

多元化巨量遙測影像分析與防災技術研發

Development of Diversified Large-Scale Remote Sensing Data Analysis and Disaster Prevention Technologies

國家災害防救科技中心 坡地洪旱組

國家災害防救科技中心 氣象組

Slope and Hydrology Division, National Science and Technology Center for Disaster Reduction

Meteorology Division, National Science and Technology Center for Disaster Reduction

摘要

本專案在多元化巨量遙測影像分析與防災技術研發方面，成果主要可分為四大類：巨量衛星影像分析技術建立、無人機影像多元應用、雙偏極化雷達降雨估計，以及氣象衛星雲參數反演與防災應用。本計畫透過多元化巨量遙測影像，建立災害變異性指標，可應用於分析地震所造成之地表同震變形及地表特徵物變異判釋，並利用長時序衛星影像資訊，進行堰塞湖變遷的持續監測。在無人機應用方面，藉由建置多元化無人機感測器影像，提升災害特徵辨識能力；此外，本年度亦嘗試結合無人機攝影測量與地面光達系統的測繪技術，互補兩者優缺點，以獲得更高品質之測繪成果。在雷達降雨估計方面，利用雨滴譜儀資料回歸統計分析，建立 S 波段 KDP 轉換至 C 波段 KDP 之關係，並提出 16 組涵蓋不同波段與天氣型態的降雨估計公式。同時，優化雷達資料品質管理、建立零回波資料處理程序，並自動化 K_{DP} 轉換流程。在氣象衛星應用方面，已建置 2016 年至今涵蓋臺灣地區的雲參數反演資料庫，並開發出一套以 CNN 架構為基礎、具高度應用潛力的全天空日射量估算技術。本計畫整合多源遙測資料與先進分析技術，涵蓋從觀測、分析到應用的完整流程，可為後續遙測防災技術之深化與系統化發展奠定良好基礎。

關鍵字：巨量遙測影像、災害變異性指標、無人機多元感測影像、地面光達測繪、雙偏極化氣象雷達、雨滴譜儀、卷積神經網路、全天空日射量

ABSTRACT

This project focuses on the development of diversified large-scale remote sensing image analysis and disaster prevention technologies. The main achievements can be categorized into four areas: (1) development of large-scale satellite image analysis techniques, (2) diversified applications of UAV imagery, (3) dual-polarization radar quantitative precipitation estimation, and (4) cloud parameter retrieval from meteorological satellites and its application in disaster monitoring. Through the integration of diversified and massive remote sensing imagery, this project established disaster variability indicators, which can be applied to analyze coseismic surface deformation caused by earthquakes and to interpret changes in surface features. In addition, long-term time-series satellite imagery was utilized to continuously monitor the evolution of earthquake-induced landslide dams. For UAV applications, the project enhanced disaster feature recognition by building a multi-sensor UAV image database. Moreover, this year, the project integrated UAV photogrammetry with handheld ground-based LiDAR survey technologies to complement the strengths and weaknesses of both methods, aiming to produce higher-quality mapping results. Using disdrometer data, we derived a regression for converting S-band K_{DP} to C-band K_{DP} and established 16 rainfall estimation formulas for different frequency bands and weather conditions. In terms of meteorological satellite applications, we built a cloud parameter retrieval database for Taiwan area from 2016 to the present and developed a CNN-based global horizontal irradiance estimation technique with strong application potential for practical applications.

Keywords: Large-Scale Remote Sensing Imagery, Disaster Variability Indicators, UAV Multi-Sensor Imagery, Ground-Based LiDAR Surveying, Dual-Polarization Weather Radar, Disdrometer, Convolutional Neural Network (CNN), Global Horizontal Irradiance

一、前言 / 概述

高空遙測影像具有間接且大範圍觀測地表的能力，可透過多元感測器（如光學、雷達、合成孔徑雷達、光達等）獲取大量且多樣化的遙測數據與影像資料。依據不同災害型態與應用需求，得以建立多種指標分析技術，進行大氣環境監測、地表環境變遷判釋等，並發展 AI 人工智慧於資料分析上的應用，進一步強化災害環境判釋能力，實現對廣域與區域性災害特性的監測與分析。

