



前瞻科技與管理 14 卷 1 期，35-49 頁（2025 年 11 月）
Journal of Advanced Technology and Management Vol. 14, No. 1, pp. 35-49 (November, 2025)
DOI:10.6193/JATM.202511_14(1).0003

衛載光達於測高應用之技術發展

曾國欣^{*}

國立中央大學太空及遙測研究中心教授

摘要

運用衛星量測地表高度，除了傳統的微波、合成孔徑雷達或光學鏡頭多視取像等成熟技術，近年亦有多個以光達為主的任務進行對地觀測，利用其光子脈衝來回傳遞的延時計算，進一步推求衛星與目標物的距離。相較於傳統光學衛星需要拍攝多視立體像對交會出目標物的高程，或是合成孔徑雷達利用相位干涉與解纏技術量測地表相對距離，光達衛星能更直接計算距離並解析不同反射面之分層細節。雖然光達與其他光學儀器皆有雲遮或氣膠干擾的限制，但其主動式遙測特性不受限於日照角度與拍攝時間，因此在應用上更為彈性，在製作數值高程模型、環境變遷偵測，以及林地生物量與碳量估算等延伸應用，具有極高的發展潛力。

關鍵詞：主動式遙測、衛星測高、衛星水深測量、數值高程模型、環境變遷

^{*} 通訊作者：曾國欣

電子郵件：khtseng@csrsr.ncu.edu.tw

（收件日期：2025 年 6 月 24 日；修正日期：2025 年 8 月 4 日；接受日期：2025 年 8 月 5 日）





The Development of Spaceborne Laser Altimetry

Kuo-Hsin Tseng*

Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

Abstract

In addition to traditional altimetry technologies such as microwave sensing, Synthetic Aperture Radar (SAR), and stereopairs of optical sensors, recent years have witnessed the emergence of several Earth observation missions that utilize Light Detection and Ranging (LiDAR) as the primary sensing tool. By calculating the time delay of photon pulses emitted and received by the sensor, these missions are able to accurately determine the distance between the satellite and target objects on the Earth's surface. Compared to conventional optical satellites that require multi-view stereo imagery to derive surface elevation, or SAR systems that rely on phase interferometry and phase unwrapping to measure relative displacement of surface scatterers, LiDAR satellites offer a more direct and intuitive method for calculating object distance. Furthermore, they are capable of resolving layered details of various reflecting surfaces.

Although both LiDAR and other optical instruments are susceptible to interference from cloud cover and aerosols, the active nature of LiDAR remote sensing allows it to operate independently of solar illumination angles and acquisition time, thereby offering greater flexibility in application. LiDAR has demonstrated significant potential in a wide range of applications, including the generation of digital elevation models, environmental change detection, and estimation of forest biomass and carbon stocks.

Keywords: active remote sensing, satellite altimetry, satellite derived bathymetry, digital elevation model, environmental change

* Corresponding Author: Kuo-Hsin Tseng
E-mail: khtseng@csrrs.ncu.edu.tw

壹、緒論

隨著雷射原理在 1950 年代末期間世，運用光子脈衝於發射器與目標物間的反射過程，可進行光達距離測量（Light Detection and Ranging, LiDAR），其原理包含利用走時（Elapsed Time）與折射校正後之光速飛時（Time of Flight, ToF）測距，或利用反射角度變化的三角幾何（Triangulation）測距，以及運用不同調製訊號間的相位差（Phase Shift）測距等方式，分別適用於不同的距離環境。透過時序記錄光子在穿透介質過程中的強度與散射特性，光達亦可量測雲霧氣膠特性、水氣風場剖面與植被地表高程等參數，功能十分多元，而本文將著重介紹光達用於測高（Altimetry）的發展與應用。

在太空應用上，第一個任務可追溯自 1971 年安裝於美國 Apollo 15 登月任務的雷射測高儀（Laser Altimeter, LALT），運用 Q 開關紅寶石雷射系統（Q-Switched Ruby Laser），在繞月軌道運行中測繪天底的一維高程剖面（如圖 1）。該任務革命性地突破以往由地球對月攝影及利用陰影進行立體高程顯影等方式，首次透過繞月儀器直接量測表面高程特徵，以 0.05 Hz 發射約 200 mJ 的能量，並以 30 公尺直徑足跡（Footprint）獲得 2 公尺左右的測距精度，在當時已能測得月球約 1,737.7 公里的球體半徑（Sjogren and Wollenhaupt, 1973）。由此可知，裝設於 Apollo 15 指令服務模組（Command and Service Module, CSM）上的 LALT，可謂是衛載光達的先驅，奠定後續運用的重要基石。

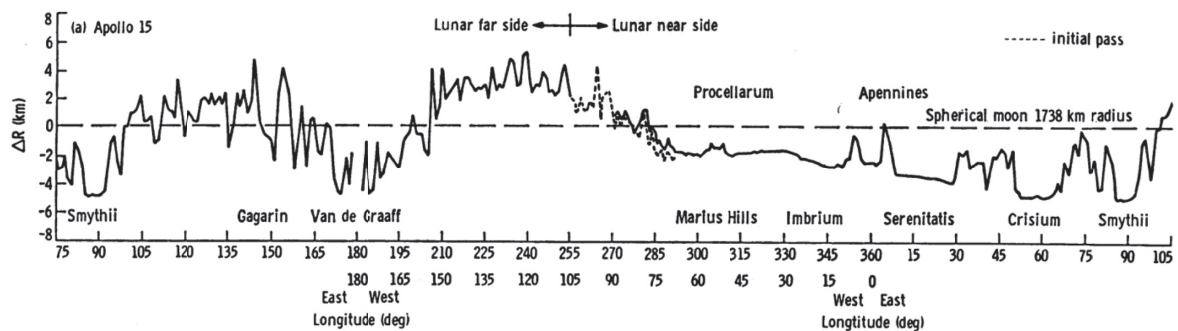


圖 1 Apollo 15 登月 LALT 量測月球高程剖面

註：LALT：雷射測高儀（Laser Altimeter）。

資料來源：Sjogren and Wollenhaupt（1973）。

此後在太空探測方面，美國太空總署（National Aeronautics and Space Administration, NASA）於 1996 年發射繞行火星的 Mars Global Surveyor，其搭載火星軌道雷射測高儀（Mars Orbiter Laser Altimeter, MOLA）以 400 公里高度繞行，透過 10 Hz 頻率發射 1,064 奈米近紅外雷射進行量測，並獲得 25 公分的測距精度，在將近四年的任務時間中，成功對火星表面進行製圖與季節性的動態分析。此外，2004 年發射前往水星的 MESSENGER（Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging）任務搭載了水星雷射測高儀（Mercury Laser Altimeter, MLA），MLA 承襲了 MOLA 的基本設計，以 8 Hz 的頻率發射 1,064 奈米近紅外雷射進行量測。因飛行軌道較高，MOLA 的足跡直徑為 10 公尺，並以每 100 ~ 300 公尺取樣間隔細緻測繪水星表面，大幅提升對高程特徵的掌握。

