	5.06	0.71	0.14	-0.02	1.09	0.23
40	6837	2237	8	4.94	0.53	0.05	-0.03	0.34	0.29
41	6837	3166	8	4.81	0.63	-0.02	0	0.14	0.04
45	7806	1885	7.81	4.94	0.45	-0.13	-0.08	0.78	0.73
46	7806	2814	8.12	4.84	0.63	0.11	-0.02	0.82	0.2
49	8775	605	7.78	5.19	0.78	-0.08	-0.04	0.66	0.56
52	8775	3392	8.16	4.78	0.64	0.09	0.03	0.7	0.38
62	10713	2689	8.09	4.88	0.61	0.04	0.03	0.31	0.33
65	11682	479	7.94	5.31	0.5	0.04	0.08	0.29	0.83
70	12651	128	7.94	5.31	0.42	0.05	0.03	0.33	0.3
73	12651	2915	8.09	4.78	0.6	0	-0.01	0.04	0.1
77	13620	1634	7.97	5	0.64	-0.04	0	0.33	0.04
78	13620	2563	8.09	4.84	0.8	0.01	0	0.04	0.01
81	14589	354	8.09	5.09	0.46	0.16	-0.13	0.98	1.21
82	14589	1283	7.94	5.03	0.44	-0.06	-0.02	0.39	0.22
97	17497	228	8.19	5.22	0.45	0.22	0.01	1.37	0.1
99	17497	2086	8.09	4.91	0.54	-0.02	0.03	0.15	0.26
108	19435	454	8.16	5.19	0.47	0.14	0.04	0.89	0.39
111	19435	3241	8.22	4.72	0.57	-0.01	0.06	0.07	0.62
130	23311	906	8	4.94	0.53	-0.12	-0.09	0.81	0.91
137	24280	2412	8.22	4.78	0.61	-0.03	0.02	0.2	0.26
142	25249	2061	8.28	4.81	0.53	0.04	0	0.28	0.03
144	25249	3919	8.47	4.47	0.47	0.09	-0.01	0.61	0.11
146	26218	780	8.41	5.09	0.43	0.25	0.07	1.55	0.63
160	28156	3793	8.38	4.5	0.41	-0.03	0.03	0.21	0.24
164	29125	2513	8.28	4.62	0.62	-0.06	-0.07	0.4	0.74
169	30095	2161	8.38	4.72	0.48	0.06	-0.02	0.36	0.18
170	30095	3090	8.38	4.62	0.72	-0.01	0.04	0.11	0.53
180	32033	2387	8.47	4.72	0.49	0.1	0.04	0.63	0.4
181	32033	3316	8.34	4.5	0.55	-0.1	-0.02	0.73	0.17
185	33002	2035	8.31	4.59	0.42	-0.05	-0.14	0.32	1.27
195	34940	1332	8.06	4.91	0.46	-0.28	0.08	1.82	0.75
1	53	982	7.56	5.31	0.48	-0.18	0.05	1.18	0.49

7	1022	1559	7.78	5.12	0.5	-0.02	-0.03	0.15	0.28
8	1022	2488	8	4.94	0.46	0.13	-0.05	0.8	0.43
12	1991	1208	7.56	5.25	0.45	-0.23	0.05	1.43	0.46
13	1991	2137	7.78	5.03	0.8	-0.08	-0.01	0.68	0.09
18	2960	1785	8.06	5.03	0.43	0.21	-0.06	1.25	0.53
23	3929	1434	7.75	5.34	0.42	-0.09	0.2	0.54	1.78
24	3929	2363	7.91	4.94	0.71	0	-0.04	0	0.44
28	4898	1082	7.75	5.25	0.54	-0.08	0.06	0.55	0.6
29	4898	2011	7.81	4.97	0.61	-0.09	-0.06	0.65	0.63
30	4898	2940	7.97	4.88	0.89	0	0.01	0	0.19
34	5867	1660	8.03	5.06	0.71	0.14	-0.02	1.09	0.23
40	6837	2237	8	4.94	0.53	0.05	-0.03	0.34	0.29
41	6837	3166	8	4.81	0.63	-0.02	0	0.14	0.04
45	7806	1885	7.81	4.94	0.45	-0.13	-0.08	0.78	0.73
46	7806	2814	8.12	4.84	0.63	0.11	-0.02	0.82	0.2
49	8775	605	7.78	5.19	0.78	-0.08	-0.04	0.66	0.56
52	8775	3392	8.16	4.78	0.64	0.09	0.03	0.7	0.38
62	10713	2689	8.09	4.88	0.61	0.04	0.03	0.31	0.33
65	11682	479	7.94	5.31	0.5	0.04	0.08	0.29	0.83
70	12651	128	7.94	5.31	0.42	0.05	0.03	0.33	0.3
73	12651	2915	8.09	4.78	0.6	0	-0.01	0.04	0.1
77	13620	1634	7.97	5	0.64	-0.04	0	0.33	0.04
78	13620	2563	8.09	4.84	0.8	0.01	0	0.04	0.01
81	14589	354	8.09	5.09	0.46	0.16	-0.13	0.98	1.21
82	14589	1283	7.94	5.03	0.44	-0.06	-0.02	0.39	0.22
97	17497	228	8.19	5.22	0.45	0.22	0.01	1.37	0.1
99	17497	2086	8.09	4.91	0.54	-0.02	0.03	0.15	0.26
108	19435	454	8.16	5.19	0.47	0.14	0.04	0.89	0.39
111	19435	3241	8.22	4.72	0.57	-0.01	0.06	0.07	0.62
130	23311	906	8	4.94	0.53	-0.12	-0.09	0.81	0.91
137	24280	2412	8.22	4.78	0.61	-0.03	0.02	0.2	0.26
142	25249	2061	8.28	4.81	0.53	0.04	0	0.28	0.03
144	25249	3919	8.47	4.47	0.47	0.09	-0.01	0.61	0.11
146	26218	780	8.41	5.09	0.43	0.25	0.07	1.55	0.63
160	28156	3793	8.38	4.5	0.41	-0.03	0.03	0.21	0.24

164	29125	2513	8.28	4.62	0.62	-0.06	-0.07	0.4	0.74
169	30095	2161	8.38	4.72	0.48	0.06	-0.02	0.36	0.18
170	30095	3090	8.38	4.62	0.72	-0.01	0.04	0.11	0.53
180	32033	2387	8.47	4.72	0.49	0.1	0.04	0.63	0.4
181	32033	3316	8.34	4.5	0.55	-0.1	-0.02	0.73	0.17
185	33002	2035	8.31	4.59	0.42	-0.05	-0.14	0.32	1.27
195	34940	1332	8.06	4.91	0.46	-0.28	0.08	1.82	0.75

以上位移量大於或等於 2 者同樣以紅色標註表示，並由上表之位
量即可計算相關數據，其中位移量之最大值 = 0.26；最小值 = -0.28；
平均值 = 0；均方根誤差 = 0.09（單位為 Pixel）。

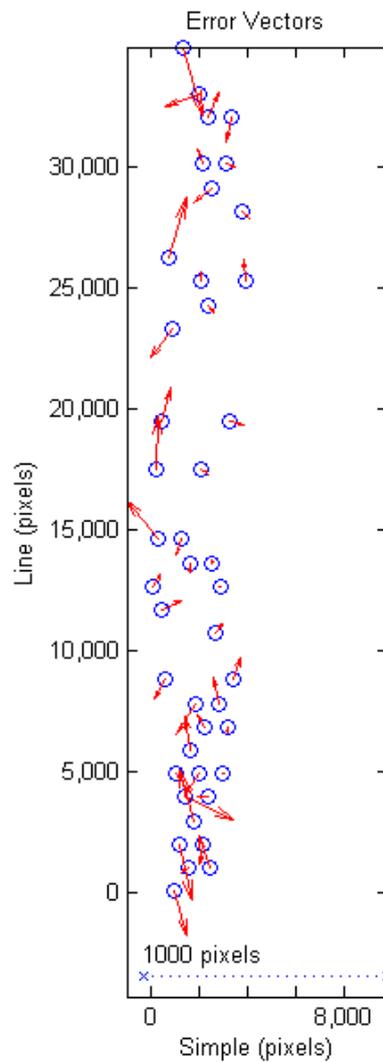


圖 6.16 誤差向量圖(070906_071115)

有關(2)同調性圖、(3)產生初步干涉圖、(4)地球曲率改正干涉圖及 DEM 改正後之干涉圖、(5)全相位回復干涉圖、(6)DTM 產製、農航所之 DTM 及坐標定位等與前一 ERS 影像測試案例之參數設定與流程皆相同，所得到的干涉圖分別如圖 6.17 ~ 圖 6.23，在此僅針對成果分析與精度評估單獨做說明。

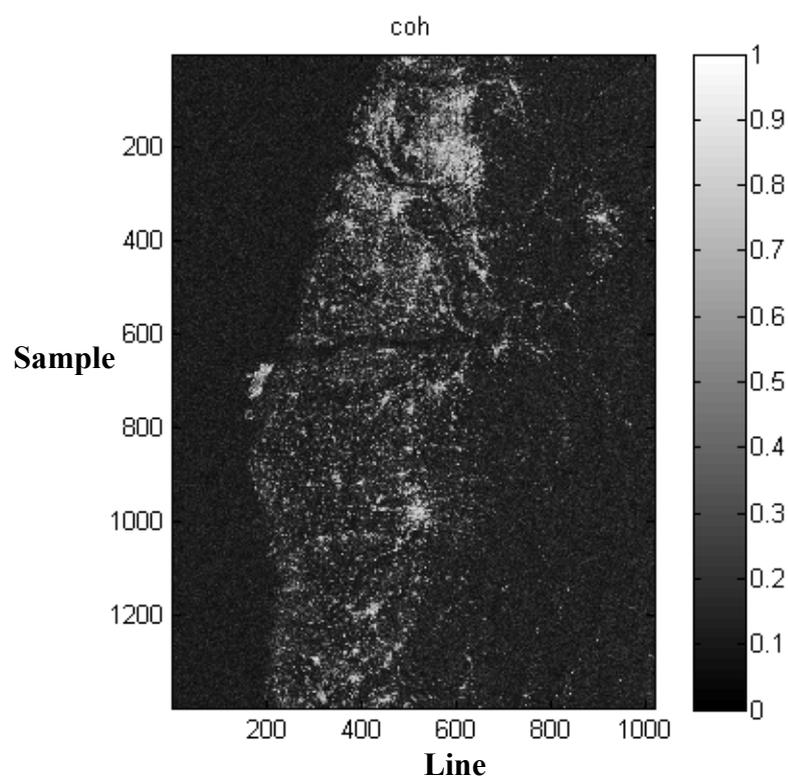


圖 6.17 同調性圖(070906_071115)

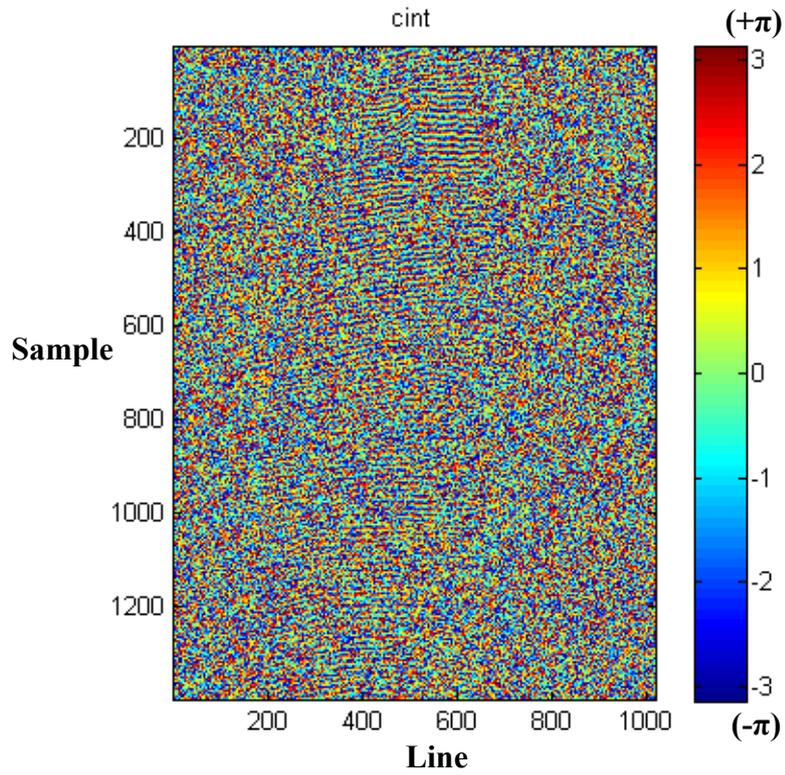


圖 6.18 初步干涉圖(070906_071115)

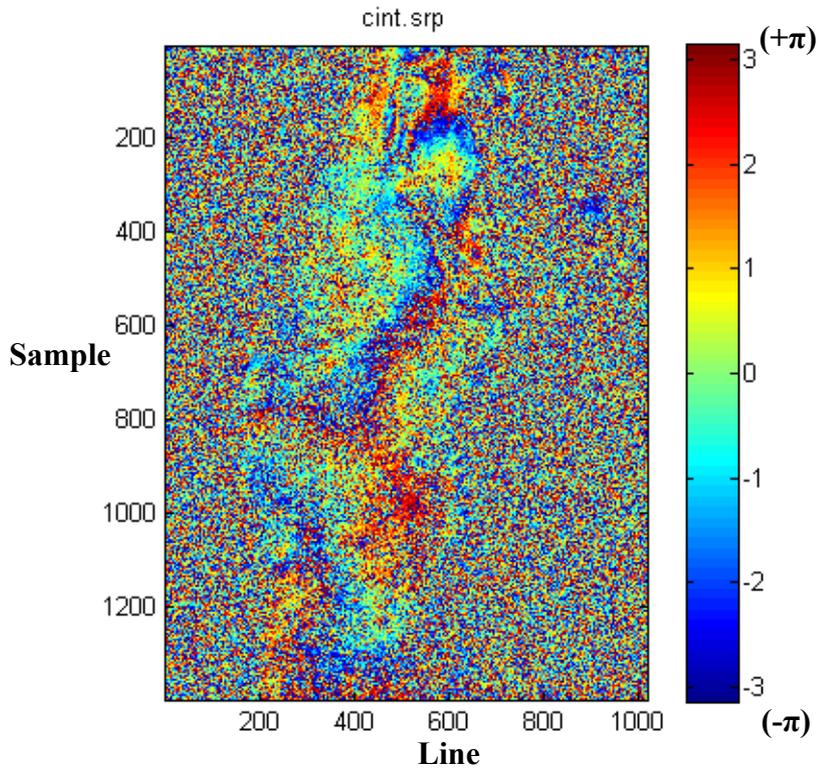


圖 6.19 地球曲率改正干涉圖(070906_071115)

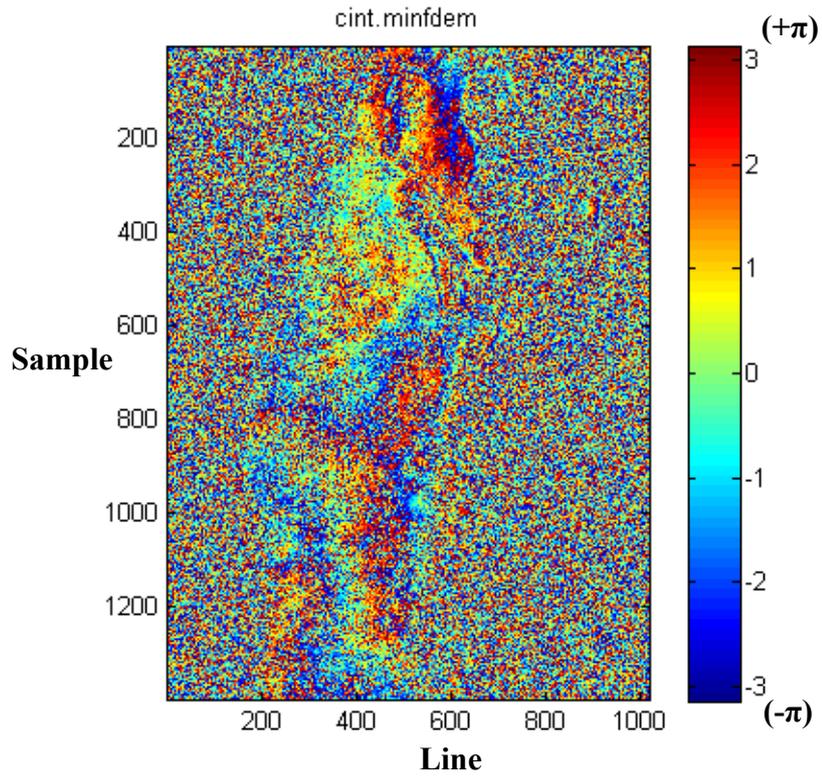


圖 6.20 經 DEM 改正後之干涉圖(070906_071115)

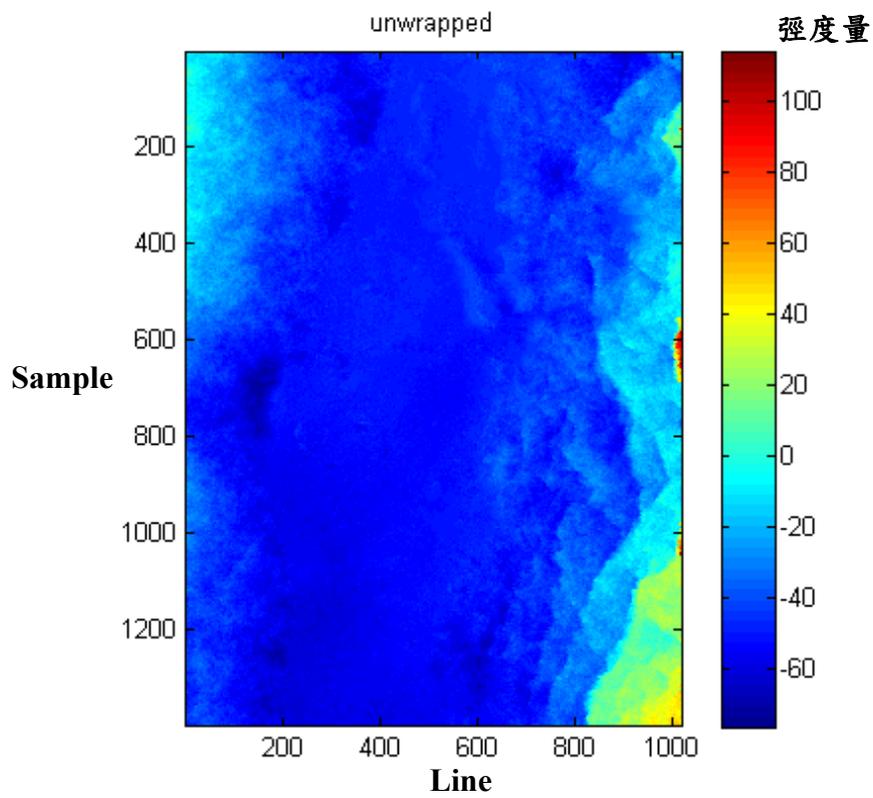


圖 6.21 全相位回復干涉圖(070906_071115)

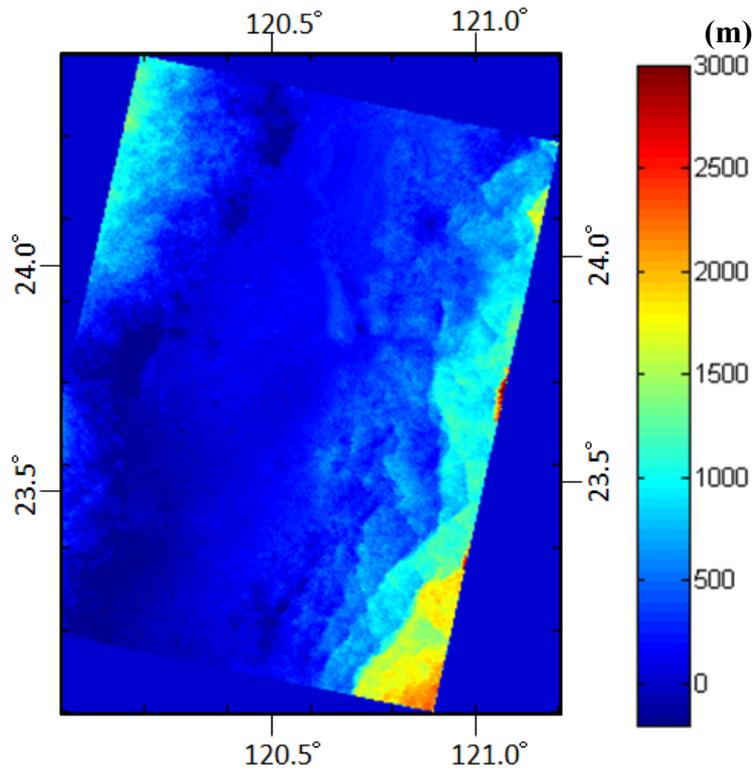


圖 6.22 InSAR 產製之 DTM 圖(070906_071115)

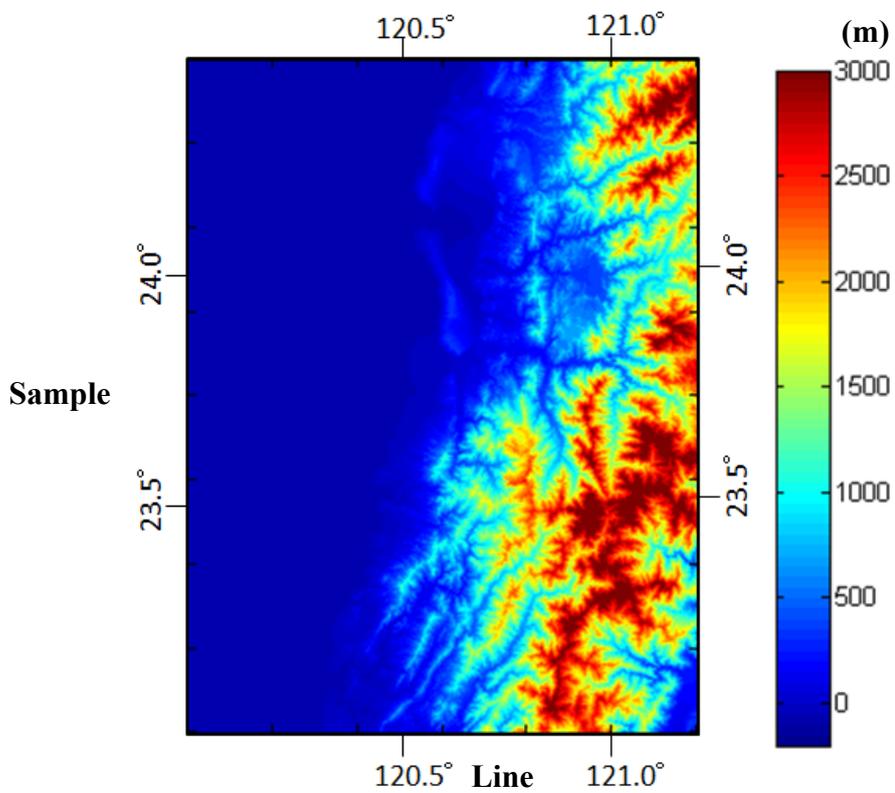


圖 6.23 農航所之 DTM 圖

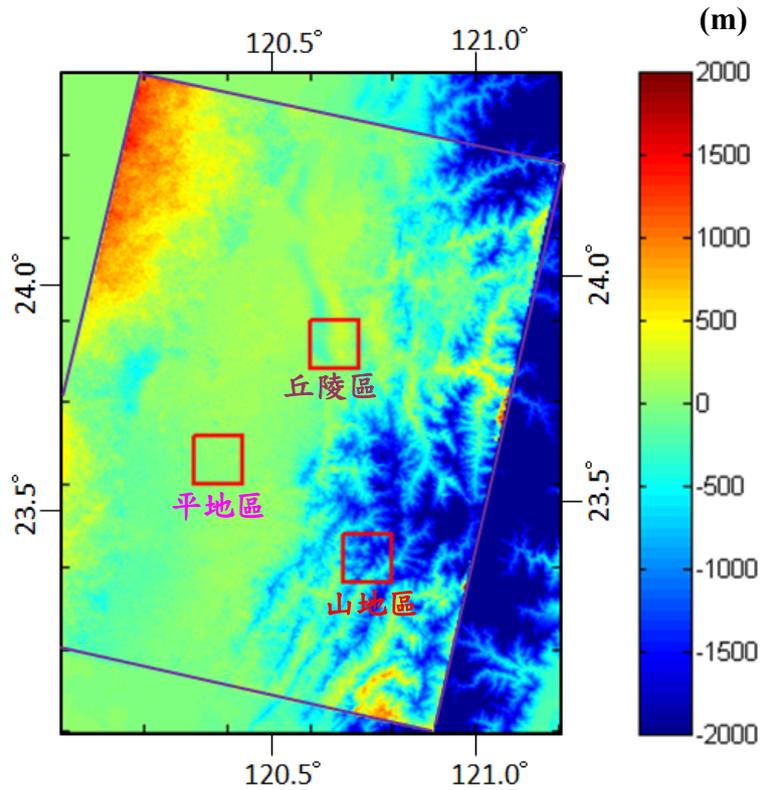


圖 6.24 InSAR 與農航所之 DTM 較差圖

(7) 成果分析與精度評估

在定性方面：由圖 6.24 中可以看出在平地區 InSAR 產製 DTM 成果與農航所 DTM 大致符合，但越往東方向之 DTM 則差距越大；且在左上角部分呈現較不合理現象，由於與 ERS 影像之測試案例參數設定相同，故判斷可能在全相位回復時未針對海面選擇適當之參數加以濾除。而在定量方面：將本研究所得到的 DTM 成果先行移除大地起伏後，同樣分別採樣 300×300 個像元大小之平原區（高程 50 m 內）、丘陵區（高程 50 m ~ 200 m）及山地區（高程 200 m 以上），如圖 6.24。之後

