



GNSS-R 遙測技術的工程應用

賴郡擘／國立中央大學土木工程學系 專任助理

林遠見／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 副教授

由於環境監測技術的進步，透過地球觀測衛星遙測的方式，以進行大範圍分析或探勘地表環境資源已是重要的趨勢。其中，全球衛星導航系統（GNSS）所發射的 L 波段訊號，除了用於定位、導航和計時外，藉由分析其直射與反射訊號的變化，同樣可作為觀測地球環境的工具，這種技術即稱為 GNSS-R。GNSS-R 技術因全球衛星導航系統覆蓋範圍廣、近即時的特性，不管是在海洋、陸地或是冰川，對於全球環境監測都是一個良好的方式。本文透過文獻探討的方式，介紹了 GNSS-R 技術的原理、方法以及近年來相關的嶄新應用層面，例如海平面高度觀測、海水表面風場推算、地表土壤含水量或冰川冰層厚度等等。

關鍵詞：GNSS-R、環境遙測、土壤含水量

前言

全球衛星導航系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）是一種利用衛星訊號提供地理空間定位的系統，而目前具有全球覆蓋範圍的衛星導航系統包含美國的 GPS、俄羅斯的格洛納斯系統（GLONASS）、中國的北斗衛星系統（BDS）和歐盟的伽利略衛星系統（Galileo）等。這些衛星的訊號傳輸時，同時允許電子接收器以高精度計算當前本地時間，更可用於時間同步，因此，全球衛星導航系統廣泛應用於定位、導航和計時。另一方面，為了滿足環境品質要求，環境監測的技術日益發展，以地球觀測衛星的遙測方式，對地球資源與環境探勘與研究是重要的趨勢。Martin 最早在 1993 年即提出以 GPS 直射訊號與地表反射訊號之間的延遲可用於量測^[1]；衛星向地表發射的無線電訊號，而地表反射訊號的波形、振幅、頻率或相位產生改變，利用延遲量測和分析反射訊號的變化便可以得知地表的粗糙度和特性，這種透過 GNSS 延遲訊號分析直射和反射訊號路徑的技術稱為 Global Navigation Satellite System-Reflectometry（GNSS-R）。GNSS-R 的量測多數是將接收儀架設於地面、無人機和飛機等不同平台測試，研究接收訊號和驗證理論^[2-4]，最早將 GNSS-R 設備裝設在衛星上的是英國的 UK-DMC 衛

星，並順利取得了海面粗糙度等地球表面物理係數^[5]。TechDemoSat 1（TDS 1）在 2014 年作為 GNSS-R 衛星發射成功^[6]，使得 GNSS-R 技術運用在星載（satellite-borne）遙測的研究又更進一步。

GNSS-R 技術對於地球觀測提供許多優勢，包括測量頻率、覆蓋範圍廣、全天候測量和近即時的觀測數據等等。目前 GNSS-R 技術在許多領域皆有不少成果；在海洋方面，可以進行海洋測高、海水表面風場推算、估計海水鹽度以及海洋油污外洩等；在陸地方面，可以估計土壤含水量和植物生長量等；在冰川方面，可以測量冰層厚度、積雪特性等。本文將介紹 GNSS-R 技術的原理和方法，以及相關技術的應用與發展。

衛星遙測介紹

環境監測的種類繁多，其目的在於滿足環境品質要求，並提供具體可靠的管理決策依據。隨著科技進步，運用衛星優勢進行環境監測的方法越來越成熟，許多國家發射了不同衛星執行不同的地球觀測計畫，我國國家太空中心亦執行了一系列的太空觀測任務，例如福爾摩沙衛星一號至三號、福爾摩沙衛星五號、福爾摩沙衛星七號，以及預計要發射的獵風者衛星與福爾摩沙衛星八號等，皆能帶來重要的科學成果。而衛星遙測根據接收