基於 MLA 與 MOLA，NASA 於 2003 年發射 ICESat (The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) 測高衛星，是首個對地觀測的光達衛星任務，其搭載地球科學雷射測高系統 (Geoscience Laser Altimeter System, GLAS)，可同時發射 532 奈米與 1,064 奈米的綠光及紅外光雷射，分別對雲頂高度、氣膠厚度與地表反射等參數進行量測。飛行於 600 公里軌道的 ICESat 成功在 2003 ~ 2010 年間對地表進行重複觀測，以 40 Hz 頻率，每 170 公尺發射直徑 70 公尺的雷射足跡 (Laser Footprint) 測量，相較於傳統測高衛星利用限幅雷達 (Pulse-Limited Radar) 進行足跡直徑數公里的大尺度觀測，高頻率與小覆蓋範圍是光達量測的最大特點，尤其在冰河消融、地形建模與植被高度等高程細節能充分掌握。

NASA 於 2018 年 9 月發射 ICESat-2 地球觀測衛星，目標是接續 ICESat 提供高精度、高時間解析度的地表高程測量資料，著重於追蹤極區冰層變化、森林結構、大氣變化及海洋表面動態。ICESat-2 在觀測儀器上有了革命性的突破，其搭載的先進地形雷射測高系統 (Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS) 採用光子計數 (Photon-Counting) 科技，每秒可發射高達一萬次 532 奈米的綠光雷射脈衝，每次脈衝含有數百顆光子，並測量反射自地表的光子脈衝事件返回時間。值得一提的是，ICESat-2 同時發射 3 道強光束與 3 道弱光束，透過巧妙的軌道設計與觀測方向調控，可達到跨徑方向間隔 3 公里、沿徑方向每 0.7 公尺一次足跡量測的縝密覆蓋與每季再訪的觀測能力，而測距精度更達到數公分等級，可持續追蹤地球冰層的變化，特別是在格陵蘭、南極冰蓋、北極海冰與高山冰河量測增減，進而協助科學家推估冰層融化對全球海平面上升的影響。此外，測量森林冠層高度與碳儲量、製作全球高解析度數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)、分析地表水文情勢，也是 ICESat-2 標準產品中的主要高階應用。

除衛載系統外，NASA 與馬里蘭大學 (University of Maryland) 的 Earth Ventures-Instrument 計畫，成功在 2018 年 12 月於國際太空站之日本實驗艙 (Japanese Experiment Module, JEM) 安裝運作 Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) 光達系統 (Dubayah et al., 2020)，主要的科學目的為瞭解陸域碳儲量、森林對二氧化碳吸附量與植被多樣性等生態議題。GEDI 能在緯度 $\pm 51.6^\circ$ 間進行觀測，首創在國際太空站進行全球高解析度森林與地表三維結構量測的任務。整套系統包含 3 臺波長 1,064 奈米的雷射儀與光束擺動單元 (Beam Dithering Unit, BDU) 以產生 4 道主光束，經多重光束抖動技術擴展為 8 條軌跡，達到跨徑方向間隔 600 公尺、沿徑方向間隔 60 公尺的取樣，每束光束照射地面形成直徑約 30 公尺的足跡，雷射頻率為每秒 242 次，預期在兩年任務期限內累積數十億次雲層以下的觀測。另外，透過 80 公分望遠鏡進行接收，可將回波光強度轉換為電壓信號，以 1 ns 間隔解析為全波形 (相當約 15 公分) 空間解析度，讓使用者進一步計算樹冠、建物高度及垂直結構複雜度等參數。

此外，日本在 2007 年 9 月發射 Selenological and Engineering Explorer (SELENE)，是日本宇宙航空研究開發機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 所執行最具規模的月球探測任務之一 (Kato, Sasaki, Tanaka, Iijima, and Takizawa, 2008)。透過搭載多項先進的科學儀器與輔助系統，SELENE 可深入瞭解月球的起源、演化、地形、礦物分布與構造特徵，為人類再度登月與深太空探測奠定基礎。其同時搭載 LALT 與立體地形攝影機 (Terrain

Camera, TC)，可以有效重建精準的三維地形，對未來登月地點的選擇及地質研究極具價值。另外，中國在2016年與2019年分別發射資源3號與高分7號兩顆搭載光達酬載的測高衛星，軌道高度皆為500公里，利用1,064奈米的紅外光雷射，分別以2 Hz與3 Hz進行量測，測距精度可達到0.3公尺等級，也成功對地表的地物高程進行量測。

貳、研究設計與實施

一般而言，衛載光達資料可分為四種資料處理等級，分別為：

- 一、Level 0 ~ 1：主要為從衛星下鏈傳輸的原始通訊封包，包含光子延時、衛星姿態定位與儀器狀態等資料，以及後續必需之時間、指向、溫度、電壓等校正資訊。
- 二、Level 2：經過地理定位後的原始光子資料，包含每次光子脈衝事件的計數與測距結果、大氣傳輸散射係數等。
- 三、Level 3A：以光子脈衝事件計算沿徑地表各項參數，包含大氣、植被、陸地、冰河、海冰、水面、水深等各分層高度。
- 四、Level 3B 以上：將光子脈衝事件以網格化計算地表參數與時間序列，如陸域高程變化、每月海面異常、每週大氣參數等時變觀測成果。

