

雷達衛星影像輔助林地災害偵測之研究

Research on Radar Satellite Images Assisted for Disaster Detection in Forest Land

主管單位：行政院農業委員會林務局農林航空測量所

邱俊穎¹

胡植慶¹

謝嘉聲²

Chiu, Chun-Ying¹

Hu, Jyr-Ching¹

Hsieh, Chia-Shen²

¹ 國立臺灣大學地質科學系

² 國立高雄科技大學土木工程系

摘要

本計畫蒐集並整理目前常用的雷達衛星資訊，就其波長、解析度、穿透特性、偏極特性、再訪週期、影像取得、費用等，評估其於不同災害所需的影像，並對颱風豪雨後之洪水溢淹、堰塞湖與崩塌地，進行分析方法及自動判釋可行性之研究，同時亦探討多時期雷達影像對分析的影響，並將研究成果建置一套較為自動化的處理流程，以利防災應變的應用。

結果顯示，洪水溢淹或堰塞湖的地點及範圍可由雷達背向散射係數的差異進行分析與判釋，在影像偏極特性的選擇上，平行極化(HH 與 VV)會比交叉極化(VH 與 HV)有更好的分析結果；崩塌地區的偵測，則以雷達植被指數 RVI 作進一步背向散射係數差異法分析，面積大於 0.06 平方公里的崩塌地有 90%能正確辨識，而面積小於 0.016 平方公里的崩塌地則有 90%判釋失敗，顯示雷達衛星影像對於大型崩塌地有比較好的辨識能力，卻無法解析較小的崩塌地；多時期濾波處理可以在保留原有影像解析力的情況下進行斑駁雜訊的濾除；多時期變遷偵測可以使用單一極化影像進行崩塌地偵測分析，相較於使用雷達植被指標 RVI 需要兩種極化影像，限制性較少；多時期變遷分析雖然有能力對林地火災跡地進行辨識，但農地栽種、灌溉、低植被灌木生長與地形差異等現象所造成的雷達訊號變異，會造成辨識的困難，降低辨識的精確性；偏移偵測法的結果顯示相當大的變形量與低相關性所發生的區域，可以指示崩塌地發生的概略位置。

為解決實際操作複雜性，計畫並建構以腳本操作來串接不同軟體的淹水與崩塌地緊急災害偵測標準流程，只需輸入事件前與事件後影像的檔名，處理的結果可產生由特定色系突顯可能災害區域的變遷偵測影像，影像帶有坐標系統，可匯入 GIS 軟體與相關地理資訊套疊，做為緊急應變的依據。

關鍵詞：遙測、合成孔徑雷達、淹水、崩塌地

Abstract

This project provides the information of radar images in terms of wavelength, spatial resolution, transmittance, polarization, revisit time, images sources, and purchase prices to facilitate the image processing and the feasibility in respond to different natural hazards induced by typhoon and heavy rainfall. Through the above-mentioned characteristics in radar images, the current project also attempts to build a series of processing methods and test their availabilities for flood area, landslide dammed lake and potential landslide zone. And we attempt to study the ability of multi-temporal radar images in detection of natural hazards after the typhoon and heavy rainfall. We also attempt to establish an automated platform for processing of radar images for quick response of governmental agency for detection of natural hazards.

The range and location of flood area and landslide dammed lake could be determined by calculating the difference of radar backscatter coefficients in the current project. In the application, parallel polarization (HH or VV) would lead clearer consequence than cross polarization (HV or VH). The range and location of landslide area could be determined by Backscattering Coefficient Difference algorithm with Radar Vegetation Index (RVI) and the analysis of HV polarimetric image as indexes in first stage. Among the detected landslide area, there were 90% of correct-discerned area are larger than 0.06 km², and 90% of wrong-discerned area are smaller than 0.016 km². This information indicates that the radar image represents better discernment for wide ranging landslide.

The preliminary study of multi-temporal radar images suggests that the multi-temporal filtering could keep the spatial resolution to remove the speckle signals. In addition, the single polarized radar images could be used for the detection of the landslide area, which is much more feasible than the method of radar vegetation index (RVI) using two polarized radar images. Although the multi-temporal radar analysis could detect the forest fire area, however the cultivation, irrigation, lower dense of bush and difference of topography could change the backscatter of radar signals and reduce the ability for accurate detection. The pixel offset tracking could detect the landslide area with large displacement and low coherence area, which can approximately indicate the landslide. However, the predicted landslide area is much larger than the actual landslide area.

To resolve the operational difficulty and complexity for hazard detection, we already establish a standard flowchart by different scripts using in corresponding software for quick response in flood detection and landslide detection. The pre-event and post-event files are required to reproduce a specific color tuned hazard area image from change detection. This image has coordinate system that display with other geographic data in GIS software. It can be used for decision making of quick response after a hazardous event.

Keywords : Remote Sensing, SAR, Inundation, landslide

一、前言

崩塌地治理為林地管理中重要的一環，除長期進行復育與監測外，如何在重大天然災害之後，在最短時間內，偵測出崩塌地位置及範圍，同時提升其偵測之效能與廣度，提供政府部門應急反應之參考，則為研究之主要方向。遙測影像已為現今各類天然災害發生後，取得災情資訊之重要工具之一，惟光學影像受雲層阻擋，常無法取得地面影像。幸而目前已有許多國家發展雷達衛星，可較不受天候之影響，取得偵測分析所需之雷達影像。

單一衛星受限於固定的繞行軌道與到訪週期，常無法於災後即時取得偵測分析之影像，若能再發展多時期雷達影像林地災害偵測相關分析模式，除能建置光學影像以外之災害偵測能量外，結合既有光學衛星群，形成多元感測器之災害偵測模式，其效果將可等同縮短同地點之再訪週期，進而提升災害資訊蒐集之應變效能。

雷達因設計方式不同，而有不同波長、偏極、再訪週期、軌道等，因此必須因應使用目的差異，選用不同感測器之產品，而目前國際間可選用之雷達影像類別繁多，如欲應用於林地災害偵測，仍應根據不同的災害類型，評估適用之產品類型。又雷達影像之分析處理極其專業，所需技術與分析人才非一般政府機關所能自行建置，惟為災害應變仍有加速災情資訊蒐集之需求，故有依所需災情資訊取得目的，建置較為一般化之處理流程之需求，以快速處理國際上因應地區災害所提供之交流圖資。此外，為盡可能發揮雷達影像之功能，需能取得更原始之影像產品並具備初期處理之量能，所需功能非一般商業影像分析軟體所能提供，而現已有多套開源軟體為此類影像（SNAP、GMTSAR、ISCE…等）提供所需處理模組，並能透過網際網路取得相關支援，如能適當運用，應能減省相當之採購與維護費用。本研究即以洪水溢淹、堰塞湖、崩塌地等林地常見災害，進行雷達衛星影像種類資訊之蒐集、分析與功能評估，以及研究使用多時期雷達影像對效益提升之可行性，嘗試建立適合之判讀準則，並建立以開源軟體為主之雷達衛星影像林地災害偵測流程，以利林地災害快速應變之資訊提供。

