

國立臺灣大學理學院地質科學研究所

碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis



2007 年寮國地震之發震構造特性與區域構造活動關聯研究

Regional seismotectonic characteristics from the

2007 Laos Earthquake

李蕙成

Huey-Cheng Lee

指導教授：徐濤德 博士

Advisor: J. Bruce H. Shyu, Ph.D

中華民國 105 年 1 月

January, 2016



國立台灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

2007 年寮國地震之發震構造特性與區域構造活動關聯研究

Regional seismotectonic characteristics from the  
2007 Laos Earthquake

本論文係李蕙成君(R02224213)在國立台灣大學地質科學研究所完  
成之碩士學位論文，於民國 105 年 1 月 21 日承下列考試委員審查通過  
及口試及格，特此證明

口試委員：

徐沁存

(簽名)

張良毅 (指導教授)

張中白

胡植慶

張午韻

## 謝 誌

閉上眼睛，腦海中浮現的仍是那個飄著冷雨的秋季，嵐霧繚繞如山水畫的瑞穗。會對地質科學充滿熱愛是來自於皓德老師在大三課程的啟蒙，之後也毫不猶疑地繼續跟著老師的腳步探索構造地質，不知不覺也有五年餘，從老師身上學到的不只是學術方面的領悟，更有人生課題的無形學分。老師曾問我，在碩士班最大的收穫是什麼？恐怕學術上的收穫已經無法用三言兩語道盡，另一方面，老師的教誨總是讓我反省，學著戒掉陋習而成為更成熟的人。

感謝昱廷、耕霈、童忻與啟賢前輩，沒有你們的指點，我不可能在這個完全陌生的遙測科學領域摸索出任何結果。感謝委員中白老師、午龍老師、君毅老師及植慶老師的指教，口試這天的當頭棒喝指點出許多未解的迷津。口試我後我已盡力修改論文以達成老師們的期許，然仍有未逮之處，希望能得到您們的諒解。

感謝實驗室的承鴻、原閔、念祺、奕維、佳穎、怡蓉、俊甫、崇哲、冠穎前輩，你們的教導、照顧與提醒，讓我在散漫的生活中不致於過度偏離學習軌道；感謝元祿、佳欣、司捷、宇威、瑀萱、吳侯、佳諭，我在忙碌的碩士時期像壞婆婆般使喚，你們也毫無怨言的包容與幫忙。

感謝在我迷惘時從不拒絕我的台大新體，許多人生的解答都是在槓片與啞鈴起落之間的沉思得到答案，在這裡我也獲得了比逃避還大的力量。感謝楷文、彥威、孟愉、名萍、耕弘、仁政、冠霖、品依、智凱、柏廷、持衡、楊寬、宇屏、俊傑、岑勳、元杰，從你們身上我學到如何在逆境中更堅韌心智，我們也一起走過了艱難的挑戰，對我來說也是碩士班最難忘的回憶之一。

感謝嘉佳，在台大的數個年頭，低潮或行動不便，都有你不辭辛勞的幫忙及傾聽。感謝俊瑋與奕德，在 EGU 無微不至的照顧，沒有你們，我可能就不只是掉了個錢包而已。在異國一起度過的這段會議時光，是碩士求學年間最有價值的學術里程。

感謝俊穎、峻浩與峻皓(很巧地你們名字都很像)，幫忙組裝電腦、compile 這麼多的程式語言，碰到千奇百怪的問題，都在你們的幫忙下迎刃而解。沒有你們，這個研究根本不知道從何開始。

感謝我的父母，沒有你們無私的付出，我不可能在校園生活毫無後顧之憂的盡情學習與揮灑。當自己開始扛下經濟重擔時，才能了解承擔壓力的責任與偉大。感謝我的哥哥與姊姊，你們一路以來的扶持，逆境時的鼓勵，讓我跨越無數的障礙。

感謝翊楷，你在我碩士班最艱難的階段出現在我的生命裡，為苦悶的生活增添了色彩，感謝你無微不至的照顧與體諒，並陪我在研究室度過無數個半夜到天明，義無反顧地成為我情緒的窗口。

本篇拙作得以完成，需要感謝每一分每一秒曾相伴在我身邊的人，得之於你們太多，原諒我未能逐一感謝。期許自己能繼續精進，不辜負你們的期望。

## 摘要



接近 70 年無大地震的寮國北部，在 2007 年 5 月 16 日，發生了一起 Mw 6.3 的地震，以及長達兩個月的群震。在低度開發、無地震測站亦無大地水準測量資料，同時甚難到達的該區域，關於這些地震的資料十分稀少，地震定位解析度也很差，然而在該區域鄰近的緬甸、泰國也在此地震後發生了 Mw 分別為 6.8、6.1 的大地震，顯示此區域存在著活躍的活動斷層。前人已依歷史地震及構造地形特性繪製出泰國-寮國-緬甸境內的活動斷層圖，因此我們知道在寮國北部的大地構造型態主要是發育東北—西南走向的斷層，根據 USGS、Global CMT、ANSS 的地震定位及中國雲南地震觀測局與越南地震局的未發表地震資料，本研究推斷 2007 年 5 月 16 日的寮國地震應發生在湄善斷層(Mae Chan fault)上，且震後於同斷層上的餘震活動約持續了兩個月。為了研究寮國北部的構造活動特性，本研究利用 ALOS 衛星(Advanced Land Observing Satellite)在 2007 年的記錄的 PALSAR 1.0 (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar 1.0)影像，製作 2007/2/17-7/5 與 2007/2/17-8/20 兩幅干涉影像對，並分析此干涉圖的結果，將同震地表變形訊號以 Okada 彈性半空間錯位正演模型，模擬出造成該地表變形的地下斷層錯動模式，再分析此斷層模型錯動的庫倫應力轉移，來解釋 2007 年寮國地震及其群震所指示的構造特性。根據本研究的模擬，2007 年 5 月 16 日寮國地震或可由長 18 公里、寬約 8 公里，平均錯動量為 0.7 公尺的左剪斷層破裂所引發，由模型估算的滑移潛能為  $1.008 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，計算出來的地震矩規模為 6.31，與全球地震網的觀測值相當。模擬出來的地表變形投影在衛星視線方向的量值也近似於干涉結果，約為 5 cm。而由正推模型計算的震後庫倫應力結果顯示，同震變形發生的主要斷層段在震後庫倫應力值下降；震後庫倫應力值上升的區域分別在主震發生之斷層段的兩側，而餘震集中在其西側應力上升的斷層段上；其東側庫倫應力上升，卻幾乎無餘震活

動，可能暗示了該處大地震發生的機率提高，值得投入更多相關研究，探討其地震周期與斷層活動性質。



**關鍵字：**寮國、湄善斷層、合成孔徑雷達差分干涉、彈性半空間錯位模型、庫倫應力轉移、班孟地震

## Abstract



Large earthquakes are often accompanied by noticeable surface deformations and damages. In cases where surface ruptures are visible and field investigations are feasible, detailed information about the co-seismic deformations is generally obtained in the field. However, in cases where field evidence for surface deformations are difficult to delineate either due to smaller magnitude of the events, deeper hypocenters, or inaccessibility of the earthquake area, remote sensing observations may provide information about the co-seismic deformations. This study focuses on the 16 May 2007 Mw 6.3 earthquake that occurred in northwestern Laos where information from GPS networks or seismic stations is scarce. The event also occurred in an area which is nearly inaccessible. Therefore, SAR interferometry is a feasible solution in an attempt to understand the co-seismic deformation pattern of the event. In this study, Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar 1.0 (PALSAR 1.0) images of Advanced Land Observing Satellite (ALOS) were used, and they were analyzed by using the Differential Synthetic Aperture Radar interferometry (D-InSAR) method on the GMTSAR software. Two co-seismic pairs were analyzed, 2007/2/17-7/5 and 2007/2/17-8/20, in order to obtain better constraint for the co-seismic deformation patterns. In this study, a model for the subsurface fault slip was constructed from the InSAR results. The earthquake may have occurred on the Mae Chang fault, one of a



series of left-lateral faults in the region. The main deformation is induced by an 18 km long, ~8 km wide fault patch with the rupture top is at ~ 4 km of and a 0.7m average slip. The attitude of the fault patch is approximately (N54E, 89N). The co-seismic deformation signal is quite apparent on both interferograms. However, the signal is ~15-20 km away from the epicenter locations of most global earthquake catalogues, and the depth of the epicenter is also different by ~10 km. This implies the global catalogues may have large errors in this region due to poor local constraints. The obtained model, nonetheless, is consistent with tectonic geomorphological observations of the area and the focal mechanism from the Global CMT catalogue. Ultimately, the fault parameters suggested from the forward model were applied to calculate coulomb stress transfer, in an attempt to explain the relationship of the main shock and the distribution of the aftershocks.

**Key words:** Laos, Mae Chan fault, Differential interferometric SAR, elastic half-space dislocation model, coulomb stress transfer, Ban Mone earthquake

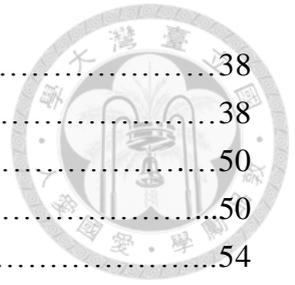
## 目錄



口試委員審定書.....	I
謝誌.....	II
中文摘要.....	III
Abstract.....	V
目錄.....	VII
圖目錄.....	IX
表目錄.....	X

第一章 動機與目的.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
第二章 研究區域地質背景.....	6
2.1 寮國西北部地區地質相關研究概況.....	6
2.1.1 地理概況.....	6
2.1.2 活動構造概況.....	6
2.2 湄善斷層.....	10
2.3 2007年5月16日班孟地震.....	12
第三章 研究方法.....	17
3.1 合成孔徑雷達干涉.....	17
3.1.1 側視雷達與合成孔徑雷達.....	17
3.1.2 合成孔徑雷達影像.....	19
3.1.3 合成孔徑雷達干涉.....	22
3.1.3.1 雷達影像成像解析度及限制.....	23
3.1.4 GMTSAR 影像處理.....	26
3.1.4.1 原始影像前處理.....	29
3.1.4.2 定向與校準.....	29
3.1.4.3 干涉.....	29
3.1.4.4 濾波.....	30
3.1.4.5 snaphu 相位解算.....	30
3.1.4.6 地理資訊定位.....	30
3.1.5 降解析度與資料重新取樣.....	32
3.2 斷層錯位模型.....	32
3.3 庫倫應力轉移.....	34

第四章 研究結果.....	38
4.1 合成孔徑雷達干涉結果.....	38
4.2 2007 年班孟地震之震源機制判定.....	50
4.2.1 同震干涉影像的判讀.....	50
4.3 寮國地震湄善斷層的斷層幾何模型.....	54
4.3.1 斷層錯位模式正推模型.....	54
4.3.2 參數選擇.....	56
4.3.3 正推模型結果.....	59
4.4 庫倫應力轉移模型.....	59
第五章 討論.....	64
5.1 解析能力之疑慮.....	64
5.2 與前人文獻研究之比較異同.....	64
5.3 庫倫應力上升區域所代表的意義.....	66
5.3.1 2007 年群震.....	66
5.3.2 未來地震災害警示區域.....	66
第六章 結論.....	68
參考文獻.....	70
附錄一 中國雲南地震觀測局及越南地震局的測站位置圖.....	72
附錄二 未發表地震資料之地震站位置座標.....	73



## 圖目錄



圖 1.1 研究區域自 1900 年至今規模大於 M 6.0 的地震 (USGS 資料庫).....	2
圖 1.2 湄善斷層空拍影像.....	5
圖 2.1 研究區域活動構造概況.....	7
圖 2.2 越南—柬埔寨—寮國地區兩百萬分之一地質圖.....	8
圖 2.3 東亞及東南亞地體架構示意圖.....	9
圖 2.4 全球地震站及全球 GPS 站在東南亞的分布圖(Simons et al., 2007).....	11
圖 2.5 2007 年 5 月 16 日班孟地震的同震干涉影像(芹澤伸龍, 2012).....	14
圖 2.6 芹澤伸龍的 InSAR 結果與斷層反演結果.....	15
圖 3.2 側視雷達架構示意圖.....	20
圖 3.3 合成天線陣列示意圖 (Usai, 2001).....	21
圖 3.4 合成天線陣列處理流程示意圖.....	21
圖 3.5 雷達設置與解析度示意圖.....	25
圖 3.6 雷達影像和地表平面的關係.....	27
圖 3.7 雜訊與斑駁現象.....	28
圖 3.8 二軌跡差分干涉法流程示意圖.....	31
圖 3.9 斷層錯位滑動模型示意圖.....	33
圖 3.10 彈性半空間錯位模型的座標系統.....	33
圖 3.11 庫倫應力變化與地震活動關係.....	36
圖 4.1 ALOS 圖幅 390 與 400 轉換至雷達座標系統的數值地形圖.....	40
圖 4.2 以圖幅編號 390 的震後影像對 2007/7/5-2007/8/20 所做不同過濾波長及不同 相位解算門檻值的測試結果圖 4.4 降解析度過濾結果 .....	51
圖 4.3 衛星視線方向(LOS)班孟地震同震干涉影像對.....	52
圖 4.4 研究區域 2007 年地震序列.....	53
圖 4.5 產生一單位的相位位移之所有可能性示意圖.....	57
圖 4.6 班孟地震的 Okada 斷層錯位模型.....	61
圖 4.7 班孟地震震後的庫倫應力轉移模型.....	62
圖 5.1 本研究與芹澤伸龍(2012)2007/2/17-2007/7/5 的干涉結果比較.....	67

## 表目錄

表 2.1 全球地震定位系統 USGS, ANSS, Global CMT 的震源機制解.....	15
表 3.1 常用雷達波段分類與衛星平台.....	36
表 4.1 本研究使用的 ALOS 衛星影像對.....	39
表 4.2 雷達座標系統的影像對反射強度圖與同調性.....	41-44
表 4.3 雷達影像處理結果.....	45-49
表 4.4 2007 年班孟地震的 Okada 斷層錯位正推模型輸入參數.....	63

# 第一章 動機與目的



## 1.1 研究動機

斷層在斷層系統之間互相影響，致使地震有序列(earthquake sequence)、群震(earthquake clustering)或餘震(aftershock)等現象，這些地震行為即反映地底下應力分配的變化。自地震學發展至今，已有相當多的研究探討強震後其鄰近地區地震活動頻率(seismicity rate)與應力轉移的關聯性。有別於傳統的彈性回彈學說(Elastic rebound theory)只討論單一斷層應力釋放與回復的活動周期(Reid,1910)；許多研究發現，地震發生時，除了錯動的斷層本身應力狀態改變，周遭其他的斷層的剪應力或正向應力都會一併跟著改變(e.g. Stein et al., 1997；Stein, 1999；Lin and Stein, 2004)。這樣的現象暗示了地震活動周期並非僅考慮單一斷層活動就能概括，而必須考慮地震之間「互相影響」的可能性，而有些研究指出這些相關性可能是來自動態應力(dynamic stress)或靜態應力(static stress)的轉移(e.g. Lin, 2010；Freed, 2005；Stein et al., 1997；Stein, 1999；Lin and Stein, 2004)。地震學研究的最終目的是減低地震災害對人類生命財產的影響，因此探討不同時間尺度的地震關聯性，能更了解在脆性圈(schizosphere)內斷層系統活動方式，對進一步的防災也是意義重大。

過去 100 年間，美國地質調查局(USGS)的地震資料庫在寮國的西北部紀錄到四起規模大於 6.0 的地震，其中有三起地震是發生在 1935 年以前。將近 70 年後，於 2007 年 5 月 17 日突然發生了一起地震矩規模為 6.3 的地震(圖 1.1)，該地震由亞於地震中心(Amateur Seismic Centre, ASC)命名為班孟地震(Ban Mone earthquake)。雖然該地震沒有傳出傷亡，但因該區域地質研究缺乏，因此對此地震的了解十分有限。後來在 2011 年 3 月 24 日，於鄰近的緬甸邊境發生一起規模 Mw 6.8 的塔雷(Tarlay)地震，以及 2014 年 5 月 5 日發生在泰國梅老(Mae Lao)的地震(圖 2.1)，都相繼說明此區域的構造活動還十分活躍，可能引起災難或傷亡，值

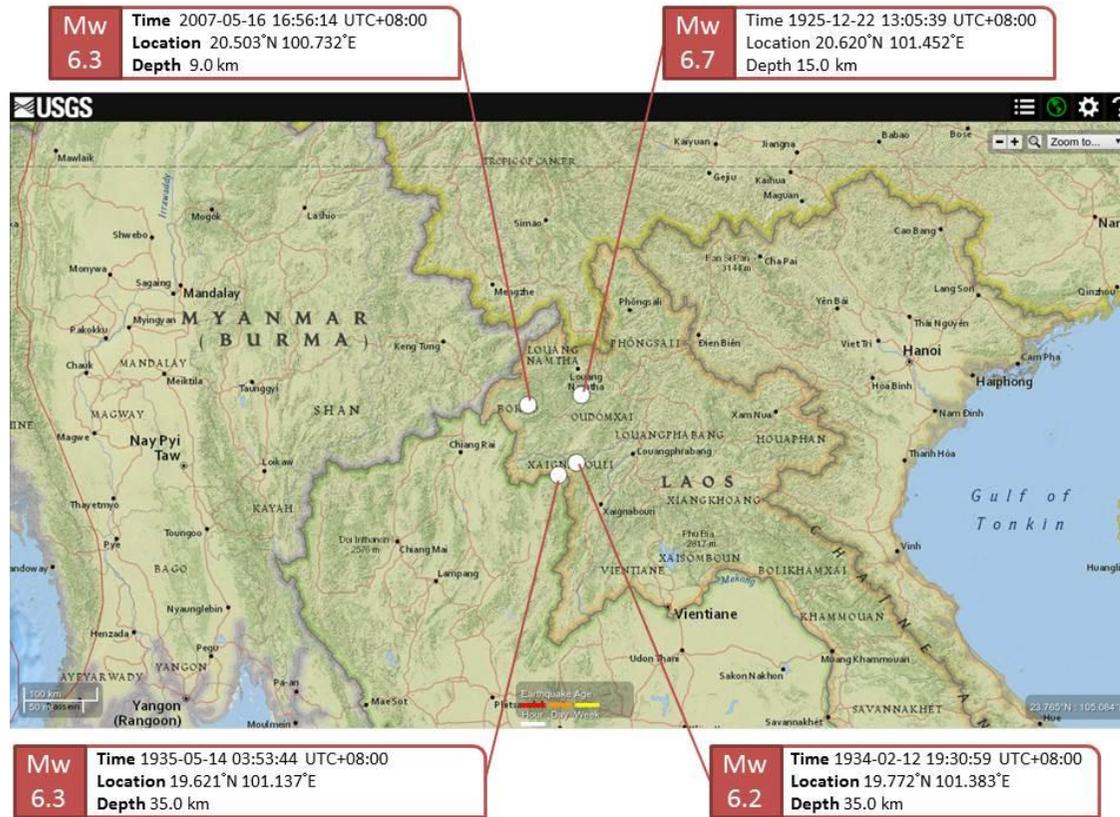


圖 1.1 研究區域自 1900 年至今規模大於 M 6.0 的地震 (USGS 資料庫)

本圖為美國地質調查局(USGS, United States Geological Survey)資料庫中，在北緯 19°-21°、東經 100°-102°的範圍內，自 1900 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 28 日所記錄地震規模  $M > 6.0$  的地震。

得科學家更進一步的著手研究。



## 1.2 研究目的

為了瞭解寮國西北部的活動構造特性，我們從研究 2007 年 5 月 16 日的班孟地震著手，因這樣規模的地震應可產生足夠明顯的地表變形，我們期望能夠藉由分析地表變形來推測地底下的構造滑移型態，並建立合理的模型，以解釋震前與震後的應力變化與地震活動的關係，希冀能進一步探討班孟地震、塔雷地震、梅老地震性質之異同，是否能從地震時間與空間資訊推演應力傳遞的可能性，了解寮國西北部區域的構造活動性質。

對於測站稀少的低度開發區域，遙測方法是唯一可行且有效率的研究方式。例如航照(Aerial photo)就常被用來描繪中尺度的地形、製作精度達 1 公尺的地形圖；又例如應用更為廣泛的合成孔徑雷達觀測資料，除了能製作地形圖以外，還能應用在火山地形監測、長期地層下陷觀測、崩塌地及地表潛移，或者跟活動斷層相關的地表變動等(Zhou et al., 2009)。儘管寮國的東北部欠缺長期的大地水準監測資料，但尚有由 ASTER GDEM 2.0 (Global Digital Elevation Model 2.0) 提供的 30 公尺數值地形圖、ALOS(Advanced Land Observation Satellite) L-band 衛星紀錄震前與震後日期的合成孔徑側視雷達原始觀測資料、全球地震定位系統 USGS、ANSS、Global CMT 的地震定位資料、越南科學院及大陸雲南地震局提供的 2007 年寮國-雲南-緬甸地區群震資料，也有前人以構造地形原理與地震分布所繪製的活動斷層分布圖(Wang et al, 2014)。從地震定位結果看來，班孟地震應是發生在左剪形走向滑移斷層湄善斷層(Mae Chan fault)上。湄善斷層在泰國境內沿線上有第四紀地形(圖 1.2)及沉積物被錯動的證據，是為活動斷層(詳細介紹見第二章 2.2)，班孟地震的發生更凸顯了其位於寮國境內活動性需更進一步探討的重要性。



ASTER GDEM 2.0 的數值地形圖精細度於本研究的應用需求綽綽有餘；L-band 的 ALOS 衛星影像不能提供精細的地表測量資料，但對大範圍的地殼變動趨勢尚有解析能力；USGS、ANSS 和 Global CMT 可以提供此區域地震規模  $M > 4.0$  粗略的震央位置及震源機制解；越南科學院及大陸雲南地震局提供的 2007 年寮國-雲南-緬甸地區群震資料記錄了規模  $M > 2.0$  以上的地震規模及震央位置，雖然其震央定位解析度只達 0.01 分，但已是區域中最为完整的微震資料。

因此，本研究嘗試以 ALOS 衛星影像製作同震干涉圖，由干涉結果觀察 2007 年班孟地震的地表變形特徵，並推測其發震構造的斷層幾何等特性，建立合理的斷層錯動模型，再用此模型計算震後應力分配與餘震分布的關係，探討寮國西北部的地震與構造活動性質。



圖 1.2 湄善斷層空拍影像(1997 年 1 月，泰國湄善)

湄善斷層沿著山腳，呈 4 點鐘-10 點鐘的走向。(圖片來源：Michael Rymer，<https://www.flickr.com/photos/38037974@N00/17141040881>)

## 第二章 研究區域地質背景



### 2.1 寮國西北部地區地質相關研究概況

#### 2.1.1 地理概況

本研究區域位在寮國西北部、泰國、緬甸國界相交的三角帶(位置見圖 2.1)，2007 年班孟地震發生在寮國境內西北部的博膠省(ບໍ່ເຈ້ງ, Bokeo)。「博膠」在寮語中意為「寶石礦」，也暗示了其豐富的寶石礦藏蘊涵。在該省境內有許多東北—西南走向的山脈，低度開發以及生態保育的規劃，使得其保有相當大面積的原始森林，但也代表其交通網路並不發達，尤其山區易達性低，因此本區域內，甚至寮國境內，除了礦業與土壤調查以外的地質研究均非常稀少，現有的地質或構造活動之研究幾乎都是受惠於與泰國或緬甸位置相鄰或斷層系統相同。本研究所在的基盤岩性為中生代的沉積岩及變質岩，圖 2.2 為越南國家地理局所出版的越南—柬埔寨—寮國兩百萬分之一地質圖。

#### 2.1.2 活動構造概況

本研究區域位於巽他板塊(Sunda plate)上，是由於印澳板塊(Indo-Australian Plate)與歐亞板塊(Eurasian Plate)擠壓碰撞，造成喜馬拉雅造山帶東南側的巽他板塊發育了一系列走向滑移的逃脫構造所形成的過渡地帶。本區域位在兩個大型斷裂帶之間，分別是以東的右剪型紅河斷裂帶(Red River fault)，以及以西的右剪型實階斷裂帶(Sagaing fault)，本區域則主要發育東北—西南走向的左移斷層(圖 2.1、2.3)。儘管本區域中的泰國、緬甸逐漸對地震災害議題開始重視，根據全球地震資料、槽溝挖掘及歷史文獻考察等建立了越趨詳盡的活動斷層資料庫，但近期新構造活動在寮國是尤其匱乏的。2007 年 5 月 16 日，在寮國境內西北部博膠省發生了一起規模 Mw 6.3 的地震。對於低度開發且幾無地質相關研究的寮國來說，這起地震具有重要的意義，顯示寮國北部存在相當程度的地震災害風險，不論是

