

小型電離層探測儀

Compact Ionospheric Probe

趙吉光

Chi-Kuang Chao

國立中央大學研製的小型電離層探測儀 (compact ionospheric probe, CIP) 是福爾摩沙衛星五號先進電離層探測儀 (advanced ionospheric probe, AIP) 的微型版，主要為搭載於立方衛星而設計，是全世界最輕巧可實地探測電離層電漿的科學酬載。質量約 433 公克、體積 0.7 U、消耗功率 3.48 W，可量測電離層離子特性，偵測造成太空通訊與導航失效的電漿密度不規則體，監控全球通訊品質與導航安全。

Compact ionospheric probe (CIP) is an all-in-one plasma sensor developed by National Central University and is capable of measuring ion concentration, velocity, and temperature like advanced ionospheric probe (AIP) onboard FORMOSAT-5 satellite. However, CIP has a smaller dimension (0.7 U), mass (433 g), and power consumption (3.48 W) than AIP and can be installed on CubeSat to monitor space communication and navigation outages caused by ionospheric plasma density irregularities.

一、小型電離層探測儀

自福爾摩沙衛星五號先進電離層探測儀 (advanced ionospheric probe, AIP) 於 2013 年研製完畢後，國立中央大學太空科學與工程學系的研發團隊便開始思考，如何有更多的飛行機會來精進科學酬載。隨後見證 AIP 成功執行科學任務，自 2017 年 9 月 7 日首度在軌開機，已長期執行任務超過 3 年，高於原先 2 年的設計壽命，為我國自製科學酬載首度達成最高技術等級。科學資料可獲率大於 90%，資料量超過 120 GB 資料，觀測時間超過 12,000 小時。並且該資料已於 2021 年 6 月正式上架至 NASA Space Physics Data Facility (SPDF) 與 Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb)，為臺灣自主研製酬載的量測資料首次登上該網站收藏，無償供全世界的太空科學家使用。讓國人對自行研製科學酬載更具信心，並且在實地量測電離層電漿領域獲得全世界的肯定。

在科技部與國家太空中心的經費支持下，我們推出小型電離層探測儀 (compact ionospheric probe, CIP，見圖 1)，以微型化、輕量化，能安裝在立方衛星為研製目標，但不減原先 AIP 的功能。主要是將 AIP 的控制器縮裝至探測器內，如此 CIP 的體積僅佔 0.7 U (亦即 100 mm × 100 mm × 70 mm)，質量為 433 公克，可符合立方衛星的安裝規範。其第一共振頻率在 170 Hz 以上，並且通過 4.5 G 正弦振動測試與 6.7 Grms 隨機振動測試，可符合多數運載火箭的發射條件。並且優化電流計的電路，將消耗功率下修至 3.48 瓦特。

CIP 可量測完整電離層電漿特性 (離子密度、離子速度、離子溫度)，偵測造成太空通訊與導航失效的電漿密度不規則體。藉由其結構分布與飄移速度，可預估各波段的通訊干擾時段與程度，有效地監測全球通訊品質與導航安全。由於全世界正如火如荼地推動低軌通訊衛星星系 (constellation)，如 Starlink、OneWeb、Telesat、Amazon 等，動輒以數千或數萬顆衛星而計。首先其衛星多位於電離層內，最適合實地量測太空電漿環境。再者衛星通訊的傳播路徑必定會通過電離層，通訊品質必定會受電離層影響。未來輕巧低功耗的 CIP 若能登上任一星系或是用立方衛星以低價建構自有星系，皆可大幅增加觀測涵蓋。



圖 1. 小型電離層探測儀。電路板由上而下分別是開口與篩網模組、類比前端處理單元、數位控制單元、電源管理單元。

CIP 的系統方塊圖可見圖 2，可分為開口與篩網模組 (aperture and meshes module, AMM)、類比前端處理單元 (analog preprocessing unit, APU)、數位控制單元 (digital control unit, DCU)、電源管理單元 (power management unit, PMU) 四個區塊。其中 APU、DCU、PMU 各放置在小於 100 mm × 100 mm 的印刷電路板上。

