101-46-7618
MOTC-IOT-100-H2DB006

海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)

交 通 部 運 輸 研 究 所
中 華 民 國 101 年 4 月

101-46-7618
MOTC-IOT-100-H2DB006

海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)

著 者：邱永芳、李良輝、張富東、蔣敏玲

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 101 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)
/邱永芳等著. --初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，
民 101.04
面 ；　　公分
ISBN 978-986-03-1984-2 (平裝)

1. 海岸 2.遙感探測 3.衛星觀測 4.地理資訊系統

351.915　　101004173

海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)

著　　者：邱永芳、李良輝、張富東、蔣敏玲
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：10548 臺北市敦化北路 240 號
網　　址：www.ihmt.gov.tw (中文版＞中心出版品)
電　　話：(04)26587176
出版年月：中華民國 101 年 4 月
印 刷 者：
版(刷)次冊數：初版一刷 80 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站
定　　價：150 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010100430　　ISBN：978-986-03-1984-2 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)
本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

101

海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)

交通部運輸研究所

GPN: 1010100430
定價 150 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="4">出版品名稱：海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)</td></tr>
<tr><td>國際標準書號（或叢刊號）
ISBN978-986-03-1984-2(平裝)</td><td>政府出版品統一編號
1010100430</td><td>運輸研究所出版品編號
101-46-7618</td><td>計畫編號
100-H2DB006</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：港研中心
主管：邱永芳主任
計畫主持人：邱永芳主任
研究人員：張富東、蔣敏玲
聯絡電話：04-26587120
傳真號碼：04-26571329</td><td colspan="2">合作研究單位：國立高雄應用科技大學
計畫主持人：李良輝副教授
研究人員：謝嘉聲、張庭榮
地址：807 高雄市三民區建工路 415 號
聯絡電話：07-3814526 轉 5256</td><td>研究期間
自 100 年 03 月
至 100 年 11 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：遙感探測，地表形變，差分干涉雷達，永久散射體雷達干涉</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：
海岸帶是實施海洋綜合管理的關鍵地帶，對其進行即時、動態的監測有其重要性。近年來，合成孔徑雷達影像(Synthetic Aperture Radar, SAR)已廣泛地被運用於地球表面的探測且成效良好。合成孔徑雷達影像係藉由雷達天線主動發射並接收其地表反射訊號來獲取地表資訊，除可穿透雲、雨、濛、霧外，亦具有全天候監測能力，其優點為可於短時間內獲取大片面積的高密度及公分級精度的高程變動資料。
永久散射體雷達干涉技術(Persistent Scatterers InSAR, PSInSAR)為較新的衛星大地測量法，傳統DInSAR技術受限於山區植被，容易導致測量誤差，造成地表監測的不準確性，而永久散射體雷達干涉技術，利用萃取分散的穩定點目標，能有效克服空間性及時間性的相關限制。本研究選擇屏東平原為研究區域，使用ERS1/2序列影像，探討PSInSAR技術於地表變化與沉陷之應用，以期能更清楚的瞭解長時間的地表變形狀況。
本研究使用 Andy Hooper 所開發的 StaMPS 軟體進行 PSInSAR 的分析。過程中使用影像處理軟體 Doris 及影像前處理軟體 ROI_PAC，同時利用 SNAPHU 軟體對差分干涉結果進行解相位的計算。本試驗並將 PSInSAR 所得結果與 GPS 測量資料進一步做比對，其結果相當一致，顯示 PSInSAR 技術具有良好的應用潛力。
本研究成果之效益及後續應用主要包括：
1. 臺灣周邊海域及島嶼遙測影像資料重整與局部更新。
2. 大型圖像之 3D 管理查詢及顯示系統平臺與功能之重置。
3. 無人飛行載具(UAV) 應用於即時海岸帶攝影實務及影像處理系統開發。
4. 多源圖像局部快速修測及更新之策略。</td></tr>
<tr><td>出版日期</td><td>頁數</td><td>工本費</td><td>本 出 版 品 取 得 方 式</td></tr>
<tr><td>101 年 4 月</td><td>170</td><td>150</td><td>凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按工本費價購。</td></tr>
<tr><td colspan="4">機密等級：
□密□密 □機密 □極機密 □絕對機密
（解密條件：□ 年 月 日解密，□公布後解密，□附件抽存後解密，
□工作完成或會議終了時解密，□另行檢討後辦理解密）
■普通</td></tr>
<tr><td colspan="4">備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。</td></tr>
</table>

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Integrated Applications of Remote Sensing Technique in the Coastal Zone Areas (3/4)

ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
ISBN978-986-03-1984-2 (pbk)	1010100430	101-46-7618	100-H2DB006

DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER
DIVISION DIRECTOR: Chiu Yuang-Fang
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yuang-Fang
PROJECT STAFF: Chang Fu-tung, Chiang Min-ling
PHONE: +886-4-26587120
FAX: +886-4-26571329

PROJECT PERIOD
FROM March 2011
TO November 2011

RESEARCH AGENCY: National Kaohsiung University of Applied Sciences
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee Liang-Hwei
PROJECT STAFF: Shei Chia-Sen, Chang Tin-Lung
ADDRESS: 415 Chien Kung Road, Kaohsiung 807, Taiwan, R.O.C.
PHONE: +886-7-3814526 ext5256

KEY WORDS:
Remote Sensing, Terrain Deformation, Differential Interferometric SAR (DInSAR), Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR)

ABSTRACT

The coast zone is the key tract that carries out the combined ocean administration, monitoring to these area with dynamic and real-time is very import works. Recently, interferometry synthetic aperture radar (InSAR) has been widely and efficiently used in exploring the properties of earth surface. InSAR obtains the information of earth surface by using the radar antenna to actively launch and receive the signals reflected from earth surface. InSAR can not only penetrate through the clouds, rains, mists, and fogs but also monitor the circumstances in all-weather, which positively helps in obtaining the terrain deformation data of a large area with high density and centimeter-scale accuracy in a short period of time.

Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR) is a new method of satellite imagery measurement. Limited to the dense vegetations in mountain area, the conventional DInSAR measurement easily results in survey errors and decreases the accuracy of monitoring the earth surface. PSInSAR, however, can detect the stable points of each interferogram and generate the time series of each stable point, which overcomes the limitations in the conventional DInSAR and provides comparable data for further analysis. Ping-Tung Area is selected as study area, and use ERS1/2 Radar images and PSInSAR technique applied to understanding detail terrain deformation. This study uses the StaMPS software developed by Andy Hooper to perform the PSInSAR analysis. In the processes, the ROI_PAC software is used to generate the Single Look Complex (SLC) images from the raw data, and then the Doris software is used to produce the interferograms. Meanwhile, the SNAPHU software is used to calculate the phase unwrapping for the results of differential interference. Furthermore, the comparisons between the results of PSInSAR and the survey data of GPS are performed in the experiments, and some discussions and inferences are made from the comparisons.

This research's benefits and applications include:

1. The strategy of map revised locally and quickly using multi-source image.
2. The dynamic 4D GIS data processing and visualize display.
3. The airborne LiDAR Techniques applied to coast zone area.
4. The coastline extraction and change detection with sub-pixel level accuracy.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
April 2012	170	150	☐RESTRICTED ☐CONFIDENTIAL ☐SECRET ☐TOP SECRET ■UNCLASSIFIED

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

目　錄

中文摘要.....I

英文摘要.....II

目錄.....III

圖目錄.....VI

表目錄.....VIII

第一章 前言.....1-1

1.1 緣起.....1-1

1.2 海島與海岸帶遙測的需求與意義.....1-2

1.3 海島與海岸帶環境遙測監測資料與應用現狀.....1-3

第二章 研究項目與工作時程.....2-1

2.1 前二年度已完成工作項目與內容.....2-1

2.2 工作項目.....2-1

2.3 工作時程與進度.....2-3

2.4 工作內容.....2-3

第三章 海岸線特徵與變遷分析.....3-1

3.1 海岸線特徵提取.....3-4

3.2 影像多尺度自動化海岸線特徵提取.....3-7

3.3 局部地區海岸線變遷探討.....3-6

第四章 雷達成像與干涉(差分)雷達.....4-1

4.1 前言 4-1
4.2 SAR 的基本原理 4-3
4.2.1 雷達影像之幾何變形 4-7
4.2.2 合成孔徑雷達(SAR) 4-8
4.3 雷達干涉技術用於地表變形監測 4-11
4.3.1 InSAR 工作原理及資料處理流程 4-12
4.3.2 D-InSAR 技術 4-14
4.3.3 InSAR/GPS 整合技術用於地表變形觀測 4-15
4.3.4 InSAR 在地表變形測量中應用 4-17
4.4 雷達干涉處理流程 4-17
第五章 固定散射體雷達干涉技術(PS-InSAR) 5-1
5.1 前言 5-1
5.2 主影像的選擇 5-3
5.3 PS 點選擇 5-4
5.4 粹取線性變形量及 DEM 殘差估算 5-6
5.5 粹取非線性變形量及大氣效應 5-9
第六章 PS-InSAR 成果評估與分析 6-1
6.1 使用軟體與流程 6-1
6.2 試驗衛星與影像規格介紹 6-4
6.3 研究區域介紹 6-4
6.4 實驗成果 6-6

6.5 PS 與 GPS 觀測資料比對 6-10
6.6 討論 6-16
第七章 結論 7-1
參考文獻 R-1
附錄一 期中審查意見回覆表 ..... 附 1-1
附錄二 期末審查意見回覆表 ..... 附 2-1
附錄三 期中報告簡報資料 ..... 附 3-1
附錄四 期末報告簡報資料 ..... 附 4-1

圖目錄

圖 3.1 各基準面與海水面的關係.....3-2
圖 3.2 初始近似海岸線之提取.....3-4
圖 3.3 海岸線之 3D 模式化及基於次像元(Sub-Pixel)之偵測.....3-5
圖 3.4 高解析度影像之參考海岸線提取.....3-5
圖 3.5 不同解析影像之海岸線之套合.....3-6
圖 3.6 不同空間解析度岸線提取之誤差分析.....3-6
圖 3.7 GM(1,1)模型的建立流程.....3-9
圖 3.8 大甲溪河口.....3-11
圖 3.9 1990, 2006, 2008, 2010 海岸分佈圖.....3-11
圖 4.1 研究處理流程示意圖.....4-3
圖 4.2 側視真實孔徑雷達架構.....4-5
圖 4.3 斜距解析度與地距解析度之關係.....4-6
圖 4.4 方位解析度與地距之關係.....4-7
圖 4.5 雷達影像幾何變形圖.....4-7
圖 4.6 合成孔徑雷達利用合成天線陣列接收、傳送脈波之示意.....4-9
圖 4.7 臺灣中部海岸帶 Envisat 雷達圖像範例.....4-10
圖 4.8 InSAR 技術工作原理.....4-12
圖 4.9 星載重複軌道方式的 InSAR 工作原理.....4-13
圖 4.10 差分干涉技術處理流程圖.....4-19
圖 4.11 衛載 SAR 系統觀測任務時間序列圖.....4-20
圖 4.12 台中地區的雷達振幅影像.....4-22

圖 4.13 台中地區 96/3/6 及 96/3/7 影像都普勒中心值 4-24
圖 4.14 初步形成的干涉條紋.....4-27
圖 4.15 相位平坦化之幾何關係.....4-28
圖 4.16 從橢球及 DEM 模擬產生的干涉圖.....4-29
圖 4.17 經過平坦化處理的干涉圖.....4-29
圖 4.18 經過微調處理的干涉圖.....4-27
圖 4.19 雷達影像同調性圖.....4-31
圖 4.20 經過全相位回復的干涉圖.....4-33
圖 4.21 座標定位的干涉圖.....4-34
圖 6.1 PSInSAR 處理流程 6-3
圖 6.2 ERS 衛星軌道圖 6-5
圖 6.3 ERS 影像的 DEM 誤差.....6-6
圖 6.4 ERS 影像的大氣效應誤差（單位：mm） 6-7
圖 6.5 Doris 軟體所運算出的 DInSAR 干涉圖.....6-8
圖 6.6 PS 點於 ERS 影像時間序列上所反映的地表變形量.....6-9
圖 6.7 ERS 影像平均速度場套上強度影像圖(Amplitude images).....6-10
圖 6.8 PS 變形速率(mm/yr)套疊在 SPOT 衛星影像上的結果示意圖 6-13
圖 6.9 GPS 變形速率(mm/yr)套疊在 SPOT 衛星影像上的結果示意圖
.....6-14
圖 6.10 將 PS 結果與 GPS 投影在視衛星方向結果，均套疊在 SPOT 衛
.....6-15

表目錄

表 2-1 工作時程與進度表 2-3
表 3-1 原始圖像所得原始列表(單位為 m).....3-12
表 4-1 干涉技術處理時不同應用的實用基線長度 4-25
表 6-1 衛星的參數資料 6-4
表 6-2 PSInSAR 使用的影像資訊（主影像為 1998 年 3 月 12 日）....6-5

第一章　前言

1.1 緣起

隨著社會經濟的快速發展，人們的物質生活水準得以不斷提高，但與此同時，各種資源、能源的大規模開發，加之環境保護措施缺乏，使得陸地表面的自然環境破壞狀況日益顯著，嚴重威脅了人類的生存與永續發展。現階段，人口問題、能源短缺、環境惡化已成為困擾人類社會的三大難題。在巨大壓力面前，人類已經逐漸把海洋作為解決所面臨困境的重要途徑，海洋將成為人類賴以生存的新區域。

海洋是生命的搖籃、風雨的故鄉、五洲的通道。資源的寶庫。海洋在一定程度上主宰著一個國家的興衰。國際社會普遍認為 21 世紀是海洋世紀。這一國際社會公認的結論有著豐富的內涵。研究海洋、開發利用海洋對國家的永續發展戰略的實施具有重要意義。早在 2002 年，加拿大制定了「加拿大海洋戰略」；2004 年，美國提出了 21 世紀的新海洋政策－「21 世紀海洋藍圖」，公佈了「美國海洋行動計畫」；同年，日本發佈了第一部海洋白皮書，提出對海洋實施全面管理；韓國也提出了「韓國 21 世紀海洋」國家戰略。已開發國家依靠在海洋高科技中的領先地位實施海洋產業發展戰略，不僅搶佔海洋空間和資源，而且把發展海洋高科技作為海洋開發的重要手段。

由於世界海洋經濟的快速增長。海上工業活動日益頻繁，特別是海上石油的開發高潮迭起。海洋開發活動在為人類帶來巨大的能源和財富的同時。也對海洋環境造成了很大的影響。產生了諸多問題，包括近海水質的惡化、珊瑚礁的消失，紅樹林的破壞、海岸線的變遷與海洋溢油污染等。1994 年，第 49 屆聯合國大會向全世界宣佈 1998 年為國際海洋年，以提高人們對海洋重要性的認識與海洋生態環境保護的自覺性。

海島與海岸帶是海洋系統與陸地系統緊密連接的樞紐地帶，研究與其相關的生態系統和周邊的環境特性及變化具有十分重要的意義。

一般來講，海島是海洋中四面環水並在高潮時露出海平面自然形成的陸地，是散佈於廣大海域中的天然鑲嵌體。在現代國際海洋法律制度下，海島與內海、領海、專屬經濟區、大陸棚一起，構造成沿岸國的「海洋國土」。海島環境特殊，特別是中、小型島嶼和島群，作為沿海國家的一項特殊的資源和國土，在資源開發和國土安全方面發揮著重要作用。

1.2 海島與海岸帶遙測的需求與意義

海島與海岸帶是實施海洋資源綜合管理的關鍵地帶。是海洋開發利用的核心區域。要實現對海島與海岸帶地區的綜合管理和有效開發利用，必須動態地掌握該地區的地理條件、自然資源情況、社會經濟發展狀況等資訊，因此，對海島與海岸帶進行即時、動態的監測對其合理開發與利用十分重要。作為海陸相互作用的交匯區，海岸帶具有複雜性和多變性的特點，傳統的海島與海岸帶調查手段存在一定的局限性，無論監測手段還是調查強度都難以滿足海島與海岸帶資源開發、環境與災害監測的需求。遙測技術被引入海島與海岸帶環境的監測中，已成為海洋資源及海洋環境監測的有效手段。

遙測技術與常規的海洋調查手段相比，具有許多獨特的優點，第一，遙測監測不受地表、海面、天氣和人為條件的限制，可以探測地理位置偏遠、環境條件惡劣的海區；第二，遙測監測的宏觀特性使它能夠進行大範圍的海島與海岸帶資源的同步調查與監測；第三，能夠週期性地觀測海洋，實現對海洋污染物的擴散、海洋生態系統的動態變化等即時監測；第四，多波段與高光譜遙測資料可以提取豐富的海洋資訊，使大幅提升海島與海岸帶研究水準成為可能。總之，遙測技術可用於研究近岸水域地形地貌特點、淺部構造、海岸類型、海岸線變化及發展趨勢、潮間帶演變、島礁分佈、航道變遷、海水懸浮物及葉綠素分佈、海流及波浪狀況、海洋溢油污染及其分佈等諸多海島與海岸帶環境問題。但如何利用多源、多時相、主被動相融合的航空與衛星遙測資料，獲取海島與海岸帶及其近海資源環境資訊並建立相關

研究模型，仍是海島與海岸帶遙測應用中的一項重要任務。

1.3 海島與海岸帶環境遙測監測資料與應用現狀

在資料來源方面，用於海島與海岸帶監測的衛星，大體上可以分為三大類：

1. 海洋水色衛星

主要用於探測海洋水色要素，如葉綠素濃度、懸浮泥沙含量、有色可溶性有機物等，此外也可獲得淺海水下地形、海冰、海水污染以及海流等資訊。

2. 海洋地形衛星

主要用於探測海表面拓撲，即海平面高度的空間分佈，以及探測海冰、有效波高、海面風速和海流等。

3. 海洋動力環境衛星

主要用於探測海洋動力環境要素，如海面風場、浪場、流場、海冰等。還可以獲得海洋污染、淺水水下地形與海平面高度等資訊。

傳統的海島與海岸帶資訊提取是透過歷史海圖、地形圖和實地調查結果對比分析得到的。這種常規的調查方法由於觀測難度大、耗資多與週期長等缺點，已經遠不能滿足海島與海岸帶經濟的發展以及現代化管理的需求。自從美國大地衛星系列 Landsat 成功發射以來，遙測、地理資訊系統(GIS)以及空間定位技術的不斷發展，為海洋科學研究提供了全新的研究手段，為海島和海岸帶的全面調查與開發、資源管理、海洋工程建設等提供了堅實的基礎。諸多研究顯示，遙測資料是海洋研究的重要資料來源，是建立多種模型的基本依據。尤其是遙測具有大範圍、多時相、多光譜、高解析度、多感測器等優勢，使其對海島與海岸帶狀況的監測更具即時性和科學性。

我國缺乏專有的海洋衛星，而目前海洋衛星之解析度較低，主要

以小尺度、大範圍之資料獲取與應用為主，如 MODIS 影像。一般而言，並不適合對島嶼及海岸帶需大尺度的資源調查或環境監測之應用。對地觀測的地球資源衛星近十年來有快速的發展，影像的空間解析度已達 1 公尺以內，如 Ikonos，QuickBird，Earth Watch 等衛星影像已有多年之應用，新一代更高解析度之衛星遙測影像，如 World View-II，GeoEye 及數位航拍影像、雷達影像(SAR)及空載雷射掃瞄(LiDAR)技術之加入，更提升了遙測技術之應用潛力。因此，選擇目前高解析度之遙測技術更能滿足實務工作之應用與需求。

第二章　研究項目與工作時程

2.1 前二年度已完成工作項目與內容

1. 第一年：主題－近岸及海岸帶遙測圖像資料之獲取、系統建置與資料局部更新。

   (1)臺灣周邊海域及島嶼遙測影像資料重整與局部更新。

   (2)大型圖像之 3D 管理查詢及顯示系統平臺與功能之重置。

   (3)無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)應用於即時海岸帶攝影實務及影像處理系統開發，包括：UAV 定位與導航方法規劃與設計、影像資料即時傳輸、影像資料幾何(Geometric)校正、輻射(Radiometric)處理及快速拼接(Stitching)及圖像鑲嵌(Mosaic)。

   (4)多源圖像局部快速修測及更新之策略。

2. 第二年：主題－近岸及海岸帶遙測圖像製圖及土地利用調查。

   (1)多源圖像海岸帶影像製圖的方法與程序。

   (2)海岸帶空載雷射掃瞄(Airborne LiDAR)資料之處理與應用。

   (3)基於影像資料之多尺度及次像元精度之岸線資料萃取、岸線變遷分析。

   (4)遙測技術於海島及島礁調查之應用－以澎湖群島為例。

2.2 工作項目

本計畫旨在以前二年度已建置完成之海岸帶圖像資料庫及相關遙測技術為基礎，由可見光、多光譜影像(光學影像)與空載雷射技術，進行海岸帶岸線特徵提取，進而援引主動式之微波遙測技術，包括合成孔徑雷達(SAR)影像、干涉雷達(InSAR)及差分雷達干涉(D-InSAR)技術，整合光學影像於海岸帶地形及地盤下陷調查應用等。

本年度計畫研究主題為：「整合遙測(可見光及雷達)技術之海岸帶特徵調查」。包括下列項目：

1. 遙測技術之島礁調查。
2. 多尺度影像及次像元精度之岸線資料萃取、岸線變遷分析。
3. 高解析合成孔徑雷達(SAR)在海洋及海岸帶的應用。
4. 差分雷達干涉(D-InSAR)量測技術偵測海岸帶高程變形量(沉陷)。

效益及其應用：

1. 利用高解析影像之特性可有效協助相關海岸管理機關加速完成相關之調查與統計之工作。
2. 援引雷達影像技術，可應用於海洋或海岸帶特定目標或特徵之萃取。
3. 差分雷達干涉技術可有效偵測大範圍、高精度海岸帶高程變化資料。
4. 可作為各港務局及海岸管理機關對海岸帶土地沉陷監測與覆蓋調查。

2.3 工作時程與進度

表2-1 工作時程與進度表

月次 / 工作項目	第一個月	第二個月	第三個月	第四個月	第五個月	第六個月	第七個月	第八個月
相關資料之蒐集與整理	■	■						
岸線特徵提取與變遷分析		■	■	■				
PS-InSAR 影像處理模式			■	■	■			
合成孔徑雷達影像校齊處理				■	■	■		
雷達差分干涉(D-InSAR)技術於海岸帶沉陷監測				■	■	■	■	
資料整理與分析報告撰寫					■	■	■	
技術與資料移轉							■	■

2.4 工作內容

遙測技術依使用之感測器之特性可以分成被動式(Passive)遙測之光學影像與主動式(Active)遙測之雷達影像、資料或雷射(LiDAR)技術。光學影像具有高空間解析度、多光譜及豐富之色彩，以接收自然光源對物體之反射能量為主，故攝像時易受天候及日夜之影響為其最大之缺點。而主動式遙測為由感測器發射本身能源並接收其反射回波，其電磁波之波長較長，例如雷達波長介於 1cm~1m 間，穿透力強，故可不受天候及日夜之影響。

主動式遙測以雷達成像為主，由於其特殊的成像幾何及易受地形因素影響，山區雷達影像之幾何糾正較之光學影像要困難得多，但就海岸帶而言，地形相對平坦，且雷達波對水體特性具有特殊之反應，反而具有特定之用途，尤其是全天候的攝像功能，能有效彌補光學影

像之不足，而差分干涉雷達(D-InSAR)技術之應用，更能提供地表微變至公分級內精度之偵測能力，已成為遙測技術中重要的分支。

本年度工作內容主要為援引主動式之微波遙測技術，其中包括了合成孔徑雷達(SAR)影像、干涉雷達(InSAR)及差分干涉雷達(D-InSAR) 、固定散射體雷達干涉技術(PS-InSAR)等技術，可獨立的或整合光學影像發揮其應用之潛力。研究中主要著重於：

1. 雷達成像幾何特性。
2. 雷達影像與光學影像融合(Fusion)技術與方法，整合二種影像之優點之圖像於海岸帶之相關應用(岸線特徵提取)。
3. 差分干涉雷達(D-InSAR)技術於海岸帶地形微變(沉陷)監測之應用與分析。

本研究基於既有現地調查資料之蒐集的完整與方便性，研究區域選擇臺灣西南部(屏東海岸)海岸帶，使用 ERS1/2 序列之雷達影像，並採用新的「固定散射體雷達干涉技術(PS-InSAR)」方法，進行相關的實驗與分析。

第三章　海岸線特徵與變遷分析

3.1 海岸線特徵提取

多年來，利用影像處理技術對遙測影像作自動化海岸線特徵提取，已發展出不少成熟的方法，這些方法包括：區域分割、傳統邊緣提取運算元、灰階影像海岸線提取及多光譜影像分類等方法。若使用多光譜(含紅外線波段)，使用影像自動化分類法可有效取得水邊線，並進一步化算的海岸線特徵。

利用衛星遙測影像研究海岸線的動態變化，首先要解決海岸線如何確定的問題。海岸線的位置受潮汐、海岸地形等因素的影響而變化。而在遙測影像上顯現的海岸線是衛星成像暫態的水邊線。為了準確反映海岸線的動態變化，必須有一個統一的參照標準。一般以同月同潮位法作為準則。但完全滿足這一準則條件的遙測影像資料很困難。海岸線依應用之目的有不同之定義。本研究為以海圖製作為目的，因此採取「平均低潮線法」或「一般高潮線法」作為提取海岸線的依據。

1. 平均低潮線法

平均低潮線的計算不僅需要利用遙測圖像。還需利用潮汐和沿岸地形資料作為參照。因為潮差和坡度是影響低潮線位置的主要因素。在推求低潮線的位置時，首先要掌握研究區的潮汐特徵，確定沿岸潮水位分佈曲線，從而求出影像水邊線和低潮線之間的潮差；然後要確定潮間帶坡度。在沒有實測資料時，可利用不同時相的遙測影像資料推求潮間帶坡度；最後利用潮差和坡度來推求低潮線。其具體步驟如下。

(1)首先，確定沿岸當時潮水位分佈曲線，用電腦進行潮汐預報，給出各驗潮站潮位過程曲線。查取衛星成像時的潮水位，用潮汐分帶法推求沿岸當時潮水位分佈曲線，對各驗潮站潮水位作統一訂正，如圖 3.1 所示。

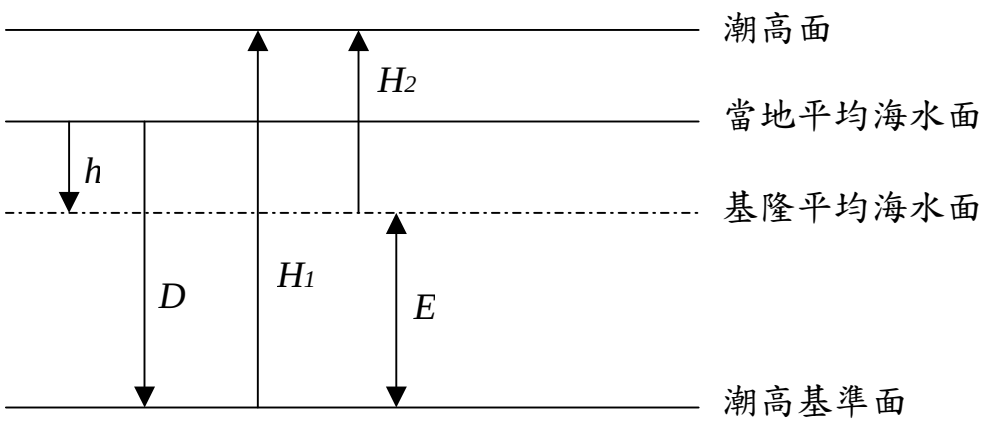


圖 3.1 各基準面與海水面的關係

由各基面換算關係可以得出：

$$H_2 = H_1 - E \quad \text{.....(3.1)}$$

式中

$$E = D - h \quad \text{.....(3.2)}$$

其中

H_1 為預報潮高(在潮高基準面上)。

H_2 為修正潮高(在基隆基準面上)。

D 為潮汐表上驗潮站潮高基準面的深度。

h 為當地平均海面和基隆基面的差值。

E 為基隆基面和潮高基準面的差值。

(2)其次，求潮間帶坡度。確定兩條水邊線的高差△h，即兩景相鄰時相遙測影像水邊線潮水位的差值。將兩幅衛星影像縮放至相同比例尺，求出兩條水邊線間的平 L，求出潮間帶坡度(i)，根據式 i=△h/L(0/00)求出各斷面的坡度。

(3)最後，推求低潮線。查得平均低潮位，求其與影像水邊線的水位

差，利用前面所求坡度計算外推平距，從水邊線外推連接繪出平滑的低潮線。

在缺乏潮汐實測資料和海岸高程的條件下，平均低潮線法不失為一種簡便易行的方法。但要得到精確的海岸線位置很不現實。主要原因在於：沿岸潮位資料難以獲取，如河口或沿岸缺少驗潮站，而目前應用的資料是從附近驗潮站潮位資料推算來的。由潮位、坡度歸算零米線的誤差較大。其次，河口地區地形地貌變化大，有的地形資料現勢代表性較差，歸算結果會存在有不同程度的誤差。

2 一般高潮線法

一般高潮線是指海洋潮流發生一般高潮時。海水所淹沒的平均界線，即通常所說的小潮高潮線。研究顯示，一般高潮線法與同月同潮位法相比。兩種方法的分析結果基本上相近似，能夠滿足宏觀分析所需的精度。同時，一般高潮線可以通過對遙測影像的分類處理與目視解譯相結合來確定，簡單易行，不需要進行修正。並且在不太長的時期內，其平均值受潮汐及海平面的影響較小，可以看作一個常數。

平均低潮線法和一般高潮線法所用資料都基於遙測影像資料，但由於平均低潮線法在提取海岸特徵線時獲取地形和潮汐資料困難，計算過程較複雜。以及利用現有潮汐資料在精度上難以滿足實用要求，而利用一般高潮線法求解海岸線的動態變化比較簡單易行。

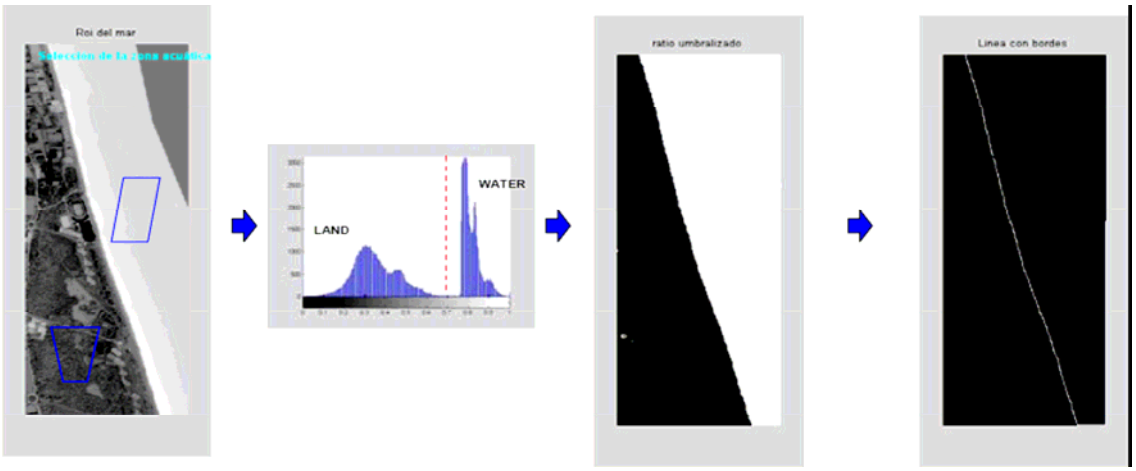
所以，本研究在自然海岸線特徵提取方法上，選擇一般高潮線法來進行岸線特徵之提取，同時輔以人工之影像辨識與數化。對人工海岸之固定特徵而言，傳統以影像運算元(Operator)或濾波器(Filter)提取特徵線的方法存在有精度不足及影像解析度不同時無法適用之問題。本研究對人工海岸特徵提出「影像多尺度自動化海岸線特徵提取」之演算法，期能有效改善前述之問題。

3.2 影像多尺度自動化海岸線特徵提取

由於海岸線變遷為一長時間之作用結果，對於不同的時間會因攝影工具之差異造成不同的影像空間解析度，當使用多源及不同解析度影像進行岸線變遷分析時，為提高較低解析度影像之岸線提取精度，可針對中、低解析度影像(如 LANDSAT, SPOT1~4 衛星影像)，以適當的影像處理技術來克服，藉此可獲得次像元(Sub-Pixel)精度之岸線資料。相關處理步驟如下：

1. 初始近似海岸線之提取

利用影像二值化(Binarization)、腐蝕(Dilution)處理，經影像相減可獲的初始岸線。(圖 3.2)



自動界定值(Threshold)偵測　　二值化－腐蝕　　影像相減

圖 3.2 初始近似海岸線之提取

2. 海岸線之 3D 模式化及基於次像元(Sub-Pixel)之偵測(圖 3.3)

(1)局部區域之選定

(2)五階多項式(Fifth Order Polynomial)之曲線擬合(模式化)

(3)二次微分運算子(Laplacian Operator)特徵曲線提取

(4)偵測曲線上最大曲率(Maximum Curvature)之特徵點，即代表具次像元精度之海岸線。

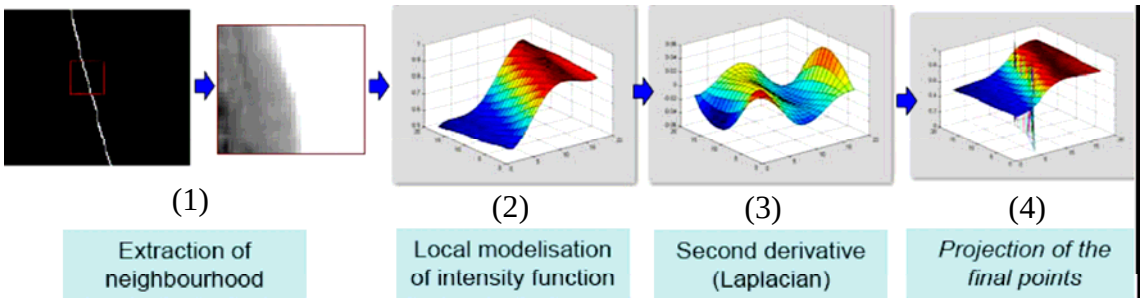


圖 3.3 海岸線之 3D 模式化及基於次像元(Sub-Pixel)之偵測

3. 高解析度影像之參考海岸線提取

高解析度多光譜影像上，進行頻譜分類、二值化+濾波處理、影像判釋，以獲取高精確度之參考海岸線。(圖 3.4)

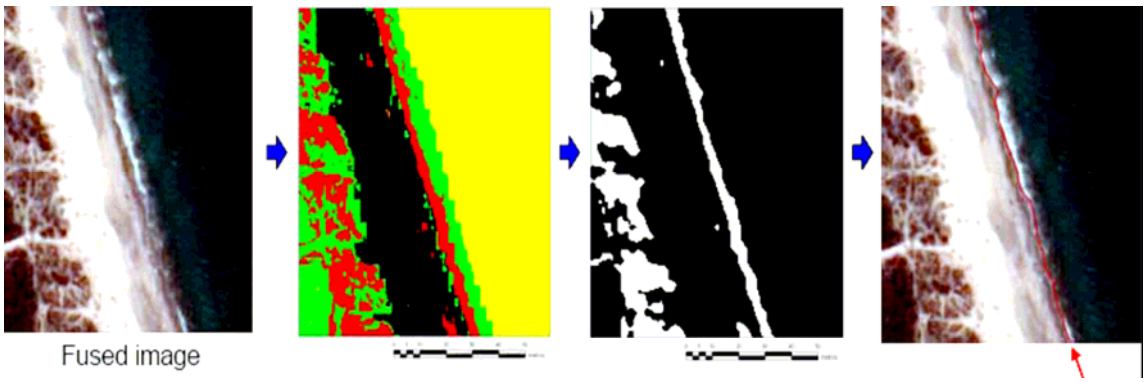


圖 3.4 高解析度影像之參考海岸線提取

4. 不同解析影像之海岸線之套合(圖 3.5)

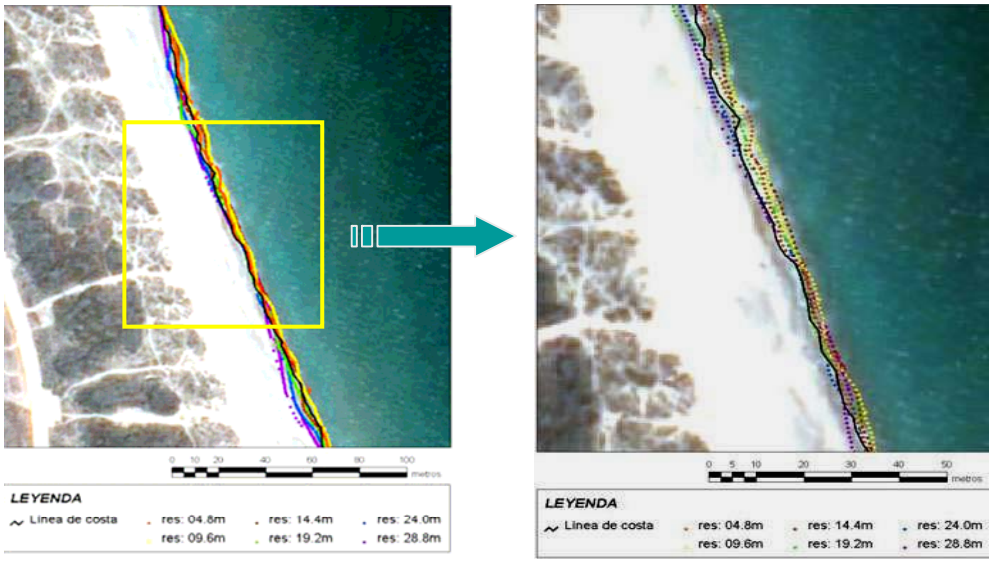
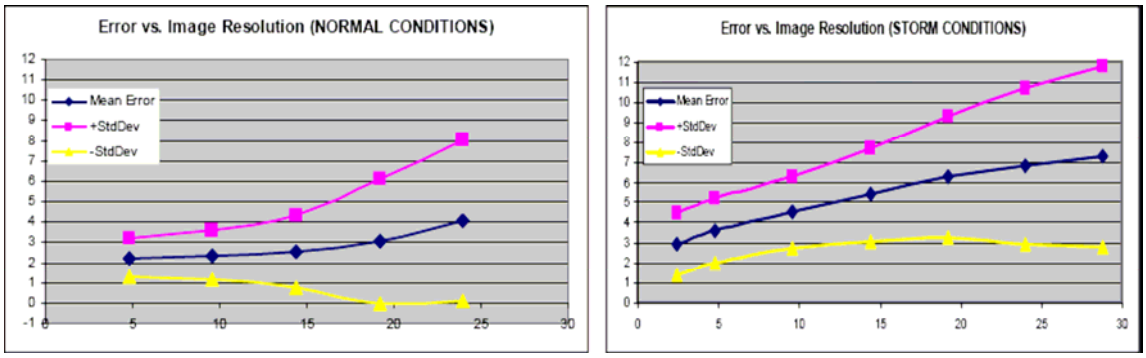


圖 3.5 不同解析影像之海岸線之套合

5. 不同空間解析度(多尺度)與自動海岸線提取之誤差分析(圖 3.6)



正常條件影像：10m 解析度影像；平均誤差約 2.5m
暴風雨後影像：10m 解析度影像；平均誤差約 4.5m

圖 3.6 不同空間解析度岸線提取之誤差分析

3.3 局部地區海岸線變遷探討

由於自然因素和人類活動的影響，致使海岸線發生了很大的變

化。為了能更好的開發和利用海洋資源，監測海岸線變化，促使我們對海岸線變化進行全方位、多角度檢測，效果顯著。隨著技術水準不斷向前推進，檢測方法層出不窮，技術手段也日益更新。

灰色系統理論(Gray System Theory)是 20 世紀 80 年代提出的。灰色系統是指相對於一定的認識層次，系統內部的資訊部分已知，部分未知，即資訊不完全的系統。灰色系統理論認為，各種環境因素對系統的影響，使得表現系統行為特徵的離散資料呈現出離亂。但是這一無規則的離散數列是潛在的有規則序列的一種表現，系統總是有其整體功能，也就必然蘊涵著某種內在規律，因而任何隨機過程都可看作是在一定時空區域變化的灰色過程。隨機量可看作是灰色量，透過生成變換可將無規序列變成有規序列。作為灰色系統理論核心和基礎的灰色模型(Grey Model, GM)，概括而言具有以下三個特點：

(1)建模所需資訊較少，通常只要有四個以上資料即可建模。

(2)不必知道原始資料分佈的先驗特徵，對無規則或不服從任何分佈的任意光滑離散的原始序列，通過有限次的產生即可轉化成為有規序列。

(3)建模的精度較高。可保持原系統的特徵，能較佳地反映系統的實際狀況。

一般的 GM(1,1)模型的建立過程可如圖 3.7 之流程所示。

設一階變量 $x_{(0)}$ 原始序列為：

$$x_{(0)} = \{x_{(0)}(1), x_{(0)}(2), \cdots x_{(0)}(k)\} \quad \text{.....(3.3)}$$

為了減少系統的不確定性，用 AGO(Accumulated Generating Operation, AGO)產生序列一次累加和，表示為：

$$x_{(1)} = \{x_{(1)}(1), x_{(1)}(2), \cdots x_{(1)}(k)\} \quad \text{.....(3.4)}$$

其中

$$x_{(1)}(k)=\sum_{j=1}^{k}X_{(0)}(j) \quad \text{.....(3.5)}$$

由灰色模組$x_{(1)}$構想的一階微分方程為：

$$\frac{dx_{(1)}}{dt}+a\,x_{(1)}=b \quad \text{.....(3.6)}$$

解微分方程，並表示成離散型式為：

$$x_{(1)}(k+1)=\left[x_{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right]e^{-ak}+\frac{b}{a} \quad \text{.....(3.7)}$$

式中 a,b 為待定係數，可用向量$\hat{a}=[a,b]^T$來表示，並利用最小二乘法原理求解 $\hat{a}=[B^TB]^{-1}B^Ty$

$$B=\begin{bmatrix}-\frac{1}{2}[x_{(1)}(1)+x_{(1)}(2)] & 1\\ -\frac{1}{2}[x_{(1)}(2)+x_{(1)}(3)] & 1\\ \vdots & \\ -\frac{1}{2}[x_{(1)}(n-1)+x_{(1)}(n)] & 1\end{bmatrix} \quad \text{.....(3.8)}$$

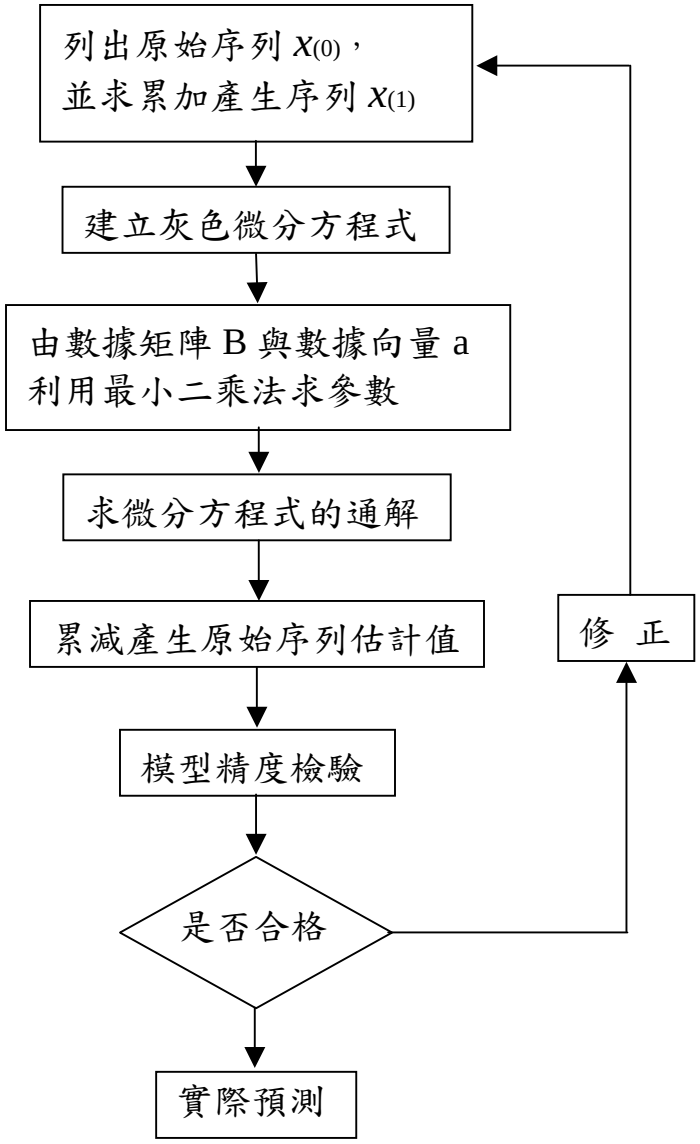


圖 3.7 GM(1,1)模型的建立流程

由於計算的是累加後的數據序列，因此計算結果必須經過累減還原成原來序列

$$f(x)=\begin{cases} x_{(0)}(1) & i=2 \\ x_{(1)}(i)-x_{(1)}(i-1) & i\geq 2 \end{cases} \quad \text{.....(3.9)}$$