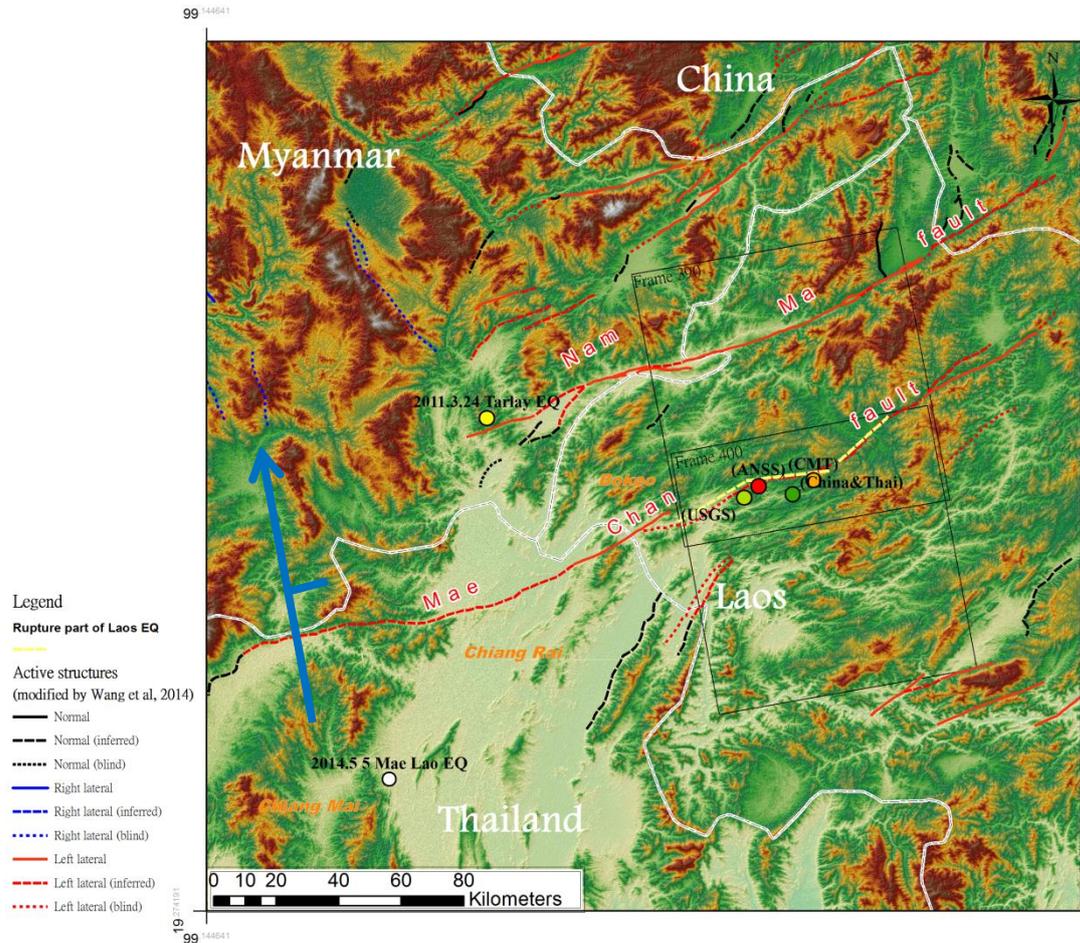


圖 2.1 研究區域活動構造概況

班孟地震發生位置位在寮國西北部，由 USGS、ANSS 及 Global CMT 全球地震定位資料庫的定位結果分別為圖中綠色、淺藍色及粉紅色的實心圓圈，標註 China & Thai 的橘色圓圈則為越南地震局與中國雲南地震站未發表的地震定位資料；白色圓圈為 USGS 資料庫的梅老地震震央位置。本圖的活動構造線改繪自 Wang 等人(2014)利用構造地形學及地震學特徵紀錄該區域的活動斷層。本研究模擬的斷層破裂面為圖中黃色虛線。藍色箭號為 ALOS 衛星行徑路徑，與其垂直的短藍線為衛星視線方向。

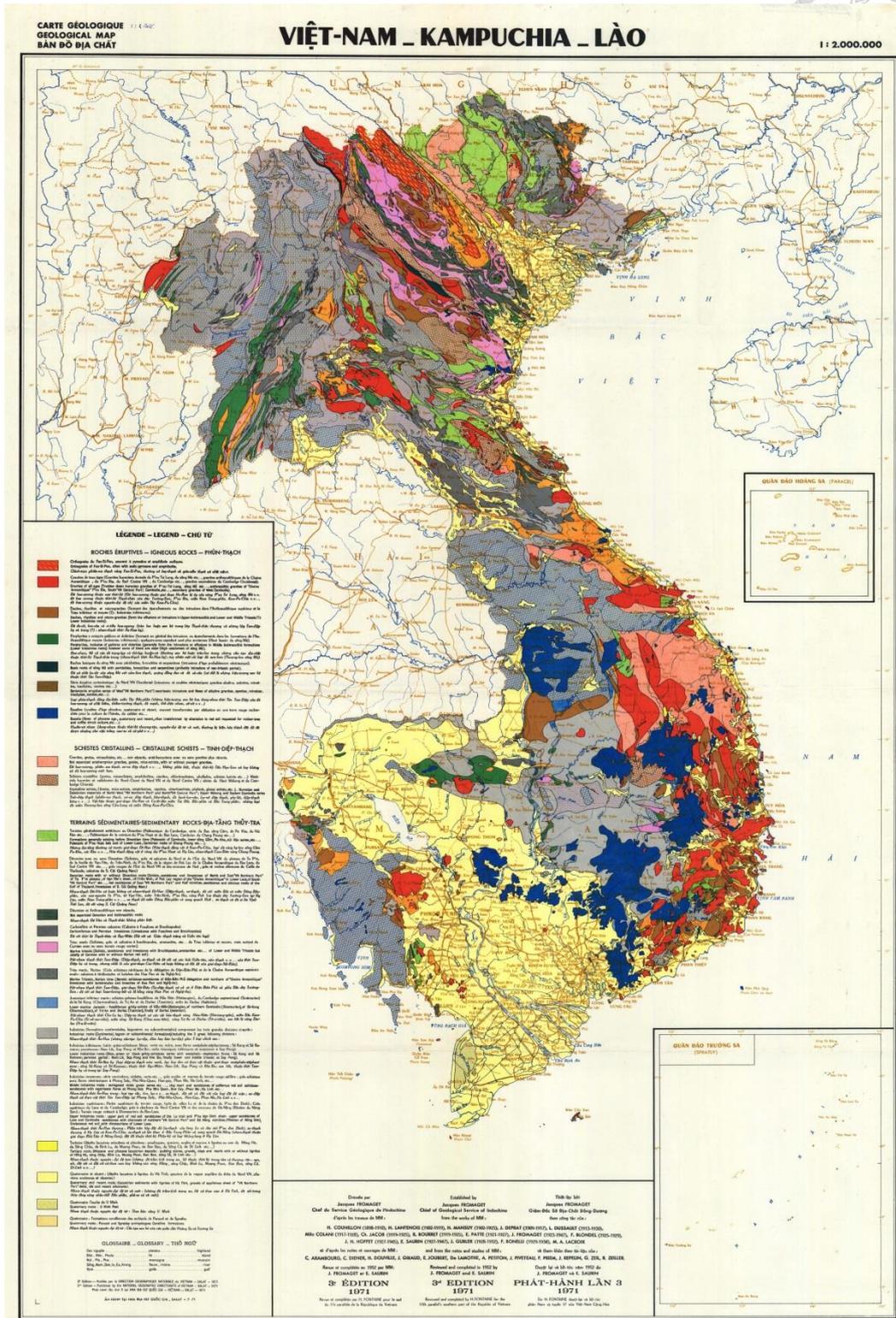


圖 2.2 越南—柬埔寨—寮國地區兩百萬分之一地質圖

(下載處：European Digital Archive of Soil Map；出版：National Geographic Directorate of Vietnam, Dalat.)

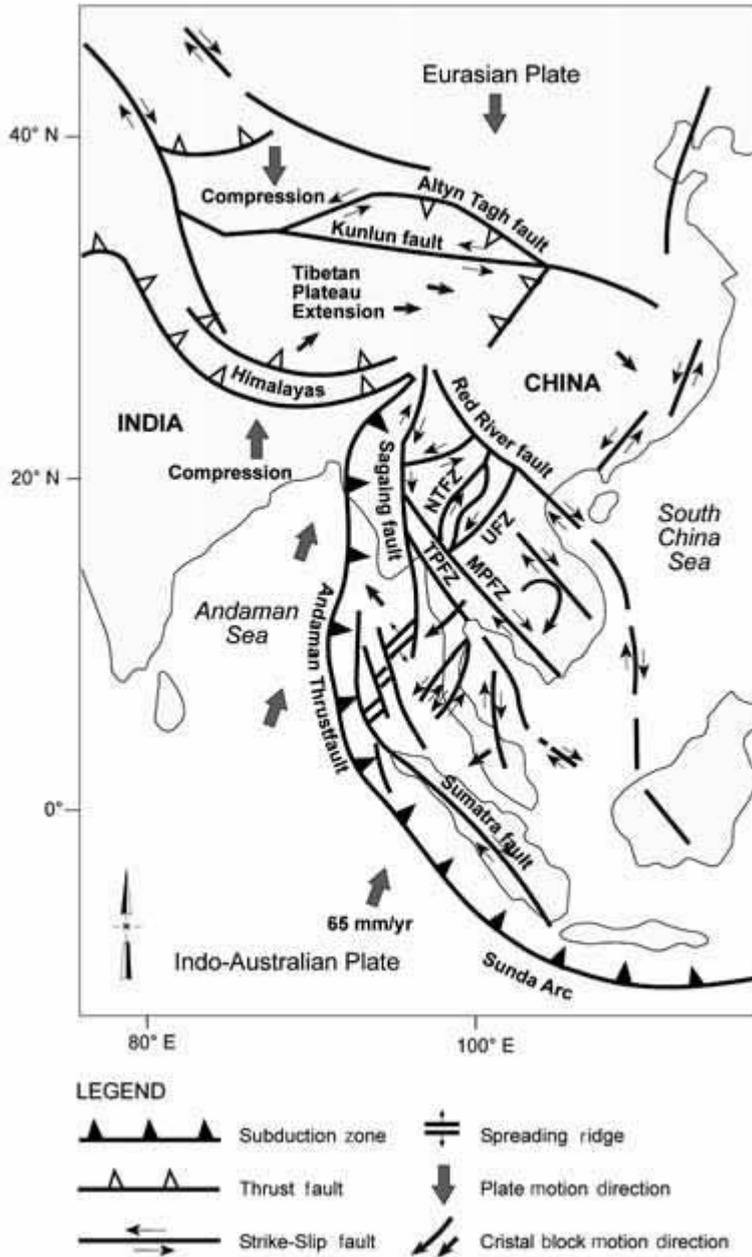


圖 2.3 東亞及東南亞地體架構示意圖

MPFZ – 湄平斷層帶(Mae Ping Fault Zone)；NTFZ – 泰國北部斷層帶(North Thailand Fault Zone)；TPFZ- Three Pagpdas Fault Zone；UFZ- Uttaradit Fault Zone.  
(改繪自 Polachan et al, 1991)

對當地居民的生命財產安全，或對未來的都市發展計劃來說，這裡的地震構造活動性質都有值得著手研究的意義。然而，寮國尚未對國內的活動斷層進行研究，該區域沒有大地水準測量資料，沒有 GPS 觀測站(圖 2.4)，也沒有鄰近的地震測站，加上 USGS 地震觀測網、Global CMT 資料庫等無法記錄到當地規模小於四的餘震，且定位結果至少有近 20 公里的水平誤差(詳細資料見表一)(位置見圖 2.1)。因此，遙測方法是對該地震目前唯一可行、也是最有效率的研究方式。我們藉由判讀衛星影像及參考全球地震定位結果，推測該地震發生在東北-西南走向的湄善斷層(Mae Chan fault)上(圖 2.1)。

## 2.2 湄善斷層(Mae Chan fault)

湄善斷層是一條東北—西南走向的左移斷層，全長約 140 公里，橫跨泰國北部、寮國北部，經湄公河(Mekong River)延伸到緬甸境內。由於其通過泰國許多主要城市，也因此湄善斷層在泰國境內的活動行為、古地震紀錄及地震災害潛能已經有些粗略的研究，然而其東部斷塊因位在較低度開發的寮國鄉下區域，目前並無相關研究。湄善斷層最早被發現是由於其沿線發育有許多走滑斷層相關地形，如閉塞丘(shutter ridge)和斷層池(sag pond)(Hinthong, 1995)，Rymer 等人(1997)發現湄公河的第四紀沉積物有數公尺的錯動，指示該斷層是一條活動斷層；而 Wood (2001)觀察到的湄公河數條支流被水平錯動總量分別約 600 公尺、300 公尺與 100 公尺，顯示湄善斷層已經活動了很長一段時間。Wood 詳細分析了泰國境內湄善斷層系統中被錯位的河階地形，利用構造地形學原理估算湄善斷層滑移速率約為 3 mm/yr。Fenton 等人(2003)也統計了泰國境內與湄善斷層有關古地震紀錄以及現生地震活動性，推測出湄善斷層的未來單一事件可能產生的最大錯移面積為 1754 平方公里、可能產生最大地震矩規模為 Mw 7.4 的地震。網站 The Nation 的文章 *2004 quake activated more fault-lines* 提及，自 2004 年南亞大地震之後，巽他板塊上的地震活動似乎就有增加的趨勢，湄善斷層的活動度因而開始受到關

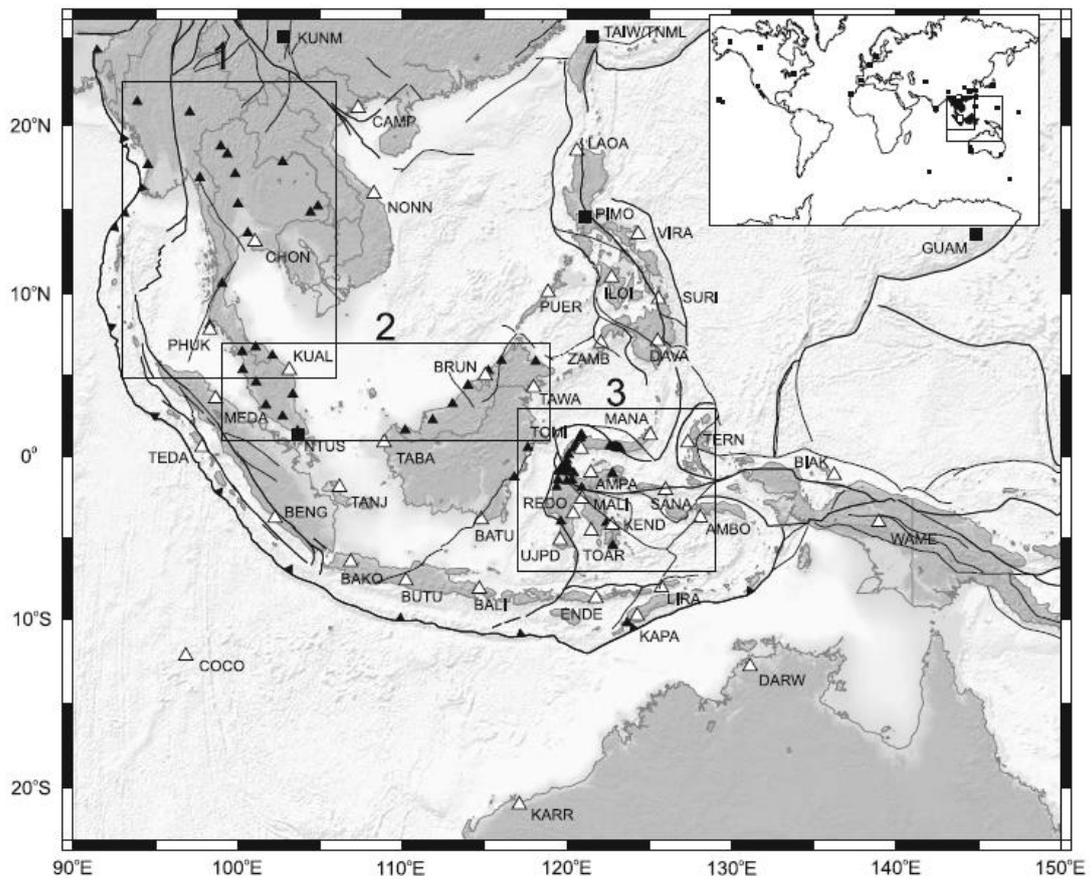


圖 2.4 全球地震站及全球 GPS 站在東南亞的分布圖(Simons et al., 2007)

由圖中可見，2007 年以前，全球 GPS 觀測網在寮國都未設站。

△為東南亞地球動力觀測網(GEODYSSEA)測站；▲為東南亞地球動力觀測網新增測站；■為國際地體動力服務組織(IGS)的連續觀測測站

注。(文章網址：<http://www.nationmultimedia.com/home2004-quake-activated-more-fault-lines-30034523.html>)



近期紀錄湄善斷層錯動造成的地震者，最具代表性為 2007 年 5 月 16 日的班孟地震，更早以前有文獻記載在 460 A.D.，一場發生在泰國北部的歷史地震，使得古如諾(Yonok)城沉陷為一個沼澤，這起災害只有一名寡婦生還，並僅記錄於歷史文獻中，目前沒有科學證據可以佐證(Notton, 1926)。

2011 年 3 月 24 日，Mw 6.8 的塔雷地震(Tarlay earthquake)之後，The Nation 的記者於 *Fears of 'big one' on Mae Chan Fault* 的報導中寫道，湄善斷層位於泰國境內的分支自此蠢蠢欲動，且可能會再發生規模大於 6.0 的地震。2014 年 5 月 5 日，泰國清萊發生的芮氏規模 6.3 的梅老地震(Mae Lao earthquake，位置見圖 2.1)，被認為可能與湄善斷層或其周圍的斷層系統的活動有關。此地震後一天內被偵測到至少 180 起餘震。

(文章網址：<http://www.nationmultimedia.com/national/Fears-of-big-one-on-Mae-Chan-Fault-30194177.html>)

### 2.3 2007 年 5 月 16 日班孟地震

2007 年 5 月 16 日，於寮國博膠省發生了地震矩規模為 Mw 6.3 的地震。這起地震雖然規模不算太大，然而博膠省、泰國清萊(Chiang Rai)及清盛(Chiang Saen)等地均有建物破裂或倒塌的紀錄。

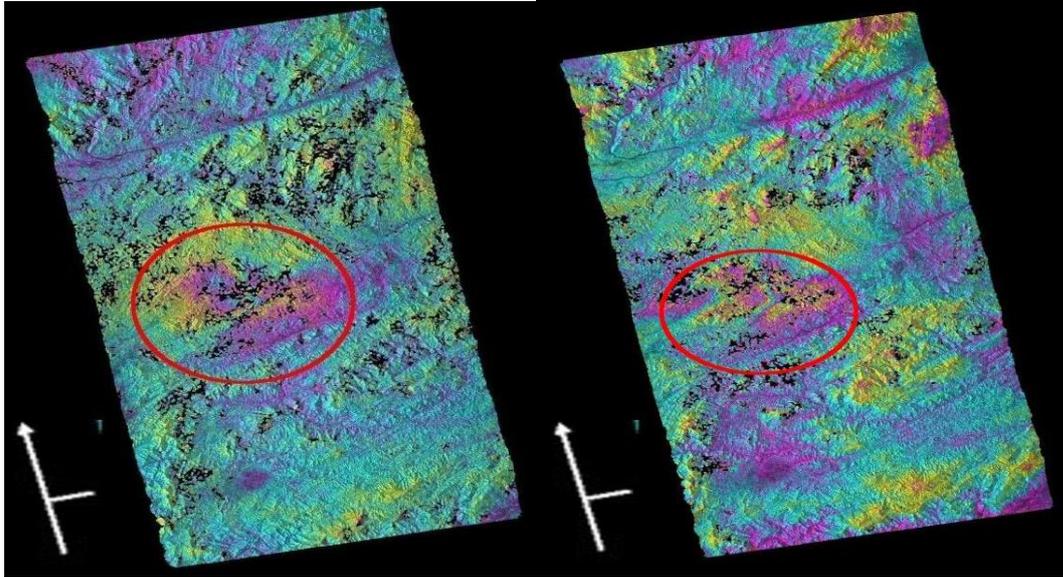
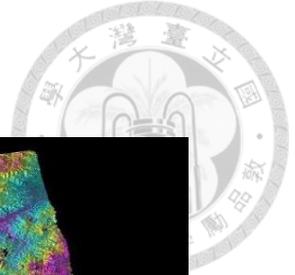
由於這起地震發震位置位於較低度開發的寮國境內，當時最近的地震觀測站位於泰國清邁，因此關於此地震的詳細資訊並沒有被記錄下來，在不同的全球地震定位系統中也存在有相當大的變異度(表一)。

本起地震唯一的相關研究是芹澤伸龍(2012)利用合成孔徑雷達差分干涉法(D-InSAR)分析 SAR 衛星影像所記錄到的同震相關地表變形。芹澤伸龍使用

Roi\_PAC (Repeat Orbit Interferometry PACkage)為 SAR 影像的分析平台，所使用的影像對有：同震影像對 2007/1/2-2007/8/22、2007/2/17-2007/7/5、2007/2/17-2007/8/20 及 2007/2/17-2007/10/5；震後影像對 2007/7/5-2007/8/20、2007/7/5-2007/10/5 與 2007/8/20-2007/10/5。在芹澤伸龍的解釋中，雖然仍有無法去除的誤差，但他觀察到每幅同震干涉影像對中在同一地方都有疑似是斷層滑移的訊號(圖 2.5 中紅圈處)，並判定該訊號是由一東北—西南走像的左移斷層與一西北—東南走向的右移斷層錯動所致(圖 2.6)。本研究與芹澤伸龍所使用的合成孔徑雷達影像對為同樣的影像來源，也同樣面臨到缺乏其他觀測資料而無法校正的問題，但本研究觀察班孟地震及其餘震的分布，根據最新發表的活動斷層的位置與幾何判定，對觀察結果有不同的判讀，詳情於第四章解釋。

2007/01/02\_2008/08/22

2007/02/17\_2007/07/05



2007/02/17\_2007/08/20

2007/02/17\_2007/10/05

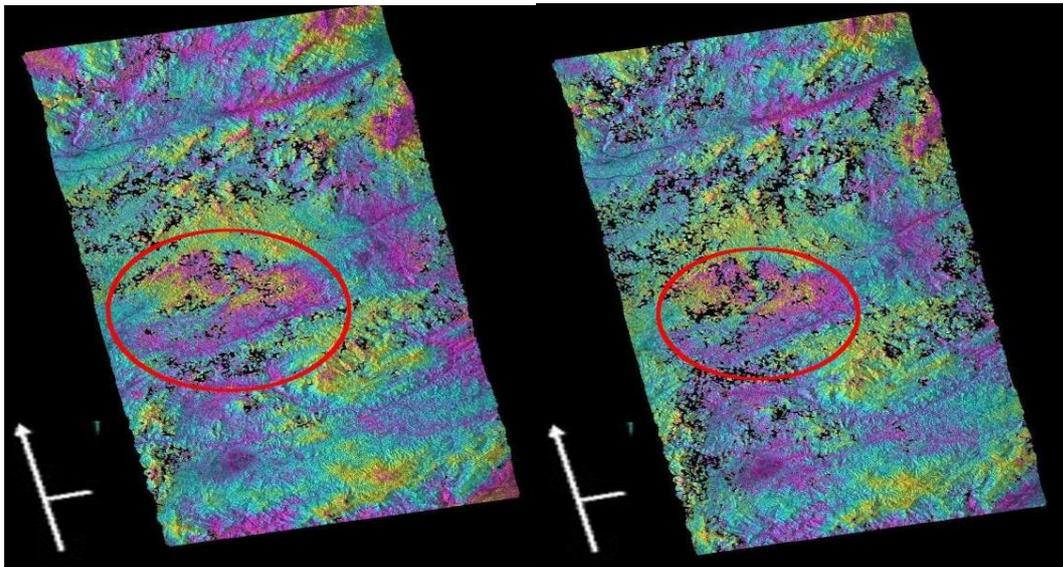


圖 2.5 2007 年 5 月 16 日班孟地震的同震干涉影像(芹澤伸龍，2012)

