



百公里外制敵機先的毫米變形偵測 — 差分干涉合成孔徑雷達分析

王國隆／國立暨南國際大學土木工程學系 副教授

陳建帆／臺北市政府工務局大地工程處 科長

邱亭瑋／臺北市政府工務局大地工程處 正工程司

林俊廷／國立暨南國際大學土木系 博士生

過去經濟發展的條件讓台灣沿海以養殖漁業為主要產業，養殖漁業需要使用大量新鮮的水來供給，為了能有足夠的水量，多數進行地下水抽取，長期的抽取地下水造成地層下陷，近年來除了養殖漁業以外，小型工廠及中型工廠對於地下水的使用也造成地下水位的逐年降低，難以恢復，合併產生的地層下陷亦沒有逆向的可能。此外，基於頻繁的板塊碰撞及造山運動影響，台灣發生地震的頻率相當高，淺層且規模大的地震發生頻率也在增加中，加上鄰近的太平洋夏季經常形成的熱帶氣旋及伴隨而來的颱風豪雨，令佔有台灣百分之七十面積的山坡地面臨崩塌的威脅，近年來隨著地狹人稠的影響，人為的開發逐漸往山區移動，此外，氣候變遷加劇了強降雨及長延時降雨的特性，亦為受地震侵蝕鬆動的山坡地增加滑動的危險，本文嘗試對於地表變形的偵測以大範圍的差分干涉合成孔徑雷達分析為主體，指出可能的應用方向提供參考。

前言

遙測技術於近年快速發展出不同波段及不同探測之分析方法，各種遙測新技術之發展為提供相關調查與變遷監測資訊之重要利器，合成孔徑雷達影像（SAR）是一種微波觀測技術，其基本原理利用衛星運行時連續發射雷達波，並將雷達回波接收後進行解算，以得到成像結果，雷達波具有優越的穿透性，比起可見光，雷達波更能輕易穿透雲霧煙塵到達地表，經反射後再被衛星接收，此外也能於夜間順利施測，圖 1 所示為旗山溪流流域合成孔徑雷達影像之單觀點複數影像（SLC），其運作時會從衛星上向地表發射一系列的電磁波，當電磁波遇到物體產生反射時，接收這些回波訊號，並量測反射波強度與時間差，以達到量測的目的。

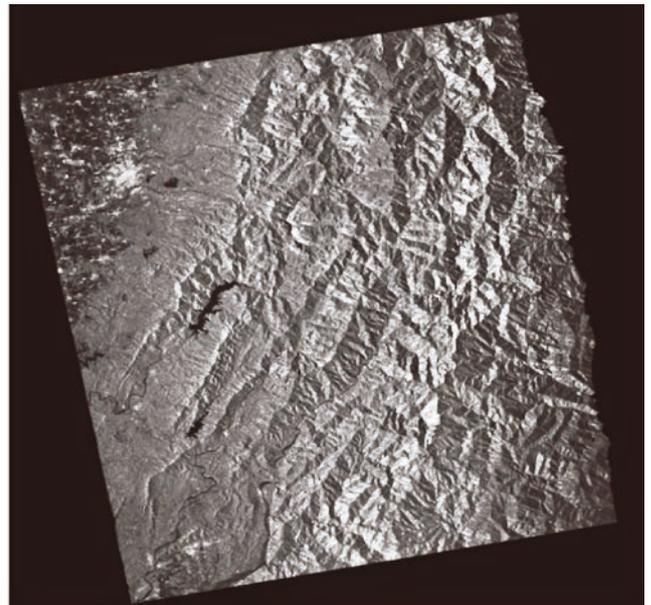


圖 1 合成孔徑雷達 SLC 影像

然而對於星載雷達而言，為了達到標準的解析度，必須安裝的雷達天線口徑會超過數百公尺，在現實中不可能達到，為了克服此問題，運用了都卜勒頻率位移的理論，在飛行過程中重複發射電磁波，在這過程中每個小天線接收到地面上的回波，會因都卜勒效應產生些微的相位變化，藉此相位史的變化過程可區分出地面的每個相元，將這一系列的回波匯整，就如同衛星搭載的小天線朝方位向移動，形成一個等效的大天線，即為合成孔徑雷達成相的運作原理，當 SAR 影像經過差分干涉處理時，可以得到相同地點多時序之地表變化量，解算成果可用於繪製地表變化量剖面圖。

差分干涉雷達（Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR）係利用兩幅同一地區不同時間（位置）所拍攝的影像作干涉處理，其解算原理如圖 2 所示，合成孔徑雷達利用衛星運行時，快速地重複發射雷達波，並將回波資料加以解算，當兩束波長相同、相位相同或保持固定相位差的光線照射在同一目標上，會產生一系列亮暗相間的干涉條紋，兩束雷達波在一定條件下也會產生干涉現象，當干涉雷達使用兩套相距 B 基線長的天線在地面產生干涉現象，干涉條紋出現時代表變形呈現雷達波波長的相位循環，將此一相位還原後經計算即可測得地表變形。