1. 模型檢驗：

對模型結果的檢驗可採二種方法，一是後驗差檢驗法，另一是採預測年份實際岸線資料取樣值來驗證預測數據。

(1)求原始數列的方差(Variance)與標準差(Standard Deviation)

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}[x_{(0)}(t) - \overline{x}_{(0)}]^2 \quad ; \quad \sigma_1 = \sqrt{\sigma_1^2} \quad \text{.....(3.10)}$$

其中

$$\overline{x}_{(0)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{(0)}(t) \text{.....(3.11)}$$

(2)求殘差的方差與標準差

殘差：

$$\varepsilon_{(0)}(t) = x_{(0)}(t) - \hat{x}_{(0)}(t) \text{.....(3.12)}$$

式中 $t=1,2,\ldots\ldots n$

(3)求後驗差比值與小誤差概率

後驗差比值 $C = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ ，小誤差概率 $P = P\{\left|\varepsilon_{(0)} - \overline{\varepsilon}_{(0)}\right| < 0.6745\ \sigma_1\}$ ，如果滿足 $\left|\varepsilon_{(0)} - \overline{\varepsilon}_{(0)}\right| < 0.6745\ \sigma_1, (t = 1, 2.....n)$ 的 $\varepsilon_{(0)}$ 的個數為 r，則 $P = \frac{r}{n}$ 。

a. 當 $C \le 0.35$, $P \ge 0.95$ 時，預測模型精度為一級(優)。

b. 當 $0.35 \le C \le 0.5$ 且 $0.8 \le P \ge 0.95$ 時，預測模型精度為二級(合格)。

本研究以前述四張(1990, 2006, 2008, 2010)不同時相衛星影像為基礎，選擇大甲溪河口為例(圖 3.8)，作為灰色建模的基礎數據，運用灰色系統預測方法建立岸線變化灰色預測模型。具體建模步驟為：

1. 在研究區陸地部份任選一點作為原點(O)，作放射狀測線 15 條，依順序記為 1, 2, ….15，如圖 3.9 所示。

2. 利用遙感圖像處理軟體 ERDAS 建立拓撲關係後，則可得到原點至各年海岸線的遙感測量距離值，組成每條側線的原始資料序列。如表 3-1 所示。

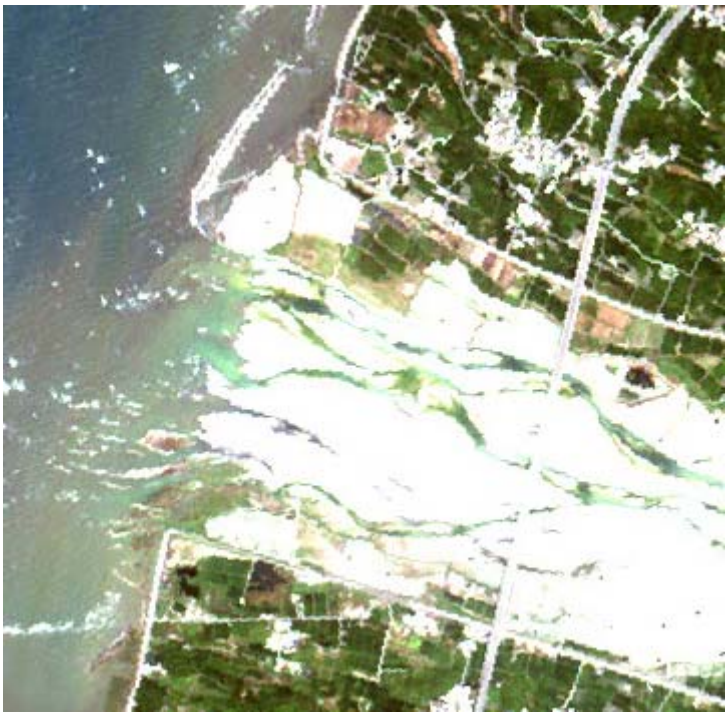


圖 3.8 大甲溪河口

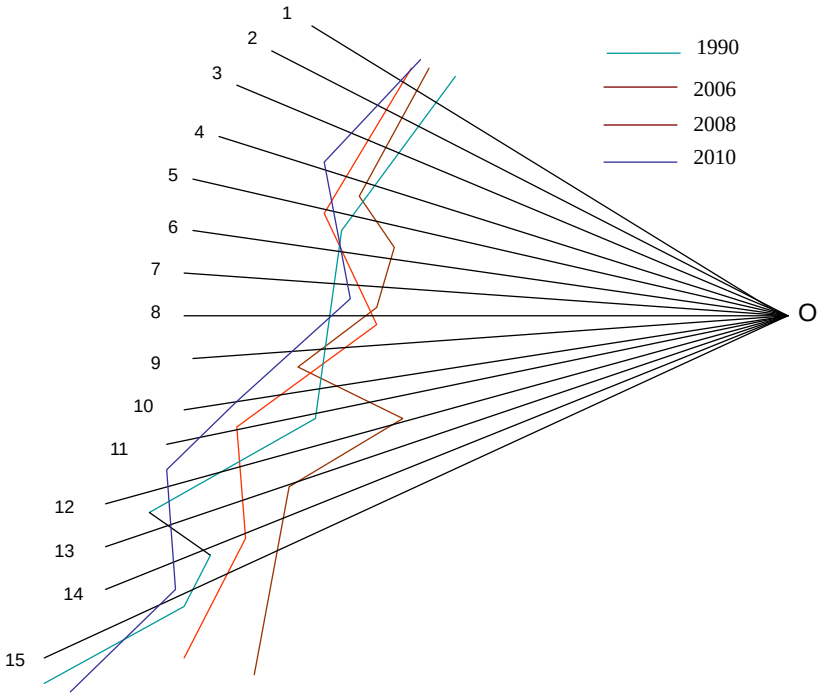


圖 3.9 1990, 2006, 2008, 2010 海岸分佈圖

表3-1 原始圖像所得原始列表(單位為m)

測線	1990 量測值	2006 量測值	2008 量測值	2010 量測值	2010 預測值	絕對 誤差	相對 誤差(%)
1	4447.58	4637.59	5498.07	6658.24	6690.71	-32.47	-0.48
2	4567.65	4984.07	5360.5	8498.53	8507.7	-9.17	-0.11
3	4648.97	5412.72	6147.89	8026.32	8038.65	-12.33	-0.15
4	4638.24	5665.23	8396.46	8087.23	8096.94	-9.71	-0.12
5	4677.97	6022.67	9252.30	8758.03	8096.64	-9.00	-0.10
6	4672.27	5997.06	9225.04	9012.14	9015.99	-3.85	-0.02
7	4139.24	6648.42	9565.14	9168.87	9173.05	-4.18	-0.03
8	4989.31	8334.26	8558.64	9152.11	9171.28	-19.17	0..24
9	4865.91	8581.41	8558.64	9081.24	9057.36	16.12	0.21
10	4863.98	8078.45	8432.56	9048.28	9043.54	4.74	0.04
11	4109.12	8341.96	8944.34	9691.51	9699.76	-8.25	-0.06
12	4032.14	6900.70	9327.20	9590.36	9603.07	-12.71	-0.07
13	3846.10	6905.85	8287.78	9662.45	9673.54	-11.23	-0.10
14	4629.65	8024.12	8936.97	9501.45	9525.60	-24.19	-0.22
15	3919.16	6549.39	8260.79	9098.25	9111.41	-10.05	-0.07

利用灰色系統理論的 GM(1,l)模型預測海岸線變化趨勢時，測線的多少影響著預測結果的精確程度。測線數越多，預測的結果就越精確，相應的運算量也會增大。因此在進行海岸線預測時，對於海岸線變化比較明顯的區域，應選取較多的測線；對於海岸線變化趨勢不明顯的區域，可選取較少的測線。但是隨著預測時間的增長，被忽略的影響海岸線變化的自然因素和人為因素會增多，會使預測值的可靠性降低，因此該方法適用於中短期的海岸線形態變化預測。

第四章　雷達成像與干涉(差分)雷達

4.1 前言

選擇雷達影像作為研究工具有幾個重要的原因。首先，雷達波擁有優越的穿透性，比起可見光更能輕易穿透雲霧煙塵的遮蔽，且在夜間亦能順利施測；而且以電磁波掃瞄可以提供面狀的地表資訊，不像GPS 屬於點的量測。因此雷達影像技術是個快速、全面且經濟的工具。

干涉合成孔徑雷達(Interferometric SAR, InSAR)係利用同一地區所拍攝之兩幅影像進行干涉處理，可產生高精度之數值地型模型(Digital Terrain Model, DTM)，其主要概念為解算影像之像對中，對應像元間雷達回波訊號之振幅(Amplitude)與相位(Phase)並回復影像像元之間的相位差(Phase Unwrapping)，即可獲得大面積之 DTM。

而利用合成孔徑雷達差分干涉技術(Differential InSAR, 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地震及斷層之進一步資訊,對相關學域貢獻良多。Zebker 等人也在 1994 年利用三幅 ERS 雷達影像，產製兩幅干涉條紋圖的差分處理來計算地面變形量，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。

固定散射體(Persistent Scatterers, PS)技術是雷達干涉方法中，較先進的處理技術，主要的目的在解決(克服)長時間的序列影像中，影像對因變形或環境效應影響(大氣及 DTM)導致影像相位改變產生不相關現象，而造成干涉處理的困難[5,6]。該項技術主要是利用像元內的最大的主要訊號源如橋樑及建物等，因該類像元有明顯固定的散射訊號，因此在時間序列的影像中，這些點位在該區域中，有足夠穩定的訊號來提供分析的資訊，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，就可以利用這些固定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。

近年來，應用遙測技術獲取土地資訊因具有涵蓋面積廣、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的能力；但由於空間及時間因素使得傳統的雷達差分干涉法仍存在許多條件限制，故本研究應用永久散射體雷達差分干涉技術(Persistent Scatterer Interferometric SAR，PSInSAR)的結果以挑選反射訊號較強的點位優勢，藉由偵測出自然界中的永久散射體於影像中的點位，進而得到該點位的長時間地形變化量。

本研究主要目的列舉如下：

1. 利用永久散射體雷達干涉技術觀測屏東平原地表變形之情況，藉由瞭解台灣屏東平原地區地表變形之行為，以便提供未來地質災害評估之參考。

2. 將永久散射體雷達干涉技術所得的地表變形資訊與GPS觀測資料進一步做比對，驗證 PSInSAR 技術之實用性。

現有研究的軟體中，有許多專業的商業應用軟體可以同時接受 RAW 影像或 SLC (Single Look Complex) 影像，但在開源程式碼的應用程式中，目前較廣為應用的軟體有 ROI_PAC (Repeat Orbit Interferometry PACkage, ROI_PAC)及 DORIS (Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software, DORIS)兩個應用程式。其中，DORIS 軟體的介面及相關配合的應用程式較完整，使用者可以較快速的學習並熟悉處理及應用，但 DORIS 僅提供了影像套合、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功能，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 格式影像。

為解決擁有原始資料的使用者也能利用 DORIS 來進行 DInSAR 的處理，且因每幅 SLC 影像的處理過程中採用的都卜勒係數值可能有差

異，所以直接採用 SLC 影像產製的干涉圖，也可能會降低成果的精度。因此，為提高干涉成果的精度，本研究擬利用 ROI_PAC 產製相同都卜勒係數值的 SLC 影像後，再由 DORIS 進行影像的 InSAR 處理作業。而由 Hooper 所發展的 Stamps(Stanford Method for PS)就是架構在此理念上，並增加地理空間的相關性因素考量，因此可以在縮減雷達影像像對資料時，並能獲得有效的地表變形資料 Hooper, 2007[7]，因此本研究就以 Stamps 為主，配合 ROI_PAC 及 DORIS 進行 PSInSAR 的處理，主要處理流程如圖 4-1 所示。

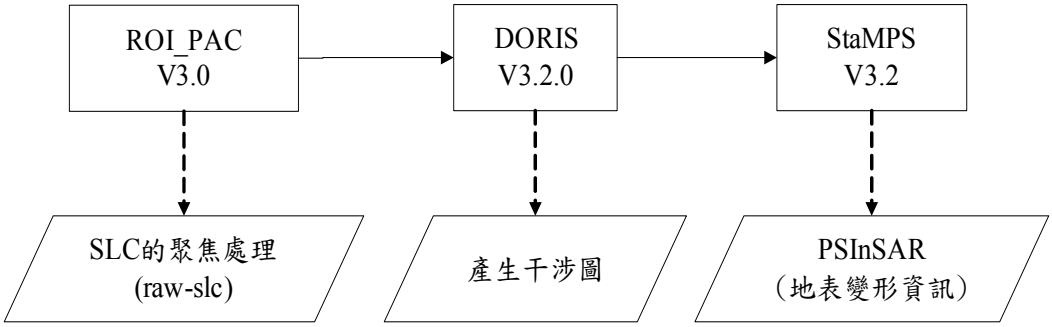


圖4.1 研究處理流程示意圖

4.2 SAR 的基本原理

雷達(Radio Detection and Ranging，RADAR)是主動式微波遙測器，它朝著成像區域發射電磁波，並記錄自目標物返回的信號、回波信號強度及時間延遲。它能主動發射電磁波，不需依賴太陽光及其他光照條件，可以全天候、全天時地獲取數據。雷達系統所使用的電磁波為電磁波譜中可見光及熱紅外譜段之外的微波波段，成像雷達所使用的範圍通常在 1 cm 至 100 cm。使用在微波波段的電磁波可穿透雲層，但電磁波穿透大氣時會被大氣中所含有懸浮粒子影響，產生散射的作用，而散射的強度與波長的四次方成反比，在一定的雲雨天氣下工作，對於波長在 4 cm 以上的雷達波而言，影響甚小，只有當波長小於 2 cm 時，電磁波穿透雲霾的能力才會受到影響，故較長波段的雷達波穿過大氣層時不會受到嚴重的散射作用，造成其不論雲、雨皆能擷

取地表影像的優勢。不同波段的雷達波束，其穿透目標物的能力也不相同，一般而言，電磁波波長愈長，則愈能穿透植物遮蔽，對於短波長、密集的遮蔽與較大的入射角，電磁波能量通常於植被遮的上緣以面散射的形式反射；而長波長、稀疏的遮蔽與較小的入射角，電磁波能量通常能穿透植被遮蔽，而在地表發生反射。

雷達系統，最早由軍方使用，用來探測硬目標(通常為金屬點目標)及測距，而這些雷達系並不產生圖像，而後期發展的雷達遙測技術則是把地形地貌作為主要探測目標。真實孔徑雷達(Real Aperture Radar，RAR)是最早的成像雷達系統，其雷達天線長度是實際長度，雷達波的發射與接收都是以其自身有效長度的效率直接反映到顯示紀錄中；圖 4.2 所示之側視真實孔徑雷達(Side-Looking RAR)即為利用一固定於飛行載具平台(飛機或衛星)上之天線(天線長度：L)，距地高度 h，朝與垂直夾一個視角(Look Angle，θ)之方向發射雷達脈波(脈波週期：τ)，當載具沿著飛行軌道方向(亦為 Azimuth Direction)以相對於地球之固定速度 V 移動，雷達也同樣掃過飛行航線的垂直方向(range direction，其中 A 為近地距點，B 為遠地距點)，並接收目標物回波之強度、相位值及走時(2-Round Travel Time)，產生與飛行航線鄰近地面範圍之連續帶狀影像。

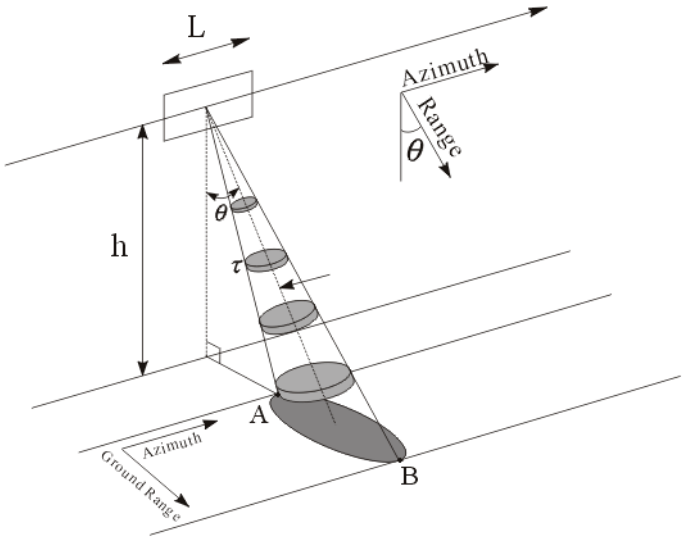


圖4.2 側視真實孔徑雷達架構

描述雷達判別在空間上相鄰目標的最小距離稱為解析度(Resolution)。雷達解析度定義在: 1.與飛行方向平行之方向解析度，稱為距離解析度(Range Resolution)；2.與飛行方向垂直之方向解析度，稱為方位解析度(Azimuth Resolution)。對任何雷達系統而言，由距離解析度與方位解析度所定義的單元稱為分辨單元(Resolution Element, or Pixel)。

1. 距離解析度(range resolution)

脈波長度(pulse length)決定雷達的距離解析度 Rr，脈波長度愈短，距離解析度愈高。c 為光速，τ 為脈波週期(pulse duration)，即一個週期的時間長，而斜距方向 (slant range)上解析度則為:

$$Rr = c\tau/2 \quad \text{.....(4.1)}$$

地距解析度(Rgr，ground range resolution)一般亦稱為距離解析度，其與斜距解析度的關係為(圖 4.3):

$$Rgr = c\tau/2\sin\theta \quad \text{.....(4.2)}$$

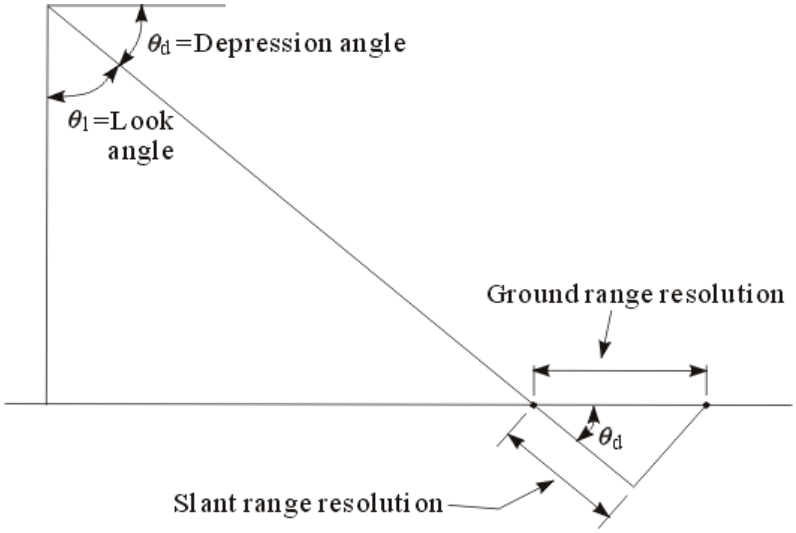


圖4.3 斜距解析度與地距解析度之關係

(Lillesand and Kiefer, 1994)。

地距解析度與視角之正弦函數成反比，也就是視角愈大，Rgr 愈小，即距離飛行航線愈遠，地距解析度愈佳。對 ERS1 而言，其地距解析度約為 25m。

2. 方位解析度(azimuth resolution)

方位解析度 Ra 則由天線波束寬度(Antenna Beam Width)及地距 r 決定，其中天線波束寬度為 λ/La、λ 為波長、La 為天線長。方位解析度為:

$$Ra=\lambda/La * h/\cos\theta=\lambda/La * r \quad \text{.....(4.3)}$$

由上式可得知，側視雷達系統中(λ 與 La 固定)方位解析度隨著地距的增加而呈線性的降低(圖 4.4)。而天線愈長或是減小波長，雖皆可提高方位解析度，但這兩個參數都有其限制。而對 ERS1 而言，若要達到 25 m 的方位解析度，天線長度必須達到 440 m，但對於星載平台而言，是無法攜帶如此龐大的天線在太空中運行，而後 SAR 的出現，其利用合成天線陣列的方式，大大提高了方位解析度，並逐漸取代真實孔徑雷達。

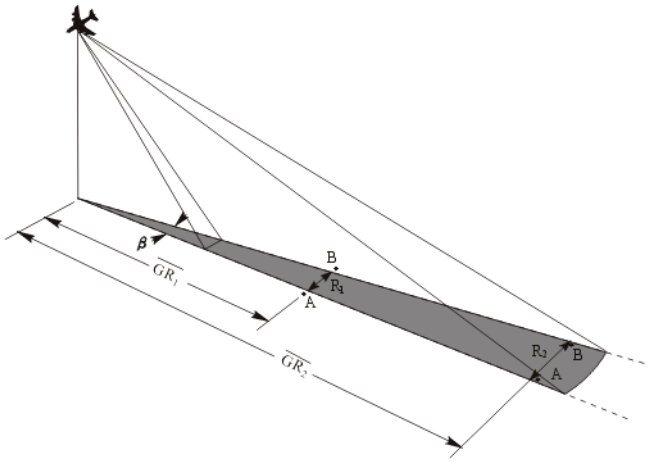


圖4.4 方位解析度與地距之關係

4.2.1 雷達影像之幾何變形

側視雷達影像除了因投影方式會引起的斜距尺度變形外，也會因為地形起伏的影響，產生明顯的幾何形變(圖 4.5)；詳細如下。

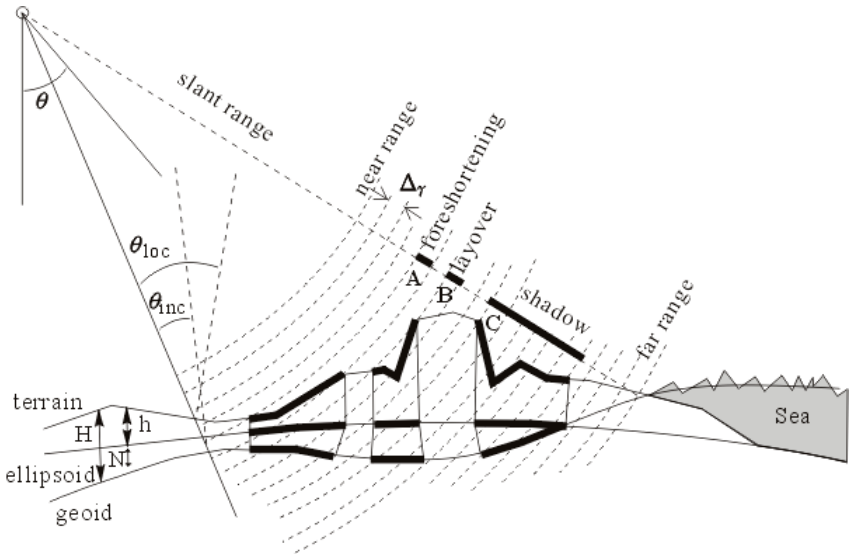


圖4.5 雷達影像幾何變形圖

h 為橢球高，H 為正高，N 為大地起伏

1. 前坡縮短(Foreshorting)

如圖 1-4 所顯示 A 的位置，在雷達圖像上所量得之面向雷達天線的地面斜坡的長度都會比實際長度短，當地形坡度角小於入射角

時，所以面向坡的回波訊號都會被壓縮成像，使得在影像中的特徵比實際情形短且亮，這樣的現象稱為前坡縮短。

2. 疊置(Layover)

如圖 3.4 所顯示 B 的位置，雷達是一個測距系統，離雷達較近的目標的回波會先到達，而遠的目標則較晚到達，故當目標高出地面時，由於頂部比底部更接近雷達，所以頂部會比底部更先成像，且其回波訊號會在影像上重疊，這種情形發生於面向波的坡度大於入射角時，稱為疊置效應。

3. 陰影(Shadow)

如圖 4.5 所顯示 C 的位置，電磁波為直線傳播，當雷達波束壽山豐等高大目標阻擋時，這些目標的背面就收不到微波，因此也不會產生雷達回波，而在雷達影像的相對位置上出現暗區，則稱為雷達陰影。

為了消除由地形所引起的幾何變形，可以由架構在 SAR 圖像的幾何粗校正的基礎上之幾何精校正方法，產生地理編碼的正射影像。有代表性的為加拿大遙測中心的 Guindon 和 Adair (1992)所開發的方法，對於地面控制點容易取得地區，以利用成像參數，包括平臺高度、雷達入射角、飛行路線的方位角、軌跡參考點、信號延遲等，以及地面控制點精確估計飛行路線參數建立正射校正變換公式。而對於地面控制點不易得到地區，則可利用數值高程模型產生模擬圖像，將模擬圖像與原始圖像配準，建立數值高程模型坐標與原始圖像間的變化關係(Guindon and Adair, 1992；Castagnas, 1996)。此方法是按照 SAR 的實際幾何關係來建立影像模型，能正確的校正高程引起的幾何變形。

4.2.2 合成孔徑雷達(SAR)

SAR 利用合成天線陣列的方式(圖 4.6)，利用載具平台上的雷達沿軌道方向前進時不斷的發射脈衝，假設天線陣列之中有五個位置(P1-P2)能看到目標物，並因為天線至目標物 Q 的距離皆不相等，故所接收回

波信號會有不同的相位移，將其分別儲存在不同的記憶體位置，利用都卜勒偏移(Doppler Shift)的原理，使不同天線位置所紀錄的回傳訊號通過一個相位平移器，分別給予相反方向的相位平移來彌補原本的相位差，使目標物的回波經信號處理後之相位趨於一致，而當地面上不同的目標物因與雷達的夾角不同(地距不同)，使得卜勒偏移亦不同，故有不同的相位值。在合成陣列天線中，此時天線長為 Ls=P2-P1，可得到方位解析度為:

$$Ra=\lambda/Ls * r$$

$$Ls=2\lambda r/La$$

可推得 $Ra= La/2$ .....(4.4)

由此可得知，合成孔徑雷達的方位解析度與天線距地的高度以及地距 r 無關，並且由很小的天線就可以得到很高且更佳的解析度。

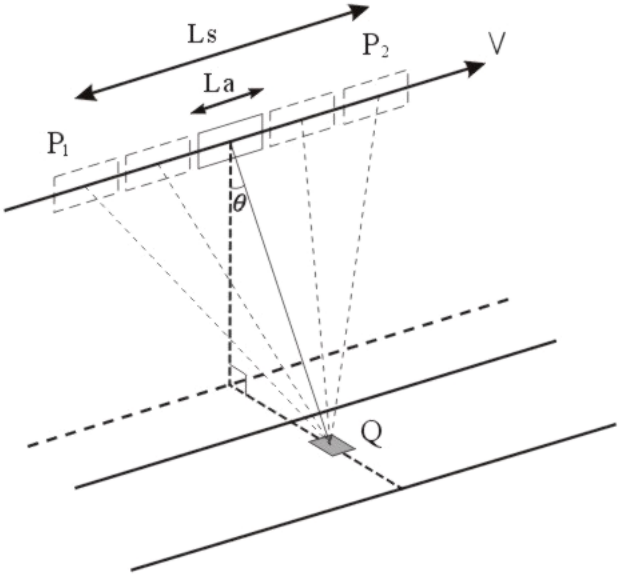


圖4.6 合成孔徑雷達利用合成天線陣列接收、傳送脈波之示意

圖 4.7 為臺灣中部海岸帶 Envisat 雷達圖像範例。

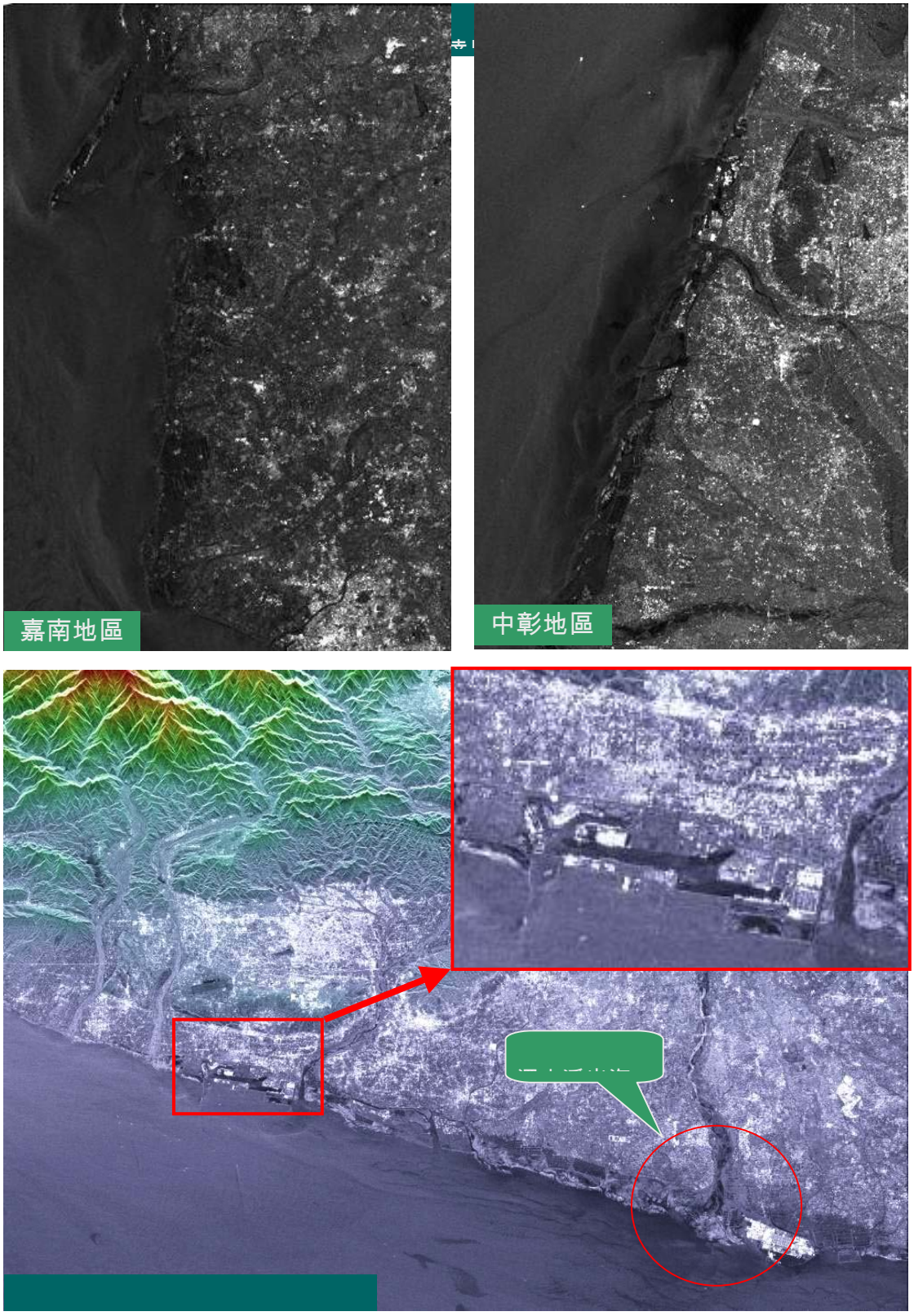


圖4.7臺灣中部海岸帶Envisat雷達圖像範例

4.3 雷達干涉技術用於地表變形監測

GPS 以其精度高、速度快、全天候等優點，成為當今國內外最先進的變形監測手段之一，已在地球動力學、地震科學等研究領域得到廣泛應用。但是，對於大範圍內採用 GPS 方法或水準測量等其他方法布網觀測是相當困難的，並有覆蓋區域小、分佈不夠合理等局限性，可能會遺漏一些重大安全隱患。此外，GPS 方法、水準測量等都是點觀測系統，因而監測資料的空間分辯率很低，很難滿足庫區大範圍變形監測的實際需要。

合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天候、全天時獲取遙測圖像的能力，是近幾年迅速發展起來的微波遙測新技術，而合成孔徑雷達干涉測量(SAR Interferometry，InSAR)，是一種新型的極具潛力的空間對地觀測技術。InSAR 技術使用星載或機載雷達信號的相位資訊提取地球表面三維資訊，能全天候、全天時地獲取大面積地面精確三維資訊，空間解析度高，基本不受氣候條件的影響。目前，在 InSAR 基礎上擴展的差分干涉技術(Differential InSAR, D-InSAR)可測量微小的地表變形，已在研究地震變形、火山運動、冰川漂移、城市沉降以及山體滑坡等方面表現出極好的前景。

InSAR 是傳統的 SAR 技術與干涉測量技術相結合的產物。它通過兩部相隔一定距離且相互獨立的 SAR 天線，分別對地面的同一區域進行成像，得到兩幅滿足一定相干條件的 SAR 圖像，透過干涉處理來獲得數位高程模型(DEM)。這種技術為我們提供了前所未有的空間對地觀測新途徑。最近十多年，InSAR 技術取得了重大突破，一般理論問題趨於解決，已成為微波遙測領域中引人注目的重要分支。[9]

1969 年美國航空太空總署(NASA)第一次採用 InSAR 技術對火星和月球表面進行了觀測。1974 年，Graham 等首次提出用 InSAR 技術用於地球表面製圖的構想，並於當年在機載 X 波段雙天線 SAR 系統下，通過 InSAR 技術得到了等高線圖。美國噴射推進實驗室(JPL)在 InSAR 技術早期研究中做了許多工作；1985 年他們首次在公開出版的

刊物中介紹了 InSAR 技術成果；1986 年 Zebker 和 Goldstein 在三藩市海灣，利用機載 SAR 系統獲得了高程精度達 2~l0m 的測量結果；1988 年 Goldstein 等人從機載雷達影像的觀測應用轉向了 SEASAT SAR 的應用，他們對相隔 3 天的 SAR 資料進行了干涉處理，繪製了地形圖，這些地形圖與公開發表的美國地理測繪圖符合得很好。自從 1991 年歐洲太空中心成功發射 ERS-l 衛星以來，許多學者都利用 ERS-l SAR 重複軌道資料對 SAR 干涉測量的局限性和應用進行了實驗研究。特別是 1995 年 4 月 ERS-2 衛星發射後，由於 ERS-l 和 ERS-2 衛星軌道距離很近，它們的 SAR 資料具有相隔僅 1 天的優點，使星載干涉測量得到了更廣泛的應用。

4.3.1 InSAR工作原理及資料處理流程

InSAR 技術按工作原理可以分為沿軌道法(Along-Orbit)、垂直軌道法(Cross-Orbit)及重複軌道法(Repeat-Orbit Interferometry)等三種方式，如圖 4.8(a),(b),(c)所示)。

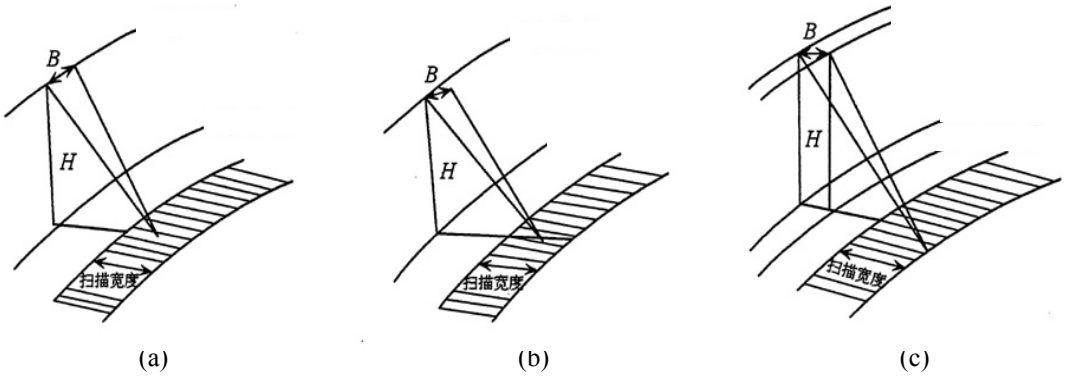


圖4.8 InSAR技術工作原理

沿軌道法是飛行平臺上同時裝載兩個天線，位置-前-後，主要用於海流速度製圖、運動目標探測和方向波浪譜測量等；垂直軌道法與沿軌道法不同僅在於天線位於飛行平臺的兩側，主要用於航空平臺；重複軌道法只需要一副天線，它通過不同的時間對同一地區進行成像，成像期間地表應具有一定的相干性，從而實現干涉測量。前兩種模式主要用於機載系統，最後一種模式主要用於星載 SAR 系統。由於機載

系統的姿態穩定性差，現在主要採用星載 SAR 系統。

星載 SAR 系統通常採用第三種方式。其原理是利用同一衛星在相鄰軌道上對同一地區進行兩次 SAR 成像。利用兩幅 SAR 圖像的相位差所產生的干涉條紋，便可提取出地表高程資訊。圖 4.9 為星載重複軌道方式的 InSAR 工作原理示意圖。

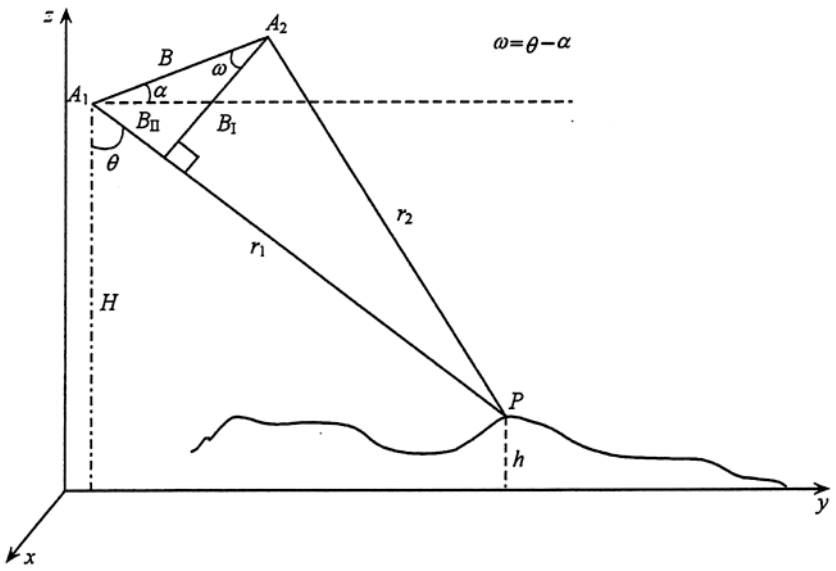


圖4.9 星載重複軌道方式的InSAR工作原理

圖中 A1、A2 分別為重複軌道上對地面解析單元 P 成像的 SAR 瞬間空間位置，r1, r2 為斜距，H 為衛星高度，基線 B 是兩個衛星軌道的偏離量，α 為基線傾角。兩個天線從同一目標表面單元接收信號的路徑差可表示為：

$$\Delta r = |r_2| - |r_1| = B_{\square} \quad \text{..... (4-5)}$$

式中 Δr 為接收信號路徑差，$B_{\square}$ 為基線的視線向分量。由於是同一天線作為發射源，所以路徑差產生的相位差 φ 為：

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) \quad \text{..... (4-6)}$$

式中 λ 為波長。根據成像幾何原理推出地面任一點的高程為：

$$\Delta r = B\sin(\theta - \alpha)$$
$$\theta = \alpha - sin^{-1}[\varphi \cdot \lambda /(4\pi |B|)]$$
$$h = H - r \cdot cos\theta \quad \text{..... (4-7)}$$

式中θ為視角，α為基線與水準方向夾角，r 為斜距，H 為雷達平臺高度，h 為目標高程，B 為基線距。

上式中的φ是解纏後的相位，而干涉雷達測量相位值是2π的模，即是包纏的，因此必須經過相位解纏後才能獲得真實相位以及得到目標的高程資訊。

InSAR 數據一般為單視複型數據(Single Look Complex, SLC)，以實部資料檔案和虛部資料檔案的形式存在，通常所見的影像是複數的模，每一點的相位值由虛部與實部的比值求反正切獲得。顯然這樣所得到的相位值只在[-π,π]之間，要獲得真實的相位值必須進行相位解纏。

獲得了適合做干涉測量的 SAR 數據後，可進行 InSAR 資料處理。

4.3.2 D-InSAR技術

D-InSAR 是在 InSAR 技術上發展起來的，它是利用同一地區的兩幅干涉圖像，其中一幅是由變形事件前兩幅 SAR 圖像獲取的干涉圖像，另一幅是由變形事件前後兩幅 SAR 圖像獲取的干涉圖像，然後通過兩幅干涉圖差分處理(去除地球曲率、地形起伏影響)來獲取地表微量變形。許多實驗結果顯示，採用差分雷達干涉技術可以探測到地面物體小於 l cm 量級的位移變化。這項技術主要應用於地表大面積的微小變形測量領域。

D-InSAR 技術作為一種變形監測新手段，非常適合幅員遼闊、自然條件複雜，變形觀測技術條件和能力非常有限的情況，它所獲取的不是離散點的資訊，而是大面積連續的資訊，可以更完整的反映地表變形資訊。與傳統的測量技術相比，D-InSAR 覆蓋範圍更大、成本更低、空間解析度高，可以監測或識別潛在或未知的地面變形資訊，並且可以全天候工作。因而，在獲取空間連續地表位移場方面，D-InSAR

具有不可替代的應用潛力，成為獲取變形資訊不可缺少的新手段。目前，D-InSAR 已表現出良好的技術優勢，隨著干涉雷達系統和相應資料處理技術的發展和完善，D-InSAR 技術的應用領域將會繼續擴展。

4.3.3 InSAR/GPS整合技術用於地表變形觀測

目前美國、日本、加拿大、中國等許多國家都建立了自己的連續 GPS 監測網(Continuous GPS Networks, CGPS)，用於連續動態監測地面沉降情況。雖然 CGPS 是永久性的、連續性觀測的地面監測網，但 CGPS 受接收儀數量和佈網陣列限制，無法做到佈網密度很高。迄今世界上 GPS 佈網密度最高的是日本的 GEONET 監測網，其最短基線為 25km。

當測區範圍大、自然條件複雜，且交通條件不便，採用 GPS 形變監測方法有覆蓋區域小、分佈不夠合理等局限性，可能遺漏一些重大安全隱患。具體來說，現有的 GPS 形變監測方法主要存在以下缺失：

1. 由於大測區範圍地形和交通條件不便等原因，在測區範圍內使用 GPS 方法佈網觀測是相當困難的，一方面工作量很大，另一方面監測系統的成本非常昂貴。

2. GPS 方法是點觀測系統，因而監測資料的空間解析度很低，很難滿足大範圍形變監測的要求。

3. 由於大範圍區域可能包括深山峽谷，GPS 接收儀天線受到遮擋，使得接收到的 GPS 衛星數減少，導致 GPS 定位精度大幅下降，達不到形變觀測精度要求。

InSAR 因受對流層延遲、電離層延遲、衛星軌道誤差、地表狀況和時間幾何失相關等影響，容易導致 InSAR 圖像解釋錯誤，造成在山區、植被覆蓋區形變測量失敗或大幅降低形變測量的精度，而 InSAR 資料本身無法解決這些現存的問題。這造成了 InSAR 技術在地表形變探測應用中的困難。

GPS 與 InSAR 技術具有如下互補性：

1. GPS 是一種高精度的點定位系統，但是 GPS 的空間解析度較低、成本高，不能滿足大範圍形變監測的需求。而 InSAR 技術則可以彌補其不足，它提供的是整個區域面上的連續資訊，能更直觀地提供地表形變的全貌，其空間解析度可以達到 20m×20m，隨著 SAR 技術的不斷發展，這個空間解析度還可以進一步提高。

2. GPS 獲得的是高精度的絕對座標，而 InSAR 僅提供相對座標，二者整合可滿足大範圍形變監測的觀測精度需求。

3. GPS 在水平方向定位精度較高，但在垂直方向定位精度較低；而 InSAR 對垂直方向的形變資訊特別敏感，可獲得高精度的形變資訊。

4. GPS 允許長時間連續觀測，但 InSAR 是暫態觀測。GPS 可提供時間解析度很高的觀測資料(取樣率可高達 20Hz)，而 SAR 衛星提供的資料通常為 35 天左右的重複週期，很難保證足夠的時間解析度。因此，InSAR 與 GPS 二者整合在時間上可將連續觀測與暫態觀測結合，從而獲取測區區形變場和應變場的動態變化。

由上可以看出，GPS 與 InSAR 技術整合，將突破單一技術應用的局限，發揮其各自優勢。一方面利用 GPS 技術來改正 InSAR 資料本身難以消除的誤差；另一方面充分利用 InSAR 與 GPS 的互補性，實現 GPS 高時間解析度與 InSAR 高空間解析度的有機統一。

GPS 與 InSAR 整合是通過二者的資料融合來實現的。Ge, L. L.等人提出了雙差雙估計法(Double Interpolation and Double Prediction，DIDP)來實現 GPS 與 InSAR 資料的融合，即利用 GPS 資料減弱大氣層延遲影響(對流層延遲、電離層延遲等)和衛星軌道誤差，並通過改正後的 InSAR 圖像去加密 GPS 觀測結果，在時間域內擬合 GPS 資料，在空間域內擬合 InSAR 資料，從而實現高精度、高時間解析度的形變監測。

在植被茂盛或成像干涉品質不高的情形下，如水庫、大壩、橋樑、管線和滑坡等區域，可以在預先設定的 GPS 監測點上安裝角反射器作

為永久性散射體(PS)，PS 可良好地反射感測器發射的電磁波並在 SAR 影像中出現明顯特徵點。這些 GPS 監測點具有精確影像座標的同時也具有精確的地理座標。

4.3.4 InSAR在地表變形測量中應用

1. 利用 InSAR 技術獲取數位高程模型(DEM)

