

新世代合成孔徑雷達影像評估技術— ATS-InSAR 研發與應用

藍振維* 李璟芳** 林士淵*** 林玉菁****

摘要

受惠於歐洲太空總署之 Sentinel-1 衛星開放資料，近年來衛載合成孔徑雷達差分干涉技術於潛在大規模崩塌與基礎工程設施維運應用漸廣，諸多新興分析技術也因應不同的目的需求逐漸問世。過去被廣泛採用之 PS-InSAR 分析法，對於臺灣山區之集水區土砂災害，多屬植被茂密且地形起伏大，地表穩定之永久散射體為數不多，在 InSAR 分析上經常力有未逮，無法獲得較全面性的多時序變形量來獲知廣域地表變異。鑑此，本文引進義大利新世代之 InSAR 分析技術，以統計同值像素法來獲取空間與時間域暫態的分布式散射體（Distributed Scatterer, DS），並結合 PS-InSAR 分析法中穩定的永久散射體，以不過度且合理地提高解算後的地表量測點密度，稱之為適應性時間序列雷達差分干涉法（Adaptive Time-Series InSAR, ATS-InSAR）。該法可依據不同的監（觀）測標的遴選適切之演算法組合。此外，若以一般基礎工程設施而言，配合升、降軌之雷達影像，更能進一步耦合解算資料分解為水平、垂直之二維變形量。另搭配矩形四面體角反射器，則可提供反射訊號微弱區較穩定之雷達回波強度，提升關注場域之長期地表變形資訊與趨勢變化之可靠度。

關鍵字：合成孔徑雷達、分布散射體、適應性時間序列差分干涉、角反射器

一、前言

合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）為一主動式之遙測技術，藉由雷達訊號從感測器發出後紀錄回聲以獲取地表資訊，並擁有不受天氣、日夜之觀測能力（Danklmayer et al., 2009）。合成孔徑干涉雷達（Interferometric SAR, InSAR）為使用相位資訊來進行地表監測應用，藉由同一地區兩張或多張雷達影像中的相位資訊進行干涉以獲得地表高程或影像間隔內之地表變形。

近十年來已逐漸被科學家廣泛使用，協助瞭解各類地表營力所產生之地表形異。目前主流之 InSAR 地表變形觀測，係使用同一地區多期影像之多時序 InSAR（Multi-Temporal InSAR, MT-InSAR）方式，以精確觀測地表長期潛移變形（Crosetto et al., 2016; Pepe and Calò, 2017），並已廣泛應用於山崩、斷層、火山等自然災害（Funning et al., 2007; Greif and Vlecko, 2012; Hooper et al., 2004），及人造基礎建設及建築物的變形監測（Huang et al., 2017; Lazecký et al., 2015;

* 中興工程顧問社防災科技研究中心助理研究員
** 中興工程顧問社防災科技研究中心高級研究員
*** 國立政治大學地政學系副教授
**** 國防大學理工學院環境資訊及工程學系副教授

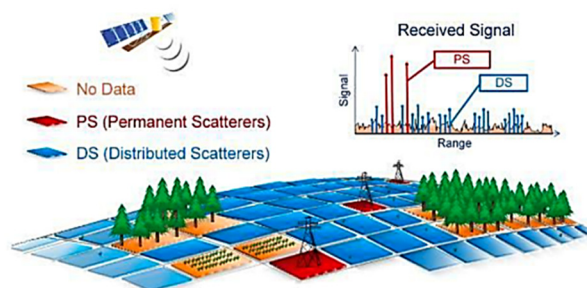
Tessitore et al., 2017)。常見之 InSAR 分析方法如表 1，主要分為永久散射體合成孔徑雷達差分干涉技術 (Persistent Scatterer Interferometric SAR, 以下簡稱 PS-InSAR) 及短基線差分干涉技術 (Small Baseline Subset, 以下簡稱 SBAS) 兩類型。前者影像集內之永久散射體，透過反演大氣相位以獲取最終高精度之地表變形。後者主要以短基線之影像連結方式，以全相位回復後之干涉圖進行時間序列變形解算。

表 1 常用多時序 InSAR 分析演算法

方法	文獻	像元選取	基線形式	參數估計	散射體
PS-InSAR	Ferretti et al., 2000, 2001	振幅離差	單主影像	$\Delta h, \Delta v$	PS
Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)	Hooper et al., 2004	振幅離差/相位穩定	單主影像/短基線	$\Delta h, \Delta v$	PS
Temporarily Coherent Point InSAR (TCPIInSAR)	Zhang et al., 2011; Zhang et al., 2012	同調性	短基線	$\Delta h, \Delta v$	PS、DS
Quasi-Persistent Scatterers (QPS)	Perissin and Wang, 2012	同調性	短基線	$\Delta h, \Delta v$	PS、DS
SqueeSAR™	Ferretti et al., 2011	統計同質檢定	短基線	$\Delta h, \Delta v$	PS、DS
Small Baseline Subset (SBAS)	Berardino et al., 2002	同調性	短基線	h, v	DS

InSAR 觀測點主要可分為 PS 點及 DS 點，如圖 1 所示。PS 點主要分布於城市地區中之建物、橋梁、人工角反射器、高壓電塔、大面積太陽能板、及自然界裸露岩塊等具較強反射之物體，在非城市地區 InSAR 觀測點分布不足。近期 InSAR 多時序分析為解決此限制多以 PS-InSAR 為主體，引入分布散射體納入解算。分布散射點 DS 為雷達影像像素內無主要散射體且具有共同散射機制之鄰近像素，如地表露頭、土石流堆積、非耕種土地及沙漠地區等，如義大利 SqueeSAR™ 導入分布散射體綜合永久散射體聯合變形解算，使用 KS (Kolmogorov-Smirnov) 檢定及 Phase Triangulation Algorithm 對分布散射體進行處理以

增加對地表觀測點數，獲得良好成效，並引領現今 InSAR 多時序地表變形分析之科研趨勢。



(Tamburini et al., 2014)