採用合成孔徑雷達影像的地表位移訊號使用差分干涉技術來取得衛星至地表變形量（Line of sight, LoS），然而單一組差分干涉技術所取得地表變形量可能存在多種誤差，利用時序性的合成孔徑雷達影像進行干涉分析時，主要產生的干涉相位資訊包含了地形、地表特徵變化、地表移動量以及大氣效應等（式 (1)），其中地形的

相位變化資訊可以採用高精度數值地形及短基線長去除該項誤差，相干值（同調, coherence）的門檻調整則可以去除低相干區域的影響，以及副產品數值地形的精準度（謝嘉聲與史天元，1999），大氣效應的誤差可以用長時間多影像的觀測降低，當消弭可能誤差來源後，僅剩下地表移動及雜訊相位差，可藉以取得較高精度且可信任之地表變形量。

$$\begin{aligned} \phi_{Int} &= 4\pi \frac{R_1 - R_2}{\lambda} \\ \phi_{Int} &= \phi_{Topography} + \phi_{Change} + \phi_{Movement} + \phi_{Atmosphere} \\ &= \frac{4\pi B_n}{\lambda R_{sin} \theta} h + \phi_{Change} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{Movement} + \phi_{Atmosphere} \\ &= \frac{4\pi B_n}{\lambda R_{sin} \theta} h + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{Movement} + \phi_{Noise} \end{aligned} \quad (1)$$

其中， R_1 及 R_2 為不同時間衛星至地表觀測點距離，

- $\phi_{Topography}$ ：地形相位變化、
- ϕ_{Change} ：地表特徵相位變化、
- $\phi_{Movement}$ ：觀測點移動相位變化、
- $\phi_{Atmosphere}$ ：大氣折射相位變化、
- $\Delta R_{Movement}$ ：衛星 1 及 2 至觀測點地表移動量、
- ϕ_{Noise} ：雜訊相位、
- B_n 為正常基線（Normal Baseline）、
- h 為待測位置地表高程、
- λ 為雷達波長、
- θ 為側視角。

採用差分干涉取得的相位差，在條件良好情形下可轉換為毫米等級之變形量，即使不進行相位還原及位移量解算，仍可由人工判釋出滑動塊體範圍，因此，由差分干涉產生出來的相位差資訊可顯示出地表變動位置，如果潛在滑移邊坡因地表高程發生些微變形，可進行進一步分析。

前述差分干涉取得之相位差僅由兩幅至四幅影像產製，雖可經由相位還原取得地表三維變形，但可能存在變位資料誤差而導致三維變形量失真，因此，可採用干涉堆疊技術進行改善並可分析得歷年之地表三維變形，利用雷達干涉堆疊技術求解地表變形趨勢主要有兩種方式，其一為採用地表永久散射體模式，其

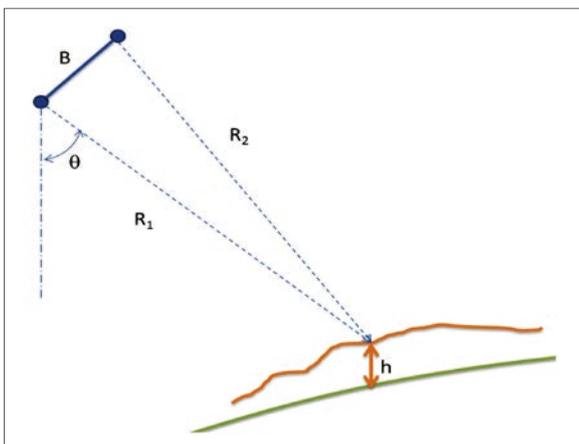


圖 2 合成孔徑雷達解算示意圖

二為採用短基線長模式，以雷達干涉堆疊技術消弭各項誤差，進而取得時序性監測下之邊坡位移量，經由干涉堆疊技術分析後所得之地表變位資訊相較於僅進行差分干涉地表變形量可靠，採用地表永久散射體模式需進行地表反射體設置或以現存之地表構造物作為散射體，經由散射體位置高反射訊號特性分析可獲得可靠之結果，此外，如雷達資料之基線長較短（低於 200 ~ 300 公尺），則可採用短基線長模式進行分析，亦可取得三維歷時變化情形。差分干涉合成孔徑雷達（DInSAR）及干涉堆疊技術（Interferometric Stacking Technique）等監測方法，可於多年期時序性資料中篩選出地表變形趨勢。

連續式地表變形解於干涉堆疊分析模式上，主要分為 PS 法及 SBAS 法兩類如表 1 所示，由表中可知兩法互有精確度及偵測地表變形之優勢，兩法中不管何法均需尋找地面持續存在地面點，亦即該點同調性（coherence）需保持相對較高方能使用，唯 PS 法需至少 20 幅以上合成孔徑雷達影像方能獲得較為精確解，如收集資料尚未達到 20 幅影像，可採用 SBAS 法進行分析。表 2 中列出目前運作中常用於差分干涉合成孔徑雷達影像，沒有運作中的合成孔徑雷達衛星資料仍可購買且價錢較低，由表中可看出各種不同波段衛星及國家政策目標不同，影像售價也不同，如侷限於預算，可使用 Sentinel-1A/B 的影像，其個別再訪週期均為 12 天，兩者搭配有機會可以取得間隔 6 天的影像；使用各種波段進行地表變形分析時需注意波長越長可以偵測到變形越大，且波長越長對於植生反射能力越佳，由過去經驗顯示，台灣山區除非高度開發地區使用 C 波段勉強可以進行偵測，而 L 波段效果較佳，然於平原地區使用何種波段均無太大差別。

