



雷達衛星 輔助工程環境監測 — 開放資料 的潛力與機會

曾國欣／國立中央大學太空及遙測研究中心 助理教授、土木工程學系 合聘助理教授

蔡富安／國立中央大學太空及遙測研究中心 教授兼中心主任、土木工程學系 合聘教授

李睿綺／國立中央大學地球科學學系 碩士班研究生

張中白／國立中央大學太空及遙測研究中心 教授、地球科學學系 合聘教授

臺灣工程環境受制於複雜的地質構造與土地利用，地表受到地震、斷層活動與地層下陷等變化影響，於短中長期對工程設計、施作與後續維護等全生命週期的永續經營造成不確定因素，因此具有時空上經濟效益的衛星觀測模式逐漸用以輔助工程環境上許多參數的監測。衛星遙測技術經歷多年的研究與驗證，資料品質日趨穩定且傳輸交流迅速，已逐步邁向營運化與實用性的導向。以光學為主的被動式遙測已在國土利用、分類與監測相關領域成為不可或缺的基礎資料源，而以雷達為主的主動式遙測技術也隨著資料開放的趨勢，成為系統性大範圍監測土地利用與地表形變的潛在工具。本篇文章將介紹利用歐洲太空總署於 2014 及 2016 年發射的 Sentinel-1A/B 兩顆雷達衛星，利用再訪影像中不同相位所組成的短基線合成孔徑雷達干涉技術（Small Baseline Subset Differential Synthetic Aperture Radar, SBAS DInSAR）分析，可用以監測臺灣西南平原的地層下陷速度、範圍與週期。後續經由全球衛星導航定位系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）連續追蹤站的點狀地面位移校正雷達成果，可填補地面觀測密度不足的地區，對地表變動的即時監測與長期趨勢預估提供了低成本且高效益的新選項。

前言

土木工程環境上需監測的項目繁多，其中包含地表錯動與沈陷等非均質變化。臺灣因為複雜的地質構造以及高密度土地利用，導致部分地區產生差異位移，長期累積對於人為建物造成巨大風險，因此若能建立經濟、有效的監測機制，對於工程設計的事前評估與後續補強，將能提供額外的輔助資訊。目前對於工程環境如斷層活動與地層下陷等參數掌握，主要透過一般現地工址調查、區域水準測量以及較大範圍的全球衛星導航定位系統（GNSS）連續站點狀監測。然而上述方法多在精度、範圍與效益中取捨，時空上高

密度的資料較難透過傳統方法呈現，因此透過衛星觀測穩定再訪、大幅寬成像的資料特點，可望成為彌補季節性以上高頻率週期與空間覆蓋空缺的可行方法。

細論臺灣的複雜地質環境，因其位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊交界處，受到板塊長期且持續的擠壓，地表破裂面形成斷層，並導致頻繁的地震活動。活動斷層的定義為過去十萬年內曾活動，未來可能再度活動的斷層，為此中央地質調查所於 2010 年普查了全臺斷層位置，進而數化本島上總共 33 條活動斷層，其中 20 條位於臺灣西南部（苗栗以南）。這 20 條斷層之中，13 條為第一類活動斷層（距今一萬年內曾發生

錯移，圖 1 紅色實線），7 條為第二類活動斷層（距今十萬年內曾發生錯移，圖 1 紅色虛線）。從 1736 年至 1999 年，14 個死亡人數超過百人的地震，有 12 個位於臺灣西南部^[1]。而斷層活動亦常造成工程上複雜度，如近年因旗山及龍船斷層造成國道三號中寮隧道的錯動，即是利用 GNSS 監測輔助維護補強的案例。若能持續監測斷層活動緩慢的變化進程，將有助於防患未然，避免潛在的工程災害。

此外，另一個地表形變較明顯的地方為西南部平原。因為彰化、雲林、嘉義一帶為密集農業區，種植灌溉需要大量用水，加上沿海地區魚塢養殖的水源需求，地層下陷是西南平原嚴重的工程災害成因。由於降雨時間及空間上分布不均，水庫蓄水量有限且平地可用水資源不足，迫使居民必須抽取地下水以補足地面上可用水的短絀，在超量抽取地下水的狀況下，造成持續性的地層下陷，後續勢必導致土地鹽化、危害建築物、影響交通設施，以及地上及地下管路破壞等。雖然近年水利法透過劃定地下水管制區限制抽取與開發，然而對於長期下陷的趨勢是否真能有效減緩，仍須透過持續性的監測加以評估。