二、各類雷達衛星影像種類資訊之蒐集、分析與功能評估

藉由蒐集並整理目前常用的雷達衛星資訊(表 1)，就其波長、解析度、穿透特性、偏極特性、再訪週期等，評估其於不同災害所需之影像處理及可行性，如堰塞湖、溢淹、崩塌地等分析判釋。考慮水氣的穿透特性、水面起伏的粗糙度、地物偏極特性與分析所需的影像等級，在颱風豪雨後洪水溢淹、堰塞湖的偵測中，建議以長波長的 L 波段優先，C 波段與 X 波段次之；在偏極特性的選擇上，以平行極化（HH, VV）優先，交叉極化（VH, HV）次之；影像處理等級的選擇上，由於分析上並不需要相位資訊，可以選擇多觀點振幅影像產品，或正射振幅影像產品。在颱風豪雨後崩塌地的偵測中，受到臺灣山區地形影響，所造成的疊置及陰影區域，會有相當範圍無法進行分析。若崩塌發生視為植被到裸地的變化過程，可使用對體散射特性敏感的 HV 偏極影像或計算雷達植被指標（Radar Vegetation Index, RVI）作為指標，進行變遷分析。

表 1、各種衛載 SAR 感測器規格

| 衛星 | 波長 (cm) | 任務時間(年) | 解析度 (m) | 再訪週期(天) | 像幅寬度(km) | 入射角 (°) | 偏極 |
|--------------------------------------|---------|-----------|---------|---------|----------|---------|---|
| C 波段 | | | | | | | |
| ERS-1/2 | 5.6 | 1991-2011 | 20 | 35 | 100 | 23 | VV |
| Envisat | 5.6 | 2002-2012 | 10-150 | 35 | 100 | 19-44 | HH,VV,HV,VH HH/VV, HH/HV, VV/VH, VH/VV |
| RADARSAT-1 | 5.5 | 1995-2013 | 10-100 | 24 | 45-200 | 20-49 | HH |
| RADARSAT-2 | 5.5 | 2007- | 3-100 | 24 | 10-200 | 20-49 | HH,VV,HV,VH HH/VV, HH/HV, VV/VH, VH/VV, HH/VV/HV/VH |
| Radarsat Constellation Mission(3Sat) | 5.5 | 2018-2026 | 5-20 | 3,12 | 30-350 | 20-55 | HH, VV, HV, VH HH/VV, HH/HV, VV/VH, VH/VV, HH/VV/HV/VH |
| Sentinel-1 (2Sat) | 5.5 | 2014-2026 | 5-100 | 6,12 | 80-400 | 20-47 | VV, HH, VV/VH, HH/HV |
| L 波段 | | | | | | | |
| JERS | 23.5 | 1992-1998 | 18 | 44 | 75 | 35 | HH |
| ALOS/PALSAR | 23.6 | 2006-2011 | 7-88 | 46 | 40-70 | 7.2-60 | HH, VV, HH/VV, VV/VH, HH/HV, VH/VV |
| ALOS-2/PALSAR-2 | 22.9 | 2014-2021 | 3-100 | 14 | 25-490 | 8-70 | HH, VV, VH, HV, HH/HV, VH/VV, HH/HV/VH/VV |
| X 波段 | | | | | | | |
| COSMO-skyMed (4Sat) | 3.1 | 2007- | 1-100 | 2.5-10 | 10-200 | 20-59.5 | HH, VV, HV, VH, HH/VV, HH/HV, VV/VH |
| COSMO-skyMed -2(2Sat) | 3.1 | 2018-2025 | 0.35-40 | - | 3-200 | - | HH, VV, HV, VH, HH/VV, HH/HV, VV/VH, HH/HV/VV/VH |
| TerraSAR-X | 3.1 | 2007-2020 | 0.25-40 | 11 | 4-270 | 15-55 | HH,VV, HH/VV, HH/HV, VV/VH |
| TerraSAR-X2 | 3.1 | 2016-2025 | 0.25-30 | 11 | 10-400 | 20-50 | HH, VV, HV, VH, HH/VV, HH/HV, VV/VH, HH/HV/VV/VH |

2.1 雷達衛星影像於颱風豪雨後洪水溢淹及堰塞湖之偵測研究與試作

颱風豪雨後之洪水溢淹、堰塞湖等災害，採用計算背向散射係數（Backscatter coefficient）的差異作為洪水溢淹或堰塞湖範圍判斷。2015 年曾文水庫梅雨前後水體變化(圖 1)與 2009 年莫拉克颱風於臺東太麻里溪堰塞湖(圖 2)的案例結果顯示，偵測成果有一定程度以上可信度，在防災應變時能提供相當的幫助，但比較大的挑戰在於衛星影像是否能在水體存在的期間進行拍攝，並快速取得影像。