採用 InSAR 技術來獲取精確的數位高程模型是一種新方法，有專家預測，InSAR 將可能成為建立全球 DEM 的唯一有效技術。利用 InSAR 技術建立 DEM 的主要步驟包括：干涉雷達信號資料的處理、成像參數的統一化、資料的幾何精匹配、平坦地形相位的糾正以及相位的解纏，經過上述步驟的處理，即可獲得斜距向的數位高程模型 DEM，再進行地理編碼(Geocoding)即可得到正射投影的數位高程模型 DEM。

2. D-InSAR 技術監測地表沉降

目前監測城市地表下沉一般採用 GPS 控制網測量和高等級水準測量，這兩種測量方法除了人力和資金耗費巨大、GPS 和水準監測點需要長期維護這些缺點，最大的問題是 GPS 和水準測量方法僅能獲得離散點的下沉量。利用 D-InSAR 技術可以有效地克服上述缺點，由於城市一般地勢比較平坦，植被相對較少，雷達反射的相關性較好，容易獲得品質較好的干涉圖像，因而利用 D-InSAR 技術監測地表下陷容易實現。

透過與地面水準測量資料的比較顯示，D-InSAR 測量值與水準測量值的相關度達 0.94 , D-InSAR 測量精度可達 5mm。

4.4 雷達干涉處理流程

合成孔徑雷達干涉技術(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)利用兩幅同一地區不同時間(位置)所拍攝的影像進行干涉處理，此項技術能產生高精度的數值地形模型，更能進一步利用雷達差

分干涉技術(Differential InSAR, D-InSAR)，精確的量測地表變形量。目前該項技術主要應用於火山監控、冰川漂移、地震變形、地層下陷偵測等。

因為衛星的軌道固定及其週期規律，利用衛載的雷達資料進行監控，可週期性的拍攝各地區的影像，並且雷達具有穿透雲層的特性，亦能在天候不佳時拍攝影像，不必擔心缺乏資料的問題。因雷達拍攝影像涵蓋範圍大，可以獲得大區域且全面性的資料，配合差分干涉技術將可獲得高精度的資料，因此雷達差分干涉技術是一項偵測地震變形強而有力的工具。

在變形量的監控上，傳統上以精密測量的方法來進行，但因受限於儀器的精度及人力、物力的需求，所以不太容易進行大範圍、高精度、高密度的測量。最近，雖然 GPS 技術快速發展，可以較快速的獲得高精度的成果，但仍受限於必須親臨現場且僅能測得單點資料的限制；若測區範圍擴大，則人力和物力的要求都要相對增加。

相對這些傳統測量方法的限制，就是以雷達差分干涉技術來獲得地表變形量的優點。以衛星來拍攝地表影像，能不間斷的重複拍攝，有連續性資料可使用，並且變形的量測精度更可以達到公分甚或公厘級的精度，不受日光及天氣的影響，是相當好的變形偵測工具。所以本研究就利用 D-InSAR 的方法來進行台灣海岸地區地層下陷的研究。

干涉圖的產生及差分干涉處理流程包含有影像套合、產生干涉圖、平坦化及全像位回復等，詳細流程如圖 4.10。

從圖中可知，處理流程中主要程序為選擇合適的雷達影像對，並從影像對中產生地形對及變形對，每一個像對都需進行套合處理的程序，為加速處理速度，可將套合處理分為初步套合及精密套合，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，所以需執行平坦化的處理，再將干涉圖的軌道誤差移除，產生與地形相對應的干涉圖。

將干涉圖進行相位回復處理後，可以產生與實際高程相對應的雷達坐標干涉圖，此時可以透過斜距轉換計算及坐標定位產生數值地形模型，也可以將變形對去除地形效應產生變形量的干涉圖。

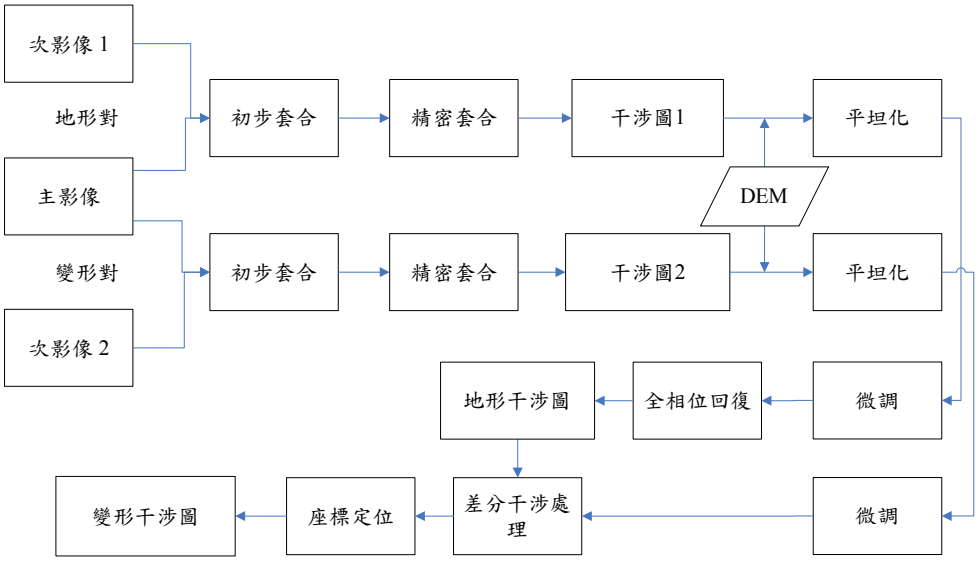


圖 4.10 差分干涉技術處理流程圖

從圖中可知，處理流程中主要程序為選擇合適的雷達影像對，並從影像對中產生地形對及變形對，每一個像對都需進行套合處理的程序，為加速處理速度，可將套合處理分為初步套合及精密套合，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，所以需執行平坦化的處理，再將干涉圖的軌道誤差移除，產生與地形相對應的干涉圖。

將干涉圖進行相位回復處理後，可以產生與實際高程相對應的雷達坐標干涉圖，此時可以透過斜距轉換計算及坐標定位產生數值地形模型，也可以將變形對去除地形效應產生變形量的干涉圖。

1. 資料來源

選擇合適的影像來源才可能處理出符合要求的結果。在干涉的處理中，複數雷達影像是必備的要求，所以選擇的影像必須具備振幅資料及相位資料。通常複數影像以實數及虛數的方式來表示，在複數空

間中，地面解析度範圍內散射的結果就是影像像元的向量，而向量的長度表示振幅，向量的角度就是相位值。

為選擇合適的影像來源，經整理衛載 SAR 系統的觀測任務及時間序列如圖 4.11。從圖中可以看出最早發射的衛載雷達系統是 Seasat 衛星，目前還在運作的衛星右方有箭頭表示，包含有 ERS-2、RADARSAT、ENVISAT 及 ALOS 等衛星。

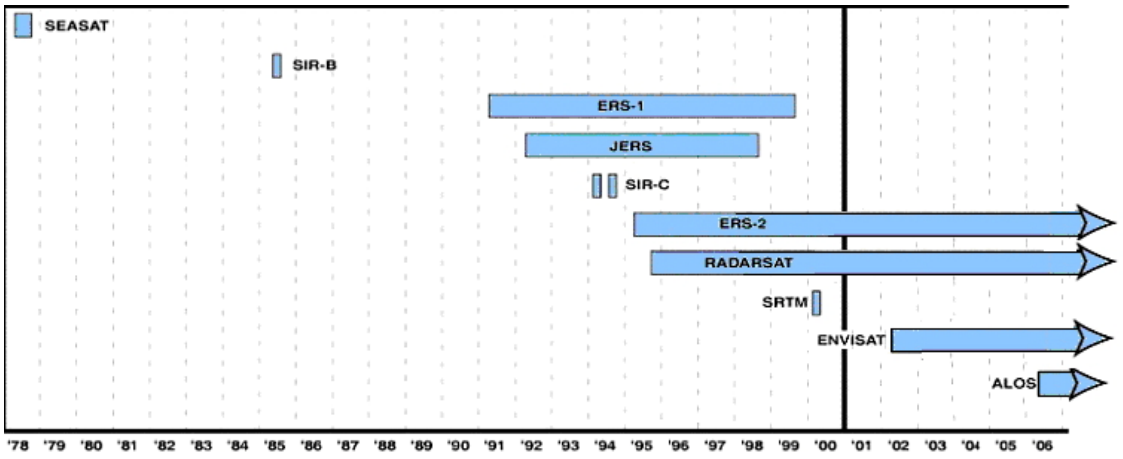


圖 4.11 衛載 SAR 系統觀測任務時間序列圖

2. SAR 影像格式

CEOS 針對 SAR 雷達影像的檔頭格式及資料格式加以定義。一幅符合 CEOS 規格的 SAR 影像必須具備三個檔案：標頭檔(Leader file)、影像檔(Image file)及尾檔(Trailer file)，另外影像中會有一個描述影像資料的卷冊檔(Volume file)，所以一幅標準的 CEOS SAR 影像必須具備上述四個檔案。

干涉的處理雖也可以從已經聚焦處理的單一觀點影像(Single-Look Complex, SLC)開始，但是大部分的處理都是從 RAW 格式開始，其原因為 RAW 的影像檔案較小、傳遞較快、也保留有較多的原始資料，可以配合干涉的處理要求進行不同聚焦的處理，產生較好的結果[Hanssen, 2001]。RAW 的影像資料從衛星接收下來時是 5bits，但為便於儲存，將每個像元資料補成 8bits 的位元組儲存在影像檔中，所以每一像元的

值為介於 0-31 之間。該項資料為複數型態，包括有 Inphase(I)及 Qquadrature(Q)兩部份。

在影像資料中，影像最前面有一個短的檔頭，此檔頭記載影像的各項基本資料。影像中每一行的起始處有一短的行頭敘述(Prefix)，利用此行頭的資料，可以檢查影像中行與行之間是不是連續的，如果敘述不連續，表示行的影像間有遺漏。因為雷達影像的成像模式為行掃描、紀錄，所以傳輸的時候都是以行為單位，如果在傳輸的過程中，有任何狀況造成資料錯誤或遺失，可以從行頭的敘述中檢查出來。所以在處理衛星影像時，一定要先進行檢查動作，避免因整行影像的錯漏造成錯誤的影響。

3. 影像選取

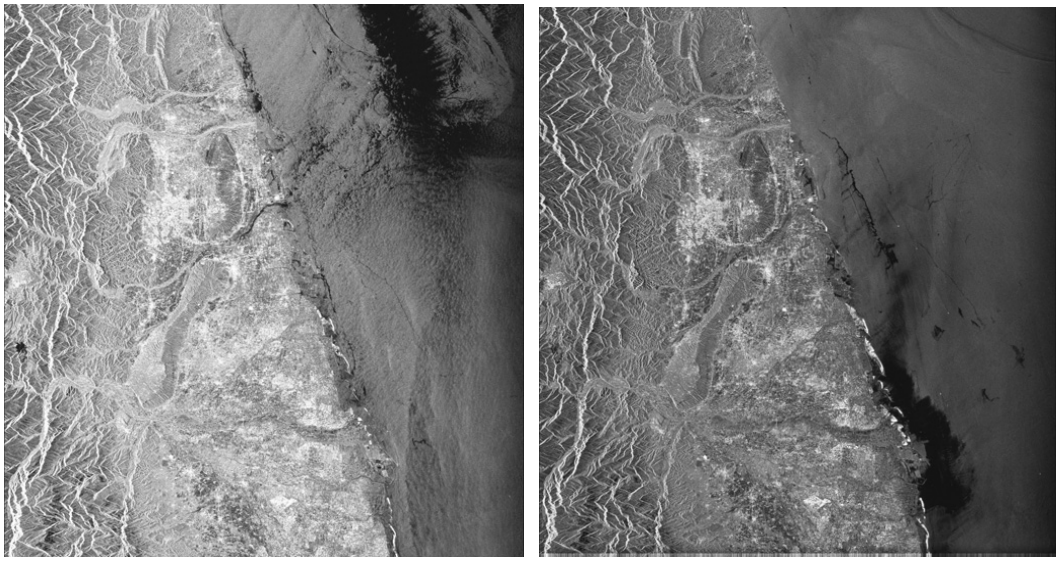
在決定區域後，影像的選擇是開始最重要的一個步驟，如果有相當多的影像可供選擇，則以研究的方向為主要考量，考慮的因素有感測器的型態、可用的資料、基線的長短及時間分佈等條件。

感測器決定主要的因素有：雷達波長、軌道的傾角及重複軌道的週期等。目前較常用的有 C 波段及 L 波段的雷達影像。若波長太短，則觀測品質會受到電離層的影響而降低；波長太長，則會對氣候因素相當敏感；並且，波長也直接影響產生干涉圖的條紋密度；軌道的傾角則會影響地面涵蓋範圍及成像的角度；重複軌道的週期會影響地面因時間不同產生變化等因素。

另一個考量的重點為可獲得的影像，例如 ERS、ENVISAT、ALOS 及 RADARSAT 等衛星的影像都可以快速的獲得，且可以透過線上的軟體查詢決定空間基線、時間基線等不同條件的衛星影像狀況。例如要研究地表變形，則要挑選橫跨變形時間段的影像，且在此變形的時間段內選擇最短的時間基線，以減少因地表其他因素變化的影響降低同調性；另一方面要選擇較短的垂直基線，因為短基線可以減少因地形及雜訊引起的相位誤差。

4. 前級處理

本研究以 1996/03/06 的 ERS-1 影像及 1996/03/07 的 ERS-2 影像為例進行處理，並顯示處理過程中每個步驟的處理結果。此兩幅影像時間間隔差一天，振幅影像的內容如圖 4.12，影像範圍為中台灣地區，因為顯示影像為處理過程的中間影像，影像成像時衛星軌道在右側，所以靠近台灣東邊為近距點、西邊為遠距點，以近距點的像元開始處理至遠距點，所以影像的東西方向與現有的地理座標相反；且此影像對為下降軌道影響，所以在方位方向的取樣順序為由北而南與地面座標相同，因此在判讀影像時，會有左右顛倒之情形。



(a):96/3/6　　(b):96/3/7

圖 4.12　台中地區的雷達振幅影像

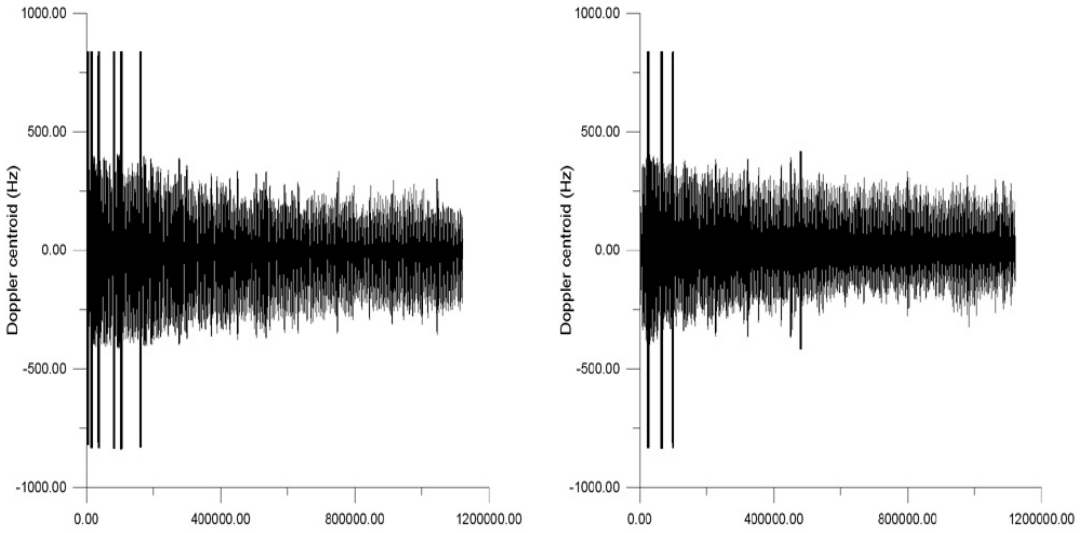
從圖中可以明顯的看出影像右邊為台灣海峽，圖中有明顯地面資料的地區為中台灣的地區，中間地面為平原區，平原中兩處隆起分別為大肚台地及八卦台地，影像左方為高程較高的山區。大肚台地的範圍，北自大甲溪，南至大肚溪，東接台中盆地，西臨清水隆起海岸平原；八卦台地北起大肚溪，南至濁水溪，東接台中盆地，西臨彰化地區，地勢大致為南高北低，台地北部和西緣的侵蝕較盛，已呈丘陵地貌，南部和東緣則尚保留許多平坦面。

在處理資料前要先確定影像的資料及其格式，雷達影像的檔頭資

料中有記載影像資料、載台資訊及處理資訊等三大類，其中影像資料內有儲存格式、影像軌道及像幅數、影像中心點成像的時間、影像中心對應地面點的經緯度、影像中心點的行列數、影像的地面寬度及長度、衛星地底點的經度及緯度、軌道旋轉角及影像中心的傾斜角等資料。載台資料有衛星 5 個點位的點位座標及速度等狀態向量值。處理的資訊包含脈衝寬度、處理的起始時間、都普勒頻率的係數及處理的影像行數等資料。

在確定影像的屬性及內容後，再來就要確定影像本體的資料是否正確，紀錄的資料是否完整等。因為雷達影像為方位方向雷達波掃描，所以都以整列式的記載方式發送及儲存，如果資料有遺漏，則會缺一整列的影像，此種狀況稱為行遺漏(Missing Line)。如果行遺漏的情形沒有校正，則會引起後續所有處理影像的對應資料產生錯誤。因此在進行干涉處理前，需先進行影像行列的檢查，如果有缺漏，則以前後行完整資料進行填補，使影像能正確的呈現。

在干涉的處理中，期望在方位方向的點位能完全的對應，就必須知道都普勒中心頻率(Doppler Centroid Frequency, fDC)。以同樣都普勒中心頻率來進行雷達影像對焦的處理，會使兩影像像元在方位方向有同樣對應量；如果用單一觀點影像來進行干涉處理，因影像已進行對聚焦處理，後續需經方位濾波的方式來校正，然而其校正效果很難達到理想的地步。因此，我門先進行都普勒中心頻率值計算，計算結果如圖 4.13，左圖(1996/03/06)的都普勒中心值約-35.38 Hz，右圖(1996/03/07)的都普勒中心值為 26.56 Hz。



(a) (b)

圖 4.13 台中地區 96/3/6 及 96/3/7 影像都普勒中心值

5. 基線計算

通常干涉處理使用的精密軌道是 DEOS 所提供的 ERS-1、ERS-2 及 ENVISAT 衛星的高精度衛星軌道，該資料主要是支援衛星測高及 DInSAR 處理使用。本研究以 Delft 大學的精密軌道資料來計算衛星影像的精確位置，再以各幅影像位置來計算各像對間幾何參數，如基線的水平分量(B//)及垂直分量(B⊥)、基線與水平線間的夾角(α)等。

ERS-1 的精確衛星軌道資料，可以包括飛行任務期間從 1991 年 7 月 30 日到 1996 年 6 月；稍後因為測高資料已關閉，所以後面僅剩快速傳送的軌道資料。ERS-1 衛星在 1996 年 7 月到 1998 年 7 月期間，雖然這段其間其仍在運轉，但沒有雷射系統的追蹤資料，所以無法有效的計算精確軌道，也就無法提供精密的軌道資料。

精確的 ERS-2 衛星軌道資料因需經過較詳細的計算，所以資料的取得可以從發射以來至幾個月前。如果需要較新的衛星軌道資料，則可以考慮只經前級處理的軌道資料，此前級資料可以提供幾週前的衛星軌道資料。

因為基線值為干涉技術的重要幾何參數，不同的基線值適合不同

的應用處理。以 ERS 衛星影像為例，適合應用情形如表 4-1，以產生數值地面模型為例，其適合垂直基線長度為 150 m 至 300 m，地表變形偵測的應用基線長度最適合長度為 30 至 70 m，地表物體特徵移動的偵測的基線長度為 0 到 5 m。

表4-1 干涉技術處理時不同應用的實用基線長度

應用目的	垂直基線($B_{\perp}$)
1. 數值地形模型	150 m 至 300 m
2. 表面變遷偵測	30 m 至 70 m
3. 表面特徵移動	0 m 至 5 m

6. 套合處理

在干涉的處理中，進行次像元精度的套合處理是必須的步驟。由於精確的影像套合技術處理較耗時，且需要大儲存空間，為有效的提升套合的效率，通常將套合程序區分成兩個步驟：初步套合及精確套合。初步套合為計算影像對中對應點的位移量，以提供精確套合良好的起始點，減少大量的運算量以提升計算效能，對應點位位移量的計算方法可以用軌道資料來自動計算，也可以直接用人眼辨識量測。精確套合的方法則以自動相關的技術來產生次像元精度的套合成果。

在初步套合的處理中，為避免進行精確套合時計算量太大，因此要求初步套合的位移量精度須在 2 個像元內，以此精度的位移量當起始值，再取進行高精度的相關計算，以此範例影像為例，直接以影像軟體量測影像中心附近明確的相對點位位移量為(110，6)，因為方位方向與斜距方向在成像時已先經過 5:1 的多觀點處理，所以量測的方位方向位移量要乘以 5，才能計算出原始影像的真正位移量，計算實際位移量為(550，6)。

雷達影像因為隨機性的斑駁，使參考影像的特徵在套合影像上未必是特徵；且因為地物背向散射係數的敏感性，使地物在兩影像上可能有不同的輪廓，無法以一般的特徵方法來進行套合。而較常使用的方法為將兩影像中重疊區域區分為若干個網格點，每個網格點選取鄰

近的像元成為一區塊，而後以兩區塊的灰階亮度計算最大相關值來求區塊位移量。因圖右方為海洋地區，不利進行套合的運算處理，所以將海洋地區的影像予以標註不處理，其餘影像區分為 6×6 個網格區塊，逐一計算區塊間的最佳套合點。

在計算出點位次像元的套合精度後，便可以多項式來代表兩者間的轉換關係。計算前將相關係數值較低的點位去除，再以最小二乘法求出該轉換參數。求出轉換參數後須將套合影像依前述的多項式，予以重新取樣，經過取樣後再與參考影像進行精密套合的處理。

從影像基線值計算得結果可知，影像頭與影像尾的基線值並不相同，也就是影像對的衛星軌道並非完全平行，所以在計算轉換的多項式時，通常會分別計算影像頭的轉換式及影像尾的轉換式，因衛星軌道的穩定性相當高，所以中間的影像轉換可以用頭尾的轉換參數內插計算得到。

7. 產生干涉圖

干涉圖是主影像與次影像兩個複數影像共軛像元相乘結果，因雷達影像在方位方向與斜距方向的解析度不同，所以為便於人眼審視及降低雜訊，會將干涉圖進行多觀點的處理。多觀點處理的方法為擷取多個像元成為一個運作視窗，將運作視窗內所有像元進行平均的計算 [Goldstein et al., 1988]。在進行多觀點處理時，為使像元對應的地面為方格狀，在斜距方向與方位方向的取樣比例為 1:5，所以實際取樣的值為 1:5 或是 2:10。

從本研究的範例影像產生的干涉圖如圖 4.14，圖中干涉圖的像元值介於-π到π之間，從影像中可以看到右邊海面區域有明顯的雜訊，像元間沒有任何相關性，在圖中間平原地區則有密密麻麻的干涉條紋，在左邊山區則有更明顯的條紋出現。由此可證實，此一像對有良好的干涉效果，但是此干涉圖尚未移除地形效應及修正軌道誤差，所以除顯示有干涉效應外，仍無法進行判釋。

圖 4.14 初步形成的干涉條紋

8. 平坦化處理

初步產生干涉圖時，因地面點位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，在干涉的處理過程中，必須將此類距離差值予以去除，才能正確的反應地面高程對應的相位值，此處理程序稱為平坦化處理。

平坦化處理的原理如圖 4.15 所示，地面點 P 至天線 A1 的距離會隨著與第一個像元的距離增加而增加，從圖中可以看出 r2 > r1 值，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，因此要計算單純因地形高度引起的相位差就必須將此項影響量去除。

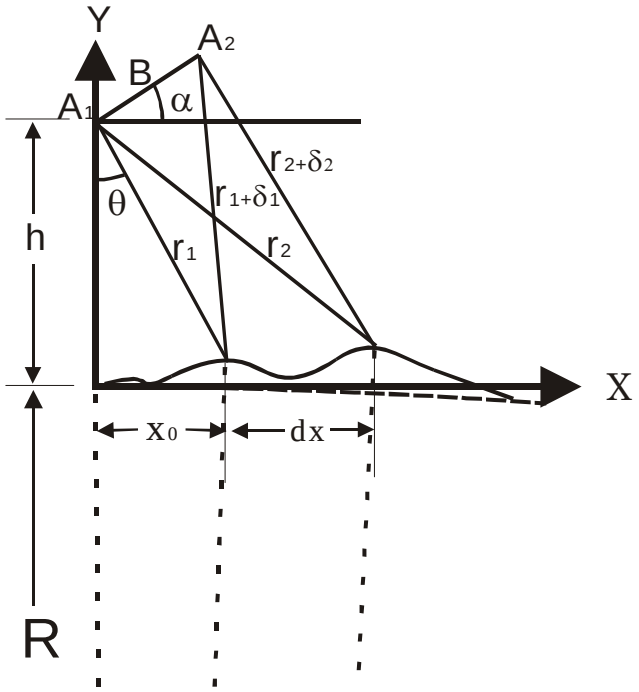


圖 4.15 相位平坦化之幾何關係

在進行平坦化處理的過程，可以直接利用橢球模式進行處理，也可以 DEM 來進行平坦化的處理，本研究模擬直接以橢球引起的地形效應及 40 m 之 DEM 產生的地形效應，兩者結果如圖 4.16 所示。

直接以橢球形成的地形效應，為點位與影像軌道旋轉角的距離函數，所以條紋與影像的有一旋轉角的夾角，且愈靠近左邊影像，其間隔越密，而靠近右邊的干涉條紋間距則較寬。以 DEM 模擬的影像，則因在山區的高度不同，模擬成像時會真實的反應到雷達成像點位處，所以兩者的處理結果在山區有明顯的不同。在左側的山區中，DEM 產生的干涉條紋較明顯、間隔較大，因為山區點位的高度較高，對應的雷達座標明顯不同，所以必須以此點位的修正量計算地形效應，才能正確的移除地形效應。

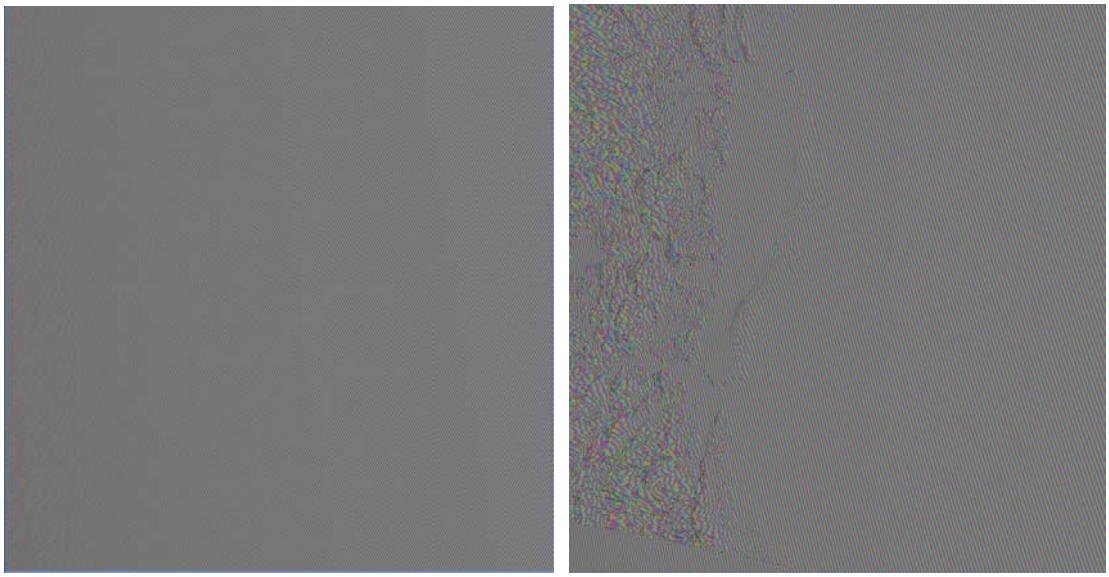


圖 4.16 從橢球及 DEM 模擬產生的干涉圖

經過以 DEM 平坦化處理後的干涉影像如圖 4.29，圖中清楚顯示干涉條紋的間距及趨勢，顯示平坦化處理的結果。理論上，經平坦化處理的條紋應反應地形的效應，也就是顯示在雷達座標的高程等高線圖。但是，圖 4.17 結果顯示有東西向的平行條紋，這明顯為軌道誤差所引起的處理錯誤，所以要以微調的方式來修正。

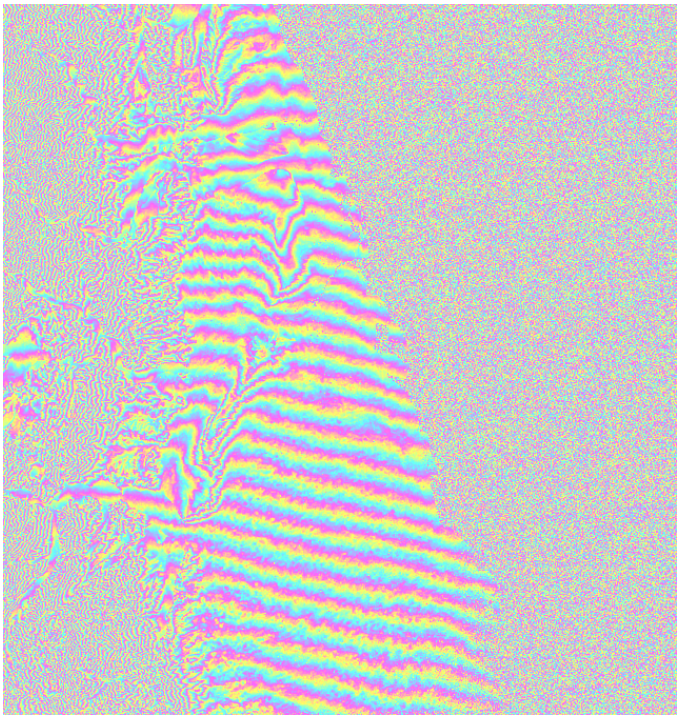


圖 4.17 經過平坦化處理的干涉圖

9. 干涉圖微調處理

進行微調處理時，須將軌道的誤差區分為方位方向的誤差及斜距方向的誤差，方位方向的誤差會引起干涉條紋在方位方向形成平行條紋，而斜距方向的誤差，則會在斜距上形成平行條紋。

就理論而言，干涉條紋為相位值的呈現方式，其實是高程的函數。所以可以利用平坦地區或海岸線為參考指標，當平坦區或海岸地區應為平坦處卻有干涉條紋，則代表該處的相位值不正確，處理的過程中可能包含有軌道誤差，因此藉由試誤法逐步修訂軌道資料，至干涉條紋顯示正確的結果為止。圖 4.17 含有平行條紋軌道誤差的干涉圖經微調後如圖 4.18 所示，從圖中可以看出已經沒有斜向或橫向的平行干涉條紋，在平坦地區的變化較和緩，且海岸線等高程地區沒有干涉條紋。

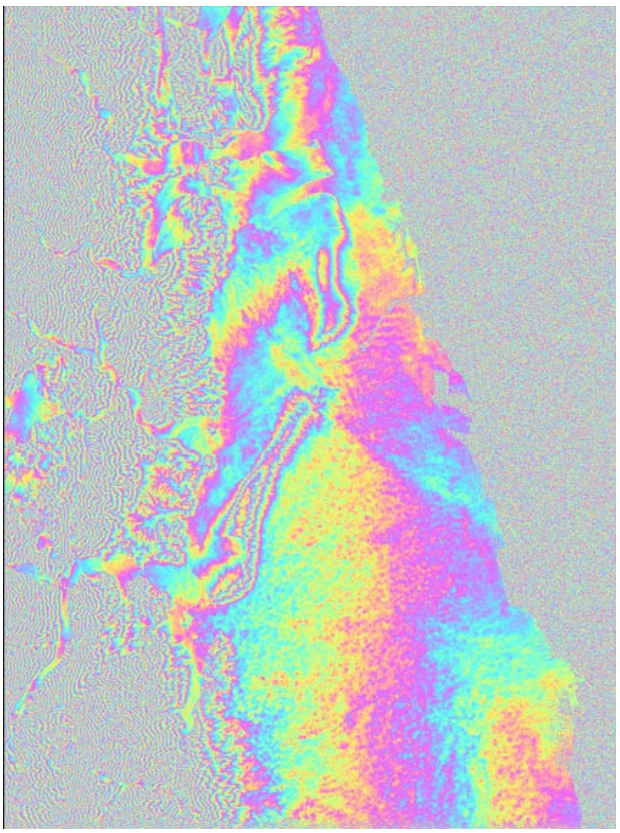


圖 4.18 經過微調處理的干涉圖

為瞭解研究區像元的干涉狀況，可以計算干涉影像的同調性圖，本研究使用的影像干涉圖如圖 4.19，圖中左側影像為研究區的相關性圖，右側為顏色圖例，同調性同的相關係數從 0 至 1。從圖中可以看出，海洋區的相關性為 0，在平原區有較好的相關性，在山區則相關性明顯的比平原區低，可能原因為因山區植坡茂密，形成不同的散射條件，所以降低相關性。

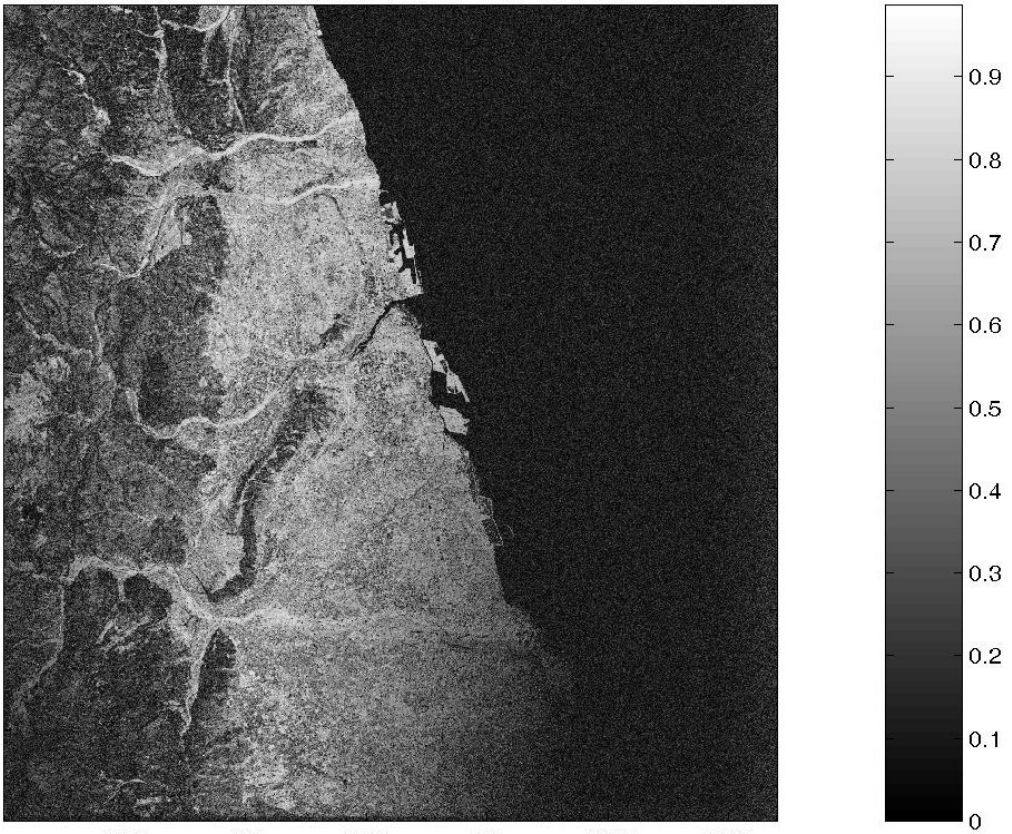


圖 4.19 雷達影像同調性圖

10.全相位回復

經平坦化處理後之相位圖，已經消除了因距離差及地球橢圓所引起的相位差值，但因干涉圖的相位值為經過模組化(Module)的處理，所以相位值只對應於 2π(-π～π)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(2π)問題之技術，稱為全相位回復(Phase Unwrapping)。

在相位模組化的處理當中，直接將整數值去除，其處理的結果是明確、直接且是唯一的，所以處理的過程沒有任問題。但是要回復至原始相位值，就會因影像(訊號)的品質而影響回復的結果。在二維影像中，可以利用周遭像元的相位資訊來判斷是否要加入整數值，例如有條紋資訊干涉圖時，每一條紋數就代表增加一個整數值，這時需要在相位圖上將波數辨認出來，這與干涉條紋的品質有關，如果有雜訊、斑駁及地物變遷等破壞干涉的情形存在，則會有部份區域無法計算。

雜訊的發生可能是幾何的問題，如前坡縮短(Foreshortening)及疊置(Layover)，通常雜訊的來源有三種(1)熱雜訊(Thermal Noise)，(2)斑駁，此為一隨機變數，(3)因天線所引起的雜訊。

本研究以 Stanford 大學所發表的 Snaphu 軟體來進行全相位回復的處理，因為該軟體可以完整回復整幅影像相位值，並可配合影像各項相關資料進行統計計算，所以回復的點位可信度很高，也獲得多數的研究團隊使用。Snaphu 在進行回復處理時必須先指定回復影像的目的，其統計模式有地形模式及變形模式兩種不同的統計模式，因此將相關參數輸入後，即可得到相位回復影像圖如圖 4.20。因為影像相位值已完全回復，並不侷限於-π到π之間，所以相位值的比例可以視為地面高程值的比例。值得注意的是，此影像的座標值仍為雷達座標系統。

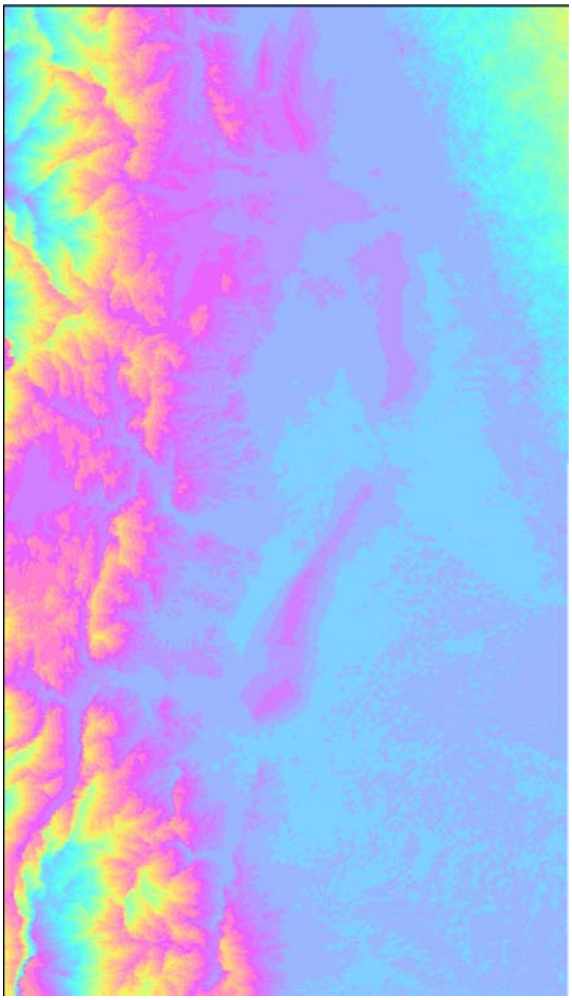


圖 4.20 經過全相位回復的干涉圖

11.座標定位

座標定位的處理係將干涉圖從雷達座標系統轉換至地面座標系統，本研究利用成像幾何法直接計算點位的地面座標值，經座標計算後的干涉圖如圖 4.21 所示，從圖中可以看出影像已經左右顛倒，與地面的座標一致，且山區因位於遠距點，所以原雷達影像成像取樣時有壓縮現象，現經座標定位計算後，回復其原有的間距，所以視覺上間距有些微的加寬。

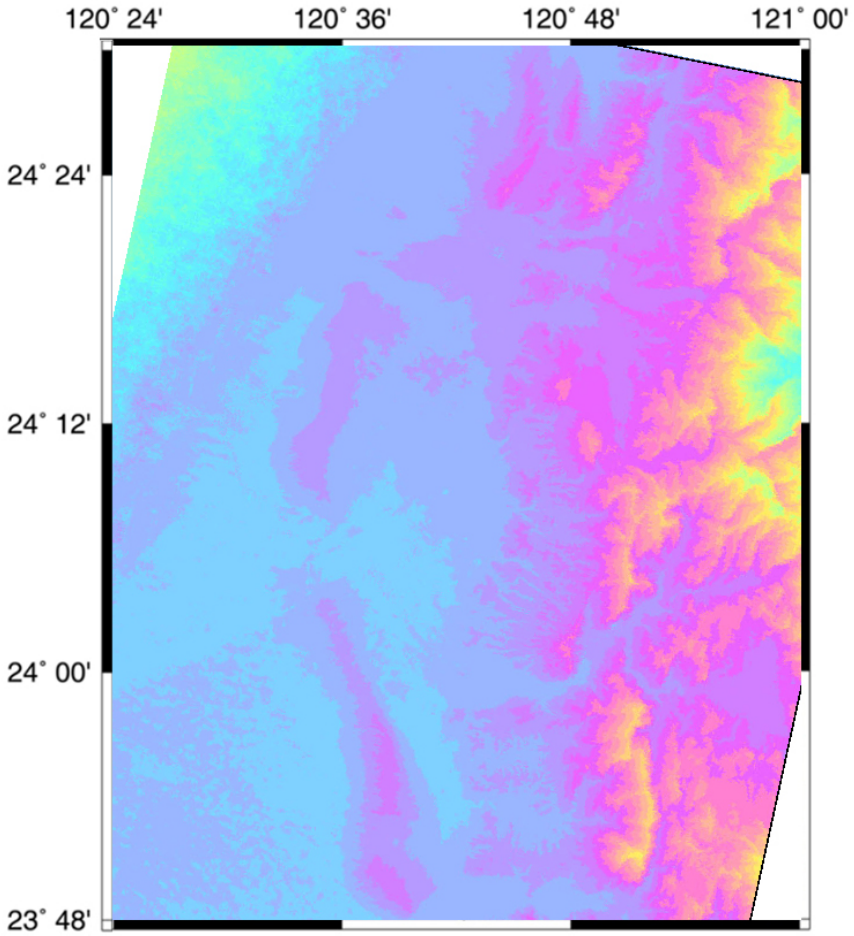


圖 4.21 座標定位的干涉圖

第五章　固定散射體雷達干涉技術(PS-InSAR)

5.1 前言

固定散色體(Persistent Scatters, PS)技術是雷達干涉方法中，較先進的處理技術，主要的目的在解決(克服)長時間的序列影像中，影像對因變形或環境效應影響(大氣及 DEM)導致影像相位改變產生不相關現象，而造成干涉處理的困難。永久散射體(Permanent Scatterer)技術主要由義大利米蘭科技大學(Technical University of Milan)Ferretti 教授所帶領的團隊所發明，第一個找出 PS 像元的演算法發表於 2000 及 2001 年，隨後該名稱以「Permanent Scatterer techniqueTM'」被註冊專利，因此後續相關方法的發展就以固定散色體(Persistent Scatterer)的名義發表，相關的研究有 Colsanti et al 及 Kampes 等。另外，在此原理架構下，有 Berardino et al. 發展的小基線法(Small Baseline subset, SBAS)及 Hopper et al.的 StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers)。

在雷達影像的成相過程中，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)，所以當像元內有明顯的散射源時，訊號會較一致，若訊號源均勻，較容易產生雜訊(訊號不相干)，如圖，這也就是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。

固定散射體 (PS) 技術主要是利用像元內的最大的主要訊號源如橋樑及建物等，因該類像元有明顯固定的散射訊號，因此在時間序列的影像中，這些點位在該區域中，有足夠穩定的訊號來提供分析的資訊，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，就可以利用這些固定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。

PS-InSAR 的處理方法，主要可區分為下列四個步驟：

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 DEM 殘差：利用時間基線(Temporal Baseline)及空間垂直基線，建立測試區的地表變形模式(Deformation Model)，並將每一個 PS 像元粹取的地表線性變型量及 DEM 殘差值和原始干涉圖進行比較。

4. 粹取非線性的變形量及大氣效應：萃取出因為大氣效應及非線性表變化量，利用時間及空間濾波器(Filter)來消除這些非線性影響量對 PS 像元相位值的變化量。

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。

使用永久散射體干涉測量法有以下幾項重要的優點與必要性：

1. 高精確性：永久散射體干涉測量法使用多張影像進行疊加運算，在影像數目大於一定數量時，量測之雷達視距變化精度可達 1mm 級或更佳。

2. 有效克服大氣因素：一般的雷達差分干涉測量法(DInSAR)很難完全去除大氣因素所造成的測量誤差，然而永久散射體干涉測量技術對於大氣效應引起的誤差可以做有效的去除，使得地表變形資訊清楚呈現。

3. 高空間密度：在一張衛星雷達圖幅內，依據設定條件可找出數百甚至數千個可追蹤的永久散射點，如此的資料密度相對於一般的精密水準測量或 GPS 測量而言，高出十倍至數十倍。