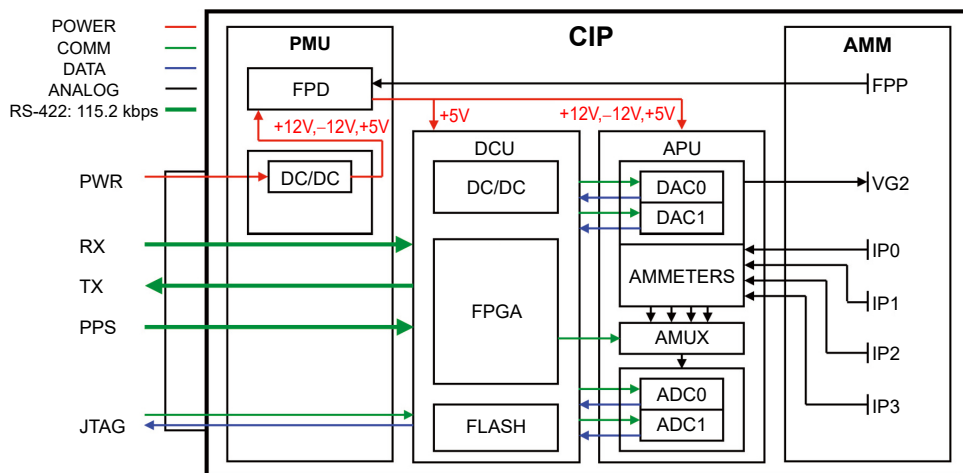


圖 2. 小型電離層探測儀的系統功能圖。

AMM 的開口平面為鍍金板，又稱浮動電位板 (floating potential plate, FPP)，與放置在 PMU 的浮動電位裝置 (floating potential device, FPD) 相連接。由於 FPP 暴露在外界電漿，當 FPP 與外界電漿達成電流平衡 (出入電流為零) 時，FPP 會呈現浮動電位。因浮動電位略低於電漿電位，常用來當作電漿量測的接地電位。AMM 內部由三組電鑄純金篩網所構成，分別是在最前端的雙層入口網 (entrance dual grids, G1)、中間的單層阻滯網 (retarding grid, G2)、最後的單層壓制網 (suppressor grid, G3)。底端為鍍金的四象限收集平板，皆分別聯通至後端 APU 的電流計。使用的電鑄純金篩網與 AIP 相同，可大幅減少污染效應，可量測精準的離子參數⁽¹⁾。

APU 有五組電流計，分別量測四象限收集平板的電流 (IP0、IP1、IP2、IP3) 外，也可使用類比多工器 (analog multiplexer, AMUX) 切換量測匯集的總電流 (IPT)。電流計會將電流轉換成電壓訊號，由 16-bit 的類比至數位轉換器 (analog to digital converter, ADC)，將輸入的電壓訊號轉換成數位訊號輸出。為能備援，設置兩組 ADC 可供切換使用。此外，APU 亦有兩組 12-bit 的數位至類比轉換器 (digital to analog converter, DAC)，將輸入的數位訊號轉換成電壓輸出。電壓輸出至單層阻滯網，用以阻擋低能量的正離子進入收集平板。同樣也有備援，可供切換使用。

DCU 採用 Xilinx Spartan-6 現場可程式邏輯閘陣列 (field programmable gate array, FPGA) 為核心，負責控制 CIP 所有積體電路晶片，佐以快閃記憶體 (flash)、時脈、電壓轉換 (DC/DC)，配合所有元件運作。使用四組預設的掃頻電壓數值，藉由序列週邊介面 (serial peripheral interface, SPI) 輸入至 APU 的 DAC，供調整阻滯網的掃頻電壓，也可透過 SPI，擷取 APU 的 ADC 數位資料。經由 FPGA 彙整各項資料組成科學封包後，透過 RS-422 傳遞給衛星端。FPGA 的程式存放在 FLASH 內，可使用 Joint Test Action Group 介面由外部燒錄 FLASH 或是 FPGA 本身。