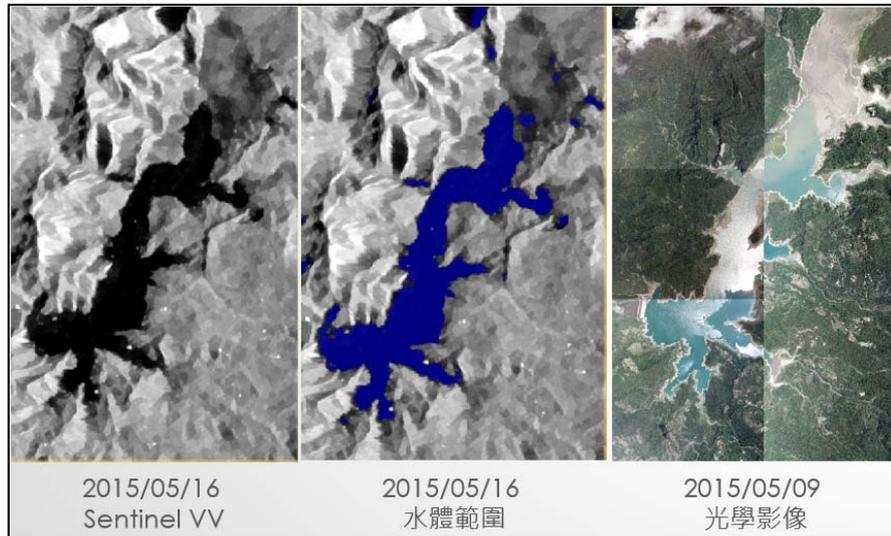


圖 1、2015 年 5 月梅雨前曾文水庫區 Sentinel-1a 雷達影像水體判釋與光學影像之比對

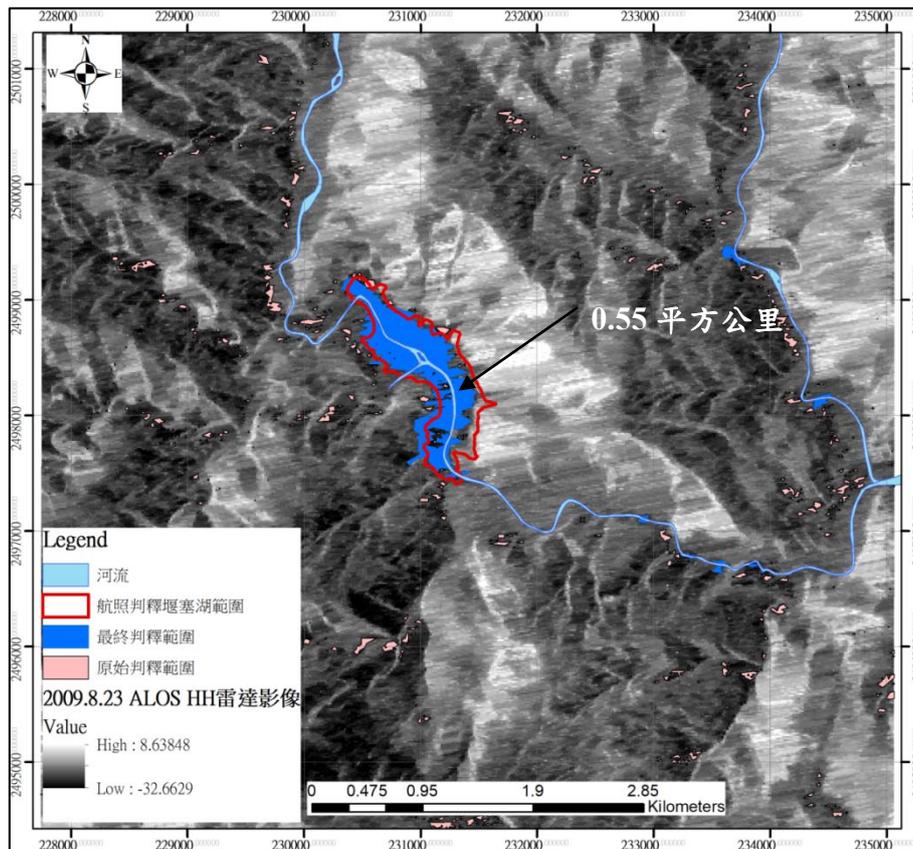


圖 2、2009 年莫拉克颱風於臺東太麻里溪之堰塞湖雷達影像辨識成果

2.2 雷達衛星影像於颱風豪雨後崩塌地之偵測研究與試作

颱風豪雨後之崩塌地偵測，則可由以下三種方式分析：(1)事件前後的 RVI 或 H/alpha 極化分解的亂度指標 (H)，可以估計地物散射特性的變化 (植被->裸地)；(2)利用地物的雷達影像的不同特徵 (不同極化的背向散射、極化分解的參數、RVI 等等)，進行監督式訓練，找出各個類別 (例如：植被、裸地、建物等) 的參數模型，可作為不同時期的類別變異的偵測；(3)利用前後期影像進行背向散射係數差異法與強度相關法之計算，可以作為崩塌地區域的變異偵測。

2009 年莫拉克颱風臺灣西南部崩塌地(圖 3)與 2018 年日本北海道地震崩塌地(圖 4)的分析顯示，相關演算有能力判釋較大面積的崩塌地，崩塌地的面積大於 0.06 平方公里者多數可被偵測到，而許多面積小於 0.016 平方公里的崩塌地則未能被辨識。就目前可取得的影像與分析成果，顯示雷達影像對於大型崩塌地有比較好的辨識能力，卻無法解析較小的崩塌地。

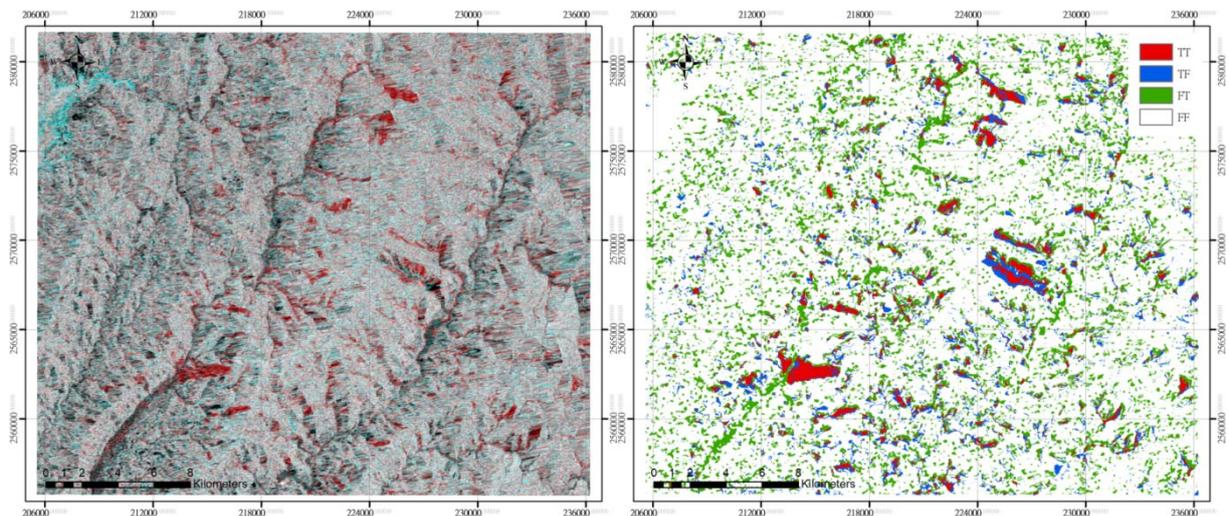


圖 3、ALOS 影像於 2009 莫拉克風災後臺灣西南部崩塌地偵測結果

(TT：實際崩塌地與辨識有崩塌地之區域；TF：實際崩塌地與辨識非崩塌地之區域；
FT：實際非崩塌地與辨識有崩塌地之區域；FF 實際非崩塌地區與辨識非崩塌地之區域)