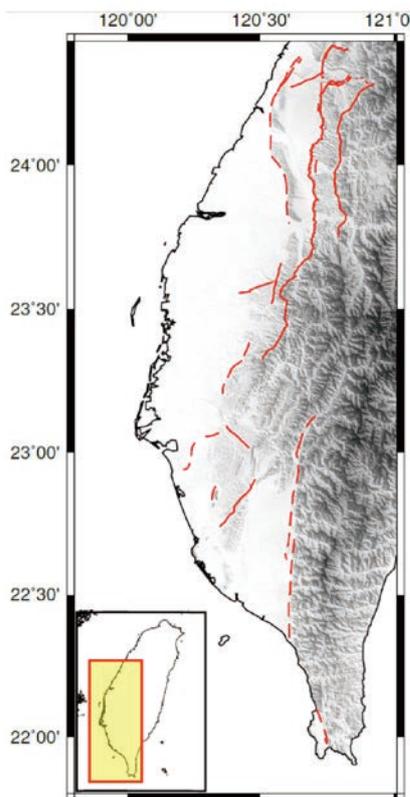


圖 1 臺灣西南部活動斷層分布。紅色實線為第一類活動斷層，紅色虛線為第二類活動斷層。

綜合上述，不論是斷層滑移與地層下陷的差異速率變化，甚或是事件型如地震引發的同震、震後位移，都可利用衛星影像加以量化短期變動與長期趨勢，而在多樣化衛星觀測方法中，又以合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）不受天氣環境限制的產品較能提供地表變遷資訊。透過雷達干涉圖提供面狀的地表變形監測，搭配臺灣密集的 GNSS 測站資料，能有效掌握工程環境上不同尺度的變化。過往受限於雷達資料成本較高且不易處理、分析，少有大範圍且系統性的使用，近年受惠於各國衛星資料開放政策，越來越多高品質的資料得以用於環境監測，並搭配地理資訊系統進行疊圖與環域分析，因此衛星觀測也逐漸成為決策單位必備的基礎資料之一，針對不同的標的與項目可彈性擇定所需的產品與監測頻率。

衛星資料應用面向

遙感探測（簡稱遙測）衛星根據其接收電磁波的能量源分為被動與主動兩類。被動式多以太陽輻射為能量源，針對地表或大氣中反射特定波長的電磁波強度進行物質分類、量化，其拍攝上受限於當地時（local time）的日間且容易受到雲霧遮蔽影響，單一顆重複軌道衛星可能須時一個月以上才能清楚地收集到地表狀態。被動式遙測主要透過類似光學攝影感測元件的方式成像，在不同波長的頻道如可見光、近紅外、中遠紅外，乃至於熱紅外線進行能量解析，進而針對該像元所在的地表位置進行地物識別與變遷分析。因為拍攝時缺乏傳遞時間與角度等測距資訊，除非在特殊需求下利用帶有傾角的拍攝與航空攝影測量中立體像對概念，才能將地表三維模型建立，且精度多限制在公尺級以上。

相對於依賴陽光的被動式感測器，主動式衛星多以雷達為能量源，透過本體酬載所產生的訊號，計算發射、反射至接收之間的時間差或訊號相位，並用以獲得空間中距離與反射面粗糙度等幾何訊息。主動式衛星利用數公分至數十公分波長的微波訊號傳遞，受到大氣狀態的影響輕微，因此可提供相當規律且精準的地表形變資訊。商用雷達衛星可追溯至歐洲太空總署（European Space Agency, ESA）於 1991 年 7 月發射的 ERS-1 衛星，利用 C 波段（波長 5.6 公分）

垂直極化 (VV) 雷達偵測 35 天間隔的再訪影像。後續 ERS-2 自 1995 年起在同樣軌道參數下提供延續性的時間序列，同年加拿大太空局也開始發展 C 波段的 Radarsat 系列。2002 年 ESA 發射 Envisat 衛星並搭配 ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) 酬載，除了以相同的 C 波段取像，更增加了不同水平垂直偏極 (polarization, 如 VV、VH、HV、HH) 以利地物判釋。爾後，日本地球觀測計畫亦在 2006 年發射了 Advanced Land Observing Satellite (ALOS) 衛星，使用 PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) 的 L 波段訊號，利用其長波長地物穿透性較佳的特性，對於植被覆蓋區的地表高程模型 (Digital Terrain Model, DTM) 與變化有較完整的資訊。上述地球資源衛星在二、三十年的進程中，累積了眾多地表觀測應用，不論在陸地的地物判釋、變遷分析、高程潛變，乃至於海面的海冰監測、污染控制等，隨著演算方法精進與資料源品質提升，衛星資料已從試驗階段逐步邁入營運式 (operational) 的品質要求，對於環境監測上也提供了可靠的參考資訊。

雷達衛星開放資料

雷達衛星因機構複雜且造價高昂，不受天氣影響而品質穩定，又可提供回波強度、極化反射特性與相位測距等多重物理參數，因此向來影像單價偏高，若是有任務型拍攝要求 (Tasking)，則五十公里見方的單張影像動輒花費一、二十萬新台幣，與次米級地表解析度的光學影像相當。且雷達影像所感測的物理參數不如可見光影像一目了然，往往需要有經驗的使用者協助資料處理與判讀，因此在影像的取得性與使用頻率上遠遠不及光學衛星。然而自 2014 年起，ESA 發射了 Sentinel-1A 雷達衛星，自此逐漸改變了遙測領域衛星使用上的習慣。Sentinel 群星任務為 ESA 哥白尼地球觀測計畫中多年期的星系，設計中包含了以雷達為主的 Sentinel-1 系列，以 10 公尺光學解析度為主的 Sentinel-2 系列，針對雷達測高與水色觀測的 Sentinel-3/-6 系列，以及以大氣與氣膠為主的 Sentinel-4/-5 系列。在這個星系設計中每個系列都有二至四顆在軌道上平均間隔的衛星，因此能有效縮短再訪週期，更重要的是，哥白尼計畫多數產品皆配合資

料開放政策，無償提供給使用者，並提供適當的免費軟體與線上教學，意在推廣衛星資料的普及度，鼓勵製作加值產品進而造福相關產業與應用端。

在 Sentinel 系列中最受人矚目的莫過於提供雷達衛星的無償影像。Sentinel-1A 搭載 12 公尺長的 C 波段雷達天線，在寬干涉模式 (Interferometric Wide swath mode) 拍攝下於軌道沿徑對 250 公里幅寬的地表可產製 5×20 公尺解析度的網格影像。其軌道設計為 12 天再訪週期，因此在 2016 年 4 月 Sentinel-1B 成功發射後，雙星能提供每六天、短空間基線 (兩次拍攝過程衛星位置的距離)、近全球同區再訪的週期性影像。有別於以往雷達任務動輒一個月以上的取像間隔，干涉像對內常因地物變遷而降低同調性 (coherence)，造成像對內相位落差過大而無法評估變動，又或是地表週期性與一次性訊號的交疊造成混淆。Sentinel-1 的高品質、低成本影像帶來了突破性的發展潛力，世界各國紛紛開始利用該衛星對於高頻率的地表變動建立完整的監測機制。