圖 1 PS 及 DS 特性分布示意圖

中興工程顧問社 (以下簡稱中興社) 為解決第一代 PS-InSAR 之變形點分布限制並與世界先進科技潮流接軌，自義大利導入綜合 PS 點及 DS 點之適應性時間序列雷達干涉分析方法 (Adaptive Time-Series Interferometric SAR, ATS-InSAR)，適度放寬 PS-InSAR 之解算限制，使用多主影像連結、權重、散射機制及不同統計方式等方式識別分布散射體，並加入 PS 點之解算成果，獲取更密集的 InSAR 觀測點分布，以增加解算後變形點之可靠度。另根據加拿大 MDA 遙測公司之定義，ATS-InSAR 分析方法屬新世代之均質分布式散射體解算法 (Homogeneous Distributed Scatterer, 以下簡稱 HDS)。本文將說明使用 ATS-InSAR 於各類之地表變形與潛在地質災害，詮釋引入 DS 點後，如何有助於各類地表變形應用之潛移觀測。

拜歐洲太空總署 Sentinel-1 雷達衛星開放資料所賜，現今吾人可於全球各區域取得遙測影像進行地表監測與分析，然而並非各類地表環境與幾何特性皆適合產生可信之 InSAR 觀測點。為增加 InSAR 觀測點，可適度佈設人工角反射器以增強雷達反射訊號，並累積多時期之影像，萃取出 PS 點分析地表變異。中興社近年亦於台電公司及公路總局技術服務案中，自行開發設計新型雙軌人工角反射器，以驗證回波訊號不佳場域之長時序雷達差分干涉分析適用性。

二、ATS-InSAR分析技術

鑒於 PS-InSAR 處理非城市地區點數分布不足，中興社採用適應性時間序列雷達干涉分析方法（ATS-InSAR），其於 PS-InSAR 之基礎，延伸處理 DS 之步驟。於常規方式解算完 PS 點後，利用統計檢定方式鑑定同質像素範圍，使多主影像、短基線連結方式組成像對，於干涉時使用統計同質像素(Statistically Homogeneous Pixel, SHP)範圍進行濾波，針對 DS 點以同調性為權進行地表變形解算，最終再與 PS 點合併成地表變形成果。以下茲將 ATS-InSAR 分析流程說明如后。

（一）永久散射體合成孔徑雷達差分干涉技術

永久散射體合成孔徑雷達差分干涉技術（Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR）為 Ferretti et al.(2000, 2001)所提出，處理流程如圖 2。PS-InSAR 從同一地區之時間序列影像中挑選時間與空間基線居中影像作為主影像（Master Image），剩餘影像則視為從影像（Slave Image），每幅從影像將與主影像使用外部 DEM 消除地形效應相位，進行 D-InSAR 干涉處理生成干涉圖及同調性圖，組成 D-InSAR 像對資料集，進而解算地表變形速度。

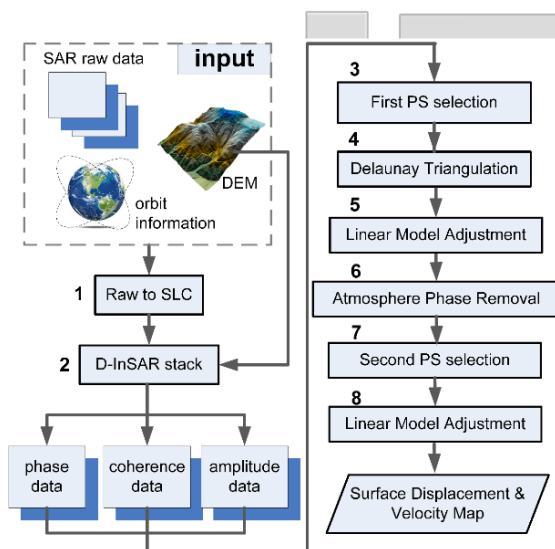


圖 2 PS-InSAR 處理流程圖

由於大氣相位在 InSAR 處理中影響結果甚鉅，為反演出大氣相位，PS-InSAR 首先使用振幅離差指數（Amplitude Dispersion Index, ADI），取較高門檻值之 PS 點進行變形解算，其式如下：

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (1)$$

式（1）， μ_A 及 σ_A 為 PS 點之時間序列振幅平均及標準差。之後以德勞內三角網（Delaunay Triangulation）連結 PS 點，建立 PS 點間之差分干涉相位觀測方程式：

$$\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{motion} + \varphi_{aps} + \varphi_{noise} \quad (2)$$

式（2）， φ_{flat} 為可用軌道資料移除之地球平坦化相位， φ_{topo} 為地形效應產生之相位， φ_{aps} 為大氣相位延遲相位，稱為 APS（Atmosphere Phase Screen）， φ_{noise} 為隨機噪聲。解算時滿足時域同調性（Temporal Coherence）最大化，其式如下：

$$|\gamma| = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{j(\varphi_{int} - \varphi_{topo} - \varphi_{motion})} \right| \quad (3)$$

式（3）中，待變形解算後，使用殘餘相位內插入 APS 後，於各干涉對中予以濾除，最終使用較低之 D_A （通常小於 0.25）重新選點及解算即可獲取最終 PS-InSAR 成果。

（二）同質分布散射體識別

為識別統計同質像素之分布，ATS-InSAR 使用 Anderson-Darling(AD)兩樣本統計檢定(Pettitt, 1976)來檢定像元間是否為同種類之像元。首先決定方位及距離向之罩窗大小，將罩窗中心像元與罩窗內像元分別依據時間序列之振幅值逐一進行 AD 統計檢定。當 F_p 及 F_q 為像元 p 及像元 q 之振幅累積分布函數，可定義統計假設為：

$$H_0: F_p = F_q, \quad H_a: F_p \neq F_q \quad (4)$$

AD 統計量則為：

$$A_{M,M}^2 = \frac{M}{2} \sum_{x \in \{x_{p,i}, x_{q,i}\}} \frac{(\hat{F}_p(x) - \hat{F}_q(x))^2}{\hat{F}_{pq}(x)(1 - \hat{F}_{pq}(x))} \quad (5)$$

其中 $\hat{F}_{pq}$ 為 p 及 q 兩像元組成之經驗累積函數（ECDF）。相比於 KS 檢定，AD 檢定對於函數

尾部有更多的權重，更適合於雷達相關應用（Parizzi and Brcic, 2011）。待選取一定之信心水準，將罩窗內通過檢定之罩窗內像素連結起來，記錄影像內每一像素個別之統計同質像素範圍，用於後續干涉圖之濾波處理，此濾波方式稱為多時相適應性濾波（Multi-Temporal Adaptive Filter）。