在點雲資料處理方法上，有使用基於密度（Density-Based）、直方圖（Histogram-Based）以及人工萃取（Manual Editing）或其他方法，大約各占三分之一，其中密度聚類演算法（Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN）是較為有效且熱門的研究方向（Jung, Parrish, Magruder, Herrmann, Yoo, and Perry, 2025）。以下以ICESat-2為例，介紹產品的處理方式與應用面向。

遙測領域近年得力於衛載光達的成功發射，為主動式光學測量開拓出一個新的領域。ICESat-2以10 kHz頻率，發射532奈米波長雷射脈衝至地表，每個脈衝發出的光子沿衛星路徑每70公分進行一次高程測量，同時發射6束（3對）的可見光雷射脈衝，沿飛行方向由左至右分別命名為GT1L、1R、2L、2R、3L、3R，同對中的兩束間隔90公尺，每對間隔3公里（如圖2），因此可獲得密集的地表資訊及精確的地形坡度變化，高程方向精度亦可達到次米等級。因雷射測距的地面雷射足跡僅約直徑11公尺，相較傳統限幅雷達測高衛星，如TOPEX/Poseidon、Jason-2、Envisat等為了大洋波浪觀測而設計直徑5~10公里的地面覆蓋範圍小得多，顯見ICESat-2較適宜用於細緻的地形建模。經前人研究其垂直精度可達10公分（Brunt, Neumann, and Smith, 2019），但對地表坡度較為敏感，在陡坡（>20%）地區因散射造成訊噪比下降，精度可能降至公尺級（Wang et al., 2019）。此外，雷射測距使用上有一大限制需要注意，便是可見光受雲遮、氣膠等大氣影響，容易造成光達點雲中的散射雜訊或未能順利落地反射，因此在雨季或多雲地區，實際地表觀測頻率較軌道3個月再訪週期來得低。

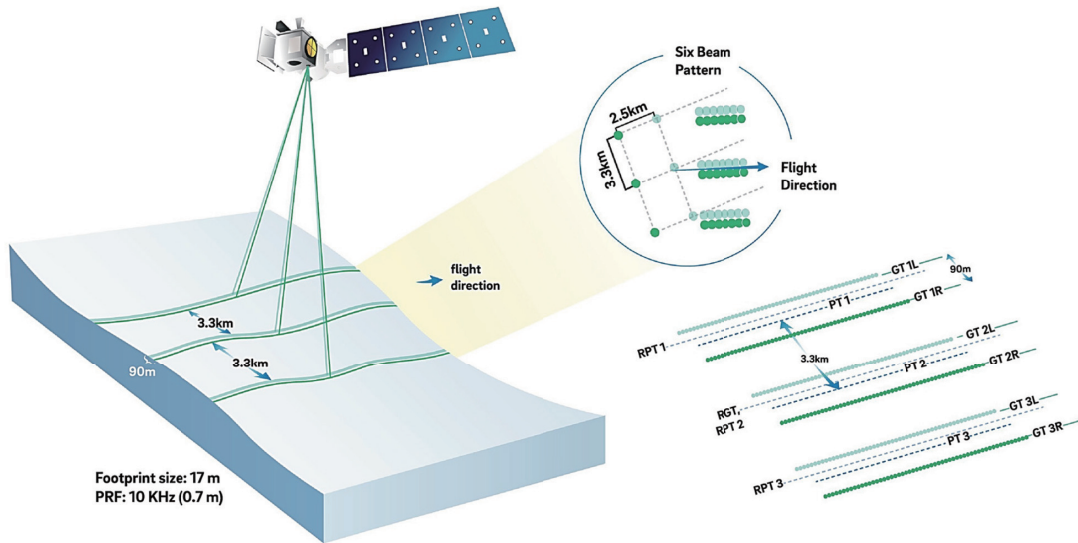


圖 2 ICESat-2 軌道示意圖

資料來源：Smith et al. (2019)。

ICESat-2 所產生的光子點雲資料需經過高階處理與過濾，才能轉化為可應用的地形、冰層或森林結構資料。NASA 透過 Earthdata 平臺提供開放資料，亦於美國國家冰雪資料中心（National Snow and Ice Data Center, NSIDC）發布 ATL00 ~ ATL23 不同處理等級產品，使用者可由 ATL03 基本光子回波資料進行特定位置的分析，作為後續計算各式高程的基礎。利用 ICESat-2 產品中的 ATL03 全球地理定位光子資料（Global Geolocated Photon Data），可由各光子脈衝事件的地理坐標與世界大地測量系統（World Geodetic System 1984, WGS84）參考橢球高程，推估光子傳遞過程中叢集（Cluster）的反射層面，如雲頂、水面及水底等。此資料集已納入必要的大氣媒介與地球物理改正，包括大氣影響、海潮和固體潮等影響。ATL03 資料可由 NSIDC 網站，經由視覺化的介面與篩選條件批次下載，目前最新的再處理版本為第 6 版。

一、原始點雲資料判釋建物高度

ATL03 的資料以 HDF5（Hierarchical Data Format 5）格式儲存，可透過第三方開源軟體 Icepyx 或其他程式語言讀取。以 2023 年 6 月 20 日通過國立中央大學的一組資料為例（圖 3），經由 NASA 提供的 Openaltimetry 平臺可搜尋及下載原始點雲資料，圖 3 下圖中綠線為 6 條光束中編號 GT1L 的強波束，橘線為編號 GT1R 的弱波束，分別通過太空及遙測研究中心及鄰近建物，橫軸為沿徑的緯度位置，縱軸為以公尺為單位的 WGS84 橢球高。由圖中可見在強反射層面有明顯的光子叢集，其他還包含地物散射、大氣散射與其他儀器雜訊等不同高程的反射訊號。Openaltimetry 平臺已提供非常良好的互動介面，即使未下載資料至用戶端，仍可利用網頁展示之目標點與鄰近的地面點的點雲資料，約略計算高程，如太空及遙測中心之屋頂高為 12.7 公尺（162.7 - 150.0），其頂樓上之樓梯間屋頂與周圍平地之高程差約為 20.1 公尺（170.1 - 150.0），皆與實際樓高十分接近。