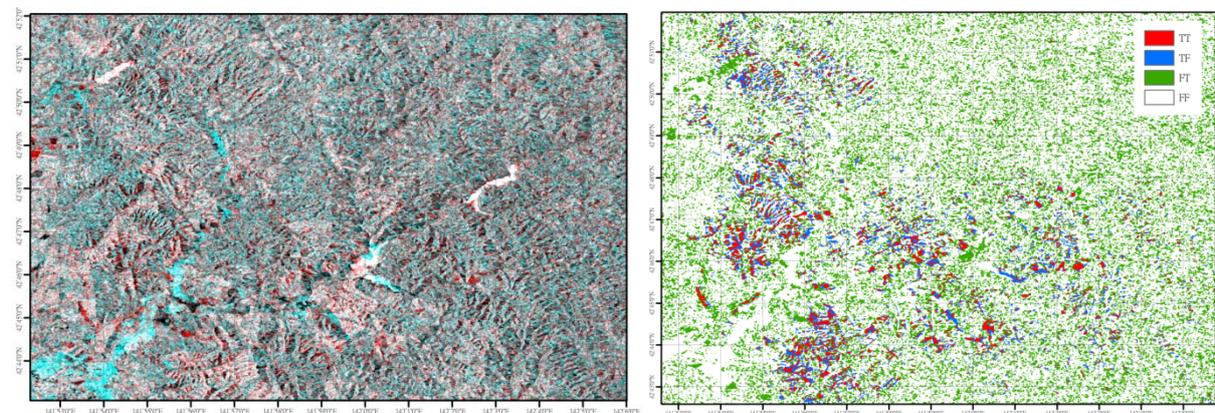


圖 4、Sentinel-1 影像於日本北海道厚真町崩塌地偵測結果

(TT：實際崩塌地與辨識有崩塌地之區域；TF：實際崩塌地與辨識非崩塌地之區域；
FT：實際非崩塌地與辨識有崩塌地之區域；FF 實際非崩塌地區與辨識非崩塌地之區域)

三、多時期雷達影像災害偵測

藉由簡單的災害前後影像指標（例如：背向散射係數或 RVI）差異，已經具備災害偵測的能力，但 [Matsuoka and Yamazaki \(2000\)](#) 指出，簡單的災害前後影像比對法，仍存在一些問題，災後的變遷可能同時存在影像訊號增強與減少，例如建築物在災後變成碎片，造成背向散射係數的增加，特別是在建築物前的雷達陰影區；相反的，海嘯或洪水可能沖走整個建築物，或清除所有建築物的碎片，導致背向散射係數的減少。

利用災害前後多時期影像的干涉同調性（Interferometric Coherence）與強度相關性（Intensity correlation），比單純災害前後影像差異更適合於災害的變遷偵測（[Plank, 2014](#)）。多時期影像的災害偵測最少使用 3 張影像，包括兩張災前短時間內的影像與一張災時（後）的影像。所有影像需要有相同的影像幾何特性（拍攝入射角、波長、軌道、飛行方向、影像模組等）（圖 5、圖 6）

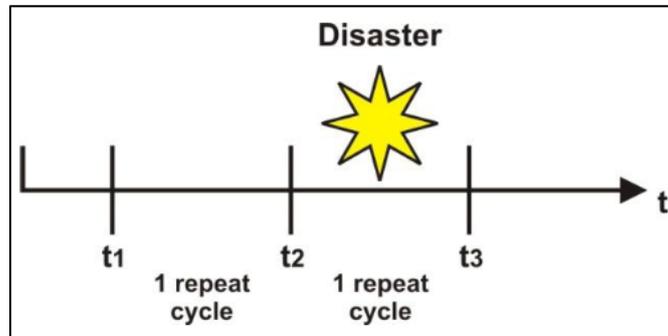


圖 5、以干涉同調性與強度相關性進行災害偵測所需最少 3 張雷達影像（[Plank, 2014](#)）

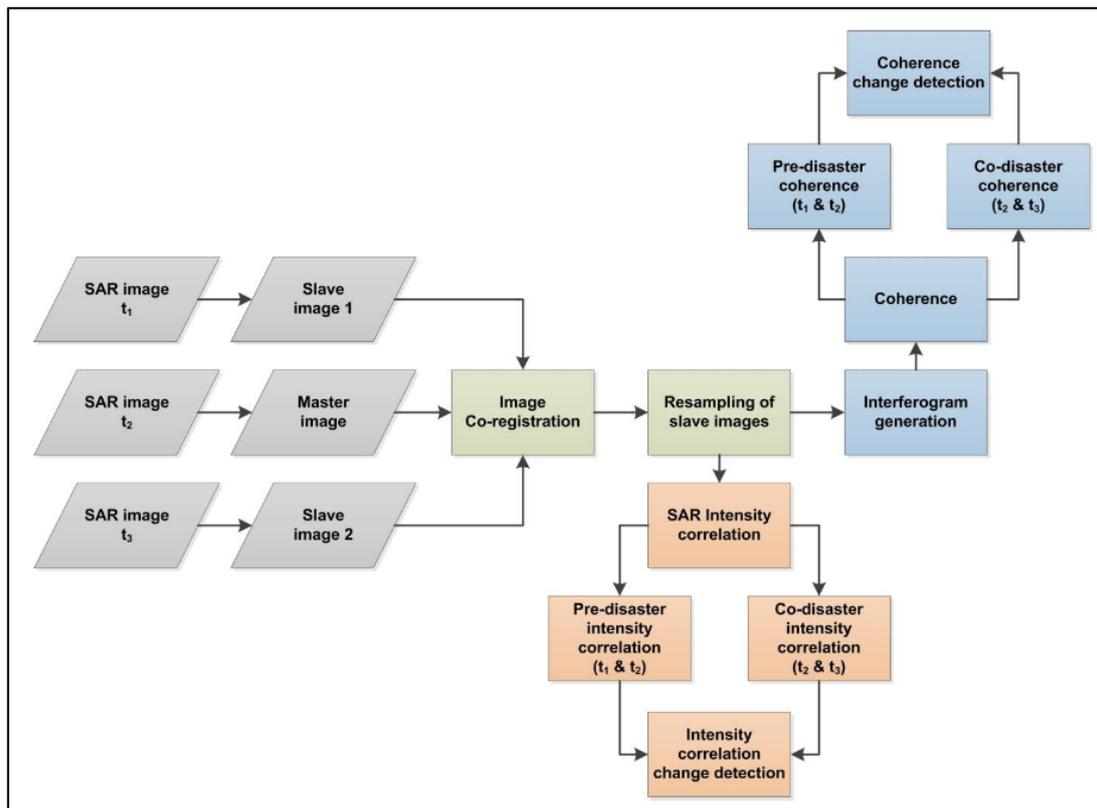


圖 6、多時期雷達影像災害偵測流程圖（[Plank, 2014](#)）

3.1 多時期雷達影像崩塌地偵測

多時期雷達影像崩塌地偵測之研究係以西南部荖濃溪的支流布唐布納斯溪集水區於 2017 年 6 月豪雨事件為研究對象 (圖 7)