紅色圈示處是芹澤伸龍研究認為 5/16 班孟地震同震變形的訊號。

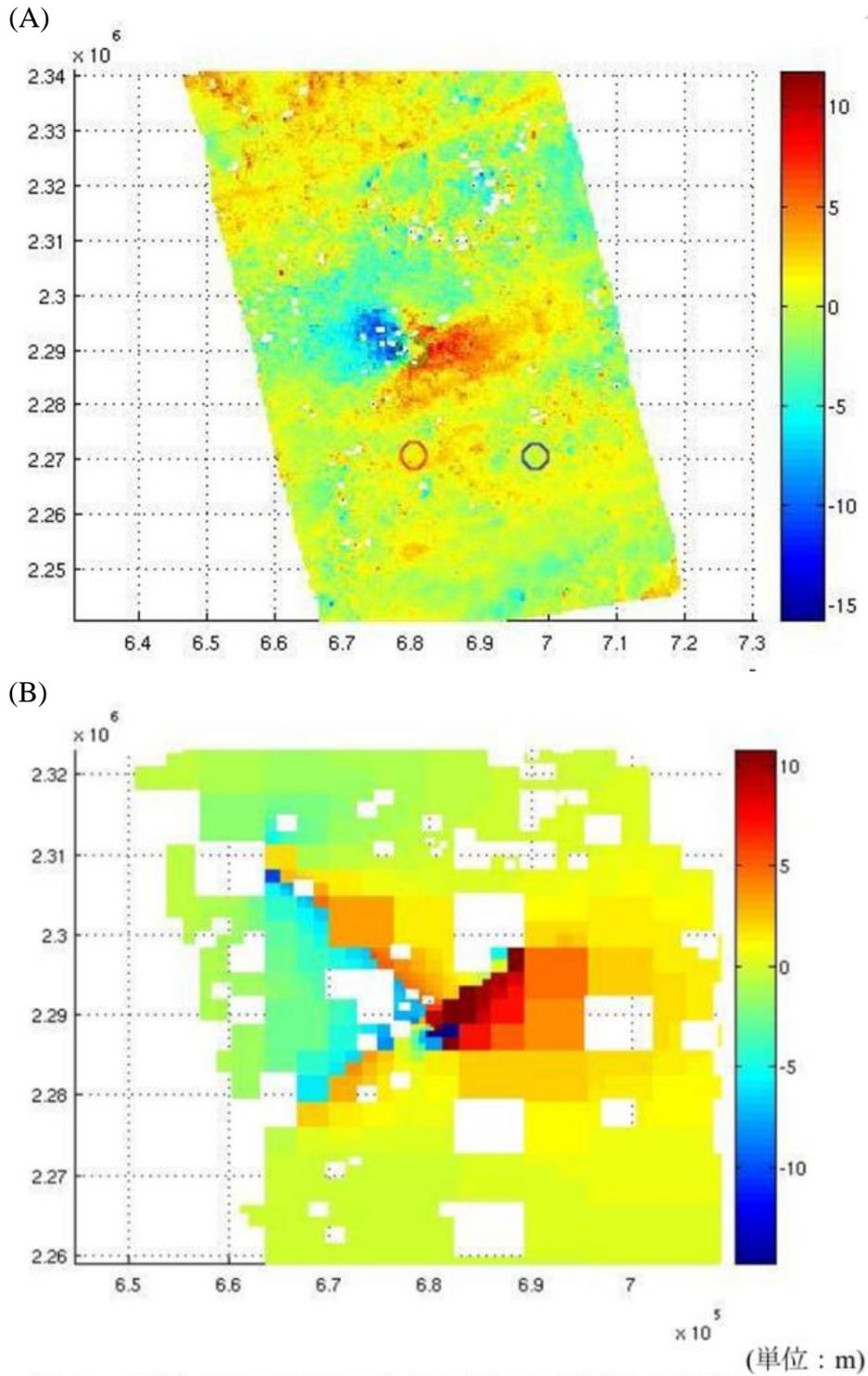
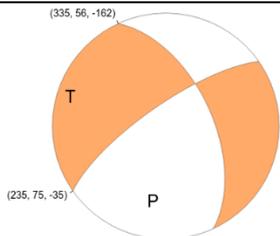
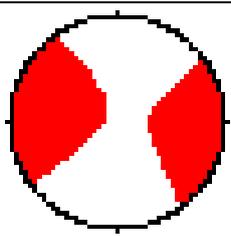


圖3.21：單純に図3.19と図3.20を足し合わせて作成した計算値

### 圖 2.6 芹澤伸龍的 InSAR 結果與斷層反演結果

(A) 芹澤伸龍以 Matlab 呈現 InSAR 的同震觀測結果。(B) 該研究的斷層正演模型為：主斷層為左移斷層，走向  $54^\circ$ ，傾斜角  $81^\circ$ ，深度 12.6 km；分支斷層為右移斷層，走向  $324^\circ$ ，傾斜角  $89^\circ$ ，深度 12.6 km

表 2.1 USGS, ANSS, Global CMT 的震源機制解

	<u>USGS</u>	<u>Global CMT Catalog</u>	ANSS
發震時間	2007-05-16 16:56:16 UTC+08:00	2007-05-16 8:56:18.4 GMT	2007/05/16 08:56:14.12
震央位置	20.470°N 100.690°E	20.52°N 100.89°E	20.5030°N 100.7320°E
震源深度	23.8 km	12.6 km	9.0 km
地震規模	M 6.3 M <sub>L</sub> 6.1	M <sub>w</sub> = 6.3 m <sub>b</sub> = 5.7 M <sub>s</sub> = 6.4 Scalar Moment = 3.35e+25	M <sub>w</sub> = 6.30
震源機制解	(strike,dip,rake) (335°, 56°, -162°) (235°, 75°, -35°)	(strike,dip,slip) (324°,81°,179°) (54°,89°,9°)	N/A
			

## 第三章 研究方法



由於研究區域難以到達且缺乏大地水準測量資料，本研究採用了遙測衛星主動式收發取得的複數資料(complex data)作為地震相關地表變形的資料來源，將複數資料以差分干涉技術(Differential SAR-Interferometry, D-InSAR)得到同震的地形變化，並經過 GMT blockmean 計算降解析度、重新取樣之後，參考 Global CMT 發布的的震源機制解，做出斷層面的正演模型(forward model)，來推測班孟地震的斷層機制，並將斷層參數套入庫倫應力轉移模型，探討班孟地震後應力場的改變與其後地震活動之間的關係。研究流程示意圖如圖 3.1。

### 3.1 合成孔徑雷達干涉(InSAR)

#### 3.1.1 側視雷達(SLAR)與合成孔徑雷達(SAR)

雷達(RADAR)是無線電偵測和定距(Radio Detection and Ranging)的縮寫。雷達系統運作時，向空間發布電磁波脈衝，透過計算發射脈衝至接收反射波的時間差及方位來得到目標物在空間中與雷達的相對位置關係。

人造衛星在高空上以固定周期沿著固定軌道繞著地球航行，裝載在衛星上的側視雷達以固定視角(look angle)持續對地表收發電磁波(圖 3.2)。因為收發訊號均在同一雷達系統中進行，所以歸類為主動式系統(active system)。有別於仰賴接收地表反射的輻射之被動式系統(passive system)，主動式系統能不分晝夜進行量測；此外，由於慣用雷達波段為微波(表 3.1)，波長範圍約在 0.3-100 cm 之間，相較於可見光具有較高的穿透能力，致使雷達波通過大氣層時不致遭受嚴重散射。一般而言，雷達波的散射強度與波長的四次方成反比，波長短於 2 公分的雷達波尚會被雲氣散射所影響，但當波長高於 4 公分，雷達波受到大氣干擾的影響甚小，並且具有較強的穿透力，能穿透樹頂的樹葉，而達到樹幹或地表。本研究使用的雷達波段為 ALOS 衛星的 L-band，波長約為 23 公分。

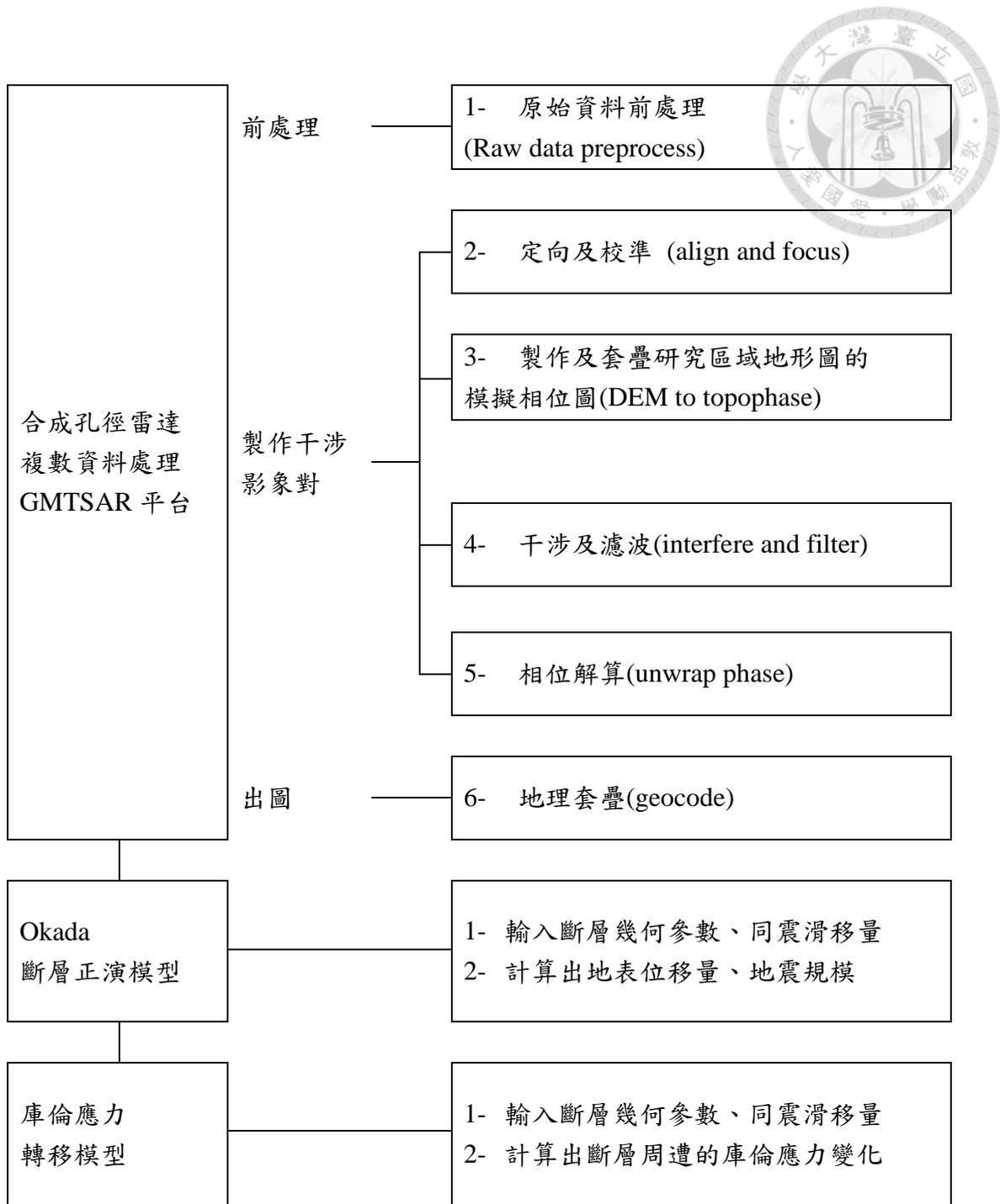


圖 3.1 研究流程示意圖



側視雷達(Side-Looking Airborne Radar, SLAR)是雷達系統中運用最為廣泛的應用之一，最早的應用可以追溯至 1950 年代，當時基於軍事用途，科學家將雷達裝置在飛機上，是為側視口徑雷達(Side-Looking Aperture Radar)，藉以探測地面上的金屬反射體及提升探測目標物的軌向(along-track)解析度，到了 1960 年代後才開始應用在科學研究上。早期裝置在飛機上的側視雷達稱為空載(airborne)側視雷達，其解析度對於製作地形圖、崩塌地探測、土地利用等應用尚堪使用，而後為了精確的科學研究需求，發展了裝載於人造衛星上的星載(space borne)側視雷達。然而，航行於數萬公里高空的人造衛星是空載雷達數十至數百倍的航高，若欲達成與空載側視雷達同等級的解析能力，勢必需要數百公尺的雷達口徑，但事實上這樣的硬體設備幾乎不可能達成，因此才有了合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)的出現。

合成孔徑雷達的天線可視為數個天線陣列並聯。以示意圖 3.3 為例，假設陣列中有五個天線能偵測到一目標物 Q，那麼在雷達行進中，這五個天線所接收到由 Q 反射之回波就會有不同的相位位移(phase shift)。這五個回波訊號分別儲存至不同的記憶體區間，再利用相位平移處理器來扣掉因天線與目標物 Q 收發位置與夾角不同所貢獻的相位差，並整理為單一視角的五個觀測值。這五個觀測值再經由累加平均化後，能得到更精準的測量結果(圖 3.4)。隨著雷達技術的發展，能在同一載具系統中裝上不同波段的雷達，並將都普勒效應原理(Doppler's effect)應用在解像上，合成孔徑雷達的解像能力可以達公分尺度。

### 3.1.2 合成孔徑雷達影像(SAR image)

前面已經提到，裝載合成孔徑側視雷達的衛星依照固定軌道及週期繞地球公轉運行，其所裝置的天線垂直軌道，以一斜角對著地表收發電磁波。天線的法線與其至地表的垂線所夾的角度稱為天底角(off-nadir angle)(圖 3.2)。目前的雷達系統天底角約介於 20-50 度之間，ALOS 衛星的天底角範圍介於 18-43 度之間，在

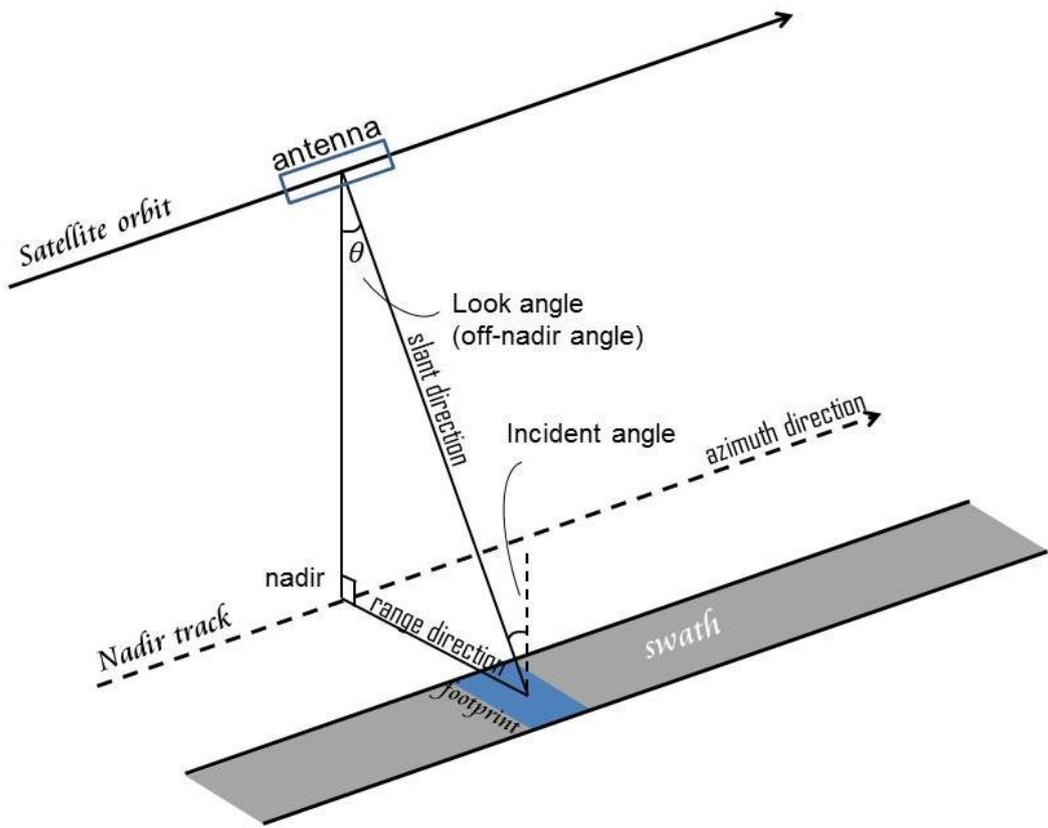


圖 3.2 側視雷達架構示意圖

人造衛星在高空上以固定周期沿著固定軌道繞著地球航行，裝載在衛星上的側視雷達以固定視角  $\theta$  持續對地表收發電磁波。衛星投影在地表上的位置為天底點(nadir)，行跡在地表上的投影為天底軌跡(nadir track)。

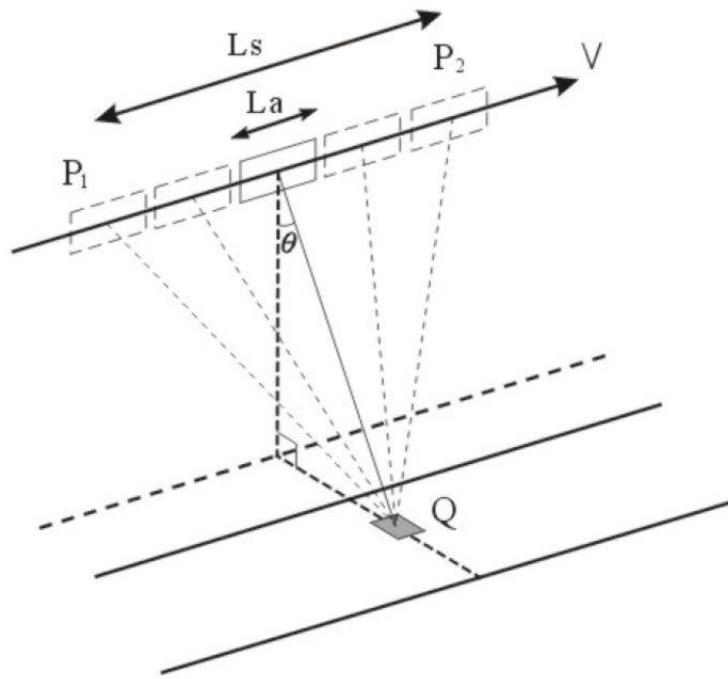


圖 3.3 合成天線陣列示意圖 (Usai, 2001)

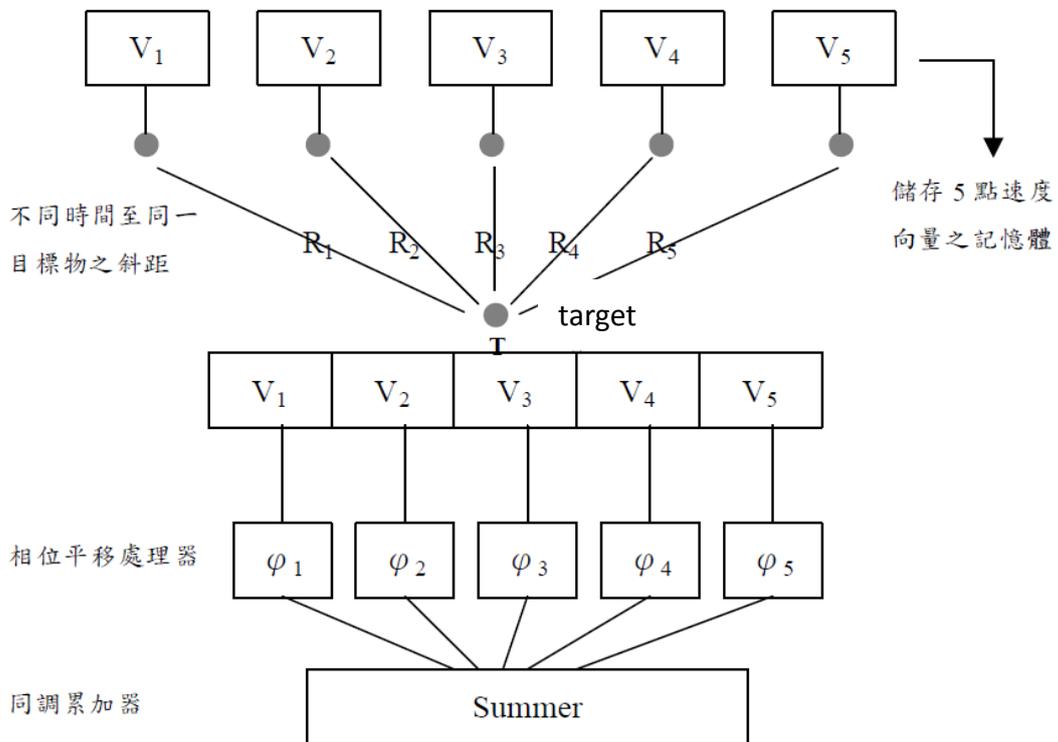


圖 3.4 合成天線陣列處理流程示意圖

本研究採用的 ALOS 衛星天線之天底角為 37 度。一般來說，由於地球是曲面的緣故，天底角會略小於衛星視角(incidence angle)，但單就一張圖幅而言，這樣的差異是可以忽略的。



現在還在運作中的合成孔徑雷達主要有 C-band (波長 3.75-7.5 公分)、L-band (波長 15-30 公分)與 X-band (波長 2.5-3.7 公分)，常用雷達波段與裝載之衛星平台見表 3.1。本研究所使用的所有衛星影像都是 ALOS PALSAR 的 L-band 影像，波長 23 公分。天線投影在地平面上的波束涵蓋面(antenna footprint)也就是頻帶寬(swath)約為 65 公里。

合成孔徑雷達影像可以視為由相素單元(pixel)組合成的二維的數位陣列。每個相素單元都記錄雷達波從地表上一個小區域內任何反射體所反射的相位和強度資訊。

### 3.1.3 合成孔徑雷達干涉(InSAR)

若是我們能取得同一地區不同時間的兩幅地形圖，那麼將兩幅影像的高程相減，就能得到在該時間範圍內的高程變化。然而，製作高精度的數值地形圖需龐大的作業時間，而星載的合成孔徑雷達彌補了這個不足。合成孔徑雷達影像的資料點為由相位、強度等資訊所構成的像素單元(pixel)，資料型態為複數資料(complex data)，每幅合成孔徑雷達影像儘耗時數小時就能完成數百平方公里的資料量測，且一平方公里能得到 3 萬多個資料點，雖然精確度不及 GPS，但能提供大範圍趨勢性的變化，這樣的尺度可應用至地層下陷的觀測、火山活動監測，或斷層活動相關地表變形等。將雷達回波影像定向校準後得到同地區、不同時間的地表回波相位，計算兩幅影像的相位差，即是干涉(interfere)。干涉圖像依照二維平面的相關性經由相位解算(unwrap)後可以反推地表變形量。

### 3.1.3.1 雷達影像成像解析度及限制

由合成孔徑雷達所接收的回波訊號，事實上是地表訊號以及其他誤差及干擾的總和。而所觀測的兩幅影像的相位差  $\psi_{\text{observed}}$  除了真正由地表位移造成的相位差  $\psi_{\text{displacement}}$  訊號以外，還包含了雷達光束行經不同大氣狀態可能造成的延遲、地面物體變化的散射等等，大致可以歸納成五種來源之和，如下式：

$$\psi_{\text{observed}} = \psi_{\text{curve}} + \psi_{\text{topography}} + \psi_{\text{orbit}} + \psi_{\text{displacement}} + \psi_{\text{error}} \quad (3-1)$$

來自地球曲面的  $\psi_{\text{curve}}$ ，可由 WGS84 橢球面的擬合來移除。輸入數值地形圖可將地形貢獻  $\psi_{\text{topography}}$  去除。 $\psi_{\text{orbit}}$  是來自軌道曲率的貢獻，由於衛星公轉軌道並非直線，而精細軌道資料可以幫助移除  $\psi_{\text{orbit}}$ 。由此看來，前三項都可以有效地被移除，而剩下的  $\psi_{\text{error}}$  則是在干涉圖製作時經由濾波(filter)來降低雜訊。此外，雷達波遇水面也會因為全反射而無法接收回波，因此在河流、湖面或海面均無法成像。

### 雷達解析度

合成孔徑雷達的影像解析度是由與飛行方向垂直的測距解析度(range resolution)，和與飛行方向平行的方位解析度(azimuth resolution)所決定的。解析度所定義的單元即為分辨單元(resolution element)，也就是空間中兩點間所能辨識的最小單位。

測距解析度是指雷達在斜距方向(slant range)的解析能力，為  $\Delta R_r$  與雷達系統所發射之脈衝長度或持續時間有關。脈衝長度越短，解析力越高，測距解析度與脈衝週期(pulse duration)的關係式為：

$$\Delta R_r = 0.5\tau c \quad (3-2)$$

其中， $\tau$  為脈衝持續時間， $c$  為光速，因此測距解析度的理論值就是半個脈

衝長的時間。 $\Delta R_r$  的單位為微秒( $10^{-6}$ sec)。測距解析度投影在地平面上就是地距解析度( $R_{gr}$ , ground range resolution, 見圖 3.4), 在衛星俯角為  $\theta$  時, 地距解析度為:

$$\Delta R_{gr} = 0.5\tau c / \cos\theta \quad (3-3)$$

以真實孔徑雷達而言, 方位解析度則是由天線寬度及離地距離而定, 定義為:

$$\Delta R_a = (\lambda / L) \times (h / \cos\theta) = \lambda r / L \quad (3-4)$$

其中,  $\lambda / L$  即為天線寬度,  $r$  為地距, 是衛星在地表上的投影點與波束的距離。由此式可知, 增加天線的寬度抑或使用較短波長地雷達波均能提升方位解析度, 而地距越大, 方位解析度則越低; 因此合成孔徑雷達的發展是用來改良傳統天線無法達成的長度。示意圖見圖 3.5。

### 入射角(incidence angle)的影響

入射角為入射波與反射面法線之夾角。一般來說, 雷達波的入射角越小, 則回波的強度越強, 反之較大的入射角因被散射的能量比例較高, 能接收的回波訊號也較少。

### 觀測地形幾何(viewing geometry)的影響

由於合成孔徑雷達運行時都是側向收發訊號, 因此觀測方向與地形本身的坡度之夾角, 影響了解析地形的能力。以圖 3.6 為例, 編號 1-10 的每個單位距離都是地距解析單元, 地形面朝向衛星的方向是為前坡(foreslope), 背向衛星的地形面是為後坡(backslope)。在後坡角度小於衛星視角的範圍內, 雷達波無法到達的區域就稱為陰影區(shadow), 在干涉圖的成像就是一片漆黑; 而圖 3.6 中可以看到前坡的 B、F、G 位在同一個地距解析單元中, C、E 也位在同一個地距解析單

