

計畫編號：SWCB-110-050

利用雷達影像偵測強降雨引致的大型崩塌
和堰塞湖

**Change Detection for Heavy Rainfall
Induced Landslide and Dammed Lake
by using SAR images**

執行單位：臺灣大學地質科學系

執行期間：110 年 01 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：胡植慶 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

目次

目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	IV
摘要.....	VII
Abstract.....	VIII
第一章 緒論	1
第一節計畫整體概述	1
第二節研究目的	2
第三節本年度工作項目內容概述與預定工作進度	3
第二章 各類雷達衛星影像種類資訊之蒐集、分析與功能評估	1
第一節各類衛星影像基本資訊之介紹	4
第二節各類衛星影像產品種類、產品編號格式說明 與線上數據目錄	12
第三節各類雷達影像分析與功能評估	40
第四節小結	44
第三章 雷達影像於強降雨後堰塞湖之偵測實作	1
第一節 雷達影像偵測淹水之研究方法	1
第二節 案例分析:Google Earth Engine 偵測 2009 年莫拉克颱風於臺東太麻里溪之堰塞湖	5
第三節 以多期雷達衛星影像分析技術輔助淹水 變化偵測	9
第四節 小結	13
第四章 雷達衛星影像於強降雨後大型崩塌之偵測實作	1

第一節	雷達影像偵測崩塌之研究方法	1
第二節	案列一：多期雷達影像於盧碧颱風之寶 來崩塌地辨識	4
第三節	案列二：多期雷達影像於盧碧颱風之玉 穗溪上游集水區崩塌地辨識	7
第四節	案列三：多期雷達影像偵測盧碧颱風之 玉穗溪下游明霸克露橋沖毀事件	10
第五章	現有雷達衛星影像處理開源軟體之評估與測試	1
第一節	Google Earth Engine 平臺簡介	1
第二節	SNAP 軟體簡介	6
第三節	小結	10
第六章	討論建議與結論	1
參考文獻		1
委員審查意見與回覆		1
第一節	期初審查意見與回覆	1
第二節	期中審查意見與回覆	3
第三節	期末審查意見與回覆	8

表次

表 2-1 各種衛載 SAR 感測器規格.....	2-9
表 2-2 各種衛載 SAR 影像購買費用相關說明.....	2-11
表 2-3 ERS 產品種類與產品編號.....	2-12
表 2-4 ERS 檔案名稱說明	2-14
表 2-5 ENVISAT 產品種類與產品編號	2-15
表 2-6 ENVISAT 檔案名稱說明	2-16
表 2-7 RADARSAT-1 產品種類與代碼.....	2-19
表 2-8 RADARSAT-2 產品種類與代碼	2-20
表 2-9 RADARSAT-2 拍攝模式代碼	2-21
表 2-10 JERS-1 產品檔案名稱編碼	2-25
表 2-11 ALOS/PALSAR 產品種類編碼說明	2-27
表 2-12 ALOS/PALSAR 產品檔案名稱編碼.....	2-29
表 2-13 ALOS-2 影像產品種類與參數.....	2-30
表 2-14 ALOS-2 產品檔案名稱編碼.....	2-31
表 2-15 COSMO-SKYMED 產品檔案名稱編碼	2-33
表 2-16 TERRASAR-X 影像種類與參數.....	2-35
表 2-17 TERRASAR-X 產品檔案名稱編碼說明	2-37
表 2-18 雷達影像偏極模式與地物辨識的適用性.....	2-42
表 5-1 SNAP SENTINEL-1 工具箱特性	5-6

圖次

圖 2-1 雷達訊號不同的偏極模式與對應的影像地物分類之應用 ..	2-2
圖 2-2 雷達影像的斑駁雜訊 (SPECKLE NOISE) 去除	2-3
圖 2-3 本研究團隊目前擁有的雷達衛星影像資料.....	2-10
圖 2-4 EOLI-SA 軟體介面.....	2-15
圖 2-5 RADARSAT-1 衛星拍攝組態示意圖.....	2-18
圖 2-6 RADARSAT-2 衛星拍攝組態示意圖.....	2-19
圖 2-7 RADARSAT-2 產品檔案組成	2-21
圖 2-8 RADARSAT 衛星影像搜尋網頁.....	2-22
圖 2-9 SENTINEL-1 產品拍攝模式.....	2-23
圖 2-10 SENTINEL-1 產品種類與等級區分.....	2-23
圖 2-11 SENTINEL 產品檔案名稱編碼說明.....	2-24
圖 2-12 SENTINEL 衛星影像搜尋網頁	2-24
圖 2-13 JERS-1 衛星影像搜尋網頁	2-26
圖 2-14 ALOS-2 影像拍攝模式.....	2-30
圖 2-15 ALOS 與 ALOS-2 衛星影像搜尋網頁.....	2-31
圖 2-16 COSMO-SEYMED 衛星影像搜尋網頁.....	2-35
圖 2-17 TERRASAR-X 產品資料結構	2-36
圖 2-18 TERRASAR-X 衛星影像搜尋網頁.....	2-37
圖 2-19 ESA 建議雷達影像各波段適用的分析.....	2-41
圖 2-20 不同波段雷達影像在雲與水氣干擾的情況.....	2-41
圖 2-21 反射面起伏程度對於不同雷達波長的反應不同.....	2-41
圖 2-22 不同波長之雷達影像對於水體與泥濘的分辨率.....	2-42
圖 2-23 HH, HV 與 VV 極化影像於相同區域內的數值分布.....	2-42
圖 2-24 不同飛行方向的疊置與陰影分析.....	2-44

圖 3-1 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.....	3-4
圖 3-2 太麻里溪堰塞湖航空相片圖	3-5
圖 3-3 莫拉克颱風太麻里溪堰塞湖研究區域	3-6
圖 3-4 雷達影像堰塞湖辨識處理流程圖	3-7
圖 3-5 基於 GOOGLE EARTH ENGINE 的 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	3-8
圖 3-6 2021 年曾文水庫運轉歷線圖	3-9
圖 3-7 曾文水庫案例研究區域	3-10
圖 3-8 多期雷達影像水體偵測處理流程圖	3-11
圖 3-9 多期雷達影像曾文水庫水體變化檢測結果圖.....	3-v12
圖 4-1 GEE 偵測崩塌方法流程圖.....	4-3
圖 4.2 寶來一橋上游右岸國有林班地邊坡崩塌研究範圍	4-4
圖 4.3 基於 GEE 的寶來一橋上游右岸國有林班地邊坡崩塌識別結果圖.....	4-5
圖 4.4 盧碧颱風之玉穗溪上游集水區崩塌地研究範圍	4-7
圖 4.5 基於 GEE 的玉穗溪上游集水區崩塌地識別結果圖	4-8
圖 4.6 盧碧颱風之玉穗溪下游南橫公路明霸克露橋研究範圍	4-10
圖 4.7 盧碧颱風之玉穗溪下游南橫公路明霸克露橋沖毀研究範圍	4-11
圖 5-1 GOOGLE EARTH ENGINE	5-2
圖 5-2 GEE 應用程式設計發展介面 (API)	5-2
圖 5-3 GEE 土地利用類型分類.....	5-3
圖 5-4 GOOGLE EARTH ENGINE 技術架構圖.....	5-4
圖 5-5 GOOGLE EARTH ENGINE 使用架構圖.....	5-5

圖 5-6 SNAP 軟體	5-7
圖 5-7 SNAP 計算輻射指數圖	5-8
圖 5-8 SNAP 多波段展示圖	5-9
圖 5-9 SNAP 光譜調整示意圖。	5-9
圖 5-10 SENTINEL-1 雷達衛星影像經由 SNAP 製作洪泛區域判定之範 例.....	5-10

摘要

臺灣地區由於其特殊的地理地勢環境，其災害主要以颱風、地震、水災、山崩為主。而近年來，隨著經濟的發展，科技的進步，越來越多的雷達衛星發射進入太空。基於雷達衛星影像穿透性強、受天氣雲霧影響程度遠遠小於光學衛星影像等特性，為防災減災研究提供了新的思維。本計畫出於防災減災的要求，針對山崩與堰塞湖災害，配合 110 年度水土保持局創新研究計畫要求之「軟體防災對策」與「新興科技應用」兩大領域，目標為應用雷達影像發展大型崩塌偵測分析模式，應用於偵測強降雨引致之大型崩塌與形成之堰塞湖，提升即時大型崩塌災害與堰塞湖之應變能力。研究主要基於事件前後雷達影像背向散射係數會發生變化的原理，採用閾值法，通過開源雲端平臺 Google Earth Engine（GEE）進行快速流程化自動處理。

Abstract

Due to its special geographical and topographic environment, the disasters in Taiwan are mainly typhoon, earthquake, flood and landslide. In recent years, with the development of economy and the progress of science and technology, more and more radar satellites are launched into space. Radar satellite images have strong penetrability and are much less affected by weather cloud and fog than optical satellite images, which provides another idea for disaster prevention and mitigation research. The requirements of this plan for disaster prevention and reduction, in view of the landslide and the lake disaster, with 110 annual soil and water conservation bureau innovation research plan calls for "software disaster prevention countermeasures" and "new technology" two fields, the goal for the application of radar image development large-scale collapse detection analysis model, is applied to the detection of heavy rainfall caused by large collapse and the formation of the lake, To enhance the emergency response capacity of immediate large scale landslide disaster and barrier lake. Based on the principle that the backscattering coefficient of radar image will change before and after the event, the study adopts threshold method and adopts Google Earth Engine (GEE), an open source cloud platform, to carry out rapid process automatic processing.

第一章 緒論

第一節 計畫整體概述

臺灣位於西太平洋地區，每年夏秋季節都會受颱風威脅。因此，颱風期間之豪雨極易引發大型崩塌、坡地走滑與土石流，造成道路中斷與房舍被掩埋等災害。且大量土石流入河道沿溪谷而下，對於河道兩岸形成強大的侵蝕及破壞力，並可能形成堰塞湖，常造成溪流沿岸及下游居民重大威脅。以 2009 年莫拉克颱風時所發生的小林村事件為例，崩塌發生後土石阻擋河道形成堰塞湖，並於形成後 104 分鐘後潰堤，當地聚落遭洪水及土石覆滅，造成嚴重傷亡。對於崩塌災害之緊急應變，除長期進行監測外，如何在重大自然災害之後，在最短時間內，偵測出崩塌地和堰塞湖位置及範圍，同時提升其偵測之效能與廣度，作為治災單位應急反應之參考，則為研究之主要方向。各類天然災害發生後，遙測影像已然為取得災情資訊之重要工具之一。由於光學影像有受水氣、雲霧與霾等因子阻擋之可能，無法穩定常時取得地面影像，目前已有多個國家發展雷達衛星，其形成之雷達影像可較不受天候之影響，取得偵測分析所需之長時間、廣範圍雷達影像。單一衛星受限於固定的繞行軌道與到訪周期，常無法於災後即時取得偵測分析之影像，故以雷達影像崩塌災害偵測相關分析模式，並進一步結合既有光學衛星群，建構多元感測器之崩塌災害偵測模式，其效果將可等同縮短同地點之再訪周期，提升針對大型崩塌與之產生的堰塞湖之災害應變效能。

本計畫主要研究應用各類雷達衛星影像，藉由 Google Earth Engine (GEE) 與 SNAP 等各類開源軟體，偵測並分析強降雨引致之

大型崩塌與堰塞湖，並建置自動化處理流程以應用於即時災害應變及行政院農委會水土保持局「利用雷達影像偵測強降雨引致的大型崩塌與堰塞湖」計畫。

第二節 研究目的

由於全球暖化加劇，世界各地發生各種環境災害愈趨頻繁，其中洪澇、山崩等災害造成了巨大經濟的損失和嚴重威脅人類的生命安全。因此如何快速確地提供即時淹水和山崩資訊，以實施救援工作，或給予政府機關評估災害影響範圍，是當今世界各國都在努力的課題。

臺灣面臨颱風與豪雨的自然災害的頻率相當高。其位於西太平洋地區，每年夏秋季節都會受梅雨、豪雨與颱風威脅。因此，汛期期間之豪雨極易引發大型山崩及堰塞湖。對於崩塌災害之緊急應變，除長期進行監測外，如何在重大自然災害之後，在最短時間內，偵測出崩塌地與崩塌後之堰塞湖位置及範圍，同時提升其偵測之效能與廣度，作為治災單位應急反應之參考，則為研究之主要目的。

光學衛星影像受天氣雲霧影響大，不能全天候全天時進行觀測。而因強降雨導致的山崩與堰塞湖，往往因為天氣雲霧等原因導致光學衛星影像無法得到時效性使用。為瞭解解決這一問題，利用對雲霧穿透性更強雷達影像偵測強降雨引致的大型崩塌與堰塞湖，有益於提升針對大型崩塌災害之應變效能。

對於現有雷達衛星影像處理開源軟體之評估與測試中，發現對

於雷達影像偵測強降雨引致的大型崩塌與堰塞湖的研究多不能實現雲端自動化處理，而本計畫主要通過 Google Earth Engine (GEE) 平臺進行快速流程化雲端自動處理以彌補這一缺陷。

第三節 本年度工作項目內容概述與預定工作進度

一、 各類雷達衛星影像蒐集分析與功能性評估

對於不同雷達衛星影像(如 ALOS、Sentinel-1 等)，就其波長(L-band、C-band、X-band 等)、解析度、穿透特性、偏極特性、回歸周期、影像取得、費用等，評估其於不同災害，包括堰塞湖、溢淹、崩塌地等分析判釋所需之規格及可行性。

二、 雷達衛星影像於強降雨後堰塞湖之偵測實作

本計畫根據前述相關雷達衛星影像之規格，基於多期雷達衛星影像研究並應洪水溢淹偵測及堰塞湖偵測提出所需之處理參數，進行雷達影像判釋淹水與堰塞湖方法建立與判釋門檻值之分析，並用 Google Earth Engine 平臺進行快速流程化雲端自動處理以實現建立堰塞湖之即時判釋依據。

三、 雷達衛星影像於強降雨後大型崩塌之偵測實作

根據前述相關雷達衛星影像之規格，基於多期雷達衛星影像，研究並提出相對應之崩塌偵測所需方法、參數與適用性，並用 Google Earth Engine 平臺進行快速流程化雲端自動處理以實現建立大型崩塌之即時判釋依據。

四、 現有雷達衛星影像處理開源軟體之評估與測試

對於現有的雷達衛星影像處理開源軟體評估其功能、介面操作

及後續維護之可行性，進而提出相關建議，使其作為 110 年度以開源軟體為主的雷達衛星影像災害偵測流程之開發基礎。

五、 預定工作進度

本計畫執行期程自 110 年 1 月 27 日起至 110 年 12 月 31 日止。第一期應於 110 年 4 月 11 日前提期初報告書（10 份）送至貴局，俾利召開期初審查會議。第二期應於 110 年 7 月 18 日前函送期中報告（5 份）至貴局，俾利辦理審查作業。期中以書面審查。第三期應於 110 年 11 月 14 日前函送期末報告（5 份）至貴局，俾利辦理審查作業。期末報告以聯合審查暨成果發表方式進行。本計劃預定進度如表 1-1 與表 1-2 所示：

表 1-1 工作進度表

重要工作項目	工作比重	預定進度	1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-11 月
各類雷達衛星影像蒐集分析與功能性評估	10	工作量或內容	蒐集圖資與相關案例	雷達影像圖資可行性評估	計劃確認所使用雷達影像	成果報告撰寫
		累計百分比	50	90	95	100
雷達影像於強降雨後大型崩塌之偵測實作	30	工作量或內容	先期規劃作業	災害偵測實作	成果精確度檢核	成果報告撰寫
		累計百分比	10	50	90	100
雷達影像於堰塞湖之偵測實作	30	工作量或內容	先期規劃作業	災害偵測實作	成果精確度檢核	成果報告撰寫
		累計百分比	10	50	90	100

以多期雷達衛星影像分析技術輔助大型崩塌災害與堰塞湖偵測	30	工作量或內容		方法建立與作業規劃	初步成果精進與檢核	成果報告撰寫
		累計百分比	0	10	50	100
累計總進度	百分比		16	42	78.5	100

表 1-2 計畫進度甘特圖

計畫名稱：利用雷達影像偵測強降雨引致的大型崩塌和堰塞湖													
月次 工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月			備註
工作計畫書	■	■	■	■									
各類雷達衛星影像種類資訊之蒐集、分析與功能評估	■	■	■	■	■	■	■						
雷達影像於堰塞湖之偵測實作	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
期中報告						■	■						
雷達影像於強降雨後大型崩塌之偵測實作	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
以多期雷達衛星影像分析技術輔助大型崩塌災害與堰塞湖偵測	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
期末報告									■	■			
預定進度（累積數）	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%			

注：計畫約從 2 月開始執行，至 11 月期間大約有 10 個月的執行時間

第二章 各類雷達衛星影像種類資訊之蒐集、分析與功能評估

雷達系統為自行發射電磁波，不須依賴接收太陽光與物體本身輻射之電磁波，故稱為主動系統，不分晝夜皆可使用，可以全天候發送及接收數據，取得資料。遙測系統所使用的雷達波，其波長從約 1 公分至 100 公分不等，幾乎可以穿透大氣層，較不受天候影響。目前地球觀測衛星所使用的雷達波波長以 X、C、L 波段最為常見，X 波段的波長約為 3.1 公分，C 波段約 5.6 公分，L 波段則約 23.5 公分。雷達系統的波長會影響其穿透地物的能力，一般而言波長越長，穿透地物就越深，如 L 或 P 等長波段雷達波穿透力較強，可穿透樹林濃密的樹葉而探測到樹枝樹幹或地面；波長越短則相反，如 X 或 K 等較短波段之雷達波穿透力較弱，在植物頂層就會被反射回去，較適合用來對樹頂或樹葉的偵測；而介於中間波長的 C 波段雷達波，則可提供目標物表面或目標物以下的資訊。另外，雷達波照射水體以反射為主，穿透能力有限，即使穿透也難有回波訊號。因此，在選擇波段時應考慮偵測的目的與偵測地區的地表覆蓋情況。

雷達訊號發射與接收時，可用不同的偏極模式（Polarization Mode），雷達波水平發射與水平接收的波稱為水平偏極化（H），而垂直發射與垂直接收的波稱為垂直偏極化（V）。而依照不同的發射與接收組合可分為 4 種不同的偏極模式，如 HH：水平發射與水平接收；VV：垂直發射與垂直接收；HV：水平發射與垂直接收；VH：垂直發射與水平接收。當雷達波發射與接收回波皆為相同的偏極模式時，稱為平行極化（Parallel Polarization），如 HH、VV。當雷達波發射與接收回波皆為不同的偏極模式時稱為交叉極化（Cross Polarization），如 HV、VH。根據發射與接收的偏極模式不同，雷達波與地表相互作用以及回波散射方式也有差異。

綜合上述，可知雷達影像的結果會受到雷達波波長以及極化方式所影響，因此使用不同波長和偏極模式的組合，可以依照情況提供所需的雷達影像，藉以偵

測各式各樣的地表目標物，且結合不同的波長及偏極化的影像特性，可以偵測出相異且互補的地表訊息（圖 2-1）。HV 偏極對於體散射特性反應較為敏感，而植被對於電磁波傳遞而言，多屬於體散射特性；HH 偏極對於二次散射特性較敏感，如建築物、船隻或橋梁等。

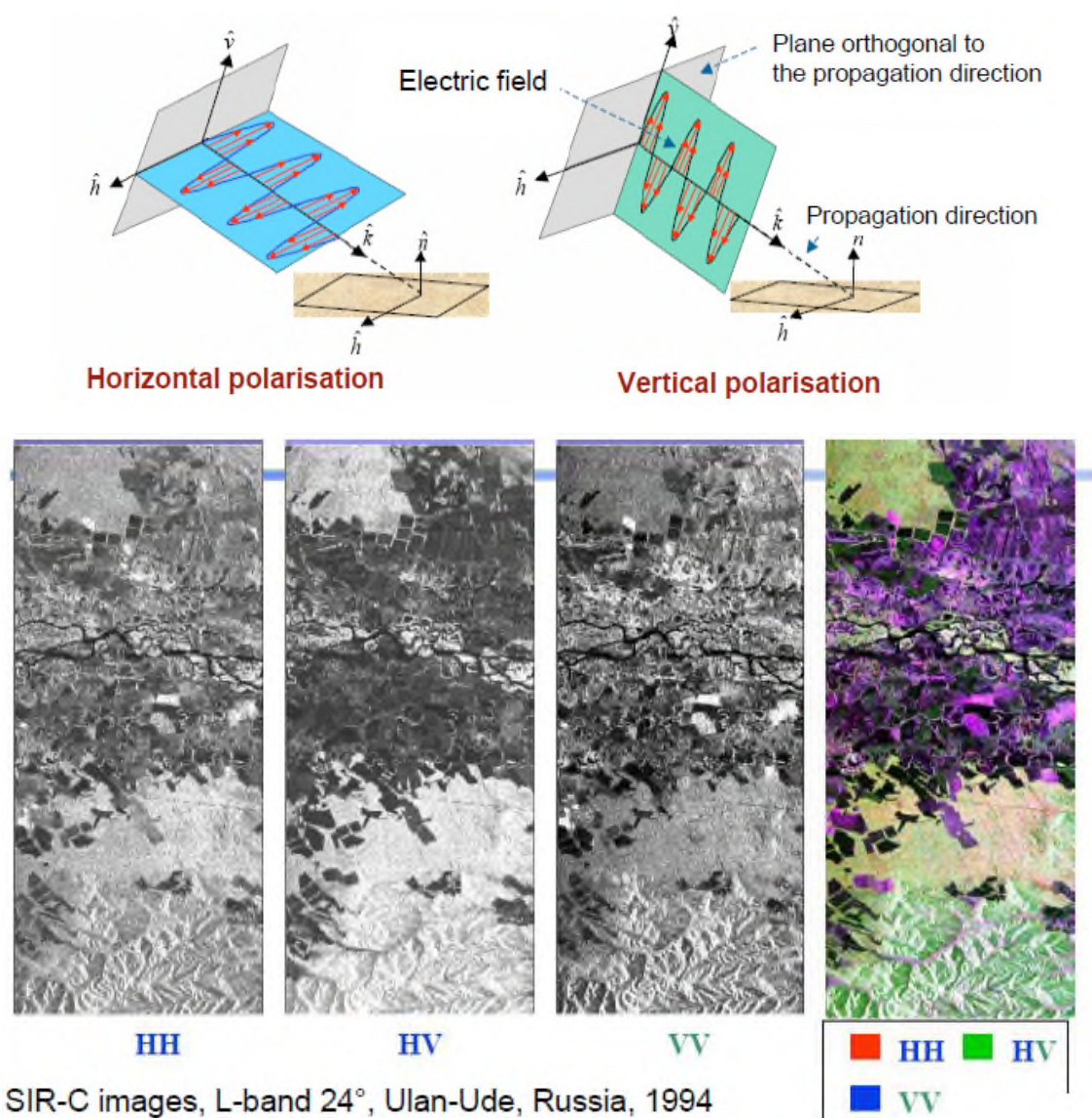
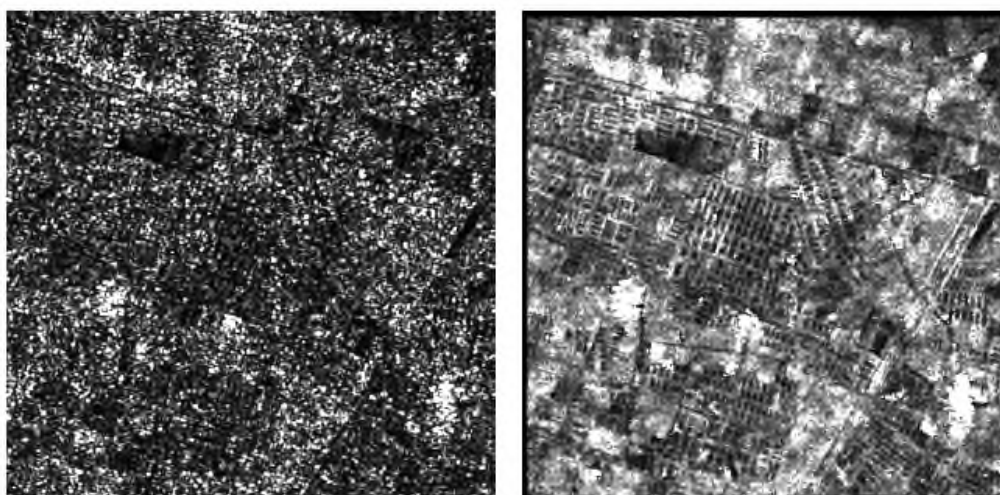


圖 2-1 雷達訊號不同的偏極模式（Polarization mode）與對應的影像地物分類之應用（資料來源：ESA Advanced Training Course <https://earth.esa.int/landtraining07/D1LA1-LeToan.pdf>）。

雷達影像因其成像特性，地面像元單元內部分布著大量的隨機散射體，每個散射體的回波特性皆由地物結構、粗糙度、介電性質、雷達波長、極化方式及雷

達波入射角等綜合因素共同決定，在同一分辨單元內，其回波信號是所有散射體回波相互的疊加或抵消，彼此之間相互干擾的結果則導致雷達影像上出現隨機分布的亮點或暗點，此種雷達影像特性即稱為斑點雜訊（Speckle noise）。斑點雜訊是影響雷達影像判讀及應用的一個很大因素，因此在進行雷達影像處理前，必須有適當的前處理，如多視處理（Multilooking）與斑駁雜訊（Speckle filtering）處理，才能將相關的雜訊去除，獲得較正確的處理及判讀訊息（圖 2-2）。



Same image, after speckle filtering

圖 2-2 雷達影像的斑駁雜訊（Speckle noise）去除（資料來源：ESA Advanced Training Course <https://earth.esa.int/landtraining07/D1LA1-LeToan.pdf>）。

第一節 各類衛星影像基本資訊之介紹

雷達影像因其波長與主動發射脈衝波之特性，於不同大氣及環境下，皆可用於紀錄相關的地表訊息，不受天候及夜間造成對環境監測的限制。因此各國已大量利用合成孔徑雷達的技術，發展不同波段的雷達衛星系統，以偵測地表變化，並達到維護國土安全之目的。目前常用的影像資料有歐洲太空總署（ESA）發射的 ERS-1、ERS-2、ENVISAT、Sentinel，日本宇宙航空研究開發機構（JAXA）發射的 JERS-1、ALOS 與 ALOS-2，加拿大太空局（Canadian Space Agency, CSA）發射的 RADARSAT，德國國家太空中心（German Aerospace Center）與德國民間公司 EADS Astrium 所共同開發的 TerraSAR-X，及義大利航太中心（Italian Space Agency，簡稱 ASI）發展的 COSMO-SkyMed。

一、 ERS-1/2

ERS-1 與 ERS-2 為歐洲太空總署（European Space Agency, ESA）分別於 1991 年 7 月與 1995 年 4 月發射的太陽同步衛星，並於 2003 年 3 月 10 日與 2011 年 7 月 4 日除役。ERS-1/2 的軌道高度約 785 公里，再訪周期皆為 35 天。衛星上所酬載的 SAR 感測器系統，以 23° 入射角斜視地面，雷達波波段為 C 波段，波長 5.6 公分，解析度約 20 公尺，像幅寬度寬約 100 公里（ESA_EO_Missions_ERS）。

二、 ENVISAT

ENVISAT 為歐洲太空總署為延續 ERS-1/2 之地球觀測任務，於 2002 年 3 月所發射之衛星，2012 年 5 月 9 日因失聯而宣布停止觀測。ENVISAT 為一太陽同步衛星，軌道高度約 800 km，再訪週期為 35 天（同 ERS-1/2）。衛星上共酬載有 10 個載具，其中包括一合成孔徑雷達系統，名為 ASAR（Advanced SAR），是屬於多偏極雷達，具有 19° 至 44° 多重入射角度，有五種拍攝模式，雷達波波段為 C 波段，波長 5.6 公分，解析度從 10 至 150 公尺不等，像幅寬度寬約 100 公里（ESA_EO_Missions_Envisat）。

三、 RADARSAT

加拿大太空總署與美國於 1995 年合作發射 RADARSAT-1 遙測衛星，並於 2013 年結束任務。此衛星為太陽同步衛星，軌道高度介在 793 至 821 公里，重返周期為 24 天。RADARSAT-1 酬載 C 波段合成孔徑雷達（SAR）系統，波長 5.6 公分。由於可調式入射角的設計，使得衛星能在不同軌道上獲取同一地區的影像，因此設計縮短了影像獲取的時間週期，提高了即時應用的能力。以亞洲地區而言，其週期約為三天。RADARSAT-1 衛星酬載之 SAR 系統有 25 種不同影像模式可供選擇，入射角由 20°變化至 49°，C 波段的雷達波長為 5.5 公分，像幅寬度從 45 至 200 公里。在解析度部分可提供 10 公尺至 100 公尺的影像資料。像幅大小則隨著拍攝條件不同而改變，從 50 km × 50 km 至 500 km × 500 km（CSA_Satellites_RADARSAT-1, eoPortalDirectory_Satellite_Missions_RADARSAT-1）。

RADARSAT-2 於 2007 年 12 月 14 日成功發射，RADARSAT-2 為 C 波段衛星影像，預計使用壽命為 7.25 年，但目前仍持續運作中。它是 RADARSAT-1 的後續衛星，軌道高度同樣約在 800 公里。迴歸週期、天線入射角度和雷達波長也與上一代相同，但觀測方式可選擇左視或右視，除延續 RADARSAT-1 的拍攝能力和成像模式外，RADARSAT-2 增加了解析度為 3 公尺的超精細模式和 8 公尺全極化模式，像幅寬度從 10 公里到 200 公里（CSA_Satellites_RADARSAT-2, eoPortalDirectory_Satellite_Missions_RADARSAT-2）。

RADARSAT Constellation Mission (3Sat) 計畫於 2018 年 11 月發射，未來將延續及補足即將除役的 RADARSAT-2，此衛星座由三個載具所組成，其主要目的為持續提供前代衛星所供給之 C 波段資訊，波長約 5.5 公分，改進合成孔徑雷達的操作使用，並提高系統可靠性。預計該群衛星的軌道高度會在 586 至 615 公里間，單顆衛星的重返周期是 12 天，整個星座重返週期則是 3 天。RADARSAT CONSTELLATION 的載具將會酬載一個 SAR 感測器結合一套自動識別系統（AIS）。目前預計 RADARSAT CONSTELLATION 主要用途將會是海上

監控（包含船隻探測、海冰監測以及漏油點探測）、災害處理與管轄、生態系統監測等，並每日訪問地球表面的 90%（CSA_Satellites_RADARSAT-3, eoPortalDirectory_Satellite_Missions_RADARSAT-3）。

四、 Sentinel-1

Sentinel-1 是歐洲太空總署哥白尼計畫（GMES）中的地球觀測衛星，由兩顆衛星（Sentinel-1a 與 1b）組成，並配有 C 波段合成孔徑雷達（SAR），於 2014 年 2 月與 4 月順利發射升空，預計可運作 12 年至 2024 年。Sentinel-1 是軌道高度為 693 公里的太陽同步衛星，單顆衛星軌道重返周期為 12 天，兩顆衛星迴歸週期為 6 天，衛星上所載之 SAR 感測系統的觀測入射角角度由 20° 變化至 47° ，觀測模式分為 Strip Map Mode（SM）、Interferometric Wide Swath Mode（IW）、Extra Wide Swath Mode（EW）與 Wave mode。雷達波為 C 波段，波長為 5.6 公分，空間解析度分別為 $5 \times 5\text{m}$ 、 $5 \times 20\text{m}$ 、 $25 \times 100\text{m}$ 與 $5 \times 20\text{m}$ ，像幅寬度從 80 到 400 公里。有別於其他 SAR 衛星影像是商業化資料，Sentinel 衛星影像可以免費取得，歐洲太空總署也開發及提供 Sentinel-1 雷達影像處理的軟體 SNAP（Sentinel Application Platform），大力推廣雷達影像的處理與應用（ESA_User_GUIDES_Sentinel-1）。

