

先進電離層探測儀

Advanced Ionospheric Probe

趙吉光

Chi-Kuang Chao

依照福爾摩沙衛星五號科學酬載的研製需求，國立中央大學開發出先進電離層探測儀。該儀器為多合一的電漿量測儀器，可實地量測電離層的電漿密度、速度、溫度等物理量。在小尺度上，可以最高取樣率每秒 8,192 次量測電漿不規則體的空間分布與暫態變化。在大尺度上，可完整得到電離層電漿在經度、緯度、季節、太陽活動的變化等。適合研究太空天氣／氣候或協助電離層地震前兆等相關議題。自衛星發射歷經在軌測試後，先進電離層探測儀已進入例行觀測。預計可在 2018 年底，開放科學資料給太空相關研究學者使用。

Advanced Ionospheric Probe (AIP) is a piggyback science payload developed by National Central University for FORMOSAT-5 satellite to explore space weather/climate and seismic precursors associated with strong earthquakes. AIP is an all-in-one plasma sensor that measures in-situ ionospheric plasma concentrations, velocities, and temperatures in a time-sharing way and is capable of measuring ionospheric plasma irregularities at a sample rate up to 8,192 Hz over a wide range of spatial scales. After early orbit checkout, ionospheric plasma parameter profiles will be routinely observed by FORMOSAT-5/AIP in night-side orbits with a geographic latitude coverage from -60° to 60° . These valuable science data shall be available to space community at the end of 2018.

國家實驗研究院國家太空中心在 2011 年底提出福爾摩沙衛星五號 (以下簡稱福衛五號) 科學酬載的研製需求，國立中央大學 (以下簡稱中大) 據此開發先進電離層探測儀 (Advanced Ionospheric Probe, AIP)，在 1 年 10 個月內打造出質量小於 5 公斤、每軌平均消耗功率小於 5 瓦特、通過所有環境測試之科學酬載。先進電離層探測儀為多合一的電漿量測儀器，可實地量測電離層的電漿密度、速度、溫度等物理量 (相關參數資料規格可見表 1)。主要的科學目標是研究太空天氣／氣候等自然現象，協助電離層地震前兆等相關研究。掌握電離層

太空天氣的動態變化，未來攸關全球的飛航安全。以美國波音公司準備在 2019 年進行無人客機的試飛為例，估計航空業未來若採用無人民航機，每年可以省下 350 億美元，也可有效地維持航班的順暢與穩定。其中一項重要的關鍵是，美國在 2020 年後將全面要求飛機需安裝 ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) 位置回報系統。位置的偵測則仰賴飛機上的 GNSS 系統，而 GNSS 訊號有可能受到電離層的干擾而產生誤差與訊號脫鎖 (Basu et al. 2002)。

過去福衛系列的科學酬載完全仰賴向國外採

表 1. 先進電離層探測儀量測地球物理參數的資料規格。

| 地球物理參數 | 範圍 | 敏感度 | 準確度 |
|------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 離子成分 C_i | 3% to 100% | 1% | 10% |
| 離子密度 N_i | 4×10^2 to $1.2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ | 1% | 10% |
| 離子速度 V_i | $\pm 3.2 \text{ km s}^{-1}$ (橫向) $\pm 5 \text{ km s}^{-1}$ (前衝) | $\pm 10 \text{ m s}^{-1}$ $\pm 100 \text{ m s}^{-1}$ | $\pm 50 \text{ m s}^{-1}$ $\pm 200 \text{ m s}^{-1}$ |
| 離子溫度 T_i | 500 to 10,000 K | $\pm 50 \text{ K}$ | $\pm 200 \text{ K}$ |
| 電子溫度 T_e | 500 to 10,000 K | $\pm 50 \text{ K}$ | $\pm 200 \text{ K}$ |

購，當時國內缺乏自主研製的能力。雖然中大團隊曾參與福衛一號電離層電漿電動儀的資料分析，並獲得非常豐碩的科學成果，例如以高解析度資料研究電離層電漿不規則體與全球分布、研究磁暴對電離層的衝擊、建立電離層經驗模式等。但深知若沒有足夠的儀器開發能力，即使有創新的想法也很難獲得卓越且獨特的科學成果。因此藉由研製探空五號、七號、九號的火箭級科學酬載為起步，逐步建構功能測試與環境測試設施。從飛行測試的成果來反饋儀器的精進，而後才能完成福衛五號科學酬載的研製，提供全世界太空科學研究的重要量測資料。一舉由過去的太空科技輸入國，轉型進階為太空科技輸出國。除了提升我國的國際政治地位，帶動經濟效益，目前也正與國外實質發展太空科技合作 (Baker and Chandran 2018)。此一範例也推動國內年輕的學者與學生能嘗試發展更多樣的科學酬載，預期可大幅提升我國自主太空科學研究的能量。

