

國立交通大學

土木工程學系
碩士論文

SRTM/TopSAR 高程數據比對與多尺度分析



研究生：賴子銘

指導教授：史天元

中華民國九十三年六月

SRTM/TopSAR 高程數據比對與多尺度分析

The Multiscale Analysis and the Comparison of DEM Acquired
from SRTM and TopSAR systems

研究生：賴子銘

Student: Ts-Ming Lai

指導教授：史天元

Advisor: Dr. Tian-Yuan Shih

國立交通大學

土木工程學系



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment to the Requirements
for the Degree of Master
in
Civil Engineering
June 2004
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校 土木工程 學系碩士班 賴子銘 君

所提論文：SRTM/TopSAR 高程數據比對與多尺度分析

合於碩士資格標準、業經本委員會評審認可。

口試委員：_____

曾義星
賴進貴
蔡榮得

指導教授：史天元 _____

系主任：方永壽 教授

中華民國 九十三年 六月 十五日

SRTM/TopSAR 高程數據比對與多尺度分析

學生：賴子銘

指導老師：史天元

國立交通大學土木工程學系

中文摘要

干涉合成孔徑雷達(InSAR)可進行地表三維地形之測繪，InSAR 具有作業受限小、製圖速度快、作業單價低之優點。然而 InSAR 測量受地物性質、地形效應與植被影響很大。本文針對兩組 InSAR DEM 進行高程比對與多尺度分析，分別為太空梭雷達製圖任務(SRTM)與空載地形合成孔徑雷達(TopSAR)高程數據，以航空攝影測量所得 DEM 為參考數據進行比對，對 InSAR 數據的差值平均、精度與粗差進行分析。比對區域面積達 2497 平方公里，比對點數共 3,017,889 點。

比對結果顯示在多山地區 SRTM 之精度為 9.451 公尺，在平坦地區精度可達 7.579 公尺，均優於 NASA 公佈的精度規範。而空載 TopSAR 資料則包含大量粗差，在山區測量的品質不理想。若不經過粗差偵測和編修，無法達到 NASA 公佈的 1~5 公尺精度，在粗差移除後平坦地區的精度為 5.603 公尺，山區則為 12.383 公尺。

多尺度分析則使用以小波轉換與傅立葉轉換分析三組資料的尺度性質，探討不同尺度下三組資料的關連與差異，並分析不同尺度對於精度的影響，最後則將小波分析於粗差偵測與等高線縮編的應用上，顯示小波理論在高程資料縮編與不同尺度 DEM 分析的應用潛力。

**The Multiscale Analysis and Comparison of DEM Acquired
from SRTM and TopSAR systems**

Student : Ts-Ming Lai

Advisor : Tian-Yuan Shih

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

InSAR technology takes advantages of cloud penetrating capability of microwaves, being claimed as a system for all weather and day and night. However, the accuracy of InSAR data was affected by terrain slope, canopy and land cover. The quality of InSAR DEM needs to be further inspected.

This thesis focused on the DEM comparison and multiscale analysis for two InSAR DEM datasets. One is the 3 arc data from Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), and the other is from Topographic Synthetic Aperture Radar (TopSAR) mission. A DEM dataset obtained by aerial photogrammetry is used to validate the system bias, random error and blunders of the two InSAR DEMs. The area size of the study area is 2,497 km² with a total of 3,017,889 pixels.

Comparing with the photogrammetric DEM, the RMSE of SRTM data is 9.451m in the mountainous area and 7.579m in the flat area. It is equal or better than the official specification. But the TopSAR data that contained massive blunders was not as good as claimed in the specification of an accuracy 1~5m, especially in the mountainous area. After removing the blunders, the RMSE of DEM difference is 5.603m in the flat area and 12.383m in the mountainous area.

The frequency properties of three datasets were also studied in multiscale

analysis with wavelets and Fourier transform, such as the relation and difference between three dataset in different scale, and the impact in accuracy in different scales. The application in contour genlization and blunder detection was also proved to be useful by applying wavelet and multiscale analysis to th DEMs.



誌謝

隨著論文的修改逐漸接近尾聲，飄蕩在四周的空氣也漸漸轉變成不一樣的味道，就好像傘兵菜鳥剛從飛機上被推下去，第一次用全身開始去感受風的力量，消失的重力，迎面而來的是全面遼闊的大地，是一種既是茫然，無助，又是興奮的味道。

在機艙上的此刻我最要感謝的是指導教授史天元教授，謝謝老師兩年來給我的照顧、支持、鼓勵與教誨，使我這兩年來的收穫與感激，一紙難盡。也要感謝組上陳春盛教授、黃金維教授與李振燾教授的教導，更要感謝口試委員成功大學曾義星教授，台灣大學賴進貴教授與中興大學蔡榮得教授對於本論文的指導與肯定。

這邊也要感謝博士班劉進金學長幫忙修改英文摘要並提供許多的寶貴建議，當然也還要感謝博士班學長榮寬和已畢業的學長偉嘉、國鑫在學業與生活上的幫忙。當然，一同作戰的介嵐哥、BOSS、棒呆的郭朗哲、阿福、福利、小支、大雄、宣昶、米粉跟宜珊，和學弟妹佩珊、世青、印淞、佑廷、慧非、展鵬、阿達、兼室友的貓哥，除了幫忙之外，大家的笑聲讓枯燥的研究生生活變的那麼有趣而且令人想念。

還有死黨灰鷹、亞宏跟妹，過去在成大奇幻社的好友 skd、熊、dor、newman、Guyver、吟游詩人亞德西、大魔王、海賊克拉克、foreman...直到這個列表無法寫完。還有常鼓勵我的小慈，有太多太多的人需要去感謝了，謝謝大家。

最後，我想把一切喜悅和成就感都獻給我的家人：老爸、老媽、老姐與小比，貝吉達與咪咪。你們總是會在全世界都結凍時，還能讓我保有最後一絲溫暖。

最後沉重的艙門被拉開，伴隨著呼哮的風聲，繚藍的海與翠綠大地展開於眼前。

目錄

| | |
|------------------------------|------|
| 中文摘要..... | I |
| Abstract..... | II |
| 誌謝..... | IV |
| 目錄..... | V |
| 圖目錄..... | VIII |
| 表目錄..... | XI |
| 第一章 緒論..... | 1 |
| §1-1 研究動機與目的..... | 1 |
| §1-2 文獻回顧..... | 2 |
| §1-3 研究方法..... | 4 |
| §1-4 論文架構..... | 5 |
| 第二章 InSAR 測量原理與實驗資料介紹..... | 6 |
| §2-1 雷達測量原理..... | 6 |
| §2-1-1 雷達影像特性..... | 8 |
| §2-1-2 干涉合成孔徑雷達..... | 10 |
| §2-2 SRTM..... | 14 |
| §2-2-1 SRTM 資料格式與特性..... | 16 |
| §2-2-2 臺灣地區 SRTM 資料組成..... | 19 |
| §2-3 TopSAR..... | 21 |
| §2-3-1 TopSAR 資料格式..... | 24 |
| §2-3-2 臺灣地區 TopSAR 資料組成..... | 26 |
| §2-4 參考航空攝影測量數據..... | 28 |
| 第三章 高程數據比對..... | 30 |
| §3-1 實驗數據描述..... | 30 |

| | |
|------------------------------|----|
| §3-2 比對流程 | 32 |
| §3-3 視覺比較 | 34 |
| §3-4 精度分析 | 37 |
| §3-4-1 TopSAR 各幅數據精度分析 | 45 |
| §3-4-2 不同坡度精度分析 | 47 |
| §3-5 粗差分析 | 49 |
| §3-5-1 各幅 TopSAR 粗差分析 | 51 |
| §3-5-2 不同坡向與粗差統計 | 52 |
| §3-6 小結 | 54 |
| 第四章 多尺度分析原理 | 55 |
| §4-1 尺度、頻率與解析度 | 55 |
| §4-2 多尺度空間 | 56 |
| §4-3 小波分析 | 58 |
| §4-3-1 連續小波轉換 | 59 |
| §4-3-2 快速小波轉換 | 60 |
| §4-4 頻譜分析 | 62 |
| 第五章 多尺度分析與應用 | 64 |
| §5-1 實驗區描述 | 64 |
| §5-2 小波分析 | 66 |
| §5-2-1 不同尺度小波係數分量分析 | 68 |
| §5-2-2 不同尺度對精度之影響 | 71 |
| §5-2-3 不同尺度相關性分析 | 73 |
| §5-3 頻譜分析 | 75 |
| §5-4 多尺度分析應用 | 79 |
| §5-4-1 粗差偵測 | 79 |
| §5-3-2 不同尺度等高線簡化比較 | 80 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 第六章 結論與建議..... | 82 |
| 參考文獻..... | 84 |
| 附錄 A：SRTM 數據 HGT 轉 ASCII 流程..... | 89 |
| 附錄 B：高程比對誤差直方圖..... | 95 |
| 附錄 C：小波分析實驗數據..... | 98 |
| 作者簡歷..... | 104 |



圖目錄

| | |
|---|----|
| 圖 1-3-1:研究流程..... | 4 |
| 圖 2-1-1:雷達成像幾何[Bamler, 1999] | 6 |
| 圖 2-1-2:雷達影像幾何變形[Ouarzeddine, 2002]..... | 9 |
| 圖 2-1-3:一次通過干涉成像幾何[Abdelfattah et al, 2002] | 12 |
| 圖 2-1-4:重複通過干涉成像幾何[Abdelfattah et al, 2002] | 13 |
| 圖 2-2-1: SRTM 裝置圖[Rabus et al, 2003] | 15 |
| 圖 2-2-2: SRTM 掃瞄次帶寬組成示意圖[Rabus et al, 2003] | 16 |
| 圖 2-2-3: SRTM 資料庫涵蓋圖 [NASA-JPL, 2003] | 17 |
| 圖 2-2-4: 歐亞資料庫涵蓋圖[NASA-JPL, 2003] | 17 |
| 圖 2-2-5: 資料獲取次數圖[NASA-JPL, 2003] | 18 |
| 圖 2-2-6: 不同誤差來源影響量與尺度[Rabus et al, 2003] | 18 |
| 圖 2-2-7: 臺灣 SRTM 資料黑白暈渲圖..... | 20 |
| 圖 2-2-8: 臺灣 SRTM 資料彩色暈渲圖..... | 20 |
| 圖 2-3-1: DC8 飛機外觀[NASA-JPL, 2003] | 21 |
| 圖 2-3-2: TopSAR 高程資料 BIL 格式轉 XYZ 示意圖..... | 25 |
| 圖 2-3-3: PacRIM-II 涵蓋區域..... | 26 |
| 圖 2-4-1: 參考航空攝影測量數據涵蓋範圍..... | 28 |
| 圖 2-4-2: 參考航測資料於圖幅 9520 兩百公尺等高線圖..... | 29 |
| 圖 2-4-3: 參考航測資料於圖幅 9521 一百公尺等高線圖..... | 29 |
| 圖 3-1-1: 9520 實驗區範圍(底圖取自 Papago 電子地圖) | 30 |
| 圖 3-1-2: 9521 實驗區範圍(底圖取自 Papago 電子地圖) | 31 |
| 圖 3-2-2: 高程比對流程..... | 33 |
| 圖 3-2-3: 搜索方式..... | 34 |
| 圖 3-3-1: 9520 實驗區黑白暈渲圖部分..... | 34 |

| | |
|---|----|
| 圖 3-3-2:9521 實驗區黑白暈渲圖部分..... | 35 |
| 圖 3-3-3:9520 實驗區剖面線位置圖(底圖為 PapaGo 電子地圖) | 35 |
| 圖 3-3-4:9520 實驗區剖面線圖..... | 36 |
| 圖 3-4-1:9520 實驗區 TopSAR 差值分佈圖..... | 39 |
| 圖 3-4-2:9521 實驗區 TopSAR 差值分佈圖..... | 40 |
| 圖 3-4-3:9520 實驗區 SRTM 差值分佈圖..... | 41 |
| 圖 3-4-4:9521 實驗區 SRTM 差值分佈圖..... | 42 |
| 圖 3-4-5:9520 實驗區 TS-SRTM 差值分佈圖..... | 43 |
| 圖 3-4-6:9521 實驗區 TS-SRTM 差值分佈圖..... | 44 |
| 圖 3-4-7:SRTM 誤差與坡度散佈圖..... | 47 |
| 圖 3-4-8:TopSAR 誤差與坡度散佈圖..... | 48 |
| 圖 3-5-1:9520 實驗區粗差分佈圖部分..... | 50 |
| 圖 3-5-2:9521 實驗區粗差分佈圖部分..... | 50 |
| 圖 3-5-4:粗差發生所在坡向的統計直方圖..... | 50 |
| 圖 3-5-4:TopSAR 資料粗差發生與坡向關係..... | 53 |
| 圖 4-2-1:多尺度空間示意圖..... | 57 |
| 圖 4-3-1:時頻域表示[Polikar, 2001], 由 5hz, 10hz, 20hz, 30hz 組成..... | 58 |
| 圖 4-3-2:墨西哥帽小波函數的擴張與平移[Zatelli, 2002] | 59 |
| 圖 4-3-3:一維子頻帶分解..... | 60 |
| 圖 4-3-4 二維離散小波轉換分解濾波器..... | 62 |
| 圖 4-3-5:離散小波分解架構..... | 60 |
| 圖 4-4-1:原始影像 $f(x,y)$ 與其對應的傅立葉頻譜 $ F(u,v) $ | 63 |
| 圖 4-4-2:頻譜分析示意圖..... | 63 |
| 圖 5-1-1:TopSAR 數據航線示意圖..... | 64 |
| 圖 5-1-2:多尺度實驗區黑白暈渲圖..... | 65 |
| 圖 5-2-1:Db3 小波分解濾波器組..... | 66 |

| | |
|---|----|
| 圖 5-2-2: Db3 小波尺度函數與小波函數..... | 66 |
| 圖 5-2-3: $\varphi(x, y)$ 係數平方和對數折線圖..... | 69 |
| 圖 5-2-4: $\psi^H(x, y)$ 係數平方和對數折線圖..... | 69 |
| 圖 5-2-5: $\psi^V(x, y)$ 係數平方和對數折線圖..... | 70 |
| 圖 5-2-6: $\psi^D(x, y)$ 係數平方和對數折線圖..... | 70 |
| 圖 5-2-7: Ts9520 尺度 j 與尺度 j-3 差值三維分佈圖..... | 71 |
| 圖 5-2-8: 不同尺度下精度變化, 單位公尺..... | 72 |
| 圖 5-3-9: $\varphi(x, y)$ 係數相關性折線圖..... | 73 |
| 圖 5-3-10: $\psi^H(x, y)$ 係數相關性折線圖..... | 74 |
| 圖 5-3-11: $\psi^V(x, y)$ 係數相關性折線圖..... | 74 |
| 圖 5-3-12: $\psi^D(x, y)$ 係數相關性折線圖..... | 74 |
| 圖 5-3-1: 傅立葉頻譜圖..... | 76 |
| 圖 5-3-2: 9520 實驗區角度頻譜分析..... | 77 |
| 圖 5-3-3: 9520 實驗區半徑頻譜分析..... | 77 |
| 圖 5-3-4: 9521 實驗區角度頻譜分析..... | 78 |
| 圖 5-3-5: 9521 實驗區半徑頻譜分析..... | 78 |
| 圖 5-4-1: Ts9521 剖面線以 FWT 進行分解..... | 79 |
| 圖 5-4-2: 不同尺度數據產製等高線比較..... | 81 |

表目錄

| | |
|---|----|
| 表 2-2-1:臺灣地區 DEM 組成圖幅..... | 19 |
| 表 2-3-1:TopSAR 系統參數..... | 22 |
| 表 2-3-2:AIRSAR 操作模式..... | 23 |
| 表 2-3-3:TopSAR 資料格式..... | 24 |
| 表 2-3-4:臺灣地區 TopSAR 高程資料簡表..... | 26 |
| 表 2-3-5:PacRIM-II 高程資料轉換成果檢核..... | 27 |
| 表 3-1-1:實驗區範圍與參考 DEM 高程範圍(m)..... | 30 |
| 表 3-1-2:實驗區高程點數統計..... | 31 |
| 表 3-1-3:坡度面積比率表..... | 31 |
| 表 3-2-2:SRTM、TopSAR 與參考攝影測量數據簡表..... | 32 |
| 表 3-2-2:高程比對關係..... | 34 |
| 表 3-4-1:9520 實驗區高程比對差值統計..... | 37 |
| 表 3-4-2:9521 實驗區高程比對差值統計..... | 38 |
| 表 3-4-3:TopSAR 各數據與 RefDEM 分析統計表..... | 45 |
| 表 3-4-4:TopSAR 各數據與 SRTM 比對統計表..... | 46 |
| 表 3-4-5:SRTM 於不同坡度精度分析..... | 47 |
| 表 3-4-6:TopSAR 數據於不同坡度精度分析..... | 48 |
| 表 3-5-1:9520 實驗區移除粗差後差值統計表..... | 49 |
| 表 3-5-2:9521 實驗區移除粗差後差值統計表..... | 49 |
| 表 3-5-3:TopSAR 各幅數據粗差移除後差值統計表..... | 51 |
| 表 3-5-4:TopSAR 相對於 SRTM 比對粗差移除後差值統計表..... | 51 |
| 表 5-2-1:尺度、頻率與解析度關係..... | 67 |

第一章 緒論

§1-1 研究動機與目的

近年來主動式遙測技術快速發展，尤其在產製大範圍高解析度數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 領域，如干涉合成孔徑雷達 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 與光達 (Light Range and Detection, LIDAR)，以主動式感測的特性逐漸受到重視。航空攝影測量至今仍是產製 DEM 最普遍並成熟的方法，使用者可以依照需求由影像產生合用的高程資料。但航空攝影測量受限於天候與日照，使得取得良好影像並不容易，傳統解析攝影測量產製 DEM 較為昂貴與費時，亦需仰賴大量的人工處理，數值攝影測量雖可以提高自動化程度，但自動匹配過程仍不可避免的發生錯誤，人為的介入是必須的。而近年來雷達測量利用微波的特性進行干涉處理獲取高程資訊，以大範圍作業、無視雲霧與輕濛、自動化製圖與費用較低等優勢逐漸受到重視。

雷達測量利用微波的特性可以穿透雲霧，較少受到天候因素影響，尤其在位處亞熱帶地區的臺灣在實施航空攝影測量過程中常因天候不佳、雲霧遮蔽或日照不足需要重新進行航拍，在測量過程中多所不便，而雷達測量正可以克服這項缺點而應用於多雲霧的熱帶地區製圖。但雷達測量受地物性質、地形遮蔽與植被影響很大，測量成果需經進一步的驗證。

在使用這些不同資料的同時，也需注意到隨著測量方式的不同，所產製的高程資料各自擁有不同的尺度性質。不同尺度的高程資料在進行地形分析有迥然不同的結果（如徑流分析）。選擇適當尺度成為空間數據在應用與分析上的重要問題。

空間資料的尺度與測量時的取樣頻率有關，亦即每一組高程資料皆有其尺度性質，原始量測點數據多藉由內插方式內插成某個尺度的網格以方便使用。

InSAR 測量利用兩幅雷達影像進行干涉處理以生產 DEM，而解析攝影測量常以來回剖面線或等高線取樣方式進行 DEM 取樣。由於使用波段、成像幾何、取樣分佈的不同，可以預期 InSAR 與航空攝影測量數據的尺度性質將會有所不同。

本文搜集臺灣地區公開的 InSAR 資料，分別為涵蓋全球的太空梭雷達製圖任務 (Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM) 數據與空載地形合成孔徑雷達 (Topographic Synthetic Aperture Radar, TopSAR) 數據，這兩組資料皆由 NASA-JPL 公佈於網路上提供各界使用者自由使用，SRTM 利用太空梭為載具進行雷達測量，航高為 223 公里，目前公開全球三弧秒數據與美國本土一弧秒數據 [JPL, 2003]。TopSAR 則是以飛機為載具，航高 8500 公尺，產製的 DEM 解析力為 5 公尺。本文希望藉由高程比對與多尺度分析的研究希望提供使用這些雷達數據的依據與參考。

§1-2 文獻回顧



針對這些不同觀測方式產製 DEM 的性質，已經有許多學者進行研究，如 Norheim[2002]在美國 Snoqualmie 河谷所做的實驗中，以 GPS 檢核點比對 InSAR 與 LIDAR 資料，發現 InSAR DEM 之地形描述面普遍高於 LIDAR，而 InSAR 資料差值平均為 -0.81m，標準差為 3.29m，LIDAR 資料差值平均則為 -0.27m，標準差 0.83m，顯示 LIDAR 資料在系統誤差與隨機誤差表現都比 InSAR 要好。交互比對 InSAR 與 LIDAR 資料發現坡度越陡峭，則兩組資料差異越大，在凹面坡 InSAR 普遍高於 LIDAR，在凸面坡則相反，也就是說 InSAR 資料的處理過程有將地貌平滑化的傾向。如填補凹面坡與切掉凸面坡，此亦說明了 InSAR 資料的空間解析度較低。在森林與灌木叢地區這兩組資料有較大差異，在空曠地、開發區、草地差異則較小，InSAR DEM 在高密集開發區有很明顯的向下的系統誤差存在，可能為雷達波對建物與其他地物的反射性質不同造成。

Sun[2003]在 SRTM 資料與太空梭雷射測高 (Shuttle Laser Altimeter, SLA) 比對研究中指出，兩組資料 SRTM 高程普遍高於 SLA 資料，SRTM-SLA 差值的平均

值為 9.80m，標準差為 8.57m，植被高度小於 10m 時兩者差值趨於隨機，而大於 10m 的地區則有一趨勢存在。在植被覆蓋的地區中，兩者差值平均值為 16.17m，標準差為 5.56m，在裸露地的平均值與標準差為 3.11m 與 5.45m，可以看出在裸露地的數據離散情況較為接近，主要差異在差值平均的不同，而 SRTM 資料在植被覆蓋區所記錄的高程並非地表高程，其差值平均可能由雪覆蓋厚度不同影響。

林紀綱[2003]將臺灣地區 TopSAR 資料重新取樣後與台澎地區 40 公尺網格數值地形資料比對分析結果發現，平地地區的隨機誤差 RMS 約為 1~5 公尺，高山地區的 RMS 則為 10~15 公尺，但比對發現在山區之系統誤差平均最高可達 30 公尺，顯示 PacRIM-2 資料測定臺灣山區 DEM 成果品質未盡理想。

在多尺度分析方面應用於地形資料的研究，國內研究者如石宏揚[2003]應用小波理論對 DEM 誤差進行偵測並修復，實驗結果顯示對於 DEM 中點狀誤差可以有效偵測，條狀誤差則有明顯的抑制效果，但基準段落誤差則無法有效的去除。而賴伯倫[1998]使用小波理論於地形之多重解析度分析，並由分解後 DEM 的小波係數萃取地形特徵點組成 TIN，並與 VIP 方法進行比較，並探討不同小波基底對各種地形的適用性。黃國良[1999]則是利用不同尺度的小波來表達含有斷線的城市表面剖面線，以小波尺度函數對於面或線的描述，並與傅立葉方法進行比較。國外研究如 Fan[2001]以小波理論的等高線進行自動化縮編，以多尺度框架為架構產生不同尺度的 DEM，並由這些不同尺度的 DEM 產生等高線作為自動化縮編的方式。Zatelli[2002]在 GRASS 下開發以小波為基礎的多尺度分析模組，並以移除 LIDAR 資料的懸高點，進行粗差濾除處理。Little[1994]應用小波於海槽地形分析，以多尺度分析進行不同寬度的中洋脊、斷層等特徵線萃取。Gallant [1997]則使用傅立葉轉換與小波轉換分析一維剖面線資料，探討尺度相關性。

§1-3 研究方法

本研究研究流程如圖 1-3-1 所示，分為高程比對與多尺度分析兩大部分。

高程比對針對兩組 InSAR DEM 進行 DEM 比對，以航空攝影測量數據作為參考數據進行平均誤差、隨機誤差、粗差進行精度分析，並探討在不同坡度與坡向對精度的影響。

多尺度分析則使用以小波轉換與傅立葉轉換分析三組資料的尺度性質，探討不同尺度下三組資料的關連與差異，並分析不同尺度對於精度的影響，最後則討論小波分析於粗差偵測與等高線縮編的應用。

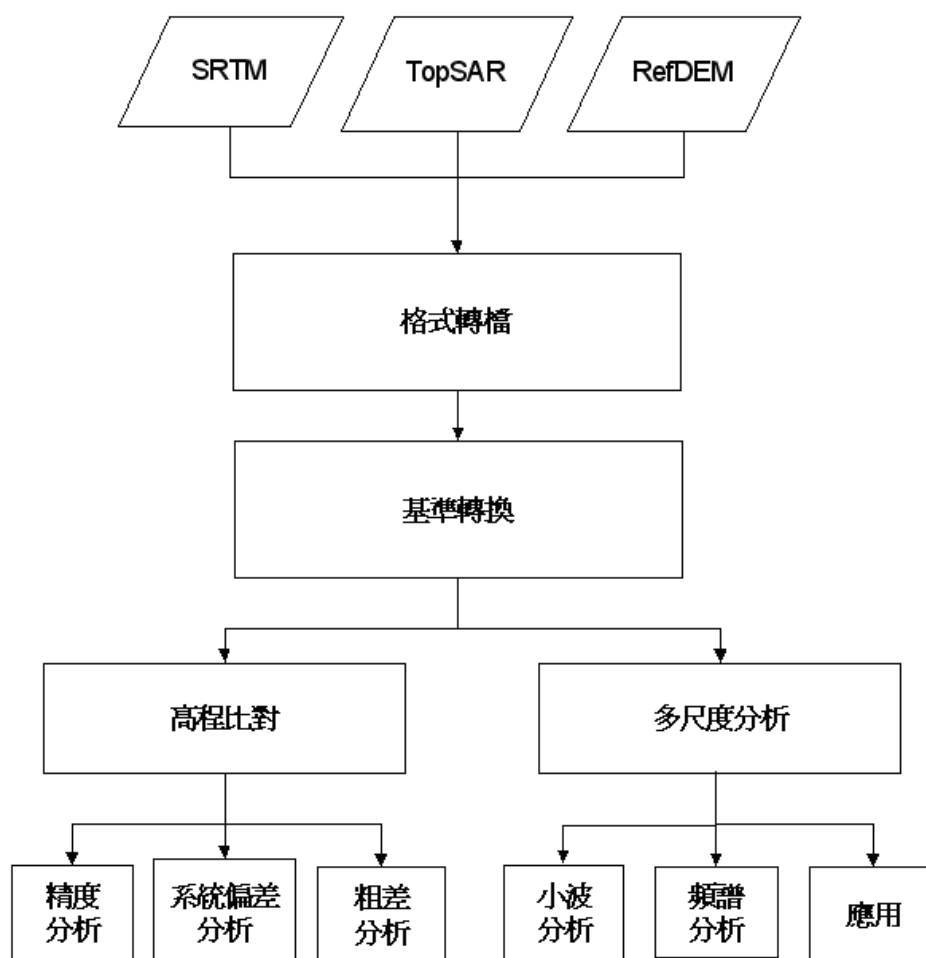


圖 1-3-1：研究流程

§1-4 論文架構

本文共分為六章，各章節主題說明如下：

第一章 緒論：敘述研究動機與目的、相關文獻回顧、研究方法與論文架構。

第二章 InSAR 測量原理與實驗資料介紹：介紹 InSAR 測量的原理與方法，並對兩組 InSAR 實驗資料格式與數據組成進行描述。

第三章 高程資料比對：描述實驗區相關資訊，論述高程比對流程與分析結果，並對粗差與坡度坡向進行探討，最後對本章實驗結果做一整理。

第四章 多尺度分析原理：論述尺度、解析度與頻率的關係，簡介頻譜分析法、小波分析和多尺度空間理論。

第五章 多尺度分析應用於高程資料比對：應用頻譜分析、離散小波轉換對不同尺度的資料進行分析，並討論小波分析於等高線縮編之應用。

第六章 結論與建議：針對本論文所做實驗成果進行說明與討論



第二章 InSAR 測量原理與實驗資料介紹

§2-1 雷達測量原理

成像雷達(Imaging Radar)是一種主動式遙測系統，此系統主動發射微波探測地物並接收回訊。由於主動式性質不像光學式被動系統接收太陽光的反射，因此可以在夜間作業。雷達系統使用微波波段，由於長波長特性可以穿透雲霧進行觀測，擁有光學式系統無法取代的優點。

相對於合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)，一般雷達系統又稱為真實孔徑雷達(Real Aperture Radar, RAR)。圖 2-1-1 為雷達成像幾何，其中 V_s/c 為載台飛行方向， H 為飛行高度。在雷達成像幾何中，不同於光學遙測系統的中心透視投影，分為方位解析度與距離解析度。每一個雷達脈衝發射並接收其回訊，產生雷達影像上的一條線，隨著飛行方向不斷前進，掃描線亦不斷向前推進，沿著飛行方向之影像解析度稱為方位解析度。由於發射的波為扇形，因此距離航線越遠之處方位解析度越差。沿著雷達波發射方向稱為距離解析度，為脈衝頻率之函數。

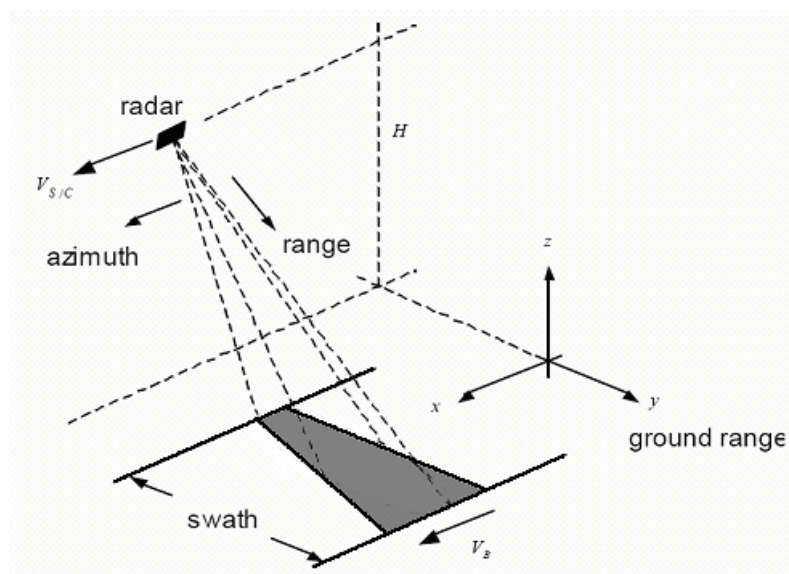


圖 2-1-1：雷達成像幾何[Bamler, 1999]

合成孔徑雷達著眼真實孔徑雷達的方位解析度隨著距離而變大的缺點，合成孔徑雷達利用兩個目標點相對雷達載具具有微小的角度差，在任一觀測時刻，相對於載具的相對速度會有所不同，因此，由這兩個目標點回來的雷達回訊將有兩個明顯的都普勒平移量(doppler frequency shifts)，根據此理論可將訊號合成產生一個雷達長天線，以此改善雷達的方位解析力，使方位解析度不隨距離增加而變差[林紀綱，2003]。

發射的雷達波經天線接收後，然後經過預處理，產生單視複數影像(Single Looking Complex, SLC)，其中附帶相關飛行姿態(即空間位置和速度向量)和成像雷達的系統參數。經過預處理後的 SAR 影像每一像元的記錄地表回訊的振幅大小和相位資訊，並儲存成兩個參數 I 與 Q，以複數表示，如公式(2-1)，故稱之為複數影像：

$$f(x, y) = I(x, y) + jQ(x, y) \dots\dots(2-1)$$

其強度可由以下公式計算[Mikhail et al, 2001]：

$$Magnitude = \sqrt{I^2 + Q^2} \dots\dots(2-2)$$

雷達測量中選用不同雷達波波段對地表各有不同的回訊性質，如 P 波段(0.5m)有較高的潛力穿透植被觀測地表，但空間解析度較差，選用波長較短的如 X、C 與 L 波段(波長在數公分左右)有較佳的空間解析度但只能觀測到植被表面，因此選擇適當的波段對於觀測結果有莫大影響。

§2-1-1 雷達影像特性

雷達系統的成像幾何與光學影像不同，回訊強度也與微波的性質有密切關係。影響雷達影像回訊強度的因素最重要的有以下三項，如入射角、表面粗糙度與介電係數，茲分述如下。

A. 入射角：

入射角是影響回訊強度的主要因素之一，入射角越小則回訊強度越弱。局部入射角則與地形有關，是由地形面的法線與雷達波的夾角形成，因此雷達影像強度與地形坡度有關。

B. 表面粗糙度：

表面粗糙度主要由地面覆蓋物決定，當表面越粗糙時，雷達波散射的情形越明顯。微波的波長越短，則對於表面粗糙度的變化越敏銳。若表面粗糙度的變化量小於八分之一的波長，可以視為平滑表面[Mikhail et al, 2001]，此時大部分的能量都被反射至另一方向，僅有少部分經由散射回到天線。在缺乏散射的情況下，平滑表面的地物在雷達影像上通常顯現為黑色。

C. 介電係數：

介電係數描述物質在電場下的反應。高介電係數物質對微波有較高的回訊，水的介電係數約 80，乾燥地表則約 3~8。當水面平靜時，通常沒有回訊，是因為此時的水面可視同為平滑表面而產生鏡射，缺乏散射的回訊，但水面受風暴影響時則因為水面不再是平滑表面而有較強回訊，此時是受高介電係數的性質影響[Mikhail et al, 2001]。

雷達影像為斜距投影，與光學式影像的中心透視投影有所不同，其幾何變形與施測地形有密切相關，包括前坡縮短，疊置效應與陰影效應，分述如下：

A. 前坡縮短(foreshortening)：

對於面向雷達波入射方向的坡面在雷達影像上會產生壓縮現象，稱為前坡縮短。如圖 2-1-2 所示，由於雷達影像是距離測量，對於面向飛行路線的山坡上的 a, b 兩點而言天線到兩點的距離差不多，因此顯現在雷達影像上的距離 L_f 比在真實世界的坡長 L (即 a b 兩點的距離) 更短。其關係為：

$$L_f = L \sin \theta \dots(2-3)$$

其中 θ 為區域入射角， L_f 為雷達影像上的距離， L 為真實坡長。

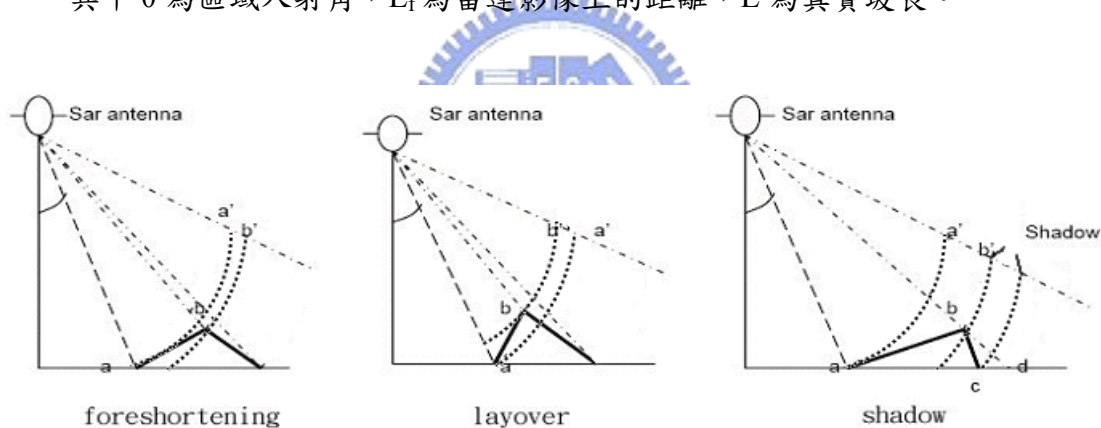


圖 2-1-2：雷達影像幾何變形[Ouarzeddine, 2002]

B. 疊置效應(layover effect)：

疊置效應是前坡縮短的極端狀況。當雷達波俯角與地形坡度越大時，區域入射角可能會變成負的。此時山頂與山底位置互換，出現山頭前傾的情形，是由於天線到山頭的距離比山底更短。

C. 陰影效應(shadow effect)：

雷達陰影是由於背向坡受到遮蔽而雷達波無法到達，產生完全沒有回訊的部分。與光學影像不同的是，陰影效應產生的是絕對的黑色，如圖 2-1-2 所示。背於距離方向其坡度角 α_b 與雷達波俯角 β 滿足以下條件時會產生陰影效應[林紀綱，2003]：

$$\alpha_b > \beta \dots\dots(2-4)$$

若坡度角固定，則陰影長度隨著地距增加而變長。

§2-1-2 干涉合成孔徑雷達

干涉合成孔徑雷達(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)利用一對複數雷達影像的相位差獲取三維高程資訊，其相位差是等比例於兩個天線中心與地表目標點之距離差。InSAR 可藉由空載或衛載進行觀測，空載雷達系統(如 NASA/JPL TopSAR 系統)以兩個天線同時觀測，可於一次飛行中同時獲得兩個不同觀測角度且涵蓋同一區域的 SAR 影像，稱為一次通過干涉(single-pass interferometry)，其成像幾何如圖 2-1-3 所示。衛載 SAR 系統多使用單天線觀測，對一個地區來說一次衛星通過只能獲得一幅 SAR 影像，衛星以一定的時間間隔和輕微的軌道偏移(相鄰兩次軌道間隔為幾十公尺至一公里左右)重複對該地區成像以取得像對，稱為重複通過干涉(repeat-pass interferometry) [劉國祥等，2000]，其成像幾何如圖 2-1-4 所示。

干涉圖像由相位差產生，相位差與地表高程有高度關連性[Abdelfattah et al, 2002]。干涉相位的週期為 2π ，由干涉相位算取地形高程，需要求解相位未定值，稱之為相位反演(phase unwrapping)。並需先移除地球曲率與橢球高對干涉圖像的影響量，方可取得可用的干涉圖像。同調性影像是計算像對的常化相關係數，描述了計算高程的不確定性。

獲取的 SAR 影像是複數格式圖元組成的二維陣列，第一維是由感測器沿著飛行方向組成(方位)，第二維是由沿著觀測方向組成(距離)，相位之公式如下 [Bernhard et al, 2003]：

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}D + \phi_{scat} + \phi_{prop} + \phi_N \dots(2-5)$$

公式(2-5)中 λ 為雷達波長，D 為感測器到地物之距離， ϕ_{scat} 為散射時受到相位飄移影響， ϕ_{prop} 為經過對流層延遲的影響量， ϕ_N 為雜訊影響量，如熱雜訊與量化誤差。干涉圖像是由 SAR 像對相乘產生的相位差，

$$\delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \dots(2-6)$$

以上是考慮重複通過干涉的情況，若為一次通過干涉，是一個雷達波發射由另一個天線接收。在一次通過干涉中，兩個天線非常接近，大氣狀況可以視為相同，則兩者 ϕ_{prop} 與 ϕ_{scat} 項相同，並忽略雜訊項影響，差分後的相位差方程式可簡化為[Bernhard et al, 2003]：

$$\delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}|D_2 - D_1| \dots(2-7)$$

而相位與地表高程之關係為 $\frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda D \sin\theta_1}$ ，其中 $B_{\perp} = B_z \sin(\theta) + B_x \cos(\theta)$ ， θ_1 是主要天線的觀測角度。由上可知 λ 越小， B_{\perp} 越大則干涉越敏感，但基線越長會導致 SAR 像對的觀測角度差異過大而減少相關性，因此基線長度多在幾百公尺到幾公里之間。

在產生干涉圖像之前，兩張 SAR 複數影像需先經過影像套合，然後第一張影像乘上另一張影像的共軛複數，同調性影像由相符的常化複數相關給予，干涉圖像表示了兩幅雷達影像的相位差，相位差與斜距差 δD 之關係如公式(2-8)所示：

$$\delta\phi = K_0 * \delta R \dots (2-8)$$

公式(2-8)中 $K_0 = 2\pi/\lambda$ 為波數， λ 為波長，在一次通過系統的中為 $\delta R = \delta D$ ，在多次通過系統中為 $\delta R = 2\delta D$ 。圖 2-1-3 為一次通過干涉成像幾何示意圖，基線是由兩個天線 A1 與 A2 形成，經過嚴密測量得到，地表高程可由公式(2-10)的關係得到[Abdelfattah et al, 2002]：

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{(D + \delta D)^2 - D^2 - B^2}{2DB} \dots (2-9)$$

$$Z(x) = H - D \cos(\theta) \dots (2-10)$$

然而雷達影像紀錄的是相位值，而要計算距離 D 則需要知道正確的完整波長數(phase ambiguity，又稱相位未定值)才能計算，此一動作即為相位反演(phase unwrapping)，若求解的相位未定值不正確，則會造成較大的誤差發生。