（三）多主影像連結方法

PS-InSAR 方式透由振幅離差指數進行選點，只萃取於影像期間內皆為穩定反射强度高及於所有干涉像對中同調性高之散射體，其條件較為嚴苛，較無法處理現實情況中，小於影像解析度之人造建物及自然界植被覆蓋之田地與山區，且 DS 與 PS 特性不同，常受時空不相關因素干擾，故本法採取 Quasi-PS（Perissin and Wang, 2012）概念，放寬 PS-InSAR 較嚴苛條件，不使用單主影像的連接方式，改以多主影像及短基線之連接方式進行地表變形解算，每幅干涉圖皆以多時相適應性濾波進行處理。

鑒於某些地物並非長時間保持高同調性，僅於短時間基線時才会有高同調性，如山區的冬季積雪、秋季樹葉掉落、季節性農田耕作及建物施工期等原因，皆會造成地表於短垂直基線及短時間內保有同調性，故僅由多主影像連結中，去除同調性較低之干涉相位，保留同調性較高之干涉相位進行解算。

本方法將去除已使用 PS-InSAR 成功解算之 InSAR 觀測點，使用平均同調性將剩餘像元進行選點後進行變形解算。為識別 InSAR 觀測點中同調性高之干涉連結，將同調性納入當作權重進行變形速度解算。而在同調性最大化之式（3）中，加入每組干涉連結之空間同調性（值域 0 至 1）作為權重：

$$| \gamma | = \left| \frac{1}{\sum w_{i,k}} \sum_{i,k} w_{i,k} e^{j(\varphi_{int} - \varphi_{topo} - \varphi_{motion})} \right| \quad (6)$$

上式中， $w_{i,k}$ 為第 i 張影像及第 k 張影像組成之干涉相位同調性。此 Quasi-PS 之方式使用干涉相位

之絕對值當作權重，同調性越高代表此干涉相位成果較佳，權重較大；反之，當同調性越低，代表此干涉成果不佳，於計算時給予較小權重，避免造成變形解算成果偏差。此方式可處理短暫短調性目標，將永久散射體以外之其它散射體合理地納入解算流程。於 DS 部分完成後，將 DS 與 PS 點成果合併，獲得具更密集分布之 InSAR 變形成果。

（四）ATS-InSAR 與 PS-InSAR 比較

為驗證 ATS-InSAR 之分析能力，本文以臺東台 9 線南迴公路 395K 路段邊坡為例，與常規 PS-InSAR 成果比較是否擁有較多 InSAR 觀測點分布。本案例使用 2019/01/05 至 2020/04/05 之 Sentinel-1A IW 模式、VV 偏極影像，PS-InSAR 部分採 2019/09/02 為主影像，並使用振幅離差指數 0.3 作為 PS 點選點門檻值依據，成果如圖 3（a），其顯示於該路段道路邊坡缺乏回波較強且穩定之點位，於道路沿線上僅有少許點位，較難快篩出較具活動性之道路邊坡路段。

反觀 ATS-InSAR 分析成果，本案例採多主影像之分析方法，將所有可能組成之兩兩影像組成干涉像對，時空間基線連接圖如圖 4 所示，並於各干涉像對使用多時相適應性濾波後綜合解算地表變形，成果如圖 3（b）。相比於 PS-InSAR 成果之 11 個 InSAR 觀測點，ATS-InSAR 變形成果之 InSAR 觀測點分布明顯增加（約 2,300 點），可快篩出該路段鄰近邊坡較具活動性之兩處區域。從圖 3（b）也顯現本方法之 InSAR 觀測點分布並非無條件增加，地表變形點位幾乎集中於裸地、道路等較具均勻反射之地表覆蓋。此亦反映真實地物回波條件，意即在原始資料的適用範圍內不過估其解釋意涵。基於雷達回波物理特性，受邊坡植被覆蓋較難於干涉分析中維持良好同調性，如圖 3（b），故本路段之植被茂密地區較無點位分布，實屬合理。綜合言之，ATS-InSAR 納入具有同調性可供分析之點位進行分析，增加 InSAR 觀測點位分布以揚顯地表變形資訊，且於

增加點位時不強求各地區皆有觀測點分布，而是採取較具信賴之點位供後續加值分析及解釋研判。

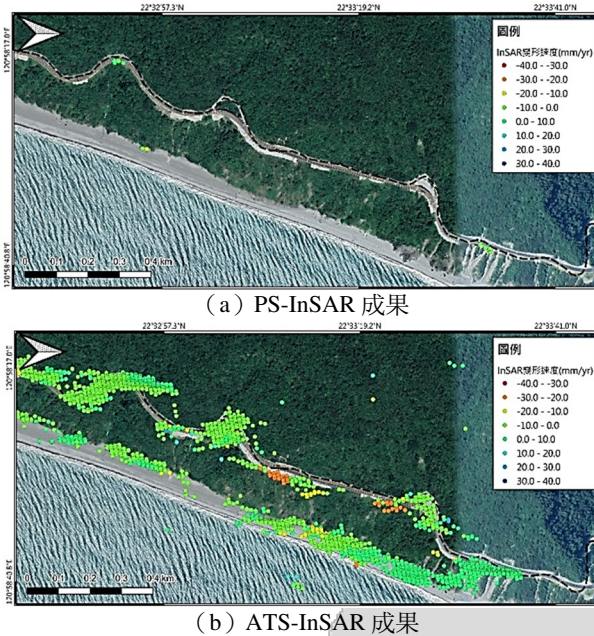


圖 3 南迴路段道路邊坡 InSAR 分析成果

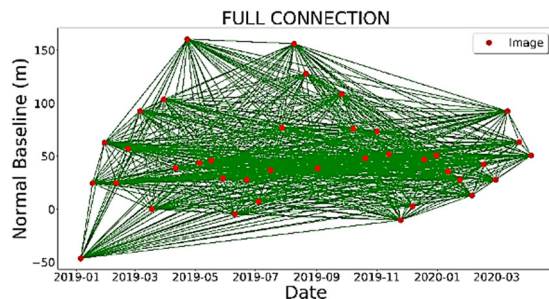


圖 4 時空間基線連接圖

(五) 多軌 InSAR 成果變形分解

合成孔徑雷達之差分干涉技術 (D-InSAR) 之變形量為視衛星 (Line Of Sight, LOS) 方向，其所偵測之變形向量方向為地表指向衛星感測器，造成 InSAR 所偵測的變形並非完全垂直於地表，故於基礎設施工程評估應用，可能肇生與土木工程師的解讀隔閡 (工程上，水平與垂直方向變位較便於理解)。隨著 SAR 感測器的推陳出新，目前已有眾多不同波長及軌道方向之感測器，可結