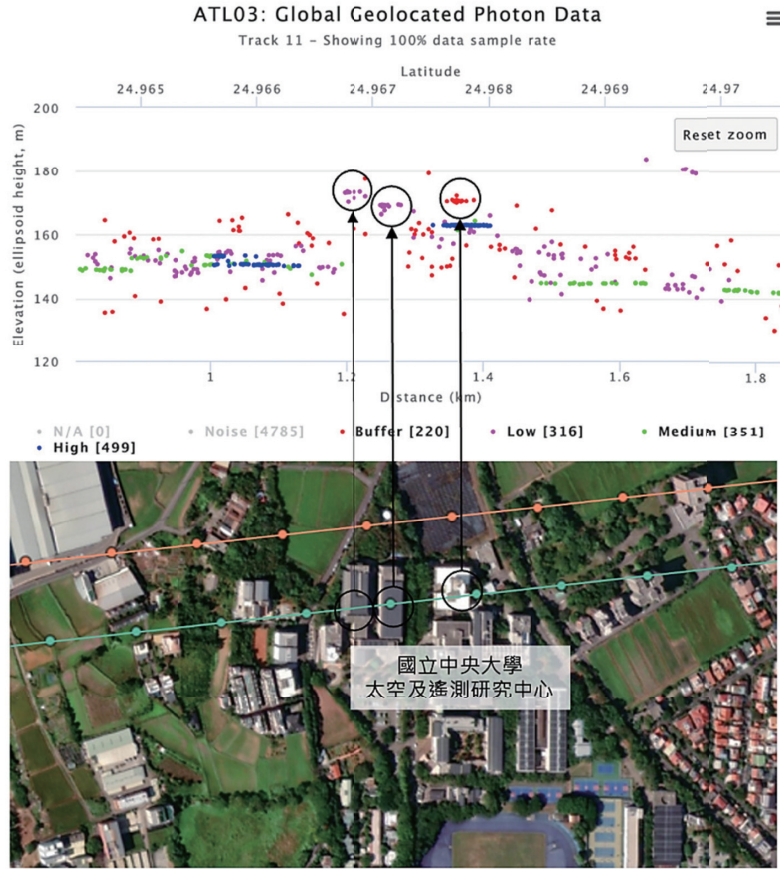


圖 3 ICESat-2 ATL-3 點雲資料用於建物高程測量

資料來源：本研究整理。

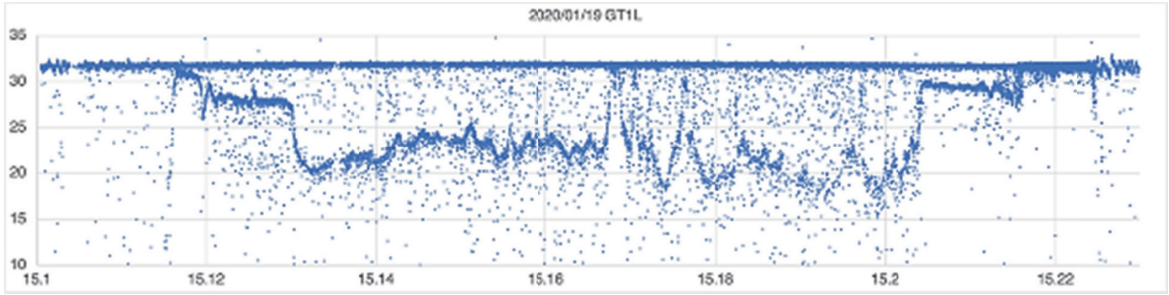
二、分析點雲資料進行水深探測

由於 ICESat-2 使用的綠光波段可穿透水面，在淺水區會形成明顯的雙層反射現象，因此當足跡軌跡進入近岸區時，可以清楚辨別點雲的分層現象。如圖 4，由 2020 年 1 月 19 日 GT1L 波束、2020 年 1 月 18 日 GT1L 波束以及 2019 年 1 月 17 日 GT1L 三條波束，分別能在南海的黃岩島、趙述島、永興島與石島三處，清楚分析島礁之水面與潟湖區之水底地形。圖中橫軸為緯度，縱軸為 WGS84 橢球高，然而原始資料尚未經水下的折射校正，僅能作為相對變化的高差參考，須經後續處理才能計算實際深度值 (Hsu et al., 2021)。

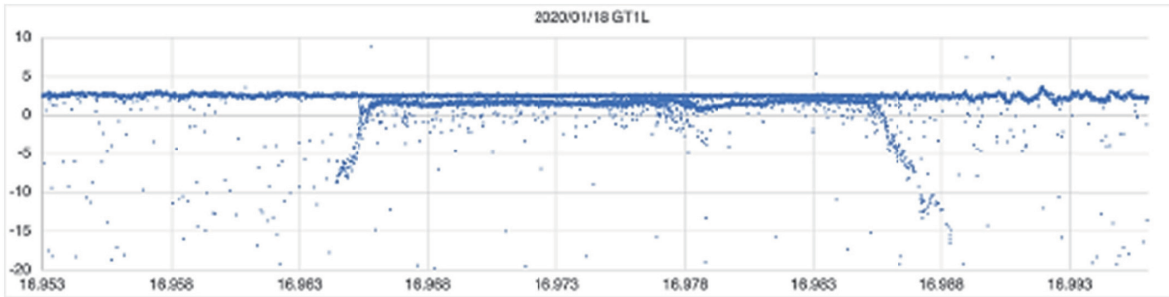
針對原始點雲資料，可先沿著衛星飛行路徑上設置一寬度 1,000 公尺之空間移動窗口 (Moving Window) 蒐集高度樣本，如圖 5 (a) 所示，並且對每個 1,000 公尺區間進行二階高斯擬合 (Two-Degree Gaussian Fitting) 以獲得海面高度。假設在移動窗口中波浪和表面梯度等影響較為平緩 (振幅為公尺以下等級)，其海面的點在高程直方圖中會形成一清晰的高斯峰值 (Gaussian Peak)。因此，一個擁有多於 1,000 個高程點之空間區間可能會形成雙峰直方圖，其中一個主要波峰在海面附近，另一個次波峰在海底附近。二階高斯擬合模型 h 的公式為：

$$h = \alpha_1 e^{\left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1}\right)} + \alpha_2 e^{\left(\frac{x - \mu_2}{\sigma_2}\right)} \quad (1)$$