與農航所 DTM 進行重疊比對，可得此三區之均方根誤差 RMSE 分別為 6.3 m、19.4 m 以及 91.8 m。

另本團隊已與貴中心取得該測試區 2008 年初之 e-GPS 資料(e-GPS 衛星追蹤站點位分布圖如圖 6.25)，以方便與本測試案例之成果進行比較（因 2007 年底時程較相近）。e-GPS 測得之高程是由本團隊使用 LGO(Leica Geo Office)商用軟體計算而得，以 H_e 表示，而 InSAR 產製之 DTM 與農航所之 DTM 分別以 H_{InSAR} 及 H 表示， e-GPS 各衛星追蹤站之高程較差表如表 6.6。

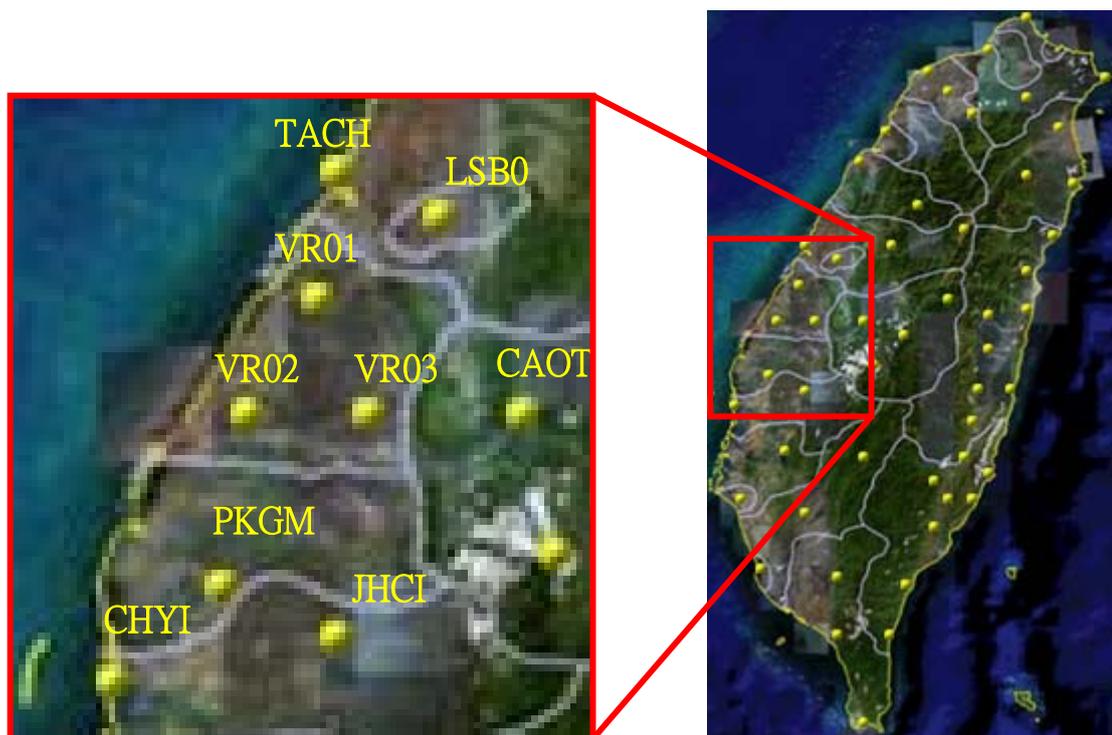


圖 6.25 e-GPS 衛星追蹤站點位分布圖

表 6.6 e-GPS 各衛星追蹤站之高程較差表

e-GPS	代號	E	N	H _e (1)	h _{InSAR} (2)	H (3)	較差一 (2)-(1)	較差二 (3)-(1)
東石	CHYI	161319	2594668	23.0	10.3	19.3	-12.7	-3.7
竹崎	JHCI	202953	2601450	151.0	117.4	124.4	-33.6	-26.6
北港	PKGM	178283	2608876	42.8	-35.8	28.6	-78.6	-14.2
田中	VR03	206549	2640278	77.4	166.2	58.5	88.8	-18.9
二林	VR02	185378	2644289	42.7	52.7	29.7	10.0	-13.0
草屯	CAOT	217497	2652981	141.7	61.7	124.7	-80.0	-17.0
和美	VR01	198167	2668296	39.4	93.3	26.4	53.9	-13.0
測繪 中心	LSB0	212001	2672264	121.8	183.5	85.0	61.7	-36.8
台中 港	TACH	201981	2687518	33.8	63.2	23.4	29.4	-10.4

由表 6.6 可看出，農航所之 DTM 與 e-GPS 之較差較小，InSAR 之 DTM 與 e-GPS 之較差較大，其最主要的原因應該是位置無法明確對位。因 e-GPS 站為非常精確的三維坐標，且部分站皆設於大樓頂端（大樓之高度應考量，如設於一、二十樓頂樓則高度已差距近 50 ~ 60 m），而 InSAR 所得到的高程為區域面之連續 DTM，且受限於影像之解析度；因 e-GPS 站為 WGS84 坐標系統，而 InSAR 產製 DTM 為 TWD67 坐標系統，做法上，將 WGS84 與 TWD67 進行坐標轉換後，即以每個 e-GPS 站的坐標所對應之高程值，與轉換至 InSAR 成果面坐標所對應之高程值進行相減即可得到較差。但因 InSAR 所得到的高程約為一 20 m × 20 m 大小之網格 DTM（以 ERS 為例），故無法與精確之 e-GPS 站明確對位，或說 e-GPS 站只能對應到 InSAR 所產

製的 20 m×20 m 大小的範圍，而無法精確與一點對位，故造成較差較大。至於其它原因可能來自軌道誤差、大氣誤差及地形產生的誤差，甚至可能為以上幾種誤差之結合，皆是影響 DTM 精度之因素，未來可配合相關性圖及高程圖供後續研究者做更進一步之探討分析。

由以上兩個案例之測試影像（ERS 與 ENVISAT 影像），因皆屬 ESA 所發展之系列影像，故以 DTM 產製之成果面來看，不論在定性或定量方面等級幾乎一致。而 RMSE 在丘陵及山區過大情況，原因很多，可能由於軌道的誤差、大氣效應影響等因素所造成。在軌道誤差方面，雖然精密星曆的精度比廣播星曆精度好很多，但是在實際計算時，會因影像地點的不同而有不同的影響，因此才會有細緻調整(Fine Tunning)處理的需求，但此處理過程不確定可以完全的消除軌道誤差（軌道不平行、軌道位置不夠正確等），所以即使使用精密星曆，仍會有軌道誤差；在大氣效應方面，如大氣分布為不均勻或前後取樣時間的大氣條件差別太大，則務必將大氣影響量減至最低。未來可以地面控制點精進軌道參數，及使用大氣模式來移除大氣效應等，進而提升 DTM 產製精度。

6.3 DInSAR 地表變遷偵測

6.3.1 清境、廬山地區變遷成果分析

6.3.1.1 實驗影像

本計畫依契約將選擇至少 4 年之三幅影像且需橫跨 2008 年 9 月份辛樂克颱風，故選擇以 2008 年 9 月 15 日左右（颱風前）之影像為基準，一幅選擇 2004 年 9 月以前之影像進行配對，作為地形對；另一幅選擇以 2008 年 10-11 月（最接近颱風後）之影像進行配對，作為變形對。研究範圍以中台灣之整幅影像（範圍約 100 km × 100 km）為測試對象，軌道編號為 #461(Track)&3123(Frame)，此區大部分為較高山區，右邊部分為太平洋，位置示意圖如圖 6.26。

依文獻及前人經驗得知，處理地表變形之垂直基線長度最好選擇 30 ~ 70 m 之範圍，本案已測試約 47 幅 ERS-2 SAR 影像，經兩兩配對後，儘量選擇垂直基線在 70 m 以內之基線長度進行後續之差分干涉計算。本研究使用三軌跡法進行地表變遷研究（必需選擇三幅影像），因配對之垂直基線長度以 2004 年 1 月 31 日與 2008 年 5 月 24 日之 ERS-2 影像配對最佳（基線長度為 101.1 m），將選擇做為地形對；而跨越辛樂克颱風之時間點則以 2008 年 5 月 24 日與 2008 年 11 月 15 日之 ERS-2 影像配對最佳（基線長度為 74.8 m），將選擇做為變形對，故以下之測試皆以此兩組配對進行差分干涉處理（以下稱為 040131_080524_081115）。

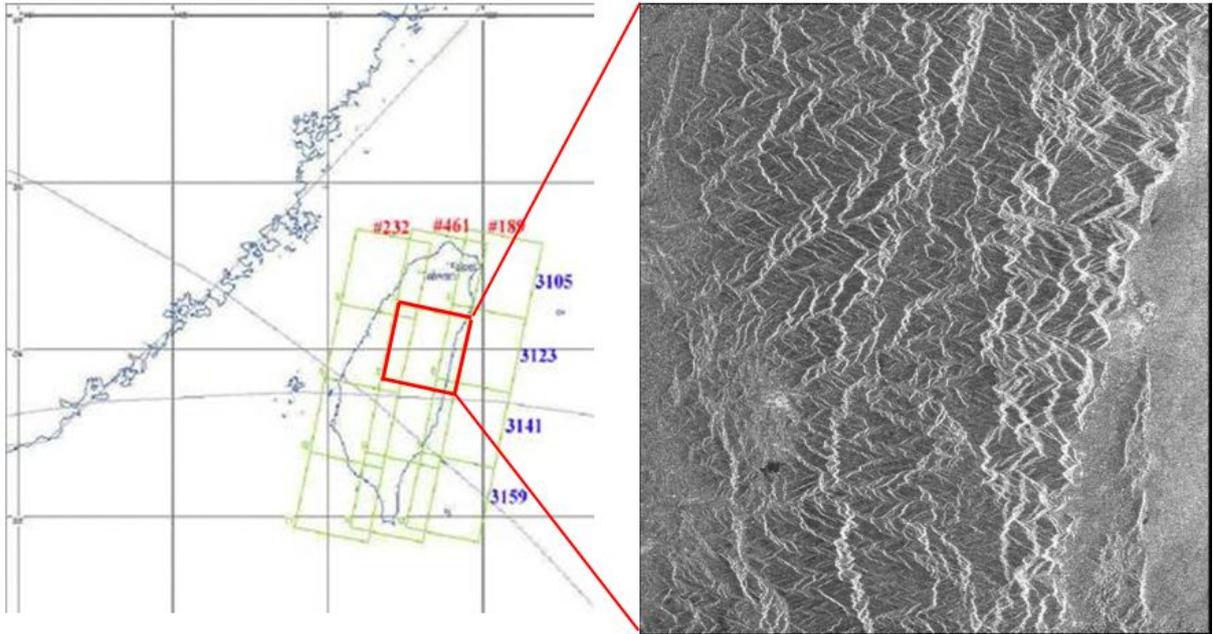


圖 6.26 研究區（軌道編號為 #461&3123）之雷達影像圖

6.3.1.2 成果展現

(1) 同調性圖

在產生干涉圖之前，同樣可先計算兩組影像的同調性圖，以先行評估兩組干涉圖產生之品質，當同調性係數趨近於 1 時，表示具高品質之同調性，兩組之同調性圖如圖 6.27。由圖可知，整區幾乎皆呈現灰黑色，表示植被太多及地形高度影響影像的相關性，同調性則較低，原因可能因為訊號不完整或干擾之影響，難以產生可信賴的干涉條紋。也由此同調性圖可看出干涉圖及差分干涉圖難有好的干涉條紋產生。

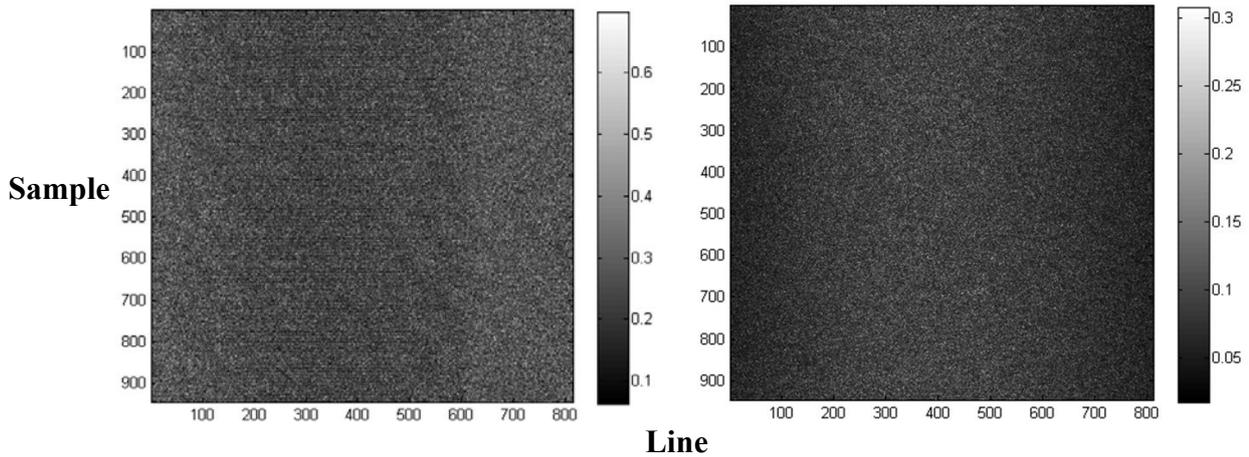


圖 6.27 同調性圖(040131_080524_081115)

(2) 產生初步干涉圖

當兩組複數影像相乘後即可得到地形對與變形對之相位差，如圖 6.28，相同的相位差會形成干涉條紋，但由圖 6.28 可知，初步干涉結果幾乎看不到明顯之干涉條紋。

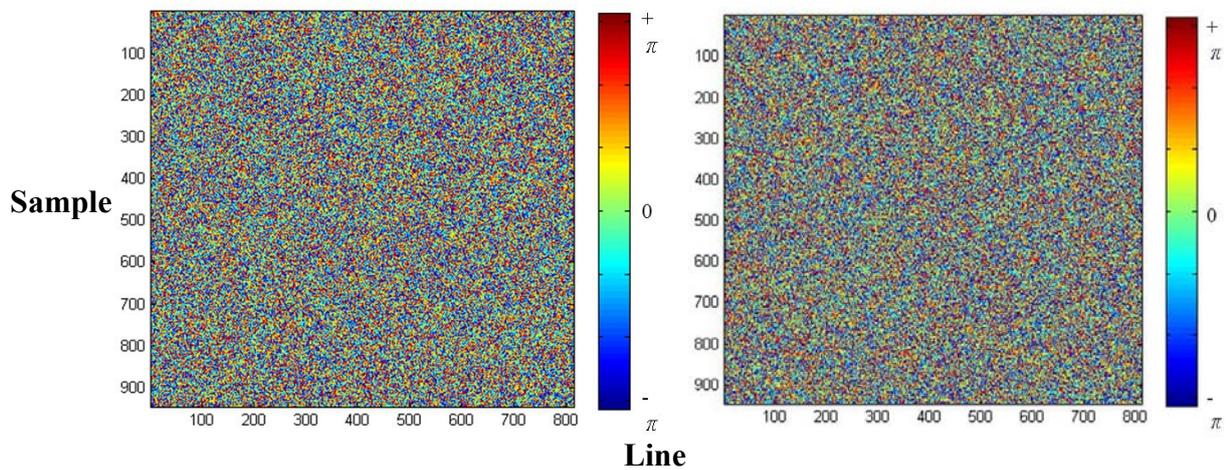


圖 6.28 初步干涉圖(040131_080524_081115)

(3) 地球曲率改正後干涉圖

初步干涉圖因尚有許多誤差，故需進行地球曲率改正以反應出地形效應，改正後的干涉圖如圖 6.29。

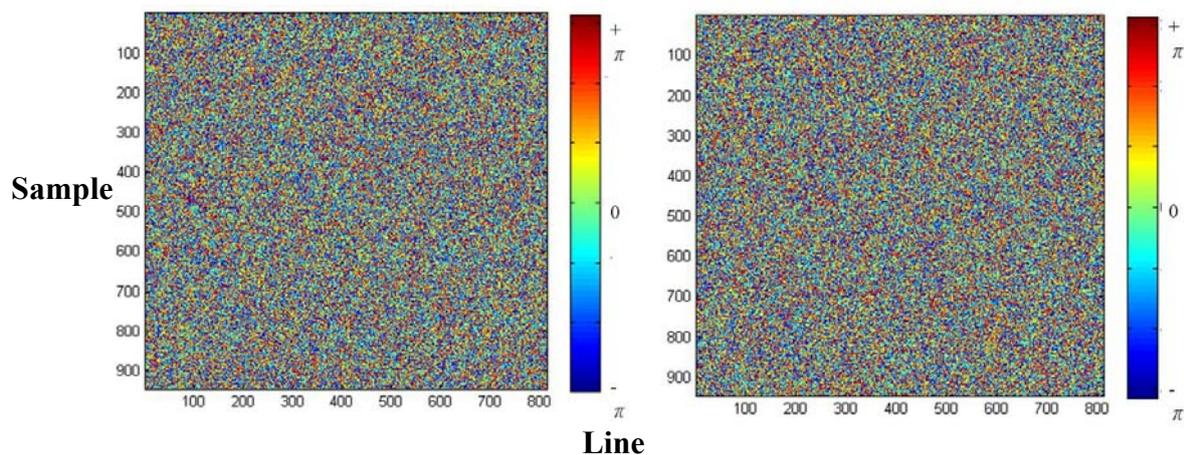


圖 6.29 地球曲率改正干涉圖(040131_080524_081115)

(4) 全相位回復

在進行全相位回復時，選擇 SNAPHU 之內建參數，即由影像左上角坐標作為起始種子像元，如此則自動產生兩組之全相位回復圖，如圖 6.30。

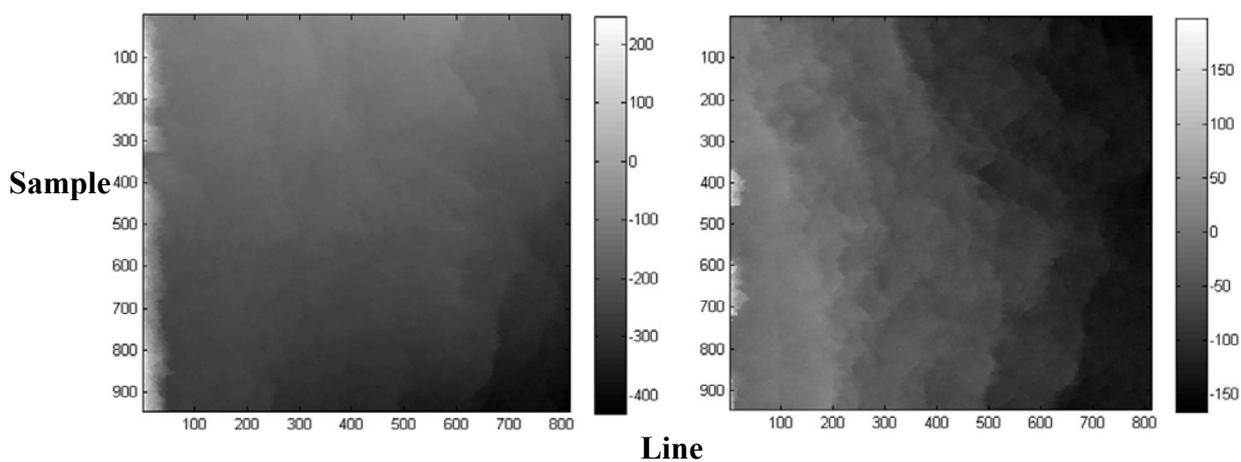


圖 6.30 全相位回復圖(040131_080524_081115)

(5) 變遷結果

將以上兩組之全相位回復之干涉圖進行差分處理，即可得到兩組影

像對的變遷結果，如圖 6.31。

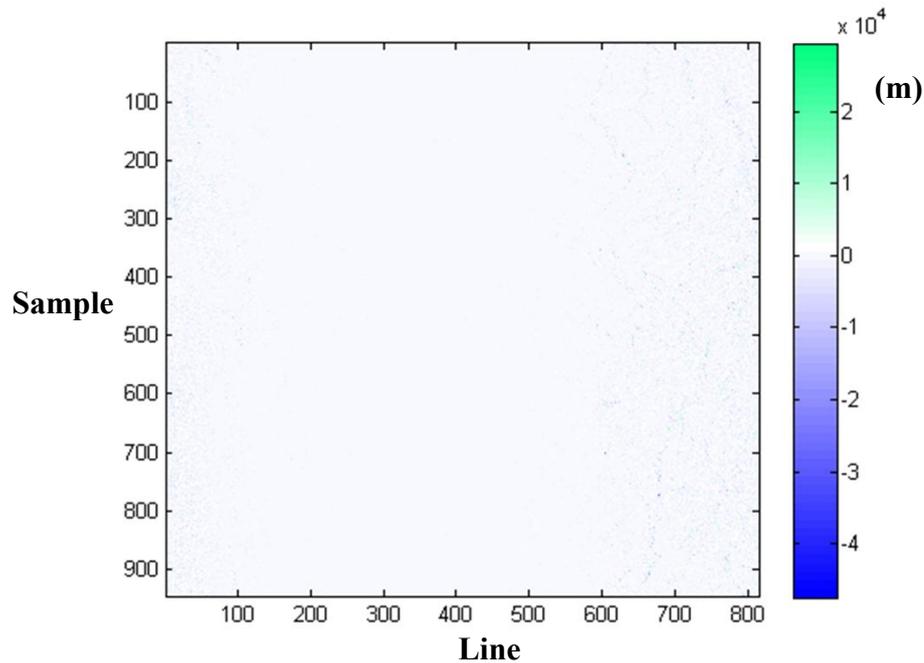


圖 6.31 DInSAR 之干涉圖(040131_080524_081115)

由於清境、廬山地區幾乎皆為山區（高程約 1100 m），由於多植被與地形崎嶇複雜等因素，造成該地區利用雷達差分干涉技術偵測變遷的可行性降低（由同調性圖即可看出）。再加上辛樂克颱風來襲，造成水災之後期影像之淤積後含水量、水土保持工程及植被復原情形等地表環境改變，使得此兩幅同調性低、造成干涉條紋不明顯，致變遷結果成效不佳。但若排除以上因素所造成之影響，其技術應用於沿海平地區域的變遷偵測成果將會是可靠的，故本團隊另外選擇 1999 年 9 月 21 日台灣中部發生的 921 大地震來進行測試，一方面可做測繪領域應用之探討，另一方面可與前人所做的研究相互驗證。

6.3.2 921 地震變遷成果分析

6.3.2.1 實驗影像

921 地震發生於 1999 年 9 月 21 日，震央在南投魚池地震站西南方 7.0 km，也就是位於台灣南投縣集集鎮，震源深度 8.0 km，芮氏規模達 7.3，此次地震是因車籠埔斷層的錯動，並在地表造成長達 80 km 的破裂帶。

本研究使用四軌跡法，選擇 921 地震的前後 1999 年 5 月 6 日（地震前）與 1999 年 10 月 28 日（地震後）的兩幅 ERS-2 影像作為變形對，並將 1996 年 3 月 6 日之 ERS-1 與 1996 年 3 月 7 日 ERS-2 資料產製之 DTM 作為地形對。研究範圍以中台灣之整幅影像（範圍約 100 km × 100 km）為測試對象，軌道編號為 #232(Track)&3123(Frame)，位置示意圖如圖 6.32。

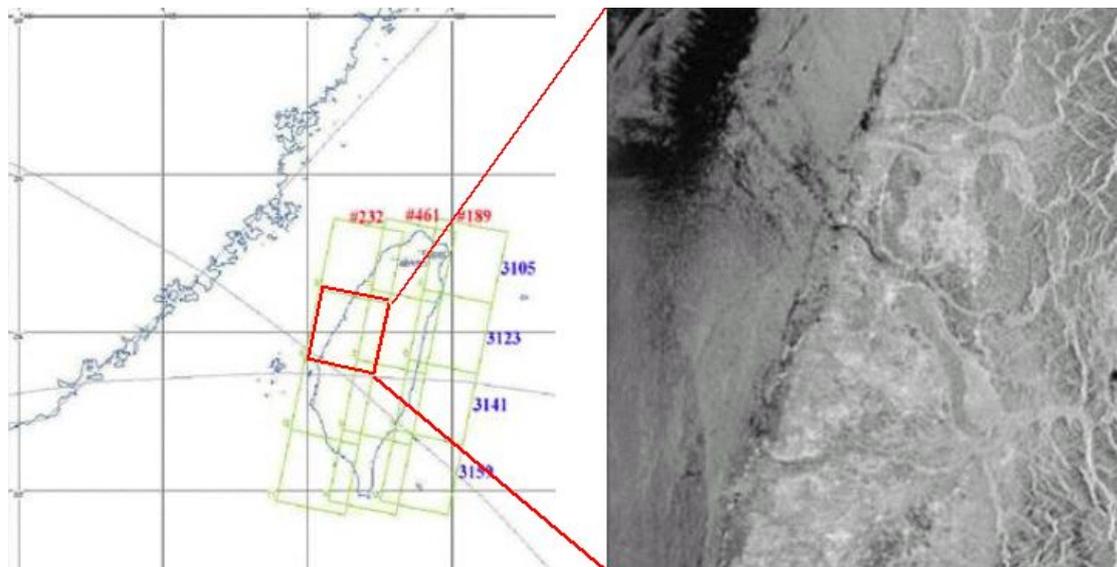


圖 6.32 研究區（軌道編號為 #232&3123）之雷達影像圖

6.3.2.2 成果展現

(1) 同調性圖

在產生干涉圖之前可以藉由同調性圖來評估製作的可行性，當同調性係數趨近於 1 時，表示具高品質之同調性。由圖 6.33 可知，地形對的同調性圖除了海洋區域的同調性較低外，其它地區包含山區的同調性皆大於 0.3；而變形對的同調性圖則是僅僅於平原（50 m 內）中有良好的同調性存在。