先進電離層探測儀 (見圖 1)，可分為探測器

與科學酬載電子系統 (Science Payload Electronics Unit, SPEU)。SPEU 可控制探測器，依照地面站所提供指令執行科學任務。SPEU 採備援設計 (見圖 2) 以避免單點失效，提升任務壽命。配置兩組控制器，分別為主控制器 (primary controller) 與備援控制器 (redundant controller)。平常運作時，僅開啟主控制器，與衛星的 CDMU (Command and Data Management Unit) 和探測器聯繫。若主控制器遭受單事件翻轉 (single event upset) 等影響，可先關閉主控制器，再啟動備援控制器來維持儀器的運作。由於 SPEU 與 CDMU 之間和 SPEU 與探測器之間的數位訊號採交叉 (cross-strap) 架構但並非網路架構，因此在同一時間僅能啟動單一控制器。由於 SPEU 將由衛星上的 PCDU (Power Control Distribution Unit) 獲得 +28 VDC 的操作電壓。PCDU 可經由 PCDU-A 供電給主要直流/直流電壓轉換器以啟動主控制器，或是經由 PCDU-B 供電給備援直流/直流電壓轉換器以啟動備援控制器。透過 PCDU 可選擇主控制器或備援控制器的

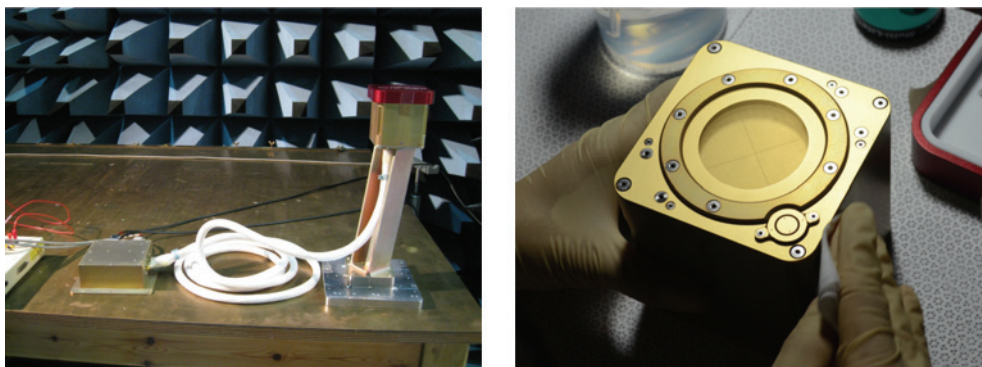


圖 1. 福衛五號的先進電離層探測儀。左圖為完整的儀器架構 (左側為科學酬載電子系統，右側為探測頭與腳架)，右圖為先進電離層探測儀之探測頭的正面。

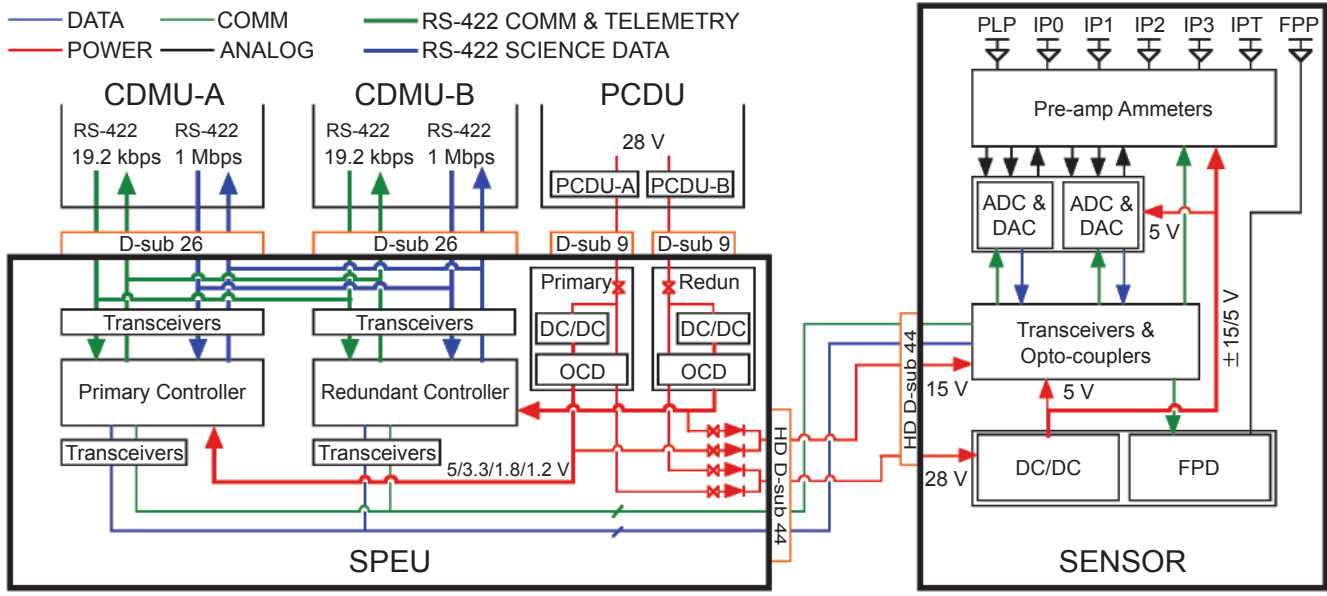


圖 2. 先進電離層探測儀功能圖，包含探測器與科學酬載電子系統。

電源切換。並且要求 PCDU-A 及 PCDU-B 的供電只能擇一，不能同時供電，否則 SPEU 無法正常運作。

先進電離層探測儀最獨特的設計是以單一探測器，達成量測多種電漿特性。但必須採分時方式，才可量測完整的電離層電漿特性 (見圖 3)，當扮演離子捕獲儀 (Ion Trap, IT)、離子流向儀 (Ion Drift Meter, IDM)、阻滯電位儀 (Retarding Potential Analyzer, RPA)、或平面式電漿探針 (Planar Langmuir Probe, PLP) 的角色，可分別量測離子密