PMU 接受衛星提供 +12 VDC 電源，電源先連接至 PMU 的 DC/DC 轉換器，再轉換為 CIP 所需的各式電壓用電，以隔絕 CIP 與衛星的地準位。PMU 具有過電流保護裝置，當發生持續 5 ms 的過電流時，保護裝置會切斷電源，並於 500 ms 後，再度啟動電源。PMU 安置有 FPD，維持與 FPP 相似的地準位，供應給 DCU 與 APU 使用。DCU 接收或傳送給衛星端的數位訊號，都會經過安置在 PMU 的光耦合器做訊號隔絕。

CIP 使用軟體定義 (software-defined) 的方式，扮演以下幾種儀器的角色 (如圖 3)，CIP 可依此得到環境電漿的各項物理參數。

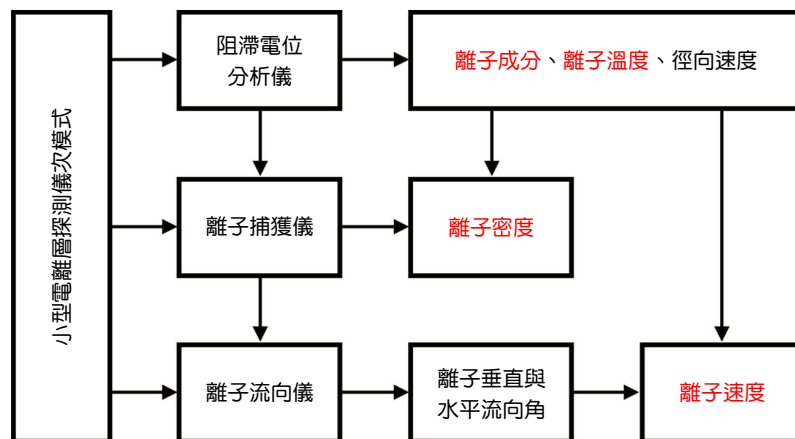


圖 3. 小型電離層探測儀的量測次模式與可獲得的地球物理參數。

- 阻滯電位分析儀 (retarding potential analyzer, RPA) 模式：固定入口網在浮動電位，施加掃頻電位於阻滯網，可得到四個離子收集平板的總電流 (IPT) 與電壓曲線 (I-V curve)，再由電流與電壓曲線適配得到離子成份比 (C_i)、離子溫度 (T_i)、前衝速度 (U_r)。
- 離子捕獲儀 (ion trap, IT) 模式：固定入口網與阻滯網在浮動電位，由 IPT 總電流量測，配合 RPA 模式的 C_i 與 U_r ，可得到總離子密度與各離子物種的密度 (N_i)。
- 離子流向儀 (ion drift meter, IDM) 模式：固定入口網與阻滯網在浮動電位，由 IP0、IP1、IP2、IP3 電流計的差值，得到離子流入探測儀水平方向的角度 (θ_H) 與垂直方向的角度 (θ_V)。配合 RPA 模式所獲得的 U_r ，可得到離子的速度向量。

與 AIP 不同之處，CIP 隱藏平面式電漿探針與高速率量測的功能。主要原因是考量安裝的衛星平台多為立方衛星，無論是立方衛星本體和環境電漿的接觸面積與下傳資料的頻寬皆有所限制所致，但可透過軟體更新，開啟這些功能，甚至可提升量測速率最高至 500 kHz。

由於 AIP 表現非常優異⁽²⁾，CIP 也因此獲得許多發射的機會。國立中央大學現已完成多台 CIP 飛行體與地面環境測試 (見圖 4)，並遞交給各團隊 (見圖 5)。例如，安裝在飛鼠號立方衛星⁽³⁾ 的 CIP，已在 2021 年 1 月 24 日於美國搭乘太空探索公司的獵鷹九號進入 550 公里高的太陽同步軌道，目前正等待地面下達指令開機量測電離層電漿特性。此外也已遞交給 INSPIRESat-1 立方衛星 (預計 2021 年 7 月初於印度發射至 500 公里 50° 傾角軌道) 與國家太空中心的多功能混合式探空火箭 (預計 2021 年 7 月底於澳洲發射)。此外，也承諾提供給 ARCADE 立方衛星 (預計 2022 年發射至 400 公里 5° 低傾角軌道)、PEARL 立方衛星 (預計 2022 年底發射至 550 公里太陽同步軌道)、SCION-X 立方衛星 (預計 2023 年發射) 執行科學任務。