表 1 連續式差分干涉合成孔徑雷達變形解算模式

PS (Persistent Scatters) 永久散射法	SBAS (Small Baseline Subset) 短基線法
獨立、不相關運動	空間相關運動佳
平滑連續時間觀測	可以處理時間上非連續資料
兩次資料取得時間受變形速率限制	兩次資料取得時間受時間相關性限制
PS 點上相當精確	稍微不精確
線性變形較佳	可進行多項式變形模型或無參數變形模型

表 2 運作中常用雷達影像相關資料

衛星	波段	波長	解析度	價格	國家
Sentinel-1A/B	C	5.6cm	5 ~ 20m	免費	歐盟
ALOS PALSAR-2	L	23cm	1 ~ 100m	24 ~ 40 萬日幣	日本
TerraSAR-X	X	3.1cm	1 ~ 16m	420 ~ 1400 歐元 (3m 解析影像)	德國
Cosmo-Skyrmed 2	X	3.1cm	1m	單幅 6000 歐元 / 多幅優惠	義大利

2016 美濃地震

2016 年高雄美濃地震發生於是 2016 年 2 月 6 日，美濃一帶災害不大，但臺南市震災相對嚴重，發生多處地滑甚至液化為主的災害及維冠大樓的倒塌，災害政府單位及學術單位分別對各種災害發生地點進行了廣泛的調查，為了瞭解美濃地震產生的影響，在本文利用了日本 JAXA ALOS-2 的影像及歐洲太空總署 ESA 的 Sentinel-1A 的影像，產生出來的干涉條紋如圖 3 及圖 4 所示，其中日本的 ALOS-2 衛星一般對台灣取像時間間隔較長，但地震後日本 JAXA 於 2 月 18 日對台灣取像，圖 3 所得的結果是 3 個月內時間基線結果，但仍可看出干涉環的存到，而圖 4 的歐洲太空總署 Sentinel-1A 是常態固定 12 天取像，所以可以看出相當漂亮的干涉環，干涉條紋的存在在這邊以 RGB 循環的色彩呈現，每一個 RGB 循環的呈現色彩代表了相對於半個雷達波長的變位，但此時變位是地表相對衛星（Line of Sight, LOS），干涉圖中有一處是 GPS 連續追蹤站，根據中央研究院 GPS Lab 查詢後該站編碼為 LNCH，向中央研究院申請下載該站美濃地震期間資料繪製高程變化如圖 5 所示，從圖 5 可以看出美濃地震期間該站高程上升約 8 ~ 10 公分，對比 ALOS-2 約為半個波長，而 Sentinel-1A 則約為 5 個波長，與圖 3 和圖 4 所呈現的干涉條紋一致，但兩者此時無法對比，仍需要將 LOS 的變位轉為垂直向方能與 GPS 觀測資料比較。

除此之外，從干涉條紋也可以觀察出可能的斷層構造，除了圖上南北向及東北—西南向的構造外，有一處較為明顯的干涉條紋處為中寮隧道通過位置，中寮隧道由於斷層通過造成隧道隆起淨空不足及隧道口高架段可能落橋危險，已進行部份隧道拆除及高架段改路堤施工，取中寮隧道位置 2015 年至 2019 年的歐洲太空總署 Sentinel-1A 雷達衛星訊號進行分析，可獲得年變形速率如圖 6 所示，可以明顯看出斷層通過位置及兩側地表抬生及下降情形，此圖中已將地表變形資料轉為垂直向，可與 GPS 觀測資料或水準觀測資料進行比對。