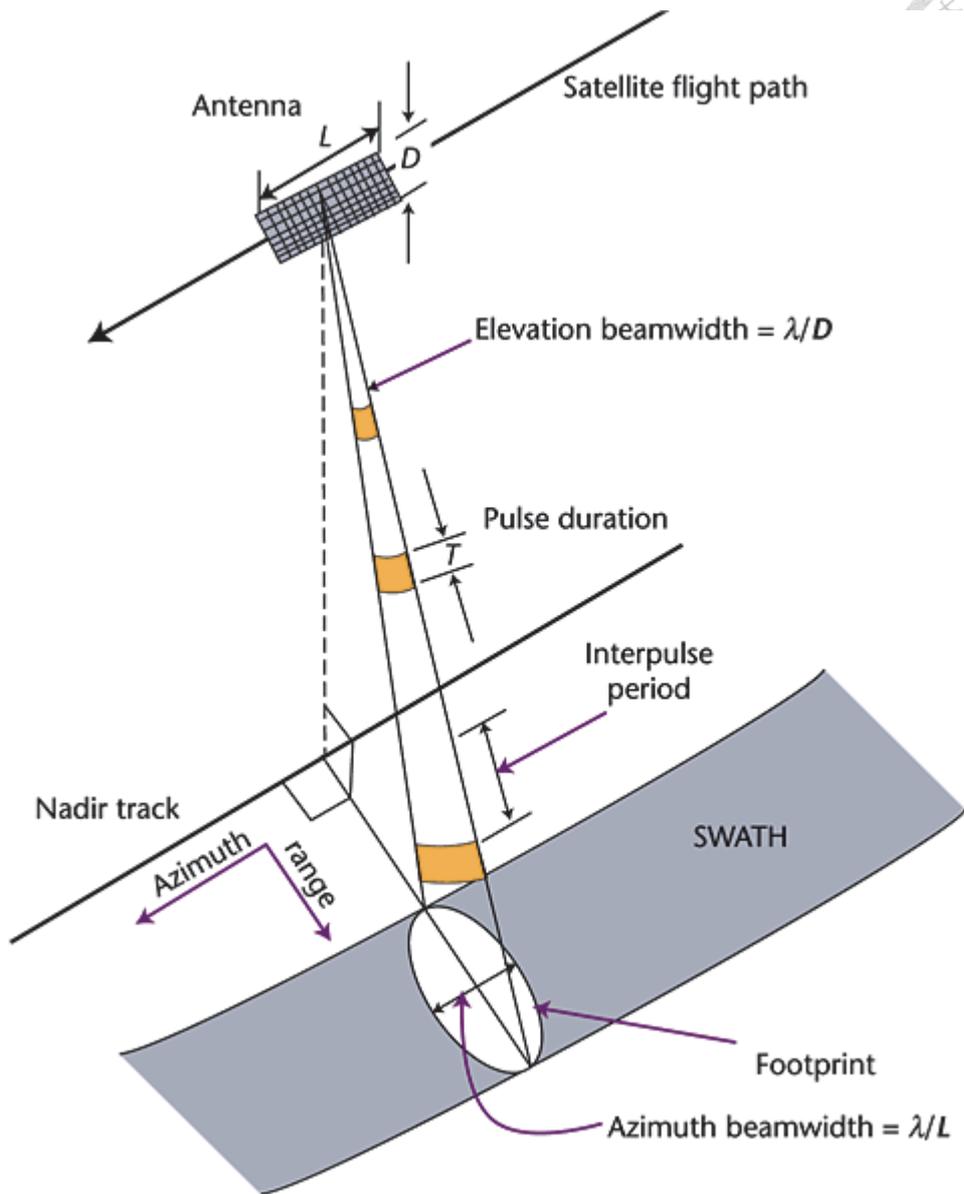


圖 3.5 雷達設置與解析度示意圖

(圖片來源：IEEE Computer Society 網站

<http://www.computer.org/csdl/mags/cs/2007/01/c1058-abs.html>)

元中，在成相上會因訊號相疊加而變亮，但山頂與山腳的距離好像變短了，這種現象是為疊置(layover)效應。



### 偏振模式(polarization)的影響

偏振模式是指雷達在發射或接收信號時，只收發能通過某一震動方向的平面之電磁波。偏振方向分為水平(horizontal，以 H 表示)及垂直(vertical，以 V 表示)，兩種偏振方向與發射和接收系統組合成四種偏振模式，分別為 HH、HV、VH 與 VV。例如 RADARSAT 的偏振模式為 HH，ERS-1 與 ERS-2 為 VV，而本研究圖幅的偏振模式有 HV 與 HH。一般而言，如果反射體目標物的排列特徵與偏振方向一致或類似，則其接收到的回波也會較弱，如垂直地面生長的作物在 HH 方向的影像反射訊號較微弱。因此同時擁有不同偏振模式的雷達系統，對地形的解析能力也較只有單一偏振模式的雷達好。

### 雜訊與斑駁現象(noise and speckle)

雜訊與斑駁現象的特徵是似粒狀的黑白斑駁訊號(圖 3.7A)。斑駁現象的產生是由於雷達波接觸到地表上小型散射體時，因散射路徑被發散，導致與周遭其他散射單元重複路徑，造成回波的強度訊號因相消或疊加而更黑或更亮，因此有斑駁的視覺效果。斑駁現象的發生與同調性(coherence)高低並無關連，在同調性高或低的干涉圖中均存在，但在光學影像中則無此現象(圖 3.6B)。因此在後續的分析中可透過濾波(filter)來過濾雜訊以凸顯影像特徵。

#### 3.1.4 GMTSAR 影像處理

GMTSAR 是公開免費的 InSAR 分析軟體。整體架構是由 C 語言寫成，需編譯入已安裝 GMT (Generic Mapping Tool)及 NETCDF 的系統中。GMTSAR 的程式主要分成三個部分：負責衛星原始複數資料內容的前處理部分，影像對干涉圖的產生及製作部分，以及繪製與 GMT 和 Google Earth 相容的出圖部分。

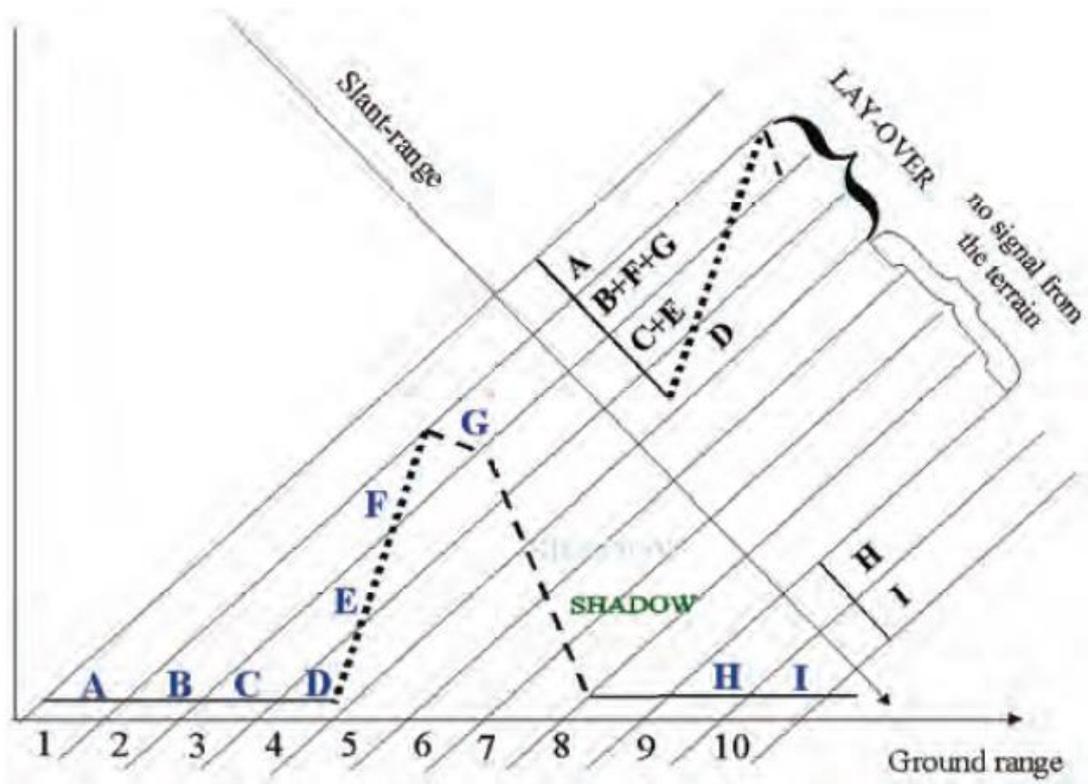
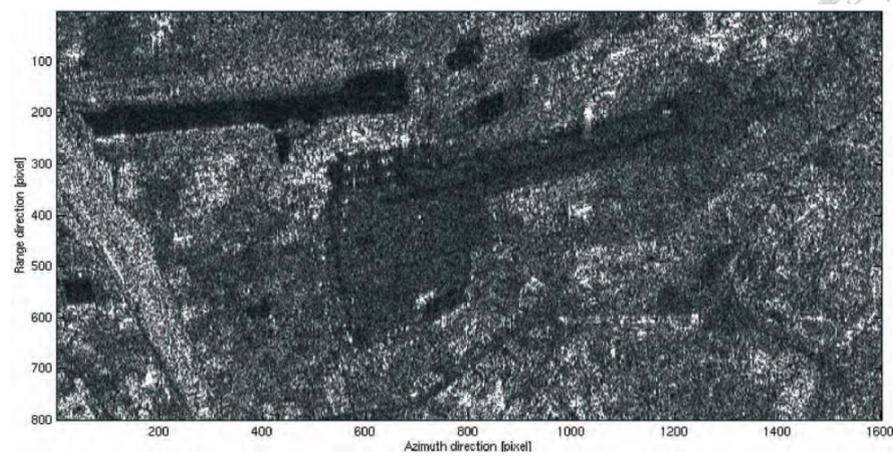


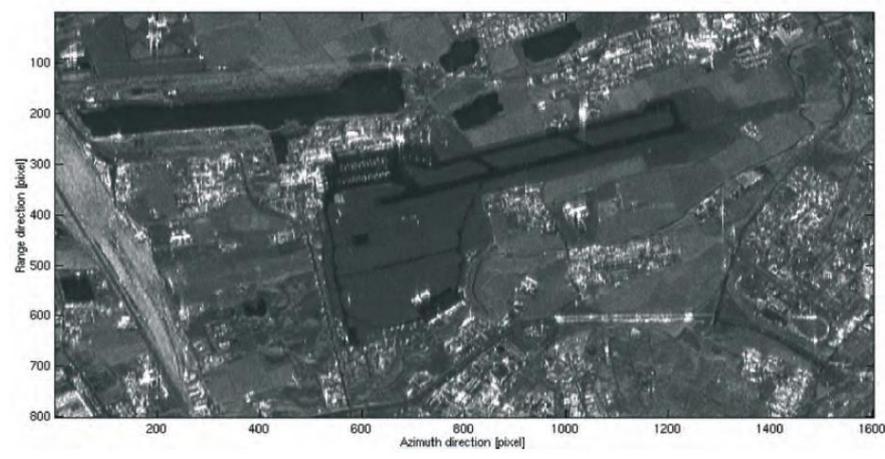
圖 3.6 雷達影像和地表平面的關係



A



B



C



圖 3.7 雜訊與斑駁現象

(A)ERS-2 衛星所拍攝到的米蘭 Linate 機場東側。斑駁效應使得應為均質的機場跑道模糊不清。(B)由不同視角的 ERS 衛星影像平均化得到的米蘭 Linate 機場影像，可看到斑駁效應已經移除。(C) SPOT 衛星拍到的米蘭 Linate 機場東側之光學影像。

有別於現有的 InSAR 處理平台如 Roi\_PAC, Gamma, DORIS 及 StaMPS 等，GMTSAR 資料處理的演算仰賴精準的軌道資訊，軌道誤差不能超過 1 m，因此計算過程中不需要再輸入軌道參數。目前 GMTSAR 支援的衛星雷達影像有：ERS-1、ERS-2、Envisat、ALOS 及 TerraSAR-X，軌道誤差大於 10 米的 SAR 衛星如 RADARSAT-1 和 JERS-1 就不適用。對本研究而言，所採用的影像是 ALOS PALSAR 1.0 的影像，雖然該衛星航行時並未記錄精細的軌道資料，但其本身的儀器精準度還在 GMTSAR 的允許範圍之內，故在干涉影像製作的流程並不受影響，唯無法做後續的軌道校正，因此有些可能歸因於軌道誤差的訊號便不能排除。

#### 3.1.4.1 原始影像前處理(pre-process)

前處理的步驟是將合成孔徑雷達的原始影像及軌道資料轉換成可讀的 ASCII (American Standard Code for Information Interchange)資料格式。而後，GMTSAR 的前處理器從衛星影像的導讀檔(leader file)獲取衛星的速率與位置資訊，以提供定向與校準的必要檔案。

#### 3.1.4.2 定向與校準(align and focus)

由於合成孔徑雷達影像以頻帶收發輻射訊號，所接收的回波角度依天底角的不同而改變，因此需要校準才能將影像轉換為單一視角的相位資訊 SLC(Single Look Complex)。影像校準後，讀取經前處理的軌道資訊，訂定都卜勒中心，回復斜距方向及軌向的偏移，以圖幅的左上角為參考點，將斜距方向(slant range)因合成孔徑雷達重複收發的影像資料堆疊(stack)並還原成原始比例。

#### 3.1.4.3 干涉(interfere)

GMTSAR 採用的雷達差分干涉法為二軌跡差分干涉法(Two-pass differential interferometry)。輸入兩幅衛星影像(主影像與副影像)及數值地形圖(DEM, Digital

Elevation Model), 分別生成主副影像的干涉圖, 以及將數值地形圖運算後得到的模擬干涉圖。萃取出兩幅干涉圖的相位影像, 以主副影像所生成的干涉圖除去數值地形圖的模擬干涉圖, 即得到由地表的變形貢獻的相位干涉圖。二軌跡差分干涉法的概念示意流程圖見圖 3.8。

#### 3.1.4.4 濾波(filter)

在生成影像對的干涉圖後, 將長波長訊號濾波處理, 可以降低干涉影像整體的訊噪比(SNR)。GMTSAR 軟體使用的濾波器是高斯濾波器(Gaussian filter), 濾波的運算法修改自 Goldstein filter algorithm (*phasefilt*) (Goldstein and werner, 1997; Baran et al., 2003)。GMTSAR 內建用於 ALOS 衛星影像的濾波器波長有 100 m、200 m、300 m、500 m 與 700 m, 可以選用上列任意波長組合過濾。

#### 3.1.4.5 snaphu 相位解算(unwrap)

相位干涉圖經過濾波處理之後, 我們希望干涉圖可以告知我們地表在事件過後的真實高度變化而非相位變化, 而將差分相位轉換為高度的過程就叫做相位解算。GMTSAR 預設的相位解算是由 Chen and Zebker (2002)以相位回復所開發的 snaphu 演算法, 不過也可以手動調整為 Sandwell and Price (1998)所開發以斜距方向(range, *x phase*)與軌向(azimuth, *y phase*)計算相位回復的演算法。在 Sandwell and Price 的演算法中, 降頻(decimation)前的斜距方向的取樣間隔為  $c\tau/2$ , 軌向的取樣間隔為  $V/PRF$ 。本研究相位解算採用 snaphu 演算法。

#### 3.1.4.6 地理資訊定位(geocoding)

地理資訊地位的步驟是將以上流程中所產出的圖, 包含相位干涉圖、強度干涉圖、濾波處理干涉圖及相位解算後干涉圖等, 由軌向/斜距方向系統轉換成經緯座標系統, 並分別製成相容於 GMT netCDF 的.grd 格式檔以及相容於 Google Earth 的.kml 檔。

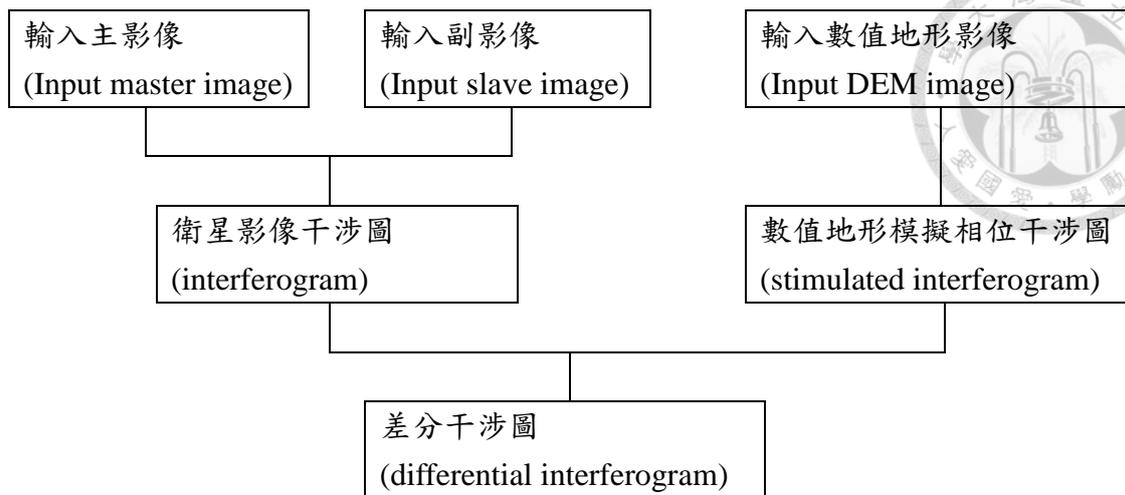


圖 3.8 二軌跡差分干涉法流程示意圖

### 3.1.5 降解析度與資料重新取樣(downsample and resample)

本研究一共製作兩幅同震干涉影像，由於沒有其他測量資料可提供校正，因此我們先將兩幅影像相同位置卻解算出相反位移方向的資料點剔除，這個過程是為重新取樣。在此步驟中先將相位解算後的干涉圖的.grd 檔先經由 GMT 的 *grd2xyz*，轉換成經度/緯度/高程的資料檔後，將同經度同緯度的資料點高程相乘，其值若為正則保留，為零或為負者剔除；最後以 *blockmean* 設定新的取樣間隔，將間格內有資料點的部分平均化，是為降解析度。

### 3.2 斷層錯位模型(dislocation model)

本研究所位置缺乏地震資料，以致於地下構造的形貌無法藉由地震學方法來獲得。地表變形與地下構造的關係可以使用以格林函數(Green's function)所建立的經驗公式來探究。格林函數描述的是物理上的場(field)與點源(source)之間的關係。我們將「錯動的斷層面」視為地震的「源」，其產生的「形變」視為「場」，點源與場的關係之連結即是格林函數，地表所觀測的位移  $d$  與斷層實際滑移量  $s$  關係可表示如下：

$$d = Gs + \varepsilon \quad (3-5)$$

其中， $\varepsilon$  為觀測誤差， $G$  為格林函數，與斷層的長度、寬度、深度、走向等參數有關。圖 3.9 為一鎖定深度(locked depth)為三公里的左移斷層錯動時，斷層系統在不同深度與距離位移量的三維錯位模型。

目前已有許多不同研究模型來探討地表的位移與地下構造的活動關係，如有限元素法模型、黏彈性半無限空間模型、穩定滑移模型等等。本研究所採用之斷層模型是基於 Okada (1985)所建立之彈性半空間錯位模型(elastic half-space dislocation model)(圖 3.10)。在這個模型中，斷層面為一介面，構造活動產生的

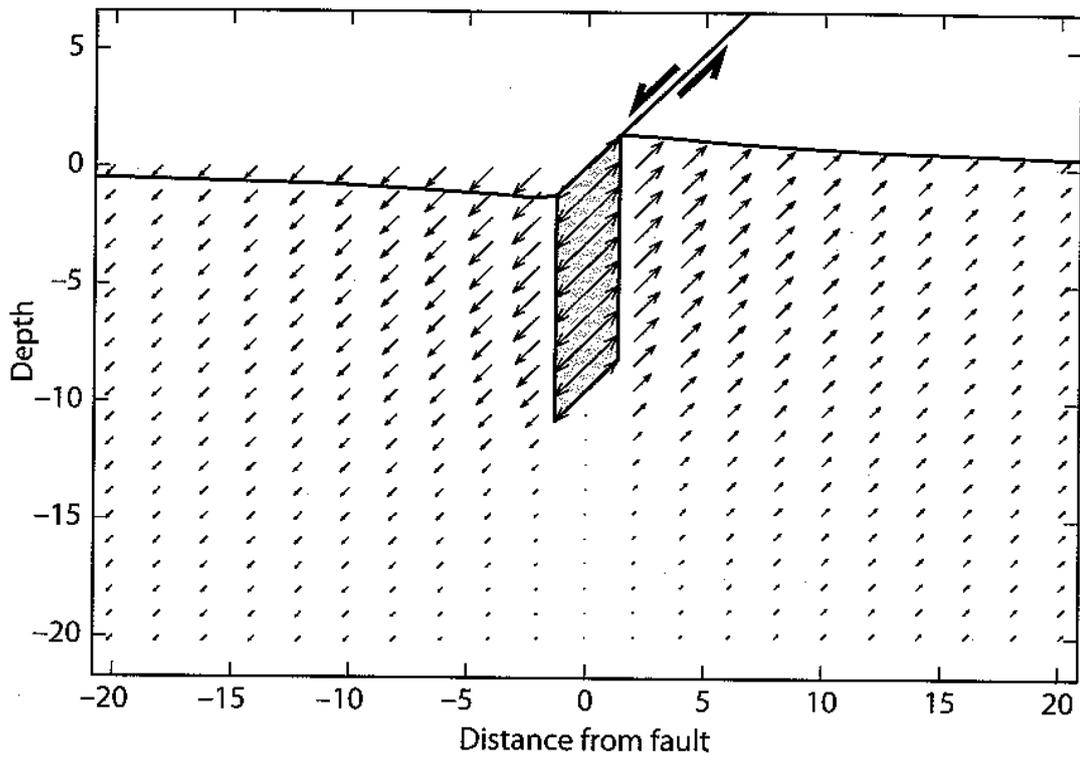


圖 3.9 斷層錯位滑動模型示意圖 (Segall, ?)