大尺度工程環境監測

在臺灣西南部地區利用合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometry SAR, InSAR) 觀測斷層活動已有為數不少的研究文獻。因為雷達衛星成像時需要有良好的反射點作為地表變形參考點，因此以臺南台地為例，由於都市建築物密度高，提供穩定的表面與強反射，增加兩幅影像之間的同調性並獲得良好干涉影像，進而能解算高解析度的地表變形資訊。根據前人研究，在 1996 ~ 2000 年間利用 ERS 衛星影像搭配合成孔徑雷達差分干涉技術 (Differential SAR Interferometry, DInSAR) 顯示臺南台地抬升作用明顯^[2-4]，並驗證該現象與周遭鄰近斷層的活動相關。而在 Huang *et al.*^[5] 的研究中，其結果與 Fruneau *et al.*^[2] 以及 Huang *et al.*^[3,4] 相當吻合，也證實臺南台地在地質上的輕微抬升現象。此外，Huang *et al.*^[5] 的研究中利用 ERS 及 Envisat 衛星分別截取 1995 至 2001 及 2005 至 2008 的影像，計算每年平均視衛星方向 (Line of Sight, LOS) 的地表位移，範圍涵蓋苗栗以南的西南部地區。此研究指出在臺灣西南部的斷層周圍也能利用合成孔徑雷達取得斷層活動資訊，例如梅山斷層、

左鎮斷層、後甲里斷層、旗山斷層、鳳山斷層等，皆有觀察到長期活動的證據。

除了臺南地區，嘉義市周遭也在斷層活動潛勢區，過去 1906 年曾發生梅山地震，造成 1237 人死亡，是臺灣史上傷亡第四大的地震^[1]，此地有複雜的斷層和褶皺系統，因此持續觀測此地的地表變形有其必要性，以預警並降低可能發生的災害。Yen *et al.*^[6] 利用疊加合成孔徑雷達干涉結果觀測地表變形，研究指出嘉義市位於雙傾伏褶皺上方，並以每年一公分的速率向上抬升。然而自 2008 年 Envisat 衛星退役後，較少利用合成孔徑雷達針對臺灣西南部進行地表變形研究，直到 2016 年 2 月 6 日美濃地震後，西南部地區的斷層活動再次得到重視，藉由長時間的時間序列變化，可觀測局部地表變形並加以分析同震與震後速度變化，減緩未來可能因地震引起的災害。

此外在地層下陷方面，臺灣西南部以彰化、雲林、屏東地區地表沉降的情況最為嚴重，根據水利署地層下陷防治資訊網之資料，彰化地區民國 81 年至 105 年累積最大下陷量達到 210 公分，平均 8.4 cm/yr，雲林地區民國 81 年至 105 年累積最大下陷量也達到 160 公分，平均 6.4 cm/yr。而在屏東地區民國 83 至 105 年累積最大下陷量達到 100 公分。儘管近年來政府透過加強管制使得地層下陷速度已明顯減緩，但情況仍須持續觀測，以降低民生、工業及交通安全上的疑慮。

在過去 20 幾年來臺灣西南部地區地層下陷的相關研究中，有不少的報告利用合成孔徑雷達影像進行下陷監測^[5,7,8]，多數研究皆利用 ESA 的 ERS-1/2 及 Envisat/ASAR 雷達衛星進行下陷的速率估算，這些結果與現地的 GNSS、水準測量和井測資料都有良好的吻合度，例如在雲林地區利用 ERS-1/2 影像於 1996 至 1999 年之間的永久散射體雷達干涉 (Permanent Scatterer InSAR, PSInSAR) 所量測到下陷量最大可達到 7.8 cm/yr，其結果與水準測量僅差大約 1 cm/yr^[7]，在 Lu *et al.*^[8] 的研究中也顯示下陷速度在 1993 至 2003 年較快，在 2005 至 2008 年下陷速度減慢，顯示了近年來地層下陷速度的確有所趨緩。

在屏東平原區域，由於降雨時間分布不均造成乾濕季分明，在 Chang *et al.*^[9] 與 Hsieh *et al.*^[10] 的研究中

顯示在乾季 (冬季) 下陷量明顯大於濕季 (夏季)，在乾季的平均下陷速度達到 3.37 cm/yr，在濕季的平均下陷速度有 0.31 cm/yr，乾季的下陷速度比濕季大了 10 倍。儘管近年來沿海地區的地層下陷速度已明顯趨緩，但地層下陷的狀況與面積仍然未明，利用合成孔徑雷達監測地層下陷可以取得面狀的速度場，不同於水準測量或是 GNSS 測量僅能提供局部或點狀資料，雷達影像能使我們了解不同地區在時間與空間上的位移分布。

短基線雷達干涉技術

雷達干涉技術主要是利用兩次衛星再訪時接收到不同相位的相位差計算地表變形量，如圖 2^[11] 所示，紅線與藍線分別為衛星第一次與第二次 (無需連續) 通過時的軌道與地表位置，透過計算相位變化化算至地表於這個時間段內在視衛星方向 (地表與衛星位置的連線方向) 的高度變化。然而相位差不僅包含了地表變形，也包含了軌道誤差、地形影響、電離層延遲與大氣層干擾等相位誤差，因此在解算過程中需經過適當改正以降低其他干擾因素造成地表變形的誤判。