合同時期不同軌道方向之 InSAR 變形成果，透過多個方向變形觀測分解出南北、東西、及垂直方向之變形，有助於更明瞭地表變形之實際情形。然而如欲分解出三維變形，須由三個不同成像幾何之觀測量才可解算。

隨著 ESA Sentinel-1 衛星不斷運行，臺灣以每 6 (中、北部) 或 12 天 (南部) 為重返週期持續獲取影像，在便利取得 SAR 影像來源之際，可用升、降軌變形成果進行向量分解。儘管以升、降軌成果剖析變形方向只有兩個觀測量，但因 SAR 感測器之衛星運行方向通常接近南北向，輔以右視方向進行觀測，觀測方向接近東西向，故升軌及降軌皆對於東西向及垂直向之變形較為敏感，南北向之變形對於 LOS 方向之變形則影響較少，可假定無影響並忽略不計。以下說明升軌及降軌分解成水平向及東西向之計算式。

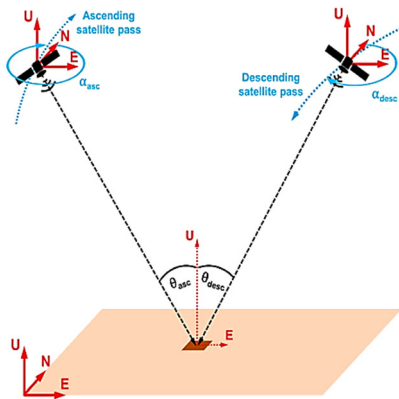
SAR 感測器升軌及降軌之成像幾何如下圖 5，雷達成像之入射角為 θ ，感測器航行方位角為 α ，InSAR 之 LOS 方向則垂直於感測器航行方向。就單一感測器而言，InSAR 之 LOS 方向變形 (V_{LOS}) 可由地表東西向 (V_E)、南北向 (V_N) 及垂直向 (V_U) 三者投影組成，詳如下式 (Fuhrmann and Garthwaite, 2019)：

$$V_{LOS} = [-\sin\theta\cos\alpha \quad \sin\theta\sin\alpha \quad \cos\theta] \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix} \quad (7)$$

當同一地表目標物同時擁有升軌及降軌之變形量 (V_{Asc} 及 V_{Desc}) 時，在忽略南北向變形時，兩個觀測量可解算成東西及垂直兩方向之變形，藉由升、降軌成果皆由式 (1) 忽略南北方向未知數 (V_U) 建立觀測方程式達成，其聯立方程式如下：

$$\begin{bmatrix} V_{Asc} \\ V_{Desc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_{Asc}\cos\alpha_{Asc} & \cos\theta_{Asc} \\ -\sin\theta_{Desc}\cos\alpha_{Desc} & \cos\theta_{Desc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_E \\ V_U \end{bmatrix} \quad (8)$$

式 (8) 中， θ_{Asc} 及 θ_{Desc} 分別代入升、降軌感測器之入射角，而 α_{Asc} 及 α_{Desc} 分別代入升、降軌航行方位角。在建立式 (7) 後，即可透由簡易之聯立方程式求出變形量 V_E 及 V_U 。



資料來源：Fuhrmann and Garthwaite (2019)

圖 5 升、降軌 SAR 觀測成像幾何示意圖

目前 Sentinel-1 影像可免費取得全球之影像，結合 Sentinel-1 升、降軌之成果並以上述方式快速分解出二維變形量，提供有別於一維變形成果，確認地表變形是否主要受垂直變形或是水平變形影響。本文將於第四節以高雄燕巢滾水坪地區為例，結合 Sentinel-1 升、降軌 ATS-InSAR 成果，分解東西及垂直向之地表變形，以評估該地區受潛在斷層之影響程度。

三、人工角反射器

(一) 人工角反射器原理

著眼於臺灣山區環境複雜，植被茂密，人工建物稀少，對於雷達衛星之反射回波訊號較差（或難以獲得良好反射回波），如於潛在大規模崩塌場址或山區潛移邊坡常有其限制性。換言之，人工角反射器（Corner Reflector，以下簡稱 CR），原理如圖 6，可視為雷達衛星於地面上之反射鏡，

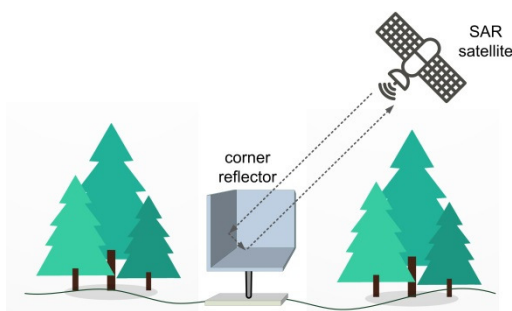


圖 6 人工角反射器原理（本研究繪製）

於設置點能獲得穩定且良好之雷達反射訊號，俾利長時序 InSAR 地表變形解算。一般而言，都會區因建物及基礎設施密集，雷達影像上之回波訊號品質多優於山區。

(二) 新型角反射器研發

在衡量人工角反射器回波性能良窳上，通常以雷達散射截面（Radar Cross Section，簡稱 RCS）來評估（Miacci et al., 2012），國內常見之三角形三面體角反射器（Triangular Trihedral CR）之 RCS 值，可以下式估計：

$$RCS_t = \frac{4\pi L^4}{3\lambda^2} \quad (9)$$

式（9）中， L 為三面體之邊長； λ 為雷達感測器之波長。而矩形三面體角反射器（Square Trihedral CR）之 RCS 值如下：

$$RCS_s = \frac{12\pi L^4}{\lambda^2} \quad (10)$$

以 C 波段為例，若 RCS 值要達到 30 dBm²，三角形三面體 CR 之邊長須為 930 mm；反之，矩形三面體 CR 之尺寸僅需 540 mm。另考量三角形三面體之人工角反射器，於佈建時需調整 CR 之垂直角（與衛星入射角正交）與方位角（垂直衛星右側視軌道），以獲得最佳反射條件。若受鄰近環境之電（磁）場影響，於設置後常需前往現場進行角度微調，以確保設置條件是否良好。鑑此，中興社開發之 CR 將改用矩形三面體（圖 7），以取代三角形三面體。除可獲得較佳之 RCS 值外，於山區佈設時，也能減少 CR 角度調整耗費人力。

