

# 地工小百科 地工技術

## 星載干涉合成孔徑雷達觀測技術於大地工程之應用

李璟芳\* 林士淵\*\*

### 一、前言

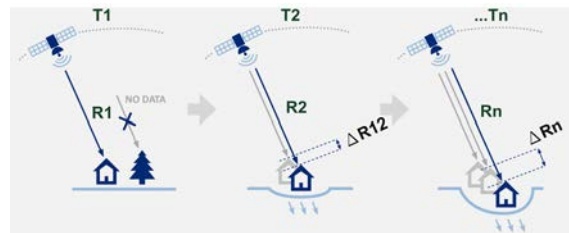
受惠於干涉合成孔徑雷達(Interferometric Synthetic Aperture Radar, 簡稱 InSAR)之快速演進與規格更新, 星載雷達干涉技術(Satellite Radar Interferometry)於近十年來蓬勃發展, 並廣泛地應用於地表變位觀測與長期地貌演育評估。其與一般光學式影像(如衛星影像、航照及 UAV 影像)相較, 雷達影像採用主動式雷達波作為訊號成像依據, 較不受天候或雲遮影響, 可於災害後或惡劣天候下立即觀測目標區域, 因此適合各類地質災害及都會區地表變異快速評估, 如火山及地震引起之地殼變動、山崩、土石流、地層下陷及冰川運移等(Lee et al., 2017; Singhroy, 2017), 分析獲得資訊可協助科學家或地質人員進行長期變異趨勢研判, 提早防範災害於未然。

### 二、雷達干涉分析原理與方法

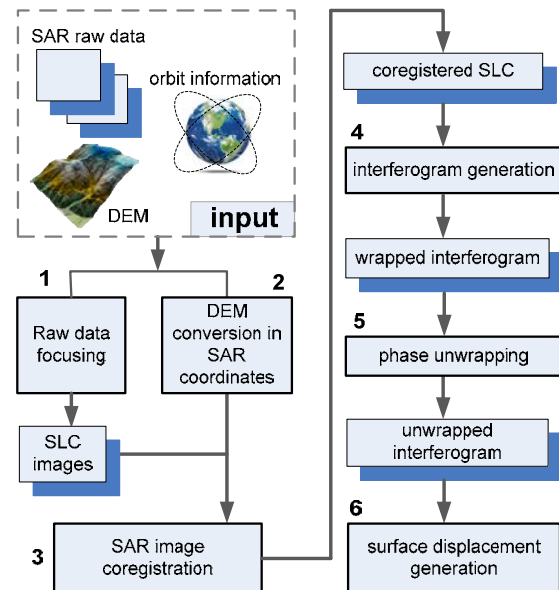
星載雷達衛星為具有固定軌道之主動式感測器, 常用雷達波波長(屬微波)可概略分為 X 波段( $\lambda$ :~3 cm)、C 波段( $\lambda$ :~6 cm)及 L 波段( $\lambda$ :~24 cm)等三類, 波長愈長穿透樹冠抵達地表之回波訊號愈佳, 適合植被茂密山區之觀測。L 波段之代表性雷達衛星如日本 ALOS-2 衛星, 而常見 C 波段之衛星如歐洲太空總署 Sentinel-1 及加拿大之 RADARSAT-2。如圖一所示, SAR 衛星於 T1 時間通過待測區進行觀測, 主動發射雷達電磁波來對目標物照射, 並持續接收目標物體之反射回波, 透過一系列資料處理與校正後可得知與待測物間之距離 R1(視衛星距離; line of sight, LoS)。若待測物地表因外部營力產生位移, 則第二次 SAR 衛星重返掃瞄時(T<sub>2</sub>), 即可由

其解析之距離 R2 來偵測觀測目標是否產生變位(空間解析度可達 mm)。同理, 經多次衛星雷達影像對同區域進行分析, 可獲致長期地表變型資訊( $\Delta R12$ )或高程變異趨勢。

就 InSAR 分析技術而言, 差分干涉法(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, 簡稱 D-InSAR)為最常用之空間地表變位解析法, 其採用 InSAR 還原後的相位及地形相關性, 使用兩或多幅影像相位進行差分獲致地表變異趨勢, 其處理流程圖如圖二所示, 主要包含影像、軌道參數及數值地形資料蒐集、影像聚焦、坐標校正、幾何對位、干涉圖分析及全相位回復等步驟, 最終可得到