Sentinel-1 雷達影像最重要的一項優點在於其軌道穩定性，透過良好的軌道控制，可以讓再訪軌道的距離偏差在五十公尺以內，如此一來可提升取像品質並增進干涉圖成功率。以下敘述全幅影像及自動化處理流程，用以觀測臺灣西南部平原的地表變形，研究方法為使用雷達影像進行短基線干涉技術 (Small Baseline Subset DInSAR, SBAS DInSAR) 分析，此流程可透過電腦程式自動化處理，從伺服器端利用開放的應用程式介面 (Application Programming Interface, API) 搜尋下載並預處理影像，輔助偵測潛勢區內的變形異常。

雷達衛星開放資料產製地表變形

首先在開放資料庫中搜尋目標區曾經拍攝過的影像，並判斷影像品質以及軌道偏差等 (如圖 3 之流程圖)，若在預定時間基線內收集到較短基線長的影像對，則把該影像納入後續短基線干涉技術的計算，反之則予以捨棄。因為 Sentinel-1 每 6 天就有一幅升軌或降軌影像，兩者搭配起來涵蓋目標區的影像數量非常多，因此將品質欠佳、大氣與電離層修正量過大或是同調性較低

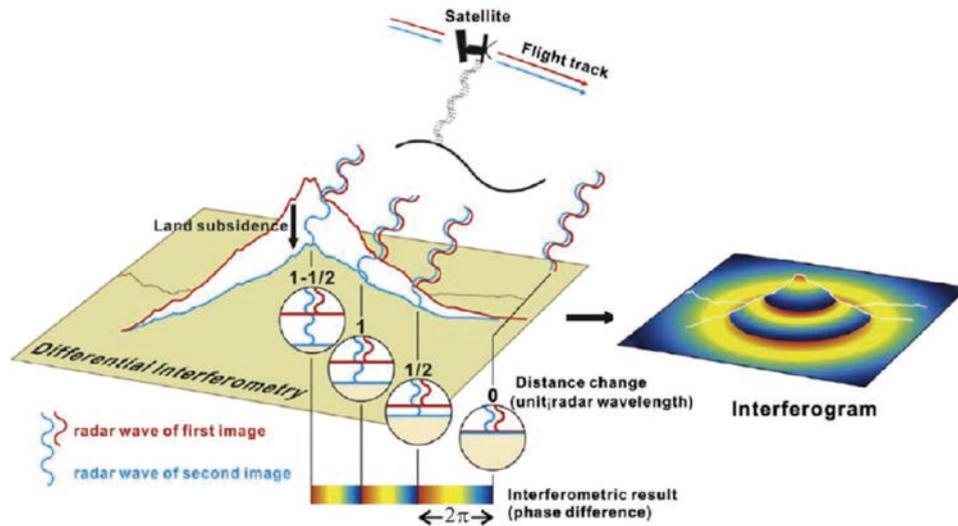


圖 2 雷達干涉示意圖 (摘自 Chang *et al.*,^[11])

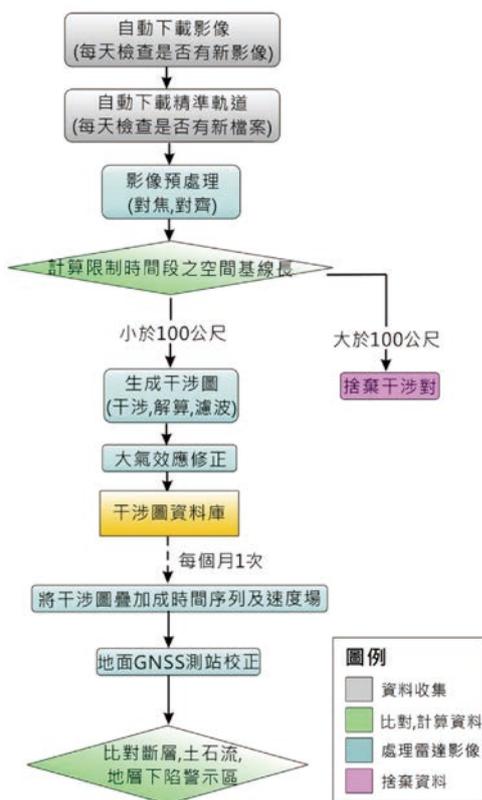


圖 3 利用雷達影像開放資料建立時序地表變形分析流程圖

的資料剔除後仍然有高頻率的影像得以計算時間序列。在每個月至少保留一至二幅干涉像對的原則下，將可以一個月一次的頻率針對反射特性良好的地表像元計算位移時間序列與速度場，後續經過地面 GNSS 測站的校正與三維方向分量拆解，可估計垂直方向的地表變形。

短基線干涉法為 Berardino *et al.*^[12] 提出的影像收集與時間序列計算流程，主要用以觀測長時間的地表變形，此方法強調利用空間及時間基線小的影像對做干涉圖，將多幅不同時間段的影像製作干涉圖後利用最小二乘法 (least squares) 得到依時間變化的地表變形。我們所使用的 Sentinel-1 衛星重返週期短，可容許在短時間基線內獲得更多可以進行干涉的影像對，且 Sentinel-1 衛星軌道精準，大部分符合時間基線內的影像對也會落在空間基線可容許的範圍。