該事件前有具有 X 波段 COSMO-SkyMed 的 5 幅降軌影像 (單極化: HH) 與 C 波段 Sentinel-1 的 5 幅降軌影像 (雙極化: VV 與 VH) 可用來分析, COSMO-SkyMed 影像時間依序為: 5/8、5/24、6/1、6/25 和 6/29, Sentinel-1 影像時間依序為: 5/5、5/17、5/29、6/10 和 6/22。以一般雷達影像較好取得的平行極化影像, 測試其偵測效果。使用 X 波段 HH 極化影像與 C 波段的 VV 極化影像作為分析。

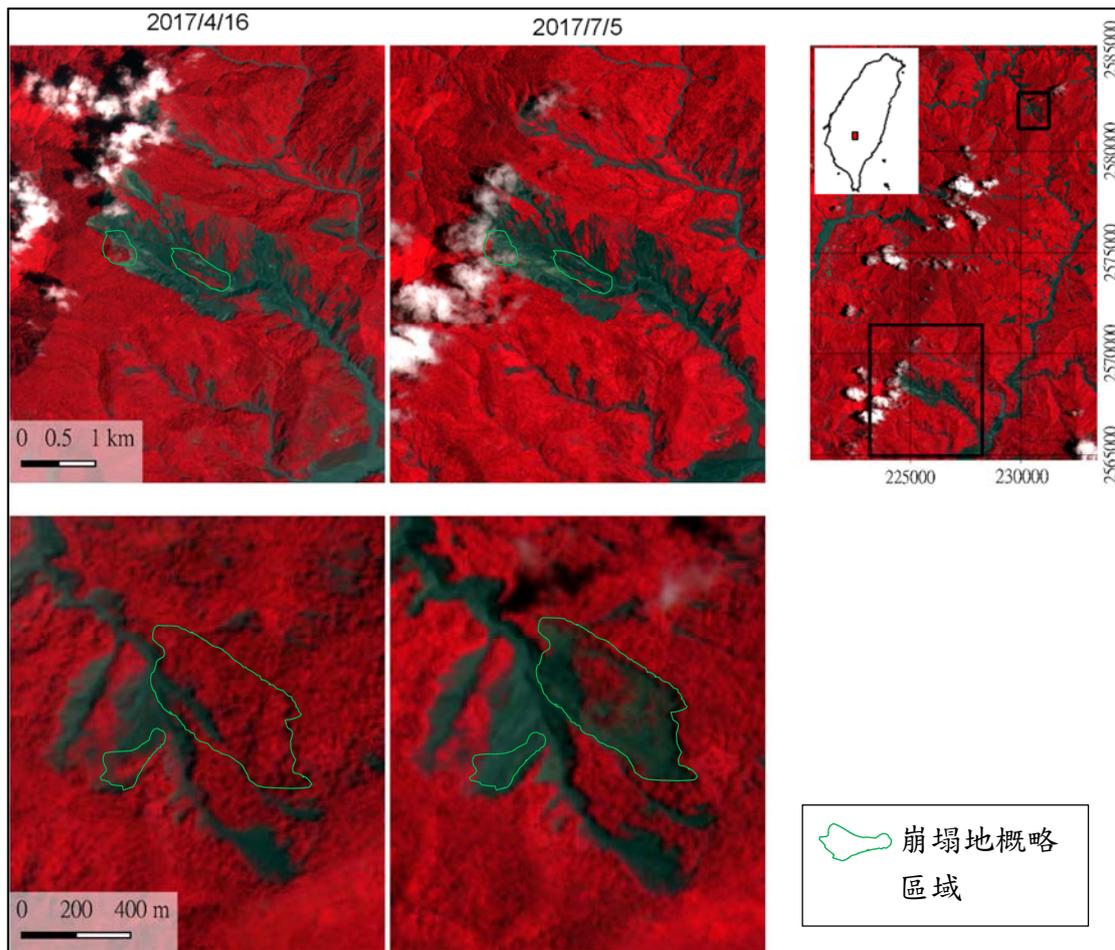


圖 7、布唐布納斯溪集水區於 2017 年 6 月豪雨事件前後之 Sentinel-2 光學衛星假色影像

分析結果 ND 數值大於 2 個標準差 (Sentinel-1: 約 0.05; COSMO-SkyMed: 約 0.07) 的區域大多能與崩塌地的範圍匹配 (圖 8)。該區域主要兩處崩塌地 (圖 7) 不論以 C 波段 Sentinel-1 或 X 波段 COSMO-SkyMed 影像都能以 ND 大於 2 個標準差的門檻所辨識。兩者差異處在於 C 波段 Sentinel-1 所辨識的崩塌地區域有較大的面積, 而解析度約 2 公尺的 X 波段 COSMO-SkyMed 可呈現更細緻崩塌地變異區域。這些區域是由崩塌地改變了地形坡度與地物, 最終在雷達回波上有變異, 可以透過變遷偵測辨識出來。

圖 8 並顯示了一些雷達影像判釋為明顯變異的區域, 在光學影像上是被雲層覆蓋的, 這表示要透過光學影像在山區進行崩塌地判釋的限制性, 而雷達訊號可穿透雲層的特性,