4. 高時間密度：衛星通過同一觀測軌道的頻率大約為一個月，如此的觀測頻率對於地表變形已能提供相當完整的測量資訊。

5. 全天候性：衛星雷達由於使用雷達波進行測量，具有較強的穿透能

力，較不易受到煙塵雨霧的干擾，能夠全天候施測，對緊急事件有較強的應對能力。

6. 價格低廉：永久散射體干涉測量法雖然需要使用多張影像進行運算，需要較多的影像購置費用及計算機硬體費用，但就其能提供的高密度（時間及空間）、高精度的地表變形資料而言，是一項十分經濟投資。

7. 中央大學太空及遙測研究中心自 1993 年即開始接收 ERS 衛星合成孔徑雷達影像，對於新構造及相關地表變形，可以在相同的精度下自 1993 年開始研究。另外，加拿大與歐洲太空總署分別發射了 RADARSAT 與 ENVISAT 衛星，其資料格式與 ERS 衛星相容，而且精度更高，具備更多接收形式，使用範圍更廣，所以在未來有確定持續的研究資料提供。

由於空間及時間因素使得傳統的雷達差分干涉法仍存在許多條限制，故本研究利用 PSI 挑選反射訊號較強的點位優勢，對屏東平原地區做地表變形監測。

5.2 主影像的選擇

PSInSAR 處理的第一個步驟為選擇序列影像的主影像，使產生的所有影像對不相干(Decorrelation)值總和為最小，也就是利用該主影像和其他影像所形成的干涉像對，其影像相干(Correlation)值的總和為最大。

影像對相干值的為干涉圖品質的指標，且依 Zebker and Villasenor 研究指出，相干係數主要與四項參數相關，分別為時間基線(Temporal Baseline)、空間垂直基線(Perpendicular Spatial Baseline)、都普勒中心頻率(Doppler Centroid Frequency)及熱雜訊(Thermal Noise)的影響。

所以挑選的相干值總和為：

$$\rho_{total} = \rho_{temporal} \cdot \rho_{spatial} \cdot \rho_{doppler} \cdot \rho_{thermal}$$

$$\cong \left[1 - f(\frac{T}{T^c})\right] \cdot \left[1 - f(\frac{B_\perp}{B_\perp^c})\right] \cdot \left[1 - f(\frac{F_{DC}}{F_{DC}^c})\right] \cdot \rho_{thermal} \quad \text{.....(5.1)}$$

其中，ρ為相關係數，上標 c 為產生干涉現象的臨界值(Critical Value)。

以ERS的影像為例，時間基線(T)的臨界值為5年，空間基線為1100公尺，都普勒中心頻率為1380Hz，熱雜訊為常數值。

5.3 PS 點選擇

PSInSAR 技術處理的方法主要就是架構在 PS 點位的選擇，因此正確選擇 PS 點位就是重要的關鍵。一般而言，目前選擇 PS 點位的方法有兩種，一種為利用像元的振幅值(Amplitude)的穩定度，另一種為另用像元的同調性(Coherence)來進行點位篩選。

1. 振幅值方法

利用振幅值散佈指標(Amplitude dispersion index)DA 進行 PS 點的選擇[Ferretti et al., 2001]

$$D_A \cong \frac{\sigma_A}{u_A} \quad \text{.....(5.2)}$$

其中，σ_A及u_A分別為序列影像中，每一像元亮度值的標準偏差(Standard Deviation)及平均值(Mean)。

在雷達影像中，像元為地面點位反射值的總合，像元地面反射值為複數g，雜訊為n，其中雜訊的模式可以用複數圓形高斯分佈(Complex Circular Gaussian)來表示，表示為實數(nR)、虛數(nI)，因為亮度值 A 的分佈為米式分佈(Rice Distribution)：

$$f_A(a) = \frac{a}{\sigma_n^2} I_0\left[\frac{ag}{\sigma_n^2}\right] e^{-(a^2+g^2)/2\rho_n^2} \qquad a > 0 \quad \text{.....(5.3)}$$

其中，I0 為修正的 Bessel function。

在高訊號雜訊比(Signal to Noise Ration, SNR)的狀況下，f_A趨近於高斯分佈(Gauss distribution)，因此，當$\sigma_n << |g|$時，可得：

$$\sigma_A \approx \sigma_{nR} = \sigma_{nI} \quad \text{.....(5.4)}$$

因為像元主要受雜訊的影響量為 g(nR)部分，因此相位分佈(συ)可以從亮度值散佈值中估計：

$$\sigma_v \approx \frac{\sigma_{nI}}{g} \approx \frac{\sigma_A}{u_A} = D_A \quad \text{.....(5.5)}$$

其中D_A就可以進行點位相位穩定值量測，當D_A值低時，像元就有高訊號雜訊比，通常以D_A<0.25 當成篩選門檻。

2. 空間同調性法

利用 SAR 影像的同調性訂定門檻值，是一個很簡單的方法。首先兩幅 SAR 影像的像元可以表示成

$$I_1(x,y) = A_1(x,y)e^{j\phi_1(x,y)}$$

$$I_2(x,y) = A_2(x,y)e^{j\phi_2(x,y)} \quad \text{.....(5.6)}$$

其中$A_1(x,y)$ $A_2(x,y)$為振幅值，$\phi_1(x,y)$ $\phi_2(x,y)$為相位值，其相關係數可以表示為：

$$\gamma(x,y) = \frac{\left|\Sigma A_1(x,y)A_2(x,y)e^{j\phi_1(x,y)-j\phi_2(x,y)}\right|}{\sqrt{\sum A_1^2(x,y)}\sqrt{\sum A_2^2(x,y)}} \quad \text{.....(5.7)}$$

其中，∑表視窗內的平均值。

只要影像內像元的相干係數保持大於門檻值，就認為該像元的訊號足夠穩定，所有符合條件的像元就可被視為 PS 候選點。因為相干性的計算方法是以視窗計算，當視窗越大時，估計的準確度就越高，但解析度相對就降低。

除了 DEM 的殘差會影響相位值，當影像對的空間基線較長時，即使像元的穩定性很強，其相關係數值仍會很低，因此，以此方法進行篩選時，計算視窗的大小及相關係數的門檻值需要另外計算得到。

在選擇 PS 候選點後，後續的分析及計算程序，只須針對這些候選點位進行處理，當候選點位在後續的處理過程中，如發現其變形量與現地的變形量差別太大(或變化趨勢不同)，就必須將該點位剔除。

挑選真正 PS 點後，接著需進行相位回復(Unwrapping)。PSI 相位回復解算為三維資訊，即平面空間 2-D 和時間。首先計算各 PS 點於時間上的變化，也就是計算所有影像上此像素的相位變化。接著設定一點為控制點，將所有影像上此點對這控制點反覆做相位回復，便可得到在時間上的變化量。再加上平面空間的相位回復，則可解算出三維的相位資訊。

5.4 粹取線性變形量及 DEM 殘差估算

當利用影像對計算出差分干涉圖時，其相位值可以表示為

$$\phi_{diff} = \phi_{mov} + \phi_{topoerror} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \quad \text{.....(5.8)}$$

其中

ϕ_{mov}：斜距方向地表移動量產生的相位變化

$\phi_{topoerror}$：因 DEM 誤差產生的殘餘地形變化量

ϕ_{atm}：不同大氣效應產生的相位變化

ϕ_{noise}：時間或空間產生的不相關或熱雜訊

地表的移動量ϕ_{mov}主要可以分成與變化速度相關的線性及非線性等兩個分量，而 DEM 殘差則與空間垂直基線相關。

$$\phi_{mov} = \phi_{linear} + \phi_{nonlinear} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot v \cdot T + \phi_{nonlinear}$$

$$\phi_{topoerror} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp} \cdot \varepsilon}{r \cdot \sin\theta} \quad \text{.....(5.9)}$$

因為像元的相位值為去除整數波長的不連續值，所以每一個像元的真正相位值有無限多解，因此為計算最佳解法，就利用連接相鄰點間的 Delauney 三角形來串接所有 PS 點，並建立點位間的關係。當三角形組成後，就開始計算不同點位兩點間的相位差：

$$\delta\phi_{diff} = \delta\phi_{\varepsilon} + \delta\phi_{mov} + \delta\phi_{atm} + \delta\phi_{noise} \quad \text{.....(5.10)}$$

整體資料集的相位差可以表示為：

$$\delta\phi_{diff}(x_a, y_a, x_b, y_b, T_i) = \frac{4\pi}{\lambda} T_i \left[v(x_a, y_a) - v(x_b, y_b)\right]$$

$$+ \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B(T_i)}{r(T_i) \cdot \sin(\theta_i)} \left[\varepsilon(x_a, y_a) - \varepsilon(x_b, y_b)\right]$$

$$+ \left[\beta(x_a, y_a, T_i) - \beta(x_b, y_b, T_i)\right] + \left[a(x_a, y_a, T_i) - a(x_b, y_b, T_i)\right]$$

$$+ \left[n(x_a, y_a, T_i) - n(x_b, y_b, T_i)\right] \quad \text{.....(5.11)}$$

其中

x, y :像元的座標

T_i :第 i 幅干涉對的時間基線

β ：地表變化速度的非線性向量

α :大氣效應

n :雜訊

在一個小區域的範圍內，將鄰近像元的大氣效應視為一致，因此在 PS 點選擇時，鄰近像元的最大距離設定為 1km，在此項條件要求下，先刪除距離過長之 PS 候選點位。

當像對確定後，即可計算出空間及時間基線長，因此可以模擬出在斜距的變化速度向量及 DEM 殘差值：

$$\delta\phi_{model}(x_a,y_a,x_b,y_b,T_i)=\frac{4\pi}{\lambda}T_i\left[v_{model}(x_a,y_a)-v_{model}(x_b,y_b)\right]$$

$$+\frac{4\pi}{\lambda}\frac{B(T_i)}{r(T_i)\cdot\sin(\theta_i)}\left[\varepsilon_{model}(x_a,y_a)-\varepsilon_{model}(x_b,y_b)\right] \quad \text{.....(5.12)}$$

利用下列模式可以計算最大的相關係數值：

$$\gamma_{model}=\frac{1}{N}\left|\sum_{i=0}^{N}\exp\left[j\cdot(\delta\phi_{diff}(T_i)-\delta\phi_{model}(T_i))\right]\right| \quad \text{.....(5.13)}$$

其中，N 為形成的干涉圖數目。

上式的計算式，當影像干涉條件相當好時，其值為 1，當完全不相干時，其值為 0。當三角形中每一個連結都計算完成時，其變形向量及 DEM 的誤差為：

$$\Delta v_{estimated}(x_a,y_a,x_b,y_b)=\left[v_{model}(x_a,y_a)-v_{model}(x_b,y_b)\right]_{maximize\gamma} \quad (5.14)$$

$$\Delta\varepsilon_{estimated}(x_a,y_a,x_b,y_b)=\left[\varepsilon_{model}(x_a,y_a)-\varepsilon_{model}(x_b,y_b)\right]_{maximize\gamma} \quad (5.15)$$

在此條件下，可以進行 PS 點位的品質測試，當所有連接點位的同

調影像(Coherence)低於門檻值，就予以剔除。其中，門檻值的選擇，依經驗當相關係數值大於 0.7 時,其結果品質就很好[Mora et al., 2003]。

經過幾次的品質測試後，剔除的點位其連結亦需消除，經過重新連結後，其變化量速度及 DEM 殘差為：

$$\Delta v_{estimated} = v(x_a, y_a) - v(x_b, y_b) \quad \text{.....(5.16)}$$

$$\Delta \varepsilon_{estimated} = \varepsilon(x_a, y_a) - \varepsilon(x_b, y_b) \quad \text{.....(5.17)}$$

稍後，再以最小自乘法求出每一個點位的絕對變化值。

5.5 粹取非線性變形量及大氣效應

經過線性向量及 DEM 誤差的處理後，就可以處理非線性的變化量，以推求研究區的變形量。首先，原始干涉相位值經過線性變形及 DEM 殘差處理後，其向位殘差值可以表示為：

$$\delta\phi_{residual}(x, y, T_i) = \delta\phi_{nonlinear}(x, y, T_i) + \delta\phi_{atoms}(x, y, T_i) + \delta\phi_{noise}(x, y, T_i) \quad (5.18)$$

式中，非線性變形及大氣效應兩個重要的項目在空間及時間域內,有不同的頻率特性,因此可以分開表示。殘差相位的平均值($\overline{\delta\phi}_{residual}$)是大氣效應對主影像每一個 PS 點影響量的估計值，此影響量對所有干涉像對都有影響，也可以說影響量與時間相關。

此外，非線性的變形量與時間的變化也有相高的相關性，因此非線性變形量的影響就可以視為是該函數的低頻分量。

$$\delta\phi_{nonlinear} = \left[\delta\phi_{residual}(T_i) = \overline{\delta\phi}_{residual}\right]_{LP_Time} \quad \text{.....(5.19)}$$

更進一步說,大氣的延遲在超過 1km 的情況下，是與空間相關的。大氣效應的攝動在每一幅干涉圖中可以視為低空間頻率訊號(Low Spatial Frequency Signal)，對每一個從影像(Slave Image)的像元而言，在不同的時間都呈現出隨機的相位值，因此，大氣效應的估計值，可

以用時間序列的平滑高通濾波(Smoothing Spatially the High Pass Filter)殘差相位表示。

$$\delta\phi_{atoms} = \left[\left[\delta\phi_{residual}(T_i)\right]_{\mathrm{HP_Time}}\right]_{LP_Space} + \left[\overline{\delta\phi}_{residual}\right]_{LP_Space} \quad \text{.....(5.20)}$$

其中，第一項係數指在 Ti 時間大氣效應在單幅 SAR 影像的影響量，所粹取出來相對於主影像的大氣效應值，在後續的處理中，在每一幅不同的干涉圖都加入該大氣效應值，以計算不同干涉圖的大氣效應影響量。

第六章　PS-InSAR 成果評估與分析

本研究利用永久散射體雷達干涉技術，藉由觀測屏東平原的地表變形資訊，進而得到長時間之年平均變化量。本章首先介紹使用軟體與研究流程，接著介紹研究資料的來源與資訊，最後說明試驗成果。

成果驗證的部分，本試驗並將永久散射體雷達干涉技術所得的地表變形資訊與 GPS 觀測資料進一步做比對，並進行探討與討論。

6.1 使用軟體與流程

本研究使用 Andy Hooper 所開發的 StaMPS v3.2 版軟體進行 PSInSAR 的分析，影像處理過程同時會使用 Doris v3.2.0 版及 ROI_PAC 3.0，並利用 SNAPHU v1.4.2 版軟體對差分干涉結果進行解相位的計算。

StaMPS 為 Andy Hooper 所研發的開放源碼，可在各種 Linux 的環境下運作(Redhat、Fedora 及 Ubuntu 等)。其軟體組成包含 1.ROI_PAC：用於成像處理，由 RAW 格式數據精聚焦處理後，產生 SLC 數據；2.DORIS 軟體：用於 SLC 數據讀取、影像套合、DEM 相位轉換、產生干涉圖等；3.Snaphu 軟體：用於干涉圖解相位計算；4.Matlab for Linux：用於後續 PS 處理等軟體。

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。原 Doris 干涉處理流程規畫處理原始檔案處理、影像套合、干涉影像生成及最終結果等，但目前 Doris 僅提供影像套合、干涉影像生成及結果獲得等三區塊的功能，而無原始檔案處理的部分，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 格式影像。因此，在進行影像的 InSAR 處理前，本試驗使用 ROI_PAC v3.0.1 版作為影像前處理，將原始影像(Raw Data)轉換為單複數格式影像(SLC)，以供 Doris 進行影像的 InSAR 處理。

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，而形成聚焦誤差，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。

經處理後的 SLC 之影像將其寬度固定為 4912 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，其中：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：資訊包含檔頭描述記錄檔、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、處理單位、聚焦方式等資料。

ROI_PAC 是一套由美國加州理工學院/NASA 噴射推進實驗室所發展處理重複軌道干涉軟體(Rosen et al, 2004)。本研究使用此軟體將原始影像(Raw Data)轉為單複數格式影像(SLC)，以進行生成干涉圖等相關處理。

SNAPHU(Statistical-cost Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping)是由 Chen, C. W. and Zebker, H. A.提出的演算法理論衍生出來的程式，由 C 語言建構而成，可在各種作業系統的環境下運作；運行的方式可分為兩種，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。

永久散射體干涉處理流程大致可分為以下八個步驟(如圖 6.1 所示)：

1. 將主副影像經過干涉處理產生強度影像、同調性影像及相位影像。

2. 於強度影像中挑選出 PS 候選點。

3. 加入數值高程模型及相位影像資訊精煉出 PS 點。

4. 將 PS 點相位還原。

5. 估算出 DEM 誤差所造成的相位。

6. 估算出大氣效應所造成的相位。

7. 產生地表位移影像（LOS 方向）。

8. 產生地表變形速度場（LOS 方向）。

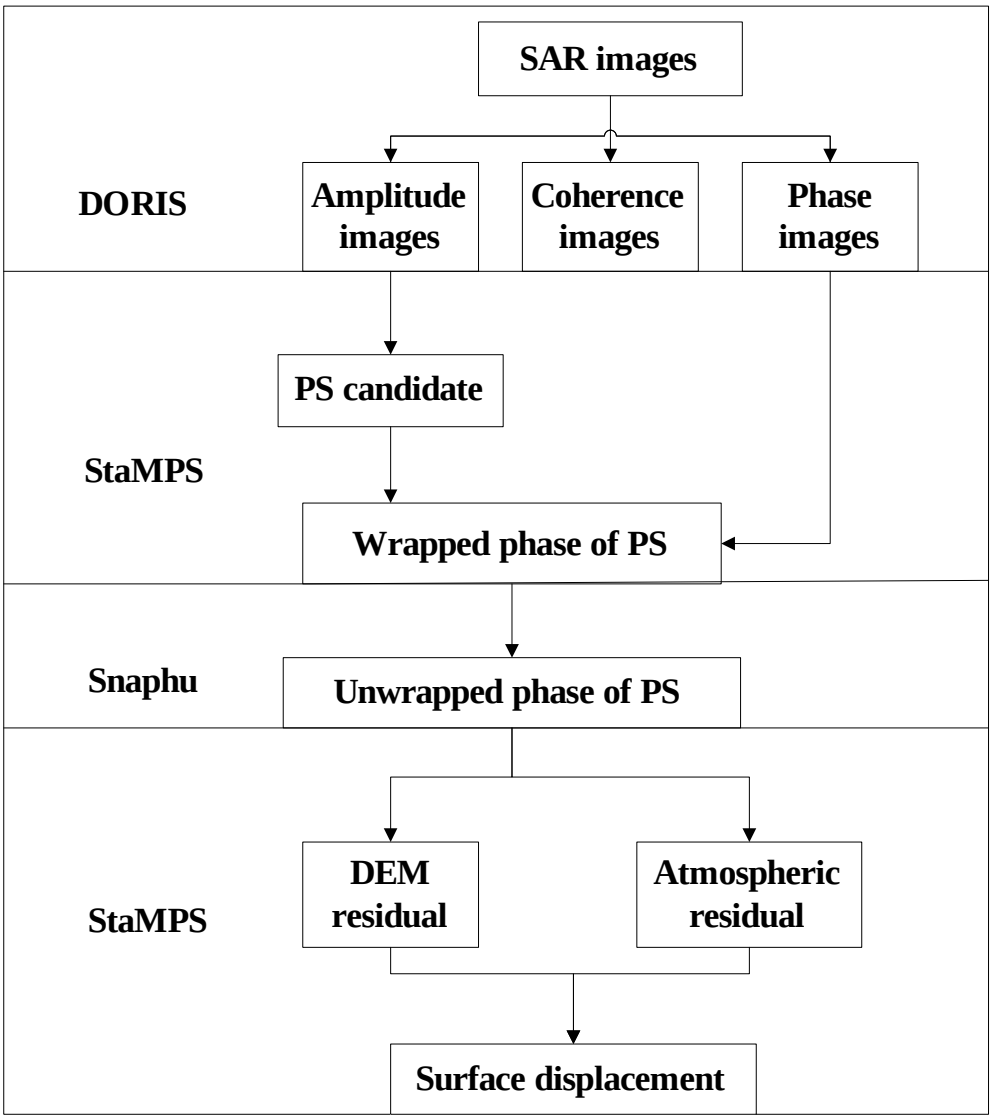


圖6.1 PSInSAR處理流程

6.2 試驗衛星與影像規格介紹

本研究所使用的衛星為歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)所發射的 ERS 系列衛星。歐洲太空總署於 1991 年 7 月發射 ERS-1 衛星，於 1995 年又發射 ERS-2 衛星，目前僅餘 ERS-2 衛星仍在運作。ERS-1 及 ERS-2 是以太陽同步軌道運行，軌道高度約為 785 公里，軌道傾斜角約為 98.5°，軌道周期目前是以 35 天為一周期運作。所酬載之合成口徑雷達影像(SAR)系統是以 23° 入射角斜視地面物攝取雷達回波資料，掃瞄軌跡寬約為 100 公里，其一幅影像大小約為 100 公里×100 公里，地面解析度約為 30 公尺，掃瞄軌跡中心距離衛星軌道投影中心約為 294 公里。使用的影像詳細資料如表 6-1。

表6-1 衛星的參數資料

使用的ERS影像參數	
波長	5.6cm(C-band, VV 極化)
側視系統	右側視系統(right-looking)
軌道重返週期	35天
解析度	25m
影像中心入射角	23度
影像大小	約100公里 × 100公里

6.3 研究區域介紹

本研究選定的影像區域為 track：232、frame：3145，該區域位於台灣西南部，屬於屏東地區（圖 6.2）。本研究影像時間為 1995 年 4 月至 2000 年 12 月，總共 12 幅影像，詳細影像資訊如表 6.2 所示。

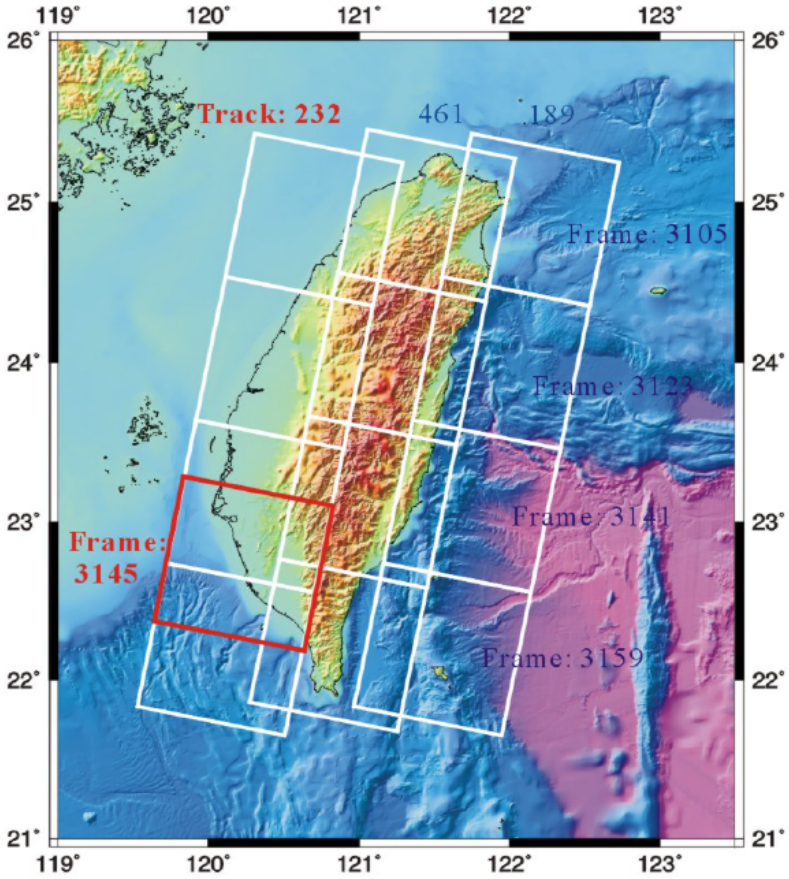


圖6.2 ERS衛星軌道圖

紅色方框為本研究所使用的區域影像(Track：232、Frame：3145)。

表6-2 PSInSAR使用的影像資訊（主影像為1998年3月12日）

編號	影像日期	衛星	軌道編號	垂直基線長(m)	與主影像間隔時間
NO.1	19950426	ERS-1	19760	42.3	-1036
NO.2	19950705	ERS-1	20762	-498.6	-967
NO.3	19950706	ERS-2	1089	-406.3	-966
NO.4	19951123	ERS-2	3093	-548.1	-829
NO.5	19960620	ERS-2	6099	37.8	-622
NO.6	19970501	ERS-2	10607	-59.5	-311
NO.7	19980312	ERS-2	15117	0	0
NO.8	19990121	ERS-2	19625	625.4	309
NO.9	19990401	ERS-2	20627	-98.6	379
NO.10	19990506	ERS-2	21128	721.8	414
NO.11	19991028	ERS-2	23634	720	586
NO.12	20001012	ERS-2	28644	624.4	930

6.4 實驗成果

本研究利用 ERS 衛星於西南部地區(track：232、frame：3145)所拍攝之影像，時間分別為 1995 年 4 月至 2000 年 12 月，共 12 幅影像。經過 PSI 分析解算後，得到屏東平原之地表變形情形，處理過程及成果如下所述：

1. DEM 誤差

在雷達差分干涉過程中，由地形效應所產生的相位並非我們所期待的，我們給予該區域內的 DEM 使扣除地形效應，但由於 DEM 為每一資料格點所平均的值，而格點的範圍又與其解析度相關，因此，所給予的數位高程與真實的地形高程有些出入，稱此為 DEM 誤差。在 PSI 運算過程中，主要是利用 DEM 誤差與垂直基線長成一線性關係來決定 PS 點門檻，利用此關係加以反推可以獲得各點的 DEM 誤差（圖 6.3）。

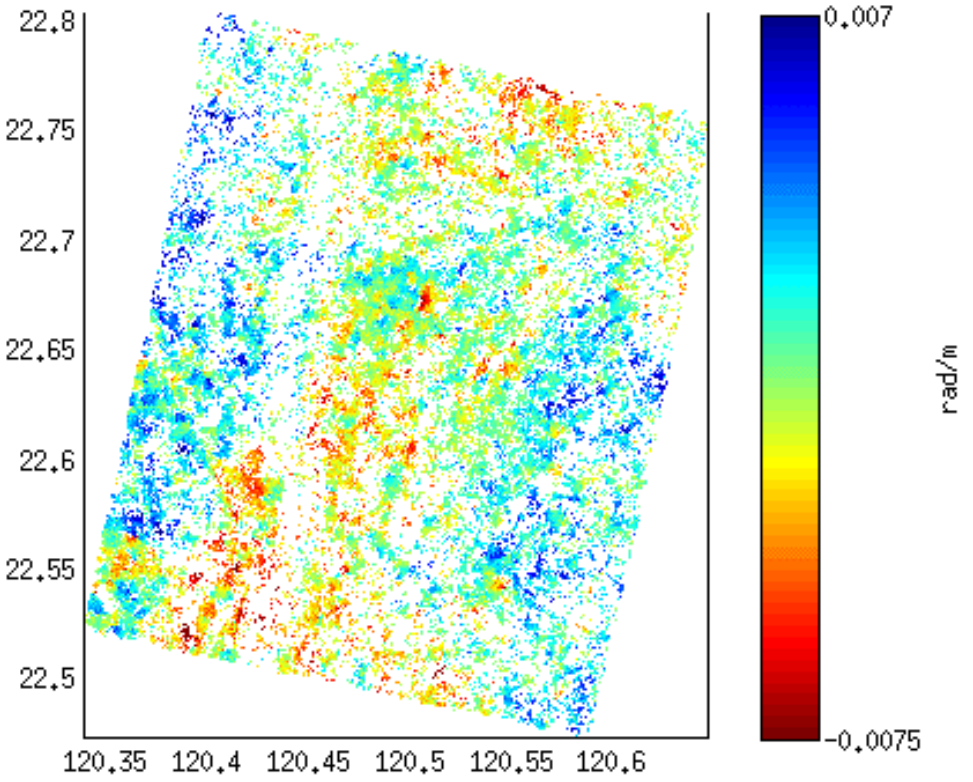


圖6.3 ERS影像的DEM誤差

2. 大氣效應誤差

在雷達差分干涉過程中，大氣效應扮演著極大誤差值的角色，誤差值往往大過於地表變形，甚至倍數影響。大氣效應主要是大氣中粒子對於雷達波的傳遞有一定程度散射，造成訊號延遲現象。本研究利用空間及時間濾波將大氣消除，其估算出影像上的大氣效應誤差如圖 6.4 所示。

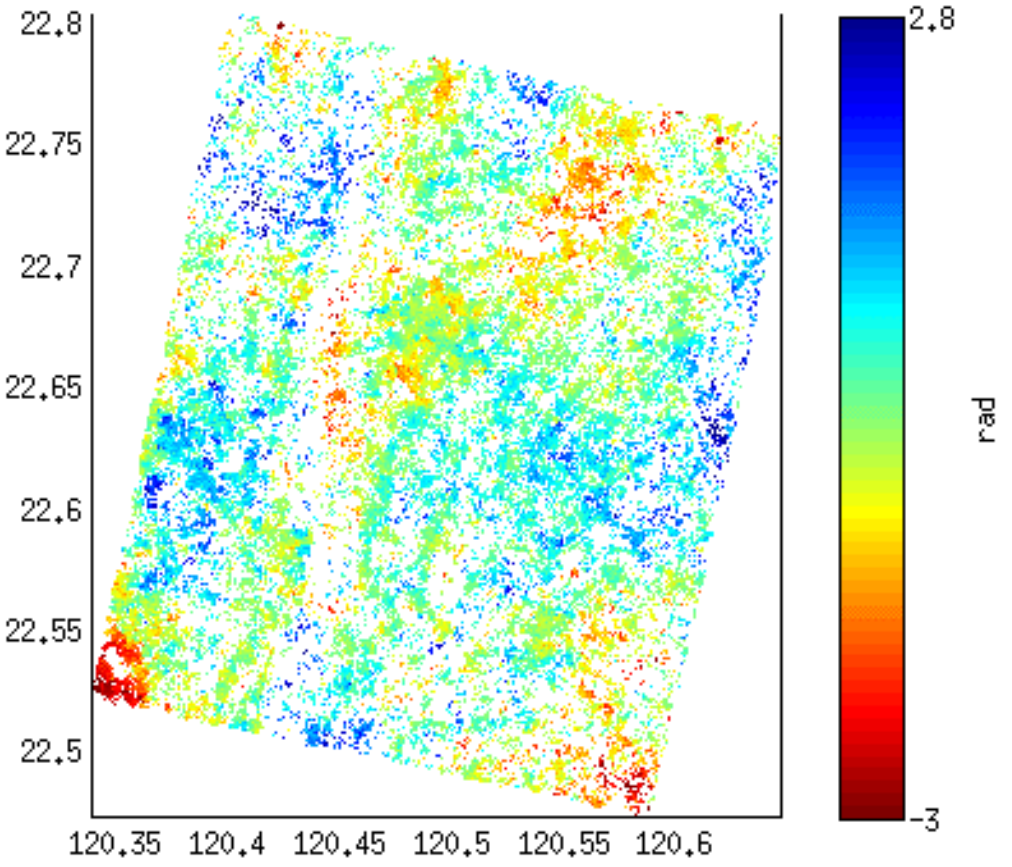


圖6.4 ERS影像的大氣效應誤差（單位：mm）

3. 時間序列地表變化量

將其各點相位資訊經相位回復，扣除 DEM 誤差及大氣效應誤差後，便可獲得各點於時間序列上所反映的地表變化量。本研究以 1998 年 3 月 12 日的影像為主影像(Master)，其餘 11 幅影像為副影像

(Slave)，經過 Doris v3.2.0 軟體運算，獲得 DInSAR 的干涉圖（圖 6.5），這些影像之中，我們可以發現研究區域內有彩虹干涉環的出現，代表著地表有活動情形，其中以屏東市區的變化最為明顯。

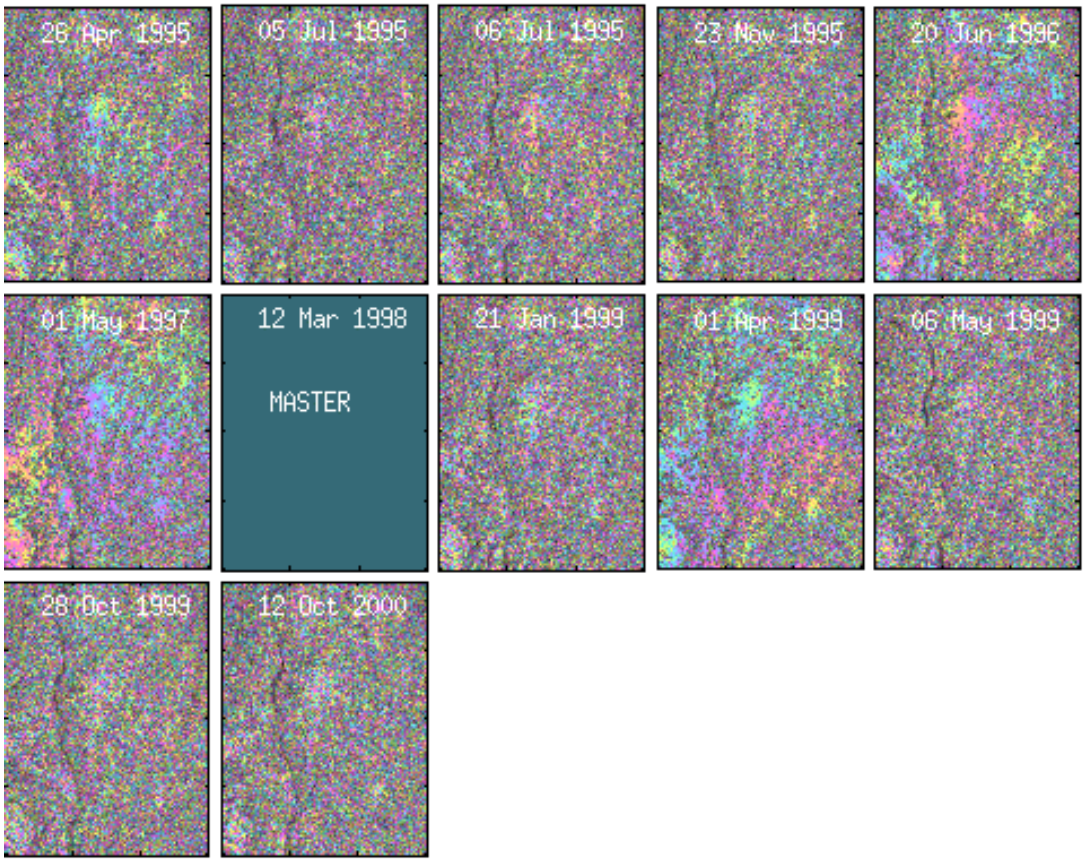


圖6.5 Doris 軟體所運算出的DInSAR干涉圖

第七幅影像為主影像(Master)，其餘 影像稱為副影像(slave)並與主影像相互套疊，形成干涉圖。

干涉後的 DInSAR 影像透過 StaMPS v2.2 軟體運算，根據強度影像的資訊，StaMPS 在研究範圍內（東經：120.35°～120.7°；北緯：22.5°～23.0°）尋找出可以相信的 PS 點總共 60594 個。將其各點相位資訊經相位回復，扣除 DEM 誤差及大氣效應誤差後，便可獲得各點於時間序列上所反映的地表變化量（圖 6.6）。其中紅色部份代表從 LOS(line of sight)方向來看是相對縮短的，相反的藍色就是相對伸長。我們也可以說，紅色代表相對於主影像來說是上升的區域，藍色代表下降。19950426 至 19970501 六幅副影像，因為時間位於主

影像之前，所以在解釋顏色代表的意義時，和其它副影像剛好相反。

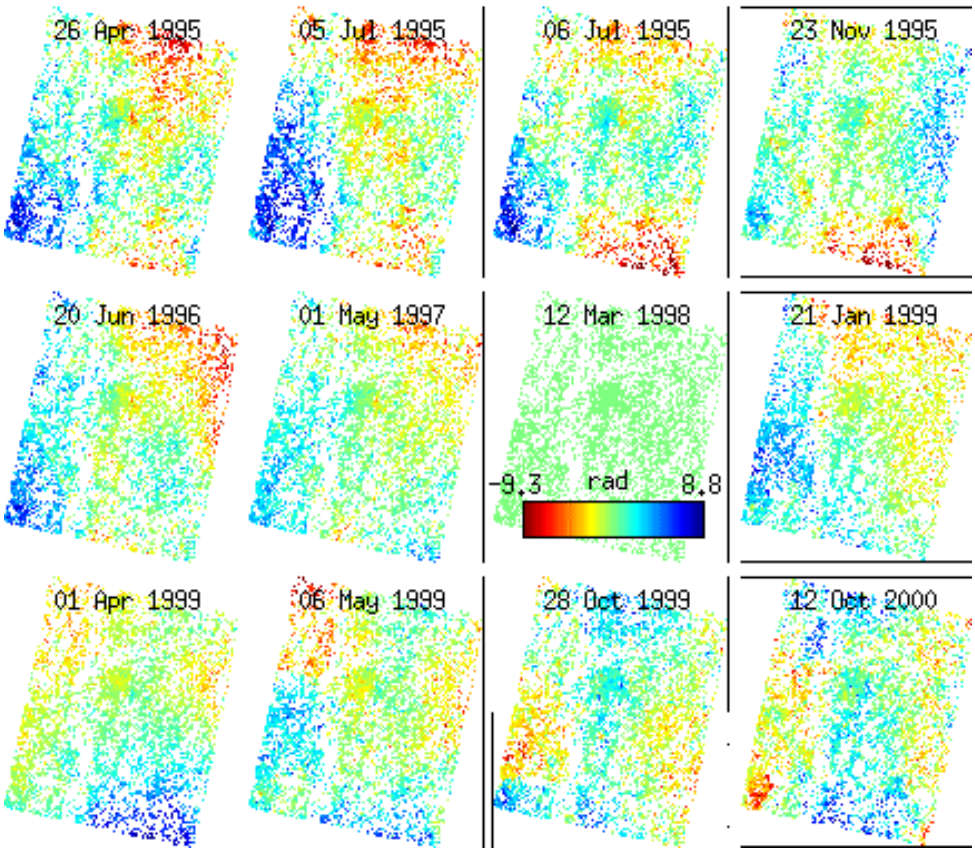


圖6.6 PS 點於ERS 影像時間序列上所反映的地表變形量

已扣除大氣效應及 DEM 誤差。紅色代表 LOS 方向縮短，藍色代表 LOS 方向伸長。（單位：mm）

4. 平均速度場

將研究時間內所產生的地表變化量除以時間基線，便可獲得該區域內的平均速度場（圖 6.7）， 紅色代表 LOS 方向縮短，藍色代表 LOS 方向伸長。由 ERS 平均速度場可觀察出在研究時間區間內，影像左下方及中上方呈現平均抬升趨勢，但影像右下方出現相對下降趨勢。

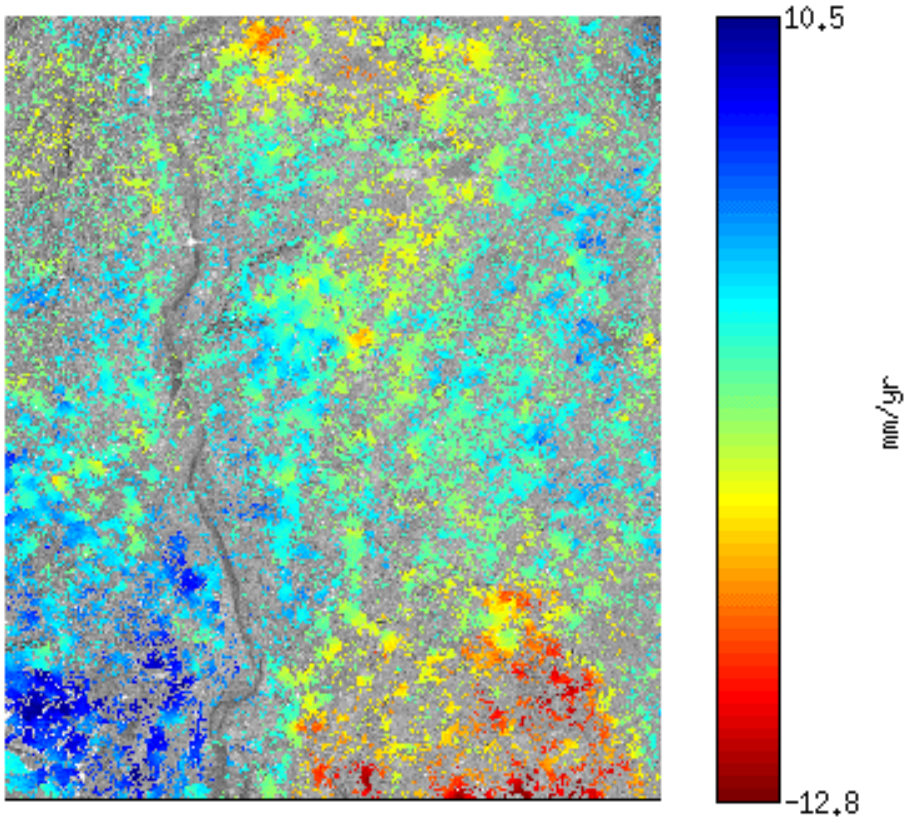


圖6.7 ERS影像平均速度場套上強度影像圖(Amplitude images)

紅色代表 LOS 方向下陷，藍色代表 LOS 方向上升。

6.5 PS 與 GPS 觀測資料比對

本研究利用永久散射體雷達干涉技術(StaMPS)解算出西南部地區地表變形量，取 1995~2000 年間 ERS(Track：232、Frame：3145) 降軌影像 12 幅，以 1998/3/12 的影像為主影像，最大軌道基線長為 721.8 公尺。相位解算結果並以精密水準點(TWD67)為參考點調整，解算過後的資料數值之準確性必須加以檢驗，取其結果與 GPS 測站觀測資料進行進一步的比對。

本研究選用自中央地質調查所所提供的屏東地區 GPS 年平均速度觀測資料作為依據，時間範圍選擇與試驗時間相近的 1995 年至 1999 年連續站的觀測資料進行比對，因此將屏東地區 GPS 之南北向量、東西向量及垂直方向資料轉換而得的視衛星方向速率(mm/y)，用來和試

驗成果之 PS 變形平均速率(mm/yr)進行資料比對。

GPS 觀測值轉換為 InSAR 視衛星方向的變形量之轉換公式為：

$$(Ux \cos\varphi + Uy \sin\varphi) \sin\theta + Uz \cos\theta \quad (6.1)$$

其中, Ux 為 GPS 東西向速度，Uy 為南北向速度，Uz 為垂直方向速度，φ 為軌道方位，θ 為視衛星角度。ERS 衛星之 φ 為北偏東 12 度，θ 為 23 度。

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之接合處，這兩個板塊每年以 8.2cm 的顯著速度相互靠近，重要的變形縮短作用發生在活動造山的台灣島上。屏東平原位於台灣西南部，由於地體構造背景特殊，屬於快速沉降與堆積的區域，由 GPS 測站測量相對於澎湖白沙站之速度約在 42.2~55.5mm/yr 之間，而且有向西南構造逃脫的現象。其多稻田、植被茂密等地理環境造成傳統 InSAR 訊號品質不佳，提供了永久散射體雷達干涉技術一個良好的材料來分析地表變形。

本研究利用 ArcGIS9.3 版軟體將 PS 速率變化(1995~2000)結果(LOS 方向)與 GPS 測站觀測速率投影在視衛星方向的 資料(1995~1999)分別套上本研究室所提供的 SPOT 台灣地區 8 米衛星影像（圖 6.8，圖 6.9），來進行比對討論。其中以暖色系(紅橘)標示小於零的速率，表示地表有沉陷變形，冷色(藍)標示數值大於零的速率，代表地表上升變形。

由平均變形速率場可局部看出各區域的相對地表變形趨勢，根據圖 6.8，本研究區域在東側的麓山帶附近有些微上升變形速率(最大上升速率為 15.3mm /yr)，然而沿著荖濃系、武洛溪與高屏溪以及較東側的東港溪上游，這些區域的永久散射體干涉結果大都呈現 0~ -15 mm/yr 的沉降變形速率，與 GPS 在高屏溪與東港溪的結果(圖 6.9)有相似變形速率的趨勢。

再進一步分別將 PS 結果與 GPS 投影在視衛星方向結果，均套疊在 SPOT 台灣地區 8 米衛星影像上，所得到的變形速率結果如圖 6.10。在本研究範圍內的變形相當吻合，唯一看似較不一致的是位在牛稠溪上

游的區域，在此區域僅有一 GPS 站(陸 192，新吉庄)結果，該站的變形為沉降(-1.8mm/yr)，而 PS 結果顯示有部分為上升變形(最大上升速率為 4.2mm/yr)，但北側臨近武洛溪也有沉降變形(平均速率約介於 -0.3~-6.3mm/yr)。仔細比對鄰近新吉庄 GPS(如果有該 GPS 站的名稱會比較有信度)站的 PS 點其實多為沉降變形，平均速率約介於-1.3～-8.2mm/yr，因而 PS 與 GPS 兩者結果仍舊是吻合的，在圖 6.10 上可能是由於圖上 GPS 站的點位標示範圍較大而易導致混淆。