五、 JERS-1

日本國家太空發展署於 1992 年 2 月 11 日發射 JERS-1（Japanese Earth Resources Satellite）衛星，其裝置兩個光學感測器與一個 HH 極化、L 波段之合成孔徑雷達，波長 23.5 公分。此衛星為太陽同步衛星，軌道平均高度為 568 公里，重返周期為 44 天，入射角度為 35° ，波段波長為 23.5 公分，影像解析度為 18 公尺，像幅寬度為 75 公里，主要應用於國土調查、農林漁業、環境保護、災害監測等方面，但 JERS-1 已於 1998 年 10 月 12 日停止運作（eoPortalDirectory_Satellite_Missions_JERS-1）。

六、 ALOS/ALOS-2

ALOS 衛星於 2006 年 1 月 24 日發射，2011 年 5 月 12 日除役，為日本地球觀測衛星計畫中，負責針對陸地區域進行觀測的衛星。ALOS 為太陽同步衛星，

平均軌道高度 691.65 公里，軌道重返周期 46 天。ALOS 衛星上共有三個 SAR 感測器系統，分別為 PRISM、AVNIR-2 及 PALSAR (Phased Array type L-band SAR)，PALSAR 的雷達波為 L 波段，波長為 23.6 公分。可提供 7.2° 至 60° 的多觀測入射角與多偏極、全偏極等選項。ALOS 衛星總共提供三大拍攝方式，分別為 Fine 拍攝方式、ScanSAR 拍攝方式、Polarimetric 拍攝方式，Fine 拍攝方式又可分為高解析單偏極 FBS (Fine-Beam Single) (HH 或 VV) 與雙偏極 FBD (Fine-Beam Dual) (HH+HV 或 VV+VH) 方式，其空間解析度分別為 7 至 44 公尺與 14 至 88 公尺 (依觀測方式而異)，像幅寬度為 40 至 70 公里 (JAXA_ALOS)。

ALOS 衛星自 2006 年 1 月發射後，已完成了階段性的任務，包括：製圖、區域觀測、災害監測和資源調查，故於 2011 年正式除役，接續的衛星 ALOS-2 於 2014 年 5 月 24 日發射，是日本宇宙航空研究開發機構 (JAXA) 計畫延續 ALOS 衛星的大型 L 波段合成孔徑雷達衛星任務，其波段波長為 22.9 公分，朝向高解析度的同時，更朝向多偏極與全偏極的應用。該衛星設計使用目標為 7 年，預計其軌道重返週期為 14 天，天線入射角度為 8° 到 70° ，影像空間解析度為 3 公尺到 100 公尺，像幅寬度為 25 公里到 490 公里 (依觀測方式而異) (JAXA_ALOS2, eoPortalDirectory_Satellite_Missions_ALOS2)。

七、COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed 為義大利航太中心 (Italian Space Agency, ASI) 利用 4 顆衛星組成的星座衛星，4 顆衛星皆酬載 X 波段之 SAR 感測器，分別於 2007 年、2008 年與 2010 年發射運作。2017 年已達到其工作壽命，但仍持續運作中。由於該衛星座共有四顆衛星運作，故軌道重返週期從 10 天至 2.5 天，軌道高度為 619.6 公里，天線入射角度分為正常範圍 25° 到 50° 與極限範圍 20° 到 59.5° ，波長為 3.1 公分，影像空間解析度從 1 公尺至 100 公尺，像幅寬度從 10 公里到 200 公里 (依觀測方式而異) (eoPortalDirectory_Satellite_Missions_COSMO-SkyMed)。

COSMO-SkyMed 第二代 (COSMO-SkyMed Seconda Generazione，簡稱 CS

G) 將會是雙衛星任務，目的在提高影像解析度與觀測的靈活性，第一顆 CSG-1 衛星預計於 2018 年發射，而第二顆 CSG-2 預計於隔一年發射，預計工作壽命為 7 年。預計 X 的波段波長不變，但影像空間解析度將會大幅提高至 0.35 公尺到 40 公尺，像幅寬度從 3 公里到 200 公里 ([eoPortalDirectory_Satellite_Missions_COSMO-SkyMed2](#))。

八、 TerraSAR-X

TerraSAR-X 衛星雷達是由德國國家太空中心 (German Aerospace Center) 與德國民間公司 EADS Astrium 所共同開發。爲了提升及確保 TerraSAR-X 品質，EADS Astrium 於 2001 年成立 Infoterra 公司，專職負責 TerraSAR 系列衛星運作及銷售。TerraSAR-X 為 TerraSAR 系列的第一顆商用衛星，已於 2007 年 6 月 15 日順利發射升空，所能提供之解析度高達 0.25 公尺，為目前所有商用衛星雷達中，所能提供最高解析度之衛星。設計使用壽命為 5 年，但目前運作良好，預計至少服務至 2020 年。TerraSAR-X 衛星是軌道高度為 514 公里的太陽同步衛星，軌道重返周期為 11 天，天線入射角度為 15° 到 55° ，其 X 波段的雷達波波長為 3.1 公分，影像空間解析度為 0.25 公尺至 40 公尺，像幅寬度為 4 公里至 270 公里 (依觀測方式而異) ([eoPortalDirectory_Satellite_Missions_TSX](#), [Buckreuss et al, 2009](#))。

爲了延續 TerraSAR-X 任務，第二代 X 波段的 SAR 衛星 TerraSAR-X2 於 2016 年開始服務，預計使用壽命為 9 年。空間解析度一樣維持在精準的 0.25 公尺，並新增 TOPS 的觀測模式，可應用於大面積的觀測。目前預計 TerraSAR-X 的軌道高度在 505 至 533 公里之間，其軌道重返周期為 11 天，天線入射角度為 20° 至 50° ，其波長一樣在 3.1 公分，影像解析度 0.25 公尺至 30 公尺，像幅寬度從 10 公里到 400 公里 (依觀測方式而異) ([Janoth et al, 2012](#))。

上述常用雷達影像來源，整理如表 2-1 所示。

表 2-1 各種衛載 SAR 感測器規格

衛星	波長 (cm)	發射時間 (年)	解析度 (m)	軌道週期 (天)	像幅寬度 (km)	入射角 (°)
C 波段						
ERS-1/2	5.6	1992-2001	30	35	100	23
Envisat	5.6	2003-2010	10-100	35	100	19-44
Radarsat-1	5.5	1995-2013	10-100	24	45-200	20-50
Radarsat-2	5.5	2007-	3-100	24	10-200	20-50
Sentinel-1 (2Sat)	5.6	2014-2024	5-20	6,12	250	30-46
Radarsat Constellation Mission (3Sat)	5.5	2018-2026	5-20	3,12	30-350	20-55
L 波段						
JERS	23.5	1992-1998	18	44	75	35
ALOS-PALSAR	23.6	2006-2011	7-89	46	40-70	8-60
ALOS-PALSAR2	22.9	2013-2017	3-100	14	25-350	20-60
X 波段						
COSMO-skyMed (4Sat)	3.1	2007-2014	1-100	2,4,8,16	10-200	20-60
TerraSAR-X	3.1	2007-2018	1-16	11	10-100	20-55
COSMO-skyMed -2 (2Sat)	3.1	2015-2023	1-3		10-40	
TerraSAR-X-2	3.1	2015-2018	0.5-4		10-40	

因本研究團隊長期研究雷達應用於地質災害等相關議題，已擁有多種不同波段、不同衛星來源的大量雷達影像資料可供研究用，而不同衛星與影像種類的檔案格式並不一致，會將不同的衛星影像檔案格式整理說明。

為獲得不同特性雷達影像在臺灣地區相關應用的處理參數，本團隊已有的影像可提供試作，並以此參數建立標準作業程序，以期快速地獲取相關資訊，進行後續判讀及應用。經整理目前既有的北臺灣地區影像如圖 2-3 所示。因應本計畫未來於颱風豪雨時可對山崩、淹水與堰塞湖進行判釋，針對目前有在運行的衛星任務，未來可能需採購雷達影像的購買（取得）單位與影像價格也列於表 6-2。

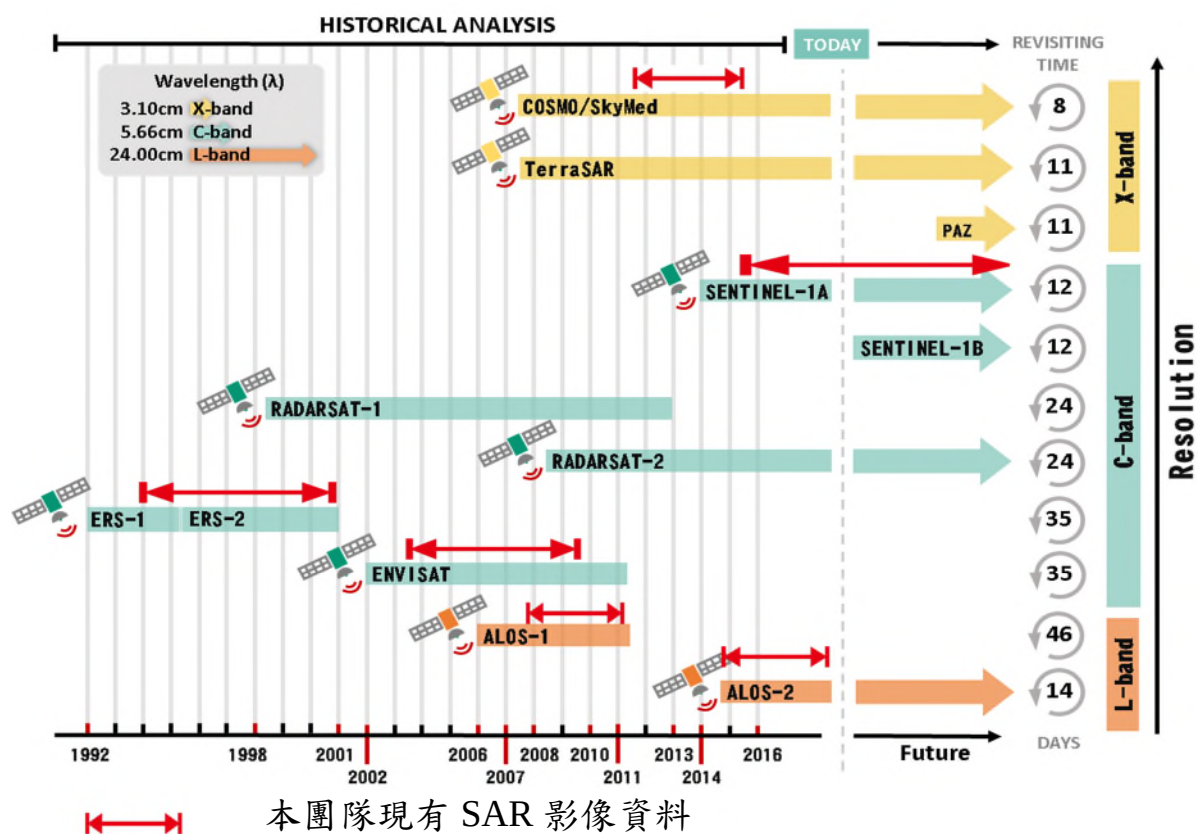


圖 2-3 本研究團隊目前擁有的雷達衛星影像資料

表 2-2 各種衛載 SAR 影像購買費用相關說明

衛星	影像購買 (取得) 單位	價格資訊				
C 波段						
Sentinel-1	ESA SciHUB	免費				
RADARSAT -2	北極星測繪科技有限公司 電話：(02) 2553-2509 聯絡人：高小姐 代購費用為表格價格加 25%	RADARSAT-2 Digital Product：\$Cad（Per Scene）				
		Beam Mode	Single Look Complex（SLC）	Path Image（SGF, SCN, SCW, SCS, SCF）	Path Image Plus（SGX）	Map Image（SSG）
		Spotlight（1m）	\$6000	\$6000	\$6000	\$6000
		Ultra-Fine（3m）	\$5400	\$5400	\$5400	\$5400
		Wide Ultra-Fine（3m）	\$7800	\$7800	\$7800	\$7800
		Extra-Fine（5m）	\$7500	\$7500	\$7500	\$7500
		Multi-Look Fine（8m）	\$4200	\$4200	\$4200	\$4200
		Wide Multi-Look Fine（8m）	\$7500	\$7500	\$7500	\$7500
		Fine（8m）	\$3600-single pol \$3800-dual pol	\$3600-single pol \$3800-dual pol	\$3600-single pol \$3800-dual pol	\$3600-single pol \$3800-dual pol
		Wide Fine（8m）	\$7500-single pol \$7800-dual pol	\$7500-single pol \$7800-dual pol	\$7500-single pol \$7800-dual pol	\$7500-single pol \$7800-dual pol
		Fine Quad-pol（8m）	\$5400	N/A	\$5400	\$5400
		Wide Fine Quad-pol（8m）	\$7800	N/A	\$7800	\$7800
		Standard（25m）	\$3600-single pol \$3800-dual pol	\$3600-single pol \$3800-dual pol	\$3600-single pol \$3800-dual pol	\$3600-single pol \$3800-dual pol
		Extended High（25m）	\$3600	\$3600	\$3600	\$3600
		Extended Low（25m）	\$3600	\$3600	\$3600	\$3600
		Standard Quad-pol（25m）	\$5400	N/A	\$5400	\$5400
		Wide Standard Quad-pol（25m）	\$7800	N/A	\$7800	\$7800
		Wide（30m）	\$3600-single pol \$3800-dual pol	\$3600-single pol \$3800-dual pol	\$3600-single pol \$3800-dual pol	\$3600-single pol \$3800-dual pol
		Scansar Narrow（50m）	N/A	\$3600-single pol \$3800-dual pol	N/A	N/A
		Scansar Wide（100m）	N/A	\$3600-single pol \$3800-dual pol	N/A	N/A
		Ship Detection	N/A	\$5400	N/A	N/A
		Ocean Survenllance	N/A	\$3600-single pol \$3800-dual pol	N/A	N/A
L 波段						
ALOS-2	JAXA	免費 （胡植慶教授為 JAXA RA6 Principal Investigater）				
	北極星測繪科技有限公司 電話：(02) 2553-250 0928113144 聯絡人：高小姐 代購費用為表格價格加 25%	ALOS-2 Standard Products				
		Acquisition Mode（Polarimetry）	Standard Scene Size（km）	Resolution（m）	New Acquisitions	Archive
		Spotlight（single）	25 × 25	3 × 1	¥550,000	¥400,000
		Ultra-Fine（single/dual）	55 × 70	3 × 3	¥390,000	¥240,000
		High-Sensitive（single/dual）	55 × 70	6 × 4.3	¥390,000	¥240,000
		Fine（single/dual）	70 × 70	9.1 × 5.3	¥390,000	¥240,000
		High-Sensitive（Full Polarimetry）	40-50 × 70	5.1 × 4.3	¥390,000	¥240,000
		Fine（Full Polarimetry）	30 × 70	8.7 × 5.3	¥390,000	¥240,000
		ScanSAR nominal（28 Mhz）（single/dual）	350.5 × 355	47.5 × 77.7	¥230,000	¥80,000
		ScanSAR nominal（14 Mhz）（single/dual）	350.5 × 355	95.1 × 77.7	¥230,000	¥80,000
		ScanSAR wide（490 km）（single/dual）	489.5 × 355	44.2 × 56.7	¥230,000	¥80,000
		X 波段				
		COSMO-skyMed Standard Products				

COSMO-skyMed (4Sat)	創宇航太 (03) 668-7775 太空及遙測研 究中心 專線一：(03) 422-9332 專線二：李小姐- (03) 422-7151#57601 專線三：王小姐- (03) 422-7151#57602 代購費用為表格價格加 25%	Acquisition Mode (Polarimetry)	Standard Scene Size (km)	Resolution (m)	New Acquisitions	Archive
		Spotlight-2	10 × 10	1 × 1	€6,000	€3,000
		Stripmap HIMAGE	40 × 40	5 × 5 (multilook)	€3,000	€1,500
		Stripmap PingPong	30 × 30	20 × 20 (multilook)	€1,900	€950
		ScanSAR Wide	100 × 100	30 × 30 (multilook)	€1,650	€825
ScanSAR Huge		200 × 200	100 × 100 (multilook)			
TerraSAR-X Basic Image Products						
Image Product		Standard Scene Size (km)	Resolution (m)	New Acquisitions	Archive	
Staring Spotlight (ST)		4 × 3.7	Up to 0.25	€6,950	€3,475	
High Resolution Spotlight (HS)		10 × 5	Up to 1	€5,950	€2,975	
Spotlight (SL)	10 × 10	Up to 2	€4,250	€2,125		
StripMap (SM)	30 × 50	Up to 3	€2,950	€1,450		
ScanSAR (SC)	100 × 150	Up to 18.5	€1,750	€875		
Wide ScanSAR (WS)	Up to 270 × 200	Up to 40	€1,750	€875		

第二節 各類衛星影像產品種類、產品編號格式說明與線上數據

目錄

一、ERS-1/2

完整的 ERS SAR 產品與產品種類編號描述如表 2-3。每張影像的檔案名稱共有 62 個字，前面 10 個字為產品編號 (Product ID)，第 15 個字開始為影像拍攝日期與時間，格式為 YYYYMMDD_HHMMSS，其他資訊可參考表 2-4 ERS 檔案名稱說明。

表 2-3 ERS 產品種類與產品編號 (ESA, 2006)

Product Name	Description	Product ID
IM Level 0	Image mode level 0	SAR_IM__0P
SLC/IMS	Image mode single-look complex image	SAR_IMS_1P
PRI/IMP	Image mode precision image	SAR_IMP_1P
GEC/IMG	Image mode geocoded	SAR_IMG_1P

	image	
MR /IMM	Image mode medium resolution image (stripline)	SAR_IMM_1P
BRW/IMB	Image mode browse image (stripline)	SAR_IM__BP
APS	Simulated alternating polarisation single-look complex image	SAR_APS_1P
APP	Simulated alternating polarisation precision image	SAR_APP_1P
APG	Simulated alternating polarisation geocoded image	SAR_APG_1P
APM	Simulated alternating polarisation medium resolution image (stripline)	SAR_APM_1P
APB	Simulated alternating polarisation browse image (stripline)	SAR_APB_BP
WV Level 0	Wave mode level 0	SAR_WV__0P
WVI	Wave mode SLC imagette and imagette cross spectra	SAR_WVI_1P
WVS	Wave mode imagette cross spectra	SAR_WVS_1P
WVW	Wave mode imagette	SAR_WVW_2P

	ocean wave spectra	
--	--------------------	--

表 2-4 ERS 檔案名稱說明 (ESA, 2006)

產品名稱 AAA_AAA_AABCCCYYYMMDD_HHMMSS_000000000D***_00000_*****_0000.E* 範例： SAR_IMP_1PTPDE19951221_103430_00000015A000_00000_00001_0005.E1			
衛星資訊	格數	格數段落	範例中的段落
產品編號	10	AAA_AAA_AA	SAR_IMP_1P
處理階段標誌	1	B	T
起始序號	3	CCC	PDE
啟用日期	8	YYYYMMDD	19951221
分隔底線	1	_	_
啟用時間	6	HHMMSS	103430
分隔底線	1	_	_
持續時間	8	0000000000	00000015
相位標示	1	D	A
相位內的週期數	3	***	000
分隔底線	1	_	_
週期內的相對軌道	5	000000	00000
分隔底線	1	_	_
絕對軌道	5	*****	00001
分隔底線	1	_	_
產品類型的文件數	4	0000	0005
句號	1	.	.
衛星編號	2	E*	E1

藉由 EOLi (Earth observation Link : <http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.htm>

1) 中 ESA 地球觀測任務的服務，下載此網站上所提供的 EOLi-SA 軟體之後，可依時間與區域查詢符合使用者所需的 ERS 衛星影像 (圖 2-4)。

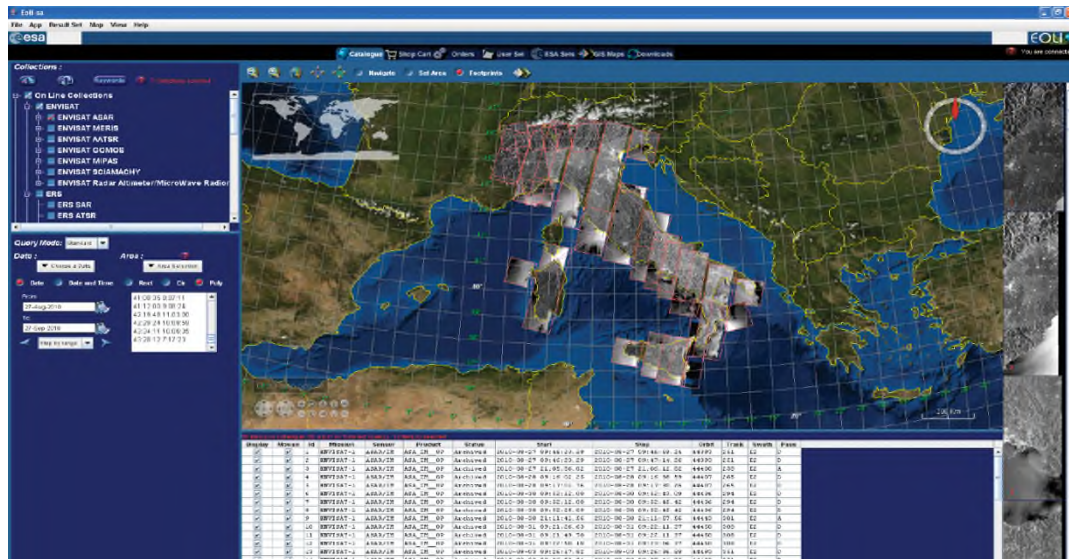


圖 2-4 EOLi-SA 軟體介面

二、ENVISAT

完整 ENVISAT SAR 產品與種類編號描述如表 2-5。影像的檔案名稱前面 10 個字為產品編號 (Product ID)，第 15 個字開始為影像拍攝日期與時間，格式為 YYYYMMDD_HHMMSS，其他資訊可參考表 2-6 檔案名稱說明。藉由 EOLi (Earth observation Link：<http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>) ESA 地球觀測任務服務，並下載網站上所提供的 EOLi-SA 軟體之後，可查詢使用者所需要時間與區域的 ENVISAT 衛星影像 (圖 2-4)。

表 2-5 ENVISAT 產品種類與產品編號 (ESA, 2012)

Product ID	Product Name	Nominal Resolution (m - Range x Azimuth)	Pixel Spacing (m)	Coverage (km - Range x Azimuth)	Equivalent No. Looks
ASA_IMP_1P	Image Mode Precision	30 × 30	12.5	56-100 × 100	>3
ASA_IMS_1P	Image Mode Single-Look Complex	9 × 6	natural*	56-100 × 100	1

ASA_IMM_1P	Image Mode Medium resolution	150 × 150	75	56-100 × 100	40
ASA_APP_1P	Alternating Polarisation Precision Image	30 × 30	12.5	41-106 × 100	>1.8
ASA_APS_1P	Alternating Polarisation Single-Look Complex	9 × 12	natural*	41-106 × 100	1
ASA_APM_1P	Alternating Polarisation Medium resolution	150 × 150	75	41-106 × 100	50
ASA_WSM_1P	Wide Swath Mode Medium resolution	150 × 150	75	400 × 400	11.5
ASA_WSS_1P	Wide Swath Mode Single-Look Complex	11.5-20 × 117	7.8x80	400 × 400	1
ASA_GM1_1P	Global Monitoring Mode Image	1000 × 1000	500	400 × 400	7-9
ASA_WVI_1P	Wave Mode Imagette and power spectrum	9 × 6	natural*	5 × 5	1
ASA_WVS_1P	Wave Mode Image Spectra	-	-	5 × 5	-
ASA_WVW_2P	Wave Mode Ocean Wave Spectra	-	-	5 × 5	-

*natural : natural pixel spacing in range and azimuth

表 2-6 ENVISAT 檔案名稱說明 (ESA, 2015)

filename = <product_ID> <processing_stage_flag><originator_ID><start_day> <“_”> <start_time> <“_”> <duration> <phase><cycle> <“_”> <relative_orbit> <“_”> <absolute_orbit> <“_”><counter><“.”> <satellite_ID> <.extension>		
Field	Size in Characters	Description

Product_ID	10	10 character string idenGeoTiffies sensor, mode and processing level. See Volume 4 for details. Characters not used are replaced with an underscore character.
Processing Stage flag	1	Set to “N” for Near Real Time product Set to “V” for fully validated (consolidated) product Set to “T” for Test product Set to “S” for a special product. Letters between N and V are assigned in order of level of consolidation (i.e., closer to V = better consolidated)
Originator ID	3	IdenGeoTiffication of the center which generated the file.
Start_day	8	In the case of instrument products it corresponds to the start day of the product from the UTC time of the first DSR. The format is YYYYMMDD. For Auxiliary files it may correspond to file creation date.
Start_time	6	Time coverage of the product expressed in seconds. If the duration of a product is not relevant information it will be set to “00000000”.
Duration	8	Time coverage of the product expressed in seconds. If the duration of a product is not relevant information it will be set to “00000000”.
Phase	1	Mission phase idenGeoTiffier
Cycle	3	Cycle number within the mission phase
Relative_orbit	5	Relative orbit number within the cycle at the beginning of the product
Absolute_orbit	5	Absolute orbit at the beginning of the product
Counter	4	Numerical wrap-around counter for quick file idenGeoTiffication. For a given product type the

		counter is incremented by 1 for each new product generated by the product originator (see note 1)
Satellite ID	2	E1 = ERS-1, E2 = ERS-2, N1 = ENVISAT-1
Extension	Variable	Optional field. Used only for distribution to users to indicate common archiving and compression standards if used (e.g., .gz, .Z, .tar, .tarZ, .gif, .jpeg, etc.)

三、RADARSAT

RADARSAT-1 衛星有 7 種不同影像拍攝模式（圖 2-5），產品種類與編號如表 2-7 所示，影像以 CEOS（Committee on Earth Observations Satellites）標準格式儲存。而 RADARSAT-2 衛星則多達 20 種不同影像拍攝模式（圖 2-6），主要產品種類區分為 9 個分類（表 2-8），每一個產品由一個產品資訊檔、數個影像資訊檔與相關支援檔案所組成，其中產品資訊檔為 xml 格式，拍攝模式的欄位名稱為 beamModeMnemonic，各種拍攝模式的代碼如表 2-9 所示。RADARSAT-1 與 RADARSAT-2 影像皆可藉由 NRA（Natural Resources Canada）網站（https://neodf.nrcan.gc.ca/neodf_cat3/index.php?lang=en），設定使用者所需要的時間、區域、影像種類來搜尋。

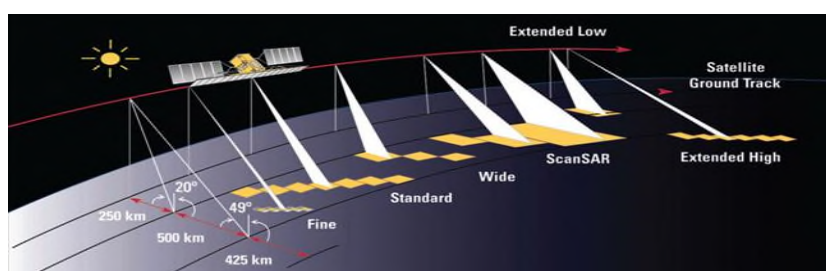


圖 2-5 RADARSAT-1 衛星拍攝組態示意圖（資料來源：CSA 網站 <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/search/images/watch.asp?id=460>）。

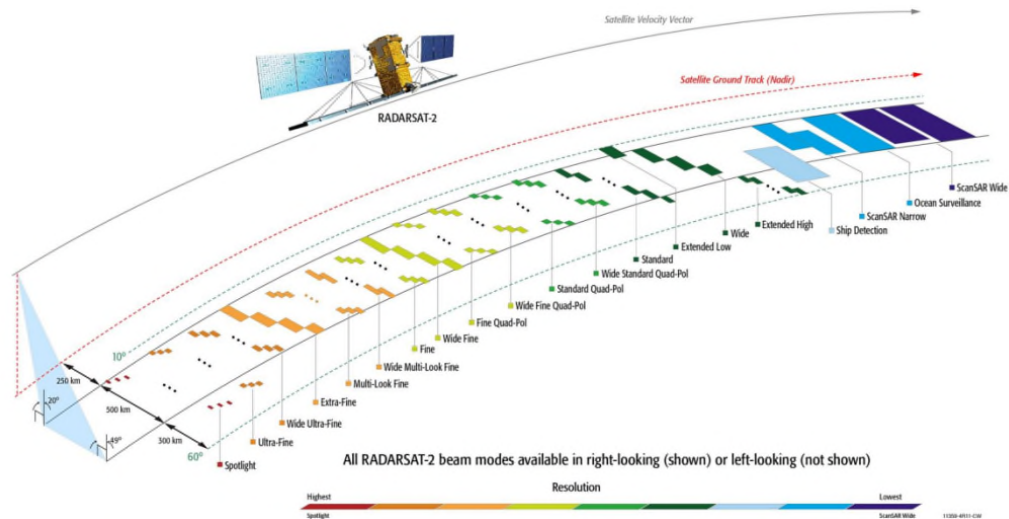


圖 2-6 RADARSAT-2 衛星拍攝組態示意圖（資料來源： RADARSAT-2 MDA

https://mdacorporation.com/docs/default-source/technical-documents/geospatial-services/52-1238_rs2_product_description.pdf?sfvrsn=10) 。

表 2-7 RADARSAT-1 產品種類與代碼（RSI, 2004）

Processing Level	Product type in RADARSAT	Product Type in RSI Terminology	Product Level in Network Station CerGeoTiffication
RAW (signal data)	RAW	RAW signal data	Level 0
Georeferenced data (Satellite path oriented)	SLC	Single Look Complex	Level 1
	SGF	Path Image	
	SGX	Path Image Plus	
	SCN	ScanSAR Narrow	
	SCW	ScanSAR Wide	
Geocoded data	SSG	Map Image	Level 2

(Map oriented)	SPG	Precision Map Image	
------------------	-----	---------------------	--

表 2-8 RADARSAT-2 產品種類與代碼 ([RSI, 2016a](#))

Product Types		Abbreviation	Processing Level	Product Descriptive Name
Slant Range	Single Look Complex	SLC	Georeferenced	Single Look Complex
Ground Range	SAR Georeferenced Extra	SGX	Georeferenced	Path Image Plus
	SAR Georeferenced Fine	SGF	Georeferenced	Path Image
	ScanSAR Narrow Beam	SCN	Georeferenced	Path Image
	ScanSAR Wide Beam	SCW	Georeferenced	Path Image
	ScanSAR Fine	SCF	Georeferenced	Path Image
	ScanSAR Sampled	SCS	Georeferenced	Path Image
Geocorrected	SAR systematic Geocorrected	SSG	Systematic Georeferenced	Map Image
	SAR Precision Geocorrected	SPG	Precision Georeferenced	Precision Map Image

表 2-9 RADARSAT-2 拍攝模式代碼 (RSI, 2016b)

Type	Code	Type	Code
Standard	Sn	Wide Multi-Look Fine	MFnW
Wide	Wn	Ultra-Fine	Un
Extended High	EHn	Wide Ultra-Fine	UnWn
Extended Low	Eln	ScanSAR Narrow	SCNA, SCNB
Fine	Fn	ScanSAR Wide	SCWA, SCWB
Wide Fine	F0Wn	Spotlight	SLAn,SLBn
Std Quad-Pol	SQn	Ocean SURVEILLANCE	OS
Wide Std Quad-Pol	SQnW	Detection of Vessels	DV
Fine Quad-Pol	FQn	Extra Fine	XF0
Wide Fine Quad-Pol	FQnW	MODEX	MX
Multi-Look Fine	MFn	TOPS	PS

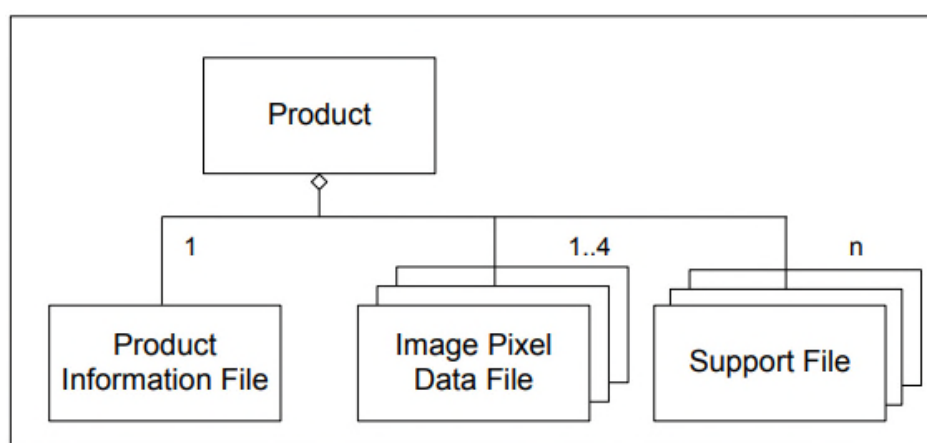


圖 2-7 RADARSAT-2 產品檔案組成 (RSI, 2016b)

National Earth Observation Data Framework Catalogue

Keyboard users: Use the arrow keys to move the map and use plus and minus to zoom.