透過不同時期的多元影像資訊，可針對環境的長期變異與災害現場進行多面向、精細化的紀錄。以 0403 花蓮地震所引發之同震變形與堰塞湖追蹤為例，可進行自然災害衝擊與環境變遷之多樣性分析。透過結合無人機攝影測量及手持式地面型光達兩種空間測繪技術，將有助於如地表特徵變化分析、災害衝擊影響資訊呈現及建立災害現場數位分身技術等面向，以基隆長潭里漁港崩塌為例，可以更全面的紀錄災害事件現地狀況，提升災後回溯與後續應變能力。

在防災降雨雷達應用方面，主要在提升短延時強降雨預警的落實應用。傳統的預警系統主要依賴每小時的雨量變化，這在快速變化的降雨情況下無法預警。為提升雙偏極化定量降雨估計公式的準確性，本計畫引入雨滴譜儀觀測資料進行輔助回歸分析，以強化降雨估算精度。氣象衛星遙測研發方面，著重在擴展「先進向日葵成像儀雲科學資料反演套件」(Advanced Himawari Imager (AHI) Cloud Science Data Retrieval Package, 簡稱 AHICSDRP) 所產出之雲參數反演產品。本計畫以有別於傳統物理模式方法（胥立南等，2015），導入人工智慧技術，建立衛星觀測資料、雲參數反演產品與地面全天空日射量(Global Horizontal Irradiance)之關聯模型，藉以估算原本僅能在測站取得之全域全天空日射量，強化大範圍日射資訊掌握能力。

二、專案研究方法 / 專案重要性/

(1) 本研究利用 Sentinel-1 衛星所提供之免費合成孔徑雷達 (Synthetic Aperture

- Radar, SAR) 影像，針對 0403 地震發生前後的升軌與降軌 SAR 影像對，進行差分干涉 (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar, DInSAR) (Rosen et al., 2000) 分析。透過升軌與降軌干涉成果進行二維速度場解算，可獲得垂直方向與東西方向之同震地表變形速度場。此外，利用 Sentinel-2 光學衛星影像，應用常態化差異水勢指標 (Normalized Difference Water Index, NDWI) (McFeeters, 1996)，藉由水體對綠光波段具有高反射率、對近紅外光波段則具低反射率與高吸收特性，有效區分並判釋水體範圍 (蔡佳穎，2025)。
- (2) 無人機攝影測量 (UAS Photogrammetry) 為由空中視角進行測繪，而手持式地面型光達 (Handheld Ground-Based LiDAR) 則由地面角度進行高密度點雲量測。兩者受限於量測角度與遮蔽問題，各自存在影像與資料缺漏之限制。因此，本研究結合無人機搭載光學相機進行空拍攝影測量，以及手持式地面型光達進行地面掃描，兩者互補測繪限制，建立更完整且高解析度之三維空間模型 (劉哲欣，2025)，可應用於地表特徵變化與災害衝擊資訊之詳細記錄與分析。
- (3) 為提升雙偏極化定量降雨估計公式的準確性，本研究運用 2016 至 2022 年七年的雨滴譜儀資料，回歸統計出 S 波段的比差異相位差 (K_{DP}) 轉換為 C 波段 K_{DP} 的關係式。此外，針對中南部七座雨滴譜儀觀測資料，分析其雨滴粒徑分布特性，並基於這些分析，反演 K_{DP} 與實際觀測雨量之擬合關係，建立了 16 組涵蓋不同波段和天氣類型的降雨估計公式，有效提升降雨估算準確度與雷達應用可靠性 (蔡直謙等，2025)。
- (4) 在氣象衛星雲參數反演產品應用方面，本研究開發基於人工智慧卷積神經網路 (Convolutional Neural Network, CNN) (Gu et. al., 2018) 之全天空日射量估算模組。此模組通過學習地面測站的全天空日射量觀測數據，建構衛