度、離子速度、離子溫度、或電子溫度 (Lin et al. 2017)。放置在電漿環境中，面向衛星前衝方向量測離子流量，可估算離子密度；藉由調整內部篩網電壓所得的電流變化，可計算離子溫度與前衝速度；若量測收集平板上不同區塊的電流量，可計算離子流入角，進而得知離子橫向速度；改變電極的電壓所得的電流變化，可計算電子溫度。量測取樣率上，可採三種速率，如正常率 (128 Hz)、快速率 (1,024 Hz)、高速率 (8,192 Hz)。要降低科學資料量，可採用正常率。要量測電漿密度不規則體非常

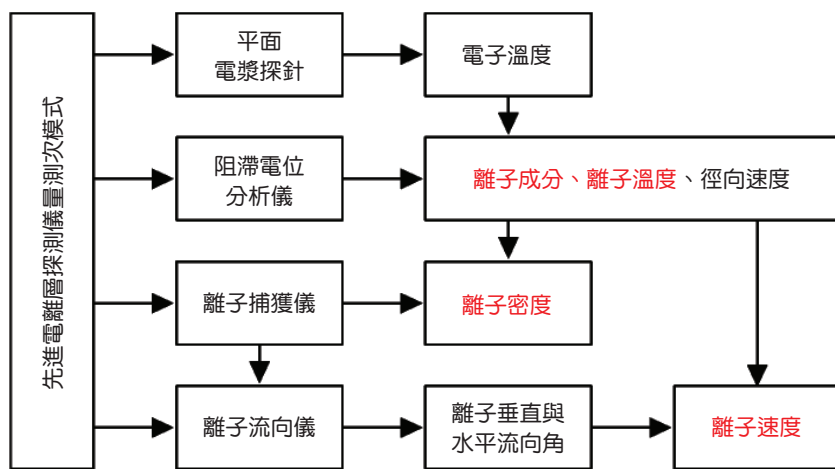


圖 3. 先進電離層探測儀量測次模式與可獲得的地球物理參數。

細微的結構，可採用高速率。例行觀測則採用快速率，既可獲得細微結構，由電流與電壓曲線推算電漿溫度又可獲致可靠度的評估。

先進電離層探測儀的探測器剖面如圖 4 所示。外部前方由浮動電位平板，平面電漿探針的電極，與入口開孔所構成。內部由四層極為細緻的純金電鑄篩網所構成，篩網上可施加適當的電壓來篩選不同能量的離子流。在最前端的是雙層入口網 (Entrance Dual Grids, G1)，通常施加浮動電壓，用以確保電漿不受到橫向電場，能平順地進入探測儀內部。浮動電壓由入口面板感應，所產生與外界電漿電位相似的浮動電位。其後的篩網為阻滯網 (Retarding Grid, G2)。由後端電路所產生的掃描電壓作用在其上，使得低能量的正離子無法繼續進探測儀的內部。接下來的篩網是壓制網 (Suppressor Grid, G3)，其電壓維持在 -15 伏特，以避免外界電子進入到收集平板，或避免太陽的紫外光照射至收集平板而使電子離開收集平板。收集平板 (collectors) 為鍍金的四象限收集平板，皆施加相同的浮動電位，但由互相獨立的電流計 (I_{P0} , I_{P1} , I_{P2} , I_{P3}) 所記錄。其上電流可由四個互相獨立的電流計所記錄，或是匯流至單一的電流計 (I_{PT}) 所記錄。當調整阻滯電位網的電位而獲致收集平板電流計讀數的改變，便是量測離子參數的電流與電壓曲線。平面電漿探針的電極上也可施加掃描電位，由該電極的電流計讀數，亦能得到電漿的電流與電壓曲線。

