

成功大學福衛七號電離層資料產品服務

鄭尹甄¹ 林建宏¹ 陳佳宏¹ 朱虹瑄¹ 蔡和芳¹ 陳世平¹ P. K.Rajesh¹

國立成功大學¹ 地球科學系

摘要

福爾摩沙衛星七號於 2019 年 6 月發射，承繼福衛三號任務，每日提供逾四千筆低緯度地區電離層掩星觀測結果。由於掩星資料反演技術門檻較高，對於一般使用者無法直覺使用，為了推廣福衛七號資料於更多使用者，我們建立資料共享平台，用以展示福衛七號的觀測數據、資料簡介與現況概述，並提供數據之下載應用。本平台的服務項目涵蓋福衛七號反掩星電子密度廓線與全球三維電離層電子密度分布，以動態視覺化展示投影至地球的電場、中性風場與電子濃度的分佈。本平台亦提供太空天氣預報與現報產品展示，包含福衛七號提供的全球電離層資料同化模型 (GIS Assimilation Model)、太空無線電掩星 (RO)同化所需之量測資料、修正理論熱氣層電離層環流模式(Thermosphere Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model, TIE-GCM)產生的短期預報三維電漿濃度全球分布，以及低緯度不規則體的偵測。藉由資料視覺化與數據開放以協助相關研究者，深入探索電離層與太空天氣研究應用。此外，秉持著開放資料的精神，本資料平台提供之簡潔圖形化高層大氣資訊，方便使用者閱覽，便於傳播前瞻科學研究，進而達到科學普及與推廣太空天氣知識的目標。

關鍵字：福衛七號；資料開放；網頁平台；視覺化

一、介紹

福爾摩沙衛星七號於 2019 年 6 月發射，為臺美雙方的大型國際合作案，承繼福衛三號演星氣象觀測任務。福衛七號 6 枚衛星分別部署在高空 550 公里處的 6 個任務軌道上，可提供南北緯 50 度間每日約 4000 筆資料，其承載全球衛星導航系統無線電訊號接收器，接收全球衛星導航系統(GNSS)訊號，如美國的 GPS 及俄國的 GLONASS，並推導大氣層溫濕度、壓力等大氣參數以及電離層電子濃度資訊。與福衛三號相比，福衛七號在台灣地區附近提供的資料量約為 3~4 倍，這些大量的觀測資料對於台灣等低緯度地區之天氣觀測、預報以及太空天氣監測有著極大的助益。

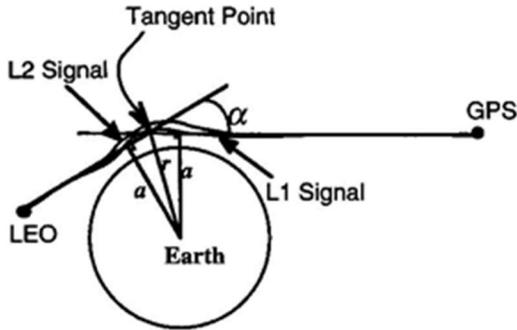
二、服務與產品

(一) RO

掩星(RO)是指在觀察者與被觀察者的天體之間有通過另一個天體，使被觀察的天體受到遮蔽之現象。當訊號通過不同介質會產生折射，利用掩星技術計算電波偏折並進行反掩，觀測地球大氣及電離層電子濃度。假設電離層為球對稱 (spherical symmetry) 之結構，運用幾何光學法，以 GPS 都卜勒頻移 (Doppler shift) 觀測量估算電波射線之偏折角 (bending angle) 和射距離 (impact distance)，再以 Abel 反演積分方程式，反演電波射線切點之電離層折射率及其電子濃度剖線。

由於電離層為頻散介質 (dispersive medium)，不同的探測電波頻率在電離層中會產生不同的偏折角，

因此電波路徑也不相同。圖一顯示 GPS 雙頻訊號 (L1 和 L2) 在 GPS 和 LEO 之間所走的不同路徑。其中一個偏折角 α 定義為電波射線兩端之漸近線的夾角；射距離 a 為漸近線到地心的距離乘以正交點上的折射指數。