的訊號來源不同，可以分成被動式遙測和主動式遙測。

我國觀測衛星

福爾摩沙衛星一號至三號分別為三個任務已結束的太空計畫，福爾摩沙衛星一號（福衛一號；FORMOSAT-1）的任務期間為1999年1月至2004年6月，是由我國製造的一顆低軌道科學實驗衛星，主要任務為三項科學實驗：電離層特性研究、海洋水色研究和Ka頻段通訊實驗。福爾摩沙衛星二號（福衛二號；FORMOSAT-2）任務期間為2004年5月至2017年8月，其任務為對全球陸地及海域進行近即時之遙測作業，搭載遙測照相儀（Remote Sensing Instrument, RSI）和高空大氣閃電影像儀（Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning, ISUAL），在白晝地區拍攝影像資料，在黑夜地區對高層大氣向上閃電之觀測，其每日即時取像之特性，可成為各救災單位於重大災害發生時的重要參考。福爾摩沙衛星三號（福衛三號；FORMOSAT-3/COSMIC）於2006年4月發射成功，2020年5月退役，是由六顆微衛星組成涵蓋全球的低軌道微衛星星系，來接收美國24顆全球定位衛星（GPS）所發出的訊號，利用掩星技術（GNSS Radio Occultation, GNSS-RO）觀測全球大氣層與電離層，屬於氣象衛星^[7-9]。

福爾摩沙衛星五號（福衛五號；FORMOSAT-5）於2017年8月順利發射進入軌道至今，是臺灣的太陽同步軌道衛星，也是第一個由我國完全自主研发的光學遙測衛星。福爾摩沙衛星五號接續福衛二號的任務，主要的光學遙測酬載可提供2公尺解析度的全色（Panchromatic）和4公尺解析度的多波譜（Multi-spectral）彩色影像，同時酬載先進電離層探測儀，可實地量測電離層的電漿成份與密度、運動速度、溫度等物理量，觀測資料除了監測全球電離層的季節變化，亦可應用於太空天氣和地震前兆異常等相關研究^[10-12]。

福爾摩沙衛星七號（福衛七號；FORMOSAT-7/COSMIC-2），延續了福衛三號計畫執行掩星氣象觀測任務，可接收美國的GPS及俄國的GLONASS訊號，同樣利用掩星技術（GNSS-RO）進行全球氣象預報、氣象變遷研究、及電離層動態監測，為6顆任務衛星及1顆自主衛星組成一個衛星群，於2019年6月發射升空。福衛七號的觀測資料解析度高、不易受低海拔的雲層遮蔽及水氣影響，可研究全球大氣邊界層結構變化，而電離層掩星觀測每日可穩定輸出超過4000筆資料，大幅增加低

緯度地區氣象資料，提升國內氣象預報準確度及劇烈天氣（颱風路徑及降雨）預測準確度^[13,14]。

獵風者衛星（TRITON）計畫預計2022年6月發射，搭載了全球導航衛星系統反射訊號接收儀（GNSS-R），將利用GNSS-R技術在低地球軌道上蒐集由地表反射訊號，進行地表特性相關的研究，如浪高反演、海面風速、海氣交互作用、颱風強度預測、土壤特性等，期望能助於劇烈天氣的預報、降低災害預警之不確定性等研究領域的提升。

被動式遙測與主動式遙測

衛星遙測的分類根據接收到的電磁波資訊的來源，可以分為被動遙測（Passive Remote Sensing）和主動式遙測（Active Remote Sensing），一般遙測儀器如果是接收和測量由地球表面及其大氣成分所產生的自然輻射，如福衛二號與五號的衛星光學影像，稱為被動式遙測。被動式遙測量測地球表面成分、物理溫度、表面粗糙度和其他物理特徵，測量的頻段由被測物質的固定物理性質（分子共振）決定，這些頻率不會改變或在其他頻帶中重複。而若遙測儀器能發射電磁波，並接收這些被地球表面或其大氣層反射、折射或散射的訊號，則稱為主動式遙測，例如，降雨雷達測量降雨產生的雷達回波，以確定地球表面的降雨率；雲剖面雷達測量從雲層返回的雷達回波，從而提供地球表面雲反射率的三維剖面等（圖1）。