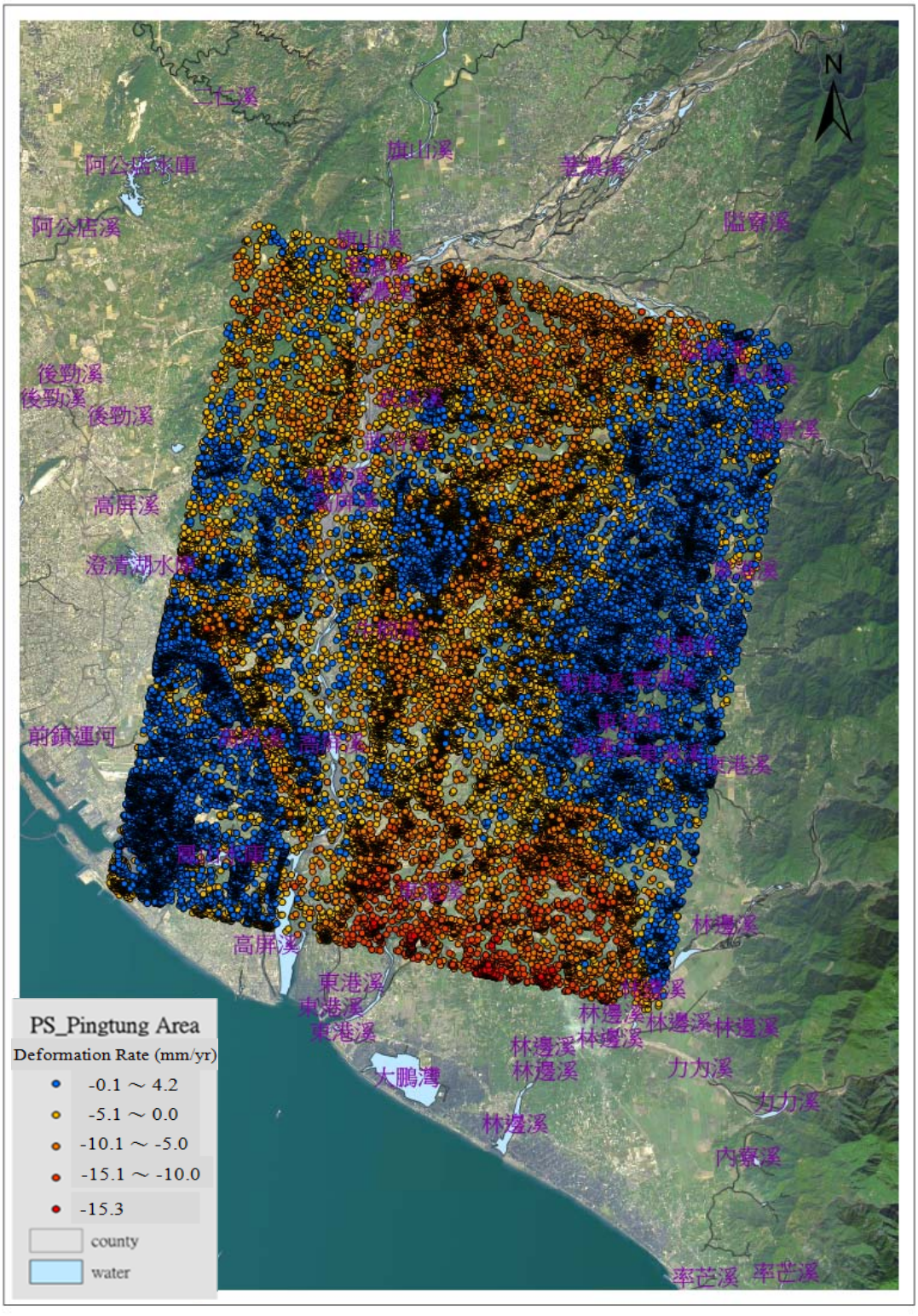


圖6.8 PS變形速率(mm/yr)套疊在SPOT衛星影像上的結果示意圖

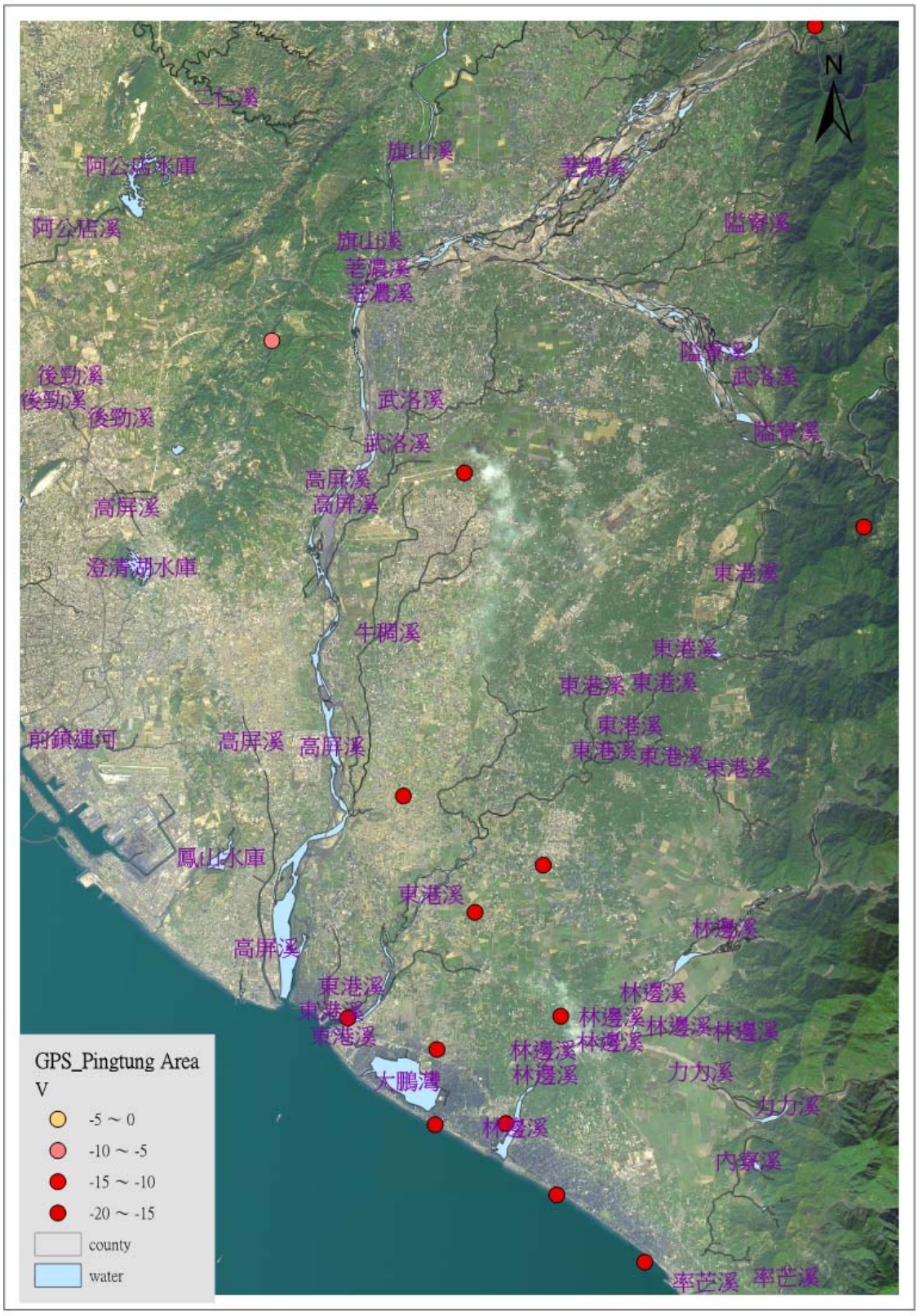


圖6.9 GPS變形速率(mm/yr)套疊在SPOT衛星影像上的結果示意圖

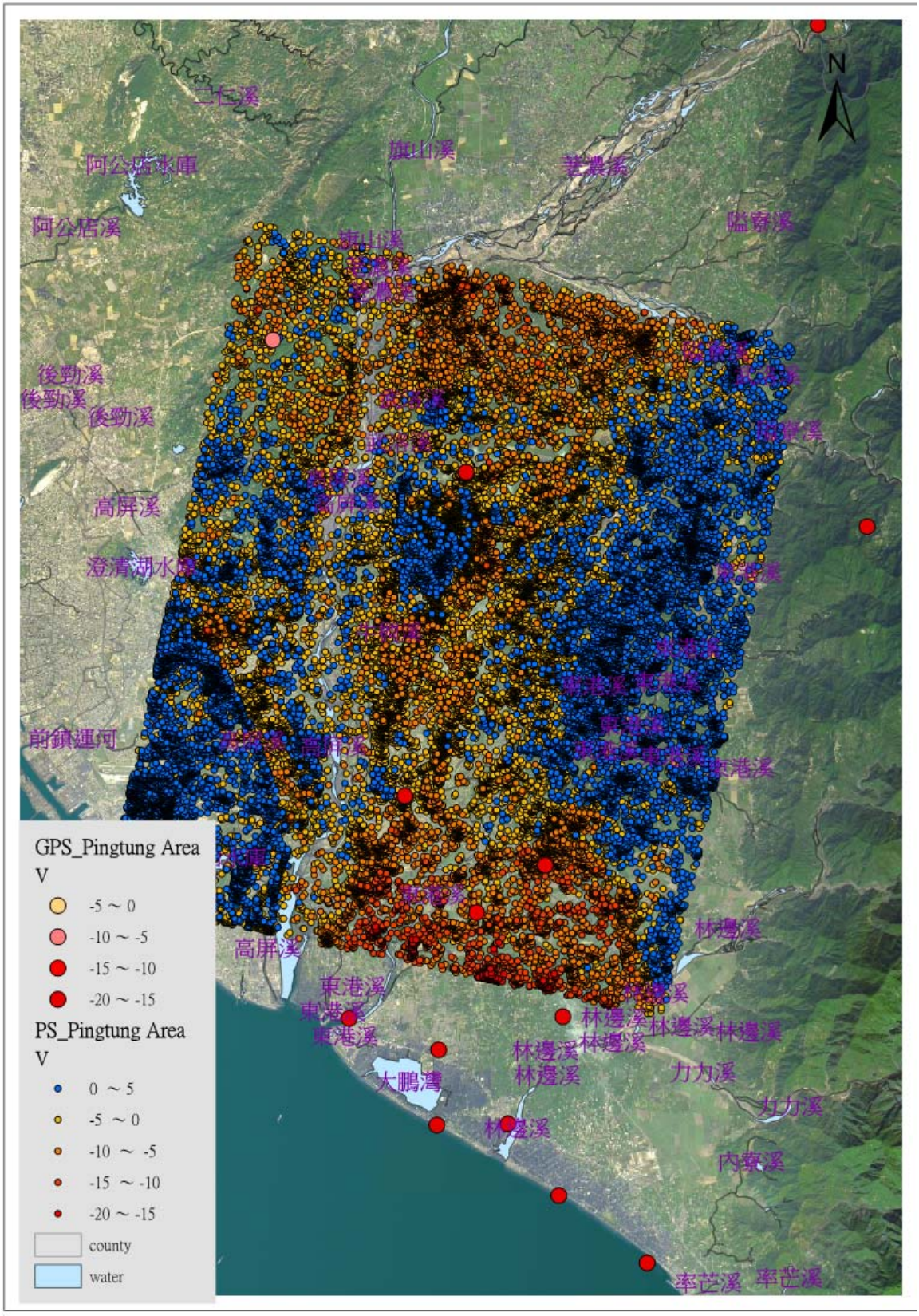


圖 6.10 將 PS 結果與 GPS 投影在視衛星方向結果，均套疊在 SPOT 衛

星影像上，所得到的變形速率結果。

6.6 討論

本研究利用 ERS 衛星於西南部地區(track：232、frame：3145)所拍攝之影像，以永久散射體雷達干涉技術對屏東平原地區進行偵測。時間分別為 1995 年 4 月至 2000 年 12 月，共 12 幅影像。研究結果顯示，在研究範圍內（東經：120.35°～120.7°；北緯：22.5°～23.0°）尋找出可以相信的 PS 點總共 60594 個，經相位解算結果並以精密水準點(TWD67)為參考點調整，將解算過後的資料數值加以檢驗，以比較其準確性。

本研究利用 ArcGIS9.3 版軟體將 PS 速率變化(1995~2000)結果與 GPS 測站觀測速率投影在視衛星方向的資料(1995~1999)分別套上本研究室所提供的 SPOT 台灣地區 8 米衛星影像，來進行比對作業。根據圖 6.8 顯示，本研究區域在東側的麓山帶附近有些微上升變形速率(最大上升速率為 15.3mm /yr)，然而沿著荖濃系、武洛溪與高屏溪以及較東側的東港溪上游，這些區域的永久散射體干涉結果大都呈現 0～-15 mm/yr 的沉降變形速率，與 GPS 在高屏溪與東港溪的結果(圖 6.9)有相似變形速率的趨勢。

再進一部分別將 PS 結果與 GPS 投影在視衛星方向的結果，均套疊在 SPOT 台灣地區 8 米衛星影像上（如圖 6.10 所示），所得到的變形速率與本研究範圍內的變形相當吻合，唯一看似較不一致的是位在牛稠溪上游的區域，在此區域僅有一 GPS 站(陸 192，新吉庄)結果，該站的變形為沉降(-1.8mm/yr)，比對鄰近新吉庄 GPS 站的 PS 點其實多為沉降變形，因此 PS 與 GPS 兩者結果仍舊是吻合的。

另外，以圖 6.10 來看，目前吻合研究區域範圍的 GPS 測站比較少，大部份偏於沿岸地區。未來可能需進一步尋求更多的 GPS 觀測資料加以驗證 PS 成果之準確性，往後可擴大 PS 研究範圍，增加 GPS 測站資料，進而做更詳細的比對作業。

第七章　結論

本研究主要目標為利用差分干涉雷達(D-InSAR)技術來進行海岸帶高程變形量(沉陷)之調查與分析。研究過程中，分別對關鍵技術建立相關處理之理論基礎，基於既有現地調查資料之蒐集的完整與方便性，研究區域選擇臺灣西南部(屏東海岸)海岸帶，使用 ERS1/2 序列之雷達影像，並採用新的「固定散射體雷達干涉技術(PS-InSAR)」方法，建立處理之數學模式，進行相關的實驗與分析。已獲得具體的初步成果。由雷達干涉技術初步結果與 GPS 實際觀測結果比對相當一致，顯示 D-INSAR 技術所推求的垂直高度變化值精度良好，也證實該技術對海岸帶地盤下陷調查應用之潛力。

利用永久散射體雷達干涉技術觀測地表變形有其一定的實用性，針對 PS 速率變化(mm/yr)結果與前人資料比對部分可能造成誤差的原因，在此列出幾項建議，提供未來改善執行方向。

1. 比較不同 PS 演算法的差異。
2. 影像選取：在決定試驗區域後，影像的選擇是一開始最重要的步驟，如有相當多的影像可供選擇，則以研究的方向為主要考量，考慮的因素有感測器的型態、可用的資料、基線的長短及時間分佈等會影響干涉成果的條件。感測器決定主要的因素有雷達波長、軌道的傾角及重複軌道的週期等。目前較常用的有 C 波段及 L 波段的雷達影像。若波長太短，則觀測品質會受到電離層的影響而降低；波長太長，則會對氣候因素相當敏感。
3. 針對所使用的演算法，適當增減影像數量，以推求地表高程變化的時間序列。
4. 增加更多測量方法加以驗證，以求 PS 結果之準確性與可靠性。

參考文獻

[1] 李京等，2010, *海島與海岸帶環境遙感，科學出版社*。

[2] 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

[3] 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.

[4] Zebker, H.A., Rosen, P.A., Goldstein, R.M., Gabriel, A. and Werner, C., 1994, On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: the Landers Earthquake, *JGR-Solid Earth*, Vol. 99, No. B10, pp. 19617-19634.

[5] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2000, Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Travsactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, No. 5, pp. 2202-2212.

[6] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2001, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1, pp. 8–20.

[7] Hooper, A., Zebker, H. A., 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

[8] Hooper, A., 2006, Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation, *Unpublished Ph.D Dissertation, Institute of Geophysics, Stanford*

University, USA.

[9] 何秀鳳，2007，變形監測新方法及其應用，*科學出版社*。

[10] 張紅，王超，吳濤，湯益先，2009，基於相干目標的InSAR方法研究，*科學出版社*。

[11] Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H. A., 2007, Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, No. B1(B07407), 21 pages.

[12] Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C. and Rocca, F., 2003, SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, No.7, pp.1685–1701.

[13] Kampes, B. M., 2005, Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique, *Springer, Germany*.

[14] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, No.11, pp. 2375-2383.

[15] Hsieh, C.S., Shih, T.Y., Hu, J.C., Tung, H., Huang, M.H. and Angelier, J., 2011, Using Differential SAR Interferometry to Map Land Subsidence: a Case Study in the Pingtung Plain of SW Taiwan, *Nature Hazards*, Vol. 58, No. 3, pp. 1311-1332.

[16] Chen, C.W. and Zebker, H.A., 2002, Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Mmodels, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 8, pp. 1709-1719.

[17] Yu, S. B., Chen, H. Y. and Kou, L. C., 1997, Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, Vol. 274, pp.41-59.

[18] 沈里俊，2003，利用 GPS 衛星測量在屏東-高雄地區地殼變形觀測之研究，*國立台灣大學地質科學研究所碩士論文*，台北市。

[19] Hu, J. C. and Yu, S. B., (2001), Active Deformation of Taiwan from GPS Measurements and Numerical Simulations, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, pp. 2265-2280.

[20] Massonnet, D. and Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 36, No.4, pp.441-500.

[21] Mora, O., Mallorqui, J.J. and Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, No.10, pp. 2243-2253.

[22] Rau, R. J. et al., 2004, Surface Deformation and Earthquake Potential of Tainan Tableland, *Southwestern Taiwan. Spec. Publ. Cent. Geol. Surv.*, 14, pp. 147-156.

附錄一 期中報告審查意見處理表

計畫名稱：MOTC-IOT-100-H2DB006b

海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)

執行單位：國立高雄應用科技大學

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
運研所港研中心 張金機前所長：		
一、 本年度三個重點，期中報告著重前兩項，第三項最終目標應為爾後重點，請再加強。	遵照委員意見，第三項內容目前仍進行中。	已依照委員意見辦理。
二、 報告附圖均無法判讀，而且單面印刷應予改進。	報告附圖已使用彩色顯示，可讀性已明顯改善，正式報告將改雙面列印。	符合規範要求。
三、 地層沉陷因濕、乾季地下水面變化呈現不等沉陷量應屬合理。但如果說因濕季地下水位升高而使地表高度推升，可說是創新研究成果，請再詳加檢核驗。	地層沉陷因濕、乾季地下水面變化呈現不等沉陷量，為目前使用歷史資料觀測所得結果所顯示的現象，是否濕季因地下水位升高而使地表高度推升，目前之推論很不易驗證，但儘可能蒐集舊有觀測資	符合規範要求。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	料進行比對。	
四、 EE',DD'及 EE',FF' 剖面呈現不等變量，應為合理。但求各剖面平均值則毫無意義，且平均值不到 lmm 已達高於精度。如要平均值應還在 EE',DD' 與 EE',FF'交會點。	剖面呈現不等變量之變化為觀測資料之推論結果。是否具有真正之物理意義，是未來真正以現有資料進行調查時才有可能加以驗證。	符合規範要求。
五、 缺現地實測資料驗証，應加強。	本研究主要以新技術之開發與應用為主，且只能使用既有之舊影像資料為之，而既有觀測之歷史資料為稀疏之點狀之分佈，進行面狀之比對確有相當之難度，已無法進行現況之比對。當儘可能蒐集舊有觀測資料進行比對。	符合規範要求。
六、 P56 最後兩時段相同， p87 000 1.06 是那年?	均為 96~99 年，已加註。	已依照委員意見辦理。
國立臺灣海洋大學　方志中教授：		
一、 分析資料均在 1995 至 2000 年，可	本研究主要在探討	符合規範要

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
否應用於較新資料來分析(2010)?	新技術之應用與處理，故首先須使用既有資料探討與驗證方法之可行性與精度分析，如確認可行將可作為未來使用之依據。因此，未來將可使用更新的資料來分析。	求。
二、 請補充本年度研究內容與四年計畫之關聯性及前 2 年度具體成果摘要。	將於期末報告中補充說明。	已依照委員意見辦理。
三、 簡明列工作進度、完成比例，並討論原因。	將補充說明，目前進度正常，合於預定進度。	已依照委員意見辦理。
四、 水準測線比 D-InSAR 較差， GPS 較佳原因為何?	水準點與 GPS 觀測點均僅有稀疏的點狀資料，而 D-InSAR 資料為面狀及內插結果，兩者進行絕對差異量之比對其顯著性不足，故以探討變化之趨勢為主要，難以探討微量差異所	符合規範要求。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	代表觀測方法之精度。	
五、 D-InSAR 成本效益分析(D-InSAR.GPS. 水準點)?	各種方法之成本效益分析得視觀測範圍大小而定。因水準或 GPS 均為逐點為之，但 D-InSAR 為大範圍之面狀資料取得。	符合規範要求。
六、 未來工作項目應明列。	遵照委員意見補充說明。	已依照委員意見辦理。
七、 影像來源及成本應說明。	遵照委員意見補充說明。	已依照委員意見辦理。
成大水工試驗所 余進利組長：		
一、 就實際海岸而言，由於波浪碎波現象，其在影像中為最亮亦是梯度最大的區戚。利用影像二值化或是最大曲率法提取海岸線應考量碎波影響。	由衛星影像萃取岸線資料之精度與影像之解析度有明顯的關係。目前衛星影像解析度無法獲得波浪碎波的細緻度，故考量碎波影響有相當的困難。	符合規範要求。
二、 報告中對於分析技術之理論基礎說明詳盡，建議後續針對今年度之探	本研究已有具體成果，將於期末報告	已依照委員意見辦理。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
討主題如岸線變遷，淺海水深及地形遙測作進一步結論說明。	中陳述結果。	
國立臺灣海洋大學 張淑淨 教授： 一、 第 65 頁指出本研究採用二軌跡法，數值高程資料採用 SRTM 而此法受 DEM 影響較大，請說明所用 DEM 資料的品質狀況及其對本研究成果的影響。	DEM 資料之精度將影響 InSAR 之地形修正，SRTM 資料亦由 InSAR 方式獲得，但其精度略差，台灣地區已有 5mDEM 資料，使用該資料可獲得更佳的精度。	符合規範要求。
二、 第 83 頁水準測量， GPS 與 D-InSAR 之高程變化比較，其間的差異值相較於絕對值，其實百分比相當高，請補充說明如何評估其可用性，並分析其影響因素，可行的提昇品質方式。	水準測量與 GPS 觀測點均僅有稀疏的點狀資料，而 D-InSAR 資料為面狀及內插結果，兩者進行絕對差異量之比對其顯著性不足，故 D-InSAR 方法為以探討相對性變化之趨勢為主要，絕度差異量基	符合規範要求。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	本上不夠準確。	
三、 P83 最後第三行，單位錯誤，請修正。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
運研所港研中心 何良勝科長： 一、 請於期末報告修正部份內容，如補強說明前二年之研究成果，報告審查委員意見，第四章名稱及增列衛星資料來源等。	遵照委員意見修正與補充。	已依照委員意見辦理。
二、 第四章中有關海岸線特微提取方式,有否與往昔方式作一比較驗證。	因無舊有資料可進行比對，故本研究只提出使用影像資料萃取岸線資之新方法。	符合規範要求。
三、 第五章中影響地層下陷之各項誤差產生因素為何?	影響地層下陷因素眾多，也視其地理位置而定，本研究之對象－屏東平原在海岸帶為以超抽地下水為主要因素。	符合規範要求。
運研所港研中心 林柏青研究員： 一、 Pll 式(3-2)與(3-3) 中有乘、除符號	遵照委員意見修	已依照委員

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
一起，應使用括弧釐清順序。	正。	意見辦理。
二、 式(3-3) 中θ 即為圖 3.2 的θ 1 '兩者應一致。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
三、 P14 第 10 列「」壽山豐」筆誤請修正。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
四、 P18 圈 3.7 裡面有簡體字，如果引用別人的圖，應該註明出處。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
五、 P19 式(3-5) 中的 $B_{□}$，是否就是圖 3.8 中的 B_{II} 如果是符號請一致。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
六、 產生雷達干涉圖的處理過程中，有很多微調動作，還有固定放射體的選擇與排除，裡面就有很大的玄機，因為你已經有實測的水準測量及 GPS 資料，作驗證與對照，也可以回頭作修正與調整，所以地形變化趨勢大致是正確的，但是精確度可能就是調整出來的，不過在應用上衛星遙測確實有它的優勢，請繼續努力發揮最大功效。	感謝委員意見，將列入精進資料處理中之考量。	已依照委員意見辦理。
七、 地表受人類活動，自然沖刷淤積作用，對任一地表變化都有很大影	地表的平面或高度的改變可以在不同	符合規範要求。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
響，干涉圖無法判斷如何能獲得地層真正變化。	時期的雷達觀測數據中造成干涉條紋，因此可由該干涉條紋反演地表之相對微變情形。	

附錄二 期末報告審查意見處理表

計畫名稱：MOTC-IOT-100-H2DB006b

海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)

執行單位：國立高雄應用科技大學

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
運研所港研中心(已退休) 張金機主任： 一、 著重衛星遙測技術分析缺乏實作分析。	本研究主要在探討新技術之應用與處理，故首先須使用既有資料探討與驗證方法之可行性與精度分析，如確認可行將可作為未來使用之依據。因此，由於資料的比對為使用既有的資料為之，無法使用現地新測資料比對之。對未來真正使用新影像資料並進行大規模方式為之才可行，但得另案為之。本研究已善用就既有資料比對之工作，目的為探討新方法之適用性與趨勢性是否一致。	符合規範要求。
二、 海岸線變遷分析，缺實測資料驗證。	因海岸線變遷為過去長時間變化之結果，並無歷史實測資料進行比對，僅能就由影像提取岸線的方法進	符合規範要求。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	行方法的論證與結果的推論。	
三、 雷達干涉地表變形監測PS-INSAR成果分析缺乏精度及誤差探討驗證,其不同等級精度一起探討不符合要求。	GPS 資料為採取靜態測量方式得到的，其精度或比平面精度差，但精度仍是 mm 等級，故精度之比較是在同等精度下比較的。	符合規範要求。
四、 針對海岸線變遷分析及地表監測成果分析應加強驗證，並改進缺失。	由於現有的研究結果只能使用舊(既)有資料進行驗證。未來工作當使用新影像資料時，當可進行更完整之精度分析與驗證。	符合規範要求。
國立臺灣海洋大學　方志中教授：		
一、 多年期計畫應將歷年審查意見及回覆作為附錄，以利審查。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
二、 第三章應增加本多年期總計畫說明及各年度已完成之工作,及第四年工作項目提供。	遵照委員意見修正，於期末報告補充說明。	已依照委員意見辦理。
三、 預期成果第二項，報告中並無章節，請說明。	該部份因於第二年度之期末報告已完成研究與實例應用分析，故未在本年度之報告	已依照委員意見辦理。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	中重覆。	
四、 SAR 如何取得與委託單位之關係，請說明。	SAR 影像除了 ERS1/2 可由中央大學遙測中心提供外，其它更好的 SAR 影像資料可經由代理商購買之(如 ENVISAT，TerraSAT)。	符合規範要求。
五、 請依評論進行修正，並進行第四年度之計畫。	遵照委員意見修正。	
成功大學水工試驗所 余進利組長：		
一、 P10.以影像多尺度自動化方式提取河口地區之海岸線是否可行?建議利用此方法針對河口地區進行評估。並比較以影像多尺度自動化方式提取沿岸之海岸線與河口區海岸線之優劣與誤差範圍。	基本上過去製作海圖時之岸線標記均以人工現地測量方式為之。本研究主要提出多重解析度影像自動萃取岸線的方法，該方法所得精度關鍵還是受到影像解析度的影響。理論上方法應屬可行，可替代現有人工的作業，尤其是未來影像解析度大幅度提高至 10cm 以內。	符合規範要求。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
二、 P12.圖 3.5 展示六種不同解析度所得到海岸線的套合比較 (1)卻僅對 10m 解析度做統計分析圖(圖 3.6)，且該 10m 解析度非圖 3.5 所呈現的六種解析度之一，原因為何? (2)建議將 10m 解析度與圖 3.5 所分析之六種解析度之統計分析整理成表以供讀者參考。	由於研究中使用不同解析度圖像，包括最舊的 SPOT 10m 解析度影像與 2m 福衛影像，由於二者差異甚大，故只能對 10m 解析度之 SPOT 影像做次像元精度之萃取，探討其精度。此僅作理論之探討與應用，未來應該不會再使用 10m 解析度之 SPOT 影像，而至少是 2m 解析度以上之等級影像。	符合規範要求。
三、 第四章之雷達成像與干涉雷達之介紹種類繁多對一般讀者來說無法短時間內消化，建議將各種雷達成像法整理成表，摘錄成像法主要原理、突破的技術、適用範圍與對象、影響成像的因素與誤差範圍，以供讀者快速查閱。	遵照委員意見修正。在報告中增列 SAR 影像資料特點之綜合說明。	已依照委員意見辦理。
四、 P32.指出合成孔徑雷達差分干涉技術(D-InSAR)能精確量測地表變形量至公分等級的精確度。針對此部分提出下列問題： (1)所謂的地表變形量是指正射下	1. D-InSAR 技術主要是求得地表任一點在不同時間之變化，這包括該點位置(平面)	符合規範要求。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
平面水平變形量?高程(垂直)變形量還是三維座標下之總變形量? (2)若合成孔徑雷達差分干涉技術如此精準為何本告中以多尺度影像自動化海岸線特徵提取方法得到誤差公尺等級的海岸線結果? (3)以合成孔徑雷達差分干涉技術來判斷海岸線之可行性應納入於本報告中或是規畫做未來	與高度，但主要以高度為準，因為高度之形變會在不同時間雷達觀測時產生干涉現象，再由甘涉條紋反演其高程之相對變化，因此，由 D-InSAR 技術所得之地表變形量主要為地形之高程相對變化量。 2. 岸線特徵提取主要為獲得地表形變之水平變位資料，而 D-InSAR 技術無法有效獲取平面位置，故不適用於岸線特徵之提取。 3. 岸線特徵提取僅能使用高解析之影像資料。	

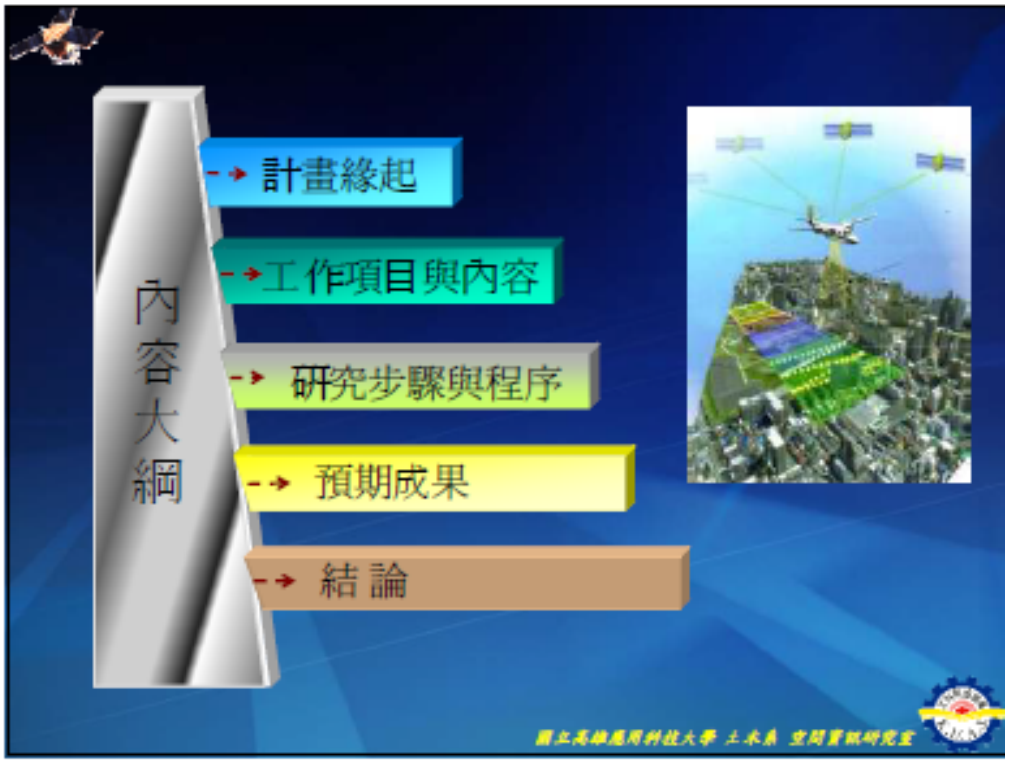
參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
五、 建議繼續執行第四年計畫。	感謝委員肯定。	符合規範要求。
國立臺灣海洋大學 張淑淨教授： 一、 報告中未島礁調查部份的成果，因係多年延續計畫，若已於前期完成，建議仍於報告中摘要說明。	遵照委員意見修正與補充說明。	已依照委員意見辦理。
二、 報告內容以 DInSAR/PS-InSAR 技術為結果，以主題圖方式呈現，分析比較與 GPS 測量資料比對，但僅比較趨勢是否一致，能否更定量地比較，例如以 GPS 站為中心的局部區域數值定量比較。DInSAR/PS-InSAR 實際取得的水平定位與垂直沈陷值的準確度與精度又如何(p.35 提到 DInSAR 精度可達 5mm，請補充說明其依據)。	本研究主要在探討新技術之應用與處理，故首先須使用既有資料探討與驗證方法之可行性與精度分析，如確認可行將可作為未來使用之依據。因此，由於資料的比對為使用既有的資料為之，無法使用現地新測資料比對之。對未來真正使用新影像資料並進行大規模方式為之才可行，但得另案為之。DInSAR 精度可達 5mm 為國外諸多大規模研究所顯示的結果。 D-InSAR 技術為近年發展逐漸成熟之新的遙測技術，應用於大範圍地表變形有其實用價值。國內相關研究單位亦以注意該技	符合規範要求。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	術的發展及其實用性，但必須啟動更大規模的研究與應用。本研究成果應可提供有價值的參考。	符合規範要求。
三、 後續(明年)已是四年期計畫最後一年，建議就此計畫歷年成果提出具應用方案。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
運研所港研中心　何良勝科長：		
一、 中英文摘要作一修正，並請依本所出版品規定辦理。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
二、 P18 之表 3.1 中補充說明絕對誤差與相對誤差定義。	遵照委員意見補充說明。	已依照委員意見辦理。
三、 建議將簡報內容補正於報告內文中。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
運研所港研中心　蔡立宏研究員：		
一、 報告編撰請符合本所出版品規定。	遵照委員意見修正。	已依照委員意見辦理。
二、 本研究為多年期計畫，建議增加說明每個年度之工作項目，以及完成的成果。	遵照委員意見修正及補充說明。	已依照委員意見辦理。
三、 雷達影像分析結果與實際地形比較結果如何?能否量化說明。	已使用既有水準點位及 GPS 觀測資料進行點位之資比對。因 D-InSAR 為面狀資	符合規範要求。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
四、 如何應用至海岸帶的地形變遷。	料，故資料之比對只能作相對性變化趨勢之對照。 台灣地區之地層下陷一般均位於海岸帶地區，因此本研究所使用之 D-InSAR 技術可應用於大範圍之海岸帶的地形變遷研究。	符合規範要求。

附錄三　期中簡報資料

海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)
期中報告 簡報
計畫主持人：李良輝
協同主持人：謝嘉聲
國立高雄應用科技大學
中華民國一00年七月十二日


內容大綱
計畫緣起
工作項目與內容
研究步驟與程序
預期成果
結論

一、計畫緣起與背景

- 光學影像主要係利用可見光和近紅外波長的反射光譜特性和輻射光譜特性成像，其多光譜資料包含了豐富的地物空間資訊，但光學影像成像受大氣狀況(天氣)及觀測時刻(日夜) 等外部條件的影響較大。
- SAR具有全天候、全天時對地觀測的能力、SAR影像也敏銳的反映地物介電常數和表面粗糙度等特性，輪廓比較清楚，具有較好的對比度並能表達豐富的地物紋理和結構資訊。
- 採用遙測影像融合技術將二 者的特性結合起來，對於充分發揮兩種資料的潛力，提高遙測解譯和資訊提取的精度和效率具有重要的意義。

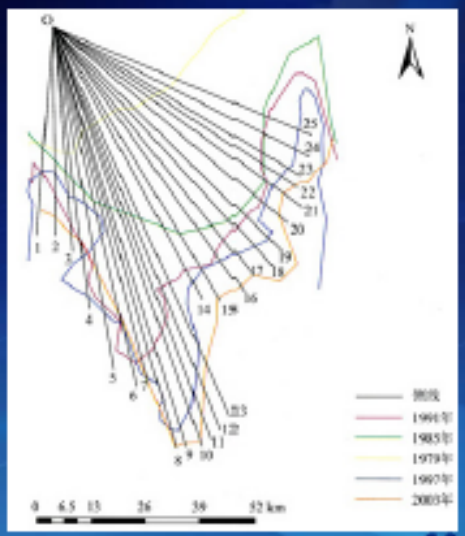
二、研究主題與工作項目

整合遙測(可見光及雷達)技術之海岸帶特徵調查。

內容包括：

1. 多尺度影像次像元精度之岸線資料萃取、岸線變遷分析。
2. 島礁調查、淺海水深及地形遙測技術。
3. 高解析合成孔徑雷達(SAR)在海洋及海岸帶的應用。
4. 差分雷達干 涉(D-InSAR)量測技術偵測海岸帶高程變形量(沉陷)。

岸線特徵提取與變化分析



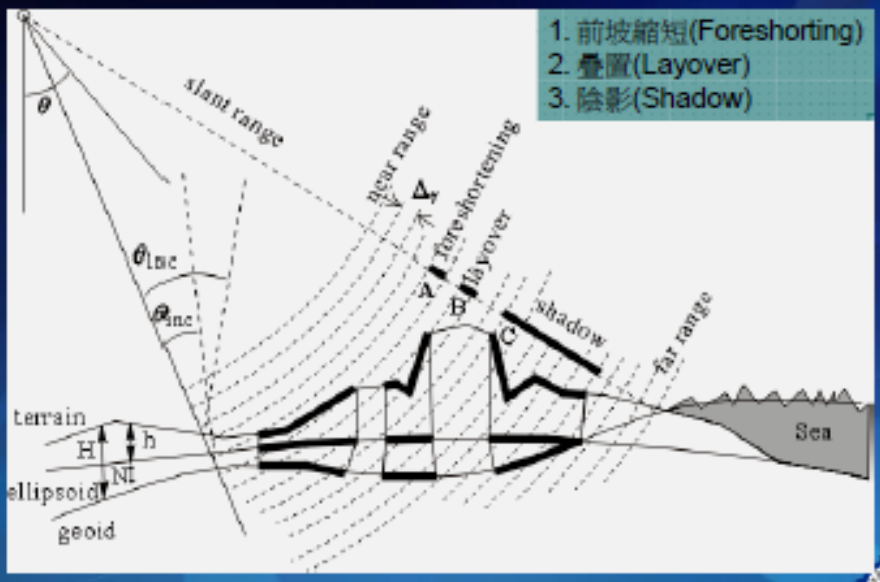
國立高雄應用科技大學 土木系 空間資訊研究室

三、研究方法與進行步驟

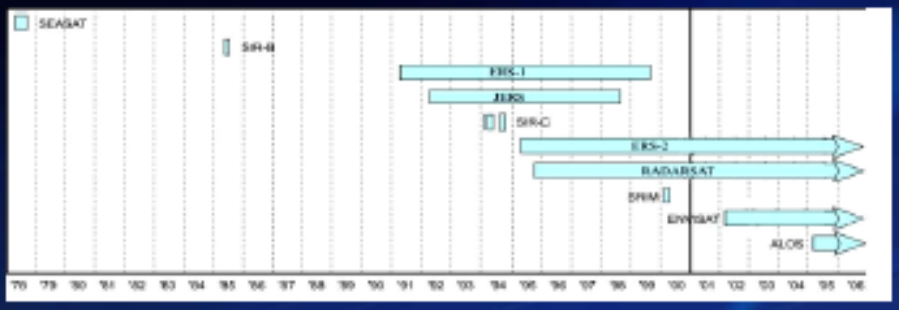
合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天候、全天時獲取遙測圖像的能力，是近幾年迅速發展起來的微波遙測新技術，而合成孔徑雷達干涉測量(SAR Interferometry，InSAR)，是一種新型的極具潛力的空間對地觀測技術。InSAR技術使用星載或機載雷達信號的相位資訊提取地球表面三維資訊，能全天候、全天時地獲取大面積地面精確三維資訊，空間解析度高，基本不受氣候條件的影響。目前，在InSAR基礎上擴展的差分干涉技術(Differential InSAR, D-InSAR)可測量微小的地表變形，已在研究地震變形、火山運動、冰川漂移、城市沉降以及山體滑坡等方面表現出極好的前景。

國立高雄應用科技大學 土木系 空間資訊研究室

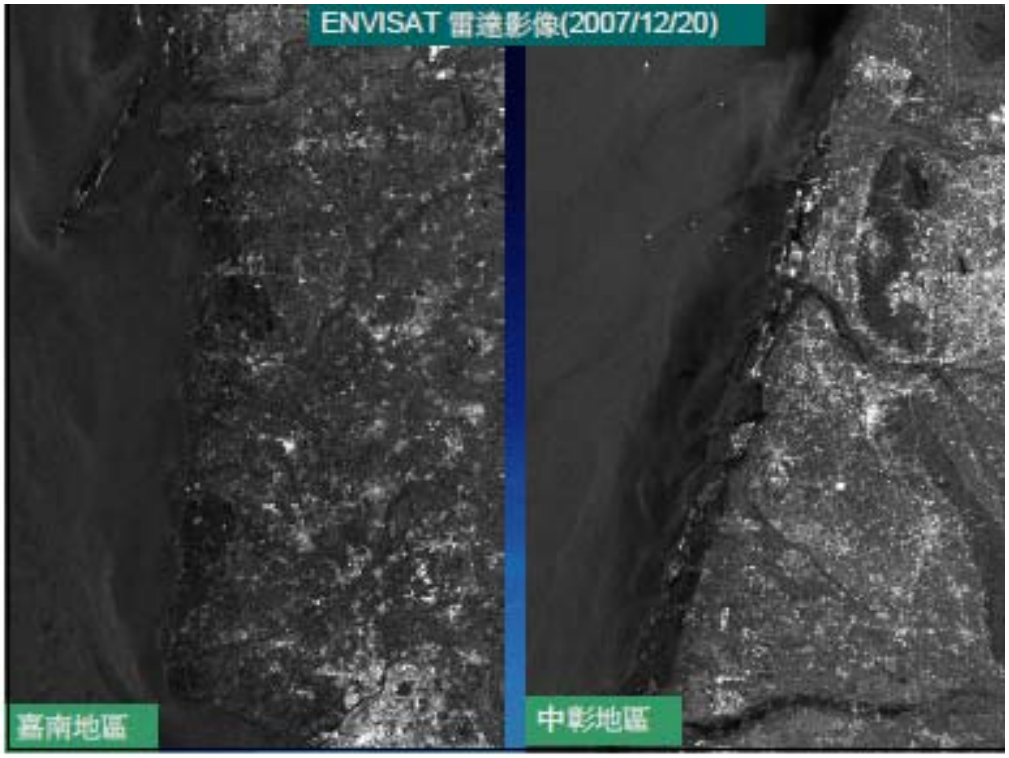
雷達影像的幾何變形

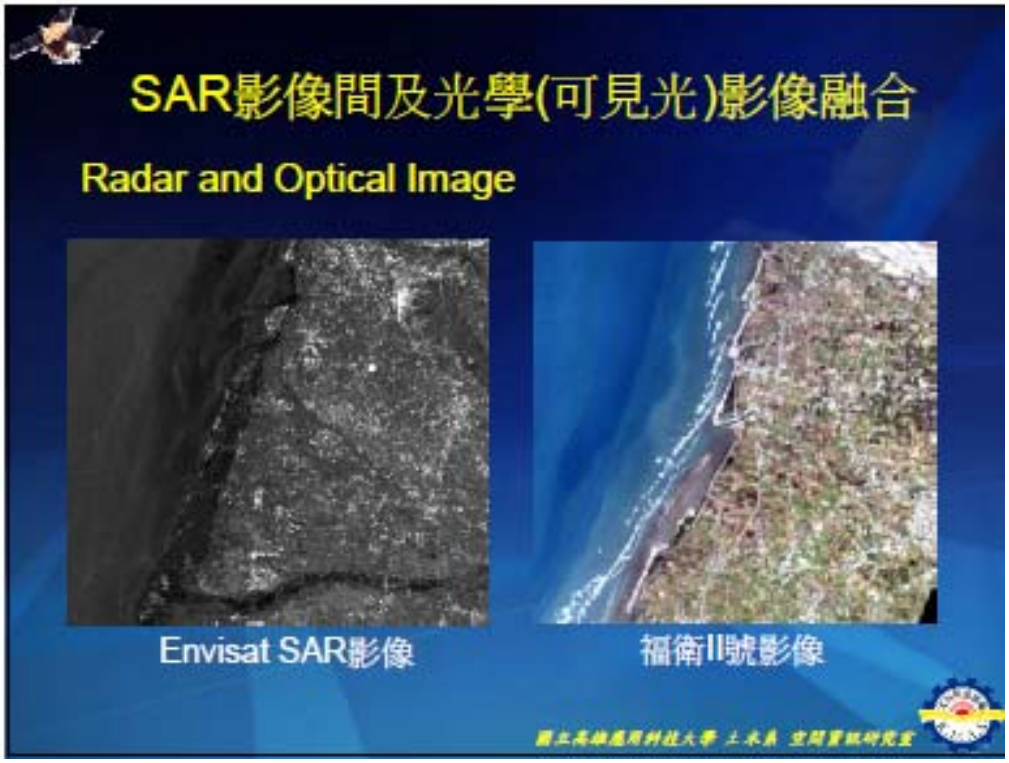


衛載 SAR影像來源



衛星名稱	發射日期	波段	高度(km)	視角	極化	解析度(m)
Seasat-1	1978,6,27	L(23.5cm)	800	20-26	HH	25
SIR-A	1981,11	L(23.5cm)	260	47-53	HH	40
SIR-B	1984,10	L	260	15-60	HH	46-14,25(A)
ALMAZ-1	1991,3,31	S(10cm)	300	30-60	HH	10-30
ERS-1	1991,7,17	C(5.6cm)	785	23	VV	30
JERS-1	1992,2,11	L(23cm)	568	35	HH	18
Radarsat	1995,11,4	C(5.6cm)	798	20-59	HH	10-100
Envisat	2002,3,1	C(5.6cm)	800	15-45	HH,VV,HV,VH	30-1000
ALOS	2006,1,24	L(23cm)	691.65	8-60	HH,VV,HV,VH	7-100