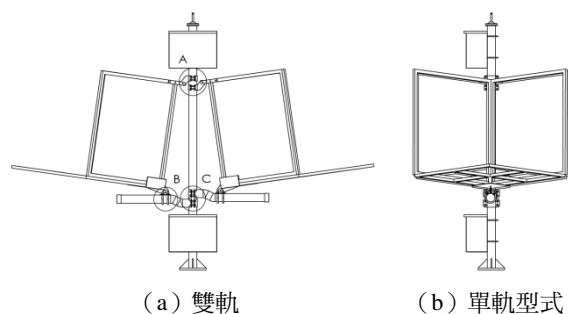


圖 7 中興社開發之矩形三面體 CR：

再者，考慮於山區惡劣環境，其受強風振動與降雨積水之影響，本設計將傳統金屬板材料改以不鏽鋼金屬網目替代，降低前述可能肇生回波訊號削弱之不利因素。另可視監測目標需求及場域條件選用單軌或雙軌 CR 進行安裝。

四、案例驗證與討論

本節就研究方法所提及之 ATS-InSAR、水平-垂直變形分解及角反射器佈建成果，以案例探討 InSAR 技術於監測山崩、道路邊坡等地表潛移趨勢，並以中興社於台 9 線南迴公路邊坡設置角反射器為例進行說明。

本研究目前採取之影像為歐盟太空總署 (European Space Agency, ESA) 於 2014 年發射之 Sentinel-1 雷達影像，該影像之規格參數如表 2，並以免費公開方式提供使用。Sentinel-1 起初每 12 天在臺灣獲取一幅影像，而於 2018 年後 Sentinel-1B 衛星發射後，Sentinel-1 影像於臺灣中北部地區重返週期最快可縮短為六天，使半年至一年內累積之影像幅數即可足夠用於 InSAR 多時序分析。

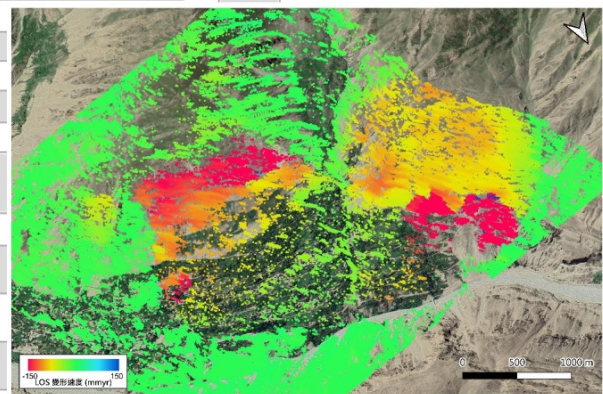
表 2 本研究使用 Sentinel-1 雷達影像規格參數

規格參數	Sentinel-1 A/B
偏極化	VV
重返週期	12/6 天
拍攝模式	IW (Interferometric Wide Swath Mode) 模式
波長	5.6 公分 (C-Band)
空間解析度	5x20 公尺
像幅寬度	250 公里
影像格式	SLC
軌道方向	升軌/降軌 (依案例選擇)

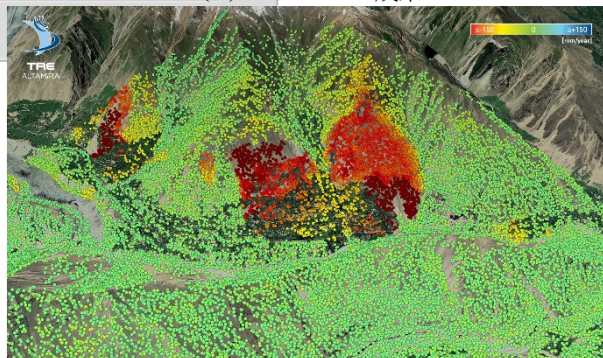
(一) 巴基斯坦 Humarri 大規模崩塌

本文以巴基斯坦之亨扎-納加爾區 (Hunza-Nagar) 的 Humarri 大規模崩塌進行潛在滑動塊體位移偵測。此大規模崩塌案例因為於印度、歐亞

板塊活動碰撞帶上地表變形劇烈，且該邊坡旁有斷層經過，造成地震頻繁，也因中巴邊境公路地表土層鬆軟、地形陡峭，伴隨坡趾受河流侵蝕、灌溉系統增加地下水位及降雨等因素造成該地區之地表活躍 (Rehman et al., 2020)。此大規模崩塌因下邊坡位置緊鄰聚落，基於防災考量，預先瞭解崩塌區邊坡之潛變演育特徵至關重要。本案例使用 2019/09/11 至 2020/09/05 一年期之 31 幅 Sentinel-1 影像進行分析，本案例分析範圍大於 InSAR 分析常給定點位之間 1 公里之大氣去相關距離 (Ho Tong Minh et al., 2020)，故需進行大氣相位消除後，再進行地表變形解算，成果如圖 8 (a)。其中顯示出兩處明顯變形之區域，可直接界定出兩明顯活動之滑動塊體，而變形最劇烈之地區更有超過 150 mm/yr 之 LOS 方向下沉變形，此也說明了 ATS-InSAR 分析適用於長時間地表快速潛移之潛在崩塌案例，此為過去 PS-InSAR 較難達成之解算成果。另本例也一同與 InSAR 分



(a) ATS-InSAR 成果



(b) SqueeSAR™ 成果 (Tre Altamira, 2020)

圖 8 Humarri 大規模崩塌 InSAR 分析成果

析法位居全球具領導技術之 SqueeSAR™ 成果進行比較，顯示 ATS-InSAR 分析成果如地表觀測點覆蓋密度、可偵測之滑動塊體邊界及相對快速變形之區域與 SqueeSAR™ 成果（圖 8（b））相似，證明 ATS-InSAR 對於邊坡潛移具有良好之分析能力。