當採用 PLP 模式，PLP 的電極將施以掃描電位 (通常在 -10 V 到 +10 V 之間)。而 G2 將維持在

浮動電位，以避免干擾 PLP 的電流收集。此時記錄 PLP 所收集的電流，便可得到電漿的電流與電壓曲線。一旦 PLP 上的電壓略小於電漿電位時，PLP 便會開始排斥電子而轉為加速正離子。隨著 PLP 的電壓持續下降，可進入 PLP 的電子流會大幅的下降。電子的溫度則可由下降的斜率來決定。倘若斜率較平，則電子溫度較高。若斜率比較陡峭，則電子溫度較低。電子溫度 T_e 可由以下之方程式所決定：

$$\frac{\kappa T_e}{e} = \frac{1}{\frac{d}{dV}[\ln(I)]}$$

其中 I 為通過 PLP 的電子流，而 V 為施加在 PLP 的電壓， κ 為波茲曼常數， e 為電子電荷。

當採用 RPA 模式，PLP 將維持在浮動電位，以避免影響離子流量量測。G2 將施以掃描電位 (通常在 0 到 +10 V 之間，但其變化範圍可在 -10 V 到 +10 V 之間)。匯集 I_{P0} , I_{P1} , I_{P2} , 與 I_{P3} 的電流合量或是單獨由 I_{PT} 所量測的電流量，便可獲得離子的電流與電壓曲線。對於多種類的電漿流，離子電流一維理論公式可表為 (Whipple 1959)

$$I(V_M) = \sum_i I_i(V_M) = A \sum_i q_i n_{oi} U_i \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}(\beta_i F_i) + \frac{\exp[-(\beta_i F_i)^2]}{\sqrt{\pi} \beta_i U_i} \right] \right\}$$



圖 4. 先進電離層探測儀的探測器剖面圖。

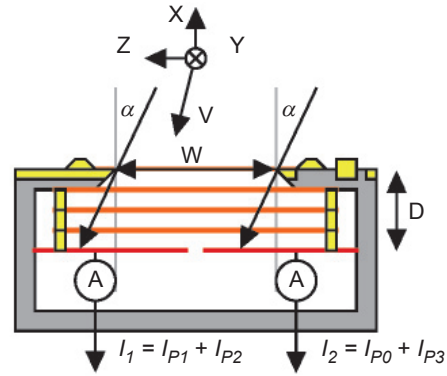
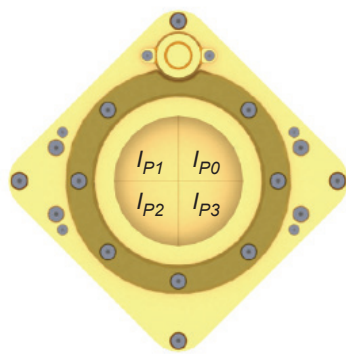


圖 5. 探測器的四象限電流收集板示意圖 (左)。量測離子來向角的示意圖 (右)。

與

$$\beta_i = \sqrt{\frac{M_i}{2\kappa T_i}}, F_i = U_i - \sqrt{\frac{2q_i V_M}{M_i}}$$

$$\beta_i F_i = \frac{U_i}{\sqrt{2\kappa T_i}} - \sqrt{\frac{q_i V_M}{\kappa T_i M_i}}$$

其中 $I(V_M)$ 是總離子電流、 $I_i(V_M)$ 是種類 i 的離子電流、 q_i 為種類 i 的離子電荷量、 M_i 為種類 i 的離子質量、 T_i 為種類 i 的離子溫度、 U_i 為種類 i 的離子前衝速度。離子電流的大小由流經路徑的最大電壓值 V_M 來決定。一旦最大電壓值確定後，由遠端的電漿到收集器之間，沿途的離子電流為一定值。這與我們當初所設定的穩定態流量一致。藉由分析離子的電流與電壓曲線，可以找出離子的溫度、成份、與前衝速度。當阻滯電位增加後，低動能的正離子便無法進入到 G2 而向外排出。而較高動能的正離子則有機會穿越 G2，而進入到收集平板。因此當阻滯電位愈高時，收集平板的電流愈小。