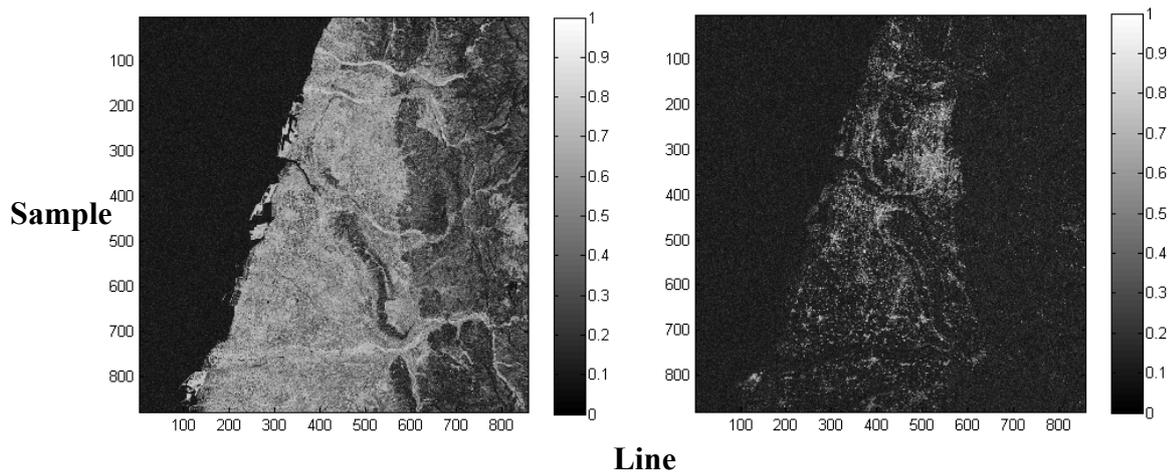


圖 6.33 同調性圖(960306_960307 & 990506_991028)

(2) 產生初步干涉圖

當兩組複數影像相乘後即可得到地形對與變形對之相位差，如圖 6.34，由圖 6.34 中可看出中間區域形成干涉條紋，此即為 921 地震所得到的初步干涉環。

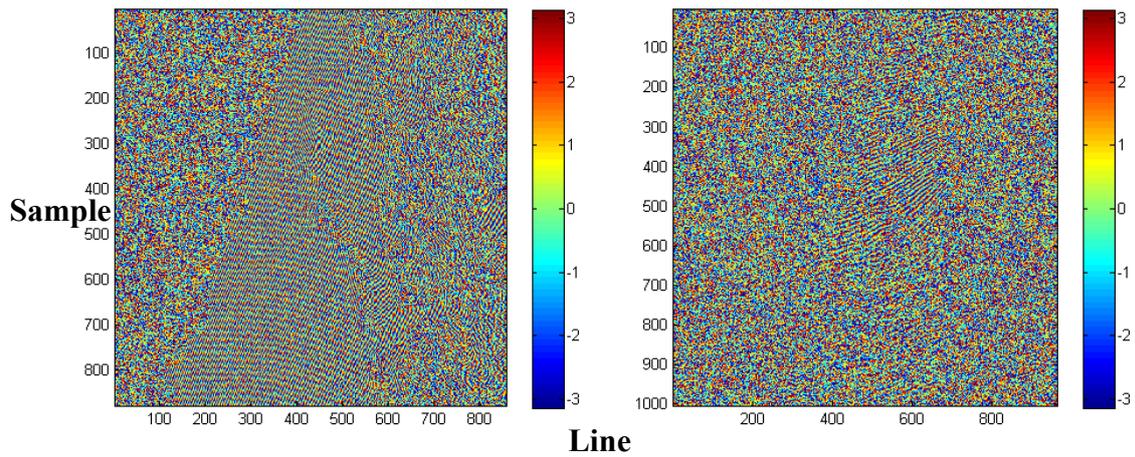


圖 6.34 初步干涉圖(960306_960307 & 990506_991028)

(3)軌道改正後干涉圖

初步干涉圖因尚有許多誤差，其中包含了來自地球曲率之因素的偏移量，故利用橢球模式來修正此一誤差，修正後的干涉圖如圖 6.35。

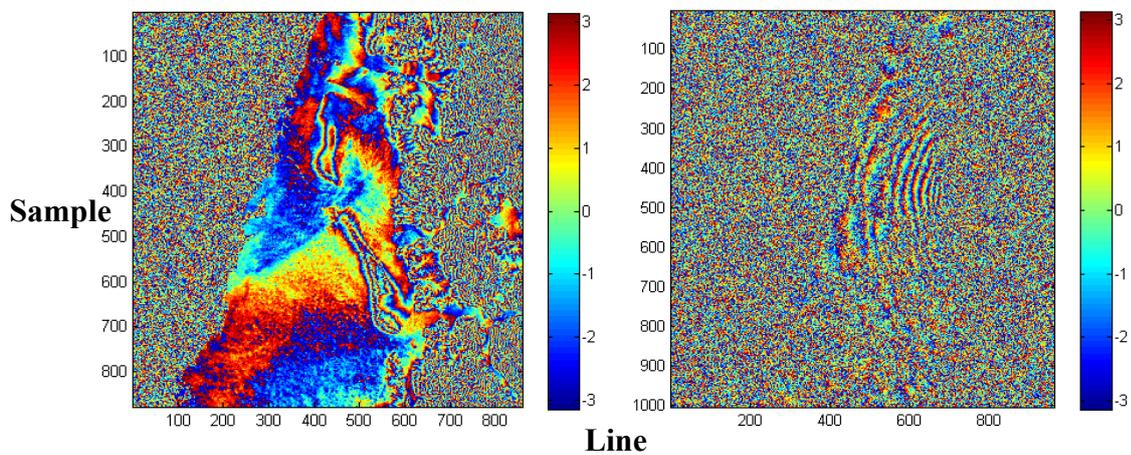


圖 6.35 地球曲率改正干涉圖 (960306_960307 & 990506_991028)

(4)變遷結果

將地形對進行全相位回復並與變形對之干涉圖進行差分處理，即可得到兩組影像對的變遷成果，如圖 6.36。圖中干涉條紋代表地面位移量

投影在雷達視距方向的變形量，而圖右邊因山區植被茂盛，並且變動量很大，導致因地震前後地表變化太大，而產生低相關的情況，缺乏有效的干涉成果，所以沒有明顯的干涉條紋產生。最後將變遷成果套疊於斷層帶上(由國立中央大學應用地質研究所工程地質與防災科技研究室提供台灣活斷層分布圖，網址 <http://140.115.123.45/DEMO.HTM>)，如圖 6.37。由圖 6.37 可以發現，所顯示的條紋變動量即為集集地震的地表變化情形，由於干涉環的結果就是高程值(變形量)的函式值，且由圖中可看出干涉條紋與斷層帶的走勢相符，表示其地表高程(變形量)的值就會相近，如果想知道實際的數據，就將兩幅干涉圖直接計算至實際數值即可，其變化量每條干涉條紋為 $5.6/2=2.8$ cm (波長的一半)，所以走勢相符，就表示形狀相似，結果一定相似(僅差在干涉條紋的數量，即波長一半的倍數)。

由於實驗原規劃要將 e-GPS 之長期追蹤站資料做為地真資訊來做為定量檢核比較之用，但因 e-GPS 啟用的時間為 2005 年，這與 921 地震時期的 1999 年相隔甚遠，故無法以 e-GPS 資料作為比較對象。雖然本研究目前未能做定量分析，但由本團隊共同主持人謝嘉聲博士論文中 921 大地震的實驗結果，曾與余水倍老師的 GPS 值進行比較，驗證了 DInSAR 技術用於變遷分析之成果面[謝嘉聲, 2006]。

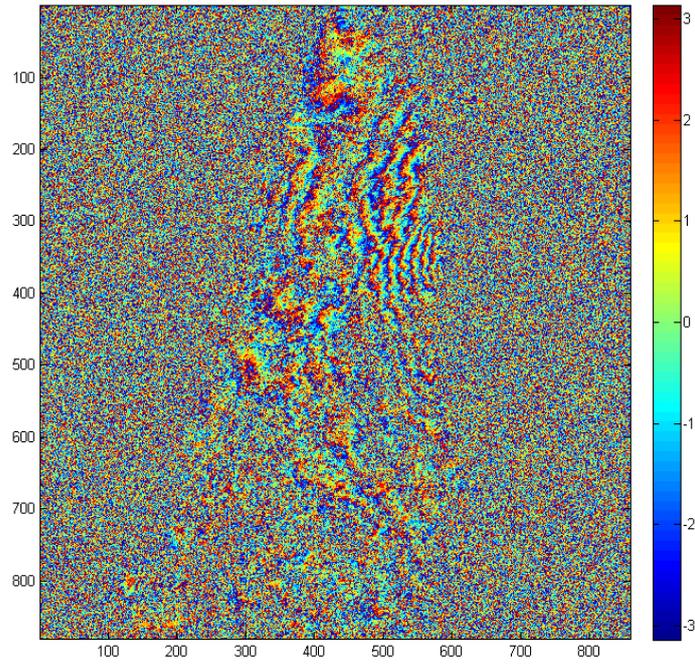


圖 6.36 變遷干涉圖(960306_960307 & 990506_991028)

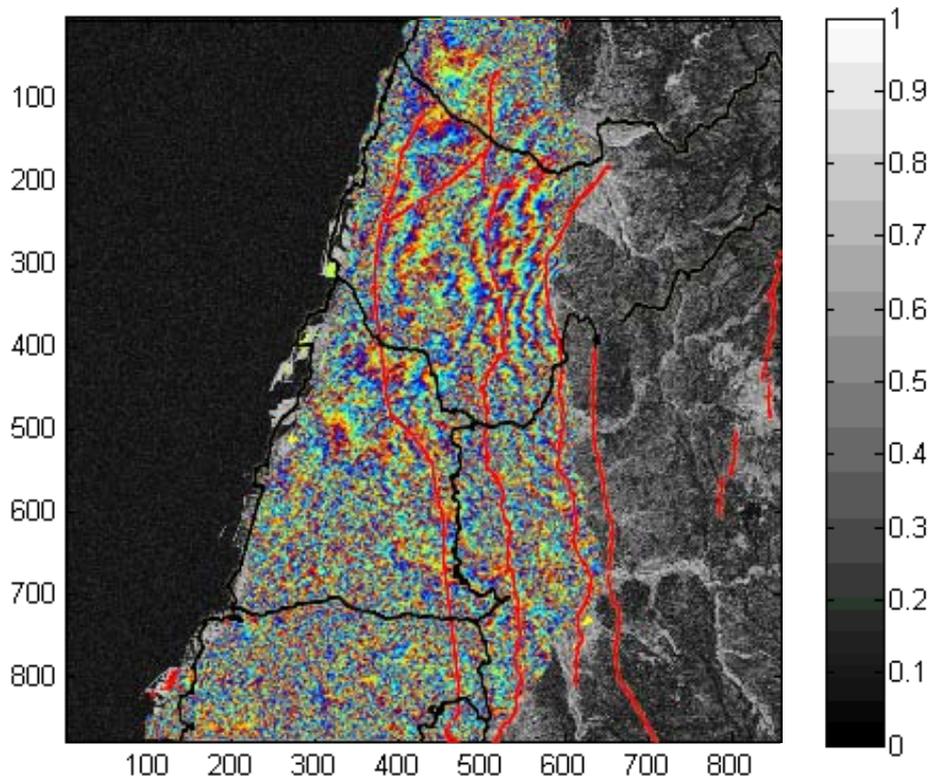


圖 6.37 變遷成果與斷層帶套疊圖(960306_960307 & 990506_991028)

此外本團隊利用 Diapason 商用軟體得到了變遷研究的部分成果，使用方法為二軌跡法，即先以現有之 DEM 來當做地形對，並利用兩張 SAR 影像做為變形對（分別為 1999 年 5 月 6 日至 1999 年 12 月 2 日共 7 幅之雷達影像，如表 6.7），最後將變形對移除地形對之地表資訊即得到該區之地表變形量。因 7 幅影像中 921 前有 4 幅影像，921 後有 3 幅影像，故共有 12 種組合，每種組合都做測試，但以 99/05/06&99/09/23 與 99/07/15&99/10/28 兩種組合之影像對成果較佳，故以下僅針對上述兩種組合影像對之初步干涉圖及經地形效應改正後干涉圖分別展示，如圖 6.38 ~ 6.41。由經地形改正後之干涉環中可看出集集地震之地表變化情形，與 DORIS 所得到的干涉環相呼應，表示 DORIS 與 Diapason 商用軟體所得到成果相符。

至於 Diapason 選擇使用二軌跡法，主要原因是 Diapason 為法國人所研發，法國學者認為二軌跡法做變遷研究效果最佳，故 Diapason 軟體僅選擇 DTM 做為地形對之二軌跡法來設計，並無其它三軌跡法及四軌跡法之選項。

表 6.7 Diapason 變遷研究所使用之 SAR 影像表

DESCW INSAR listing Track: 232 Frame: 3123						
Mission	Date	Orbit	$B_{//}$	B_{\perp}	Delta Days	Doppler
E2	990506	21128	0	0	0	99.9
E2	990610	21629	-118	-403	35	99.9
E2	990715	22130	-88	-246	70	99.9
E2	990819	22631	320	783	105	99.9
E2	990923	23132	53	213	140	99.9
E2	991028	23633	-37	-6	175	99.9
E2	991202	24134	-494	-1109	210	99.9

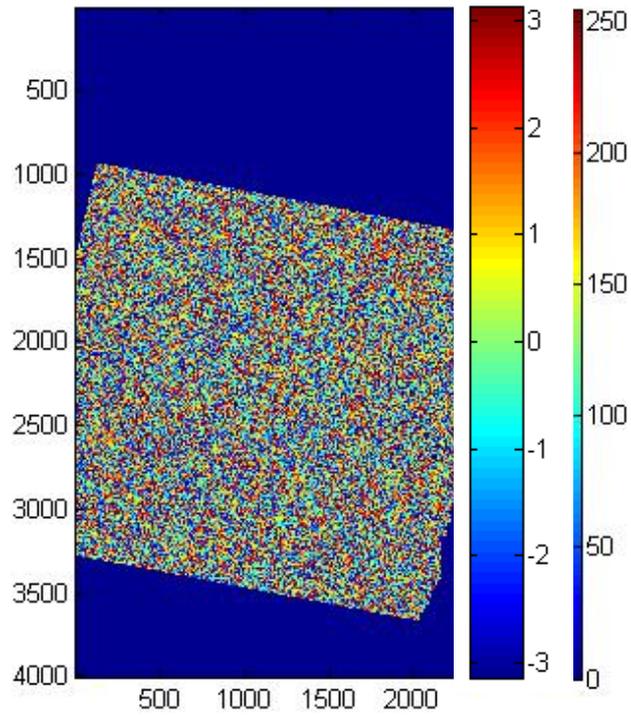


圖 6.38 初步干涉圖(99/05/06_99/09/23)

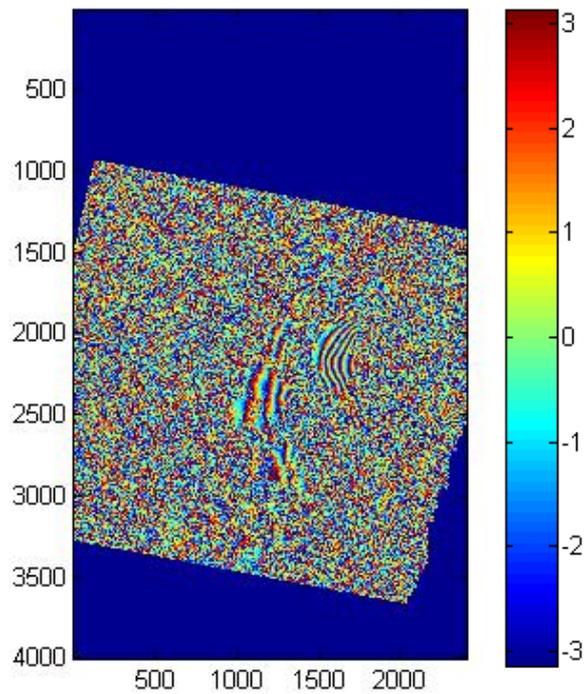


圖 6.39 經地形效應改正後之干涉圖(99/05/06_99/09/23)

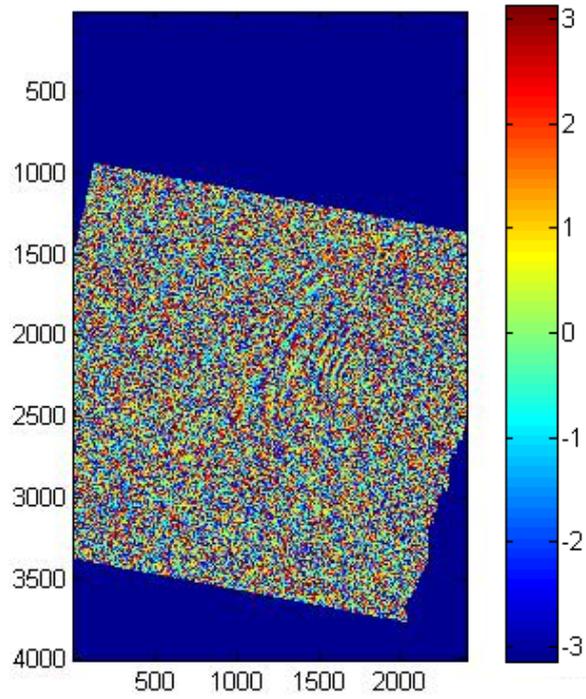


圖 6.40 初步干涉圖(99/07/15_99/10/28)

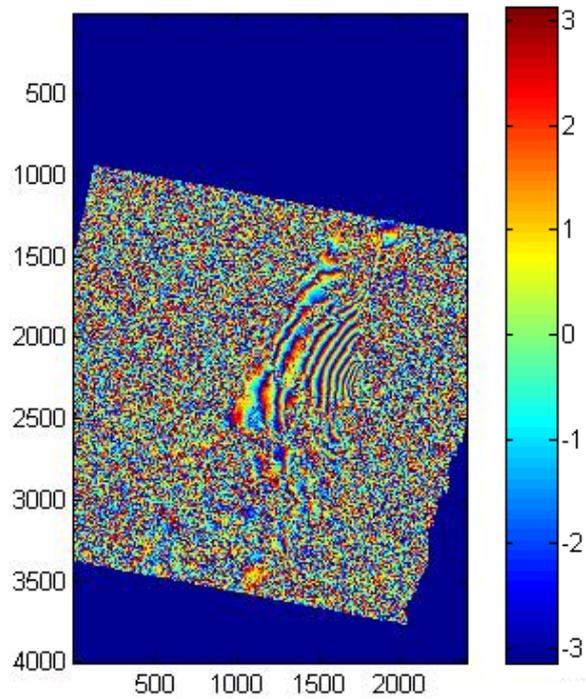


圖 6.41 經地形效應改正後之干涉圖(99/07/15_99/10/28)

以上由清境、廬山地區變遷成果可知，因該區多山、多植被，造成同

調性低，干涉效果不佳；而由 921 大地震之變遷成果則驗證了 DInSAR 技術之可行性。由以上兩個實驗可知，變遷成果仍以平地區可得到較佳的成果，而在高程較高地區，因無法具有良好的同調性，且雷達影像中點位明顯較少，故利用 DInSAR 技術獲取高精度的變形量有其先天上的限制。

由以上說明，DInSAR 技術獲取高精度的變形量有其先天上的限制，在此提出一個解決之道，即永久散射體雷達干涉測量法 (PSInSAR)。由於在實驗的過程中，會有很多幅 SAR 影像因為包含了較多的低同調性區域（如多植被等），而使得整幅 SAR 影像被捨棄，但是這種情況對於那些沒有被植被覆蓋的地方而言是很可惜的。故 PSInSAR 技術就是想利用那些有著高同調性的區域（指的是該像元於影像前後期擁有特別強烈的反射訊號），來偵測變化量，使得過去因包含較多低同調性像元而被捨棄的 SAR 影像得以應用於變遷偵測。以下將介紹 PSInSAR 之原理、步驟與相關成果。

6.4 PSInSAR 原理、步驟與成果

6.4.1 原理與步驟

根據各項研究結果顯示，PSInSAR 的方法可以有效的偵測出地表變形量，其中永久散射體可以利用影像同調性(Coherence)或影像振幅(Amplitude)等資料進行挑選，如果點位挑選不當，則會產生很大的誤差，因此如何在多時的雷達影像上，有效的挑選出正確的永久散射體並計算其變形量，為目前雷達干涉技術偵測正確地表變形的關鍵技術。

因為台灣位於亞熱帶地區，植被濃密且生長速度快，加上氣候變化大，易降低獲取影像間的相關性，影響干涉的處理結果，因此本研究選擇採用永久散射體的方式來進行雷達干涉處理。以永久散射體雷達干涉技術偵測地表變形的研究，目前在台灣地區仍未有較佳的結果產生，因此本研究探討永久散射體的選擇方法，進而研發或選擇有效的固定散射體選擇機制，以建立有效的處理方法，進而能快速、正確的偵測出地表變形量。

永久散射體(PS)技術首先由 Ferretti 等人提出[Ferretti *et al.*, 2001]，主要是利用像元內有明顯且固定的散射訊號如橋樑及建物等當作最大的主要訊號源，該類像元在時間序列的影像中有足夠穩定的訊號來提供分析的資訊。圖 6.42(a)表示當地面沒 PS 的時候，反射訊號是沒有規律的；圖 6.42(b)則是代表有一個 PS 在地面時，其訊號就可以有一致的特性。根據同一區域鄰近像元環境條件相類似的假設，在後續分析中，就可以利用這些永久散射的點位資訊進行雜訊的濾除，進而推算出在時間序列中不同時間點 PS 點相位及高程的變化。

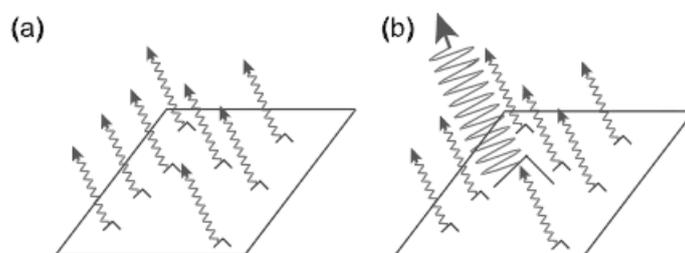


圖 6.42 永久散射體示意圖

因此，在雷達影像的成像過程中，一個解析像元(Resolution Element)所反映訊號是由該像元範圍內所有散射訊號的平均值，因此像元內大量雜訊會影響影像相位值及振幅值的結果（形成訊號或破壞訊號）。在傳統處理的方法中，植生密集區不易產生干涉影像的原因。主要是因為 SAR 影像中每一個像元都包含數個地面點，這個像元的值是來自這些地面點的平均值，若這塊地面區域是由植被構成，由於雷達訊號反射到植被後是散射，故沒有一定的方向性而使得這個像元會被當作是雜訊。而當這個地面區域中有包含明顯的散射體，則會因為有一個明顯且強烈的反射訊號而導致這個像元的平均值具有一個特定的方向性。利用這個特性，就可以從影像中挑出有效的像元。

PSInSAR 之處理步驟如下：

1. 組成序列差分干涉圖

在 N+1 幅影像中，選擇一幅主影像(Master Image)，形成干涉效果最好的 N 幅影像對。

2. 選擇穩定點位目標

計算像幅內所有的像元點，建立 PS 候選點位。

3. 萃取地表的線性變形及 DTM 殘差

利用時間基線(Temporal Baseline)及空間垂直基線，並依假定的線性變形量及 DTM 殘差估計值，建立測試區的地表變形模式

(Deformation Model)；並將不同假定之地表變形模式與原始干涉圖進行比較，以獲得最佳地表變形模式，即可得到每一個永久散射體像元所萃取之地表線性變形量及 DTM 殘差值。

4. 萃取非線性的變形量及大氣效應

原始干涉圖扣除最佳地表變形模式後，可得因為大氣效應造成之非線性變化量，該變化量可利用時間及空間濾波器獲得排除該變化量之數值。

5. 獲得因時間變化產生地表的變形量

整合線性及非線性的變化量，得到最終地表的變形量。

以上 1~4 項所述之任何一個步驟都會影響干涉結果的精度，因此要確保各項步驟都在可控制的範圍之內，才能產生良好的干涉結果。

6.4.2 實驗成果

6.4.2.1 實驗影像

因為永久散射點的不隨時間劇變特性，使得過去許多不良的雷達影像對得以製作出優良的成果。本研究選擇 ERS-2 降交軌道（軌道編號為 #232(Track)&3141(Frame)，如圖 6.43），測試區則選擇在彰化、台南地區，測試影像從 1996 年 3 月至 1999 年 12 月間原本共有 20 多幅影像，但與主影像（選擇為 1996/03/06 之 ERS-1 影像）進行配對並計算垂直基線長度後，

將垂直基線長度大於 1,500 m 以上之影像對剔除，最後僅餘 10 幅影像（所有影像資訊如表 6.8）。並從中標定 6 × 6 km 的彰化都會區影像進行處理，期望找到影像間的永久散射點資訊，藉而得到良好的變遷資訊。在過去的影像系列中，很大部分地區因為鄰近區域的植被茂盛因素而被捨棄（如圖 6.43 紅色框）。

由以上 10 幅影像對之干涉圖中可以看出，僅有一組影像對 (96/0306&96/03/07) 可以製作出良好的變形對，故本實驗主要是要說明應用 PS-InSAR 技術可以使得原本不能製作出良好的變形對的影像對也可以製作出變形資訊，也就是說若是可以及時得到雷達影像資料，就可以製作出變形資訊。

表 6.8 PSInSAR 使用的影像資訊

垂直基線長(m)	影像日期	間隔時間(天)
-65.6	960307	1
-158.6	981112	981
-973.2	981217	1016
-172.8	990121	1051
-892.9	990401	1121
-76.5	990506	1156
-484.4	990610	1191
-329.3	990715	1226
-79.9	991028	1331
-1200.1	991202	1366