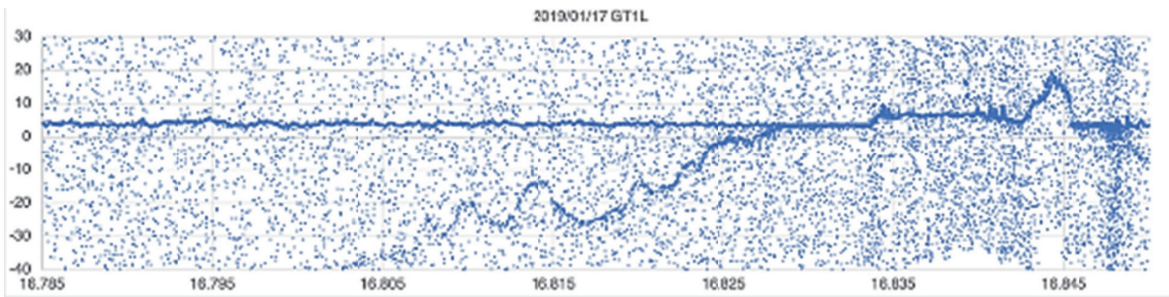
其中 α_1 和 α_2 為振幅； μ_1 和 μ_2 為期望值； σ_1 和 σ_2 分別為兩個波峰的標準差（Standard Deviation, STD）。



(a) 黃岩島



(b) 趙述島



(c) 永興島、石島

圖 4 ICESat-2 光達點雲資料呈現南海島礁水下地形

註：x 軸為緯度，y 軸為 WGS84 橢球高。

資料來源：本研究整理。

圖 5 (a) 中紅點為原始點雲，假設第一個波峰代表海水表面，則可繪製出圖 5 (a) 中藍線和陰影區，展示 $\mu_1 \pm 3\sigma_1$ 的結果，而落在這個範圍內的光子被視為海表面，並在此步驟中移除，而高於此範圍的光子點也會被移除。此海表面之高程後續將用於折射校正。

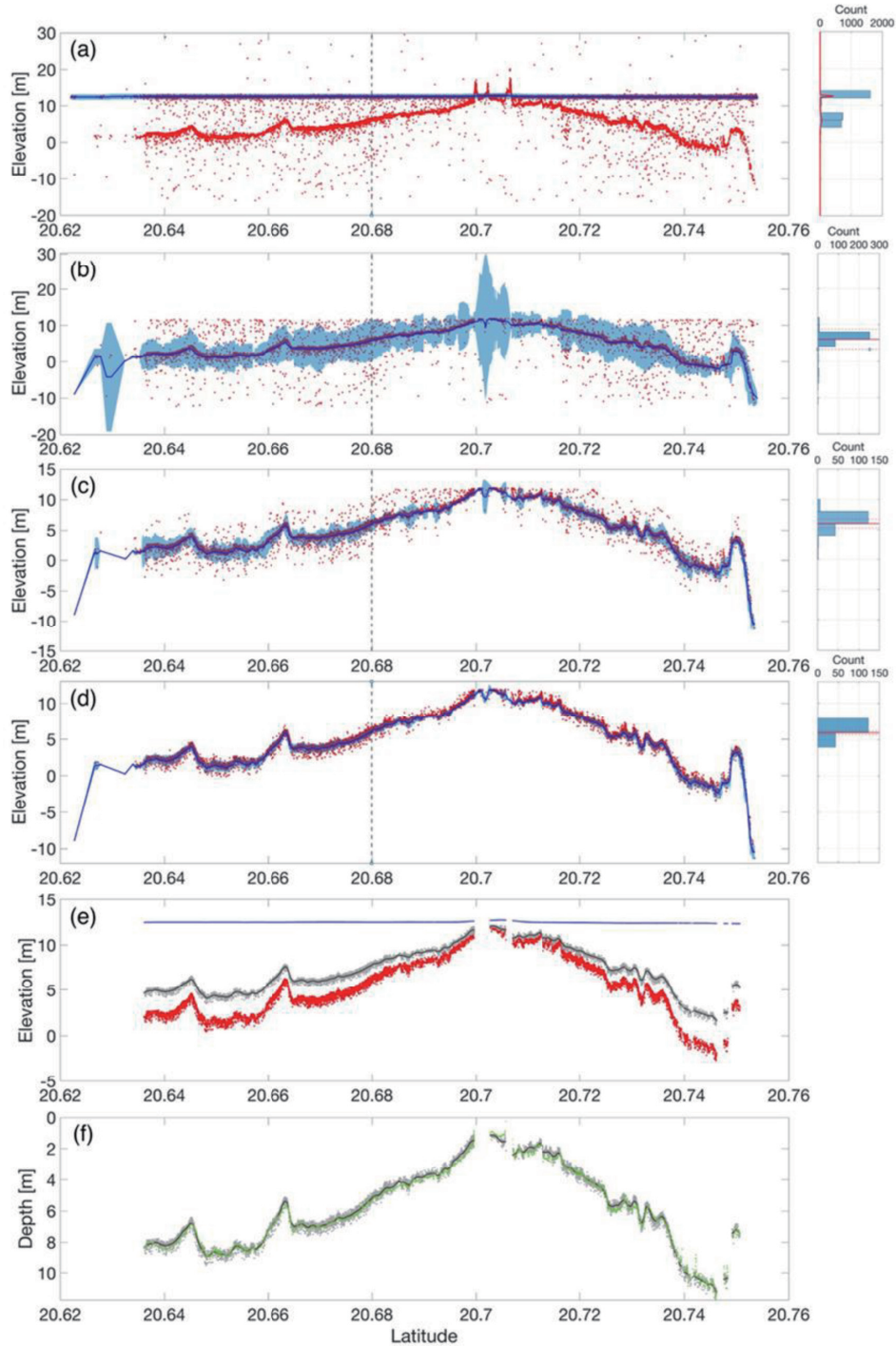


圖 5 光子點雲資料過濾流程示意圖

資料來源：Hsu et al. (2021)。

從圖 5 中不難發現，進入水中的光子容易因雜質而造成不同程度的體散射 (Volume Scattering)，此雜訊在剖線上對比相對平滑的底部地形會呈現高頻率波動。針對此一雜訊，可使用移動罩窗檢測反射最多光子的高度，並移除剩餘的離散點，方式為對在第一步中保留