GNSS-RO/R 原理

一般衛星使用的電磁波為微波波段（頻率：1~40 GHz），頻率低到高分別命名為L、S、C、X、Ku、K和Ka波段（圖2），以X、C、L波段最為常見。

而針對不同頻率可測量不同的目標物，頻率越小（波長越長）穿透地物就越深，如L或P波段穿透

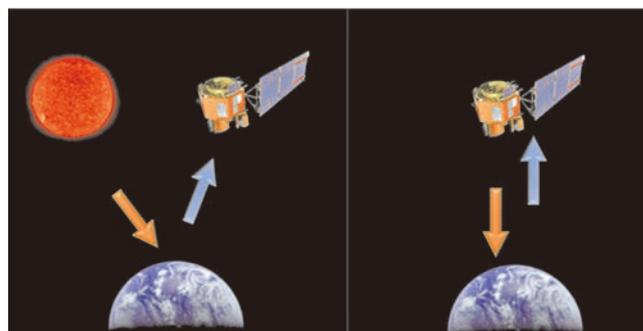


圖1 被動遙測（左）和主動式遙測（右）示意圖
（圖片來源：NASA）

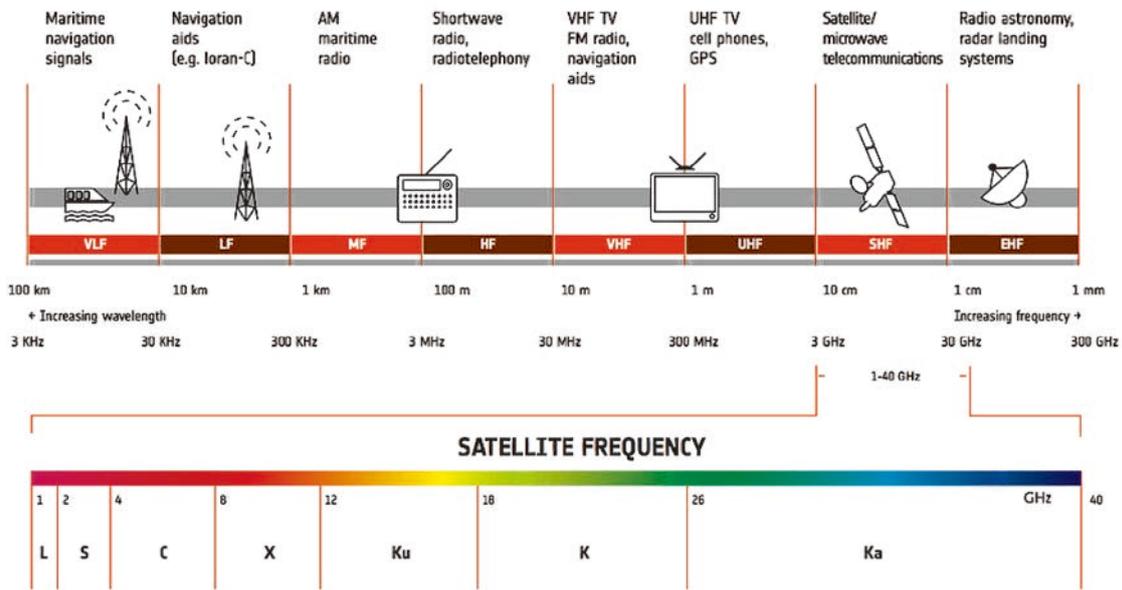


圖 2 電磁波分類及代號 (圖片來源: European Space Agency)