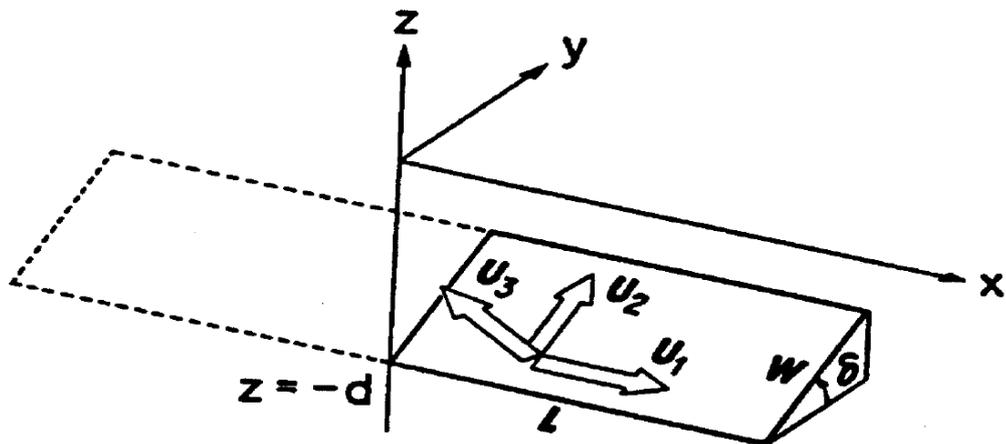


圖 3.10 彈性半空間錯位模型的座標系統 (Okada, 1985)

x 軸方向為平行斷層走向之方向，y 軸方向垂直斷層走向之方向，z 軸為垂直地表之方向。U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、U<sub>3</sub> 分別為斷層面上平行斷層走向滑移量、平行斷層傾沒方向滑移量，以及斷層面法向量方向之滑移量。

應變不會通過斷層面，而是在斷層的兩側分別作用；地表為另一不能傳遞應力的自由介面(free surface)，自由介面是正斷層與逆斷層應力的終點。又該模型探討的尺度為可以忽略地球曲面的有限長度之斷層。為了簡化計算並使彈性應變能運用在計算之中，此模型必要之假設為斷層所在的岩體材料為均質(homogeneous & isotropic)，而地表位移  $d_i$ 、斷層面上的錯動量  $u_j$  與地表下斷層錯動的力  $F$  可表示為：

$$d_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[ \lambda \delta_{jk} \frac{\partial d_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left( \frac{\partial d_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial d_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (3-6)$$

式 3-6 描述的是當地表下一斷層面  $\Sigma$  產生了  $\Delta u_j(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  的錯動量， $F$  為地表下  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  所施加的力，那麼其所造成的地表位移為  $d_i(x_1, x_2, x_3)$ ； $\partial d_i^j$  為地表受  $j$  方向的力，而在地面上觀測點產生  $i$  方向的位移， $\partial d_i^k$  為地表受  $k$  方向的力而在地面上觀測點產生  $i$  方向的位移。在此式中， $\lambda$  與  $\mu$  為拉曼常數， $\delta_{jk}$  為克羅內克符號(Kronecker delta)， $v_k$  為在單位斷層面  $d\Sigma$  上沿法向量的方向餘弦。有了錯動量與地表位移的關係式，則可輸入斷層參數及滑移量正推出地表應變之正演模型(forward model)，抑或輸入地表應變值來回推可能的斷層幾何之逆推模型(inverse model)。由於本研究地區可掌握的資訊太過缺乏，因此係以輸入合理範圍的斷層長度、寬度、深度、走向、傾角的正演模型，來比對衛星影像的觀測資料，並進一步輸入庫倫應力轉移模型來探討地震後的餘震分布活動之可能機制。

### 3.3 庫倫應力轉移(Coulomb stress transfer)

任何一個斷層面的應力狀態，都可以分解成平行斷層面上的剪應力  $\tau$ ，以及垂直斷層面方向的正應力  $\sigma_n$ 。正向應力在斷層面上的作用可假想為砝碼貢獻於斜面上的摩擦力，當剪應力克服摩擦力則砝碼在斜面上開始滑動，同理，斷層面上的剪應力克服正向應力與孔隙液壓所貢獻的摩擦力時，斷層面則可以產生滑動，關係式如下式：

$$\sigma_f = \tau - \mu(\sigma_n + p) \quad (3-7)$$

式中的 $\sigma_f$ 稱為庫倫應力(Coulomb stress)，精確來說，庫倫應力描述的是真實存在抑或假想的斷層面上剪應力方向的力場。大地震發生後釋放的應力稱為庫倫破壞應力(Coulomb failure stress)。根據庫倫破壞準則(Coulomb failure criterion)，地震發生後，在斷層附近的任何一個假想斷層面，我們都可以計算面上的庫倫應力變化(change of Coulomb failure stress)  $\Delta\sigma_f$  為：

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n + \Delta p) \quad (3-8)$$

其中  $\mu$  為摩擦係數； $\Delta\tau$  為平行斷層面上的剪應力變化； $\Delta\sigma_n$  為垂直斷層面的正向應力之變化(壓縮應力為正)； $\Delta p$  為斷層帶孔隙液壓的變化(增加為正)。若算出的庫倫應力變化  $\Delta\sigma_f$  為正值，則表示該處被觸發地震的機率增加；反之若  $\Delta\sigma_f$  為負，則代表該處處於應力陰影帶(stress shadow)，較不易被觸發餘震(圖 3.11)。

本研究使用由 Toda 等人開發在 Matlab 平台上的 Coulomb 3.3 軟體來建立 2007 班孟地震後的對周遭斷層系統的庫倫應力轉移模型。斷層的走向參考 Wang et al(2014)利用構造地形與地震活動所描繪的斷層線(圖 2.1)，地下幾何參考 Global CMT 對班孟地震測得的震源機制解，並使用 Okada 的斷層錯位模型推得的滑移參數，結果將於下一章討論。

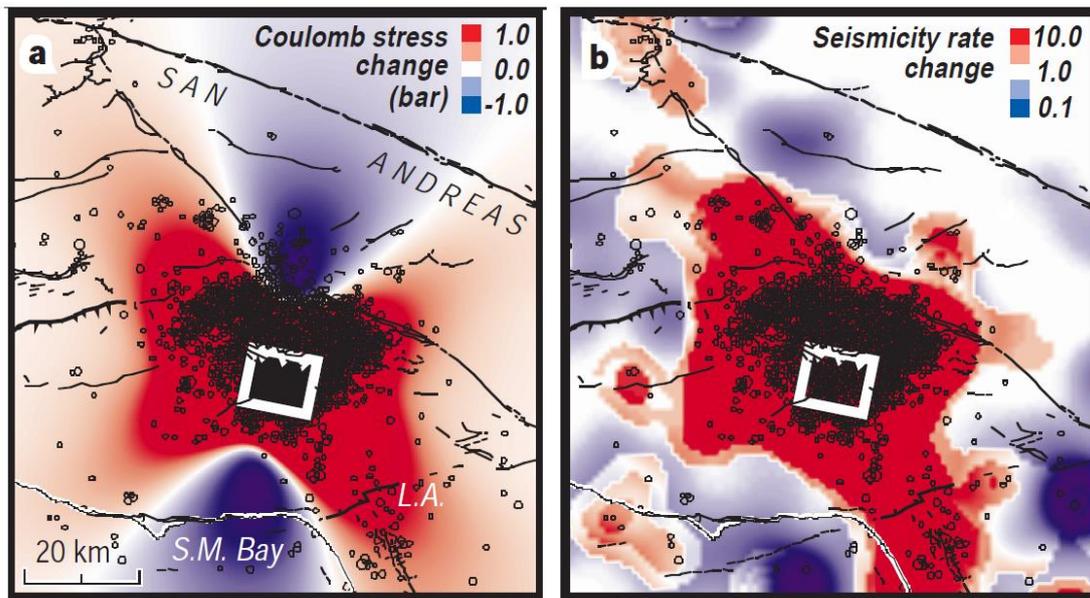


圖 3.11 庫倫應力變化與地震活動關係(Stein, 1994)

(a)為 1994 年 Mw 6.7 的加州大地震震後所計算的庫倫應力變化量。紅色區域代表庫倫應力上升，藍色區域代表庫倫應力下降，黑色空心圓圈為該地震後 3 至 6 個月所發生 Mw 大於等於 1.5 的餘震。(b)為同時間內利用地震學方法所統計的地震活動度，紅色區域代表地震活動度上升，藍色代表下降。

表 3.1 常用雷達波段分類與衛星平台

波段名稱	頻率	波長	衛星平台
HF	3-30 MHz	10-100 m	
P	< 300 MHz	1 m	
VHF	30-300 MHz	1-10 m	
UHF	300-3000 MHz	0.3-1 m	
L	1-2 GHz	15-30 cm	J-ERS-1, ALOS, Seasat
S	2-4 GHz	7.5-15 cm	Almaz
C	4-8 GHz	3.75-7.5 cm	ERS-1&2, Envisat, RADARSAT-1&2
X	8-12 GHz	2.5-3.75 cm	TerraSAR-X, COSMO-SkyMed
Ku	12-18 GHz	1.67-2.5 cm	
K	18-24 GHz	0.75-1.11 cm	
Ka	24-40 GHz	0.75-1.11 cm	
mm	40-300 GHz	7.5 – 1 mm	
V	40-75 GHz	4.0 – 7.5 mm	
W	75-110 GHz	2.7 – 4.0 mm	
UWB	1.6-10.5 GHz	18.75 – 2.8 cm	

## 第四章 研究結果



於 2007 年 5 月 16 日發生的班孟地震發生於東經  $100.69^{\circ}$ ，北緯  $20.470^{\circ}$ ，地震矩規模為  $M_w$  6.3 (USGS Catalogue)。以過去地震學及構造地形學的認知，這樣規模的地震或可造成可觀察到的地表變形(Wells and Coppersmith, 1994)。可惜的是，2007 年的當時寮國該區域附近完全沒有大地水準測量資料，亦無接近的地震測站保留下關於該地震的任何測量資訊。理論上這樣的地震規模而言，地表變形的量不會太大，因此無法使地表出現明顯的同震斷層線崖(fault scarp)，且以濕潤多雨的寮國北部而言，小量的地表變形也可能在數年之內受到強烈的侵蝕作用而不易辨識。在地震發生的七年後的今日，即便利用高精度的水準測量儀器前往測量，可能也難以有任何幫助。然而，早自 2006 年開始，ALOS 衛星早已以 691.65 公里的平均飛行高度，每 46 日行經地球上的同一位置，並紀錄下其所行經地區的地表相位，而這正是此研究唯一可取得的高精度地表資訊。

ALOS 衛星於 2006 年 1 月 24 日由執行地球觀測衛星計畫的日本發射，於 2011 年 5 月 12 日除役，統計其在班孟地震前後行經的日期有編號 2007/1/2、2007/2/17、2007/7/5、2007/8/20 及 2007/10/5 日等。在本研究中則使用北行軌道(ascending path) 第 484 號軌道，390 與 400 號圖幅，所使用的影像對見表 4.1。

### 4.1 合成孔徑雷達干涉結果

班孟地震發生的位置在 ALOS 衛星影像圖幅編號 390 與 400 重疊的區域，本研究分析了這兩個圖幅編號的影像，使用 ASTER GDEM 2.0 作為數值地形底圖(圖 4.1)，以 GMTSAR 程式產生了 1 幅震前干涉影像對，10 幅同震干涉影像對和 4 幅震後干涉影像對。每幅干涉影像對的同調性以雷達座標系統呈現於表 4.2 中。震前影像因同調性太低，無法解算出結果。同震影像在圖幅 390 中，2007/2/17-2007/7/5、2007/2/17-2007/8/20、2007/2/17-2007/10/5，以及

表 4.1 本研究使用的 ALOS 衛星影像對

圖幅編號	主影像日期	副影像日期	時間間隔	備註
390	2007/1/2	2007/2/17	46 天	震前
390	2007/1/2	2007/7/5	184 天	同震
390	2007/1/2	2007/8/20	230 天	同震
390	2007/1/2	2008/4/6	460 天	同震
390	2007/2/17	2007/7/5	138 天	同震
390	2007/2/17	2007/8/20	184 天	同震
390	2007/2/17	2007/10/5	230 天	同震
390	2007/7/5	2007/8/20	46 天	震後
390	2007/7/5	2007/10/5	92 天	震後
400	2007/2/17	2007/7/5	138 天	同震
400	2007/2/17	2007/8/20	184 天	同震
400	2007/2/17	2007/10/5	230 天	同震
400	2007/2/17	2007/11/20	276 天	同震
400	2007/7/5	2007/8/20	46 天	震後
400	2007/7/5	2007/10/5	92 天	震後

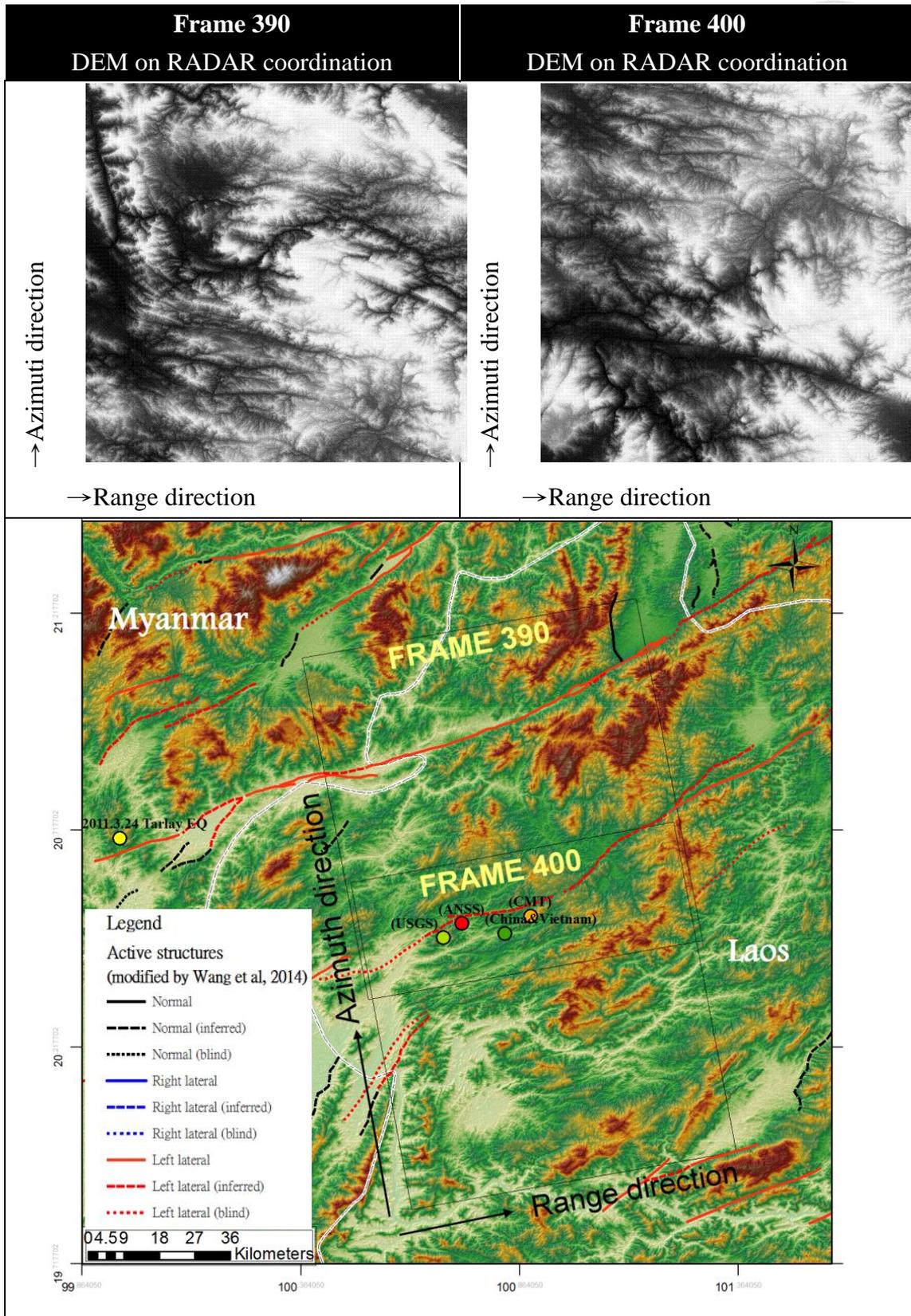


圖 4.1 ALOS 圖幅 390 與 400 轉換至雷達座標系統的數值地形圖

表 4.2 雷達座標系統的影像對反射強度圖與同調性  
 反射強度為白色，低者為深色。對應地理位置見圖 4.2

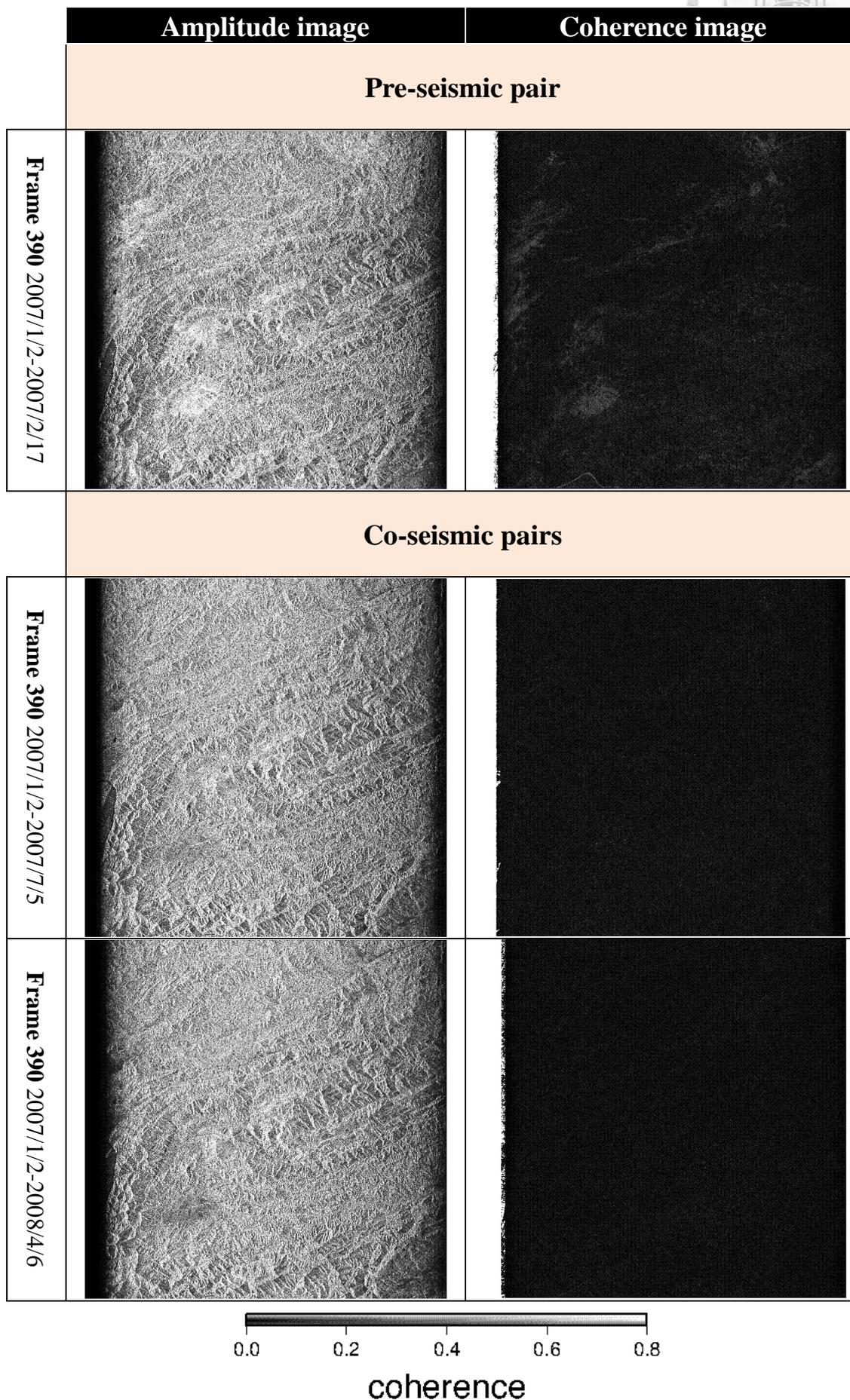




表 4.2(續)

Frame 390 2007/2/17-2007/7/5		
Frame 390 2007/2/17-2007/8/20		
Frame 390 2007/2/17-2007/10/5		



coherence

表 4.2(續)

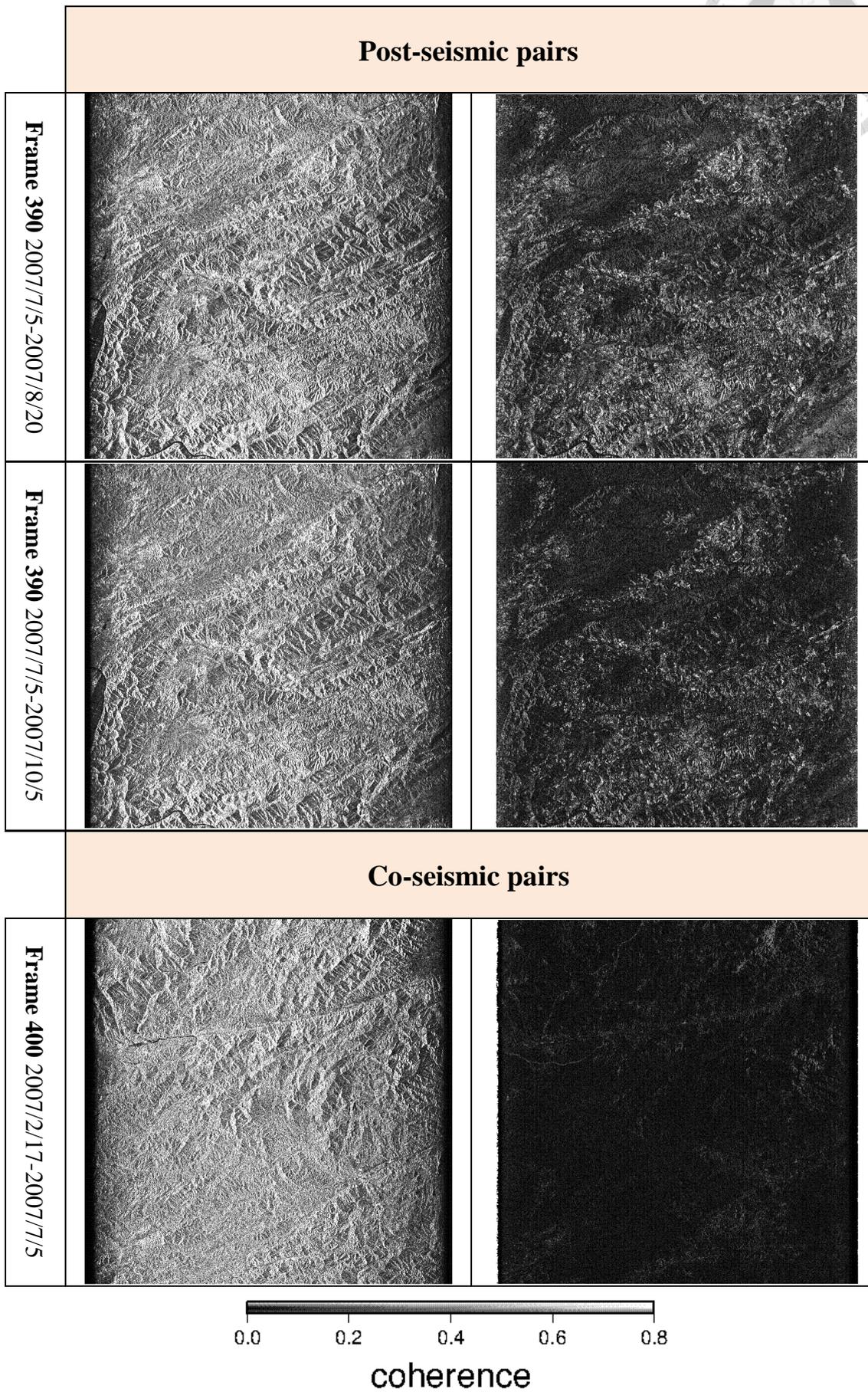
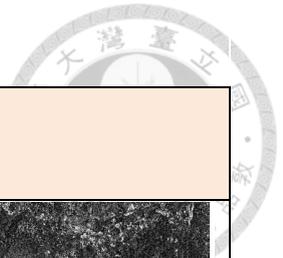


表 4.2(續)

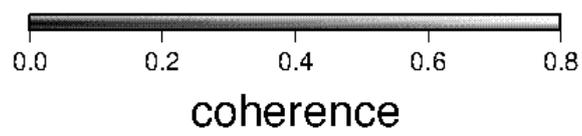
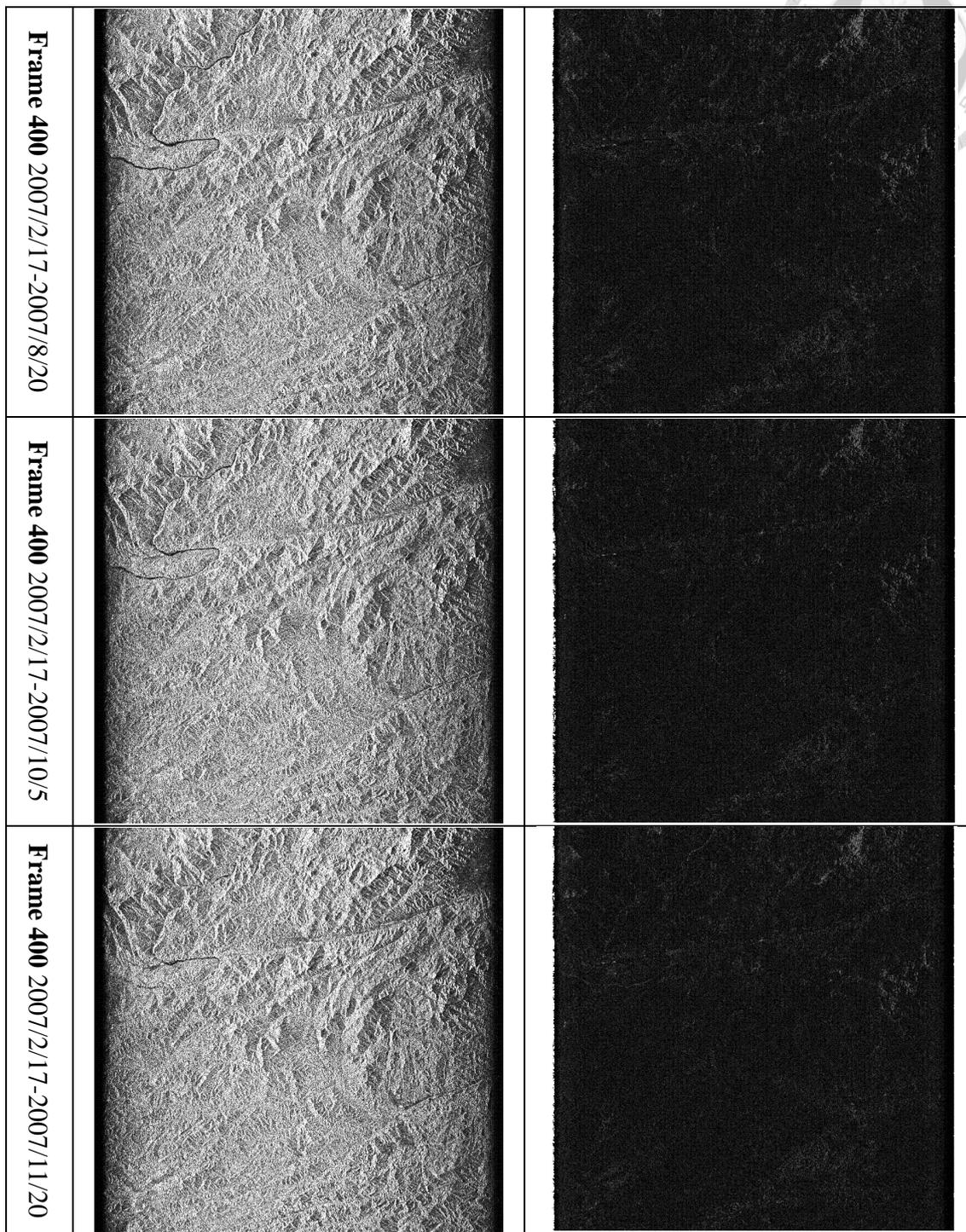
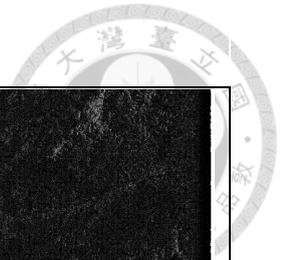
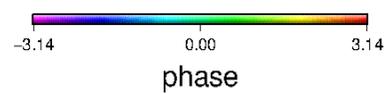