圖一 多時序雷達影像掃瞄示意圖 (TRE ALTAMIRA, 2017)



圖二 多時序D-InSAR分析流程圖

\*財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 \*\*國立政治大學地政學系

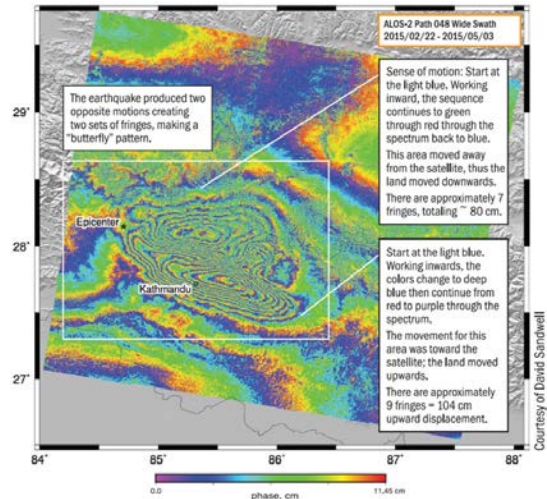
兩對或多對影像間之地表位移點資訊。若觀測區具備 20-25 幅之雷達影像，則可採用永久散射點雷達差分干涉技術 (Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar; 簡稱 PS-InSAR) 來分析歷史地表變位特徵，該法萃取分析過程中相位變化穩定的永久散射體，藉由影像對之基線資訊，進行大氣及地形效應誤差校正，以解算出多時序地表平均變動量 (Ferretti et al., 2001)，為目前 InSAR 評估技術中公認最為穩定的地表變異分析法。另因應不同應用需求與影像幅數限制，相關之雷達影像分析方法也逐漸推陳出新，如最小二乘法 (least square, LS)、小基線集 (Small BAseline Subset algorithm, SBAS)、時間序列法 (SqueeSAR)、相關目標法 (coherence point target, CT)、暫態相關點 (TCP-InSAR) 等 InSAR 技術。

### 三、干涉相位圖與PS點變位之判讀

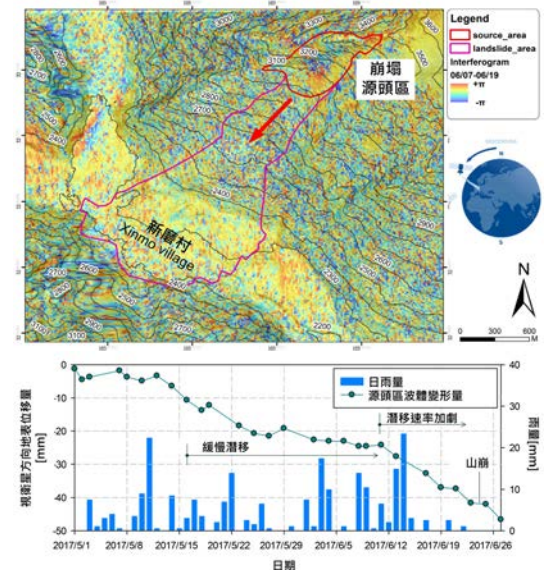
由於差分干涉相位圖最少僅需兩幅雷達影像即能進行分析，故於全球重大地質災害發生後，經常被科學家作為災情研判之第一手資料，以初步了解事件發生前後地表之變異程度及影響範圍。如圖三所示，為一典型地震後 D-InSAR 分析之干涉相位圖，圖中所呈現之多環類彩虹干涉條紋，可代表該區域於事件後所產生之相對地表變形量。本案例中一個完整之干涉條紋 (色階圖由紅色至紫色) 即代表 1/2 雷達波波長之變形量 (11.45 cm; L 波段)，故累計觀測區內干涉條紋數量，可快速評估相對於干涉條紋中心點，整個干涉環涵蓋範圍內之潛在地表變形量；如本例中 9 條干涉環對應之相對變位約 104 cm。另地表變位反映在物理量上可能為抬升或下降，其可由干涉條紋之外環起始顏色進行研判；以本例鄰近首都-加德滿都 (Kathmandu) 之干涉環，頻譜由外圈淺藍色階向中心點漸變為深藍-紫-紅色色階，代表首都周邊區域之地形變化趨近衛星視角方向，意即震後地表呈現隆起 (或抬升) 現象。反之，如圖三鄰近震央 (epicenter) 北側干涉環區域，若干干涉環頻譜往中心點由藍色漸變為綠-黃-紅色色階 (即遠離衛星方