在此我們利用 2016 年 11 月至 2017 年 6 月之間的 20 張臺灣地區升軌 (ascending) 影像作為範例，圖 4 為此系列影像拍攝時間與空間基線關係圖。將每幅影像預處理並湊成影像組做干涉處理後，經過解纏 (unwrap)、濾波 (filtering)，可得到 81 組解纏後的地表變形圖，將這些不同時間區段的地表變形利用最小二乘法處理後，可得到在影像拍攝的每個時間點上視衛星方向累積地殼變形量 (如圖 5)，最後將這些位移量疊加後可得這段時間內在視衛星方向的平均地殼變形速度 (圖 6a)，其速度均方根誤差皆小於 1 mm/yr。由於測試的時間僅有八個月且大多為乾季月份，因此在彰化雲林地區所得沿衛星方向的速率較大。由圖 5 的時序變化中我們可以發現，雲林地區在主影像 (2017/01/27) 時間後開始出現較明顯的沉陷，且在五月到達峰值，此現象與地層下陷在乾季較為顯著的季節性相符，如此高頻率且面狀的變動在過往研究中難以利用其他資料觀測而得。

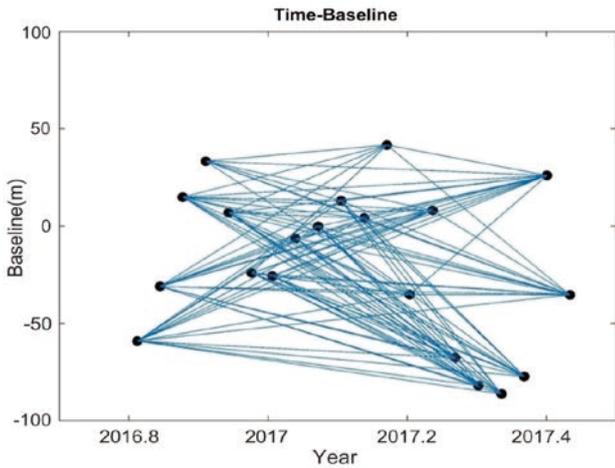


圖 4 時間空間基線分佈圖

如前述相位差計算限制，合成孔徑雷達資料中可能存在如軌道與介質影響等誤差，且利用合成孔徑干涉法疊加得到的速度，僅是相對於該影像區域的平均速度，所以需要利用地表上 GNSS 測站所得資料進行校正。GNSS 速度場在空間中為點狀的資料，密度取決於設站數目，而合成孔徑干涉雷達影像為面狀的資料，因此透過校正能提供空間上高密度的覆蓋。此外，因為地表在三維方向有非均勻變形，因此在視衛星方向的位移觀測量也有包含水平向位移的貢獻。因此我們利用中研院地球科學研究所收集到的測站變形資訊（以下稱 GNSS 速度場）進行校正。由 GNSS 速度場我們可得三