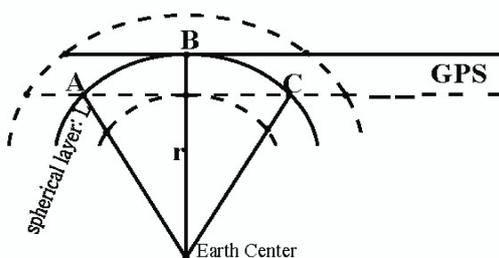
圖一、GPS 掩星幾何法之示意圖，定義在 LEO 衛星收到 GPS 衛星訊號的偏折角 α 、射距離 a 、切點半徑 r ，以及 L1 和 L2 訊號在電離層中有不同的偏折角，而產生路徑分離的現象。節錄自 Hajj and Romans (1998)。

1. 研究方式

根據 Yue et al. (2013)等前人之研究指出，在傳統 Abel 反演積分式中加入非球對稱因子，可有效改善電離層反演之 F 層甚至 E 層電子濃度。相應於掩星切點之共軛點（定義為 GPS-LEO 連心線在地球同心球殼上的兩個交點，且其與上述之切點同一高度）經緯度上的 TEC，代入不對稱因子(式一)：

$$A_j = \frac{TEC_{A,j} + TEC_{C,j}}{2TEC_{B,j}}$$

其中下標 j 代表不同的切點高度，B、A 和 C 分別代表該切點及其相應兩共軛點的經緯坐標（如圖二）。



圖二、掩星切點與其共軛點的關係。圖中水平實線和

虛線代表同一掩星事件中，前一時間和下一時間之 GPS-LEO 連線。B 代表該連線在地球同心球殼上的切點，A、C 代表同一半徑 r 之共軛點。圖節錄自 Yue et al. (2013)。

若有任一點不在 GIM 的格點上，則以內插補點方式取 GIM TEC 值。該因子運用至掩星事件所涉及的局部球對稱空間，且其結果將在反演後，反映到切點路徑上之電子濃度，並改善之。福衛七號則是將式 X 中的 TEC 改為標準 Abel 反演之 Ne (式二)，將累積夠多之一維 Ne 用以建構全球電離層 Ne 三維分布，代入不對稱因子，以修正反演結果。

$$A_j = \frac{Ne_{A,j} + Ne_{C,j}}{2Ne_{B,j}}$$

2. 資料類型

RO 分為 ionPrf 以及 igaPrf 兩種類型：ionPrf 為福衛七號掩星電離層觀測資料產品，藉由福衛七號 GNSS 雙頻掩星以及非掩星觀測量，由電離層超量相位演算程序以及掩星電離層反演程序，可得知電離層電子密度剖線、校正之掩星全電子含量 (calibrated TEC, 簡稱校正 TEC)、近地點之地理經緯度及高度等資訊。igaPrf 是從前者衍生而得的另一種電離層觀測資料產品，內含修正之電子密度剖線，以及相關的觀測量。兩者主要的差別在於前者的電子密度剖線是由標準 Abel 反演 (standard Abel inversion) 得到的；而後者是由增益 Abel 反演 (aided-Abel inversion) 得到的。

(二) GIS

全球電離層資料同化模型 (GIS Assimilation Model) 將地面全球導航衛星系統 (GNSS) 接收站觀測到的傾斜總電子含量 (TEC) 以及 F7 / C2 進行的太空無線電掩星 (RO)，利用高斯-馬可夫卡爾曼濾波器將其同化，作為國際參考電離層 (IRI) 模型提供連續的三維電離層電子密度分布，背景誤差斜方差值的計算則是使用太陽黑子數量與 IG 指標。