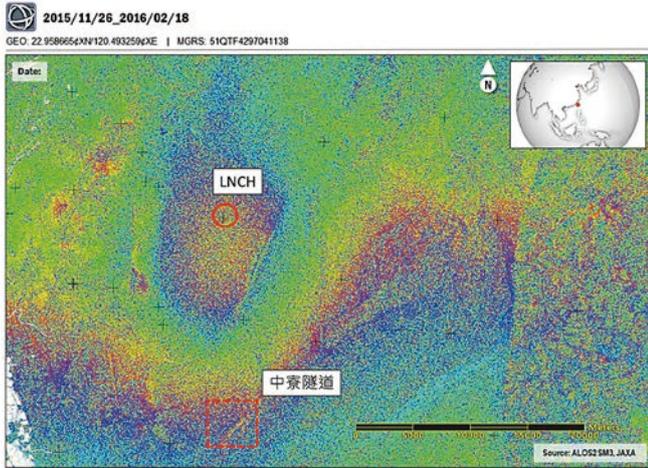


圖 3 採用日本 JAXA ALOS-2 分析所得的干涉條紋

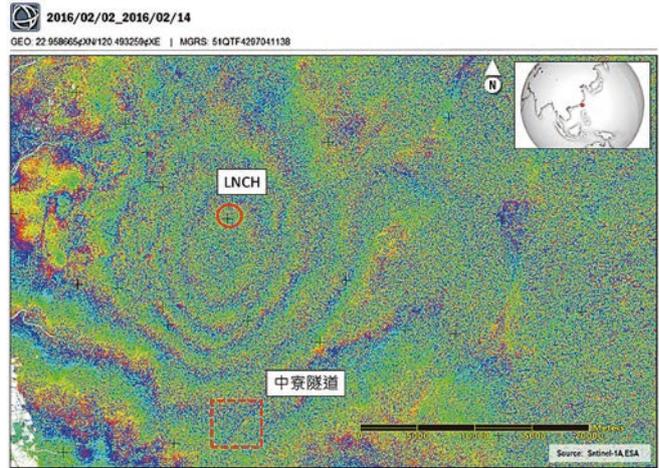


圖 4 採用歐洲太空總署 ESA Sentinel-1A 所產生的干涉條紋



圖 5 中央研究院 GPS Lab 提供之 LNCH GPS 連續追蹤站美濃地震期間高程變化

2018 花蓮地震

2018 年 2 月份花蓮地區出現連續的地震，於 2 月 6 日 23 時 50 分 42.6 秒出現芮氏規模 6.0 地震，花蓮、太魯閣及南澳測站測得震度七級，同時造成多處房屋傾

斜倒塌、17 人罹難之意外，地震後對於地震肇因是否由斷層或其他活動造成第一時間難以分辨，主要原因均指向米崙斷層之活動，於是本文取用歐洲太空總署提供之合成孔徑雷達衛星 Sentinel-1 號衛星資料進行分析，Sentinel-1 衛星分為 A 及 B 兩顆衛星，其再訪週期均為 12 天，兩顆衛星分別在不同軌道運行，交錯運行時可以取像時間可縮短至 6 天取得一幅影像，本文取用兩兩一幅進行分析，分析時參考地形使用內政部 5 公尺解析之數值地形，分析所得干涉條紋 (fringe) 如圖 7 所示，分析副像 (終止) 時間分別為 2 月 3 日、2 月 5 日及 2 月 9 日，前述提及干涉條紋出現時顯示地表可能出現變形，觀察圖 7 中時間序列干涉條紋可發現，截至 2 月 3 日時受力變形位置主要出現於南側的嶺頂斷層西側 (圖 7(a))，於 2 月 5 日時則集中至北側米崙斷層東側 (圖 7(b))，最後於 2 月 3 日至 2 月 9 日的像對出現明