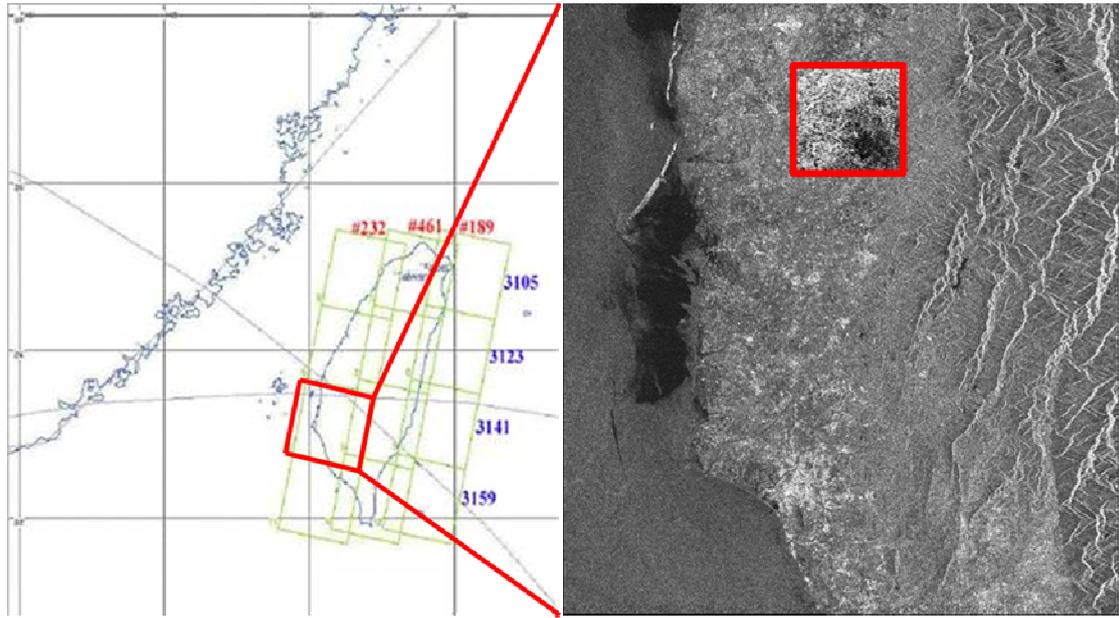


圖 6.43 研究區（軌道編號為 #232&3141）之雷達影像圖

6.4.2.2 成果展現

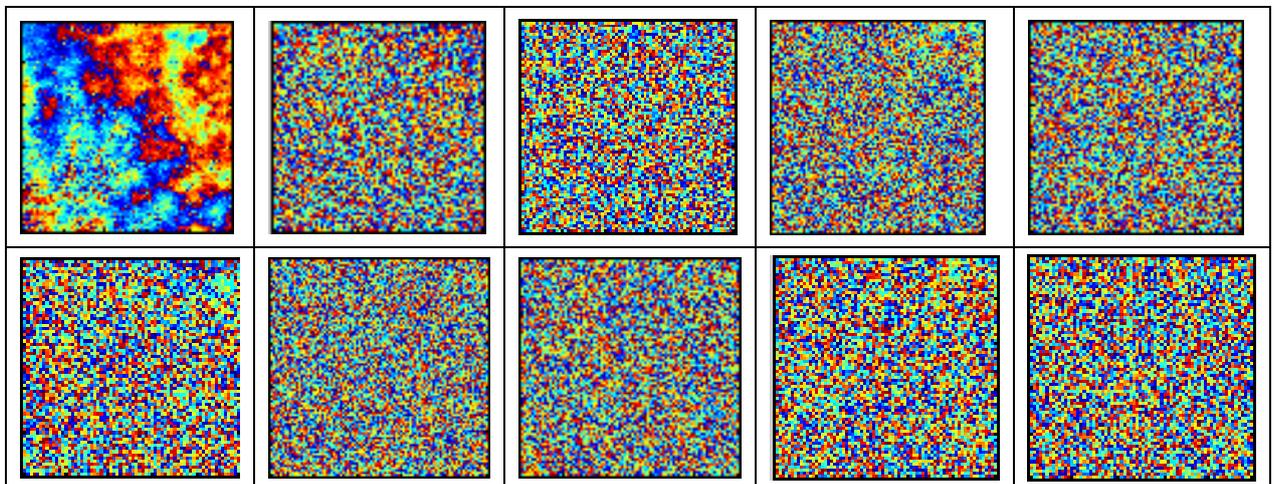


圖 6.44 各時期影像與主影像的相位變化

圖 6.44 表示主影像與其餘 10 幅影像之間的同調性。同時為了找到永久
 散射體，將從這幾幅連續的影像中找到其影像對於主影像之同調性數值皆
 高於 0.3 的點，這些點都有可能是永久散射點，故在這一個步驟挑選出來的

點又被稱為永久散射體的候選點。在這個步驟中共找到了 282 個候選點，其分布的情況如圖 6.45。

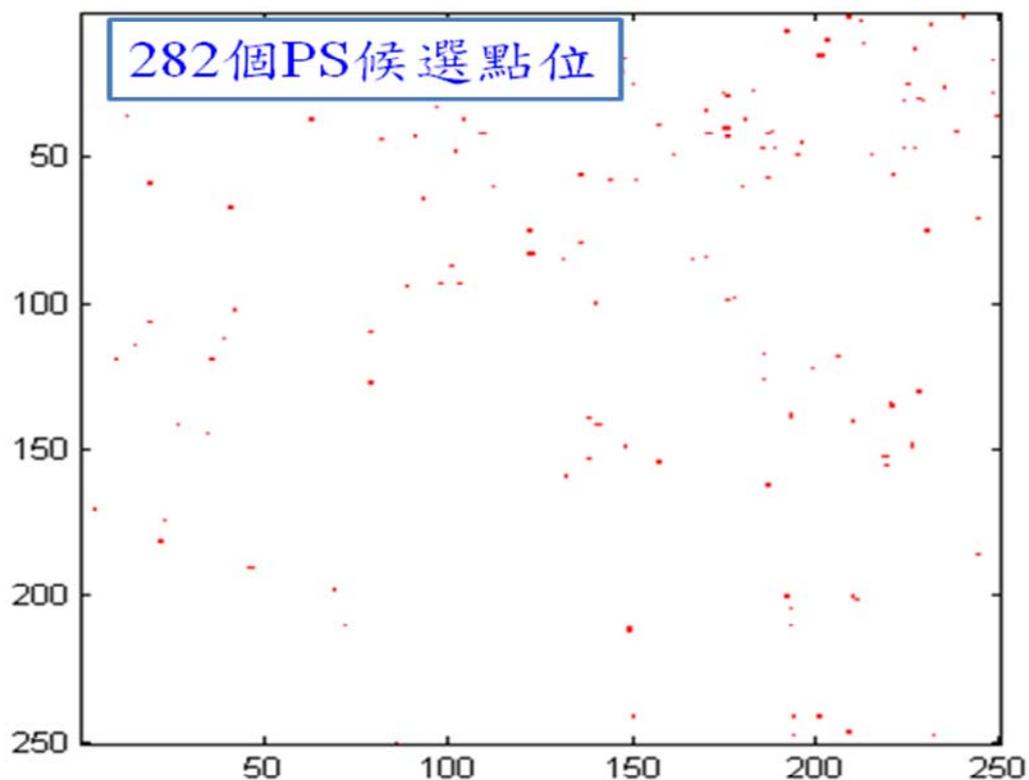


圖 6.45 永久散射體的候選點分布圖

由於永久散射體的分布是極為離散的，故必須要將它們之間建立關聯性，最簡單的關聯性建立方式，就是採用三角網。而這個方法也是在 SNAPHU 的全相位方回復方式推出之前的主流方式。圖 6.46 就是其架構的 Denaunay 三角網網形。

建立完網形架構後，計算每一個三角形點與點之間的相位回復值，並利用地面觀測網型平差的觀念，將起始粗差較大的點位先行移除後再加以

計算，然後再利用條件式剔除掉所有不合理的點，剩下的點就是永久散射體的確定點。本團隊已自行開發程式，將大氣效應及地形效應的模型同時考量套用，經計算後就可以得到這幾幅圖的年變形量，如圖 6.47。

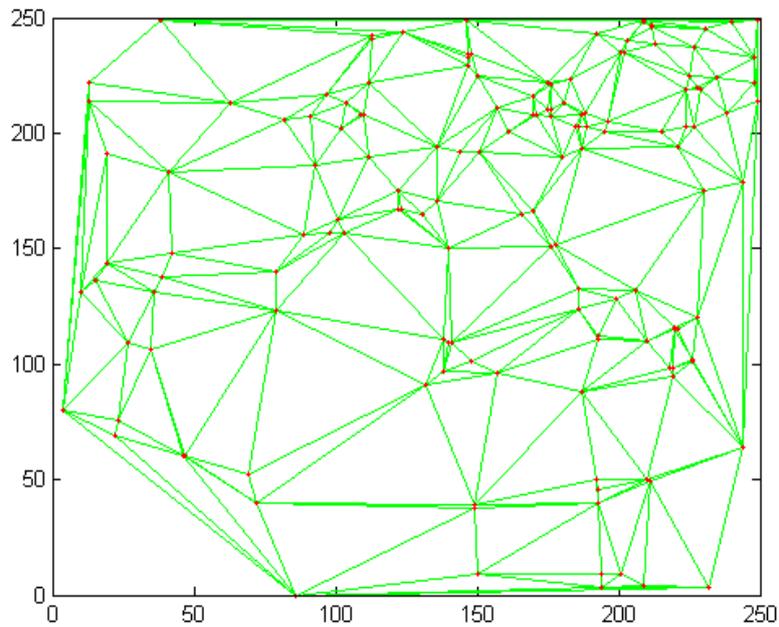


圖 6.46 建立的 Delaunay 三角網網形

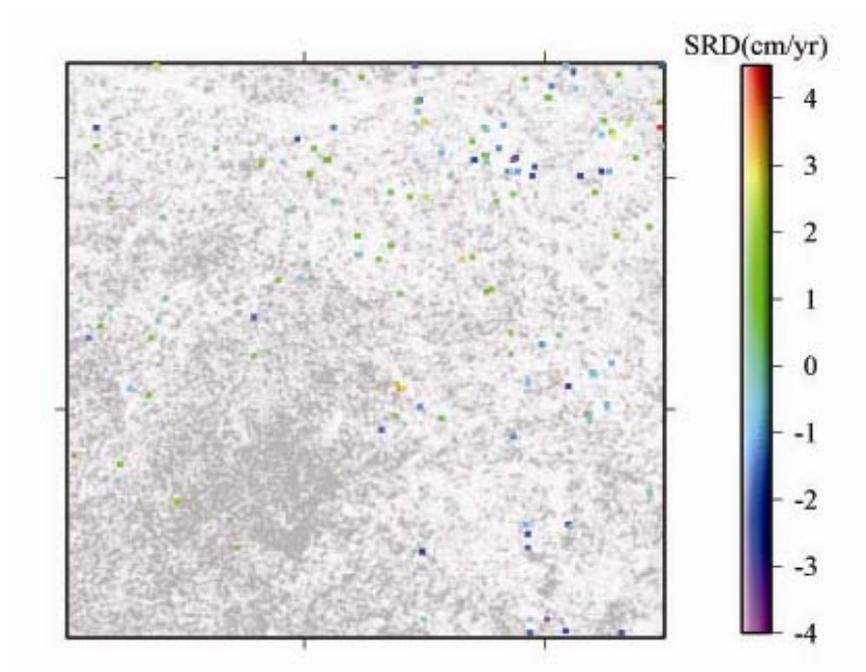


圖 6.47 PS 變遷成果之年變化量

經剔除所有不合理的 PS 候選點後，最後剩下 147 個 PS 點，點位的平均密度大約為 4.1 PS/km²。依 Colesanti 及 Hooper 等人的研究而言，在一般干涉圖中都看不出任何訊息（條紋）的情形下，每平方公里產生 3~4 個 PS 點已可接受 [Colesanti *et al.*, 2003; Hooper *et al.*, 2004]。且本實驗區含有植被，此時有這樣的數據結果更屬難得。

6.5 綜合分析：

由以上之 DTM 產製及變遷分析（含 PSInSAR）之成果及本團對執行本案的過程中，部分議題分析如下：

- 一、將 6.2 節 DTM 產製(InSAR)所使用測試影像相關資料統一整理，包含 6 組 ERS 影像配對及 11 組 ENVISAT 影像配對，詳細資訊如表 6.9。

表 6.9 DTM 產製(InSAR)所使用測試影像相關資料一覽表

測試影像與地區	主 影 像	副 影 像	B_{\perp} (m)	備 註
ERS-1/2 影像 台中彰化地區	960306	960307	62.8	ERS 影像共選擇 6 組配對，考量時間間隔越短，同調性越佳之優勢，故最後選擇以 ERS-1/2 影像做為展示案例（如紅色標註）。
	990506	991028	-19.5	
ERS-2 影像 彰化台南地區	990306	960307	-66	
	960306	990506	-75	
	990506	991028	-21.5	
	990710	991028	-253.3	

ENVISAT 影像 台中彰化地區	070419	070524	-67.2	ENVISAT 影像共選擇 11 組配對影像，並律 定基線在 50 ~ 300 m 之間配對共有 5 組， 最後以成果較佳之配 對做為展示案例（如 紅色標註）。
	070906	071115	64.8	
	071115	071220	-494.6	
	071115	080612	-94.2	
	071115	080717	-42.7	
	071115	080821	-211.5	
	071115	080925	-333.5	
	071220	080717	479.7	
	080612	080717	83.3	
	080717	080821	-180.2	
	080717	080925	-310.8	

二、將 6.3 ~ 6.4 節變遷分析（含 DInSAR）所使用測試影像相關資料統一整理，包含約 60 幅 ERS 影像進行配對，詳細資訊如表 6.10。

三、由各項測試結果可知，DTM 產製在平地及地勢較低之丘陵區（約 100 m 以內，精度可達 m）效果非常好，是可考慮以衛載雷達干涉測量來進行更新，但地勢較高之丘陵區（100 ~ 300 m，精度約 10 ~ 20 m）及山區（500 m 以上，精度低於 50 m）因地形較為複雜，且多植被覆蓋，故不易產生干涉條紋，DTM 產製實屬不易。而變遷分析亦同，於平地之變遷偵測是可行的，地勢較高之丘陵區及山區未來可以 PSInSAR

技術增加 PS 點以提升變遷分析精度。

表 6.10 變遷分析（含 DInSAR）所使用測試影像相關資料一覽表

測試地區	使用到的影像				備註
清境 廬山 地區	混和測試並尋找適當的像對				1. 共選擇 47 幅 ERS-2 影像進行配對，最後選擇符合合約內容最近時間之影像配對做為展示案例（如紅色標註）。 2. 使用軟體為 DORIS，使用方法為三軌跡法。
	031122	050219	060520	080105	
	031227	050326	061007	080209	
	040131	050430	061111	080315	
	040306	050604	070120	080419	
	040410	050709	070331	080524	
	040515	050917	070505	080628	
	040619	051022	070609	081011	
	040724	051126	070714	081115	
	041002	051231	070818	081220	
	041106	060204	070922	090124	
	041211	060311	071027	090718	
050115	060415	071201			
921 大地 震台 中集 集地 區	地形對		變形對（混和測試並尋找適當的像對）		1. 地形對直接選擇時間間隔僅差 1 天之影像，變形對則選擇主影像 8 幅、副影像 3 幅進行組合配對，最後以成果較佳之配對做為展示案例（如紅色標註）。 2. 使用軟體為 DORIS，使用方法為四軌跡法。
	主影像	副影像	主影像	副影像	
	990306	990307	990121 990401 981112 981217 990506 990610 990715 990819	990923 991028 991202	

921 大地 震台 中集 集地 區	地形對	變形對		1. 現有 DTM 當做地形對，變形對則選擇 12 組配對（921 前有 4 幅影像，921 後有 3 幅影像），最後以成果較佳之配對做為展示案例(如紅色標註)。 2. 使用軟體為 Diapason，使用方法為二軌跡法。
	採用 Diapason 內定的 SRTM 3" DTM (約 90 m × 90 m 網格資料)	990506	990923	
	990506	991028		
	990506	991202		
	990610	990923		
	990610	991028		
	990610	991202		
	990715	990923		
	990715	991028		
	990715	991202		
	990819	990923		
	990819	991028		
	990819	991202		

四、當所選取影像對的基線值太長時，鄰近像元的相位值變化可能超過 2π ，會引起全相位回復計算的誤差；若選擇的基線太短時，則因幾何結構不佳，對地形變化的靈敏度較差。因此基線長度是形成干涉條件的重要限制因素。本案目前所選擇影像配對之基線，在 InSAR 產製 DTM 方面是符合參考值 300 m 以內，而 DInSAR 變遷偵測之配對基線卻無法符合參考值 70 m 以內。但以本團隊的測試結果來看，文獻所提供之基線適用值僅能做參考，實際處理中，基線長度並不是影響成果好壞的重要關鍵（如基線較短並不保證成果較佳，基線較長亦不保證成果較差），將視個案實際之處理成果而定。

五、同調性為進行干涉處理的重要指標，任何的擾動都會使得重覆軌道的資料之間失去同調性，故選擇影像對時儘可能以重訪週期短及其季節性相同之影像為主要考量，使其同調性高，後續干涉處理才可能有較佳之成果。

六、如果影像獲得時間的大氣分布相當均勻，其影響量是可以忽略的，但若大氣的分布為不均勻或前後取樣時間的大氣條件差別太大，就必須將大氣的影響效應剔除。且大氣會影響訊號折射效果，導致像元在套合處理時產生誤差，會產生相位的差異，故未來研究應考量大氣效應的影響量。

七、干涉處理過程中每個步驟的作業要求需相當嚴格，如有些微的疏忽，就會影響結果甚鉅。因此要確保處理過程的正確，才能獲得良好的精度。處理過程中影響結果最大的就是全相位回復[Zebker and Lu, 1998]，因為計算回復值都是整數的波數值，所以只要處理過程有誤，產生的誤差量將影響全幅影像。目前本案已仔細檢視每項流程，並考量最佳參數設定等，以確保每項流程均能合乎規範。但因軟體之參數實在太多，如有時間可針對不同的目的、需求或演算法進行不同的測試，以達更正確有效的成果。

八、入射角可能是導致同調性不佳的原因，可以幾個層面來做探討：

(1)兩幅影像空間基線過長時，因入射角差異過大會改變一個像元內的回波

訊號，而使影像相關性降低；且使得兩幅影像無法完全重合，對後續影像套何影響甚鉅（因套合不佳，同調性即不佳，影響最後干涉品質）。

(2)當地表特徵改變時，其入射角亦會隨之改變，因而影響回波的量(amplitude)與值(phase)，對影像同調性會有相當的影響

(3)當地物特徵為平坦地時，入射角約等於視角，視角不同會引起都普勒頻率的差異，而使影像相關性降低。

(4)在距離方向，由近距到遠距，地面像元的入射角是逐漸增大的，入射角越大，則變形越大，相對於垂直位移的敏感性也越大。

(5)由於入射角的關係，InSAR 技術對高程資訊特別敏感，以 ERS 雷達衛星影像產生的干涉圖中，每一條干涉環代表了 2.8 公分相對於衛星入射角的變形。

由以上說明可知，兩幅影像之入射角將會影響影像的同調性，故為得到較佳之干涉結果，兩幅影像的入射角應儘可能相同，以確保干涉品質。

九、由 6.2 ~ 6.4 各項測試案例，將 DTM 產製、變遷分析之相關成果與限制條件等資料綜合說明如表 6.11。

表 6.11 DTM 產製及變遷分析之相關成果與限制條件一覽表

工作項目	成	果	限	制	條	件
DTM 產製	台中彰化地區因使		1. 時間上之一致性：重複軌道之雷達			

(InSAR)	<p>用相隔一天之 Tandem 影像，同調性最佳，故在平地得到較佳之成果 (RMSE 達 m 級)，但在丘陵及山區(高程約 200 m 以上)仍無法達到較佳成果。</p>	<p>干涉需維持兩張 SAR 影像之反射訊號不變，故短週期之重複軌道量測，較能滿足此一要求，特別是對植物生長區而言。</p> <p>2. 空間上之一致性：對 SAR 訊號之入射角，兩攝影位置最好能接近，一般而言，很難在長基線(大於 600 m)維持此一要求，最合適的基線長建議在 50 m 至 150 m 之間。</p>
變遷分析(1) (DInSAR)	<p>1. 清境、廬山因高程較高(約 1,100 m)，且多植被覆蓋，無法得到具體成果。</p> <p>2. 921 大地震測試 ERS 及 ENVISAT 影像，其干涉環與前人發表文獻及與 Diapason 商用軟體進行比較，斷層帶走勢相符。</p>	<p>1. 無論使用二軌跡、三軌跡或四軌跡法，所選擇之地形對需相當準確。</p> <p>2. 變形對需選擇跨越發生事件時間點之兩幅影像。</p> <p>3. 差分干涉成果與基線長短有相當重要關係，基線越短(約 30 ~ 70 m)將可偵測越高精度的高程差。</p>
彰化、台南 變遷分析(2) (PSInSAR)	<p>1. 由 282 個 PS 候選點，剔除不合理點位後，得到 147 個 PS 點，點位的平均密度約為 4.1 PS/km²，最後經計算就可以得到起迄影像之年變形量。</p> <p>2. 使原本不能製作出良好變形對的影像對也可以製作出變形資訊。</p>	<p>1. 至少須 30 ~ 40 幅影像先行測試(越多越好)，並剔除大於臨界基線(一般取 1,500 m)以上之影像，使最後仍保有 20 ~ 30 幅影像進行測試，主要目的是要能夠保證選取 PS 點的可靠性，同時也能保證演算法的收斂性和結果的準確性。</p> <p>2. 考慮到大氣相位模型的有效性，一般 PS 處理只局限於較小的區域。</p> <p>3. 在地表斜距視線方向變化不確定的情況下，地表變化很難用一個變化模型來描述，特別是線性模型有相當大的局限性。</p>

除了以上分析之外，本案之測試案例皆使用 2001 年以前之 ERS 影像，最主要是由於 DEOS 已於 2008 年 1 月之後不提供精密星曆資料，以致於嚴重影響干涉成果品質，其原因探討如下：

- 一、 由於 ERS 系列衛星最早配備有 3 個陀螺儀以用來確定衛星的姿態角，所以 ERS2 衛星影像對可以精確的利用都普勒頻率來計算干涉對。但自從 2000 年 2 月後，其中一顆陀螺儀損壞，造成 ERS2 的都普勒中心定位精度比以往來的差，在這段時期 ESA 有提出其他備用模式來修正失去陀螺儀後的成果，但由於模式效用太差，正式使用時造成達近 $\pm 10^\circ$ 的誤差。
- 二、 都普勒頻率中心可以達到 $\pm 9000\text{Hz}$ ，在形成雷達影像時，不同的都普勒頻率中心會造成不同的幾何，也就是說，兩張影像是否能具備足夠的同調性，這與兩張的都普勒頻率差距大小有關。一般正常在處理原始資料時，都會把兩張影像處理成相同的都普勒頻率中心，但由於這段時期的誤差可達到 $\pm 9000\text{Hz}$ ，所以 ERS2 很難用以形成干涉像對。
- 三、 直到 2001 年 6 月才進入到所謂的零陀螺儀(Zero Gyroscope Mode, ZGM)以及到 2002 年 3 月的零陀螺儀偏角控制(ZGM-Yaw Control Mode)時期，此時期的誤差可控制在 $\pm 5^\circ$ 內，以及最重要的是普勒頻率中心誤差可控制在 $\pm 4500\text{ Hz}$ 內，並且有比較精確的普勒頻計算。不過很遺憾的是，都普勒頻率中心的 $\pm 4500\text{ Hz}$ 的差距還是讓使用者

在選擇影像做干涉上受到很大的限制。

四、 DEOS 組織在提供星曆上有參考上述的條件，所以一開始的星曆是從 1995 年 4 月提供到 2003 年 8 月，但由於後期的影像星曆誤差小於軌道中心的誤差，故暫停提供其精密星曆資料改以有任務才提供其精密星曆。之後因 ENVISAT 衛星要與 ERS-2 進行前後軌道觀測模式，所以開始提供 ERS-2 的精密星曆資料（自 2001 年 12 月直到 2008 年 1 月為止）。

雖然 DEOS 組織自 2008 年 2 月已不再釋出精密星曆，但歐洲的 Doris(Doppler orbitography and radiopositioning integrated from space)計畫已在衛星上架設特殊的反射裝置，並藉由世界各地所佈設地面站之觀測值，以修正衛星軌道的位置。自從該計畫啟用之後，星曆之精度大幅上升，而 DEOS 組織在經過 2007 年的評估後，發現釋出的精密星曆與 Doris 計畫啟用後之星曆資料精度相當，故自 2008 年 2 月以後已不再釋出精密星曆。

故目前使用 ERS-2 影像資料時，可利用 Doris 計畫所提供之星曆資料進行改正，但必需使用人工方式將資料替換掉原本的星曆資訊（詳細取得方式如 <http://www.avisioceanobs.com/en/doris/index.html>）。如無法取得或使用 Doris 星曆資料，則只能依賴精度較差之廣播星曆或利用地面控制點來反求衛星軌道參數。

第七章 利用 InSAR 辦理 DTM 之產製及輔助現有資料進行局部更新 新的產能、作業經費、人力需求及利用 DInSAR 快速偵測 地表顯著變動區域等規劃報告

7.1 衛載式 InSAR 於 DTM 產製及輔助更新之應用—應用 InSAR 技術辦理 DTM 更新可行作法評估、作業流程設計及更新頻率探討。

7.1.1 DTM 更新可行作法評估

DTM 更新之先決條件應為精度在可接受之範圍內始有其更新之意義，故如何在合理條件下提升 DTM 產製之精度，為本團隊努力達成之目標，可行性作法評估如下：

一、增進基線的精度

當所選取影像對的基線值太長時，鄰近像元的相位值變化可能超過 2π ，會引起全相位回復計算的誤差；若選擇的基線太短時，則因幾何結構不佳，對地形變化的靈敏度較差。因此基線長度是形成干涉條件的重要限制因素。增進基線精度的方法如下：

(一) 利用地面控制點精進基線值。

即利用影像內的控制點來計算衛星的外方位參數，計算的方法很多，如督卜勒斜距法、影像幾何轉換法等[謝嘉聲，2006]，可選擇其中一種計算方法來獲得，進而求出相關參數值。但此法必須確認明確的點位位置，也必須具備地面的點位坐標。如所選擇的方法同時考量地面控制點點位之精度、密度等條件，進而推估基

