



應用新世代次米級超高解析度雷達星系於地球觀測 與結構物監測之前景概論

蔡亞倫^{1,2,*}

¹ 國立臺灣大學土木工程學系副教授

² 國立臺灣大學水工試驗所推廣組組長暨特約副研究員

摘要

近年隨著衛星微型化與合成孔徑雷達系統技術之突破，新一代次米級解析度微衛星雷達星系已迅速發展，為地球觀測與工程應用帶來革命性變化。本文首先回顧目前雷達衛星發展之背景與應用局限，如時間及空間解析度不足、取像角度不彈性等，接著介紹近年雷達星系之創新，包含輕量、高重訪率、機動觀測、即時處理、多軌道部署與多角度取像，並針對目前已運作之五大微衛星雷達星系（ICEYE、Capella、Umbra、Synspective 與 iQPS）進行系統性介紹，說明其技術差異與特色。亦透過三個應用實例，如儲油槽容量偵測、極區地貌判釋與都市建物高度估測，展示微衛星雷達之實務優勢。最後，本文討論當前微衛星雷達於輻射校正、雜訊控制與地理對位精度等面向之限制，並展望其未來之發展潛力。

關鍵詞：小型衛星任務設計、星載雷達資料處理、差分干涉處理技術、時間序列分析與變遷變異監測、基礎設施風險評估

* 通訊作者：蔡亞倫

電子郵件：yalunstsai@ntu.edu.tw

（收件日期：2025 年 4 月 17 日；修正日期：2025 年 5 月 5 日；接受日期：2025 年 5 月 6 日）



Emerging Perspectives on the Application of Next-Generation Sub-Meter High-Resolution SAR Constellations for Earth Observation and Structural Monitoring

Ya-Lun S. Tsai^{1,2,*}

¹Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Taiwan University

²Extension Team Leader & Contract Associate Research Fellow, Hydrotech Research Institute, National Taiwan University

Abstract

Recent advancements in satellite miniaturization and Synthetic Aperture Radar (SAR) system technologies have driven the rapid development of a new generation of sub-meter resolution microsatellite SAR constellations, revolutionizing Earth observation and engineering applications. This paper first reviews the current state of radar satellite development and its limitations, such as insufficient spatial and temporal resolution. It then introduces recent innovations in microsatellite SAR systems, including lightweight platforms, high revisit frequency, agile tasking, on-board processing, as well as multi-orbit and multi-angle imaging. A systematic overview is also provided for five currently operational microsatellite SAR constellations, i.e., IC-EYE, Capella, Umbra, Synspecive, and iQPS, highlighting their technical distinctions and system characteristics. Practical advantages are illustrated through three application case studies across different domains: oil tank volume estimation, Arctic thermokarst landform interpretation, and urban building height reconstruction. Finally, the paper discusses current constraints in radiometric calibration, noise control, and geolocation accuracy, and explores the future potential of microsatellite SAR in various application fields.

Keywords: small satellite mission design, spaceborne radar data processing, differential interferometric technique, time series analysis and change detection, structure risk assessment

* Corresponding Author: Ya-Lun S. Tsai
E-mail: yaluntsai@ntu.edu.tw

壹、現今雷達衛星發展之背景

一、衛星雷達遙測之現時重要性

衛星遙感探測（Spaceborne Remote Sensing，亦簡稱為星載或衛載遙測）的重要性於近年大幅受到矚目，其原因不僅因為日益加劇的氣候變遷（Climate Change）而導致的各類環境問題，也包含因人事成本上升造成的缺工困境（圖 1）。以氣候變遷而言，其作用與影響範圍不僅在空間上廣袤，部分現象於時間上之變化亦幾乎肉眼不可察覺，因而需要長如數年、甚至數十年方可被指認，諸如海平面上升造成的海岸線侵蝕（Tsai and Tseng, 2023）、氣溫升高造成之極圈永凍土的消融下陷（Tsai, Dietz, Oppelt, and Kuenzer, 2019b）等等。另一方面，大規模農業與工程活動的監測與監管，過往時常仰賴人工巡檢或調查（Tsai and Lin, 2020），不僅曠日費時，亦難以達到高效率、自動化的近即時（Near Real-Time）監測。為了解決上述問題，衛星遙測因其具備相較於傳統航空攝影（Aerial Photography）或無人飛行載具，有較大像幅寬（Swath Width）、更長的任務運作時間（通常至少三年以上），而提供了一大範圍、長時間的廣域監測解方。

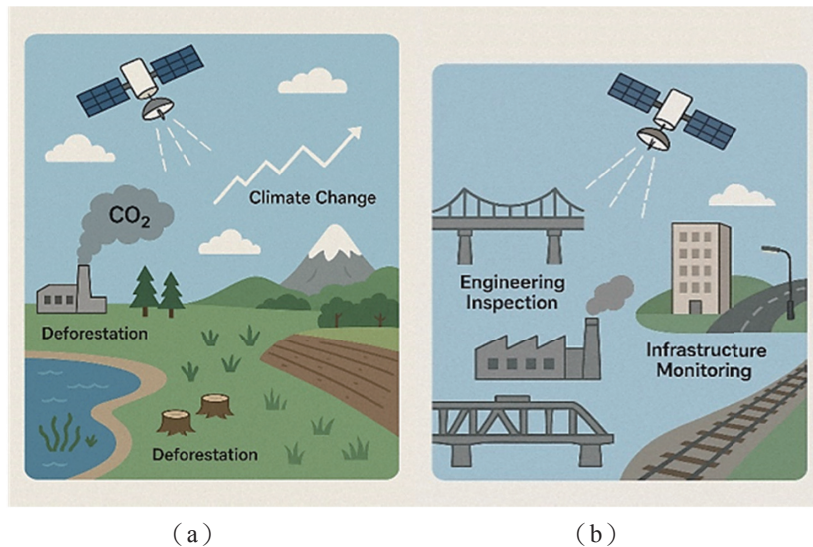


圖 1 衛星遙感探測於 (a) 環境觀測與 (b) 構造物監測之多元應用性示意圖

資料來源：本研究繪製。

然而由於傳統常用的多光譜感測器（Multi-Spectral Sensor）之拍攝光譜範圍局限於可見光與紅外光，即所謂的光電／紅外感測器（Electro-Optical/Infra-Red, EO/IR），故當大氣中有雲霧或霧霾發生時，其將受限於天氣條件而無法拍攝到地表，令即時監測無法實現（Tsai, Dietz, Oppelt, and Kuenzer, 2019a），具體案例如圖 2 所示，可見圖 2（a）受到嚴重之雲霧影響而無法獲得有效之地面資訊。此外，因多光譜感測器大多為被動式監測（Passive