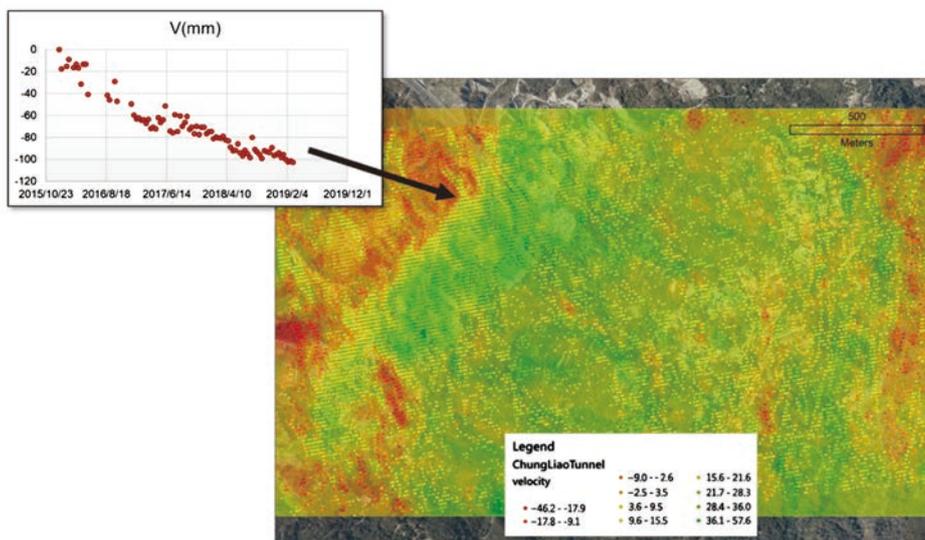
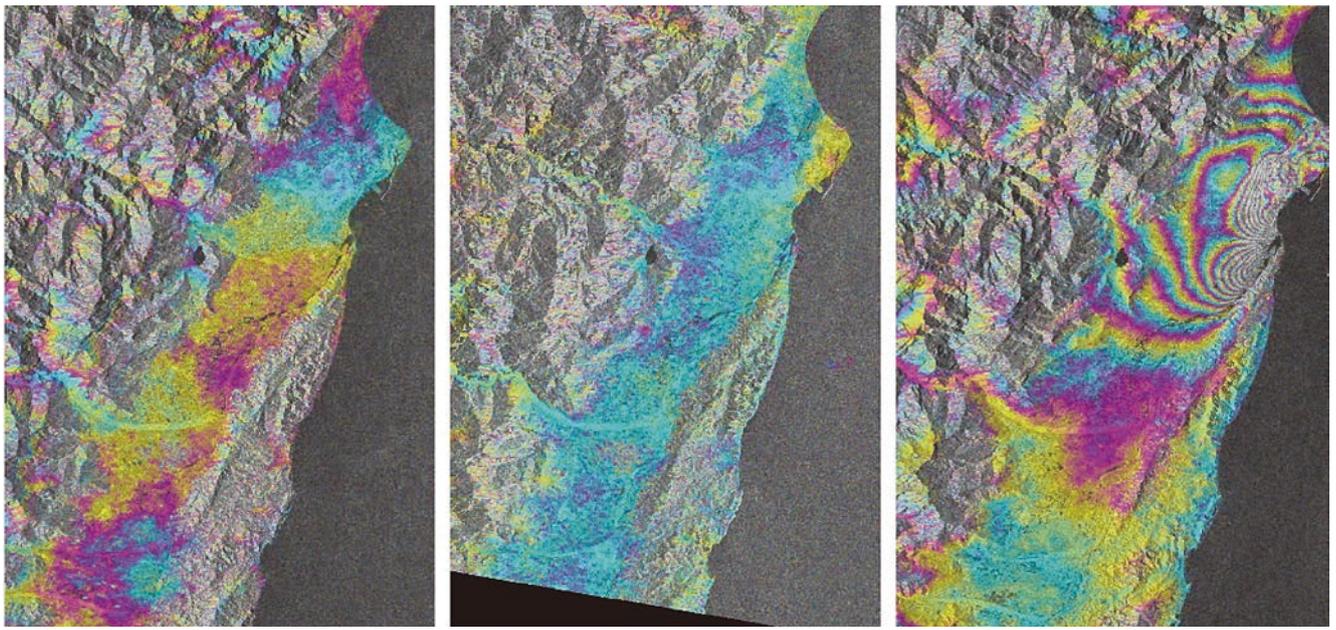


圖 6 中寮隧道 2015 年至 2019 年由雷達衛星訊號分析獲得之垂直向年變形速率 (mm/year)

顯干涉條紋，由圖 7(c) 中干涉條紋雖可觀察出變形集中位置，唯對於工程觀點而言無法有效研判變形方式，於是將干涉產生的相位差予以還原則可以解算得地面點相對衛星的距離變化 (Line of sight, LoS)，但是 LoS 無法與衛星追蹤站觀測資料比對，於是本研究將 LoS 資料再分析拆解其垂直向量製圖，以變化 2 公分間距為等高線繪圖如圖 8 所示，由圖中可知北側為沈陷，其最大值为

12 公分，而南側為升高，最大值为 36 公分。

然連續分析是否有機會追蹤或提前得知地震前兆？本文中嘗試以 2016 年底至 2018 年初歐洲太空總署資料進行分析，所得垂直向變化如圖 9 所示，從事後來看，2017 年 10 月開始該處的地表已經加速呈現下降的情形，如能從其他觀測成果獲得同樣結果，此一方法可以提供部份地震預警參考。



(a) 2018/1/22 ~ 2018/ 2/3 (b) 2018/1/12 ~ 2018/2/5 (c) 2018/2/3 ~ 2018/2/9

圖 7 0206 花蓮地震震前及同震干涉條紋

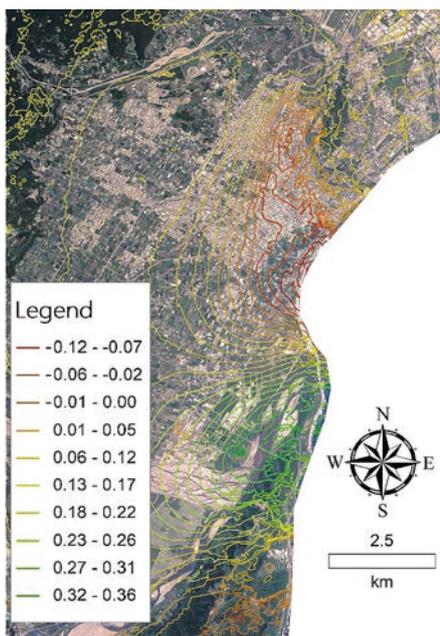


圖 8 0206 花蓮地震 2018/2/3 ~ 2018/2/9 DInSAR 地表垂直變形 (單位: 公尺)