星觀測資料、雲參數反演結果與全天空日射量之非線性關聯模型，運用此模型於每個衛星觀測像素點，可估算出全域的全天空日射量（陳御群等，2025）。

三、 專案亮點成果

1. 衛星遙測影像判識災害及變異性指標建立

(1) 地震災害之地表同震變形分析

以 2024 年 4 月 3 日發生於花蓮外海規模 7.2 地震為例，透過地震前後之合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）影像，可獲取地震所造成之地表變形資訊。本研究選取 Sentinel-1 衛星於 2024 年 3 月 27 日與 2024 年 4 月 8 日的升軌影像，以及 2024 年 3 月 29 日與 2024 年 4 月 10 日的降軌影像，進行差分干涉（DInSAR）處理，分析成果如圖 1(a)與圖 1(b)所示。在升軌干涉圖中，約可觀測到 17 個干涉環，顯示最大沿視衛星方向之累積地表位移約為 47.6 公分；降軌干涉圖則約有 18 個干涉環，顯示最大累積地表位移約為 50.4 公分，主要位移區域集中於花蓮市區。進一步透過升軌與降軌之干涉成果，可進行東西方向與垂直方向速度場之解算，如圖 1(c)至圖 1(f)所示。在水平位移分析結果中，於 YENL 測站位置的東西方向位移差異高達 25 公分，主要原因為 InSAR 技術僅能解析東西方向之位移，而該區域實際的水平位移主要以南北方向為主，導致東西方向的解算結果與真實位移存在較大差異。

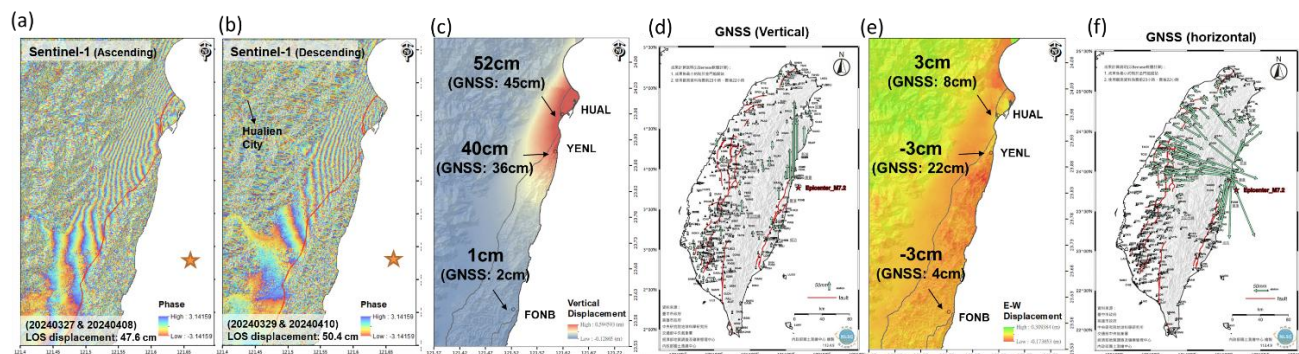


圖 1. 0403 花蓮地震所造成之同震地表變形分析成果。(a)升軌影像干涉成果；
(b)降軌影像干涉成果；(c)垂直方向速度場解算成果；(d)GNSS 垂直方向監測成
果；(e)東西方向速度場解算成果；(f) GNSS 水平方向監測成果。

(2) 堰塞湖之判釋與發展歷程追蹤

0403 花蓮地震及後續餘震於「萬榮鄉萬里溪上游」及「秀林鄉木瓜溪上游」兩處生成堰塞湖。透過 Sentinel-2 光學影像可清楚看見堰塞湖之形成與發展歷程。以萬里溪上游之堰塞湖為例，於 2024 年 4 月 4 日地震發生後形成，並由下游水位站觀測到水位下降的紀錄。經由常態化差異水勢指標 (Normalized Difference Water Index, NDWI) 計算，可推估該堰塞湖之最大蓄水面積約為 3.6 公頃。上述兩處堰塞湖均於 2024 年 7 月 22 日至 26 日凱米颱風期間發生潰堤，潰堤後下游水位站測得水位明顯上升。從 2024 年 7 月 28 日的 Sentinel-2 影像顯示，萬里溪上游堰塞湖區域已無水體存在，顯示該區域之堰塞湖已完全消失。萬里溪上游堰塞湖之判釋與監測歷程，詳如圖 2 所示。