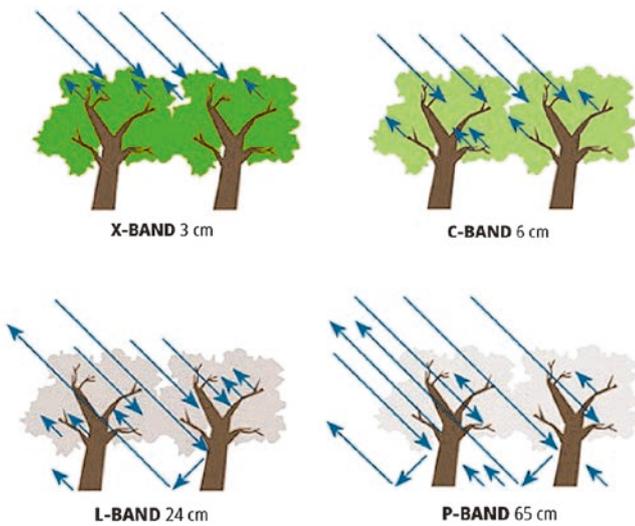


圖 3 電磁波不同波段穿透力示意圖

力較強，可穿透樹林與樹葉而探測到地面，頻率越大（波長越短）則相反，如 X 較短波長之雷達波穿透力較弱，在植物頂層就會被反射回去，較適合用來量測較小的物體，空間解析度較高，介於中間的 C 波段則可提供目標物表面或目標物以下的資訊（圖 3）。全球衛星導航系統（GNSS）使用的波段為 L 波段，1993 年 Martin 即提出可利用現有的訊號源（GPS），其直射訊號與地表反射訊號之間的延遲來量測海面高度^[1]。目前有關於 GNSS 訊號分析主要可分為掩星技術（Global Navigation Satellite System-Reflectometry - Radio Occultation, GNSS-RO）與接受反射訊號（Global Navigation Satellite System-Reflectometry, GNSS-R）。

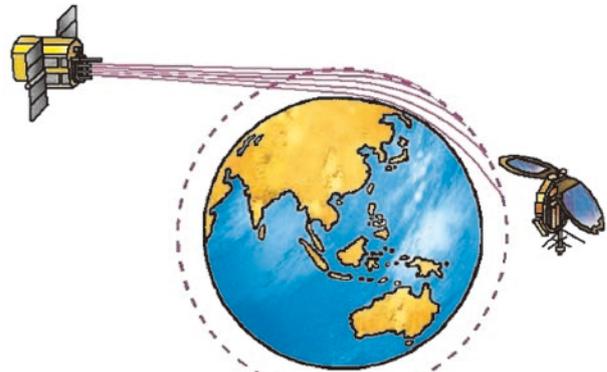


圖 4 掩星技術示意圖 (圖片來源: 國家太空中心)

全球衛星導航系統掩星技術 (GNSS-RO)

掩星技術（Radio Occultation）是指於當電磁波訊號通過行星大氣層時的變化檢測。當電磁波穿過大氣層時，電磁波會因折射而路徑彎曲。折射的幅度取決於該路徑上的折射率，折射率則與大氣層的密度梯度有關，當電磁波穿過大氣層的路徑較長時，折射效果最明顯（圖 4）。在 GPS 頻率（L 波段）的彎曲量無法直接測量，可以使用都卜勒效應計算和彎曲度計量，分析發射器和接收器的幾何關係。在中性大氣中（電離層以下），可以得出有關大氣溫度、壓力和水蒸氣含量的資訊，因此可將掩星技術應用於氣象學中。

而全球衛星導航系統掩星技術（Global Navigation Satellite System-Reflectometry - Radio Occultation, GNSS-RO），歷史上也稱為 GPS 掩星技術（GPS-RO 或

GPSRO)，電磁波訊號依賴於 GPS（全球定位系統）或其他全球衛星導航系統。GNSS-RO 是一種用於大氣測量相對較新的技術，於 1995 年首次應用^[15,16]；用作天氣預報工具，也可以用於監測氣候變化。作為氣象學的應用，掩星技術透過接收 GPS 訊號的低地球軌道衛星來回傳數據（如福衛三號與福衛七號），GPS 訊號必須穿過大氣並產生折射，折射的大小取決於溫度和大氣中的水蒸氣濃度。全球衛星導航系統掩星技術幾乎是對大氣狀態瞬時觀測，GPS 衛星和低地球軌道衛星之間的相對位置隨時間變化，從而可以垂直觀測連續的大氣層狀態。

全球衛星導航系統反射接收儀（GNSS-R）

全球衛星導航系統反射接收儀（Global Navigation Satellite System-Reflectometry, GNSS-R）是測量 GNSS 直射訊號與地表反射訊號之間的延遲（時間延遲或相位延遲），再根據 GNSS 衛星、接收儀和地表反射點之間的幾何位置關係推算地表特性（圖 5），可獲得地表粗糙度和其他地球物理參數。

處理訊號的方式，一種 GNSS-R 量測是利用左、右旋極化天線並記錄直射訊號與反射訊號的載波相位資料，透過接收儀計算訊號間鐘差等方式，分析傳播路徑的延遲，並得知天線至地球表面的幾何關係（高度）。這種方式常用於岸基測波，將儀器架設於河邊或岸邊，可計算水位或潮位落差，代替傳統的驗潮測量模式。也可將 GNSS-R 接收儀裝設在飛機或氣球上，則觀測的水面面積較大，甚至是裝設於低軌道衛星（如獵風者衛星），來進行海面高度測量，與傳統衛星主動式遙測測高相比不需要發射器，或利用多個低軌道衛星組來提升量測範圍的時空間解析度。