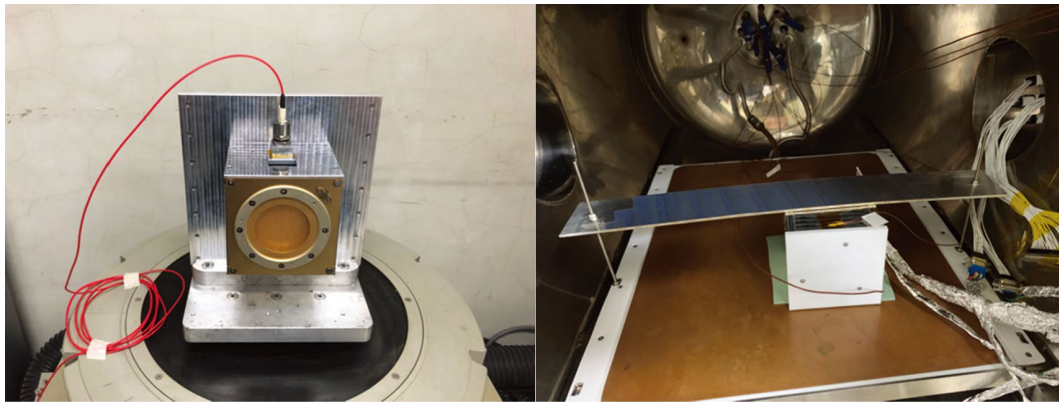


圖 4. 小型電離層探測儀在中大太空系的實驗室完成振動測試 (左圖) 與熱真空測試 (右圖)。

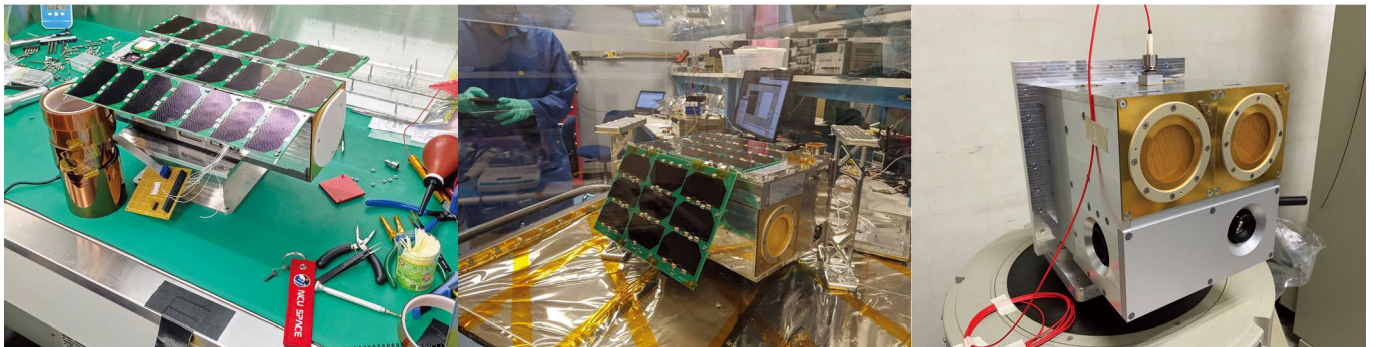


圖 5. 小型電離層探測儀飛行體安裝在飛鼠號 (左圖)、INSPIRESat-1 (中圖)、混合式探空火箭任務酬載電離層閃爍儀 (右圖)。

CIP 可用於電離層的基礎研究與應用，可研究大氣波動向上耦合現象，自對流層上傳至熱氣層的大氣潮汐，造成赤道地區 wave-number 4 (WN4) 電漿密度分布，探討熱氣層與電離層的交互作用。亦可偵測電離層電漿密度不規則體的小尺度結構，評估太空通訊干擾與導航失效的衝擊。