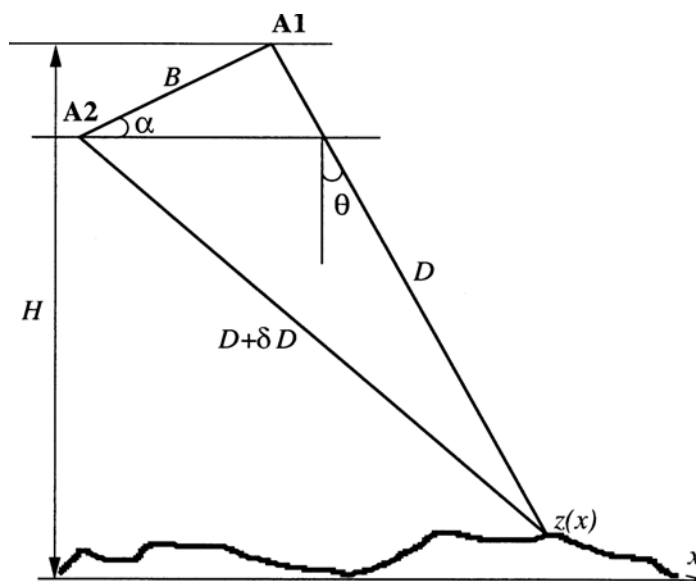


圖 2-1-3：一次通過干涉成像幾何[Abdelfattah et al, 2002]

重複通過干涉成像幾何如圖 2-1-4，其中航高為 H ，基線長為 B ，觀測角為 θ ， D 為斜距， δD 為兩斜距之差， z 為地表高程，基線與水平面夾角為 α ，基線的水平與高程分量 B_x 與 B_z ， $P(X, 0)$ 與 $P(X+x, z)$ 分別為在參考高度上與地表上的兩目標點。

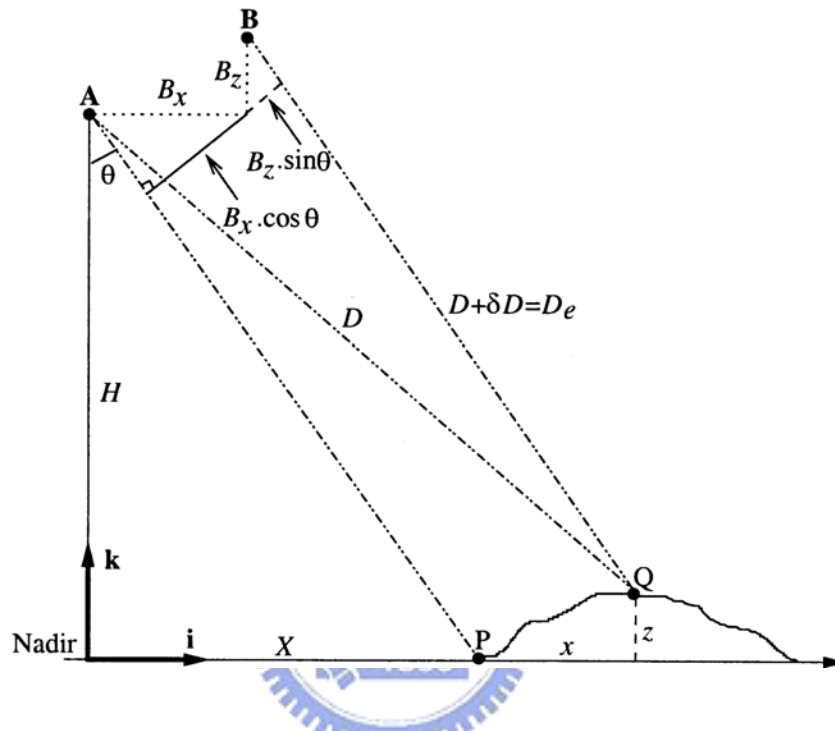


圖 2-1-4：重複通過干涉成像幾何[Abdelfattah et al, 2002]

在重複干涉幾何中，SAR 像對是由不同的飛行航線中獲取，精確的載台位置是產生干涉圖像與計算高程的要件之一，但是在取得的星曆中多半有著一些不確定性，這會對干涉幾何造成極大的誤差，降低 SAR 像對的同調性。衛載的多次通過的系統中，好的相位高程轉換要求精確的軌道參數，穩定的大氣狀態，地表物的反射特性等，才能產生高精度的 DEM。

§2-2 SRTM

2000 年二月，太空梭雷達製圖任務(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)是由美國 NASA-JPL 與德國太空中心(DLR)、義大利太空中心共同合作，以十一天的時間記錄了北緯 60 度到南緯 57 度間所有陸地的雷達數據，並產製幾乎涵蓋全球的數值高程模型。這是人類史上第一次使用單一感測器與單一處理標準產製全球涵蓋的 DEM，不像 GLOBE 資料集[Hastings et al, 1998]是由許多不同感測器與觀測技術的處理成果綜合而來。

SRTM 的 DEM 成果分 1 弧秒與 3 弧秒兩種，約相當 30 公尺與 90 公尺的空間解析度，分別稱為 SRTM-1 與 SRTM-3，而 GLOBE 資料集為 30 弧秒，相當於一公里的空間解析度。SRTM 系統酬載在 STS-99 太空梭上，共完成 176 條軌道的飛行，其中 159 條軌道資料用於地形製圖，軌道傾角為 57 度，軌道高度 233 公里，在十一天之中觀測了 1000 個帶寬，每個帶寬長度從幾百公里到幾千公里不等，共 12TB 雷達資料[Rabus et al, 2003]。對範圍內陸地 99.96%有一次取像，94.59%有兩次取像，50%的地區有三次以上取像，其目的是以兩種不同的角度進行觀測，以填補因遮蔽造成的資料空缺[NASA-JPL, 2003]。

在太空梭上有兩套獨立的干涉雷達系統，美國 C 波段系統 SIR-C 與德國/義大利的 X 波段系統 X-SAR，在機腹上裝有共用的雷達波發射器與兩套成像雷達天線，然後在長 60 公尺的機械臂裝上另兩組天線，以 60m 機械臂作為基線，進行干涉觀測，SRTM 同時記錄了兩個波段的雷達資料，C 波段資料由 NASA-JPL 負責處理，涵蓋了約 11900 萬平方公里，X 波段資料由德國 DLR 處理，約涵蓋 5800 萬平方公里。目前網路上已公開的數據是由 NASA-JPL 負責處理的 C 波段 DEM，預計雷達地距複數影像與雷達斜距複數影像等數據也將在不久的未來會提供各界下載使用[Rabus et al, 2003]。

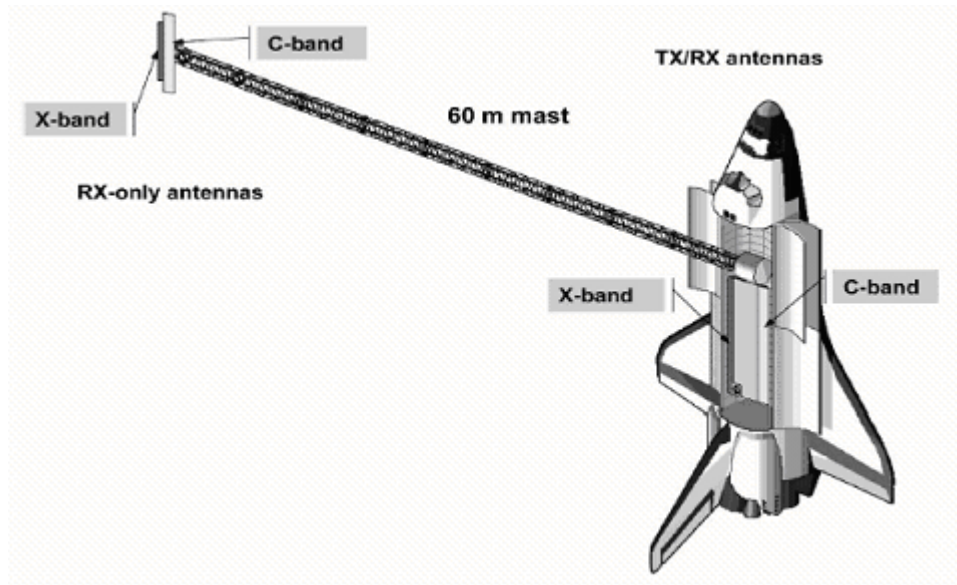


圖 2-2-1：SRTM 裝置圖[Rabus et al, 2003]

SRTM 使用 InSAR 技術由兩張涵蓋相同地區的 SAR 影像利用同一目標物的雷達回訊係數做干涉處理，可由相位差計算地物高程。大部分衛載系統需要通過目標上空兩次觀測以上來獲取兩個 SAR 影像進行干涉，屬於重複通過干涉 (repeat-pass interferometry)。由於兩次取像時間不同，大氣狀況與濕度也不相同，常造成 SAR 像對的相關性降低，無法產生干涉圖像。SRTM 同時使用兩組成像雷達觀測同時取得 SAR 像對，屬於一次通過干涉 (single-pass interferometry)，解決了重複通過干涉的問題。

SRTM 的側視角度 (off nadir angle) 從 30 度至 45 度不等，觀測帶寬為 225 公里，由四個次帶寬組成，以 17 度到 65 度週期性旋轉發射頭構成幾乎同步的成像，如圖 2-2-2，次帶寬 1、3 與 2、4 對不同的偏極方向 (HH+VV) 同時取像，因此只需要兩個旋轉角度。圖中橘色為 XV 為 X-SAR 帶寬。

在太空中基線的絕對定位是以一公尺精度的 GPS 接收器進行測量，由於基線位置的微小誤差將會直接導致 DEM 誤差產生，1mm 的基線量測誤差將會導致 0.5 至 1 公尺的 DEM 高程誤差產生 [Rabus et al, 2003]，因此在機械臂上也裝置了精密的追蹤器以監測基線長度變化，以達 mm 級精度。

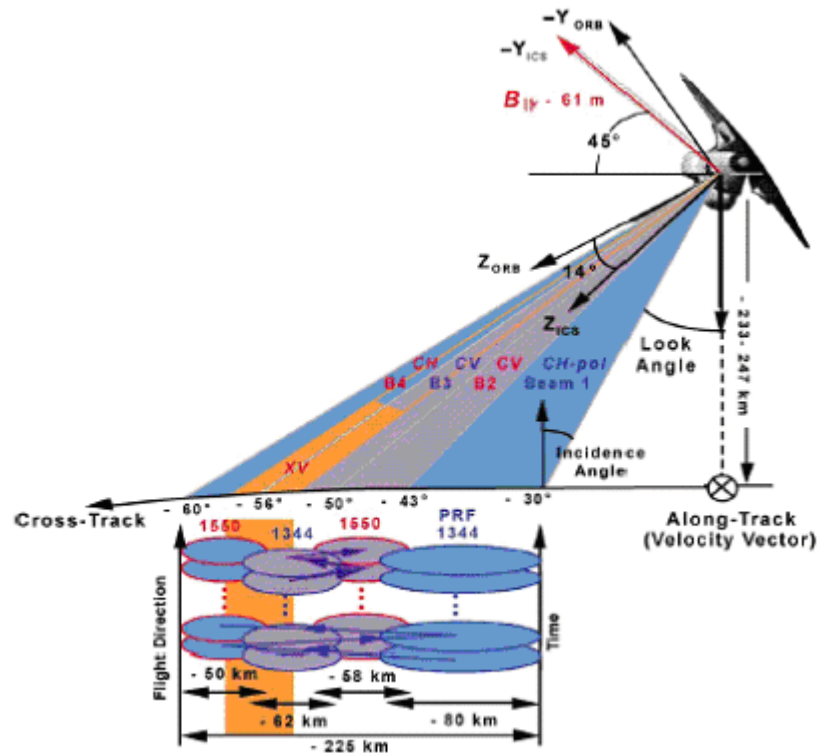


圖 2-2-2：SRTM 掃瞄次帶寬組成示意圖[Rabus et al, 2003]

§2-2-1 SRTM 資料格式與特性

SRTM 資料以洲作為基礎進行處理，再經幾種預處理步驟如編輯、粗差移除、決定水面高程與定義海岸線。再依地理座標進行切割，將成果裁切成 15000 個圖幅檔案存放，每一圖幅涵蓋範圍為一經度乘一緯度。每個圖幅是由範圍內所有資料獲取(data take)平均而得，圖幅名稱是由圖幅西南角的經緯度來命名，SRTM 數據的取樣間距為 1 弧秒或 3 弧秒，視 SRTM-1 或 SRTM-3 資料庫而不同。SRTM-3 資料是由 SRTM-1 經 3x3 的平均遮罩產生，由 1201x1201 個點組成，高程資料單位最小紀錄至公尺。SRTM-3 資料以洲為單位釋出，各洲資料庫涵蓋區域如圖 2-2-3 所示。而 SRTM-1 資料只釋出美國本土的資料。SRTM 資料的儲存格式是 HGT，16bit 的 binary 格式儲存，Motorola big-endian 的編碼順序，檔案中沒有檔頭資料，以行的順序排列。沒有資料的值被標示為-32768[JPL, 2003]。SRTM 數據下載網址為(URL: <http://seamless.usgs.gov/>)。

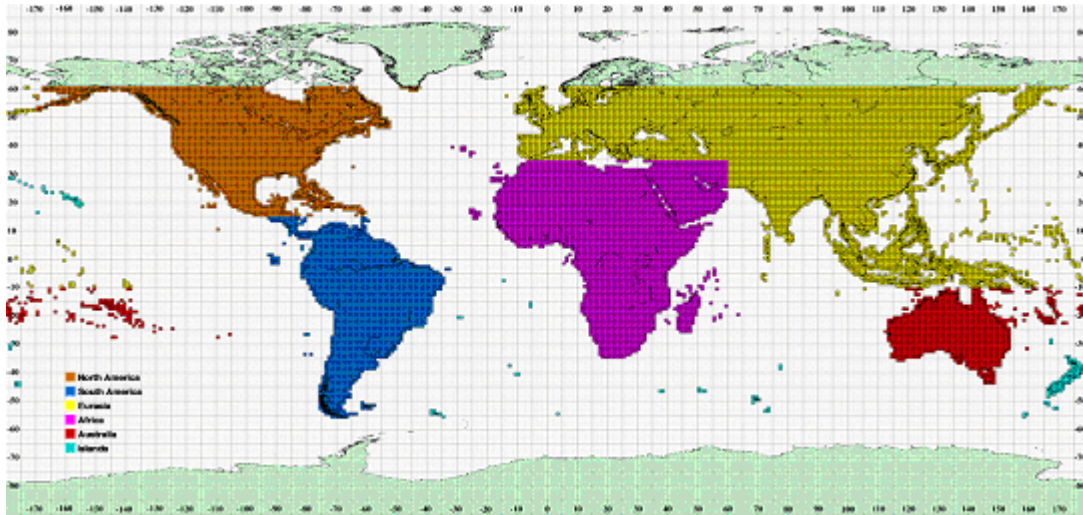


圖 2-2-3：SRTM 資料庫涵蓋圖 [NASA-JPL, 2003]

SRTM 資料分為歐亞、北美、南美、非洲、澳洲、與其他島嶼等六個資料庫，共涵蓋北緯 60 度到南緯 57 度間全球所有陸地。而歐亞資料庫涵蓋範圍如圖 2-2-4 所示，包含了許多不同的地貌，西從不列顛群島、跨過阿爾卑斯山、西伯利亞、到中國大陸、西藏高原、印度、東至大太平洋島弧，南至印尼群島，共包含 5940 個檔案，並涵了包含歐亞大陸與太平洋與印度洋上大部分的島嶼，最高處在喜馬拉雅山聖母峰 8848 公尺。我們所研究的區域，是位於在大太平洋火環的臺灣地區，從圖 2-2-5 可知，是經過二次資料獲取的地區。

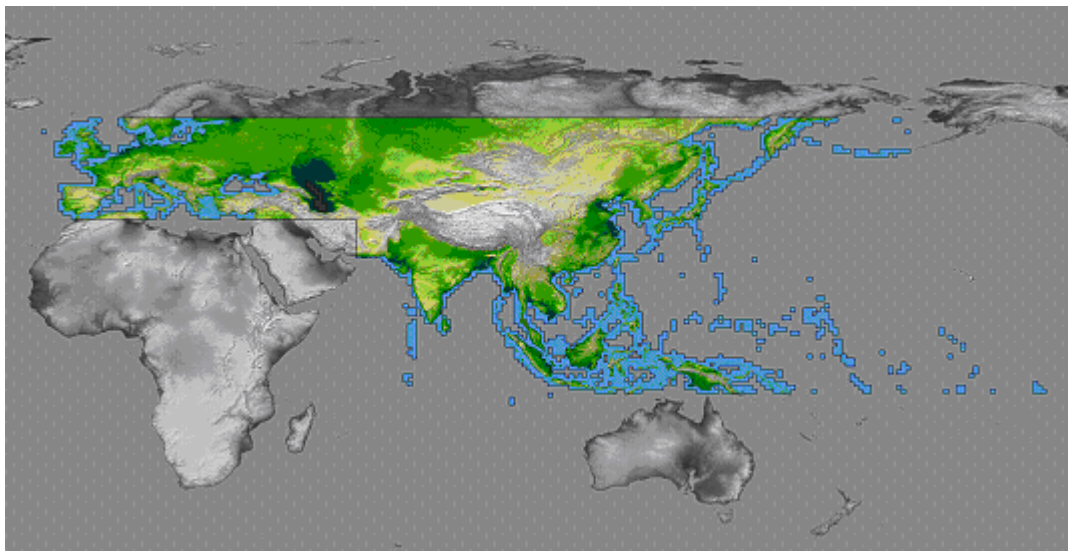


圖 2-2-4：歐亞資料庫涵蓋圖[NASA-JPL, 2003]

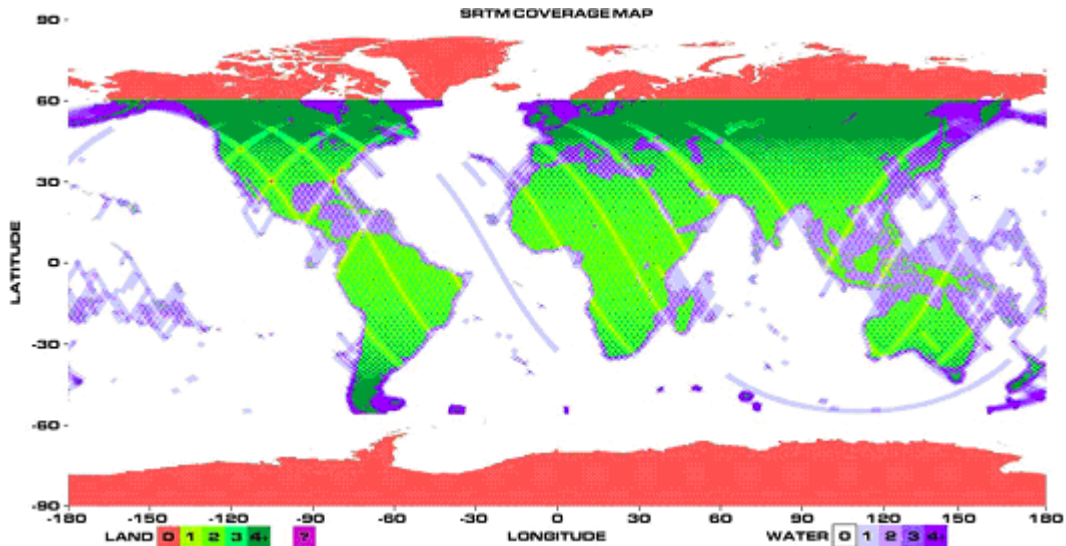


圖 2-2-5：資料獲取次數圖[NASA-JPL, 2003]

SRTM 的高程基準是 WGS84 EGM96 geoid，而且取得的描述面是 DSM。NASA 公佈的資料規範絕對水平精度為 12.5 公尺，絕對高程精度為 10 公尺，在同一個帶寬內的相對高程精度為 6 公尺，約為 225 km x 255 km 的區域，這是預期使用者進行幾何與系統誤差的改正後可達到的精度，影響相對高程精度主要為熱誤差(thermal noise)影響。影響 SRTM 資料品質之誤差來源如圖 2-2-6 所示。SRTM 的觀測角度為 55 度，受到陰影效應影響產生許多資料空缺點，藉由不同方向的觀測可以有效的補足資料空缺的問題。

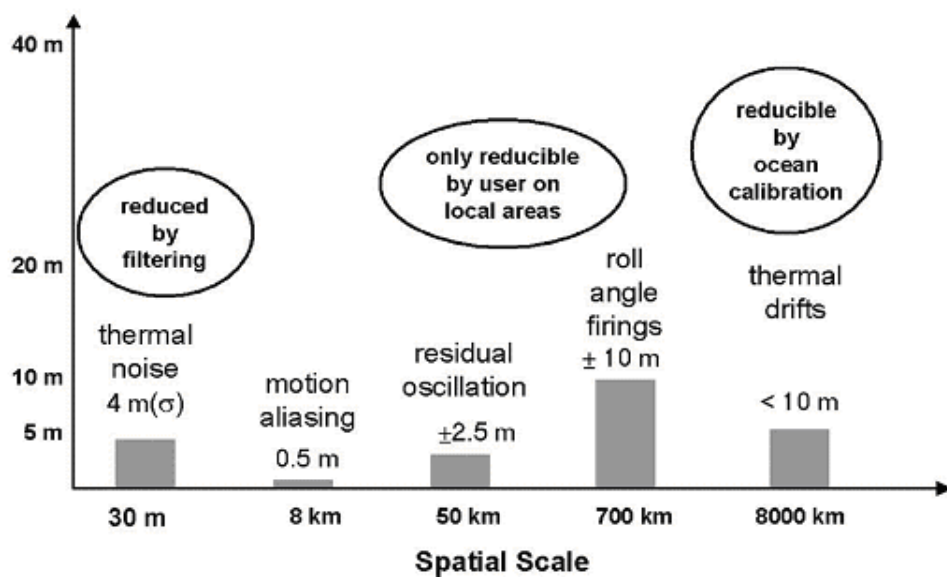


圖 2-2-6：不同誤差來源影響量與尺度[Rabus et al, 2003]

§2-2-2 臺灣地區 SRTM 資料組成

臺灣本島的 SRTM DEM 數據由十個檔案組成，列於表 2-2-1：

表 2-2-1：臺灣地區 DEM 組成圖幅

| 檔案名稱 | 高程最小值(m) | 高程最大值(m) |
|-------------|----------|----------|
| N21E120.HGT | -34 | 341 |
| N21E121.HGT | -19 | 226 |
| N22E120.HGT | -68 | 3035 |
| N22E121.HGT | -26 | 2912 |
| N23E120.HGT | -49 | 3917 |
| N23E121.HGT | -43 | 3812 |
| N24E120.HGT | -56 | 2439 |
| N24E121.HGT | -37 | 3860 |
| N25E120.HGT | -16 | 21 |
| N25E121.HGT | -70 | 1102 |

SRTM 轉檔流程如附錄 A，經轉檔、接合與裁切後，臺灣地區 SRTM DEM 網格數為 2384 x 4195，高程值分佈從-70 到 3917 公尺，由於 SRTM 數據也包含海上的高程點，在使用上需先進行處理。經由去除海上高程點後，陸上高程點數為 4,638,351 點，其中資料空缺點數為 165,231 點，資料空缺率為 3.564%。

黑白暈渲圖 2-2-7 中可以清楚的看出山區 SRTM 數據有較嚴重的資料空缺情形發生，在中央山脈兩側資料空缺的發生較為頻繁，可能與坡度和觀測方向有關，在背向坡上由於回訊較低，無法計算高程點的比例因而較高。彩色暈渲圖展示於圖 2-2-8，河流、湖泊等陸上水體也會因鏡面反射效應而沒有回訊，而海面上由於海風產生的海浪使的表面粗糙度較高，仍有不少回訊產生，如圖 2-2-7 台灣西岸的海面上有許多的高程資料存在。



圖 2-2-7：臺灣 SRTM 資料黑白暈渲圖
(黑色部分代表高程值為 0 或資料空缺。)

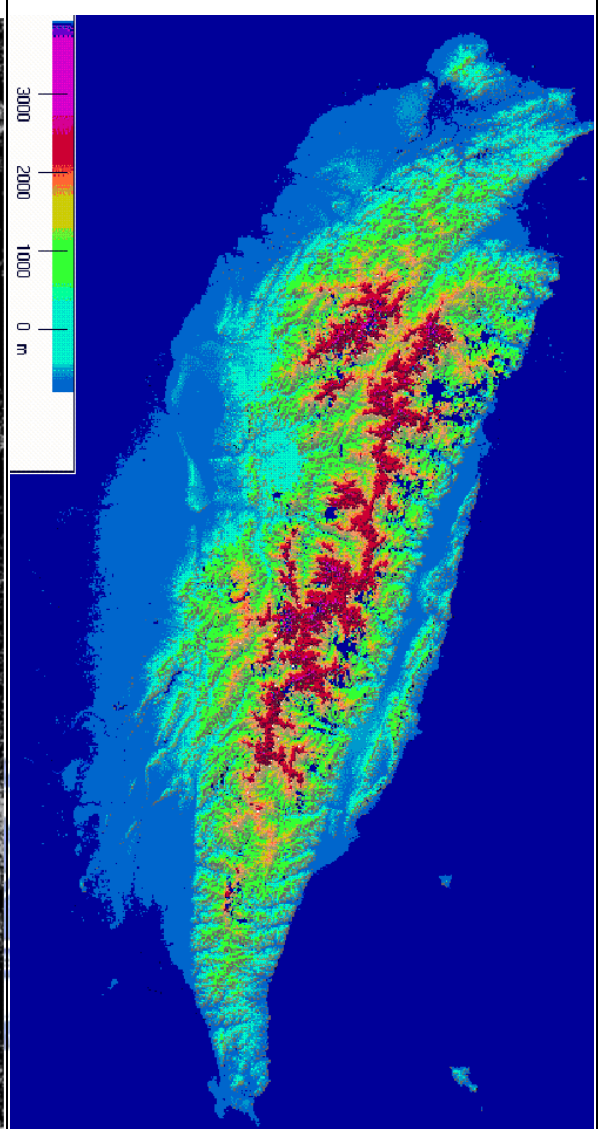


圖 2-2-8：臺灣 SRTM 資料彩色暈渲圖

§2-3 TopSAR

1996 年 11 月 30 日，臺灣參與美國 NASA/JPL 『太平洋周邊國家地區實施全偏極、多波段及干涉合成孔徑雷達計畫，PacRim』，由農委會、國立中央大學太空及遙測研究中心與美國太空總署共同合作[陳錕山，1999]，計畫中使用 AIRSAR 系統觀測臺灣北部、中部台中港與溪頭、南部墾丁四個區域。2000 年 9 月 27 日，NASA/JPL 再度執行後續計畫 PacRIM-II，地區涵蓋臺灣西部、中部、南部[林紀綱，2003]。TopSAR 為 AIRSAR 系統中之一子模式，主要目的是用來產生高精度高解析度 DEM。



圖 2-3-1：DC8 飛機外觀[NASA-JPL, 2003]

AIRSAR 系統酬載在 DC8 飛機上，其外觀如圖 2-3-1 所示，為左向側視(left-looking)雷達系統，使用三種微波波段，分別是 C 波段、L 波段及 P 波段，平均波長分別為 5.6cm、23.5cm 及 68cm，其中 C 波段與 L 波段用於干涉模式。機上雷達波發射器發射水平或垂直方向的偏極雷達波，接收器可記錄六個頻道的回訊資料，為 C、L 與 P 三個波段的水平與垂直偏極回訊[Lou et al, 1995]。再將獲取的回訊資料以類比數位轉換器(Analog to Digital Converter)轉換成 8 位元影像資料，AIRSAR 系統也包含一個及時處理器(real-time processor)，可用來處理這些頻道(channel)產生快覽影像(scrolling image)，快覽影像可以檢查雷達影像的品質，還可以確認觀測區域是否為目標區。

DC8 機上還裝有 GPS(Global Positioning System)和 INS(Inertial Navigation System)以記錄飛機觀測姿態的位置和姿態角。GPS 部分使用 Motorola Six-Gun GPS 接收器，具有六個頻道和穩定的時鐘，Honeywell GPS 與 INS 整合式元件

(Integrated GPS and INS, IGI)，具有一個小且相當靈敏的環形雷射陀螺儀，且這個陀螺儀與 GPS 接收器整合在一起，可以進行更高精度的姿態量測。這套系統精度為 κ 角精度 $\pm 0.02^\circ$ ， ω 角精度 $\pm 0.01^\circ$ ， ϕ 角精度 $\pm 0.01^\circ$ ，每個軸向的速度精度為 $\pm 0.03\text{m/s}$ ，絕對位置精度為 $\pm 16\text{m}$ ，需額外的處理來獲得優於 1m 的絕對位置精度[Lou et al, 1995]。

TopSAR 相關系統參數列於表 2-3-1，使用 C 與 L 波段來進行干涉雷達測量產製數值高程模型。在 XT11 模式中僅使用 C 波段進行干涉雷達測量，在 XT12 模式中則同時用 C 波段與 L 波段進行干涉，C 波段與 L 波段對植被有不同的穿透程度，其產製之 DEM 可以用來植被研究，C 波段產製的 DEM 其精度約為 1~5 公尺，L 波段約為 5~10 公尺。

表 2-3-1：TopSAR 系統參數[Howard, 1995]

| TopSAR 系統參數 | |
|---------------|---------------|
| 航高(公尺) | 8000~9000 |
| 脈衝頻率(MHZ) | 600 |
| 天線長(公尺) | 1.6 |
| 天線寬(公尺) | 0.11 |
| 基線長(公尺) | 2.58 |
| 基線角(度) | 62.77 |
| 距離頻寬(MHz) | 40 |
| 使用波段 | C, L, P |
| 平均波長(公分) | 5.6, 23.5, 68 |
| 斜距解析力(公尺) | 3.75 |
| 方位解析力(公尺) | 1.2 |
| DEM 空間解析力(公尺) | 5 |
| 觀測角度(度) | 20~65 |
| 帶寬(公里) | 10 |

AIRSAR 系統中提供提供三種操作模式以供不同製圖目的使用，表 2-3-2 為 AIRSAR 操作模式，表中全偏極指同時分別發送垂直與水平方向之偏極的雷達波，每一個回訊同時取得 HH 與 VV 的資料。POLARSAR 模式對水體與植被較敏感，沿軌(along track)干涉模式 ATI 則被用來量測海洋表面，此兩個模式的目的並非

用來量測地形資訊[JPL, 2003]。

表 2-3-2：AIRSAR 操作模式

| 操作模式 | 產生資料 | | |
|-------------|---------|------------|---------|
| | DEM | 全偏極(HH+VV) | VV |
| POLSAR | | 波段 P, C, L | |
| TopSAR XTL1 | 波段 C | 波段 P, L | 波段 C |
| TopSAR XTL2 | 波段 C, L | 波段 P | 波段 C, L |
| ATI | | | 波段 C, L |

TopSAR 是以量測三維地表高程為目的。屬於叉軌(cross-track)干涉模式，意指同時使用兩支天線接收回訊，可在一次飛航中獲取一對 SAR 像對，再經干涉原理由雷達影像之相位差計算高程資訊，亦稱一次通過干涉(single-pass interferometry)。

Madsen[1995]於美國加州與亞利桑納州中 Fort Irwin 與 Walnut Gulch 兩個實驗區所做的研究中，將 TopSAR 資料產生之 DEM 與傳統光學立體像對產生之資料進行高程比對，發現兩者高程差值之 RMS 值平坦區為 2.2 m；高山區則為 5.0 m，Fort Irwin 實驗區包含高山與平坦地，高程值域為 600-1500m，高山主要組成為花崗岩，而 Walnut Gulch 實驗區則為雨量少但有一長滿青草之牧場，與一些泥土岩粒組成的區域，高程約在 1300-1600m 之間，在此實驗中 TopSAR 資料之高程精度在 2.2~5.0 公尺之間，與 JPL 公佈之 1~5 公尺精度相符。

§2-3-1 TopSAR 資料格式

TopSAR 數據包含四個(只有 C 波段)或八個(C 與 L 波段)DEM 相關檔案，與 1 至 2 個偏極數據檔案，每一圖幅檔案組成格式如表 2-3-3 所示：

表 2-3-3：TopSAR 資料格式[JPL, 2003]

| DEM 數據(C 波段，L 波段不一定) | | | |
|----------------------|--------------|--------------------------|------------|
| Ts#####_c.vvi2 | C 波段 VV 強度影像 | 16bit | 2.5 Mbytes |
| Ts#####.demi2 | C 波段 DEM | 16bit | 2.5 Mbytes |
| Ts#####.corgr | 相關係數圖 | byte file | 1.2 Mbytes |
| Ts#####.incgr | 區域入射角圖 | byte file | 1.2 Mbytes |
| 偏極數據 | | | |
| Ts#####_l.datgr | L 波段偏極影像 | compressed Stokes matrix | 15 Mbytes |
| Ts#####_p.datgr | P 波段偏極影像 | compressed Stokes matrix | 15 Mbytes |

其中高程資料.demi2 檔以 16bit 數值、BIL 方式儲存，需要由以下公式換算實際高程：

$$H = \text{高程增量} * DN + \text{高程起始值}$$

高程增量與高程起始值可由檔頭參數中找到，DN 為.demi2 檔案中 16bit 數值，TopSAR 的高程資料基準為 WGS84 EGM96 geoid，是以 EGM96 全球大地位模式計算全球大地起伏模式。

本研究處理過程以 ENVI 軟體讀取.demi2 檔案並轉出成 ASCII 格式方便後續計算。由於輸出之 ASCII 格式檔案是以 BIL 方式儲存 DN，因此必須由檔頭之四個角點座標計算每一個點的座標。作法是先將四個角點之經緯度轉成 TWD97 二度分帶之座標，並依照以下計算每個高程點之水平座標。

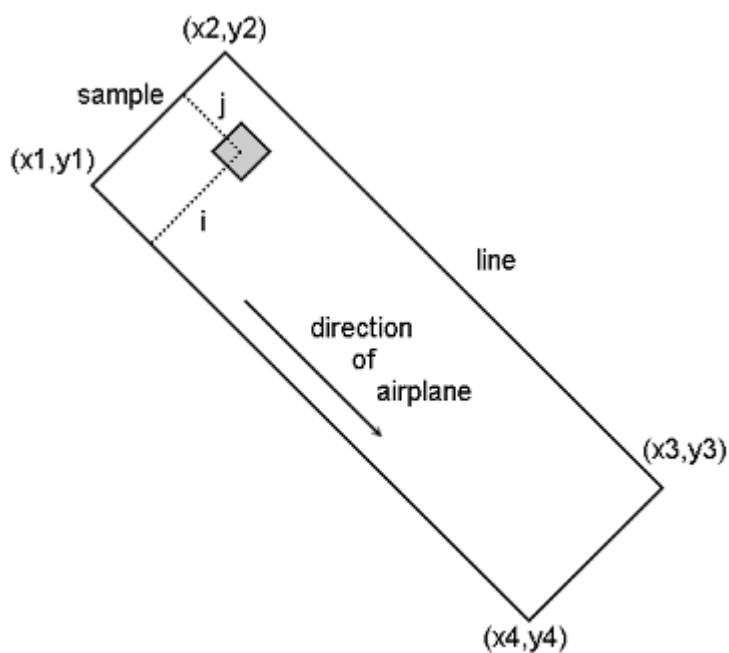


圖 2-3-2：TopSAR 高程資料 BIL 格式轉 XYZ 示意圖

$$x_{i,j} = x_1 + i \times \frac{x_2 - x_1}{M - 1} + j \times \frac{x_4 - x_1}{N - 1}$$

$$y_{i,j} = y_1 + i \times \frac{y_2 - y_1}{M - 1} + j \times \frac{y_4 - y_1}{N - 1}$$

$$z_{i,j} = DN \times \Delta h + h_0$$

(x1,y1) (x2,y2) (x3,y3) (x4,y4)為圖 2-3-2 中四個角點之座標，i, j 為 BIL 格式中的位置，M 為每條掃瞄線之點數，N 為掃瞄線之數量，Δh 與 h₀ 為檔頭資料中高程增量與高程起始值，並以第三角點作為檢核轉換之檢核，關係如下：

$$dx3 = x3' - x3$$

$$dy3 = y3' - y3$$

其中 dx3 與 dy3 為第三角點推算第三角點之座標與原始座標比較作為檢核角點座標之用。並計算轉換後之網格大小。在轉換過程中發現，實際轉換出來的網格大小約為 4.999m。

§2-3-2 臺灣地區 TopSAR 資料組成

臺灣目前擁有之 TopSAR 資料共為 21 幅，包含 PacRIM-I 12 幅與 PacRIM-II 9 幅，整理於表 2-3-4，皆可由([Url:http://airsar.jpl.nasa.gov/cgi-bin/search.plex](http://airsar.jpl.nasa.gov/cgi-bin/search.plex))下載。

1996 年觀測的 PacRIM-I 數據為 10 公尺解析度，其處理品質較不穩定，本文主要研究 PacRIM-II 的數據，DEM 解析度為五公尺。其中 Ts1250、Ts1265 與 Ts1456 有 C 與 L 波段的 DEM。

表 2-3-4：

臺灣地區 TopSAR 高程資料簡表

| 檔名 | 獲取日期 | 波段 | 解析度 |
|--------|-----------|------|-----|
| Ts0259 | 30-NOV-96 | C | 10m |
| Ts0388 | 30-NOV-96 | C | 10m |
| Ts0530 | 30-NOV-96 | C | 10m |
| Ts0537 | 30-NOV-96 | C | 10m |
| Ts0538 | 30-NOV-96 | C | 10m |
| Ts0539 | 30-NOV-96 | C | 10m |
| Ts0540 | 30-NOV-96 | C | 10m |
| Ts0541 | 30-NOV-96 | C | 10m |
| Ts0542 | 30-NOV-96 | C | 10m |
| Ts1104 | 30-NOV-96 | C, L | 10m |
| Ts1105 | 30-NOV-96 | C, L | 10m |
| Ts1107 | 30-NOV-96 | C, L | 10m |
| Ts1215 | 27-SEP-00 | C | 5m |
| Ts1220 | 27-SEP-00 | C | 5m |
| Ts1223 | 27-SEP-00 | C | 5m |
| Ts1225 | 27-SEP-00 | C | 5m |
| Ts1250 | 27-SEP-00 | C, L | 5m |
| Ts1262 | 27-SEP-00 | C | 5m |
| Ts1265 | 27-SEP-00 | C, L | 5m |
| Ts1456 | 27-SEP-00 | C, L | 5m |

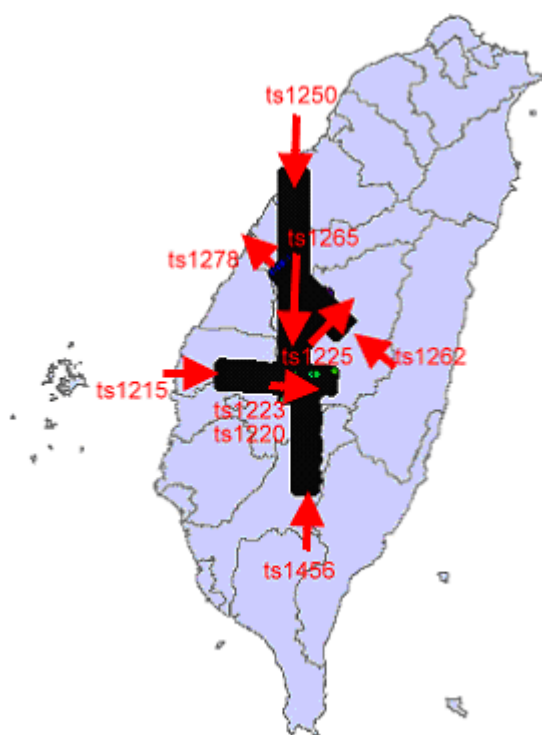


圖 2-3-3：PacRIM-II 涵蓋區域

PacRIM-II 的涵蓋範圍如圖 2-3-3 所示，集中在台灣中部，主要涵蓋縣市有苗栗縣、台中縣市、南投縣、雲林縣等，目的是對 921 大地震後對於災情較嚴重的區域提供研究與測試數據。

經轉換後之 PacRIM-II 資料列於表 2-3-6，第三角點檢核的 dx, dy 差值來看，大多數的資料都在 2 公尺以內。以 5 公尺的解析度來看，對第三角點的影響在次像元等級內，唯獨 Ts1250L 與 Ts1265L 這兩個資料的 dx 差值在 50 公尺左右，檢查其高程最低值也極不合理，位於-1000 公尺上下，但檢視其檔頭資料這兩個資料的高程起始值分別為-920.9 與-1042.6，推測應是 NASA/JPL 處理過程的錯誤造成錯誤的檔頭參數，因此在後續分析上將不使用這兩組品質較差的數據。

表 2-3-5 中空缺率的計算方式是從 DN 影像中計算 DN 值為-16384 的點數，亦即無法計算高程的點，再除以全部點數可得，實驗資料中空缺率在 5~28%之間，可以注意到地勢較高的數據如 Ts1220、Ts1223，Ts1456 其空缺率較高，可達 19%~28%左右，而地勢較低的數據如 Ts1250 則空缺率僅為 5.12%。