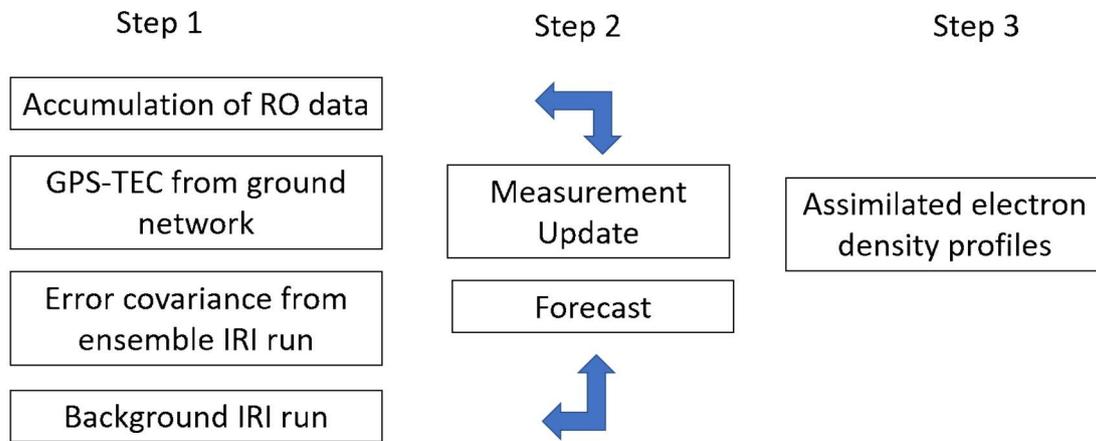
在第一步驟，將背景 IRI 密度和誤差協方差值當作初始預測值，使用測量值對初始值進行修正，預測

值與測量值為一小時更新一次，提供每小時的全球電離層密度剖面。GIS 的解析度在垂直分辨率為 20 公里、緯度/經度分辨率為 5 乘以 2.5 度。範圍在垂直高度 100 公里至 F7/C2 的軌道、北緯 90 度至南緯 90 度、東經 175 度至西經 175 度。

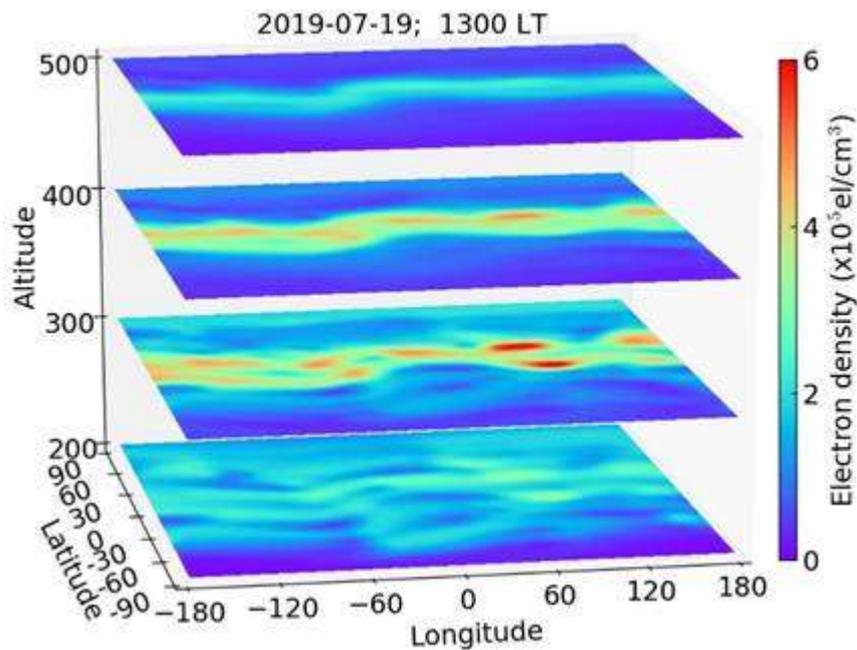
圖三顯示 GIS 資料同化系統的執行，在第一步中將加載一小時內累積的 RO、GNSS 全電子含量數據以及背景誤差協方差值，運行 IRI 模型用以提供初始背景，系統每小時累積的 GNSS 全電子含量減去經驗模型計算的電漿層電子含量，校正 GNSS 全電子含量中的離子數量。其經驗模式根據該年其中一天的經緯度、