線精進之程度，將不失為良好的研究題材。

(二) 利用 DTM 精進基線值。

當缺乏精密軌道資料時，可利用現有 DTM 配合相關的成像幾何參數形成模擬干涉圖，並比較真實干涉圖及模擬干涉圖間之差異，以迭代的方法來逐步修正各幾何參數，當套合結果正確時，就可以獲得相關基線值[Seymour and Cumming, 1996]。

二、移除大氣效應

為求精確獲得地表變形量，了解大氣效應對干涉的影響進而消除之，已是必備之處理工作，藉由日益精進的技術、更密集的 GPS 網站及更多的大氣資料蒐集，配合精進大氣模式的修正，使大氣效應對干涉的影響能有效偵測，必能達到精進干涉技術的結果。有以下三種方法來移除。

(一) 利用 GPS 資料移除大氣效應。

(二) 利用氣象資料移除大氣效應。

(三) 以堆疊的方法移除大氣效應。

依目前所處理之經驗，平地部分已可達到一定之精度，丘陵地如能依上述方法提升 DTM 之精度，則更新 DTM 將是可行的；而山區因多山、多植被，由國內、外文獻及目前處理的經驗（如第六章之 DTM 產製及變遷分析之測試案例）將無法產製精度較高之 DTM，本案已初步探討雷達干涉於 DTM 產製之高程分界，區分平地及地勢較低之丘陵區（約 100 m 以內，精

度可達 m)、地勢較高之丘陵區 (100 ~ 300 m, 精度約 10 ~ 20 m) 及山區 (500 m 以上, 精度低於 50 m) 三種等級, 提供未來 DTM 應用之參考。另因 DTM 產製精度與衛星影像之解析力有關, 以 ERS 系列影像而言, 因解析度約 20 m, 故 DTM 之精度最佳成果應可達到 20 m 以內 (但仍需視該區高程而定), 若需達到更高之 DTM 精度, 應選擇解析力較高的衛星雷達影像 (如 ALOS), 或空載雷達影像。

7.1.2 作業流程設計

DTM 產製之作業流程已於第五章 5.1-5.6 詳細說明, 主要包含基線計算、影像套合、產生初步干涉圖、地球曲率改正、全相位回復、相位轉高程、坐標定位及最後 DTM 生成等, 流程圖如圖 7.1。

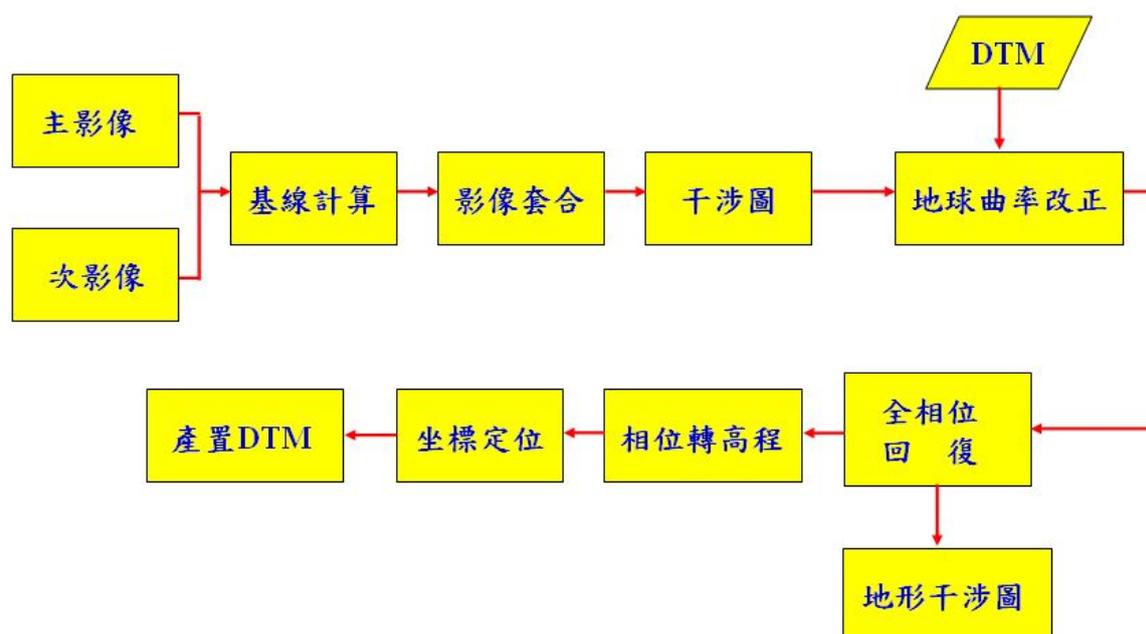


圖 7.1 DTM 產製流程图

7.1.3 更新頻率探討

本團隊依實際執行 DTM 產製之經驗，更新頻率建議如下：

一、一般情況：考量地形變動狀況、成本效益、單位（主管）需求等，如每年更新乙次 DTM 則無太大意義，且增加成本；又如時間太長（8~10 年）才更新 DTM 則忽略了細微累積之變形量，相關單位如要利用舊有數據資料進行規劃或決策，可能造成資源浪費或做出錯誤判斷（因與最新資料會有出入），以下分兩個方面來探討：

(一)DTM 產製時間：以 InSAR 技術產製 DTM 之時間非常快速，只要選擇適當影像對約 12 個小時即可完成一幅影像，但困難在於適當良好品質之影像對無法立即獲得（影像配對基線儘可能小於 100 m），且重訪週期為 35 天（以 ERS 為例），至少要 2 個月才能獲得同一區域影像。

(二)DTM 產製成本：假設軟體及人力費用暫不考慮情況下，僅考量影像數量購置費用。以 ERS 為例，全台灣須 3 個 Frame 及 3 個 Track 共 9 幅影像才能涵蓋，如每幅影像區域選擇 4 幅影像進行配對（共 6 種組合），則共需 36 幅影像，每幅影像以 12,000 元計算，共需 432,000 元。

除以上說明之外，DTM 更新後尚須進行細部修編工作，將更增添額外經費。但如純以影像購置費用 432,000 元做為考量，並以每年平均

購置 10 萬元影像費用來看，建議 DTM 產製以 4-5 年更新乙次較為適切（實際情況仍以貴單位自行考量決定），但如知悉其他單位已規劃近幾年內將更新 DTM，則貴單位可彈性調整 DTM 更新之頻率。另建議每年須編列年度預算定期採購若干幅雷達衛星影像（以 ERS-2、ENVISAT 影像為例，35 天重返週期，每年可採購同一地區約 10 幅影像），當累積影像數量後，除可做 DTM 產製及地層下陷變化量之研究外，單位內部亦可自行逐月、逐年與其它計畫所得到的 DTM 進行比較。

二、突發之天災人禍：因天然災害（如地震、颱風）或人為疏失造成地表嚴重變形，則應立即採購若干幅雷達衛星影像（建議 9 幅左右，將於 7.2 節中說明），對該區大範圍之地形變化做一初步瞭解並分析（即立即更新發生地形變化之區域），以供相關單位或決策者做為指揮、判斷及復原之參考依據。

7.2 InSAR 於變遷分析應用—研析利用 InSAR 偵測地表顯著變動區域之作業經費、效益，以及適用此方法之地形、地貌。

7.2.1 作業經費規劃

一、影像費用

因進行 InSAR(DInSAR)處理，要找到適合之配對影像相當不易，通常要先以軌道資料計算基線長度（垂直基線長度），往往測試之影像數量龐大，無法定出確切之影像需求數量。以本團隊實際執行之研究經驗，將針

對變遷分析估計較為適當之配對影像數量，首先針對雷達衛星之單幅影像之價格查詢如下：

(1) ERS-1/2

ERS-1/2 三種標準產品 Raw、SLC 與 PRI 資料，其價格統一如下：

教育學術及政府機構 (約 100 km × 100 km) NT\$8,500

私人機構 (約 100 km × 100 km) NT\$12,750

(2) ENVISAT/ASAR

教育學術及政府機構 (約 100 km × 100 km) NT\$25,000

私人機構 (約 100 km × 100 km) NT\$25,000

(3) ALOS/PALSAR

教育學術及政府機構 (約 70 km × 70 km) NT\$12,000

私人機構 (約 70 km × 70 km) NT\$12,000

(4) RADARSAT-1/2(約 50 km × 50 km ~ 500 km × 500 km)：

Fine Level (8 m 解析力，50 km × 50 km)

Standard Level (25 m 解析力，100 km × 100 km)

ScanSAR Wide Level (100 m 解析力，500 km × 500 km)

每種 Level 價格皆相同，約美金 4,000 元，折合台幣約 120,000 元。

(5) JERS-1/2(約 75 km × 75 km)：日幣 60,000 元，折合台幣約 12,000 元。

由以上各雷達衛星之價格來看，平均單幅影像約台幣 12,000 ~ 16,000 元左右 (除 RADARSAT 120,000 元、ENVISAT 2,5000 元較貴之外)，採購

影像大部分涵蓋範圍為 50 km × 50 km ~ 100 km × 100 km，為方便後續規劃說明，單幅影像之價格皆以 12,000 元計算。

其次將針對地表變遷（含 PSInSAR）研究，簡述所需使用之影像數量及價格。

（一）地表變遷研究：

使用差分干涉雷達得到地表變形量的方法，如使用二軌跡法需 2 幅影像、三軌跡法需 3 幅影像、四軌跡法需 4 幅影像。而最主要的關鍵在於地形對選擇一定要準確，因配對影像需考量適當之基線長度，故需對影像對進行不斷的測試，如以四軌跡法為例，建議至少採購同一系列影像約 5 幅（即有 10 種組合）做為地形對，進行配對計算後，可得到最佳之基線組成，即以此最佳基線配對（或次佳基線配對）進行地形對的干涉處理；而變形對則需跨越地表變化之時間點，故建議至少採購同一系列離地表變化前後最近的各 2 幅影像，即由此 4 種組合中所得到的最佳配對進行變形對的干涉處理。如此先由 5 幅影像中選擇最佳之配對影像做為地形對，再選擇跨越地表變化之適當配對影像做為變形對，即可進行地表變遷研究。故以上合計 9 幅影像，則需花費 108,000 元。

（二）PSInSAR 變遷研究：

依目前蒐集之相關文獻所述，進行 PS 變遷研究至少約需 20-30 幅影像，所得到的成果才會較佳[Ferretti *et al.*, 2001]，且實際進行影像配對時尚需剔除基線過長（通常為 1,500 m 以上）之影像對，故建議以 30 幅影像進行 PS 研究，則需花費 360,000 元。

二、軟體費用

目前軟體分商用套裝軟體及免費套裝軟件兩種，商用套裝軟體（如 Diapason）乙套約 50 萬元，另需加入每年合約授權費 20 萬元，且如版本升級亦須配合提升版本，又要額外付費，算是一項比較大的投資，操作人員僅需具備相關背景知識即可較容易訓練及操作，但無法明瞭其中之關鍵技術；而免費套裝軟件（如 DORIS、ROI_pac）可由網站免費下載更新，完全不用花費，但操作人員需具備 InSAR 專業知識，及軟件的操作流程，必需花費較多時間之訓練才能了解熟悉。但此套裝軟件為模組化設計，每一步驟的輸出即為下一步驟的輸入，各研究團隊可針對其專業部分自行撰寫程式，以取代某一步驟之模組化軟件，除可了解 InSAR 的內部涵義外，亦可與套裝軟件所產生之結果做一比較。

三、人力費用

不論使用商用套裝軟體或免費套裝軟件，InSAR(DInSAR)所得到的成果必須要進行成果評估，也就是要與可信賴的資料進行比對。對干涉技術

而言，所需花費的人力費用不外乎控制點的選取及高程測量（GPS 或水準測量）等外業工作。其步驟為先於影像中選取明顯建物轉角或道路交叉口等較亮點位作為候選控制點，再配合相片基本圖或高解析力光學影像輔助，以確定最後決定之控制點（依經驗至少 10 點以上）。接著就必須至該點位進行高程測量。初步規劃人力必須有總負責人乙人，顧問乙人，下設 2-3 組實際參與組（視該區大小而定），並設組長各乙人，每組編有 3-4 個測量員，負責測量工作。以上人力規劃如由貴單位人員組成，則完全不需人事費用，僅需實際外業工作人員之差旅費；如人力規劃由貴單位人員及納編部分外聘人員所組成，則將支付外聘人員之人事費用（工資至少每日以 1,000 元計算）。

綜上所述，如軟體費用及人事費用暫不考量之情況下，所需花費之項目僅影像採購費用（價格已於前述說明）。如以測繪領域而言，InSAR 相關研究應以長遠永續為考量，除每年編列經費採購雷達影像外，亦應訂定方案鼓勵測繪人士大量投入 InSAR 研究行列。

7.2.2 效益

干涉雷達測量之優勢就是成本較低、且可大範圍獲取連續的 DTM 與地表變形量，對衛載數據而言，資料可定期取得，對突發的地表變形狀況（如地震、土石流）將可得到快速偵測結果，對精度要求不高之需求單位是相

當有利的。以本案所得到的雷達干涉成果（ERS 系列影像），在 DTM 產製方面：平坦地區及地勢較低之丘陵區（100 m 以內）可得到精度較佳之 DTM，應可更新 40 m × 40 m 之網格式 DTM。在遙測科技突飛猛進之際，如此精度應無法滿足實際需求者之要求，故最佳解決方式就是發展空載雷達干涉計畫。另在地表變遷方面：在 921 大地震之測試案例中所得到的變遷成果中可看出，其變化量與地殼斷層面的走勢是趨於一致的，雖然尚未做定量上之分析，但與商用軟體 Diapason 所得到的干涉成果是類似的，表示 DORIS 只要參數設定適當且正確，其可與商用軟體的成果相符，同時由文獻中可知利用雷達干涉進行變遷偵測，其精度可達 cm 等級，故此技術之應用潛力是無窮的。

7.2.3 適用地區

目前由國內、外文獻期刊所得到高精度的雷達干涉成果，地區均選擇較為平坦區域，或僅針對平坦區進行分析。故針對台灣多山、多植被地區而言，使用雷達干涉技術實不利於台灣地區之變遷分析。實務上，利用雷達干涉技術於變遷分析之適用地區，以本案測試結果來看，在地勢平坦地區所得到的地表變形精度較佳，是可考慮以衛載雷達干涉測量來進行處理，而最不適用的地區為地形複雜（或破碎）且多植被覆蓋地區，不易產生干涉條紋。另在適合之衛載雷達影像選擇方面，因影像間之同調性為干涉條紋是否生成的重要指標，為使兩配對影像之干擾最小、同調最高，應

選擇重訪週期較短之衛星影像，故以普遍性、方便性及價格方面綜合考量，建議以 ENVISAT 影像做為長期研究或投資的對象較為適合，適用影像分析表如表 7.1。

說明如下：分重訪週期、價格、波長、解析力、採購時效、DORIS 可讀取之格式、精密星曆有無等方面分別評比及配分，總分最高者即為最適用之影像。

(1)價格：除 RADARSAT 影像 120,000 元及 ENVISAT 影像 2,5000 元價格較貴外，其於影像皆在 12,000 ~ 16,000 元之間，價格越便宜，使用者越有能力採構，故 RADARSAT 及 ENVISAT 較貴配 1 分，餘以 15,000 元分界，價格在 15,000 元以下之影像配 3 分，以上者 (15,000~25,000 元) 則配 2 分。

(2)重訪週期面：原則上重訪周期越短，地物地貌變化量越少，同調性應較佳，故依此原則配分，RADARSAT 配 3 分、ERS-2、ENVISAT 各配 2 分、ALOS、JERS-2 各配 1 分。

(3)波長：波長越長其穿透性越佳，故 ALOS、JERS-2 之波長較長配 2 分、而 ERS-2、ENVISAT、RADARSAT 各配 1 分。

(4)解析度：解析度越高，影像越清晰，越容易辨識地物，故 ALOS、RADARSAT 解析度較高配 3 分，JERS-2 次之配 2 分，ERS-2、ENVISAT 則各配 1 分。

(5)採購時效：以 ERS 最快速，ENVISAT 次之，餘較慢或狀況不明，故 ERS-2

配 3 分、ENVISAT 配 2 分，ALOS、RADARSAT、JERS-2 各配 1 分。

(6)DORIS 可讀取之格式：目前 DORIS 可讀取之影像格式包含 ERS、

ENVISAT 等影像，ALOS、RADARSAT 影像於 DORIS 手冊中亦可載

明可讀取其格式，但實際上狀況仍有待釐清，故 ERS-2、ENVISAT 各

配 3 分，ALOS、RADARSAT 各配 2 分，JERS-2 配 1 分。

(7)有無精密星曆：原則上，衛星皆可取得精密星曆資料（目前除 ERS-2 自

2008 年 2 月後暫不提供），但因網站公布時間並不明確，只能隨時至網

站查閱。故除 ERS-2 配 1 分外，其餘影像皆配 2 分。

由以上配分基準可得各影像之總分：ERS 影像 14 分、ENVISAT 影像 12 分、ALOS 影像 14 分、RADARSAT 影像 13 分、JERS-2 影像 11 分。故以 ERS 及 ALOS 影像總分最高，RADARSAT 影像次之，理應以上述三種影像做為優先選擇的對象。但因 ERS-2 目前暫不提供精密星曆（但可直接使用廣播星曆或以現有 DTM 及控制點來精進軌道精度之方式自行研究取代），ALOS 委請中央大學代訂約需 2~3 個星期，RADARSAT 國內目前無代訂機構，需使用者自行與代理商接觸採購（或直接與衛星國家機關聯繫），更不具時效。故以價格、時效、公用（商用）軟體皆可處理等方面綜合分析考量下，且總分並無差距太大，初步建議以 ERS 搭配 ENVISAT 影像做為長期投資及研究的對象，可能是現階段較適合選擇之影像。

表 7.1 適用影像分析表 (括弧內為配分)

影像	ERS-2	ENVISAT	ALOS	RADARSAT	JERS-2
價格(元)	12750	25000	12000	120000	16000
重訪周期	35	35	46	24	44
波長	5.6 cm	5.6 cm	19 cm	5.6 cm	19 cm
解析度	20 m	20 m	最佳 7 m	最佳 3m	18 m
採購時效	1 天	3~5 天	15~20 天	不明	不明
DORIS 可 讀取格式	可	可	不明	不明	不明
有無精密 星曆	無	有	有	有	有
總分	14	12	14	13	11

第八章 InSAR 於測繪領域應用之策略報告

8.1 概述

測繪領域基本上就是一門關於地球空間資訊的學域，傳統的測繪受到地面測量技術、時空尺度和精度水準的侷限，其產品主要是單一的地形圖。它不能反映（至少不能及時反映）地球表面形態的變化，特別是大範圍及全球的變化。

現代測繪工程的核心技術是空間技術，包括遙感探測(Remote Sensing; RS)、衛星定位測量(Global Positioning System; GPS)、地理資訊系統(Geographic Information System; GIS)及光達雷射掃瞄技術(Light Detection And Ranging; LiDAR)。測繪的範圍擴展到整個近地空間，其支撐技術是快速發展的資訊技術，主要處理的對象是電磁波及影像資訊，再加入通訊、電腦網路等資訊技術，使地球空間資訊的理論和技術比傳統的測繪有了很大的發展與更新。

在全球性的觀測中，各種對地觀測新技術已能連續快速獲取地球表面（或淺層）隨時間變化的幾何及物理資訊，以瞭解地球上各種現象及其變化。因此當前測繪領域，或說空間資訊領域則應當利用3S（RS、GPS、GIS）技術結合其他技術（如InSAR、衛星重力探測技術等）對地進行觀測，為建構數位地球提供描述地球動態變化的地理資訊產品。

InSAR是一種應用於測繪及遙感且極具潛力的雷達遙感新技術，它是SAR成像與電磁波干涉兩大技術結合的結果。其觀念是藉由兩幅天線同時觀測（單軌雙天線模式）或兩次平行觀測（重複軌道模式），來獲取同一地區的重複觀測資料（複數影像對），提取同一目標對應的兩個回波信號間的相位差，結合觀測平台的軌道資料提取高程資訊，即可獲得高精度、高解析度的地面高程資訊。在InSAR基礎上進一步發展了差分合成孔徑雷達干涉技術（Differential InSAR; DInSAR），利用此技術可以精密測定地表的微小變形，精度可達 cm 級甚至 mm 級。由於InSAR(DInSAR)不受天候限制，並可高精度進行大範圍的對地觀測，且已廣泛應用在不同的領域層面，目前已成為提取高精度DTM的重要工具之一。

8.2 應用

InSAR(DInSAR)技術於測繪領域之應用層面相當廣泛，舉凡地震監測、滑波崩塌及土石流監測、地物地貌分類、地形坡度測量、工程變形監測、海流測量、火山災害監測及冰川冰原監測等，皆屬測繪領域之範疇。以下分別略述之。

一、地震探測

由於地震引起地面上規模大且輪廓清楚的裂縫，因此用雷達干涉技術來探測地震的同震位移；而干涉圖包含了所有同震及部分餘震變形，可提

供距離向的變化等值線圖，且用地震前後的干涉測量數據能快速、精確的提取地震同震位移訊息。Massonnet 等人結合ERS-1數據及地形訊息推導了干涉圖，其測量結果與地面調查測得的位移一致，將所得結果與地面調查比較，距離向測量精度在 4 cm 範圍內[Massonnet *et al.*, 1993]。Zebker 等人利用1994年的ERS-1 SAR數據開展了Landers地震同震位移的研究，驗證了使用地震前後的干涉測量數據能快速、精確的提取地震同震未移之訊息[Zebker *et al.*, 1993]。Peltzer等人模擬變形的簡單情形，推導所得干涉條紋的方向可以產生關於局部位移梯度方向的訊息，其空間分布是條紋強度的一種量度[Peltzer *et al.*, 1996]。

二、滑坡崩塌與土石流監測

滑坡或土石流崩塌有其特殊的分布與演化的規律，正確的了解這些規律，並掌握它們的發展趨勢，對於滑坡崩塌與土石流等災害監測實有重大的意義。在許多傳統的方法（如大地測量或GPS）都可解決計算得到這些災害的變化量，但以雷達干涉測量最具潛力，

Kimura及Yamaguchi用SAR干涉技術在日本北部Yamagata Prefecture地區探測一個活動滑坡，得到了較佳的成果。從1994~1996年間，日本JERS-1的L波段SAR衛星以44天之重訪週期採集了20多幅覆蓋該活動滑坡區域的雷達影像，滑坡體約 1 km 寬（南北向）及 2 km 長（東西向），呈矩形分布，透過野外調查和SPOT HRV影像的地質攝影測量確定了主要滑坡地段

的大致範圍[Kimura and Yamaguchi, 2000]。

由以上說明可知，利用此技術可快速得到該區之各種相位干涉圖（如曲率改正後、全相位回復及差分干涉圖），如與實際災後之地表變化量進行比對驗證，其變化量方向與地形走勢趨於一致，且量化結果皆可達到一定精度，證明雷達干涉技術用於滑坡崩塌與土石流監測是可行的。

三、地物地貌分類

雷達干涉測量對於地物地貌進行分類是一個很有前景的方法，因為除了前後兩次獲取時間差的時相變化外，干涉圖提供了地表特性及雷達訊號的訊息，對地物地貌之分類方面是有助益的；Askne及Hagberg應用了1992年早期在瑞典南部的一個地區從ERS-1數據上得到的干涉圖，並對此進行了驗證：對分類目的而言，基線長度是影響分類的重要因素，但短基線可能沒有長基線來得適用[Askne and Hagberg, 1992]；Wegmuller等人用干涉測量相關性來探討，其相關性仰賴於波長、雜訊比、距離解析度及獨立觀測次數等雷達系統參數，及干涉測量之基線和入射角等幾何參數有關，按照Wegmuller的說法，干涉測量是地表分類一種很有前景的手段。

四、地形坡度測量

1992年Werner等人就表面坡度估計做了較細緻的工作，由於雷達干涉測量可以從複數影像所得到的干涉圖，直接求得相位梯度，如果知道基線

的幾何關係，則可直接確定地表坡度[Werner, 1992]；Wegmiiller等人未進行全相位回復就得到了地形坡度，且由地形坡度可確定其入射角，可與影像所酬載SAR影像的數據中相互驗證。由於地形坡度可以相位差的近似切平面幾何關係來表示，因而不需要進行全相位回復就可以進行計算，累積的相位梯度可以用來預測全相位回復期間相位在累積過程中的初始值[Wegmiiller *et al.*, 2000]。

五、火山災害監測

由於雷達干涉測量可以得到DTM及地表的變化量，則火山災害監測研究也是有潛力的，如火山熔岩流所引起的災害及火山型態、火山坡面狀況、熔岩流的厚度、寬度及火山邊緣的外形及其最深處峽谷的分布等，這些特徵在該區地形圖上是不明顯的，但藉由雷達干涉測量則可得到一定精度之觀測及判釋。

Evans等人使用了1991年7月在冰島Hecla火山獲取的TOPSAR數據，此研究表明SAR干涉測量對研究火山熔岩流引起的災害及火山型態較明顯的作用[Evans *et al.*, 1992]。由於干涉SAR有高的解析度和垂直向精度，因此Mark和Garbeil觀察到義大利Somma山邊緣的外形和它側面最深處峽谷的分布，這些特徵在該地區地形圖上是不明顯的[Mark and Garbeil, 1993]。另外DTM也被用來分析火山坡面狀況及熔岩流的厚度及寬度[Hagberg *et al.*, 1993]。

六、冰川冰原監測

冰川及冰原的存在對地球的氣候、海洋及大氣系統具有十分重要的作用。Goldstein等人將SAR干涉測量應用於南極的Russerford冰川垂直向變動，探測極限為 1.5 mm，水平向變動約 4 mm，製圖精度可達到 0.5 km [Goldstein *et al.*, 1993]。另Hartl等人亦於南極附近的一個測試區做研究，假設在數據獲取期間，潮流運動的水平向速度保持不變，可以透過差分干涉測量確定，結果與該區的預測值非常接近，約 5 cm [Hartl *et al.*, 1993]。