二、WN4 電漿密度分布

赤道地區 WN4 電漿密度分布，是近 15 年來太空科學界最受到矚目的議題之一，也讓科學家開始研究對流層的大氣潮汐如何傳播至熱氣層與電離層。首先由 IMAGE/FUV 的觀測結果 (使用 135.6 nm 頻段，也就是由 O^+ 與電子結合所發出的光)，發現 WN4 分布似乎不能以簡單的電場與磁場交互作用來解釋⁽⁴⁾，從春季赤道異常帶的全球分布。明顯可見在南美洲、非洲、東南亞、中太平洋上，赤道異常帶有明顯的增強⁽⁵⁾。過去太空科學界未曾仔細思考，對流層與電離層有如此明顯的連結。主要是認為即使低層大氣波動可向上傳播，其能量上達至電離層 F 層峰以下就消失殆盡。但此次觀測結果似乎可推測，非遷移的大氣潮汐 (non-migrating atmospheric tide) 可藉由白天的 E 域發動機效應，透過 $E \times B$ 的垂直飄移，改變赤道電離層 F 層的電漿密度分布，並認為熱帶地區的暴雨會持續地影響太空天氣。

藉由 TIME-GCM 模式 (thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model) 與 GSWM 模式 (global-scale wave model) 提供下邊界的波動條件，發現東向傳播經度波數 3 的非遷移日潮 (diurnal component of an eastward propagating tide with zonal wave number 3, DE3) 可造成 WN4 的分布⁽⁶⁾。DE3 主要是由熱帶地區的對流層，在深對流雲中雨滴形成的潛熱釋放而激盪出來，反映大氣每日週期性地吸收太陽輻射的變化。但會形成有較大幅度的擾動地區，主要是發生在陸地與海洋的分布區塊，例如南美洲、非洲、東南亞、中太平洋，有較多的對流區塊與雲帶形成的經度分布⁽⁷⁾。然而 WN4 也會隨季節而改變，由美國國防氣象衛星計畫 (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) F13 衛星自 1995-2005 的觀測資料顯示，在春秋兩季會出現 4 個峰值、夏季會出現 3 個峰值、冬季會出現 2 個峰值⁽⁸⁾。由福衛五號 AIP 的觀測 (見圖 6)，也可看出在 720 公里高觀測的離子密度分布呈現清晰的赤道 WN4 分布。未來 CIP 可接替 DMSP 系列衛星的長期觀測 (預計在 2023 年淘汰)，持續研究大氣波動向上耦合現象。

三、電漿密度不規則體

雖然早在 1970 年代，就已觀測到赤道地區的電漿密度不規則體，並且對此現象的統計結果已有概念，但確切出現成因至今仍不清楚，而且預測出現的能力仍乏善可陳。一般相信，重力波會初始化大幅度的電離層擾動，進而發展成電漿泡 (plasma bubbles)。而這些重力波的擾動，很多是由低層大氣向上傳播至高層大氣。電漿泡是一種電離層電漿密度不規則體⁽⁹⁾，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⁽¹⁰⁾，也是研究太空天氣的重要課題。這些電漿密度不規則體的結構複雜，從數公尺 (從雷達回波的波長) 到數百公尺 (衛星量測) 的結構，皆已發現。這些電漿密度不規則體嚴重地影響某些大範圍頻率的無線電波通訊，特別是在高頻 (HF) 與特高頻 (VHF) 的波段，有時電漿密度不規則體所產生的電離層閃爍，甚至會影響到超高頻 (UHF) 的通訊。無論是高頻通