小時以及太陽輻射 F10.7 指數計算得出。

該數據產品利用從地面和太空測量獲得的水平與垂直電離層資訊，可以研究大規模電離層電子密度的變化。圖四顯示 2019 年 7 月 19 日當地時間 13 點在 GIS 密度中偵測到的 WAVE-4 波動。若是使用傳統的 Abel 反演密度分布圖，必須結合數天的數據資料，才能產生類似圖 X 的全球電子密度圖，而 GIS 的優點為可以每天且每小時提供此種全球密度變化，更有效率的研究日常電離層變化，特別是 F7/C2 測量密度集中的低緯度地區。



圖三、執行中的 GIS 資料同化系統，此系統每小時累積 RO 和 TEC 資料。



圖四、GIS 密度分布圖顯示偵測到的 WAVE-4 波峰，該圖是在 2019 年 7 月 19 日當地時間 13 點使用一小時的

F7/C2 和 GNSS 全電子含量產生的

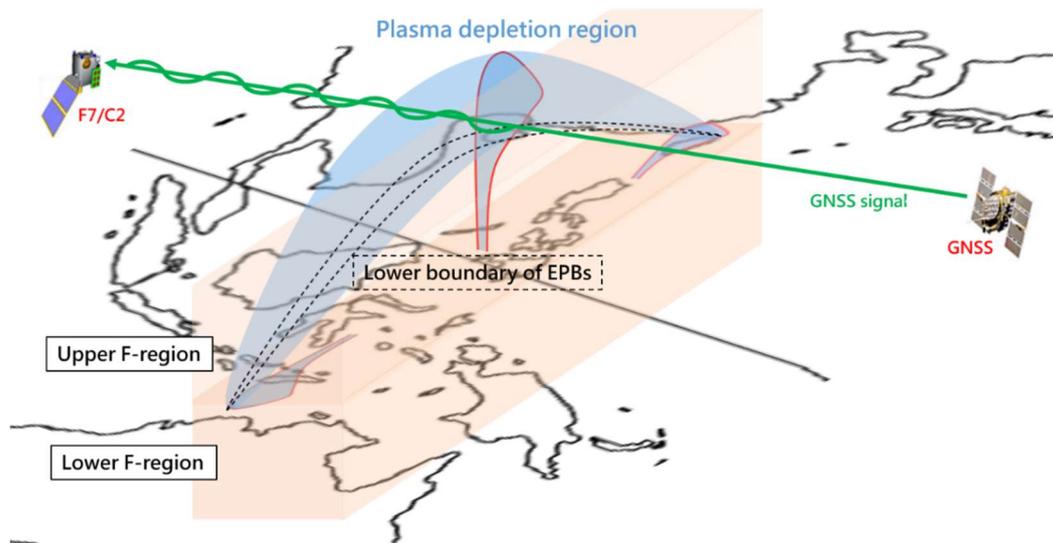
(三) S4 EPB Detection 低緯度不規則體偵測

閃爍(Scintillation)為影響人造衛星訊號品質的自然現象，傳送的電磁波受到經過的介質密度變化影響造成強度與相位擾動即為閃爍。閃爍越強，則衛星定位或其他相關應用受到的干擾越明顯。全球定位系統(GNSS)訊號即經常受到閃爍現象干擾，強烈閃爍現象將對於船隻與航空導引及無人機與自動駕駛車輛等精密應用造成風險。