表 4.3 雷達影像處理結果

表格中 N/A 表示相位無法解算。



	相位圖 (phase)	高斯過濾相位圖 (phase filtered)	相位解算圖 (unwrap)	視衛星方向解算圖 (LOS)
<b>Frame 390,</b> Pre-seismic 2007/1/2-2007/2/17				
<b>Frame 390,</b> Co-seismic 2007/1/2-2007/7/5			N/A	N/A
<b>Frame 390,</b> Co-seismic 2007/1/2-2007/8/20				



45

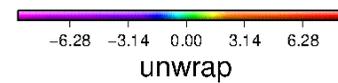
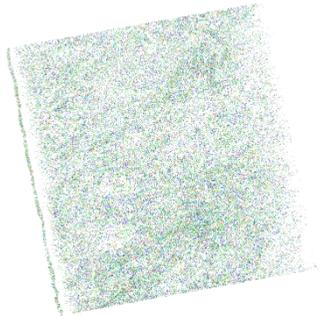
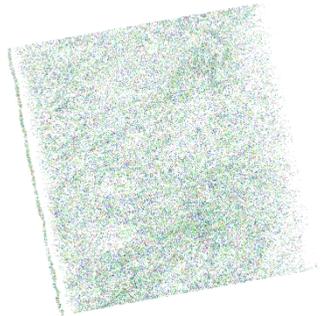
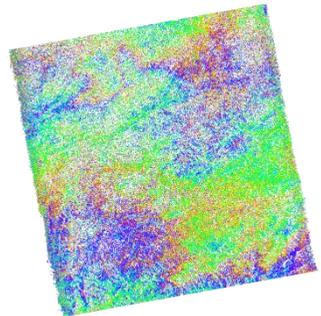
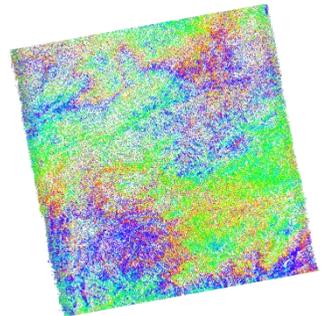
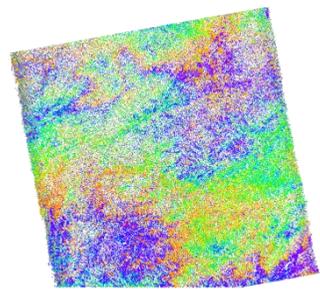
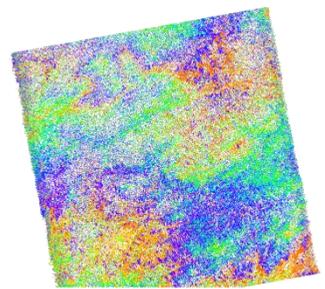
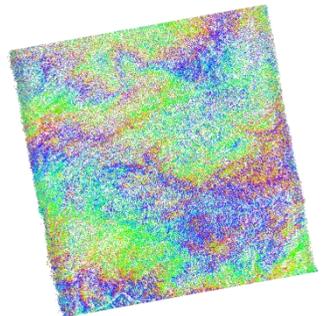
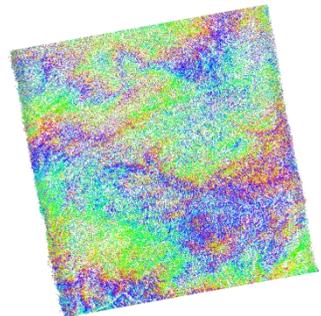
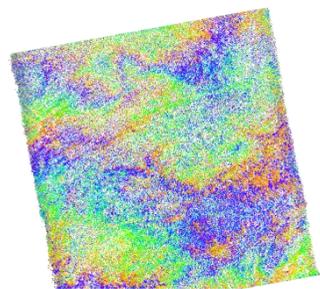
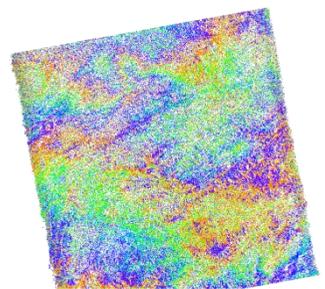


表 4.3 (續)



<p><b>Frame 390,</b> Co-seismic 2007/1/2-2008/4/6</p>			<p>N/A</p>	
<p><b>Frame 390,</b> Co-seismic 2007/2/17-2007/7/5</p>				
<p><b>Frame 390,</b> Co-seismic 2007/2/17-2007/8/20</p>				

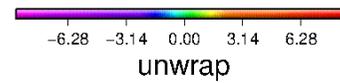
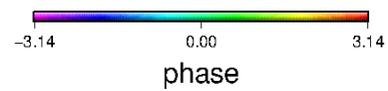


表 4.3 (續)

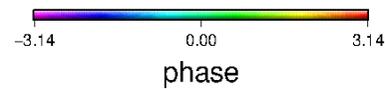
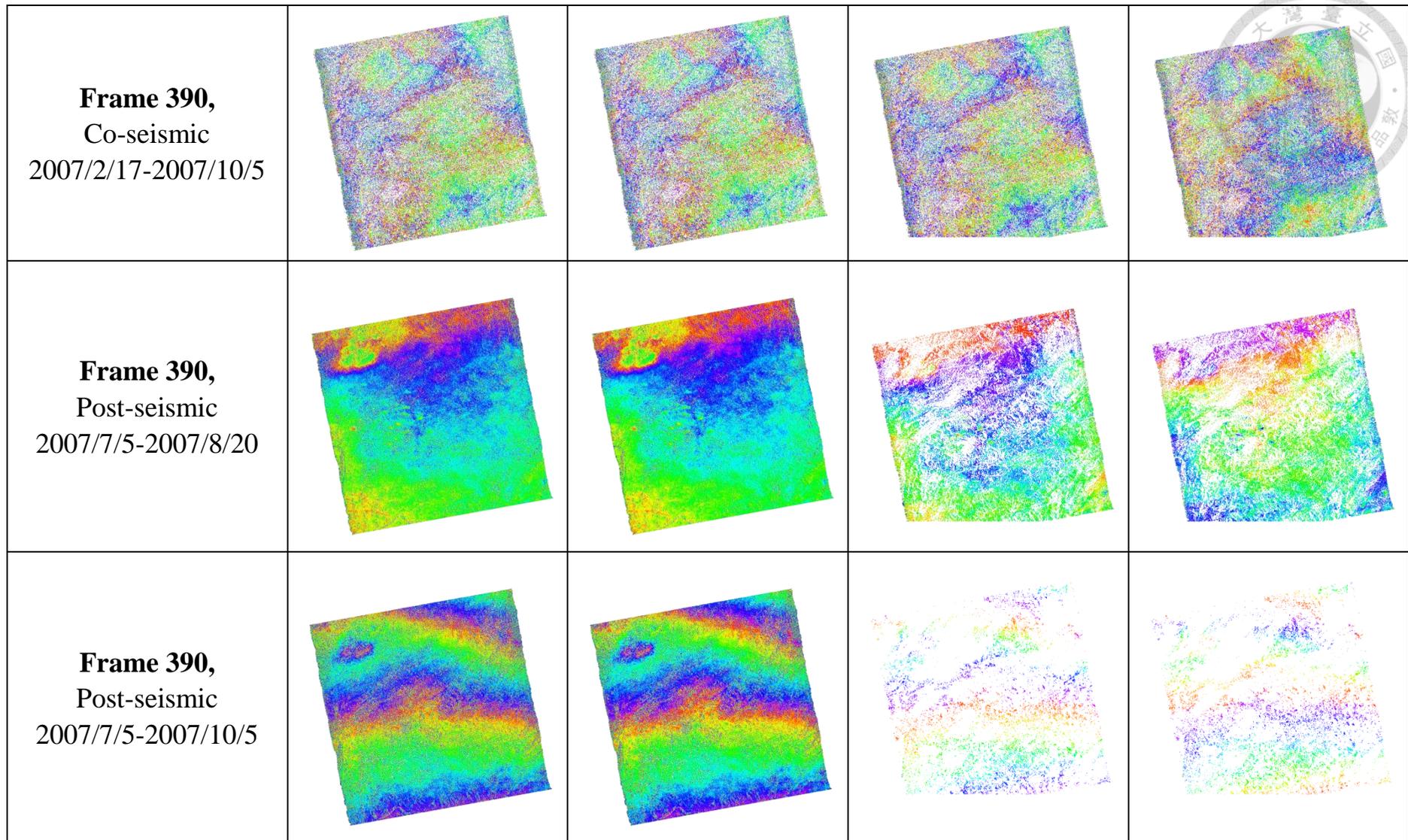


表 4.3(續)

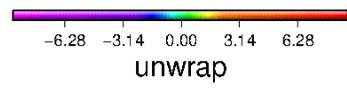
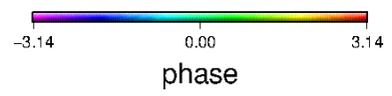
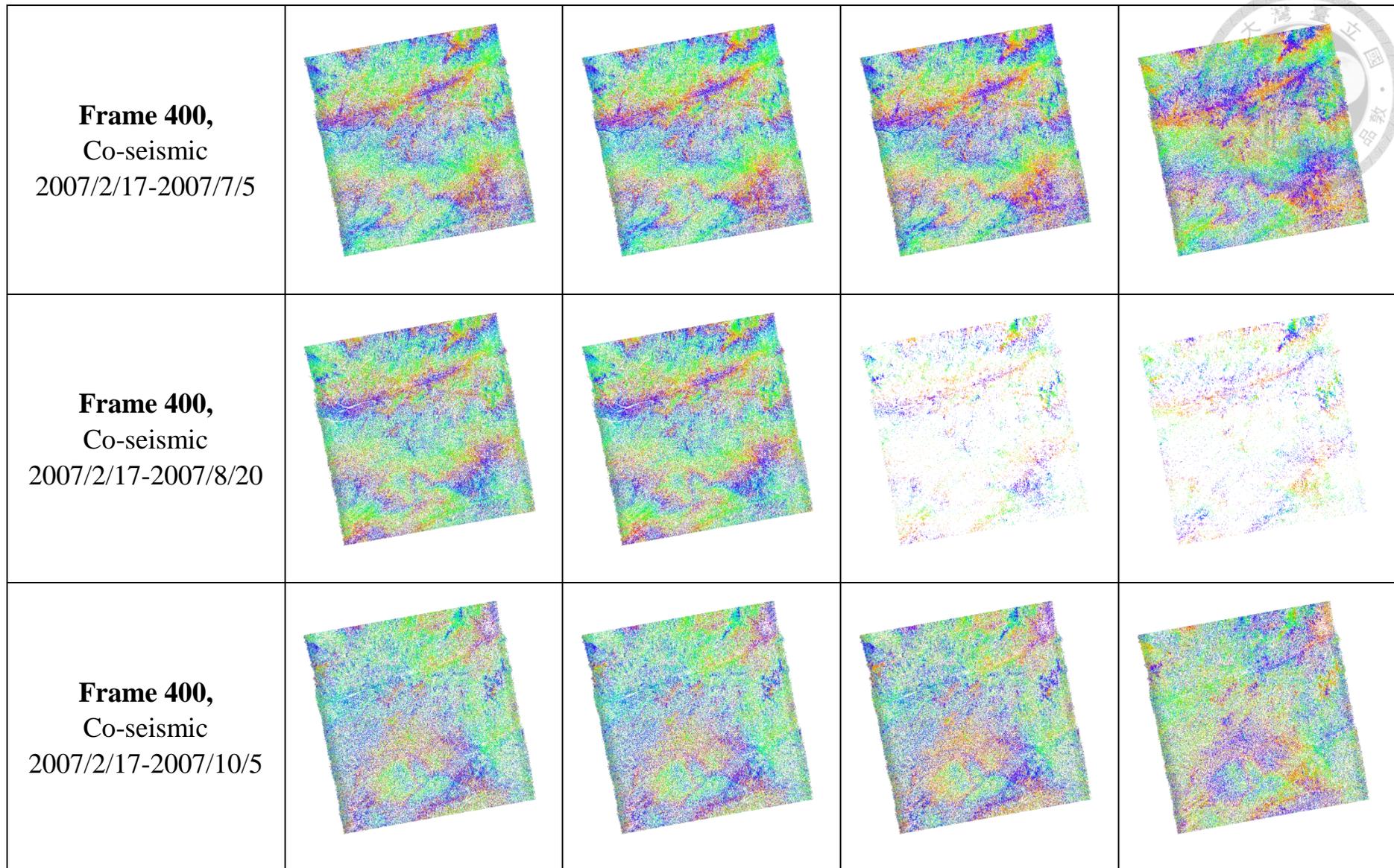
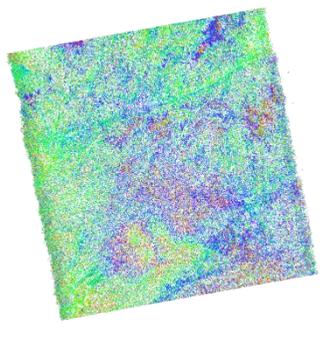
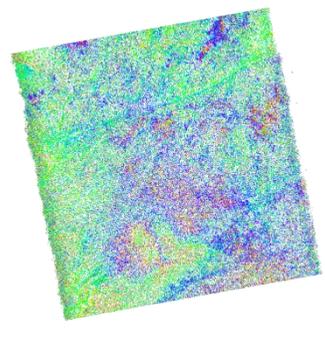
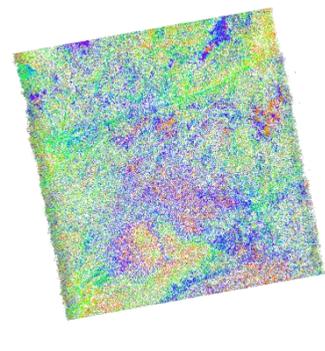
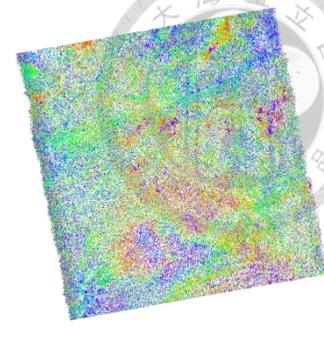
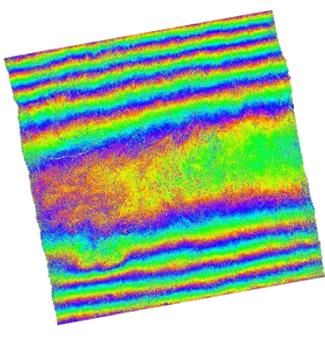
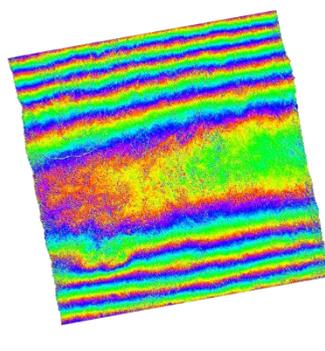
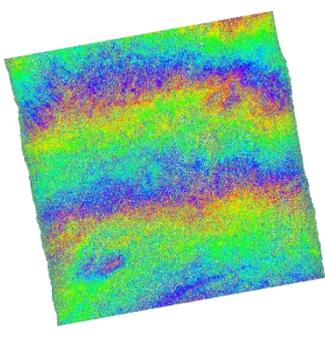
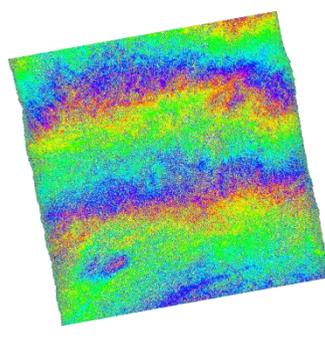
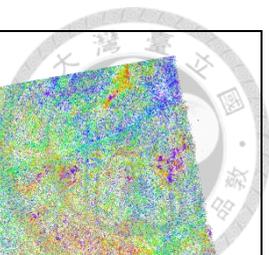
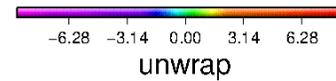
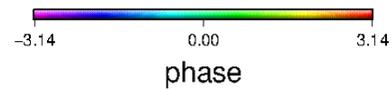


表 4.3(續)

<p><b>Frame 400,</b> Co-seismic 2007/2/17-2007/11/20</p>				
<p><b>Frame 400,</b> Post-seismic 2007/7/5-2007/8/20</p>			<p>N/A</p>	<p>N/A</p>
<p><b>Frame 400,</b> Post-seismic 2007/7/5-2007/10/5</p>			<p>N/A</p>	<p>N/A</p>



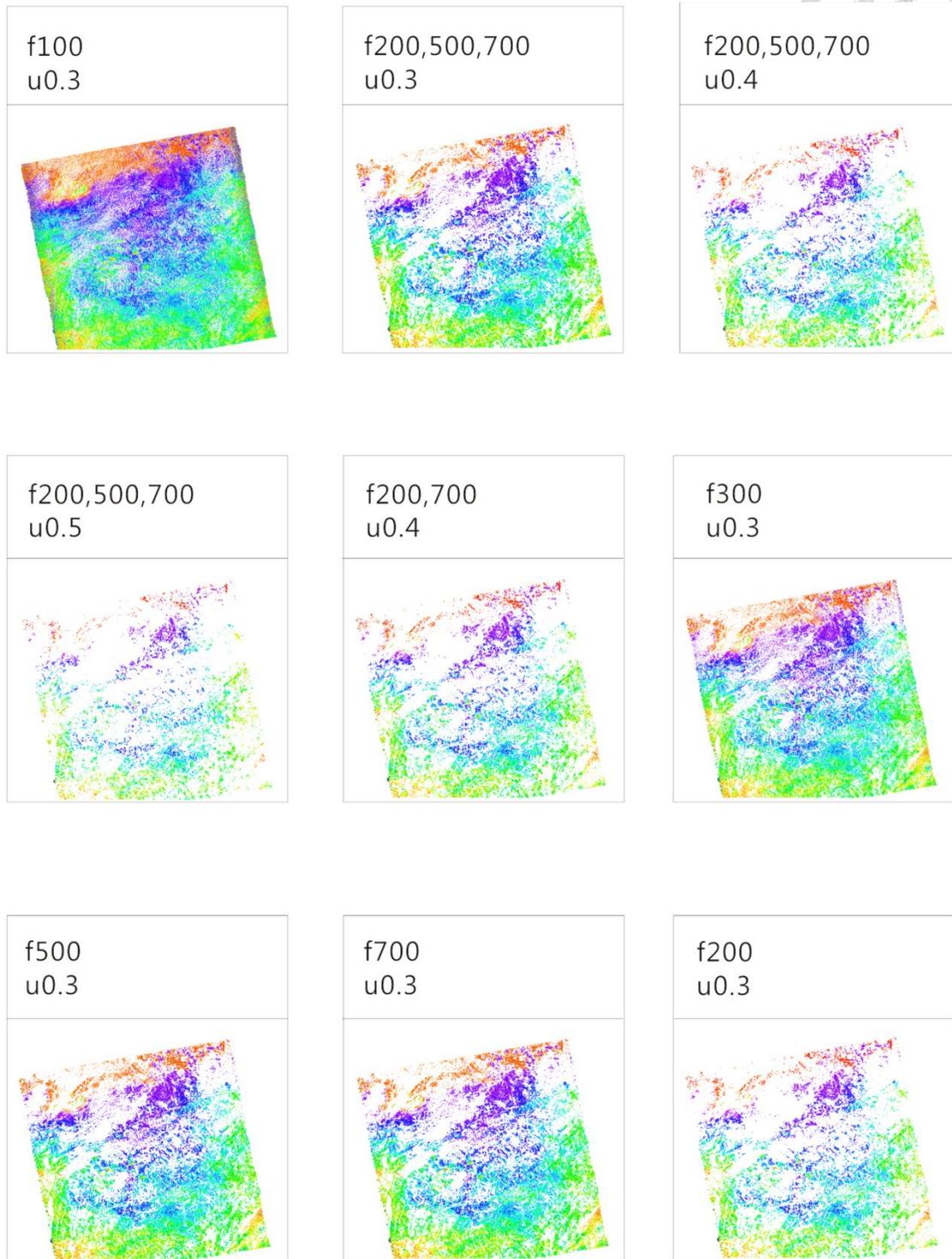
2007/2/17-2007/7/5、2007/2/17-2007/8/20、2007/2/17-2007/10/5、2007/2/17-2007/11/20 的影像對都有相當良好的解算結果。震後影像在圖幅 400 的兩幅皆無法解算，僅有圖幅 390 的兩幅影像對尚能解算，但解算結果仍有明顯的長波長、近東西走向的調帶式雜訊無法藉由高斯過濾器去除(圖 4.2)。

## 4.2 2007 年班孟地震之震源機制判定

由於全球地震網在 2007 年的架設並未普及到寮國地區，導致全球地震定位系統的定位結果有相當大的差異(圖 4.1)，如 ANSS 與 Global CMT 的震央距離差異近 16 公里，而 USGS 與 Global CMT 的定位結果更差了近 22 公里。這樣的結果顯示全球地震定位系統對於此地震僅能提供非常粗略的參考。Global CMT 利用地震波紀錄的質心震矩張量(CMT, centroid moment tensor)波型，逆推斷層破裂時的剪力模式來求得震源機制解，顯示其中一組節點面(nodal plane)與湄善斷層的走向近似。因此，本研究假設班孟地震係湄善斷層沿著既有斷層面滑動，並參考 Global CMT 所報導的震源機制解(詳見表 2.1)，認定其東北—西南走向、向南傾沒的一組左移斷層面( $54^{\circ}, 89^{\circ}, 9^{\circ}$ ) 是代表本次地震的主破裂面。

### 4.2.1 同震干涉影像的判讀

本研究的地震所在處橫跨 ALOS 衛星圖幅編號 390 與 400 重疊之處(圖 4.2)，所選的震前影像為 2007 年 2 月 17 日，震後則選取 7 月 5 日以及 8 月 20 日的影像。於 GMTSAR 平台所處理的干涉結果經由相位解算後回推成衛星視線方向(LOS)位移量的干涉結果如圖 4.3，在圖中的南馬斷層及湄善斷層兩側，可能受地形影響有產生有關的效應，而在地圖右下角的盆地中，兩幅干涉影像解算出完全相反的位移方向，顯示其受區域半封閉地形影響，大氣的變化可能遠大於地表所貢獻的變化。此外因缺乏地面水準測量資料，使得本分析結果無法以地面控制點校正，解析能力亦有限。



f: Gaussian filter in meter  
u: correlation threshold for snaphu (0~1)

