

台灣電波掩星資料處理系統：電離層產品簡介

葉文豪¹，黃成勇¹，陳坤林¹，曾子榜²，何旭慧³，吳靜美⁴，黃俊穎³，李修文⁴，林敬傑³

¹ 國家太空中心，國家實驗研究院

² 澳洲地球科學研究所

³ 台灣科學資料處理中心，氣象局

⁴ 全球定位科學與應用研究中心，中央大學

摘要

台灣電波掩星資料處理系統是由台灣的國家太空中心(National Space Organization, NSPO)，氣象局台灣科學資料處理中心(Taiwan Analysis Center for COSMIC, TACC)，以及中央大學全球定位科學與應用研究中心(GPS Science and Application Research Center, GPSARC)共同發展，目前此系統正使用於處理福爾摩沙衛星七號，簡稱福衛七號，的觀測資料。福衛七號是由六顆近地球軌道衛星所組成，為的是取代在 2020 年 5 月退役的福衛三號，繼續進行電波掩星的觀測。福衛三號接收美國導航衛星 GPS 訊號，每天可提供約 1000 筆的電離層電波掩星觀測資料，福衛七號除了接收 GPS 訊號之外，也可接收俄羅斯導航衛星 GLONASS 的訊號，每天可提供約 2500 筆。在此報告中，將介紹使用台灣電波掩星資料處理系統所處理出的福衛七號電離層產品。

關鍵字：電波掩星，福爾摩沙衛星七號，台灣電波掩星資料處理系統

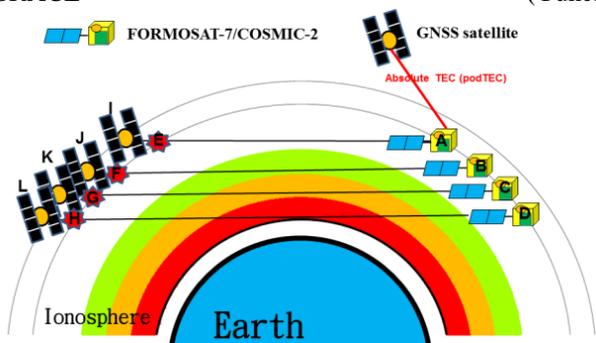
1. 前言

電波掩星一開始是使用在太陽系行星的大氣探測(Phinney and Anderson, 1968, Lindal et al. 1983, Lindal et al. 1987)，隨著全球定位衛星系統的成熟，使用電波掩星技術來觀測地球的電離層以及大氣變得可能。電波掩星的觀測原理如圖一，當GPS衛星訊號橫向傳播通過電離層時，電磁波的相位會受到電離層影響，訊號被福爾摩沙衛星七號，簡稱福衛七號，接收後，受電離層影響相位的訊號將可用來進行電離層電子濃度的反演。

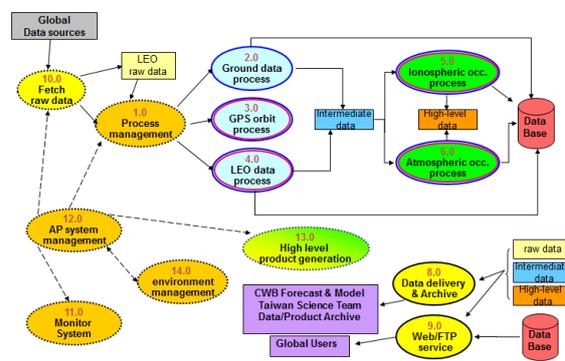
在90年代以及21世紀初，許多進行電波掩星觀測的衛星計畫發射，例如 MicroLab-1, CHAMP (Wickert et al. 2001, Pavelyev et al. 2007)，以及 GRACE (Yunck

et al. 2000)。在2006年，六顆福爾摩沙衛星三號，簡稱福衛三號，的近地表衛星發射來進行電波掩星觀測的任務。在2019年，福衛三號的延續計畫，福衛七號，發射六顆近地表衛星。福衛七號除了同樣與福衛三號接收美國的GPS衛星訊號之外，也接收了俄羅斯的GLONASS衛星訊號，因此每天可提供約2500筆電離層電子濃度類面的觀測資料。