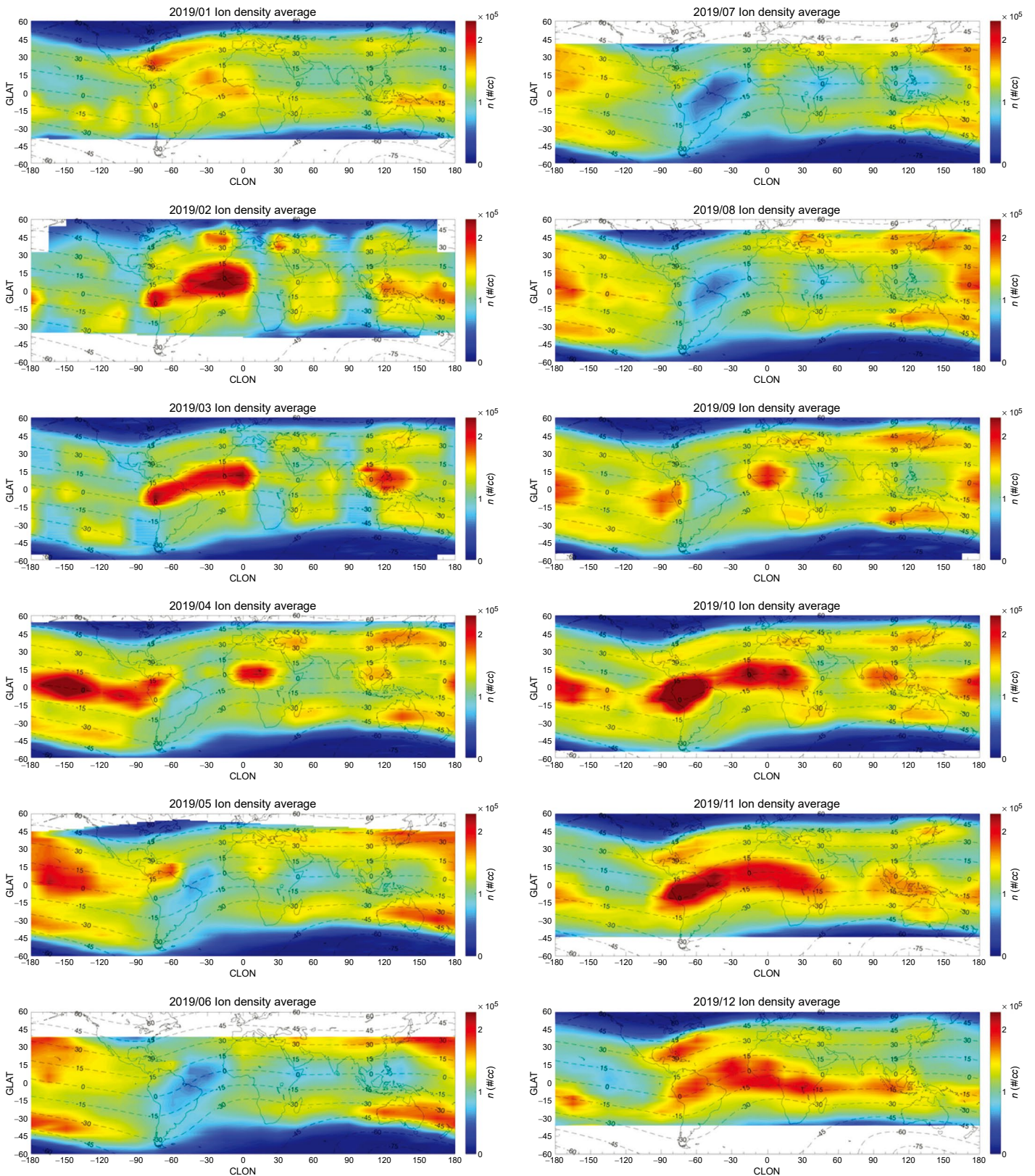


圖 6. 福衛五號 AIP 觀測 2019 年各月份的全球夜間電離層離子密度變化，有明顯的赤道 WN4 密度分布在南美洲、非洲、東南亞、中太平洋，也可看到明顯的中緯度電漿密度增強帶的出現。

訊或導航訊息，都會受到當地夜晚竄升的電漿密度不規則體影響，導致通訊干擾或導航失效，對於作戰的指管通資情監偵 (command, control, communications, computers, intelligence, surveillance, and reconnaissance, C4ISR) 皆有極大的衝擊。