電離層閃爍現象是由位於地表上空約 200-1000 公里高度之不規則體造成，該不規則體在赤道區域入

夜後形成而於日出前消失，且其分布位置會隨時間、季節、太陽活動以及地球磁場變化而有顯著不同，因此不規則體的位置預報相當困難。由於地面測站限制以及衛星觀測量不足，目前亦無對全球不規則體的即時監測。在衛星科技不可或缺的現在，建立快速的全球不規則體觀測系統為當務之急。

藉由福衛七號之掩星實驗酬載偵測訊號擾動發生的時間地點，推測不規則體的位置，福衛七號的高時間解析度觀測可以提供近即時的全球電離層不規則體每小時分布(圖五)。



圖五、為本團隊應用福爾摩沙衛星七號(福衛七號)酬載 GNSS 接收機偵測全球不規則體的每小時更新結果。利用福衛七號每小時快速環繞地球一圈的優勢，建構不規則體近即時全球分布圖。該結果為沿磁赤道分布的不規則體隨高度位置(經度/海拔高度)繪製，是人類首次以高時間解析度對全球電離層電漿密度不規則體進行監測。

(四) DART-TIEGCM

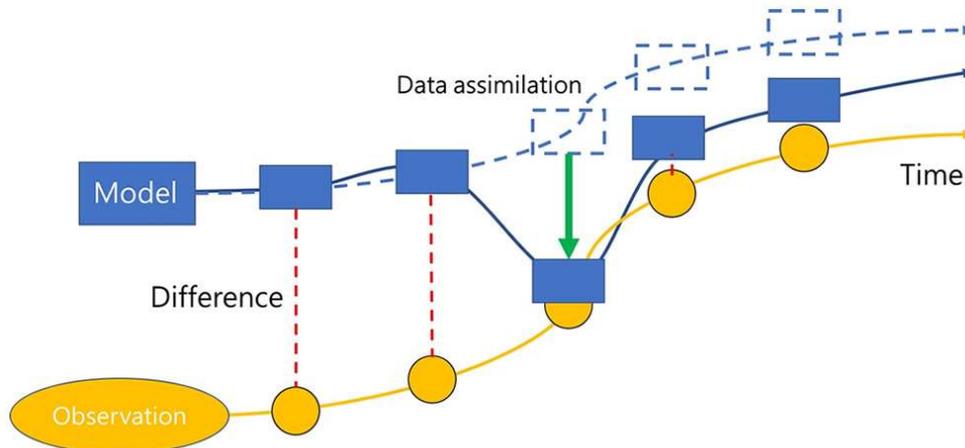
本資料是應用美國國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR)開發之太空天氣預報系統——DART-TIEGCM 資料同化方法，利用電離層觀測資料，如全球地面 GPS 接收機網解算之電離層全電子含量(Total Electron Content, TEC)以及福爾摩沙衛星三號與七號之電離層無線電掩星(Radio Occultation, RO)觀測資料，修正電離層模式(TIEGCM 模式)中三維電漿濃度全球分布的初始值[Chen et al., 2016a]，讓模式初始值更接近真實觀測值，達到更加準

確的預報結果[Chen et al., 2016b]。除了修正模擬的電漿濃度之外，模式中其他物理參數，如中性大氣濃度、中性風場、中性溫度...等亦會隨其修正，可以用來研究電離層事件發生時的物理參數變化與其影響程度 [Chen et al., 2017; 2019]。

資料同化的原理是利用觀測資料修正來模式資料，如圖六所示，由於模式無法完全模擬真實世界的情況，模式與觀測資料之間存在差值。模式在第 3 個時間點時進行資料同化之後，將模式資料修正接近觀測資料，除了得到更接近真實觀測的結果之外，也會影響模式