為了能夠有台灣自主的電波掩星資料處理系統，國家太空中心、氣象局台灣科學資料處理中心、以及中央大學全球定位科學與應用研究中心，合作共同發展台灣電波掩星資料處理系統(Taiwan Radio Occultation Process System, 簡稱TROPS)，TROPS的

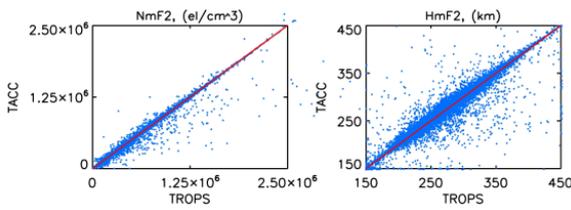


圖一，電波掩星原理圖



結

圖二，台灣電波掩星資料處理系統(Taiwan Radio Occultation Process System, TROPS) 結構圖。



圖三，福衛七號 2019.197 至 2019.365 經由 TROPS 以及 TACC 反演電子濃度剖面之 NmF2 以及 HmF2 比較。

構如圖二所示，在此報告中將對圖二中5.0的電離層產品處理流程進行詳細的介紹。

2. 台灣電波掩星資料處理系統電離層產品

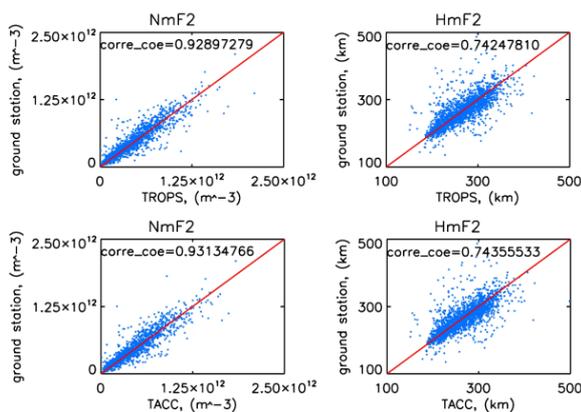
TROPS將提供三項電離層產品：1.電子濃度剖面；2.閃爍係數；3.絕對電子含量。其中電子濃度剖面以及閃爍係數都已經上線，可從TROPS網頁下載資料 (https://tacc.cwb.gov.tw/v2/product_trops.html)，絕對電子含量預計在10月上線。

2.1 電子濃度剖面

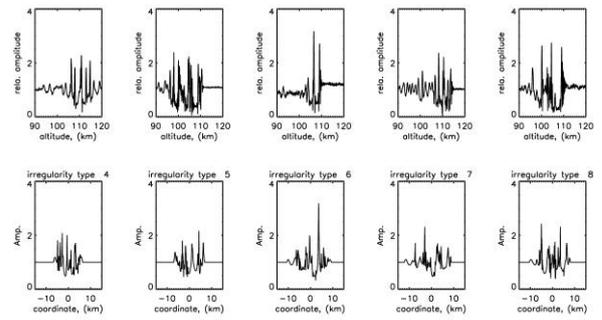
從圖一中可看出，當全球導航衛星從I、J、K、L位置發射的訊號被福衛七號在A、B、C、D位置接收，由於訊號通過不同高度的電離層，訊號的相位被路徑上的電子濃度所影響，由受影響的相位便可得由以下公式得到訊號路徑上的電子濃度線性積分，名為(total electron content, 簡稱TEC)(Schreiner et al., 1999)

$$TEC = \int N dl = -\frac{f^2}{40.3 \times 10^6} \int (n-1) dl = -\frac{f^2 S}{40.3} \quad (1)$$

$$TEC = -\frac{S_1 f_1^2}{40.3} = -\frac{S_2 f_2^2}{40.3} = \frac{(S_1 - S_2) f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}$$