150 results from a total of 3697 returns

Footprint on the map	Satellite	Acq Start Date	Beam	Polarization	Metadata	Type	Image ID	Quicklook on map	Zoom
☒	RADARSAT-1	2012-06-17 02:29:44	ScanSAR Wide A (W1 W2 W3 S7)	HH	See Meta	raw		Not Available	
☐	RADARSAT-1	2012-06-13 14:51:18	Standard 4	HH	See Meta	raw		Not Available	
☐	RADARSAT-1	2012-	ScanSAR	HH	See Meta	raw		Nnt	

圖 2-8 RADARSAT 衛星影像搜尋網頁 https://neodf.nrcan.gc.ca/neodf_cat3/index.php?lang=en。

四、Sentinel-1

Sentinel-1 分為四種拍攝模式 Stripmap、Interferometric Wide Swath Mode、Extra Wide Swath Mode 與 Wave，可依據處理等級與解析度再分為不同的產品（圖 2-9 與圖 2-10），檔案名稱編碼由：衛星任務、拍攝模式、產品種類、解析度、處理等級、極化、拍攝日期與時間、軌道資訊等所組成（圖 2-11）。Sentinel 的資料可以免費在 ESA SciHUB 網站（<https://scihub.copernicus.eu/>）中搜尋與下載。

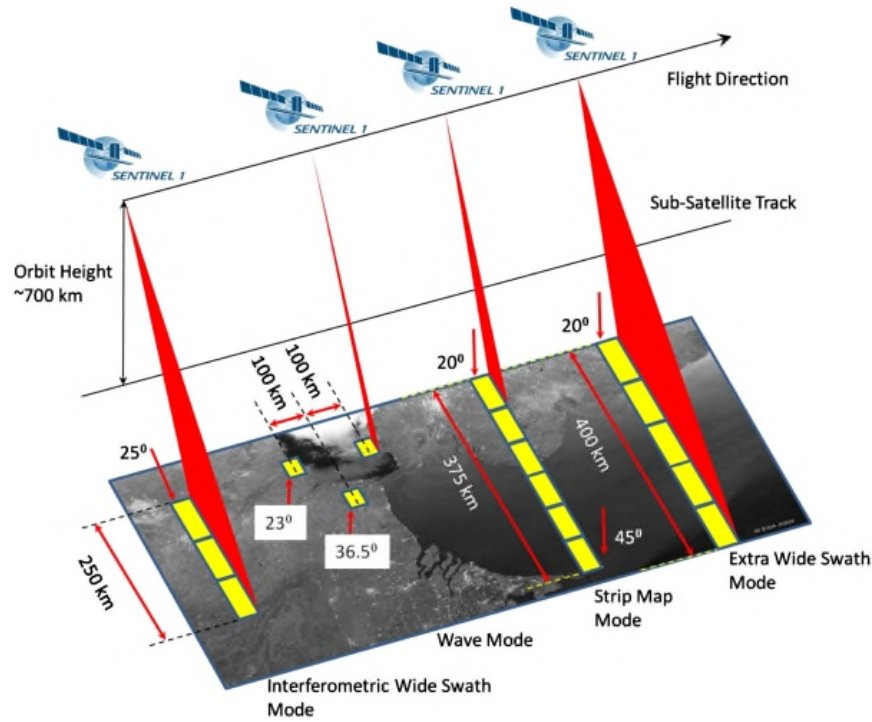


圖 2-9 Sentinel-1 產品拍攝模式（資料來源：ESA Sentinel-1 SAR User Guides <https://Sentinel.esa.int/web/Sentinel/user-guides/Sentinel-1-sar/acquisition-modes>）。

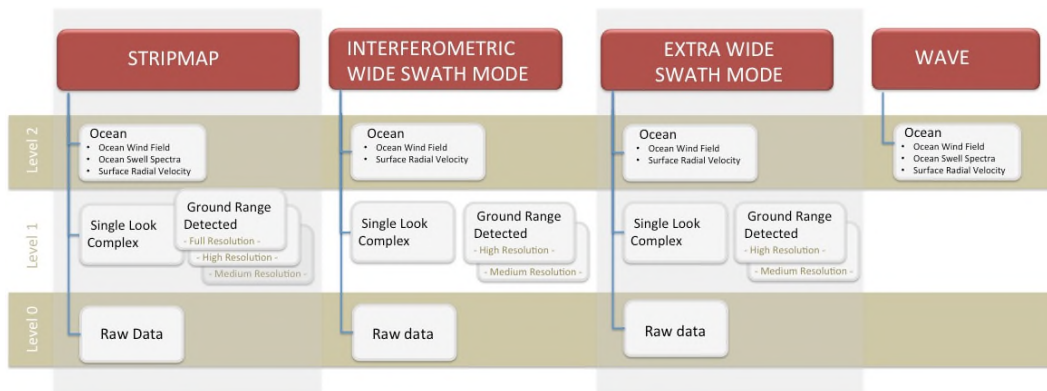


圖 2-10 Sentinel-1 產品種類與等級區分（資料來源：ESA Missions Sentinel-1 <https://Sentinel.esa.int/web/Sentinel/missions/Sentinel-1/data-products>）。

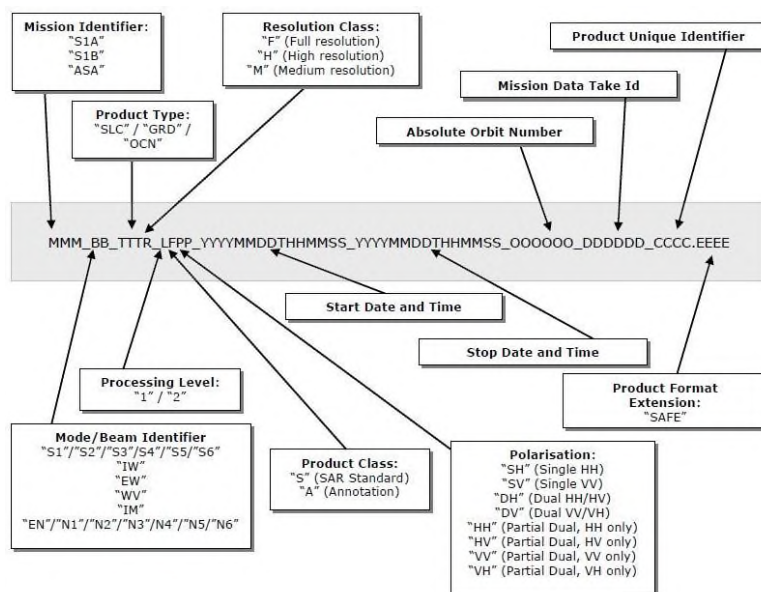


圖 2-11 Sentinel 產品檔案名稱編碼說明（資料來源：ESA Sentinel-1 SAR Technical Guides <https://earth.esa.int/web/Sentinel/technical-guides/Sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-product-formatting>）。

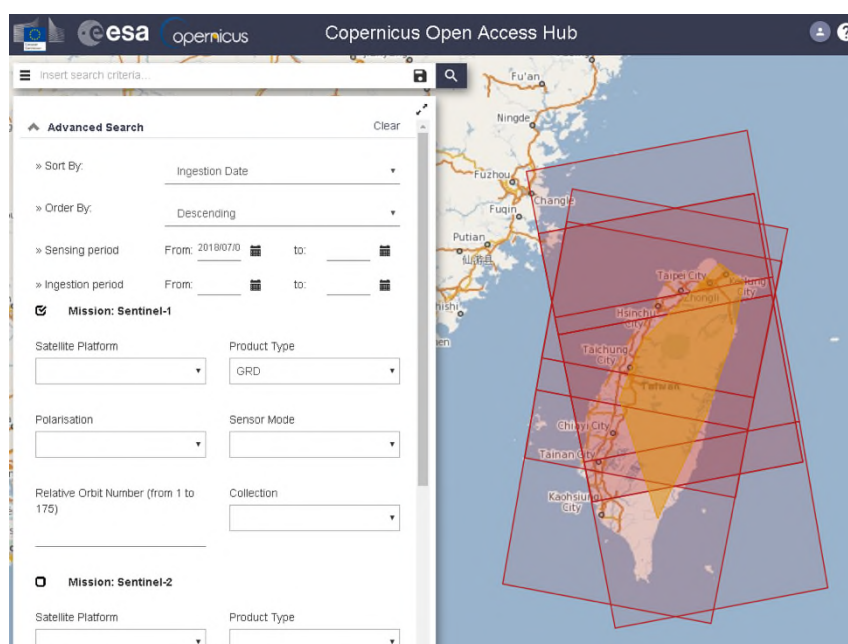


圖 2-12 Sentinel 衛星影像搜尋網頁 <https://scihub.copernicus.eu/>。

五、JERS-1

JERS-1 產品分為四種，包含 RAW、Precision Image、Single Look Complex、Medium Resolution Image，其編碼分別為：JSA_RAW_0P、JSA_PRI_1P、JSA_SLC_1P 與 JSA_IMM_1P，產品檔案名稱由：衛星任務、產品種類、拍攝時間、軌道資訊等所組成（表 2-10）。

2018 年 1 月 ESA 宣布 JERS SAR Level1 影像可免費下載，但需要經過註冊與認證（<https://earth.esa.int/web/guest/jers-1-news/-/article/jers-1-sar-and-optical-data-available>）。目前可由 NASA EARTHDATA 網站（<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>）搜尋影像資料。

表 2-10 JERS-1 產品檔案名稱編碼（ESA, 2015）

filename = <Platform>_<OPER>_<product_ID>_<Start_time>_<End_time>_<abs_orbit>_<track_number>_<frame_node_number>_<crc_code>		
Field	Size	Description
Platform	3	JE1 （JERS-1） or SE1 （SEASAT）
Product_ID	10	product code JSA_RAW_0P
Start_time	15	YYYYMMDDTHHMMSS
End_time	15	YYYYMMDDTHHMMSS
Abs_orbit	6	Absolute orbit number
Track_number	4	Track number
Frame_node_number	4	Node number at centre of image frame
Crc_code	4	4-digit random hex string as unique idenGeoTiffier

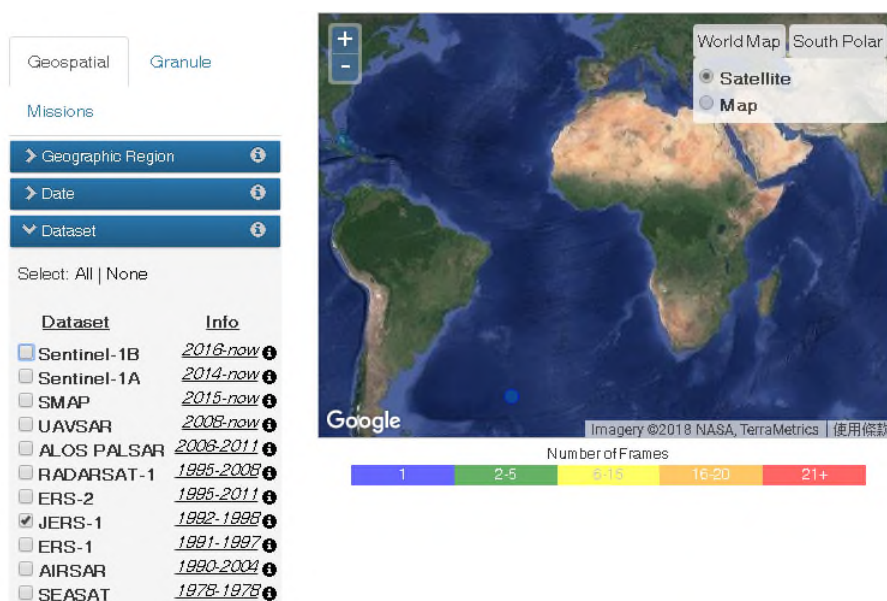


圖 2-13 JERS-1 衛星影像搜尋網頁 <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>。

六、ALOS/ALOS-2

ALOS 提供三種拍攝模式：Fine 模式、ScanSAR 模式與 Polarimetric 模式，Fine 模式又可分為高解析單偏極與雙偏極，詳細產品編號如表 5-11 所示。產品的檔案名稱編碼為 ALPSR<swath mode><orbit number><frame number>- <obs mode><level>< processing option code ><projection><asc/desc>.tar，各項參數之說明如表 2-12 所示。

ALOS-2 提供三種拍攝模式：Spotlight、Stripmap 與 ScanSAR，各模式再依據解析度、掃描寬度與極化，區分為不同的產品（圖 2-14，表 2-13）。產品檔案名稱的編碼格式為 IMG-XX-ScenID-ProductID（詳見表 2-14）。以 IMG-HH-ALOS2132560470-161105-HBQR1 為範例，代表影像極化：HH、衛星：ALOS-2、軌道參數：13256、Scene frame：0470、影像時間：20161105、影像產品：High-sensitive mode Full (Quad.) polarimetry、觀測方向：右視、產品等級：Level 1.1。

ALOS 與 ALOS-2 的影像都可以藉由 JAXA 網頁 <https://auig2.jaxa.jp/ips/home> 來搜尋資料（圖 2-15）。

表 2-11 ALOS/PALSAR 產品種類編碼說明 (ESA, 2013)

Order Type	PALSAR mode	Corresponding ESA Product Type	Description
RAW	All	RAW_0P	Unfocussed raw SAR data
SLC	FBS	FBS_SLC_1P	Single look complex (SLC) slant range, products. Side-lobe reduction is not applied.
	FBD	FBD_SLC_1P	
	PLR	PLR_SLC_1P	
	DN	DN_SLC_1P	
GDH	FBS	FBS_GDH_1P	Multi-looked, detected ground range, products. Side-lobe reduction is applied.
	FBD	FBD_GDH_1P	
	PLR	PLR_GDH_1P	
	DN	DN_GDH_1P	
	WB1	WB1_GDH_1P	SCANSAR products processed to 3 bursts per pixel (3 independent azimuth looks) . Side-lobe reduction is applied.
GDL	FBS	FBS_GDL_1P	Multi-looked, detected ground range, low resolution products. Side-lobe reduction is applied. Generated by processing to GDH parameters and then spatially averaging by a factor of 12 (24 for FBS_GDH) to provide a ground range
	FBD	FBD_GDL_1P	
	PLR	PLR_GDL_1P	
	DN	DN_GDL_1P	

			spatial resolution ~ 150m and an ENL>100.
GEC	FBS	FBS_GEC_1P	Side-lobe reduction is applied.
	FBD	FBD_GEC_1P	
	PLR	PLR_GEC_1P	
	DN	DN_GEC_1P	
	WB1	WB1_GEC_1P	SCANSAR products processed to 3 bursts per pixel (3 independent azimuth looks) . Side-lobe reduction is applied.
GDH GDL GEC	PLR	PLP_GDH_1P PLP_GDL_1P PLP_GEC_1P	Multi-looked, detected ground range, low resolution products. Side-lobe reduction is applied. Generated by processing to GDH parameters and then spatially averaging by a factor of 12 (24 for FBS_GDH) to provide a ground range spatial resolution ~ 150m and an ENL>100.

*FBS : single polarization;

FBD : dual polarization;

PLR : quad polarization;

WB1,WB2 : SacanSAR wide bearm;

DN : digital number

表 2-12 ALOS/PALSAR 產品檔案名稱編碼 (ESA, 2013)

filename = ALPSR<swath mode><orbit number><frame number>- <obs mode><level>< processing option code ><projection><asc/desc>.tar		
Field	Size	Description
< swath mode >	1	S – wideswath P - otherwise
< orbit number >	5	Absolute orbit number
<frame number>	4	Frame number
<obs mode>	1	H – High resolution mode W – Wide observation mode D – Direct downlink P – Polarimetry mode C – Calibration mode
<level>	3	1.0 (RAW) , 1.1 (SLC) , 1.5 (Detected)
<processing option code>	1	1-character idenGeoTiffier -see table below
<projection>	1	U – Universal Transverse Mercator P – Universal Polar Stereographic “-“ – Not geocoded
<asc/desc>	1	A – Ascending D - Descending

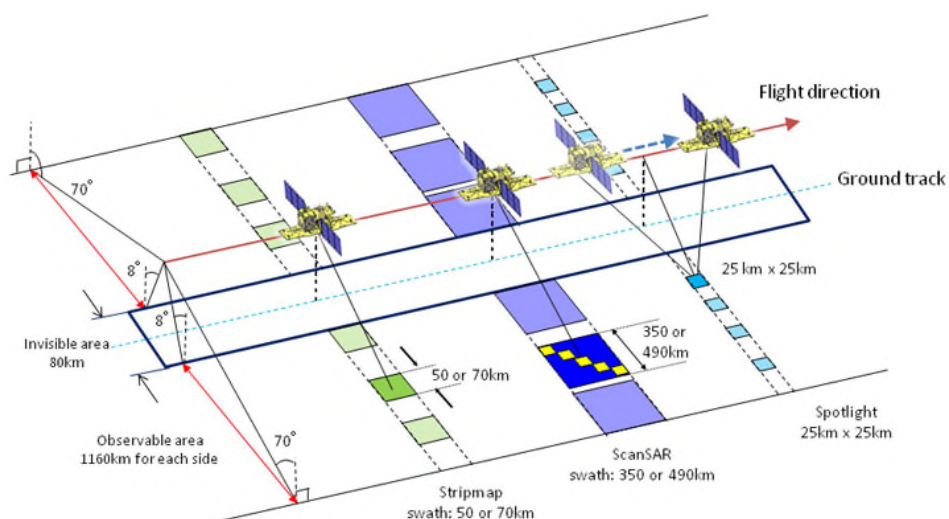


圖 2-14 ALOS-2 影像拍攝模式 (JAXA ALOS-2 Overview [http :
//www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm)) 。

表 2-13 ALOS-2 影像產品種類與參數 (JAXA_ALOS2)

Observation mode	Spotlight	Stripmap					ScanSAR		
		Ultrafine (3m)	High sensitive (6m)		Fine (10m)		Normal	Wide	
Bandwidth (MHz)	84	84	42		28		14	28	14
Resolution (m)	3×1	3	6		10		100 (3 looks)		60
Incidence angle (deg.)	8 - 70	8 - 70	8 - 70	20 - 40	8 - 70	23.7	8 - 70		8 - 70
Swath (km)	25×25	50	50	40	70	30	350 (5 scans)		490 (7 scans)
Polarization*	SP	SP/DP	SP/DP /CP	FP	SP/DP /CP	FP	SP/DP		SP/DP
NESZ (dB)	-24	-24	-28	-25	-26	-23	-26	-23	-26
S/A (dB)	Rg	25	25	23	23	25	20	25	20
	Az	20	25	20	20	23		20	20

*SP : HH or HV or W; DP : HH+VH or W+VH; FP : HH+HV+VH+VV; CP : compact pol. (experimental)

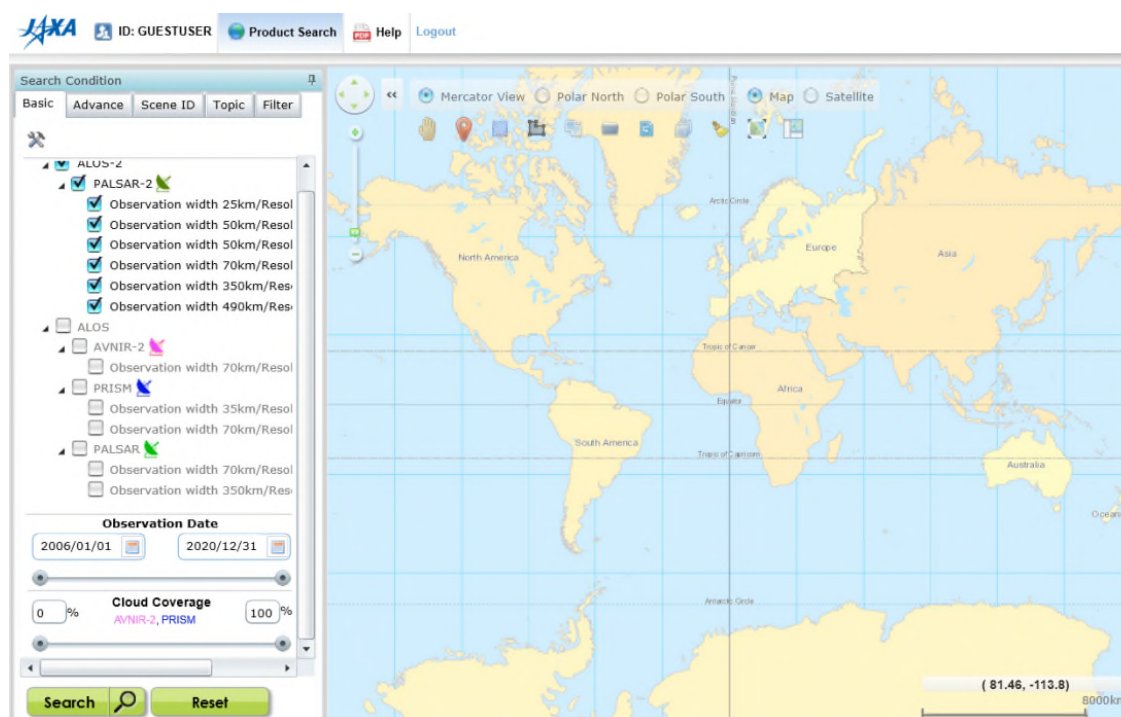
圖 2-15 ALOS 與 ALOS-2 衛星影像搜尋網頁 <https://auig2.jaxa.jp/ips/home>

表 2-14 ALOS-2 產品檔案名稱編碼 (JAXA, 2014)

filename = IMG-XX-ScenID-ProductID			
Field	Description		
XX	Polarization （Transmission and Receiving） HH ： Horizontally polarized wave transmission / Horizontally polarized wave receiving HV ： Horizontally polarized wave transmission / Vertically polarized wave receiving VH ： Vertically polarized wave transmission / Horizontally polarized wave receiving VV ： Vertically polarized wave transmission / Vertically polarized wave receiving		
Scene ID	AAAAAABBBBBBCCCC-YYMMDD		
	AAAAA	Satellite ID = 'ALOS2'	
	BBBBB	Orbit accumulation number of a scene center	
	CCCC	Scene frame number of a scene center	
	-	Separator （hyphen）	
	YYMMDD	Observation date of a scene center	
Product ID	DDDEFFFGHI		
	DDD	Observation Mode	
		SBS	Spotlight mode
		UBS	Ultra-fine mode Single polarization
		UBD	Ultra-fine mode Dual polarization
		HBS	High-sensitive mode Single polarization
		HBD	High-sensitive mode Dual polarization

		HBQ	High-sensitive mode Full (Quad.) polarimetry
		FBS	Fine mode Single polarization
		FBD	Fine mode Dual polarization
		FBQ	Fine mode Full (Quad.) polarimetry
		WBS	ScanSAR nominal [14MHz] mode Single polarization
		WBD	ScanSAR nominal [28MHz] mode Single polarization
		WWS	ScanSAR nominal [28MHz] mode Single polarization
		WWD	ScanSAR nominal [28MHz] mode Dual polarization
		VBS	ScanSAR wide mode Single polarization
		VBD	ScanSAR wide mode Dual polarization
	E	Observation Direction (L : Left looking, R : Right looking)	
	FFF	Processing Level (1.1 : Level 1.1, 1.5 : Level 1.5, 3.1 : Level 3.1)	
	G	Processing Option (G : Geo-Coded, R : Geo-Reference, _ : Not specified (underscore))	
	H	Map Projection (U : UTM, P : PS, M : MER, L : LCC, _ : Not specified)	
	I	Orbit Direction (A : Ascending, D : Descending)	

七、COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed 影像拍攝模式分為 Stripmap、Scansar 與 Spotlight 三種，區分為標準產品與高階處理產品，其中標準產品再根據處理的程度又可區分為下列 5 種產品：

- Level O : RAW, Received SAR signal;
- Level 1A : SCS, Single look, Complex, Slant Range;
- Level 1B : DGM, Detected, Ground project, Multilooked;
- Level 1C : GEC, Geocoded Ellipsoid Corrected;
- Level 1D : GTC, Geocoded Terrain Corrected.

高階處理產品則分為：

- Quicklook : reduced spatial resolution image for browsing purposes
- Co-registered products : a set of image layers coregistered together (i.e. merged in vertical direction) , for interferometry, change detection and so on
- Mosaiked products : a set of image joined together (i.e. merged in horizontal direction) , for large spatial coverage representation

Speckle filtered image : an image with an increased equivalent number of looks (ENL)

Interferometric products (interferometric coherence and phase) : in support of the interferometric applications

DEM : Digital elevation data and related height error map obtained with interferometric techniques

產品檔案名稱的編碼格式為 CSKS<i>_<YYY_Z >_<MM>_<SS>_<PP>_<s><o>_<D><G>_<YYYYMMDDhhmmss>_<YYYYMMDDhhmmss>.h5 (詳見表 2-15)。

COSMO-SkyMed 的影像可以藉由 e-geos 網頁 (<http://catalog.e-geos.it/#query>) 設定條件來搜尋影像 (圖 2-16)。

表 2-15 COSMO-SkyMed 產品檔案名稱編碼 (ASI, 2009)

filename = CSKS<i>_<YYY_Z >_<MM>_<SS>_<PP>_<s><o>_<D><G>_<YYYYMMDDhhmmss>_<YYYYMMDDhhmmss>.h5		
Code	Meaning	Allowed values
<i>	IdenGeoTiffier of the satellite within the SAR constellation that acquired the scene	1 2 3 4
<YYY_Z >	Product Type	Standard Products : RAW_B SCS_B SCS_U DGM_B GEC_B GTC_B
<MM>	Instrument Mode used during the acquisition	HI (Himage) PP (PingPong) WR (WideRegion) HR (HugeRegion) S2 (Spotlight 2)
<SS>	IdenGeoTiffier of the swath (or subswath combination in the case of ScanSAR mode) used for the data acquisition	[0A-0B-01-...-24] for Himage Mode [0A-0B-01-...-23] for PingPong Mode [00-...-07] for WideRegion Mode [00-...-05] for HugeRegion Mode [0A-...-0D-01-...-33] for Enhanced Spotlight Mode
<PP>	Polarizations used during the acquisition	HH = Horizontal Tx/Horizontal Rx for Himage, ScanSAR and Spotlight modes VV = Vertical Tx/

		Vertical Rx for Himage, ScanSAR and Spotlight modes HV = Horizontal Tx/ Vertical Rx for Himage, ScanSAR VH = Vertical Tx/ Horizontal Rx for Himage, ScanSAR CO = Co-polar acquisition (HH/VV) for PingPong mode CH = Cross polar acquisition (HH/HV) with Horizontal Tx polarization for PingPong mode CV = Cross polar acquisition (VV/VH) with Vertical Tx polarization for PingPong mode
<S>	IdenGeoTiffier of the Look Side	L = LEFT R = RIGHT
<O>	IdenGeoTiffier of the Orbit Direction	A = Ascending D = Descending
<D>	Delivery Mode	F = Fast Delivery mode S = Standard Delivery mode
<G>	State of the Selective Availability during the acquisition, affecting Orbital Data derived by GPS Instrument	N = ON F = OFF
<YYYYMMDDhhmmss>	Sensing Start Time rounded to the closest integer second	YYYY = year MM = month DD = day of the month hh = hour mm = minute ss = second
<YYYYMMDDhhmmss>	Sensing Stop Time rounded to the closest integer second	As for sensing start time

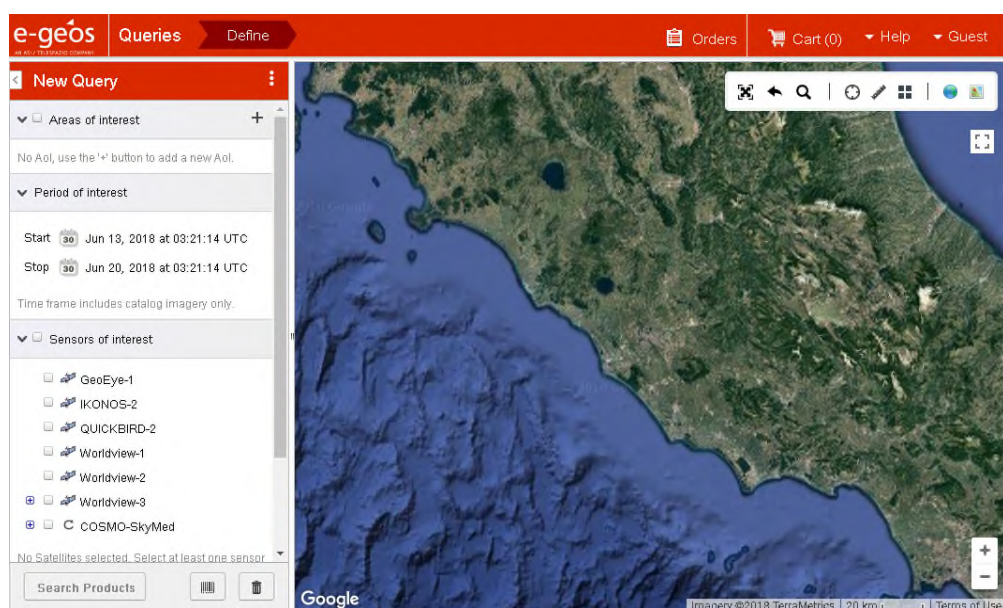


圖 2-16 COSMO-SeyMed 衛星影像搜尋網頁 <http://catalog.e-geos.it/#query> : [undefined](#)