表 2-3-5：PacRIM-II 高程資料轉換成果檢核(m)

| 檔名 | 高程最小值 | 高程最大值 | 第三角點 dx | 第三角點 dy | 空缺率 |
|---------|-----------------|-----------------|---------------|--------------|--------|
| Ts1215 | -21.10 | 1304.80 | 1.51 | -0.81 | 7.70% |
| Ts1220 | 10.20 | 2863.80 | 0.39 | 0.01 | 19.46% |
| Ts1223 | 73.2 | 3168.47 | -0.63 | 1.13 | 18.76% |
| Ts1225 | -71.2 | 1406.15 | -0.17 | 0.75 | 9.80% |
| Ts1250C | -73.20 | 867.08 | 0.43 | -1.61 | 5.12% |
| Ts1250L | <u>-920.90</u> | <u>1082.70</u> | <u>-50.61</u> | <u>-0.39</u> | 7.25% |
| Ts1262 | -128.60 | 2172.37 | -0.94 | 0.77 | 9.90% |
| Ts1265C | -124.10 | 2807.49 | 0.65 | -0.47 | 8.42% |
| Ts1265L | <u>-1042.60</u> | <u>4542.847</u> | <u>-51.41</u> | <u>-0.41</u> | 9.39% |
| Ts1278 | -136.40 | 894.48 | 1.07 | 0.83 | 10.2% |
| Ts1456C | 398.1 | 2898.46 | 0.93 | -0.32 | 26.85% |
| Ts1456L | 331.10 | 3041.34 | 0.34 | -0.32 | 27.52% |

§2-4 參考航空攝影測量數據

參考資料使用內政部的 921 緊急製圖成果 DEM，以下簡稱為 RefDEM，獲取於 1999 年 921 大地震後在臺灣中部災區所拍攝兩萬分之一的黑白航空相片，航高從地面起算約 3000 公尺，拍攝時相機焦距為 15 公分，前後重疊 65%，航帶重疊 30%，以解析攝影測量方式產製 5 公尺間距等高線，再轉成 20 公尺間距的 DEM，以 ASCII 檔案儲存 XYZ，圖幅 9520 主要位於南投縣與嘉義縣之間，共 110 幅，2,026,058 個高程點，如圖 2-4-2。圖幅 9521 主要位於台中縣，共 90 幅，1,670,621 個高程點，繪製等高線圖 2-4-3。涵蓋分佈圖如圖 2-4-1 所示，平面系統是 TWD97 二度分帶系統，高程系統為正高。

RefDEM 的平面精度規範為 90% 的檢核點誤差在 2.5 公尺內，剩下 10% 其誤差在 5 公尺以內。高程精度規範為 90% 的誤差在 2.5 公尺內，剩下 10% 誤差不能超過 5 公尺。

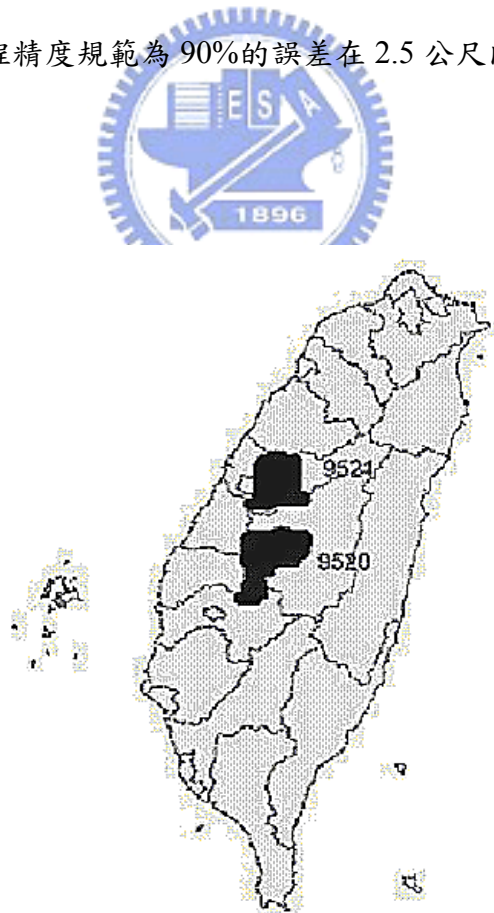


圖 2-4-1：參考航空攝影測量數據涵蓋範圍

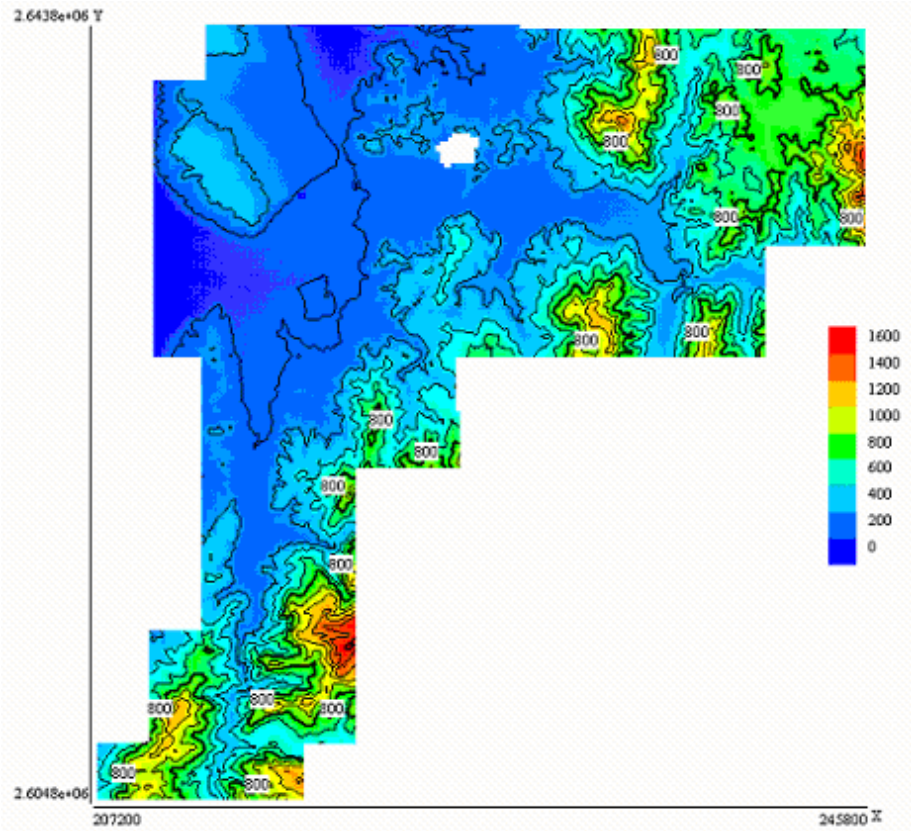


圖 2-4-2：參考航測資料於圖幅 9520 兩百公尺等高線圖

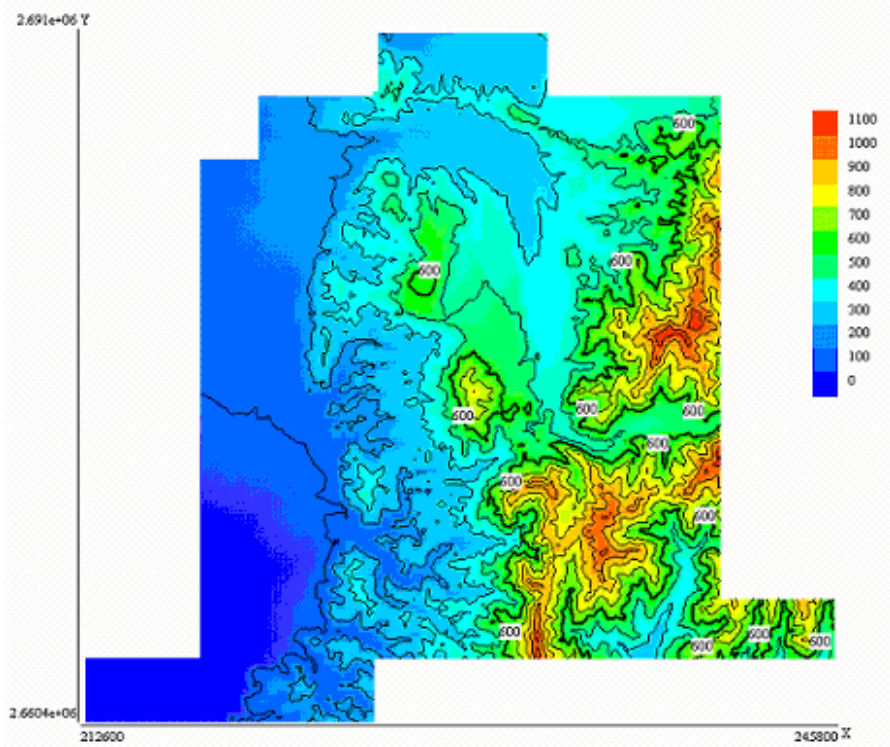


圖 2-4-3：參考航測資料於圖幅 9521 一百公尺等高線圖

第三章 高程數據比對

§3-1 實驗數據描述

高程比對的實驗區選定依照參考航空攝影測量數據涵蓋劃分為 9520 與 9521 兩個實驗區，範圍如表 3-1-1 所列。9520 實驗區東西寬為 38.38 公里，南北長 38.83 公里，涵蓋範圍如圖 3-1-1，大部分在南投縣，並涵蓋彰化縣、雲林縣與嘉義縣些許地區。實驗區內的 TopSAR 資料有 Ts1215、Ts1220、Ts1223、Ts1225、Ts1262、Ts1265、Ts1456 共六幅 DEM。

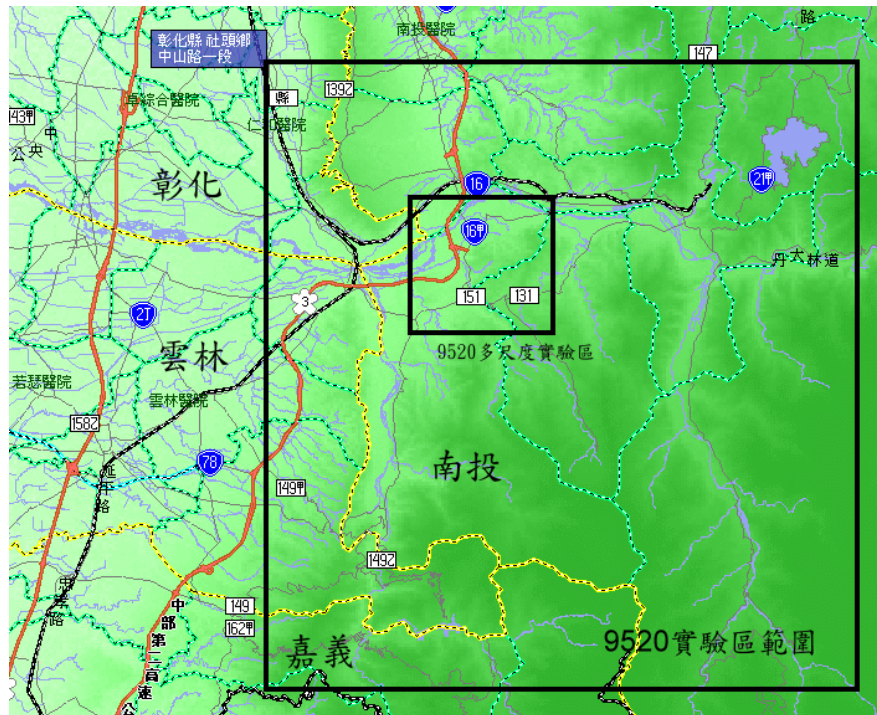


圖 3-1-1：9520 實驗區範圍(底圖取自 Papago 電子地圖)

表 3-1-1：實驗區範圍與參考 DEM 高程範圍(m)

| 實驗區 | Max E | Min E | Max N | Min N | Max H | Min H |
|------|--------|--------|---------|---------|----------|--------|
| 9520 | 245720 | 207340 | 2643800 | 2604970 | 1687.450 | 3.210 |
| 9521 | 245740 | 212680 | 2690860 | 2660400 | 1250.215 | 19.942 |

9521 實驗區東西寬 33.06 公里，南北長為 30.46 公里。涵蓋範圍如圖 3-1-2，以台中縣市為主，值得注意的是部分台中都會區在 9521 實驗區範圍內，實驗區內的 TopSAR 數據為 Ts1250、Ts1265、Ts1278 三幅資料，共計四幅 DEM，各實驗區有效高程點數統計列於表 3-1-2。

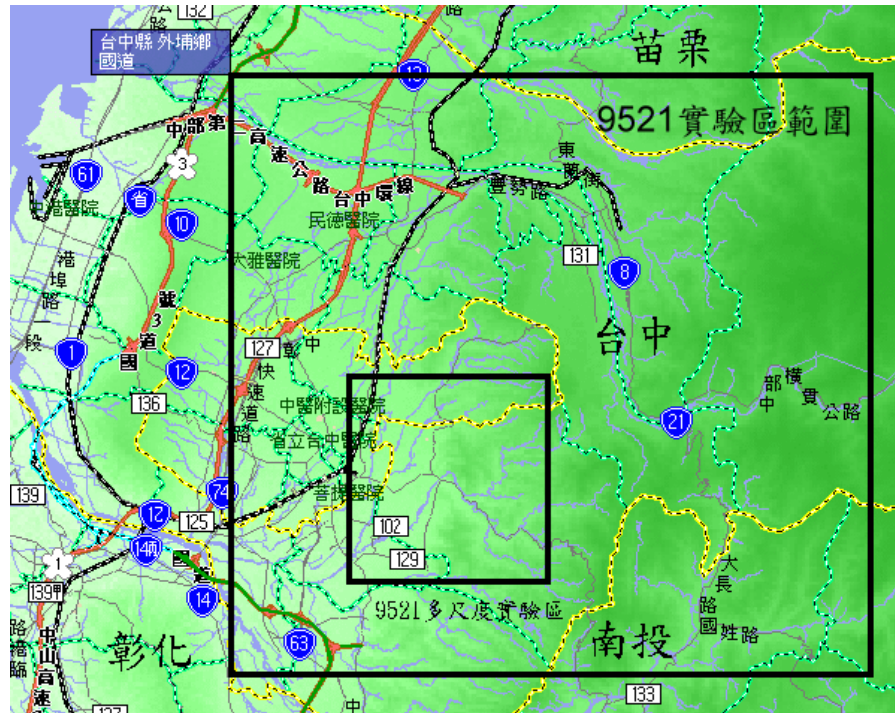


圖 3-1-2：9521 實驗區範圍(底圖取自 Papago 電子地圖)

表 3-1-2：實驗區高程點數統計

| 數據簡稱 | 9520 實驗區 | 9521 實驗區 |
|--------|------------|------------|
| SRTM | 188,995 | 128,812 |
| TopSAR | 74,074,196 | 33,409,520 |
| RefDEM | 2,026,058 | 1,670,621 |

由 RefDEM 計算實驗區內之坡度整理於表 3-1-3，9520 實驗區坡度 30 度以上地區占 57%，9521 實驗區僅占 27%，相較 9521 實驗區，9520 實驗區包含較多地形起伏較大的區域。

表 3-1-3：坡度面積比率表

| | 0 度至 15 度 | 15 度至 30 度 | 30 度至 45 度 | 45 度以上 |
|----------|-----------|------------|------------|--------|
| 9520 實驗區 | 14.88% | 28.05% | 41.86% | 15.02% |
| 9521 實驗區 | 43.60% | 29.46% | 23.19% | 3.79% |

§3-2 比對流程

比對流程中使用的三種資料相關參數如表 3-2-1 所列，由於這三種資料使用的平面系統與高程系統和航空攝影測量數據不同，因此這些資料必須轉換至同一座標系統才能進行比較，地圖投影轉換工具使用 Proj 程式[Evenden, 1995]進行投影轉換計算，proj 投影正算與反算一次的平均絕對誤差約在 0.3 公尺左右，程式計算的可逆性極高[史天元, 2000]，對本研究最小 DEM 網格五公尺解析度而言影響有限，因此以 Proj 進行 WGS84 經緯度轉 TWD97 二度分帶計算，將 SRTM 與 TopSAR 經緯度數據轉換至 TWD97 二度分帶系統。

表 3-2-2：SRTM、TopSAR 與參考攝影測量數據簡表

| | SRTM | TopSAR | RefDEM |
|------|-------------|-------------|-------------|
| 觀測時間 | 2000 年 2 月 | 2000 年 9 月 | 1999 年 10 月 |
| 航高 | 223000m | 8500m | 3000m |
| 解析度 | 90m | 5m | 20m |
| 高程精度 | 16m | 1~5m | * |
| 水平精度 | 20m | 10m | * |
| 平面系統 | WGS84 經緯度 | WGS84 經緯度 | TWD97 |
| 高程系統 | EGM96 geoid | EMG96 geoid | 正高 |
| 描述表面 | DSM | DSM | DEM |

(*注：參考航空攝影測量數據精度規範詳見§2-4)

在高程系統轉換方面，SRTM 與 TopSAR 使用的是 WGS84 EGM96 geoid，是由 EGM96 地位模式計算全球大地起伏，台灣使用的正高系統也是參考 EGM96 作為長波長部分進行進一步的測量與計算而成[黃金維, 2003]，兩系統的差異應不大，因此將直接進行比對。

經過平面系統轉換與高程系統確認後，將所有資料轉成 XYZ 儲存，以點為單位進行處理，先經過資料空缺濾除的處理將無效值去除，再將高程值為負的高程點移除，由於本實驗區 9520 與 9521 確定區域皆在陸地上，其高程值不應該為負值，而在 TopSAR 資料中有不少高程點為負值。為不影響實驗成果，先將這些明顯的粗差點濾除，高程比對示意圖如圖 3-2-2 所示。

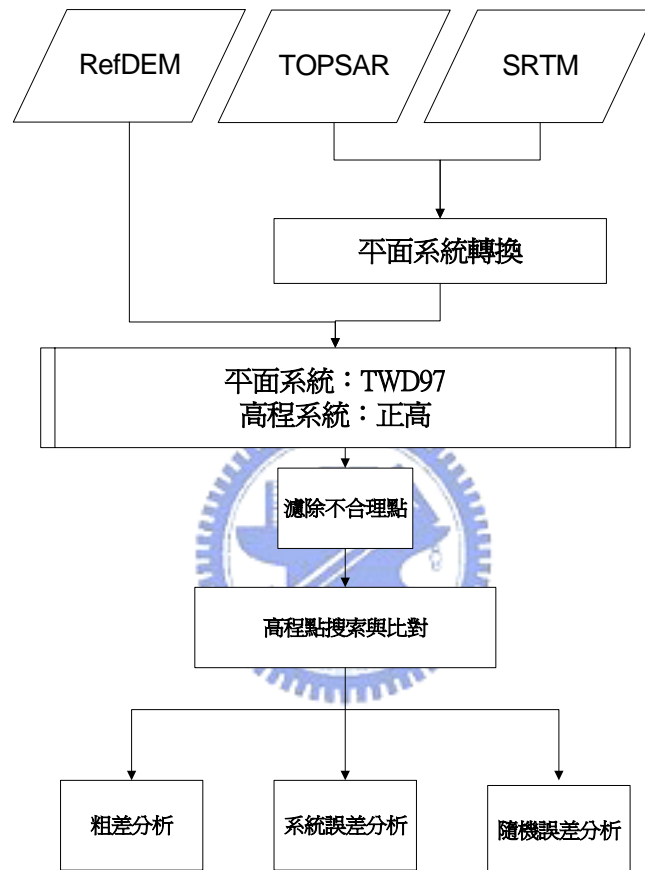


圖 3-2-2：高程比對流程

高程資料比對方式是使用以點為基礎的搜索，先將所有高程資料依照 E 值然後 N 值排序後，再逐點以二分搜尋法於參考高程資料尋找相同點，為減少計算量，以參考資料網格大小作為條件，如圖 3-2-3 所示，亦即若搜尋點在參考點的網格內，視兩者為相同點進行比較，然後輸出參考資料之平面座標與高程差值。本研究如表 3-2-2 依照 DEM 網格間距大小對 SRTM、TopSAR 與參考航空攝影測量數據進行高程比對。

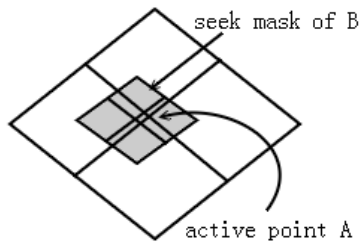


圖 3-2-3：搜索方式

表 3-2-2：高程比對關係

| 簡寫 | 搜尋數據 | 被搜索數據 |
|----------|--------|--------|
| SRTM-Ref | SRTM | RefDEM |
| Ref-TS | RefDEM | TopSAR |
| SRTM-TS | SRTM | TopSAR |

§3-3 視覺比較

圖 3-3-1 與圖 3-3-2 分別為兩實驗區的黑白暈渲圖，皆以 Surfer 軟體[Golden software, 2003]將高程點 XYZ 資料以最小曲率法[Wessel, 1999]內插成五公尺網格繪製而成，圖中可以看出 SRTM 資料受限於原始資料解析度而描述的地形面較為平滑，值得注意的是在山區出現補丁狀的整齊排列，經進一步檢查發現，這些補丁點間格相距約 90 公尺，推測試與 SRTM 的原始點位置由 90 公尺間距內插成 5 公尺網格造成，與最小區率內插法有關。

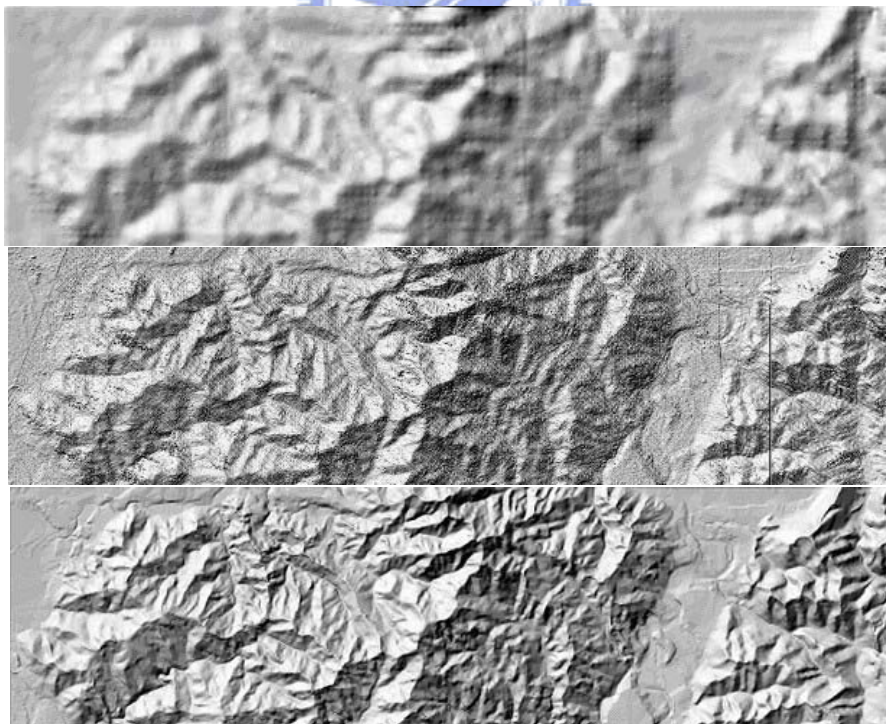


圖 3-3-1：9520 實驗區黑白暈渲圖部分，範圍在(220000, 2631000)、(230000, 2634000)之間，大小約 10km x 3km。由上而下依序為 SRTM、TopSAR、RefDEM。

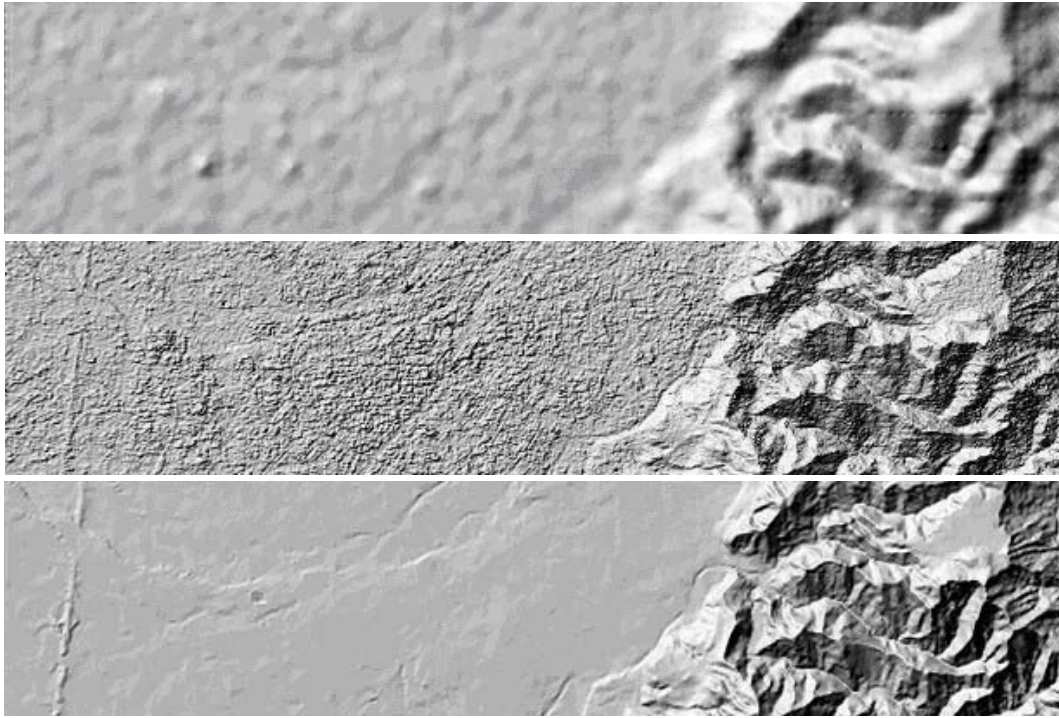


圖 3-3-2：9521 實驗區黑白暈渲圖部分，範圍在(218000, 2632000)、(227000, 2634000)之間。大小為 9km x 2km。由上而下依序為 SRTM、TopSAR、RefDEM。

由於 TopSAR 與 SRTM 主要使用 C 波段的雷達波，觀測面為地物覆蓋表面，亦即 DSM。SRTM 資料由於解析力較低，地物覆蓋情形較難以視覺判讀，而 TopSAR 五公尺資料在圖 3-3-2 中與參考航空攝影測量數據相較，則可明顯看出地物覆蓋，在左半部市區呈現較粗糙的表面，而參考航空攝影測量數據則相對上平滑許多。

這三組資料所描述的趨勢面是一致的，但在山區 TopSAR 資料品質明顯較差，如圖 3-3-1 中 9520 實驗區 TopSAR 資料由視覺觀察下看出。可能原因與山區植被、坡度有關。

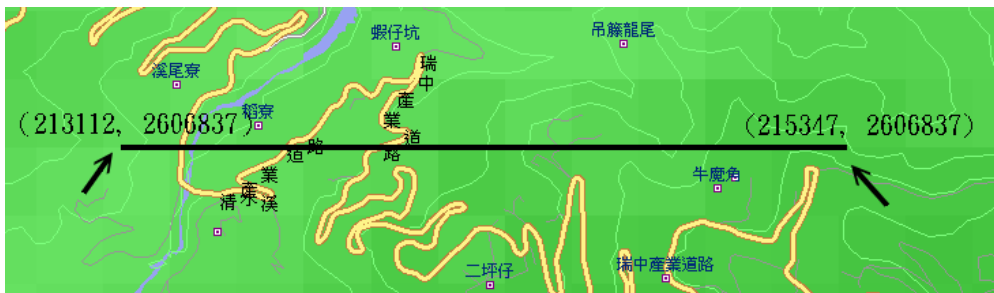


圖 3-3-3：9520 實驗區剖面線位置圖(底圖為 PapaGo 電子地圖)

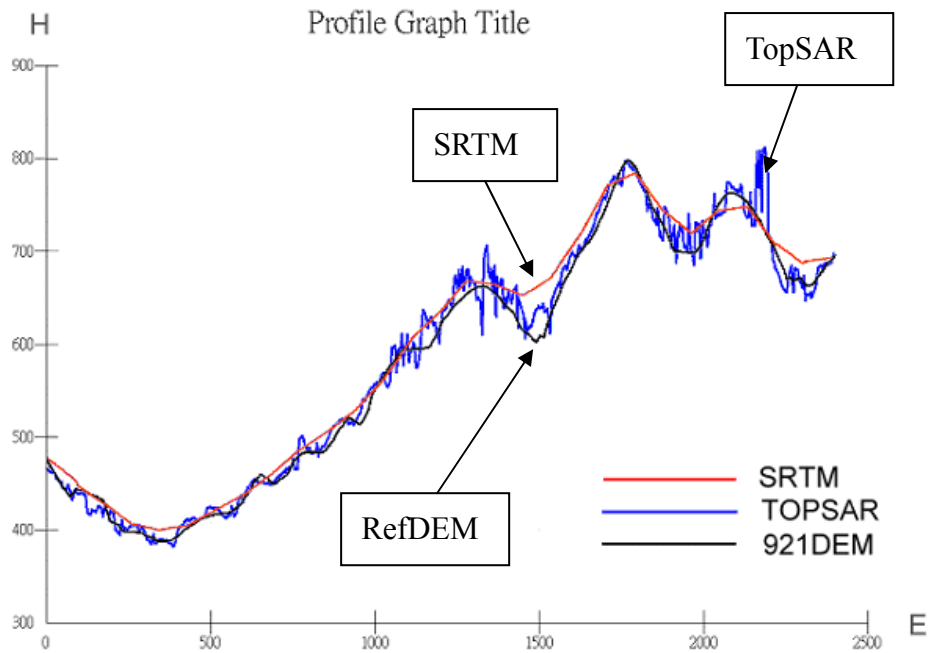


圖 3-3-4：9520 實驗區剖面線圖，起點 (213112, 2606837)，終點(215347, 2606837)

圖 3-3-4 為 9520 實驗區中三組資料組成 TIN 後所擷取的剖面線圖，相關位置圖繪於圖 3-3-3，剖面線圖可以顯示三組資料的特性，TopSAR 資料由於高解析度包含較多的高頻資訊，但許多地形起伏過於急遽的數據未必是正確的地形訊息，震盪情形十分明顯。SRTM 相對於參考資料 RefDEM 由於其取樣頻率之限制而有平滑地表的現象。RefDEM 的剖面線則較為合理。這也是因為 SRTM 與 RefDEM 是經過編修的資料，包含粗差較少，而 TopSAR 資料是自動處理完後直接釋出、未經過編修的原始資料，因此包含許多自動處理造成的粗差與不合理的高程點。

§3-4 精度分析

精度分析中使用四個指標，分別為平均誤差(Mean Error)，平均絕對誤差(Mean Absolute Error, MAE)，均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)與無偏標準差(Standard Deviation, SD)，其定義如下：

1. 平均誤差(Mean Error)； $ME = \frac{\sum d_i}{n}$
2. 平均絕對誤差(MAE)； $MAE = \frac{\sum |d_i|}{n}$
3. 均方根誤差(RMSE)； $RMSE = \frac{\sum d_i^2}{n}$
4. 無偏標準差(SD)； $SD = \frac{\sum (d_i - \mu)^2}{n}$

若差值屬於隨機誤差，則其平均應為零，並且服從常態分布。因此當差值為隨機誤差並屬於常態分佈時，而平均誤差不為零，表示兩個描述面存在著一系統偏差，而將顯現在平均誤差指標上。

平均絕對誤差則可用來與平均誤差對照，顯示差值得正負號分布情形，若平均誤差為零，MAE 為五公尺，則顯示正負誤差的大小一致。若 MAE 與平均誤差一樣，則顯示差值都是同一符號。

均方根誤差為表現精度的常用方法之一，無偏標準差則是扣除掉平均誤差後計算的標準差，不受系統偏差的影響。因此一般來說，RMSE 會比 SD 來的大。

表 3-4-1：9520 實驗區高程比對差值統計(m)

| 9520 實驗區 | Points | Mean Error | MAE | RMSE | SD | Max Error |
|----------|-----------|------------|--------|--------|--------|-----------|
| SRTM-Ref | 88,802 | 4.923 | 7.184 | 10.655 | 9.451 | 139.000 |
| Ts-Ref | 1,670,593 | 4.033 | 10.885 | 25.266 | 24.941 | 1364.800 |
| Ts-SRTM | 157,569 | -0.316 | 12.948 | 28.219 | 28.217 | 901.500 |

表 3-4-2：9521 實驗區高程比對差值統計(m)

| 9521 實驗區 | Points | Mean Error | MAE | RMSE | SD | Max Error |
|----------|---------|------------|-------|-------|-------|-----------|
| SRTM-Ref | 73,267 | 5.188 | 5.817 | 7.839 | 7.579 | 91.740 |
| Ts-Ref | 962,967 | 0.618 | 4.437 | 8.700 | 8.678 | 501.960 |
| Ts-SRTM | 58,167 | -3.457 | 6.667 | 9.185 | 7.035 | -202.200 |

經由比對後 9520 與 9521 實驗區的誤差統計結果分別列於表 3-4-1 與表 3-4-2，經比對發現，SRTM、TopSAR 與 RefDEM 的平均誤差並不為零，顯示 SRTM 與 TopSAR 數據之描述面與參考數據之間存在著系統偏差值，SRTM 與參考數據的偏差值約為 4.923 公尺與 5.188 公尺。TopSAR 則為 4.033 公尺與 0.618 公尺。

SRTM 的描述面明顯普遍高於 RefDEM 約五公尺，可能的因素為高程系統的些許差異造成，或與植批覆蓋的高度有關。以精度來看，9.451 公尺的無偏標準差合乎 NASA-JPL 公佈之 90%信心區間（標準差的 1.6 倍）16 公尺精度。9521 實驗區的精度更佳，其無偏標準差可達 7.579 公尺，換算至 90%信心區間約為 12.126 公尺。

TopSAR 整體數據品質與預期差異較大，在 9520 實驗區其 RMSE 為 25 公尺，9521 實驗區則為 8 公尺，均較資料規範中的 1~5 公尺誤差範圍來的大，在地形陡峭的 9520 實驗區中精度明顯不佳，較平坦地較多的 9521 實驗區的 RMSE 大了將近三倍，最大差值可達 1346 公尺。

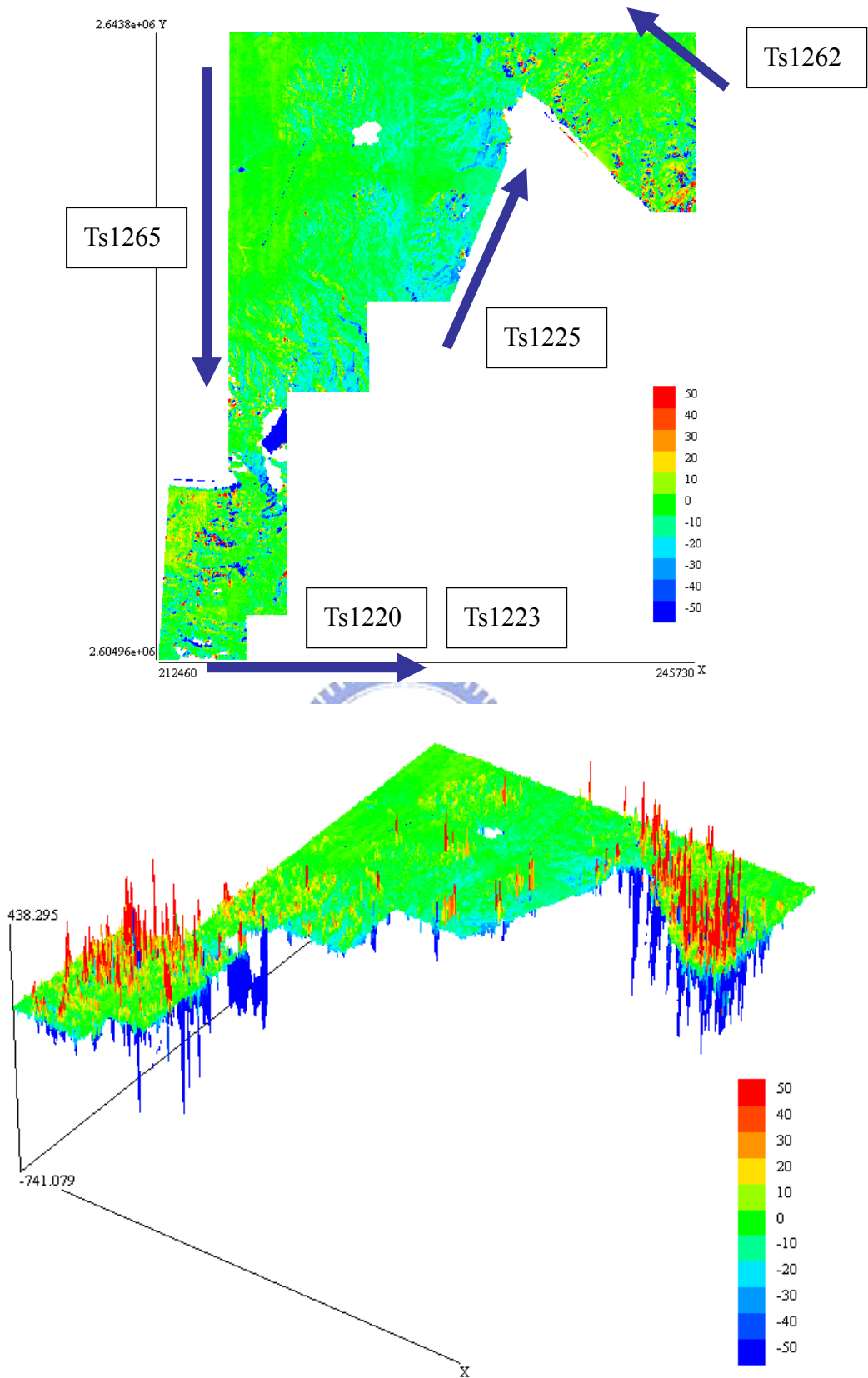


圖 3-4-1：9520 實驗區 TopSAR 差值分佈圖

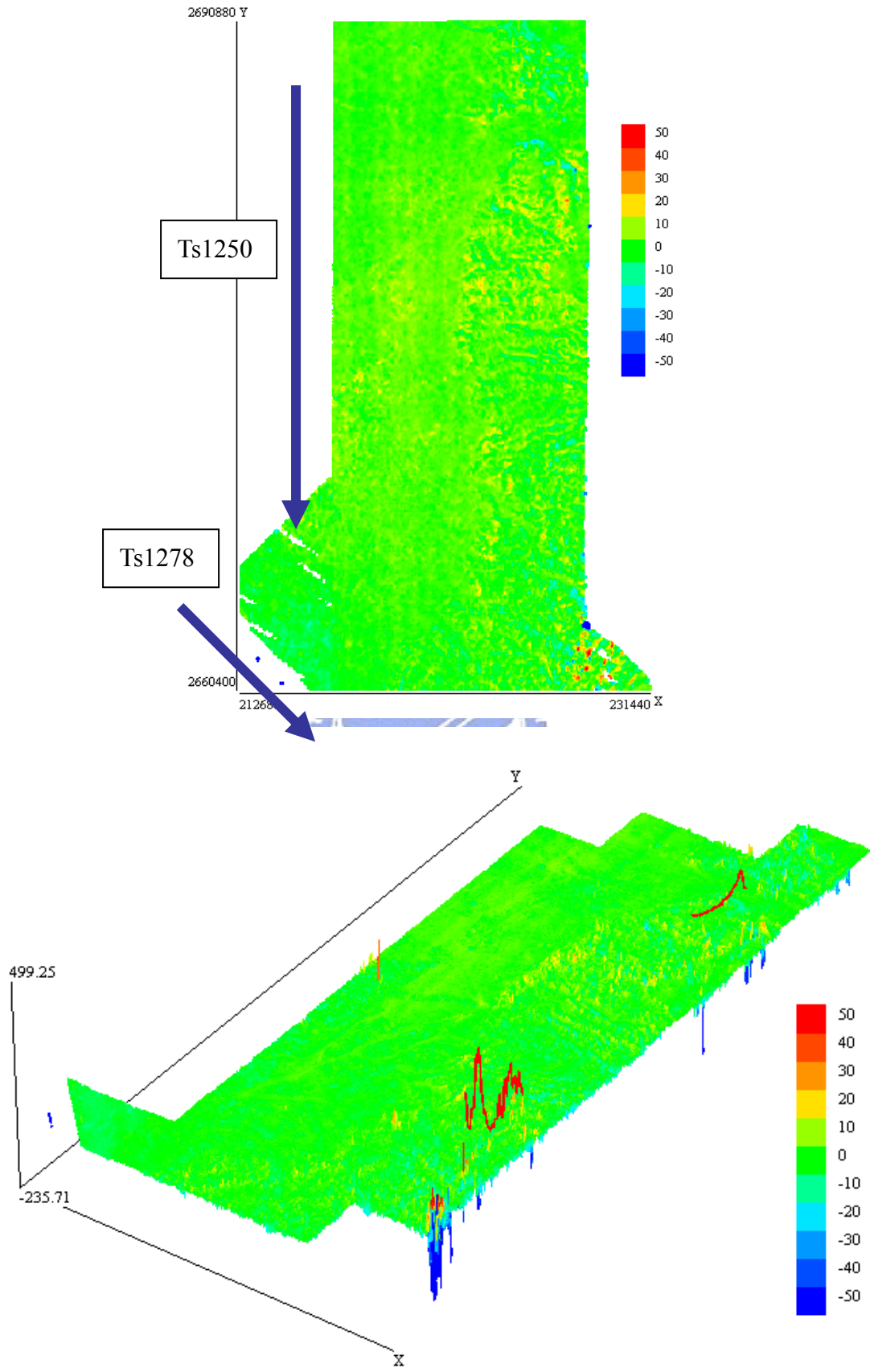


圖 3-4-2 : 9521 實驗區 TopSAR 差值分佈圖

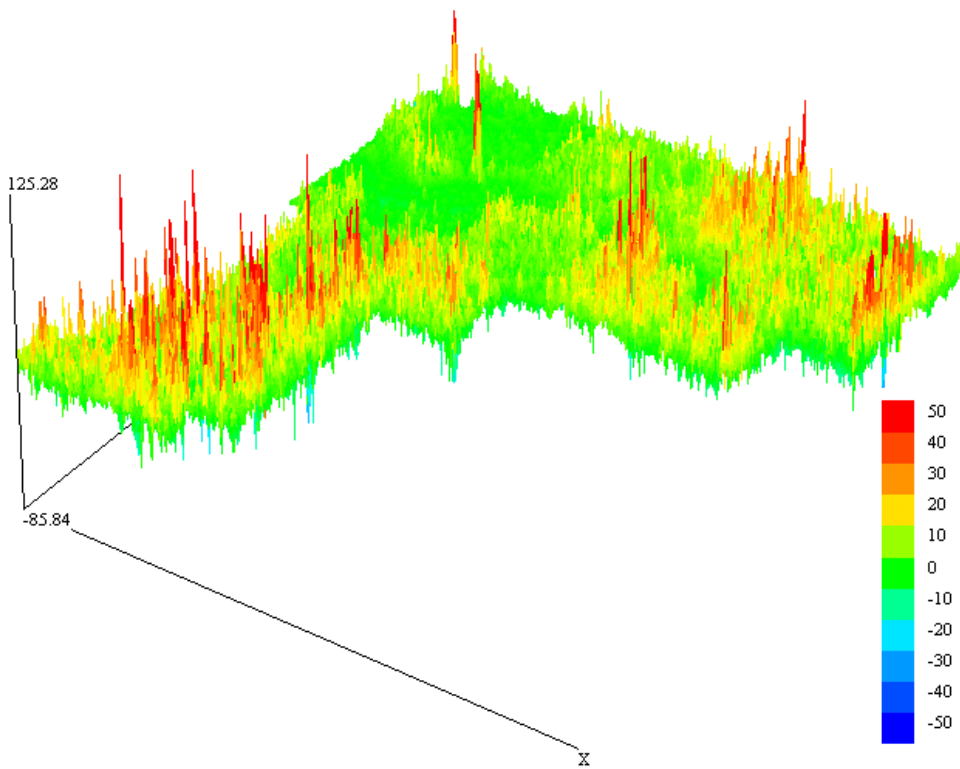
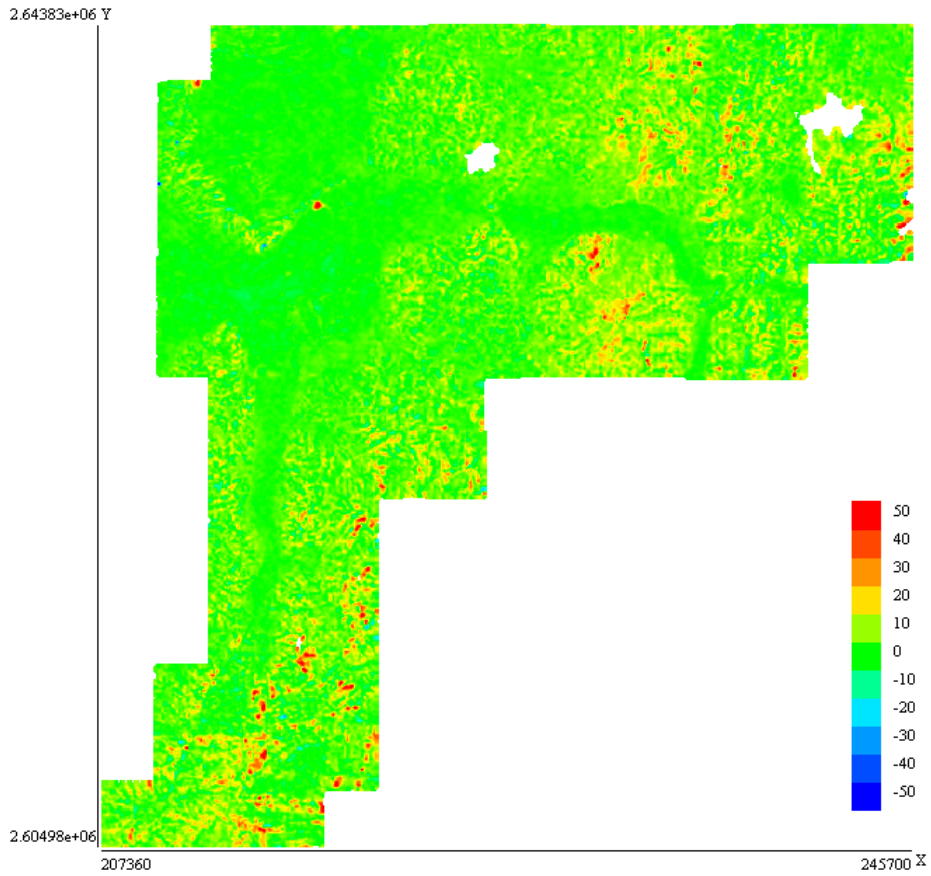