向)，則代表地表產生沉陷。

圖四 (上圖) 為 2017/6/24 發生於大陸四川省茂縣大規模崩塌之災前最近兩期雷達影像差分干涉圖，從圖中顯示滑坡源頭區於災前已呈現遠離衛星視線方向之侵蝕地貌 (相位:  $+\pi$ )，意指災前源頭之裸露岩盤可能已肇生滑移特徵，圖四 (下圖) 則為蒐集災前數十幅雷達影像所分析而得之崩塌料源區-PS 地表變位趨勢線，經套疊當地災前雨量資料，得知該滑坡於 2017 年 5 月上旬即開始肇生潛移 (舊山崩復發)，直至 6 月上旬降雨後，其變形歷線 (滑移速率) 逐漸由緩趨陡 (變形量增加)，最終於 6/24 誘發大規模滑坡災害，造成 62 戶 120 餘人被掩埋。



圖三 尼泊爾2015大地震(Mw:7.8)誘發之同震變形之干涉相位圖 (UNAVCO, 2017)



圖四 大陸四川省茂縣大規模山崩PS-InSAR分析成果 (財團法人中興工程顧問社分析)



# 地工技術

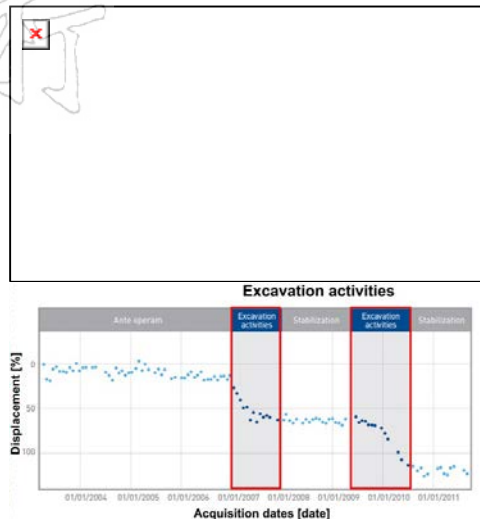
## 四、雷達干涉觀測技術於大地工程之應用

星載雷達影像衛星重訪週期由過去 24 天逐漸縮短後(Sentinel-1A/B 約 12 天；COSMO-SkyMed 約 8 天)，已大為提昇廣域地表位移之常時性觀測之需求。相較於山區茂密之植被與地形遮蔽效應，都會區因地勢平坦且人工結構物數量眾多(雷達波反射較佳)，更能突顯 InSAR 的應用優勢。InSAR 於大地工程之相關應用已擴及隧道及鐵工路等線型變位、機場跑道沉陷、大壩基礎及堤防穩定、維生管線設施、都會區建物、露天開挖、地下礦場、廢棄物堆置、舊礦區地上開發、填海造陸工程、海洋風能評估、碳封存、石油及天然氣開採場域評估等。如圖五為都會區施作地下鐵車站深開挖監測案例，由站區周邊密集 PS 點所萃取之位移歷線(2004-2011 年)，可觀測站體上方地表於兩次鑽掘開挖作業期間，曾導致地表沉陷跡象(藍色點)，其資訊可作為施工單位之安全監測基準值研訂參考。