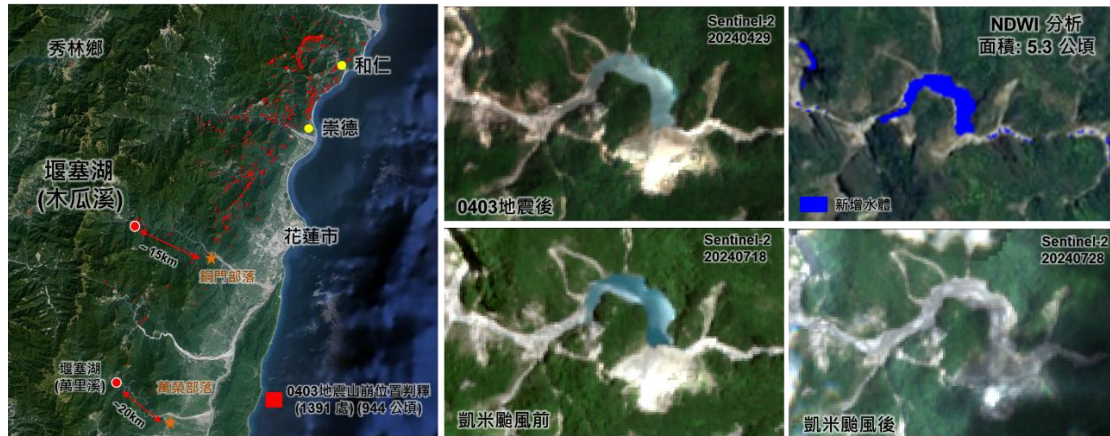


圖 2. 花蓮縣萬榮鄉萬里溪壩塞湖之影像分析水體變遷過程

2. 無人機攝影測量與地面光達點雲整合技術之建立

本研究透過整合無人機攝影測量與地面光達系統之空間測繪技術，有效精進災害事件現地情況之全面紀錄。無人機與地面光達為常見之空間資料建置設備，兩者各具優勢，亦存在量測視角與遮蔽上的限制。然而，經測試與驗證後，兩者測繪成果具備良好的互補特性，能彌補各自的資料缺漏。以 2024 年 6 月 3 日發生於基隆長潭里漁港之崩塌事件為例，透過無人機空拍影像建模與地面光達掃描資料之整合，可有效產製一組完整且高密度之點雲資料。進一步加工生成 10 公分解析度之數值高程模型（DEM），作為精細地形分析與後續災害應用之基礎資料，提升災害衝擊評估與地形變遷監測之應用效益。

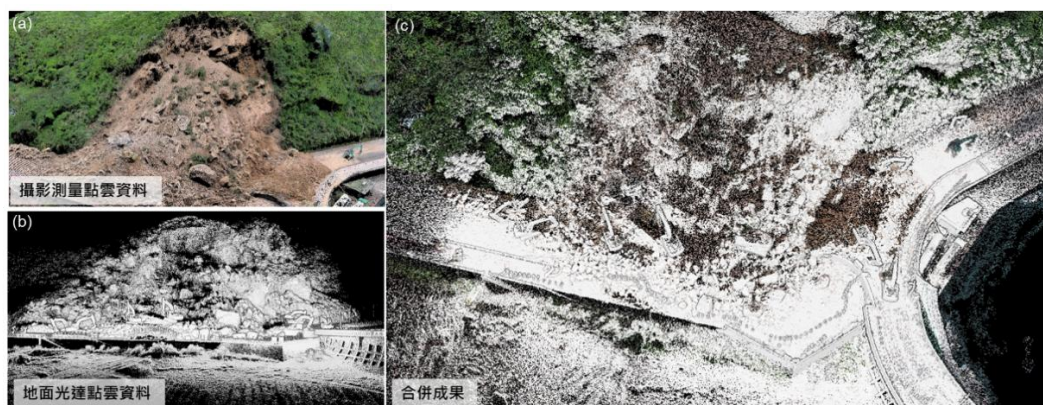


圖 3. 以基隆長潭里漁港崩塌為例，分別呈現攝影測量點雲資料、地面光達點雲

資料，以及合併之成果。

3. 防災降雨雷達應用

(1) 優化雷達資料品質管理程序

中央氣象署於 2023 年初完成了七股、墾丁及花蓮三座 S 波段雷達的升級作業，將原有都卜勒雷達升級為雙偏極化雷達。針對這三座雷達，利用統計方法定義各雷達在不同高度層的最佳觀測範圍，並建立零回波資料處理程序，完成全臺雷達最佳觀測範圍及處理程序的建置。此外，利用雨滴譜儀資料，統計回歸出 S 波段 K_{DP} 轉換為 C 波段 K_{DP} 的關係式（圖 4）。此轉換程序已納入自動化資料品質管理流程，定時產出轉換後的 K_{DP} 資料，供雷達資料同化與落雨小幫手相關技術使用，強化雷達降雨估計與短延時降雨預警系統之應用成效。