圖四，福衛七號 2019.197 至 2019.365 經由 TROPS(上圖)以及 TACC(下圖)反演電子濃度剖面與地面電離層探測儀之 NmF2 以及 HmF2 比較。



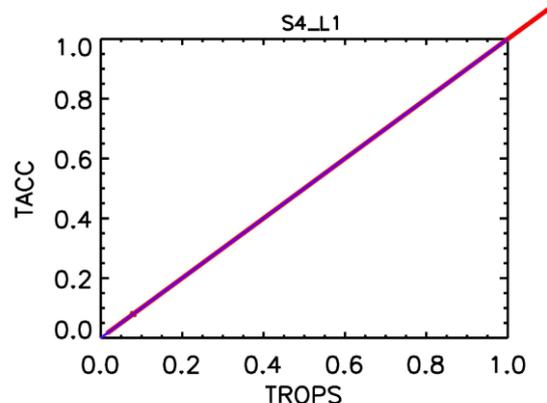
圖五，福衛三號大幅度震盪振幅(上)與模擬結果比較(Yeh et al., 2020)。

(1)式中N為電子濃度，f為訊號之頻率，S為訊號之相位。由於全球導航衛星的高度與福衛七號的高度有很大的差異，因此若是直接進行處理，將會造成一定程度的誤差，因此需要把福衛七號至全球導航衛星高度的TEC扣除掉，扣除方法如圖一中，當福衛七號運行至E、F、G、H點時，扣除掉線段IE、JF、KG、LH的TEC，便可得到線段AE、BF、CG、DH的TEC，再基於電離層電子濃度球狀對稱假設，經由電離層阿貝爾轉換(abel transform) (Schreiner et al., 1999)，便可得到電子濃度剖面

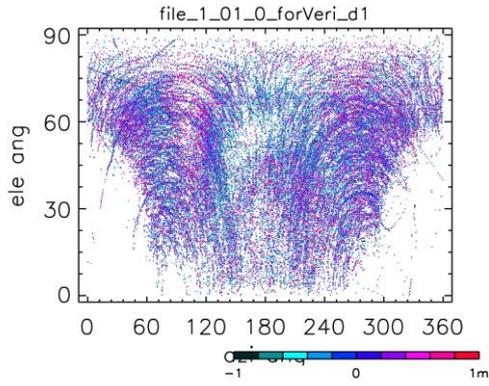
$$N(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{LEO} \frac{dT/dr_0}{\sqrt{r_0^2 - r^2}} dr_0 \quad (2)$$

(2)式中N為電子濃度，T為TEC。

圖三為 TROPS 與氣象局台灣福衛分析中心 (Taiwan Analysis Center for COSMIC, 簡稱TACC)使用美國福衛資料分析中心(COSMIC Data Analysis and Archive Center, 簡稱CDAAC)軟體反演電子濃度剖面之最大電子濃度(NmF2)以及最大濃度高度(HmF2)比較，從圖三可看出兩者的一致性，除此之外，TROPS 以及TACC的結果也分別與全球數個電離層探測儀的



圖六，福衛七號從 2020.130 至 2020.139 的 TROPS 與 TACC 至閃爍係數比較。



圖七，福衛三號 01 號衛星在太陽能板為 0 度時的多路徑效應影響。

NmF2 以及 HmF2 比較，比較結果如圖四，可看出 TROPS 與 TACC 的表現結果幾乎一致。

2.2 閃爍係數

當訊號從全球導航衛星傳播至福衛七號衛星時，若是路徑上有電子濃度梯度較大的區域，也就是電離層不規則體，訊號便會因為較大的電子濃度梯度在相位以及振幅產生大幅度的震盪，如圖五便是五個福衛三號大幅度震盪的振幅以及模擬的比較。而閃爍係數 S_4 便是以 50Hz 的振幅資料，經過以下公式計算來取得 (Syndergaard, 2006)

$$S_4 = \frac{\sqrt{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}}{\langle I \rangle} \quad (3)$$