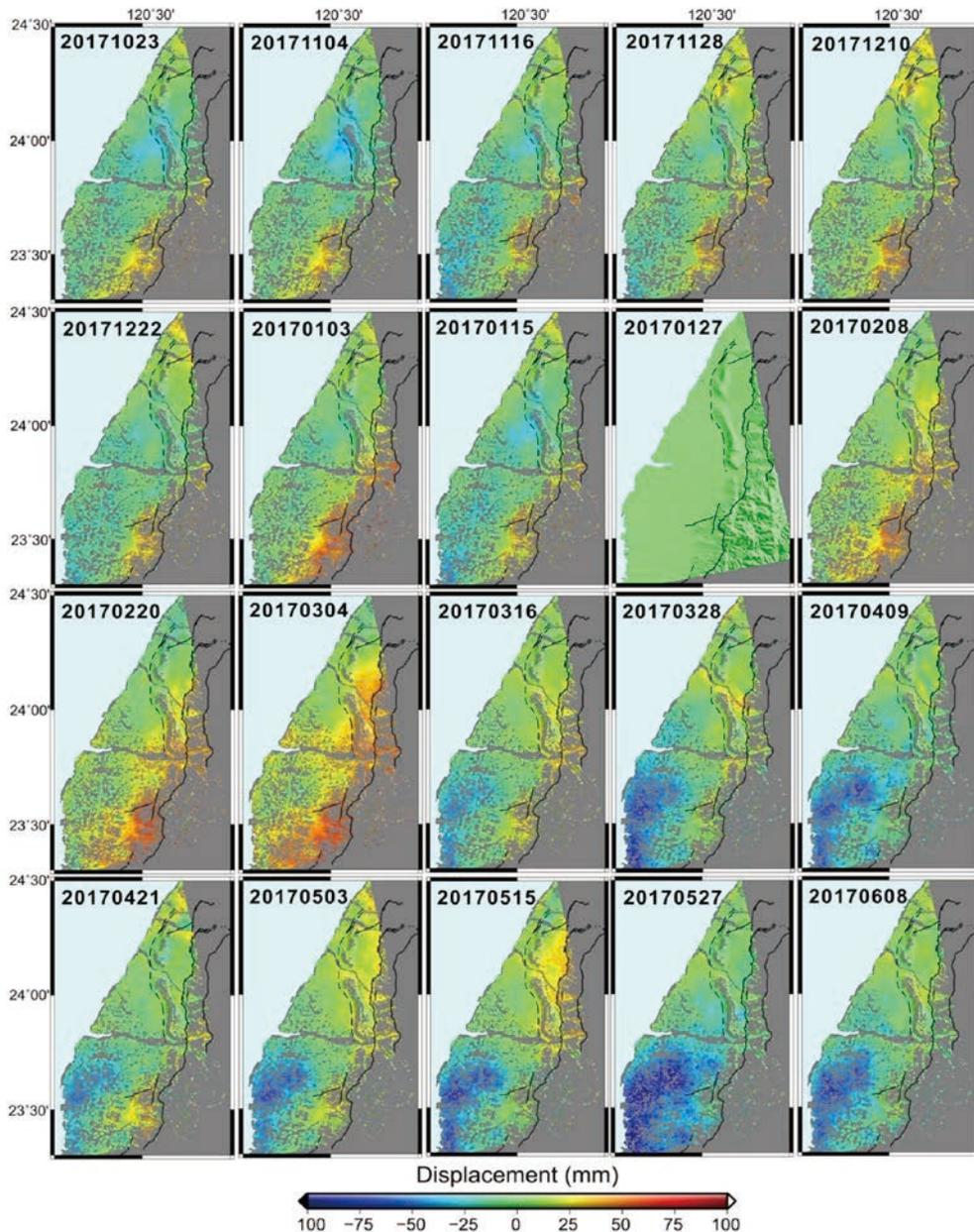


圖 5 視衛星方向地表變形之時間序列變化

維方向分量，將與衛星像對同時間區段之各方向日平均坐標分別擬合後，將個別方向的合成視衛星（Line of Sight, LOS）方向速度場（式 (1)）， α 為衛星飛行方位角（azimuth）， θ 為衛星觀測入射角（incidence angle），再利用類似 Hung *et al.* [13] 所使用的資料綜合方法，將合成孔徑干涉雷達及 GNSS 資料結合。此方法為算出研究區域內的 GNSS 速度與合成孔徑雷達干涉法所得點該測站速度之差值，再利用克利金內插法 [14] 將此差值內差成面狀資料並在合成孔徑雷達干涉成果內予以扣除，便可得到校正後研究區域內合成孔徑雷達干涉疊加的速度資料。

$$[LOS] = [\cos\theta \quad -\cos\alpha \sin\theta \quad -\sin\alpha \sin\theta] \begin{bmatrix} GPS_U \\ GPS_N \\ GPS_E \end{bmatrix} \quad (1)$$

如圖 6a 所示，在校正前視衛星方向的速度場於南北向有一明顯的梯度偏差（ramp），在經由地面站校正後圖 6b 透影至垂直向速度與地面實測資料吻合（因利用同資料作為參考修正）。而此觀測方法主要目的在於提供 GNSS 測站外大範圍的變形量，進而評估沉陷區域範圍以及觀察斷層兩側是否出現差異位移。由圖 6 中可以得到雲林一帶在 2017 年初乾季時經歷的地層下陷約達 6 至 9 公分，且範圍與地下水管制區十分吻合。

資料限制與精進空間

雖然利用地面 GNSS 測站校正的方法可以減緩因外部因素造成的相位問題，然而過程中卻有可能消除了部分真實訊號，因此較完善的方法仍須將干涉像對進行適當修正。舉例來說，當雷達波傳遞時會受到電離層影響，並在干涉圖上產生相位超前，進而影響到測量地表變形的精度。電離層對於相位產生的影響與頻率成平方反比，因此在前人相關研究中皆提到電離層對不同頻率的雷達波皆會造成影響，尤其對較低頻率的 L 波段會有更明顯的延遲 [15,16]。在 Gomba *et al.* [17] 研究中顯示較高頻率的 C 波段也會受到電離層的影響，進而增加地表變形監測的不確定性。由於前人針對臺灣西南部地區的研究之中觀測區域較小，電離層濃度在數十公里內小範圍上較無梯度變化，而不會在干涉圖上產生明顯的相位影響，故無針對電離層效應進行修正。但在處理整個臺灣西南部地區全幅影像時，上百公里範圍的電離層濃度變化會比小範圍來的明顯，未妥善修正可能帶有 10 至 20 全電子含量單位（Total Electron Content Unit, TECU）殘留，此電離層效應造成相位變化顯示在干涉圖上，因此必須加以去除以增加測量精度。