當採用 IDM 模式，PLP 與 G2 維持在浮動電位。若有必要減少較輕離子流入收集平板而影響量測結果，可施加約 3 V 的正電壓於阻滯網上。各象限收集板連接至四個各自獨立的電流計。透過相鄰電流計讀數的差值，可推導出離子的橫向流入角度 (如圖 5)。離子入射角的正切量可表示為 (Lin et al. 2017)

$$\tan \alpha = \alpha \frac{W}{2D} \cos \frac{\theta}{2}$$

$$\theta = \sin \theta + \left[1 - \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right) \right] \pi$$

其中 W 為探測器的入口寬度， D 為入口至收集平板的距離。離子入射角與離子流量的投影比例關係如圖 6，無論是方形開孔或是圓形開孔其曲線皆呈現其單調變化，證明皆可獲得唯一解。離子速度在儀器座標 Y 軸與 Z 軸的分量可表示為 $v_y = (-v_x) \tan \alpha_y$ 和 $v_z = (-v_x) \tan \alpha_z$ 。其中 v_x 可由 RPA 模式所

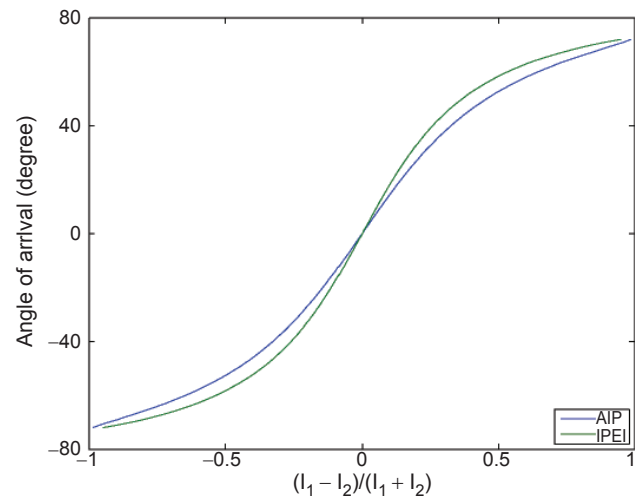


圖 6. 離子入射角 (縱軸) 與離子流量的投影 (橫軸) 比例關係。分別繪出圓形開孔福衛五號 AIP (藍色) 和方形開孔福衛一號 IPEI (綠色) 的曲線。