Sensing)，需仰賴太陽光照射以提供地物光譜反射值（Spectral Reflectance），故除了夜間光影像外，大多僅能於日間有照明時進行監測，進而大幅限制其於災損評估或軍事監控的有效性（Tsai, Huang, Chen, and Han, 2023）。與之相反地，應用長波長之微波（Microwave）（波長介於 1 公釐至 1 公尺之間）的主動式雷達系統（Active Radar System），因具有不受雲霧限制且日夜皆可施測的優勢，可實現全天候、全時段、近即時的地表及地物監測，而於近年受到很大的矚目，尤其是能夠提供二維影像的合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）。

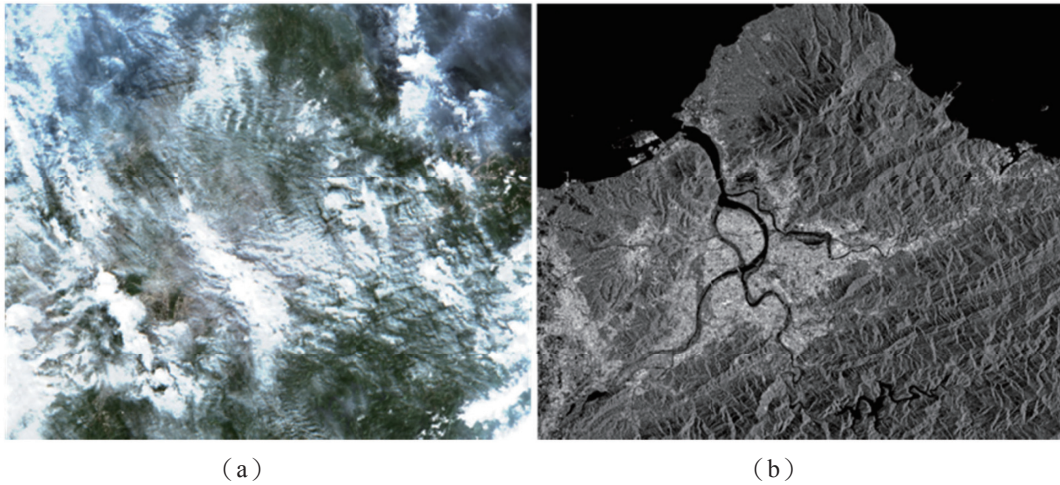


圖 2 大臺北區域於 (a) 多光譜影像 (Sentinel-2, 拍攝於 2025 年 4 月 4 日) 與 (b) SAR 影像 (Sentinel-1, 拍攝於 2025 年 4 月 5 日) 之差異比較

資料來源：本研究產製。

二、過往衛載 SAR 之應用局限

SAR 透過應用衛星載臺 (Platform) 與地物的相對移動，以及都卜勒波束削尖技術 (Doppler Beam Sharpening, DBS) 來模擬出比實際物理尺寸更長的天線 (亦稱為孔徑 [Aperture])，而具有相較於傳統側視空載雷達 (Side-Looking Airborne Radar, SLAR) 更好且更細微之航線方位方向 (Azimuth Direction) 空間解析度 (Woodhouse, 2006)。自歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 於 1991 年發射的 ERS-1 雷達衛星 (現已退役) 以降，現今已有多個被廣泛應用於地球觀測與環境監測的 SAR 衛星，例如較知名且至 2025 年 4 月仍運作中的由德國太空總署 (German Aerospace Center, DLR) 開發之 TerraSAR-X、義大利航太中心 (Italian Space Agency, ASI) 運作之 COSMO-SkyMed、加拿大太空總署 (Canadian Space Agency, CSA) 維運之 RADARSAT-2、日本宇宙航空研究開發機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 規劃之 PALSAR-2，以及在 2014 年由 ESA 發射之 Sentinel-1 (詳細再訪週期 (Revisit Period)、空間解析度等比較，請參見 Tsai et al. [2019a])。然事實上，這些衛星於現今的工程與軍事之實務應用上，通常仍有以下限制。

（一）空間解析度不足

相較於廣域環境變遷偵測，工程結構物（如橋樑、壩體）與軍事目標（如戰機、船艦）之監測與分類往往仰賴針對重點構件進行高細節之偵測，因而需要公尺級甚至公分級之地物識別能力（Tsai et al., 2023）。然而，以近年最常被使用之免費 Sentinel-1 資料之寬幅模式（Interferometric Wide Swath Mode）為例，為了達到耗能、像幅寬與近連續拍攝模式之間的平衡，其空間解析度僅約 20 公尺，因而無法清晰捕捉構造物之形體與幾何，進而限制實務上識別與監測之應用。

（二）時間解析度不足

由於 SAR 為主動式之感測器，需要較大能量以發射電磁波供成像，因此在維持足夠空間解析度的條件下，其無法提供如被動式多光譜感測器一般的寬像幅及連續觀測；又因為傳統雷達感測器大多為單獨一顆衛星構成之單星任務（如 PALSAR-2、RADARSAT-2），且為了使拍攝時間固定以比較變遷，並使拍攝範圍可覆蓋全球，絕大部分衛星均部署於近極軌道（Near-Polar Orbit）下之太陽同步軌道（Sun-Synchronous Orbit）（Ager, 2022）。綜合以上條件，現今多數衛載雷達感測器於同一地點的再訪週期大多長達 1 週甚至更久，難以提供如光學感測器一般的每日多訪（Sub-Daily Revisit）的高時間解析度。

（三）取像角度不彈性

雖然自 2002 年 ESA 開發並發射之環境觀測衛星（Environmental Satellite, ENVISAT）上酬載之先進合成孔徑雷達（Advanced Synthetic Aperture Radar, ASAR）感測器以降，主流之雷達天線均已具備可調整之拍攝視角（Look Angle）（即近似於雷達訊號入射角〔Incident Angle〕）之操作彈性，然為了確保成像穩定性與軌道控制精度，傳統雷達衛星大多設定為固定航線方位方向之成像模式（Torres et al., 2012），進而限制其針對特定高價值目標區域之再訪彈性與時效性。

貳、近年微衛星雷達星系之創新

為了解決上述的各項問題，並且隨著積體電路與衛星開發技術的突破，近年衛載雷達系統已有多個破壞式創新（Disruptive Innovation），包含以下各點：

一、減輕衛星的重量

相較於傳統重量超過 1 噸甚至 2 噸的大型 SAR 衛星，諸如 ERS-1（2,384 公斤）、TerraSAR-X（1,230 公斤）、COSMO-SkyMed（1,700 公斤）、Sentinel-1（2,300 公斤），近年衛星微型化（Miniaturization）的概念受到日益歡迎與實現。具體而言，透過使用可折疊展開的拋物面天線（Parabolic Antenna）以及較小的訊號處理系統，衛星的重量可減輕至 100 公斤以下。定義上，根據不同的重量，小衛星又可被進一步分類為微衛星、奈米衛星等等（表 1）。