八、TerraSAR-X

TerraSAR-X 有三種拍攝模式：Spotlight、Stripmap 與 Scansar，再根據空間解析度與掃描寬度又可再分為主要 7 種影像模式（表 2-16）。TerraSAR-X 的產品格式如圖 2-17 所示，最上層資料夾名稱格式為 TSX1_SAR__AAA_BBBB_CC_D_EEE_XXXXXXXXTxxxxxx_yyyyyyy yTyyyyyy，而影像檔案名稱格式為 IMAGE_FF_GGG_[beam ID]（詳見表 2-17）。TerraSAR-X 的影像都可以藉由 AIRBUS 網頁（<https://terrasar-x-archive.terrasar.com/>）設定條件來搜尋影像（圖 2-18）。

表 2-16 TerraSAR-X 影像種類與參數（Buckreuss et al, 2009）

Imaging Mode	Standard Scene Size (km)	Maximum Acquisition Length (km)	Slant Range Resolution (m)	Azimuth Resolution (m)	Polarisation	Full Performance Range (°)
Staring SpotLight (ST)	4 × 3.7	3.7	0.6	0.24	Single (VV or HH)	20° - 45°
HighRes SpotLight 300 MHz (HS300)	10 × 5	5	0.6	1.1	Single (VV or HH)	20° - 55°
HighRes SpotLight (HS)	10 × 5	5	1.2	1.1	Single (VV or HH)	20° - 55°
			1.2	2.2	Dual (HH & VV)	
SpotLight (SL)	10 × 10	10	1.2	1.7	Single (VV or HH)	20° - 55°
			1.2	3.4	Dual (HH & VV)	

StripMap (SM)	30 × 50 Single pol	1650	1.2	3.3	Single (VV or HH)	20° - 45°
	15 × 50 Dual pol		1.2	6.6	Dual (HH & VV, HH & HV, or VV and VH)	
ScanSAR (SC)	100 × 150	1650	12 (at 150 MHz)	18.5	Single (VV or HH)	20° - 45°
Wide ScanSAR (WS)	270 × 200	1550	Depending on range bandwidth 1.7 - 3.3	40	Single (VV, HH, HV or VH)	15.6° - 49°

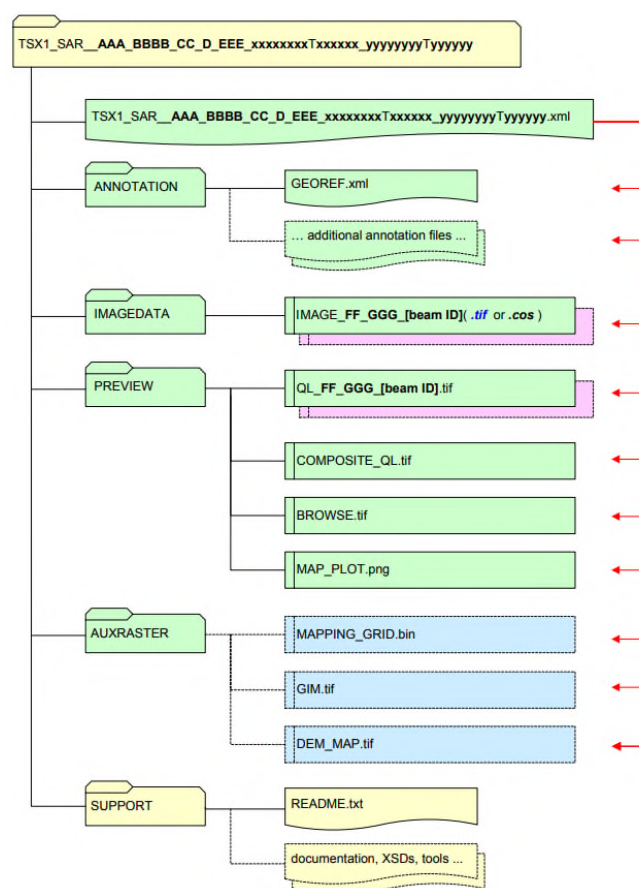


圖 2-17 TerraSAR-X 產品資料結構 (DLR, 2007)



圖 2-18 TerraSAR-X 衛星影像搜尋網頁 <https://terrasar-x-archive.terrasar.com/>

表 2-17 TerraSAR-X 產品檔案名稱編碼說明 (DLR, 2007)

最上層資料夾名稱= TSX1_SAR__AAA_BBBB_CC_D_EEE_xxxxxxxxTxxxxxx_yyyyyyyyTyyyyyy ,			
Constituent ID	Constituent Name	Value Range	Remark
-	Mission	TSX1	Fixed
-	Sensor	SAR_	Fixed
AAA	Product variant	SSC, MGDMGEC, EEC	Product class
BBBB	Resolution variant	SE__,RE__	Product sub-class : spatially or radiometrically enhanced. No entry (____) for sscs.

CC	Imaging mode	SM, SC, SL, HS	Example : HS for High-Resolution spotlight
D	Polarisation mode	S, D, T, Q	Example : T for TWIN polarization mode
EEE	Antenna receive configuration	SRA, DRA	SRA for single-receive antenna DRA for dual-receive antenna
xxxxxxx xTxxxxxxx	UTC start time	-	Format : yyyyymmddthhm mss
yyyyyyy yTyyyyyy	UTC stop time	-	
影像檔案名稱= IMAGE_FF_GGG_[beam ID]			
FF	Polarization channel image layer	HH, HV, VH, VV	TxRx polarization
GGG	Geometric (antenna receive channel) image layer	SRA, FWD, AFT	Geometric layers for DRA/ATI mode (forward and after) . Quadpol data is processed with the “SRA” geometric phase center offset (thus 0)
[beam ID]	Elevation beam (configuration) ID	e.g. strip_007, scan_009, ...	As taken from the order file for detected products (e.g. Scan_009, strip_009, stripfar_009) . IdenGeoTi ffyng the different image

			layers for each subswath of (experimental) complex scansar products (e.g. Strip_009, strip_010, strip_011 and strip_012) .
--	--	--	--

第三節 各類雷達影像分析與功能評估

一、堰塞湖與洪水溢淹

雷達影像不受晝夜影響且不易受大氣雲霧干擾、有較大的影像面積與對同一地點較短的再訪周期，並且對水體表面屬於鏡面散射，其背向散射訊號非常低的特徵，在洪泛區辨識的分析上是非常好的工具。

但在分析上仍會受到雷達波長的差異，有不同的應用。較小的波長可以相對有較高解析度，然而短波長容易受到水氣干擾，在颱風豪雨期間會有資料品質的問題，長波長雷達影像則相對不容易受到水氣干擾(圖 2-19 與圖 2-20)。另外，當水表面受到風的作用或者水流的作用，並非完全平坦的情況下，相對於短波長雷達波的粗糙度較大，會有較大的背向散射訊號，可能會導致水體辨識的誤差，這種情況下的水面對於長波長雷達波的粗糙度較短波長雷達波小，鏡面散射的效應更明顯，較容易辨識水體，不受水面起伏影響(圖 2-21)。但如果要區分出洪泛區域中水體與泥濘的差異，短波長的雷達波會具有較高的辨識度(圖 2-22)。考慮雷達波長對於水體的反應差異，在堰塞湖與洪水溢淹的判釋上的雷達影像選擇，L 波段優於 C 波段，而 C 波段優於 X 波段。

雷達影像依據訊號發射與接收時不同，分為 4 種不同的偏極模式(Polarization Mode)，HH：水平發射與水平接收、VV：垂直發射與垂直接收、HV：水平發射與垂直接收、VH：垂直發射與水平接收。不同的極化對於地表地物的反應也有所差異，[Henry et al. \(2006\)](#) 的研究指出，平行極化(HH,VV)相較於交叉極化(HV,VH)對於水體的辨識更有優勢，但由於 HV 對於水面的起伏的粗糙度比較不敏感，因此在實際應用上，又比 VV 更適合應用於水體的辨識(表 2-18)，而且在同一張區域影像中，HH 極化的數值直方圖分布比其他極化更廣，意指 HH 極化在不同類別的區分更具有優勢(圖 2-23)。

綜合以上資訊，在堰塞湖與洪水溢淹的辨識中所需要選擇的雷達影像，以 L 波段優先，C 波段次之，X 波段最後，而使用的極化影像則以 HH 優先，VH、HV 次之，VV 最後。由於作為水體辨識的資料為雷達影像的背向散射值，並不

需要原始的相位資訊，因此在影像處理等級的選擇上，可以選擇多觀點振幅影像產品，或正射振幅影像產品。但如需快速取得影像，仍可購買單觀點複數影像產品，再藉由軟體處理，則可得到背向散射值做為水體之分析。

	Mapping+ reconnaissance intelligence		Hydrology+ land cover/use		Flood under vegetation Biomass		Biomass DEM under forest	
Bands	Ka	K	Ku	X	C	S	L	P
Frequency (GHz)	40-26.5	26.5-18	18-12.5	12.5-8	8-4	4-2	2-1	1-0.3
Wavelength (cm)	0.75-1.1	1.1-1.67	1.67-2.4	2.4-3.75	3.75-7.5	7.5-15	15-30	30-100
Polarization	HH, VV, HV, VH							

圖 2-19 ESA 建議雷達影像各波段適用的分析

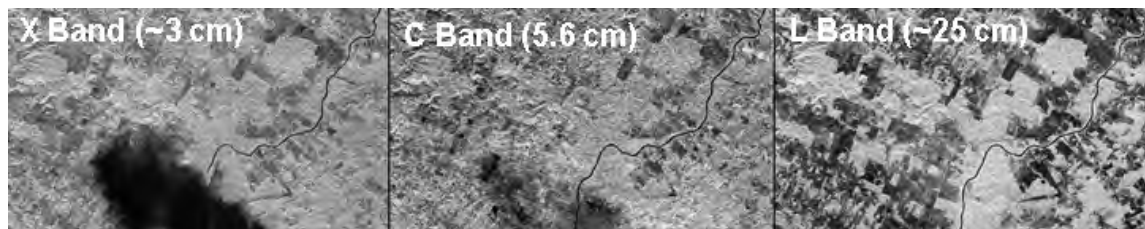


圖 2-20 不同波段雷達影像在雲與水氣干擾的情況（資料來源：https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=226458&name=DLFE-2124.pdf）

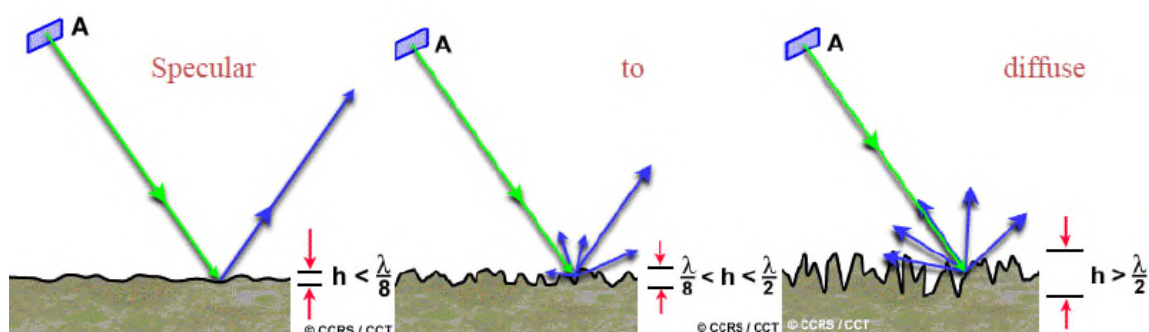


圖 2-21 反射面起伏程度對於不同雷達波長的反應不同。 h 為反射面起伏高度， λ 為雷達波長（資料來源：資料來源：ESA Advanced training course https://earth.esa.int/documents/10174/643004/D4T1a_yesou_LTC2013.pdf）

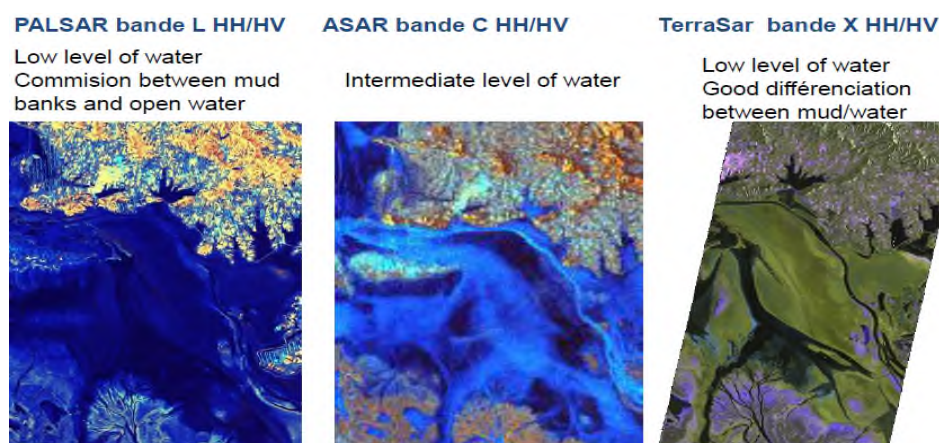


圖 2-22 不同波長之雷達影像對於水體與泥濘的分辨率（資料來源：ESA

Advanced training course [https :](https://earth.esa.int/documents/10174/643004/D4T1a_yesou_LTC2013.pdf)

[//earth.esa.int/documents/10174/643004/D4T1a_yesou_LTC2013.pdf](https://earth.esa.int/documents/10174/643004/D4T1a_yesou_LTC2013.pdf))

表 2-18 雷達影像偏極模式與地物辨識的適用性（Henry et al., 2006）

	HH	HV	VV
Forest	+	+++	++
Fields	++	+++	++
Urban areas	+++	-	++
Water bodies	+++	++	+

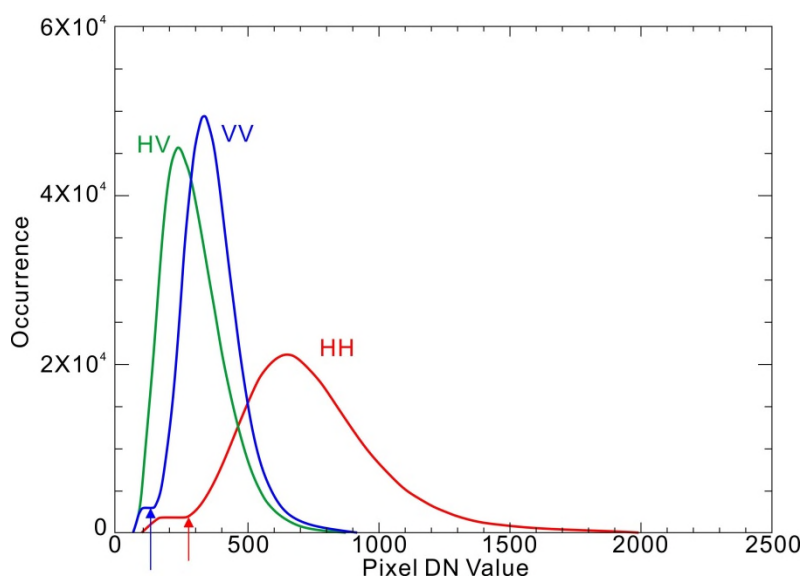


圖 2-23 HH, HV 與 VV 極化影像於相同區域內的數值分布。箭頭代表區分水體的門檻值（Henry et al., 2006）。

二、崩塌地

颱風豪雨後的崩塌地辨識理論上有三種方式可以進行分析，第一種是利用事件前後的地物散射特性變化（植被→裸地），需要全極化雷達影像來計算植被指數（Radar Vegetation Index, RVI）或 H/alpha 極化分解的分析，獲得亂度之指標（H），才能進行分析（[陳錕山，2010](#)；[極隼科技股份有限公司，2012](#)；[Plank et al., 2016](#)）。第二種方式需要先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），先進行監督式訓練，找出各個類別（例如：植被、裸地、建物等）的參數模型，再進行不同時期的類別變異偵測（[陳錕山，2010](#)；[Novresiandi and Nagasawa, 2017](#)）。第三種是利用前後期雷達影像背向散射係數差異（backscattering coefficient difference）與強度相關（Intensity correlation），來進行山崩區域的變異偵測（[Suga and Konishi, 2012](#)；[Plank, 2014](#)；[Konishi and Suga, 2018](#)），這種方式只須要前後期相同極化的影像來進行分析，並不需要全極化影像，所需要的雷達影像限制較少。

綜合以上資訊，前兩種方式所需要的雷達影像規格為全極化雷達影像、單視複數影像（SLC），而第三種方式雖然不需要全極化影像，但由於山崩事件前後可能有明顯的植被變化（體散射特性），建議使用對體散射特性敏感的 HV 偏極影像來進行分析（[Novresiandi and Nagasawa, 2017](#)）。

雷達影像雖然可以不受晝夜影響且不易受大氣雲霧干擾得到地物影像資料進行分析，但相較於光學影像，雷達影像因成像受地形起伏影響而有相當的限制，當雷達脈衝側視觀測角度小於目標物坡度時，坡頂回波訊號比波底回波訊號先達到天線，造成疊置現象（Layover）；當坡度大於側視觀測角度時，會使得坡頂與天線形成陰影區（Shadow），造成影像上沒有回波訊號的區域。這些現象都會使雷達影像在山坡地有相當大的區域無法進行分析（圖 2-24）。

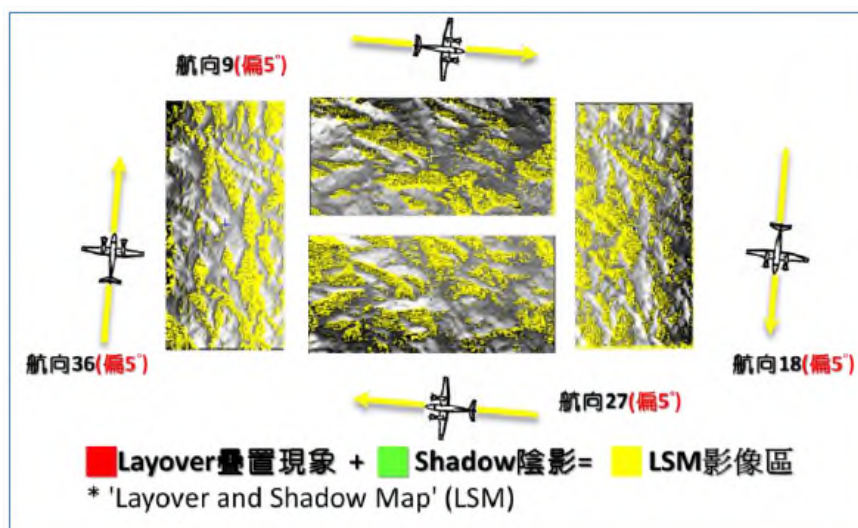


圖 2-24 不同飛行方向的疊置與陰影分析（[極隼科技股份有限公司](#)，2012）

第四節 小結

綜上所述，雷達影像因為可以全天 24 時不分晝夜工作，不受大霧或者雲層的影響，具有一定的穿透能力，例如穿透數目和建築物，且其對同一地點有較短的再訪周期等優點受到廣大科研人員的喜愛。隨著經濟的發展，科技的進步，研究探索的需求不斷增多，雷達影像也由原先的不開源與需要高價購買，演變為隨著遙測技術的進步，越來越多可用的雷達衛星影像出現，可供人們選擇的雷達影像雷達影像種類也越來越多，一些雷達影像數據也逐漸免費開放以供大家科研所使用。研究學者們可以根據自己的研究需要選擇不同的雷達影像。例如研究需要穿透能力很強的雷達波段可以選擇 L 雷達波段，需要解析度高的雷達影像可以購買 TerraSAR-X 的 Staring SpotLight (ST) 影像產品，具有超高的解析度 0.25m，但其購買價格較為昂貴。本計劃綜合考慮到一方面歐洲太空總署的 Setinel-1 雷達影像是目前免費開放給大眾研究使用，且其解析度為 5×20m，解析度相對來說已經較高，可以滿足本計劃對於較大堰塞湖與崩塌地的偵測；另外一方面 Setinel-1 雷達影像可以在 Google Earth Engine 這個開源免費的雲端平臺上直接調用處理，可以節約大量時間與內存空間以及突破設備限制，所以計劃主要選擇

的雷達影像為歐洲太空總署的 Sentinel-1 雷達影像。而本計劃所偵測出的堰塞湖和崩塌地範圍的解析度都取決於計劃所使用的雷達影像的解析度，例如本計劃採用的是 Sentinel-1 雷達影像空間解析度為 $5 \times 20\text{m}$ ，再加上雷達影像的斑駁雜訊，具有代表意義的訊號應為相鄰像元都具類似特徵，其代表性才足夠，因此所偵測的堰塞湖與崩塌地的解析度會大於一個像元 $5 \times 20\text{m}$ 之大小，甚至其變化需要大於 2×2 個像元的區域有相似變化才具有代表性，也就代表所能偵測到的最小堰塞湖與崩塌地範圍會大於 100 m^2 ，但由於雷達影像本身受到地形效應遮蔽影響大斑駁雜訊也多，要夠大才具有代表性，所以研究目標物應該要遠大於 100 m^2 才能被偵測到。另外值得一提的是本計劃所使用的 DEM 數據均為 Google Earth Engine 雲端平臺可直接調用的 NASA SRTM Digital Elevation 30 m 數據，其空間解析度為 30 m 。

第三章 雷達影像於強降雨後堰塞湖之偵測實作

第一節 雷達影像偵測淹水之研究方法

近幾十年來，光學或合成孔徑雷達（SAR）已顯示出它們在監測淹水的潛力（[Amitrano et al., 2018](#); [Khan et al., 2010](#)）。但多光譜等光學感測器無法穿透雲層和大雨，不能即時的獲取由強降雨導致的洪水，而 SAR 感測器可以做到這一點（[Joyce et al., 2009](#)）。所以研究表明目前 SAR 資料集相較於光學影像更適用於監測洪水（[Greifeneder et al., 2014](#); [Y. Li et al., 2019](#); [OHKI et al., 2016](#); [Rahman & Thakur, 2018](#); [Uddin et al., 2019](#); [Voormansik et al., 2013](#)）。現今，偵測洪水的技術大致可分為兩種一是傳統的基於機器學習的分類方法（[Bayik et al., 2018](#); [Shahabi et al., 2020](#); [Shen et al., 2019](#)）；二是基於閾值的方法（[Manjusree et al., 2012](#); [Psomiadis, 2016](#)）。傳統基於機器學習的方法需要來自現場的大量訓練資料，但這些資料在洪水期間難以收集。而基於閾值的技術（手動和自動）似乎對即時的洪水監測更加方便。

目前基於閾值的方法又可以分為人為判釋和自動的，人為判釋閾值檢測技術通常很困難且具有挑戰性，因為人為判釋閾值需要瞭解少量訓練樣本（[Malinowski et al., 2015](#); [Manjusree et al., 2012](#)）。這種技術會導致生成不太準確和不一致的淹水範圍。這是由於人為判釋的閾值用於分離水和非水要素具有可變性（[Manjusree et al., 2012](#)）。但是由於是人為判釋確定閾值，它的適用性更強，不同研究區可以調整閾值，其效果更好。

而基於自動閾值的方法無需使用任何訓練樣本（[Cao et al., 2019](#); [Haq et al., 2012](#)）。其計算影像統計數據，以推導出對水和非水像素進行分類的最佳閾值。基於自動閾值的方法包括影像平鋪和分割選擇方法、Kittler 和 Illingworth 方法、全域最小閾值方法、品質指數閾值、分割組合和 Otsu 影像閾值法（[Martinis et al., 2009](#); [Miasnikov et al., 2004](#); [Papamarkos & Gatos, 1994](#); [Xue & Zhang, 2012](#)）。大津（Otsu）法是洪水制圖中最廣泛的方法。它基於一種自適應閾值方法，該方

法度量評估從正規化影像直方圖計算出的標準閾值的種類間的標準差。它並不太複雜，需要最少的資料分析、後處理與參數設定，使其適合範圍大的 SAR 影像（Cao et al., 2019; Kordelas et al., 2018; J. Li & Wang, 2015）。同時大津（Otsu）法也具有一定的局限性，那就是大津（Otsu）法是假定具有兩個群體分布的雙峰長條圖分布，並且還假定在兩個峰之間有明顯區分。而若在研究區域中，物件區域與背景區域相比較小，則長條圖不再表現出雙峰性，此時，大津（Otsu）法的作用就不明顯（Tiwari et al., 2020）。

Otsu（大津）法簡單來說就是求其種類間標準差最大。其首先需要將影像轉換成灰度影像，255 個灰度等級。定義影像的寬度為 h ，影像的高度為 w ，灰度閾值為 t ，大於這個值的像元將它的灰度設置為 255，小於的設置為 0；定義小於閾值的像元為前景 n_0 ；大於等於閾值的像元為背景 n_1 ；則：

$$\text{影像的像元數量} = h * w$$

$$n_0 + n_1 = h * w$$

定義前景像元數量占總像元數量的比例為 w_0 ；背景像元數量占總像元數量的比例為 w_1 ，則：

$$w_0 = n_0 / (h * w)$$

$$w_1 = n_1 / (h * w)$$

$$w_0 + w_1 = 1$$

定義前景平均灰度為 u_0 ，背景平均灰度為 u_1 ；則：

$$u_0 = n_0 \text{ 灰度累加和} / n_0$$

$$u_1 = n_1 \text{ 灰度累加和} / n_1$$

定義平均灰度為 u ，則：

$$u = (n_0 \text{ 灰度累加和} + n_1 \text{ 灰度累加和}) / (h * w)$$

$$u = w_0 * u_0 + w_1 * u_1$$

定義類間標準差為 g ，則：

$$g = w_0 * (u_0 - u)^2 + w_1 * (u_1 - u)^2$$

由上式，可以推出類間標準差 g ：

$$g = w_0 * w_1 * (u_0 - u_1) \quad 2$$

遍歷每一個灰度值 t ，得到最大的 g 對應的 t 便能得到所需閾值。

另外，合成孔徑雷達利用偵測洪水主要的原理是：雷達波對靜止水體具有強烈反射之特性，能在水體偵測上顯示清楚的訊號。由於水體特性的鏡面反射率高，而背向散射回波率很低，因此在水體監測的應用上，可以藉由其低回波的特性來判別水體的增減，作為堰塞湖範圍的判定。所以利用閾值法通過合成孔徑雷達影像監測洪水就是要分析獲取背向散射回波值，具體操作為根據背向散射回波閾值分割出水與非水，更一步利用高程（DEM）以及坡度等特性提取出效果更加的水體，再計算前後期雷達影像的背向散射值是否有明顯變化，做為堰塞湖形成範圍判斷的一種方式。

根據本團隊之前的研究(胡植慶等, 2018; 胡植慶等, 2019; 邱俊穎等, 2019)的研究，雷達影像在淹水災害中已具有一定的偵測能力。過去研究利用多種方式以藉由雷達影像來判釋洪水溢淹或堰塞湖等水體 (Chapman et al., 2015; De Roo et al., 1995; Martinis et al., 2011; Bartsch et al., 2012; Martinis et al., 2009; Muster et al., 2013; Evans et al., 2010; Simon et al., 2014)。在這些應用中，閾值也是最普遍用來劃分水域的方法。但建築物的陰影區、植被茂密區的二次散射與強風造成水表面的粗糙，都會造成淹水區域判釋的困難 (Martinis, 2010)，而需要人為調整判釋的閾值設定。Bioresita et al. (2018) 提出了對於 Sentinel-1 自動快速淹水區判釋的處理流程，在系統為 Intel 雙核心 1.9 GHz 與 32G RAM 的條件下，每次處理的時間為 10 小時，該方法總體精度超過 98%，F 值 (F1-Measure) 範圍為 0.64-0.92。但本團隊利用 Google Earth Engine 雲平臺，能達到更加快速流程化偵測堰塞湖，時間快到三至五分鐘就能得到堰塞湖範圍結果。

本團隊於農航所委託計畫「雷達衛星影像輔助林地災害偵測之研究(1/2)」(2018) 中，也以 SNAP 軟體通過閾值法進行了 2009 年莫拉克颱風於臺東太麻里溪之堰塞湖偵測，得到得結果如圖 3-1 所示，結果顯示雷達影像判釋的堰塞湖面積約為 0.55 平方公里，與航照判釋的堰塞湖如圖 3-2 (陳昆廷等, 2010) 對

比，其精度指標：準確率（Accuracy）= 99.3%、精確率（Precision）= 63.2%、召回率（Recall）= 81.1%、F1-Measure= 71.0%和 Kappa= 70.7%。

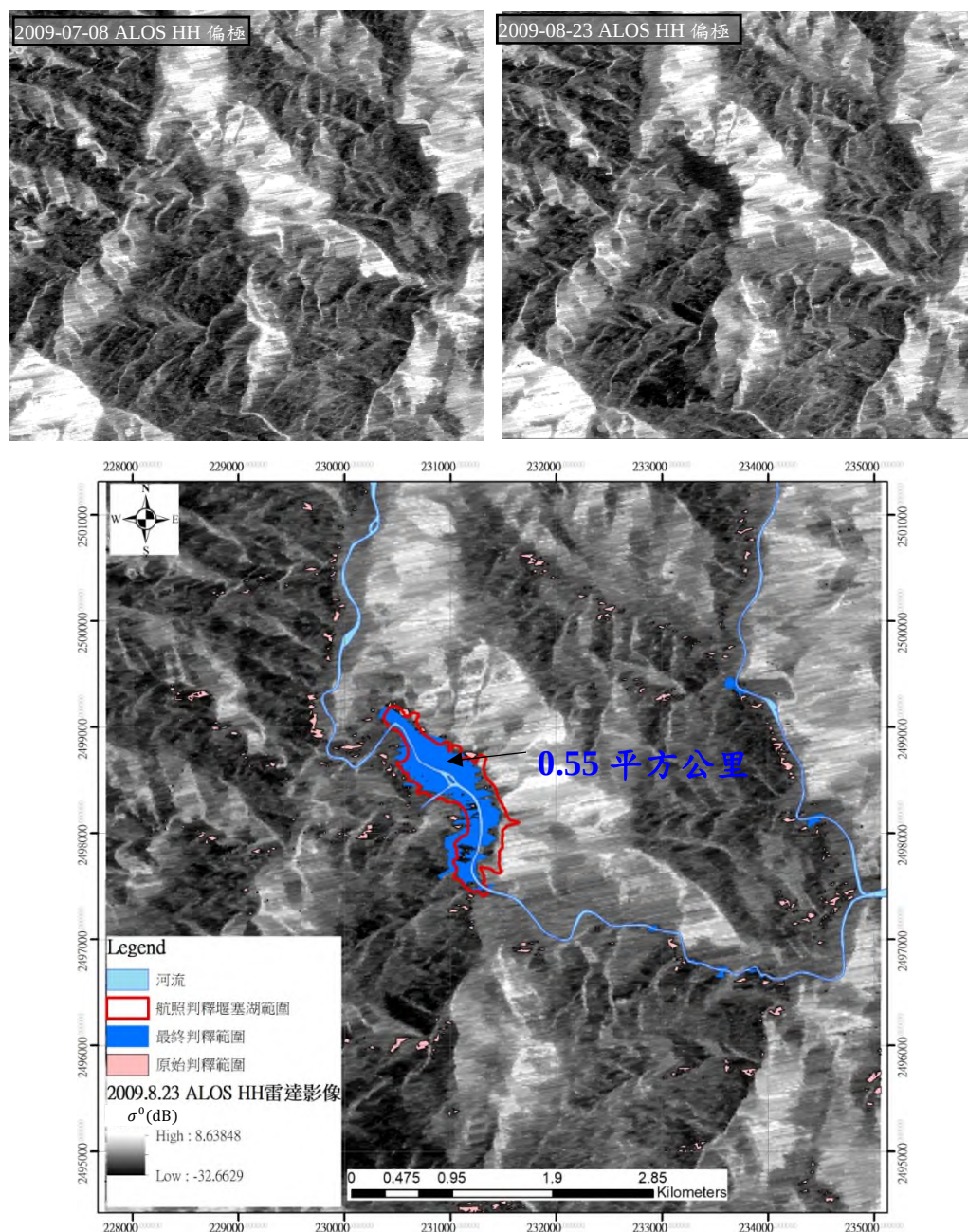


圖 3-1 2009 年莫拉克颱風於臺東太麻里溪之堰塞湖雷達影像辨識成果。粉紅色為初始判釋區域，包含河道與山谷積淹水所造成的變遷，藉由河流圖層可萃取堰塞湖的範圍（藍），與航照所判釋的區域（紅）比較略有差異。