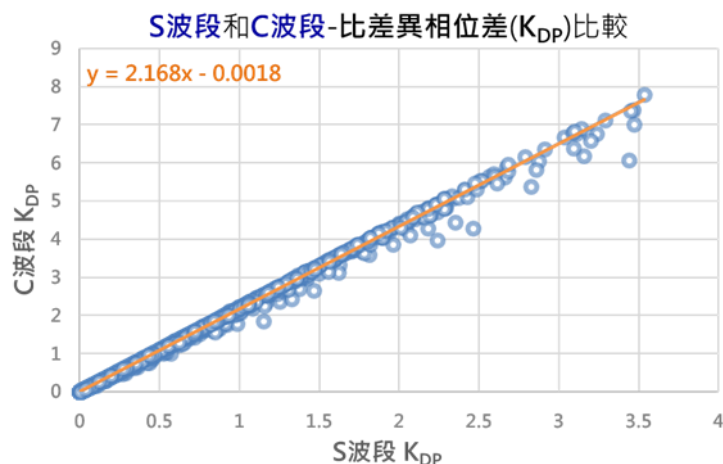


圖 4. 2016 至 2022 年雨滴譜儀資料統計回歸得出的 S 波段與 C 波段 K_{DP} 關係式。

(2) 建立雙偏極化降雨估計公式 $R(K_{DP})$

本研究蒐集中央氣象署於 2016 至 2022 年間，在中南部地區設置的 7 座雨滴譜儀資料，並針對梅雨季與颱風季期間之短延時強降雨事件，進行雨滴粒徑分布特性之分析。結果顯示，午後對流的特性為雨滴較大但數量較少，與其他天氣類型有明顯區別。此外，

在不同天氣類型中，山區的雨滴粒徑普遍較平地小，但數量卻較多（圖 5）。

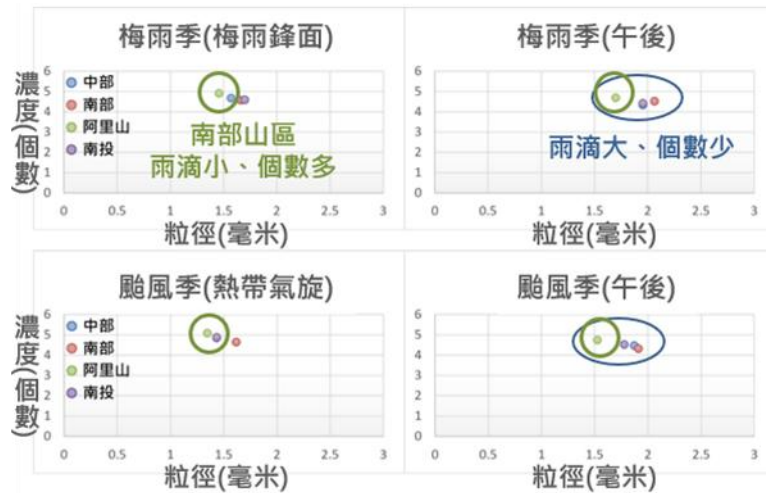


圖 5. 不同天氣類型及地區的雨滴粒徑分布特性。

4. 氣象衛星資料運用

(1) 建置臺灣地區衛星雲參數反演資料庫

藉由 AHICSDRP 雲反演核心程式與自動化程序的建立，重製自 2016 年至今的雲參數反演資料，並完成逐時資料庫建置，以供研究和即時監控之用。此資料庫的產品內容包括 2 種天文參數（太陽天頂角、日星相對方位角）、8 種雲反演參數（雲態、雲頂溫度、雲頂氣壓、雲頂高度、雲光學深度、雲滴有效粒徑、雲水路徑、雲冰路徑），以及 2 種增值產品（雲屬分類、飛航積冰威脅指數），為後續多元災害應用與研究提供完整之衛星雲參數資料。

(2) 開發全域全天空日射量估算技術

為了擴展雲物理特徵參數的應用範疇，本研究開發基於卷積類神經網路技術的全天空日射量估算模組。該模組利用向日葵衛星資料，包括觀測數據與雲反演結果，通過學習地面測站的全天空日射量觀測數據來建立模型，並進而估算每個衛星觀測像素點的全天空日射量。以 2024 年 6 月進行全天空日射量估算準確性的初步