表 1 衛星重量分級定義表

衛星種類	重量（公斤）
大衛星（Large）	> 1,000
中衛星（Medium）	500 ~ 1,000
小衛星（Minisatellite）	100 ~ 500
微衛星（Microsatellite）	10 ~ 100
奈米衛星（Nanosatellite）	1 ~ 10
皮米衛星（Picosatellite）	0.1 ~ 1

資料來源：整理自 Janson（2023）、Laufer and Pelton（2020）。

此典範轉移（Paradigm Shift）係因為傳統大衛星雖然具備較大的能源與載重額度，然此些優勢並不能滿足近年日益多元的衛星遙測應用場景。具體而言，小衛星不僅可減少發射的成本，亦可顯著縮短衛星的研發時程、增進運作時的靈活性，以及消耗性之戰略使用（Janson, 2023）。

二、增加星系的衛星數量

相比於過往仰賴單一大衛星來達成任務，現今往往應用 2 顆以上，甚至超過 10 顆之衛星群（Constellation），以更彈性地分配資源，並且大幅提高再訪拍攝的頻率，達到每日多訪的近即時監測目標。透過高頻率的拍攝，於災害應變與軍事監控上的實務效益亦可大幅提升（Tsai, 2024b）。此外，於實務上，衛星群也提供備援之防禦性，例如當特定衛星之本體或訊號受到太空天氣事件（如太陽閃焰〔Solar Flare〕）（Köksal, Demir, and Kilcik, 2021）或人為破壞時，其餘衛星可即時替補接續進行拍攝任務，以維護系統的整體可用性與穩定性。

三、星載處理與機動取像

得益於處理器之微型化與深度學習的架構輕量化，相較於傳統衛星須將收到的資料下傳（Downlink）至地面接收站方始處理，導致自拍攝至分析完畢之間的時間可能延宕數小時甚至數天，近年來有越來越多的微衛星應用邊緣計算（Edge Computing）技術於星上進行影像處理，即所謂星載處理（On-Board Processing）。具體而言，包含散斑（Speckle）、去噪等前處理，或是更進階複雜之變異點偵測（Anomaly Detection）或自動目標識別（Automatic Target Recognition, ATR），均在近年被實現（Garcia et al., 2024）。此舉不僅可大幅減少傳輸的資料大小以增快下傳時間，亦大大增進了近即時影像分析與情資解讀的時效性。

除了處理端之外，現今之微衛星亦有敏捷取像（Agile Tasking）之特色（L’Abbate et al., 2015）。透過與其他衛星（諸如地球同步衛星〔Geostationary Satellite〕）或是地面接收站的資料分享，衛星群可自動調動最鄰近事件發生地之單個甚至多個衛星，並近即時自不同角度進行聯動拍攝，以達到針對災害與軍事行為之快速判讀。

四、多元軌道部署與多角度取像

如前一節所言，傳統大型雷達衛星大多部署於距離地表 600 ~ 800 公里之近極太陽同步軌道上，以確保不同日期拍攝之影像具有相似之條件；然而此舉亦會造成中、低緯度地區有明顯較長之再訪週期。因此，近年發展之微衛星群開始嘗試使用中等傾角軌道（Mid-Inclination Orbit）。透過約 45 ~ 60 度之間的軌道傾角，衛星對於中緯度高人口密集區域，如歐亞與北美範圍之陸域及海洋，可有更高之取像頻率（Cotugno et al., 2024）。此外，因不受限於太陽同步軌道之時間，微衛星亦可在下午或傍晚等時段進行拍攝，達到全日監測之理想。亦有衛星群使用較低軌道高度（低於 500 公里）之部署模式，以進一步提升空間解析度。儘管此舉將導致衛星遭受更大之大氣層空氣阻力而縮短任務壽命，但考量微衛星之成本遠較傳統大衛星為低，權衡後仍有相當優勢。除了軌道的彈性，由於微衛星有較小的質量，透過搭配靈活的高度控制系統（Attitude Control System, ACS），其可較傳統大衛星更快速地定向（Steering）與旋轉，達到改變取像視角（俯仰角）與方位角（前後視）之性能（Triharjanto, Budiantoro, Yanto, and Sumantyo, 2018）。亦有衛星透過將天線裝置於環架（Gimbal）系統上，進而獲得更彈性的波束轉向（Beam Steering）彈性（Courie, Faza, Hertanto, Poetro, and Ardi, 2019）。此些多角度拍攝設計，可更客製化地滿足實務上需要特別角度取像、重疊拍攝（Stereo）、多視角觀測等需求。

綜合上述各點，筆者將近年微衛星雷達系統之創新特色，及其與傳統大衛星之差異，整理於表 2 並示意於圖 3。

表 2 新世代小衛星雷達與傳統大衛星雷達之比較

項目	傳統大衛星雷達	新世代小衛星雷達
空間解析度	公尺級	次米級
時間解析度	數天至數週	數小時（每日多訪）
軌道類型	近極太陽同步軌道	同左，或中等傾角軌道
軌道高度（公里）	600 ~ 800	較低，可低於 500
取像視角角度調整	可調整	可調整
取像方位角度調整	固定，不可調整	可調整
衛星數量	大多單星	多星，甚可超過 10 顆
衛星重量（公斤）	> 1,000	大多低於 500，甚至不到 100
天線（孔徑）型態	大多為相位陣列	同左，或為拋物面、可折疊型
研發成本	較高	較低
研發時程	較長	較短
運作壽命	較長，通常為 3 ~ 7 年	較短
任務調度彈性	較低，須提前規劃	較高，且可自動化分派