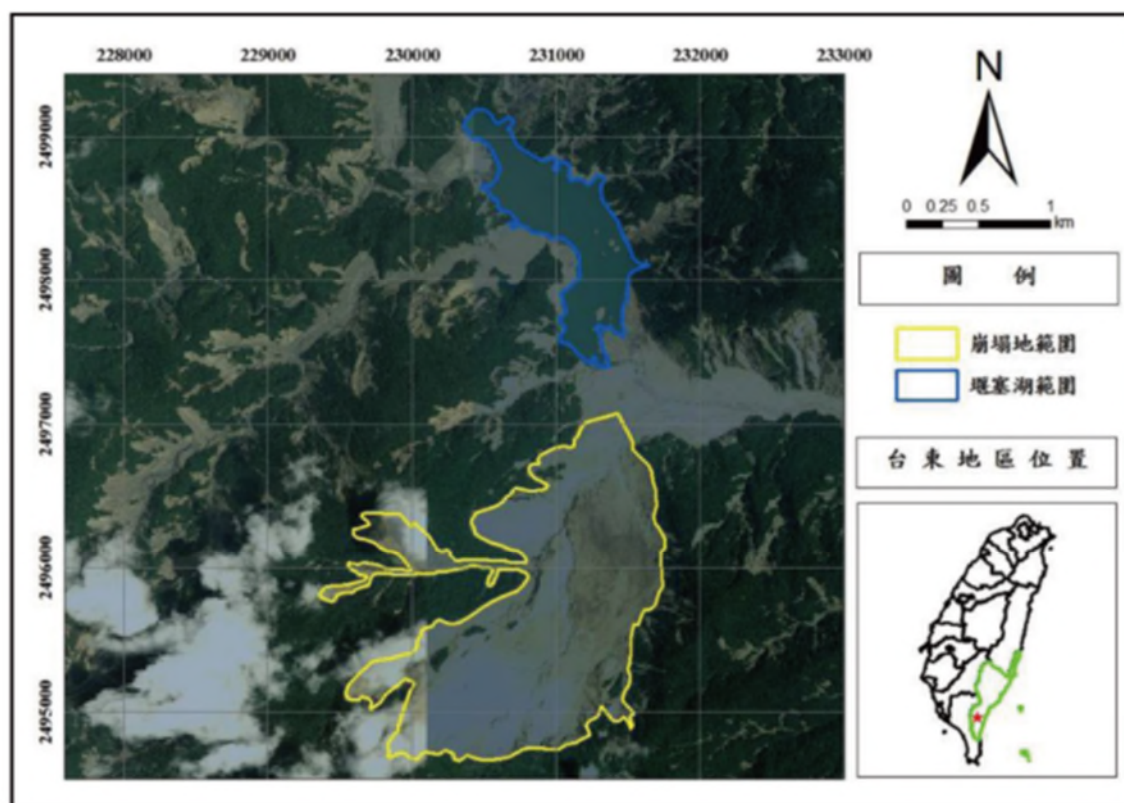


圖 3-2 太麻里溪堰塞湖航空相片圖（陳昆廷等，2010）

而對於本次計畫，由於背向散射係數（sigma-naught）在統計上能提供更好的水體與陸地的分辨能力（Foumelis, et al., 2015; Stewart, 2016），基於此本團隊旨在利用 Google Earth Engine 基於背向散射係數通過人工或者自動閾值法，再通過嘗試研究區內所有高程值與坡度值，對比 Sentinel-2 數據人工目視確定 DEM 參數和坡度參數，得到最終的偵測結果，以實現快速流程化且雲端自動化偵測堰塞湖。

第二節 案例分析：Google Earth Engine 偵測 2009 年莫拉克颱風於臺東太麻里溪之堰塞湖

莫拉克颱風於民國 98 年 8 月襲臺，造成臺灣南部豪大雨，引發臺灣多處大規模崩塌，崩塌之土石阻塞河道，形成多處堰塞湖。其中太麻里溪（包盛社）堰塞湖位於臺東縣境內之太麻里溪流域上游，天然壩體遭水流沖刷形成一寬度約 20 公尺之溢流水道，既有壩高約為 10 公尺，阻塞河道之土體長度約為 1.2 公里，

蓄水體積約 533 萬噸（圖 3-2）。現地於民國 98 年 12 月進行溢流口處溢流水道簡易挖降作業，減少堰塞湖蓄積之水體體積，降低堰塞湖水面高度。本案例具體研究區域如圖 3-3 所示。

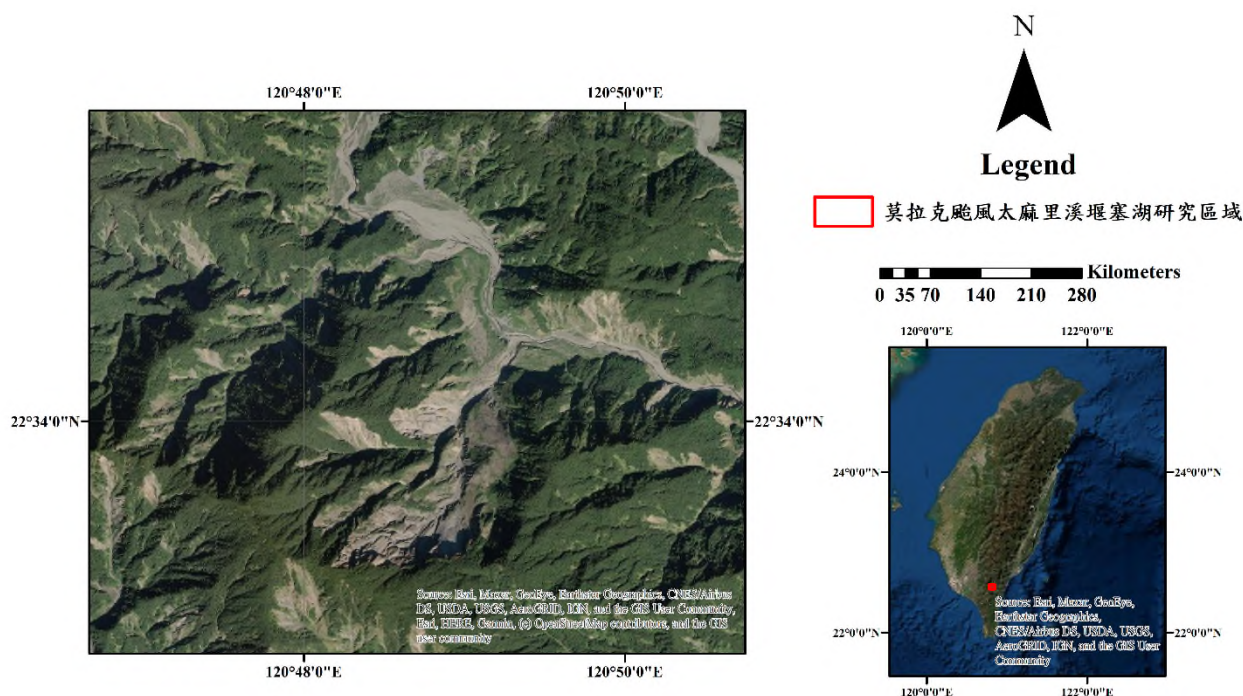


圖 3-3 莫拉克颱風太麻里溪堰塞湖研究區域

本案例使用影像為 L 波段 ALOS 影像，包含事件前 7/8 日之影像與事件後 8/23 日之影像，根據 [Henry et al. \(2006\)](#) 的研究採用 HH 偏極作為分析之指標。堰塞湖判釋也屬於水體變遷分析的一種，主要原理在判釋不同時間的水體範圍，再將變化的範圍作為判釋的依據。基本處理 SOP 流程如圖 3-4 所示。

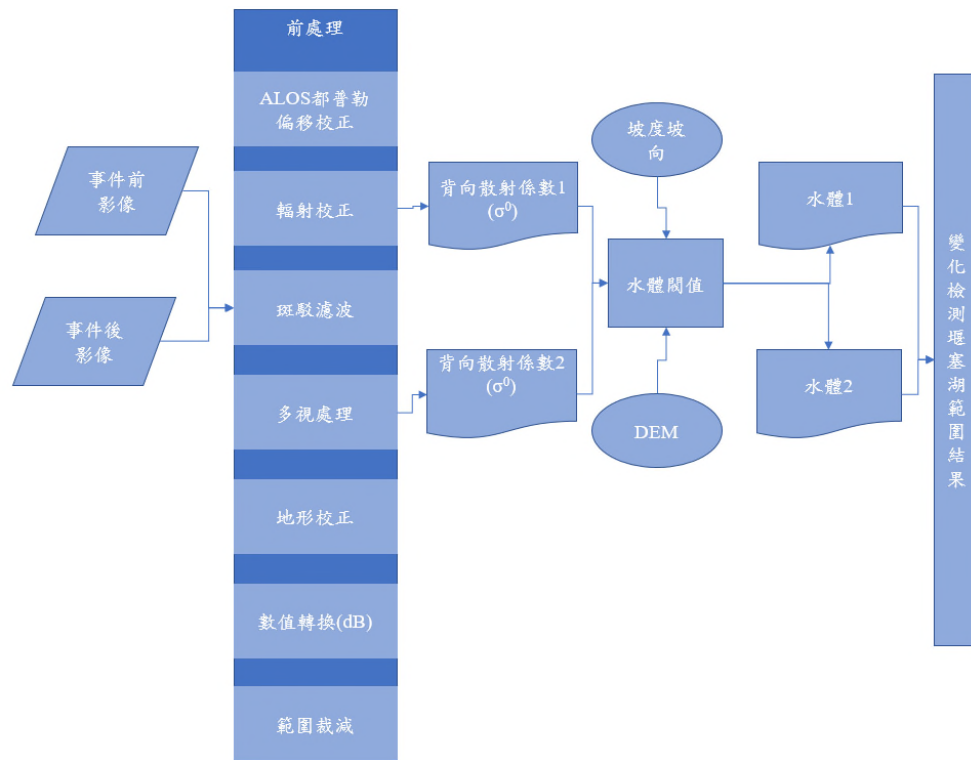


圖 3-4 雷達影像堰塞湖辨識處理流程圖。影像必須先進行前處理，包括 ALOS 影像的都普勒偏移校正、輻射校正轉換為背向散射係數、斑駁濾波與多視處理以降低雜訊干擾，接著進行地形校正。再進行人工背向散射閾值判斷來確定水體與非水體的門檻。數值高程與坡度等數據可以用來輔助計算降低判別之水體誤判。最後配合變化檢測分析，可判釋堰塞湖的範圍。

由於目前 Google Earth Engine 上所提供的衛星雷達影像只有 Sentinel-1 的 C 波段影像，但是 2009 年莫拉克颱風發生時 Sentinel-1 衛星還未發射成功，所以本計畫使用的是 L 波段 ALOS 影像。Google Earth Engine 不提供 ALOS 雷達影像，所以需要將 L 波段的 ALOS 影像先在 SNAP 軟體中先進行上述圖 3-4 預處理，導出剪裁好研究區的 dB 值的背向散射值為 GeoTiff 檔案，再導入 Google Earth Engine 中，利用 Google Earth Engine 的 API 進行圖層的顯示，再根據經驗挑選背向散射值閾值進行水體的提取，以及結合 DEM、坡度等數據進行提取水體的誤差校正。在得到事件前與事件後影像水體部分，再利用 Google Earth Engine 進行變化檢測，就得到事件後增大的堰塞湖水體。之後將所得堰塞湖範圍與航照所得堰塞湖範圍進行精度驗證，最終結果如圖 3-5 所示：

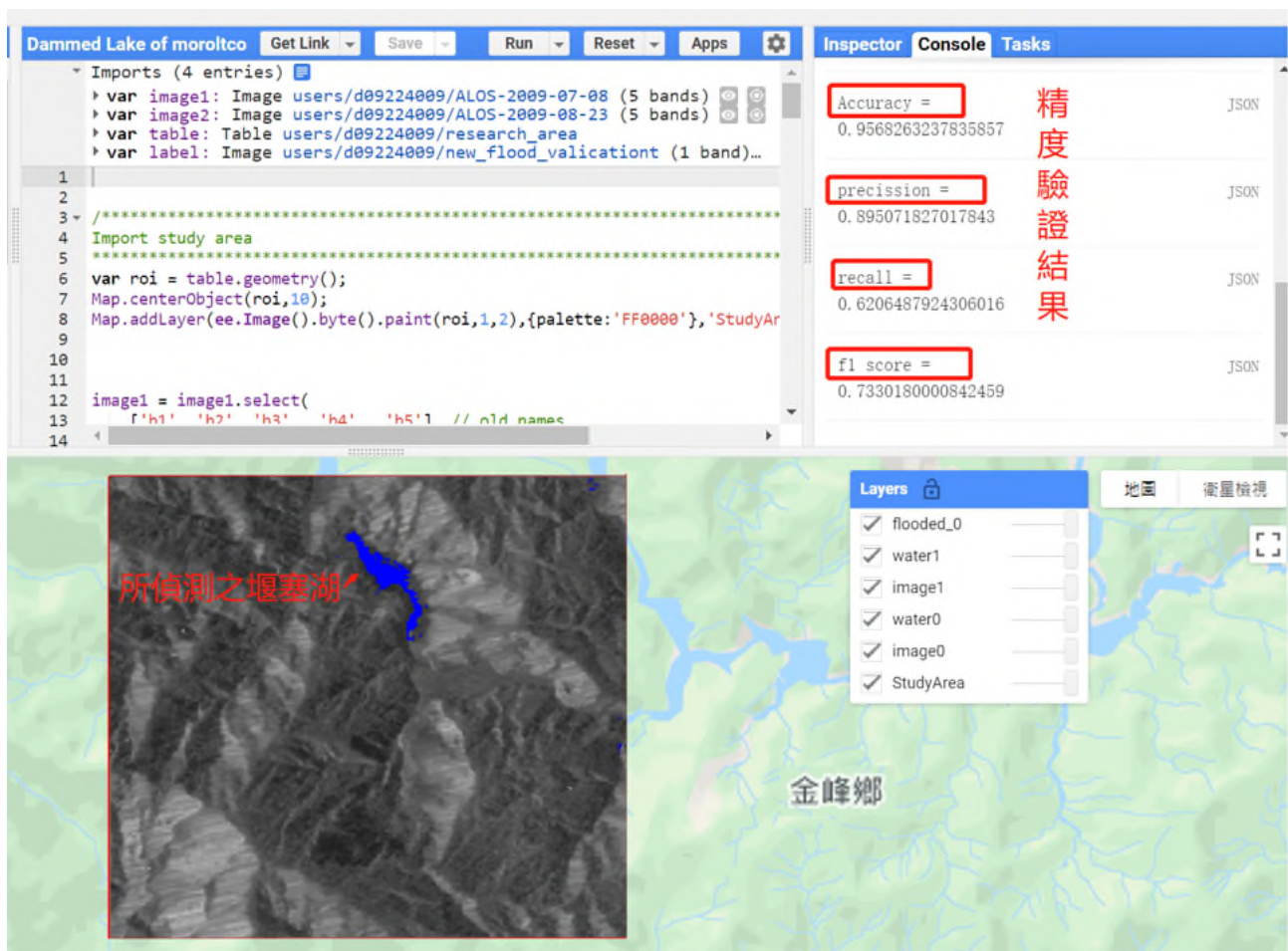


圖 3-5 基於 Google Earth Engine 的 2009 年莫拉克颱風於臺東太麻里溪之堰塞湖雷達影像辨識成果。經過多次測試，Google Earth Engine 設定背向散射值的閾值為 -13，進行水體的初步提取，然後設定 DEM 小於 450 m，坡度小於 20°以校正初步閾值提取水體之誤差。

具體實現 GEE 程式碼可由以下鏈接取得：

<https://code.earthengine.google.com/a0c8f603bfabfad1a0b1a5cb0cf227b1>

第三節 以多期雷達衛星影像分析技術輔助淹水變化偵測

2021 年的臺灣遭遇了嚴重的旱災，可以被形容為百年大旱，造成了全臺供水吃緊，一度造成農業停灌。主要的原因為 2020 年是臺灣 56 年以來第一次沒有颱風登入，造成了平均全臺降雨少了 1000 毫米。這旱情造成了臺灣重要的水庫—曾文水庫的蓄水只剩下 11%。旱情一直持續到 6 月初，開始降雨，到 7 月初，曾文水庫從 6 月 5 號 60 百萬立方公尺的蓄水量猛然增長至 7 月 10 號時 361 百萬立方公尺，大致一個多月，蓄水量增加了 300 萬立方公尺如圖 3-6 所示。而本案例的具體研究區域如圖 3-7 所示。

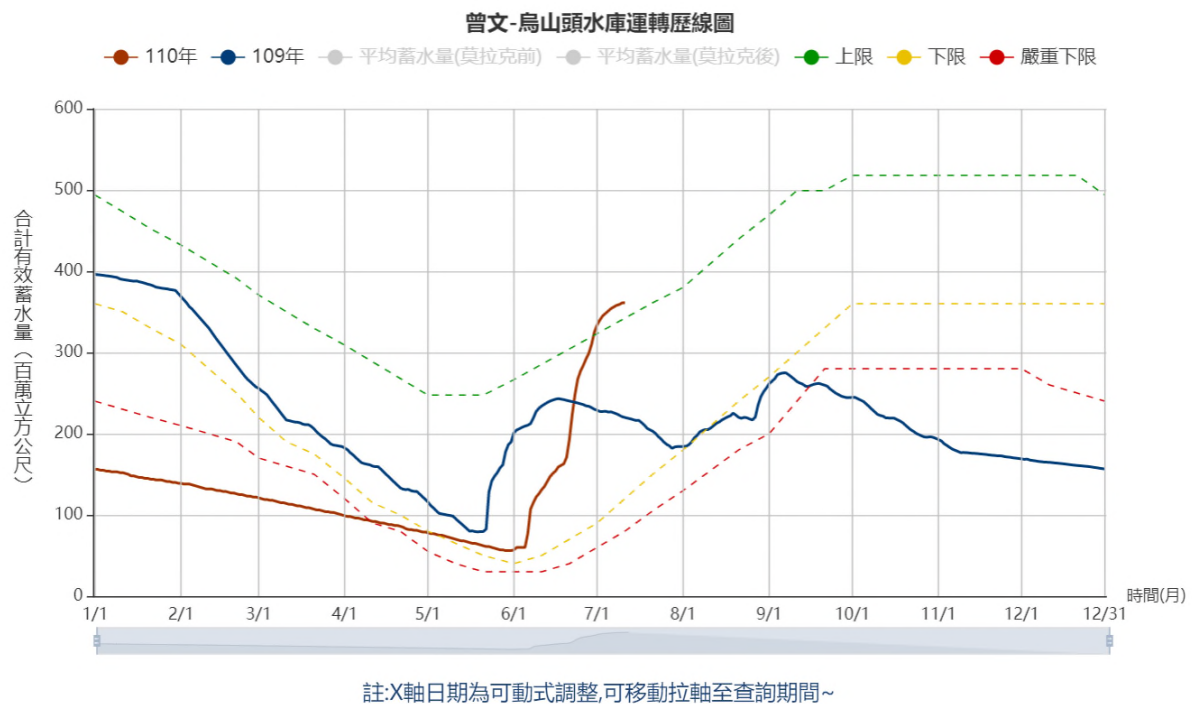


圖 3-6 2021 年曾文水庫運轉歷線圖。資料來源：南區水資源局 <https://www.wrasb.gov.tw/water/waterLine.aspx?waterType=1&no=13&pno=sno=>

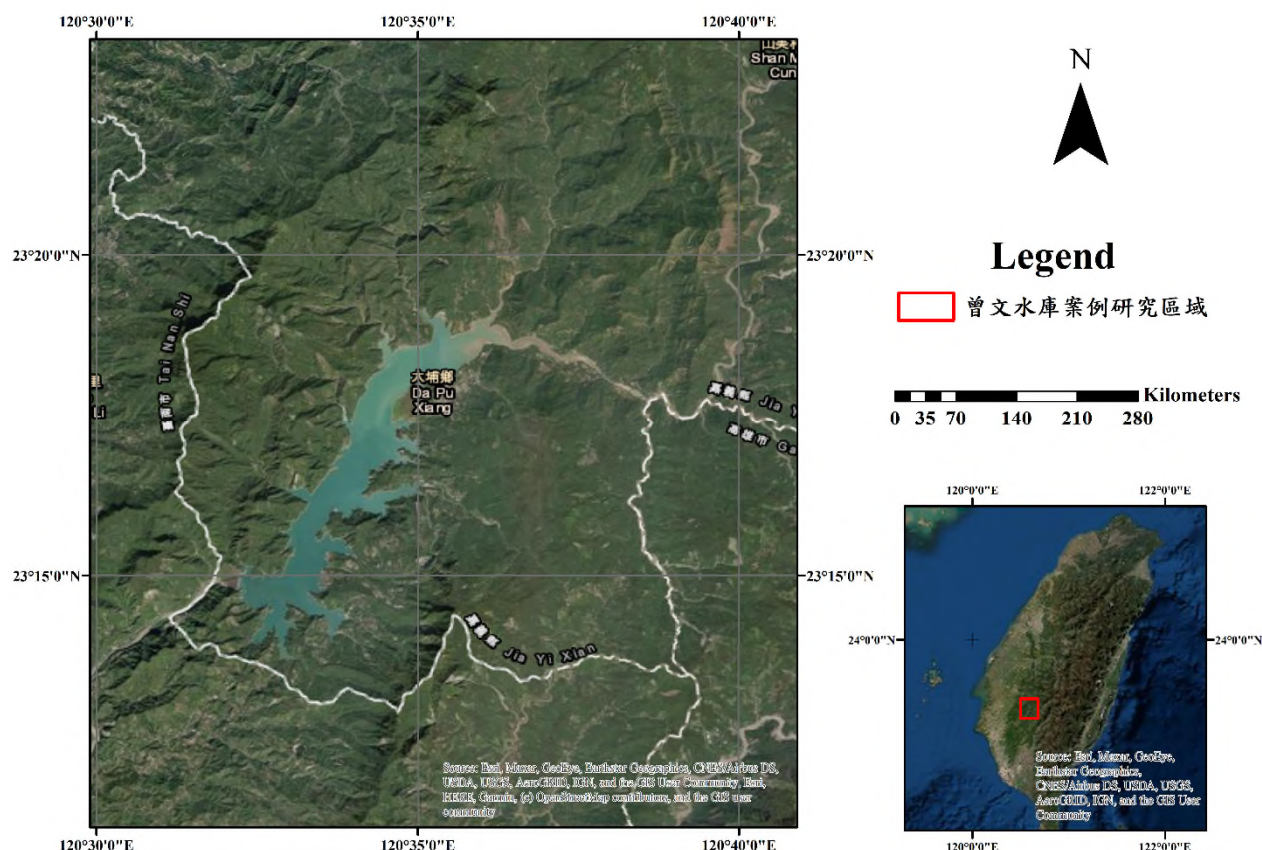


圖 3-7 曾文水庫案例研究區域

曾文水庫水量大致一個月時間快速攀升，解決了蓄水量告急之問題。這一過程可以利用多期雷達衛星影像進行長期持續的觀測，有利於時刻把握災情資訊以供決策使用。

此案例使用 Google Earth Engine 中提供的 Sentinel-1 雷達衛星影像之 GRD VV 極化，前期影像為 2021/05/01，後期影像為 2021/06/30，依照淹水辨識處理流程（圖 3-8）通過 Google Earth Engine 的 Code Editor 調用 API 進行前處理。值得注意的是本案列與上述案例不同的是在此使用了大津法（OTSU）來自動確定水體的背向散射閾值。其後再利用 DEM 數據進行水體的誤差校正以便更好的提取水體。接著進行相鄰時間兩兩影像的變化檢測，得到水體變化範圍影像。本案列的精度驗證是利用 2021 年 5 月 1 號到 2021 年 6 月 30 號期間，曾文水庫上空無雲遮蔽時 2021 年 5 月 14 號的 Sentinel-2 光學影像，與用來預測水體的 Sentinel-1 雷達衛星影像時間僅差距一天，根據南區水資源局數據顯示這兩天之

間水庫之水量相差極小，所以適合用來精度驗證。在 Google Earth Engine 中利用 NDWI (Normalized Difference Water Index, 正規化水體指數) 提取 Sentinel-2 光學影像的水體面體當作精度嚴重數據。得到精度較好的結果在 Google Earth Engine 中進行顯示保存輸出下載結果影像，以完成多期雷達衛星影像分析技術輔助淹水變化偵測目標如圖 3-9 所示。

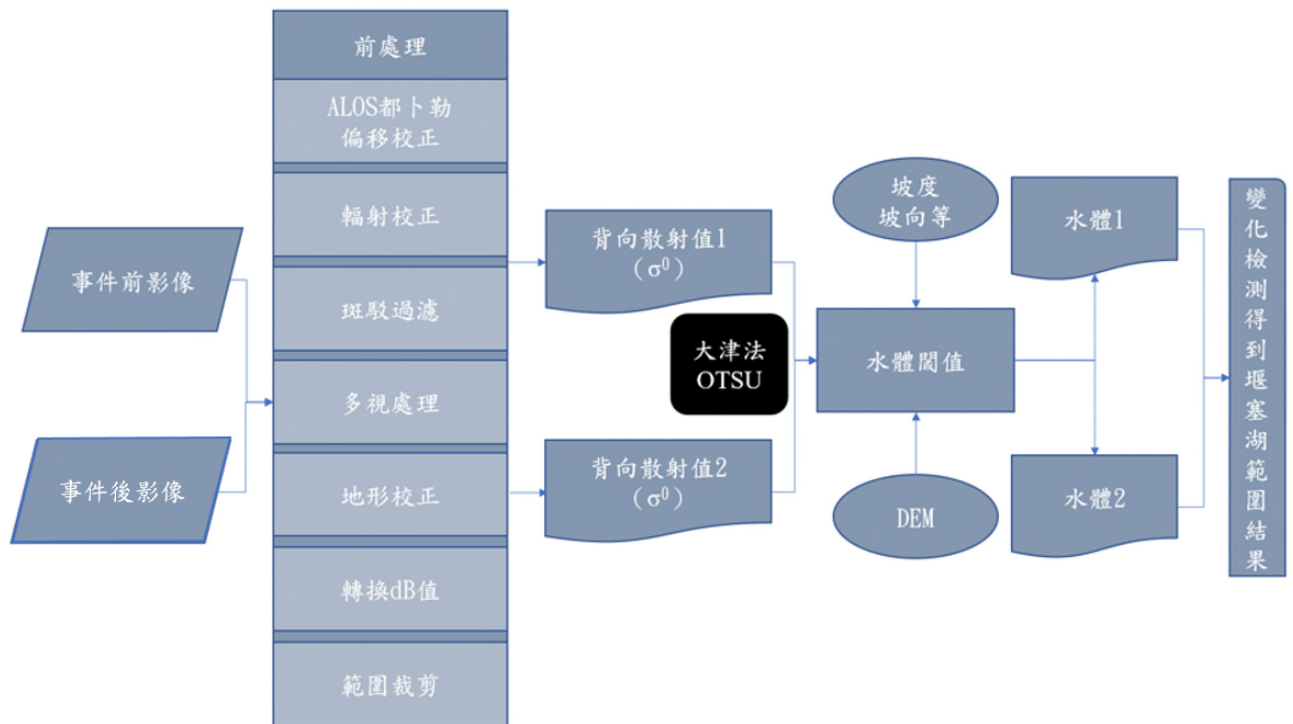


圖 3-8 多期雷達影像水體偵測處理流程圖。

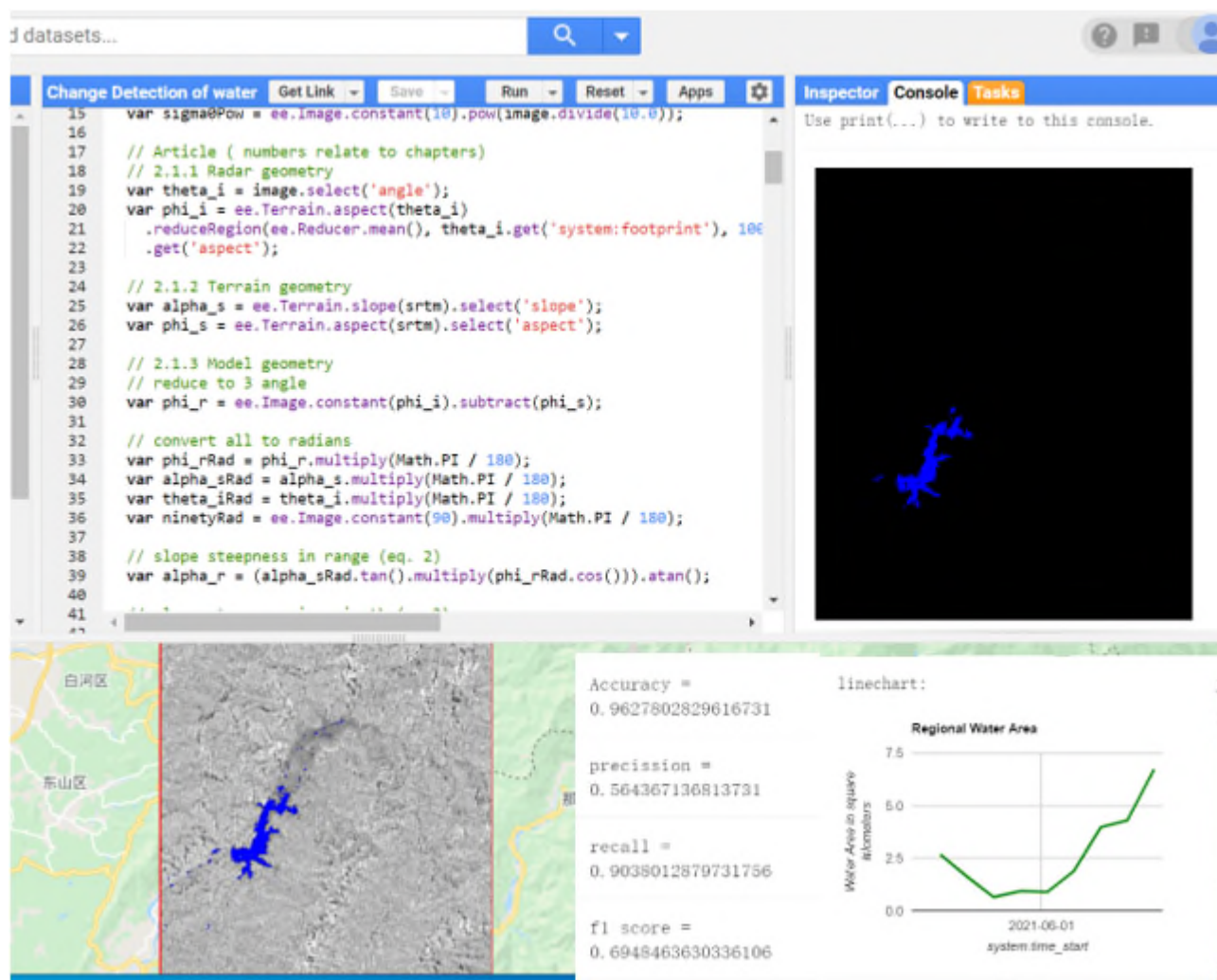


圖 3-9 多期雷達影像曾文水庫水體變化檢測結果圖

具體實現 GEE 程式碼可由以下鏈接取得：[https :](https://code.earthengine.google.com/f988a8579ca86dcfd33ff693a85a7c69)