評估，結果顯示，均方根誤差為 0.45 MJ/m^2 ，相關係數達 0.90（圖 6），顯示出良好的作業潛力。

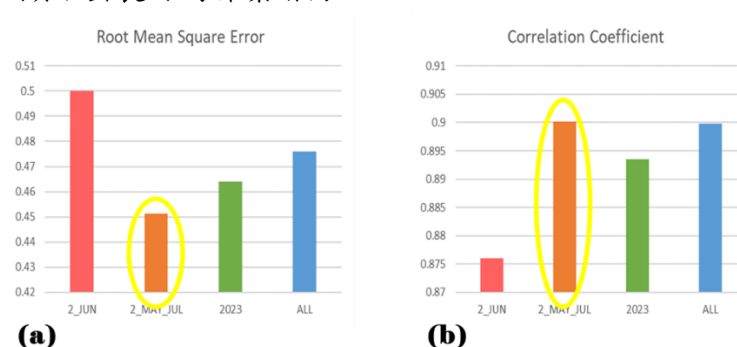


圖 6. 2024 年 6 月全天空日射量估算校驗結果：(a)均方根誤差及(b)相關係數。
橘色柱代表最佳實驗結果。

四、 結論與建議 / 未來執行與規劃

本年度藉由多元化遙測資訊與技術之開發，已完成衛星遙測影像判識災害流程及地表變異性指標之建立。透過地震前後之合成孔徑雷達（SAR）影像進行差分干涉（DInSAR）處理，可有效獲取地震所造成之地表變形資訊，並輔以光學影像計算常態化差異水勢指標（NDWI），應用不同時期之影像資料，可進行地震誘發堰塞湖之形成與消長歷程之追蹤與監測。在三維測繪資料建置方面，透過結合無人機攝影測量與地面光達系統，發揮兩種設備技術之互補特性，有效克服個別量測技術之限制，建立完整且高密度之點雲資料，有助於更全面呈現與紀錄災害事件現地狀況，提升災害調查與分析應用之價值。

氣象雷達與衛星遙測應用上，針對雙偏極化雷達降雨估計、氣象衛星雲參數反演與全天空日射量估算技術進行改進，以提升防災應用的準確性與即時性。在降雨估計方面，透過雨滴譜儀資料，回歸統計 S 波段與 C 波段 K_{DP} 的轉換關係，並建立 16 組適用於不同狀況的降雨估計公式，提高降雨預測準確度。在防災降雨雷達應用方面，優化雷達資料品質管理程序，以提升降雨監測能力。在氣象衛星應用方面，建置臺灣地區衛星雲參數反演資料庫，並開發基於 CNN 的全天空日射量估算模組。初步評估顯示，均方根誤差 0.45 MJ/m^2 ，相關係數達 0.90，展現良好應用潛力。未來將持續精進多元化的各項遙測技術，強化 AI 人工智慧

技術在遙測資料應用的普遍性，並結合各種異質資料，以提升自然災害的監測與預警能力，強化防災應變與環境變遷監測之技術能量。

五、 參考文獻

胥立南、賴彥任 (2015)。應用 MTSAT2 衛星資料估算臺灣地表日射量，104 年天氣分析與預報研討會論文全文彙編，中央氣象局，台北市。

陳御群、劉嘉騏、朱容練、于宜強 (2025)。氣象衛星資料估算地面全天空日射量技術開發，國家災害防救科技中心。

劉哲欣、林又青、李士強、何瑞益、呂喬茵、張志新(2025)。無人機攝影測量與地面光達的測繪應用，國家災害防救科技中心。

蔡直謙、廖信豪、劉嘉騏、林欣弘、于宜強 (2025)。高時空解析度暴雨與淹水預警技術評估，國家災害防救科技中心。

蔡佳穎、林聖琪、呂喬茵、張志新(2025)。衛星影像於全球災害之分析與應用，國家災害防救科技中心。

Gu, J., Wang, Z., Kuen, J., Ma, L., Shahroudy, A., Shuai, B., ... & Chen, T. (2018). Recent advances in convolutional neural networks. *Pattern recognition*, 77, 354-377.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425-1432.

Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333-382.