另一種處理訊號的方式是運用訊號的干涉現象，計算干涉現象波形的變化，進一步得知地表物理參數。干涉現象是由於 GPS（GNSS）訊號的多路徑效應，與反射點的介電質參數有關，雖然是高精度定位的主要誤

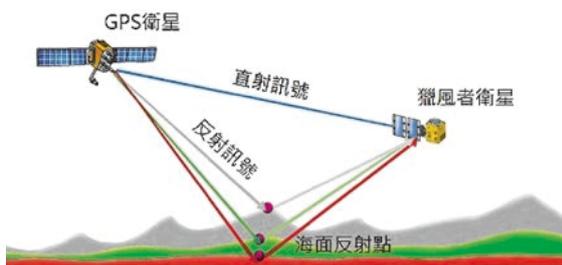


圖 5 GNSS-R 技術示意圖（圖片來源：國家太空中心）

差原因，但可利用其變化量進行環境參數推估。訊噪比（SNR）是比較訊號強度與背景雜訊強度，可用於衡量 GPS 接收儀接收到的訊號強度，反應發射功率、天線增益、路徑距離及多路徑效應等因素的影響，因此可以藉由 SNR 分析來進行地表物理參數的量測。

GNSS-R 應用

海面風場和粗糙度

GPS 反射訊號的路線比直射訊號長，固會產生時間延遲，又加上反射點粗糙度與反射訊號散射的影響，GNSS-R 接收儀接收到的反射訊號強度會減弱，結構也與直射訊號不同。海面在風的作用下引起波浪造成海面粗糙度的變化，風速越大海面粗糙程度越大，影響的反射訊號變化程度也越大；NASA 透過實驗發現，反射訊號的功率峰值隨著風速的增大而減小，波形也越平滑^[2]，如圖 6 所示。

Zavorotny, Voronovich, and Sensing^[17] 建立了一個理論模型，該模型描述了全球定位系統（GPS）訊號的功率與海面風場的關係，之後 Elfouhaily, Thompson, Linstrom, and Sensing^[18] 將模型進一步改進。Clarizia, Ruf, Jales, Gommenginger, and sensing^[19] 則提出了 Minimum Variance (MV) wind speed estimator，利用 5 個不同觀測點建立 GNSS-R Delay-Doppler Maps (DDMs)，進一步推估海面風場。Foti *et al.*^[20] 利用 TechDemoSat-1 (TDS-1) 資料推估了海洋風速，該研究結果為 GNSS-R 技術的首次星載遙測展示，與實測資料有良好的一致性（圖 7）。

土壤含水量

土壤含水量（Surface Soil Moisture Content, SMC）是地表的一個重要參數，它會影響地球在大多數的水循環、能量平衡和碳循環等環境過程。土壤含水量影響地表溫度、降水和蒸散量，對河流徑流（降雨－徑流模擬）、植被／作物健康和灌溉管理有很大影響，並且是水管理的關鍵變量。由於測量困難以及使用傳統方法監