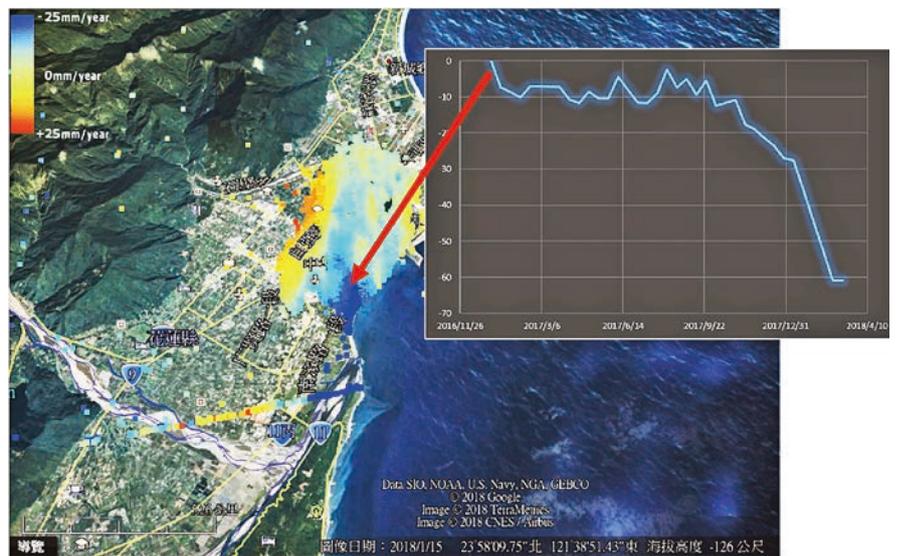


圖 9 花蓮地震前至地震發生後之序時地表垂直變化 (mm)

地層下陷

差分干涉方法於空曠地區可獲得更高精度成果，於解算本次花蓮地震時因採用 Sentinel-1 合成孔徑衛星資料，每幅資料可涵蓋半個台灣範圍，解算出干涉條紋時發現台灣西部出現一組干涉條紋如圖 10 所示，可能出現半個 Sentinel-1 波長之沈陷，將干涉條紋解算為地表垂直變形後切一剖面由西至東結果如圖 11 所示，由圖中可知此處確實出現沈陷錐，對比坐標位置發現沈陷中點位置附近有一內政部國土測繪中心衛星追蹤站，此一位置 DInSAR 解算之高程變化為降低 18.6 mm。

為驗證此一成果，本研究嘗試取得衛星追蹤站 GPS 變化資料，向國土測繪中心購買 2018 年 2 月 1 日至 2 月 9 日日臺西及北港兩衛星追蹤站 RINEX（每秒）資料自行進行點對點解算，解算時以北港衛星追蹤站為參考站，取得臺西站高程變化，假設北港衛星追蹤站之高程變化為 0，獲得之臺西衛星追蹤站高程變化如圖 12 所示，由圖中可知，與 DInSAR 解算相同時間（2 月 3 日至 2 月 9 日）之高程降低為 18.6 mm，而 DInSAR 解算成果為高程降低 19.2 mm，兩者成果相符，但觀察臺

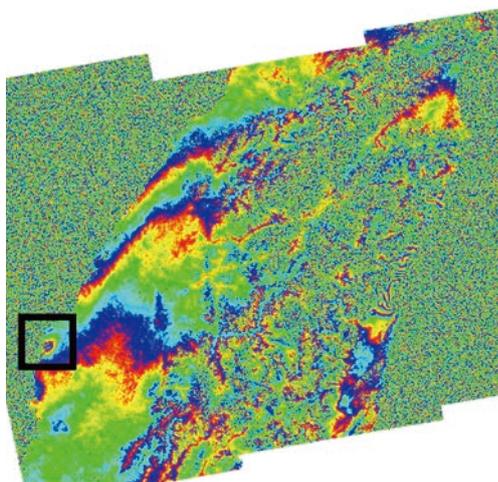


圖 10 2018/2/3 ~ 2018/2/9 北台灣同震干涉條紋

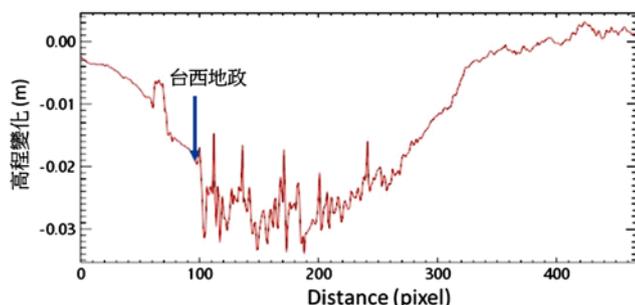


圖 11 2018/2/3 ~ 2018/2/9 DInSAR 台西鄉由西至東地表垂直變形

西站高程變化，與 2 月 6 日地震並無直接關連情形，而屬於持續降低，冬季期間高程持續降低是否與地層下陷有關或屬於季節性的高程上升下降趨勢，但觀察其變形加速時間點與停止時間點，或與該地四周均為養殖魚塢有關，在冬季期間養殖業者於部份時段抽取地下水，造成些微地層下陷，於停止抽水後下陷停止，但此部份本文僅就 GPS 及 DInSAR 兩者得出此一觀測討論，無法證實業者是否抽取地下水，本文目的僅在於驗證 DInSAR 成果可有效觀測地表變形量。