則凸顯了利用雷達影像在崩塌地辨識的優點。

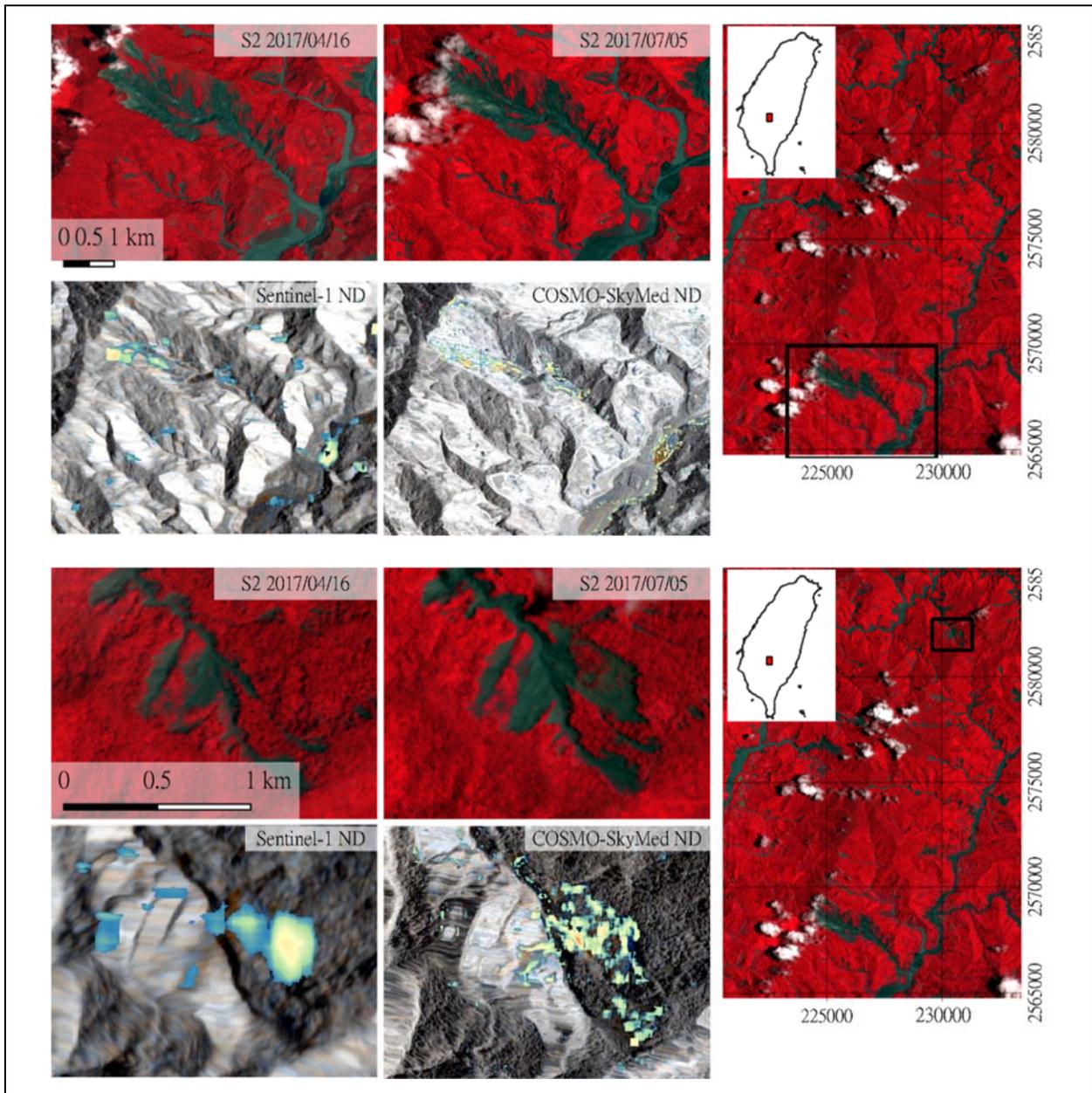


圖 8、以多時期變遷分析偵測 2017 年 6 月豪雨後布唐布納斯溪集水區崩塌地

3.1 多時期雷達影像淹水及堰塞湖偵測

以 2018 年 8 月 23 日豪雨在臺灣西南部淹水的事件，使用 C 波段 Sentinel-1 雷達影像，共取 3 幅升軌影像，影像時間依序為：8 月 2 日、8 月 14 日與 8 月 26 日，根據胡植慶等人 (2018) 的報告，Sentinel-1 在水體辨識使用 VV 極化有較好的結果，因此可選作淹水分析的極化影像。

多時期雷達影像淹水偵測分析研究成果如圖 9 顯示，以多時期變遷分析的 ND 作為淹水區域判釋的指標並不理想。在 2018 年 8 月臺灣西南部豪雨的淹水案例中，ND 數值高的區域只能指示部分有淹水的區域，有許多誤判的區域是事件前後變化大但非淹水的區域，例如圖 9 左上部分當中偏橘紅色的區域，代表 8 月 26 日雷達訊號比 8 月 14 日大

相當多的區域，由於水體會造成較少的雷達反射訊號，因此這些區域應該非淹水造成。

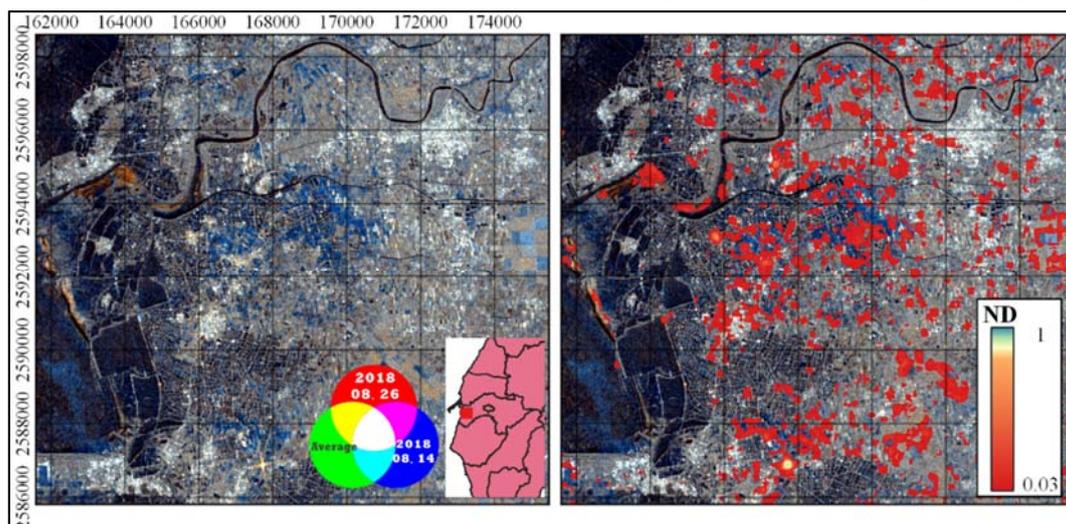


圖 9、以多時期變遷分析偵測 2018 年 8 月臺灣西南部豪雨淹水區域

另以 2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風於臺東太麻里溪堰塞湖的事件，使用 L 波段 ALOS HH 極化影像作為分析，共取 3 幅影像，影像時間依序為：1 月 5 日、7 月 8 日與 8 月 23 日，多時期雷達影像堰塞湖偵測分析研究成果如圖 10 顯示，2009 年 8 月莫拉克颱風臺東堰塞湖的偵測也有 2018 年 8 月臺灣溪南部豪雨淹水案例相同的情況，ND 值較大的區域指涵蓋了部分堰塞湖，但主要堰塞湖的部分卻沒有包括其中。ND 數值較大的區域在主要發生在堰塞湖下游，這些區域從圖 10 左下的 RGB 多時期變遷影像可以得知，推測應為崩塌地堆積物造成雷達的反射訊號增強的結果。