CIP 是實地量測電漿密度不規則體的最好工具，可高速量測其複雜結構，進而評估太空通訊干擾與導航失效程度⁽¹¹⁾。以 AIP 為例，其觀測的電漿密度不規則體出現機率空間分布 (見圖 7) 與中華衛星一號電離層電漿電動效應儀 (ionospheric plasma and electrodynamics instrument) 觀測的結果類似⁽¹²⁾。目前自駕車 (如 Tesla、Google 等，目前正衝擊汽車保險業的收益，減輕車輛擁有者的保險支出) 與自駕客機 (如 Boeing、Airbus 等，預計航空業每年可減少 350 億美元的支出) 的發展，孕育出公分級的導航資訊需求。雖然現行民用 GNSS 接收機準確度已由 3–10 m 進步到 1–3 m (GPS III 衛星)，但 GNSS 訊號會受到電離層電漿不規則體的干擾而產生明顯的誤差，精確的導航資訊需求將凸顯新一代太空天氣現報與預報的重要性。而 CIP 星系的佈建將是發展太空天氣監測不可或缺最重要的利器，量測電離層電漿不規則體的三維結構與時序變化，將會是實地量測最重要的挑戰。

四、結論

CIP 在科技部與國家太空中心的支持下，已大幅縮減酬載的體積、質量、消耗功率，達成初步的研製目標，並在 2019 年獲得科技部未來科技突破獎的殊榮。也因此獲得許多發射的機會，現已完成 4 套 CIP 分別遞交給飛鼠號立方衛星、INSPIRESat-1 立方衛星、多功能混合式探空火箭任務酬載團隊。並且承諾將提供給 ARCADE 立方衛星、PEARL 立方衛星、SCION-X 立方衛星團隊執行科學任務。未來可與國際太空研究委員會 (Committee on Space Research) 合作⁽¹³⁾，經由小衛星星系工作小組 (Task Group on Establishing a Constellation of Small Satellites) 推廣使用 CIP，達成國際合作共同研究太空科學的目標。此外，還可以逐步與現役相似酬載交織共組多星系觀測，如福衛五號 AIP、福衛七號星系 IVM，取代美國空軍 DMSP 的角色，成為全世界最完整的電離層天氣和氣候監控系統，建構我國初始的自主太空形勢認知體系 (space situational awareness)。

參考文獻

1. Z. W. Lin, et al., *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **28**, 99 (2017).
2. C. K. Chao, S.-Y. Su, and C. H. Liu, *Adv. Space. Res.*, **65** (10), 10.1016/j.asr.2020.02.009 (2020).
3. Y. Duann, et al., *Adv. Space. Res.*, **66** (1), 10.1016/j.asr.2020.01.012 (2020).
4. E. Sagawa, T. J. Immel, H. U. Frey, and S. B. Mende, *J. Geophys. Res.*, **110**, A11302 (2005).
5. T. J. Immel, et al., *Geophys. Res. Lett.*, **33** (15), L15108 (2006).
6. M. E. Hagan, et al., *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L20109 (2007).
7. T. Tsuda, and S. Kato, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **67**, 43 (1989).
8. Z. Ren, et al., *Geophys. Res. Lett.*, **35** (5), L05108 (2008).
9. S. Basu, Su. Basu, J. Aarons, J. P. McClure, and M. D. Cousins, *J. Geophys. Res.*, **83**, 4219 (1978).
10. Kelly, M. A., J. M. Comberiate, E. S. Miller, and L. J. Paxton, *Space Weather*, **12**, 601 (2014).
11. Liu, Y. H., C. K. Chao, S.-Y. Su, and C. H. Liu, *Radio Sci.*, **47**, (2012).
12. Su, S. -Y., C. H. Liu, H. H. Ho, and C. K. Chao, *J. Geophys. Res.*, **111** (A6), 1 (2006).
13. D. Baker and A. Chandran, *Science*, **361** (6399), 207 (2018).