圖 12 以北港衛星追蹤站為參考站解算臺西衛星追蹤站高程變化成果

潛在崩塌觀測 — 以台北市為例

多時序差分干涉合成孔徑雷達影像比對及變形分析主要針對 6 處敏感性邊坡分析，分別為文山區貓纜 T16 及 T21 塔柱周邊邊坡，南港區舊莊街 2 段 334 號附近邊坡，內湖區 CGS-0624-NH-082、北投區陽明大學邊坡、士林區萬溪（主線）5 K + 250 ~ 5 K + 700 等。分析目的係瞭解邊坡是否產生潛移，並進行後續對策因應，考量是否有足夠觀測影像資料可以同步驗證，影像主要採用歐洲 Sentinel-1A/B 分析，觀測資料使用區間以 2017 ~ 2018 年為主及近年有災害事件者針對該年度區間進行影像判釋及分析，歐洲太空總署衛星通過台灣主要有兩個軌道，其相對軌道編號分別為 69（上升軌）及 105（下降軌），按照台灣地區衛星通過位置，邊坡主要坡向朝東分析結果較佳為上升軌道之 69 號，主要坡向朝西分析結果較佳則為下降軌道之 105 號，此外，由於衛星繞行為南北向，主坡向為南向或北向由於與衛星運行軌道同向，所得結果精確度相較於東西向較差，本文中遭遇主坡向為南北向時同步使用上升軌道及下降軌道測試分析結果，將各邊坡分析結果列如表 3 所示。

表 3 各邊坡分析條件彙整表

編號	位置	分析採用軌道	主坡向	備註
1	文山區／貓纜 T16 塔柱周邊邊坡	105	西	
2	文山區／貓纜 T21 塔柱周邊邊坡	69/105	南	105 雜訊較高
3	北投區／陽明大學邊坡	69	西南	
4	士林區／萬溪(主線) 5K+250~5K+700	105	西	
5	內湖區／CGS-0624-NH-082 邊坡	105/69	南	69 雜訊較高
6	南港區／舊莊街 2 段 334 號附近	105	西南	

分析結果顯示此六處邊坡均有速度不一之變形，故挑選部份邊坡進行現勘，圖 13 為貓纜 T16 塔柱周邊邊坡分析結果，於邊坡治理範圍內有部份的邊坡變形速率較高，於現場勘驗時尋找比對分析結果是否正確，圖 14 為現場勘驗時構造物裂縫情形，可知雖地表

有部份植生但分析結果仍具有參考性。

另於陽明大學分析結果如圖 15 所示，陽明大學內有部份位置地表變動量較高，尤其範圍內之操場，現場勘查照片如圖 16 所示，由圖中可知勘驗結果與 DInSAR 分析結果一致。