圖 3-4-3：9520 實驗區 SRTM 差值分佈圖

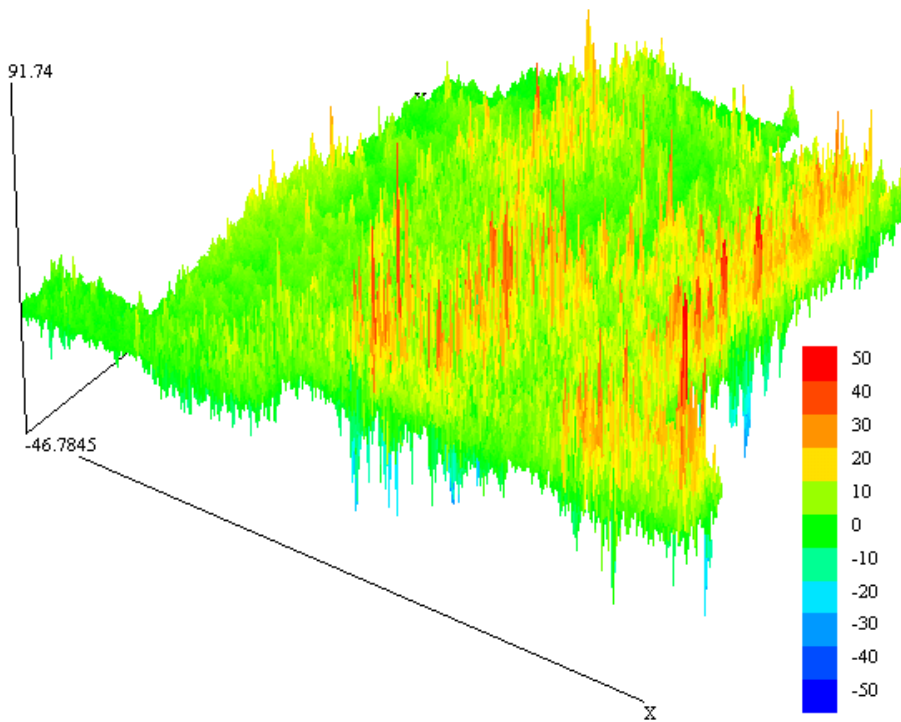
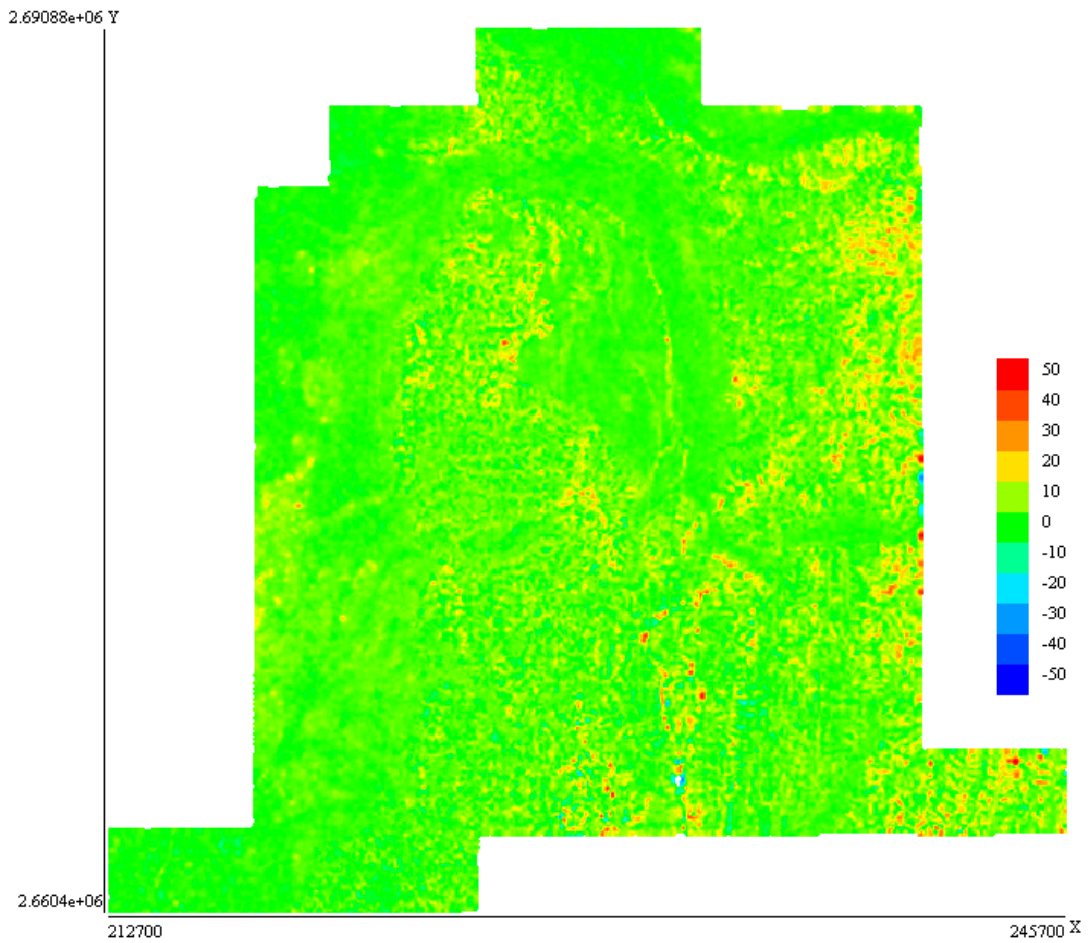


圖 3-4-4：9521 實驗區 SRTM 差值分佈圖

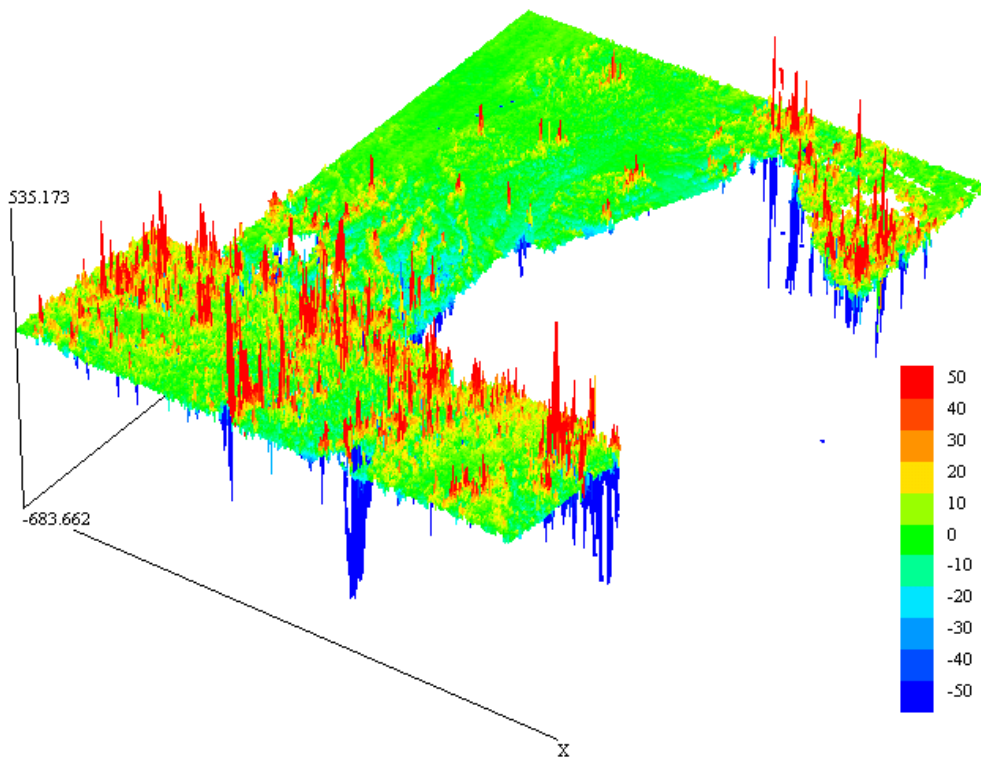
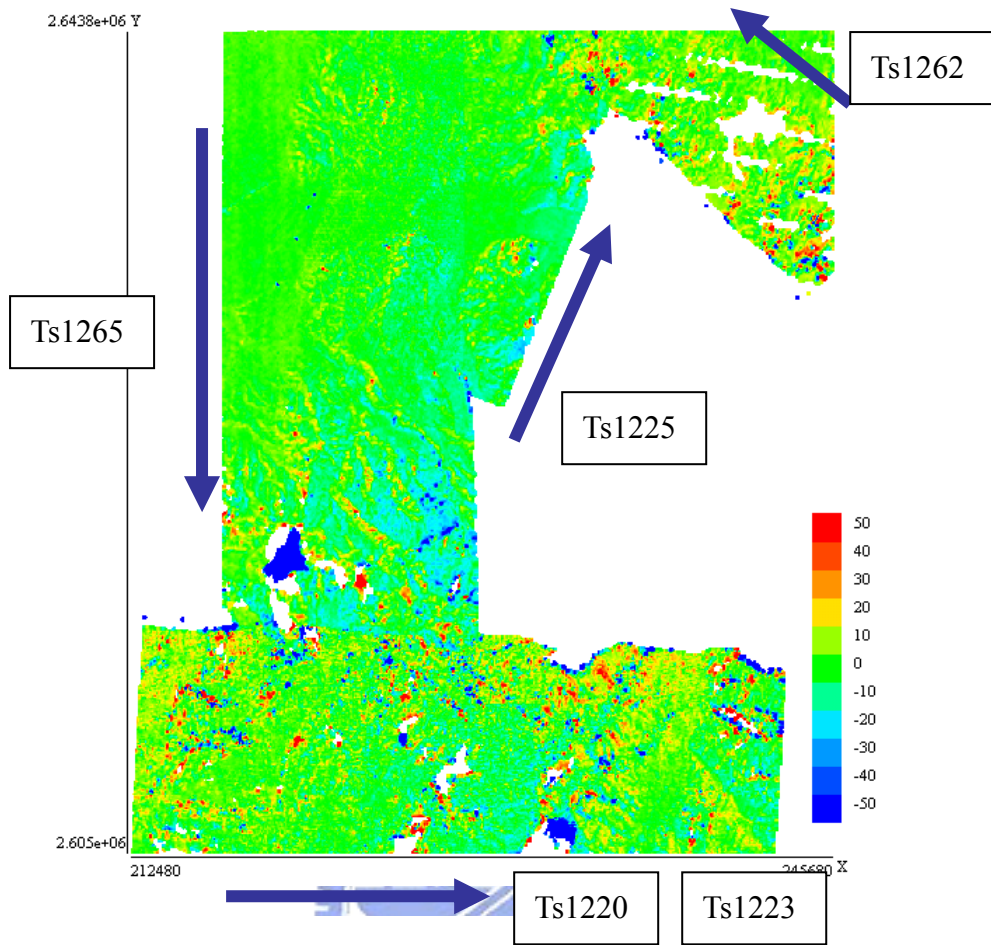


圖 3-4-5：9520 實驗區 TS-SRTM 差值分佈圖

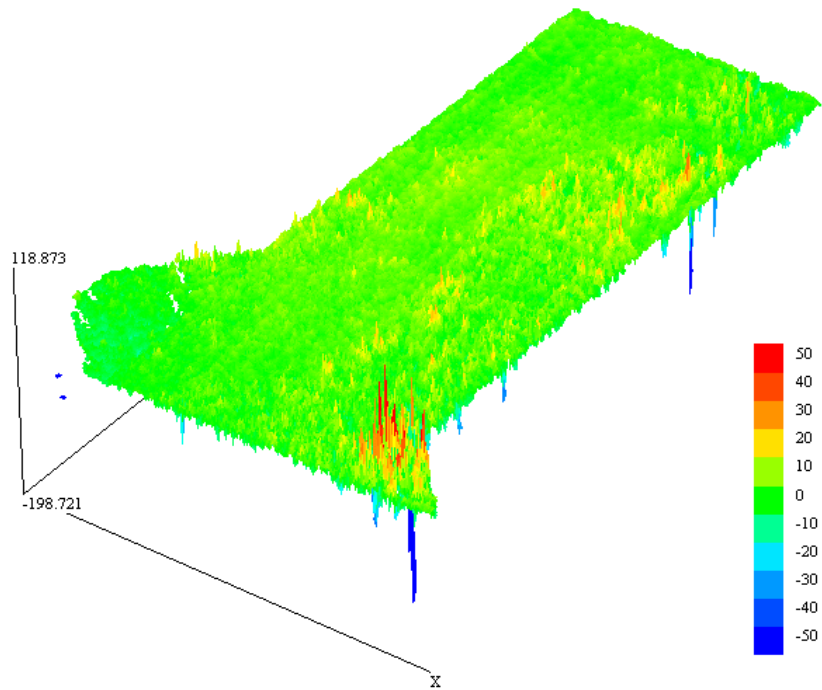
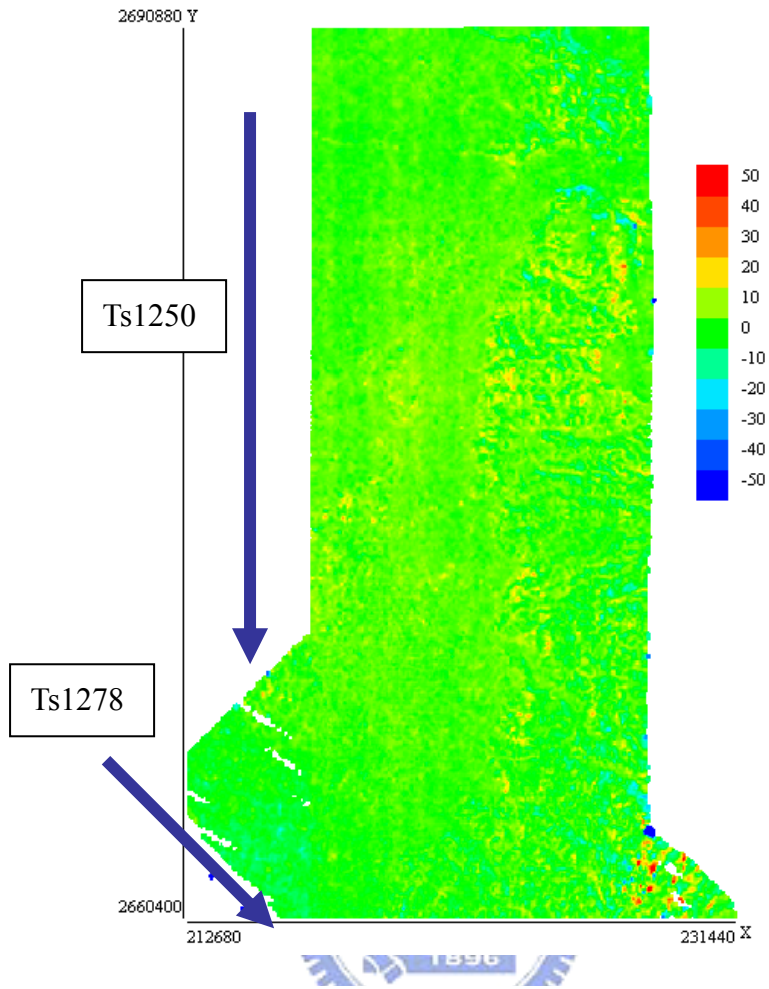


圖 3-4-6：9521 實驗區 TS-SRTM 差值分佈圖

§3-4-1 TopSAR 各幅數據精度分析

分別對每一幅 TopSAR 數據進行比對結果整理於表 3-4-3 與表 3-4-4，總體 TopSAR 數據的差值平均值為 4.033 公尺(9520 實驗區)與 0.618 公尺(9521 實驗區)，而不同幅的 TopSAR 數據其平均誤差也各不相同，從-4.404 公尺到 6.406 公尺不等，顯示不同航帶的數據的系統誤差各異，可能是載台之定位誤差或是粗差影響了平均誤差。各幅數據的最大誤差多在 200 公尺至 500 公尺之間，最大可達 1000 公尺以上。

各幅 TopSAR 數據無偏標準差多介於 6.770 公尺至 32.317 公尺之間，在多山區的 9520 實驗區的無偏標準差則在 13.668 到 32.317 公尺之間，無偏標準差大於 30 公尺的數據有 Ts1220、Ts1223、Ts1262 等三幅。而多平地的 Ts1278c 與 Ts1250c 其無偏標準差則為 6.770 公尺與 9.033 公尺，精度表現明顯較佳，並較接近資料規範的五公尺精度。

表 3-4-3： TopSAR 各數據與 RefDEM 分析統計表(m)

| | Points | Mean Error | MAE | RMSE | SD | Max Error |
|-------------|---------|------------|--------|--------|--------|-----------|
| Ts1220c-Ref | 185,543 | -4.404 | 16.923 | 31.386 | 31.075 | 630.100 |
| Ts1223c-Ref | 187,470 | 5.084 | 14.387 | 31.959 | 31.551 | 752.010 |
| Ts1225c-Ref | 407,779 | 5.067 | 7.963 | 14.577 | 13.668 | 926.890 |
| Ts1262c-Ref | 188,471 | 0.229 | 12.094 | 32.318 | 32.317 | 1364.801 |
| Ts1265c-Ref | 701,330 | 6.406 | 9.722 | 24.139 | 23.273 | 445.040 |
| Ts1250c-Ref | 766,079 | 0.106 | 4.448 | 9.034 | 9.033 | 501.960 |
| Ts1278c-Ref | 196,888 | 2.612 | 4.397 | 7.257 | 6.770 | 243.710 |

而在兩組 InSAR 數據的相互比對中，9520 實驗區 SRTM 數據與總體 TopSAR 數據的差值平均為 0.316 公尺，最大相對差值平均的數據為 Ts1220，達 8.545 公

尺，而最小則為 Ts1225，僅 0.536 公尺。SRTM 的描述面普遍高於 TopSAR 數據，僅 Ts1265 例外。兩組數據的無偏標準差則為 28.217 公尺(9520 實驗區)與 7.035 公尺(9521 實驗區)，在平地的相互比對精度比較高，而山區則明顯較低，在航空攝影測量數據比對下精度較差的幾幅數據如 Ts1220、Ts1223、Ts1262 在相互比對中精度分析同樣較差。

表 3-4-4：TopSAR 各數據與 SRTM 比對統計表(m)

| | Points | Mean Error | MAE | RMSE | SD | Max Error |
|--------------|--------|------------|--------|--------|--------|-----------|
| Ts1220c-SRTM | 33,416 | -8.545 | 18.866 | 34.924 | 33.862 | 555.300 |
| Ts1223c-SRTM | 33,759 | -1.033 | 14.297 | 34.689 | 34.673 | 878.000 |
| Ts1225c-SRTM | 21,294 | -0.536 | 6.860 | 13.530 | 13.520 | 901.500 |
| Ts1262c-SRTM | 9,123 | -6.002 | 14.511 | 32.423 | 31.862 | 581.000 |
| Ts1265c-SRTM | 53,184 | 3.178 | 10.100 | 22.723 | 22.500 | 583.400 |
| Ts1250c-SRTM | 44,521 | -4.146 | 6.079 | 7.706 | 6.496 | 209.200 |
| Ts1278c-SRTM | 13,646 | -1.211 | 4.964 | 8.259 | 8.170 | 202.200 |

§3-4-2 不同坡度精度分析

InSAR 測量成果與施測的地形坡度有密切關係，對不同坡度的 SRTM 與 TopSAR 數據進行分析的成果列於表 3-4-5 與表 3-4-6，結果發現 SRTM 與 TopSAR 數據的精度明顯與坡度有關，SRTM 在越平坦的地形精度最佳，坡度越大則精度愈差。SRTM 在不同實驗區時相同坡度的精度非常一致。

表 3-4-5：SRTM 於不同坡度精度分析(m)

| SRTM | Slope | Points | Mean Error | SD |
|----------|-----------------|--------|------------|---------------|
| 9520 實驗區 | 0~15 degree | 50,863 | 3.510 | <u>6.698</u> |
| | 15~30 degree | 19,293 | 7.523 | <u>11.735</u> |
| | 30 degree above | 122 | 19.986 | 35.111 |
| 9521 實驗區 | 0~15 degree | 54,336 | 4.454 | <u>6.1643</u> |
| | 15~30 degree | 17,220 | 7.608 | <u>10.495</u> |
| | 30 degree above | 76 | 9.930 | 27.039 |

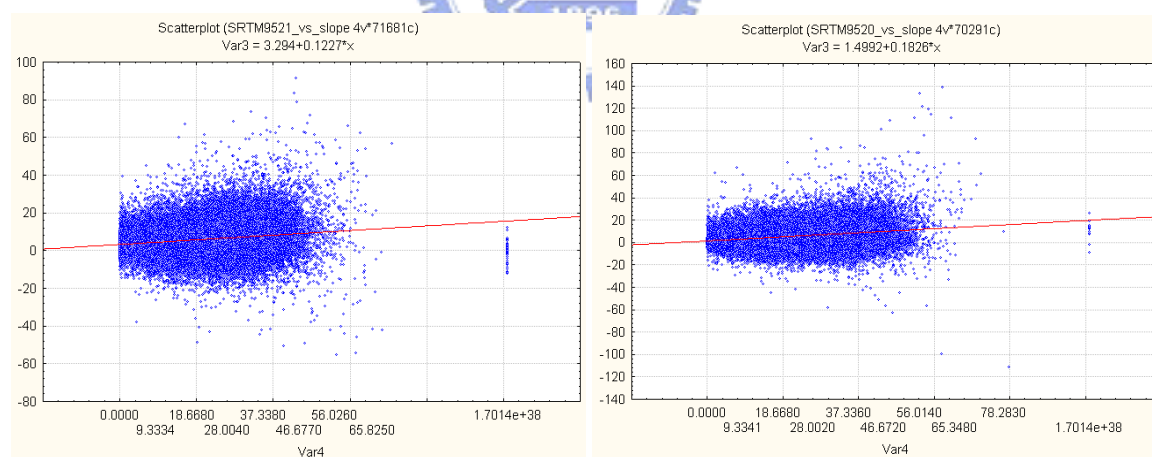


圖 3-4-7：SRTM 誤差與坡度散佈圖，左圖為 9520 實驗區， $R=0.30$ 。右圖為 9521 實驗區， $R=0.22$ 。

TopSAR 數據的精度也呈現相同的趨勢，其誤差隨著坡度而逐漸增大，坡度大於 30 度的高程點之無偏標準差為 100 公尺，顯示坡度較高的高程點包含較多的粗差。即使是在平坦地區，如 9520 實驗區中坡度小於 15 度的高程點其精度為 15.450 公尺，依然無法達到資料規範中的 5m 精度要求。

在坡度超過 30 度的高程點中，其誤差平均亦較大，在 9520 實驗區中為 -17.970 公尺，顯示多為向下的粗差，而 9521 實驗區的粗差則多為向上的粗差。

誤差與坡度的散佈圖繪於圖 3-4-8。在兩實驗區中相同坡度的精度差異依然很大，顯示在兩實驗區中精度表現差異並未完全與坡度有關。

表 3-4-6：TopSAR 數據於不同坡度精度分析(m)

| TopSAR | Slope | Points | Mean Error | SD |
|----------|-----------------|-----------|------------|---------------|
| 9520 實驗區 | 0~15 degree | 1,063,673 | -3.233 | <u>15.450</u> |
| | 15~30 degree | 495,564 | -4.925 | <u>34.235</u> |
| | 30 degree above | 4,714 | -17.970 | 57.930 |
| 9521 實驗區 | 0~15 degree | 828,253 | -0.447 | <u>7.428</u> |
| | 15~30 degree | 120,001 | -1.840 | <u>14.238</u> |
| | 30 degree above | 171 | 15.823 | 100.622 |

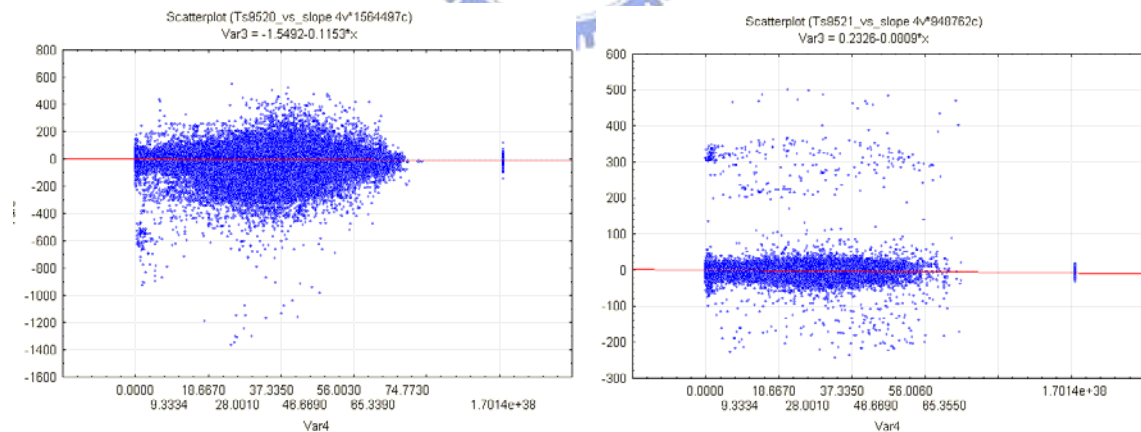


圖 3-4-8：TopSAR 誤差與坡度散佈圖，左圖為 9520 實驗區， $R=0.07$ ，右圖為 9521 實驗區， $R=0.11$ 。

§3-5 粗差分析

經上節比對後發現 TopSAR 資料相較其他兩組資料含有大量粗差，而最大差值可達 1000 公尺以上。由於 TopSAR 系統的系統精度規範為 1~5 公尺，而在上節分析中 TopSAR 資料包含大量 100 公尺以上的殘差，這些殘差不應被視為隨機誤差的集合，而需以粗差看待。

為剔除粗差的影響，以差值得三倍無偏標準差作為剔除粗差的門檻，將差值在 99.7%信心區間外視為粗差，剔除粗差後之統計表列於表 3-5-1 與表 3-5-2，TopSAR 平均誤差變動不大，而 9520 實驗區的無偏標準差由 24.941 公尺降為 12.383 公尺，與林紀綱[2003]在高山區檢驗的 10~15 公尺的隨機誤差相符，對於平地較多的 9521 實驗區則粗差對標準差影響較小，因為其粗差發生比率僅為 9520 實驗區之四分之一左右，粗差濾除後可達 5.603 公尺的精度，已經優於 SRTM 的精度。

由粗差比來看，取三倍中誤差應會濾除 0.3%的高程點，然而在地勢陡峭的 9520 實驗區中濾除率皆在 1.35%至 1.40%之間，為期望值 4.5 倍，除了在地勢平緩的 9521 實驗區 TopSAR 粗差比率較低外，其餘兩者都在 1.4%以上。

表 3-5-1：9520 實驗區移除粗差後差值統計表(m)

| 9520 實驗區 | Points | Mean Error | SD | Filt.Points | Filt. Ratio |
|----------|-----------|------------|--------|-------------|-------------|
| SRTM-Ref | 87,536 | 4.481 | 7.997 | 1,266 | 1.425% |
| Ts-Ref | 1,647,462 | 2.786 | 12.383 | 23,131 | 1.385% |
| TS-SRTM | 155,437 | -1.339 | 15.211 | 2,132 | 1.353% |

表 3-5-2：9521 實驗區移除粗差後差值統計表(m)

| 9521 實驗區 | Points | Mean Error | SD | Filt.Points | Filt. Ratio |
|----------|---------|------------|-------|-------------|-------------|
| SRTM-Ref | 72,171 | 4.902 | 6.575 | 1,096 | 1.496% |
| Ts-Ref | 958,938 | 0.636 | 5.603 | 4,029 | 0.418% |
| TS-SRTM | 56,988 | -3.145 | 5.835 | 1,179 | 2.027% |

經由粗差濾除的高程點之部分與 RefDEM 組成的 TIN 套疊之後顯示於圖 3-5-1 與圖 3-5-2，可以發現 SRTM 與航空攝影測量數據的粗差發生大多在地形變動較劇烈的地方，由與取樣頻率不足導致較大的差值。TopSAR 資料在同樣在山區容易有粗差發生，而更傾向包含一些系統誤差，如圖 3-4-7 左邊一排黃色點皆是高程差值達 100 公尺以上的高程點組成。在 9521 實驗區左邊的平坦區包含部分台中市區，擁有較多的地物覆蓋，這些粗差也可能是描述面不同引起。

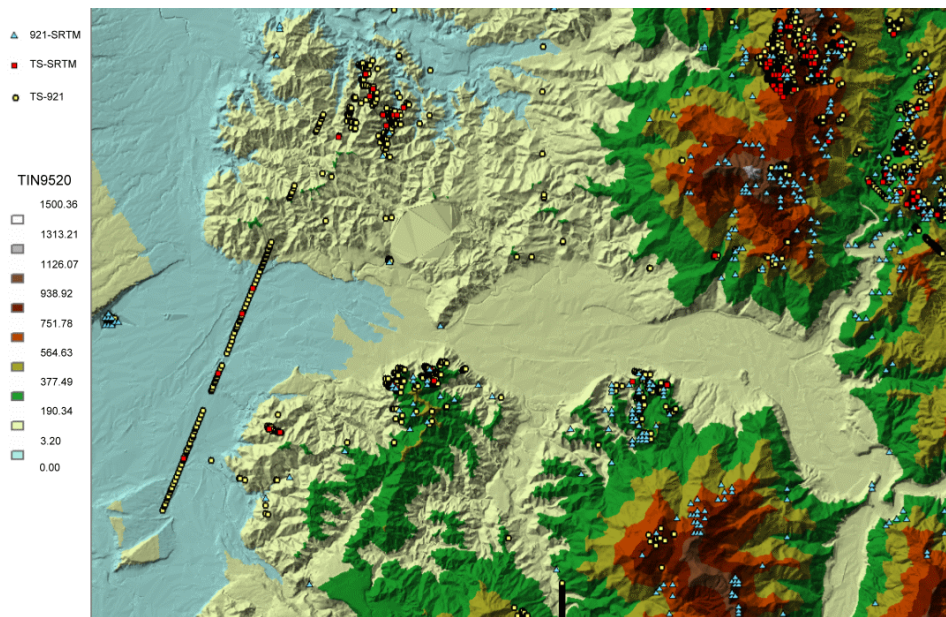


圖 3-5-1：9520 粗差分佈圖部分，在(217201, 2643232) (238634, 2627821)之間

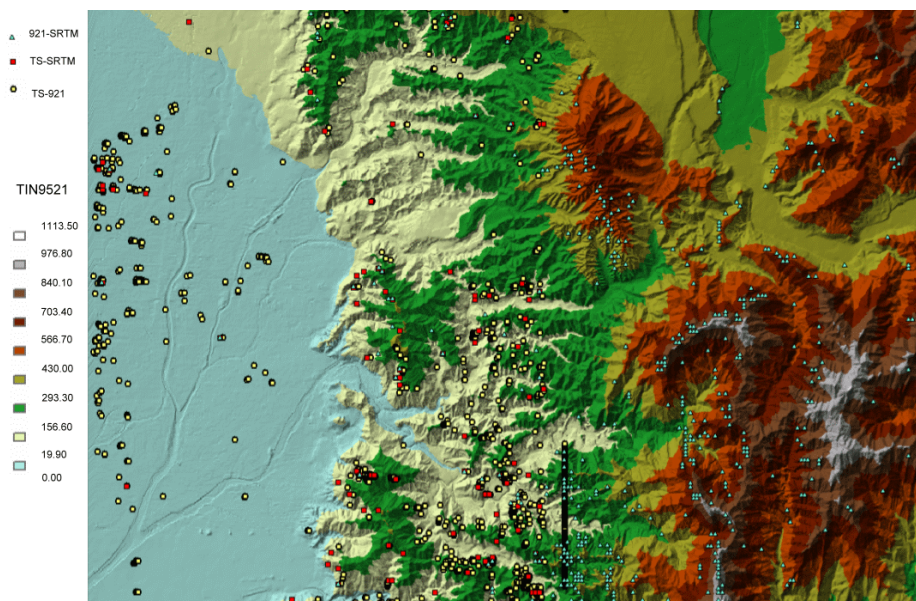


圖 3-5-2：9521 粗差分佈圖部分，在(217658, 2678390) (237507, 2664240)之間

§3-5-1 各幅 TopSAR 粗差分析

對各幅 TopSAR 數據分別進行分析，發現濾除率與精度有直接的關係，濾除率較高的數據其精度通常較差，三幅粗差比在 1.5% 以上的數據其精度都差於 30 公尺，濾除後也在精度 15 公尺以上。大致上以 SRTM 做為參考時濾除率均較表 3-5-3 為高，如 Ts1223 其濾除比可達 5.083%，Ts1262、Ts1265、Ts1250 均在 2% 以上。

表 3-5-3：TopSAR 各幅數據粗差移除後差值統計表(m)

| 9520 實驗區 | Points | Mean Error | SD | Filt.Points | Filt. Ratio |
|-------------|---------|------------|--------|-------------|-------------|
| Ts1220c-Ref | 181,948 | -4.558 | 19.140 | 3,595 | 1.938% |
| Ts1223c-Ref | 183,727 | 3.456 | 17.145 | 3,743 | 1.997% |
| Ts1225c-Ref | 404,145 | 4.807 | 8.522 | 3,634 | 0.891% |
| Ts1262c-Ref | 185,466 | -1.080 | 15.358 | 3,005 | 1.594% |
| Ts1265c-Ref | 693,505 | 4.444 | 9.685 | 7,825 | 1.116% |
| Ts1250c-Ref | 763,350 | 0.177 | 5.697 | 2,729 | 0.356% |
| Ts1278c-Ref | 195,169 | 2.429 | 4.807 | 1,719 | 0.873% |

表 3-5-4：TopSAR 相對於 SRTM 比對粗差移除後差值統計表(m)

| 9521 實驗區 | Points | Mean Error | SD | Filt.Points | Filt. Ratio |
|--------------|--------|------------|--------|-------------|-------------|
| Ts1220c-SRTM | 32,812 | -9.518 | 18.799 | 604 | 1.808% |
| Ts1223c-SRTM | 32,043 | -1.087 | 12.035 | 1,716 | 5.083% |
| Ts1225c-SRTM | 21,273 | -0.585 | 9.326 | 21 | 0.099% |
| Ts1262c-SRTM | 8,891 | -6.903 | 13.469 | 232 | 2.543% |
| Ts1265c-SRTM | 52,070 | 1.719 | 10.731 | 1,114 | 2.095% |
| Ts1250c-SRTM | 43,074 | -3.693 | 5.544 | 1,447 | 3.250% |
| Ts1278c-SRTM | 13,471 | -1.021 | 5.953 | 175 | 1.282% |

§3-5-2 不同坡向與粗差統計

對粗差發生所在坡向進行統計顯示出 TopSAR 數據的粗差明顯集中在幾個坡向之間，其統計直方圖繪於圖 3-5-3，對照觀測路徑後發現粗差都位在相對於觀測方向的背向坡，如 Ts1220 的粗差大量集中在 315 度至 45 度的北向坡中。Ts1262 則多集中在 180 度至 315 度之間，以西南坡較多。