由於地形數據是研究冰川、冰原的基礎資料，但大多數的山地冰川都沒能獲取高分辨率的地形圖，故透過雷達干涉測量技術，由干涉的條紋圖中包含了冰流轉動及潮流作用的結果，可提供其流速、潮流之位移及位置。

除了以上之應用外，其他尚包含工程變形監測、海流測量及其它未於本案所提及之應用，皆可以雷達干涉測量技術來得到地表之高程及變化量，這可由國外一些學者之研究得到驗證。

8.3 未來建議之策略方向

近年由於兩岸關係逐漸緩和，兩岸間之學術交流也更加頻繁，大陸測繪人士投入InSAR之研究能量與文獻期刊較多，往往在研討會中發表InSAR相關應用的文章也同樣較多，相較之下，台灣從事InSAR領域研究人員有限（尤其是從事測繪領域研究方面），如何鼓勵測繪領域人員加入InSAR行

列，實有其長遠規劃之需要。本團隊規劃之策略方向主要包含政府部門及學術單位共同研究與發展，相輔相成，為測繪領域開創新的天地。

在政府部門方面，建議必需訂定近、中、長程規劃及階段性目標、發展空載InSAR計畫、建立InSAR領域國際交流及產學合作管道及InSAR領域人才培育體系及管理制度，此外尚包含InSAR技術宣傳普及工作、促進國際InSAR人才交流及與軍方爭取合作關係等，尤期台灣因山坡地過度開發，每逢豪雨或地震等天然災害發生時，造成無可彌補之遺憾，故如何防災也是政府必須同時規劃之方向；而學術單位方面，則建議朝InSAR(DInSAR)基礎理論研究、InSAR與其他技術結合應用及定期舉辦國內外有關InSAR相關議題學術研討會及規劃現階段研究議題為主要策進方向，並積極參與政府機關有關InSAR領域之建教合作案、與國外大學就InSAR領域交換學生等。由以上本團隊所建議之策略方向，將分別針對比較重要項目如「救災防災」、「發展空載InSAR」、「爭取與軍方合作」及「研究議題規劃」等四個面向做說明。

一、救災減災與防災

台灣的主要災害，大部分是由地表的自然作用所引起，因台灣位於颱風路徑要衝，及歐亞大陸板塊和菲律賓海洋板塊的接觸帶上，使得颱風及地震成為威脅台灣地區最嚴重之天然災害。一旦發生嚴重災情，造成生命

財產重大損失，因此面對颱風、水災、地震等天然災害威脅且難以預測之際，更應建立救災防災之救難機制。

天有不測風雲，當發生突發之天然災害時，必須立即獲取災區之衛載光學與雷達影像（或可先與代理商簽年度合約），先利用雷達干涉技術分析災區範圍之地表變形狀況，再與光學影像進行比對判釋，於1天內將初步得到的災害資訊報請相關單位知悉，並召開「XX災區衛星影像分析會議」，將災前與災後之影像分析細部資料，與了解該區之大致狀況及人員生還等情形，以供上層決策之參考依據。

多一分防災準備，少一分災害損失，所以最重要的工作還是要從各種災害的預防、減災、整備、應變、復原重建等層面來推動，故政府部門、民間企業與學術單位應共同合作，建立救災減災與防災機制，建議如后：

- (一)研究和建立重大災害（如地震、風災、土石流）應急階段的災害影響範圍及快速提取與分析等之關鍵技術；
- (二)建立基於高效能空載 SAR 影像和多來源衛星 SAR 影像的災害監測與評估技術模組，並在典型區域進行應用示範，形成相應的技術流程與標準；
- (三)建立重點區域災害風險評估模型；
- (四)形成一套具有高效能空載 SAR 技術的災害應急應用軟體，並與國家災害管理部門的業務運作系統相銜接。

除以上建議外，仍需強化防災體系，落實防災教育，建立防災觀念，預防各種災害發生及提昇防災應變能力，以減輕災害之損失，確保人民身家、性命、財產安全。

二、發展空載InSAR

目前研究人員能使用台灣空載InSAR資料寥寥可數，往往研究InSAR僅能使用衛載重覆軌道資料進行干涉處理。在從事衛載雷達干涉研究時，雖具有涵蓋面積廣、高密集點位、連續式測量、成像時間迅速等優勢，但重覆軌道之配對影像卻無法滿足良好的同調性，以致於無法產生較佳之干涉條紋，如要克服同調性不佳之問題，應發展同時裝置兩個雷達天線系統之空載InSAR計畫，則可對全台灣及附近海域進行偵測，對從事InSAR領域之研究者而言，即多了一份值得研究的數據資料，將可深入去研究台灣的地表高程與變形資料。且同時具有衛載與空載雷達影像資料，可依需求者之目的進行選擇，兩者並可相互比較。

台灣的空載SAR的發展主要來自JPL/NASA的「環太平洋全偏極合成孔徑雷達計畫」：TOPOSAR計畫。在台灣主要是由中央大學負責規劃與接洽。TOPOSAR的機載上裝備有X、C、L、P四個波段的SAR系統，並還可以調整其頻率。在建置DEM的同時還可以順便測試各個波段與頻率對於測區的影像；經過這幾次的測試，發現波長愈大的波段對於台灣地區的觀測

越適合，但由於台灣地下電台嚴重，波長較長的P波段會受到地下電台的訊號影響，因此未來空載SAR系統的發展建議以L波段作為台灣觀測之依據。

TOPOSAR計畫於1988年開始運作，Lou等人首先於1996年公開初始規格如報告書（請參考<airsar.jpl.nasa.gov>），而後系統屢有更替，無法一一列舉，有興趣者可自行深入了解其系統規格。

三、爭取與軍方合作關係

據了解，軍方單位（國安局、電展室）有做SAR方面之研究，且影像也有多種雷達影像，如能爭取與軍方維持建教合作關係，應更能拓展測繪領域，吸引更多人才從事InSAR領域研究。

四、研究議題規劃方向

利用先進之遙測科技，以大尺度高精度之方式，仔細觀測台灣地表每一部分之移動變化，包括空間及時間上之變化，進而推論大地內在及外在作用下之變動行為，建立可預測的台灣地形變動模式。本團隊建議之研究議題如下，可供貴單位發展測繪領域相關計畫之規劃參考。

- (一) 台灣板塊邊界觀測研究；
- (二) GPS連續追蹤站及大地測量方法於地震地質之應用。
- (三) 衛星及空載LiDAR辨識地表斷層帶分布與特徵之應用。
- (四) 空載InSAR萃取高解析度DTM之應用。

(五) PS-InSAR偵測微量地表變形之應用。

(六) 開發GPS觀測徑向濕氣延遲量及斷層掃瞄技術，供GPS及InSAR校正及改善觀測精度。

由上說明可知，InSAR未來發展之策略方向應由政府部門與學術單位共同推展，政府部門訂定政策與方向，學術單位則依此方向舉辦各項研討會，與國內外專家學者相互切磋研討，以提昇國際競爭力。尤其最近全世界災難頻傳，如何救災、防災實為當前最重要的課題，InSAR技術也扮演非常重要的角色。

由於InSAR技術是獲得DTM資訊的重要手段，它充分利用了雷達回波的相位資訊，不僅可建立大面積的DTM，而且還可利用DInSAR技術監測地面微小的變形量，其應用相當廣泛，是一種非常具有挑戰性的空間對地觀測技術。經過近20年的快速發展，SAR影像的成像技術、InSAR處理的演算法日趨成熟，且逐步應用於實務，但由於衛星軌道成像參數之精度、基線之估算、InSAR處理演算法對陰影及疊置等地形方面的處理則有待進一步改進。

近年來，相關文獻提出永久散射體PS技術應用於InSAR干涉處理過程中，PS技術分析長時間內保持穩定的散射體的相位變化，在即使無法獲得干涉條紋的情況下，也能取得 cm 級的地表變形測量精度，大大增加了干涉測量的測量精度，是InSAR研究領域的一項重大技術突破，具有巨大的實

際應用潛力。

我國在 InSAR 領域的研究雖然有一些進展，但仍屬起步階段，資料仍以衛載重覆式軌道的數據為主，且計算工具皆須依賴國外軟體進行處理。因此，InSAR 處理數據的缺乏，限制了 InSAR 處理技術的發展，所以要在測繪領域之 InSAR 領域獲得較佳之成就，除了政府部門要鼓勵測繪領域相關人員從事 InSAR 研究、開發各項步驟流程演算法之處理程式外，亦需長遠規劃考量，積極培養人才與健全管理制度，以號召相關人士從事 InSAR 相關領域研究，為國防建設及經濟發展而努力。

第九章 工作期間及進度

本案預期完成進度之工作項目與實際之執行進度所對應之甘特圖展示如表 9.1。由表 9.1 可知，大部分工作項目之實際執行期程皆超出原本規劃，如軟體測試及研究區之選定方面，並無當時預期的容易；DORIS 軟體測試及影像申請（或採購）的配對，在實際操作時才發現有一些技術問題待克服；再加上測試區之山區部分難以產生明顯的干涉條紋，以致於 DTM 及變遷偵測之成果無法具體獲得等，故執行期間實際執行進度皆比預期完成進度所花費的時間來得長。雖然大部分工作項目之期程超出預期規劃期程，表示本團隊遇到問題持續解決及克服，以達成本案之工作目標。

表 9.1 預期完成與實際執行之工作項目對應之甘特圖

工作項目	2009			2009			2009 2010			2010		
	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05
文獻回顧	██████████			██████████			██████████			██████████		
軟體測試	██████████			██████████			██████████			██████████		
研究區域選定	██████████			██████████			██████████			██████████		
利用 InSAR 技術完成初步 DTM 產製成果	██████████			██████████			██████████			██████████		
利用 DInSAR 技術完成清境、廬山之初步變遷成果	██████████			██████████			██████████			██████████		
查核點（含 DORIS 操作流程、DTM 產製及清境、廬山變遷之初步成果）	██████████			██████████			██████████			██████████		
繳交期中報告	██████████			██████████			██████████			██████████		

預期完成進度 ██████████
 實際執行進度 ██████████

工作項目	2009			2009			2010			2010		
	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05
清境、廬山地區變遷成果與分析							████████████████████			████████████████████		
				████████████████████								
撰擬 DTM 產製之成果評析與更新之可行性分析							████████████████████			████████████████████		
				████████████████████								
撰擬 InSAR 於測繪領域之應用、發展分析報告										████████████████████		
							████████████████████					
撰擬 InSAR 快速偵測地表顯著變動區域之作業經費、效益報告										████████████████████		
							████████████████████					
查核點 (含 DTM 產製與變遷分析之成果比較分析、測繪領域規劃報告及作業經費規劃、效益報告)										████████		
										████████		
繳交報告期末										████████████████████		
										████████████████████		
預定進度(累積數)	30%			55%			80%			100%		

預期完成進度 ██████████
 實際執行進度 ██████████

第十章 結論與建議

10.1 結論

- 一、本案是以 ESA 之 ERS 與 ENVISAT 衛星影像進行干涉處理，然而以固定視角的 C-band 用於山區地形時，受前波縮短、疊置及陰影等雷達成像幾何影響，且 C-band 無足夠能量穿透樹林等因素，而無法獲得較佳之成果。
- 二、在 InSAR 於 DTM 產製研究方面，在平坦地區精度已可達 m 級，但於丘陵及山區成果明顯不佳。另在高程分界方面，因採樣區不同，精度亦不同，但本研究依據 RMSE 及同調值可初步判斷高程於 100 m 以內，其精度等級可達 m 級；高程於 100 ~ 300 m 之間，精度等級約 10 ~ 20 m，高程於 500 m 以上，則精度等級已低於 50 m 以上。故 100 m 以下之高程應可以衛載雷達干涉測量製作，而地勢較高之丘陵區及山區（300 m 以上）未來可以 PSInSAR 技術增加 PS 點以提升變遷分析精度。。
- 三、DInSAR 於地表變遷研究方面，由於清境、廬山屬山區（高程約 1,100 m），因幾何效應及多植被等因素，不易產生良好的同調性，相關係數較低，無法得到較佳之結果。故新增較為平坦之測試區，選擇 1999 年 921 大地震區域，則成果明顯改善，所得到的變形結果與斷層走勢一致。

四、由相關文獻及本案初步研究可知，PSInSAR 技術確實可將原無法產生干涉條紋地區，藉由 PS 點得到地表變形資訊，惟本案使用影像數量較少（11 幅），初步成果雖然還可接受，但較不具說服力，未來應至少以 25-30 幅影像來進行 PSInSAR 研究，使成果更具說服力。且於本研究區中，PSInSAR 利用空間影像同調性的方法，共找出 282 個 PS 候選點位，經品質測試後仍保留有 147 個點位，點位的平均密度大約為 4.1 PS/km²，就充滿植被的區域而言，此數值是相當不錯的。

五、雷達系統因波長不同會影響結果的精度及適用性，所以 SRTM 使用 X Band 精度較差，但提供全球陸地的三維資料；而使用 C Band 精度較高，適用於一般變形測量；至於 L Band 精度最高，則適用於亞洲地區植生較多地區的變形測量。至於製圖比例可以參考與高程精度之關係，通常 DTM 的精度約為 3~5 m，其適用比例尺約為 1/25,000；DTM 的精度約為 10 m，其適用比例尺約為 1/50,000；DTM 的精度約為 20~30 m，其適用比例尺約為 1/250,000。

10.2 建議

一、同調性圖為是否可進行干涉處理的指標，由實驗得知，平地的同調性最高、山區次之、海面則為最低。由於任何的擾動都會使得重覆軌道的資料之間失去同調性，最佳解決之道即發展同時裝置兩個雷達天線

系統在同一機載平台上之「空載雷達干涉測量」。

二、本研究以衛載 InSAR(DInSAR)技術無法獲得山區 DTM 產製及地表變遷較佳之成果，此與台灣山區地形崎嶇複雜、植被覆蓋，以及所使用的雷達波長與視角有關，建議未來可進一步使用長波長之影像及考慮地形選擇較合宜入射角的雷達影像資料來進行測試研究（如 ALOS 影像），但須先克服格式問題。

三、2008 年 1 月後便無法自 DEOS 獲得精密星歷資料，未來應找尋適當方法（如可以地面控制點精進軌道參數，及使用大氣模式來移除大氣效應等），進而提升 DTM 產製精度。

四、因山區受限地形或植被等因素而使得干涉成果不佳，未來建議可於山區適當地點佈設角反射器，以於影像上獲取明顯特徵，以利影像套合處理。

參考文獻

- e-GPS 衛星基準站即時動態定位系統VBS-RTK 定位測試成果報告，2006，內政部國土測繪中心，台中。
- 地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫總報告，2006，「衛星雷達差分干涉量測地殼變形研究」，經濟部中央地質調查所。台北。
- 呂建興，2001，「使用三軌跡法與ERS資料偵測台灣都市地區地貌變化」，碩士論文，國立成功大學，台南。
- 林紀綱，2003，「NASA/JPL空載InSAR測定台灣地區的DEM成果分析」，碩士論文，國立成功大學，台南。
- 陳卉瑄，2001，「差分合成孔徑干涉雷達應用於偵測集集地震地形變之研究」，碩士論文，國立成功大學，台南。
- 陳鴻緒、蔡展榮，2001，「使用ERS資料與SAR干涉技術在台灣地區求定DEM之實務探討」，第二屆兩岸測繪研討會暨第十七屆測量學術及應用研討會論文集（一），第35–42頁。
- 張中白、王志添、王皓正、陳錕山，2002，「應用雷達差分干涉法監測都會型地表變形：以中壢工業區為例」，航測及遙測學刊，九卷，第三期，第9–14頁。
- 廖子毅，1997，「合成孔徑雷達干涉儀應用於數值地形模型之探討」，碩士論文，國立中央大學，中壢。
- 謝嘉聲，2006，「以雷達干涉技術偵測地表變形之研究」，博士論文，國立交通大學，新竹。
- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., and Laczniak, R. J., 1999, "Sensing the Ups and Downs of Las Vegas: InSAR Reveals Structural Control of Land Subsidence and Aquifer-system Deformation," *Geology*, Vol. 27, pp. 483–486.

- Askne, J., and Hagberg J., 1993, “Potential of Interferometric SAR for Classification of Land Surfaces,” *Proceedings of IGARSS'93*, Tokyo, pp. 18–21
- Bock, Y., 1998, “Reference systems,” GPS for Geodesy 2nd Edition, *Springer*, pp. 1–42.
- Chang, C. P., Chang, T. Y., Wang, C. T., Kuo, C. H., and Chen, K. S., 2004a, “Land-surface Deformation Corresponding to Seasonal Ground-water Fluctuation, Determining by SAR Interferometry in SW Taiwan,” *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 67, pp. 351–359.
- Chang, C. P., Wang, C. T., Chang, T. Y., Chen, K. S., Liang, L. S., Pathier, E., and Angelier, J., 2004b, “Application of SAR Interferometry to a Large Thrust Deformation: the 1999 $M_w=7.6$ Chichi Earthquake in Central Taiwan,” *Geophysical Journal International*, Vol. 159, pp. 9–16.
- Chen, C. W., and Zebker, H. A., 2000. “Network Approaches to Two-dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms,” *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 17, No. 3, pp. 401–414.
- Chen, C. W. and Zebker, H. A., 2002. “Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 8, pp. 1709–1719.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2003. “Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique,” *Engineering Geology*, Vol. 12, No. 68, pp. 3-14.
- Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Monserrat, O., Agudo, M., and Fernandez, P., 2005, “Land Deformation Monitoring Using SAR Interferometry: State-of-the-art,” *Photogrammetry*, Vol. 6, pp. 497–510.
- Evans, D. L., 1992, “Radar Interferometry Studies of the Earth’s Topography,” *Transactions on American Geophysical Union*, Vol. 73, pp. 557–558.
- Fialko, Y., Simons, M., and Agnew, D., 2001, “The Complete (3-D) Surface Displacement Field in the Epicentral Area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine Earthquake, California, from Space Geodetic Observation,” *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, pp. 3063–3066.

- Franceschetti, G., and Lanari, R., 1999, *Synthetic Aperture Radar Processing*, CRC Press, Boca Raton, USA.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., 2001, "Permanent Scatterers in SAR interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, pp. 8-20
- Fruneau, B., Pathier, E., Raymond, D., Deffontaines, B., Lee, C. T., Wang, H. T., Angelier, J., Rudant, J. P., and Chang, C. P., 2001, "Uplift of Taiwan Tableland (SW Taiwan) Revealed by SAR Interferometry," *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, pp. 3071–3074.
- Gabriel, A. K., and Goldstein, R. M., 1988, "Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, No. 5, pp. 857–872.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., and Zebker, H. A., 1989, "Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, No. 7, pp. 9183–9191.
- Galloway, D. L., Hudunt, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., and Rosen, P. A., 1998, "Detection of Aquifer System Compaction and Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California," *Water Resources Research*, Vol. 34, pp. 2573–2585.
- Gens, R., and van Genderen, J. L., 1996, "SAR Interferometry-issues, Techniques, Applications," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, pp. 1803–1835.
- Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamb, B., and Frolich, R. M., 1993, "Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an antarctic ice stream," *Science*, Vol. 262, pp. 1525–1530.
- Ghiglia, D. C., and Romero, L. A., 1994, "Robust Two-dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping That Uses Fast Transform and Iterative Methods," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 11, pp. 107–117.
- Gilles, P., Paul, R., Francois, R., and Ken H., 1996, "Postseismic Rebound in Fault Step-Overs Caused by Pore Fluid Flow," *Science*, Vol. 273, No. 5279, pp. 1202–1204

- Graham, L. C., 1974, "Synthetic Interferometric Radar for Topographic Mapping," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, pp. 763–738.
- Hagberg, J. O., 1993, "On the Optimization of interferometric SAR for topographic mapping," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, no. 2, pp. 303–306.
- Hanssen, R., 2001, *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Netherlands.
- Hartl, P., Thiel, K. H., Wu, X., Doake, C., Sievers, J., 1993, "SAR interferometry: Experiences with various phase unwrapping methods," *Proceedings of the 2nd ERS-1 Symposium*, pp. 727–732.
- Henderson, F. M., and Lewis, A. J., 1998, *Principles and Applications of Imaging Radar*, John Wiley, New York, USA.
- Hooper, A., 2009, *StaMPS/MTI Manual, version 3.1*, Delft Institute of Earth Observation and Space Systems. *Delft University of Technology*, Netherlands.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B., 2004, "A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers," *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, No. 5 (L23611), 5 pages.
- Huang, M.-H., Hu, J.-C., Hsieh, C.-S., Ching, K.-E., Rau, R.-J., Pathier, E., Fruneau, B., and Deffontaines, B., 2006, "A Growing Structure near the Deformation Front in SW Taiwan Deduced from SAR Interferometry and Geodetic Observation," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 33, L12305, doi: 10.1029/2005GL025.
- Jung, H. C., Kim, S. W., Jung, H.S., Min, K. D., and Won, J. S., 2007. "Satellite Observation of Coal Mining Subsidence by Persistent Scatterer Analysis" *Engineering Geology*, Vol. 92, No. 1–2, pp. 1–13
- Kampes, B. M., 2005, "Radar interferometry: Persistent scatterer technique," *Springer*, Germany.
- Kimura, H. S., and Yamaguchi, Y. S., 2000, "Detection of landslide areas using satellite radar interferometry," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 66, no. 3, pp. 337–344.

- Liang, L. S., Hanssen, R., and Perski, Z., 2003, "Radar Interferometry with Public Domain Tools," *FRINGE 2003*, Frascati, Italy.
- Liu, G. X., Ding, X. L., Li, Z. L., Li, Z. W., Chen, Y. Q., and Yu, S. B., 2004, "Pre- and Co-seismic Ground Deformations of the 1999 Chi-chi, Taiwan Earthquake, Measured with SAR Interferometry," *Computer and Geosciences*, Vol. 30, pp. 333–343.
- Lyons, S., and Sandwell, D., 2003, "Fault Creep Along the Southern San Andreas from Interferometric Synthetic Aperture Radar, Permanent Scatterers, and Stacking," *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, Vol. 108, no. B1 (2047), 24 pages.
- Madsen, S. N., and Zebker, H. A., 1998, Synthetic Aperture Radar Interferometry: Principles and Applications, Manual of Remote Sensing, Volume 2, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Massonnet, D., and Feigl, K. L., 1998, "Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth Surface," *Reviews of Geophysics*, Vol. 36, pp. 441–500.
- Massonnet, D., Holzer, T., and Vadon, H., 1997, "Land Subsidence Caused by the East Mesa Geothermal Field, California, Observed Using SAR Interferometry," *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, pp. 901–904.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Fiegl, K., and Rabaute, T., 1993, "The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry," *Nature*, Vol. 364, pp. 138–142.
- Meadows, P. J., 2002, "The ERS-2 SAR Performance: Another Further Update", CEOS SAR Workshop, London, pp. 24–26.
- Mora, O., Mallorquí, J. J., and Broquetas, A., 2003, "Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps From a Reduced Set of Interferometric SAR Images," *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 41, no. 10, pp. 2243–2253.
- Mouginis-Mark, P. J., Garbeil, H., 1993, Digital topography of volcanoes from radar interferometry: An example from Mt. Vesuvius, Italy, in press, Bull. Vole.
- Nafaly, U., 2004, "TecSAR-profomance design and status," *EUROSAR 5th European Conference on SAR*, Beijing.

- Pathier, E., Fruneau, B., Deffontaines, B., Angelier, J., Chang, C. P., Yu, S. B., and Lee, C. T., 2003, "Coseismic Displacements of the Footwall of the Chelungpu Fault Caused by the 1999, Taiwan Chi-chi Earthquake from InSAR and GPS Data," *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 212, pp. 73–88.
- Rogers, A. E. E., Ingalls, R. P., 1969, "Venus: Mapping the Surface Reflectivity by Radar Interferometry", *Science*, Vol. 165, pp. 797–799.
- Seymour, M. and Cumming, I., 1996, "InSAR Terrain Height Estimation Using Low-quality Sparse DEMs," Fringe 96' workshop on ERS SAR Interferometry, Zurich, Switzerland.
- Solaas, G. A., 1994, ERS-1 Interferometric Baseline Algorithm Verification, ESA Technical Report(Es-Tn-Dpe-Om-Gs02), Hague, Netherlands.
- Strozzi, T., and Wegmuller, U., 1999, "Land Subsidence in Mexico City Mapped by ERS Differential SAR Interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 4, pp. 1940–1942.
- Suga, Y., Takeuchi, S., Oguro, Y., Chen, A., J., Ogawa, M., Konishi, T., and Yonezawa, C., 2001, "Application of ERS-2/SAR Data for the 1999 Taiwan Earthquake," *Advances in Space Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 155–163.
- Tesauro, M., Berardino, P., Lanari, R., Sansosti, E., Fornaro, G., and Franceschetti, G., 2000, "Urban Subsidence inside the City of Napoli (Italy) Observed by Satellite Radar Interferometry," *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, pp. 1961–1964.
- Wegmuller, U., and Werner, C., 1997, "Retrieval of vegetation parameters with SAR interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, pp. 18–24.
- Wegmuller, U., Strozzi, T., and Tosi, L., 2000, "Differential SAR interferometry for land subsidence monitoring: methodology and examples", *Proceedings of SISOLS 2000*, Ravenna, Italy, pp. 25–29.
- Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., and Wiesmann, A., 2003, "Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping," *Proceedings of IGARSS*, Vol. 7, pp. 4362–4364.
- Werner, C. L., Hensley, S., Goldstein, R. M., Rosen, P. A., and Zebker, H. A., 1992, "Techniques and applications of SAR interferometry for ERS-1: Topographic mapping, change detection, and slope measurement,"

Proceedings of the 2nd ERS-1 Symposium, ESA, Cannes France.