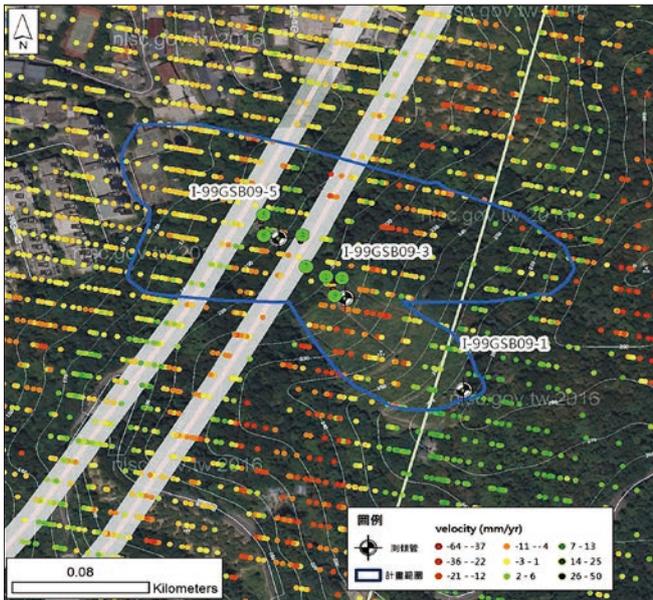


圖 13 貓纜 T16 塔柱周邊邊坡現勘位置圖

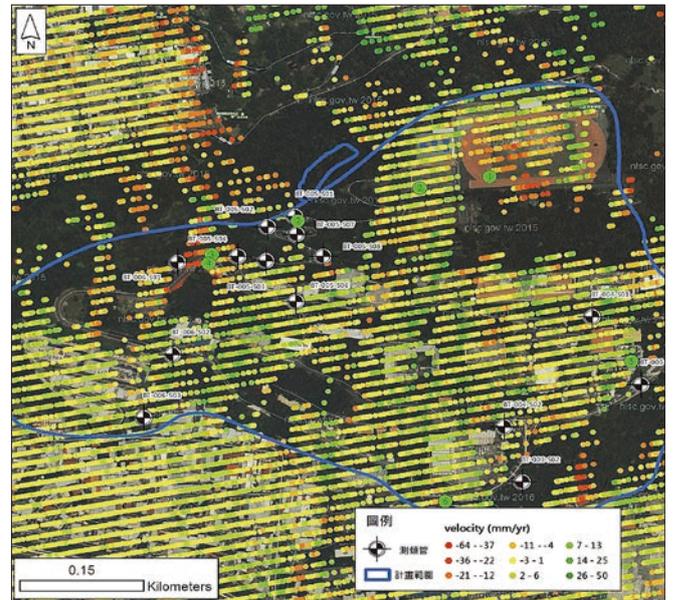


圖 15 陽明大學邊坡現勘位置圖



圖 14 圖 13 中點位 3 之構造物裂縫



圖 16 點位 1 邊坡上方操場產生龜裂

為測試是否能由此一遙測分析模式早期預警，挑選 2019 年 10 月 1 日米塔颱風期間發生崩塌位置進行分析，士林區至善路三段 150 巷邊坡分析時間為 2017/03 ~ 2019/06，分析坡向為西向，將連續式差分干涉合成孔徑雷達分析成果繪如圖 17 所示，圖中包含整體垂直變形暈染圖及等高線，藉由此兩種圖資可以快速找到崩塌頭部或崩塌界線如圖中之紅色虛線所示，兩虛線間之為變形最高地方，現場勘查時間為 2020 年 2 月 20 日如圖 18 所示，由圖中可以看出地表陷落情形，值得注意的是圖 17 的分析結果僅至 2019 年 6 月，並未涵蓋米塔颱風事件，為尋找可能促發時間，選擇崩塌線附近取出連續式變形資料如圖 19 所示，由圖中可知至善路三段 150 巷促發時間可提前至 2018 年 7 月，如能早期發現及現勘確認可儘早提出改善方案。

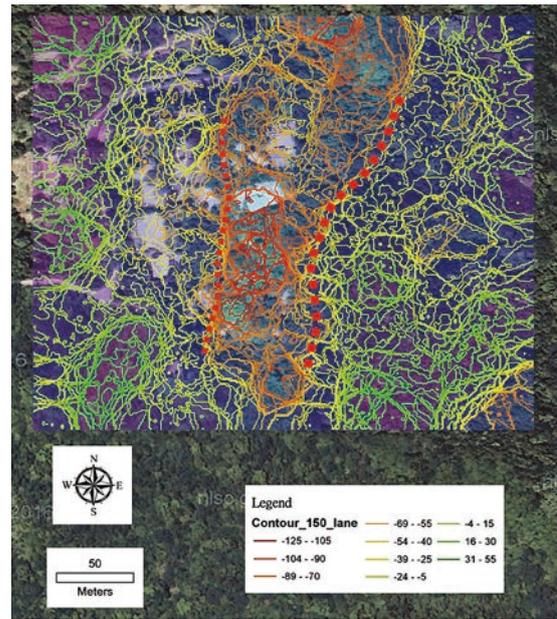


圖 17 至善路三段 150 巷連續式差分干涉合成孔徑雷達位移分析成果



圖 18 至善路三段 150 巷分析結果中變形速率最高位置現地勘查照片

結語

本文利用差分干涉方法分析地震、地層下陷及坡體滑動監測之可能性，結果顯示此一方法可快速獲得大面積的變形資訊，對於地表變形及方向均可掌握，於美濃地震及花蓮地震時獲得的地表變形資訊或可提供斷層細部調查的參考，地層下陷的位置可提供水資源規劃的建議，坡體滑動的監測如能保持持續性的關注，可提前部署監測系統，有機會在災害發生前發佈警告訊息通知影響範圍民眾及政府後續避災規劃參考。

本研究提供成功案例，但差分干涉合成孔徑雷達雖可於夜間或雲霧遮蔽時進行，但仍有其限制諸如由側視衛星造成的觀測角度、變形量過大、地表植生過密等問題，使用時對於產生之結果仍應審慎評估。

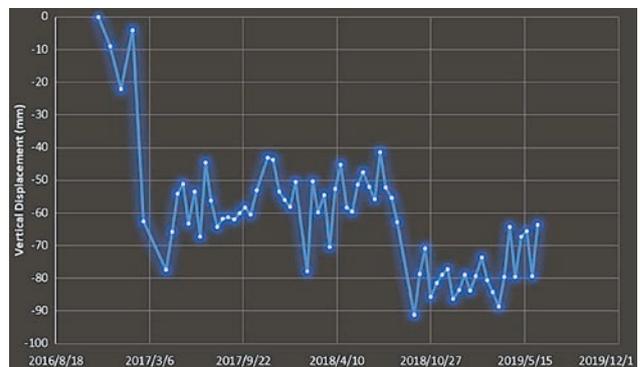


圖 19 至善路三段 150 巷崩塌頭部連續變形圖

參考文獻

1. 謝嘉聲、史天元 (1999), 「以雷達干涉量測技術產生數值高程模型資料實作探討」, 地圖, 第十期, 第 69-82 頁。