SRTM 粗差與 TopSAR 相比較無顯明集中的情形，但在兩實驗區中顯示出相同的趨勢，皆集中在西向坡，約為 225 度至 360 度之間。

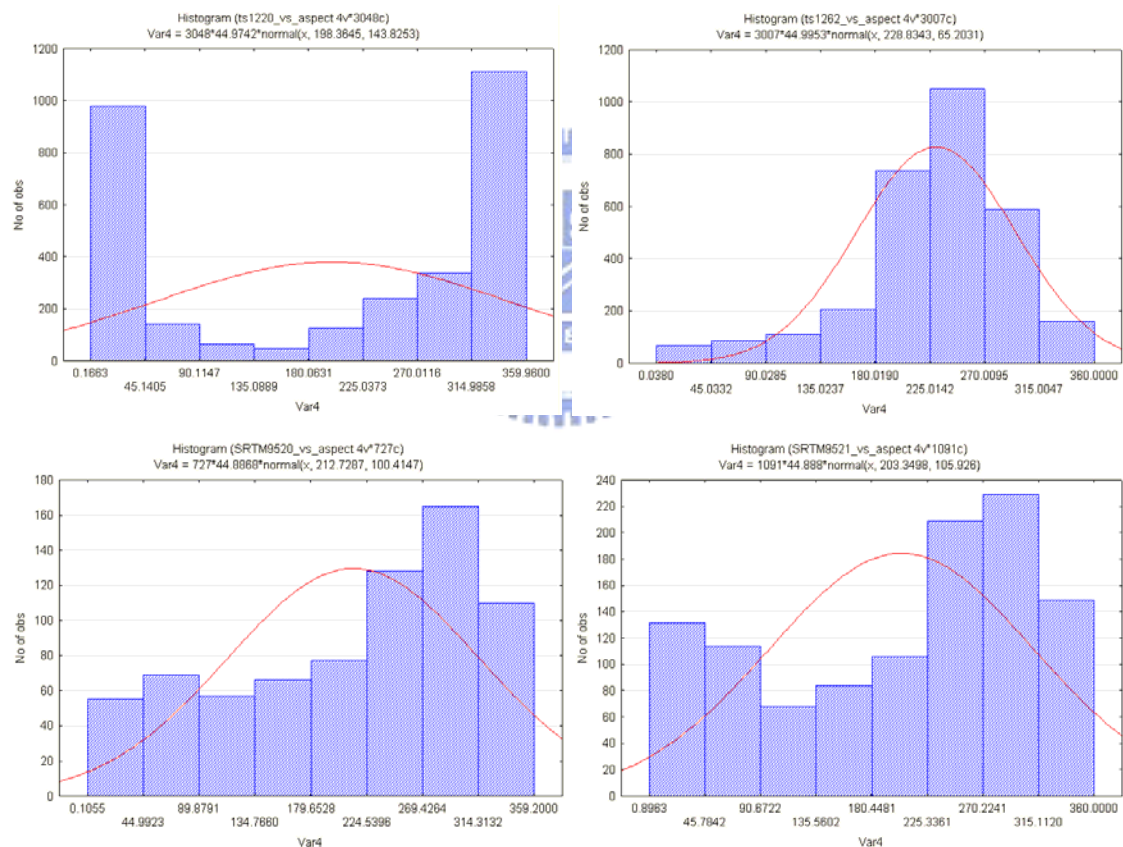


圖 3-5-4：粗差發生所在坡向的統計直方圖，從左上、右上、左下、右下依序為 Ts1220、Ts1262、9520 實驗區 SRTM、9521 實驗區 SRTM

套疊粗差點發生與坡向圖於圖 3-5-4，有利於更清楚看出粗差發生位置與飛行方向之關係。如圖 3-5-4 下方 Ts1220 粗差多集中在西北坡與北坡，而 Ts1262 則集中在西南坡與西坡上，皆位於飛行航線的背向坡上，是因為背向坡的回訊較弱，因此計算高程時容易發生錯誤。

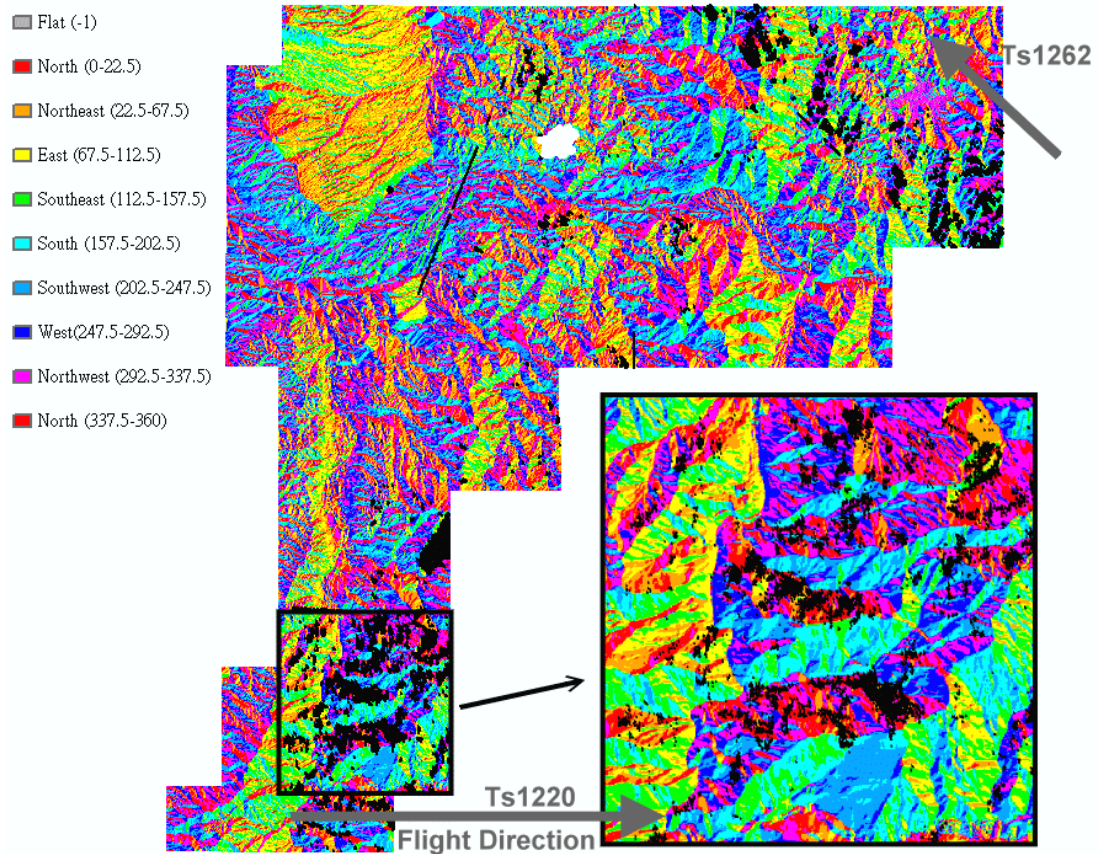


圖 3-5-4：TopSAR 資料粗差發生與坡向關係

§3-6 小結

臺灣地區 SRTM 成果經航空攝影測量數據比對後無偏標準差在多山地區為 9.451 公尺，平坦地區為 7.579 公尺，符合 NASA 公佈的資料規範精度。而空載 TopSAR 數據則包含大量粗差，若不經過粗差偵測和編修，無法達到 NASA 公佈之 1~5 公尺精度，在粗差移除後平坦地區的無偏標準差約在 5.603 公尺左右，山區則為 12.383 公尺。SRTM 與 TopSAR 的差值平均並不明顯，SRTM 的平均誤差為 5 公尺左右，可能是由地物覆蓋與高程基準差異造成。TopSAR 各幅數據的差值平均各不相同，分佈在-4 公尺至 6 公尺之間，而 SRTM 與 TopSAR 的相對平均誤差在 9520 實驗區僅為 0.316 公尺，而 9521 實驗區有較大差異。

SRTM 資料經過編修資料品質較為一致，主要誤差來源是由於取樣頻率較低而對地表面之描述力不足導致，在 90 公尺的 SRTM 資料中因是由 30 公尺的資料平均得，數據粗差不若 TopSAR 資料嚴重，其發生比率與大小也較低。

空載 TopSAR 成果由於未經編修，包含許多明顯的粗差點，明顯的粗差如陸地上許多為 0 或負的高程點與數百公尺的差值。由差值分佈來看，差值較大的正差值附近常伴隨著數量與差值相近的負差值發生，應與雷達影像的疊置效應 (layover effect) 造成山頂平面位置錯移有關。位於背向坡的回訊較弱、陡坡的雷達影像幾何較差，將造成計算錯誤導致大量粗差的產生。實驗也顯示隨著坡度越陡峭則 InSAR 精度會越差。

比對結果顯示在台灣地區測定的 TopSAR 數據精度無法達到 Masdsen [1995] 在加州沙漠區實驗所得的兩公尺精度，並認為 NASA 公佈 1~5 公尺的高程精度對臺灣多山地區的資料而言實際上是過份樂觀了。使用者也必須考量到 InSAR 觀測的表面是 DSM，直接當成 DEM 來使用是有問題的，需經進一步地物濾除演算法的處理才能使用。

第四章 多尺度分析原理

§4-1 尺度、頻率與解析度

尺度的意涵包括了空間範圍涵蓋與描述精細程度，尺度亦定義了觀測方式的極限與限制，例如像元大小、網格解析度、最小可分辨地物與最小製圖單元等，對多數製圖者而言，尺度僅是紙圖與現實世界的一個比例，現在對於尺度的概念大多由紙圖時的概念延續下來，亦常稱為比例尺或地理尺度。較低尺度意味著較少細節，適合用來觀察大範圍的趨勢，而較高尺度則是包含較多的細節，用來觀察細微的變動。而在數值資料中多以像元大小或網格解析力來描述尺度 [Quattrochi et al, 1997]。本文研究主題數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)亦屬此類。DEM可以視為一種廣義的二維訊號。Woods[1996]認為DEM是以一組連續平滑的空間函數來描述地形，Burrough則定義DEM是為僅包含高程資料的矩陣資料[Woods, 1996]，李志林[1999]解釋了DEM是利用一個任意座標系中大量已知的XYZ座標點對地形面的一個簡單的統計描述。

測量產生的空間資料，常常會依照不同的製圖需求產生不同尺度的資料，縮編(generalization)是空間資料多尺度表達的重要內涵[Fan, 2001]。由於地形分析對於地形資料的解析度非常敏感，不同尺度的資料會使分析結果相異，在進行集水區研究時更為明顯，由相鄰網格計算水系網，不同網格大小會有不同的結果。經由不同的測量方法也可以獲取不同尺度的資料，這些方法對地表進行不同頻率的取樣，對網格資料來說，取樣頻率即為網格解析度大小，每個網格代表對地表的一個取樣點。依照取樣理論，對某一個函數以間隔DX進行取樣，則函數高於 $\frac{1}{2}DX$ 的頻率部分將會喪失[李志林等。1999]，亦即取樣點對地形面的描述的頻率是受到網格解析度的限制。

廣泛使用的網格資料產製過程中必須經過內插處理，在使用資料的同時原始

的採樣頻率通常未知，網格資料所能表達的最高頻率受限於網格解析度的大小，地形訊號的頻率成分應與原始取樣點密度有關，但所描述的地形面起伏崎嶇之程度依然主宰了頻率成分的主要構成，多尺度分析能對這些性質提供一個描述的方法。本章以下簡介多尺度分析之原理。

§4-2 多尺度空間

許多自然界的訊號具有多重尺度特徵，如地形資料，由遠至近多種不同觀察方式所見皆有不同，在頻率的觀點來看，這些訊號並非是單一頻率組成，而是由低至高許許多多不同頻率所組成的訊號[黃國良，2001]，在多尺度分析中，則是將資料以不同尺度的近似函數來表達，並在不同尺度下對資料的性質進行分析。

假設一組訊號 $f(x)$ 以展開函數的線性組合表示則如公式(4-1)：

$$f(x) = \sum_k \alpha_k \varphi_k(x) \dots\dots(4-1)$$

k 為整數的集合，可以為有限或無限， $\varphi_k(x)$ 稱為展開函數，若對於已知的 $f(x)$ 其 α_k 的組合是唯一的，則稱 $\varphi_k(x)$ 為基底函數，該基底可以表達的函數集合形成一函數空間，亦稱封閉延展(closed span)，可寫成[Gonzales et al, 2001]：

$$V = \overline{\text{Span}_k \{\varphi_k(k)\}} \dots\dots(4-2)$$

在多尺度分析的理論中，以各種具有有限能量的訊號在一定尺度 j 下的尺度函數所組成的集合，稱為近似空間(Approximation Space)，以 V_j 表示，其定義如下，

$$V_j = \{\alpha_j \varphi \mid \forall \varphi \in L^2(R)\} \subset L^2(R) \dots\dots(4-3)$$

式中 $L^2(R) = \left\{ f \mid \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx < \infty \right\}$ ，是具有有限能量的訊號函數 f 的集合，而

在連續兩個相鄰的尺度 j 與 $j+1$ 的近似空間 V_j 與 V_{j+1} 中之間，存在一細節空間(Detail Space) W_i 。 W_i 是 V_j 與 V_{j+1} 相對應的兩個近似函數之殘差所形成的集合，表現訊號的高頻分量，如此， W_i 是 V_j 在 V_{j+1} 裏的正交補集合(orthogonal complement)，如公式(4-4)與(4-5)：

$$V_j \oplus W_j = V_{j+1} \dots\dots (4-4)$$

$$V_j \cap W_j = \{0\} \dots\dots (4-5)$$

因此多尺度分析是在建立在一系列的近似子空間中，而上層尺度的近似的完全包含下層尺度的近似空間，亦即較細解析度的近似函數 $\alpha_{j+1}\varphi$ 包含了較粗解析度的近似函數 $\alpha_j\varphi$ 的所有資訊，如圖 4-2-1 所示。依照多尺度分析理論，可知一自然訊號 $f(x)$ 可由所有尺度的細節分量加總而成，如公式 4-6：

$$L^2(\mathbb{R}) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \oplus W_j = \dots\dots \oplus W_{-2} \oplus W_{-1} \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus W_2 \dots\dots (4-6)$$

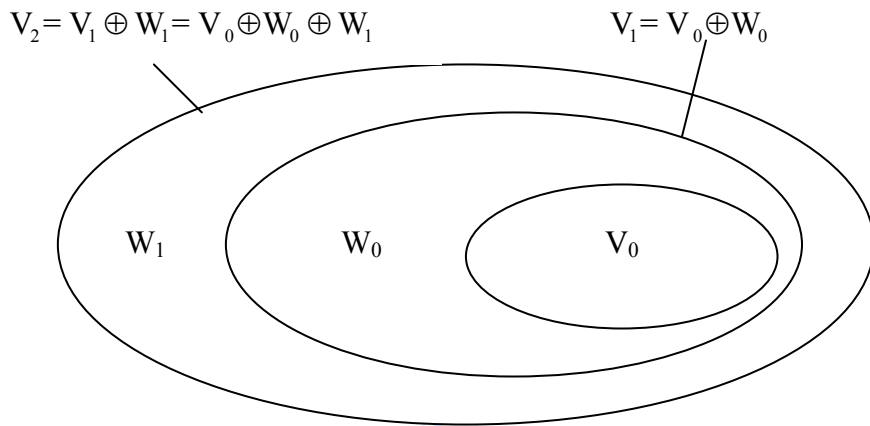


圖 4-2-1：多尺度空間示意圖

以上可知多尺度分析是建立在一連串的封閉子空間 $V_j \subset L^2(\mathbb{R})$ 中，其中 $j \in \mathbb{Z}$ ，並有以下幾個性質[Kaleva et al, 2000]：

1. 對所有 $j \in \mathbb{Z}$ ，其 $V_j \subset V_{j+1}$
2. 對所有 $j \in \mathbb{Z}$ ，其 $f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j+1}$
3. $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}$ 並且 $\overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j} = L^2(\mathbb{R})$
4. 存在著一個 $\varphi \in V_0$ 以致於 $\{\varphi(x-k) | k \in \mathbb{Z}\}$ 是 V_0 的一個正交基底

§4-3 小波分析

法國科學家Morlet 1980年在進行地震分析時首次提出小波理論的構想，Mallat於1987年首度結合結合子頻帶編碼(Subband Coding)、影像金字塔(Image pyramid)與四鏡相濾波器(quadrature mirror filter, QMFs)提出多尺度分析理論(Multiresolution Analysis, MRA)，以多個以上的解析度進行分析與表示[Gonzales et al, 2001]。多尺度分析的優點是利用不同尺度的分解來讓在特定尺度下無法顯現的特徵可以在另一個尺度觀測到。小波具有多尺度與時頻分析能力，透過不同頻率來分析訊號的特性，已經成功的應用在訊號分析與影像壓縮相關領域上。

在傅立葉轉換中雖然有良好的頻率解析度並能夠做整體頻率域的描述，卻無法知道頻率發生的位置(localization)，因為傅立葉轉換所用的基底函數 sin 與 cos 存在於整個時間域中，在轉換過程中喪失時間的資訊。

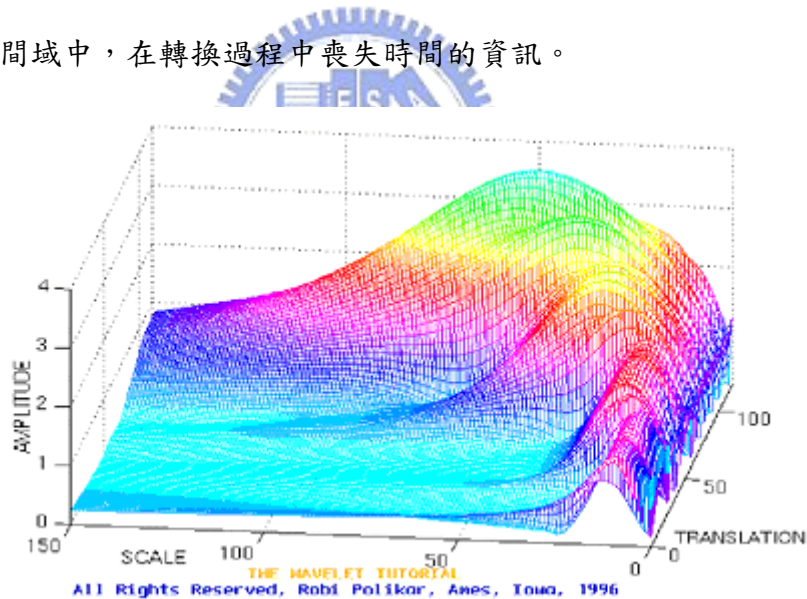


圖 4-3-1：時頻域表示[Polikar, 2001]，由 5hz, 10hz, 20hz, 30hz 組成

而小波利用有限承載的小波基底函數對訊號進行摺積，可以同時描述發生的頻率與位置，稱為時頻分析(Time Frequency Analysis)，如圖 4-3-1 能對高頻提供良好的時間解析度與較差的頻率解析度，對低頻提供良好的頻率解析度與較差的時間解析度。

§4-3-1 連續小波轉換

連續小波轉換的定義如公式(4-7)[Polikar, 2001]：

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \Psi_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \dots (4-7)$$

式中 τ 為平移參數， s 為尺度參數，定義為頻率倒數，這兩個參數用來描述不同尺度與不同位置的小波。逆轉換如公式(4-8)。

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi^2} \int_s \int_\tau \Psi_x^\psi(\tau, s) \frac{1}{s^2} \psi \left(\frac{t-\tau}{s} \right) d\tau ds \dots (4-8)$$

C_ψ 稱為可逆常數(the admissibility constant)，需滿足公式(4-9)則連續小波轉換可逆：

$$C_\psi = \left\{ 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega \right\}^{1/2} < \infty \dots (4-9)$$

$\psi^*(t)$ 稱為母函數，必須要滿足以下三個條件：

1. 有限承載，指小波在一定區間外之值為零。
2. 有限能量，小波函數對時間積分的平方和需為有限。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \dots (4-10)$$

3. 平均值為零，亦即小波函數為一擺動(oscillatory)函數。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \dots (4-11)$$

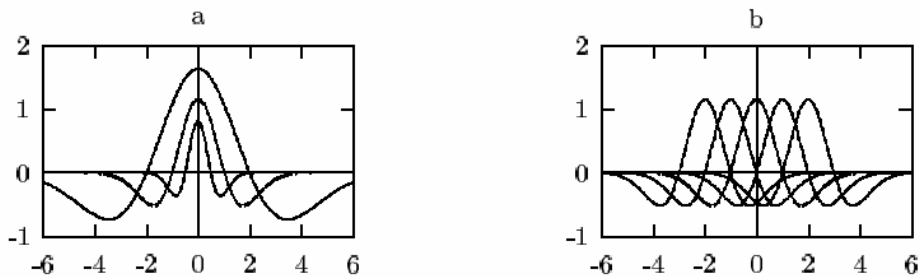


圖 4-3-2：墨西哥帽小波函數的擴張與平移[Zatelli, 2002]

以墨西哥帽小波為例，該函數是由高斯函數經由二次微分得到，滿足公式(4-9)與(4-10)，圖 4-3-2 為墨西哥帽小波函數的擴張(尺度變換)與平移情況。

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s^3}} \left(e^{-\frac{t^2}{2s^2}} \left(\frac{t^2}{s^2} - 1 \right) \right) \dots\dots(4-12)$$

§4-3-2 快速小波轉換

快速小波轉換(FWT)利用子頻帶編碼技術將一個影像分解成一組有限頻寬的高低頻分量，稱為子頻帶， $h_0(n)$ 、 $h_1(n)$ 為一組分解篩檢程式， $g_0(n)$ 與 $g_1(n)$ 則為一組合成篩檢程式，每個子頻帶是由一組帶通篩檢程式產生，並經減少取樣儲存成低頻係數與高頻係數，如圖 4-3-3，原始訊號 $x(n)$ 經過子頻帶分解後要能夠完美的重建，亦即 $x'(n)=x(n)$ ，則篩檢程式組需滿足特定條件。在經過增加取樣每個子頻帶加總而不會有資訊喪失[Gonzales et al, 2001]。

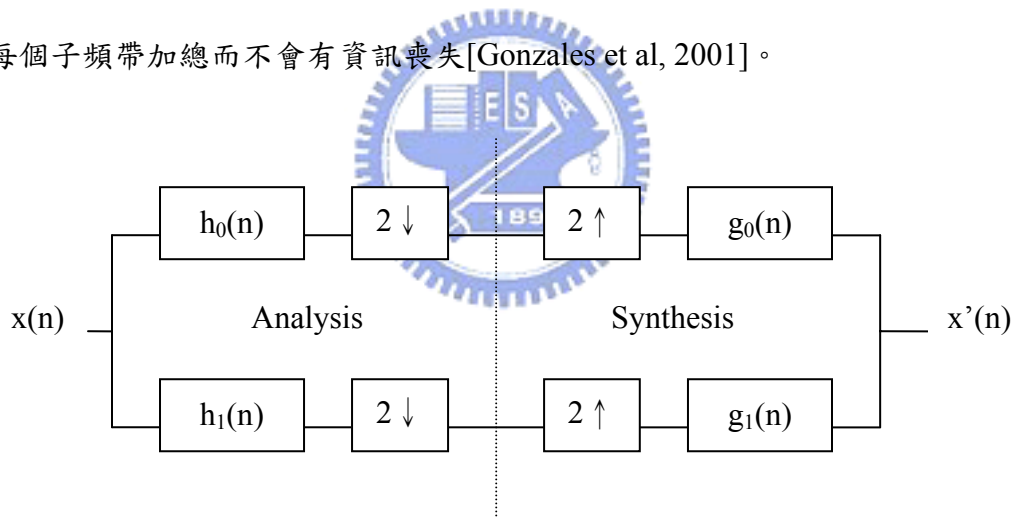


圖 4-3-3：一維子頻帶分解

將 FWT 延伸到二維訊號上時，需要有一個二維的尺度函數 $\varphi(x, y)$ ，與三個二維的小波函數 $\psi^H(x, y)$ 、 $\psi^V(x, y)$ 與 $\psi^D(x, y)$ ，可以利用其可分離性拆解成一維函數的乘積，如圖 4-3-3 為二維離散小波轉換的分解濾波器。

$$\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \dots\dots(4-13)$$

$$\psi^H(x, y) = \psi(x)\varphi(y) \dots\dots(4-14)$$

$$\psi^V(x, y) = \varphi(x)\psi(y) \dots(4-15)$$

$$\psi^D(x, y) = \psi(x)\psi(y) \dots(4-16)$$

二維尺度函數與小波函數之基底函數定義為如下，其中尺度函數用來描述訊號的近似部分，而小波函數則用來描述訊號的細節部分。

$$\varphi_{j,m,n}(x, y) = 2^{j/2}\varphi(2^j x - m, 2^j y - n) \dots(4-17)$$

$$\psi^i_{j,m,n}(x, y) = 2^{j/2}\psi(2^j x - m, 2^j y - n), i = \{H, V, D\} \dots(4-18)$$

則大小 $M \times N$ 之二維訊號 $f(x, y)$ 的離散小波轉換則為：

$$W_\varphi(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) \dots(4-19)$$

$$W_\psi^i(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \psi^i_{j_0, m, n}(x, y), i = \{H, V, D\} \dots(4-20)$$

其中 j_0 為起始尺度， $W_\varphi(j_0, m, n)$ 稱為 $f(x, y)$ 在尺度 j_0 的近似係數，描述了低頻分量， $W_\psi^i(j_0, m, n)$ 則是尺度 $j \geq j_0$ 在水平方向、垂直方向與對角方向的細節係數，描述了不同方向高頻分量。

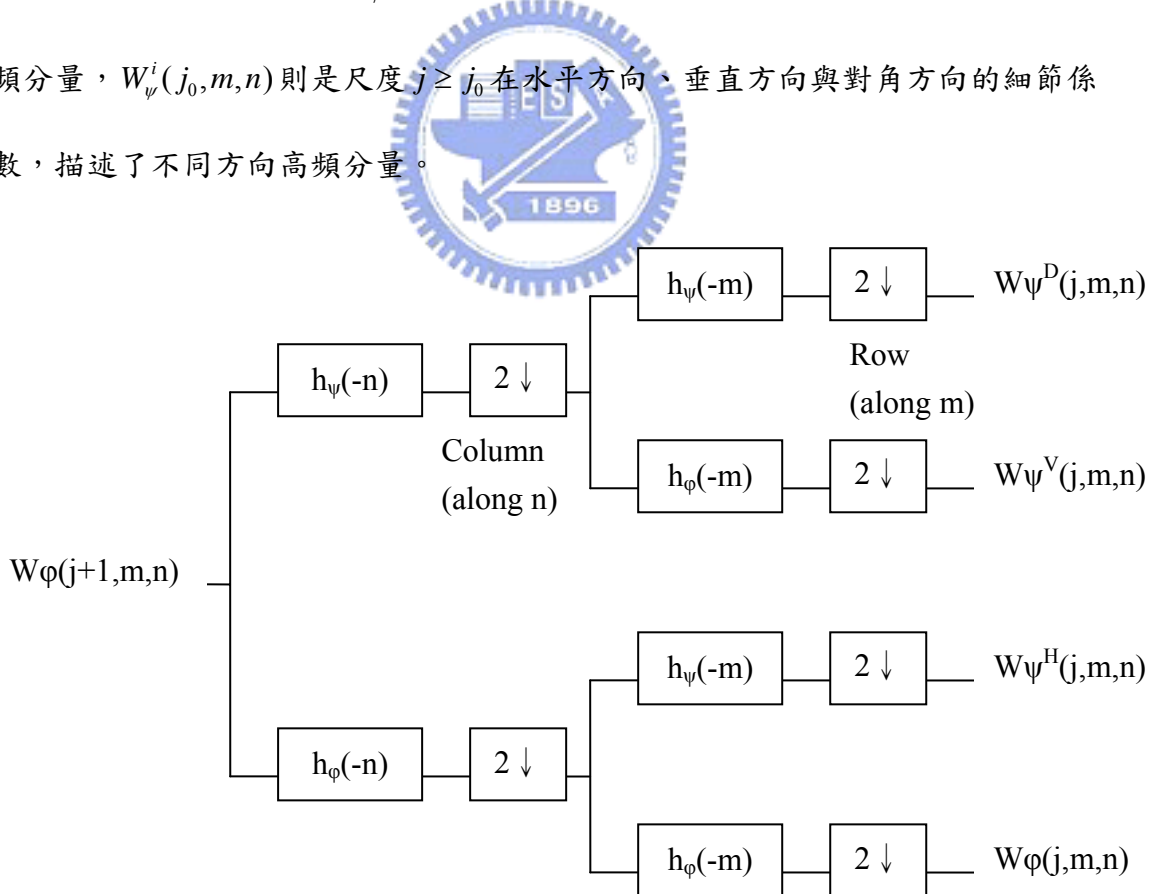


圖 4-3-4 二維離散小波轉換分解濾波器[Gonzales et al, 2001]

圖 4-3-4 為一次小波分解，尺度由 $j+1$ 變成 j ，多次的小波分解架構如圖 4-3-5，藉由遞迴的方式重複對近似係數進行分解已獲取不同尺度的資料。

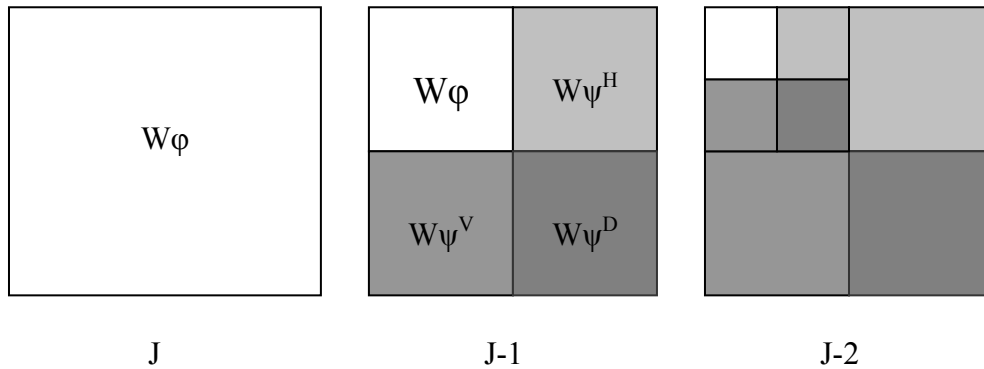


圖 4-3-5：離散小波分解架構

§4-4 頻譜分析

傅立葉轉換(Fourier Transform, FT)適合用來描述一組資料的頻率特性，利用不同頻率sin/cos函數的摺積(convolution)轉換一組訊號至頻率域上，並可以完全的重建。FT的優點是可以辨識各個頻率分量的影響量，常用來進行數據整體的頻率描述，主要有三個性質[Gonzales et al, 2001]：

1. 頻譜中的尖峰(高反應)代表頻率成分的主要方向。
2. 頻率域上的尖峰可以顯現主要頻率成分。
3. 可使用頻率域濾波對某個頻率分量進行處理。

傅立葉轉換廣泛的應用在影像處理與訊號分析領域，並能對資料進行整體頻率域上的描述，一幅 $M \times N$ 大小的影像 $f(x, y)$ 之二維離散傅立葉轉換(DFT)由公式(4-21)與公式(4-22)定義：

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)} \dots\dots(4-21)$$

傅立葉反轉換(iDFT)則為：

$$f(x, y) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(ux/M+vy/N)} \dots\dots(4-22)$$

公式(4-21)與公式(4-22)稱為離散傅立葉轉換對，變數 u 與 v 為頻率域變數， x 與 y 則為空間域變數。DFT轉後的係數 $F(u,v)$ 包含實數 $R(u,v)$ 與虛數 $I(u,v)$ 部分，則傅立葉頻譜的定義為：

$$|F(u,v)| = [R(u,v)^2 + I(u,v)^2]^{1/2} \dots (4-23)$$

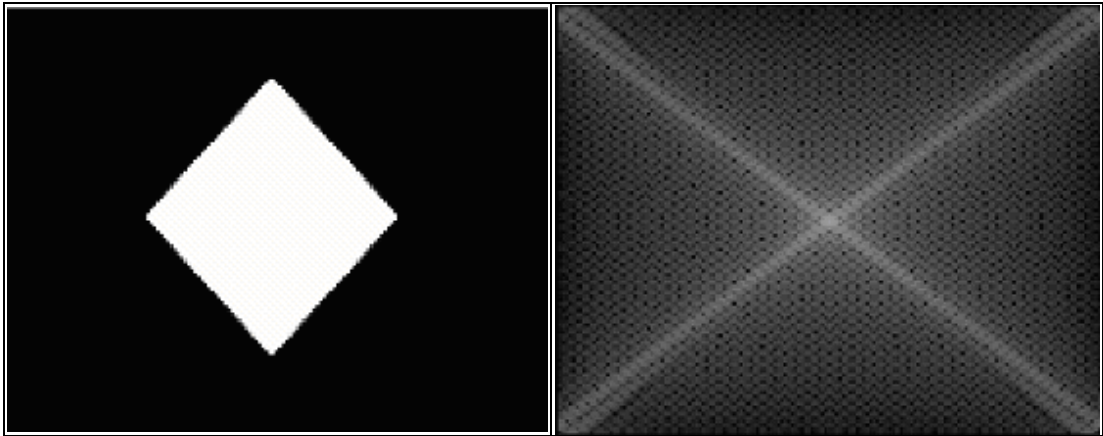


圖4-4-1：原始影像 $f(x,y)$ 與其對應的傅立葉頻譜 $|F(u,v)|$

圖4-4-1為原始影像 $f(x,y)$ 與其對應的傅立葉頻譜 $|F(u,v)|$ ，在傅立葉頻譜中可以看出尖峰(白色部分)看出影像主要的頻率成分與方向。若以極座標表示頻譜，則可看出不同頻率與方向上頻率成分的多寡，如圖4-4-2所示，可利用極座標轉換將 $F(u,v)$ 轉換至 $S(r,\theta)$ 上， r 與 θ 為極座標中的兩個變數，若對每一個 θ 值加總徑向方向上的頻譜值則可看出不同方向上的頻譜性質，若對不同半徑將各方向加總則可看出不同頻率上的特性，以兩個一維函數 $S(r)$ 與 $S(\theta)$ 描述，如公式(4-23)與(4-24)。

$$S(u,v) \xrightarrow{\text{Polar transformation}} S(r,\theta) \dots (4-23)$$

$$S(r) = \sum_{\theta=0}^{\pi} S(r,\theta) \dots (4-24)$$

$$S(\theta) = \sum_{r=1}^{R_0} S(r,\theta) \dots (4-25)$$

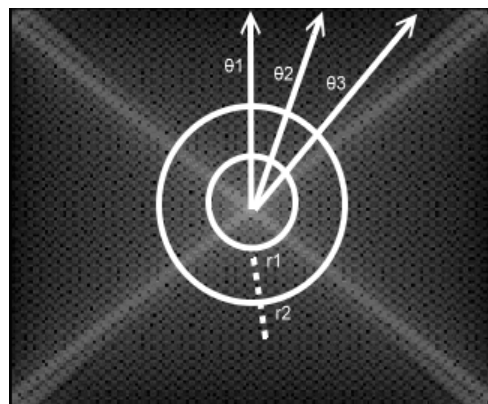


圖4-4-2：頻譜分析示意圖

第五章 多尺度分析與應用

§5-1 實驗區描述

9520 與 9521 兩個實驗區各切取 9 公里與 10 公里見方的數據作為多尺度實驗區，並於黑白暈渲顯示於圖 5-1-2，9520 多尺度實驗區的範圍為(217000, 2627000)與(226000, 2636000)之間，9521 多尺度實驗區範圍為(218000, 2665000)與(228000, 2675000)之間，皆以最小曲率法[Wessel, 1999]內插成五公尺網格，內插後網格大小為 1801x1801 與 2001x2001。兩個實驗區三組資料分別以 SRTM9520、Ts9520、R9520、SRTM9521、Ts9521、R9521 代稱。

圖 5-1-1 是在多尺度實驗區中 TopSAR 資料的組成，在左圖中 Ts9520 數據是由 Ts1225 與 Ts1265 組成，而右圖中 Ts9521 數據則是 Ts1250，測量時的飛行方向在圖中以箭頭表示。TopSAR 是一個左向側視的系統，可依此判斷 InSAR 資料觀測時的方位(Azimuth)與距離(Range)方向，由於 SAR 影像的特性在距離方向上會發生前傾效應(layover effect)，在產製 DEM 時應會造成某些程度的影響。

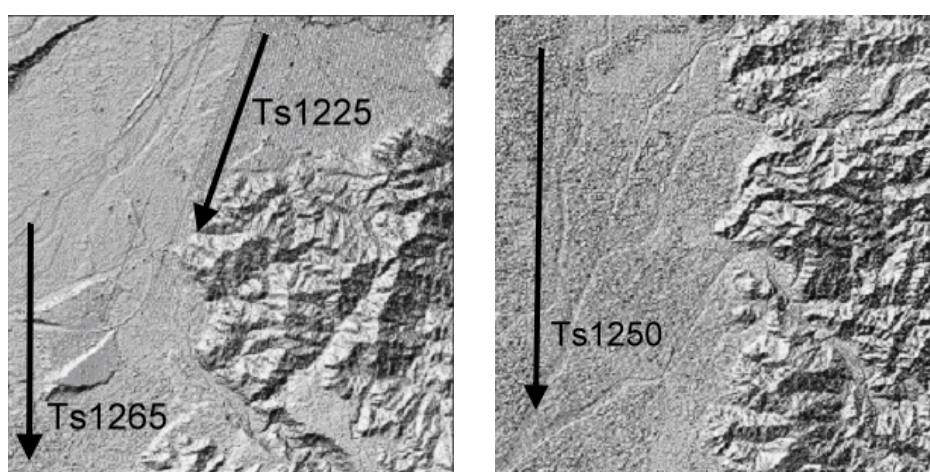


圖 5-1-1：TopSAR 數據航線示意圖

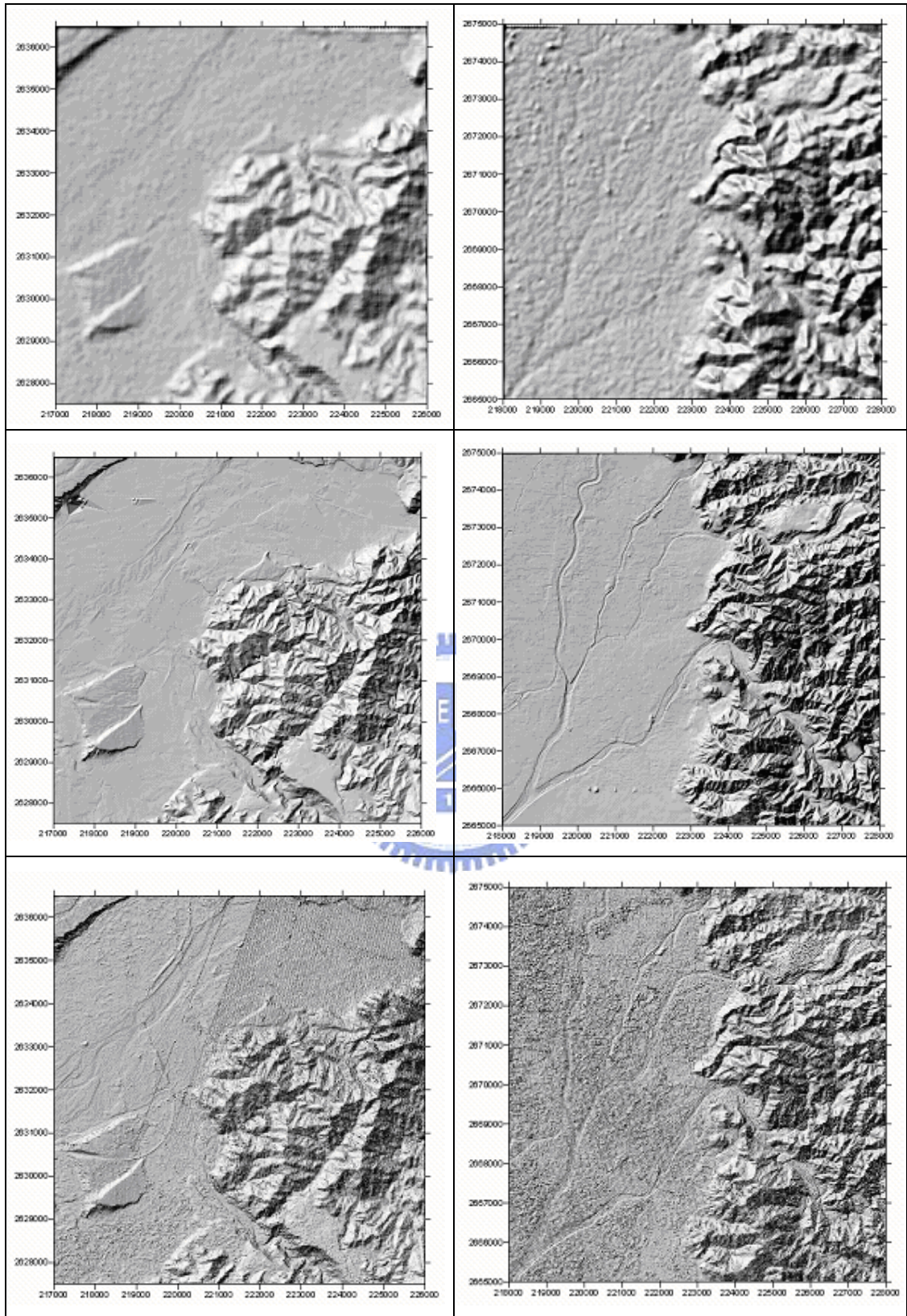


圖 5-1-2：多尺度實驗區黑白暈渲圖，左邊為 9520，右邊為 9521，由上而下依序為 SRTM，參考航空攝影測量數據與 TopSAR

§5-2 小波分析

傅立葉轉換雖有良好的頻率解析度，然而在轉換過程中喪失時間的資訊，僅能對整體頻率性質進行描述，小波轉換則可同時對發生位置與頻率進行描述，Daubechies 小波群具正交與雙正交、有限承載的特性，可以應用在連續小波轉換與離散小波轉換的計算實現上，而 Daubechies D3(以下簡稱 Db3)小波對於平滑、崎嶇、不規則與似中斷點的訊號能作精確的表達，其適用性比 Haar 小波或 Meyer 小波更佳[黃國良，1999]，因此在本節小波分析選用 Daubechies D3 小波進行實驗。本節所有實驗皆使用 Matlab 之小波工具箱[Misiti et al, 1997]完成。