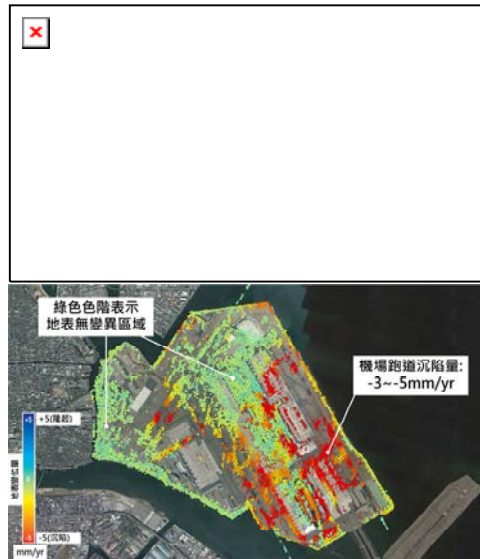
而鄰近海岸地區之地下水變化或湧浪侵襲所衍生之地表沉陷，也影響公共設施穩定性與防洪堤正常功能，如圖六(上)為美國紐奧良防洪堤防(白線方框)之災前長期監測成果(2002-2007 年)，該資訊可提供了解暴潮來襲前後堤防是否穩定安全。圖六(下)則為填海造陸區機場興建後之航廈及跑道沉陷監測成果(2004-2010 年)，分析結果顯示部分區域可能因施工期間回填夯實不足，於營運後始產生顯著地表沉陷。

圖七為 InSAR 於露天廢棄物掩埋場之應用案例，由於丘狀回填區表層上覆礫石層，提供了雷達波良好之反射條件，本案例獲取的 PS 點密度高達 10,000 點/km<sup>2</sup>，相較於其它地表位移量測技術可提供更全面的觀測資訊。

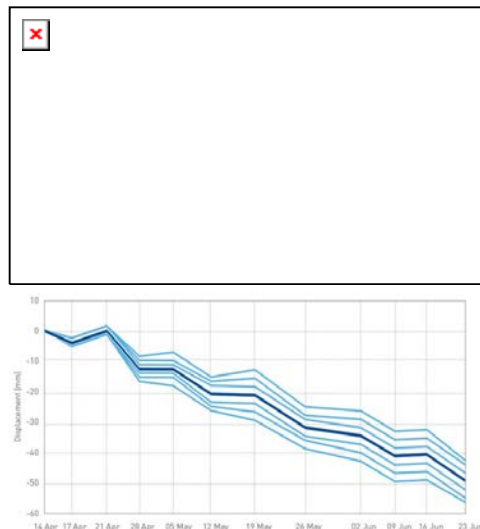
另外在地底能源開採與碳封存的議題上，InSAR 同樣可以用於觀測補注/抽取作業後之細微地殼變動量。近期歐盟國家更嘗試從工程設計之初即可導入 InSAR 觀測技術，連同施工中地形變位觀測與竣工後維運管理階段一併採用。藉由其大範圍監測點來獲得單點測站所無法涵蓋之面狀地表位移資訊；同時由歷年位移歷線中，可預知工程結構與大地互制行為下場址之脆弱場域，以提供權責管理單位提早補強防範潛在災害。



圖五 InSAR於地下鐵車站深開挖之地表沉陷監測 (TRE ALTAMIRA, 2017)



圖六 InSAR於濱海易淹水區堤防監測及填海造陸機場跑道沉陷監測 (TRE ALTAMIRA, 2017)

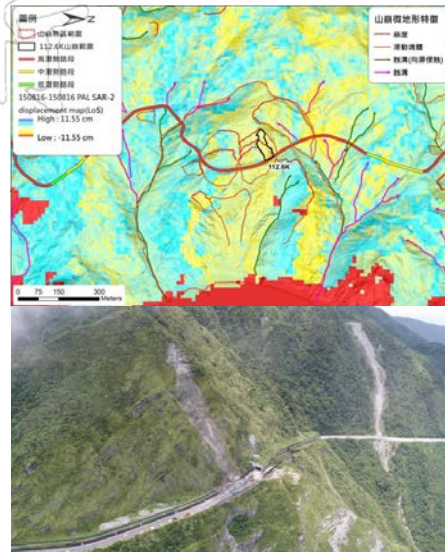


圖七 InSAR於露天廢棄物掩埋場之沉陷監測 (TRE ALTAMIRA, 2017)