(3) 式中 I 表示訊號的振幅。圖六表示福衛七號從 2020.130 至 2020.139 的 TROPS 與 TACC 至閃爍係數比較，可看出 TROPS 與 TACC 的結果幾乎一致。

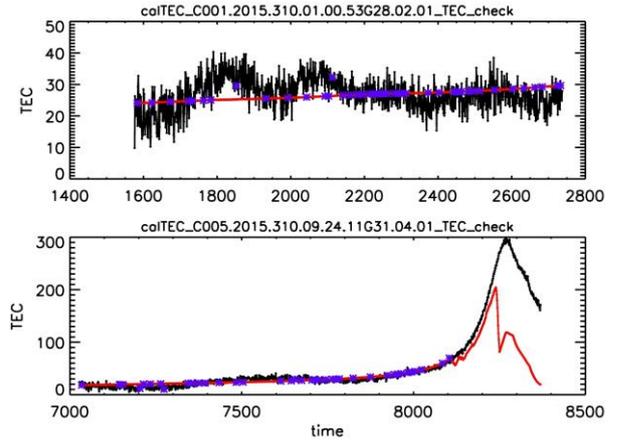
2.3 絕對電子含量

從 2.1 節可知，在使用阿貝爾轉換之前，需要先使用 (1) 式計算訊號路徑上的 TEC，但計算 TEC 之前，需要先計算受到太陽能板多路徑效應 (multipath effect) 的影響，以及福衛七號的差分碼偏差 (differential code bias)。由於計算太陽能板多路徑效應需要長時間資料進行統計分析，預計在 10 月完成多路徑效應以及差分碼偏差，因此本節以福衛三號結果進行說明。

從全球導航衛星所接收到的訊號，首先要先進行周波模稜值 (ambiguity) 的解算，然後再藉由以下公式進行多路徑效應的計算 (Leick, 2004)

$$M1 = P_1 - \Phi_1 + \frac{2}{1 - \alpha_f} (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (4)$$

$$M2 = P_2 - \Phi_2 + \frac{2\alpha_f}{1 - \alpha_f} (\Phi_1 - \Phi_2)$$



圖八，福衛三號 01 號衛星在太陽能板為 0 度時的多路徑效應影響修正前後結果。

其中 $M1$ 以及 $M2$ 為 f_1 以及 f_2 頻率的多路徑效應影響， Φ_1 以及 Φ_2 為 f_1 以及 f_2 頻率的相位觀測量， P_1 以及 P_2 為 f_1 以及 f_2 頻率的電碼觀測量， α_f 為 $(f_1/f_2)^2$ ，再經由長時間的觀測，來得到多路徑效應影響圖，圖七為福衛三號 01 號衛星在太陽能板為 0 度時的多路徑效應影響。由於福衛三號的太陽能板只有擺動一個方向，但福衛七號除了擺動之外，還有轉動，總共兩個方向，因此需要更多資料來進行統計，圖八為福衛三號 01 號衛星在太陽能板為 0 度時的多路徑效應影響修正前後結果，圖八中，黑色曲線為使用電碼所計算的 TEC，而紫點為經過多路徑效應修正後的結果，紅色曲線為相位所計算的 TEC 經過多路徑效應校正後的結果。

3. 總結

台灣電波掩星資料處理系統是針對福衛七號資料處理所發展的系統，主要提供大氣以及電離層產品，電離層產品主要為 1. 電子濃度剖面；2. 閃爍係數；3. 絕對電子含量。除了絕對電子含量需要長時間資料進行統計分析之外，電子濃度剖面以及閃爍係數都已經上線，可經由 TROPS 網頁進行下載。