圖 4.2 以圖幅編號 390 的震後影象對 2007/7/5-2007/8/20 所做  
不同過濾波長及不同相位解算門檻值的測試結果

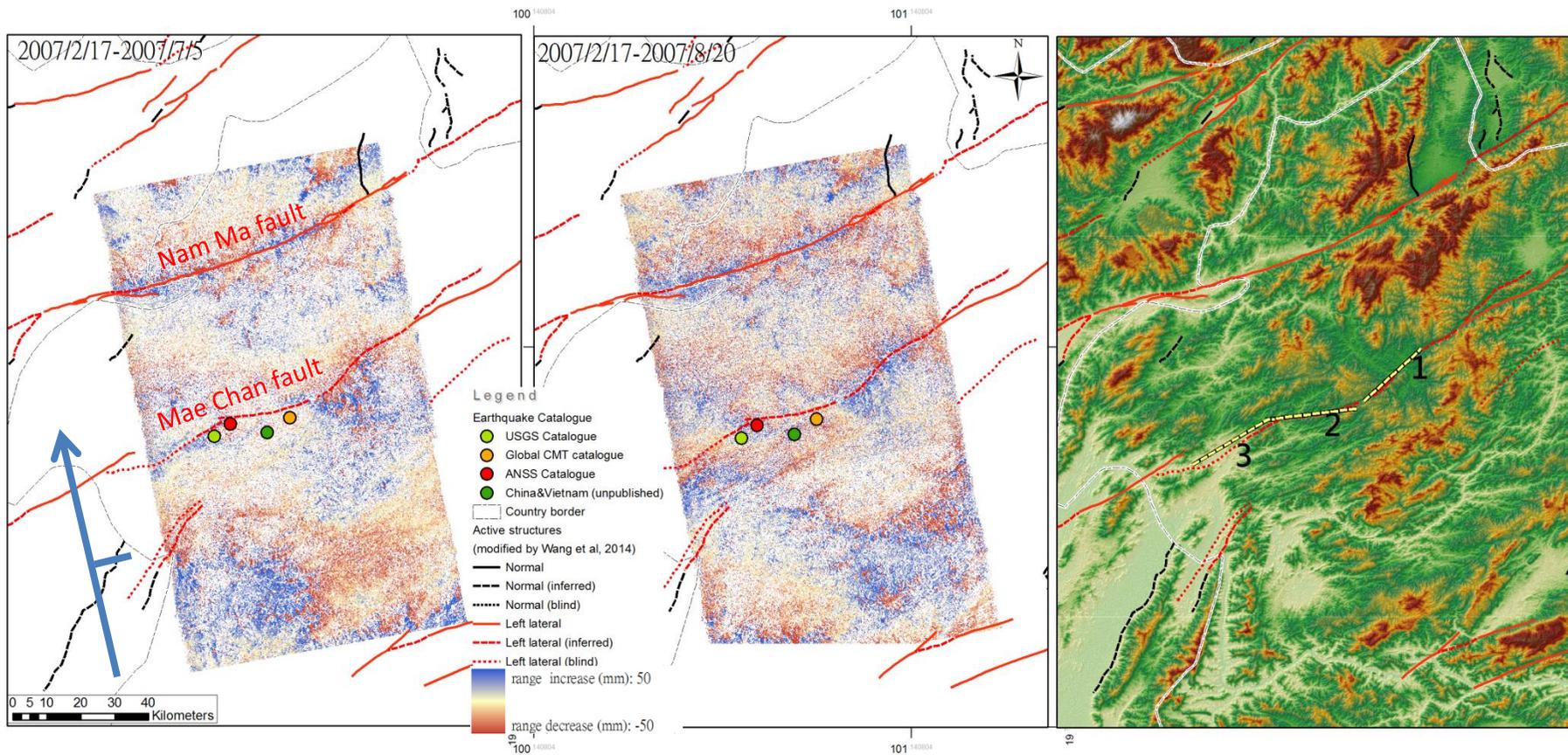


圖 4.3 衛星視線方向(LOS)班孟地震同震干涉影像對

左圖藍色箭號為衛星行進方向，垂直線段指示視線方向。切過干涉圖的兩條東北—西南走向的斷層，右圖中黃色線段為本研究正推模型及庫倫應力模型所模擬之斷層段。

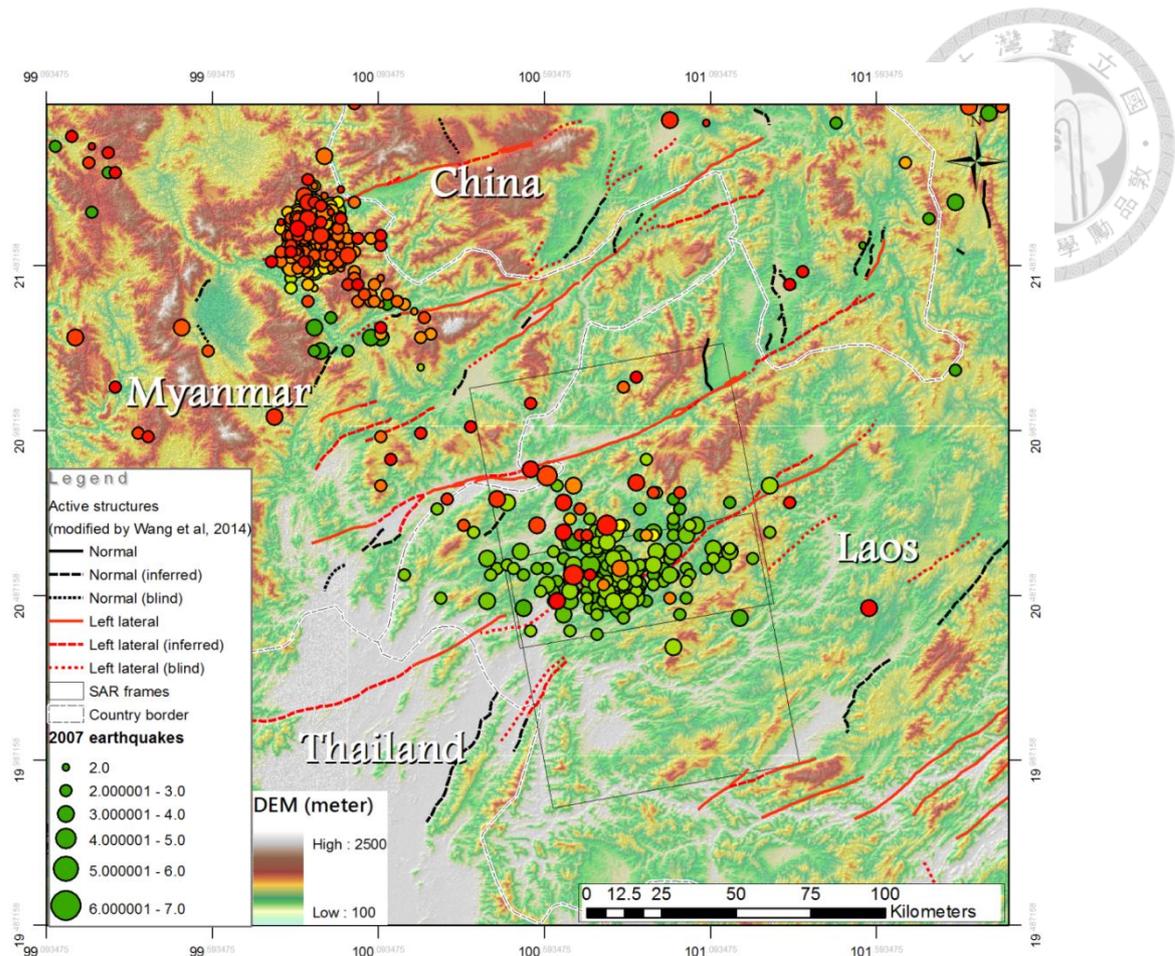


圖 4.4 研究區域 2007 年地震序列

本圖的地震資料是由中國雲南地震站及越南地震觀測局提供的未發表資料。圖中的地震紀錄了 2007 年 1/7 至 12/31 所發生的 652 個地震，依時間序列，顏色由綠色變化至紅色。位於寮國境內，以綠色為主的群震係集中在 5 月 16 日班孟地震後至 6 月之間，而位於緬甸境內的橘紅色系群震主要集中在 6 月底。圖中的 SAR frames 由上而下為圖幅編號 390 與編號 400。

即使在雜訊很多的相位解算結果中，仍能清楚看到湄善斷層在地震定位結果東方的斷塊，其相對距離於地震後在斷層南側、北側分別增加(range increase)與縮短(range decrease)(圖 4.3)，其增加與縮短的量值大約為 50 mm。以北向運行軌道的衛星來說，相對距離縮短意味著其斷塊的淨滑移量可能為向西或抬升，反之，相對距離增加則指示向東或沉陷的位移。

### 4.3 班孟地震湄善斷層(Mae Chan fault)的斷層幾何模型

#### 4.3.1 斷層錯位模式正推模型(forward dislocation model)

在無法得到校正資料的情形之下，仍有一些小方法能夠輔助排除可能為誤差的資料點，以及協助提升分析目標為構造訊號的可信度。欲排除的目標如圖 4.3 右下方的盆地為例，在僅僅差距 46 天的兩幅干涉影像中卻解出了相反的位移，顯示其肯定不是由地震相關的地表位移所貢獻的。因此，本研究將兩幅同震干涉影像以解算後的位移值正負作為篩選。過濾的對象為在同一座標的資料點於兩幅解算出相反的位移方向者。解算出相反位移的格點座標，就是接下來要用來移除誤差資料的濾網。

ALOS 衛星影像原始干涉結果的單位解析度為 0.05 分(約 8.3 公里)。將同震干涉影像：圖幅 390 的 2007/2/17-2007/7/5、圖幅 390 的 2007/2/17-2007/8/20，圖幅 400 的 2007/2/17-2007/7/5 與圖幅 2007/2/17-2007/8/20 分別過濾掉在同樣位置不同日期具有相反位移量的資料點，結果(圖 4.4)可以清晰看到，右下方盆地內的訊號皆已移除，在河谷內可能有大氣干擾的訊號也不復存在，而湄善斷層在圖中右邊斷塊(以下編號 1 號)兩側的訊號仍存在，且降解析度後仍能觀察到同樣的趨勢。結果顯示此訊號在斷層以北的變量在衛星視線方向移近了約 50 mm，斷層以南的變量為向衛星方向遠離了約 50 mm，很可能就是 2007 年班孟地震的構造訊號，因此需要進一步的分析驗證。

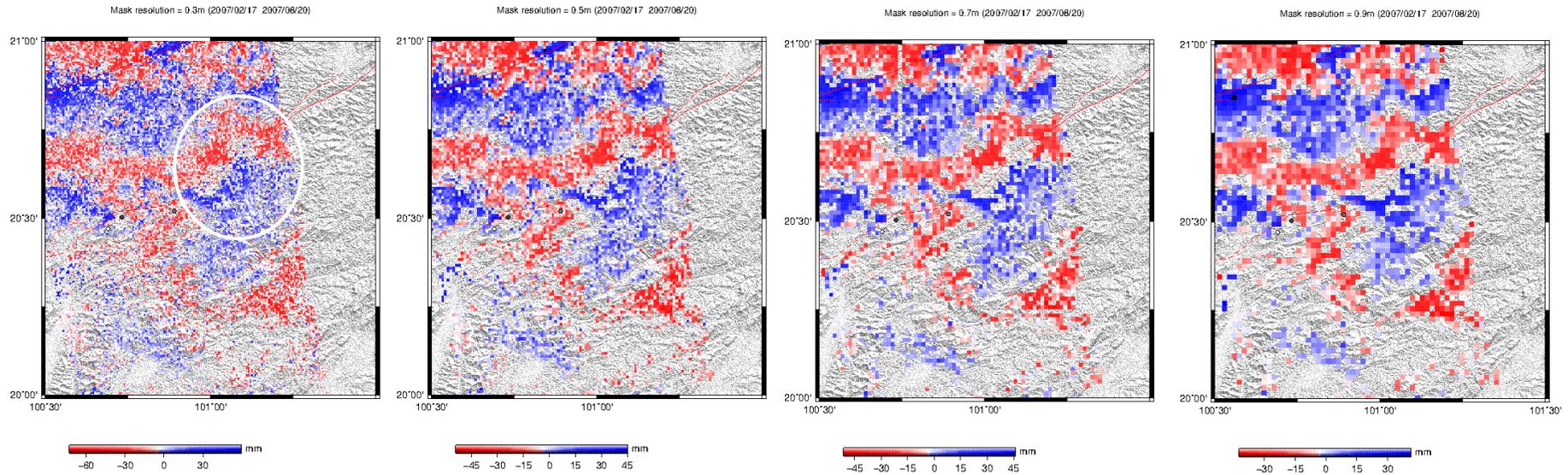


圖 4.4 降解析度過濾結果

本幅為 2/17-8/20 降解析度且過濾後的結果，可以明顯看到右下方的盆地內資料點大多都已移除，而被本研究認為是同震位移的訊號(同左圖白色圈內區域)在降解析度後都仍保留訊號特性。

以合成孔徑雷達的觀測系統而言，所有關於地表的訊號都是在衛星視線方向進行收發，而非直接記錄到在水平面或鉛直面上的位移。以相對衛星距離縮短(range decrease)的訊號為例，其可能代表純抬升，或斷塊純向西移動，抑或者是抬升與西移兼具。在沒有地面觀測資料的控制之下，一個訊號所代表的意義有無限多組解(圖 4.5)。因此，在本研究中欲探討震源機制與的表同震變形的關係，並不適合由合成孔徑雷達干涉影像逆推斷層幾何，而是以觀察到的斷層長度，設定合理的寬度、深度、滑移量及其他參數，輸入適用的正推錯位模型(forward model)並檢視模型結果是否符合觀測值。

#### 4.3.2 參數選擇

Okada 的彈性半空間斷層錯位模型所需的參數如下：與斷層幾何有關的參數為斷層傾角、斷層寬度、斷層長度及斷層走向；與滑移有關的參數有斷層鎖定深度、斷層鉛直方向滑移量和斷層水平方向滑移量；與圍岩性質有關的參數為柏松比(Poisson's ratio)，與斷層剪力性質有關的參數為剪力模數  $G$ (shear modulus)。

首先根據地震矩規模的經驗公式(Kanamori 1977；Hanks and Hiroo, 1979)來計算出合理的地震矩(seismic moment)範圍。從地震觀測結果(表 2.1)顯示 2007 年班孟地震的地震矩規模為 6.3，而地震矩規模( $M_w$ )與地震矩( $M_0$ )關係式如下：

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (4-1)$$

$$M_0 = \mu AD \quad (4-2)$$

其中， $\mu$ 為剪力模數，單位為 Pa (即  $N/m^2$ )，本研究使用的是代表大陸地殼的 33GPa (即  $33 \times 10^9 Pa$ )； $A$  為同震斷層破裂面積，單位為  $m^2$ ； $D$  為斷層面的平均滑移量，單位為 cm。一個  $M_w$  為 6.3 的地震，其地震矩  $M_0$  應約為  $10^{25.5}$  dyne-cm。本研究設定  $M_w$  範圍介於 6.251 與 6.349 之間，以其計算的  $M_0$  結果為  $2.67 \times 10^{25}$

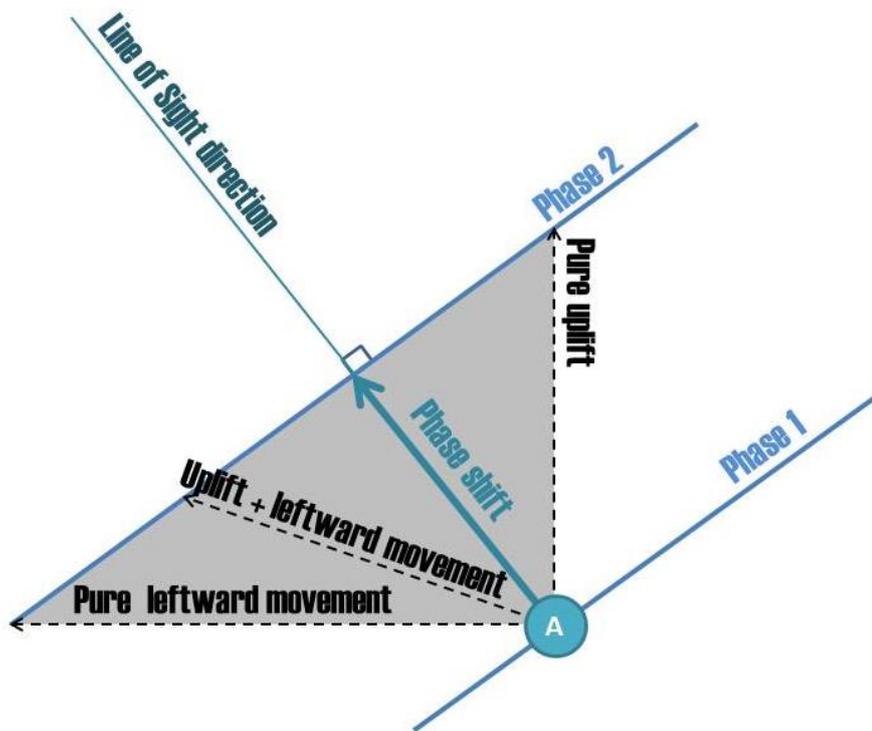


圖 4.5 產生一單位的相位位移之所有可能性示意圖

以點 A 欲產生一個測距解析單元由 phase 1 往 phase 2，LOS 方向距離縮短 (range decrease) 的相位位移 (phase shift)，如藍色箭號所表示，則其可能表示的地表位移向量可能是抬升、純向左移，或抬與左移的組合。灰色區域代表欲產生一藍色箭號的相位平移量之所有可能的地表位移向量。

至  $3.7510^{25}$  dyne-cm 之間，代入剪力模數 33GPa 後，得到滑移潛能 (slip potency) (即斷層破裂面積 A 與平均滑移量 D 之積) 範圍為  $8.09 \times 10^9$  至  $1.13 \times 10^{10}$  ( $m^2$ -cm) 之間。接下來就是設定符合此範圍的斷層破裂長度、破裂深度、破裂面積及滑移量，並找出最接近合成孔徑雷達干涉觀測結果的一組解作為正推模型的結果。

### 斷層破裂長度

根據干涉圖的觀察，2007 班孟地震的主破裂疑似出現在圖 4.1 中湄善斷層的 1 號斷層段 (fault segment) 上，長約 15-18 公里，而根據 Wells and Coppersmith (1994) 的斷層統計資料指出，斷層在地表的破裂長度必定小於地下的破裂長度，且長度不超過地下斷層破裂的  $3/4$ ，因此本研究帶入正推模型帶入的長度參數範圍是 18-24 公里。

### 斷層破裂深度

根據 Sanders (1990) 觀察 San Andreas fault 的結果，一般小地震在該走向滑移斷層的發震深度 (seismogenic depth) 為 1-6 公里深，大地震的發震深度會達 11-18 公里，最深可達 22 公里；King and Wesnousky (2007) 統計大陸地殼中的走向滑移斷層地震資料，地震規模大於 6 的發震深度集中在 2-15 公里之間。在本研究的正推模型中，需設定的相關參數為斷層鎖定深度與斷層寬度，而本研究帶入正推模型的鎖定深度範圍為 2-15 公里，寬度範圍為 5-17 公里。

### 斷層平均滑移量

本研究在正推模型帶入的滑移量參考自 Wells and Coppersmith (1994) 所記載有滑移資訊的地震紀錄，如 1972 年 12 月 23 日，發生在尼加拉瓜，由右移斷層錯動所引發地震規模 6.3 的 Managua 地震，其斷層破裂面積為 120 平方公里，最大滑移量為 0.67 公尺；1983 年 12 月 22 日，發生在南非幾內亞，由右移具正斷層分量的斷層錯動所引發地震規模 6.32 的 Guinea 地震，其斷層破裂面積為 378

平方公里，最大滑移量為 0.45 公尺；1988 年 1 月 22 日，發生在澳洲 Tennant Creek，由右移斷層錯動所引發地震規模為 6.26 的地震，其斷層破裂面積為 117 平方公里，最大滑移量為 1.3 公尺，平均滑移量為 0.63 公尺；1989 年 12 月 25 日，發生在加拿大，由逆斷層錯動所引發地震規模為 6.3 的 Ungava 地震，其斷層破裂面積為 50 平方公里，最大滑移量為 2.0 公尺，平均滑移量為 0.8 公尺。綜合前人整理的地震資料，本研究認為 2007 年班孟地震的斷層平均滑移量在 0.6-0.8 公尺之間。

#### 4.3.3 正推模型結果

本研究採用 Okada (1975)發表的斷層錯位模型，經過接近三十多組數斷層參數正推結果，選出最接近合成孔徑雷達觀測結果的模型，認為 2007 年班孟地震可以由一個長 18 公里、破裂寬度 8 公里、鎖定深度為 4 公里深的純左移斷層破裂所模擬出來，其滑移潛能為  $1.008 \times 10^{10} \text{ m}^2\text{-cm}$ ，由 Okada 的彈性半空間斷層錯位模型所計算出來的地震矩規模為 6.3146，近似於 USGS 和 Global CMT 計算出來的地震規模，而斷塊南北兩側的衛星視線方向的最大位移量也約為 5 公分，與觀測值相當(圖 4.6)。相關參數見表 4.1。

### 4.4 庫倫應力轉移模型(Coulomb stress transfer model)

除了觀察到 2007 年班孟地震的同震變形集中在湄善斷層的 1 號斷塊上(圖 4.4)(編號位置見圖 4.1)，也從中國雲南地震局及越南地震局未公布的資料中也可以發現，2007 年班孟地震發震後至六月之間，湄善斷層發生了頻繁的餘震(圖 4.2)。這可能暗示了走向滑移斷層系統中應力在水平空間上的轉移。

根據斷層錯位正推模型結果，本研究認為 2007 年班孟地震的主要地表變形是發生在湄善斷層編號 1 的斷層段上。將這些數據代入庫倫應力轉移模型中，將衛星圖幅所涵蓋的湄善斷層簡單分成三個斷層段，其編號為 2 號的斷層段走向接

近東西向，編號為 3 的斷層段又與編號 1 近乎平行；假設 2007 年班孟地震的震央在 2 號斷層段，並在 2 與 3 號斷層段僅有很小的 0.01 公尺與 0.02 公尺，而這兩個斷層的鎖定深度、寬度皆與編號 1 相同，且滑移方式皆為純左移，則模擬出的震後的庫倫應力變化結果，編號 1 與 3 的斷層面庫倫應力都降低了，但編號 2 的斷層面上的庫倫應力卻提升了  $2 \times 10^{-5}$  bar(見圖 4.7)。由於班孟地震所觀測到的餘震，大多數皆發生在 2 號斷層段的沿線，因此這樣的結果暗示餘震分布可能與震後庫倫應力上升的斷層段位置有關。最後，1 號斷層段東邊端點應力的上升，可能代表該處未來發生大地震的機率增加。

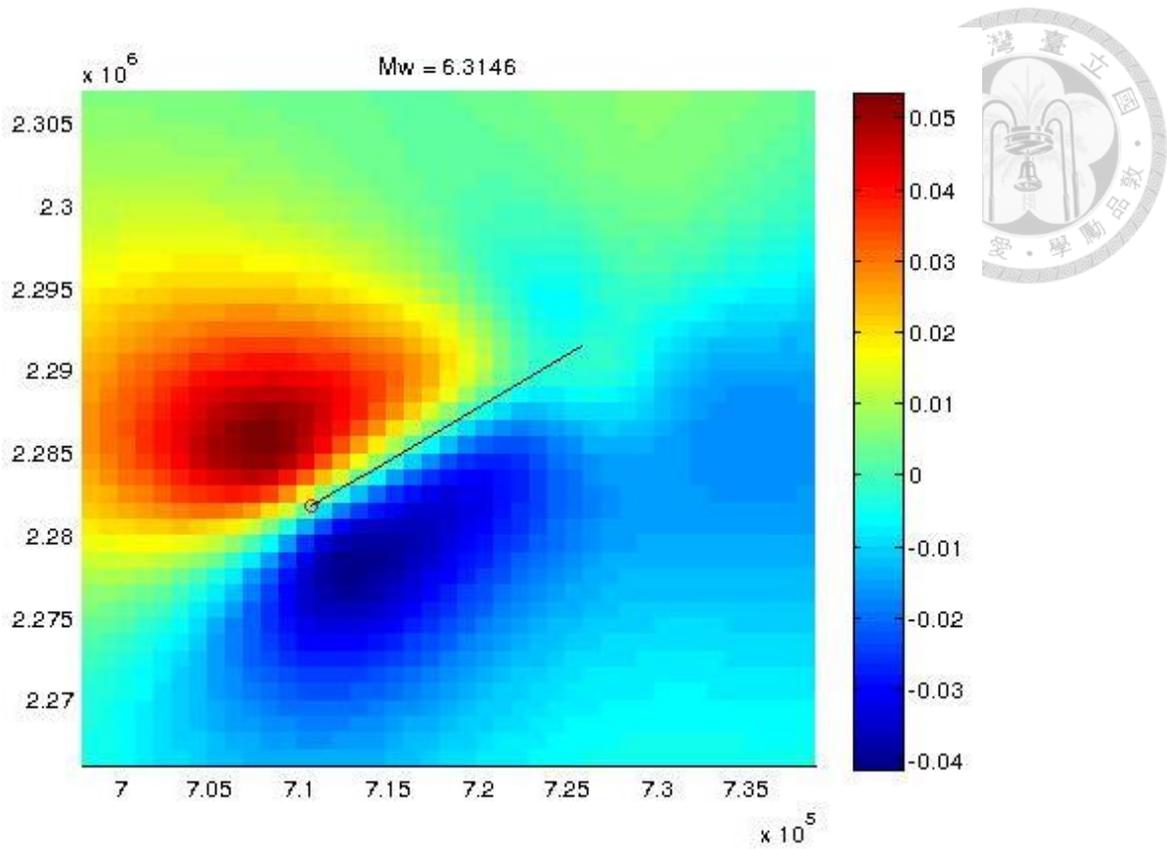
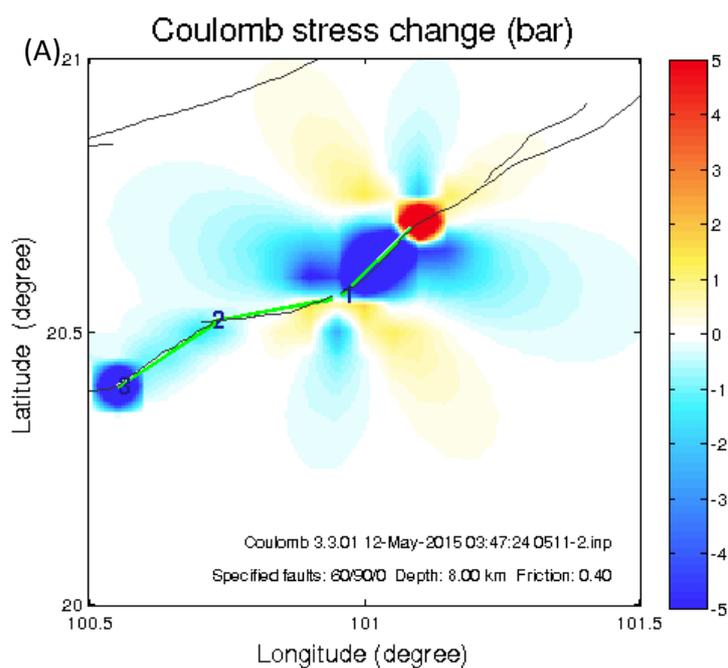