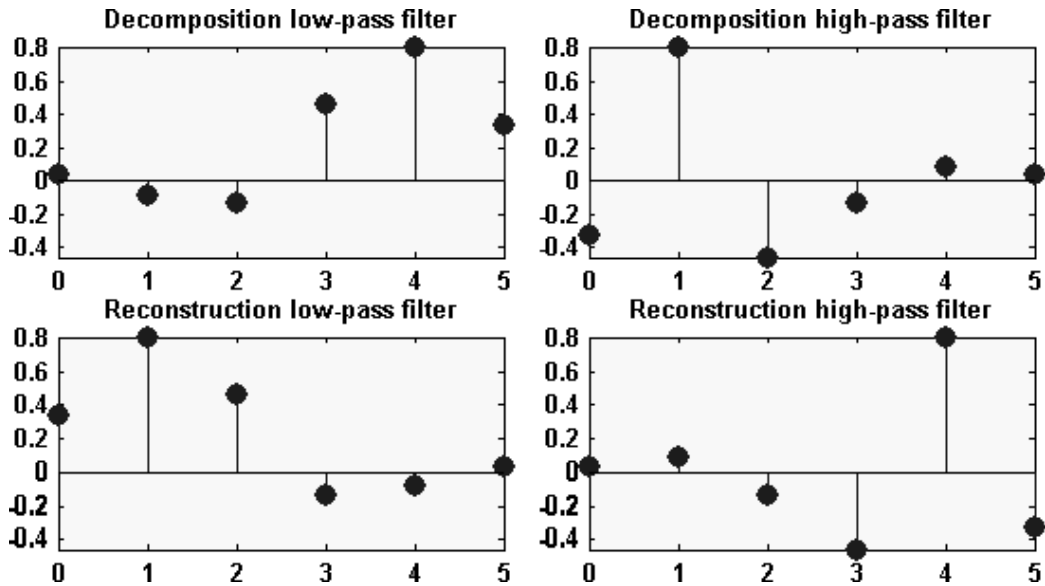


圖 5-2-1：Db3 小波分解濾波器組

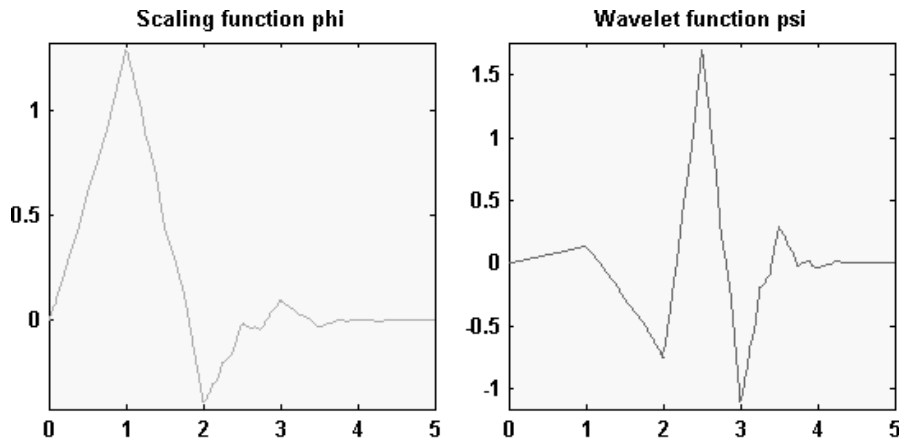


圖 5-2-2：Db3 小波尺度函數與小波函數

小波分解以遞迴的方式重複對尺度係數進行分解，產生不同尺度的係數，分解後頻率相差為二的倍數，尺度係數的網格數也被減少取樣至二分之一，其尺度由 J_0 降為 J_0-1 ，尺度係數的網格解析度也跟著倍增，尺度、解析度與頻率的關係如表 5-2-1 所示。尺度 j 定義為 $f = 2^j$ ， f 為頻率，其意義為每個取樣間格所完成的週期數，以餘弦函數為例，由 1 至 0 再至 1 的過程稱之。

在 DEM 資料中網格數據的取樣間格有實際的物理意義。在本實驗中的取樣間格均為 5 公尺，將頻率化算成波長可方便理解，兩者關係如公式(5-1)，在本實驗中 $\delta=5$ ，公式(5-2)中 u 為傅立葉轉換中的頻率係數，亦即公式(4-24)中的 $S(r)$ ，而小波轉換中原始尺度 j 相對應波長為 10 公尺，每減少一個尺度則波長倍增。

$$\lambda = \frac{\delta}{f} \dots(5-1)$$

$$f = \frac{u}{M} \dots(5-2)$$

表 5-2-1：尺度、頻率與解析度關係

| | | | | | | |
|----|-----------|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 尺度 | J_0 | J_0-1 | J_0-2 | J_0-3 | J_0-4 | J_0-5 |
| 頻率 | 1 | 1/2 | 1/2 ² | 1/2 ³ | 1/2 ⁴ | 1/2 ⁵ |
| 波長 | λ | $\lambda*2^1$ | $\lambda*2^2$ | $\lambda*2^3$ | $\lambda*2^4$ | $\lambda*2^5$ |

各實驗數據經 db3 小波分解至 $j=5$ 後各小波係數圖繪於附錄 C 圖 C-1 至圖 C-6，在小波分析中各顯示出不同性質，SRTM 在前三個尺度中幾乎沒有細節資訊，航空攝影測量數據的小波係數($\psi^H(x, y)$, $\psi^V(x, y)$, $\psi^D(x, y)$)則在前三個尺度中表現出較清晰的地形輪廓，TopSAR 與 SRTM 則不明顯，TopSAR 在高尺度雖有較大的分量，但所呈現的細節資訊看不出地形輪廓。但三者的尺度係數描述的低頻地形資訊則非常一致。

§5-2-1 不同尺度小波係數分量分析

經小波分解後細節資訊被遺留在殘差空間中，由小波係數 $\psi^H(x, y)$ 、 $\psi^V(x, y)$ 、 $\psi^D(x, y)$ 表達，概略資訊則由尺度係數表達。要描述在不同尺度下細節資訊的含量，可以使用小波係數平方和取對數法計算回應指標 S_i 。小波係數可以視作地形訊號與小波函數的相似度[Mallat, 1999]，高頻訊息如斷線、起伏劇烈的地形輪廓應會表現於小波係數之中，若訊號中有屬該尺度的頻率，會有較大的係數出現，將各尺度的高頻係數平方加總後可以表達各尺度中細節資訊的多寡。

$$S_A = \ln(\sum \varphi(x, y)^2) \dots\dots(5-1)$$

$$S_i = \ln(\sum \psi^i(x, y)^2), i = H, V, D \dots\dots(5-2)$$

SRTM、TopSAR 與 RefDEM 經 db3 小波以 FWT 轉換之後計算成果如附錄 C 表 C-1-1 至表 C-1-6，並繪製折線圖於圖 5-3-3 至圖 5-3-6，由此可以分析歸納出幾項性質：

1. 9520 實驗區 S_A 指標在五個尺度皆高於 9521 實驗區，推測與實驗區內坡度有關。
2. 同為 InSAR 技術的 SRTM 與 TopSAR 其 S_A 指標十分接近，航空攝影測量數據的 S_A 指標則明顯高於其餘兩者，在兩實驗區都呈現相同結果。顯示航空攝影測量與 InSAR 所描述的地形趨勢面有所不同。
3. TopSAR 的 S_H 、 S_V 指標在前兩個尺度中明顯高於其餘兩者，但隨著尺度漸減而差異漸小。
4. 航空攝影測量數據的 S_H 、 S_V 指標在兩實驗區中幾乎完全一致，顯示出航測數據的 DEM 成果不受地形影響。
5. TopSAR 的 S_V 指標比 S_H 大的多，顯示出 TopSAR 數據在不同方向上的描述能力不同，DEM 成果品質與觀測方向有關。
6. 由 S_D 指標可以看出 SRTM 與 RefDEM 較為平滑化的特性， $\psi^D(x, y)$ 係

數是經由垂直與水平方向的高頻濾波過濾後而得，而在前三個尺度中 TopSAR 皆明顯高於 SRTM、RefDEM。

7. 不同尺度的數據在 S_D 指標上的分別度較大，如圖 5-2-6，SRTM、TopSAR 與 RefDEM 折線可明顯區分，適合觀察數據的尺度性質。

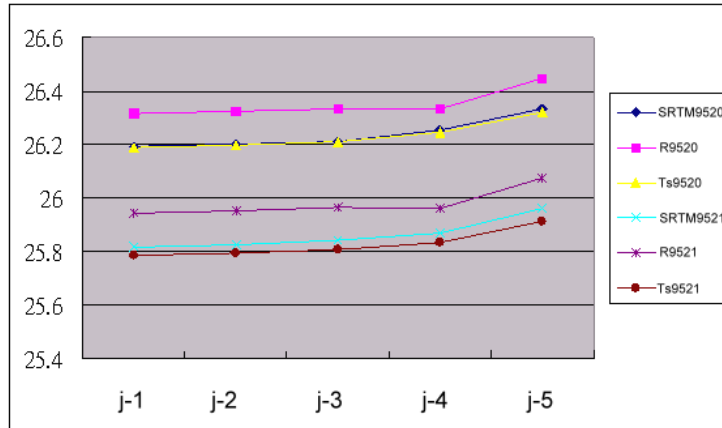


圖 5-2-3： $\varphi(x, y)$ 係數平方和對數折線圖

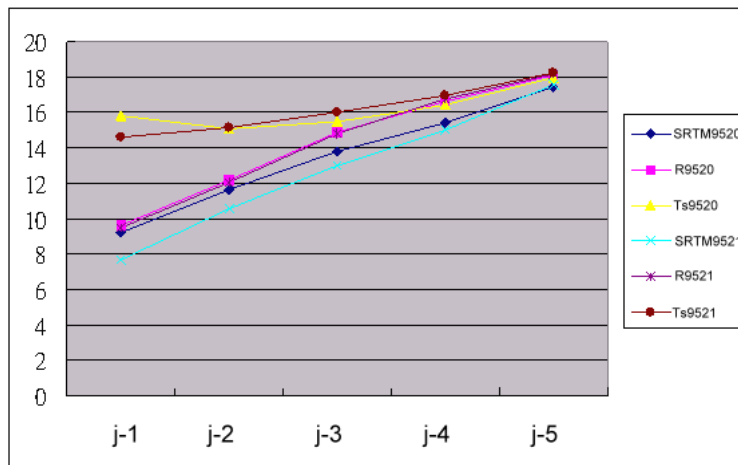


圖 5-2-4： $\psi^H(x, y)$ 係數平方和對數折線圖

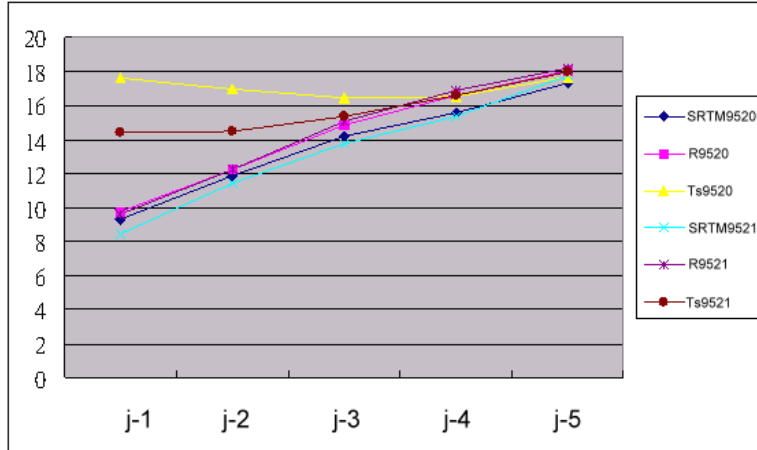


圖 5-2-5： $\psi^V(x, y)$ 係數平方和對數折線圖

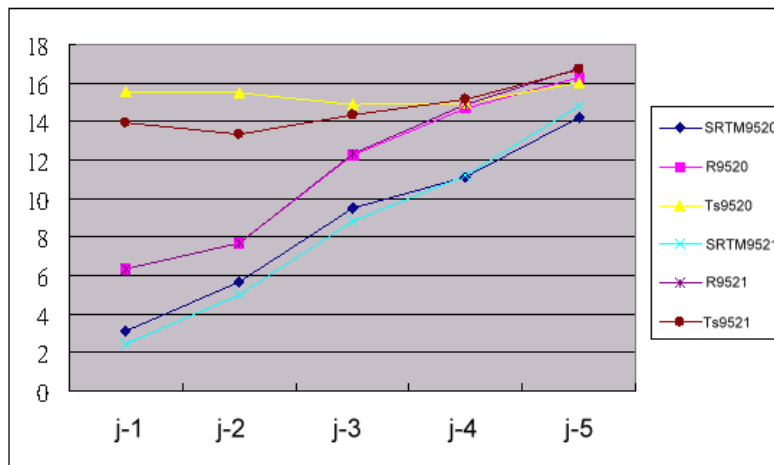


圖 5-2-6： $\psi^D(x, y)$ 係數平方和對數折線圖

§5-2-2 不同尺度對精度之影響

當尺度降低意味著高頻訊息減少，DEM 也越平滑。地形訊號大致上來說相較於其他空間資訊(如影像)來說是尺度較低的，除非是較為特殊的地形，否則地形理論上不會在很短的距離內起伏劇烈，而空間統計正是利用此特點對地形面進行預測，在 DEM 產製過程中，起伏過於劇烈的高程點通常是匹配錯誤或相位反演 (phase unwrapping) 計算錯誤造成的粗差點。經由小波分析分解至較低的尺度時這些粗差點將會被遺留在更高尺度的細節空間中。本節利用此性質探討在不同尺度下對於 DEM 精度的影響。

計算方法是由不同尺度的 $\varphi(x, y)$ 係數捨棄掉 $\psi^H(x, y)$ 、 $\psi^V(x, y)$ 與 $\psi^D(x, y)$ 係數後回組 DEM，以不同尺度的 SRTM 與 TopSAR 與原始尺度的 RefDEM 作為參考進行精度分析，此時原始尺度的 RefDEM 可視為尺度 j-2。

計算成果如附錄 A 表 A-2-1 至表 A-2-4，Ts9520 與 R9520 比對後無偏標準差為 8.71 公尺。隨著尺度降低精度逐漸提高，圖 5-2-7 為 Ts9520 尺度 j 與尺度 j-3 差異。

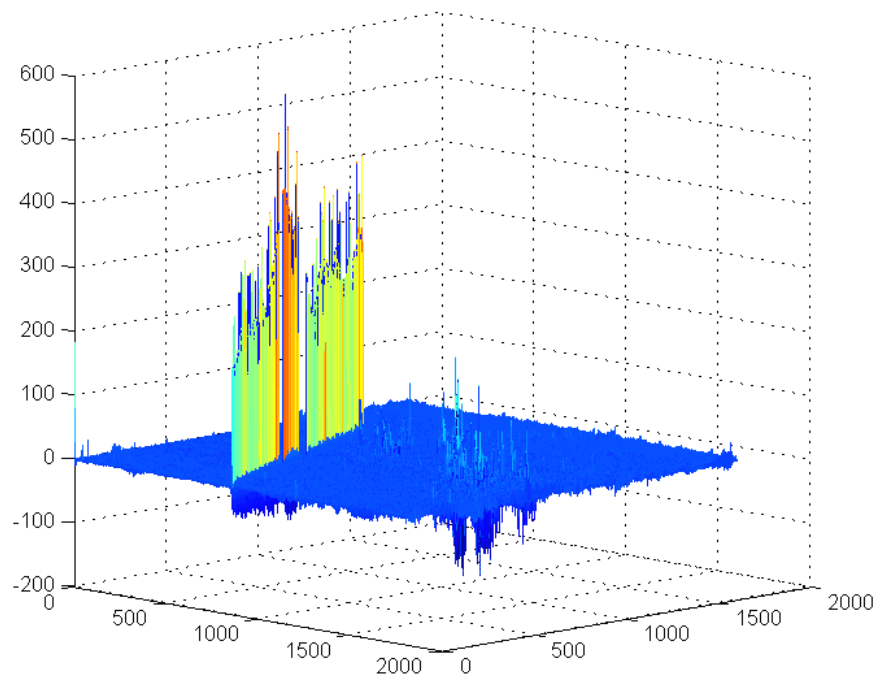


圖 5-2-7：Ts9520 尺度 j 與尺度 j-3 差值三維分佈圖

由前章分析可知粗差點對 TopSAR 資料精度影響很大，當粗差點的影響逐漸去除後精度自然提高，Ts9520 在尺度 j-3 時精度最高，尺度 j-4 與尺度 j-5 又逐漸變差，是由於當尺度過低時對細微地形訊息描述力不足導致。

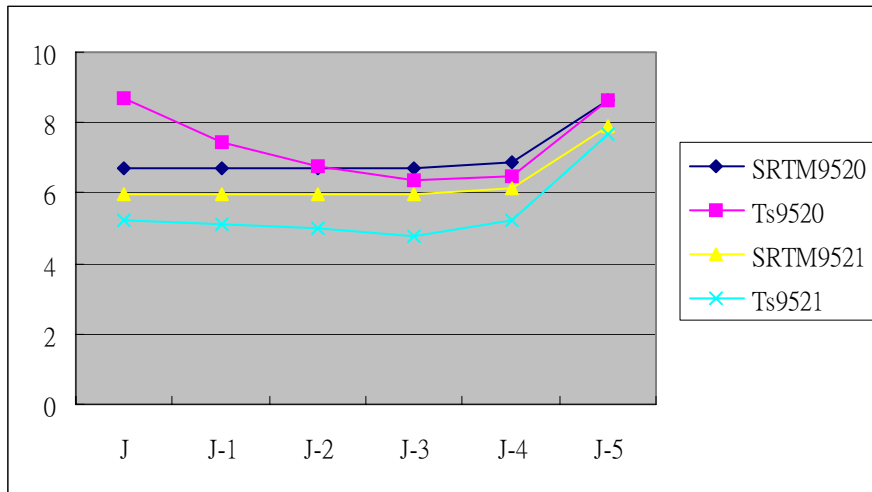


圖 5-2-8：不同尺度下精度變化，單位公尺

Ts9521 數據同樣於尺度 j-3 時有最佳精度，但由於 Ts9521 受到粗差的影響較不顯著，因此當尺度漸減時精度提高的幅度不若 Ts9520 明顯，但在低於 j-3 尺度時精度同樣變差，顯示過低的尺度對精度有負面影響。

SRTM 由於原始尺度並不高，因此尺度改變時對精度影響有限，尺度 j 至尺度 j-4 精度變化有限。

由於用來檢驗的 RefDEM 平面解析度為 20 公尺，對應至尺度係數的樣本數與尺度 j-2 相當，實驗顯示 Ts9520、Ts9521、SRTM9520 於 j-3 有最佳的精度。實驗資料與檢驗資料在尺度相近時其對地形描述的細緻程度也較為相似，當分解至更低尺度時可以對高頻的隨機誤差或粗差產生抑制效果，卻也將犧牲地形更細緻的描述力，當分解至檢驗數據的尺度更低一層時有最佳的精度表現。在精度分析中與檢驗資料的原始尺度有密切關係。

§5-2-3 不同尺度相關性分析

相關性分析是評估兩組數據相關程度的強弱，圖 5-2-9 至圖 5-2-12 為各實驗數據間小波係數相關性分析，用以表現不同數據在不同尺度下的關連，由圖 5-2-9 中顯示出各數據之間 $\varphi(x, y)$ 係數維持高度相關，顯示各數據於各尺度描述的地形趨勢非常一致。

各數據的小波係數間相關性都隨著尺度越高而相關性越低。各數據於高尺度的差異十分明顯，相關度於前兩個尺度多趨近於零。由於各數據的最高描述尺度各不相同，導致了高尺度係數的低相關。尺度低於 $j-3$ 時各數據相關性快速提高，也注意到 Ts-R 由於其原始數據尺度較為相近，相關性提升的幅度也較大。總體來說 TopSAR 與航測數據相關性在各尺度與各係數之間均為最高。

Ts9520-R9520 在垂直方向上的係數相關性都明顯比水平方向上要低的多，由圖 5-3-10 與圖 5-3-11 比較中可以看出，可能與 TopSAR 在垂直方向的 DEM 品質較差有關。

值得注意的是 $\varphi(x, y)$ 係數在 $j-4$ 時，Ts-R 與 SRTM-R 的相關性均有微幅下降，而同為 InSAR 數據的 SRTM-Ts 卻然保持一定趨勢，InSAR 數據與航空攝影測量數據在此尺度的關連性驟降需經進一步的驗證。

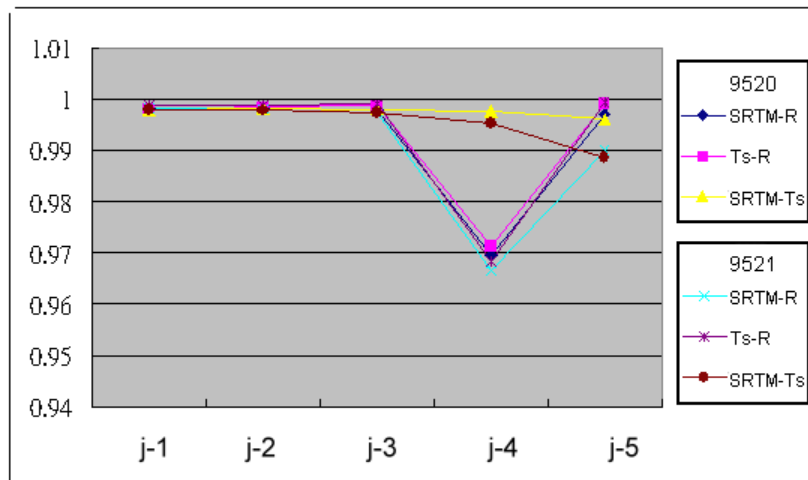


圖 5-2-9： $\varphi(x, y)$ 係數相關性折線圖

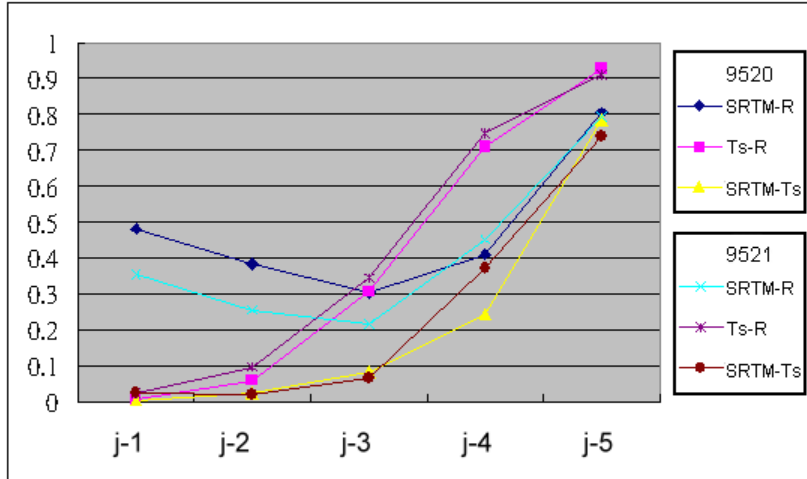


圖 5-2-10： $\psi^H(x, y)$ 係數相關性折線圖

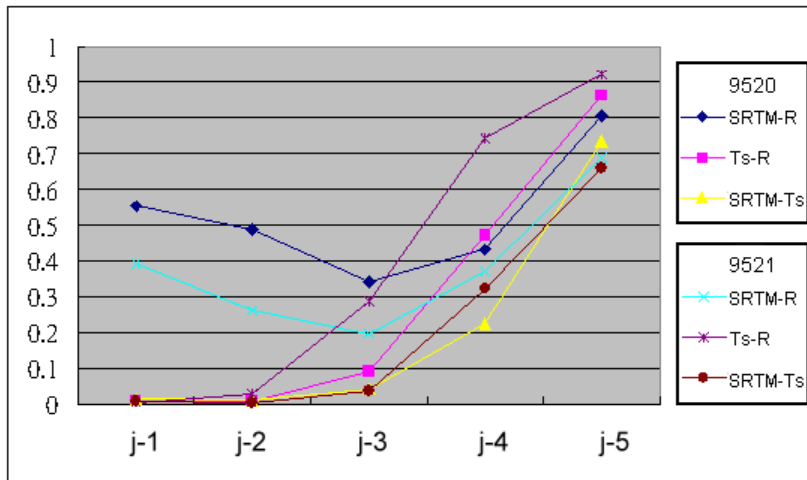


圖 5-2-11： $\psi^V(x, y)$ 係數相關性折線圖

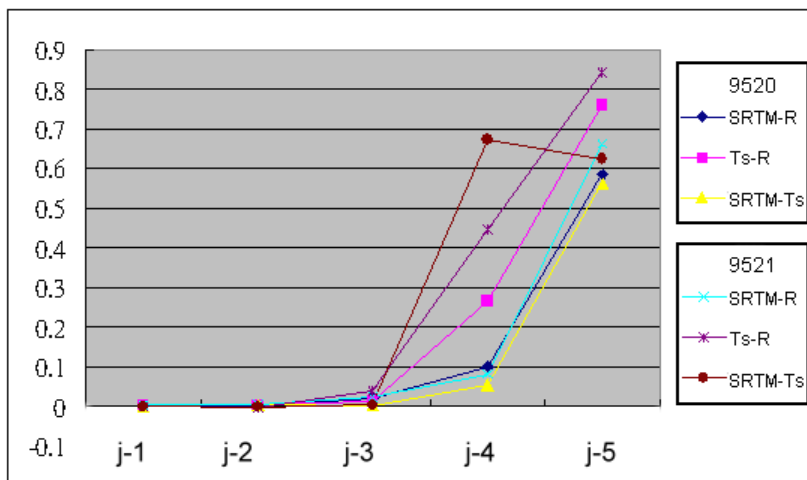


圖 5-2-12： $\psi^D(x, y)$ 係數相關性折線圖

§5-3 頻譜分析

傅立葉轉換可以表現整體資料的頻率性質，由各組資料的頻譜圖 5-3-1 可以看出 SRTM 與航空攝影測量數據明顯缺乏高頻資訊，而在 Ts9520 的頻譜中則顯示出顯著的方向性頻率與較高的頻率。

在圖 5-3-2 至圖 5-3-5 中顯示了距離與角度方向頻率分量的分析，圖 5-3-2 與圖 5-3-4 中橫軸角度是為方位角，單位為度，可以發現在 45 度、90 度、135 度與 180 度處有較大的分量存在，這是由於資料取樣成正方形網格，在計算時僅取離散的整數角度四捨五入，在這些角度的頻譜值有較低的機率被四捨五入到另一個整數去，並非數據性質造成。

此外，這三組資料的頻譜角度分析其趨勢是一致的，值得注意的是，在圖 5-3-2 中 TopSAR 資料在 117 度處有較大的分量存在，是為其他兩組資料所無，經對照圖 5-1-1 後發現 Ts1225 的飛行方向正好與該頻率方向垂直，是由於不同方向觀測的 TopSAR 資料疊置效應影響的方向不同，兩組資料混疊後造成的此方向上的頻率。

在頻率分析中顯示出 TopSAR 與 SRTM 在低頻部分皆與航空攝影測量數據非常接近。隨著頻率逐漸提高，TopSAR 數據以繼續維持一定的高頻分量，而 SRTM 與航空攝影測量數據則開始快速下降。

9520 實驗區中，圖中橫軸頻率為 $S(r)$ 。在頻率 25（換算成波長為 360 公尺）以前三組數據都非常接近，僅 R9520 略高一點，而 Ts9520 與 R9520 的頻譜分析曲線相交於頻率 100（波長 90 公尺），之後 R9520 的曲線快速下降，但 Ts9520 仍維持一定分量，並有無下降之趨勢。SRTM9520 與 R9520 則交於頻率 185 處（波長 48.67 公尺），在這之後 SRTM 的頻率分量高於 R9520。

9521 實驗區中表現的趨勢與 9520 實驗區非常相似，三組頻率在頻率 20（波長 500 公尺）之前幾乎重疊，之後 Ts9521 與 R9521 曲線將交於頻率 100 之處，亦即波長 100 公尺，SRTM9521 與 R9521 則將交於頻率 370（波長 27 公尺）。特

別的是 Ts9521 中頻率 831(波長 12 公尺)左右有一明顯分量存在，對照圖 5-1-2，應是由市區稠密地物所影響的頻率分量。

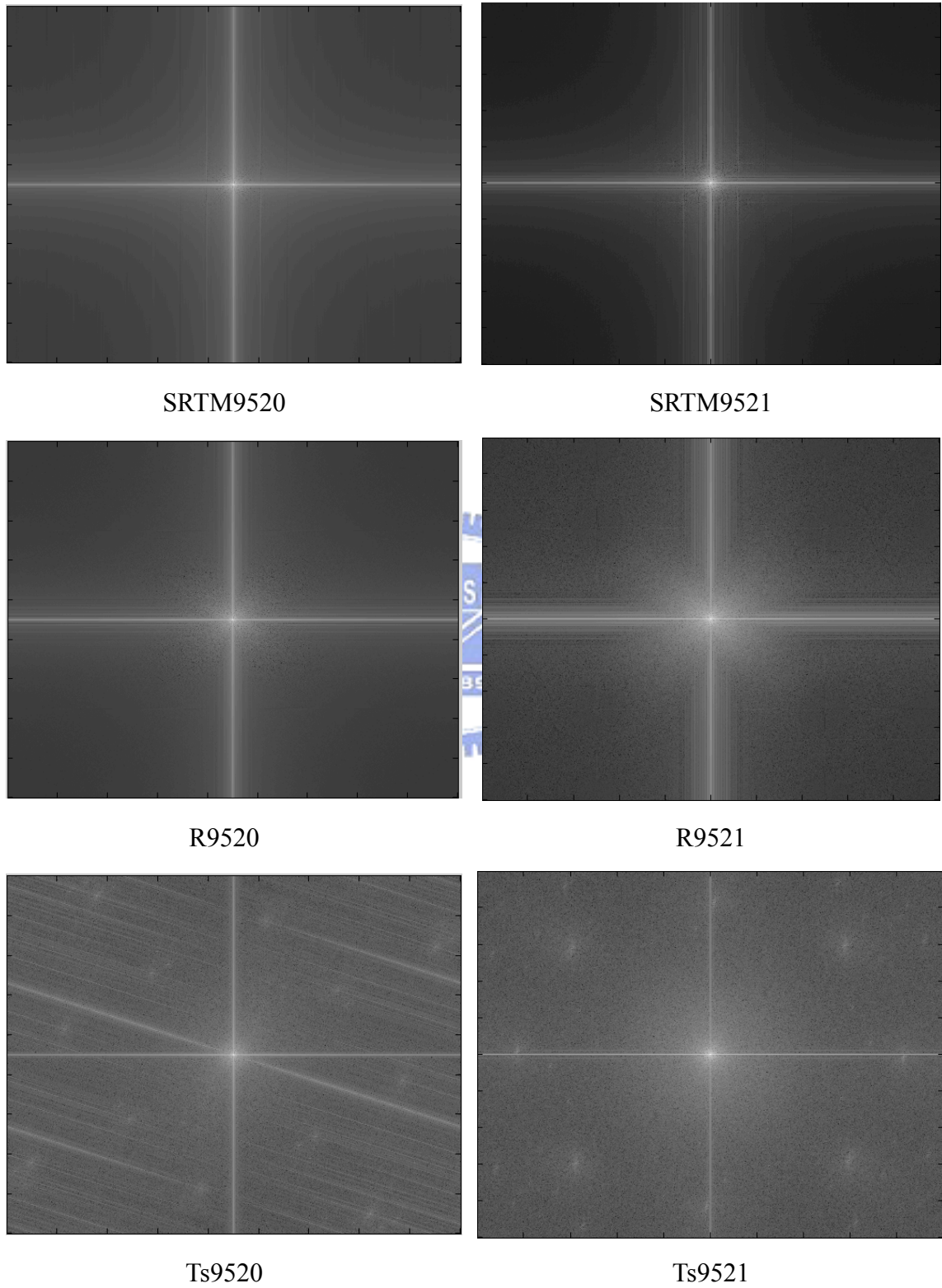


圖 5-3-1：傅立葉頻譜圖

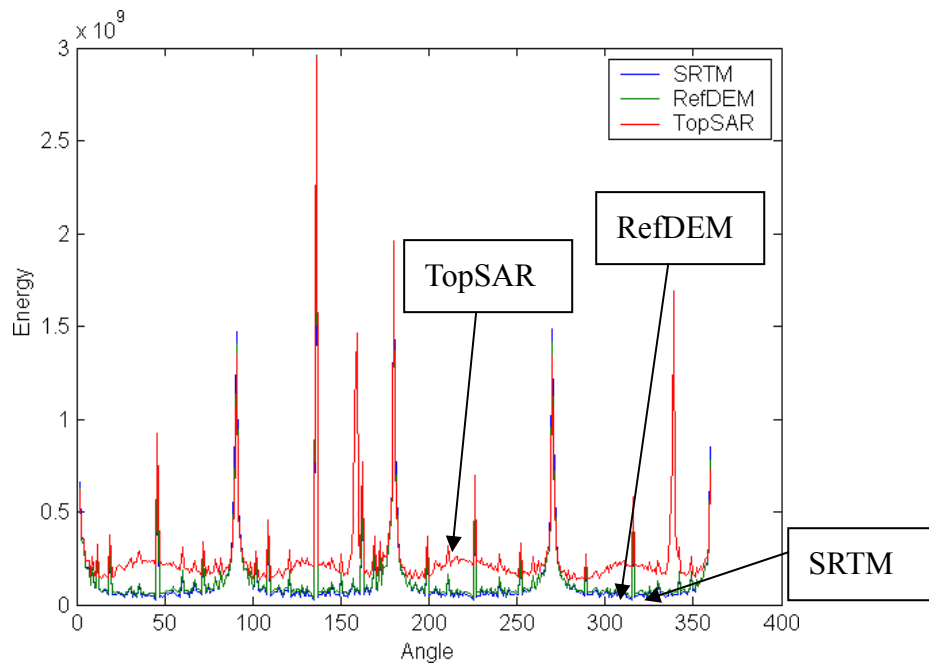


圖 5-3-2：9520 實驗區角度頻譜分析

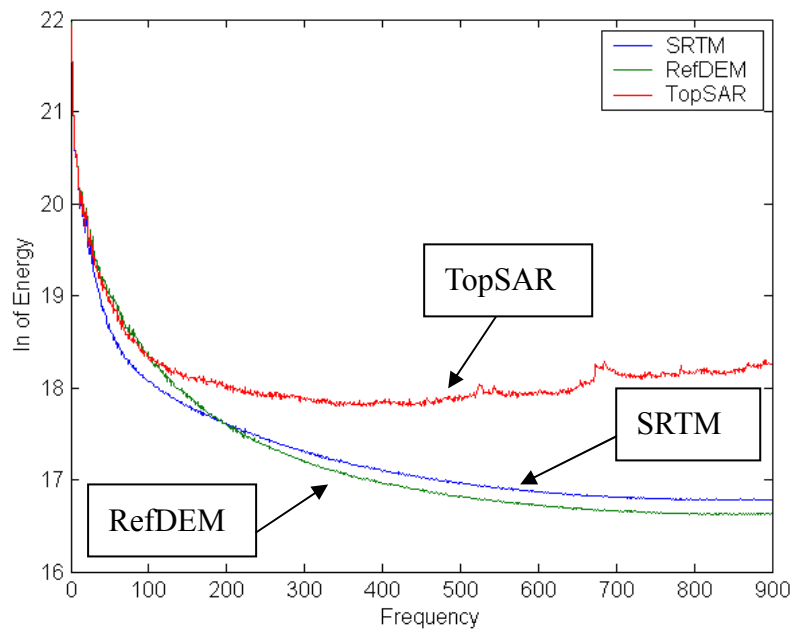


圖 5-3-3：9520 實驗區半徑頻譜分析

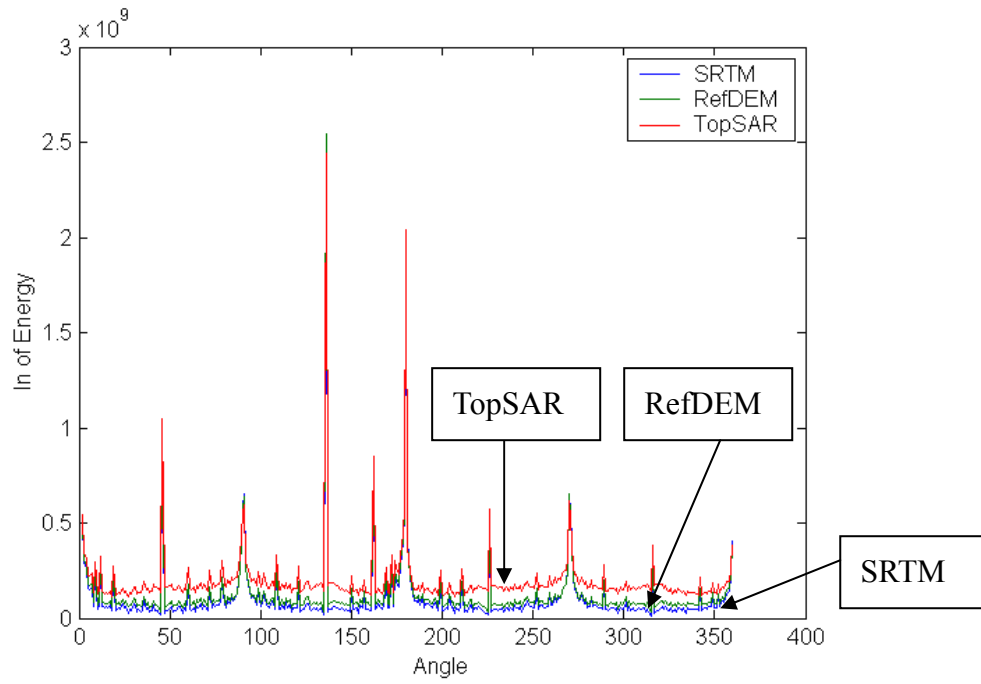


圖 5-3-4：9521 實驗區角度頻譜分析

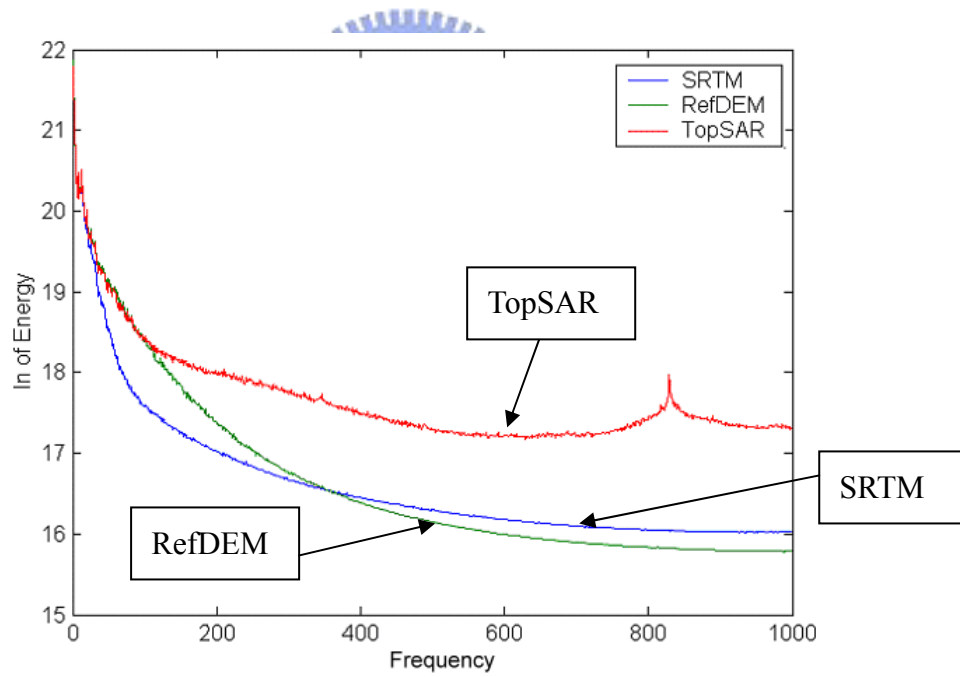


圖 5-3-5：9521 實驗區半徑頻譜分析

§5-4 多尺度分析應用

§5-4-1 粗差偵測

本節應用小波於地形剖面線分析與粗差偵測，粗差是由測量過程中錯誤所引起的，通常與附近的高程點有較大的差異，利用這種不連續的性質，可以在不同尺度分解中發現。圖 5-4-1 是利用 db3 小波將 TopSAR 資料剖面線進行至尺度 j-5 的分解，可以注意到不同尺度的高頻訊息表現在細節部分中，於橫軸約 500 公尺處有一明顯不合理的粗差存在，在 j-1、j-2、j-3 的細節部分則表現出較大的響積 (response)，可清楚偵測到粗差發生的位置。