資料來源：本研究整理。

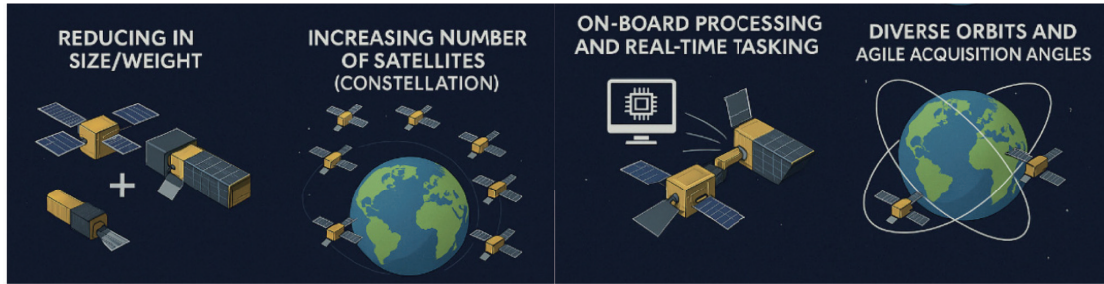


圖 3 近年微衛星雷達系統之主要創新面向示意圖

資料來源：本研究繪製。

參、近年微衛星雷達星系之介紹

築基於上述特色，近年已有數個不同微衛星雷達星系投入運作。值得一提的是，不同於傳統大衛星大多仰賴各國太空總署耗費許多經費研發，下列所提之衛星群均由一般民間公司甚至微型新創公司所研發，可印證前一節所述之微衛星雷達系統開發成本已大幅降低。

一、ICEYE

ICEYE 為芬蘭的新創公司，於 2018 年發射了第一顆試驗衛星 ICEYE-X1。令人驚豔的是，該衛星的重量僅 70 公斤，長寬僅 70×60 公分，為世界上首個達到微衛星標準的 SAR 衛星；但其可展開 3.25 公尺長之相位陣列天線（Phased Array）並獲取 10 公尺解析度之影像。自概念證明可行後，ICEYE 開始快速擴增其衛星群之規模與數量，並且也更新衛星之硬體與設計，例如於其最新第四代衛星之硬體設計中，已可透過長駐模式（Dwell Mode）獲得達 0.25 公尺之解析度（ICEYE, n.d.）。該公司也已建立多元的異業合作通路，並推出多個應用案例，如洪患影響範圍偵測、船隻辨認等。此外，直到 2025 年 4 月該公司已累積發射共 51 顆衛星，為目前最大數量之雷達衛星群。

二、Capella

美國加州新創公司 Capella Space 同樣於 2018 年底發射了第一顆實驗性衛星 Capella 1（又稱為 Denali 或 SpaceCap），該試驗用衛星之重量不到 50 公斤，並應用摺紙的概念將天線收闔，於軌道上展開後可達到 100 平方英尺。後續該公司又發射不同世代的衛星設計，值得注意的是，第二顆衛星 Capella 2（又稱為 Sequoia）即應用 45 度之中等傾角軌道於距地表 525 公里之軌道，突破傳統應用近極太陽同步軌道之窠臼。目前 Capella Space 已升級至第三代名為 Acadia 衛星（其重量為 110 公斤，嚴格來說已經不屬於微衛星），其最高解析度拍攝模式——超聚型（Spotlight Ultra）可獲得 0.25 公尺之空間解析度（Capella Space, n.d.），至

2025 年 4 月第一至第三代已累計發射共計 15 顆衛星。與 ICEYE 相同，該公司也與多個公司合作，亦有提供船隻偵測等相關加值服務。

三、Umbra

另一家美國新創公司 Umbra，則較晚發射其第一顆實驗衛星——Umbra-SAR 2001。於 2021 年，此顆 65 公斤重的衛星即透過聚型模式提供 0.25 公尺的空間解析度，直到 2025 年 4 月已發射 10 顆衛星。值得一提的是，Umbra 與高解析度多光譜公司 Maxar 有深度合作，自 2024 年起提供潛在客戶超高解析度光學與雷達影像之組合，此異質資料之結合為科學研究與軍事應用帶來相當高價值的資源，增進地物判釋的完整性（Umbra Lab, n.d.）。

除了上述三家現今公認較為成熟之 SAR 微衛星星系外，亦有其他國家之新創公司投入此一戰場，雖然此些星系之衛星數量仍較少或表現尚不穩定。

四、Synspective

日本 Synspective 公司在 2020 年發射較原計畫更重（150 公斤）之第一與第二顆實驗衛星 StriX- α 與 β 後，至 2025 年 4 月已發射重量為 100 公斤之 StriX 1 至 StriX 4，共計 4 顆衛星，部署於約 500 公里高之太陽同步及中等傾角軌道。該公司之衛星特色為可展開的面板一側為太陽能板（Solar Cells），另一側則為 SAR 天線，以節省空間與重量。其新聚焦聚型模式（Staring Spotlight Mode）可提供約 0.25 公尺之空間解析度（Synspective, n.d.）。

五、iQPS

另一日本公司 iQPS（Institute for Q-Shu Pioneers of Space），則於 2019 年發射約 100 公斤重之 QPS-SAR 衛星，其特色為拋物面天線僅重 10 公斤。直到 2025 年 4 月，該公司已 有 9 顆衛星運作中，預計可提供優於 0.5 公尺之空間解析度。其目標為達成完整星系後，可於地球上絕大部分之區域，達到每 10 分鐘即提供一次觀測之高再訪率（iQPS, n.d.）。

綜合比較上述五個微衛星雷達星系後，其差異整理於表 3。可見此些研發公司大多於模仿年分開始進行實驗衛星之發射，目前或目標也均為提供達半公尺之空間解析度；然各個星系已發射之衛星數量則差異甚巨。儘管如此，所有星系均使用短波長 X 波段（波長介於 2.4 ~ 3.8 公分），而非傳統大雷達衛星常用之 C 波段（波長介於 3.8 ~ 7.5 公分，如 Sentinel-1、RADARSAR-2）或 L 波段（波長介於 15 ~ 30 公分，如 PALSAR-2）。其原因為在相同雷達天線長度條件下，方位方向解析度與波長成正比，故藉由縮減波長，並搭配較低之軌道高度與創新取像模式，此些微衛星即可提供遠較傳統大衛星雷達更高、更細之空間解析度。順帶一提，儘管 TerraSAR-X 與 COSMO-SkyMed 亦使用 X 波段進行拍攝，也具有次米級之解析度，然兩者之再訪週期，遠不及此些微衛星星系之每日多訪頻率。

另外，若細部檢視近期此五大微衛星雷達星系之發射資訊，可發現絕大部分均透過美國

SpaceX 公司之獵鷹九號 (Falcon-9) 運載火箭發射，且甚至有多家公司之衛星於同一次載運任務中同時升空之巧合，如 2024 年 8 月 16 日之發射任務中，即同時發射 ICEYE (衛星編號 33、39、40、43)、Capella (衛星編號 15)、Umbra (衛星編號 9 與 10) 及 QPS-SAR (衛星編號 8)。由此可知，微衛星因其量體遠較傳統衛星為小，故不僅可大幅降低發射之成本，亦可達到快速多星部署之效。

表 3 近年微衛星雷達星系之比較 (統計至 2025 年 4 月)