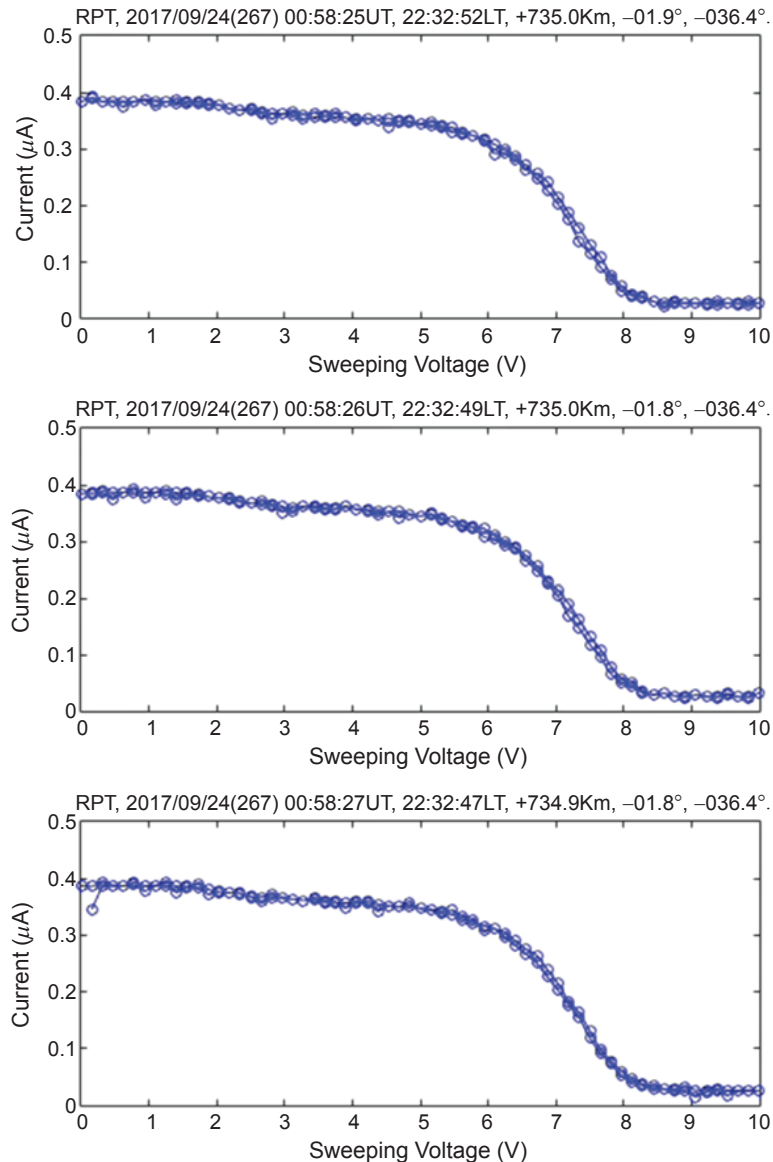


圖 7. RPA 次模式以 IPTON 的量測結果。電流的電壓上升曲線與電壓下降曲線幾乎一致，並無明顯的遲滯效應。證實與地面測試有相同的效果並符合預期，可獲得高精確的離子溫度與密度資料。

推得的 U 來求得，如此可獲得在儀器座標的離子速度。若要更進一步地獲得更精確的離子速度，則仍須透過電漿分布函數來詳細的計算。

當採用 IT 模式，PLP 與 G2 將維持在浮動電位或固定在某特定電位上。匯集 I_{p0} , I_{p1} , I_{p2} , 與 I_{p3} 的電流量或是單獨由 I_{pT} 所量測的電流量，配合 RPA 模式量測的 U ，便可獲得全離子密度。

隨著福衛五號的發射，先進電離層探測儀已在 2017/9/7 10:26 首次在軌開機。開機後儀器均為正常狀態，探測器內的初始溫度約為 -20°C ，SPEU 內的溫度大約為 0°C 。隨開機時間的增加，儀器內部溫度逐漸上升。隨後在下一個軌道施行第一次量測，目標為夜間緯度 $\pm 60^{\circ}$ 之間 (由南緯 60° 移動至北緯 60°) 的電離層電漿參數，預計量測軌道

數為 1 軌。量測前切換所有次模式，以間隔五秒的方式切換。測試完各次模式後，使用正常率以 PRI 模式量測 30 分鐘。第一次量測資料檔案大小為 615 KB，符合預期。直至今日 2017/10/31 為止，已完成在軌測試與各種功能驗證，如量測次模式切換 (PRI, RPA, IDM/IT)、量測速率切換 (正常、快速、高速)、電流計切換 (分電流計、總電流計)、浮動電位切換等。實際獲得資料量測時間為 10,250 分鐘，獲得資料量為 1,036,129 Kbytes。其中一項重要的結論，實測資料證實先進電離層探測儀的內部並未遭受污染 (見圖 7, Chen and Chao 2017)，將可獲得高精確的離子溫度與密度資料。過去在實驗室的電漿注入測試下 (Lin et al. 2017)，已證明先進電離層探測儀所使用純金一體成型網，可大幅減少污染效應，量測的準確度也相對提昇。而後在探空九號的飛行測試下，也證明先進電離層探測儀可達成各項量測功能，並且在 100 至 102 公里區間 (密度峰值出現在 101.6 公里高)，量測到散塊 E 層的電漿密度結構。然而從在軌測試用 PLP 模式量測電漿的電流與電壓曲線中，卻看到先進電離層探測

儀外部的 PLP 電極似乎出現明顯的污染效應。因此未來的科學觀測任務中，將著重在可量測正確的電離層離子參數上。

目前例行觀測的結果可見圖 8，在大尺度上顯示在低緯度區的電漿密度高，而中緯度區的電漿密度低，此結果符合科學家對電離層特性的理解。同時圖上顯示在南緯 5° 至北緯 15° 之間發現電漿泡 (plasma bubbles)。電漿泡是一種電離層電漿密度不規則體 (Basu et al. 1978)，其電漿密度相對於背景的電漿密度會較低。這類的電漿泡對於太空通訊會有嚴重的干擾 (Kelly et al. 2014)，也是研究太空天氣的重要課題。

此外，福衛五號具有每兩天重返的軌道設計，我們可將每軌量測的電漿參數，合成為全球的電漿參數分布。以離子密度為例 (見圖 9)，每兩天可合成出一張全球離子密度分布圖，圖中很明顯能看出大尺度的 Wave-4 離子密度空間分布的形態 (Immel et al. 2006)。此類型的全球電漿參數分布，可對於太空天氣或太空氣候研究短周期的空間分布變異，將會有極大的助益。