（二）烏來忠治里（台 9 甲線旁籃球場）

2015 年於蘇迪勒颱風襲臺，於數天內降下豐沛雨量，造成新北市烏來及新店山區之區域型土砂災害，衝擊住民安全且造成房建物諸多毀損。烏來忠治地區於災後至今，仍有部分區域持續潛移變形，如忠治部落於台 9 甲線（南下）旁之籃球場。本研究蒐集 2019/11/19 至 2020/10/08 升軌 Sentinel-1 影像進行 ATS-InSAR 分析地表變形趨勢，分析成果如圖 9。成果顯示忠治地區廣域而言並無明顯區域變形發生，唯一較具下沉變形為圖中分布於台 9 甲線忠治籃球場周緣區域。中興社亦至現場調查沉降區域，發現忠治籃球場下邊坡建物及東側建物道路旁皆有出現新鮮開裂痕，顯示該區域確實受邊坡滑動影響而肇生地貌變異。其中，該地區之最大變形量級約為 3 cm/yr，其餘如忠治部落、河道等區位暫趨於穩定。本分析期間所偵測出較具活動性之忠治籃球場下邊坡區域也與地調所量測之滑移速率相近，約 5 cm/yr（朱偉嘉等，2020），由於現地已有測傾管等現地監測設備，長期之 InSAR 遙測分析可與其監測資訊

驗證時間序列之變形量比對是否吻合，以擴展單點監測至面狀活動性偵測，提供多元尺度之監測方案。

（三）高雄市燕巢區滾水坪

本文以燕巢滾水坪進行 ATS-InSAR 分析後，結合升、降軌成果進行水平-垂直變形分解，掌握地表實際變形方向。此分析以 Sentinel-1 影像為主，升、降軌分別採 2019/1/至 2020/5 期間內各約 40 幅影像，分別進行 ATS-InSAR 分析處理，並將參考點至於圖中上半部，升軌及降軌成果分別如圖 10（a）及圖 10（b）。以單軌成果判讀，圖 10（a）升軌成果顯示圖中南側地區相比於北側地區有稍微抬升之現象，而圖 10（b）降軌成果則為南側相對北側地區有下沉趨勢，兩者呈現之趨勢剛好相反，假設以單一成果並假設地表以垂直方向變形運動判釋，其可能會導致誤判。因圖 10（a）及圖 10（b）兩成果之呈現趨勢相反，為釐清是否擁有水平位移導致，本研究計算兩者重疊區域後，在忽略南北向變形之情況下進行東西向及垂直向變形分解，東西向與垂直向變形成果分別如圖 10（c）及圖 10（d）。圖 10（c）東西向分解成果顯示圖中下半部區域呈現出相對上半部有 2 cm/yr 之向西變形情形，而圖 10（d）垂直向分解成果呈現區域穩定之現象，並無明顯地表抬升或下沉之現象，故推測車瓜林斷層線通過該地