研發公司	國家	首次發射 (年)	波段	偏極	最佳空間解 析度 (公尺)	僅部署於 近極軌道	目前衛 星數量
ICEYE	芬蘭	2018	X	VV	0.25	是	51
Capella	美國	2018	X	HH/VV	0.25	否	15
Umbra	美國	2021	X	HH/VV	0.25	是	10
Synspective	日本	2020	X	VV	0.25	否	4
iQPS	日本	2019	X	HH/VV	0.50	否	9

註：HH：水平發射並水平接收訊號；VV：垂直發射並垂直接收訊號。
資料來源：本研究整理。

肆、超高解析度微衛星雷達影像應用實例

為了進一步展示近年微衛星雷達星系可提供之實務上的優勢，本節以筆者已完成或正在進行的相關研究進行分享。以下三個案例包含針對陸域、海岸及城市之監測，由此可知雷達遙測之應用面向相當廣泛。

一、能源基礎設施監測

近年許多遙測應用專注於儲油槽監測，因其油料量之變化不僅與經濟活動相關 (Semadeni, 2004)，亦與軍事及國家能源安全休戚與共 (Xu, Chen, Sun, Chen, and Li, 2014)。過往已有少數研究使用 SAR 影像進行監測，以克服傳統多光譜衛星受到陰影遮蔽及夜間無法偵測等問題。然此些研究大多使用解析度超過 2 公尺之影像 (Liu, Xie, Yang, Xiao, and Bao, 2018; Ma et al., 2022)，不能獲得公分級之油槽與油量資訊，無法滿足實務上之需求。因此，於 Tsai et al. (2023) 研究中使用 ICEYE 0.25 公尺解析度之單觀點複數影像 (Single Look Complex, SLC)，分析臺灣高雄中油煉油廠之儲油量變化。如圖 4 可知，不僅油槽側壁的護欄造成的二次反射 (Double Bounce) 可清楚辨識，為了貼合油料頂面以避免昇華損失的油槽浮頂上的金屬固定栓亦清晰可見。透過結合此些特徵以及雷達衛星拍攝時之視角等資訊，即可解算各個油槽於取像當下之幾何，如油槽半徑、槽高、油料量等，達到完整之儲油效率與變異分析。

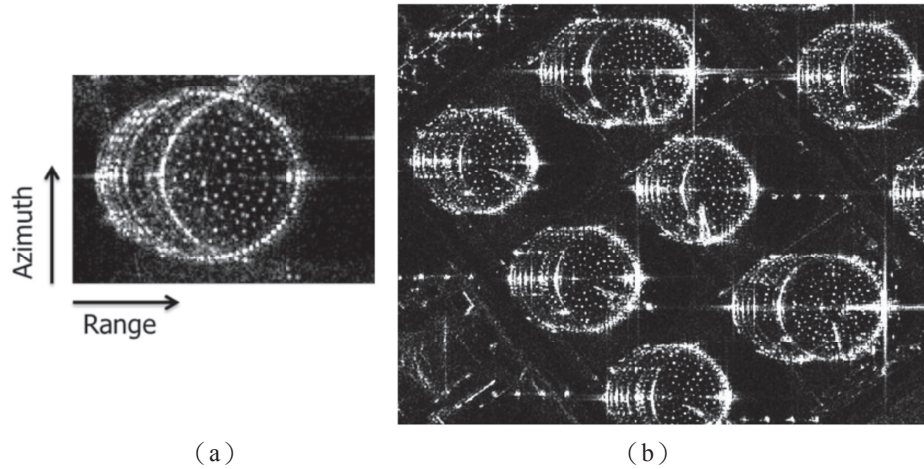


圖 4 儲油槽於 ICEYE 0.25 公尺解析度影像上之 (a) 不同方向之特徵及 (b) 結構物幾何造成之反射特徵

資料來源：本研究產製。

二、極圈永凍土地貌分析

得益於獨特的生物化學作用與極慢的分解速度，北極永凍土儲存了世界上約一半的陸域碳匯量 (Hugelius et al., 2014; Streletskiy, Anisimov, and Vasiliev, 2015)；然而受到氣候變遷的影響，極圈海岸受到的衝擊遠較其他地方更大，而有更快的海岸侵蝕與下陷速度 (Tsai, 2024a)。儘管針對其監測之必要性為全世界所認知，然因該區域時常受到北極霾 (Arctic Haze) 或永夜 (Polar Nights) 之影響，而無法達到全年觀測 (Koike et al., 2021)。雖然近期有研究團隊使用 SAR 影像以達到全季節、全天候之監測 (Bartsch, Ley, Nitze, Pointner, and Vieira, 2020; Stettner et al., 2018)；然此些研究大多著眼於廣域海岸分析，而無法獲得年內季節性變遷數據。因此透過使用 Umbra 0.5 公尺之影像，如圖 5 拍攝於美國阿拉斯加波弗特海 (Beaufort Sea) 海岸，可見比起 Sentinel-1 20 公尺解析度之影像，有明顯更清晰之特徵與細節，如冰融喀斯特地形 (Thermokarst) 之格狀紋理與其湖泊，均可在 Umbra 影像中判釋。

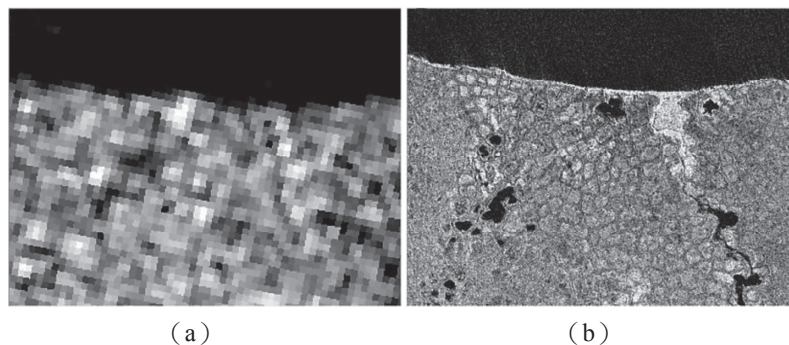


圖 5 北極圈永凍土地貌於 (a) Sentinel-1 20 公尺解析度影像與 (b) Umbra 0.5 公尺解析度影像上之呈現差異

資料來源：本研究產製。

三、都市建物高度解算

為了達到城市數位治理與數位孿生（Digital Twin）等應用，產製完整的都市建物三維模型為一重要任務（Rottensteiner et al., 2012）；然而相較於偵測各建物平面範圍，萃取建物高度值則相當困難，因此過往研究往往仰賴光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）等資料。然而因 SAR 本身即透過側視（Side-Looking）幾何進行取像，故其於建物的側面資訊反演具有相當之潛力。具體而言，透過分析牆面結構反射特徵，並移除相鄰建物的疊置（Occlusion）後，即可計算出相對於參考基準面之建物高度（Sun, Mou, Wang, Montazeri, and Zhu, 2022）。如圖 6 為拍攝於新北市三重區之 Capella 0.35 公尺解析度影像，可見緊鄰河岸之多個新建案大樓之強反射特徵可被明確指認，並可進一步用以測量該區建物之樓高。