4. Reference

- [1] G.F. Lindal, J.R. Lyons, D.N. Sweetnam, V.R. Eshliman, D.P. Hinson, and G.L. Tyler, "The atmosphere of Uranus: Results of radio occultation measurements with Voyager 2," *J. Geophys. Res.*, vol. 92, Dec. 30, pp. 14987-15001, 1987.
- [2] R.A. Phinney and D.L. Anderson, "On the radio occultation method for studying planetary atmospheres," *J. Geophys. Res.*, vol. 73, no. 5, pp. 1819-1827, 1968.
- [3] G. F. Lindal, G. E. Wood, H. B. Hotz, D. N. Sweetnam, V. R. Eshleman, and G. L. Tyler, "The atmosphere of Titan: An analysis of the Voyager 1

- radio occultation measurement,” *Icarus*, vol. 53, pp. 348-363, 1983..
- [4] A.G. Pavelyev, Y.A. Liou, J. Wickert, T. Schmidt, A.A. Pavelyev, and S.F. Liu, “Effects of the ionosphere and solar activity on radio occultation signals: Application to CHALLENGING Minisatellite Payload satellite observations,” *J. Geophys. Res.*, vol. 112, A06326, 2007.
- [5] J. Wickert, C. Reigber, G. Beyerle, R. König, C. Marquardt, T. Schmidt, L. Grunwaldt, R. Galas, T.K. Meehan, W.G. Melbourne, and K. Hocke, “Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, no. 17, pp. 3263-3266, 2001.
- [6] T.P. Yunck, C.-H. Liu, and R. Ware, “A history of GPS sounding,” *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, vol. 11(1), pp. 1-20, 2000.
- [7] W.S. Schreiner, S.V. Sokolovskiy, C. Rocken, D.C. Hunt, “Analysis and GPS/MET radio occultation data in the ionosphere,” *Radio Science*, 34, 4, 949-966, July-August 1999.
- [8] W.H. Yeh, C.Y. Lin, J.Y. Liu, S.P. Chen, T.Y. Hsiao, and C.Y. Huang, “Superposition property of the ionospheric scintillation S4 index,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17, 4, April, 2020.
- [9] S. Syndergaard, “COSMIC S4 Data,” 2006, Retrieved from https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/doc/documents/s4_description.pdf
- [10] Alfred Leick, *GPS satellite surveying*, 3rd edition, John Wiley & Sons, 2004.

Taiwan Radio Occultation Process System (TROPS) : Preliminary results of ionospheric products

Wen-Hao Yeh¹, Cheng-yung Huang¹, Kun-Lin Chen¹, Tzu-Pang Tseng², Hsu-Hui Ho³, Jing-Mei Wu⁴,
Jyun-Ying Huang³, Hsiu-Wen Li⁴, Ching-Chieh Lin³

¹National Space Organization, National Applied Research Laboratories

²Geoscience Australia, Australia

³Taiwan Analysis Center for COSMIC, Central Weather Bureau

⁴GPS Science and Application Research Center, National Central University

Abstract

Taiwan Radio Occultation Process System (TROPS) is a Taiwan-built data process system has developed by National Space Organization (NSPO), Taiwan Analysis Center for COSMIC (TACC), and GPS Science and Application Research Center (GPSARC). Presently, TROPS is used for data processing of FORMOSAT-7/COSMIC-2 (F-7/C-2) mission, which contains six low Earth orbit (LEO) satellites and launched in late June, 2019. F-7/C-2 is the follow on mission of FORMOSAT-3/COSMIC (F-3/C) mission, which also contains six LEO satellites to receive GPS signal for RO observation. F-3/C mission can provide around 1000 electron density profiles of ionosphere. F-7/C-2 mission can provide around 2000 electron density profiles of ionosphere due to F-7/C-2 satellites not only receive GPS signal but also GLONASS signal. In this study, the data performance and the validation results of preliminary ionospheric retrieve results of TROPS for F-7/C-2 will be presented.

Key Words : Radio Occultation , FORMOSAT-7 , Taiwan Radio Occultation Process System