ENVISAT 雷達影像(2007/12/20)
嘉南地區
中彰地區


SAR影像間及光學(可見光)影像融合
Radar and Optical Image
Envisat SAR影像
福衛II號影像

新的特徵點(Feature Point)提取方法

目的：解決影像間存在尺度(Scale)、旋轉(Rotation)及光照 (Illuminance)之差異性。

(1) SIFT (Scale Invariant Feature Transformation)演算法

(2) SURF (Speed UP Robust Feature)演算法

- 尺度空間極值求取
- 特徵點位置確定

特徵提取

- 特徵點方向確定
- 特徵點描述 (Descriptor)

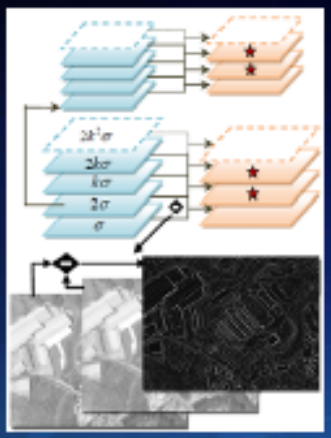
特徵描述

- 特徵匹配 (Matching)
- 除錯機制 (RANSAC)

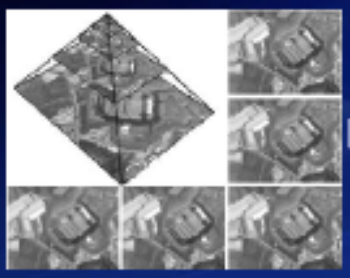
特徵匹配

國立高雄應用科技大學 土木系 空間資訊研究室

SIFT演算法

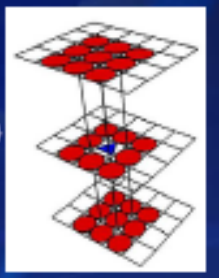


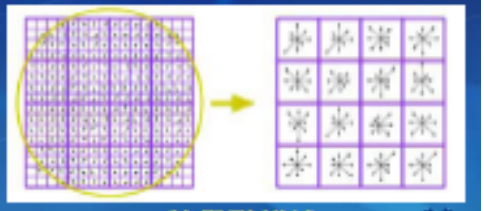
DoG 運算元



影像金字塔

局部極值提取

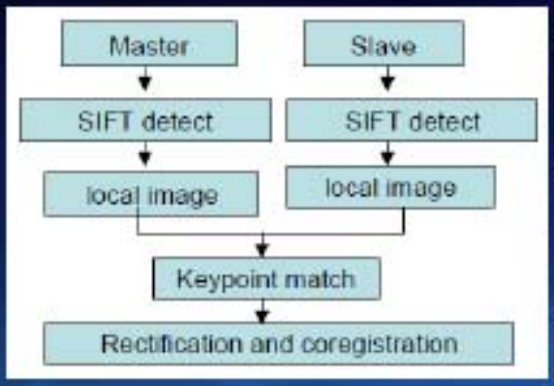


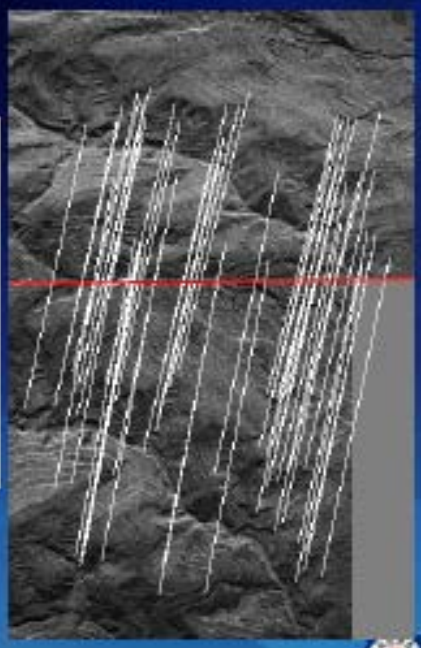


特徵點描述

國立高雄應用科技大學 土木系 空間資訊研究室

特徵點匹配





D-InSAR技術監測地表沉降

目前監測城市地表下沉一般採用GPS控制網測量和高等級水準測量，這兩種測量方法除了人力和資金耗費巨大、GPS和水準監測點需要長期維護這些缺點，最大的問題是GPS和水準測量方法僅能獲得離散點的下沉量。利用D-InSAR技術可以有效地克服上述缺點，由於海岸帶及城市一般地勢比較平坦，植被相對較少，雷達反射的相關性較好，容易獲得品質較好的干涉圖像，因而利用D-InSAR技術監測地表下陷容易實現。

透過與地面水準測量資料的比較顯示，D-InSAR測量值與水準測量值的相關度達0.94，D-InSAR測量精度可達5mm。

干涉雷達 (InSAR)原理

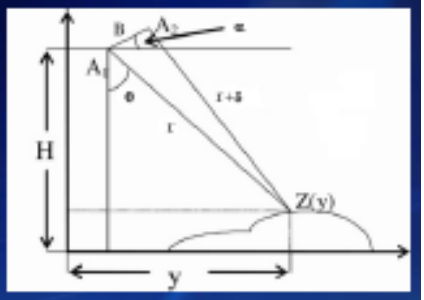
- 同一地面點傳送訊號至天線A_1及A_2因距離不同產生的相位差爲

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

- 因雷達波爲發送-接收，故雷達波的行進距離爲原距離的2倍

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi}\varphi$$

- 利用三角函數公式可推得相關值



$$\angle A_2A_1Z = 90^0 - \theta + \alpha$$
$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(c)$$
$$(r+\delta)^2 = r^2 + B^2 - 2rB\cos(90^0 - \theta + \alpha)$$
$$= r^2 + B^2 - 2rB\sin(\theta - \alpha)$$

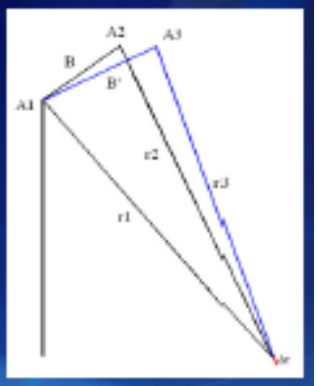
Z(y): topograph h: satellite altitud
λ: wavelength φ: phase
B: baseline θ: look angle
α: baseline angle

差分干涉(D-InSAR)

- 差分干涉技術爲將含有變形量的干涉圖中去除地形產生的變化量，剩下的爲變形量的干涉效應
- 差分干涉技術主要以重複軌道的模式來量測地表變形量
- 差分干涉技術所量測的變形量爲實際變形量投影在雷達視距方向的變形量

差分干涉(D-InSAR)原理

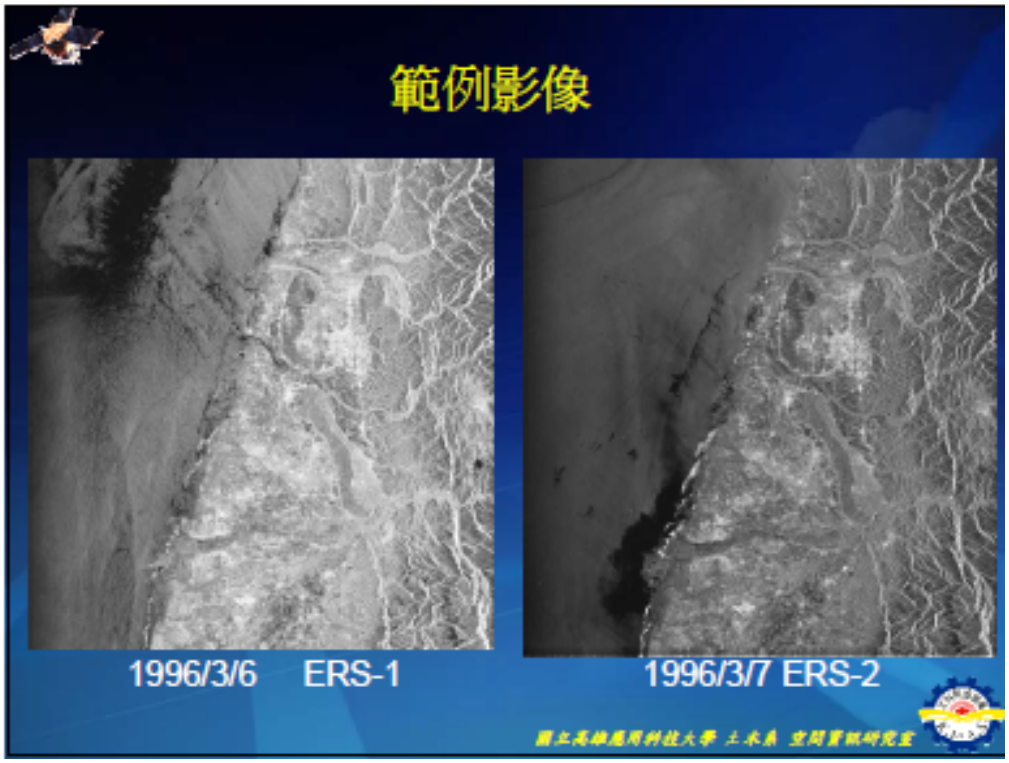
- 假設
  - A1及A2爲地形對(斜距爲r1及r2)
  - A1及A3爲變形對(斜距爲r1及r3)
  - 地形對斜距差$B_{//}$，變形對斜距差$B_{//}'$
  - 地面位移量在視距方向的變形量爲Δr
- 地形對相位值 $\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{//}$
- 變形對相位值 $\phi' = -\frac{4\pi}{\lambda}(B_{//}' + \Delta r)$
- 地形對平坦化處理 $\phi_f = -\frac{4\pi}{\lambda} B\cos(\theta_0 - \alpha)\cdot(\theta - \theta_0)$
- 變形對平坦化計算 $\phi_f' = -\frac{4\pi}{\lambda} B'\cos(\theta_0 - \alpha')(\theta - \theta_0) - \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$
- 變形量 $\phi_f' - \phi_f \frac{B_{\perp 0}'}{B_{\perp 0}} + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$



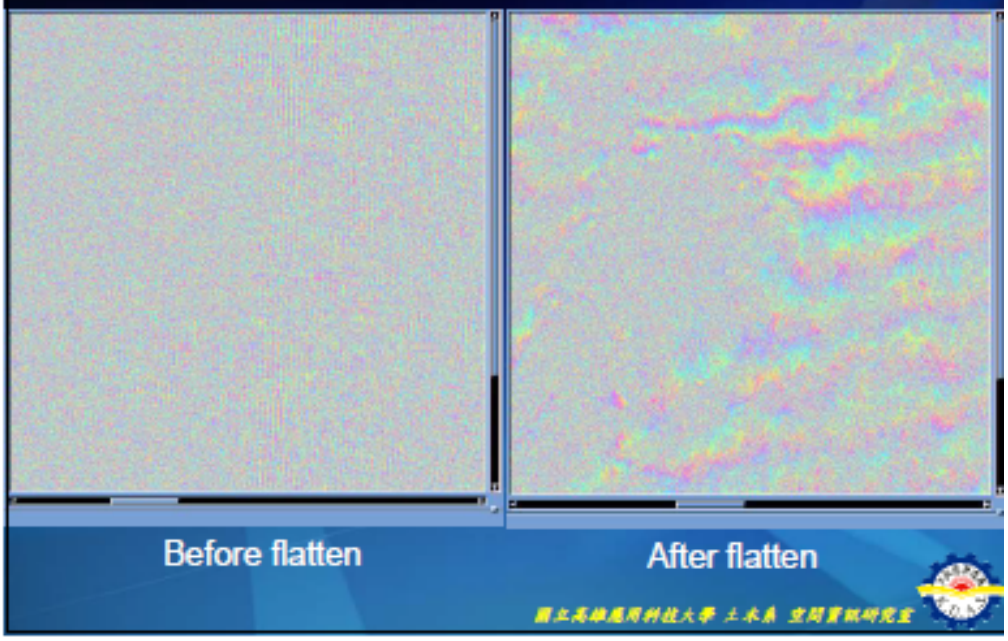
雷達干涉技術處理流程

- 基本處理流程
  - 基線計算
  - 影像套合
  - 產生干涉圖
  - 平坦化處理
  - 全相位回復
  - 相位至高程轉換
  - 坐標定位

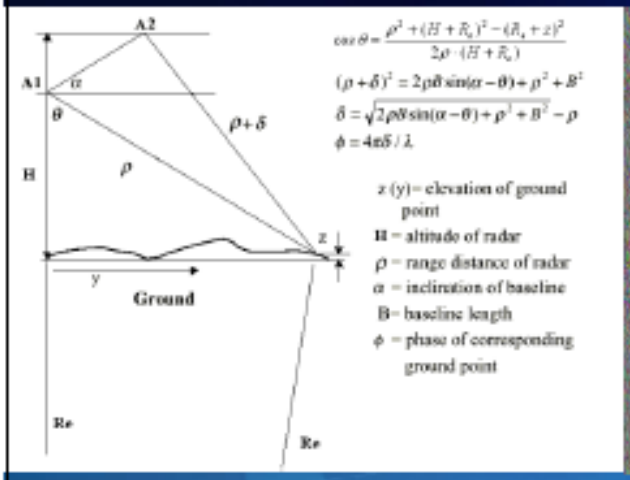
D-InSAR 資料處理流程圖
主影像 1
地形對
主影像
變形對
主影像 2
初步套合
精密套合
干涉圖1
干涉圖2
平坦化
DEM
地形干涉圖
全相位回復
撒碼
變形干涉圖
座標定位
差分干涉處理
撒碼


範例影像
1996/3/6 ERS-1
1996/3/7 ERS-2

產生干涉圖及平坦化處理



DEM模擬干涉圖



$$\cos\theta = \frac{\rho^2 + (H + R_e)^2 - (R_e + z)^2}{2\rho \cdot (H + R_e)}$$

$$(\rho + \delta)^2 = 2\rho B \sin(\alpha - \theta) + \rho^2 + B^2$$

$$\delta = \sqrt{2\rho B \sin(\alpha - \theta) + \rho^2 + B^2} - \rho$$

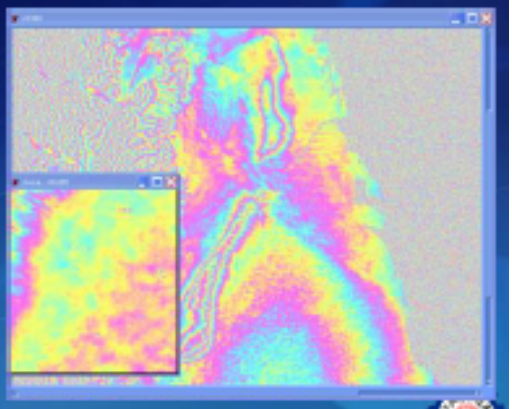
$$\phi = 4\pi\delta / \lambda$$

z (y) = elevation of ground point
H = altitude of radar
ρ = range distance of radar
α = inclination of baseline
B = baseline length
ϕ = phase of corresponding ground point

全相位回復

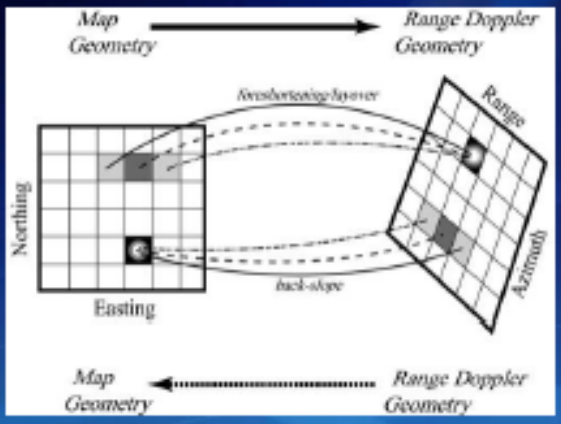
- $\phi_\omega = W\{\phi\} = \text{mod}\{\phi + \pi, 2\pi\} - \pi$, where
  $\phi = -4\pi\Delta R/\lambda + \phi N = 2\pi k + \phi N$,
- Residue point

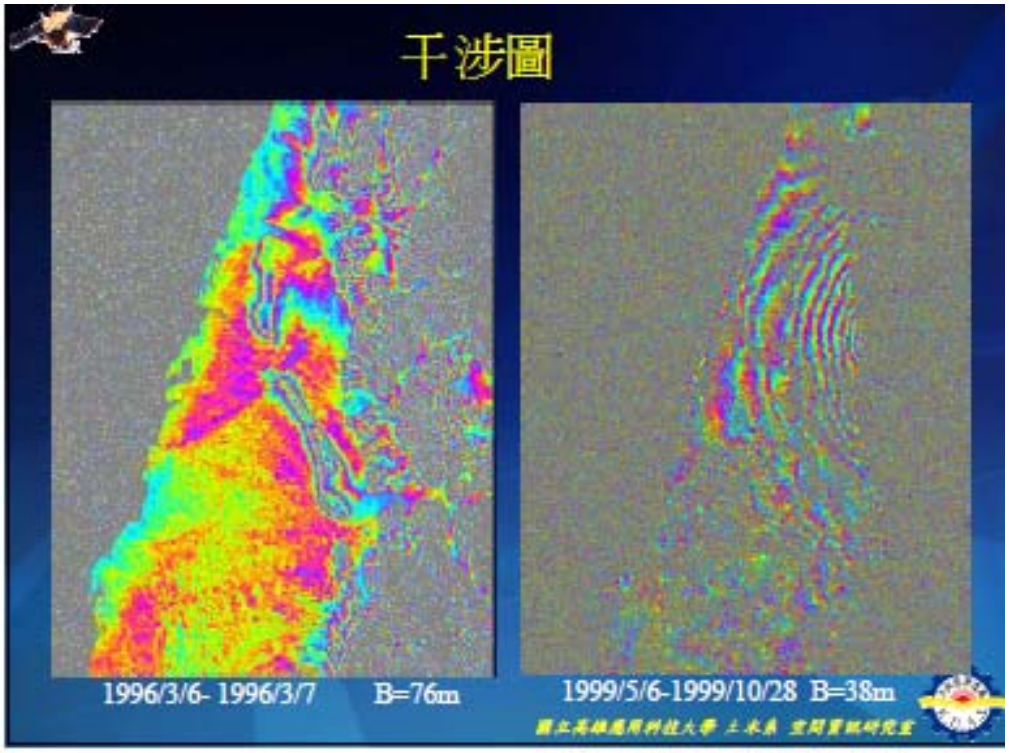
0.2	0.2	0.2	0.2
0.4	0.2	0.2	0.4
0.6	0.8	0.8	0.6
0.8	0.8	0.8	0.8

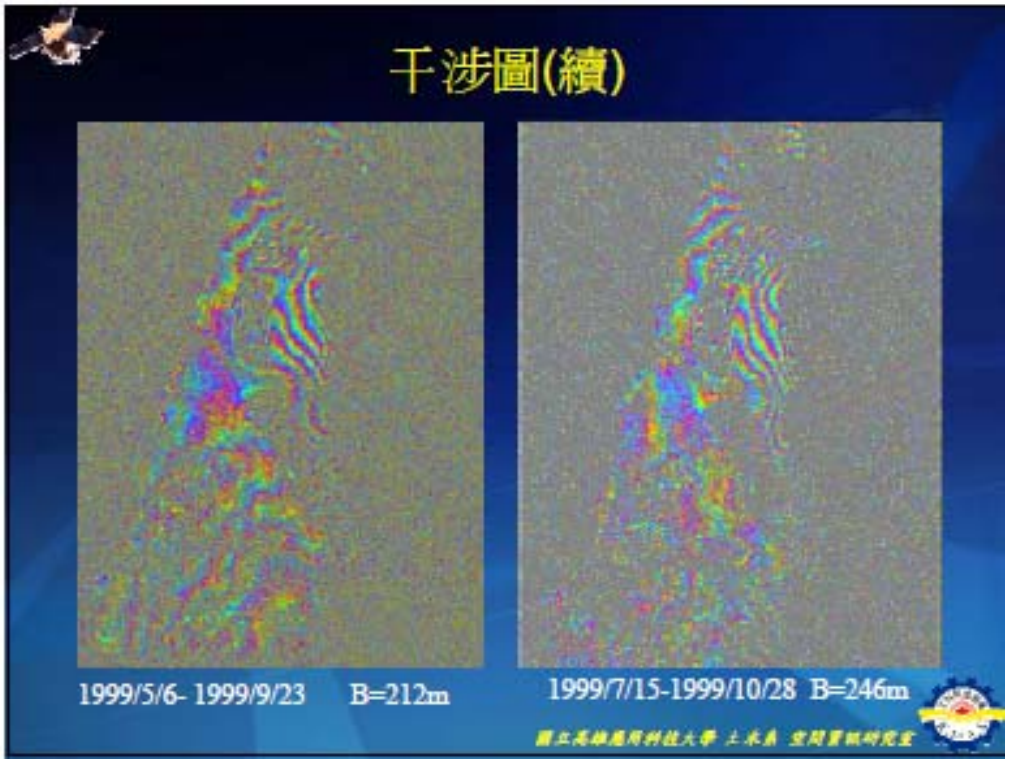


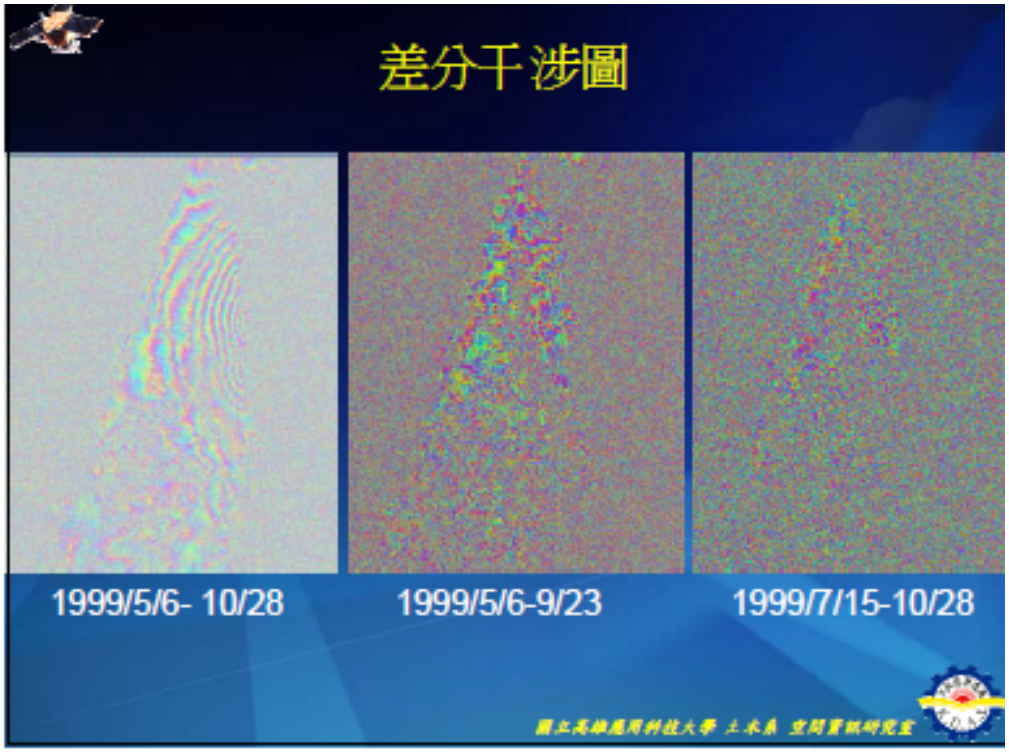
坐標定位

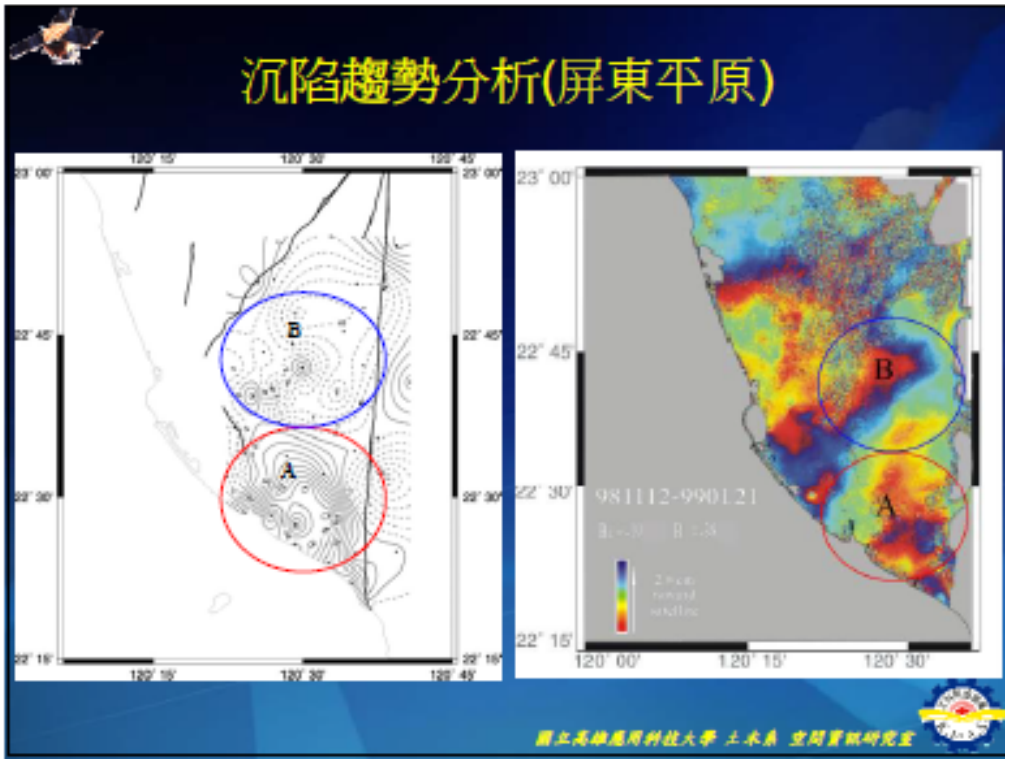
- 目的:
  - 將雷達座標轉換至方格座標
- 方法:
  - Range-Doppler method
  - SAR geometry method



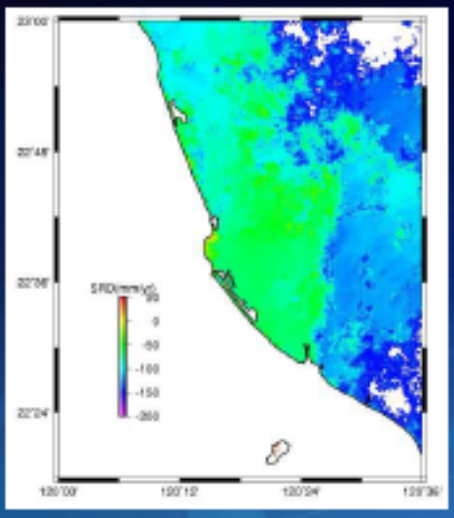

干涉圖
1996/3/6- 1996/3/7 B=76m
1999/5/6-1999/10/28 B=38m


干涉圖(續)
1999/5/6- 1999/9/23 B=212m
1999/7/15-1999/10/28 B=246m

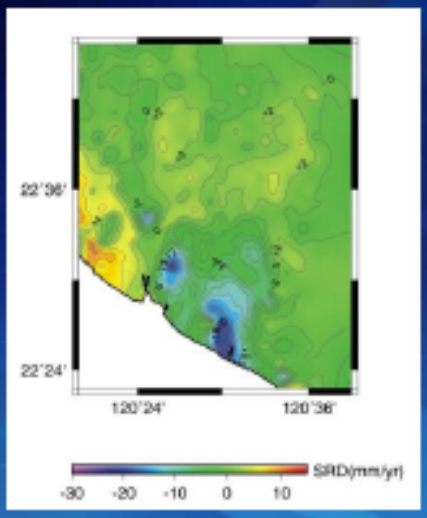

差分干涉圖
1999/5/6- 10/28
1999/5/6-9/23
1999/7/15-10/28


沉陷趨勢分析(屏東平原)
B
A
981112-990121
120° 00'
120° 15'
120° 30'
22° 45'
22° 30'
23° 00'

沉陷趨勢分析(屏東平原)



由屏東平原97-98年間年度變動量



1995-2000年平均變化速率

雷達干涉技術之地層下陷偵測

雷達干涉量測技術(Radar Interferometry)在地表變形災害的應用中，可以快速且全面的獲取高精度的地表變形資訊，已成爲地表變形偵測的有利工具。但因雷達干涉技術偵測的品質深受處理技術、目標點位性質及大氣等條件的影響，以台灣地區潮濕多植被的特性，要獲得良好的結果實屬不易。根據各項研究結果顯示，固定散射體雷達干涉技術(PS-InSAR)的方法可以有效的偵測出地表變形量，其中固定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固定散射體並計算其變形量，爲目前雷達干涉技術偵測正確地表變形的關鍵技術。

雷達差分干涉技術(Differential InSAR)是用來量測地表微小移動的技術，方法爲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，這個技術可提供至公分級或更少的相對精度。D-InSAR量測地表移動量(Displacement)的方向並非垂直的方向，而是沿著雷達視距(Line of Sight)方向的變動量。

D-InSAR是建構在兩張不同時期的干涉圖上，其中一張干涉圖爲地形對，代表地表高程；另一張干涉圖爲變形對，變形對資料則包含了地形效應及地表變形的效應。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，得到的結果爲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，處理的方式可分爲三種：

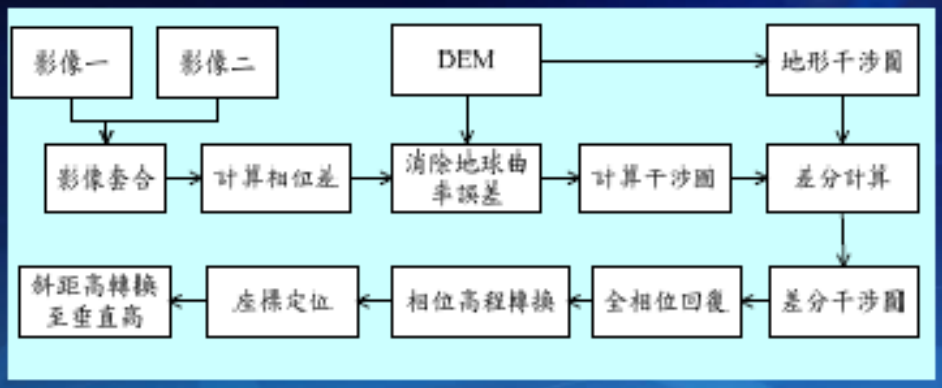
1. 二軌跡法 (Two-pass Differential Interferogram)

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

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

本研究採用二軌跡法，數值高程資料則利用SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)資料，處理流程如圖：

二軌跡法資料處理流程



固定散射體技術

固定散色體(Persistent Scatters, PS)技術是雷達干涉方法中，較先進的處理技術，主要的目的在解決(克服)長時間的序列影像中，影像對因變形或環境效應影響(大氣及DEM)導致影像相位改變產生不相關現象，而造成干涉處理的困難。

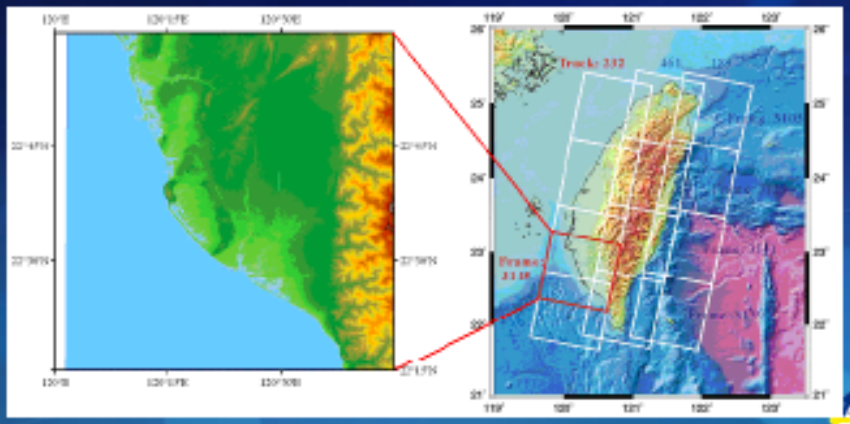
固定散射體 (PS) 技術主要是利用像元內的最大的主要訊號源如橋樑及建物等，因該類像元有明顯固定的散射訊號，因此在時間序列的影像中，這些點位在該區域中，有足夠穩定的訊號來提供分析的資訊，根據同一區域鄰近像元環境條件相類似的假設，在後續分析中，就可以利用這些固定散射的點位資訊進行雜訊的濾除，進而推算出在時間序列中不同時間點PS點相位及高程的變化。

PSInSAR的處理方法，主要可區分爲下列五個步驟：

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DEM殘差：利用時間基線(Temporal Baseline)及空間垂直基線，建立測試區的地表變形模式(Deformation Model)，並將每一個PS像元粹取的地表線性變型量及DEM殘差值和原始干涉圖進行比較。
4. 粹取非線性的變形量及大氣效應：萃取出因爲大氣效應及非線性表變化量，利用時間及空間濾波器(Filter)來消除這些非線性影響量對PS像元相位值的變化量。
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。

成果測試與分析

本研究以屏東地區作爲研究區域，該地區位於ERS衛星軌道編號(track)爲232、框架編號(frame)爲3145的雷達影像位置，該地區的數值地形圖如下圖所示圖。



基本GPS觀測資料

近年在台灣所建置的GPS 觀測網，在屏東地區共有48個測站，1996~1999年所測得之垂直移動速率約爲13 ~ -25 mm/yr (負值代表沉陷)，其中位於屏東平原南部之20個測站其下陷速率達到11~ 25 mm/yr (Hou et al., 2004)。張中白等(2003)以InSAR觀測台灣西南部季節性之地表變形，得到台灣西南部地表沉降速率之季節性變化與地下水位高低波動一致(Chang et al, 2003)。

本研究擬整合現有水準測量成果、GPS觀測量配合衛星差分雷達干涉資料等量測資料，並建立一標準格式之高程變化模式，由現有觀測資料與分析，掌握屏東平原地表變化趨勢。本計畫之工作重點主要可分爲兩項：

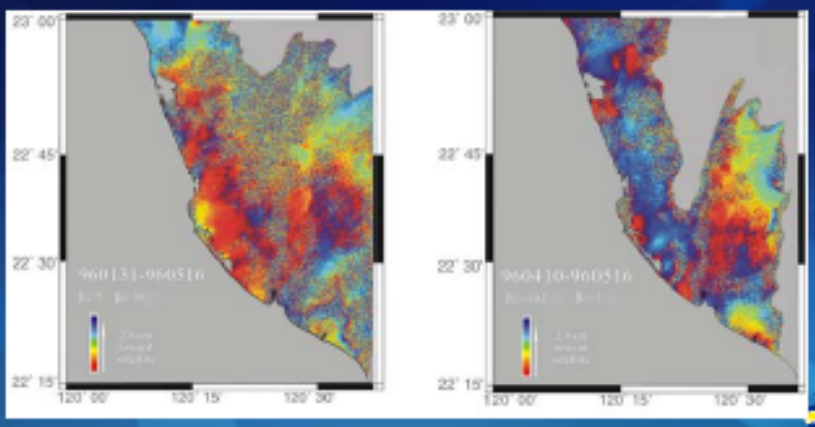
一、資料蒐集整理及分析，

二、整合資料進行時間序列地表變形分析。

搜集之資料含各單位於不同時代進行之水準檢測、地層下陷監測井及GPS監測站，探討其監測現況及地層下陷防治實務上之功能與限制性。其次爲探討衛星差分雷達干涉技術應用於地層下陷監測系統可行性之評估分析。

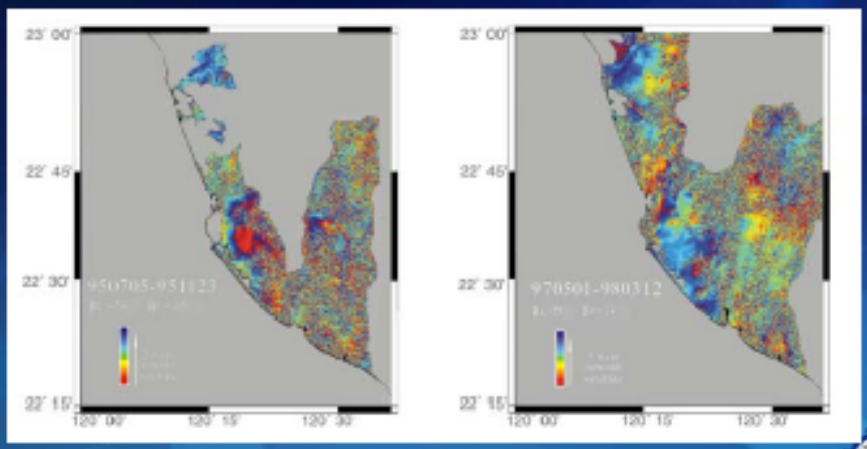
影像對時間在乾季的差分干涉結果

圖中顯示：差分干涉圖之干涉環(fringe)表示視衛星方向的變形量，假若顏色變化由紅到藍表示變化量爲+2.8cm，反之，若顏色變化由藍到紅，則變化量爲-2.8cm。圖左下方之圖例分別代表像對日期、垂直及水平基線長、干涉環比例尺。



影像對時間在溼季或是間隔時間較長的差分干涉成果

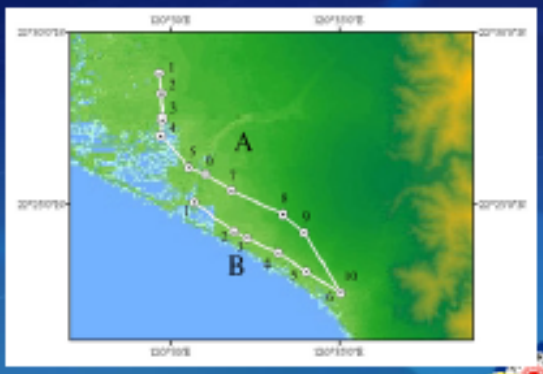
圖中顯示：干涉環較不明顯但仍可看出以林邊溪口爲沉降中心，向兩側及北邊遞減。



成果精度分析

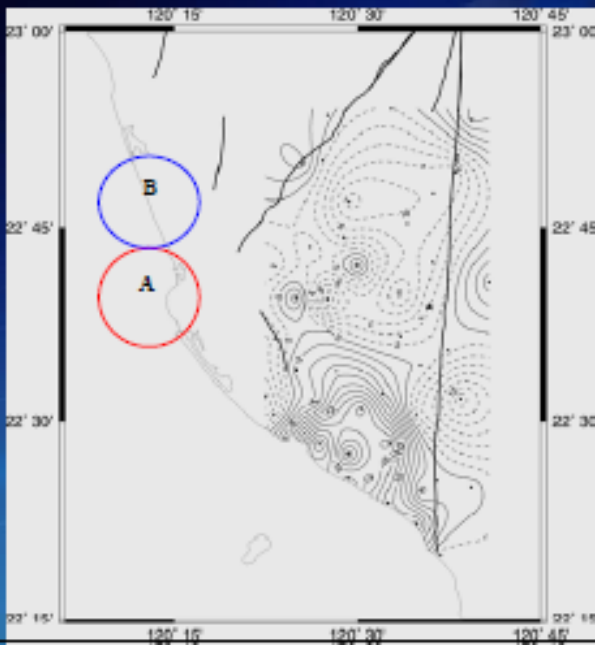
為能確實比較差分干涉技術計算垂直高度變化量的精度，本研究選用工研院於1997年4月及1998年3月在該地區的兩次水準測量資料為參考，計有A、B兩條測線。

其中A測線點位分布較偏北邊，編號從1至10號，共有10個測站；B測線則較偏南邊靠近沿海地區，編號從1至6號，共有6個測站，水準測量站點位分布如右圖。



屏東平原沉陷量分析

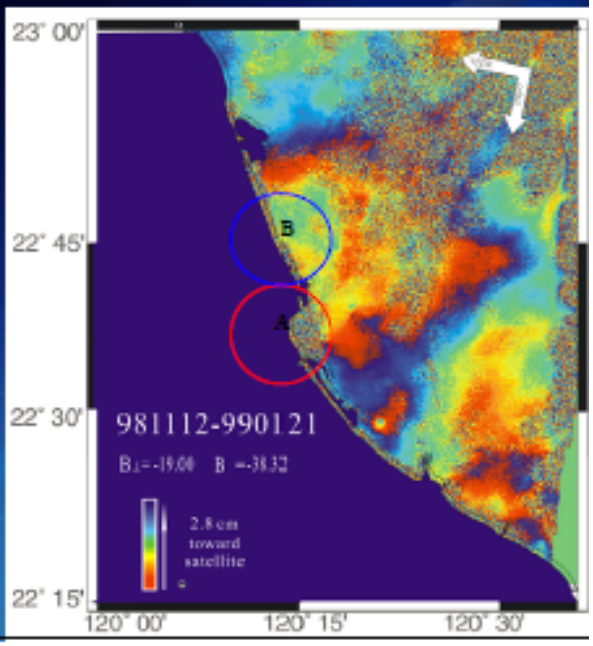
由GPS資料所內插計算得每年上升(Hu,2006)



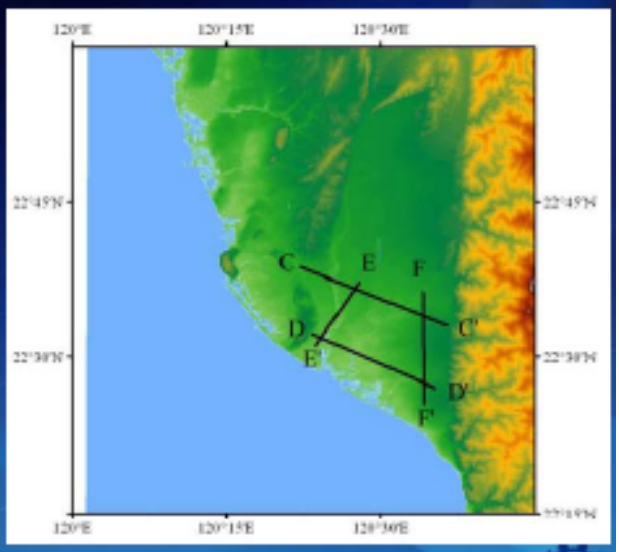
由 D-InSAR計算的差分干涉及下降速率曲線圖

干涉圖的色彩表示爲地表變形在雷達是線方向的變化量，每一環的變化量爲2.8cm。

A區塊部份爲地層下陷的區域；
B區塊部份爲上升的地區。



爲更詳細分析屏東地區變形結果，將研究區內變化較大的屏東平原分別沿西北-東南走向取C-C`、D-D`剖面及對應的E-E`、F-F`剖面進行剖面分析，以利了解研究區域內地層下陷範圍及下陷變形量，剖面位置示意圖如右圖



影像對乾季及溼季的平均下陷量

溼季	平均下陷量(cm)			
影像對	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'
950705-951123	-0.02	-0.40	-0.95	-0.39
970501-980312	0.02	-0.44	0.32	1.13
990506-991028	-0.18	-1.30	0.21	-0.13
990506-000106	0.01	-2.07	-0.27	0.26

影像對乾季及溼季的平均下陷量

乾季	平均下陷量(cm)			
影像對	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'
960131-960516	-0.03	-0.52	-0.15	0.14
981112-990121	-0.07	-0.57	-0.34	-0.49
981112-990506	-1.31	-2.56	-1.15	-0.12
990121-990506	-0.94	-2.14	-0.75	0.43