- Wu, Y., Hong, W., and Wang, Y., 2007, "The current status and implications of polarimetric SAR interferometry," *Journal of electronics and information technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 67–70.
- Zebker, H.A., and Lu, Y., 1998, "Phase Unwrapping Algorithms for Radar Interferometry: Residue-Cut, Least-Squares, and Synthesis Algorithms," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 15, No. 3, pp. 586–598.
- Zebker, H. A., and Goldstein, R. M., 1986, "Topographic Mapping from Interferometry Synthetic Aperture Radar Observations," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. 5, pp. 4993–4999.
- Zebker, H. A., Werner, C. L., Rosen, P. A., and Hensley, S., 1994, "Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 4, pp. 823–836.
- Zebker, H. A., 2000, "Studying the Earth with Interferometric Radar," *Computer in Science and Engineering*, Vol. 23, pp. 52–60.
- Zisk, S. H., 1972, "A New Earth-based Radar Technique for the Measurement of Lunar Topography", *Moon*, Vol. 4, pp. 296–306.

附錄一 雷達干涉測量相關名詞英中對照

Across-track Interferometry 橫軌式干涉

Advanced Land Observing Satellite; ALOS 先進地球觀測衛星

Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2; AVNIR-2 先進可見光與近紅外輻射計

Along-track 沿軌式干涉

Ambiguity 不確定值

Amplitude 振幅

Ascending 昇交

Azimuth 方位方向

Conventional Terrestrial System; CTS 協議地球坐標系統

Convolution 摺積

Deformation Model 變形模式

Delft institute for Earth-Oriented Space research; DEOS

Delft Object-oriented Radar Interferometric Software; DORIS 雷達干涉軟體

Descending 降交

Digital Terrain Model; DTM 數值地形模型

Differential InSAR; DInSAR 差分干涉合成孔徑雷達

Digital Surface Model; DSM 數值表面模型

Digital Elevation Model; DEM 數值高程模型

Doppler 都普勒

ENVIroment SATellite; ENVISAT 環境監測衛星

European Respiratory Society; ERS 歐洲太空總署

Fast Fourier Transformation; FFT 快速傅立葉轉換

Focus 聚焦

Four-pass Differential Interferogram 四軌跡法

Fringes 條紋

Geographic Information System; GIS 地理資訊系統

Geomatic Dilution of Precision; GDOP 幾何圖形強度因子

Geoinformatics 地球資訊學

Global Positioning System; GPS 全球衛星定位

Light Detection And Ranging; LiDAR 光達雷射掃描

Inertial Navigation System; INS 慣性導航系統

Interferometric SAR; InSAR 干涉合成孔徑雷達

Image Registration 影像套合

Imaging Radar 雷達影像任務

Japanese Earth Resources Satellite; JERS 日本地球資源衛星

Jet Propulsion Laboratory; JPL 噴射推進實驗室

Master Image 主影像

Multi-look 多觀點

National Aeronautics Space Administration; NASA 國家太空總署

National Imagery and Mapping Agency; NIMA 國家影像製圖局

Open Source 開放源碼

Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping; PRISM
全色態遙感立體測繪儀

Patch 區塊

Permanent Scatterers InSAR; PS-InSAR 永久散射體差分干涉雷達

Phase 相位

Phase Unwrapping 全相位回復

Phased Array type L-band SAR; PALSAR 相位陣列 L 波段雷達

Power 灰階亮度

Precise Orbit 精密軌道

Range 斜距方向

Resampling 重新取樣

Real Time Kinematic; RTK 即時動態定位

Remote Sensing; RS 遙感探測

Repeat-track 重複軌道式

Rover 移動站

Shuttle Imaging Radar; SIR 太空梭成像雷達

Shuttle Radar Topography Mission; SRTM 太空梭雷達地形任務

Single Look Complex; SLC 聚焦處理後單一觀點複數格式影像

Slave Image 次影像

Speckle 斑駁

Statistical-cost Network-flow Algorithm for PHase Unwrapping; SNAPHU 全
相位回復統計網路軟體

Synthetic Aperture Radar; SAR 合成孔徑雷達

Tandem Mission 協力式任務

Temporal Baseline 時間基線

Three-pass Differential Interferogram 三軌跡法

Two-pass Differential Interferogram 二軌跡法

United States Geological Survey; USGS 美國地質調查所

Virtual Base Station; VBS 虛擬基準站

Zero Gyroscope Mode; ZGM 零陀螺儀

ZGM-Yaw Control Mode 零陀螺儀偏角控制

附錄二 參考文獻摘要綜整

地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫總報告，2006，「衛星雷達差分干涉量測地殼變形研究」，經濟部中央地質調查所。台北。

摘要：張中白等以DInSAR技術量測台灣地殼變形研究，將台灣北、中、南、東及主要活動斷層地區做一完整報告。在所有的研究區中，特別是東部地區，由於山區較多，植被濃密，造成雷達的同調性較差，所以雷達差分干涉的結果都相對很差，由於這是DInSAR技術先天上的限制，目前的方法較難克服，未來可發展固定散射體差分干涉雷達測量，來解決目前的困難，期能更了解台灣各地區的活動斷層情形。

呂建興，2001，「使用三軌跡法與ERS資料偵測台灣都市地區地貌變化」，碩士論文，國立成功大學，台南。

摘要：DInSAR是遙測學上的一項新測量的方法，它可以用來獲取地表變形資訊，與其他地表變形測量方法(如地面測量、航空攝影測量、GPS測量、雷射掃瞄等)比較，此方法具有許多優點，例如它不必到達時地地面即可施測、受雨雲霧之影響小且鉅全天候資料蒐集之能力、提供大範圍的量測資訊、節省較多的人力與物力、可快速求得突然的地表起伏變化(如地震及山崩)與緩慢的地表起伏變化(如地層下陷)等等。三軌跡法就是DInSAR技術的一種，本文選用發生在1999年921大地震前後(1月21日、5月6日、9月23日、10月28日)共四張中部地區之歐洲遙測資源衛星ERS/2影像作為實驗資料，以地震前之影像對製作產生地形之干涉影像，再以地震前後之影像對製作產生另一組干涉影像，將此兩干涉影像之相位資訊相減，便可獲得地震前後之地表位移量。實驗成果初步顯示與GPS成果吻合，期平均誤差約6.5 cm，顯示三軌跡法與ERS資料在適當之資料處理下，可以偵測台灣都市地區地帽之變化，本文並分析此法偵測台灣都市地區地帽變化

之能力與探討在PHASE這套軟體產生地表位移圖時，可能發生之實務問題與可能的解決辦法。

陳卉瑄，2001，「差分合成孔徑干涉雷達應用於偵測集集地震地形變之研究」，碩士論文，國立成功大學，台南。

摘要：民國88年9月21日集集地震，以芮氏地震規模7.3、震源深度7.0 km造成鄰近地區的重大傷亡與及嚴重的地表變形，利用GPS於地震前後控制點所量測的變化量，提供了高精確度的地表變形點位控制，由於控制點並物均勻且不普遍的分布在震央區周圍，對於精確的地表變形描述仍需藉助於數值模擬。DInSAR於地震前後拍攝之影像經適當處理後，可以差分出這段時期的地表變形，提供全面性的地表變形資訊。InSAR在美國及日本以成功的偵測出地震所引起的地表變形，但少見應用於國內的相關研究，由於台灣的高溼度、多植被及多山的特性，要利用InSAR獲取高精度的地表高程數據及地表變形資訊有其先天限制。本研究以先期性的應用及發展此技術為主體，先將台灣中部地面覆蓋物與干涉成果的關係作一描述比較，將此技術應用於集集地震的地表變形偵測，並利用GPS資料及數值模擬資料必要的輔助及檢驗。本研究顯示在程式區地形變資訊與GPS相較之平均誤差小於10 cm，車龍埔斷層右方的山區誤差高達數公尺，誤差來源除了時間與空間非相關外，大氣及繁盛植被對訊號之散射造成的誤差亦不可忽略。InSAR應用在此地震考慮到地震上盤繁密植被致使訊號失真的影響，僅得主斷層下盤的變形資訊，在人口稠密區（如台中市區）的地形變化卻比預期的效果還好，表示InSAR雖然精確度不如GPS且成果好壞端賴地面覆蓋物與資料品質，卻可於大範圍區域內快速而具經濟效益的擷取同震變形量，點位密集而分布均勻，並且在城市區的地形變監測具有公分級可信度，在未來地震災害預防及分析上不失為一個有潛力的偵測工具。

林紀綱，2003，「NASA/JPL空載InSAR測定台灣地區的DEM成果分析」，碩士論文，國立成功大學，台南。

摘要：台灣地區多為高山地形，且多植被覆蓋區，造成航遙測求取精確地表資訊較為困難，而空載InSAR具有減少這些缺失的潛力，且它具有全天候偵測及不受天候影響兩大優點。InSAR法使用兩張涵蓋相同地區的SAR影像，利用同一目標物的雷達回波數位訊號進行干涉處理，之後可得到相位差及其與高程之間的關係，進而能夠在短時間內產生區域之數值高程模型。本研究以2000年美國NASA/JPL的「環太平洋全篇及合成口徑雷達計畫」中的TOPSAR在台灣地區所產生的DEM作為實驗資料，實驗區在台灣中部地區，將TOPSAR_DEM與航測參考DEM進行套合，分析在不同地區及不同波段之下，兩者高程之系統偏差與隨機誤差之估計，以及估算粗差點與無法計算高程點兩者之比例及發生位置和地表參數之相關性。研究成果顯示，TOPSAR_DEM的高程走勢大致與參考DEM者吻合，但兩者之間仍存在著顯著的系統偏差及粗差，系統偏差呈現非線性的分布，隨機偏差的RMS值在平地區域較小，約1-5 m，實驗區總面積約2016 km²，參考點數約120萬點，粗差發生之比例約為1.26%，無法計算出的高程比例約為6.37%（整體平均）或18.22%（高山區）。

陳鴻緒，2001，「使用ERS資料與SAR干涉技術在台灣地區求定DEM之實務探討」，碩士論文，國立成功大學，台南。

摘要：InSAR是傳統雷達技術之一種延伸應用，藉由同一目標物在兩個不同衛星上的雷達回波訊號之相位差來或取地表之三維資訊。除可川穿透雲霧集晝夜皆可施測之特性，使其在遙測領域中對於地表資料的獲取上，扮演著愈來愈重要的角色。本研究使用軟體為Voxel Corporation 3dSAR處理系統之FOCUS與PHASE兩模組，實驗資料為ERS-1/2於1995年12月8日與12月9日下降軌道通過台灣之Tandem

Mode影像，其基線長度為220 m，主要測試區為台北縣都會區，實驗資料經FOCUS進行格式轉換後，利用PHASE進行影像套合、產生干涉圖、相位還原等工作，最後產生DEM。研究中用以比對成果之資料為利用航空攝影測量所測製之台北縣數值高程模型。將InSAR求定之DEM與實驗區航測DEM進行比較，共有93850個共同格點，兩者之高程差之RMS為23.73 m，其中有86%的點高程差在20 m以內之點位分布與正射相片對照，可發現高程差與地表種類有著相關性，在建物密集的區域其高程差較大，約5-20 m，而在無建物或植被覆蓋區域其高程差較小，約在5 m之間。

廖子毅，1997，「合成孔徑雷達干涉儀應用於數值地形模型之探討」，碩士論文，國立中央大學，中壢。

摘要：1997年台灣地區第一次利用衛載合成孔徑雷達干涉技術來建立數值高程模型(網格式40 m × 40 m)。實驗資料分別為1996年3月6日與7日之ERS-1/2之影像，基線長約78 m、水平夾角約 -20.4°，其實驗結果與農航所之網格式DTM(40 m × 40 m)比較，水平方向控制在0.1個像元以內，當所有可計算的像元皆列入統計時(約為一個60 km × 60 km的區域)，其高程均方差為22.5 m，如僅對平原地區比較時，均方差為20 m。

張中白、王志添、王皓正、陳錕山，2002，「應用雷達差分干涉法監測都會型地表變形：以中壢工業區為例」，航測及遙測學刊，九卷，第三期，第9-14頁。

摘要：本研究選用八幅ERS1/2 人造衛星所擷取的合成孔徑雷達影像，以差分干涉法進行測量，成功獲得中壢工業區過去十年內地表變形情形。研究成果顯示中壢工業區的變形以垂直下陷為主，變形區域大體呈圓形分佈。另外，本區下陷事件大約從1996 年開始發生，至2000

年以後方才逐漸趨緩；由於明顯的下陷速率變化，以及近圓形的變形分佈，本區的地層下陷極有可能是地下水抽取所引起。地下水抽取造成的地層下陷可以利用數值模擬加以驗證，這將是後續的研究重點。

謝嘉聲，2006，「以雷達干涉技術偵測地表變形之研究」，博士論文，國立交通大學，新竹。

摘要：InSAR為利用不同時間或不同位置的雷達天線所獲得的兩幅或多幅複數影像，再藉由相位差來量取地表的三維資訊。目前主要的應用包含DTM產生、地震變形量的研究、地層下陷、火山監控及冰川飄移等。

台灣地區因位於地震帶上，地震發生的頻率相當頻繁，特別是一些規模較大的地震，常造成地表嚴重的變形，威脅人民生命財產的安全。如何有效的監測其變形狀況，實為其相當重要的課題。因InSAR處理的步驟較多，過程複雜不易了解，大多研究團隊均以套裝軟體進行處理。本研究以公用程式為主，期有興趣及需求的使用者廣泛應用。

為了解雷達干涉技術於台灣地區進行變形偵測的可行性，本研究以台灣中部地區集集地震及屏東平原地層下陷進行測試。在集集地震變形偵測方面，因台灣中不繁密的植被覆蓋及地震引起的變動產生不相關性，使得斷層東邊地區因低相關性而無法偵測變動情形，但斷層西邊因地勢較平坦且變動量亦較小，因此以干涉技術可清楚的偵測其變化情形。DInSAR與GPS皆具有高精度的偵測結果，在垂直方向的RMSE為3.3 cm，兩者具有相當的一致性，因此在地震的變形偵測中，兩者的量測資料可以有良好的互補作用。

由於近年來沿海地區超抽地下水造成嚴重的地層下陷，因此本研究利用雷達差分干涉技術來偵測屏東平原的地表變形量，並與GPS與水準資料做比較，探討DInSAR在台灣地區地層下陷的精確度，並分析屏東平原的下陷狀況。由實驗可知下陷量平均值與GPS及水準測量下陷量平均值差異量均小於1 cm，且變化的趨勢一致，由干涉圖中可明顯的看出林邊溪河口附近海岸為下陷最嚴重的地區，且屏東平原在乾、濕季的下陷量明顯的不同，乾季的下陷量大於濕季的下陷量。

Chang, C. P., Chang, T. Y., Wang, C. T., Kuo, C. H., and Chen, K. S., 2004a, “Land-surface Deformation Corresponding to Seasonal Ground-water Fluctuation, Determining by SAR Interferometry in SW Taiwan,” *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 67, pp. 351–359.

摘要：本篇利用InSAR技術於台灣西南部季節性地表變形之研究，主要重點在屏東平原，初步結果顯示地層下陷特別發生在乾季，而在濕季幾乎都沒有發生。然而局部地層下陷經常是由沉積物排水後所導致，我們在此區比較InSAR觀測所得到的地下水資料，由比較顯示下陷率與地下水層的下降趨勢有關。由本研究可知InSAR技術對於監測地球表面變形是一個非常有效高解析力的處理工具，且對於天然災害防護亦能提供重要的資訊。

Chang, C. P., Wang, C. T., Chang, T. Y., Chen, K. S., Liang, L. S., Pathier, E., and Angelier, J., 2004b, “Application of SAR Interferometry to a Large Thrust Deformation: the 1999 $M_w=7.6$ Chichi Earthquake in Central Taiwan,” *Geophysical Journal International*, Vol. 159, pp. 9–16.

摘要：Chang等人將GPS變形模擬差分干涉圖與雷達差分干涉圖比較，在雷達視距方向的比較結果，其中誤差最大值約為5 cm左右。

Chen, C.W., and Zebker, H. A., 2000. “Network Approaches to Two-dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New

Algorithms,” *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 17, No. 3, pp. 401–414.

摘要：二維的全相位回復就是，只從剩餘的相位去推斷較精準的相位值，是合成孔徑雷達資料干涉的一個關鍵步驟。注意到最近全相位回復問題的網形構成，我們在這裡加入了一些良好建立的網形理論去形式化這些問題，分析它的複雜度和取得解答的演算法。也有建議全相位回復目標應該要減少回復和沒有回復的相位梯度差異。這裡我們使用網形結構去證明這個所謂的最小 L^0 -norm問題是NP-hard，或者是複雜性理論建議是不可能存在算法去確切解決。因此必須去找到近似解，我們提出兩個新的算法：第一個使用最短路徑的思想和生成樹以改善Goldstein等的residue-cut法。[Radio Sci. 23, 713 (1988)]我們的改進算法非常快，提供完整的覆蓋面，並允許用戶定義權重。隨著我們的第二個算法，我們擴展線性網絡流量問題的想法為非線性 L_0 情況。該算法能獲得較高的近似最低 L_0 規範。利用干涉數據，我們證明我們的算法是與其他現有的算法在速度和準確度是具有高度競爭力，優於他們在這些案件的成果。

Chen, C. W. and Zebker, H. A., 2002. “Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 8, pp. 1709–1719.

摘要：二維的相位回復是干涉合成孔徑雷達資料分析的關鍵步驟。該文介紹一個方法藉干涉分割原本較大的區域到幾個較小的獨立回復部分並進一步分割為獨立可靠的不規則區域。該技術導出成果的估計值可得出完整干涉被回復作為較小的單片成果。

Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., 2001, “Permanent Scatterers in SAR interferometry,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,

摘要：時空和幾何的不相關往往阻礙雷達干涉去成為一個地面形變監測和地形剖面重構的工具。此外，大氣擾動會強烈影響結果的準確度。本文提出了一種完整的程序去鑑定和利用穩定的自然反射或永久散射體(PS)從長時間序列干涉SAR圖像開始。因為它經常發生，PS的尺寸小於解析度，干涉圖的相關性即使在基線大時也好於不相關，所有可用的ESA和ERS圖像數據可以成功利用。在這些像素，次米級精度的DEM和毫米級的地形變動檢測是可以實現，因為大氣相位屏(APS)的貢獻可以被估計或刪除。接下來的例子會顯示小運動測量，DEM的完善，APS估計和移除的案件，地點是在意大利安科納的滑動區。使用ERS衛星數據。

Fialko, Y., Simons, M., and Agnew, D., 2001, “The Complete (3-D) Surface Displacement Field in the Epicentral Area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine Earthquake, California, from Space Geodetic Observation,” *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, pp. 3063–3066.

摘要：該文使用干涉合成孔徑雷達資料來取得在美國南加州地震規模7.1的Hector Mine地震同震移位變動的連續地圖。關於地震斷層面主要是垂直和水平移位呈反對稱，和平移斷層變形的線性預估模型一致。有些來自地表移動資料的視對稱誤差可能導因於斷層幾何的複雜性。

Gabriel, A. K., and Goldstein, R. M., 1988, “Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B,” *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, No. 5, pp. 857–872.

摘要：1988年Gabriel與Goldstein以兩個分離軌道的SIR-B系統收集了同一區域的資料，成功以單一天線重覆軌跡的方式建立DTM，在此模式的差分干涉處理中，DTM的品質將影響干涉處理結果的好壞，處理的

技巧在於要將雷達影像與DTM所產生的地形影像精確套合。此法的限制是DTM的精度及雷達系統的雜訊。

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., and Zebker, H. A., 1989, "Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, No. 7, pp. 9183–9191.

摘要：InSAR係利用同一地區不同時間所拍攝之兩幅影像進行干涉處理，可產生高精度之數值地形模型，其主要概念為解算影像像對中，對應像元間雷達回波訊號之振幅與相位，並回復影像像對之間的相位差，即可獲得大面積之DTM。且Gabriel等學者首先證實利用此技術可獲得cm級的變形量，在其研究中，以三幅SEASAT的雷達影像產生出兩幅干涉條紋圖，再以此兩幅干涉圖利用差分干涉技術推求地表的變形量。在處理的過程中，對於產生兩個不同的干涉條紋圖，都使用相同的處理步驟，以避免產生不同的誤差。

Galloway, D. L., Hudunt, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., and Rosen, P. A., 1998, "Detection of Aquifer System Compaction and Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California," *Water Resources Researc*, Vol. 34, pp. 2573–2585.

摘要：合成孔徑干涉雷達有高度的潛力來偵測和量化由含水質系統固結引起的地層下陷。高空間解析的干涉合成孔徑雷達斜距位移地圖是從ERS-1收集雷達資料，在加州的羚羊谷地下水集水域取得。該資料使吾人得以近幾年(1993-1995)的下陷模式和過去用傳統方法的偵測做綜合比較。改變的下陷模式一般於土地及水域都能適用。干涉合成孔徑雷達偵測模式一般與基於地下水水流及含水質系統固結的整合模型的預期是一致的。部分矛盾反映出該分布的知識尚未完備與壓

縮沉澱物的性質。當使用同時與地下水層及其他地質資訊相關的觀測量時，合成孔徑干涉雷達資料可能對於含水質系統固結模擬的強制參數估計有用。

Ghiglia, D. C., and Romero, L. A., 1994, “Robust Two-dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping That Uses Fast Transform and Iterative Methods,” *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 11, pp. 107–117.

摘要：二維相位回復應用在不同的科學及工程領域，包含光學及微波干涉、成像補償、合成孔徑雷達相位改正及影像處理等方面。針對二維相位理論值之回復，本篇透過使用快速餘弦轉換的方式發展一個穩健的方法，即假設二維相位值結合二維權重，快速轉換仍然可以使用迭代方法去解決加權相位回復問題，加權相位回復亦可使用在孤立不一致的區域。

Graham, L. C., 1974, “Synthetic Interferometric Radar for Topographic Mapping,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, pp. 763–768.

摘要：地形圖的生產需要二種資訊。首先，必須辨認在地圖將處理的細節。其次，必須在三維測量不同對象的位置和地徵。當前空載雷達干涉技術提供的方法無論何時，在任何不利天氣，不分日夜皆可使用。為了使合成孔徑技術在二維得到較好的解析度雷達使用干涉法得到第三項觀測量。

Hanssen, R., 2001, *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Netherlands.

摘要：InSAR係利用同一地區不同時間所拍攝之兩幅影像進行干涉處理，可產生高精度之DTM，其主要概念為解算影像像對中，對應像元間雷達回波訊號之振幅與相位，並回復影像像對之間的相位差，即可獲得大面積之DTM。

Henderson, F. M., and Lewis, A. J., 1998, Principles and Applications of Imaging Radar, John Wiley, New York, USA.

摘要：雷達測量相對於航空攝影測量而言，算是一個較新生代的遙測科技，它使用波長1 mm – 1 m的微波波段作為探測波，其中當波長小於 2 cm 時，雲對雷達波會有明顯的干擾；當波長大於 4 cm 時，則雷達波幾乎不受雲、雨的阻擾，可提供地面清晰的資料。

Huang, M.-H., Hu, J.-C., Hsieh, C.-S., Ching, K.-E., Rau, R.-J., Pathier, E., Fruneau, B., and Deffontaines, B., 2006, “A Growing Structure near the Deformation Front in SW Taiwan Deduced from SAR Interferometry and Geodetic Observation,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 33, L12305, doi: 10.1029/2005GL025.

摘要：在1996年到2000年期間以ERS的干涉合成孔徑雷達影像使用差分干涉技術來監測台灣西南變形前緣附近台南台地的即時生長結構。透過合併GPS資料的水平速率和差分干涉合成孔徑雷達的傾斜距離位移轉換至垂直方向變形並討論台灣區域的變形部分和地震危險。

Liu, G. X., Ding, X. L., Li, Z. L., Li, Z. W., Chen, Y. Q., and Yu, S. B., 2004, “Pre- and Co-seismic Ground Deformations of the 1999 Chi-chi, Taiwan Earthquake, Measured with SAR Interferometry,” *Computer and Geosciences*, Vol. 30, pp. 333–343.

摘要：1999年規模7.6的集集大地震是台灣在20世紀最強的島國地震，由ERS-1/2衛星所獲得的C波段五幅SAR影像結合去研究有關1500平方公里區域的前震及共震的表面變形，超過2-3年的前震干涉顯示了一致性的條紋型態，與LOS位移變化是相當的，大約 32 mm 左右，在這個區域的變形是透過東西向的地殼壓縮所導致，另短時間的共震干涉顯示清晰的弧形條紋型態，大約有10個條紋，相當於 28.3 cm 的位移變化量，此共震變形的結果與GPS量測及非指定斷層

(fault-dislocation)模型的模擬干涉計算比較，皆能有很好的擬合，本研究證明對於監測平坦地區之地表變形，短波長的InSAR系統是有能力的。

Massonnet, D., and Feigl, K. L., 1998, “Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth Surface,” *Reviews of Geophysics*, Vol. 36, pp. 441–500.

摘要：SAR干涉差分的技術（稱為干涉合成孔徑雷達，InSAR）被採用於1999年9月20日的車籠埔斷層地表破裂帶，台灣集集地震，使用六張ERS-2衛星影像，涵蓋期間從1999年2月至2000年1月。相對於現有大地測量數據，干涉合成孔徑雷達測量結果有更廣泛的分析，這是因為高空間取樣率和公分級的準確性。然而，同震位移只有在斷層可以被評價。干涉圖的分析表明，相位差的一個線性趨勢主要是由於軌道誤差，我們可以刪除使用GPS數據去從干涉圖中刪除。更正的干涉圖提供精確的InSAR同震位移地圖，在台中東部海岸線30公里以西的斷層呈現出從36.7公分到大約5公分的持續下降。該地圖的分析表明，彰化斷層（其位於約車籠埔的20公里西處）和屯子腳斷層位移影響力。我們的理解是，在這方面這些地震引起的小斷層。從GPS數據有1.7釐米的不確定性，提出量化的精確的地圖。除了這個單一值，我們強調有同震干涉圖的利益去更全面地評估地圖的可靠性。與沒有InSAR資料的位移推斷模型去比較滑動分佈來突顯優勢。因三軌跡法必須將地形對進行全相位回復的處理，在處理的過程中容易引起錯誤，且以干涉圖當地形對會有許多地方因相關性不好而沒有干涉條紋，導致處理的問題與困擾。

Massonnet, D., Holzer, T., and Vadon, H., 1997, “Land Subsidence Caused by the East Mesa Geothermal Field, California, Observed Using SAR Interferometry,” *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, pp. 901–904.