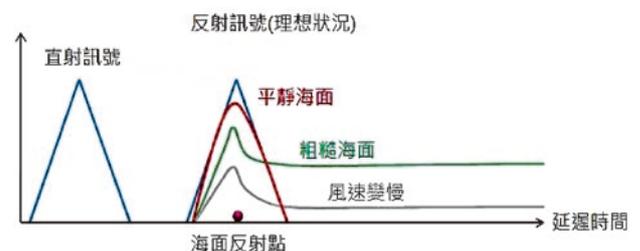
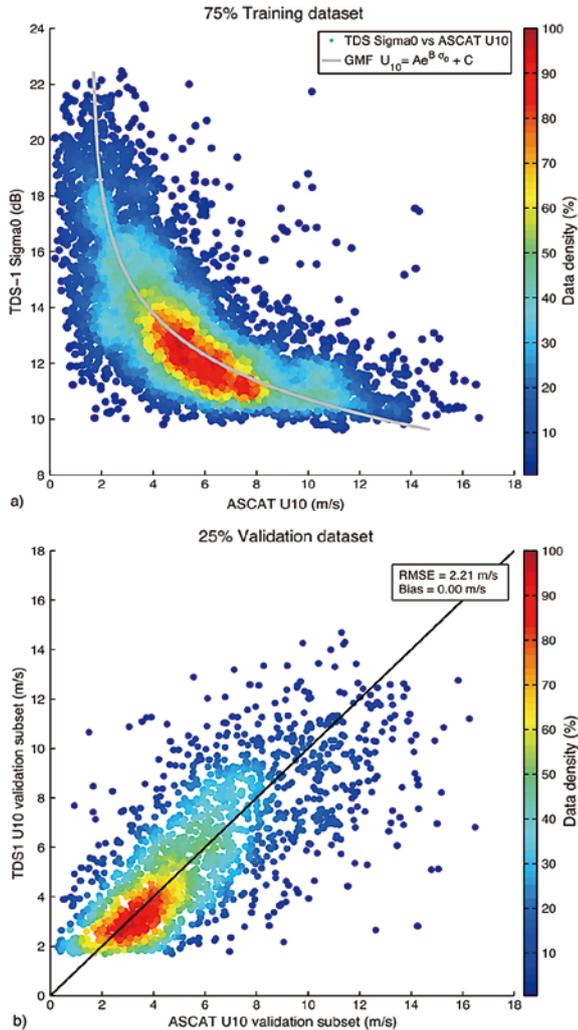
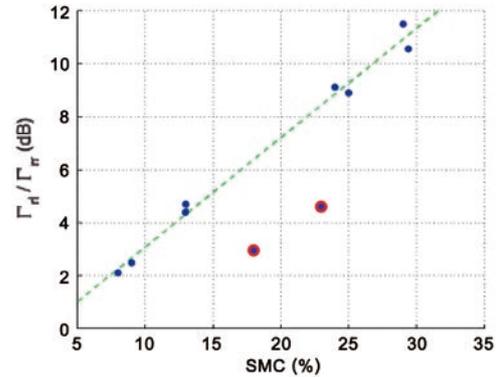


圖 6 GNSS-R 觀測海面風場示意圖（圖片來源：國家太空中心）

圖 7 TDS-1 推算海面風速成果^[20]

視較大區域的高昂成本，土壤含水量很少包含在地球環境過程的建模中。由於 GNSS-R 技術的發展，GNSS 反射訊號包含有土壤含水量、介電常數、地表粗糙度等的資訊，使得越來越多研究使用 GNSS-R 技術來推估土壤含水量。Zavorotny and Voronovich^[21] 提出了利用 GPS 反射訊號推估土壤含水量的可能性，說明了此方法是最便於土壤含水量量測的方式。西班牙 Starlab 研究所設計了 SMIGOL 探測裝置 (soil moisture interference-pattern GNSS observations at L-band reflectometer)，用於探測直射訊號和干涉後的反射訊號，分析干涉訊號波形特徵，並推估與土壤含水量的關係及其他地表參數，即 Interference Pattern Technique (IPT)。Rodriguez-Alvarez *et al.*^[22] 使用 IPT 技術建立演算法，從簡單的土壤模型到有植被的複雜模型，證實土壤含水量與干涉訊號的振幅有關。Egido *et al.*^[23] 利用機載平台獲取的 GNSS 反射訊號，分析土壤含水量和地上生物量 (AGB) 上的植被

圖 8 土壤含水量 (SMC) 與反射訊號 (SNR) 關係圖^[23]

對反射訊號的影響，其結果亦支持了 GNSS-R 作為土壤含水量遙測工具的功能 (圖 8)。

植被監測

植物覆蓋在土壤上，其含水量會影響土壤含水量的監測，因此估計植物含水量可以提高土壤含水量的推估準確度。另一方面，植被的監測除了環境保護的用途，也可運用在確保農作物生長，隨著 GNSS 系統的發展，GNSS 接收儀遍佈各地，從地面測站至星載遙測，皆有助於植物監測網的建立。GNSS 訊號為 L 波段，其反射訊號能反應地表粗糙度、含水量等物理參數。Small, Larson, and Braun^[24] 指出訊噪比 (SNR) 會隨著植被的生長而減小，因此利用 GPS 的雜訊統計量定性並估計了植物生長量。Wan, Larson, Small, Chew, and Braun^[25] 同樣利用 GPS 的訊噪比 (SNR) 來觀測植物含水量，其研究顯示 GPS 數據對沙漠類型植物或農作物有較好的結果，高水分植物則誤差較大 (圖 9)。