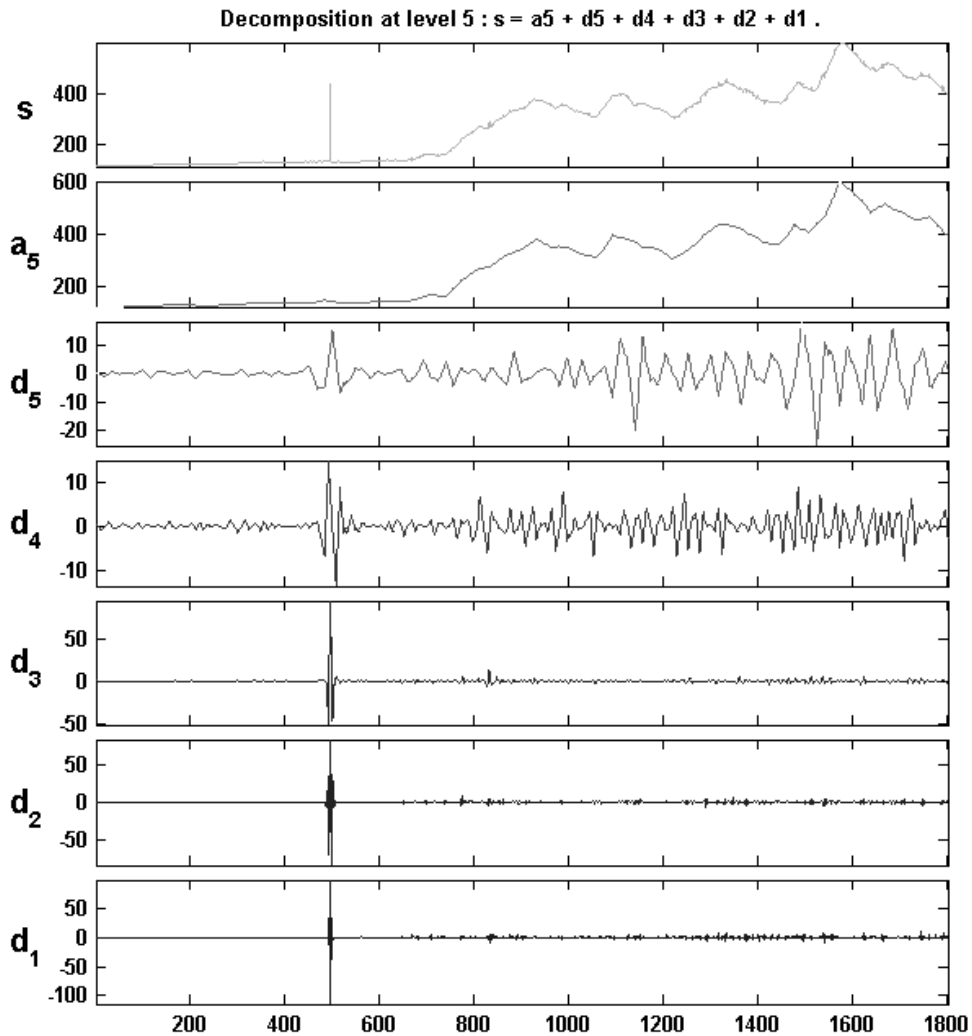


圖 5-4-1：Ts9521 剖面線以 FWT 進行分解

§5-3-2 不同尺度等高線簡化比較

等高線是地形資料最重要的一種表現方法，本節探討不同尺度 DEM 對於等高線產製的影響。傳統上在繪製不同尺度的地形圖時皆以人工進行縮編，而當數值地形資料越常使用之際，以電腦進行等高線自動化縮編越形重要。傳統上地圖縮編使用的原理如下[李育端，2000]：

1. 簡化：線條的簡化是根據一些幾何標準去除多餘線條或不需要的點位元，如 Douglas-peuker 演算法[Robinson et al, 1995]。
2. 平滑化：平滑化目的是使線條更為自然，並增加視覺上的美觀，平滑化不需考慮到資料量或幾何因素，僅為美學考量。
3. 合併：當比例尺縮小時，將兩相鄰物件合併在一起，如道路的兩邊線。否則將顯的擁擠。
4. 位移：當比例尺縮小時將一些擁擠的地物與線條依一定製圖原則進行移位，必要時可以稍微改變線條之形狀。

本節藉助多尺度的性質對 DEM 分解至不同尺度產製等高線進行比較。藉由抽取掉不同頻率的資訊來減少過多的細節部分，可以有效簡化線條，並可以利用時頻分析能力，針對特定位置/頻率的點進行處理，而不需將某個頻率分量完全移除，可靈活對局部區域 DEM 的進行尺度處理。

實驗成果如圖 5-4-1，以 TopSAR 數據為例，將由 Ts9521 切取一塊數據，以 db3 小波進行分解至尺度 j-5，並以不同尺度的 DEM 繪製 15 公尺等高線與 SRTM 和 RefDEM 進行比較。

如圖所示，隨著尺度漸減等高線線條變的平滑，尺度 j 中較毛躁的線條在 j-5 中已經變的柔和。左上方較多瑣碎的等高線也隨著尺度減少而逐漸消失。等高線的數目也隨著尺度漸減而變少，顯示出等高線線條對於數據尺度的敏感。

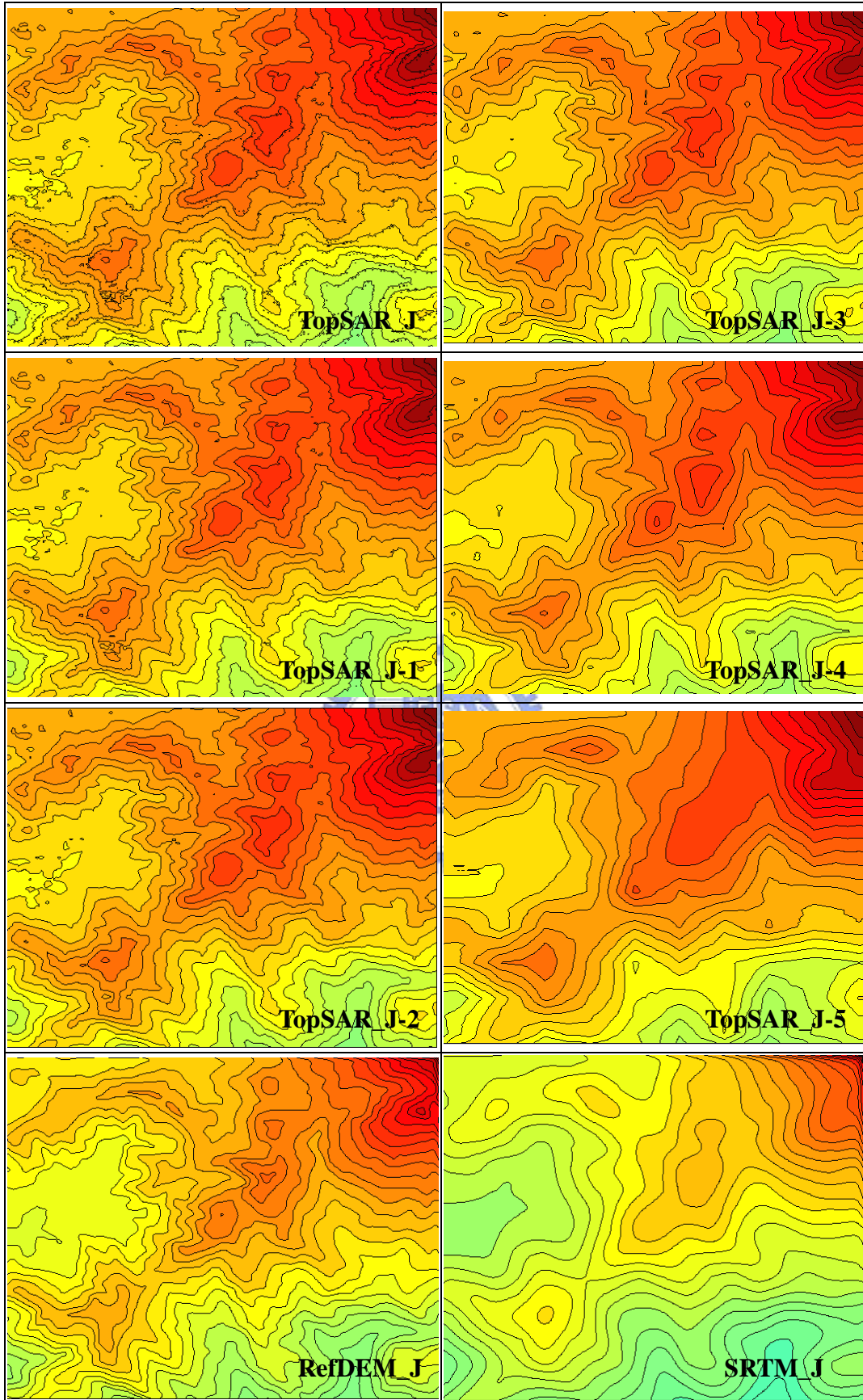


圖 5-4-2：不同尺度數據產製等高線比較

第六章 結論與建議

本論文對於 InSAR 測量進行一連串的實驗，就高程比對結果與多尺度分析成果相關結論與建議整理如下。

1. SRTM 數據在多山地區的無偏標準差為 9.451 公尺，平地為 7.579 公尺，優於 NASA 官方公佈的精度，然而在中央山脈東側受到陰影效應影響，資料空缺情形嚴重，在使用上必須注意。
2. TopSAR 數據在多山地區的無偏標準差 24.941 公尺，由於航高相對較低與地形影響，粗差發生非常頻繁，受陰影效應影響，粗差多集中在航線的背向坡，其最高差值可達 1000 公尺以上，經由粗差濾除後精度為 12.383 公尺。
3. TopSAR 數據在平地區域精度為 8.678 公尺，經由粗差濾除後精度可達 5.603 公尺，由於 9521 實驗區中包含台中市市區的東半部，在此粗差多發生在建物集中區，是由於 InSAR 觀測的 DSM 與航空攝影測量描述的 DEM 差異導致，InSAR 數據於都會區的 DSM 性質須待進一步研究來驗證。
4. SRTM 與 TopSAR 數據與航空攝影測量數據比對之下皆有顯著的系統偏移存在，SRTM 在兩實驗區的系統偏移分別為 4.923 公尺與 5.188 公尺，而 TopSAR 數據的系統偏移則為 4.033 公尺與 0.618 公尺，各幅 TopSAR 數據的差值平均各有不同，顯示單以 GPS 進行載具定位的差值平均仍然明顯，應以角反射器佈設控制點以利校正。
5. InSAR 測量受到地形效應的影響很大，並與航高有關，航高 223000 公尺的 SRTM 受地形影響較小，而航高 8500 公尺的 TopSAR 則較為嚴重，雷達影像的前傾效應、前坡縮短效應與陰影效應對 InSAR DEM 品質有很大的影響，並與觀測方向有關。

6. 在頻率分析中顯示 TopSAR 與 SRTM 在低頻部分與航空攝影測量數據十分接近。隨著頻率逐漸提高，TopSAR 數據繼續維持一定的分量，而 SRTM 與航空攝影測量數據分量則開始快速下降。三組數據在波長大於時 360 公尺（9520 實驗區）與 500 公尺（9521 實驗區）其強度幾乎一致。
7. TopSAR 數據不同航帶之間存在地形描述的差異，其 DEM 品質並與觀測方向有很大的關係，將不同飛行方向的數據接合之後由於前傾效應的方向不同，而將產生某個方向的頻率出現，該方向垂直於 InSAR 觀測時的飛行方向。
8. 小波分析中在尺度 j-1 至 j-5 之間地形趨勢一致並維持高度相關，而 9520 實驗區在這五個尺度之指標皆明顯高於 9521 實驗區，該差異應與地形有關。
9. 航空攝影測量數據的三個高頻係數指標 $\psi^H(x, y)$ 、 $\psi^V(x, y)$ 、 $\psi^D(x, y)$ 在兩實驗區幾乎相同，而 TopSAR、SRTM 在兩實驗區則略有不同，顯示航空攝影測量數據較不受地形影響。
10. TopSAR 數據在尺度 j-3 時可達到最佳精度，分別為 10.16 公尺與 7.6 公尺，證明分解至適當尺度對頻率較高的隨機誤差與粗差有明顯的抑制效果，但會犧牲描述細微地形特徵的能力。
11. 小波分析可以利用多尺度分析進行等高線縮編。藉由抽取掉不同頻率的資訊來減少冗餘的細節部分，以利應用於小比例尺的製圖，並可以利用時頻分析能力，針對特定位置與頻率的數據進行處理，而不需將某個頻率分量完全移除，降低資料量的損耗。
12. 在應用 TopSAR 數據的同時，應對飛行路線與測區內的地形坡度與坡向進行分析，以掌握高程數據測量成果的品質。

參考文獻

史天元，石宏揚。2001。以小波進行數值高程模型雜訊去除，第二十屆測量學術及應用研討會，論文編號A7，51-58。(Url:<http://nhmrc.cv.nctu.edu.tw/People/tyshih/Publications/SE2001/DEMdenosing2001.pdf>)

史天元。2000。橫麥卡脫(TM)座標與經緯度轉換。地籍測量，19(2):1-9。(Url:<http://nhmrc.cv.nctu.edu.tw/People/tyshih/Publications/CadaE/MapTM2sub.pdf>)

李志林，朱慶。1999。數位高程模型。數字地球基礎叢書。武漢大學出版社。

林紀綱。2003。NASA/JPL空載InSAR測定臺灣地區的DEM成果分析。成功大學測量工程學系碩士論文。

黃國良。1999。以小波表達城市幾何表面之新方法。國立成功大學測量工程學系碩士論文。

李育端。2000。小波表達多值線條函數之方法及其特性分析-以Haar與Daubechies小波為例。國立成功大學測量工程學系碩士論文。

賴伯倫。1998。小波理論於數值地形模型之多重解析度分析。國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。

劉國祥，丁曉利，陳永奇，李志林，鄭大偉。2000。極具潛力的空間對地觀測新技術——合成孔徑雷達干涉。中國科學院資源環境科學資訊中心，第十五卷，2000年，第六期。(Url:<http://159.226.136.229/cwais/DQ000620.htm>)

賴進貴，王韋力，邱顯晉，陳伯銜。2003。DTM品質檢和與提升之研究。遙測技術在崩塌地、土石流及坡地管理應用計畫，行政院農業委員會水土保持局。

黃金維。2003。臺灣地區大地起伏模式精度預估。內政部。

陳錕山。1999。參與美國太空總署合成孔徑雷達影像實驗-台灣地區資料獲取處理計劃(III)。八十八下半年及八十九年度農委會科技計畫期末摘要報告。農委會。(Url: <http://www.google.com.tw/search?q=cache:V2J9AM7uvGUJ:www.coa>.)

gov.tw/org/foodagriculture/tech89_final/210.htm+%E8%BE%B2%E5%A7%94%E6%9C%83+pacrim&hl=zh-TW)

Amgaa, Tsolmon. 2003. Wavelet-based analysis for object separation from laser altimetry data. ITC, Holland.

(Url:http://www.itc.nl/library/Papers_2003/msc/gfm/amgaa_tsolmon.pdf)

Abdelfattah, Riadh, Jean Marie Nicolas. 2002. Topographic SAR Interferometry Formulation for High-Precision DEM Generation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11.

Bamler, Richard, Wessling. 1999. The SRTM Mission: A World-Wide 30 m Resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days. (Url:<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo99/bamler.pdf>)

Chen, C.T., K.S. Chen, C.T. Wang, L.S. Liang. 2001. Applications of AIRSAR data Acquired during PACRIM-II in Taiwan, IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. (6):2610 - 2612.

Crosetto, M. 2002. Calibration and Validation of SAR Interferometry for DEM generation. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 213– 227.

Datcu, M., Dragos Luca, Klaus Seidel. 1996. Multiresolution Analysis of DEMs: Error and Artifact Characterization.

(Url:http://earth.esa.int/workshops/fringe_1996/luca/.)

Evenden, Gerald I. 1995. Cartographic Projection Procedures for the Unix Environment - A User's Manual. (Url: <http://remotesensing.org/proj/>)

Gonzalez, Rafael, Richard Woods. 2001. Digital Image Processing 2e. Prentice Hall Press.

Gallant, John C., Michael F. Hutchinson. 1997. Scale Dependence in Terrain Analysis. Mathematics and Computers in Simulation. 313-321.

Golden Software. 2003. Surfer,

(Url:<http://www.goldensoftware.com/products/products.shtml>)

Hastings, D.A., Dunbar P.K., 1999. Development and assesment of globe land 1 km base elevation model (GLOBE). International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, issue 32, part 4, 218-221.

JPL, 2003. AirSAR, Airborne Synthetic Aperture Radar. National Aeronautics and Space Administration (Url: <http://airsar.jpl.nasa.gov/index.html>).

JPL, 2003. AIRSAR Integrated Processor Documentation DATA FORMATS. National Aeronautics and Space Administration (Url: http://airsar.jpl.nasa.gov/data/data_format.pdf).

JPL, 2003. AIRSAR Implementation. National Aeronautics and Space Administration (Url:<http://airsar.jpl.nasa.gov/documents/genairsar/chapter3.pdf>).

JPL, 2003. Shuttle Radar Topography Mission. National Aeronautics and Space Administration (Url:<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

Kervyn, Francois, 2001. Modelling topography with SAR interferometry: illustrations of a favourable and less favourable environment. Computers & Geosciences. Issue 27, 1039–1050.

Kaleva, Osmo, Heimo Ihalainen, Pentti Saarenrinne. 2000. A Wavelet based Method for Estimation of the Power Spectrum from Irregularity Sampled Data. (Url:<http://butler.cc.tut.fi/~kaleva/spectrum/wavelet.pdf>)

Lillesand, Thomas M., Ralph W. Kiefer, 2000. Remote Sensing and Image Interpretation 4th edition, Wiley press.

Lou, Yunling, Yunjin Kim, Jakob Van Zyl, 1995. The NASA/JPL Airborne Synthetic Aperture Radar System. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.(Url: http://airsar.jpl.nasa.gov/documents/genairsar/airsar_paper1.pdf)

Madsen, S.N., Martin, J.M, Zebker, H.A. 1995. Analysis and Evaluation of the NASA/JPL TOPSAR Across-track Interferometric SAR System. IEEE

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
- Milkhail, Edward M., James S. Bethel, J. Chris McGlone, 2001. Introduction to Modern Photogrammetry. John and Wiley & Son Inc., chapter 11, 323~344.
- Madsen, Soren N., Jan M. Martin, Howard A. Zebker. 1995. Analysis and Evaluation of the NASA/JPL TopSAR Across-Track Interferometric SAR System. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing., 33(2)??-??..
- Mallat, Stephane. 1999. A Wavelet Tour of Signal Processing 2e. Academic Press.
- Misiti, Michel, Yvse Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi. 1997. Wavelet Toolbox for Use with Matlab. Mathworks Inc.
- Norheim, Robert A., Vivian R. Queija, and Ralph A. Haugerud. 2002. Comparison of LIDAR and INSAR DEMs with dense ground control.
(Url:<http://gis.esri.com/library/userconf/proc02/pap0442/p0442.htm>.)
- Ouarzeddine, Mounira S., 2002. Generation of Digital Terrain Models using polarimetric SAR interferometry. ITC. Holland.
(Url: http://www.itc.nl/library/Papers/msc_2002/gfm/ouarzeddine.pdf)
- Polikar, Robi. 2001. The Wavelet Tutorial.
(Url:<http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>)
- Quattrochi, Dale A., Michael F. Goodchild. 1997. Scale in Remote Sensing and GIS. CRC Press.
- Robinson, Arthur H., Joel L. Morrison, Phillip C. Muehrcke, A. Jon Kimerling, Stephen C. Guptill. 1995. Elements of Cartography 6e. Wiley Press.
- Rabus, B., Michael Eineder, Achim Roth, Richard Bamler, 2003. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, issue 57, 241-262.
- Sarah A. Little. 1994. Wavelet Analysis of Seafloor Bathymetry : An Example.

Wavelets in Geophysics. Wavelet Analysis and its Applications volume 4. P.167-182. Academic Press Inc.

Sun, G., K.J. Ranson, V.I. Kharuk, K. Kovacs, 2003. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. Remote Sensing of Environment, issue 88, 401–411.

USGS ,2003. Shuttle Radar Topography Mission Home page. U.S. Geological Survey. (Url:<http://srtm.usgs.gov/index.html>).

Wu, Fan, 2001. A Study on the Scale-Dependent Representations of Relief Based on Wavelet Analysis. School of Resource and Environment Science, Wuhan University, P.R.China.

(Url:<http://www.ikg.uni-hannover.de/isprs/workshop/wufan.doc>)

Wood, Jo, 1996. The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models. Ph.D. thesis. City university. London.

(Url:<http://www soi.city.ac.uk/~jwo/phd/>.)

Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1999. The generic mapping tools (GMT) technical reference and cookbook, Univ. of Hawaii, USA.

Zebker, Howard A., Thomas G. Farr, Ronald P. Salazar, 1995. Mapping the World's Topography Using Radar Interferometry: the TOPSAT Mission. JPL, National Aeronautics and Space Administration.

Zatelli, Paolo, Andrea Antonello. 2002. New GRASS Modules for Multiresolution Analysis with Wavelets. Proceedings of the Open source GIS – GRASS users conference 2002.

(Url:http://www.ing.unitn.it/~grass/conferences/GRASS2002/proceedings/proceedings/pdfs/Zatelli_Paolo.pdf)

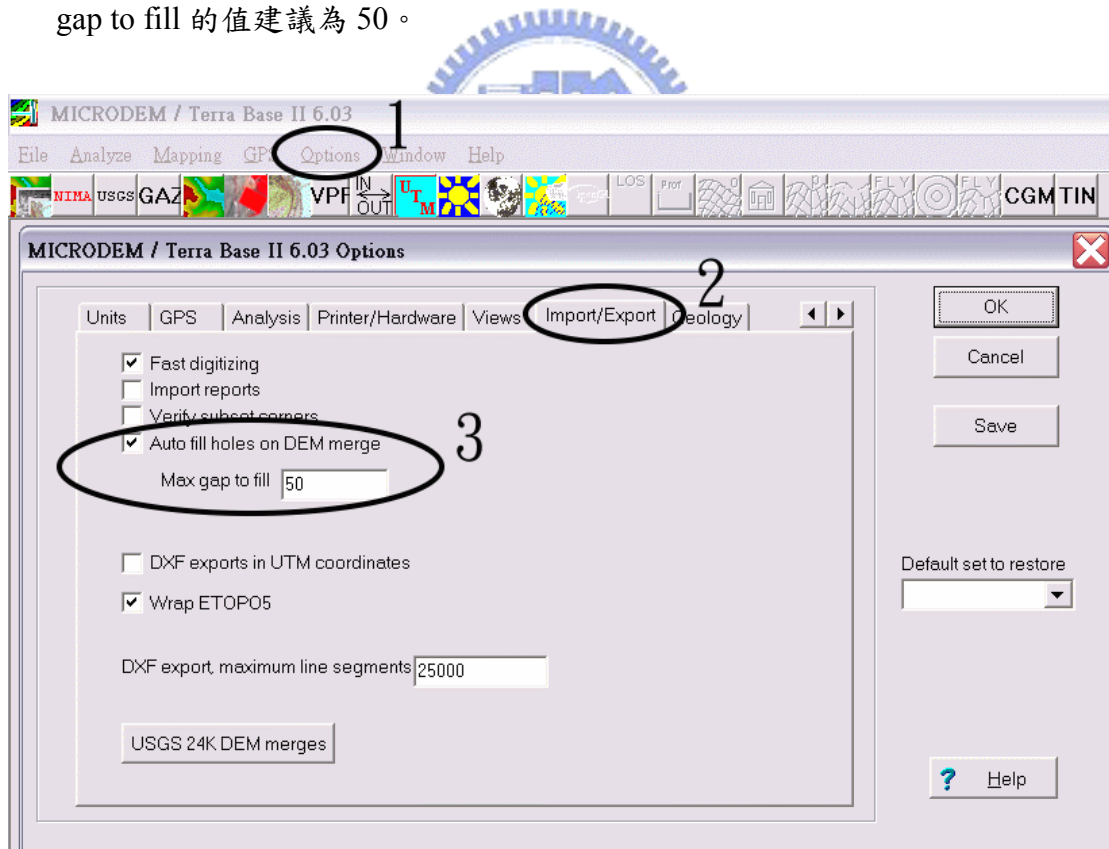
附錄 A：SRTM 數據 HGT 轉 ASCII 流程

SRTM 網頁提供 ESRI 產品 ARC/INFO 及 ArcView 使用者之觀看方式，為更換檔名 .HGT 為 .BIL 即可直接載入觀看。轉檔則須使用 IMAGEGRID，並須先行製作檔頭。本文謹提供使用一免費軟體 MicroDEM/terrabass 6.02 版之作業方式，以供使用者參考。

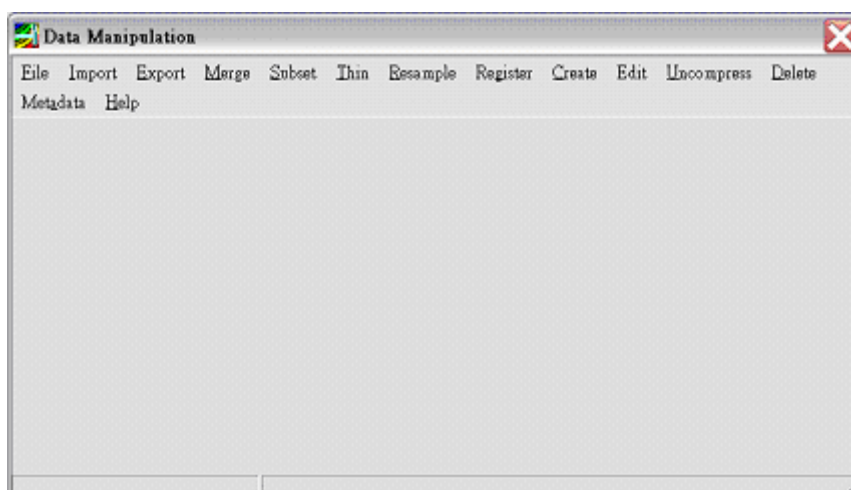
1. MicroDEM/terrabass 6.02 版是較為穩定的版本，建議使用此版本。請由此下載 http://www.wood.army.mil/TVC/MicroDEMv6/microdem_ver_60.htm。



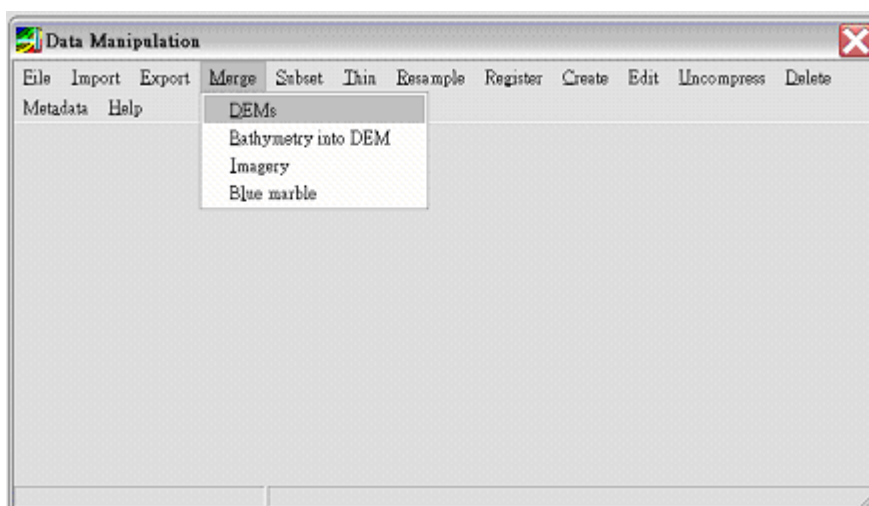
2. 開啟 MICRODEM 軟體，由下拉式選單選取 Option (1)，再由上方標籤頁中尋找 Import/Export(2)，可以選擇轉出的 ASCII DEM 是否要將空缺點填補，Max gap to fill 的值建議為 50。



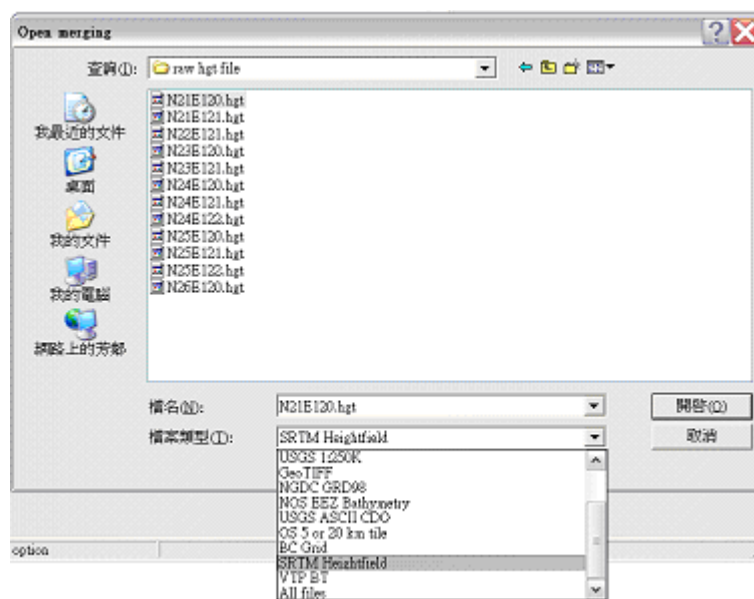
3. 由下拉式選單 File -> Data Manipulation 開啟資料處理副程式。



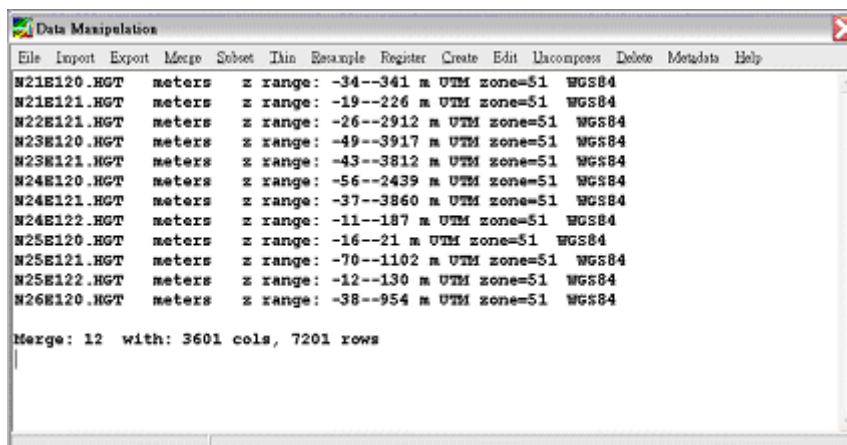
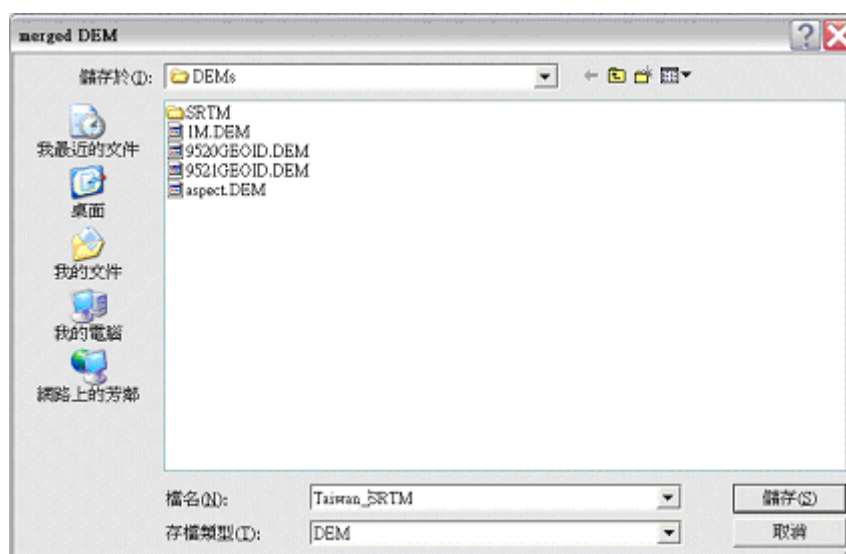
4. 由上方下拉式選單選擇 Merge -> DEM，進行資料的接合動作。



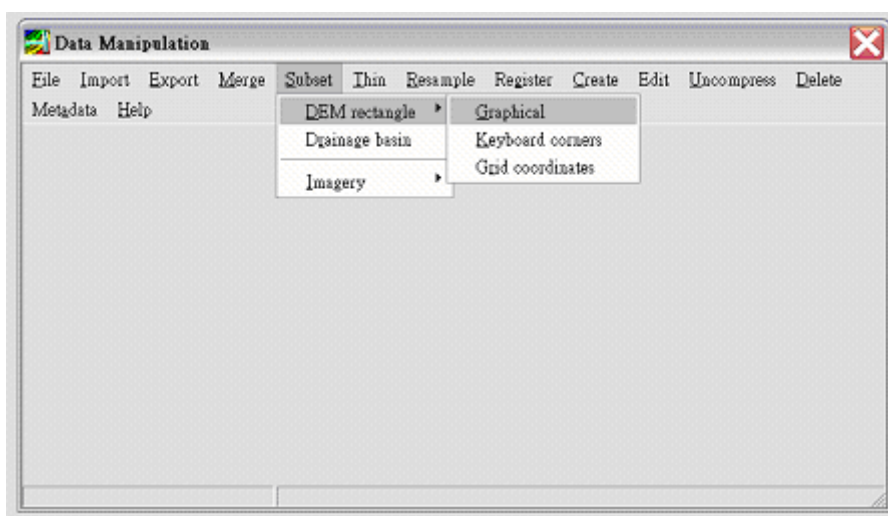
5. 檔案類型選擇 SRTM heightfield，會出現 .hgt 檔，一一以滑鼠將之開啟，結束時選擇取消。



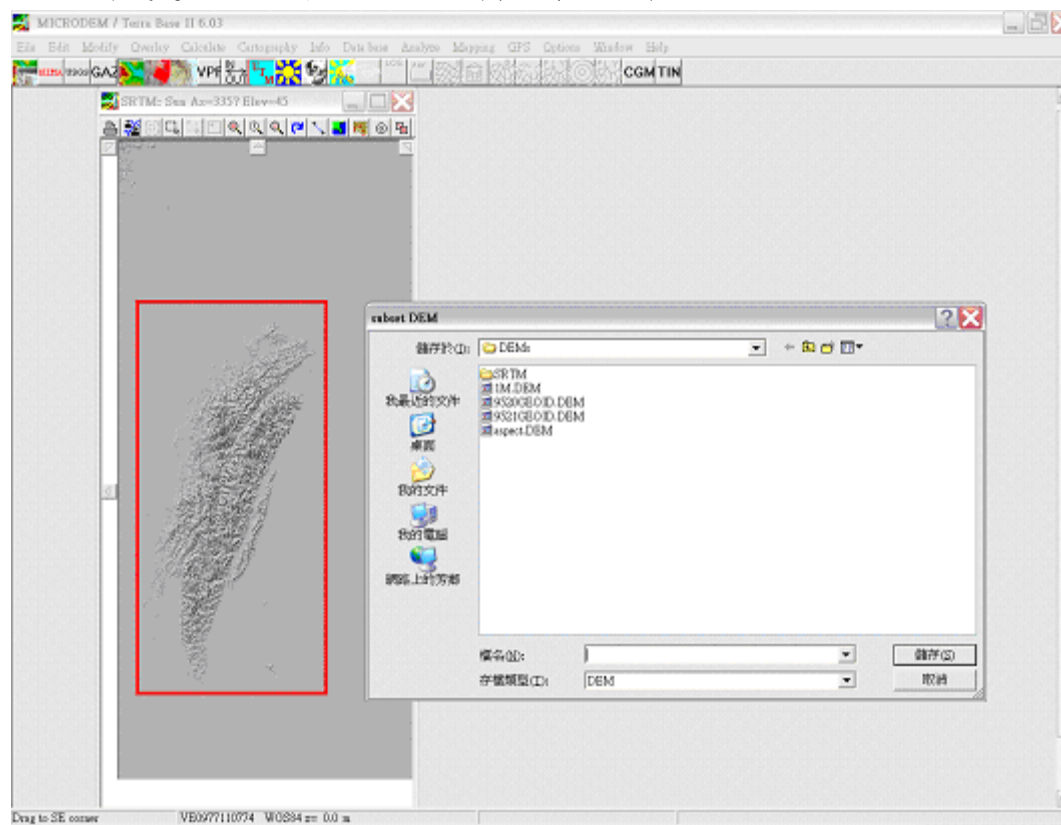
6. 接著出現存檔視窗，請輸入接合後的檔名。



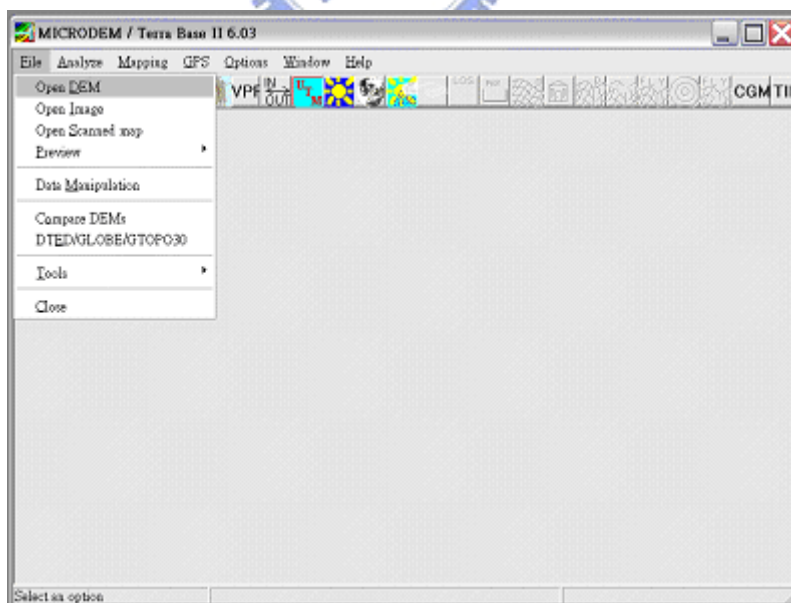
7. 由下拉式選單選擇 Subset -> DEM rectangle -> Graphical，選擇剛剛接合的檔案。



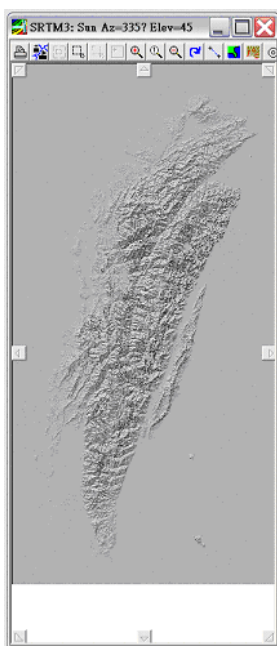
8. 以滑鼠選取欲切割的區域，並輸入存檔檔案名。



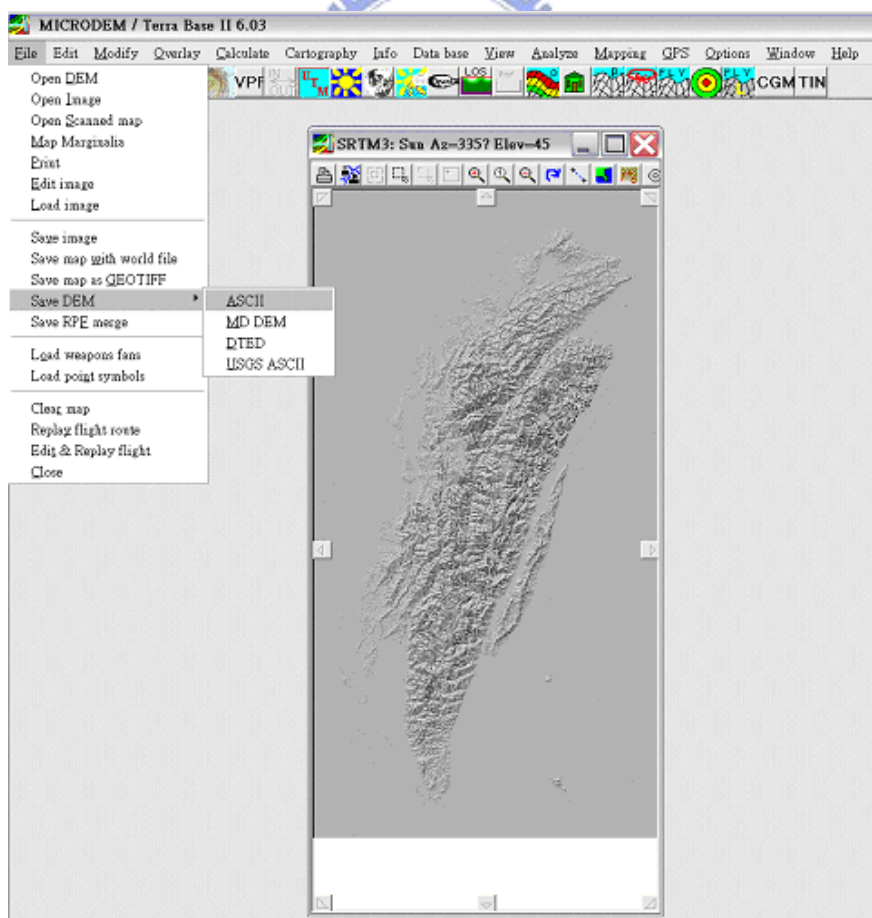
9. 回到 MicroDEM 主程序，由下拉式 File -> Open DEM 開啟裁切完的檔案。