之後預測的結果。從圖六可以看到，原本第 4 個時間點之後的模式預測是藍色虛線方框，但是在經過資料

同化之後變為藍色實線方框，更接近真實觀測資料，提升電離層預報準確度。



圖六、資料同化原理示意圖

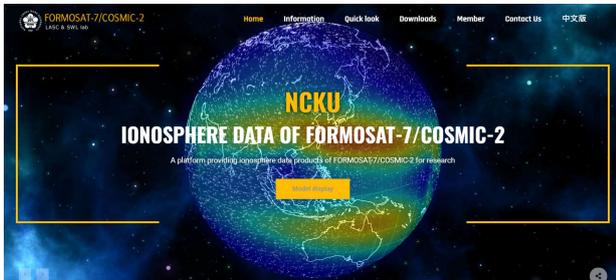
圖八

三、介面

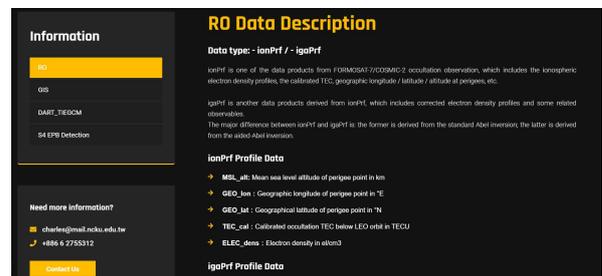
本網站分成幾個部分，具有中英雙語版本

(一) 首頁(圖七)：包含網頁介紹以及中間 Model display 按鈕可以連結到地球網頁觀看本研究室模擬的電離層動圖(圖八)。

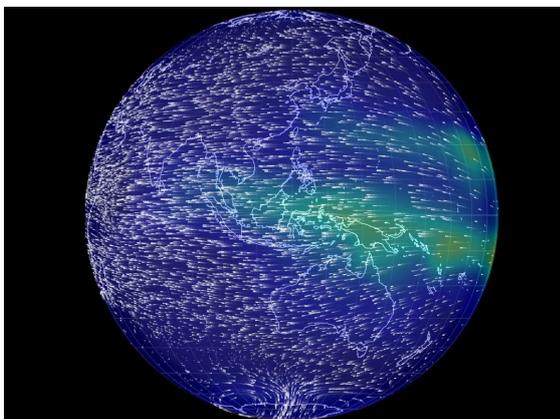
(二) 資料介紹(圖九)：包含本網站所有產品的介紹。



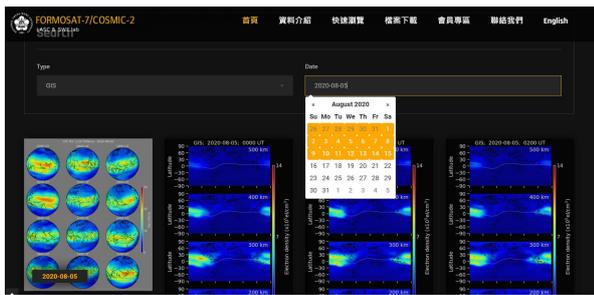
圖七



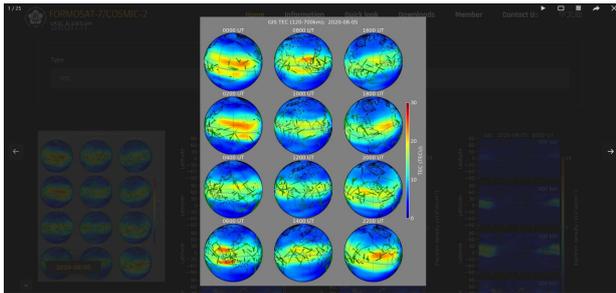
圖九



(三) 圖片預覽：在快速預覽的畫面(圖十)中，可以選擇想要預覽的資料類型以及時間，RO-ionPrf、RO-igaPrf、GIS、S4 EPB detection 以日期選擇，TIEGCM 則是以事件選擇，點擊展示圖片可以放大(圖十一)，接著點擊左右箭頭快速前後時間的展示圖。