結論

GNSS 衛星的 L 波段訊號，作為長期免費且穩定的訊號源，可充分發揮衛星遙測的優勢；全天候、大範圍、近即時和高時空解析度等特性，是用來監測地表不管是海洋、陸地或冰川的好方法。除了本文提到的海面風場，對於海洋監測還可推估海水面高度和海洋鹽度等物理參數；陸地監測方面除了作為新興的土壤含水量監測方式，亦可用來推估其他地表特性如積雪量、密度或生物量等。隨著 GNSS-R 技術的發展，越來越多的衛星任務將要進行 (福衛七號和獵風者等)，可使我們獲得更多、更高解析度的地表特性，期望未來能增進自然環境如海嘯、颶風、颱風、火山或地震等災害的監測。

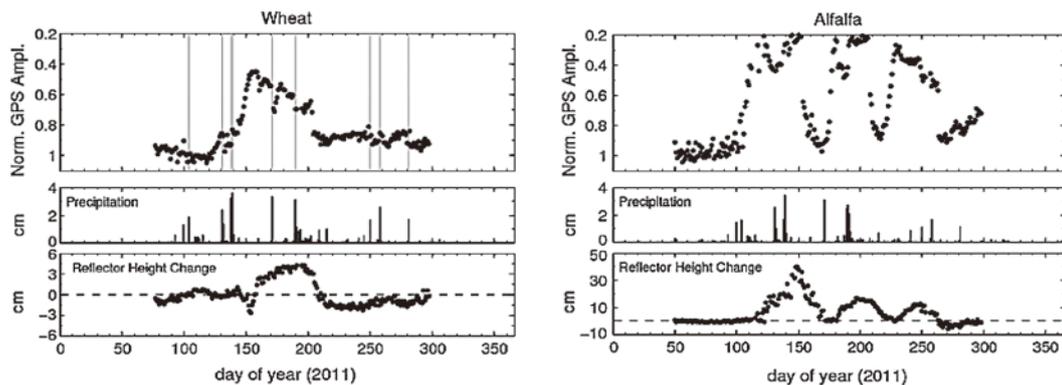


圖 9 GPS 反射訊號與農作物含水量 (左)、高水分植物含水量 (右) 的關係圖^[25]