圖 6 都市建物於 Capella 0.35 公尺解析度影像上之牆面構造反射特徵

資料來源：本研究產製。

伍、未來發展方向與結論

透過前述章節以及三個應用實例，可知近年高速發展之微衛星雷達星系影像，具有應用於多個不同領域之高度潛力。然事實上，至今此類資料相較於傳統大衛星雷達，仍具有以下之局限。

一、甚少提供經校正之標準化回波強度

如同多光譜影像，若欲進行跨影像之變遷或時間序列分析（Time Series Analysis），則確保影像間之品質一致為重要之前提。然而目前絕大部分微衛星雷達提供之回波強度（Intensity）產品均未經過輻射校正。換言之，其強度影像僅包含原始之數值接收值（Digital Number, DN），而非分析時所需之標準化雷達截面積（Normalized Radar Cross-Section, NRCS）。此問題主要係因微衛星上具備之可用計算效能較低，故星載校正處理較難實現；且為壓縮衛星體積與重量，部分校正用之元件可能並不完整。甚至部分微衛星可能並未偵測

為了將接收值校正為 NRCS 需要之輔助資訊，諸如精確衛星高度與軌道、各像元之入射角等等 (Bhattacharya, Rao, and Mandal, 2021)。

二、回波強度之品質較差且雜訊大

儘管微衛星應用摺疊技術，可自發射時長寬高均僅約 1 公尺之衛星量體中，延伸出約 3~5 公尺左右之天線，然此尺寸仍然遠較傳統大衛星雷達要明顯地小。舉例而言，Sentinel-1 具有達 12 公尺之相位陣列天線；而 ICEYE 之天線僅有 3.25 公尺長。也因為此較小之天線長，根據天線理論，在相同波長條件下，天線增益 (Antenna Gain) 正比於有效天線面積 (Effective Antenna Aperture)。因此，微衛星會有較差之天線增益，即較差之能量集中效率，使得有效發射與接收到之雷達波能量較弱 (Harrington, 1960)。另一方面，因微衛星雷達同樣也會有較小的太陽能板，使得星上之可用之能量遠較傳統大衛星雷達為弱，導致其可供雷達模組使用的傳輸功率 (Transmitted Power) 較弱。結合上述兩點，最終微衛星雷達收到之有效回波自然會有較差之信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) (Kim, Myung, and Kang, 2009) 以及較大的背景雜訊，其中後者結合系統噪音 (與雷達系統頻寬、噪音指數 [Noise Figure]、天線特性以及量測模式等相關) 即所謂等效噪聲後向散射係數 (Noise-Equivalent Sigma Zero, NESZ)。此兩者分別會降低於影像上判釋地物之清晰度，以及萃取微弱回波目標 (如水體) 之可行性 (Tsai, 2024c)。

三、明顯較差之地理對位精度

除了第一點提到之輻射穩定度對於變遷分析十分重要外，最終影像產品之地理對位精度亦直接地影響成果可靠度。傳統大雷達衛星為了確保取像時之軌道及高度量測精度至少達公分級 (Hackel, Gisinger, Balss, Wermuth, and Montenbruck, 2018)，大多使用雙頻率 (Dual-Frequency) 之全球導航系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 接收儀或甚至使用地面雷射測距校正，也會搭載追星儀 (Star Tracker) 以獲得精準之衛星姿態數據。然而微衛星雷達系統因受限於重量與體積，通常僅使用單頻之 GNSS 接收儀且甚少使用追星儀。此外，於高度控制元件 (Altitude Control System) 方面，微衛星亦較少安裝高精度之反應輪 (Reaction Wheel)、陀螺儀 (Gyro) 或力矩棒 (Torque Rod)，使其在控制衛星姿態及角速度量測上均有較大偏差，進而使得其取像之視角定位精度不佳 (Shou, 2014)。以上各因素，再加上微衛星大多部署於較低軌道高度而有更快的飛行速度，都讓衛星本體之軌道、高度、姿態與定向精度受限，使得最終影像之地理對位精度遠不及 Sentinel-1 等噸級大衛星雷達感測器。

四、尚無法執行差分干涉分析技術

受限於上一點，SAR 影像之重要技術——差分干涉處理 (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, D-InSAR) 之可行性，亦難以於目前之微衛星雷達影像被實現。根據干涉處理之理論，除了相位展開 (Phase Unwrapping) 會嚴重影響成果品質外，影像對之間的精密對位為一大前提 (Tsai, Lin, Kim, and Choi, 2019)。具體而言，因干涉技術主要仰

賴相位 (Phase)，故兩張 SLC 之對位精度，需達到 1/10 甚至 1/100 個次像元 (Pixel) 等級，否則干涉圖 (Interferogram) 之雜訊會增加，且同調性 (Coherence) 亦會顯著下降 (Li, Bao, Li, and Liao, 2006)，如圖 7 所示，可見有強回波之建物群仍無法提供有效之干涉條紋。因此，儘管微衛星雷達星系具有每日多訪、高空間解析度等優勢，若影像之取像幾何無法達到精準對位之要求，則仍然無法產生可用之干涉成果。

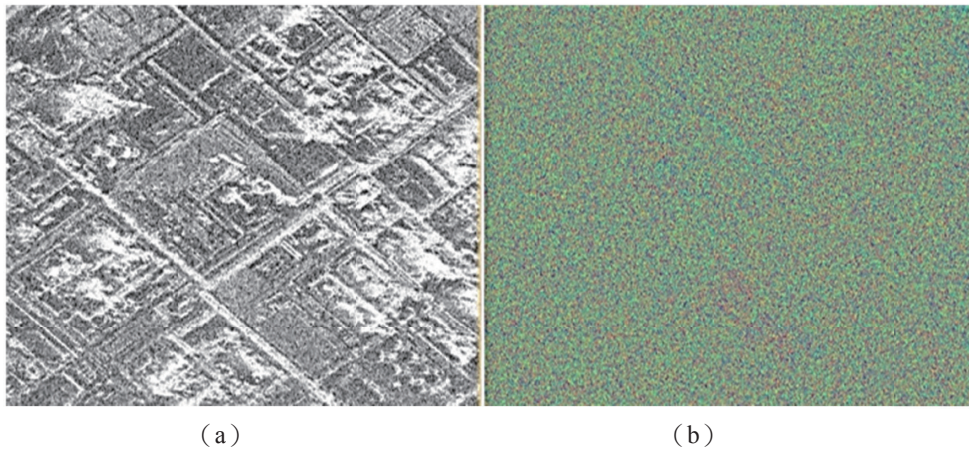


圖 7 應用時間間隔僅不到一個月之 ICEYE 0.5 公尺解析度影像對於城市區域執行差分干涉之結果：
(a) 回波強度；(b) 干涉圖

資料來源：本研究產製。

儘管目前微衛星雷達星系仍有上述各項軟硬體缺陷；然而，回顧其發展之歷史脈絡，自先驅者 ICEYE 發射其首顆實驗型衛星，至今也僅不到八年，故吾人仍可樂觀地期待未來會有更多的資金投入、新創公司加入，以及先進技術被用於解決上述問題，正如當初 SAR 被發明，以取代 SLAR 一般。