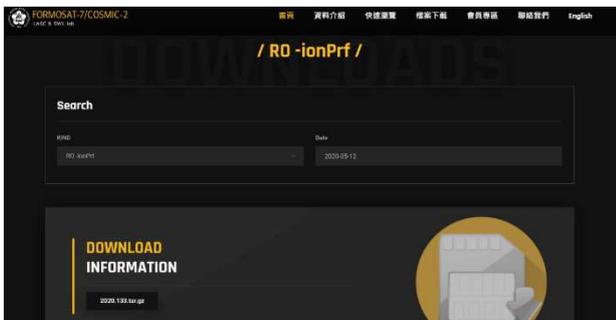


圖十



圖十一

(四) 檔案下載(圖十二)：在檔案下載頁面提供本網站各種產品的數據資料，為求資訊使用安全以及管理需求，使用者須先至會員專區頁面註冊並登入後方可下載。



圖十二

四、結論

福爾摩沙衛星七號資料展示暨太空天氣產品展示平台 (<http://formosat7.earth.ncku.edu.tw>)所提供的資料，包含福衛七號提供的全球電離層資料同化模型 (GIS Assimilation Model)、太空無線電掩星 (RO)同化所需之量測資料、修正理論熱氣層電離層環流模式 (Thermosphere Ionosphere Electrodynamics General

Circulation Model, TIE-GCM)產生的短期預報三維電漿濃度全球分布，以及低緯度不規則體的偵測，藉由共享給海內外學者研究應用，以及向大眾傳播前瞻科學研究，期許太空科學研究能不斷精進並吸引更多學者參與其中。

五、參考資料

Chen, C. H., C. H. Lin, T. Matsuo, W. H., Chen, I. T., Lee, J. Y., Liu, J. T. Lin, and C. T., Hsu, Ionospheric data assimilation with thermosphere-ionosphere-electrodynamics general circulation model and GPS-TEC during geomagnetic storm conditions, *Journal of Geophysical Research*, 121, 5708-5722, doi:10.1002/2015JA021787, 2016a.

Chen, C. H., C. H. Lin, J. Y. Liu, T. Matsuo, and W. H. Chen, Ionospheric data assimilation modeling of 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm, *Journal of Geophysical Research*, 121, 11,549-11,559, doi:10.1002/2016JA023346, 2016b.

Chen, C. H., C. H. Lin, W.-H. Chen, and T. Matsuo, Modeling the ionospheric prereversal enhancement by using coupled thermosphere-ionosphere data assimilation, *Geophysical Research Letters*, 44, 1652–1659, doi:10.1002/2016GL071812, 2017.

Chen, C. H., C. H. Lin, and T. Matsuo, Ionospheric responses to the 21 August 2017 solar eclipse by using data assimilation approach, *Progress in Earth and Planetary Science*, 6:13, doi:10.1186/s40645-019-0263-4, 2019.

Chen, S. P., C. H. Lin, P. K. Rajesh, J. Y. Liu, R. Eastes, M. Y. Chou, and J. M. Choi, Near real-time plasma irregularity monitoring by FORMOSAT-7/COSMIC-2, (Under revised)

Chen, S. P., D. Bilitza, J. Y. Liu, R. Caton, L. C. Chang, and W. H. Yeh, An empirical model of L-band scintillation S4 index constructed by using FORMOSAT-3/COSMIC data. *Advances in Space Research*, 60(5), 1015-1028, doi:10.1016/j.asr.2017.05.031, 2017.

Chou, M. Y., C. C. H. Lin, H.-F. Tsai, and C.-Y. Lin (2017), Ionospheric electron density inversion for Global Navigation Satellite Systems radio occultation using aided Abel inversions, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 122, doi:10.1002/2016JA023027, 2017.

Liu, J. Y., Chen, S. P., Yeh, W. H., Tsai, H. F., & Rajesh, P. K. (2016). The worst-case GPS scintillations on the ground estimated by using radio occultation observations of FORMOSAT-3/COSMIC during 2007–2014. *Surveys in Geophysics*, 37, 791, doi:10.1007/s10712-015-9355-x, 2016.