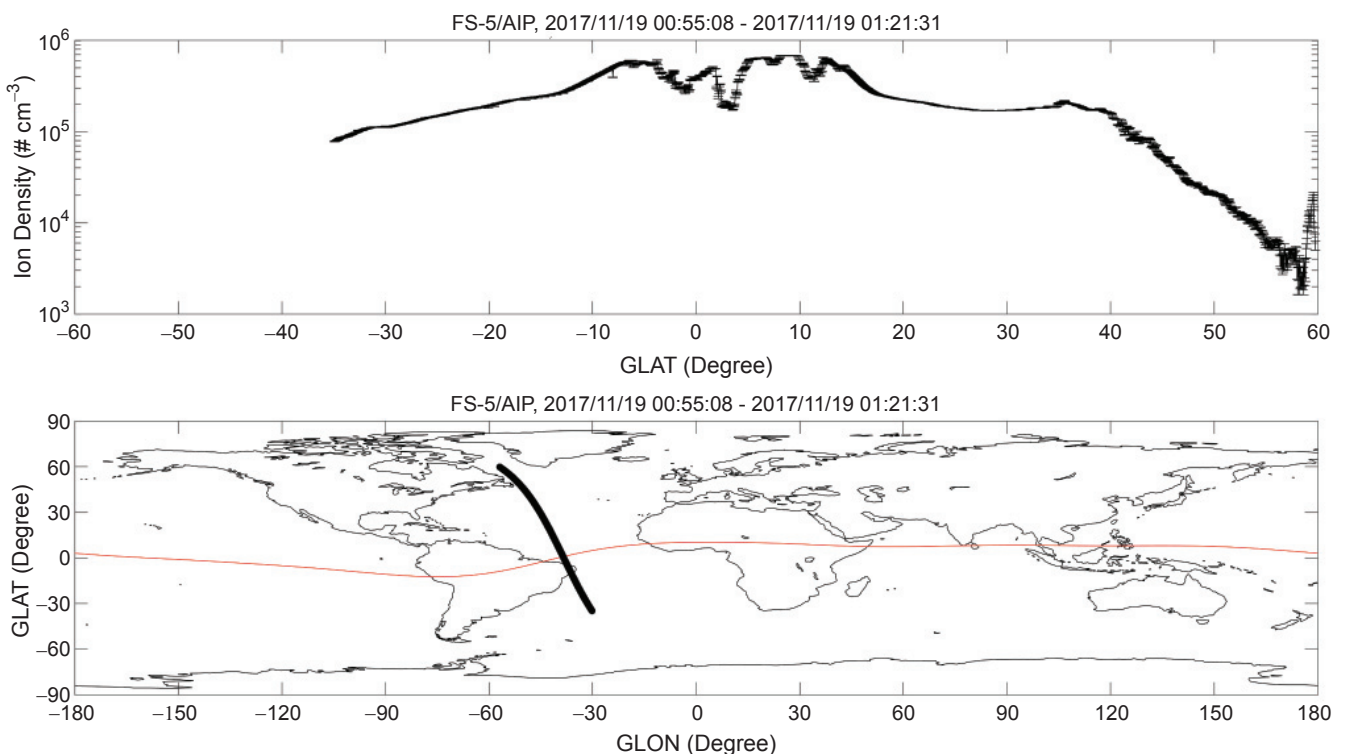


圖 8. 福衛五號先進電離層探測儀實地量測電離層赤道地區電漿密度不規則體。

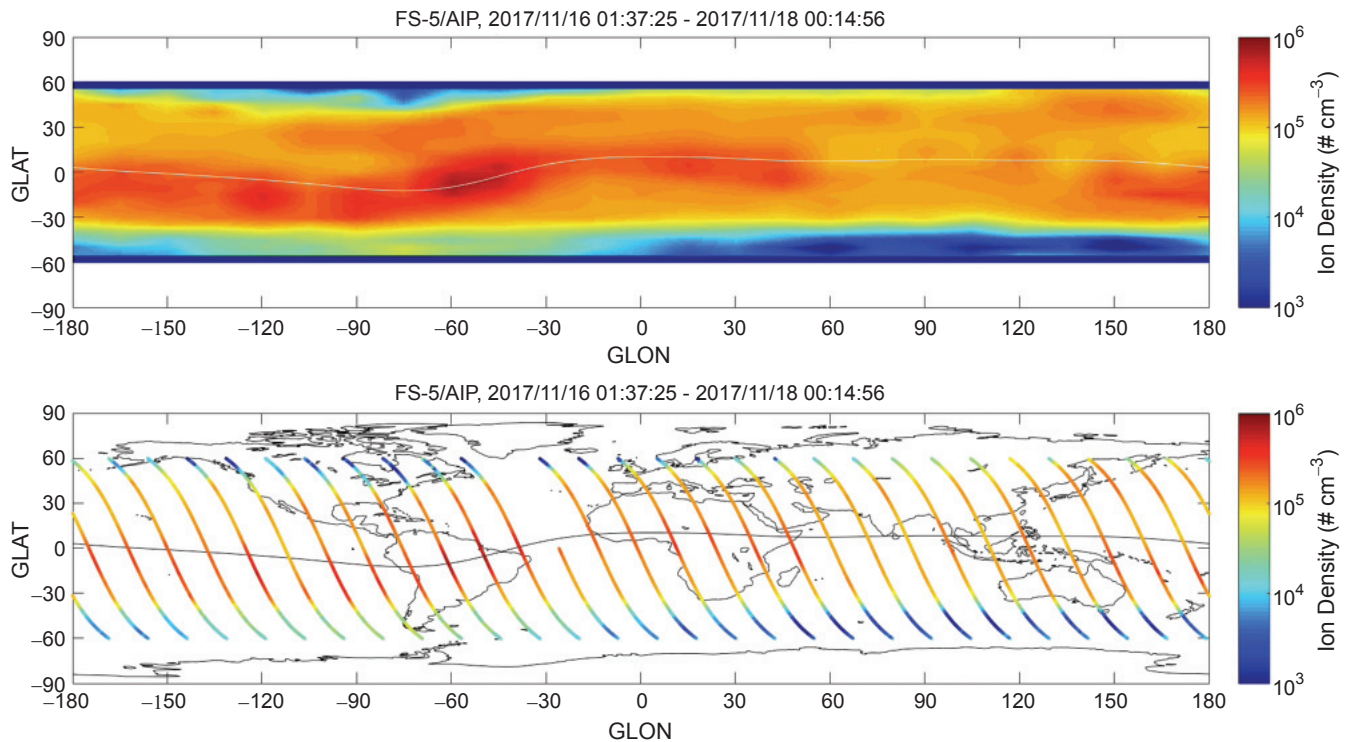


圖 9. 福衛五號先進電離層探測儀每兩天可合成一張全球電離層離子密度分布圖。

先進電離層探測儀研製計畫已在 2017 年 12 月順利完成結案，目前中大團隊正執行福衛五號先進電離層探測儀任務操作計畫，預計在兩年內完成任務操作、資料校驗分析、科學研究、推廣資料使用等工作。在任務操作方面，依照授權操作範圍，將例行的科學資料收集最大化與最佳化，以符合儀器的任務定義。可配合特殊科學觀測需求，提供客製化的資料服務。在資料校驗分析方面，預計在 2018 年底完成初步資料，並開始提供國內外研究者使用。之後將依照本團隊的校驗成果與使用者的反饋，完成資料第一階段的修訂並予以公開。在科學研究方面，將聚焦在太空天氣研究，協助電離層地震前兆研究。在推廣資料使用方面，將組成科學團隊，協助國內使用者善用此資源。參與各項重要的國際學術會議，推廣資料的使用。

參考文獻

1. Basu, S., K. M. Groves, Su. Basu, and P. J. Sultan, *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, **64**, 1,745 (2002).
2. Baker, D. and A. Chandran, *Science*, DOI: 10.1126/science.aau7631 (2018).

3. Lin, Z. W., C. K. Chao, J. Y. Liu, C. M. Huang, Y. H. Chu, C. L. Su, Y. C. Mao, and Y. S. Chang, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **28**, 99 (2017).
4. Chen, Y. W. and C. K. Chao, FORMOSAT-5 AIP Data Processing Software Test Report, FS5SPL-CDRL-1023, NSPO/NARL, 0100 (2017).
5. Whipple, E. C., Jr., *Proc. IRE*, **47** (11), 2023 (1959).
6. Basu, S., S. Basu, J. Aarons, J. P. McClure, and M. D. Cousins, *J. Geophys. Res.*, **83**, 4219 (1978).
7. Kelly, M. A., J. M. Comberiate, E. S. Miller, and L. J. Paxton, *Space Weather*, **12**, 601 (2014).
8. Immel, T. J., E. Sagawa, S. L. England, S. B. Henderson, M. E. Hagan, S. B. Mende, H. U. Frey, C. M. Swenson, and L. J. Paxton, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, (2006).



趙吉光先生為國立中央大學太空科學研究所博士，現為國立中央大學太空科學研究所副教授兼所長。

Chi-Kuang Chao received his Ph.D. in space science from National Central University. He is currently an associate professor/director in the Graduate Institute of Space Science at National Central University.