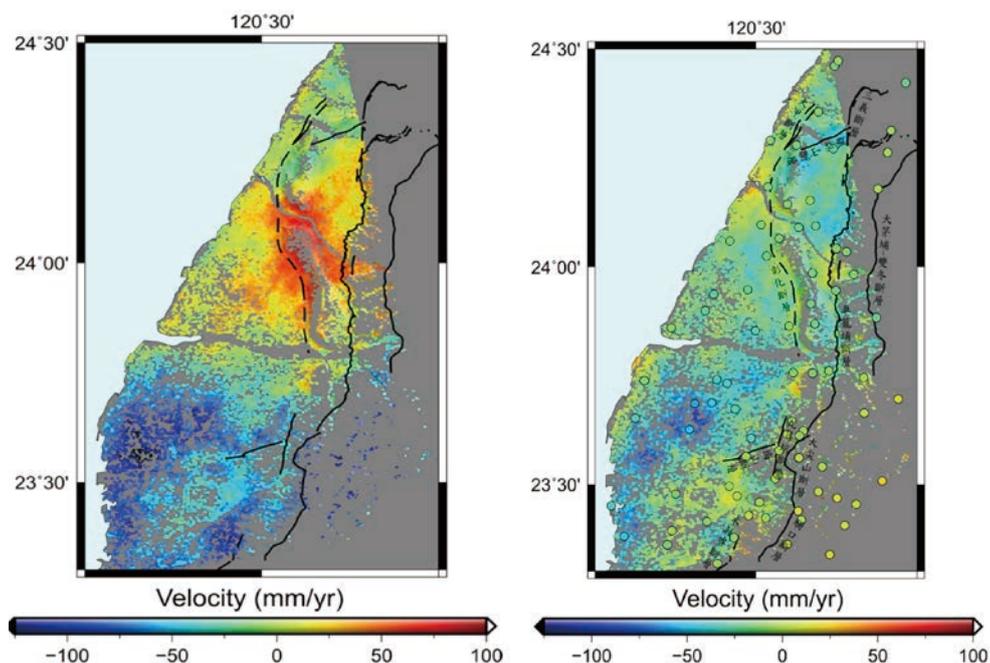


圖 6 (a) 未經 GNSS 校正視衛星方向速度場，(b) 經 GNSS 校正後反投影至垂直向速度場

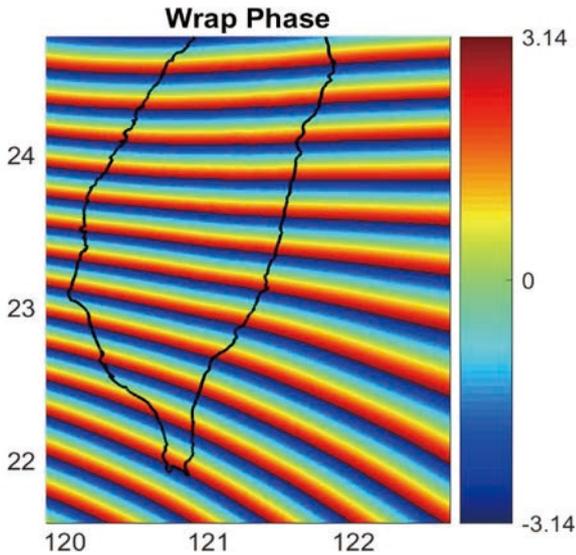


圖 7 在美濃地震前後升軌影像對中，電離層造成相位延遲所產生的多餘干涉環

臺灣西南部地區位於電離層赤道異常區 (Equatorial Ionization Anomaly Region)，而造成臺灣由南到北電離層濃度的下降梯度變化，若干干涉圖前後兩張影像在同一區域的電離層 TEC 差異過大，會導致干涉圖中沿著衛星飛行方向 (azimuth) 有相位延遲產生。且衛星影像的獲取時間也會影響到電離層濃度，Sentinel-1 的降軌 (descending) 和升軌 (ascending) 分別在當地時間 6 點和 18 點通過臺灣地區，而電離層的濃度會受到太陽的影響，在太陽升起後逐漸升高，約在 12 至 14 點會達到最高值，之後持續下降，因此在降軌獲取影像時的電離層濃度還很低，兩幅影像之間電離層濃度的差異不太明顯，多數無需進行修正。然而在升軌獲取影像時，兩幅影像之間電離層濃度已產生差異，尤其在春秋季電離層活動明顯時變化更甚，因此必須針對電離層的影響進行修正。

以 Sentinel-1 而言，單張影像可涵蓋台中以南至臺灣本島最南端的西部平原區域 (沿衛星飛行方向近 300 公里)，相較前人在臺灣的合成孔径雷達干涉研究中多使用局部影像，Sentinel-1 的影像沿衛星飛行方向 (azimuth) 影像長度較長，因此若無修正電離層相位延遲，在解纏 (unwrap) 時，沿衛星飛行方向 (azimuth) 會有很大的誤差值產生。以美濃地震前後干涉圖為例 (圖 8a)，電離層全電子含量差異在干涉圖前後兩張影像的兩個時間段，南北方向差異為 15 TECU，反映在沿衛星飛行方向有數十個度的相位延

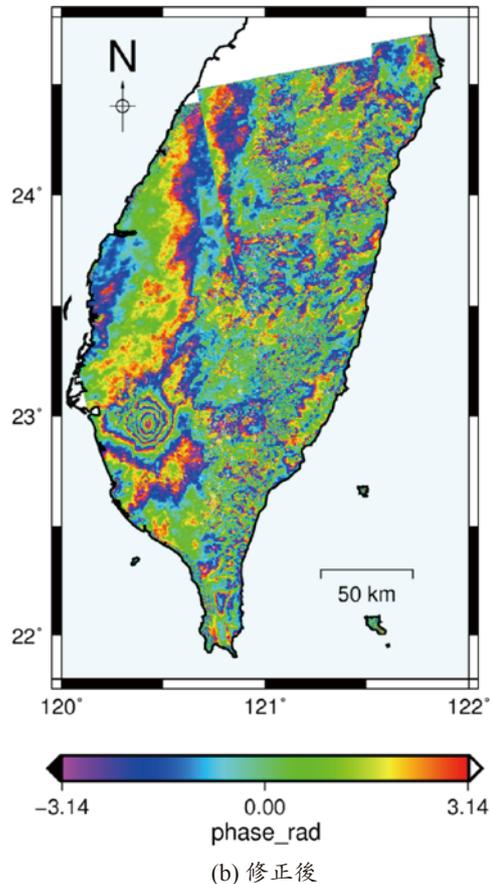
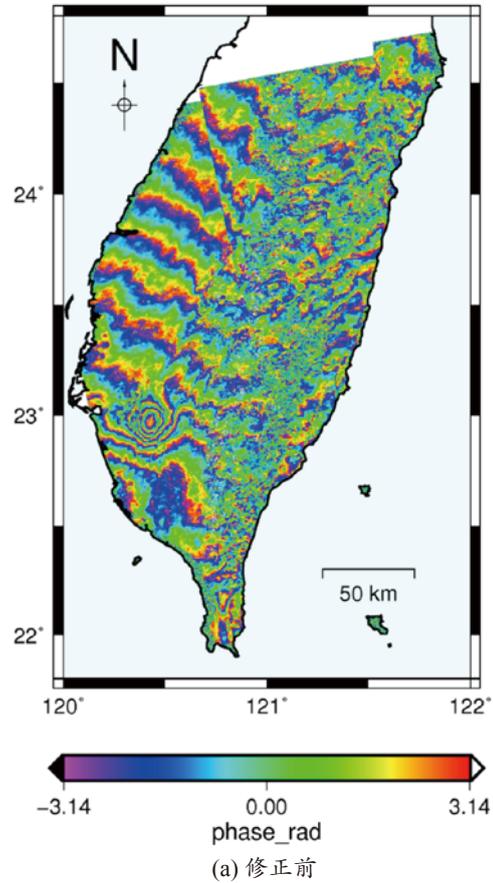