參考文獻

- Martin-Neira, M.J.E.J. (1993). A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry. *ESA Journal*, 17(4), 331-355.
- Katzberg, S.J. and Garrison Jr, J.L. (1996). *Utilizing GPS to determine ionospheric delay over the ocean*.
- Komjathy, A., Maslanik, J., Zavorotny, V.U., Axelrad, P., and Katzberg, S.J. (2000). *Sea ice remote sensing using surface reflected GPS signals*. Paper presented at the IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120).
- Martin-Neira, M., Caparrini, M., Font-Rossello, J., Lanelongue, S., Vallmitjana, C., and Sensing, R. (2001). The PARIS concept: An experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 142-150.
- Gleason, S., Hodgart, S., Sun, Y., Gommenginger, C., Mackin, S., Adjr, M., and Sensing, R. (2005). Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low earth orbit for the purpose of ocean remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6), 1229-1241.
- Unwin, M., Duncan, S., Jales, P., Blunt, P., and Tye, J. (2014). *Implementing GNSS-reflectometry in space on the TechDemoSat-1 mission*. Paper presented at the Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014).
- Anthes, R.A., Bernhardt, P.A., Chen, Y., Cucurull, L., Dymond, K.F., Ector, Healy, S.B., Ho, S.-P., Hunt, D.C., Kuo, Y.-H., Liu, H., Manning, K., McCormick, C., Meehan, T.K., Randel, W.J., Rocken, C., Schreiner, W.S., Sokolovskiy, S.V., Syndergaard, S., Thompson, D.C., Trenberth, K.E., Wee, T.-K., Yen, N.L., and Zeng, Z. (2008). The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: Early results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), 313-334.
- Liou, Y.-A., Pavelyev, A.G., Liu, S.-F., Pavelyev, A.A., Yen, N., Huang, C.-Y., and Sensing, R. (2007). FORMOSAT-3/COSMIC GPS radio occultation mission: Preliminary results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11), 3813-3826.
- Schreiner, W., Rocken, C., Sokolovskiy, S., Syndergaard, S., and Hunt, D. (2007). Estimates of the precision of GPS radio occultations from the COSMIC/FORMOSAT-3 mission. *Geophysical Research Letters*, 34(4).
- Chen, C.-H., Lin, C.C., Liu, J.-Y., Matsuo, T., Wei-Han, C., Atmospheric, and Sciences, O. (2017). The impact of FORMOSAT-5/AIP observations on the ionospheric space weather. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 28(2), 1.
- Chou, M.-Y., Shen, M.-H., Lin, C.C., Yue, J., Chen, C.-H., Liu, J.-Y., and Lin, J.-T. (2018). Gigantic circular shock acoustic waves in the ionosphere triggered by the launch of FORMOSAT-5 satellite. *Space Weather*, 16(2), 172-184.
- Lin, Z.-W., Chao, C.-K., Liu, J.-Y., Huang, C.-M., Chu, Y.-H., Su, C.-L., and Sciences, O. (2017). Advanced ionospheric probe scientific mission onboard FORMOSAT-5 satellite. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(2).
- Cook, K., Fong, C.-J., Wenkel, M. J., Wilczynski, P., Yen, N., and Chang, G. (2013). *FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS radio occultation constellation mission for global weather monitoring*. Paper presented at the 2013 IEEE Aerospace Conference.
- Yue, X., Schreiner, W.S., Pedatella, N., Anthes, R.A., Mannucci, A.J., Straus, P.R., and Liu, J.Y. (2014). Space weather observations by GNSS radio occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2. *Space Weather*, 12(11), 616-621.
- Kursinski, E., Hajj, G., Schofield, J., Linfield, R., and Hardy, K.R. (1997). Observing earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *Astrophysics Data System*, 102(D19), 23429-23465.
- Melbourne, W., Davis, E., Duncan, C., Hajj, G., Hardy, K., Kursinski, E., and Yunck, T. (1994). *The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring*. JPL Publication, 94-18.
- Zavorotny, V.U., Voronovich, A.G., and Sensing, R. (2000). Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2), 951-964.
- Elfouhaily, T., Thompson, D.R., Linstrom, L., and Sensing, R. (2002). Delay-Doppler analysis of bistatically reflected signals from the ocean surface: theory and application. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(3), 560-573.
- Clarizia, M.P., Ruf, C.S., Jales, P., Gommenginger, C., and Sensing, R. (2014). Spaceborne GNSS-R minimum variance wind speed estimator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11), 6829-6843.
- Foti, G., Gommenginger, C., Jales, P., Unwin, M., Shaw, A., Robertson, C., and Rosello, J. (2015). Spaceborne GNSS reflectometry for ocean winds: First results from the UK TechDemoSat-1 mission. *Geophysical Research Letters*, 42(13), 5435-5441.
- Zavorotny, V.U. and Voronovich, A.G. (2000). *Bistatic GPS signal reflections at various polarizations from rough land surface with moisture content*. Paper presented at the IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120).
- Rodriguez-Alvarez, N., Camps, A., Vall-Llossera, M., Bosch-Lluis, X., Monerris, A., Ramos-Perez, I., and Sensing, R. (2011). Land geophysical parameters retrieval using the interference pattern GNSS-R technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 71-84.
- Egido, A., Paloscia, S., Motte, E., Guerriero, L., Pierdicca, N., Caparrini, M., and Sensing, R. (2014). Airborne GNSS-R polarimetric measurements for soil moisture and above-ground biomass estimation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(5), 1522-1532.
- Small, E.E., Larson, K.M., and Braun, J. (2010). Sensing vegetation growth with reflected GPS signals. *Geophysical Research Letters*, 37(12).
- Wan, W., Larson, K.M., Small, E.E., Chew, C.C., and Braun, J.J. (2015). Using geodetic GPS receivers to measure vegetation water content. *GPS Solutions*, 19(2), 237-248.