摘要：1997年Massonnet等利用InSAR技術來偵測加州East Mesa地熱區的地層下陷情形。該研究使用四幅ERS衛星影像，此四幅影像共可形成六幅干涉圖，該研究利用此六幅干涉圖分別進行短時間間隔及長時間間隔的分析，並與水準測量進行比較，得到相同的下陷結果。

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Fiegl, K., and Rabaute, T., 1993, “The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry,” *Nature*, Vol. 364, pp. 138–142.

摘要：Massonnet等則以ERS兩幅地震前後的雷達影像產生干涉條紋，利用現有DTM資料消除地形效應，使計算後之條紋為僅受地震變動影響之干涉圖，有效的偵測出1992年美國加州Landers地區7.3級地震的變形量。該研究干涉處理的結果得到cm級的精度。

Strozzi, T., and Wegmuller, U., 1999, “Land Subsidence in Mexico City Mapped by ERS Differential SAR Interferometry,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 4, pp. 1940–1942.

摘要：地層下陷在墨西哥城是一種嚴重的問題，這個城市是座落在高度可壓縮粘土及經由強抽取地下水的地方，至上個世紀止總下陷超過 9 m。ERS差分雷達干涉測量在1995年12月至1997年9月已對墨西哥城進行下陷製圖。對於某些地區的下陷速度超過每年 30 cm 的空間梯度，表示具有強烈的垂直方向上之運動。此遙感技術，獨特的空間覆蓋範圍和分辨率，對於合理管理的含水層系統及新的結構和行動，可以提供重要的信息規劃，以保存已損壞的建築物。

Suga, Y., Takeuchi, S., Oguro, Y., Chen, A., J., Ogawa, M., Konishi, T., and Yonezawa, C., 2001, “Application of ERS-2/SAR Data for the 1999 Taiwan Earthquake,” *Advances in Space Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 155–163.

摘要：由1999年台灣大地震（集集大地震）發生在1999年9月21日進行都市破壞和土地位移偵測的干涉SAR適用性進行了研究，數據基礎由ERS-2重複通過取得。這三張ERS-2的雷達數據獲得於1999年1月21日、5月6日和9月23日，前兩個影像是在地震發生前取得，第三張則是地震後兩天取得。兩個主要結果是由研究獲得。首先是信息一致性的有效性的核查，檢測損壞的城市地區的建築物倒塌，另一種是不同的有效干涉圖去提取土地位移的紋理。後者的結果還證明，由InSAR萃取的土地紋路和由GPS產生的結果是一致的。

Zebker, H. A., and Goldstein, R. M., 1986, “Topographic Mapping from Interferometry Synthetic Aperture Radar Observations,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. 5, pp. 4993–4999.

摘要：1986年NASA於CV990飛機上裝載SAR系統進行舊金山灣之DTM製作，獲得一幅面積約為11 km × 10 km之DTM資料，其成果與美國地質調查所(USGS)的等高線圖高度相符。

Zebker, H. A., Werner, C. L., Rosen, P. A., and Hensley, S., 1994, “Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 4, pp. 823–836.

摘要：干涉雷達技術對於高解析力之地形製圖產生DTM是非常有效的工具，本篇提出了資料蒐集的分析透過ERS1衛星上合成孔徑雷達裝置，使用接近重覆軌道式的單一衛星對於減少成本及衛載硬體的複雜性是有吸引力的，經過雷達回波訊號干涉處理，這些資料可以簡化成相關地圖及DTM，這相關地圖顯示時間相關的顯著性減少，將視環境因子而定，當相關性很高，它將可能去產生DTM。雜訊分析期待在ERS1干涉資料於阿拉斯加及美國西南的地區，在這些區域相對誤差是可能小於 5 m 均方根誤差，然而軌道的不精確表示需要共

軌點去減少絕對高度誤差，我們找到每 $40\text{ km} \times 40\text{ km}$ 約6個共軌點具有 5 m 的均方根誤差，或需要更好的高程精度去維持小於 5 m 均方根誤差之系統性地圖高程誤差。這ERS1雷達系統的表現對於地形應用，雖然對大部分的地區有效，但對於時間的不相關誤差、透過修正軌道重覆週期得到的絕對高程及符合精密軌道技術等仍期待有改進的空間，這最後的成果將在全球製圖任務有很多的應用。

附錄三 教育訓練相關資料

內政部國土測繪中心 99 年度教育訓練
「發展合成孔徑雷達干涉技術於測繪領域應用先期規劃案研習會」

課 程 配 當 表

日期 時間	98 年 4 月 6 日 (星期二)
08:30 ┆ 09:00	報 到
09:10 ┆ 10:00	InSAR 及 DInSAR 原理、處理流程及應用簡介 講師：中央大學教授 吳究
10:10 ┆ 11:00	1. Doris 軟體介紹 2. Doris 軟體產製 DTM 及變遷偵測成果分析
11:10 ┆ 12:00	講師：中央大學博士生 張奇 助教：研究生 蕭逸凡
12:00 ┆ 13:30	午 餐
13:30 ┆ 14:30	上機操作實習—DTM 產製及變遷偵測分析
14:40 ┆ 16:30	講師：高雄應用科技大學助理教授 謝嘉聲 助教：研究生 蕭逸凡
16:30	賦 歸
備註	訓練場地：本中心 5 樓第 2 會議室。

檔 號：

保存年限：

內政部國土測繪中心 函

機關地址：40873台中市黎明路2段497號4樓
聯絡人及電話：湯美華(04)22522966轉208
電子郵件信箱：m1@mail.nlsc.gov.tw
傳真電話：(04)22592273

受文者：國立中央大學

發文日期：中華民國99年3月24日
發文字號：測企字第0990002869號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：普通
附件：

主旨：貴校檢送承辦本中心「發展合成孔徑雷達干涉技術於測繪應用先期規劃」案（案號：NLSC-98-13，計畫主持人吳究教授）教育訓練課程表，本中心原則同意，屆時請依表定課程積極辦理。

說明：復 貴校99年3月22日中大遙字第0996000096號函。

正本：國立中央大學
副本：本中心秘書室、企劃課 099/03/24
10:00:40

裝

訂

線



附錄四 研討會發表文章摘要

以 DGPS 和 InSAR 幾何圖形詮釋差分算符

Differential GPS and Interferometric SAR Geometry for a Delta-Operator Interpretation

吳究¹ 張奇² 謝吉修²

Joz Wu, Chi Chang, and Chi-Hsiu Hsieh

摘要

於測繪科技中差分算符頻頻派上用場，尤其兩個數量相減能直接剔除共通卻絕對未知的誤差影響量。導航衛星定位之際，參考和移動天線共通的系統誤差計有衛星軌道與時鐘偏差、電離層與對流層延遲、使用者接收時錶偏差等。差分 DGPS 算符使資料分析模式僅含相對的變量。

干涉合成孔徑雷達 InSAR 量測目標物背向散射回波到接收天線相位距離之差異。藉正確回復的相位和高精度干涉基線長度與方位，始能重建物空間數值地型。本於幾何圖形與它對代數結果的呈現，作者們試洞察 DGPS 相對對流層延遲參數，和詮釋 InSAR 大數係數(分子時遠大於分母)演算模式。

關鍵詞：DGPS、InSAR、餘弦定律、誤差傳播

Abstract

A difference operator is frequently employed in geomatics for eliminating unknown common-mode bias influences. In satellite navigation, there can be systematic errors for reference and rover receiving antennae, such as the satellite orbit and clock biases, the ionospheric and tropospheric delays, the user's clock offsets, etc. Based on a differential GPS operation, the data analysis model only has relative parameters.

Interferometric SAR can be used to measure the difference in phase ranges via a backscattered echo from a target to both receiving antennae. Due to the correct phase unwrapping and the precise length and orientation of an interferometric baseline, it becomes possible to generate a digital terrain model. With a geometric figure representing an algebraic equation, the writers try to look into the DGPS-based tropospheric delays, and they also interpret large-coefficient InSAR range error.

Key words: DGPS, InSAR, Cosine law, Error propagation

¹ 臺灣中壢 國立中央大學太空及遙測研究中心 教授 (通訊作者, Email: jozwu@csrsr.ncu.edu.tw)

² 臺灣中壢 國立中央大學土木工程學系空間資訊組 博士候選人

使用合成孔徑雷達干涉技術產製數值地形模型之研究—以中台灣地區為例

Study on DTM Generation Using Synthetic Aperature Radar Interferometry Technique – Example of Middle Taiwan

張奇³ 吳究⁴ 蕭逸凡³
Chi Chang Joz Wu Yi-Fan Shaw

摘要

合成孔徑雷達干涉技術(Synthetic Aperature Radar Interferometry; InSAR)是獲得數值地形模型(Digital Terrain Model; DTM)的利器，其原理主要是利用同一目標物在兩個不同衛星位置上的雷達回波訊號的相位差，來獲取地表高精度的三維資訊。InSAR 產製 DTM 之主要步驟包含有影像套合、產生干涉圖、全相位回復等，最後即可得到 DTM。實驗影像採用 1996、2004、2005 年的 ERS-1/2 衛星影像進行測試，地點選擇為中台灣地區，該區如為平坦區，則干涉情形良好；但如為山區，則植被濃密，不易產生干涉現象。本研究將以公用軟體 Doris 進行 DTM 產製之初步分析，並尋求改進之道。

關鍵詞：合成孔徑干涉雷達、數值地形模型、影像套合、相位回復

Abstract

Synthetic Aperature Radar Interferometry (InSAR) is a new technique to explore the Digital Terrain Model (DTM). It makes use of the phase difference of the radar echoes at two different Satellite positions to extract the 3D information of the surface. The DTM can be generated from InSAR technique, the procedure includes image registration, interferogram generation, phase unwrapping and DTM generation. The test data are ERS-2 acquired on 1996, 2004, and 2005 . The test site is in the middle Taiwan. The interferogram was not significant in high mountains and dense vegetation area. This study that DTM will be generated using Doris public software, preliminary analyzed and refined them.

Keyword: InSAR, DTM, image registration, phase unwrapping

³ 國立中央大學太空及遙測研究博士候選人

⁴ 國立中央大學太空科學研究所教授

³ 國立中央大學太空及遙測研究碩士生

INTERFEROMETRIC SAR TECHNIQUE FOR HILLY DTM REFINEMENT IN TAIWAN

Yi-Fan Hsiao¹, Joz Wu^{1,2}, and Chi Chang¹

¹Department of Civil Engineering, National Central University

²Center for Space and Remote Sensing Research, National Central
University

E-mail: ¹973202090@cc.ncu.edu.tw; ²jozwu@csrsr.ncu.edu.tw,

KEYWORDS: InSAR, Permanent Scatterer, DTM

ABSTRACT: Spaceborne synthetic aperture radar (SAR) has become the best Earth's surface measurement tool according to not only radar sensor can obtain geoinformation without sunlight effect but also it can update geoinformation quickly which because of satellite's cycle observation. Interferometry SAR (InSAR) is the technique which can produce digital terrain model by just two SAR images in same region. Most spaceborne SAR satellites have just one antenna, so they can't take images pairs in the same circle. To solve that problem we using different period SAR images instead. However, it could not make the effective interference fringes successful when the objects on the ground had been changed numerous. This situation always happened in hilly area.

One way to solve this problem is using the permanent scatterer interferometry SAR (PS-InSAR) method. Because of the artificial structures on the ground would not be murdered frequently, we consider them to be the permanent scatterers. Afterward we rebuild the interferometry by those permanent scatterers. We expected the results on the hilly can be produced digital terrain model, and the accuracy can be within 10 meters.

Differential InSAR Detection of Surface Displacements in Central Taiwan 利用 DInSAR 技術偵測中台灣的地表變遷

Yi-Fan Hsiao⁽¹⁾, Joz Wu⁽²⁾, Chi Chang⁽³⁾
蕭逸凡⁽¹⁾，吳究⁽²⁾，張奇⁽³⁾

⁽¹⁾ Department of Civil Engineering, National Central University, Zhongli, Taiwan

⁽²⁾ Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University, Zhongli, Taiwan

⁽³⁾ Department of Civil Engineering, National Central University, Zhongli, Taiwan

⁽¹⁾ 中央大學工學院土木系，中壢，台灣

⁽²⁾ 中央大學太空及遙測研究中心，中壢，台灣

⁽³⁾ 中央大學工學院土木系，中壢，台灣

Abstract:

Spaceborne synthetic aperture radar (SAR) has become the best Earth's surface measurement tool because not only radar sensor can obtain geoinformation without sunlight effect but also radar sensor can update geoinformation quickly according to satellite's cycle observation. Differential Interferometry SAR (DInSAR) is the technique which can detect surface displacements on the order of a few centi-metres. The technique uses three or four SAR images building two different InSAR images first, and then finds the differential between the two pairs. Most spaceborne SAR satellites can't take images pairs in the same circle because they have just one antenna. To solve that problem we using two-pass differential interferometry method. However, it could not make the effective interference fringes successful when the objects on the ground had been changed numerous. This situation always happened in hilly area. One way to solve this problem is using the permanent scatterer interferometry SAR (PS-InSAR) method. Because of the artificial structures on the ground would not be murdered frequently, we consider them to be the permanent scatterers. Afterward we rebuild the interferometry by those permanent scatterers. We expected the results of land change on the hilly can be produced and the accuracy can be within meters.

Key words: **DInSAR, Hill.**

摘要

傳統的測量技術是建立於光學觀測範疇，也就是說只要光線充足的地方就可以進行量測，像是水準儀、光學衛星等等。這種測量方式幫助我們在地面測量上取得良好的成就，但是當測量的發展運用到空中以及衛星時，光學的觀測方式就會受到大氣現象、光線充足否的因素干擾；當有雲的時候不能測量、當光線不足的時候不能拍攝射影像片等等。雷達技術由於不受到大氣作用影響，故其技術發展成為現代測量的重要課題。透過重複軌道的雷達干涉衛星(InSAR)，我們不但可以取得低成本的數值地形模型資料，更透過差分的雷達干涉技術(DInSAR)，可以取得公分等級精度的大範圍變遷偵測資訊。但是重覆軌道的雷達干涉技術會因為地表上的變遷（例如，融雪、植被）等因素，導致在進行雷達干涉時會因為地面上的變化而使得原本應該可以進行的干涉處理的地區變成不能處理。本研究是想建立山區觀測的機制，並想導入 PS-InSAR 的技術，使得起伏大的山區也可以進行廣泛的變遷偵測。

關鍵字：矮山，合成孔徑雷達，差分干涉。

整合多時期 SAR 影像之監測實例

The case of change detection by multi-temporal SAR image integration

蕭逸凡¹ 張奇² 吳究³ 謝嘉聲⁴
Yi-Fan Hsiao, Chi Chang, Joz Wu, Chia-Sheng Hsieh

摘要

近年來，合成孔徑干涉雷達差分技術已經成為研究上一項利於觀測地表變形的工具，透過所獲取的大量影像，有助於我們更能夠連續性的觀測地表變形。

但是，雷達訊號在空間上與時間上的不相關性，限制了此項技術無法更廣泛的應用；永久散射體雷達干涉技術，利用追蹤分散的點目標，能有效克服時間以及空間上不相關的限制；因此，本研究將此項技術應用在所選取的研究區域內，以期能更清楚的了解地表變化的時空演變。

關鍵詞：合成孔徑干涉雷達差分，永久散射體雷達干涉

Abstract

Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) technique has increasingly been applied in geosciences as a powerful tool to monitor land surface deformation. In addition, the large archives of SAR data enable us to monitor ground deformation continually.

However, temporal and spatial decorrelations of radar signal have prevented this technique from more frequent utilization. An advanced InSAR processing technique that tracks the signals of discreted point-wise targets called Persistent Scatterers Interferometry Technique (PSInSAR) was herein applied to our research area in order to better understand the deformation patterns. Thus the PSInSAR method allows us to know the deformation of these discrete points that were minimally affected by decorrelation of radar signals through time.

Keyword : DInSAR, PSInSAR, DTM

¹ 國立中央大學碩士生

² 國立中央大學博士生

³ 國立中央大學教授

⁴ 國立高雄應用科技大學助理教授

內政部國土測繪中心
「發展合成孔徑雷達干涉技術於測繪領域應用先期規劃」案
期末報告審查會意見彙整表

會議時間

99年5月18日(星期二)下午2:30

報告廠商

國立中央大學

委員意見

廠商答覆(含承諾)內容

侯委員
進雄

1. 報告中有關文獻的回顧只引述各研究計畫的結果，但對於各研究區域之地形地貌均無任何說明，請就原始文獻的地形地貌加以引述，俾於瞭解其背景資訊。

將於期末報告修正版中加入相關文獻之地形地貌資訊。

本團隊已將文獻重新審視，已將文獻中有提到的地形地貌及高程資訊加入第二章文獻回顧中。

2. 由於報告中可得到的資訊僅 InSAR 對於丘陵及山地地區的應用不甚理想，請就研究結果作更明確的表述，以提供未來測繪技術規劃之更明確參考指標。

將本案現階段之研究成果於期末報告修正版中作更明確的表述。

已於6.2.1節DTM產製之實驗與結果最後增加高程分界之圖表說明，並於綜合分析中第三點明確述明測試所得之高程。如P.93~96, P.133

3. 本計畫屬應用先期規劃，DTM 的製作與地形變遷應用的可行性，結論建議明確描述適用的地區，可達之精度，以利未來可行應用。

將於期末報告修正版中，在結論與建議方面，針對DTM產製與地形變遷等應用，明確描述所適用的地區及可達到之精度。

已於第十章結論第二點中說明。如P.168

吳委員
水吉

1. 本案最後應對研究結果做歸納整理，說明資料處理情形、成果及相關限制條件等。

將本案現階段之研究成果於期末報告修正版中做歸納整理，並說明資料處理情形、成果及相關限制條件等。

已於第六章綜合分析中第九點列表綜整補述。如 P.137~138

2. 在建議有提供入射角可能是導致同調性不好的問題，對於此項說明建議收集相關資料，以輔助說明。

將於期末報告修正版中收集入射角可能是導致同調性不好原因之相關資料。

已於第六章綜合分析中第八點說明。如 P.136~137

蔡委員 展榮	1. 在 SAR 影像的發展歷史會因應用面的限制而有所轉變，建議增加 SAR 影像的轉變過程，以提供未來策略規劃參考。	將於期末報告修正版中補充有關 SAR 影像的轉變過程等資料。 已於 2.3 節中補充說明 SAR 之發展趨勢及因如無法產生三維（高程）資訊而轉變發展 InSAR 及 POLInSAR，如 P.18~21。
	2. 結論裡建議依據幾何資料的判讀、製圖比例尺等，明確說明不同雷達系統的可用性及適用性。	將於期末報告修正版中補充說明。 已於第十章結論第五點中說明。如 P.169
徐委員 百輝	1. 文獻回顧為早期之論文或研究成果，建議增列近期及 PS-InSAR 之研究。	將於期末報告修正版中增列較近期之 InSAR(DInSAR)及 PSInSAR 相關文獻，並做回顧。 已於第二章文獻回顧中補述，並增列於參考文獻中，如 P.23~24
	2. 本案期末報告僅重在衛載 SRA 之介紹與應用，建議增加有關空載 SAR 之相關資料，如目前既有之系統規格、精度等。	將於期末報告修正版中增加有關空載 SAR 之相關資料（含目前之發展概況、系統規格及其精度等）。 已於 8.3 節中補充說明。如 P.162~163
	3. 本案第3章比較分析，建議先釐清InSAR、DInSAR之主要應用方向，再針對該應用，與其他測繪技術進行比較。	將於期末報告修正版中將第三章重新撰擬及調整順序。 已於第三章先將 InSAR(DInSAR)之應用領域說明後，再介紹可使用的測繪技術(已調整順序)。如 P.29~31
	4. 本案除 Doris 外，亦提及其他開放原碼軟體，建議與商用軟體列表，說明其適用性及限制條件等資訊。	將於期末報告修正版中列表說明 Doris 與其它軟體之比較分析（含價格、適用性及限制條件等） 已於 6.1 節中補充 DORIS 與其他商用（公用）軟體列表比較。如 P.74~76
朱委員 金水	1. 期末報告中民國年及西元年、影像區域表示方式等，請統一寫法。	將於期末報告修正版中將年份及影像區域方式寫法統一。 已統一修正。
	2. 本案 P.46 說明基線為響雷達干涉重要限制因素，其中提及基線太長&基線太短部分，建議增加參考數值。	將於期末報告修正版中說明基線太長、太短之參考數值。 已補充。如 P.54

	3.表 9.1 所列查核點，應明確列出查核項目內容。	將於期末報告修正版中明確列出查核項目內容（或建議甘特圖中刪除此項）。 已修正。如 P.166~167
劉委員 正倫	1.Diapason 使用 2 軌跡法，清境廬山使用 3 軌跡法，921 地震變遷使用 4 軌跡法，3 者使用不同差分干涉方式，請補充說明使用原則。	將於期末報告修正版中補充說明 2 軌跡法、3 軌跡法及 4 軌跡法之使用原則、時機與其比較分析。 已於 6.3 節最後及 6.5 節綜合分析第八點中補述。如 P.123~124, 137~138
	2.P.113 提及 PS-InSAR 有套用大氣效應與地形效應，為何僅 PS-InSAR 之實驗有套用大氣效應與地形效應，其他實驗均未納入，請補充說明。	將於期末報告修正版中補充各項實驗案例是否納入大氣模式之原因說明。 1. 目前因雷達干涉處理是在 DORIS 下執行，並無大氣效應或地形效應選項，故無法套用此模式；且在一般的處理中，必須有相對應的參考資料才能模擬之。如 GPS 固定站因可長期觀測接收衛星資料，即可找尋一模式模擬大氣模式，而 InSAR 卻無類似方式模擬，也許是 DORIS 未考量之原因，未來可單獨進行研究。 2. 在 PS 處理中，可將大氣效應及地形效應訂定公式予以模式化，直接納入條件式中求解，且自行設計程式，故 PSInSAR 研究中有納入。
工作小 組意見	1.P.94 表 6.5 之成果分析中缺乏較差數值之數據分析及驗證，與如何在 InSAR 產製之 DTM 中讀取 9 個 e-GPS 追蹤站之高程資料，請補充說明。	將於期末報告修正版中補充說明較差數據及如何讀取 e-GPS 追蹤站之高程資料。 已於 6.2 節最後補充說明。如 P.108~109
	2.P.115 第 1 段「最後的成果會剩下 147 個點，點位的平均密度大約為 4.1PS/km ² 。」，無其他文獻之平均密度參考，難以判斷此成果的優劣，請補充相關資料。	將於期末報告修正版中補充相關文獻資料，以支撐研究成果。 已補充相關參考文獻，以支撐成果。如 P.132
	3.P.115 此 PS 成果僅由圖 6.46 評估，缺乏數據分析，無法佐證 6.5 綜合分第 1 項最後 2 行	將於期末報告修正版中補充說明。 因研驗區為彰化地區，包含丘陵地及

	<p>「丘陵地及山區可以 PS-InSAR 技術增加 PS 點，提升變遷分析之精度」，請補充相關資料及說明。</p>	<p>山區，由實驗得知成果可接受，且本研究主要是說明應用 PSInSAR 技術可以使得原本不能製作出良好的變形對的影像對也可以製作出變形資訊，也就是說若是可以及時得到雷達影像資料，就可以製作出變形資訊。如 P.127~128</p>
<p>4.P.119</p>	<p>ALOS 之 SLC 格式無法為 Doris 應用，是否有測試其他之格式偵測模組，或利用 Diapason 測試，以找尋其他解決策略，請補充說明。</p>	<p>將於期末報告修正版中補充 ALOS SLC 格式相關問題及是否可於其它軟體中進行測試等說明。</p> <p>由於 ALOS 衛星資料較新，各地的格式並沒有統一，造成軟體並不能處理每一個處理站產出的 SLC 產品。也就是說 CEOS 資料格式中，不同的處理站有不同的處理方式，資料格式自然也就不同。如 P.76 說明。解決策略目前只有使用者自行於處理站所處理的檔頭資料中搜尋或計算 DORIS 之參數設定格式中所要的資料。</p>
<p>5.P.120</p>	<p>7.1.1 DTM 更新可行作法評估，在此節最後一段提及「本案已初步探討雷達干涉於 DTM 產製之高程分界，區分為平地(50m)、丘陵(50~200m)及山區(200m 以上)三種等級，提供未來 DTM 應用參考」。</p> <p>(1) 高程分界係由實驗區採樣區界定，但採樣區及其高程劃分缺乏說明，請補充說明。</p> <p>(2) 本段僅說明不同地形之成果，但缺乏 3 者於 DTM 產製之作法差異，請補充說明。</p> <p>(3) 期中報告中提到期末將探討干涉於 DTM 產製之最大高程分界，期末僅區分為 3 個等級，並未探討 DTM 產製之最大高程分界，請補充說明。</p>	<p>將於期末報告修正版中配合同調性圖及高程資訊，來探討 DTM 產製之最大高程分界，並補充相關說明。</p> <p>已於第六章 DTM 產製之實驗與結果增加高程分界之圖表說明。如 P.92~96</p>
<p>6.P.122</p>	<p>7.1.3 更新頻率探討，建議地形無特殊變化以 3-5 年更新乙次即可，但缺乏更新頻率相關分析，請補充說明。</p>	<p>將於期末報告修正版中補充更新頻率相關分析。</p> <p>已於 7.1.3 節補充說明，如 P.144~145</p>

	<p>7.P.127 建議以 ERS 系列影像做為長期研究或投資的對象，但相關分析並未納入精密星曆之有無、精密星曆取得時間，以及在無精密星曆的情況下，應用面之解決方法等因素，請補充相關分析及評估。</p>	<p>將於期末報告修正版中加入有無精密星曆資料（或在無精密星曆之情況下如何提供解決之道）之選項，並再重新進行評估與分析。</p> <p>已增列相關分析於 7.2.3 中，如 P.152。</p>
	<p>8.8.2 應用原則上應有前人研究驗證，進而轉換為適合之作法，而非概略敘述可能之應用面，1~6 項請補充參考文獻，並修正相關內容。</p>	<p>將於期末報告修正版中修正內容及補充相關參考文獻。</p> <p>已於 8.2 節中補充相關文獻。如 P.155~159</p>