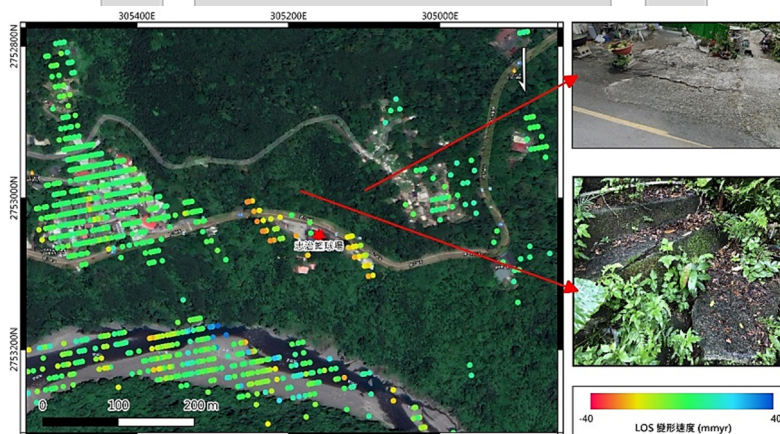


圖 9 烏來忠治地區 ATS-InSAR 分析成果

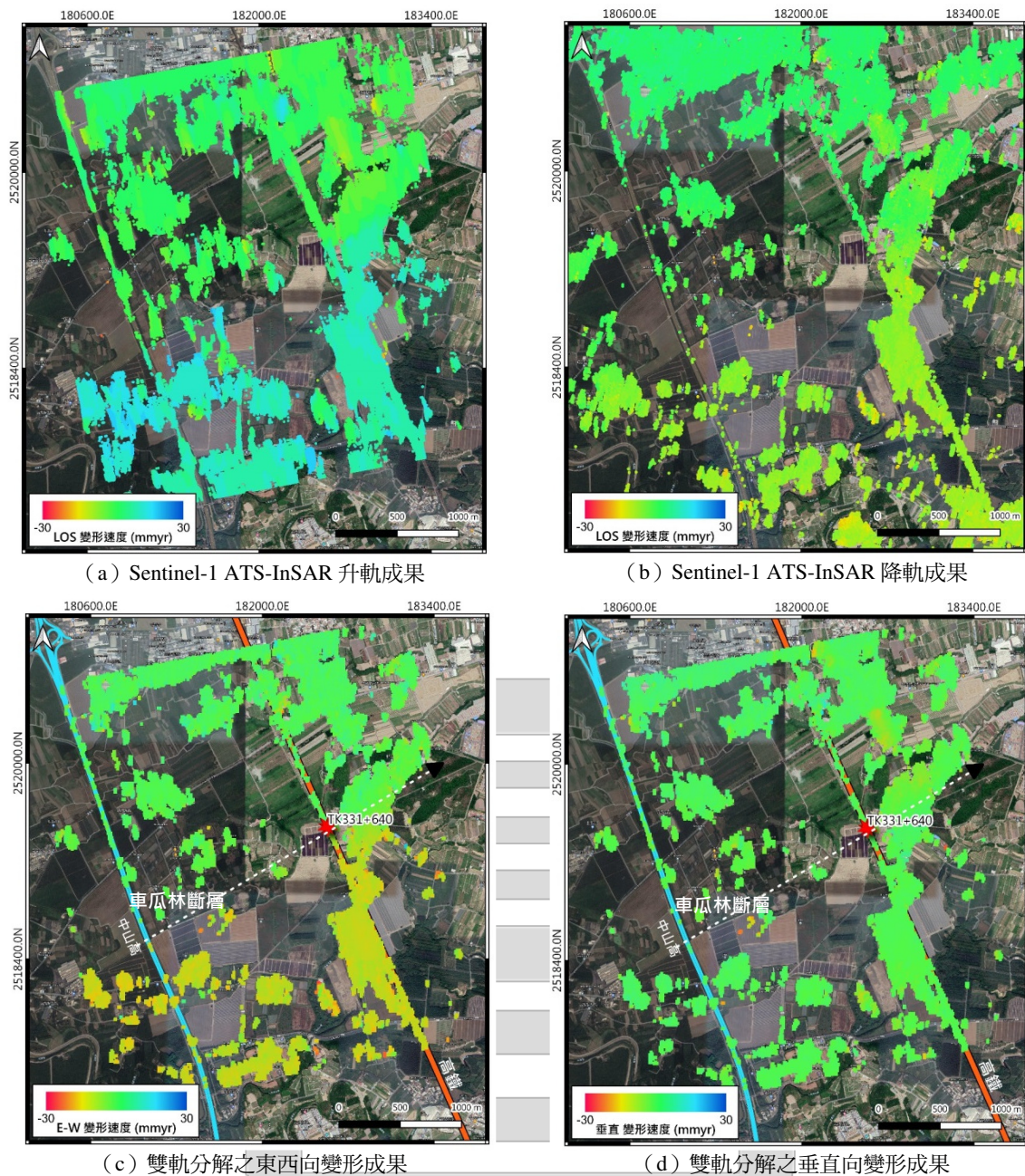


圖 10 滾水坪 ATS-InSAR 分析成果

區，造成斷層下盤（北側）及斷層上盤（南側）地表水平變形量速度差異，並與趙家賢（2019）使用 GNSS 資料觀測出之 331K+640 軌道里程位置發生地層剪切錯動位移吻合。

本區域南部之向西變形，參照圖之示意圖，於升軌影像顯示為地表與衛星距離縮短，視衛星方向距離縮短，地表 LOS 變形方向顯示抬升；反

之對降軌影像而言，地表遠離衛星，地表 LOS 變形方向顯示下沉。此案例說明地表隱含水平位移，於不同軌道之 InSAR 成果中會呈現相反變形之現象，故進行 InSAR 分析時，結合升、降軌之成果綜合分析對於工程設施有其必要性。至於本區 InSAR 觀測點除分布於建物及裸地區域外，尚於該地區內之國道及高鐵高架路段有較高密度分

布，顯示出 InSAR 技術於工程建設之加值應用，除可協助監測各路段是否有長時間下沉潛移變形之現象外，亦可透由雙軌之水平、垂直邊形監測地表之水平位移錯動，建立長時序、例行性之變形觀測機制，評估基礎建設是否存在致災潛能。

（四）人工角反射器應用

中興社自 2019 年起已因應不同實務需求，陸續於全臺佈建 14 座人工角反射器，包含單軌與雙軌之三角形三面體 CR 及矩形三面體 CR，區域涵蓋臺北、花蓮、臺東等縣市之公路及林道邊坡。同時也以 Sentinel-1 雷達衛星開放資料，建置雷達回波強度圖查詢資訊平台（圖 11），可任意輸入日期與升、降軌道瀏覽目標區之各時段雷達回波強度（套疊 Google Earth 遙測影像）。為避免新攝軌道誤差，分析資料取其近三週之強度圖（VV 偏極）進行平均，供人工角反射器佈建初期及後續成效檢核。



圖 11 Sentinel-1 雷達回波強度查詢資訊平台

實務應用案例如圖 12 所示，以台 9 線南迴公路 395K 邊坡為例，由公路總局第三區養護工程處之鑽探及歷史監測資料顯示，計畫區內存在一潛移滑動塊體，其鄰近褶皺構造，周緣岩盤略為破碎，道路周邊可見陷落及錯移特徵，滑動深度約在 39-40m。本處除原規劃之邊坡監測設備外，為了將點狀監測資料擴展至面狀，以釐清公路沿線上下邊坡之坡體變異特性（圖 3 所示），本計畫導入了新世代 ATS-InSAR 分析技術，並於

2020/10/9 在區域北側及南側潛在滑動塊體之道路下邊坡設置了兩座矩形網形四面體 CR（CR1：邊長 60 cm、CR2：邊長 100 cm；如圖 13）。因本處邊坡坡向面東，故選擇升軌軌道進行觀測（降軌影像之地形幾何扭曲效應較為顯著）。圖 14 則顯示了 CR 佈建後之雷達回波振幅變化，從圖 14(a) 中可得知 CR 尺度效應在雷達強度圖上之差異，相較於佈建前，60 cm 邊長 CR 安裝後約可觀察至 4-6 個像素亮點（2020/10/11），而 100 cm 邊長 CR 約可觀察至 9-16 個像素亮點。其在雷達強度時間序列上亦有相仿現象，於振幅值域上，後者約為前者之 1.7 倍。待後續雷達影像幅數累積數量足夠後（12-20 幅；以本處 Sentinel-1 影像約至少累積 144 天），即可進行 ATS-InSAR 分析，以精確地獲得特定關注場域位置之地表變形特徵，並與現地既有監測資料進行相互校核（如 GNSS 觀測）。



（底圖：青山工程顧問提供）

圖 12 台 9 線南迴公路 CR 佈設圖



圖 13 南迴公路 CR 佈設實景

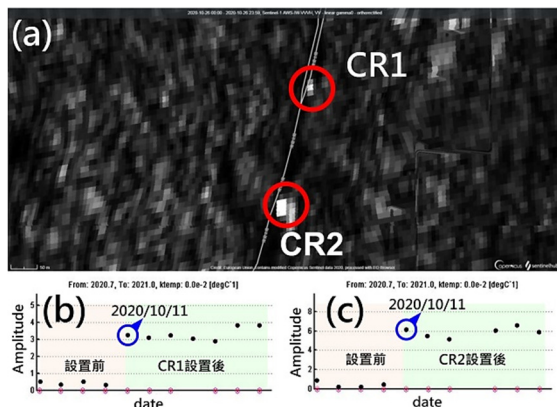


圖 14 台 9 線 395K CR 佈設後雷達回波強度與振幅變化時序圖

五、結論與建議

本文介紹了中興社引進之新世代 ATS-InSAR 差分干涉進階分析技術，除了有助於地質災害前期預警與工程維運階段之監測，以長期大地地表或構造物上之變形趨勢來預判潛在病灶，以達快速篩選易致災熱區之外，亦可進行邊坡尺度或符合地域特性的工程整治規劃。本技術可兼顧廣域、小區域不同比例尺、相異影像資料來源（空間相關與時間相關異質性）及乾濕季變化（臺灣西南部）之情境，給定不同分析策略與流程。