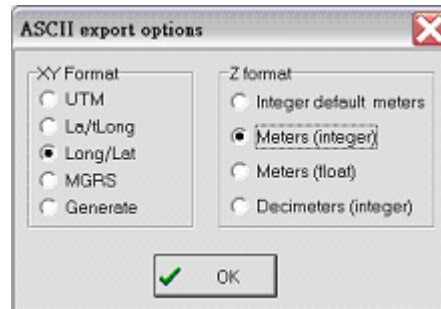
10. 檢查輸出區域的黑白暈渲圖。



11. 由 File -> Save DEM -> ASCII 將 MD DEM 檔轉成 ASCII XYZ。



12. ASCII 輸出格式 XY 選擇 Long/Lat，Z 選擇 Meters(integer)已足夠。如需地圖投影後座標，則可選擇 UTM 選項，直接產生國際橫麥卡托座標。



13. 至此轉出資料格式為經緯度，Z 為橢球高，需經地圖投影轉換成 TWD97 座標。本研究使用 Proj4 程式進行計算轉換。下載地點 <http://remotesensing.org/proj/>，本文使用 Windows 編譯版本，請依照 readme.txt 進行安裝。

14. 使用指令為 `proj +proj=tmerc +lon_0=121 +ellps=WGS84 +k=0.9999`

`+x_0=250000 -f %.0f SRTM.xyz>SRTM_TWD97.xyz`

指令說明：`+proj=tmerc` 選擇投影方式，`tmerc` 為橫麥卡脫投影

`+lon_0=121` 中央子午線為 121 度

`+ellps=WGS84` 參考橢球選擇 WGS84

`+k=0.9999` 尺度參數選擇 0.9999

`+x_0=250000` 橫座標平移 250000 公尺

`-f%.0f` 輸出至小數點下 0 位。

`SRTM.xyz>SRTM_TWD97.xyz` 輸入>輸出檔名

附錄 B：高程比對誤差直方圖

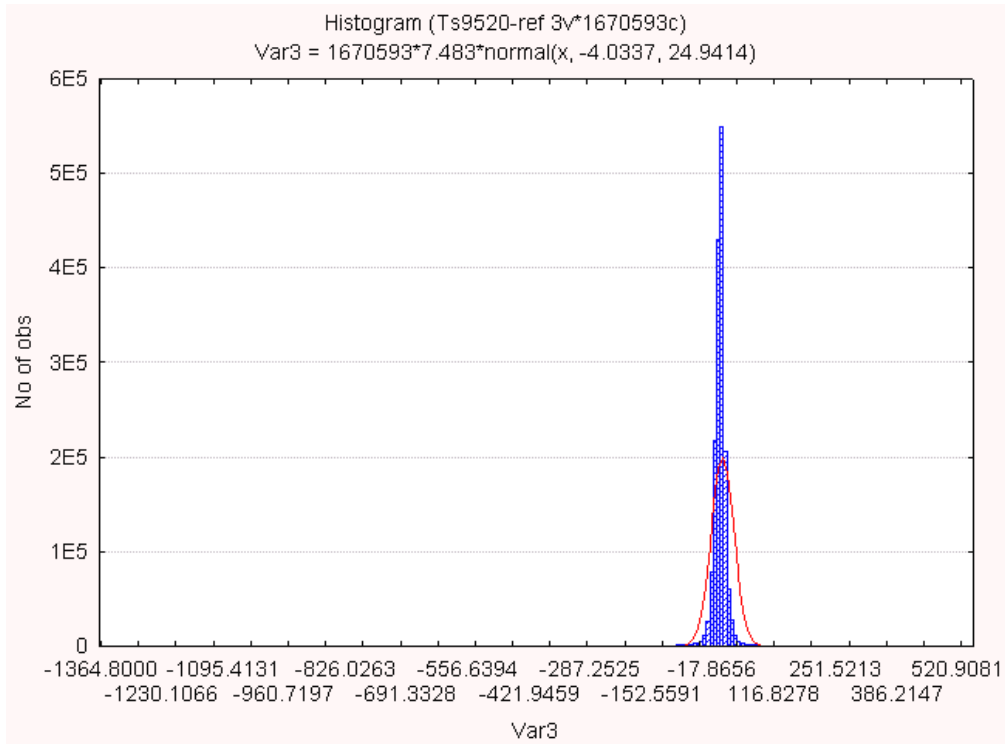


圖 B-1：9520 實驗區 TopSAR 誤差值方圖

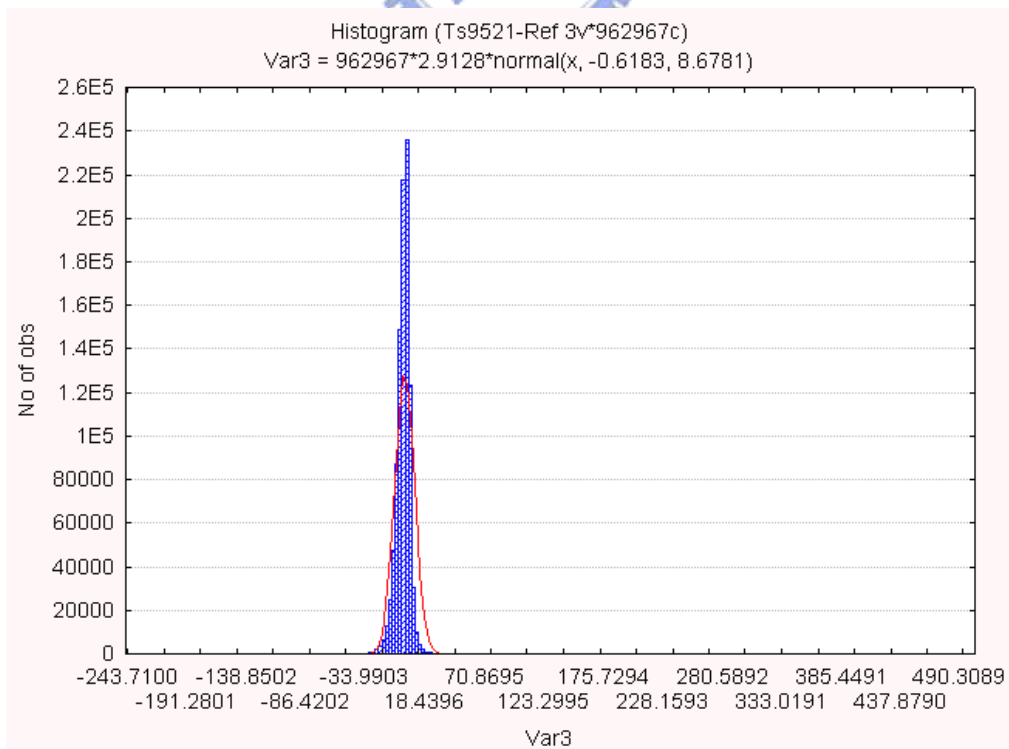


圖 B-2：9521 實驗區 TopSAR 誤差值方圖

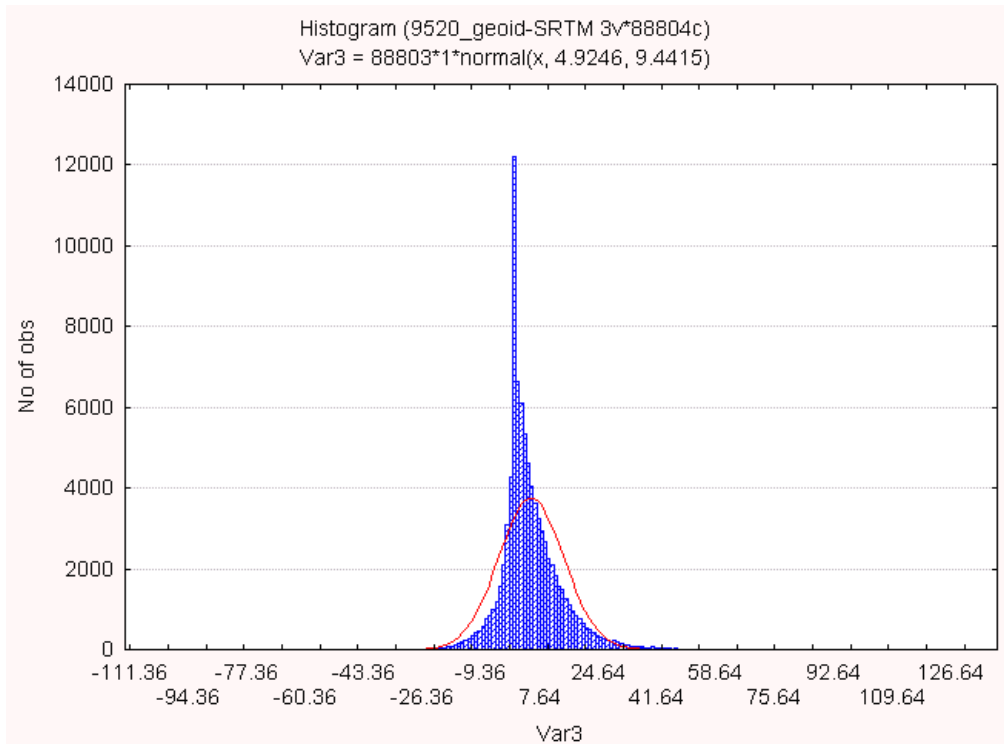


圖 B-3：9520 實驗區 SRTM 誤差值方圖

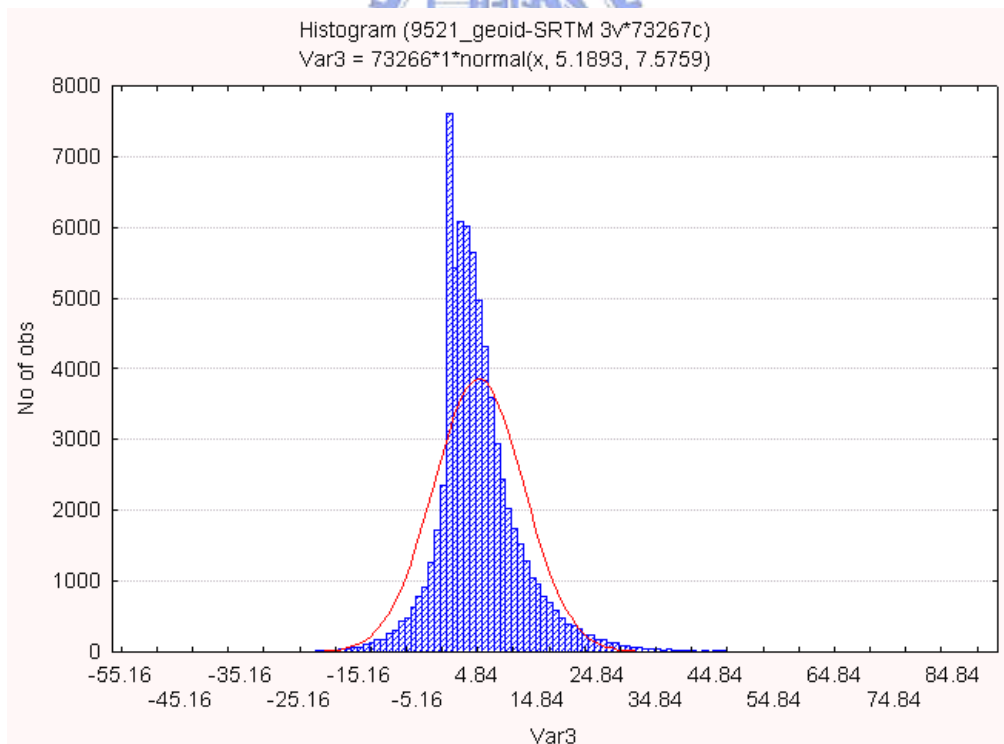


圖 B-4：9521 實驗區 SRTM 誤差值方圖

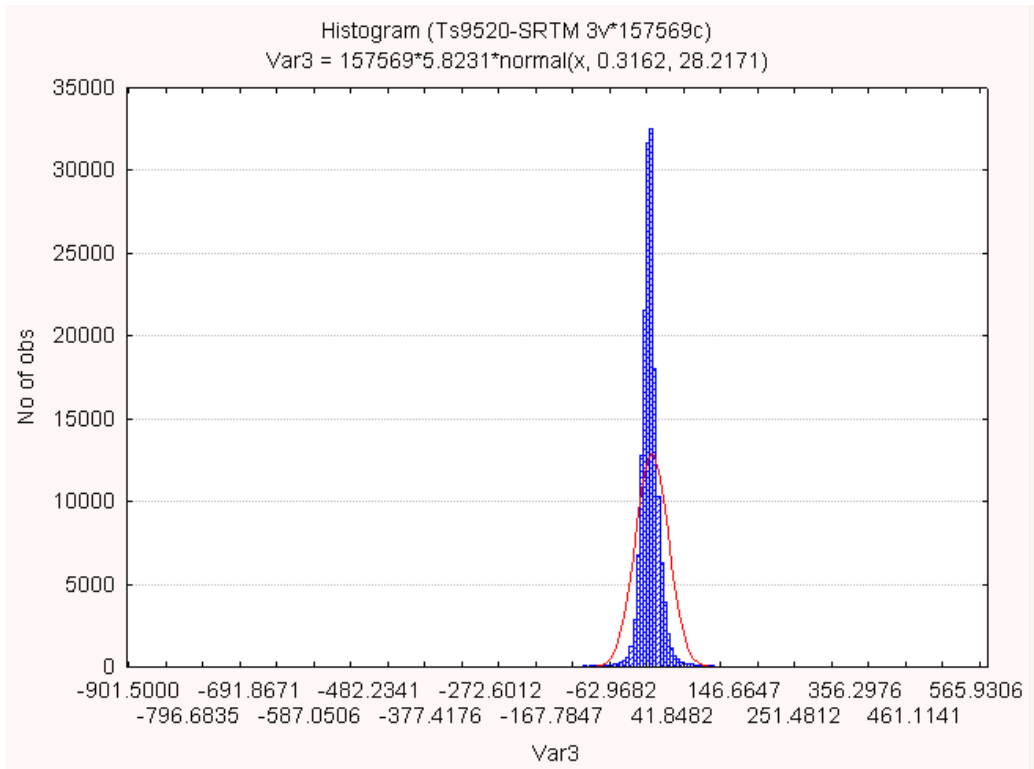


圖 B-5：9520 實驗區 TopSAR-SRTM 相對誤差值方圖

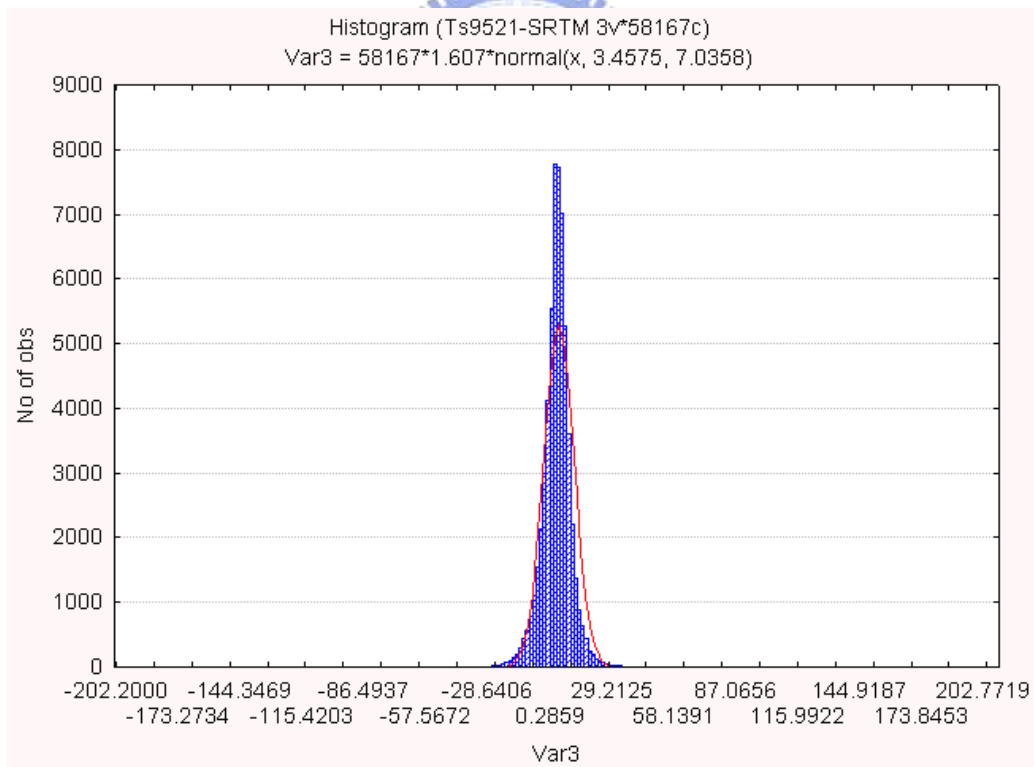


圖 B-6：9521 實驗區 TopSAR-SRTM 相對誤差值方圖

附錄 C：小波分析實驗數據

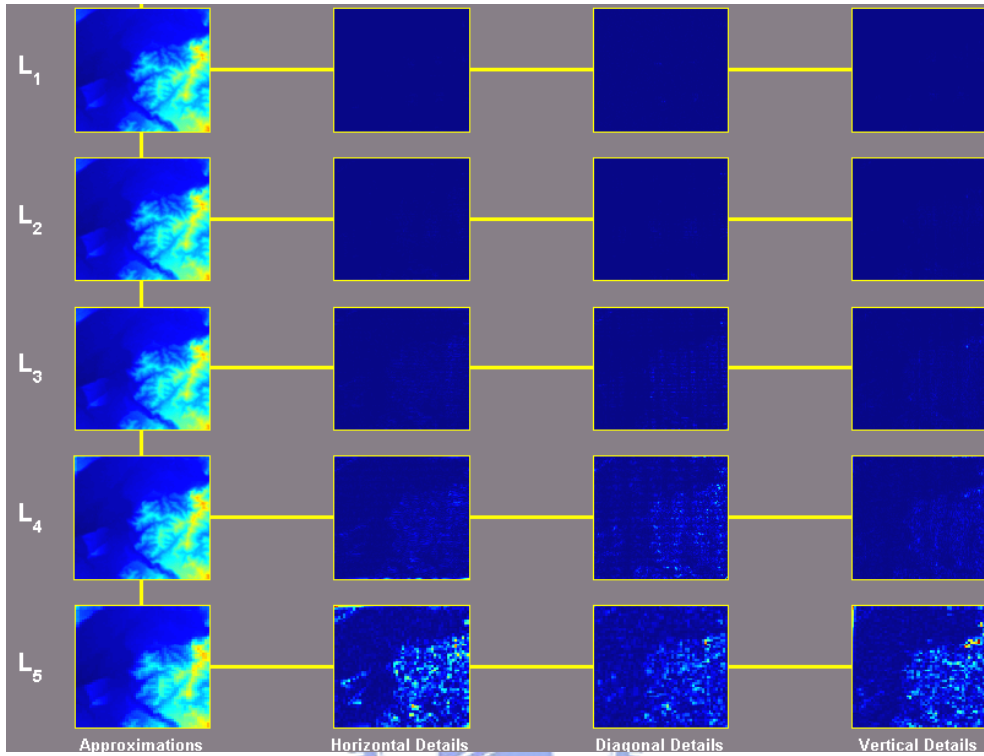


圖 C-1：SRTM9520 以 Db3 小波進行五層分解

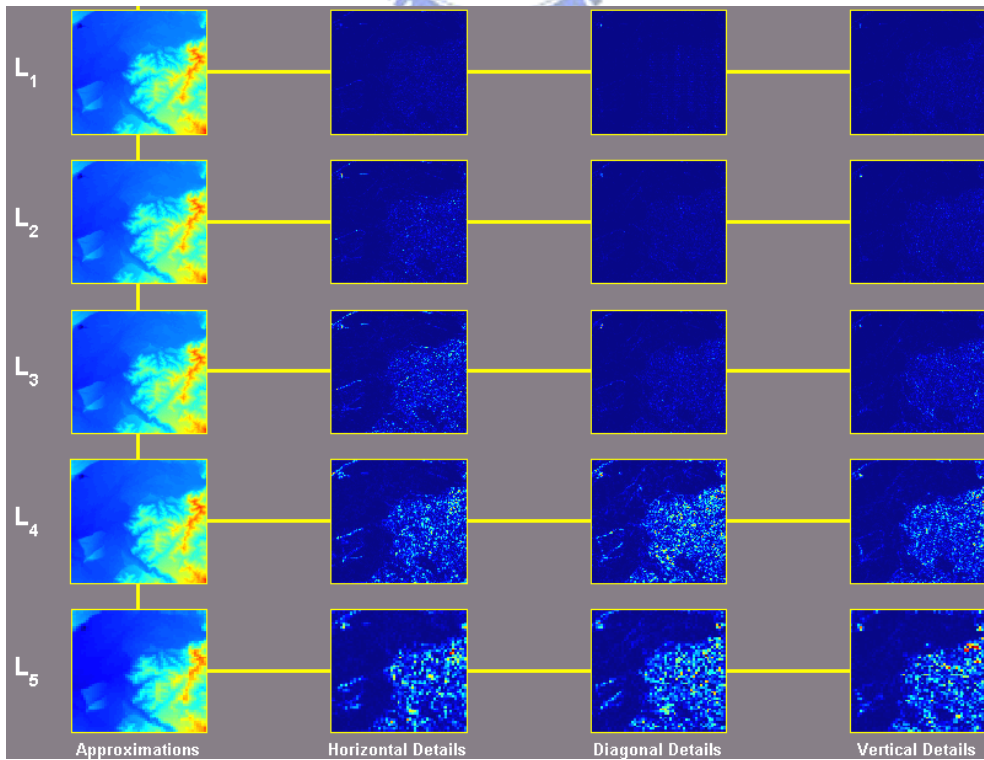


圖 C-2：R9520 以 Db3 小波進行五層分解

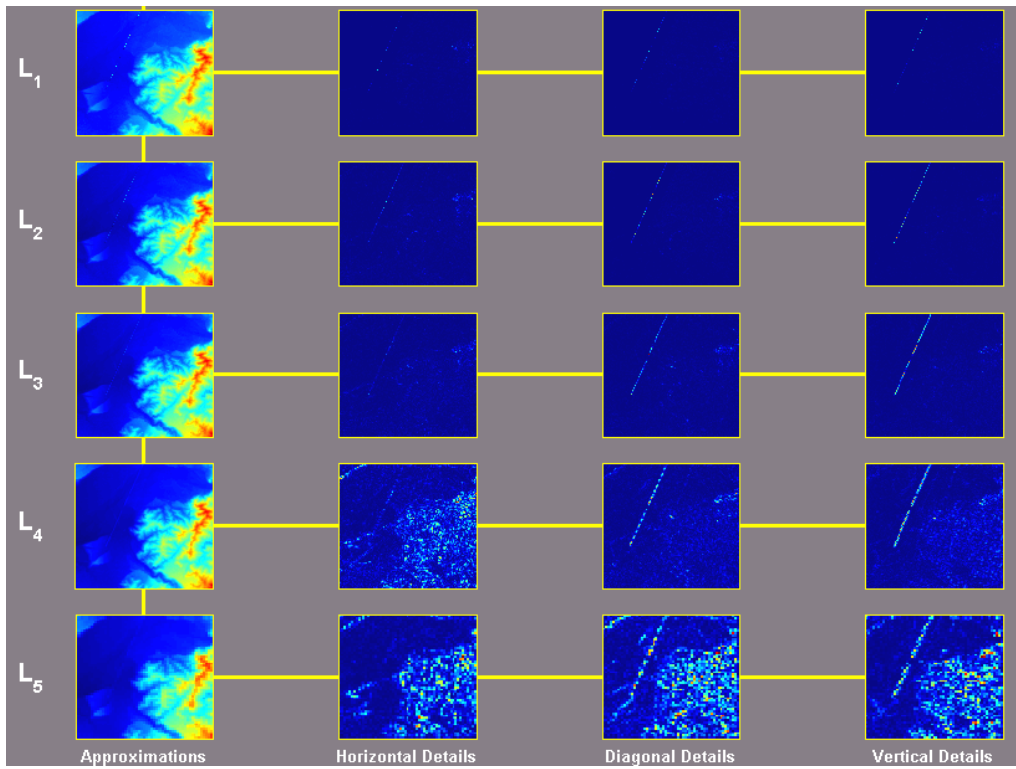


圖 C-3：TS9520 以 Db2 小波進行五層分解

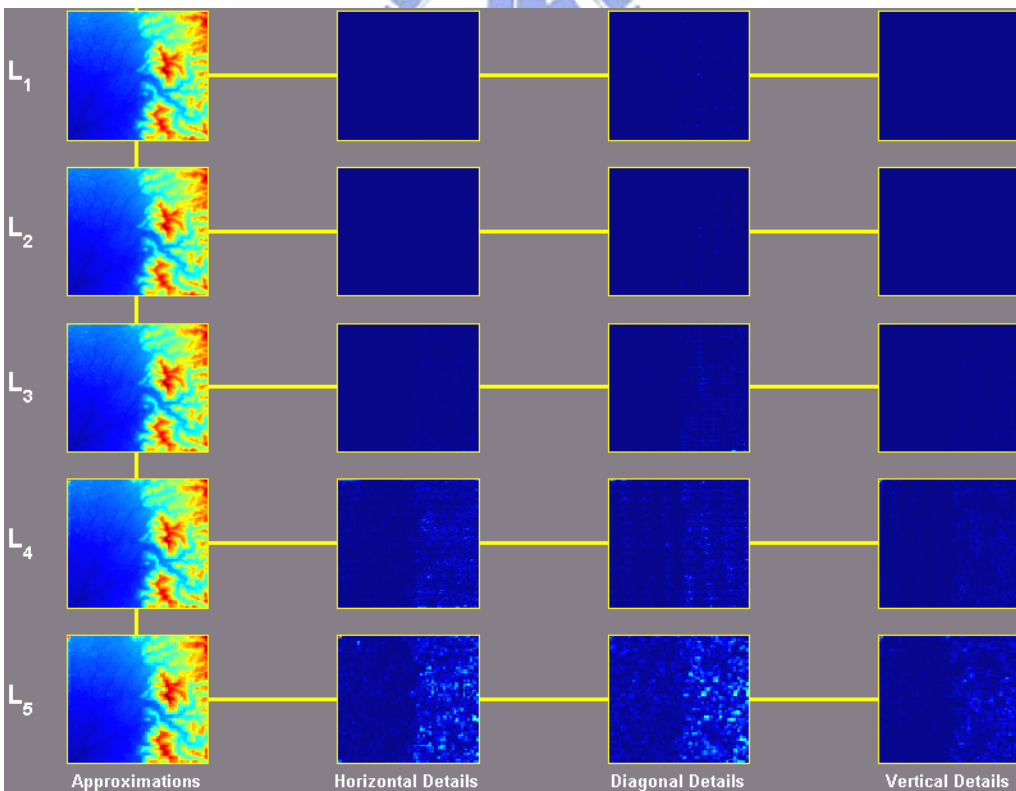


圖 C-4：SRTM9521 以 Db3 小波進行五層分解

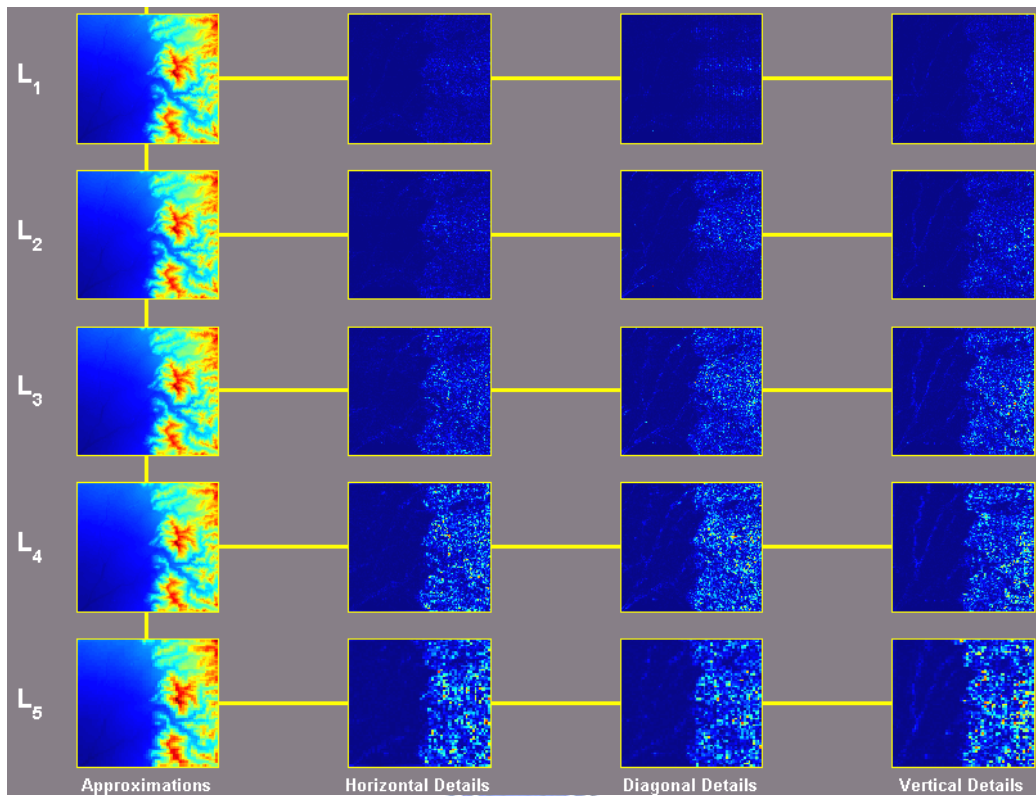


圖 C-5：R9521 以 Db3 小波進行五層分解

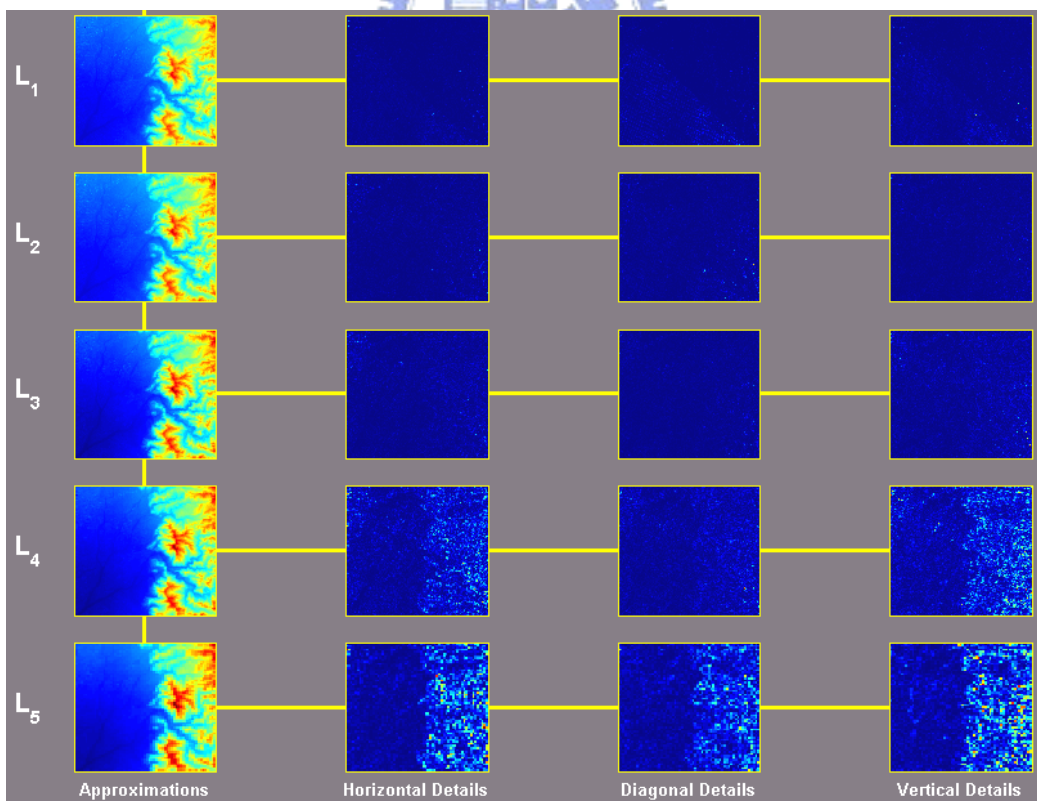


圖 C-6：Ts9521 以 Db3 小波進行五層分解

表 C-1-1：SRTM9520 於 db3 小波進行五層分解小波係數平方和取對數

| Scale | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| S _A | 26.1909 | 26.2010 | 26.2123 | 26.2530 | 26.3343 |
| S _H | 9.1943 | 11.6331 | 13.8360 | 15.4460 | 17.4186 |
| S _V | 9.3230 | 11.8529 | 14.1719 | 15.5895 | 17.3065 |
| S _D | 3.0763 | 5.6567 | 9.4772 | 11.1295 | 14.2270 |

表 C-1-2：R9520 以 db3 小波進行五層分解小波係數平方和取對數

| Scale | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| S _A | 26.3132 | 26.3230 | 26.3339 | 26.3317 | 26.4489 |
| S _H | 9.6299 | 12.1789 | 14.8497 | 16.6611 | 18.1176 |
| S _V | 9.7248 | 12.1909 | 14.8235 | 16.5478 | 18.0063 |
| S _D | 6.3107 | 7.6845 | 12.2984 | 14.6914 | 16.3453 |

表 C-1-3：Ts9520 以 db3 小波進行五層分解小波係數平方和取對數

| Scale | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| S _A | 26.1896 | 26.1989 | 26.2090 | 26.2466 | 26.3210 |
| S _H | 15.8069 | 15.0534 | 15.4620 | 16.4504 | 17.9629 |
| S _V | 17.5869 | 16.9151 | 16.4594 | 16.4834 | 17.6800 |
| S _D | 15.5516 | 15.4873 | 14.9090 | 14.9605 | 16.0556 |

表 C-1-4：SRTM9521 於 db3 小波進行五層分解小波係數平方和之對數

| Scale | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| S _A | 25.8151 | 25.8261 | 25.8405 | 25.8698 | 25.9596 |
| S _H | 7.6691 | 10.5843 | 13.0057 | 15.0225 | 17.5444 |
| S _V | 8.4398 | 11.4370 | 13.7530 | 15.3676 | 17.7609 |
| S _D | 2.4046 | 4.9611 | 8.8277 | 11.1800 | 14.8642 |

表 C-1-5：R9521 以 db3 小波進行五層分解小波係數平方和之對數

| Scale | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| S _A | 25.9427 | 25.9532 | 25.9666 | 25.9622 | 26.0735 |
| S _H | 9.5259 | 12.0541 | 14.8354 | 16.7548 | 18.1863 |
| S _V | 9.6349 | 12.2149 | 15.0233 | 16.8806 | 18.1476 |
| S _D | 6.3531 | 7.6662 | 12.3600 | 14.8962 | 16.7792 |

表 C-1-6：Ts9521 以 db3 小波進行五層分解小波係數平方和之對數

| Scale | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| S _A | 25.7855 | 25.7959 | 25.8088 | 25.8341 | 25.9138 |
| S _H | 14.5895 | 15.1242 | 16.0129 | 16.9973 | 18.2295 |
| S _V | 14.3691 | 14.4699 | 15.3374 | 16.5636 | 17.9731 |
| S _D | 13.9225 | 13.3596 | 14.3909 | 15.1753 | 16.7012 |

表 C-2-1：由 db3 小波重建不同尺度 SRTM9520 精度變化

| Scale | J ₀ | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|-------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Mean | -18.7757 | -18.7761 | -18.7779 | -18.7777 | -18.7670 | -18.7336 |
| Std | 6.7238 | 6.7215 | 6.7153 | 6.7085 | 6.8484 | 8.6436 |
| Max | 116.2720 | 116.2685 | 116.2592 | 116.2408 | 116.1902 | 117.3505 |
| Min | -64.1100 | -64.0943 | -63.8500 | -63.7269 | -64.4653 | -81.5679 |

表 C-2-2：由 db3 小波重建不同尺度 Ts9520 精度變化

| Scale | J ₀ | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|-------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Mean | -19.6698 | -19.6695 | -19.6699 | -19.6699 | -19.6709 | -19.6713 |
| Std | 8.7087 | 7.4482 | 6.7862 | 6.3529 | 6.4869 | 8.6557 |
| Max | 595.4900 | 349.8077 | 202.3138 | 114.4319 | 114.1752 | 116.2227 |
| Min | -170.4700 | -151.8259 | -139.6555 | -110.0098 | -101.4584 | -107.6900 |

表 C-2-3：由 db3 小波重建不同尺度 SRTM9521 精度變化

| Scale | J ₀ | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|-------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Mean | -14.7981 | -14.7983 | -14.7993 | -14.7988 | -14.7939 | -14.7788 |
| Std | 5.9460 | 5.9450 | 5.9401 | 5.9417 | 6.1215 | 7.8857 |
| Max | 281.7000 | 271.2903 | 253.5287 | 180.0268 | 154.0436 | 116.5399 |
| Min | -53.7400 | -53.7478 | -53.7244 | -53.2997 | -57.6082 | -67.9216 |

表 C-2-4：由 db3 小波重建不同尺度 Ts9521 精度變化

| Scale | J ₀ | J ₀₋₁ | J ₀₋₂ | J ₀₋₃ | J ₀₋₄ | J ₀₋₅ |
|-------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Mean | -18.9086 | -18.9088 | -18.9087 | -18.9083 | -18.9066 | -18.9094 |
| Std | 5.2480 | 5.1286 | 4.9829 | 4.7559 | 5.2403 | 7.6961 |
| Max | 192.4500 | 188.2217 | 234.1777 | 98.2530 | 47.3690 | 30.1005 |
| Min | -166.9600 | -183.8847 | -209.1463 | -102.6518 | -67.2513 | -76.8161 |

表 C-3-1：SRTM9520 與 R9520 小波係數相關性分析，db3 小波

| Scale | J ₀ -1 | J ₀ -2 | J ₀ -3 | J ₀ -4 | J ₀ -5 |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| R _A | 0.9982 | 0.9981 | 0.9980 | 0.9694 | 0.9971 |
| R _H | 0.4814 | 0.3838 | 0.3026 | 0.4097 | 0.8043 |
| R _V | 0.5539 | 0.4873 | 0.3413 | 0.4315 | 0.8052 |
| R _D | 0.0030 | 0.0010 | 0.0218 | 0.1008 | 0.5843 |

表 C-3-2：Ts9520 與 R9520 小波係數相關性分析，db3 小波

| Scale | J ₀ -1 | J ₀ -2 | J ₀ -3 | J ₀ -4 | J ₀ -5 |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| R _A | 0.9980 | 0.9983 | 0.9986 | 0.9712 | 0.9990 |
| R _H | 0.0061 | 0.0591 | 0.3060 | 0.7098 | 0.9265 |
| R _V | 0.0095 | 0.0101 | 0.0915 | 0.4725 | 0.8626 |
| R _D | 0.0016 | 0.0036 | 0.0138 | 0.2649 | 0.7578 |

表 C-3-3：Ts9520 與 SRTM9520 小波係數相關性分析，db3 小波

| Scale | J ₀ -1 | J ₀ -2 | J ₀ -3 | J ₀ -4 | J ₀ -5 |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| R _A | 0.9979 | 0.9981 | 0.9980 | 0.9975 | 0.9960 |
| R _H | 0.0027 | 0.0257 | 0.0839 | 0.2427 | 0.7852 |
| R _V | 0.0142 | 0.0107 | 0.0427 | 0.2240 | 0.7342 |
| R _D | -0.0008 | 0.0034 | 0.0020 | 0.0539 | 0.5614 |

表 C-3-4：SRTM9521 與 R9521 小波係數相關性分析，db3 小波

| Scale | J ₀ -1 | J ₀ -2 | J ₀ -3 | J ₀ -4 | J ₀ -5 |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| R _A | 0.9981 | 0.9979 | 0.9974 | 0.9664 | 0.9900 |
| R _H | 0.3532 | 0.2561 | 0.2151 | 0.4514 | 0.7921 |
| R _V | 0.3919 | 0.2607 | 0.1972 | 0.3708 | 0.6896 |
| R _D | 0.0032 | 0.0059 | 0.0230 | 0.0820 | 0.6617 |

表 C-3-5：Ts9521 與 R9521 小波係數相關性分析，db3 小波

| Scale | J ₀ -1 | J ₀ -2 | J ₀ -3 | J ₀ -4 | J ₀ -5 |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| R _A | 0.9987 | 0.9987 | 0.9989 | 0.9683 | 0.9993 |
| R _H | 0.0234 | 0.0968 | 0.3446 | 0.7470 | 0.9102 |
| R _V | 0.0050 | 0.0282 | 0.2863 | 0.7434 | 0.9215 |
| R _D | -0.0008 | -0.0038 | 0.0396 | 0.4460 | 0.8417 |

表 C-3-6：Ts9521 與 SRTM9521 小波係數相關性分析，db3 小波

| Scale | J ₀ -1 | J ₀ -2 | J ₀ -3 | J ₀ -4 | J ₀ -5 |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| R _A | 0.9979 | 0.9977 | 0.9972 | 0.9952 | 0.9885 |
| R _H | 0.0242 | 0.0196 | 0.0661 | 0.3697 | 0.7389 |
| R _V | 0.0085 | 0.0029 | 0.0370 | 0.3229 | 0.6589 |
| R _D | -0.0007 | -0.0019 | 0.0035 | 0.672 | 0.6223 |

作者簡歷

姓名：賴子銘

籍貫：台灣省台中市

出生日期：民國 69 年 6 月 26 日

學歷：國立台中一中畢業

國立成功大學測量工程學系畢業

國立交通大學土木工程學系碩士班肄業

經歷：九十二年專門職業及技術人員高等考試測量技師及格