[//code.earthengine.google.com/f988a8579ca86dcfd33ff693a85a7c69](https://code.earthengine.google.com/f988a8579ca86dcfd33ff693a85a7c69)

第四節 小結

與本團隊於農航所委託計畫「雷達衛星影像輔助林地災害偵測之研究(1/2)」(2018)中，以 SNAP 軟體通過閾值法進行的 2009 年莫拉克颱風於臺東太麻里溪之堰塞湖偵測相比，本計畫使用了 Google Earth Engine 平臺，突破了硬體的設備的限制，能更快速的得到堰塞湖偵測結果，而且人工修改閾值更為直觀方便，也能立馬顯示閾值調整後所得影像結果。而其局限性是 Google Earth Engine 平臺上目前暫沒有提供 ALOS 影像，所以 ALOS 影像必須先在 SNAP 軟體中進行包括都督勒偏移校正、輻射校正、斑駁過濾、多視處理、地形校正、轉換 dB 值等預處理後輸出保存為 GeoTiff 檔案，再導入 Google Earth Engine 中進行後續水體提取，結合 DEM 數據與坡度數據校正初步提取之水體，再進行事件前與事件後水體的變化檢測，以得到最終的結果，再進行輸出保存到 Google 雲端可隨時下載至本地。然若 Google Earth Engine 提供 ALOS 影像，則這些預處理也可在 Google Earth Engine 中進行，便不需要使用 SNAP 軟體，實現在 Google Earth Engine 中完成整個堰塞湖偵測流程，有利於提高研究的便捷性與時效性。

多期雷達衛星影像分析技術輔助淹水變化偵測—以曾文水庫為例，利用多時間序列雷達遙感影像，可以全天時、全天候的偵測水體變化，為旱災和洪水災害提供實時諮詢以供決策使用，也可為災後工程救治提供資訊。本案列相較於案列一使用了最新且免費，解析度也相對較好的 Sentinel-1 雷達 C 波段影像，而且所選定的時間範圍內所有影像可以快速至幾分鐘內流程化雲端計算得到結果並顯示輸出。另外本計劃使用了大津法 (OTSU) 進行了提取水體的背向散射閾值自動判別確定，減少了人工閾值的選擇。唯不足之處為還需要人工判識用來減少陰影影響的 DEM 高程數據閾值以及影像與所偵測結果解析度為 $5 \times 20\text{m}$ ，若需要更高解析度的則無法滿足，由於雷達影像本身的地形遮蔽限制與斑駁雜訊，所偵測的目標物面積應夠大，需要遠超過 100m^2 ，且周邊環境最好無太多地形遮蔽，水面無大面積植生長期存在。

第四章 雷達衛星影像於強降雨後大型崩塌之偵測實作

第一節 雷達影像偵測崩塌之研究方法

臺灣由於其多高山且多颱風的地理環境特性，崩塌是其主要的災害之一。如何快速應對山崩事件是評估損失和拯救生命的必要條件，爲了快速響應救災工作，在崩塌事件發生後的幾天，幾周到幾個月內建立準確的崩塌地圖十分重要，所以有必要開發易於使用的工具，並提供可免費獲取的數據，以快速繪製崩塌災難事件後的地圖以供決策以及挽救生命財產損失使用（[Handwerger et al., 2020](#)）。

山崩滑動塊體之偵測，除利用地形判釋與現地調查之外，遙測方法提供一個大面積範圍調查的重要工具，有別於地面儀器的點位或線狀的監測，遙測影像提供崩塌地範圍圈繪，以影像判釋進行的調查工作有較高的廣度及便利性。例如基於 Google Earth Engine（GEE）雲端開源平臺利用 Landsat-8 光學衛星影像進行崩塌地識別研究，使用支持向量機（Support Vector Machine：SVM）、決策樹（Classification and Regression Trees：CART）、最小距離（Minimum Distance）、隨機森林（Random forest：RF）和樸素貝葉斯技術（Naïve Bayes techniques）進行的，其中 SVM 和 RF 的精度驗證真陽性率（TPR）達到了 87.5%，優於所有其他技術（Singh et al., 2021）。雖然如

Landsat 等光學影像提供了高質量的數據，但在快速響應災害的工作中往往由於受雲霧雨水天氣影響大，有比較大的研究限制，如光學衛星影像 2015 年 7.8 Mw 的 Gorkha 地震引發了超過 25000 起滑坡，但是持續的雲層覆蓋使衛星光學圖像在一周多的時間內無法繪製滑坡圖（[Robinson et al., 2019](#); [Williams et al., 2018](#)）。但是雷達衛星影像因它具有可以穿透雲層並且能不分晝夜工作，其可以避開這些問題，而雷達衛星影像也有自己的缺陷就是會受到幾何陰影和失真的限制。

現今雷達影像已廣泛應用於崩塌地識別研究中，其基本的原理是在災害如崩塌事件發生前後，當地表性質（如反射率、粗糙度、介電性質）發生變化時，振幅和相干性就會發生變化，但目前研究大多集中在 InSAR，其測量事件前後兩次獲得的影像雷達相位變化以進行量化地表變形（[Handwerger et al., 2020](#)）。除了崩塌地識別（[DeVries et al., 2020](#)），基於 SAR 雷達振幅與基於相干的變化偵測也應用在了洪水偵測、森林火災以及其他災害（[Ruiz-Ramos et al., 2018](#); [Tay et al., 2020](#); [Washaya et al., 2018](#)）。基於相干性的變化檢測方法在城市地區有很好的成效，因為通常在事件發生前相干性較高，而在事件發生後相干性降低。然而，基於振幅的變化檢測方法在崩塌容易發生的植生密集山區優於基於相干的方法，因為在植生密度高的地區相干性總是低，即沒有變化，而振幅可以變化（[Handwerger et al., 2020](#); [Jung &](#)

Yun, 2020)。

基於事前前後雷達影像振幅變化的原理，本計劃的崩塌地偵測研究基於 Google Earth Engine (GEE) 開源雲端平臺，以及此平臺中可免費且快速調用的 sentinel-1 雷達數據，通過計算事件前後一段時間所累積的研究區雷達影像數量的平均振幅差異進行崩塌地的偵測。具體的研究方法如圖 4-1 所示：

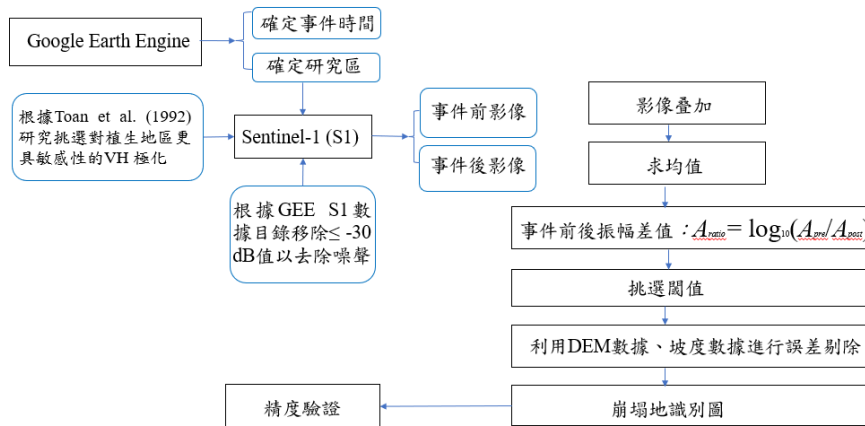


圖 4-1 GEE 偵測崩塌方法流程圖。

首先在 GEE 中先確定事件的前後時間範圍，再確定需要偵測的研究區域用以確定 Sentinel-1 的影像，根據 Toan et al. (1992) 研究，選擇對植生地區更加敏感的 VH 極化，並且根據 GEE S1 數據說明移除 ≤ -30 dB 的值去除噪聲，然後分別將事件前後一段時間內的影像進行疊加求振幅均值，再求事件前後影像振幅插值，接著根據經驗選擇振幅閾值，再利用 DEM 數據與坡度數據通過嘗試研究區內所有高程值與坡度值，人工目視解譯確定效果最好的 DEM 參數和坡度參數，

進行誤差別除得到崩塌地識別結果，最後與事件前後的 Sentinel-2 影像人工判識數化的崩塌地範圍對比做精度驗證，得到最終的偵測結果，以實現快速流程化且雲端自動化偵測崩塌地。

第二節 案列一：多期雷達影像於盧碧颱風之寶來崩塌地辨識

2021 年 8 月盧碧颱風帶來了大規模劇烈豪雨，8 月 5 日起連日豪雨造成了高雄六龜寶來一橋上游右岸國有林班地邊坡崩塌，該地屬於山崩地滑潛勢區，前經莫拉克風災後崩塌，邊坡原已逐漸自然復育，但是由於本次的盧碧颱風連日豪雨使高漲洪水衝擊上坡面，導致再度崩塌，大量土石滑落河道，堆積在河道右岸，土石量概估約有 25 萬立方公尺。本計劃案例一的研究區域範圍如圖 4.2 所示。

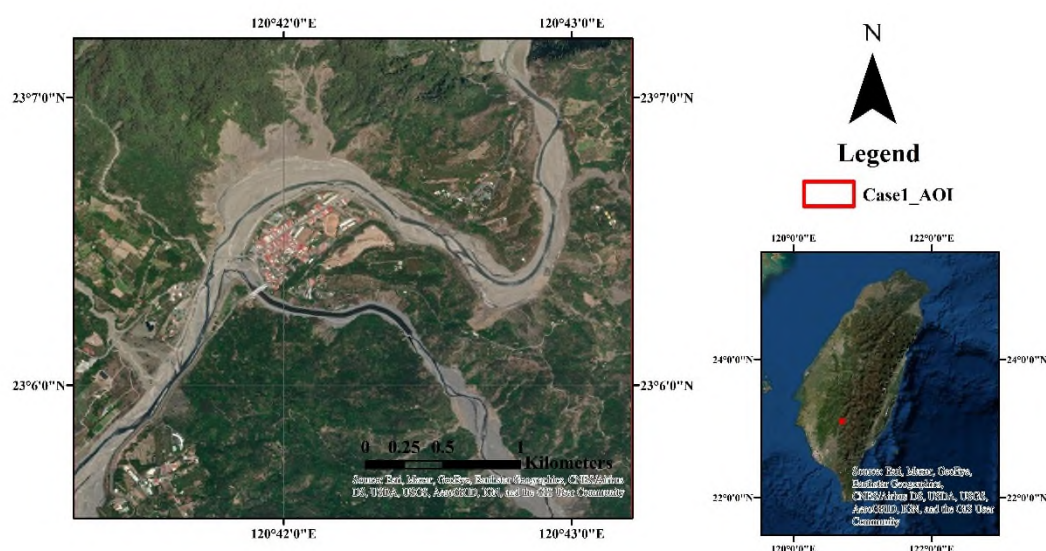


圖 4.2 寶來一橋上游右岸國有林班地邊坡崩塌研究範圍。

經緯度位置大約為東經 $120^{\circ}41' - 120^{\circ}43' E$ ，北緯 $23^{\circ}06' - 23^{\circ}07' N$ ，位於臺灣中南部。

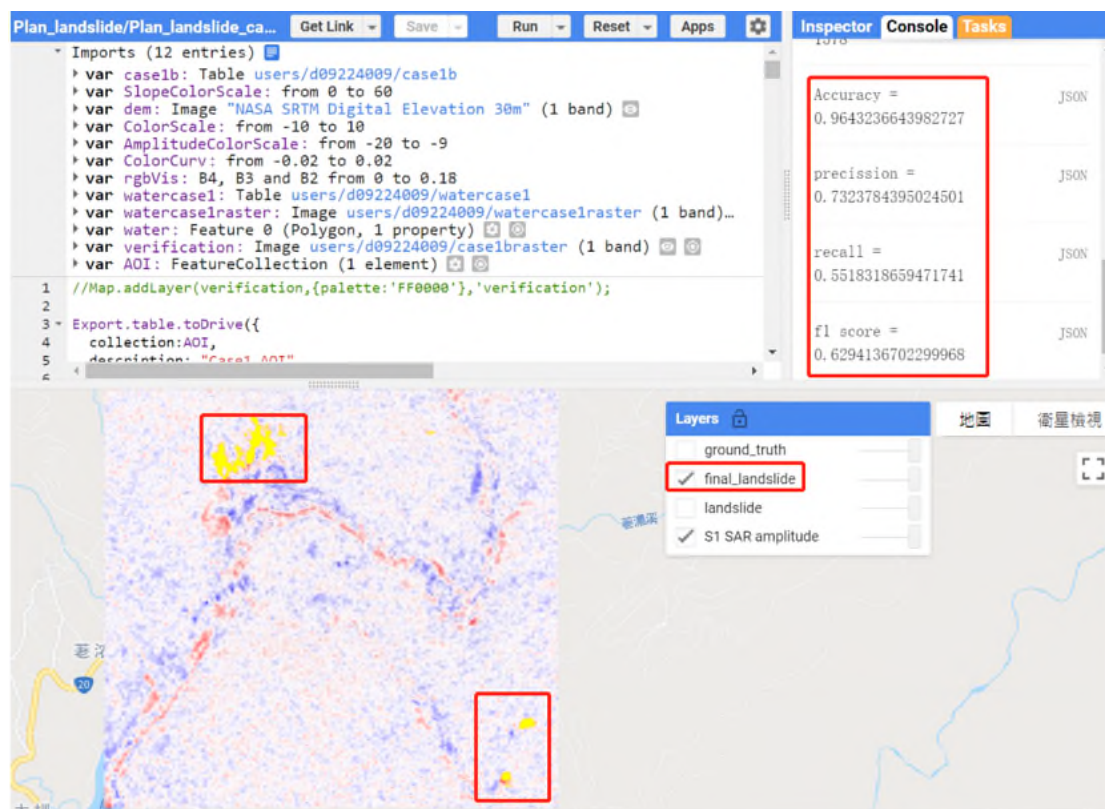


圖 4.3 基於 GEE 的寶來一橋上游右岸國有林班地邊坡崩塌識別結果圖。黃色部分為識別崩塌地範圍。

本計劃案例一採用的方法如圖 4.1 所示，選取因盧碧颱風帶來的大規模劇烈豪雨所導致的高雄六龜寶來一橋上游右岸國有林班地邊坡崩塌作為研究案例，其屬於山崩地滑潛勢區，在莫拉克風災後崩塌，而後已經逐漸自然復育，但是此次又發生了崩塌，且崩塌範圍較大。案例選取盧碧颱風 2021 年 8 月 7 日前三個月事件前影像與 8 月 10 日後一個月影像，分別求事件前後的 SAR 影像平均振幅，再將事件前

後影像相減，得到前後影像振幅差。然後利用振幅差根據影像顯示屬性利用閾值法提取崩塌地範圍。設置振幅閾值為大於 2dB，進行平滑去除小斑塊，而後根據研究區 DEM 數值與坡度降低誤差，設置 DEM 值大於 525 m，且坡度值大於 15°，得到如上圖 4.3 所示崩塌地識別結果。其識別結果與 Sentinel-2 事件前 2021 年 7 月 9 號以及事件後 8 月 28 號這兩張光學影像，經過人工判識寶來一橋上游右岸國有林班地邊坡再生崩塌範圍進行對比，精度驗證結果為 Accuracy = 0.964，precision = 0.732，recall = 0.552，f1 score = 0.629.

具體 GEE 的 code 可參考以下鏈結：

<https://code.earthengine.google.com/5eebe0b19945c6295102751537123b04>

第三節 案列二：多期雷達影像於盧碧颱風之玉穗溪上游集水區崩塌地辨識

高雄市桃源區玉穗溪全長 7.3 公里，集水區面積 1231.9 公頃，由於高屏地區受到 2021 年盧碧颱風豪雨影響，累積降雨量從 7 月 31 日到 8 月 7 日達到 2212.5 毫米，是莫拉克風災後最大單一降雨事件雨量值。玉穗溪集水區在莫拉克風災時便已造成上游林班地大面積崩塌，此次盧碧颱風豪雨擴大了其崩塌面積 128.2 公頃，產生了 1107 萬方土砂量與荖濃溪匯流口堆積 202 萬方沖積扇，還導致 713 萬方土砂堆積坡面與河道，造成了嚴重的影響。本計劃案例二的研究區域範圍選定為玉穗溪集水區上游如圖 4.4 所示。

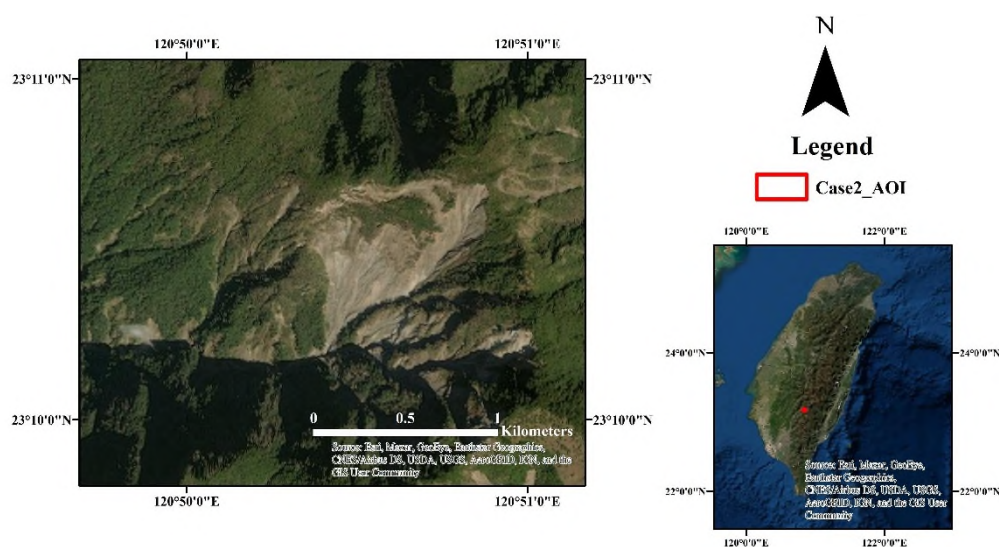


圖 4.4 盧碧颱風之玉穗溪上游集水區崩塌地研究範圍。

經緯度位置大約為東經 $120^{\circ}50' - 120^{\circ}51' E$ ，北緯 $23^{\circ}10' - 23^{\circ}11' N$ ，位於臺灣中南部。

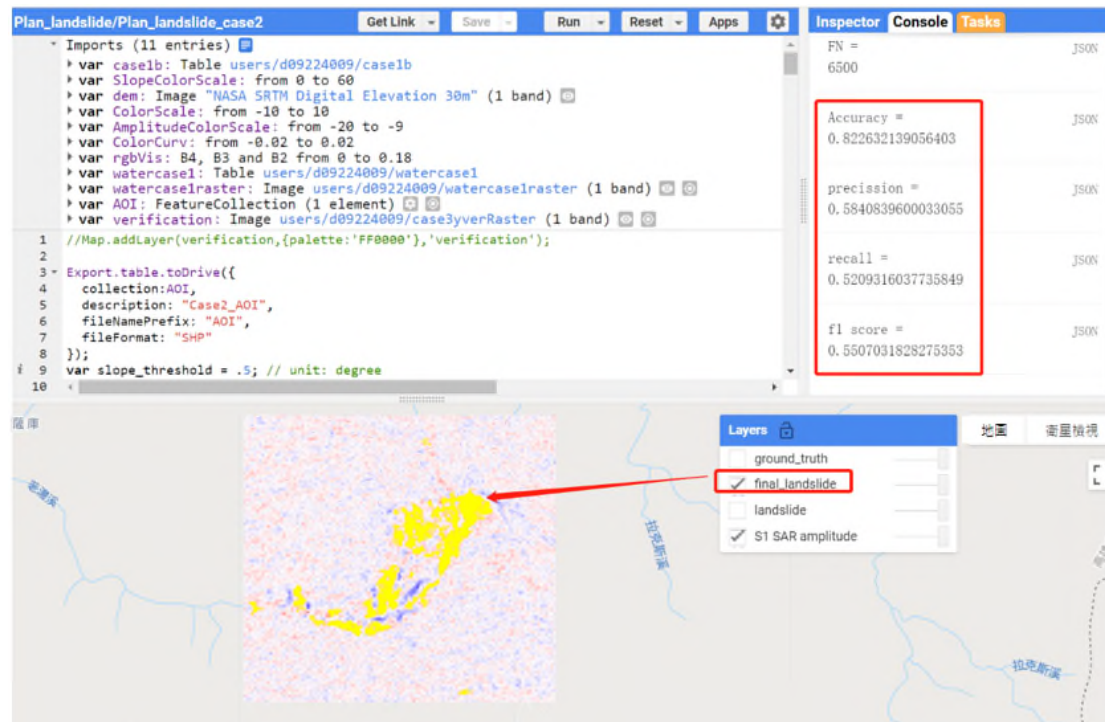


圖 4.5 基於 GEE 的玉穗溪上游集水區崩塌地識別結果圖。黃色部分為識別崩塌地範圍。

本計劃案例二採用的方法如圖 4.1 所示，選取因盧碧颱風帶來的大規模劇烈豪雨所導致的玉穗溪上游集水區崩塌地作為研究案例，其在莫拉克風災後崩塌也已經逐漸自然復育，但是此次又因盧碧颱風帶來的大規模劇烈豪雨又發生了崩塌，且崩塌範圍巨大，影響嚴重。也為了驗證案例一的寶來一橋上游右岸國有林班地邊坡崩塌識別結果的經驗參數，本研究的案例二與案例一一樣也是根據圖 4.1 所示方法流程，選取盧碧颱風 2021 年 8 月 7 日前三個月事件前影像與 8 月 10 日後一個月影像，分別求事件前後的 SAR 影像平均振幅，再將事件前後影像相減，得到前後影像振幅差。然後利用振幅差根據影像顯示

屬性利用閾值法提取崩塌地範圍。設置振幅閾值為大於 2dB，進行平滑去除小斑塊，而後根據研究區 DEM 數值與坡度降低誤差，設置 DEM 值大於 525 m，且坡度值大於 15°，得到如上圖 4.5 所示崩塌地識別結果。其識別結果與 Sentinel-2 事件前 2021 年 7 月 9 號以及事件後 8 月 28 號這兩張光學影像，經過人工判識玉穗溪上游集水區崩塌地範圍進行對比，精度驗證結果為 Accuracy = 0.827，precision = 0.584，recall = 0.521，f1 score = 0.551。

具體 GEE 的 code 可於以下鏈結取得：

<https://code.earthengine.google.com/740f8c233f6afad60573709c4167aa45>

第四節 案列三：多期雷達影像偵測盧碧颱風之玉穗溪下游明霸克露橋沖毀事件

玉穗野溪集水區受到 2021 年盧碧颱風豪雨影響造成崩塌 128.2 公頃，產生 1107 萬方土砂量，還有 713 萬方土砂堆積於坡面與河道。另外造成較大影響的是豪雨挾帶土砂形成土石流，沖斷了南橫公路明霸克露橋，在匯流口堆積 202 萬方沖積扇，寬度達 500 公尺，最高達 22.3 公尺，平均高度 11.9 公尺，對交通造成了嚴重的影響，也導致了較高的人力物力財力損失。本計劃案例三的研究區域範圍選定為玉穗溪集水區下游的南橫公路明霸克露橋區域如圖 4.6 所示。

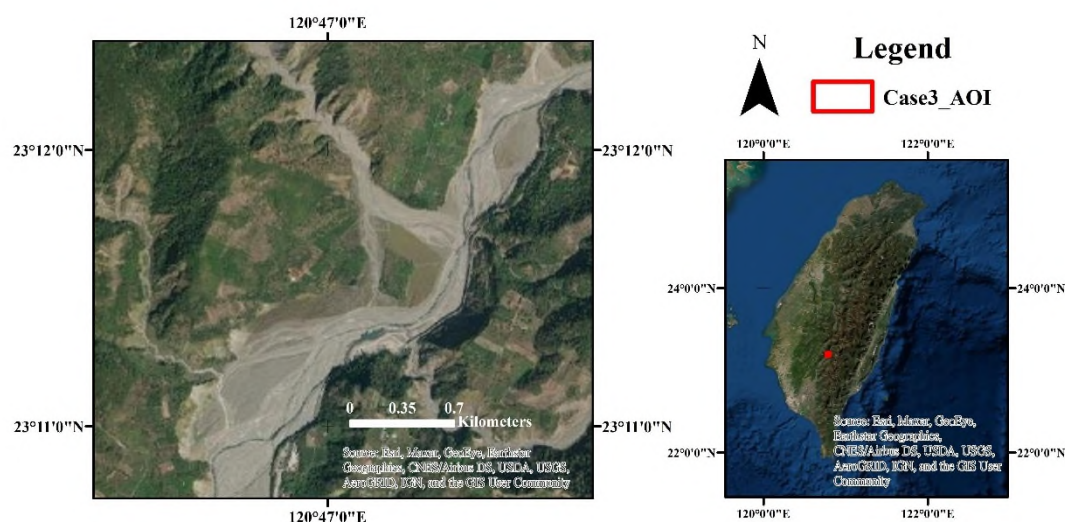


圖 4.6 盧碧颱風之玉穗溪下游南橫公路明霸克露橋研究範圍。明霸克露橋坐標：23.188646 N ， 120.788213 E ，位於臺灣中南部。

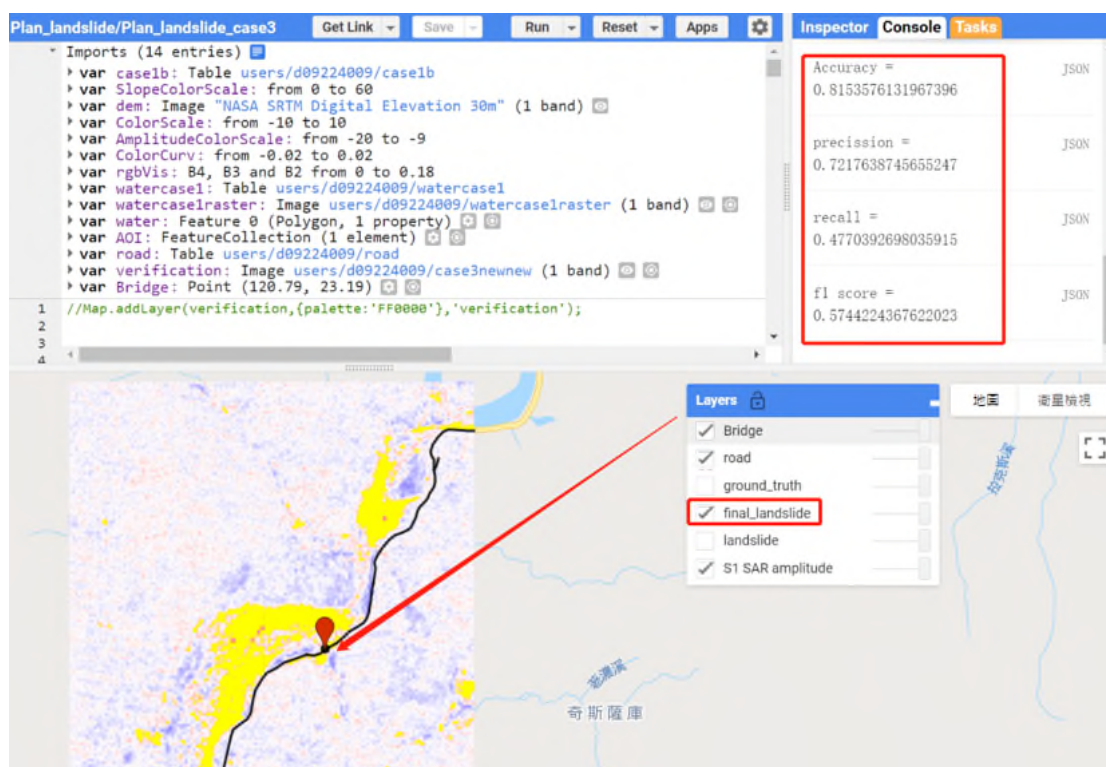


圖 4.7 盧碧颱風之玉穗溪下游南橫公路明霸克露橋沖毀研究範圍。

黃色部分為識別崩塌地範圍。黑色線段為南橫公路部分區域，紅點定位為明霸克露橋。

此案例也採用如圖 4.1 所示方法，選取因盧碧颱風帶來的大規模劇烈豪雨所導致的玉穗溪下游南橫公路明霸克露橋沖毀區域作為研究案例。也為了驗證前面案例所使用的研究參數適用性問題，本案例使用的振幅參數，DEM,坡度參數都與上面兩個案列一致，得到如上圖 4.5 所示崩塌地識別結果，而精度驗證是通過與 Sentinel-2 事件前 2021 年 7 月 9 號以及事件後 8 月 28 號這兩張光學影像，經過人工判識玉穗溪下游泥沙堆積範圍進行對比，精度驗證結果為 Accuracy = 0.815, precision = 0.722, recall = 0.477, f1 score = 0.574。

具體 GEE 的 code 可於以下鏈結取得：

[https://code.earthengine.google.com/4ef95e7448fd60713bb1871ded7151f](https://code.earthengine.google.com/4ef95e7448fd60713bb1871ded7151f5)

[5](#)

第五節 小結

本計劃通過三個案例研究分析基於 GEE 的 Sentinel-1 雷達影像偵測降雨引發的崩塌，三個案例都採用一致的研究方法：（1）前後影像的振幅差參數都設置為大於 2dB；（2）若在山區為了去除斑駁雜訊，設置 DEM 參數大於 500 左右；（3）坡度大於 15°左右；（4）而在地形平坦地區斑駁雜訊少，對 DEM 高程參數與坡度參數無要求。

偵測的結果驗證也顯示其精度也較高，Accuracy 都大於 80%，precision、recall、f1 score 都接近 50%，說明其具有適用性，且通過 GEE 這個開源雲端平臺，可以快速至 1 分鐘內偵測識別出崩塌地範圍，若要偵測其他地區崩塌地，可直接在 GEE 中框選研究區域範圍，選擇事件前後影像時間範圍，就可以簡單快速的偵測事件前後崩塌範圍。對於崩塌地識別的解析度與堰塞湖或淹水偵測一樣，取決於所使用的雷達影像的解析度，例如本計劃所使用的是 Sentinel-1 影像，其解析度為 5×20m。綜上，本計劃山崩結果可用來後續偵測識別崩塌地，為防災減災以及決策提供參考。