此外，隨著近年深度學習技術有目共睹地高速發展、多元衛星遙測任務之啟航（如高光谱、測高儀等），以及衛星間即時通訊 (Inter-Satellite Link) 技術之實現，我們可預期此些創新均將於不遠的未來，進一步用以提升衛星雷達資料之進用性以及與異質資料融合之擴充性，協助達到更自動化、更高效率、更完整之地物與地表分析，以解決各類環境變遷與結構物監測之實務需求。

致謝

本研究承蒙歐洲太空總署 (European Space Agency) 提供 Sentinel-1 雷達影像（下載自 Copernicus Data Space Ecosystem, <https://dataspace.copernicus.eu/analyse/apis/sentinel-hub>）、國家科學及技術委員會自然處空間資訊學門計畫（編號：NSTC 114-2121-M-002-002、NSTC 114-2119-M-002-026），與教育部玉山青年學者計畫（編號：NTU-114V1022-4）之支持方得以完成，毋任感荷。

參考文獻

- Ager T. P., 2022., *The Essentials of SAR: A Conceptual View of Synthetic Aperture Radar and Its Remarkable Capabilities*, Lewes, DE: Author.
- Bartsch A., Ley S., Nitze I., Pointner G., and Vieira G., 2020, "Feasibility Study for the Application of Synthetic Aperture Radar for Coastal Erosion Rate Quantification Across the Arctic," *Frontiers in Environmental Science*, 8, 143. doi:10.3389/fenvs.2020.00143
- Bhattacharya A., Rao Y. S., and Mandal D., 2021, *Radar Remote Sensing for Crop Biophysical Parameter Estimation*, Singapore: Springer. doi:10.1007/978-981-16-4424-5
- Capella Space, n.d., "Unlock the Power of SAR Data," <https://www.capellaspace.com/earth-observation/data> (accessed April 15, 2025).
- Cotugno F., Berardino P., Bonano M., Ciccolella A., Costa G., Crespo F. M., Levrini G., Manunta M., Moccia A., Renga A., and Lanari R., 2024, "Constellation Design and Analysis for Spaceborne DInSAR Mapping in Mid-Inclination Orbits: The IRIDE NIMBUS Mission," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63, 1000120. doi:10.1109/TGRS.2024.3519212
- Courie I. A., Faza G. A., Hertanto A. Y., Poetro R. E., and Ardi N. S., 2019, "Preliminary Design of Imaging Microsatellite for Preventing Illegal Fishing in Indonesia," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 284, 012042. doi:10.1088/1755-1315/284/1/012042
- Garcia L. P., Furano G., Ghiglione M., Zancan V., Imbembo E., Ilioudis C., Clemente C., and Trucco P., 2024, "Advancements in On-Board Processing of Synthetic Aperture Radar (SAR) Data: Enhancing Efficiency and Real-Time Capabilities," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 16625-16645. doi:10.1109/JSTARS.2024.3406155
- Hackel S., Gisinger C., Balss U., Wermuth M., and Montenbruck O., 2018, "Long-Term Validation of TerraSAR-X and TanDEM-X Orbit Solutions with Laser and Radar Measurements," *Remote Sensing*, 10(5), 762. doi:10.3390/rs10050762
- Harrington R. F., 1960, "Effect of Antenna Size on Gain, Bandwidth, and Efficiency," *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section D: Radio Propagation*, 64D(1), 1-12. doi:10.6028/JRES.064D.003
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E. A. G., Ping C.-L., Schirrmeister L., Grosse G., Michaelson G. J., Koven C. D., O'donnell J. A., Elberling B., Mishira U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., and Kuhry P., 2014, "Estimated Stocks of Circumpolar Permafrost Carbon with Quantified Uncertainty Ranges and Identified Data Gaps," *Biogeosciences*, 11(23), 6573-6593. doi:10.5194/bg-11-6573-2014
- ICEYE, n.d., "See More with Modes," <https://www.iceye.com/sar-data/imaging-modes> (accessed April 15, 2025).
- Institute for Q-shu Pioneers of Space, n.d., "What is SAR? Features of SAR Data," <https://i-qps.net/>

en/product/ (accessed April 15, 2025).

- Janson S., 2023, "The Concept and History of Small Satellites," in F. Branz, C. Cappelletti, A. J. Ricco, and J. W. Hines (Eds.), *Next Generation CubeSats and SmallSats: Enabling Technologies, Missions, and Markets*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. pp. 9-55. doi:10.1016/B978-0-12-824541-5.00017-0
- Kim S. Y., Myung N. H., and Kang M. J., 2009, "Antenna Mask Design for SAR Performance Optimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(3), 443-447. doi:10.1109/LGRS.2009.2016356
- Koike M., Goto-Azuma K., Kondo Y., Matsui H., Mori T., Moteki N., Ohata S., Okamoto H., Oshima N., Sato K., Takano T., Tobo Y., Ukita J., and Yoshida A., 2021, "Studies on Arctic Aerosols and Clouds during the ArCS Project," *Polar Science*, 27, 100621. doi:10.1016/j.polar.2020.100621
- Köksal H., Demir N., and Kilcik A., 2021, "Analysis of the Cosmic Ray Effects on Sentinel-1 SAR Satellite Data," *Aerospace*, 8(3), 62. doi:10.3390/aerospace8030062
- L'Abbate M., Germani C., Torre A., Campolo G., Cascone D., Bombaci O., Soccorsi M., Iorio M., Varchetta S., and Federici S., 2015, "Compact SAR and Micro Satellite Solutions for Earth Observation," paper presented at the 31st Space Symposium, Technical Track, Colorado Springs, CO.
- Laufer R. and Pelton J. N., 2020, "The Smallest Classes of Small Satellites Including Femtosats, Picosats, Nanosats, and CubeSats," in J. N. Pelton and S. Madry (Eds.), *Handbook of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation*, Cham, Switzerland: Springer. pp. 87-101. doi:10.1007/978-3-030-36308-6_5
- Li Z., Bao Z., Li H., and Liao G., 2006, "Image Autocoregistration and InSAR Interferogram Estimation Using Joint Subspace Projection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(2), 288-297. doi:10.1109/TGRS.2005.860984
- Liu C., Xie C., Yang J., Xiao Y., and Bao J., 2018, "A Method for Coastal Oil Tank Detection in Polarimetric SAR Images Based on Recognition of T-shaped Harbor," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 29(3), 499-509. doi:10.21629/JSEE.2018.03.07
- Ma C., Zhang Y., Guo J., Hu Y., Geng X., Li F., Lei B., and Ding C., 2022, "Structural Projection Points Estimation and Context Priors for Oil Tank Storage Estimation in SAR Image," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 194, 267-285. doi:10.1016/j.isprsjprs.2022.10.016
- Rottensteiner F., Sohn G., Jung J., Gerke M., Baillard C., Benitez S., and Breitkopf U., 2012, "The ISPRS Benchmark on Urban Object Classification and 3D Building Reconstruction," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, I-3, 293-298. doi:10.5194/isprsannals-I-3-293-2012
- Semadeni M., 2004, "Storage of Energy, Overview," in C. J. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of*