下來的光子點，使用一個較小的移動窗口來移除隨機散布在水中以及明顯偏離海底地形之光子點。在此步驟中，由於高程直方圖的偏斜分布，因此建議採用中值濾波器。在低濁度條件下，光子主要出現在高程直方圖的下部。此步驟得到之表面如圖 5 (b) 所示，緩衝區為 2σ ，圖 5 (b) 中紅點為第一次濾除雜訊後點雲，藍色區間為中誤差容許範圍。此高度範圍以外的點將被移除。具有較小移動窗口間距 100 公尺的相同中值濾波器，會額外重複迭代兩次以去除偏離主群組的光子，如圖 5 (c) 與圖 5 (d) 所示，圖中紅點為第二次及第三次濾除雜訊後點雲，藍色區間為中誤差容許範圍。為了確保高度值由足夠密集且重複的樣本決定，只使用至少達到其原始點密度 20%，或大於 28 個點的窗口。最後，運用跨度 100 公尺之移動平均 (Moving Average) 來計算每個剩餘光子點的高度。

前述 ICESat-2 光子高度是基於空氣中光速來計算得到，由於光速從空氣進入海水時傳遞速率會由 $2.997 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至 $2.235 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Mobley, 1995; Parrish, Magruder, Neuenschwander, Forfinski-Sarkozi, Alonzo, and Jasinski, 2019)，因此需要透過折射校正來調整高估的水深。折射校正的公式為 (Green, Mumby, Edwards, and Clark, 2000; Parrish et al., 2019)：

$$Z_n = Z_o * \left(\frac{n_a}{n_w} \right) \quad (2)$$

其中， Z_n 為校正後水深； Z_o 為原始水深； $n_a = 1.00029$ 為空氣折射率； $n_w = 1.34116$ 為海水折射率。經過上式計算後，校正後的水深將比原始水深淺如圖 5 (e)，紅點為最終無雜訊點雲，藍線為水面位置，灰點為空載光達點雲 (Shih, Arumugam, and Shyue, 2011)。

理論上，ICESat-2 的光束入射角會導致光線在水中彎曲，使其相關地理位置改變。然而考慮其偏離天底角 (Off-Nadir Angle) 極小 (大約 6 mrad)，發射的光束在進入水中 30 公尺後受折射影響僅會產生 9 公分的水平偏移 (Parrish et al., 2019)。與雷射足跡寬度、照準精度 (Pointing Accuracy) 相比，海水折射引起的水平偏移很小，在計算中可以忽略不計。

最後，使用全球潮汐模型進行潮位補償，如 Technical University of Denmark Tide Model 2016 (DTU16) (Cheng and Andersen, 2017)，並利用 DTU18 平均海水面模型將基準面從 WGS84 橢球高化算至平均海水面 (Mean Sea Surface)，如圖 5 (f) 所示，若電子航行圖或其他海圖圖幅使用最低天文潮 (Lowest Astronomical Tide, LAT) 計算時可再加以轉換，據此建立以衛載光達資料作為參考水深資訊之衛星影像水深反演運算流程。此方法在水質允許的情況下可清楚由點雲叢集辨識水面與水底之地形起伏，經考慮折射校正後最深處可達水下約 40 公尺 (Jung et al., 2025)，並可將利光譜對數比例衰減模式 (Log-Ratio Attenuation Mode)，進一步利用光學影像進行面狀地形反演。

三、結合光學影像進行水深製圖

在多光譜影像中，可見光在水中穿透會產生能量衰減的消光現象，到達水底後反射形成遞減的離水反射率，並回到衛星高度，其物理模型主要參照比爾定律 (Beer-Lambert Law)。

這樣的衰減現象隨著水深呈指數型衰減，例如在第一公尺衰減 50% 的反射能量，並在第二公尺衰減剩下的 50%，以此類推得以計算光線在水中的光徑長度，並作為計算深度的基礎。在水質穩定的情況下，水深理論上會與綠、藍光波段之對數比例呈現以下線性關係 (Lyzenga, 1978; Stumpf, Holderied, and Sinclair, 2003)：

$$Z = k_0 \frac{\log B1}{\log B2} + k_1 \quad (3)$$

其中 Z 為水深， $B1$ 、 $B2$ 分別為兩波段中較大與較小之離水反射率，例如在極淺地區（深度 < 5 公尺）可用較敏感的綠光、紅光波段，對於較深區域則以藍光、綠光波段為主， k_0 、 k_1 為將比值縮放與平移至實際水深的轉換參數。然而經檢視多數島礁資料，式 (3) 中的線性衰減過程常因不同水質條件而有非線性的偏折，造成深水區會有深度低估的現象 (Cahalane, Magee, Monteys, Casal, Hanafin, and Harris, 2019)，因此本團隊研究發展出非線性解算過程 (Hsu et al., 2021)，利用波段比值與深度的經驗衰減模型，套用在 ICESat-2 軌跡上之光學影像波段比值，與 ICESat-2 計算水深進行回歸，以解算下式中 k_a 、 k_b 、 k_c 三個係數，最終將公式套用至全幅影像：

$$Z = k_a e^{k_b \left(\frac{\log B1}{\log B2} \right)} + k_c \quad (4)$$

目前國際上拍攝張數較多，且解析度較佳的光學影像為歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 哥白尼計畫的 Sentinel-2 衛星 (Phiri, Simwanda, Salekin, Nyirenda, Murayama, and Ranagalage, 2020)。在 2015 年 6 月發射第一顆 Sentinel-2A 後，又在 2017 年 3 月及 2024 年 9 月分別發射 Sentinel-2B 及 Sentinel-2C，構成 10 公尺多光譜解析度的星系，每顆再訪頻率為 10 天，故整體現行的平均拍攝頻率為 3~4 天，可快速、即時提供地表變遷分析，也提供大量資料克服在水深計算上時常遇到的雲遮、水質、波浪、耀光等問題。透過挑選合適的影像進行計算，可得到不同淺水區域的水深地形，以下以圖 6 蓬勃礁為例，瞭解水底地形產製與驗證成果。圖 6 表格為在反演深度區間內反演水深（黑點）與驗證水深（橘點）之 STD（單位為 $\pm$ 公尺）、系統性偏差 (Bias) 與判定係數 R^2 。可見反演水深可計算至約 18 公尺，與獨立檢核之 ICESat-2 軌跡 (2020 年 1 月 15 日) 相比，STD 為 0.56 公尺， R^2 達到 0.96。