表中可以看出除F-F'剖面無明顯趨勢外，其餘三條剖面溼季的下陷量都明顯低於乾季的下陷量，顯示該地區因溼季雨量較豐富填補地下水，導致乾溼季的下陷量有明顯的差異。

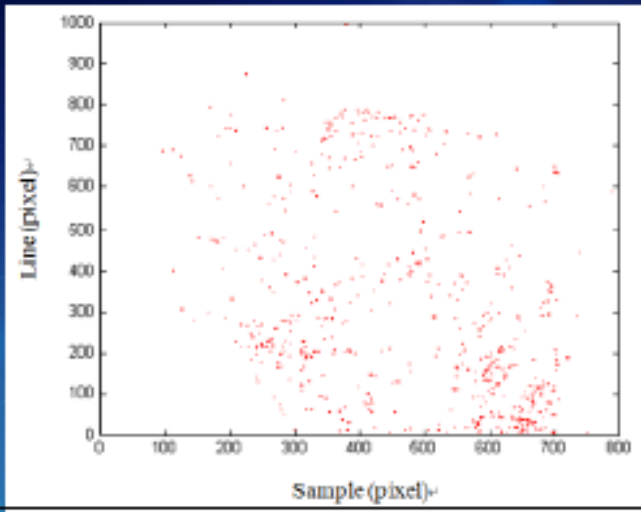
PSInSAR 結果

影像時間方面，本研究使用1996~1999 年之12幅SAR影像分別配對成11 幅干涉影像對，其中主影像選擇爲1999/01/21之ERS2影像。

垂直基線長	影像日期	與主影像間隔時間		-282	990610	139
200	960306	-1035		-127	990715	174
136	960307	-1034		904	990819	208
43	981112	-69		352	990923	242
-764	981217	-34		121	991028	277
125	990506	105		-997-	991202	311

1. 挑選PS候選點

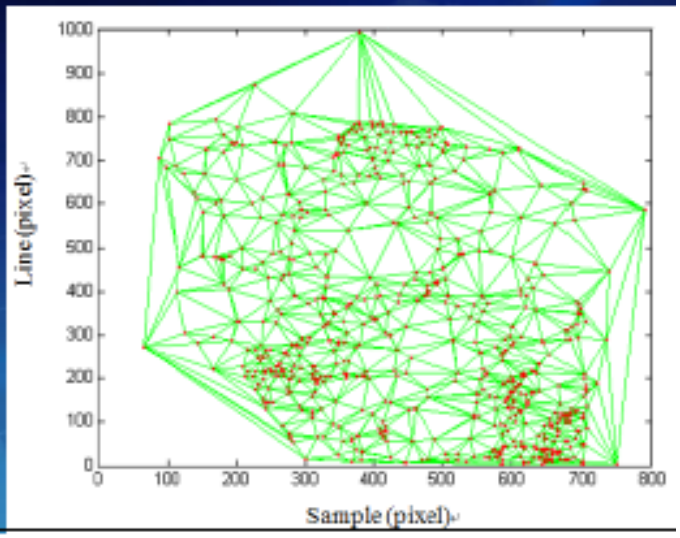
由於受到空間基線的影響，故PS候選點的挑選將從這幾幅連續的影像中找到其影像對於主影像之同調性數值皆高於0.28的點，當作PS的候選點，其點位分布的情況如下圖所示。整幅影像中，我們萃取出829個候選點，約每平方公里有0.1個PS候選點。



2. 建立三角網

由於永久散射體的分布是離散的，故必須將其點與點間建立關連性。

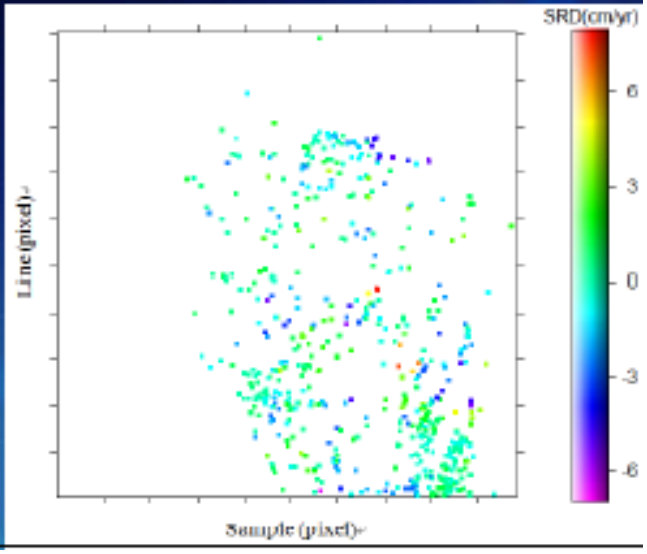
本試驗利用Delaunay三角網將各個PS候選點進行連線，其成果如圖所示。



3. 計算變形量

三角網形架構建立完後，計算每一個三角形點與點之間的差值，

並且利用同調函式模型來估算其中的變形量與地形殘差估算。最後得到來自斜距方向上的年平均變形量如圖。



結果顯示，PSInSAR技術於本測區中，利用時間序列同調圖像共找出829個PS點，上升最大變動為7.2cm/yr 集中於像幅中心，下沉最大變動為 -6.2cm/yr 集中於像幅中下方。

分析與討論

1. 由兩條水準測量導線上點位的三種資料值相比較，得到D-InSAR技術所推求的垂直高度變化值與水準測量變化值及由GPS內插的垂直高度變化值，其平均值差異量均小於1cm，且變化的趨勢一致，證實D-INSAR技術所推求的垂直高度變化值精度良好。
2. 從干涉圖的分析中可知，乾季的差分干涉圖色彩圖環較為明顯，干涉效果較好，顯示乾季季節時地表的含水量變動較少，影像對的相關性較高，因此有較佳的干涉結果。

3. 從屏東地區的剖面圖分析中可知，有兩條剖面的下陷量從1996至1999年期間下陷量逐年增加，且在98至99年間的下陷量明顯較前幾年大許多。

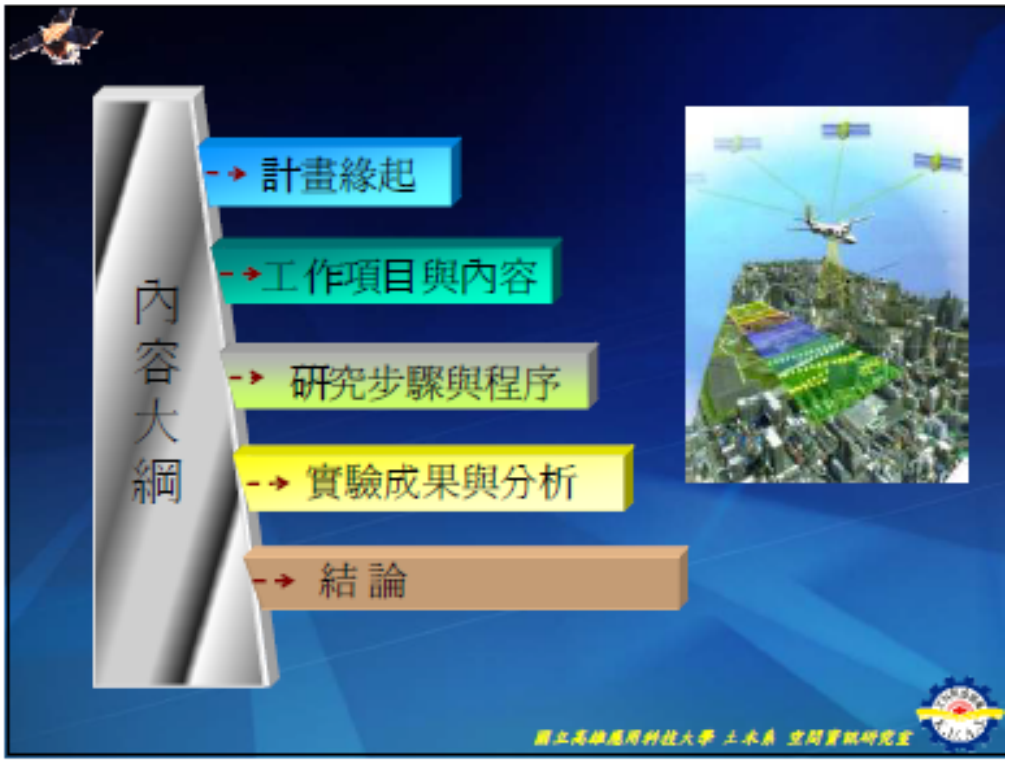
4. 時間跨越乾季的影像對與溼季的影像對相比，確實量測到較高的下陷量，表示研究區域中地層下陷情形能反應季節性的變化，此區地層下陷的情況確實受到季節性的影響使得地下水位升高或降低，也惟有利用D-InSAR才能如此有效且選用短時間間隔的觀測研究此區域整體的變形作用。

五、結 論

本研究主要目標爲利用差分干涉雷達(D-InSAR)技術來進行海岸帶高程變形量(沉陷)之調查與分析。研究過程中，分別對關鍵技術建立相關處理之理論基礎，基於既有現地調查資料之蒐集的完整與方便性，研究區域選擇臺灣西南部(屏東海岸)海岸帶，使用ERS1/2序列之雷達影像，並採用新的「固定散射體雷達干涉技術(PS-InSAR)」方法，建立處理之數學模式，進行相關的實驗與分析。已獲得具體的初步成果。由雷達干涉技術初步結果與GPS實際觀測結果比對相當一致，顯示D-INSAR技術所推求的垂直高度變化值精度良好，也證實該技術對海岸帶地盤下陷調查應用之潛力。後續將持續完成更完整的資料處理與分析工作。

附錄四　期末簡報資料

海岸帶及近海衛星遙測技術之整合應用研究(3/4)
期末報告 簡報
計畫主持人：李良輝
協同主持人：謝嘉聲
國立高雄應用科技大學
中華民國一00年十一月十五日


內容大綱
計畫緣起
工作項目與內容
研究步驟與程序
實驗成果與分析
結 論

一、計畫緣起與背景

- 光學影像主要係利用可見光和近紅外波長的反射光譜特性和輻射光譜特性成像，其多光譜資料包含了豐富的地物空間資訊，但光學影像成像受大氣狀況(天氣)及觀測時刻(日夜) 等外部條件的影響較大。
- SAR具有全天候、全天時對地觀測的能力、SAR影像也敏銳的反映地物介電常數和表面粗糙度等特性，輪廓比較清楚，具有較好的對比度並能表達豐富的地物紋理和結構資訊。
- 採用遙測影像融合技術將二者的特性結合起來，對於充分發揮兩種資料的潛力，提高遙測解譯和資訊提取的精度和效率具有重要的意義。

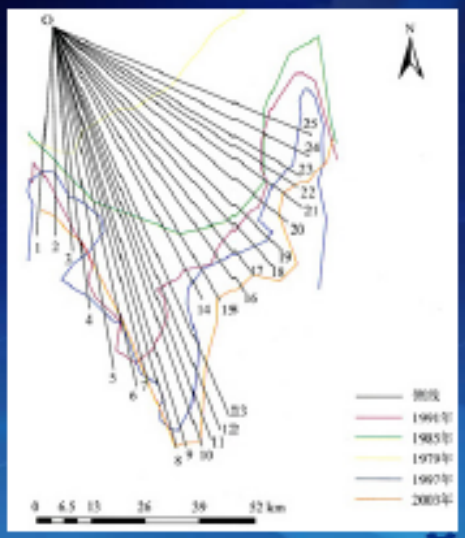
二、研究主題與工作項目

整合遙測(可見光及雷達)技術之海岸帶特徵調查。

內容包括：

1. 多尺度影像次像元精度之岸線資料萃取、岸線變遷分析。
2. 島礁調查、淺海水深及地形遙測技術。
3. 高解析合成孔徑雷達(SAR)在海洋及海岸帶的應用。
4. 差分雷達干涉(D-InSAR)量測技術偵測海岸帶高程變形量(沉陷)。

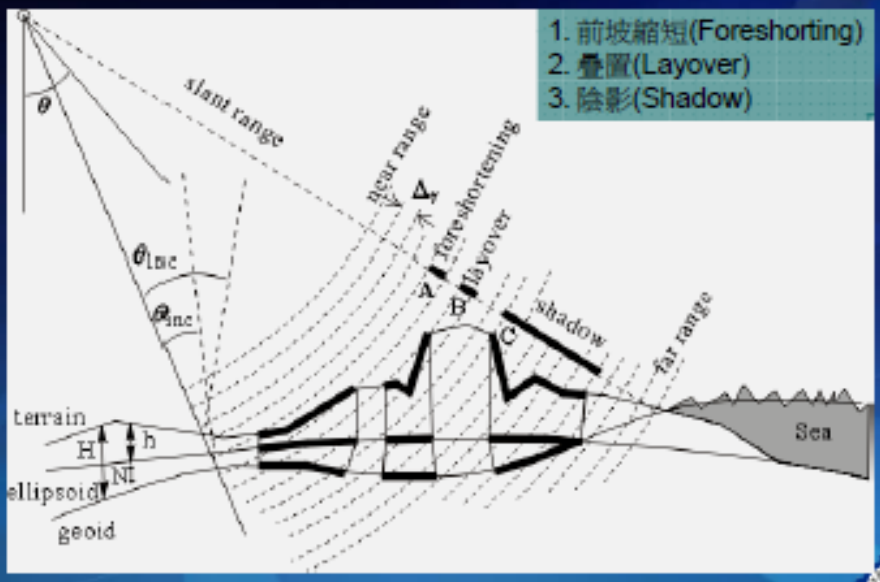
岸線特徵提取與變化分析



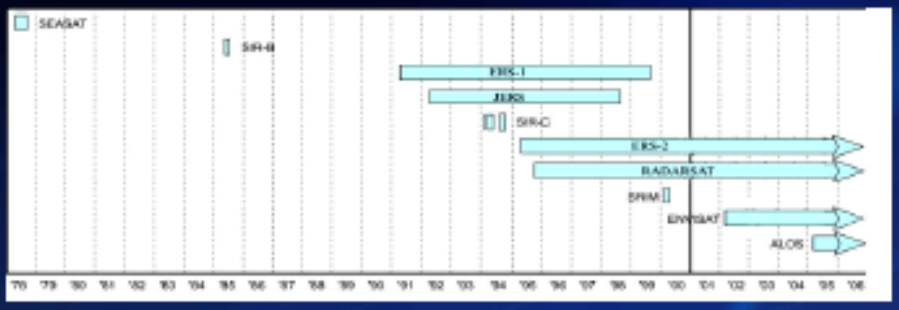
三、研究方法與進行步驟

合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天候、全天時獲取遙測圖像的能力，是近幾年迅速發展起來的微波遙測新技術，而合成孔徑雷達干涉測量(SAR Interferometry，InSAR)，是一種新型的極具潛力的空間對地觀測技術。InSAR技術使用星載或機載雷達信號的相位資訊提取地球表面三維資訊，能全天候、全天時地獲取大面積地面精確三維資訊，空間解析度高，基本不受氣候條件的影響。目前，在InSAR基礎上擴展的差分干涉技術(Differential InSAR, D-InSAR)可測量微小的地表變形，已在研究地震變形、火山運動、冰川漂移、城市沉降以及山體滑坡等方面表現出極好的前景。

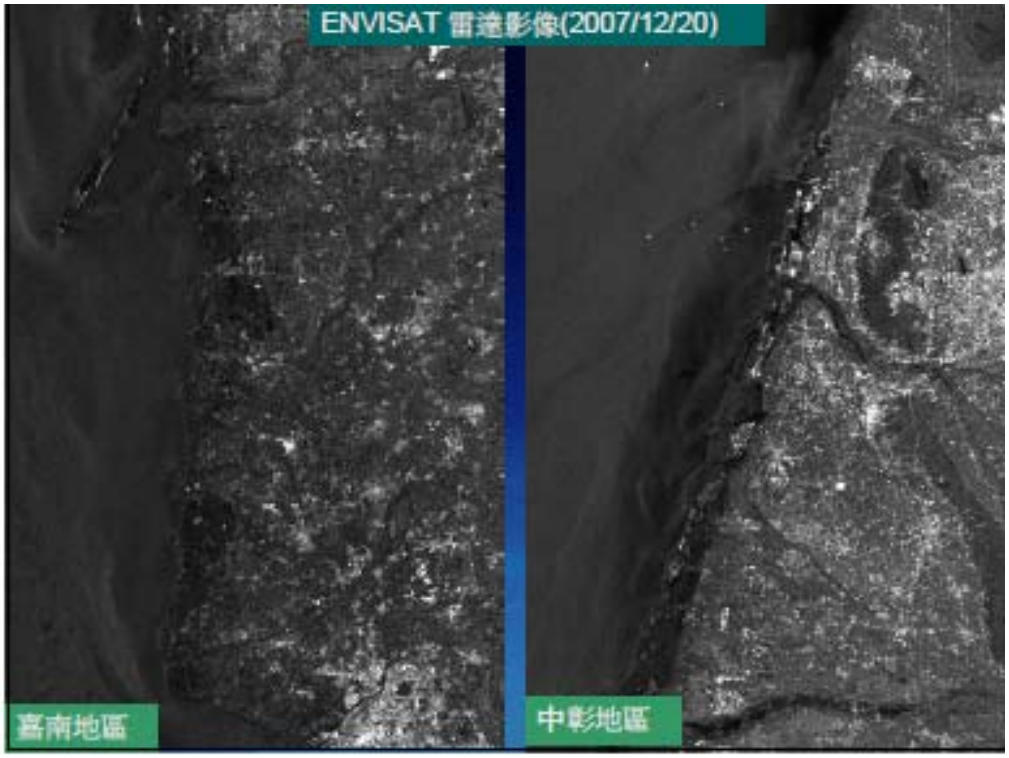
雷達影像的幾何變形

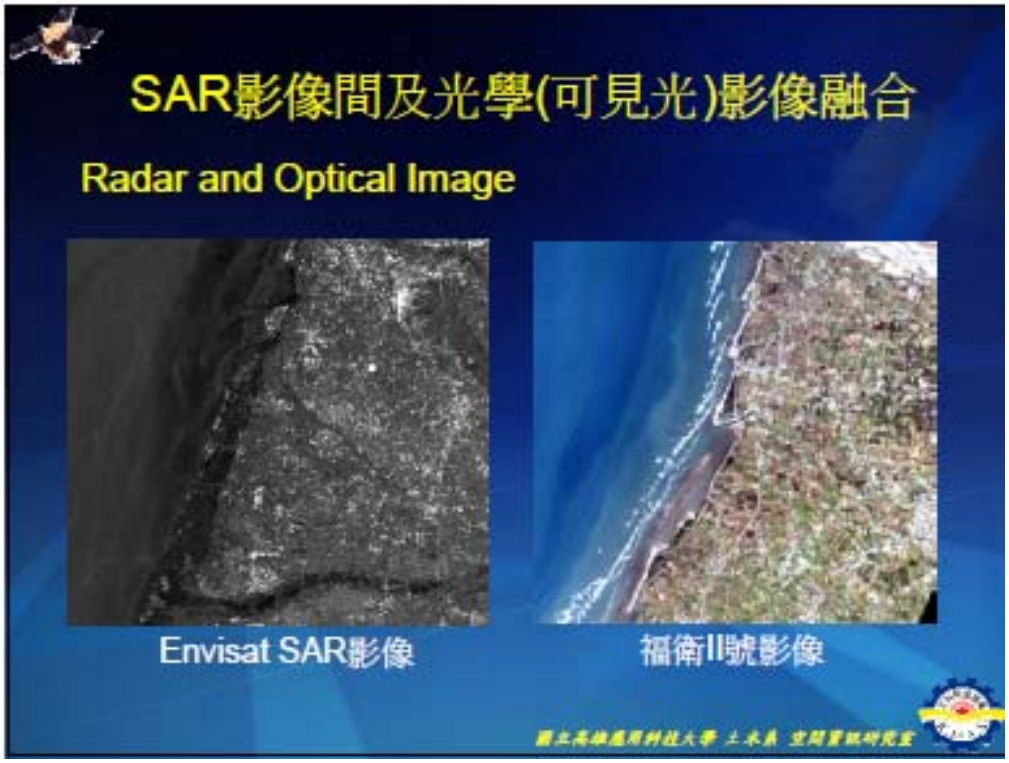


衛載 SAR影像來源



衛星名稱	發射日期	波段	高度(km)	視角	極化	解析度(m)
Seasat-1	1978,6,27	L(23.5cm)	800	20-26	HH	25
SIR-A	1981,11	L(23.5cm)	260	47-53	HH	40
SIR-B	1984,10	L	260	15-60	HH	46-14,25(A)
ALMAZ-1	1991,3,31	S(10cm)	300	30-60	HH	10-30
ERS-1	1991,7,17	C(5.6cm)	785	23	VV	30
JERS-1	1992,2,11	L(23cm)	568	35	HH	18
Radarsat	1995,11,4	C(5.6cm)	798	20-59	HH	10-100
Envisat	2002,3,1	C(5.6cm)	800	15-45	HH,VV,HV,VH	30-1000
ALOS	2006,1,24	L(23cm)	691.65	8-60	HH,VV,HV,VH	7-100


ENVISAT 雷達影像(2007/12/20)
嘉南地區
中彰地區


SAR影像間及光學(可見光)影像融合
Radar and Optical Image
Envisat SAR影像
福衛II號影像

新的特徵點(Feature Point)提取方法

目的：解決影像間存在尺度(Scale)、旋轉(Rotation)及光照 (Illuminance)之差異性。

(1) SIFT (Scale Invariant Feature Transformation)演算法

(2) SURF (Speed UP Robust Feature)演算法

- 尺度空間極值求取
- 特徵點位置確定

特徵提取

- 特徵點方向確定
- 特徵點描述 (Descriptor)

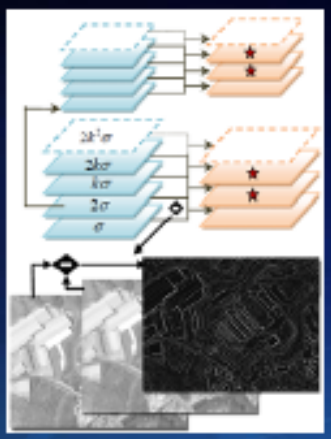
特徵描述

- 特徵匹配 (Matching)
- 除錯機制 (RANSAC)

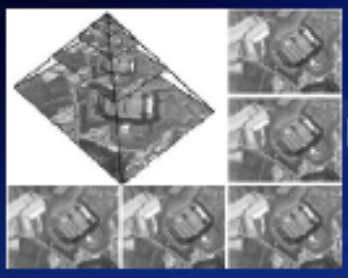
特徵匹配

國立高雄應用科技大學 土木系 空間資訊研究室

SIFT演算法

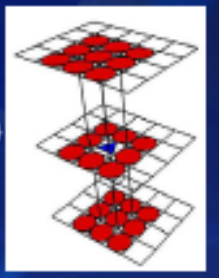


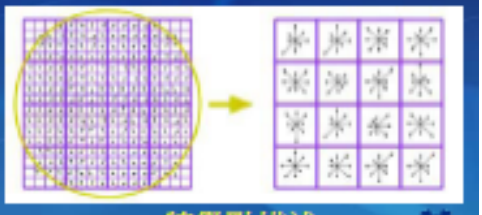
DoG 運算元



影像金字塔

局部極值提取

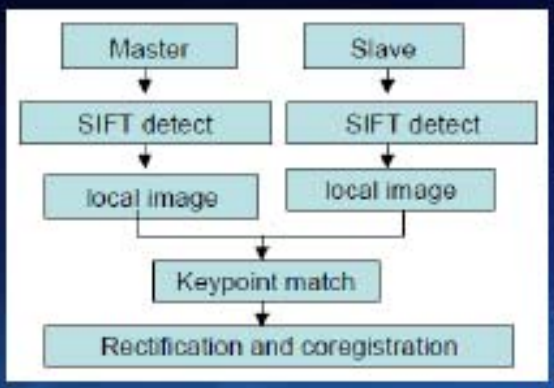


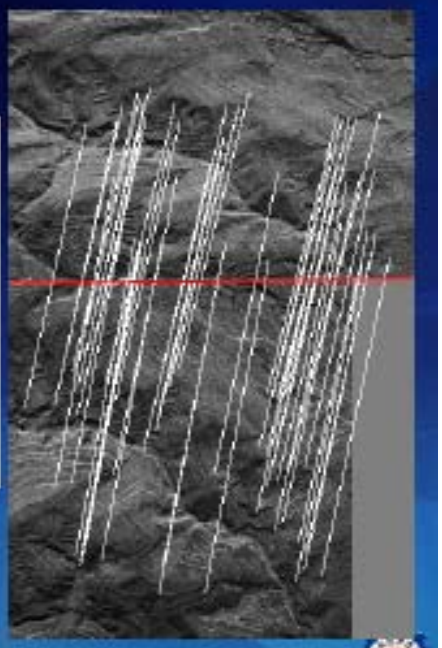


特徵點描述

國立高雄應用科技大學 土木系 空間資訊研究室

特徵點匹配





D-InSAR技術監測地表沉降

目前監測城市地表下沉一般採用GPS控制網測量和高等級水準測量，這兩種測量方法除了人力和資金耗費巨大、GPS和水準監測點需要長期維護這些缺點，最大的問題是GPS和水準測量方法僅能獲得離散點的下沉量。利用D-InSAR技術可以有效地克服上述缺點，由於海岸帶及城市一般地勢比較平坦，植被相對較少，雷達反射的相關性較好，容易獲得品質較好的干涉圖像，因而利用D-InSAR技術監測地表下陷容易實現。

透過與地面水準測量資料的比較顯示，D-InSAR測量值與水準測量值的相關度達0.94，D-InSAR測量精度可達5mm。

干涉雷達 (InSAR)原理

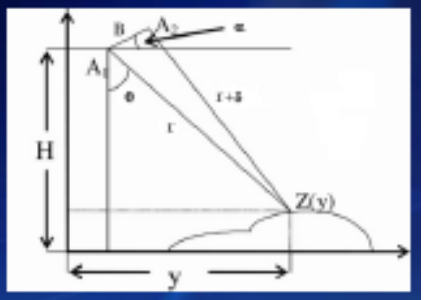
- 同一地面點傳送訊號至天線A_1及A_2因距離不同產生的相位差爲

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

- 因雷達波爲發送-接收，故雷達波的行進距離爲原距離的2倍

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi}\varphi$$

- 利用三角函數公式可推得相關值



$$\angle A_2A_1Z = 90^0 - \theta + \alpha$$
$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(c)$$
$$(r+\delta)^2 = r^2 + B^2 - 2rB\cos(90^0 - \theta + \alpha)$$
$$= r^2 + B^2 - 2rB\sin(\theta - \alpha)$$

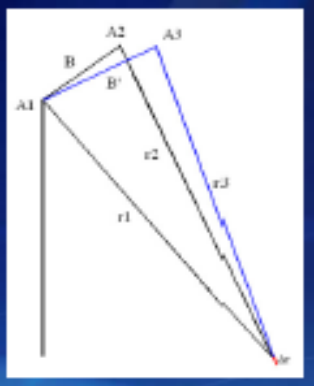
Z(y): topograph h: satellite altitud
λ: wavelength φ: phase
B: baseline θ: look angle
α: baseline angle

差分干涉(D-InSAR)

- 差分干涉技術爲將含有變形量的干涉圖中去除地形產生的變化量，剩下的爲變形量的干涉效應
- 差分干涉技術主要以重複軌道的模式來量測地表變形量
- 差分干涉技術所量測的變形量爲實際變形量投影在雷達視距方向的變形量

差分干涉(D-InSAR)原理

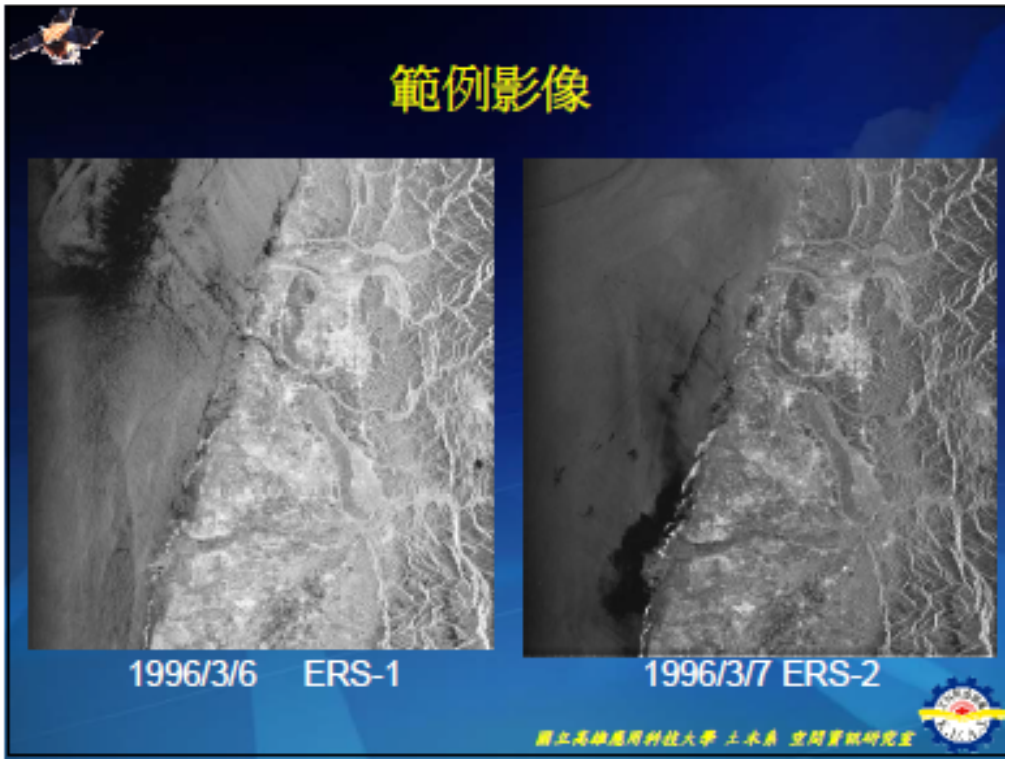
- 假設
  - A1及A2爲地形對(斜距爲r1及r2)
  - A1及A3爲變形對(斜距爲r1及r3)
  - 地形對斜距差$B_{//}$，變形對斜距差$B_{//}'$
  - 地面位移量在視距方向的變形量爲Δr
- 地形對相位值 $\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{//}$
- 變形對相位值 $\phi' = -\frac{4\pi}{\lambda}(B_{//}' + \Delta r)$
- 地形對平坦化處理 $\phi_f = -\frac{4\pi}{\lambda} B\cos(\theta_0 - \alpha)\cdot(\theta - \theta_0)$
- 變形對平坦化計算 $\phi_f' = -\frac{4\pi}{\lambda} B'\cos(\theta_0 - \alpha')(\theta - \theta_0) - \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$
- 變形量 $\phi_f' - \phi_f \frac{B_{\perp 0}'}{B_{\perp 0}} + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$



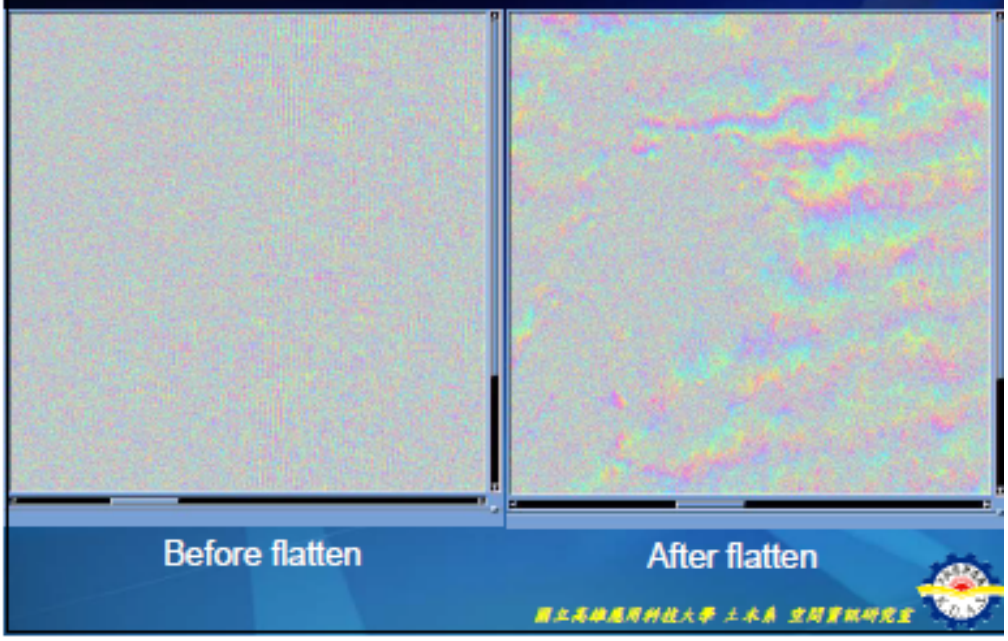
雷達干涉技術處理流程

- 基本處理流程
  - 基線計算
  - 影像套合
  - 產生干涉圖
  - 平坦化處理
  - 全相位回復
  - 相位至高程轉換
  - 坐標定位

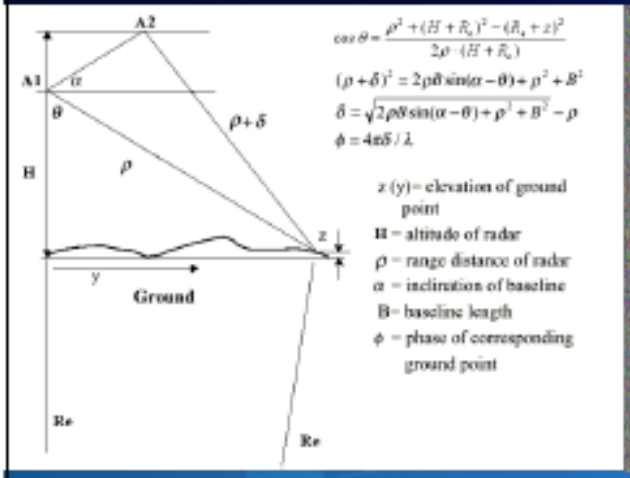
D-InSAR 資料處理流程圖
次影像 1
地形對
主影像
變形對
次影像 2
初步套合
精密套合
干涉圖1
干涉化
DEM
初步套合
精密套合
干涉圖2
干涉化
地形干涉圖
全相位回復
濾鍋
變形干涉圖
座標定位
差分干涉處理
濾鍋


範例影像
1996/3/6 ERS-1
1996/3/7 ERS-2

產生干涉圖及平坦化處理



DEM模擬干涉圖



$$\cos\theta = \frac{\rho^2 + (H + R_e)^2 - (R_e + z)^2}{2\rho \cdot (H + R_e)}$$

$$(\rho + \delta)^2 = 2\rho B \sin(\alpha - \theta) + \rho^2 + B^2$$

$$\delta = \sqrt{2\rho B \sin(\alpha - \theta) + \rho^2 + B^2} - \rho$$

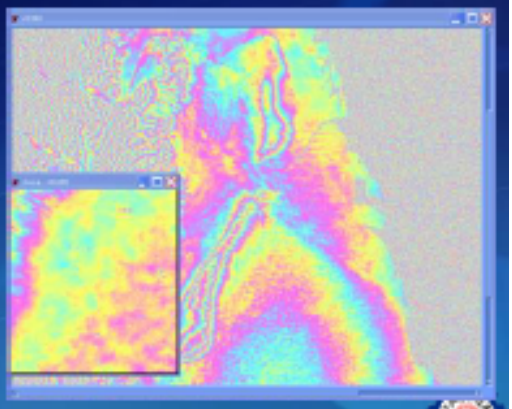
$$\phi = 4\pi\delta / \lambda$$

z (y) = elevation of ground point
H = altitude of radar
ρ = range distance of radar
α = inclination of baseline
B = baseline length
ϕ = phase of corresponding ground point

全相位回復

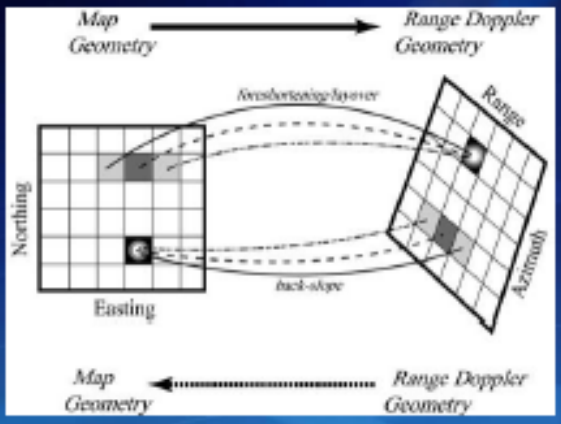
- $\phi_\omega = W\{\phi\} = \text{mod}\{\phi + \pi, 2\pi\} - \pi$, where
  $\phi = -4\pi\Delta R/\lambda + \phi N = 2\pi k + \phi N$,
- Residue point

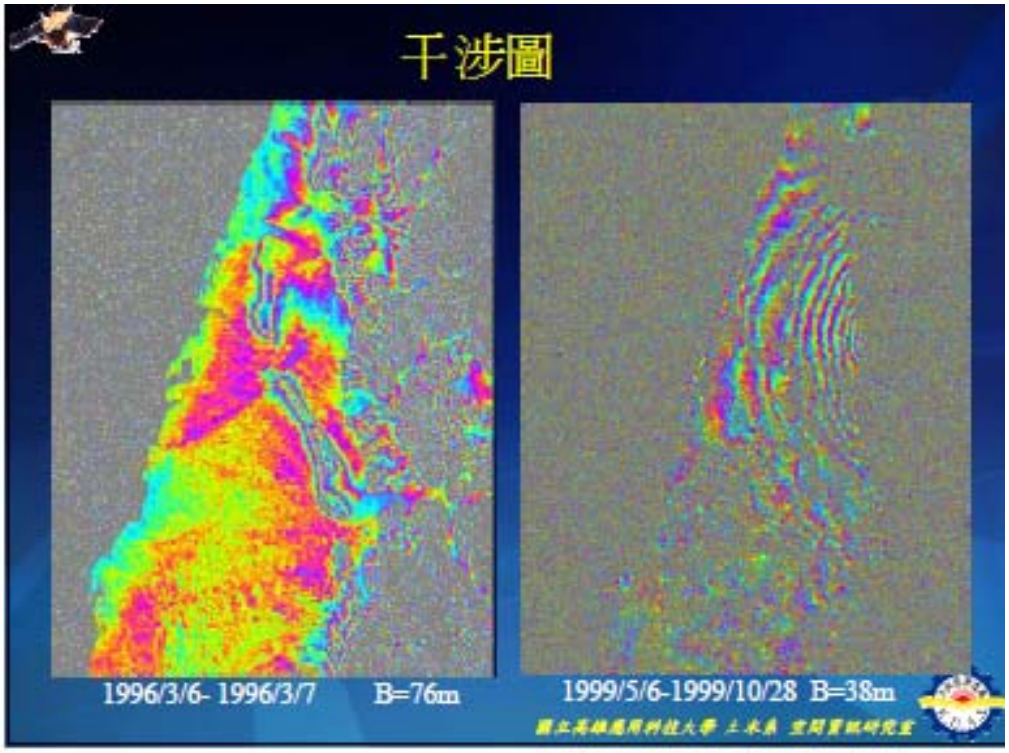
0.2	0.2	0.2	0.2
0.4	0.2	0.2	0.4
0.6	0.8	0.8	0.6
0.8	0.8	0.8	0.8

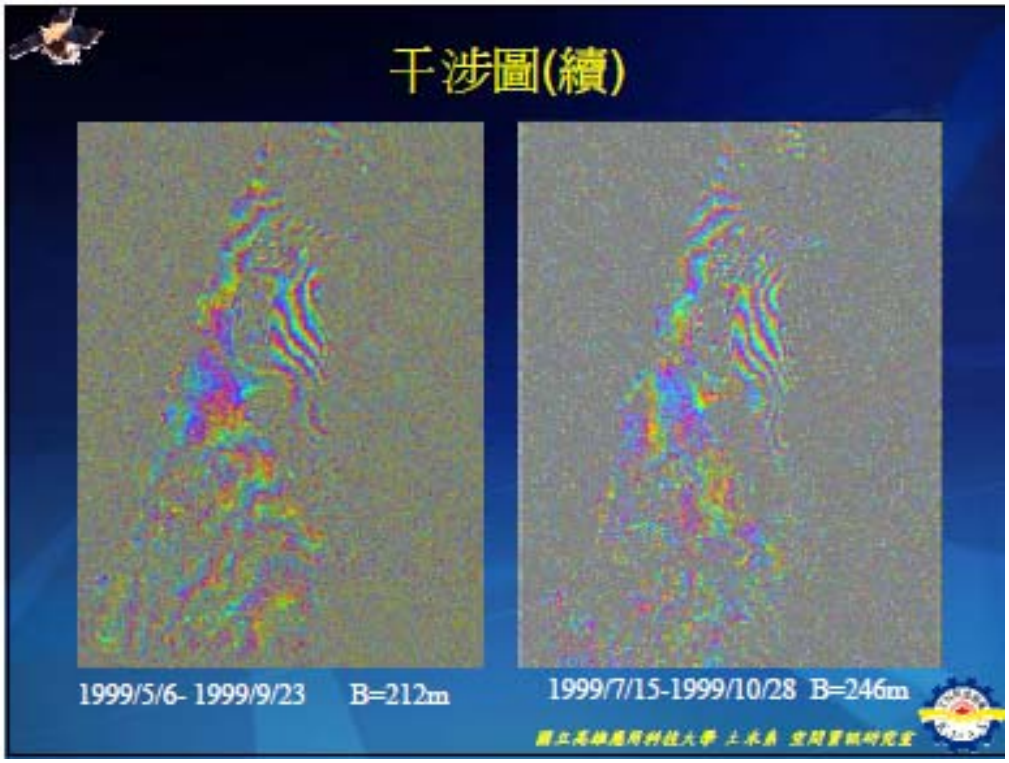


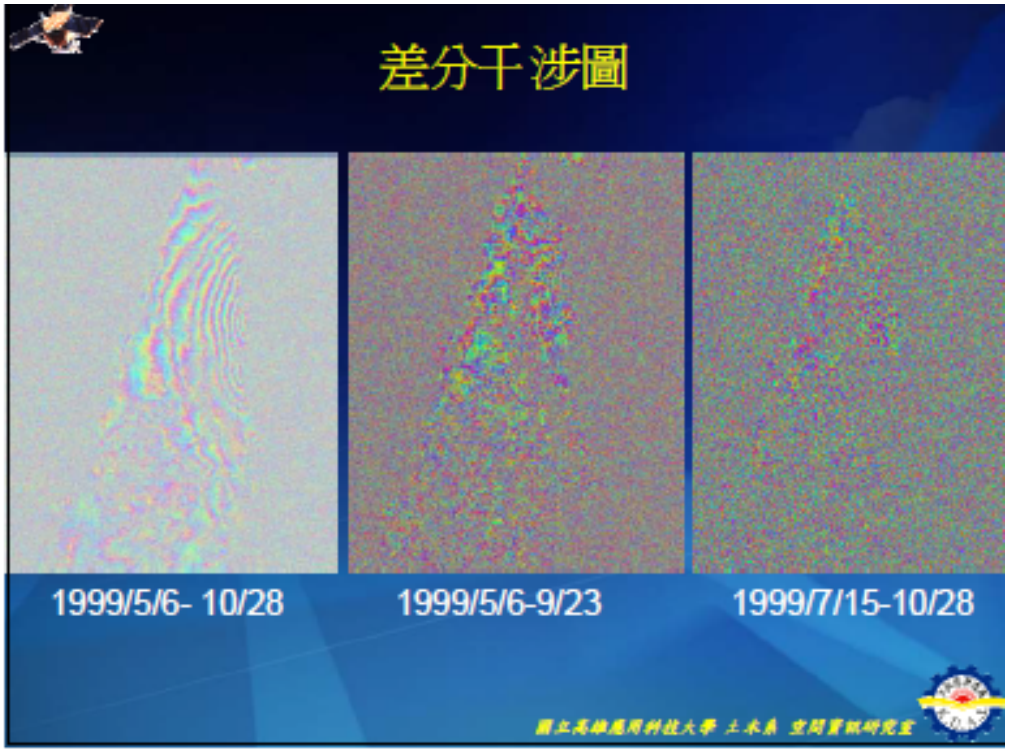
坐標定位

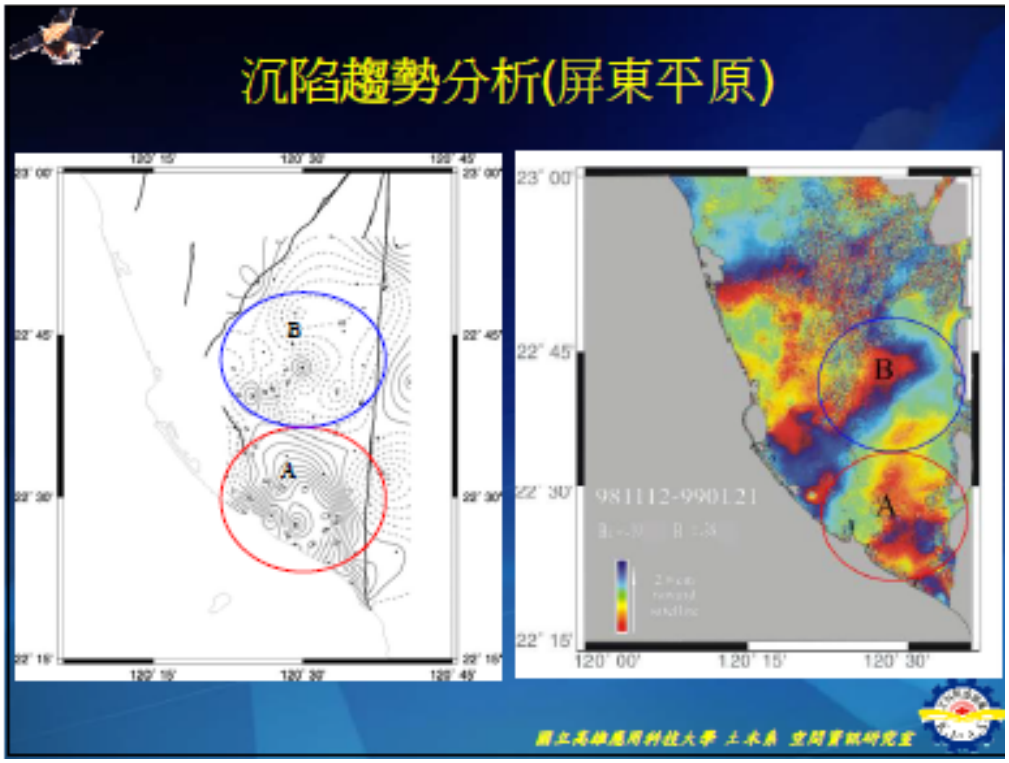
- 目的:
  - 將雷達座標轉換至方格座標
- 方法:
  - Range-Doppler method
  - SAR geometry method