圖 4.6 2007 年班孟地震的 Okada 斷層錯位模型

在衛星視線方向由斷層錯位模型正推的地表變形，單位為公尺。此斷層的斷塊同圖 4.1 的 1 號斷塊。



(B)

Coulomb stress change for specified rake 0 deg. (bar)

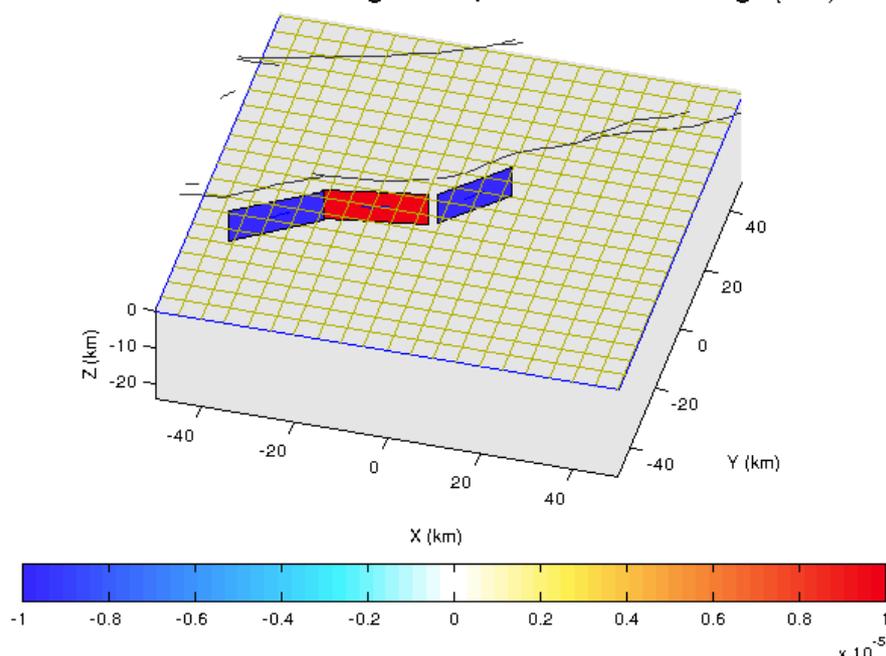


圖 4.7 2007 年班孟地震震後的庫倫應力轉移模型

(A)庫倫應力轉移模型在深度為 8 公里的應力變化。(B)湄善斷層編號 1 號、2 號和 3 號斷塊在 2007 年班孟地震後的庫倫應力變化情形，2 號斷塊應力上升。

表 4.4 2007 年班孟地震的 Okada 斷層錯位正推模型輸入參數

參數內容	Matlab 程式碼參數名稱	值
衛星視角(look angle)	look_ang	38 度
剪力模數 G(shear modulus)	Gshear	33 GP
柏松比(Poisson's ratio)	nu	0.25
斷層傾角	theta	89
斷層寬度	W	8 公里
斷層鉛直方向滑移量	slip	0
斷層水平方向滑移量	Slip2	0.7 公里(左移)
斷層鎖定深度	dtop	4 公里
斷層長度	len	18 公里
斷層走向	strike	北偏西 54 度

## 第五章 討論



本研究觀察 2007 年班孟地震以及其餘震分布，以模型假設的方式探討主震與餘震的關係，並企圖以遙測資料分析主震的地表變形，回推其地下構造概況，並以推得的地下構造以及震後應力分配的變化，討論主震與餘震的關係。在輔助資訊匱乏的情況下，仍有一些議題無法驗證而得到定論，列舉如下：

### 5.1 解析能力之疑慮

本研究解析出來的同震地表變形在 LOS 方向的變量為 5 cm，也就是說此地震造成斷層兩側的滑移量差值最大約為 10 公分。本文在第三章討論過合成孔徑雷達干涉資料的解析能力，其極限大約為半個波長長度，對於波長為 23 公分的 L-band 合成孔徑雷達，本地震的地表變形量勉強在解析能力的極限邊緣，加上沒有其他地表觀測資料輔助，可能無法解決本研究資料在可信度上的爭議。然而，在兩幅不同日期的同震影像對中，該位置的訊號量值同調性高，在過濾雜訊後訊號仍保留，且由該訊號所推演的斷層錯位模型結果能確實符合地震所釋放的能量大小，並能以其庫倫應力轉移結果解釋主震後的餘震分布情形，故本研究認為 2007 年班孟地震的同震變形應是可以由 L-band 的合成孔徑雷達影像解析出來的。

### 5.2 與前人文獻研究之比較異同

即使是分析同樣的影像對、使用同樣的地震定位結果，本研究與該區域唯一的前人研究——芹澤伸龍(2012)的研究結果卻有些微的不同(圖 5.1)。芹澤伸龍(2012)觀察到同震變形發生的位置在圖 5.1 右幅的紅框內，而形變量是在+5.9 公分至-5.9 公分之間，但其推演出來的斷層模型之位移量卻是在 5 公尺的尺度(圖 2.6)；造成本研究與其分析結果不同的原因可能包括以下：



### A. 系統差異

本研究的合成孔徑雷達影像是在 GMTSAR 平台上分析，而芹澤伸龍(2012)的分析平台則是 roi\_Pac。雖然 GMTSAR 從干涉到濾波的步驟皆編譯自 roi\_Pac 的程式碼，但到了相位解算的步驟，GMTSAR 預設只能使用 snaphu 作為解算工具，而這很可能就是造成相位解算結果不同的主要原因。雖然分析結果顯示其地表變形的範圍應在同一級數，皆在數十毫米之間，但圖 5.1 中可明顯看到，本研究認為是主要地表變形的位址，於芹澤伸龍的分析結果中並不像是斷層訊號。解算的差異直接影響到下一步的影像判讀。

### B. 對地震定位的採信程度

芹澤伸龍於其分析中，首先假設全球地震定位結果可信，並為主要地表變形發生在 USGS 所定之震央附近，然而本研究對於缺乏近站資料所進行的地震定位並不全然採信。本研究相信由 Global CMT catalogue 斷層機制解所代表的剪力波方向可以指示斷層破裂面的位態，並根據此破裂面位態找出合理的斷塊位置以進行進一步的庫倫應力分析。儘管芹澤伸龍亦採用 Global CMT catalogue 震源機制解，解釋 2007 年班孟地震為一東北—西南走向的左移斷層與其共軛西北—東南走向的右移斷層錯動所引發，但其描繪的這組共軛斷層並不符合前人在此處以構造地形學方法所勾勒的湄善斷層之斷層跡位置(圖 5.1)。

### C. 資料本身的限制與不足

本研究與芹澤伸龍(2012)唯一與地表相關的觀測資料即是 ALOS 合成孔徑雷達衛星影像，因此影像本身的解析能力就限制了研究的精確程度。2007/2/17-2007/7/5 的時間基線為 138 天，空間基線長為 318.61 公尺；2007/2/17-2007/8/20 的時間基線長為 184 天，空間基線長為 403.89 公尺。一般而言，InSAR 對地表監測的應用仰賴大地水準測量資料來校正，如由空間基線貢

獻的失相關通常可以由地表控制點(Groud Control Points, GCPS)來移除，擁有 GPS 監測資料或其他相反行進方向的 InSAR 影像等，都能用來提升影像的解析能力。



### 5.3 庫倫應力上升區域所代表的意義

#### 5.3.1 2007 年群震

走滑斷層因最大與最小應力軸皆幾乎在水平面上，因此地震過後應力的轉移，相較於正斷層系統或逆斷層系統，更容易在地圖上直接觀察或分析。在世界上的許多大型剪切帶如加州 San Andreas fault(Stein, 1994)、安納托利亞斷層(Anatolian fault)(Stein et al., 1997)，其歷史所記錄的大地震似乎有隨著時間推移而沿著斷層向某個方向推進發生的現象，就像書架上的書本依序傾倒一般，因此以地震後庫倫應力轉移來解釋之。庫倫應力上升處，地震活動度通常會上升，也意味著有下一起大地震發生的風險。在本研究中，本研究分析結果指向 2007 年 5 月至 6 月發生在湄善斷層上的餘震可能是自 2007 年班孟地震向西傳遞庫倫應力所觸發的，也許因為在該斷層段上應力無法累積，使得這些應變能隨著小型地震釋放。

#### 5.3.2 未來地震災害警示區域

本研究的庫倫應力模型結果顯示，1 號斷層段東側在 2007 年班孟地震後，應力明顯上升了 5 bar(圖 4.7)，但餘震並未在此區域分布，很有可能指示未來還會發生較其他餘震規模還大的地震，值得持續關注。若欲更進一步探討該區域的地震潛勢，建議可藉由在斷層沿線進行槽溝挖掘尋找古地震紀錄，以得到湄善斷層的地震周期，對後續的都市規劃、潛在災害防治亦意義重大。

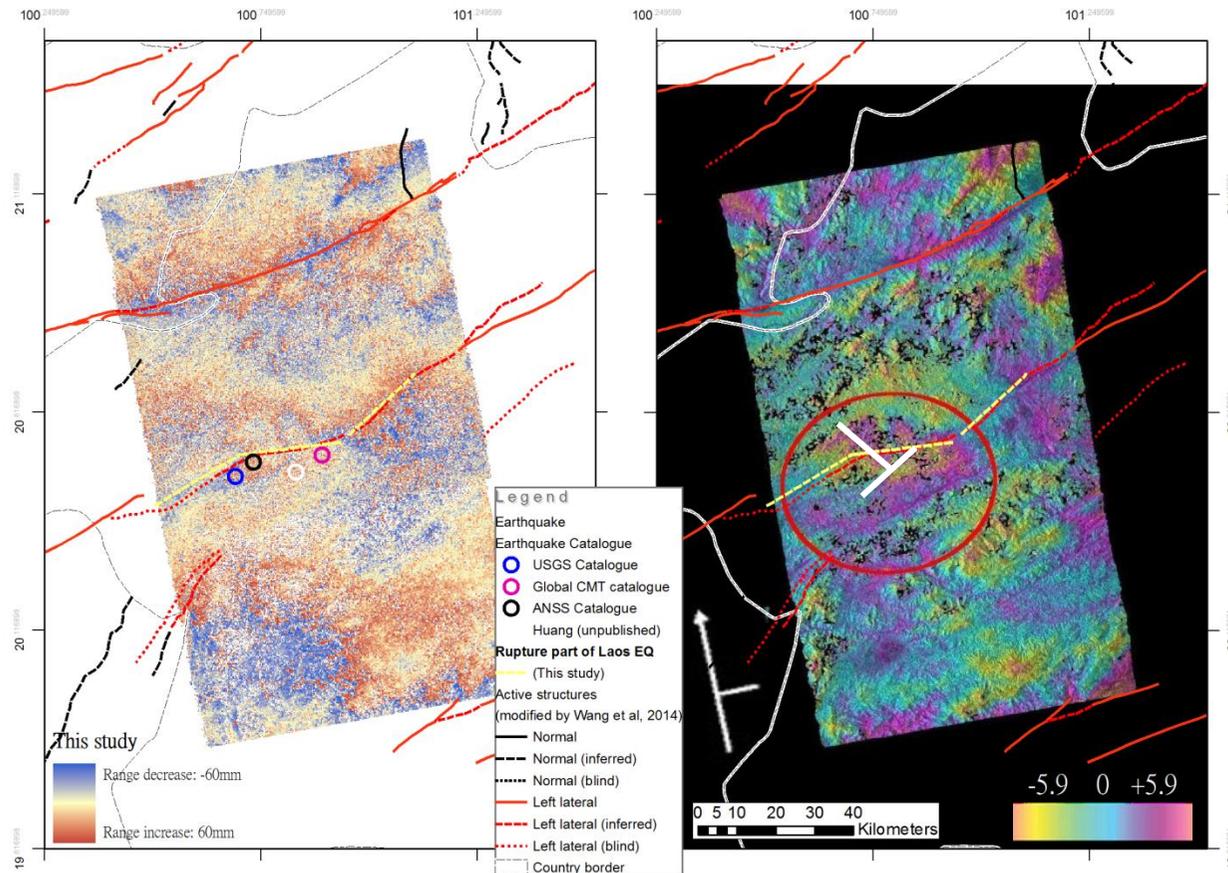


圖 5.1 本研究與芹澤伸龍(2012)2007/2/17-2007/7/5 的干涉結果比較

左圖為本研究在 GMTSAR 平台上分析同震干涉影像結果；右圖為芹澤伸龍(2012)以 ROI\_Pac 分析同一筆資料的結果，單位為公分，白色線段為芹澤伸龍正推之 2007 班孟地震斷層面解。

## 第六章 結論



今日的寮國北部活動構造相關研究概況可簡述如下：該區域無地震測站，無大地水準監測資料，雖有由 Wang(2014)等人依構造地形原理及全球地震資料整理出寮國北部的活動斷層分布圖，但這些構造的活動情形、滑移速率或歷史地震等還未有任何進一步的研究，因此寮國北部究竟處於怎樣的地震災害風險之中，無人知曉。在地質相關測站尚未布置的該區域也難以著手進行研究。

然而，自 2007 年以來，寮國北部以及其鄰近區域的地震活動相當頻繁，於 2007 年 5 月 16 日、2011 年 3 月 24 日與 2014 年 5 月 5 日，分別在寮國、緬甸和泰國都發生了規模大於 6 的地震。另外，中國雲南以及越南的地震測站也觀察到寮國與緬甸於 2007 年有兩簇群震，其中集中在五月至六月群震就發生在寮國北部(圖 4.2)，且又可能與 5 月 16 日發生的  $M_w$  6.3 之班孟地震有關連。這些由中國及越南地震測站所得到的定位解析度僅達 0.01 度，儘管十分粗略，仍不難看出班孟地震與群震的分布都在前人(Rymer et al., 1997; Wood, 2001)所定義的左剪型湄善斷層上，由全球地震網 USGS、Global CMT 與 ANSS 對 5 月 16 日地震的定位結果亦如是(圖 2.1)。湄善斷層因有延伸至泰國，其位於泰國的斷層段已有許多研究證明其確實為活動斷層(Wood, 2001)，並有研究顯示該段若錯動，最大可能產生規模 7.4 的地震(Fenton, 2003)。2007 年一系列在寮國境內的地震證明湄善斷層在此區域亦十分活躍。

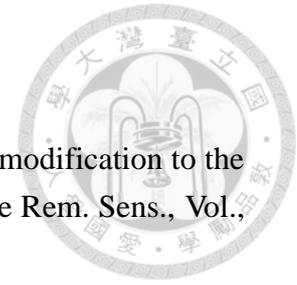
地震矩規模 6.3 的地震，應可產生可觀察到的地表變形。唯一可能記錄到該地震的地表變形者為 2007 年有航經寮國，裝載合成孔徑雷達的 ALOS PALSAR 1.0 L-band 衛星。本研究即分析該衛星影像，以差分干涉法製作 2007/2/17-7/5 與 2007/2/17-8/20 兩幅同震干涉影像對。分析結果指出，震央所在之斷層段應只有極小的滑移量，主要的同震地表變形應位在諸多地震定位結果東邊的斷層段上，

其量值在衛星視線方向約為 5cm。本研究接著以 Okada 彈性半空間錯位模型，在合理的參數設定範圍內，以正推的方式模擬出該地表變形對應的地下斷層滑移模型。結果顯示 2007 年 5 月 16 日班孟地震的主要同震變形可由長 18 公里、寬約 8 公里，平均錯動量為 0.7 公尺的左剪斷層破裂所模擬出來，由模型計算的地震矩規模為 6.31，與全球地震網的觀測值相當；而震央所在之斷層段，可能最多僅具有 0.01 公尺的平均滑移量而已。

本研究根據斷層錯位模型來計算震後的庫倫應力變化，發現餘震集中的斷層段，確實在震後應力有提升了  $10^{-5}$  bar。在同震變形發生的主要區域，庫倫應力計算結果在震後下降了，可能可以解釋為何該處並非餘震集中之處。而在主要同震變形的東側，震後庫倫應力大幅上升，卻未觀察到地震活動，可能代表該區域未來發生較大地震的風險增加，值得進一步地投入地震研究。

雖然本研究可用的資料十分稀少，解析度也幾乎在爭議的邊緣，但在合成孔徑雷達影像無法得到任何校正的情況下，仍能以正演模型來找出地表變形的合理訊號，顯示遙測方法在低度開發的區域對於觀測大地震的地表變形是有效率且有應用價值的研究方式。

## 參考資料



Baran, I., M. Stewart, B. Kampes, Z. Perski, and P. Lilly, (2003) A modification to the Goldsetin Radar interferogram filter., *IEEE Trans. Geoscience Rem. Sens.*, Vol., 41, No. 9, pp. 2114-2118.

Chen C. W. and H. A. Zebker, Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 17, pp. 401-414 (2000).

Chen C. W. and H. A. Zebker., 2000, Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 17, pp. 401-414.

Freed, A. M., 2005, Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer, *Annu. Rev. Earth Planet*, doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122505

G. C. P. King and S. G. Wesnousky, 2007, Scaling of Fault Parameters for Continental Strike-Slip Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 6, pp. –, December 2007, doi: 10.1785/0120070048

Goldstein, R. M. and C. L. Werner, (1997) “Radar ice motion interferometry,” in *Proc. 3rd ERS Symp.*, vol. 2, Florence, Italy, 1997, pp. 969–972.

Harris, R. A., J. F. Dolan, R. Hartleb, S. M. Day, 2002, The 1999 Izmit, Turkey, Earthquake: A 3D Dynamic Stress Transfer Model of Intraearthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 1, pp. 245–255

Hinthing, C. 1995, The study of active faults in Thailand, *Technical Conference on the Progression and Vision of Mineral Resources Development (Department of Mineral resources)*, pp. 129-140

Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W., 1987, *Remote Sensing and Image Interpretation*, Sec. Ed., John Wiley and Sons, Inc.: Toronto.

Lin, C. H., 2010, A Large Mw 6.0 Aftershock of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Triggered by Shear Waves Reflected from the Earth's Core, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 5B, pp. 2858–2865, November 2010, doi: 10.1785/0120090141

Notton, C., 1926 *Analles du Siam, Chronique de Sinhanavati* [Siam annals, Sinhanvati

chronicle]: Paris, Imprimerieis Char

Polachan, S, Pradidtan, S., Tongtaiw, C., Janmaha, S., Intarawijitr, K. and Sansuwan, C. 1991, Development of Cenozoic Basins in Thailand. *Mar. Petrol. Geol.*, 8: pp. 84-97

Rymer, M. J., R. J. Weldon II, C. S. Prentice, S. Koswan, A. Lumjuan and N. Muangnoicharoen (1997), Tectonic setting and late Quaternary activity along the Mae Chan fault, Northern Thailand and Western Laos, *Geol. Soc. Am., Abstracts with Programs*, 29, pp. 229-230

Sanders, C. O, 1990, Earthquake Depths and the Relation to Strain Accumulation and Stress Near Strike-Slip Faults in Southern California, *Journal of Geophysical research*, VOL. 95, NO. B4, pp.4751-4762, April 10, 1990

Simons, W.J., F. Soquet, A. Ambrosius, B.A.C., Matheussen, S.J., Vigny, C, Haji Abu, S., Promthong, C., Subarya, C., Sarsito, D., Morgan, P and Spakman, W., 2007, A decade of GPS in South-east Asia: resolving Sundaland motion and boundaries. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 112(B06420), pp.1-20

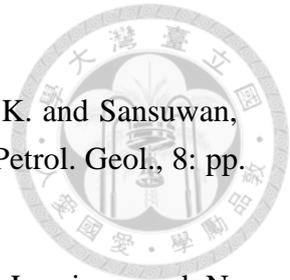
Wang Y., Y.N. Lin, M. Simons, and S. T. Tun., 2014, Shallow rupture of the 2011 Tarlay earthquake (Mw 6.8), Eastern Myanmar, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, First doi:.1785/0120120364

Wells, D. L. and L. J. Coppersmith, New Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, 1994, *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 84, No. 4, pp.974-1002

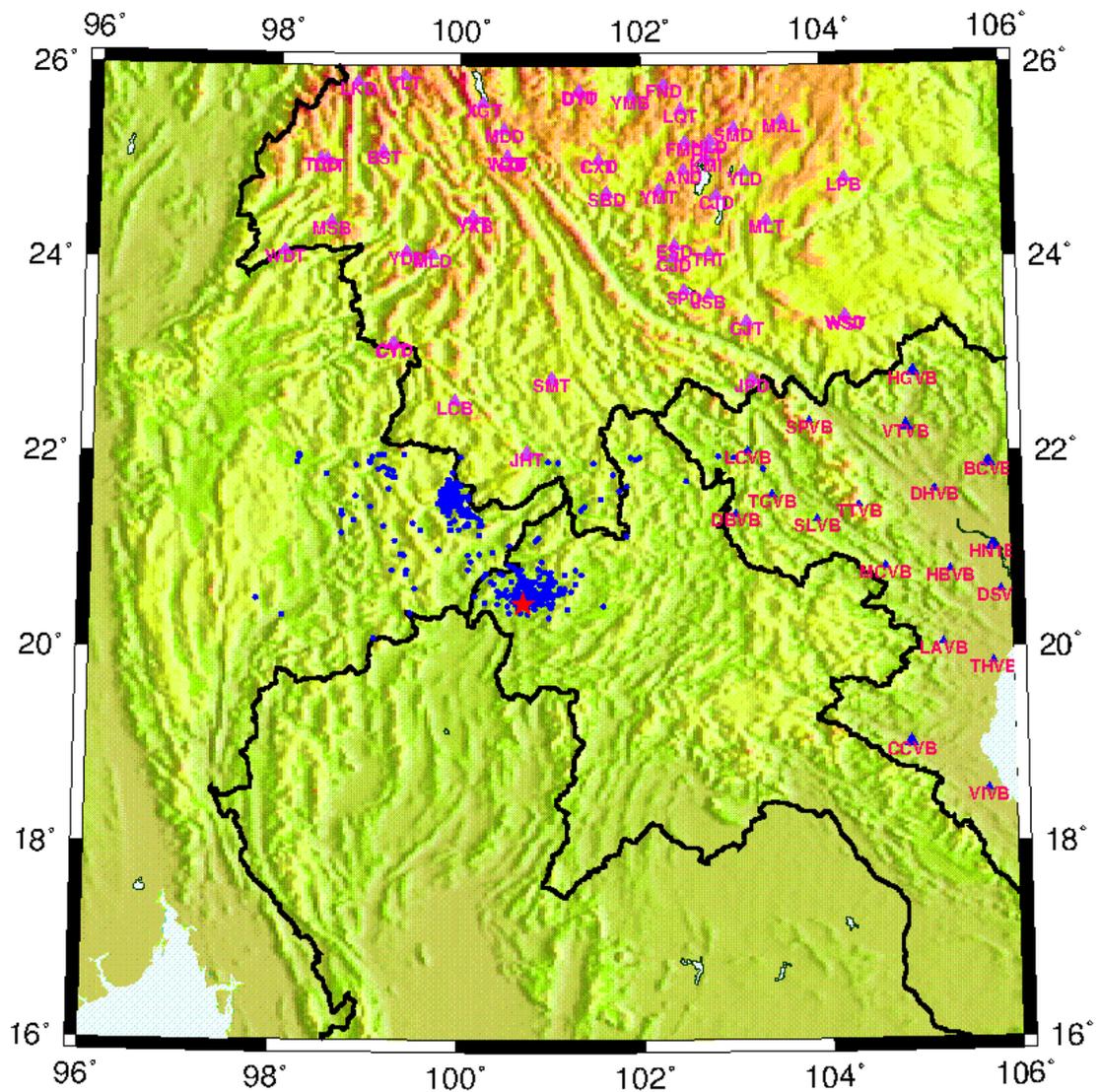
Wood, S. H., 2001, Slip-rate estimate from offset streams, valley volume, and denudation rate: Mae Chan fault, Northern Thailand, *Eos, Trans. Am. Geophysics. Un.*, pp. 82-932

Zhou, X , N.B. Chang, S. Li, 2009, Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research, *Sensors*, 2009, 9, pp. 1876-1912; doi:10.3390/s90301876

芹澤伸龍, 2012, Co-seismic deformation of the two earth-quakes at Laos (May 2007, Mw6.3) and Yun-nan (Jun 2007, Mw6.1), 北海道大學自然史科學系 碩士論文



附錄一、中國雲南地震觀測局及越南地震局的測站位置圖(測站座標見附錄二)



附錄二、未發表地震資料之地震站位置座標(地理位置見附錄一)

越南地震局			中國雲南地震觀測網		
測站代號	經度	緯度	測站代號	經度	緯度
HGVB	104.977	22.827	DHV	21.62683	105.1838
CBVB	106.198	22.633	DSV	20.5855	105.8873
TIYB	107.401	21.336	BGV	21.29017	106.2275
CCVB	104.881	19.036	HBV	20.79617	105.3387
VTVB	104.886	22.27	LCV	22.03867	103.1543
BCVB	105.778	21.884	LAV	20.05317	105.2475
LSVB	106.753	21.855	MCV	20.84417	104.6355
HN1B	105.805	21.025	SLV	21.33383	103.905
HCMB	107	11	THV	19.85083	105.782
			TTV	21.47267	104.361
			TGV	21.58983	103.4182
			PLV	20.806	106.6302
			DBV	21.38967	103.0183
			SPV	22.33833	103.8352
			VIV	18.548	105.7