以本方法計算水深精度可達隨深度比例的 10% 以內，在淺水區域（深度 20 公尺以內）的整體均方根誤差亦在 2 公尺以內，精度滿足國際水道測量組織 (International Hydrographic Organization, IHO) 對於海圖規範的區域可信度 (Category of Zone of Confidence, CATZOC) 要求，可望達到 B2 至 C 等級，對於電子航行圖製圖人員在水下淺點與礙航物標記上有相當大的助益。

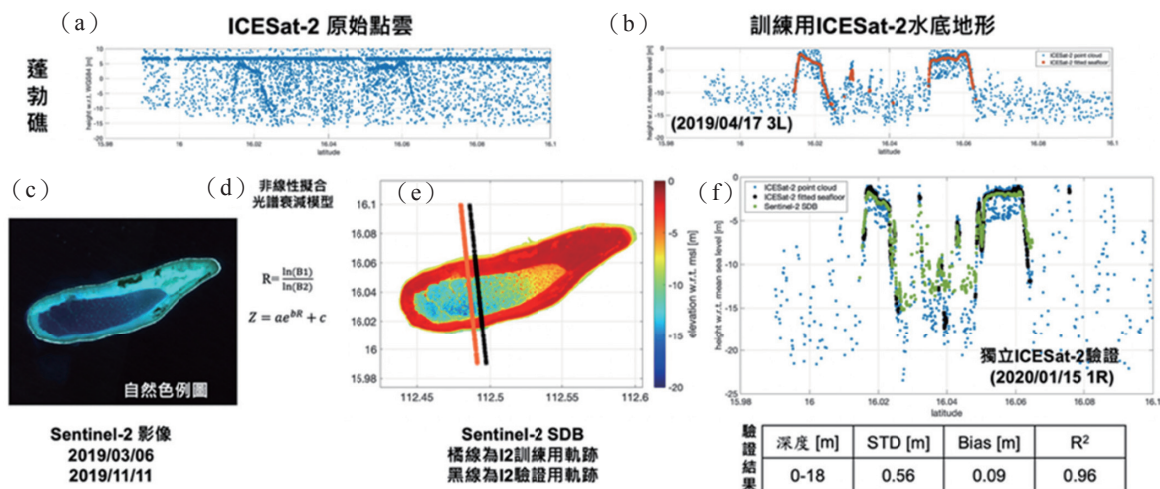


圖 6 結合 ICESat-2 與 Sentinel-2 產製水底地形與驗證示意圖：(a) ICESat-2 原始點雲（藍點）；(b) 原始點雲擬合水底地形（橘點）；(c) 目標區自然色影像；(d) 對數衰減反演模式；(e) 反演水深成果與 ICESat-2 訓練／驗證軌跡；(f) 剖線高程驗證

資料來源：本研究整理。

參、結論與建議

衛星光達任務於現在或未來都是不可或缺的重要量測工具，不論在科學研究抑或是實務應用領域中均不斷擴展其潛力，逐漸成為太空遙測領域作業化的星種之一。尤其近二十年來在技術上已有重大突破，不論是 NASA 的 ICESat (2003 ~ 2009)、ICESat-2 (2018 年發射)，或安裝於國際太空站上的 GEDI (2018 ~ 2023) 任務，皆成功證明了衛載雷射系統在地表高程、植被結構與冰雪圈動態觀測的高解析度與高精度潛力。這些任務為新一代衛星雷射任務奠定了基礎，將進一步應用於氣候變遷監測、碳儲量估算、水文情勢評估以及災害風險管理等複雜的地球觀測議題。展望未來，衛星雷射任務的發展方向將受到幾項關鍵科技與科學趨勢的驅動。首先，越來越多的任務採用多光束與光子計數技術，如 ICESat-2 所搭載的 ATLAS 儀器即為典範。此類技術能提供更高的空間取樣密度、更精細的垂直解析度，並可偵測陸地、冰層、海洋與內陸水體的微小高程變化。在衛載光達資料處理上，為了滿足廣泛的科學研究與工程應用需求，在研究上仍有非常多值得投入的課題。例如在點雲處理上，如何達到演算法的精度提升與自動化處理能力，對於大氣中的離異點進行偵測移除，而在水底探測時能將水底從雜點中分離，讓處理流程在不同環境條件下皆能適用，是當前拓展使用層面的一大挑戰。雖然深度學習具有足夠的潛力可解決上述問題，但此類方法目前仍處於初探階段，快速增加參考資料量才能突破模型訓練的一大限制。

此外，在軌運行 6 年的 ICESat-2 截至 2025 年 3 月已發射二兆次的雷射脈衝，且仍有充足燃料與良好的酬載狀態，預計至少可運作至 2030 年，其累積的歷史資料將繼續為極地研究、生物多樣性保護與氣候政策提供重要的依據。在此同時，NASA 已開始構想未來的

LiDAR 衛星任務，隨著感測器小型化與即時資料處理技術的進步，未來的雷射測高系統有望搭載於小型衛星或星系任務上，獲得更高的全球覆蓋頻率與時間解析度，有助於捕捉地表與冰雪環境的季節性與年際變遷。其次，衛星雷射資料與其他遙測資料的整合應用已成為重要趨勢，包括合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）、光學影像以及全球衛星導航系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）為基礎的測地觀測等。這些多元資料的融合，有助於更全面地描繪植被冠層動態、冰河與冰蓋質量變化、永凍土融解現象以及海岸地形演變。跨資料整合亦提升了產品的準確度與應用可靠性，並促進數位孿生地球（Digital Twin Earth）模型與預測系統的建構。此外，亦有商業公司規劃小衛星光達星系的解決方案，同樣針對環境、農業、基建、森林監測等面向提供更豐富的即時資料。至於如何處理巨量光達資料、如何確保小衛星的姿態與指向精度、如何設計高功率的雷射與電力系統等，將會是未來的研發重點。