圖 8 美濃地震前後升軌雷達影像干涉圖

遲，如圖 8 中東北至西南向的週期性相位變化。在此我們使用中央大學 Ionospheric Radio Science Lab (ISRL) 利用地面站所建立電離層垂直全電子含量進行校正，利用 Gomba *et al.* [17] 中所提出修正相位的方法，將電離層產生之相位延遲進行修正 (圖 8b)。由此修正成果可以見得，在系統性建立地表變形觀測時間序列時，仍須考量不同環境因素造成的誤差並予以移除，方能獲得較為穩定與可靠的觀測量。

結語

衛星資料於過往因經濟或技術上的使用門檻較高，主要以研究試驗性質的產品為主，較少用於大範圍、高頻度的監測。拜開放資料政策所賜，ESA Sentinel-1 星系提供了絕佳的潛力與機會供世界各國針對土地利用與變遷進行監測。臺灣地處地質環境複雜、變動頻繁的環太平洋地震帶，地狹人稠且土地利用型態日益轉變，除了地面調查外亟需衛星資料的輔助監測以提供工程環境上許多基礎資料的建置。相較於其他國家少有像臺灣如此高密度且維護良好的 GNSS 連續觀測站，這些地面觀測可扮演衛星資料的控制點，使雷達影像對解算出面狀地表變形更具準確性與實用性。因此我們可以善用資源，適時適度地將已成熟的衛星資料加以標準化並推廣至緊急應變、短期地質災害、長期地表變動等不同面向，以利決策單位的判斷。

參考資料

1. 鄭世楠等人 (2014), 臺灣地區歷史地震文獻資料庫 (<http://tec.earth.sinica.edu.tw/TEM/hisevent/>). 臺灣地震模型組織委員會
2. Fruneau, B., Pathier, E., Raymond, D., Deffontaines, B., Lee, C. T., Wang, H. T., and Chang, C. P. (2001), Uplift of Tainan Tableland (SW Taiwan) revealed by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 28(16), 3071-3074.
3. Huang, M. H., Hu, J. C., Hsieh, C. S., Ching, K. E., Rau, R. J., Pathier, E., and Deffontaines, B. (2006), A growing structure near the deformation front in SW Taiwan as deduced from SAR interferometry and geodetic observation. *Geophysical Research Letters*, 33(12).
4. Huang, M. H., Hu, J. C., Ching, K. E., Rau, R. J., Hsieh, C. S., Pathier, E., and Deffontaines, B. (2009), Active deformation of Tainan tableland of southwestern Taiwan based on geodetic measurements and SAR interferometry. *Tectonophysics*, 466(3), 322-334.
5. Huang, M. H., Bürgmann, R., and Hu, J. C. (2016), Fifteen years of surface deformation in Western Taiwan: Insight from SAR interferometry. *Tectonophysics*, 692, 252-264.
6. Yen, J. Y., Chen, K. S., Chang, C. P., and Boerner, W. M. (2008), Evaluation of earthquake potential and surface deformation by differential interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 782-795.
7. Tung, H. and Hu, J.-C. (2012), Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of central Taiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. *Tectonophysics*, 578, 126-135.
8. Lu, C. H., Ni, C. F., Chang, C. P., Chen, Y. A., and Yen, J. Y. (2016), Geostatistical Data Fusion of Multiple Type Observations to Improve Land Subsidence Monitoring Resolution in the Choushui River Fluvial Plain, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 27(4), 505-520.
9. Chang, C. P., Chang, T. Y., Wang, C. T., Kuo, C. H., and Chen, K. S. (2004a), Land-surface deformation corresponding to seasonal groundwater fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan. *Mathematics and Computers in Simulation*, 67(4), 351-359.
10. Hsieh, C. S., Shih, T. Y., Hu, J. C., Tung, H., Huang, M. H., and Angelier, J. (2011), Using differential SAR interferometry to map land subsidence: a case study in the Pingtung Plain of SW Taiwan. *Natural hazards*, 58(3), 1311-1332.
11. Chang, C. P., Chen, K. S., Wang, C. T., Yen, J. Y., Chang, T. Y., and Lin, C. W. (2004b), Application of space-borne radar interferometry on crustal deformations in Taiwan: A perspective from the nature of events. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(3), 523-543.
12. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and 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), 2375-2383.
13. Hung, W. C., Hwang, C., Chen, Y. A., Chang, C. P., Yen, J. Y., Hooper, A., and Yang, C. Y. (2011), Surface deformation from persistent scatterers SAR interferometry and fusion with leveling data: A case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 957-967.
14. Cressie, N. A. C. (1993), *Statistics for Spatial Data*. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Son, Inc.
15. Meyer, F., Bamler, R., Jakowski, N., and Fritz, T. (2006), The potential of low-frequency SAR systems for mapping ionospheric TEC distributions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(4), 560-564.
16. Jung, H. S., Lee, D. T., Lu, Z., and Won, J. S. (2013), Ionospheric correction of SAR interferograms by multiple-aperture interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5), 3191-3199.
17. Gomba, G., González, F. R., and De Zan, F. (2017), Ionospheric phase screen compensation for the Sentinel-1 TOPS and ALOS-2 ScanSAR modes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(1), 223-235. 