第五章 現有雷達衛星影像處理開源軟體之評估與 測試

第一節 Google Earth Engine 平臺簡介

針對 40 多年以來封存的衛星數據無法被有效的利用，Google 公司開發了 Earth Engine 這一平臺，希望實現整合全球信息、供大眾使用。Google Earth Engine (GEE) 是一個“遙測大數據”分析和呈現的平臺。它將衛星影像和地理空間數據集以及科學分析功能結合在一起，如圖 5-1，使科學家，研究人員和開發人員可以使用它來檢測變化，繪製趨勢並量化地球表面的差異。Google Earth Engine 目前有許多的 API 可以調用以便計算研究，其 API 包括 JavaScript 版本和 Python 版本。另外，更為關鍵的是 GEE 是一個雲端平臺，免費面向非營利性機構人員。科研人員可以免費使用 Google 雲端伺服器的運算能力，這對於硬體設備條件不好且需要大量數據運算的研究人員提供了更好的科研條件，使其突破硬體條件設備限制，在數據處理速度上得到了質的提升。GEE 應用程式設計發展介面如圖 5-2 所示，其已經被廣泛的應用於遙感地物分類如圖 5-3、動態變化監測、生態學等領域。

目前 Google Earth Engine 上可以免費獲取幾十 PB 的影像柵格資料以及向量數據。影像類數據包括 Landsat 系列產品、MODIS 系列產品、Sentinel 系列產品、NAIP 產品等；向量數據如全球向量邊界等；

利用雷達影像偵測強降雨引致的大型崩塌與堰塞湖

高程數據；夜光遙感數據；土地分類產品數據、全球水體數據等；氣候天氣數據；疾病人口等數據。

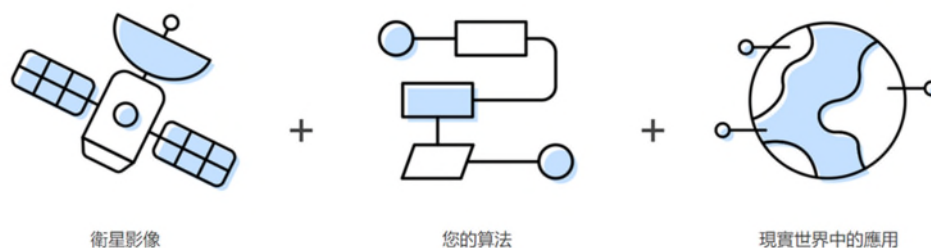


圖 5-1 Google Earth Engine (GEE, 參考來源：<https://earthengine.google.com/platform/>)

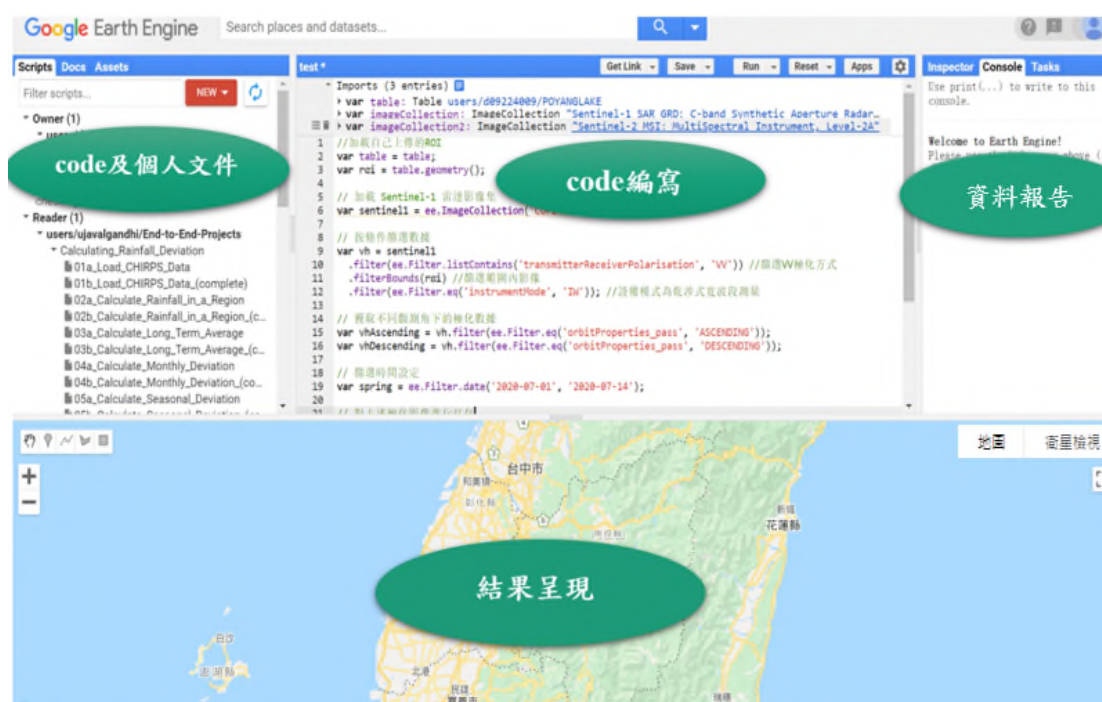


圖 5-2 GEE 應用程式設計發展介面 (API) (GEE, 參考來源：<https://earthengine.google.com/platform/>)

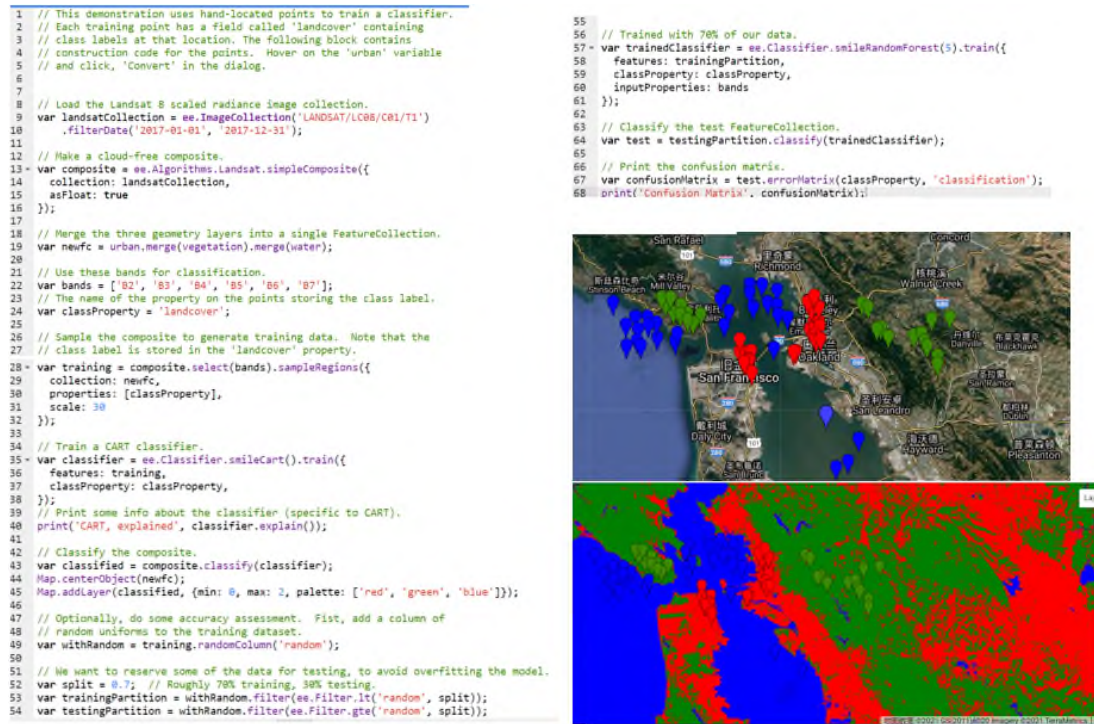


圖 5-3 GEE 土地利用類型分類（GEE，參考來源：<https://earthengine.google.com/platform/>）

Google Earth Engine 的技術架構可以分為四大部分如圖 4-4 所示，（1）前臺調用服用（2）API（3）後臺計算服務器（4）數據存儲服務。

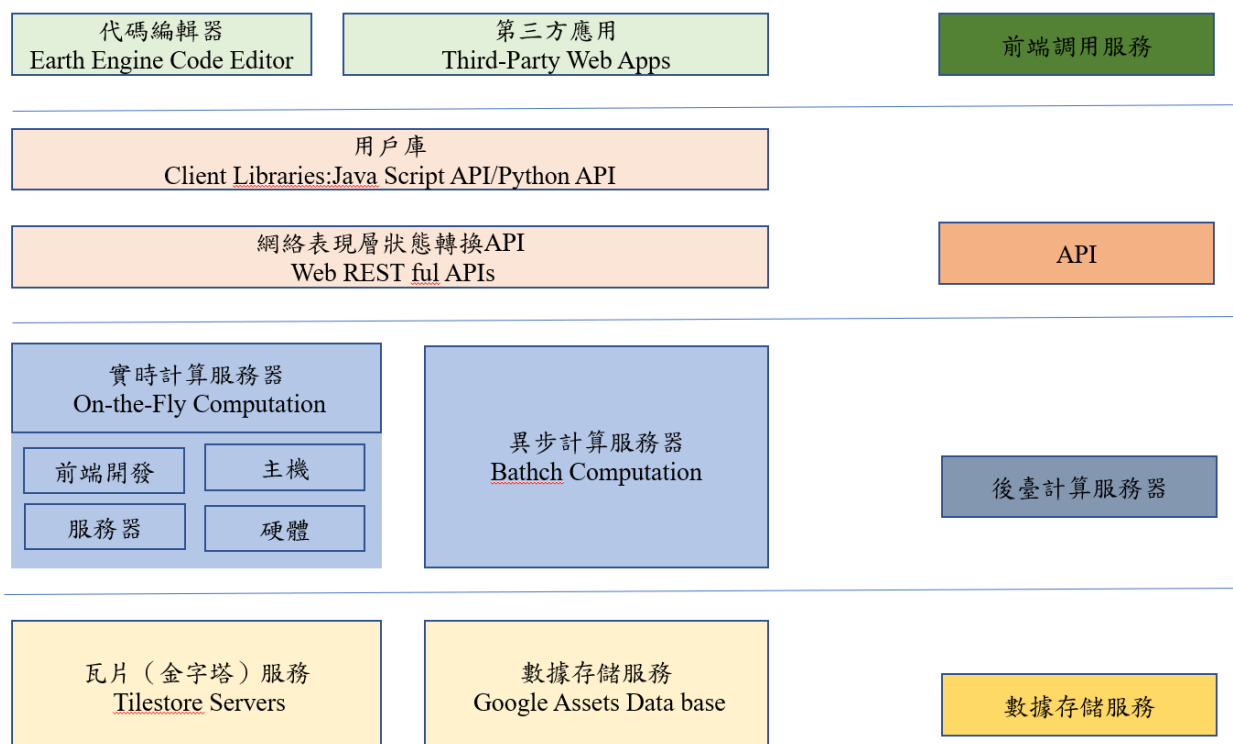


圖 5-4 Google Earth Engine 技術架構圖

Google Earth Engine 平臺的整個處理流程如下圖所示，它與本地軟體使用有區別，目前主要是通過用戶自主編寫相關處理 code 來處理遙感影像數據，而不是通過界面 UI 操作來實現。具體步驟如下，而其使用架構如圖 5-5 所示：

- (1) 用戶在 Google Earth Engine 提供的在線的 Code Editor 上編寫 code；
- (2) 點擊運行後編輯器會將用戶編寫的 code 通過 API 接口直接發送給 Google Earth Engine 的後臺；

- (3) Google Earth Engine 後臺接收到用戶編寫的 code 會根據 code 的邏輯將 code 分配到不同的服務器上操作；
- (4) 顯示的邏輯會經過後臺計算後返回給編輯器地圖界面顯示，同時輸出；
- (5) 異步導出的邏輯會生成相關導出任務，然後在後臺異步執行直至任務到處結束，相關結果根據用戶設置導出到 Google Drive、Google Cloud Storage、或者 Google Assets 中。

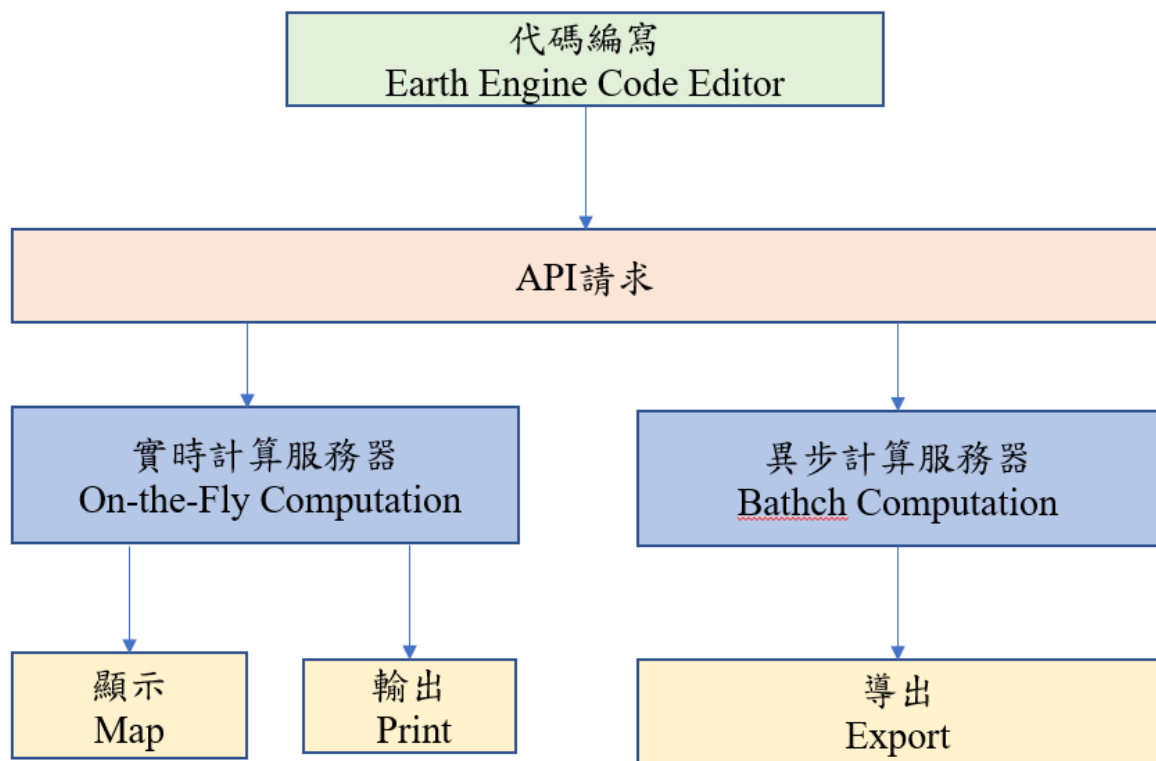


圖 5-5 Google Earth Engine 使用架構圖

第二節 SNAP軟體簡介

SNAP 軟體簡介將複雜的開源碼處理流程，透過圖形化介面提供操作使用，總共分成三種不同的工具，分別為 Sentinel-1 工具箱、Sentinel-2 工具箱、Sentinel-3 工具箱。本計畫主要利用其中的 Sentinel-1 工具箱來處理 SAR 影像。

Sentinel-1：處理 ESA SAR 的影像（Sentinel-1; ERS-1 & 2; ENVISAT; ALOS PALSAR; TerraSAR-X; COSMO-SkyMed; RADARSAT-2 的第三方 SAR 數據），將 SAR 影像進行處理的工具，將影像進行讀取、處理、顯示、分析的應用程式，功能中包含糾正、雜訊濾除、套合、正射處理、數據轉換、極化處理、產製干涉圖，詳細功能種類說明如表 5-1。

表 5-1 SNAP Sentinel-1 工具箱特性

支援的雷達影像種類
Sentinel-1, ENVISAT ASAR, ERS-1/2, RADARSAT-2, ALOS, ALOS-2, Cosmo-Skymed, TerraSAR-X/TanDEM-X
功能種類
1. SNAP 內包含所有一般性地球觀測資料處理（裁切、重新取樣、影像計算） 2. 影像校正（SENTINEL-1, ENVISAT ASAR, ERS 1/2, ALOS, RADARSAT-2, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed） 3. 多視處理與斑駁雜訊（單時與多時）濾波 4. 精確軌道處理（SENTINEL-1, Doris, Prare and Delft orb.） 5. 複數影像產品的套疊與偵測 6. Sentinel-1 TOPS 影像的干涉、影像條帶（Burst）去除、切片影像（slice）合並 7. 都普勒地形校正 8. 地形校正期間的輻射標準化 9. SAR 模擬、疊置和陰影遮罩 10. SAR 地形校正模擬 11. 橢球校正、地圖重新投影、鑲嵌 12. 海洋工具：基於 SAR 資料的基本程序：溢油偵測、船舶偵測和

風場估計

13. 完全集成 InSAR 處理器 (Jlinda) 可用於條帶模式和去除成像時的都普勒效應
14. 四波長和雙波長矩陣轉換，斑點濾波，分解和分類器
15. 與 PolSARpro 工具箱兼容 (讀取，輸出)

使用的介面簡單化 (如圖 5-6)，將所需要功能透過連接圖方法組成處理流程，計算干涉成果。

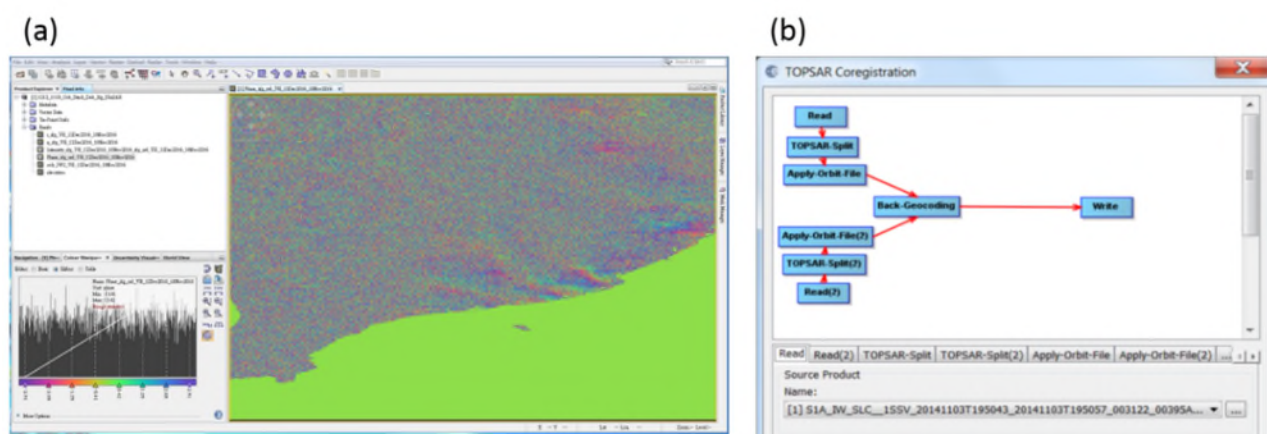


圖 5-6 SNAP 軟體 (a) 操作畫面。(b) 執行處理功能連結圖

Sentinel-2：處理高解析度光學影像 (Sentinel-2 MSI、RapidEye、SPOT、MODIS (Aqua 和 Terra)、Landsat (TM))，功能具有大氣糾正、輻射處理、計算輻射指數如：DVI，RVI，PVI，IPVI，WDVI，TNDVI，GNDVI，GEMI，ARVI，NDI45，MTCI，MCARI，REIP，S2REP，IRECI，PSSRa (如圖 5-7)、土壤指數如：SAVI，TSAVI，MSAVI，MSAVI2，BI，BI2，RI，CI、水指數如：NDWI，NDWI2，MNDWI，NDPI，NDTI、提供影像分類、多變數轉化偵測法。

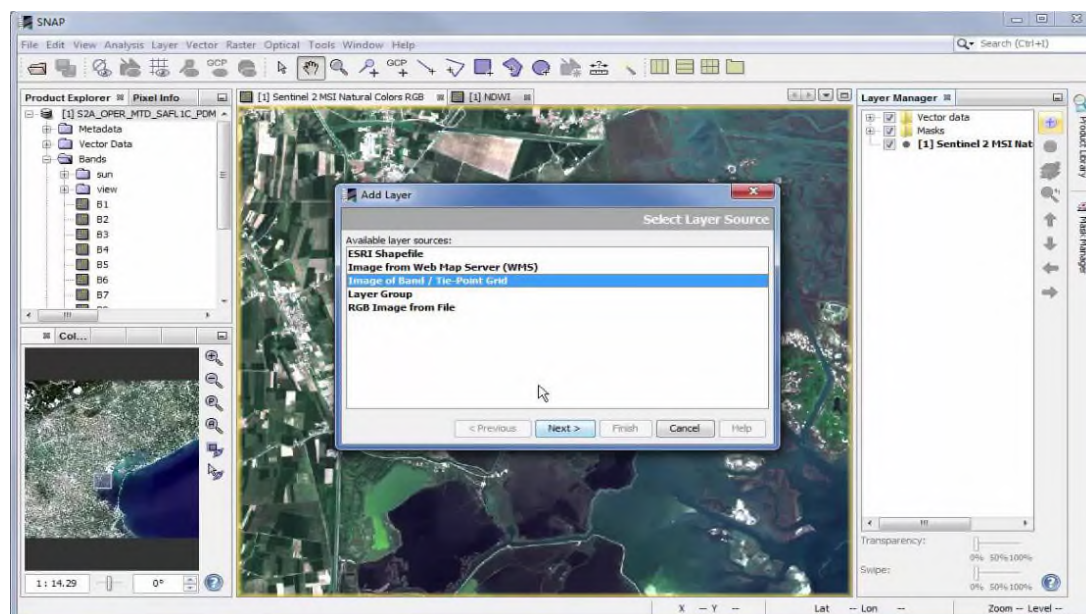


圖 5-7 SNAP 計算輻射指數圖

Sentinel-3：處理中等解析度光學影像（Sentinel-3 OLCI/SLSTR; ENVISAT MERIS/AATSR; Landsat 4–8; CHRIS/Proba; Spot VGT; MODIS, SeaWiFS, VIIRS; ALOS, AVHRR），功能具有可視化快速載入影像，並且可同時多幅影像呈現（如圖 5-8），並具有分析的功能（像素分析、影像直方圖、光譜值、散布圖法），以及處理的功能（群集分析、光譜融合、影像糾正、影像鑲嵌）（如圖 5-9）。為提供更多的處理方案可結合 Python、Java 開發的套件，擴充原本功能的使用性，如搭配其他軟體（如 R 語言、QGIS、GRASS-GIS 等）可以處理洪氾區域判釋（如圖 5-10）。

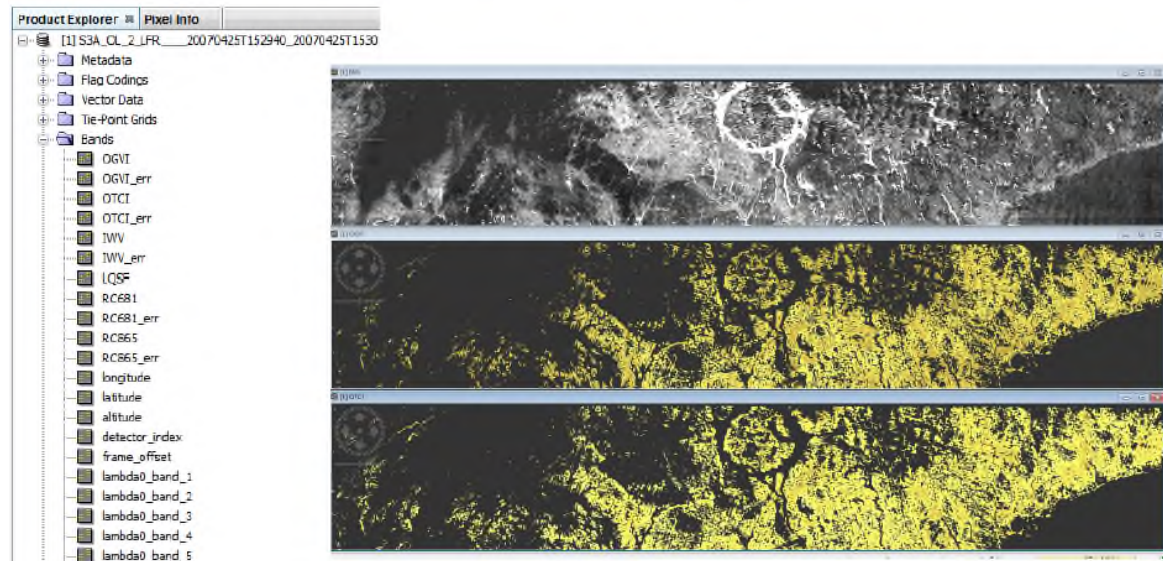


圖 5-8 SNAP 多波段展示圖

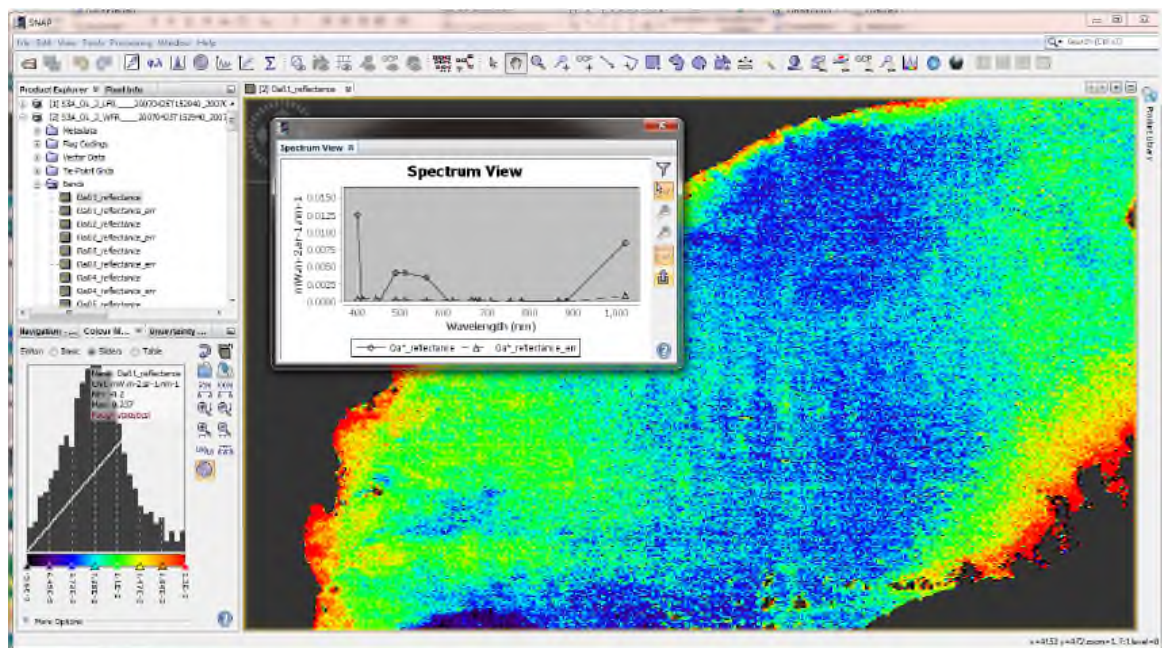


圖 5-9 SNAP 光譜調整示意圖。

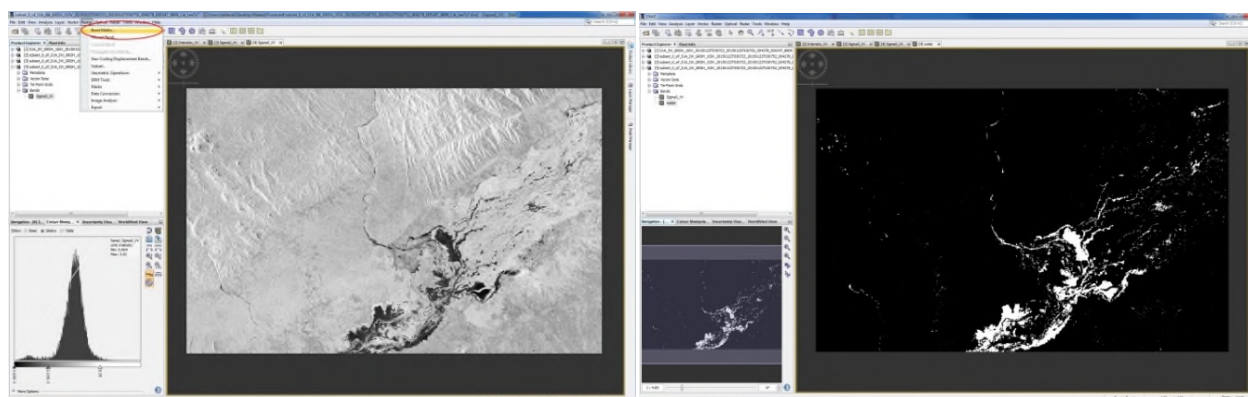


圖 5-10 Sentinel-1 雷達衛星影像經由 SNAP 製作洪泛區域判定之範
例（資料來源：ESA）。

第三節 小結

Google Earth Engine 平臺與 SNAP 軟體相比較，兩者各具有自身的優缺點。用戶可以根據自己需求選擇使用，或者結合使用。

就 Google Earth Engine 平臺來說，它具有以下幾點優勢：

- (1) 非商業用戶免費使用；
- (2) 基礎數據量大，可直接 API 調用，省時省力；
- (3) 後臺處理運算能力強，使用戶突破硬體設備限制；
- (4) 其擁有一個完整而良好的開發生態環境。

其缺點為：對於 code 能力要求較高，若 code 基礎不強，則無法很難使用。

SNAP 軟體的優點是：

- (1) 屬於免費開源軟體；
- (2) 圖形化使用者介面，操作方便；
- (3) 對用戶使用友好，無 code 能力要求。

其缺點為：對於硬體設備要求高，否則無法處理多數量大面積的衛星遙測資料。

第六章 討論建議與結論

本計畫已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以及影像費用與獲取便捷性，在颱風豪雨後洪水溢淹、堰塞湖的偵測中，建議使用的最佳影像是選擇使用 C 波段與的 Sentinel-1 雷達影像。

現有雷達衛星影像處理開源軟體之評估與測試中，經過比較 Google Earth Engine 開源雲端平臺和 SNAP 軟體優缺點，發現使用 SNAP 軟體，在影像進行讀取、處理、顯示、分析，更包含輻射校正、雜訊濾除、套合、正射處理、數據轉換、極化處理、產製干涉圖等一系列處理對硬件設備要求較高，對存儲空間與記憶體需求也大，從數據的下載到獲得堰塞湖與崩塌地識別結果需要 30 分鐘至幾個小時不等，但是使用 Google Earth Engine 開源雲端平臺，確定好研究區與事情前後影像時間可以快至一兩分鐘內得到堰塞湖與崩塌地識別結果。所以本計劃建議使用的最佳研究平臺為 Google Earth Engine 開源雲端平臺。

本計劃研究主要基於歐洲太空總署的 Sentinel-1 雷達影像的事件前後雷達影像後背散射係數會發生變化的原理，採用閾值法，反復實驗確定偵測堰塞湖的背向散射係數閾值大約為-13 dB 左右，而 DEM 高程值則需要根據研究區內的平均高程參考進行人工目視判定；崩塌地的偵測之閾值經過研究得出影像前後振幅差大於 2 dB，而 DEM 在山間設定為 500 公尺左右，坡度設置為 15°左右較為合適，要研究平

坦地形區如河流沖積扇則對坡度與 DEM 高程無要求。通過開源雲端平臺 Google Earth Engine (GEE) 對堰塞湖與崩塌地偵測識別進行快速流程化自動處理，結果顯示偵測的精確指標 Accuracy 基本大於 80%，precision、recall、f1 score 大約上 50% 甚至更高，有一定程度上可信度，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或崩塌地存在的期間進行拍攝，快速取得影像，另外便是由於 Sentinel-1 影像自身解析度的原因所偵測的堰塞湖與崩塌地面積需要足夠的大，需要遠大於 100 m²，若需要更高解析度的偵測則可以參照表 2-1 各種衛載 SAR 感測器規格和表 2-2 各種衛載 SAR 影像購買費用相關說明，購買所需要的雷達影像解析度進行分析研究。

參考文獻

1. 邱俊穎, 謝嘉聲, 黃宗仁, 葉堃生, 管立豪, & 胡植慶. (2019). 合成孔徑雷達影像於颱風豪雨後淹水之偵測. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 24 (4), 211-222.
2. 胡植慶(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托研究計畫成果報告書。
3. 胡植慶(2019), 雷達衛星影像輔助林地災害偵測之研究(2/2), 行政院農業委員會林務局農林航空測量所委托研究計畫成果報告書。
4. 陳錕山(2010), 雷達影像觀測技術於坡地災害之應用, 行政院農業委員會委託研究計劃成果報告書。
5. 極隼科技股份有限公司(2012), 雷達遙測技術於林地災害判釋之研究, 農林航空測驗所委託研究計畫成果報告書。
6. Amitrano, D., Di Martino, G., Iodice, A., Riccio, D., & Ruello, G. (2018). Unsupervised rapid flood mapping using Sentinel-1 GRD SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56 (6), 3290-3299.
7. ASI. (2009). COSMO-SkyMed SAR Products Handbook. Roma,

Italy.