衛星雷射技術的應用也正逐步擴展至深太空領域。例如，月球與行星探測任務正積極研究高解析度雷射測高技術，用以繪製月球、火星與小行星等天體表面。這些技術未來將在探月與深空探索中發揮關鍵角色，協助科學研究與人類活動的拓展。而國際間的合作交流將在新一代衛星雷射任務中扮演關鍵角色——NASA、ESA、JAXA 等機構正透過聯合任務規劃、資料共享與能力建構計畫，推動全球性觀測能力的長期發展。此等合作於應對全球性議題至關重要。總結而言，衛星雷射任務的未來將以科技創新、任務多樣化以及跨領域整合為主軸，對地球系統觀測與永續發展將產生深遠的影響。

參考文獻

- Brunt K. M., Neumann T. A., and Smith B. E., 2019, "Assessment of ICESat-2 Ice Sheet Surface Heights, Based on Comparisons over the Interior of the Antarctic Ice Sheet," *Geophysical Research Letters*, 46(22), 13072-13078. doi:10.1029/2019GL084886
- Cahalane C., Magee A., Monteys X., Casal G., Hanafin J., and Harris P., 2019, "A Comparison of Landsat 8, RapidEye and Pleiades Products for Improving Empirical Predictions of Satellite-Derived Bathymetry," *Remote Sensing of Environment*, 233, 111414. doi:10.1016/j.rse.2019.111414
- Cheng Y. and Andersen O. B., 2017, "Towards Further Improving DTU Global Ocean Tide Model in Shallow Waters and Polar Seas," paper presented at the 2017 Ocean Surface Topography Science Team Meeting (OSTST), Miami, FL.
- Dubayah R., Blair J. B., Goetz S., Fatoyinbo L., Hansen M., Healey S., Hofton M., Hurtt G., Kellner J., Luthcke S., Armston J., Tang H., Duncason L., Hancock S., Jantz P., Marselis S., Patterson P. L., Qi W., and Silva C., 2020, "The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-Resolution Laser Ranging of the Earth's Forests and Topography," *Science of Remote Sensing*, 1, 100002. doi:10.1016/j.srs.2020.100002

- Green E., Mumby P. J., Edwards A. J., and Clark C. D., 2000, *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*, Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Hsu H.-J., Huang C.-Y., Jasinski M., Li Y., Gao H., Yamanokuchi T., Wang C.-G., Chang T.-S., Ren H., Kuo C.-Y., and Tseng K.-H., 2021, "A Semi-Empirical Scheme for Bathymetric Mapping in Shallow Water by ICESat-2 and Sentinel-2: A Case Study in the South China Sea," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 1-19. doi:10.1016/j.isprsjprs.2021.05.012
- Jung J., Parrish C. E., Magruder L. A., Herrmann J., Yoo S., and Perry J. S., 2025, "ICESat-2 Bathymetry Algorithms: A Review of the Current State-of-the-Art and Future Outlook," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 223, 413-439. doi:10.1016/j.isprsjprs.2025.03.016
- Kato M., Sasaki S., Tanaka K., Iijima Y., and Takizawa Y., 2008, "The Japanese Lunar Mission SELENE: Science Goals and Present Status," *Advances in Space Research*, 42(2), 294-300. doi:10.1016/j.asr.2007.03.049
- Lyzenga D. R., 1978, "Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features," *Applied Optics*, 17(3), 379-383. doi:10.1364/AO.17.000379
- Mobley C. D., 1995, "The Optical Properties of Water," in M. Bass, E. W. Van Stryland, D. R. Williams, and W. L. Wolfe (Eds.), *Handbook of Optics*, 2nd ed., New York, NY: McGraw-Hill. Vol. 1, pp. 43.3-43.56.
- Parrish C. E., Magruder L. A., Neuenschwander A. L., Forfinski-Sarkozi N., Alonzo M., and Jasinski M., 2019, "Validation of ICESat-2 ATLAS Bathymetry and Analysis of ATLAS's Bathymetric Mapping Performance," *Remote Sensing*, 11(14), 1634. doi:10.3390/rs11141634
- Phiri D., Simwanda M., Salekin S., Nyirenda V. R., Murayama Y., and Ranagalage M., 2020, "Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review," *Remote Sensing*, 12(14), 2291. doi:10.3390/rs12142291
- Shih P. T.-Y., Arumugam D., and Shyue S.-W., 2011, "Bathymetric Lidar Survey of Penghu Islands and Dongsha Atoll Using an Ellipsoidal Height System for Bathymetric Mapping in Shallow Waters and Difficult-to-Navigate environments," *Sea Technology*, 52(11), 42-45.
- Sjogren W. L. and Wollenhaupt W. R., 1973, "Lunar Shape via the Apollo Laser Altimeter," *Science*, 179(4070), 275-278. doi:10.1126/science.179.4070.275
- Smith B., Fricker H. A., Holschuh N., Gardner A. S., Adusumilli S., Brunt K. M., Csatho B., Harbeck K., Huth A., Neumann T., Nilsson J., and Siegfried M. R., 2019, "Land Ice Height-Retrieval Algorithm for NASA's ICESat-2 Photon-Counting Laser Altimeter," *Remote Sensing of Environment*, 233, 111352. doi:10.1016/j.rse.2019.111352
- Stumpf R. P., Holderied K., and Sinclair M., 2003, "Determination of Water Depth with High-Resolution Satellite Imagery over Variable Bottom Types," *Limnology and Oceanography*,

48(1, pt 2), 547-556. doi:10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547

Wang C., Zhu X., Nie S., Xi X., Li D., Zheng W., and Chen S., 2019, “Ground Elevation Accuracy Verification of ICESat-2 Data: A Case Study in Alaska, USA,” *Optics Express*, 27(26), 38168-38179. doi:10.1364/OE.27.038168