- Energy*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. Vol. 5, pp. 719-738. doi:10.1016/B0-12-176480-X/00104-2
- Shou H.-N., 2014, "Microsatellite Attitude Determination and Control Subsystem Design and Implementation: Software-in-the-Loop Approach," *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 904708. doi:10.1155/2014/904708
- Stettner S., Beamish A. L., Bartsch A., Heim B., Grosse G., Roth A., and Lantuit H., 2018, "Monitoring Inter- and Intra-Seasonal Dynamics of Rapidly Degrading Ice-Rich Permafrost Riverbanks in the Lena Delta with TerraSAR-X Time Series," *Remote Sensing*, 10(1), 51. doi:10.3390/rs10010051
- Streletskiy D., Anisimov O., and Vasiliev A., 2015, "Permafrost Degradation," in J. F. Shroder, W. Haeberli, and C. Whiteman (Eds.), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. pp. 303-344. doi:10.1016/B978-0-12-394849-6.00010-X
- Sun Y., Mou L., Wang Y., Montazeri S., and Zhu X. X., 2022, "Large-scale Building Height Retrieval from single SAR Imagery Based on Bounding Box Regression Networks," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 184, 79-95. doi:10.1016/j.isprsjprs.2021.11.024
- Synspective, n.d., *Synspective SAR Data*, <https://synspective.com/data/synspective-sar-data/> (accessed April 15, 2025).
- Torres R., Snoeij P., Geudtner D., Bibby D., Davidson M., Attema E., Potin P., Rommen B., Floury N., Brown M., Traver I. N., Deghaye P., Duesmann B., Rosich B., Miranda N., Bruno C., L'Abbate M., Croci R., Pietropaolo A., Huchler M., et al., 2012, "GMES Sentinel-1 Mission," *Remote Sensing of Environment*, 120, 9-24. doi:10.1016/j.rse.2011.05.028
- Triharjanto R. H., Budiantoro P. A., Yanto D., and Sumantyo J. T. S., 2018, "The Design Progress of LAPAN-Chiba University SAR Micro-Satellite," in *2018 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)*, New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi:10.1109/ICARES.2018.8547111
- Tsai Y.-L. S., 2024a, "Monitoring Arctic Permafrost Coastal Erosion Dynamics Using a Multidecadal Cross-mission SAR Dataset along an Alaskan Beaufort Sea Coastline," *Science of the Total Environment*, 917, 170389. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.170389
- Tsai Y.-L. S., 2024b, "Monitoring Summertime Erosion Patterns over an Arctic Permafrost Coast with Recent Sub-meter Resolution Microsatellite SAR Data," *EGUsphere*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1099> (accessed April 15, 2025).
- Tsai Y.-L. S., 2024c, "Using Cross-Mission SAR Data for a Multidecadal Coastline Change Monitoring and Assessing the Influences of SAR-Related Factors," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1-13. doi:10.1109/JOE.2024.3425968
- Tsai Y.-L. S., Dietz A., Oppelt N., and Kuenzer C., 2019a, "Remote Sensing of Snow Cover Using

- Spaceborne SAR: A Review,” *Remote Sensing*, 11(12), 1456. doi:10.3390/rs11121456
- Tsai Y.-L. S., Dietz A., Oppelt N., and Kuenzer C., 2019b, “TerraSAR-X Time-series InSAR Measurements of Permafrost Deformation in the Mackenzie Delta, Canada,” paper presented at the TerraSAR-X/TanDEM-X Science Team Meeting, Oberpfaffenhofen, Germany.
- Tsai Y.-L. S. Huang C.-J., Chen C.-L., and Han J.-Y., 2023, “Automatic Monitoring of Oil Tank 3D Geometry and Storage Changes with Interferometric Coherence and SAR Intensity Information,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 1584-1595. doi:10.1109/JSTARS.2023.3337126
- Tsai Y.-L. S. and Lin S.-Y., 2020, “Big Climate Data Assessment of Viticultural Conditions for Wine Quality Determination in France,” *OENO One*, 54(4), 699-717. doi:10.20870/oeno-one.2020.54.4.3563
- Tsai Y.-L. S., Lin S.-Y., Kim J.-R., and Choi Y., 2019, “Analysis of the Seasonal Velocity Difference of the Greenland Russell Glacier Using Multi-Sensor Data,” *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 30(4), 541-562. doi:10.3319/TAO.2019.06.03.01
- Tsai Y.-L. S. and Tseng K.-H., 2023, “Monitoring Multidecadal Coastline Change and Reconstructing Tidal Flat Topography,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118, 103260. doi:10.1016/j.jag.2023.103260
- Umbra Lab, n.d., “SAR Imaging Modes That Best Suit Your Needs,” <https://umbra.space/remote-sensing/> (accessed April 15, 2025).
- Woodhouse I. H., 2006, *Introduction to Microwave Remote Sensing*, Boca Raton, FL: CRC Press. doi:10.1201/9781315272573
- Xu H., Chen W., Sun B., Chen Y., and Li C., 2014, “Oil Tank Detection in Synthetic Aperture Radar Images Based on Quasi-Circular Shadow and Highlighting Arcs,” *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1), 083689. doi:10.1117/1.JRS.8.083689