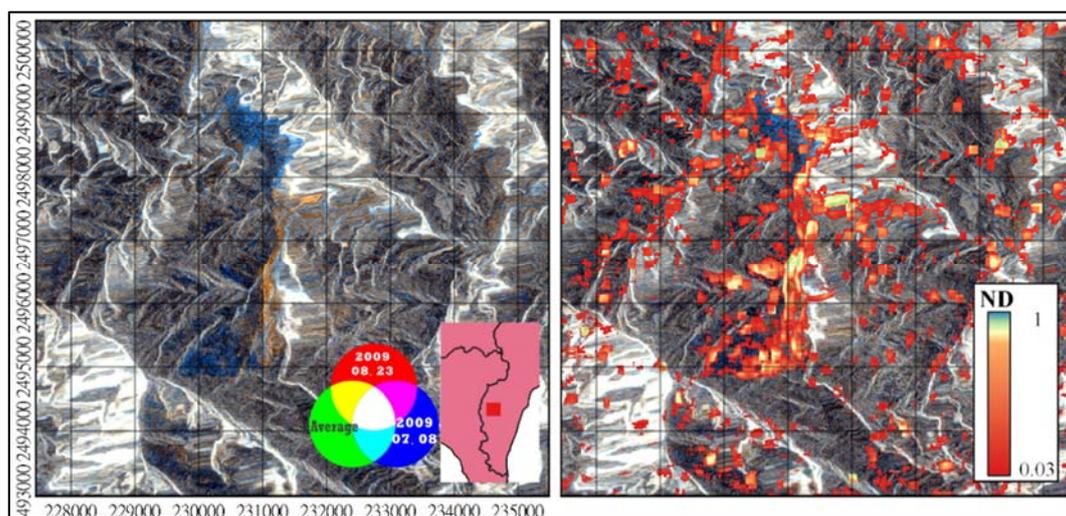


圖 10、以多時期變遷分析偵測 2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風於臺東太麻里溪堰塞湖

目前多時期影像的分析成果並不良好，而且多期影像的分析需要更複雜的計算，將增加災害應變時提供災情資訊的複雜度與時程，在胡植慶等人 (2018) 的研究中顯示 2 張雷達影像之強度差異即可有效的對淹水區域進行偵測，建議在淹水偵測上不須以多時期影像作為分析方法。

四、林地災害之雷達衛星影像分析判讀準則建立

根據胡植慶等人(2018)研究，雷達影像在淹水與崩塌地災害中已具有一定的偵測能力，背向散射係數之差異可作為洪水溢淹的判斷指標(圖 11 左)；具有雙極化的雷達影像，可以使用 RVI 差異可作為快速判釋崩塌地的指標(圖 11 中)；若使用單極化雷達影像，可藉由多時 RGB 影像以特定顏色凸顯變異數值大的區域，作為快速判釋崩塌地的指標(圖 11 右)。故針對不同林地災害類型統整出建議使用衛星影像、指標等(表 2)。

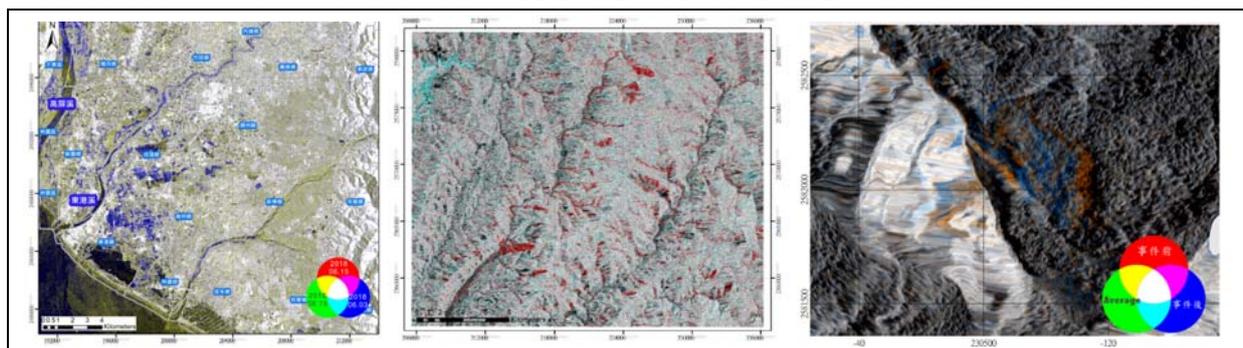


圖 11、雷達衛星影像快速偵測出洪水溢淹、崩塌地等林地災害之成果

表 2、林地災害之雷達衛星影像分析判讀準則

| 災害類型 | 分析方法 | 使用波段 | 建議使用雷達衛星影像 | 使用指標 | 判釋原則 | 使用軟體 |
|-------------|--------------|-------|-----------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|
| 淹水 (無風浪) | 水體區域變化 | L>C>X | Sentinel-1 | HH>VV | 1) 將事件前設為藍色，事件後設為綠色與紅色之 RGB 影像中藍色系之區域。 2) 水體門檻數值約-10 dB | SNAP, GRASS-GIS |
| 淹水 (有風浪) | 水體區域變化 | L>C>X | Sentinel-1 | HV, VH | 1) 將事件前設為藍色，事件後設為綠色與紅色之 RGB 影像中藍色系之區域。 2) 水體門檻數值約-10 dB | SNAP, GRASS-GIS |
| 崩塌地 | 背向散射係數差異法 | L>X>C | ALOS、 COSMO-SkyMed | $RVI > (HV, VH) > (HH, VV)$ | 1) 將事件前 RVI 設為紅色，事件後 RVI 設為綠色與藍色之 RGB 影像中紅色系之區域。 2) 將事件前影像設為紅色，事件後影像設為藍色，影像平均設為綠色之 RGB 影像中偏紅與偏藍系之區域。 3) 式 2-4 的 Moving Windows: 19*19~25*25, 式 2-5 的門檻參數: 1.5~2 | SNAP, R-Language |
| 崩塌地 | 常態化差異指標 (ND) | L>X>C | ALOS、 COSMO-SkyMed | HH, VV | ND>2 個標準差 | SNAP, R-Language |
| 崩塌地 | 偏移偵測 | L>X>C | ALOS、 COSMO-SkyMed | HH, VV | 低相關性與高位移的區域 | SNAP, MicMac, R-Language |

五、建立以開源軟體為主之雷達衛星影像林地災害偵測流程

以雷達衛星影像進行林地災害偵測在實際操作計算有一定的複雜性，為解決實際操作複雜性的問題，研究嘗試建置一套標準化之林地災害雷達衛星影像處理流程，俾利快速提供因應災害地區之圖資，更能加速災情資訊之蒐集。

5.1 雷達衛星影像偵測洪水溢淹之處理流程

淹水偵測的部分，影像必須先進行前處理，包括精確軌道資訊的提供、移除熱雜訊、輻射校正轉換為背向散射係數、斑駁濾波降低雜訊干擾，接下來進行影像套合，將兩張影像之像元配對在一起，再進行地形校正，將影像坐標轉為真實地理坐標系統(WGS84)，套用高斯混合模型 (Gaussian Mixture Model, GMM) 對影像的分析，可以區分水體與非水體的門檻，配合所有資訊進行多時期變遷分析，可判釋溢淹的範圍 (圖 12)。