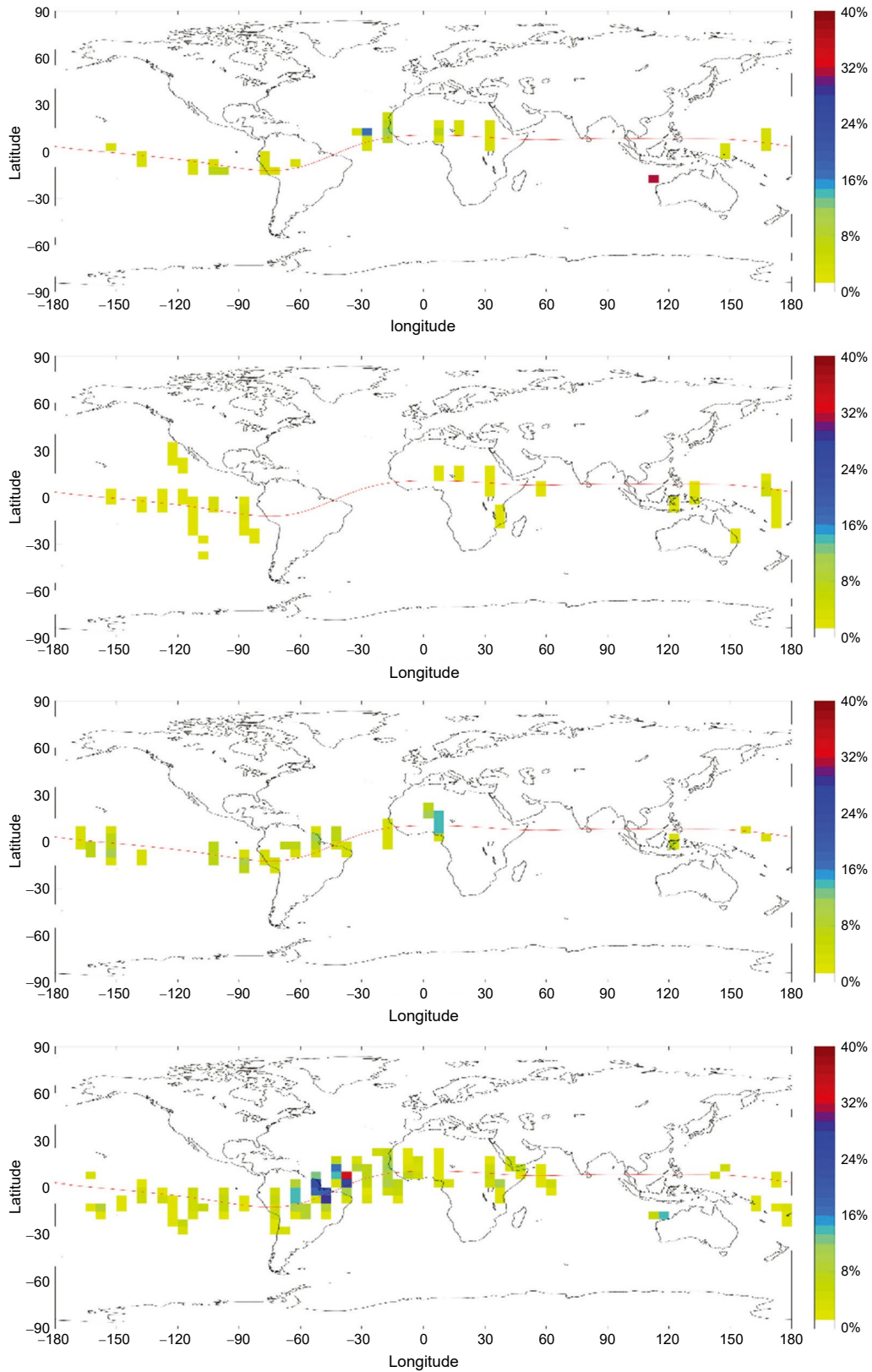


圖 7. 福衛五號量測全球電離層電漿密度不規則體的分布區域與出現機率，由上而下分別是 3 月春季、6 月夏季、9 月秋季、12 月冬季。最嚴重的干擾地區是從南美東部跨過大西洋到西非洲。雖然在太陽黑子減少時，干擾的機率會降低，但與過去福衛一號量測的結果維持相似的分佈。

作者簡介

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與工程學系副教授及兼任系主任。

Chi-Kuang Chao received his Ph.D. in Space Science from National Central University. He is currently an associate professor/chair in Department of Space Science and Engineering at National Central University.