8. Bartsch, A., Trofaier, A.M., Hayman, G., Sabel, D., Schlaffer, S., Clark, D.B., & Blyth, E. (2012). Detection of open water dynamics with ENVISAT ASAR in support of land surface modelling at high latitudes. *Biogeosciences*, 9 (2), 703–714.
9. Bayik, C., Abdikan, S., Ozbulak, G., Alasag, T., Aydemir, S., & Sanli, F. B. (2018). Exploiting multi-temporal Sentinel-1 SAR data for flood extend mapping. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*, 42 (3), W4.
10. Buckreuss, S., Werninghaus, R., & Pitz, W. (2009). The German satellite mission terraSAR-X. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 24(11), DOI: 10.1109/RADAR.2008.4720788.
11. Cao, H., Zhang, H., Wang, C., & Zhang, B. (2019). Operational flood detection using Sentinel-1 SAR data over large areas. *Water*, 11 (4), 786.
12. Chapman, B., McDonald, K., Shimada, M., Rosenqvist, A., Schroeder, R., & Hess, L. (2015). Mapping Regional Inundation with Spaceborne L-Band SAR. *Remote Sensing*, 7 (5), 5440–5470.
13. De Roo, A., van der Knijff, J., Horritt, M., Schmuck, G., & De Jong, S. (1995). Assessing Flood Damages of the 1997 Oder Flood and the 1995 Meuse Flood. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing*, Enschede, The

- Netherlands, 16–20.
14. DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J. W., & Lang, M. W. (2020) . Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. Remote Sensing of Environment, 240. doi : 10.1016/j.rse.2020.111664
 15. DLR. (2007) . TerraSAR-X Ground Segment Level 1b Product Format Specification. TX-GS-DD-3307.
 16. ESA. (2006) . Product Specification for ERS Products within ENVISAT Format. Technical Report PX-SP-50-9105.
 17. ESA. (2012) . ENVISAT payload data segment, Volume 8 ASAR Product Specifications . Technical Report PO-RS-MDA-GS-2009.
 18. ESA. (2013) . ALOS-PALSAR IPF SAR Products, CEOS format specifications. PLSR-CEOS-v3.2.
 19. ESA. (2015) . ENVISAT-1 products specifications, product data conventions. Technical Report IDEAS+-SER-IPF-SPE-2337.
 20. Evans, T.L., Costa, M., Telmer, K., & Silva, T.S. (2010) . Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to Map Land Cover and Seasonal Inundation in the Brazilian Pantanal. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 3 (4) , 560-575.
 21. Fomelis, M. (2015) . ESA Sentinel-1 Toolbox Generation of SAR Backscattering Mosaics, Course Materials. In Proceedings of the 6th

- ESA Advanced Training Course on Land Remote Sensing, Bucharest, Romania, 14.
22. Greifeneder, F., Wagner, W., Sabel, D., & Naeimi, V. (2014). Suitability of SAR imagery for automatic flood mapping in the Lower Mekong Basin. *International Journal of Remote Sensing*, 35 (8), 2857-2874.
23. Handwerger, A. L., Jones, S. Y., Huang, M.-H., Amatya, P., Kerner, H. R., & Kirschbaum, D. B. (2020). Rapid landslide identification using synthetic aperture radar amplitude change detection on the Google Earth Engine. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-24. doi : 10.5194/nhess-2020-315
24. Haq, M., Akhtar, M., Muhammad, S., Paras, S., & Rahmatullah, J. (2012). Techniques of remote sensing and GIS for flood monitoring and damage assessment : a case study of Sindh province, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15 (2), 135-141.
25. Henry, J. B., Chastanet, P., Fellah, K., Desnos, Y. L. (2006). Envisat Multi-Polarized ASAR Data for Flood Mapping. *Int. J. Remote Sens.*, 27(10), 1921-1929, https://doi.org/10.1080/014311605_00486724.
26. Janoth, J., Gantert, S., Koppe, W., Kaptein, A., & Fischer, C. (2012, July). TerraSAR-X2-mission overview. In *Geoscience and Remote*

- Sensing Symposium (IGARSS) , 2012 IEEE International (pp. 217-220) . IEEE., DOI : 10.1109/IGARSS.2012.6351599
27. JAXA. (2014) . ALOS-2/PALSAR-2 Level 1.1/1.5/2.1/3.1 GeoGEOTIFF Product Format Description.
28. Joyce, K. E., Belliss, S. E., Samsonov, S. V., McNeill, S. J., & Glassey, P. J. (2009) . A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in physical geography*, 33 (2) , 183-207.
29. Jung, J., & Yun, S.-H. (2020) . Evaluation of Coherent and Incoherent Landslide Detection Methods Based on Synthetic Aperture Radar for Rapid Response : A Case Study for the 2018 Hokkaido Landslides. *Remote Sensing*, 12 (2) . doi : 10.3390/rs12020265
30. Khan, S. I., Hong, Y., Wang, J., Yilmaz, K. K., Gourley, J. J., Adler, R. F., et al. (2010) . Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in Lake Victoria basin : Implications for hydrologic prediction in ungauged basins. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49 (1) , 85-95.
31. Konishi, T., Suga, Y. (2018) . Landslide Detection Using COSMO-SkyMed Images : A Case Study of A Landslide Event on Kii Peninsula, Japan. *Euro J. Remote Sens.*, 51 (1) , 205-221.

32. Kordelas, G. A., Manakos, I., Aragonés, D., Díaz-Delgado, R., & Bustamante, J. (2018). Fast and automatic data-driven thresholding for inundation mapping with Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 10(6), 910.
33. Li, J., & Wang, S. (2015). An automatic method for mapping inland surface waterbodies with Radarsat-2 imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 36(5), 1367-1384.
34. Li, Y., Martinis, S., Wieland, M., Schlaffer, S., & Natsuaki, R. (2019). Urban flood mapping using SAR intensity and interferometric coherence via Bayesian network fusion. *Remote Sensing*, 11(19), 2231.
35. Malinowski, R., Groom, G., Schwanghart, W., & Heckrath, G. (2015). Detection and delineation of localized flooding from WorldView-2 multispectral data. *Remote Sensing*, 7(11), 14853-14875.
36. Manjusree, P., Kumar, L. P., Bhatt, C. M., Rao, G. S., & Bhanumurthy, V. (2012). Optimization of threshold ranges for rapid flood inundation mapping by evaluating backscatter profiles of high incidence angle SAR images. *International Journal of Disaster Risk Science*, 3(2), 113-122.
37. Martinis, S. (2010). Automatic Near Real-Time Flood Detection in High Resolution X-Band Synthetic Aperture Radar Satellite Data

- Using Context-Based Classification on Irregular Graphs, Ph.D. Thesis, LMU Munich, München, Germany, urn : nbn : de : bvb : 19-123731.
38. Martinis, S., Twele, A., & Voigt, S. (2009) . Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 303–314.
 39. Martinis, S., Twele, A., & Voigt, S. (2009) . Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9 (2) , 303-314.
 40. Martinis, S., Twele, A., & Voigt, S. (2011) . Unsupervised Extraction of Flood-Induced Backscatter Changes in SAR Data Using Markov Image Modeling on Irregular Graphs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49 (1) , 251–263.
 41. Miasnikov, A. D., Rome, J. E., & Haralick, R. M. (2004, 26-26 Aug. 2004) . A hierarchical projection pursuit clustering algorithm. Paper presented at the Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004.
 42. Muster, S., Heim, B., Abnizova, A., & Boike, J. (2013). Water Body Distributions across Scales : A Remote Sensing Based Comparison of Three Arctic Tundra Wetlands. *Remote Sensing*, 5 (4) , 1498–

1523.

43. Novresiandi, D. A., Nagasawa, R. (2017). Polarimetric Synthetic Aperture Radar Application For Tropical Peatlands Classification : A Case Study in Siak River Transect, Riau Province, Indonesia. J. Appl. Remote Sens., 11 (1) , 016040, [https : //doi.org/10.1117/1.JRS.11.016040](https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.016040).
44. OHKI, M., WATANABE, M., NATSUAKI, R., MOTOHKA, T., NAGAI, H., TADONO, T., et al. (2016). Flood Area Detection Using ALOS-2 PALSAR-2 Data for the 2015 Heavy Rainfall Disaster in the Kanto and Tohoku Area, Japan. Journal of The Remote Sensing Society of Japan, 36 (4) , 348-359.
45. Papamarkos, N., & Gatos, B. (1994). A new approach for multilevel threshold selection. CVGIP : Graphical Models and Image Processing, 56 (5) , 357-370.
46. Plank, S. (2014). Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR—A comprehensive review and outlook to Sentinel-1. Remote Sensing, 6 (6) , 4870-4906.
47. Plank, S., Tuele, A., & Martinis, S. (2016). Landslide mapping in vegetated areas using change detection based on optical and polarimetric sar data. Remote Sensing, 8 (4) , 307.
48. Psomiadis, E. (2016). Flash flood area mapping utilising

- SENTINEL-1 radar data. Paper presented at the Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications VII.
49. Rahman, M. R., & Thakur, P. K. (2018). Detecting, mapping and analysing of flood water propagation using synthetic aperture radar (SAR) satellite data and GIS : A case study from the Kendrapara District of Orissa State of India. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 21, S37-S41.
 50. Robinson, T. R., Rosser, N., & Walters, R. J. (2019). The Spatial and Temporal Influence of Cloud Cover on Satellite-Based Emergency Mapping of Earthquake Disasters. Sci Rep, 9 (1), 12455.
[https : //www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31462664](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31462664) doi : 10.1038/s41598-019-49008-0
 51. RSI. (2004). RADARSAT Data Products Specifications. RSI-GS-026, Revision 3/0, August 19, 2004.
 52. RSI. (2016a). RADARSAT-2 Product description. RN-SP-52-1238, Revision 1/13, March 21, 2016.
 53. RSI. (2016b). RADARSAT-2 Product format definition. RN-RP-51-2713, Revision 1/15, OCT. 26, 2016.
 54. Ruiz-Ramos, Marino, A., & Boardman, C. P. (2018, 22-27 July 2018). Using Sentinel 1-SAR for Monitoring Long Term Variation in Burnt Forest Areas. Paper presented at the IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

55. Shahabi, H., Shirzadi, A., Ghaderi, K., Omidvar, E., Al-Ansari, N., Clague, J. J., et al. (2020). Flood detection and susceptibility mapping using Sentinel-1 remote sensing data and a machine learning approach : Hybrid intelligence of bagging ensemble based on k-nearest neighbor classifier. *Remote Sensing*, 12 (2) , 266.
56. Shen, X., Wang, D., Mao, K., Anagnostou, E., & Hong, Y. (2019). Inundation extent mapping by synthetic aperture radar : a review. *Remote Sensing*, 11 (7) , 879.
57. Simon, R.N., Tormos, T., Danis, P.A. (2014). Geographic object based image analysis using very high spatial and temporal resolution radar and optical imagery in tracking water level fluctuations in a freshwater reservoir. *South Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics*, 3, 287-291.
58. Singh, P., Maurya, V., & Dwivedi, R. (2021). Pixel Based Landslide Identification Using Landsat 8 and GEE. Paper presented at the 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS.
59. Stewart, C. (2016). Exercise Sentinel-1 Processing, Course Materials. Proceedings of the 8th ESA Training Course on Radar and Optical Remote Sensing, Cesis, Latvia, 5.
60. Suga, Y., Konishi, T. (2012, November). Landslide Detection Using Very High-Resolution Satellite Imageries. In *Land Surface Remote*

- Sensing (Vol. 8524, p. 852428) . In Proceedings of the 8th SPIE Asia-Pacific remote sens., Land Surface Remote Sens. (852428–852428-6) . Kyoto, Japan., doi : 10.1117/12.976033.
61. Tay, C. W. J., Yun, S. H., Chin, S. T., Bhardwaj, A., Jung, J., & Hill, E. M. (2020) . Rapid flood and damage mapping using synthetic aperture radar in response to Typhoon Hagibis, Japan. Sci Data, 7(1) , 100. [https : //www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32214103](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32214103) doi : 10.1038/s41597-020-0443-5
62. Tiwari, V., Kumar, V., Matin, M. A., Thapa, A., Ellenburg, W. L., Gupta, N., & Thapa, S. (2020) . Flood inundation mapping-Kerala 2018; Harnessing the power of SAR, automatic threshold detection method and Google Earth Engine. Plos one, 15 (8) , e0237324.
63. Uddin, K., Matin, M. A., & Meyer, F. J. (2019) . Operational flood mapping using multi-temporal Sentinel-1 SAR images : a case study from Bangladesh. Remote Sensing, 11 (13) , 1581.
64. Voormansik, K., Praks, J., Antropov, O., Jagomägi, J., & Zalite, K. (2013) . Flood mapping with TerraSAR-X in forested regions in Estonia. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7 (2) , 562-577.
65. Washaya, P., Balz, T., & Mohamadi, B. (2018) . Coherence Change-Detection with Sentinel-1 for Natural and Anthropogenic Disaster

- Monitoring in Urban Areas. Remote Sensing, 10 (7) . doi :
10.3390/rs10071026
66. Williams, J. G., Rosser, N. J., Kincey, M. E., Benjamin, J., Owen, K. J., Densmore, A. L., et al. (2018) . Satellite-based emergency mapping using optical imagery : experience and reflections from the 2015 Nepal earthquakes. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18 (1) , 185-205. [https : //nhess.copernicus.org/articles/18/185/2018/](https://nhess.copernicus.org/articles/18/185/2018/) doi :
10.5194/nhess-18-185-2018
67. Xue, J.-H., & Zhang, Y.-J. (2012) . Ridler and Calvard's, Kittler and Illingworth's and Otsu's methods for image thresholding. *Pattern Recognition Letters*, 33 (6) , 793-797.

委員審查意見與回覆

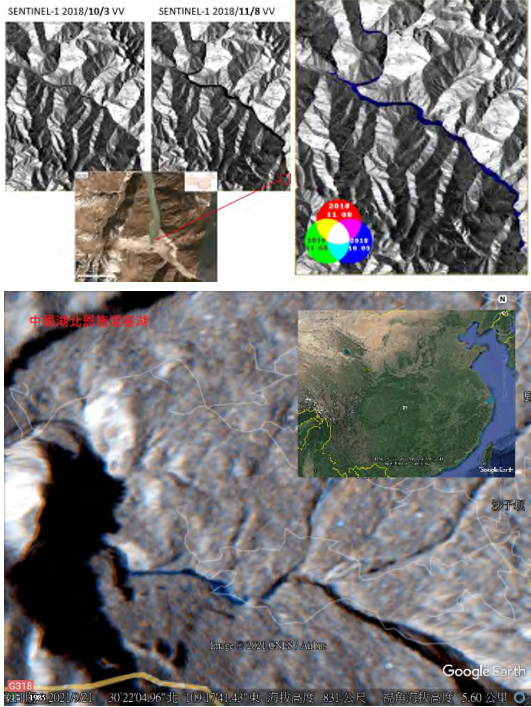
第一節 期初審查意見與回覆

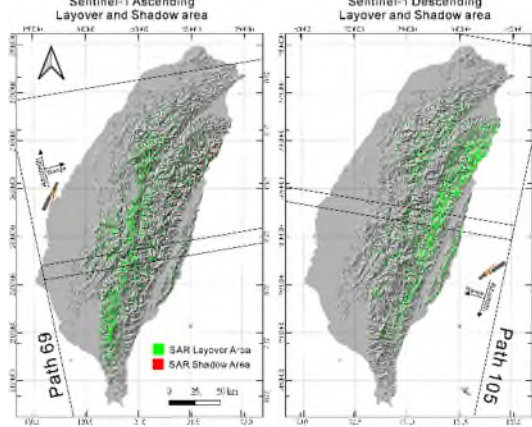
期初審查意見	處理情形
1. SAR 時間序列資料要如何利用？請再詳述。	感謝評委意見。SAR 時間序列資料可以用 GEE 中一些指定函數 API 做出水體的動態檢測，計劃將於期末計劃中完成，如期中報告書中第三章第三節所述。
2. 創宇航太可訂購SAR 影像、Sentinel-1 影像，水保局都有可申請下載。	感謝評委意見。有需要的話我們會選擇從創宇航太訂購精度質量更好的影像。COSMO-SkyMed 代理現在是創宇航太（03）668-7775 雷達衛星影像購買視窗的資料表已修改。
3. SAR 訊號極化訊號受地形和介電性質有關，非僅有植被與裸露的差別。	感謝評委意見。目前研究目標其中之一在雷達影像對於山崩的偵測，雖然介電性質會影像 SAR 訊號的變化，但山崩所造成的地形、地表植被與粗糙程度變化都會是山崩形成的主要明顯改變，因此可以藉由這些變異所造成的 SAR 訊號變異作為山崩偵測的主要依據。 本研究也會先利用 DEM 將地形效應以及水體區域進行遮罩，再進行植被與裸露地研究，以便更好的辨識出山崩區域。
4. 雷達影像偵測宜注意大型崩塌與堰塞湖發生之熱點區位及好發時期。	感謝評委意見。大型崩塌與堰塞湖主要發生在超大颱風來時遭遇強降雨的山區地勢陡峭且有河流的地區，如（陳昆廷等，2010）莫拉克颱風引致堰塞湖之案例分析所述。

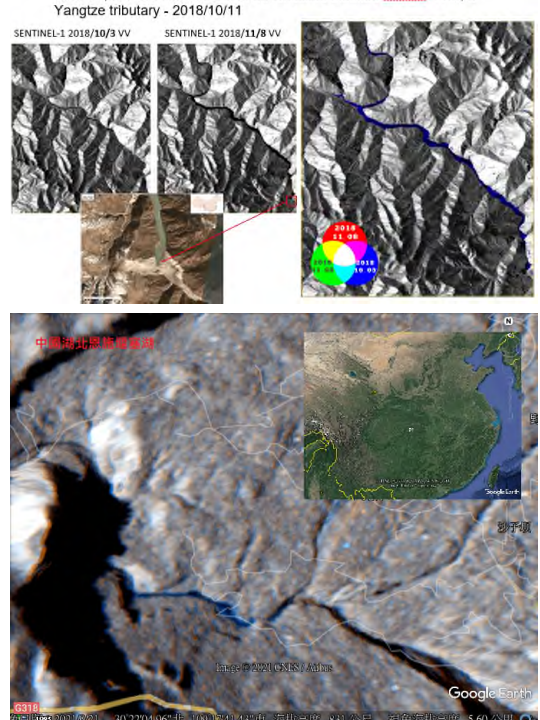
期初審查意見	處理情形
5. 大規模崩塌及堰塞湖形成之機制宜有論述，找出可能發生之時空分布，俾方便偵測。	感謝評委意見。時空分佈同上問題 4 所述。
6. 計畫目的是災害預警或是工程治理？宜提出最經濟有效之標準操作流程。	感謝評委意見。計畫主要目的在於提供光學影像之外，SAR 影像對於災害發生後的緊急致災區域資訊提供。目前最經濟有效之標準操作流程就是利用 GEE 平臺與其開源影像資料進行研究。
7. 建議計畫內容應能符合原訂題目，即是善用 SAR 偵測強降雨所引發之崩塌及堰塞湖，需定義實驗或資料蒐集之時空及地區或事件。	感謝評委意見。目前實驗有研究 2009 年莫拉克颱風引發的臺東太麻里溪堰塞湖與山崩。
8. SAR 應用或 SNAP 及 GEE 應用近年已有極多之應用成果，建議本計畫應強調其成果或程序系統對水土保持在大型崩塌之引發研究上能有較高貢獻。	感謝評委意見。本研究將在過去建構的分析程序系統上更佳精進，以提供災害偵測的能力精進，也期望於水土保持於大型崩塌的研究上有更多貢獻。
9. 建議針對現行各類雷達影像進行全面性之分析評估（包含周期、通路、價格、效能、解析度、時間等），提出颱風豪雨期間針對大型崩塌與堰塞湖即時偵測之可行方案。	感謝評委意見。計畫書各類雷達影像進行全面性之分析評估已在章節「各類衛星影像基本資訊之介紹」進行補充描述，計劃中提出了依托 GEE 平臺及其開源影像利用閾值法對颱風豪雨期間的大型崩塌與堰塞湖即時進行偵測研究。
10. 建議針對 2009 年莫拉克颱風期間產生十多個堰塞湖進行分析驗證本計畫提出方案。	感謝評委意見。需考慮影像是否有涵蓋堰塞湖存在的時間，經過調查，目前計劃中已經加入 2009 年莫拉克颱風引發的台東太麻里溪堰塞湖與山崩進行研究。

第二節 期中審查意見與回覆

期中審查意見	處理情形
1. 報告書中所述「Google Earth Engine」中沒有 ALOS 雷達影像，需要用 SNAP 處理後再輸入 Google Earth Engine 進行分析的問題。其實水保局已經建立了臺灣地區完整的 Sentinel-1 影像資料庫，可由 BigGIS 上展示，並申請下載，建議應善用水保局現有資源。	感謝評委建議。Google Earth Engine 可直接使用雲端 Sentinel-1 影像，並利用雲端運算，並不需要透過將資料下載到本機再進行運算處理，這也是 Google Earth Engine 分析 Sentinel-1 影像的優勢之一。
2. P3-13 提到，不足之處為需要人工判釋來減少陰影影響的 DEM 高程數據閾值，需詳細說明人工究竟如何操作？是否客觀？以 Sentinel-1 影像為例，新版的 SNAP 就提供了詳細的疊置與陰影遮罩，可以排除有疑慮的觀測值。建議應尋求更客觀的方式來決定閾值。	感謝評委建議。嘗試所有研究區的 DEM 值與坡度值，通過對比 Sentinel-2 數據人工目視解譯確定閾值。
3. 報告書所舉之偵測堰塞湖實例，為莫拉克風災後之台東太麻里溪面積達 0.55 平方公里（55 公頃）之堰塞湖，對於面積如此廣大之特例，設定閾值決定水體範圍比較不會混淆，但若仔細檢視影像，仍有許多強度值和堰塞湖區域強度值相近的區域，有可能會造成混淆。從實際應用的角度來思考，建議期末報告時應選取幾個小型堰塞湖來測試目前方法的適用性。	感謝評委建議，本計畫目的在於探討 SAR 影像是否有能力在天候不佳時，提供大範圍大型自然災害的研判，以提供災害災情資訊蒐集之應變能力。目前有做過一些範例，包括 2009 年 8 月莫拉颱風於臺東造成之堰塞湖、2018 年 10 月中國川藏交界金沙江山崩造成堰塞湖、2020 年 7 月中國湖北恩施堰塞湖。但對臺灣於較小型的堰塞湖，由於影像解析度、山區地形效應與堰塞湖存在時間與影像時間的無法匹配（例：今年 2 月形成之台東卑南大南溪堰塞湖），這部分並沒有良好的分析成果。

期中審查意見	處理情形
	2018年川藏交界金沙江山崩造成堰塞湖 Over 24,600 evacuated in Tibet as landslide blocked Jinsha River, a Yangtze tributary - 2018/10/11  SENTINEL-1 2018/10/3 VV SENTINEL-1 2018/11/8 VV 中國西北黑龍江流域 Google Earth
4. 第二章有關各類雷達衛星影像資訊內容完整，建議後續可作為本局同仁初步入門之參考教材。	感謝評委建議。可作為貴單位同仁初步入門之參考教材。
5. 部份內文明顯有複製自大陸文獻之簡體字（如 P3-1 最後一段、P3-12 等），請調整修正。	感謝評委建議。已進行修改。
6. 本計畫使用 GEE 強大的雲端運算能力及豐富的衛星影像資源，有利於後續技術成果之推廣，故建議堰塞湖及崩塌之偵測技術以 GEE+Sentinel-1 影像為主進行開發。	感謝評委建議。本計畫的堰塞湖及崩塌之偵測技術是以 GEE+Sentinel-1 影像為主進行開發，但由於2009年莫拉克颱風時沒有Sentinel-1影像，而本案想要研究莫拉克颱風造成的堰塞湖所以採用了ALOS影像，在Setinel-1有資料時則都可以使用其在GEE中進行研究。
7. 對於堰塞湖及崩塌偵測如使用 Sentinel-1 影像，由於臺灣山	感謝評委建議。由於合成孔徑雷達衛星側視取像，升降軌有不同

期中審查意見	處理情形
區地形效應，升軌及降軌影像是否均可適用於堰塞湖及崩塌偵測？	的地形效應範圍，升降軌可試用的區域會略有差異。 
8. 近期之堰塞湖案例建議可以今年 2 月形成之台東卑南大南溪堰塞湖為案例進行測試，其位置為 (22.72515,120.95689)。	感謝評委建議，臺東卑南大南溪堰塞湖發生於 2 月 5 日左右，當日水位上升 30 分鐘後即逐漸降低，隨後 16 小時期間水位雖有多次起伏，但均未超過安全警戒範圍，經過 24 小時後水流及水位均已回復至安全值。在堰塞湖較嚴重積水時並沒有適合的雷達影像可進行分析。
9. 附錄之「期中委員審查意見」應為「期初委員審查意見」。	感謝評委建議。已進行修改。
10. 天候不佳時，利用衛星雷達影像即時判釋大型崩塌及堰塞湖事件為一可行之方式，唯目前臺灣面臨之問題為影像取得管道、頻率、價格、時效性...等，建議本研究進行深入分析上述各項因子，提出最佳解決方案供水保局參考。	感謝評委建議。詳細可參見表 2-1 各種衛載 SAR 感測器規格與表 2-2 各種衛載 SAR 影像購買費用相關說明以及第六章討論建議與總結。
11. 另請說明本研究發展之判釋程序未來是否能自動化，同時在短時間進行大量影像判釋，以利防災應變期間推定緊急對策之參考。	感謝委員建議。Google Earth Engine 程式設定好之後，改變輸入影像即可進行分析，理論上可以進行自動化，但如要進一步進行雜訊與誤判區降低，則需進一步提供額外資料作為分析，這部

期中審查意見	處理情形
	分可以再進一步研究。
12. 計畫中提到利用 DEM 校正水體判釋誤差以提取水體範圍，請補充如何選定 DEM 之高程與坡度之閾值。	感謝委員建議。嘗試所有研究區的 DEM 值與坡度值，通過對比 Sentinel-2 數據人工判識閾值。
13. 計畫中以 L 波的 ALOS 雷達影像驗證堰塞湖判釋之可行性，且有不錯的判釋效果。然 GEE 中僅有具 C 波的 Sentinel-1 雷達影像，雖然使用曾文水庫做為測試，但堰塞湖規模通常水體範圍較小且受附近地形險峻，建議補充以 Sentinel-1 為例判釋近年發生的堰塞湖之相關成果。	感謝委員建議。目前有做過一些範例，包括 2009 年 8 月莫拉勒颱風於臺東造成之堰塞湖、2018 年 10 月中國川藏交界金沙江山崩造成堰塞湖、2020 年 7 月中國湖北恩施堰塞湖。但對臺灣於較小型的堰塞湖，由於影像解析度、山區地形效應與堰塞湖存在時間與影像時間的無法匹配（例：今年 2 月形成之台東卑南大南溪堰塞湖），這部分並沒有良好的分析成果。 2018年川藏交界金沙江山崩造成堰塞湖 Over 24,600 evacuated in Tibet as landslide blocked Jinsha River, a Yangtze tributary - 2018/10/11 
14. 請補充說明 ALOS 雷達影	感謝評委建議。ALOS 影像前處

期中審查意見	處理情形
像經 SNAP 軟體處理再以 GEE 分析所需的時間，可作為未來防減災流程的參考依據。	理時間約 30~60 鐘即可。
15. 請補充計畫報告書之工作項目與預定工作進度。	感謝評委建議。已在第一章第三節進行補充說明。
16. 報告書封面計畫編號請修正為 SWCB-110-050。	感謝評委建議。已進行修改。
17. 請補充說明計畫內使用之 DEM 精度數值。	感謝評委建議。DEM 採用 GEE 可直接調用的 NASA SRTM Digital Elevation 30m 數據，其解析度為 30 m。已在第二章小結有所補充。
18. 補充以此方法偵測堰塞湖之限制條件，如：影像解析度、堰塞湖規模、附近之環境條件、水質等可能影響之因素。	感謝委員建議。已補充在第二章小結第三章小結。

第三節 期末審查意見與回覆

期末審查意見	處理情況
1. 想請教應用 GEE 偵測雷達衛星的成果其最小可偵測的面積範圍？其與應用光學衛星所判釋的誤差值大概是多少？	感謝委員建議，最小面積報告裡說明取決於使用的雷達影像解析度。
2. 案例一莫拉克事件為 2009 年，但 ALOS-2 為 2014 年 5 月發射，所以應該是講錯了？	感謝委員建議。
3. GEE 成果可以輸出 tif 圖檔，供其它成果專案應用與加值應用。	感謝委員建議，已經設置可以直接輸出 GeoTiff 檔案了。
4. 計畫書內之地圖截圖均有簡體字，請修正。例：圖 3-5。	感謝委員建議，已修正。
5. 計畫書內標點符號請使用全形字。	感謝委員建議，已修正。
6. 章節 4 之案例二中提到"選取盧碧颱風 2021 年 8 月 7 日前三個月事件前影像與 8 月 10 日後一個月影像"，後者影像時間間隔與災害事件相隔較長，請補充說明如何以此"提升即時大型崩塌災害與堰塞湖之應變能力"？	感謝委員建議，目前 GEE 程式也可以用事件後一張影像的，精度會降低一點，仍有 50%的精確度。對於大型崩塌與堰塞湖發生的位置確認，仍有相當的應變能力。