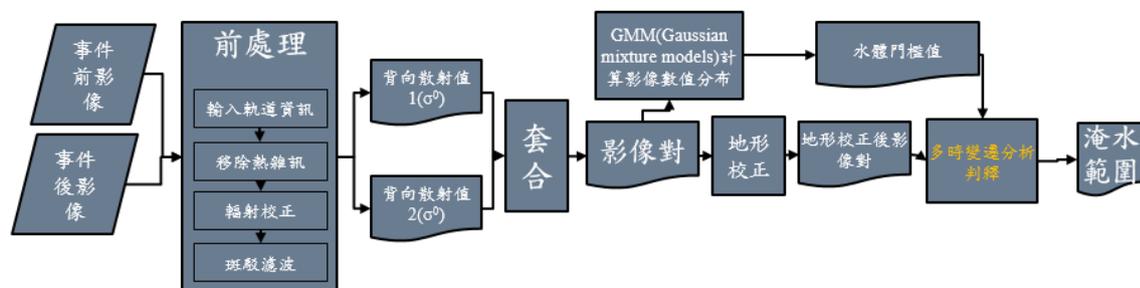


圖 12、雷達衛星影像偵測洪水溢淹之流程圖

5.2 雷達衛星影像偵測崩塌地之處理流程

崩塌地偵測的部分，影像必須先進行前處理，包括精確軌道資訊的提供、移除熱雜訊、輻射校正轉換為背向散射係數、斑駁濾波降低雜訊干擾，接下來進行套合將兩張影像像元配對在一起，計算 RVI，再進行地形校正，將影像坐標轉為真實地理坐標系統 (WGS84)，進一步以背向散射係數差異法計算影像變遷的程度，配合門檻值的設定與地形效應遮罩，最終可得到崩塌地範圍判釋區域 (圖 13)。

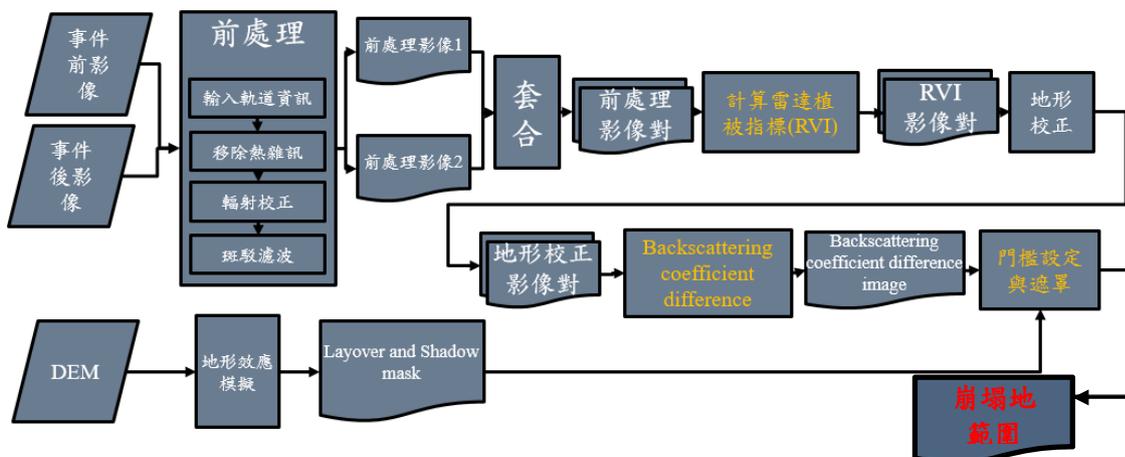


圖 13、雷達衛星影像偵測崩塌地之流程圖

六、結論與建議

6.1 雷達影像多時期的分析

1. 多時期濾波處理可以在保留影像空間解析度的情況下，有效降低斑駁雜訊，提高影像特徵。
2. 多時期變遷分析在崩塌地有良好的偵測效果，雖然需要使用 3 張影像，但只需要較易獲得的平行極化影像 (HH 或 VV) 即可進行分析。
3. 淹水區域判釋案例直接利用背向散射係數差異的效果比多時期分析成果要好。

6.2 林地災害之雷達衛星影像分析判讀準則

本計畫兩年度的研究中使用的雷達衛星影像種類包括 L 波段 ALOS 的 SLC 影像、C 波段 Sentinel-1 的 GRD 影像與 X 波段 COSMO-SkyMed 的 SLC 影像，在使用這些影像做為案例分析的條件下顯示：

1. 雷達影像的背向散射係數的差異就足以作為洪水溢淹的判斷指標。
2. 具有雙極化影像時，可使用 RVI 差異可作為快速崩塌地判釋的指標。
3. 高解析度 X 波段單極化影像有能力直接透過背向散射係數的強度差異偵測崩塌地。
4. 多時變遷偵測與偏移偵測的方法都有能力做為崩塌地判釋的分析工具。

6.3 後續研究方向建議

在緊急應變方法已建立的情況下，災害發生時是否能快速取像作為分析是未來需要考慮的方向。目前有新型合成孔徑雷達衛星包括加拿大的 RADARSAT Constellation Mission (C 波段) 與芬蘭的 ICEYE (X 波段) 有能力在 24 小時內取得相同區域的影像，並且 ICEYE 未來預計要達到 3 小時的再訪週期，是未來在防災應變使用影像上的良好選擇。

另外有鑑於遙感地球觀測數據可從許多自由訪問的開放性儲存庫中獲得，但用戶需要執行一系列複雜的預處理步驟，否則無法實現對數據的有效利用。如果能透過多維數據集 (Data Cube) 的概念，建構可方便存儲和分析大量柵格數據的地理數據基礎結構，則能降低由這些大數據挑戰引起的障礙，並以分析就緒 (analysis ready) 形式提供對大型時空數據的訪問。未來如果能建立台灣地區的 Sentinel-1 SAR 與 Sentinel-2 光學影像的多維數據集，提供經過輻射校正與地形校正的分析就緒數據，對於林地監測 (時間與空間) 與防災緊急應變災害資訊之取得應更為有利。

參考文獻

1. 胡植慶，謝嘉聲，邱俊穎與李秀芳 (2018)，雷達衛星影像輔助林地災害偵測之研究 (1/2)，行政院農業委員會林務局農林航空測量所委託研究計畫成果報告書，163 頁。
2. Matsuoka, M., & Yamazaki, F. (2000). Characteristics of satellite SAR images in the areas damaged by earthquakes. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International, 6, 2693-2696, doi: 10.1109/IGARSS.2000.859684.

3. Plank, S. (2014). Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR—A comprehensive review and outlook to Sentinel-1. *Remote Sens.*, 6(6), 4870-4906, doi: 10.3390/rs6064870.