就 InSAR 分析技術的發展歷程，仍需再次強調，唯有充分瞭解監測標的物屬性（或災害成因）、地形因子與周緣環境背景特性，再行挑選合適波段雷達影像與評估方法。意即良好的資料搭配適切分析模型，才可獲得可信結果。

近期中興社亦戮力投入智能角反射器之研發與專利申請，對於低相關性之低密度散射點區域，可借助角反射器與人造設施提升其雷達回波強度。身處萬物聯網的 5G 潮流，CR 連結低功耗經濟型 IoT 感測器，除單就其反射回波功能外，亦能廣泛地蒐集關注場域之環境資訊（如微氣候、雨量、振動感知等）。透過感測資料即時回傳雲端，並與既有 InSAR 評估資訊平台整合，可交互驗證 InSAR 分析成果，提供數位轉型趨勢下的高品質整合性解決方案服務。

謝 誌

本研究特別感謝公路總局第三區養護工程處大武工務段及青山工程顧問有限公司提供場址基本資料與角反射器安裝協助，謹此一併申謝。

參考文獻

- Altamira, T. (2020) The Humarri slide is the most active #landslide in the area of Hunza-Nagar with #displacement velocities exceeding 354 mm/yr. Thanks to #InSAR and its successful application, further studies are being conducted to #monitor the #slope evolution and adopt. In Twitter. https://twitter.com/TRE_ALTAMIRA/status/1306501759133679619/photo/1
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002) A New Algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), pp.2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., & Crippa, B. (2016) Persistent Scatterer Interferometry: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, pp.78–89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
- Danklmayer, A., Doring, B. J., Schwerdt, M., & Chandra, M. (2009) Assessment of Atmospheric Propagation Effects in SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(10), pp.3507–3518. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2022271>
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011) A New Algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), pp.3460–3470. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000) Nonlinear Subsidence Rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5I), pp.2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), pp.8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Fuhrmann, T., & Garthwaite, C. M. (2019) Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion. In *Remote Sensing*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/rs11030241>
- Funing, G. J., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., & Fumagalli, A. (2007) Creep on the Rodgers Creek fault,

- northern San Francisco Bay area from a 10 year PS-InSAR dataset. *Geophysical Research Letters*, 34(19), p.L19306. <https://doi.org/10.1029/2007GL030836>
- Greif, V., & Vlcko, J. (2012) Monitoring of Post-Failure Landslide Deformation by the PS-InSAR Technique at Lubietova in Central Slovakia. *Environmental Earth Sciences*, 66(6), pp.1585–1595. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0951-x>
- HO TONG MINH, D., Hanssen, R., & Rocca, F. (2020) Radar Interferometry: 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives. *Remote Sensing*, 12(9), p.1364. <https://doi.org/10.3390/rs12091364>
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004) A New method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23). <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Huang, Q., Crosetto, M., Monserrat, O., & Crippa, B. (2017) Displacement Monitoring and Modelling of a High-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, pp.204–211. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.016>
- Lazecský, M., Perissin, D., Zhiying, W., Ling, L., & Yuxiao, Q. (2015) Observing Dam's Movements with Spaceborne SAR Interferometry BT - Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5 (G. Lollino, A. Manconi, F. Guzzetti, M. Culshaw, P. Bobrowsky, & F. Luino (eds.); pp. 131–136. Springer International Publishing.
- Miacci, M. A. S., Nohara, E. L., Martin, I. M., Peixoto, G. G., & Rezende, M. C. (2012) Indoor Radar Cross section measurements of simple targets. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 4(1), pp.25–32. <https://doi.org/10.5028/jatm.2012.04014711>
- Pepe, A., & Calò, F. (2017) A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. In *Applied Sciences* 7(12). <https://doi.org/10.3390/app7121264>
- Perissin, D., & Wang, T. (2012) Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1), pp.271–280. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2160644>
- Pettitt, A. N. (1976) A Two-Sample Anderson-Darling rank statistic. *Biometrika*, 63(1), pp.161–168
- Rehman, M. U., Zhang, Y., Meng, X., Su, X., Catani, F., Rehman, G., Yue, D., Khalid, Z., Ahmad, S., & Ahmad, I. (2020) Analysis of Landslide Movements Using Interferometric Synthetic Aperture Radar: A Case Study in Hunza-Nagar Valley, Pakistan. In *Remote Sensing* 12(12). <https://doi.org/10.3390/rs12122054>
- Tamburini, A., Del Conte, S., Ferretti, A., & Cespa, S. (2014) Advanced Satellite InSAR Technology For Fault Analysis And Tectonic Setting Assessment. Application To Reservoir Management And Monitoring. <https://doi.org/10.2523/17574-MS>
- Tessitore, S., Di Martire, D., Calcaterra, D., Ramondini, M., Russo, G., & Infante, D. (2017) Multitemporal Synthetic Aperture Radar for bridges monitoring. In W. Heldens, N. Chrysoulakis, T. Erbertseder, & Y. Zhang (Eds.), *Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments II*, p.16. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2278459>
- Zhang, L., Ding, X., & Lu, Z. (2011) Ground Settlement Monitoring based on temporarily coherent points between two SAR acquisitions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(1), pp.146–152. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.10.004>
- Zhang, L., Lu, Z., Ding, X., Jung, H., Feng, G., & Lee, C.-W. (2012) Mapping Ground Surface Deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin. *Remote Sensing of Environment*, 117, pp.429–439. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.020>
- 朱偉嘉、林錫宏、蔡政翰 (2020) 烏來忠治籃球場邊坡滑動監測初步成果及滑動特性探討。經濟部中央地質調查所 108 年度業務成果發表會手冊，23
- 趙家賢 (2019) 以 2015 至 2018 年大地測量資料分析車瓜林斷層地表變形及橫跨斷層之高架橋結構位移，國立成功大學測量及空間資訊學系學位論文 <https://doi.org/10.6844/NCKU201901971>

中興社研發叢書及電腦程式銷售

中興工程顧問社已發行研發、編譯叢書 314 種及電腦程式 23 套，多屬規劃、設計、施工、管理等方面之工程技術，其叢書及程式目錄、售價、摘要、申購表、繳款方式及信用卡繳費單等，皆已上「中興工程顧問社」之網站 www.sinotech.org.tw，歡迎上網查閱選購；若需進一步查詢請電話或傳真至電話：(02)8791-9198 轉 467 陳小姐，或傳真：(02)8791-2198