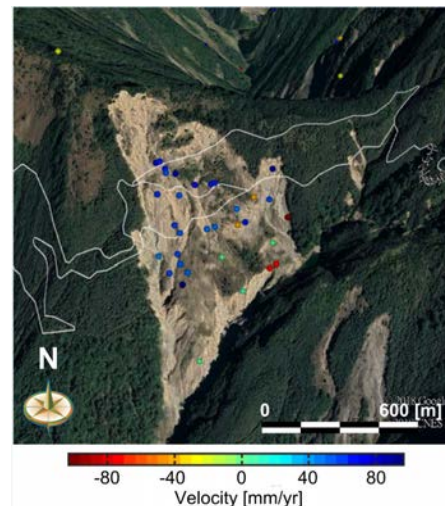
## 五、雷達干涉分析於邊坡土砂災害評估

針對各類邊坡土砂災害潛勢區，建置符合單一場址變異特性的監測系統最能直接觀測地貌演育之手段，惟建立預警與觀測系統成本花費較高，且受限於地形與所處位置(如偏遠山區)，通常無法廣泛地大量設置，故雷達影像干涉技術可用來彌補 GPS、地震儀及現場量測設備之不足，目前國外亦廣泛採作為評估邊坡災害或舊山崩復發之活動性評估指標。如圖八(上)所示，為採用 2015-2016 年 JAXA ALOS-2 雷達影像於分析而得之公路邊坡(公路下邊坡為台灣石粉舊礦場)地表潛移變位量(視衛星方向)。配合微地形判釋圈繪之滑動塊體分布及 D-InSAR 分析成果，可清楚地顯示坡體滑移區沿臺灣石粉舊礦場凹陷地形向台 9 線上邊坡延伸，為主要侵蝕區。而位於潛在崩塌區南、北兩側之蝕溝地表侵蝕現象也愈形明顯，研判其原因可能與下方海岸側受海潮侵蝕(凹岸)失穩有關。值得一提的是，2017/5/28 梅雨造成台 9 線 112.6K 上邊坡岩屑崩滑與落石(圖八(下))。其恰好位於 InSAR 分析區內之顯著潛移區，若以該山崩災害事件作為驗證案例，本次 112.6K 坍滑範圍落於山崩微地形判釋之圈繪邊界內，屬高潛勢災害路段。進一步檢視災害所處位置之干涉相位圖，亦發現其值落於 $+\pi$ 值域。換言之，本次兩期雷達影像干涉分析表明 112.6K 坡體於杜鵑颱風(2015/9)後已存在潛移特徵(約 8.5cm/yr；李與林，2017)。

圖九則為採用 30 幅多時序 ESA Sentinel-1 雷達影像評估高雄市荖濃河流域中游之大規模崩場地之活動性(面積：36.5 公頃)，並以 PS-InSAR 分析獲得地表變位量(PS 點相關性門檻值:0.7；影像時間：2015/06/19-2017/02/20)。該岩體滑動誘發於莫拉克颱風後，由累積變位量顯示近期裸露坡面上之分離滑動塊體仍有持續下移現象(藍色點)，而坡腹及坡趾處亦有零星地表侵蝕現象(橘或紅色點；與降雨地表逕流及河道冲刷有關)。未來若能配合視事件型山崩目錄(山崩熱區)與 PS-InSAR 地表位移量(近期活動性)，將有助於颱風豪雨來臨前，預先評估潛在土砂災害潛勢與災害管理策略研擬。



圖八 台9線(蘇花公路)九宮里路段D-InSAR地表變位圖與112.6K岩屑崩滑災後空拍



圖九 多時序Sentinel-1雷達影像於大規模崩地之PS-InSAR地表變位圖

## 參考文獻

- 李璟芳、林士淵 (2017), 「InSAR干涉圖應用於大規模崩塌活動性與區域型土砂災害即時定位之研究」, 中興工程顧問社小型創意研發成果報告。
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2001). "Permanent Scatterers in SAR Interferometry", *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.
- Lee, C. F., Liu, J. K., Singhroy, V., and Li, J. H. (2017). "Using High-Resolution D-InSAR Derived from RADARSAT-2 Images to Monitor Regional Landslide Activity and Sediment Transportation in Mountainous Area-A Case Study in Northern Taiwan", 2017 ICEO&SI Conference, JUNE 25-27, Yilan, Taiwan.
- Singhroy, V. (2017). "Operational Application of Radar Images, Handbook of Satellite Applications", Joseph, P.N., Scott, M., Sergio, C-L. (Eds.), Springer Press, 739-755.
- TRE ALTAMIRA - A CLS Group Company (2017). <http://tre-altamira.com/technology/>(June 14, 2018).
- UNAVCO. (2017). <https://www.unavco.org/data/imaging/sar/sar.html>(June 14, 2018).