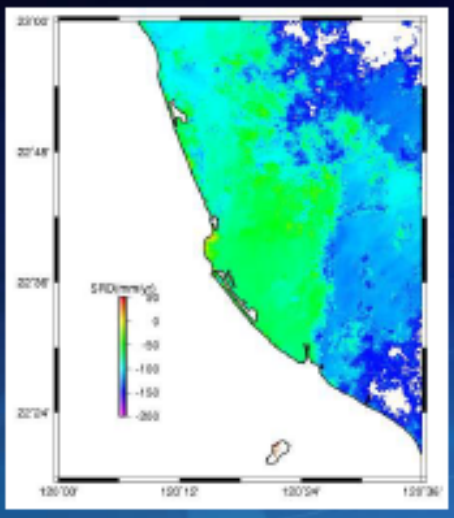

干涉圖
1996/3/6- 1996/3/7 B=76m
1999/5/6-1999/10/28 B=38m


干涉圖(續)
1999/5/6- 1999/9/23 B=212m
1999/7/15-1999/10/28 B=246m

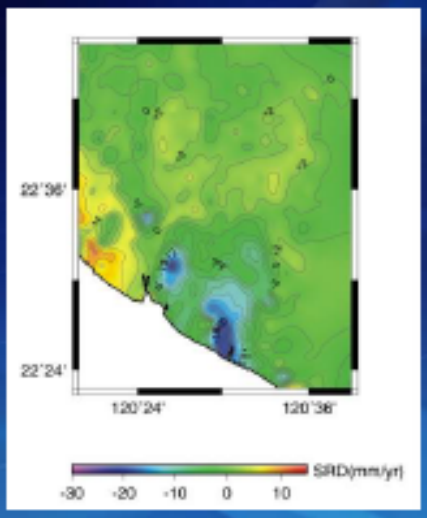

差分干涉圖
1999/5/6- 10/28
1999/5/6-9/23
1999/7/15-10/28


沉陷趨勢分析(屏東平原)
B
A
981112-990121
120° 00'
120° 15'
120° 30'
23° 00'
22° 45'
22° 30'
22° 15'

沉陷趨勢分析(屏東平原)



由屏東平原97-98年間年度變動量



1995-2000年平均變化速率

雷達干涉技術之地層下陷偵測

雷達干涉量測技術(Radar Interferometry)在地表變形災害的應用中，可以快速且全面的獲取高精度的地表變形資訊，已成爲地表變形偵測的有利工具。但因雷達干涉技術偵測的品質深受處理技術、目標點位性質及大氣等條件的影響，以台灣地區潮濕多植被的特性，要獲得良好的結果實屬不易。根據各項研究結果顯示，固定散射體雷達干涉技術(PS-InSAR)的方法可以有效的偵測出地表變形量，其中固定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固定散射體並計算其變形量，爲目前雷達干涉技術偵測正確地表變形的關鍵技術。

雷達差分干涉技術(Differential InSAR)是用來量測地表微小移動的技術，方法爲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，這個技術可提供至公分級或更少的相對精度。D-InSAR量測地表移動量(Displacement)的方向並非垂直的方向，而是沿著雷達視距(Line of Sight)方向的變動量。

D-InSAR是建構在兩張不同時期的干涉圖上，其中一張干涉圖爲地形對，代表地表高程；另一張干涉圖爲變形對，變形對資料則包含了地形效應及地表變形的效應。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，得到的結果爲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，處理的方式可分爲三種：

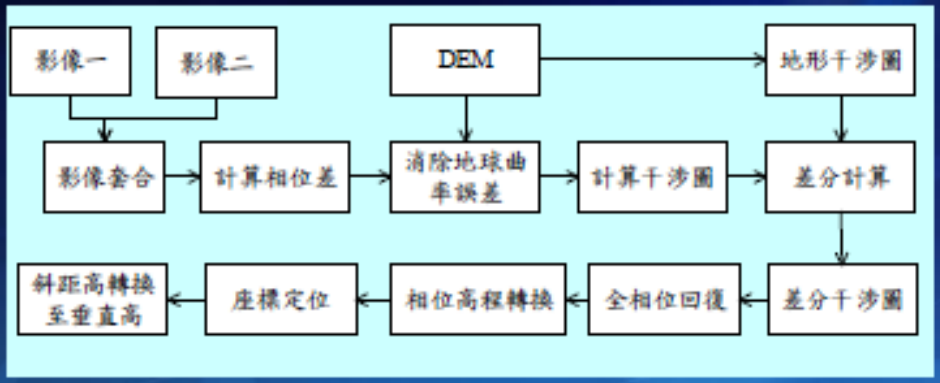
1. 二軌跡法 (Two-pass Differential Interferogram)

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

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

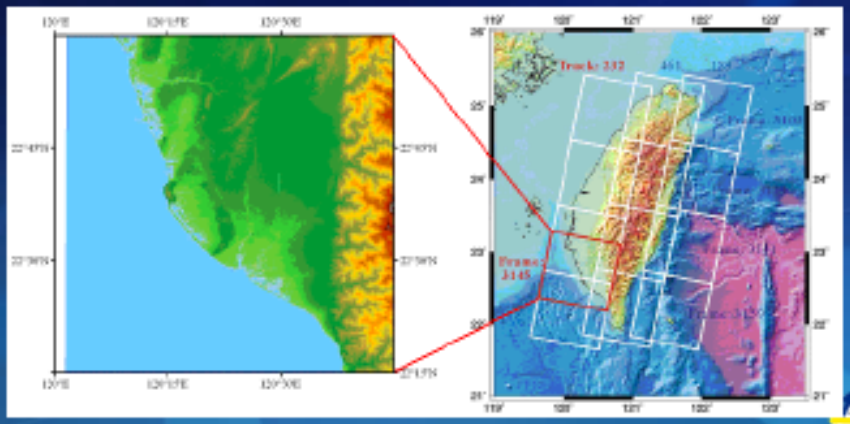
本研究採用二軌跡法，數值高程資料則利用SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)資料，處理流程如圖：

二軌跡法資料處理流程



成果測試與分析

本研究以屏東地區作爲研究區域，該地區位於ERS衛星軌道編號(track)爲232、框架編號(frame)爲3145的雷達影像位置，該地區的數值地形圖如下圖所示圖。



基本GPS觀測資料

近年在台灣所建置的GPS 觀測網，在屏東地區共有48個測站，1996~1999年所測得之垂直移動速率約爲13 ~ -25 mm/yr (負值代表沉陷)，其中位於屏東平原南部之20個測站其下陷速率達到11~ 25 mm/yr (Hou et al., 2004)。張中白等(2003)以InSAR觀測台灣西南部季節性之地表變形，得到台灣西南部地表沉降速率之季節性變化與地下水位高低波動一致(Chang et al, 2003)。

本研究擬整合現有水準測量成果、GPS觀測量配合衛星差分雷達干涉資料等量測資料，並建立一標準格式之高程變化模式，由現有觀測資料與分析，掌握屏東平原地表變化趨勢。本計畫之工作重點主要可分爲兩項：

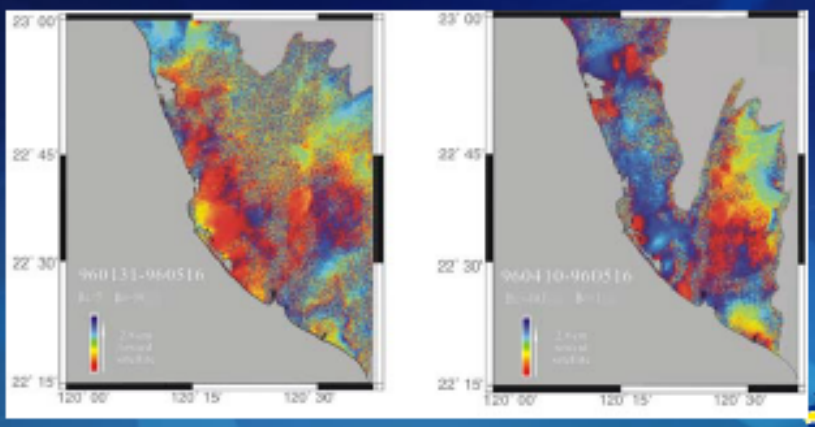
一、資料蒐集整理及分析，

二、整合資料進行時間序列地表變形分析。

搜集之資料含各單位於不同時代進行之水準檢測、地層下陷監測井及GPS監測站，探討其監測現況及地層下陷防治實務上之功能與限制性。其次爲探討衛星差分雷達干涉技術應用於地層下陷監測系統可行性之評估分析。

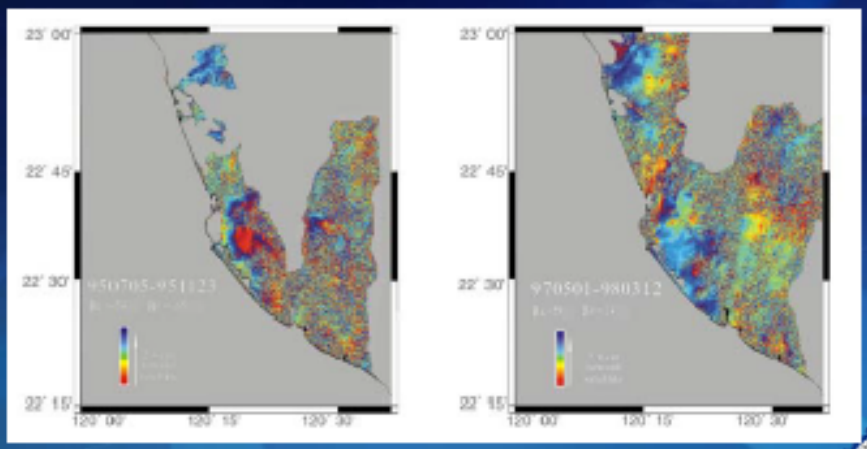
影像對時間在乾季的差分干涉結果

圖中顯示：差分干涉圖之干涉環(fringe)表示視衛星方向的變形量，假若顏色變化由紅到藍表示變化量爲+2.8cm，反之，若顏色變化由藍到紅，則變化量爲-2.8cm。圖左下方之圖例分別代表像對日期、垂直及水平基線長、干涉環比例尺。



影像對時間在溼季或是間隔時間較長的差分干涉成果

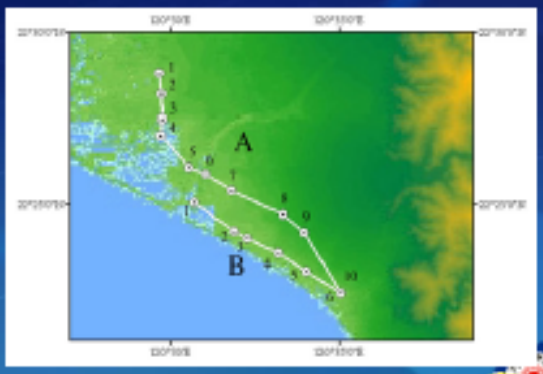
圖中顯示：干涉環較不明顯但仍可看出以林邊溪口爲沉降中心，向兩側及北邊遞減。



成果精度分析

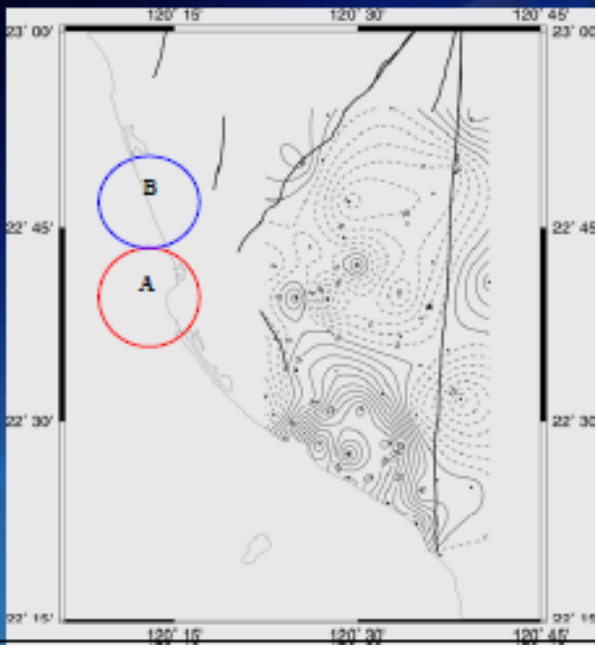
為能確實比較差分干涉技術計算垂直高度變化量的精度，本研究選用工研院於1997年4月及1998年3月在該地區的兩次水準測量資料為參考，計有A、B兩條測線。

其中A測線點位分布較偏北邊，編號從1至10號，共有10個測站；B測線則較偏南邊靠近沿海地區，編號從1至6號，共有6個測站，水準測量站點位分布如右圖。



屏東平原沉陷量分析

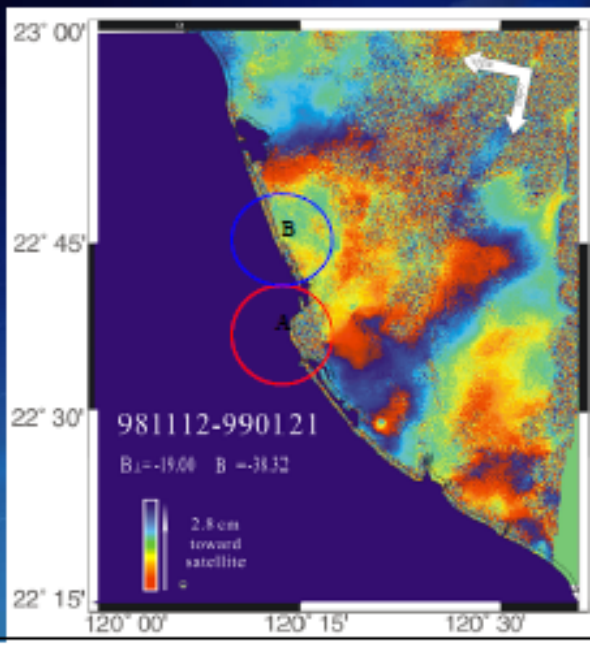
由GPS資料所內插計算得每年上升(Hu,2006)



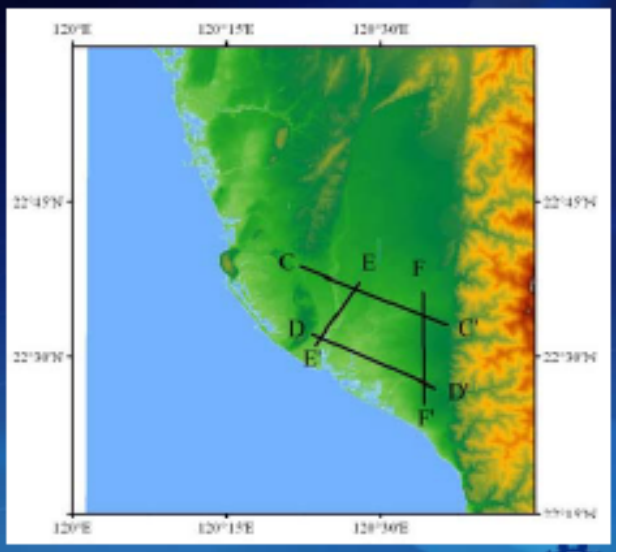
由 D-InSAR計算的差分干涉及下降速率曲線圖

干涉圖的色彩表示爲地表變形在雷達是線方向的變化量，每一環的變化量爲2.8cm。

A區塊部份爲地層下陷的區域；
B區塊部份爲上升的地區。



爲更詳細分析屏東地區變形結果，將研究區內變化較大的屏東平原分別沿西北-東南走向取C-C`、D-D`剖面及對應的E-E`、F-F`剖面進行剖面分析，以利了解研究區域內地層下陷範圍及下陷變形量，剖面位置示意圖如右圖



影像對乾季及溼季的平均下陷量

溼季	平均下陷量(cm)			
影像對	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'
950705-951123	-0.02	-0.40	-0.95	-0.39
970501-980312	0.02	-0.44	0.32	1.13
990506-991028	-0.18	-1.30	0.21	-0.13
990506-000106	0.01	-2.07	-0.27	0.26

影像對乾季及溼季的平均下陷量

乾季	平均下陷量(cm)			
影像對	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'
960131-960516	-0.03	-0.52	-0.15	0.14
981112-990121	-0.07	-0.57	-0.34	-0.49
981112-990506	-1.31	-2.56	-1.15	-0.12
990121-990506	-0.94	-2.14	-0.75	0.43

表中可以看出除F-F'剖面無明顯趨勢外，其餘三條剖面濕季的下陷量都明顯低於乾季的下陷量，顯示該地區因濕季雨量較豐富填補地下水，導致乾濕季的下陷量有明顯的差異。

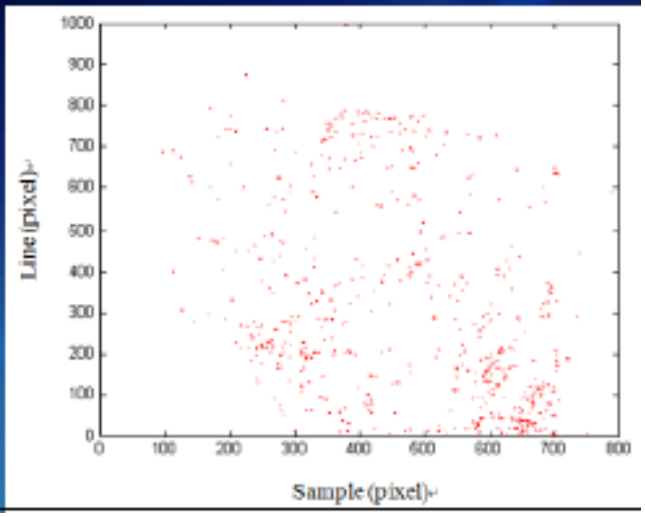
固定散射體技術 (PS-InSAR)

固定散色體(Persistent Scatters, PS)技術是雷達干涉方法中，較先進的處理技術，主要的目的在解決(克服)長時間的序列影像中，影像對因變形或環境效應影響(大氣及DEM)導致影像相位改變產生不相關現象，而造成干涉處理的困難。

固定散射體 (PS) 技術主要是利用像元內的最大的主要訊號源如橋樑及建物等，因該類像元有明顯固定的散射訊號，因此在時間序列的影像中，這些點位在該區域中，有足夠穩定的訊號來提供分析的資訊，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，就可以利用這些固定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。

1. 挑選PS候選點

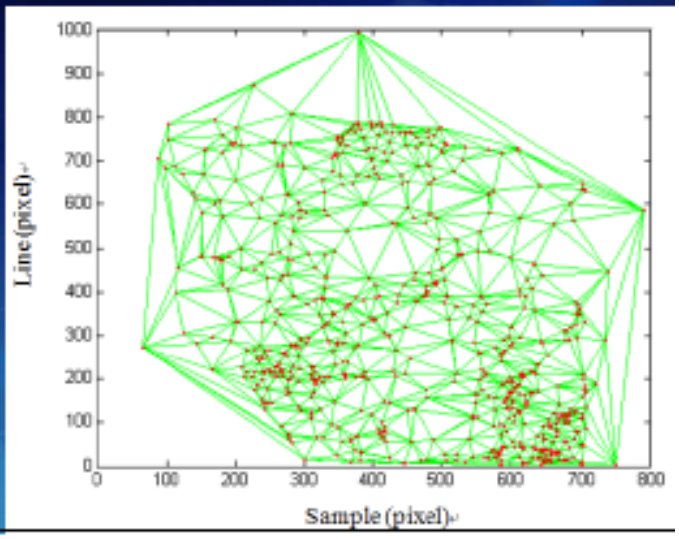
由於受到空間基線的影響，故PS候選點的挑選將從這幾幅連續的影像中找到其影像對於主影像之同調性數值皆高於0.28的點，當作PS的候選點，其點位分布的情況如下圖所示。整幅影像中，我們萃取出829個候選點，約每平方公里有0.1個PS候選點。



2. 建立三角網

由於永久散射體的分布是離散的，故必須將其點與點間建立關連性。

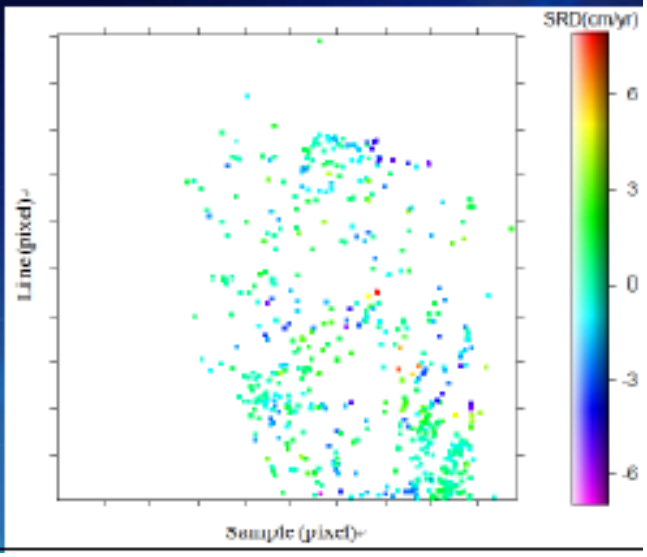
本試驗利用Delaunay三角網將各個PS候選點進行連線，其成果如圖所示。



3. 計算變形量

三角網形架構建立完後，計算每一個三角形點與點之間的差值，

並且利用同調函式模型來估算其中的變形量與地形殘差估算。最後得到來自斜距方向上的年平均變形量如圖。



PSInSAR 結果實驗與分析

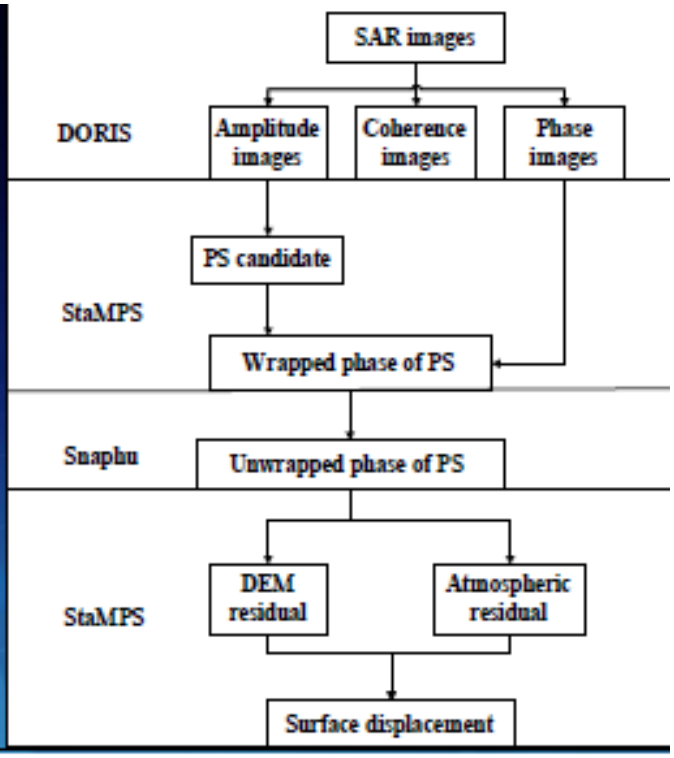
本研究使用Andy Hooper所開發的StaMPS v3.2版軟體進行PSInSAR的分析，影像處理過程同時會使用Doris v3.2.0版及ROI_PAC 3.0，並利用SNAPHU v1.4.2版軟體對差分干涉結果進行解相位的計算。

永久散射體干涉處理流程

大致可分爲以下八個步驟(如圖所示)：

1. 將主副影像經過干涉處理產生強度影像、同調性影像及相位影像。
2. 於強度影像中挑選出PS 候選點。
3. 加入數值高程模型及相位影像資訊精煉出PS點。
4. 將PS 點相位還原。
5. 估算出DEM誤差所造成的相位。
6. 估算出大氣效應所造成的相位。
7. 產生地表位移影像（LOS 方向）。
8. 產生地表變形速度場（LOS 方向）。

永久散射體干涉處理流程

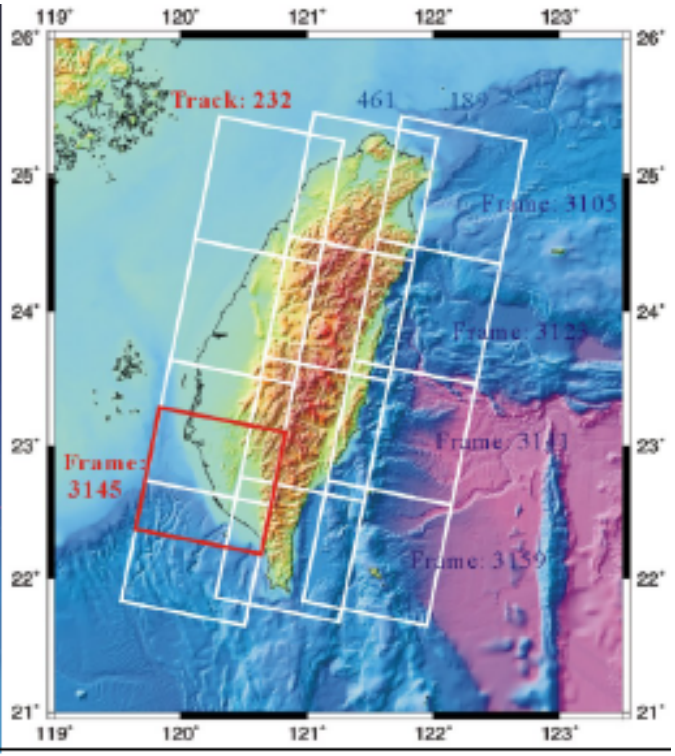


衛星的參數資料

使用的ERS影像參數	
波長	5.6cm(C-band, VV 極化)
側視系統	右側視系統(right-looking)
軌道重返週期	35天
解析度	25m
影像中心入射角	23度
影像大小	約100公里 x 100公里

研究區域

本研究選定的影像區域爲track：232、frame：3145，該區域位於台灣西南部，屬於屏東地區（如圖4-2）。本研究影像時間爲1995年4月至2000年12月，總共12幅影像。

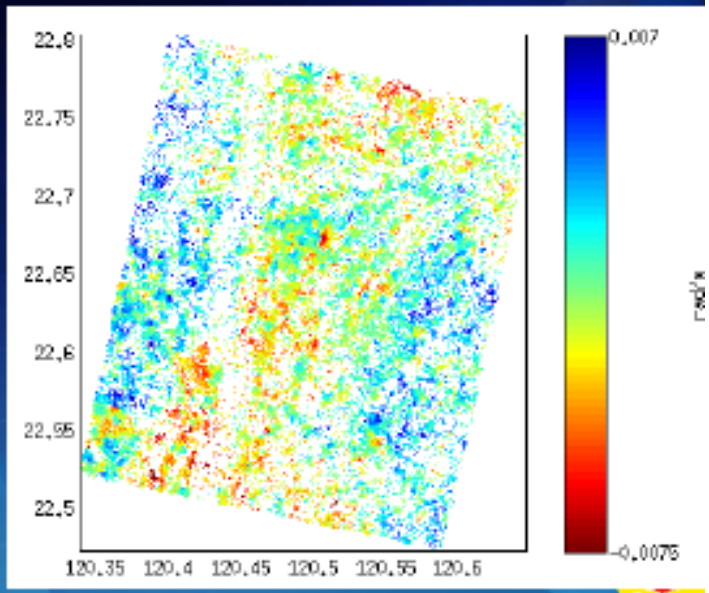


PSInSAR使用的影像資訊(主影像爲1998年3月12日)

編號	影像日期	衛星	軌道編號	垂直基線長(m)	與主影像間隔時間
NO.1	19950426	ERS-1	19760	42.3	-1036
NO.2	19950705	ERS-1	20762	-498.6	-967
NO.3	19950706	ERS-2	1089	-406.3	-966
NO.4	19951123	ERS-2	3093	-548.1	-829
NO.5	19960620	ERS-2	6099	37.8	-622
NO.6	19970501	ERS-2	10607	-59.5	-311
NO.7	19980312	ERS-2	15117	0	0
NO.8	19990121	ERS-2	19625	625.4	309
NO.9	19990401	ERS-2	20627	-98.6	379
NO.10	19990506	ERS-2	21128	721.8	414
NO.11	19991028	ERS-2	23634	720	586
NO.12	20001012	ERS-2	28644	624.4	930

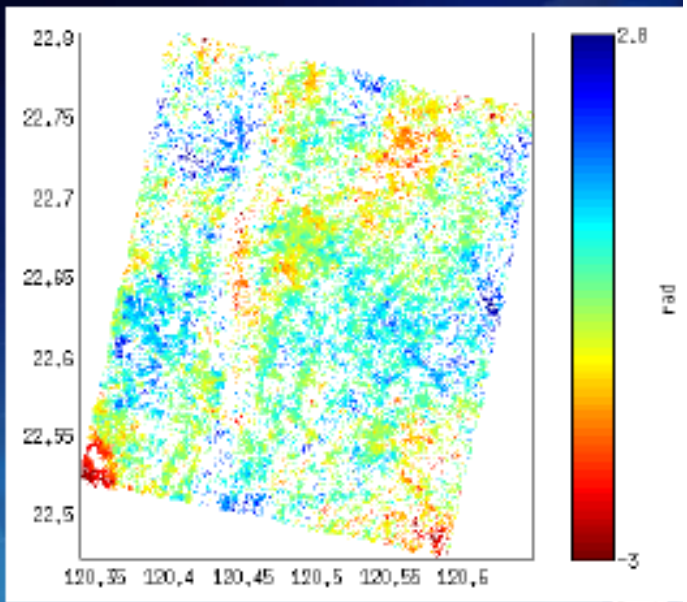
處理過程及成果(1)

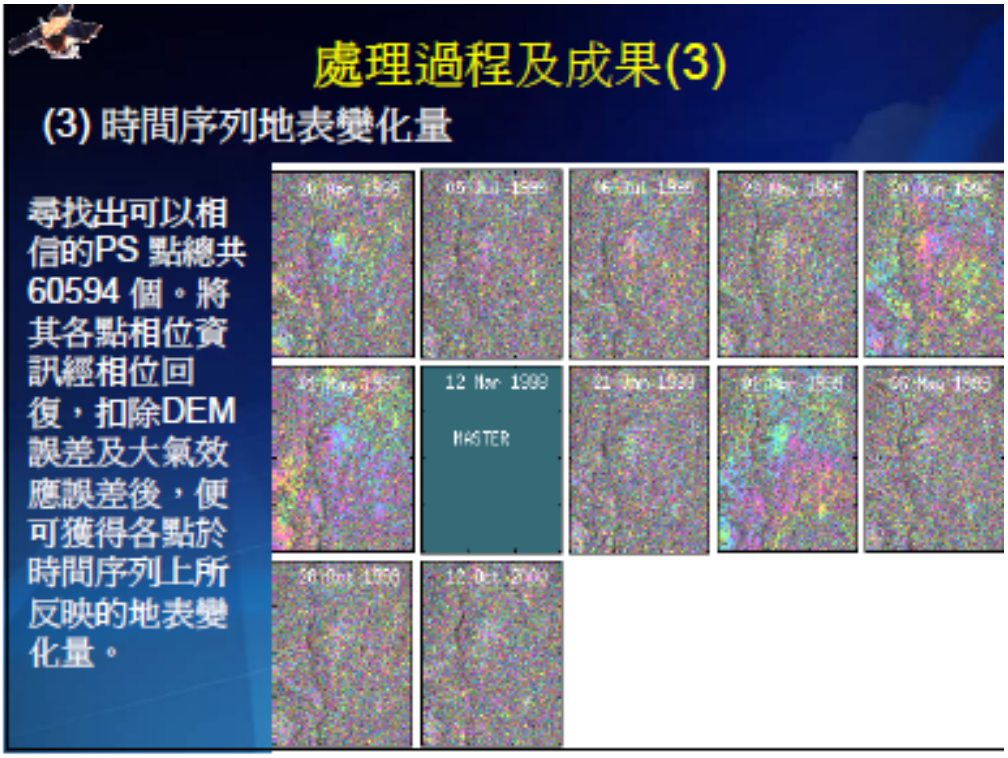
(1) ERS影像的DEM誤差

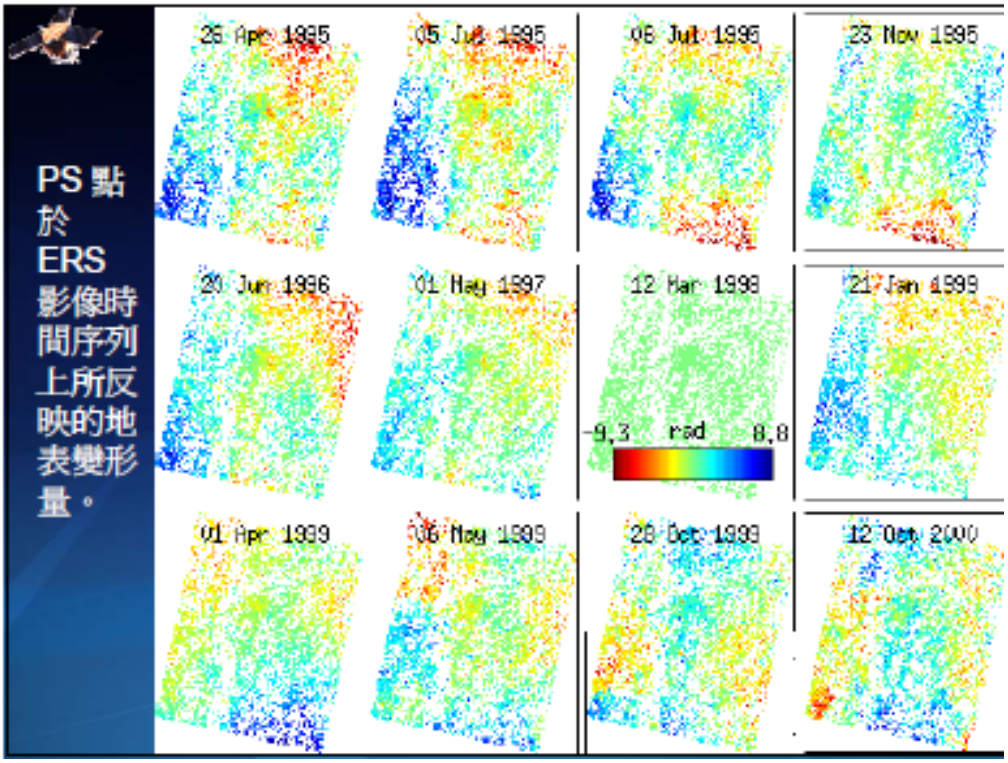


處理過程及成果(2)

(2) ERS影像的大氣效應誤差(mm)



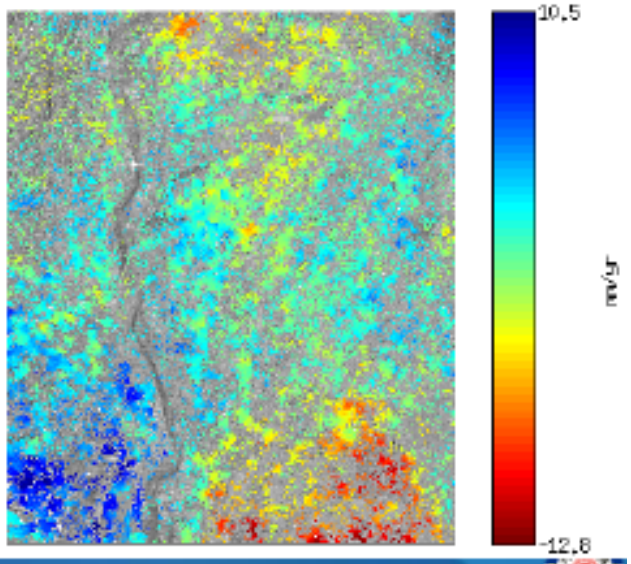

處理過程及成果(3)
(3) 時間序列地表變化量
尋找出可以相信的PS 點總共60594 個。將其各點相位資訊經相位回復，扣除DEM誤差及大氣效應誤差後，便可獲得各點於時間序列上所反映的地表變化量。
12 Mar 1998
MASTER


PS 點於ERS影像時間序列上所反映的地表變形量。
26 Apr 1995
05 Jul 1995
06 Jul 1996
23 Nov 1995
20 Jun 1996
01 May 1997
12 Mar 1998
21 Jan 1999
-9.3 rad 8.8
01 Apr 1999
06 May 1999
28 Oct 1999
12 Oct 2000

處理過程及成果(4)

(4) 平均速度場

將研究時間內所產生的地表變化量除以時間基線，便可獲得該區域內的平均速度場（圖4-7），紅色代表LOS 方向縮短，藍色代表LOS 方向伸長。由ERS 平均速度場可觀察出在研究時間區間內，影像左下方及中上方呈現平均抬升趨勢，但影像右下方出現相對下降趨勢。



PS與GPS觀測資料比對

本研究選用自中央地質調查所所提供的屏東地區GPS年平均速度觀測資料作爲依據，時間範圍選擇與試驗時間相近的1995年至1999年連續站的觀測資料進行比對，因此將屏東地區GPS之南北向量、東西向量及垂直方向資料轉換而得的視衛星方向速率(mm/y)，用來和試驗成果之PS變形平均速率(mm/yr)進行資料比對。

GPS觀測值轉換爲InSAR視衛星方向的變形量之轉換公式爲：

$$(Ux \cos\varphi + Uy \sin\varphi)\sin\theta + Uz \cos\theta$$

其中, Ux爲GPS東西向速度，Uy爲南北向速度，Uz爲垂直方向速度，φ 爲軌道方位，θ 爲視衛星角度。ERS衛星之 φ 爲北偏東12度，θ 爲23度。

PS與GPS觀測資料比對

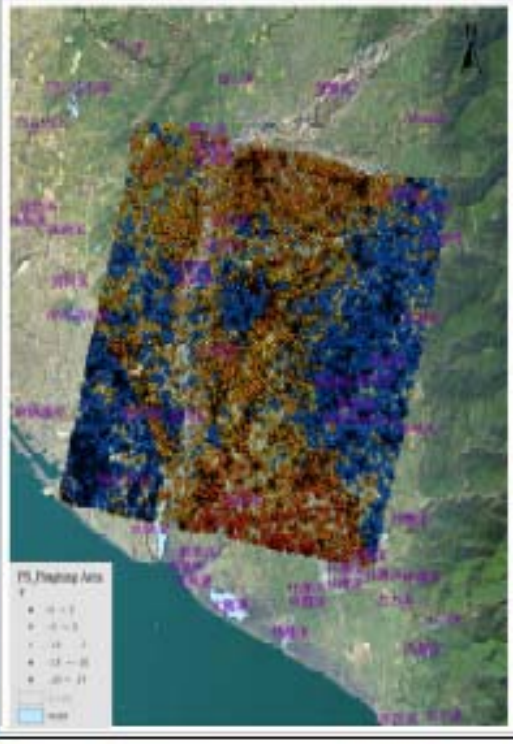
將PS速率變化(1995~2000)結果(LOS方向)與GPS測站觀測速率投影在視衛星方向的 資料(1995~1999)分別套上本研究室所提供的SPOT台灣地區8米衛星影像（圖4-8、圖4-9），來進行比對討論。其中以暖色系(紅橘)標示小於零的速率，表示地表有沉陷變形，冷色(藍)標示數值大於零的速率，代表地表上升變形。

由平均變形速率場可局部看出各區域的相對地表變形趨勢，根據圖4-8，本研究區域在東側的麓山帶附近有些微上升變形速率(最大上升速率爲15.3mm /yr)，然而沿著荖濃系、武洛溪與高屏溪以及較東側的東港溪上游，這些區域的永久散射體干 涉結果大都呈現0~ -15 mm/yr的沉降變形速率，與GPS在高屏溪與東港溪的結果(圖4-9)有相似變形速率的趨勢。

PS與GPS觀測資料比對

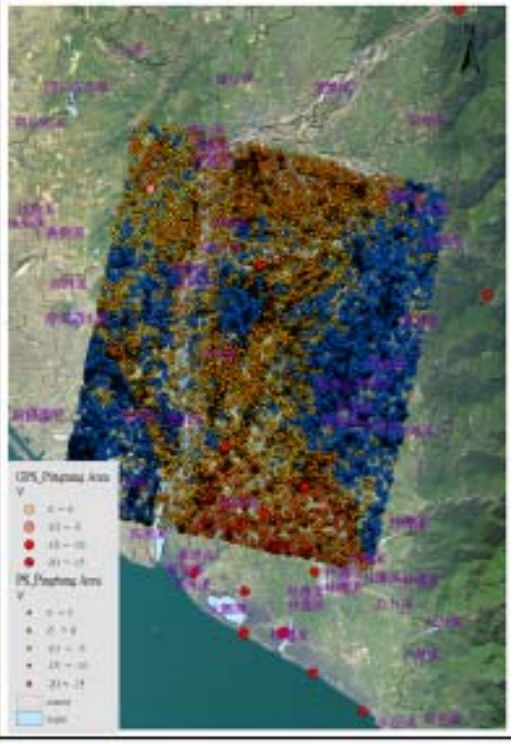
再進一步分別將PS結果與GPS投影在視衛星方向結果，均套疊在SPOT台灣地區8米衛星影像上，所得到的變形速率結果如圖4-10。在本研究範圍內的變形相當吻合，唯一看似較不一致的是位在牛稠溪上游的區域，在此區域僅有一GPS站(陸192，新吉庄)結果，該站的變形爲沉降(-1.8mm/yr)，而PS結果顯示有部分爲上升變形(最大上升速率爲4.2mm/yr)，但北側臨近武洛溪也有沉降變形(平均速率約介於-0.3~-6.3mm/yr)。仔細比對鄰近新吉庄GPS(如果有該GPS站的名稱會比較有信度)站的PS點其實多爲沉降變形，平均速率約介於-1.3～-8.2mm/yr，因而PS與GPS兩者結果仍舊是吻合的，在圖4-10上可能是由於圖上GPS站的點位標示範圍較大而易導致混淆。

PS變形速率(mm/yr)套疊在SPOT台灣地區8米衛星影像上的結果示意圖



GPS變形速率(mm/yr)套疊在SPOT台灣地區8米衛星影像上的結果示意圖

分別將PS結果與GPS投影在視衛星方向結果，均套疊在SPOT台灣地區8米衛星影像上，所得到的變形速率結果。



分析與討論

本研究利用ArcGIS9.3版軟體將PS速率變化(1995~2000)結果與GPS測站觀測速率投影在視衛星方向的資料(1995~1999)分別套上本研究室所提供的SPOT台灣地區8米衛星影像（如前圖所示），來進行比對作業。根據圖4-8顯示，本研究區域在東側的麓山帶附近有些微上升變形速率(最大上升速率爲15.3mm /yr)，然而沿著荖濃系、武洛溪與高屏溪以及較東側的東港溪上游，這些區域的永久散射體干涉結果大都呈現0～-15 mm/yr的沉降變形速率，與GPS在高屏溪與東港溪的結果有相似變形速率的趨勢。

分析與討論

再進一部分別將PS結果與GPS投影在視衛星方向的結果，均套疊在SPOT台灣地區8米衛星影像上（如圖4-10所示），所得到的變形速率與本研究範圍內的變形相當吻合，唯一看似較不一致的是位在牛稠溪上游的區域，在此區域僅有一GPS站(陸192，新吉庄)結果，該站的變形爲沉降(-1.8mm/yr)，比對鄰近新吉庄GPS站的PS點其實多爲沉降變形，因此PS與GPS兩者結果仍舊是吻合的。

五、結 論

本研究主要目標爲利用差分干涉雷達(D-InSAR)技術來進行海岸帶高程變形量(沉陷)之調查與分析。研究過程中，分別對關鍵技術建立相關處理之理論基礎，基於既有現地調查資料之蒐集的完整與方便性，研究區域選擇臺灣西南部(屏東海岸)海岸帶，使用ERS1/2序列之雷達影像，並採用新的「固定散射體雷達干涉技術(PS-InSAR)」方法，建立處理之數學模式，進行相關的實驗與分析。已獲得具體的初步成果。由雷達干涉技術初步結果與GPS實際觀測結果比對相當一致，顯示D-INSAR技術所推求的垂直高度變化值精度良好，也證實該技術對海岸帶地盤下陷調查應用之潛力。後續將持續完成更完整的資料處理與分析工作。