

福爾摩沙衛星五號

FORMOSAT-5

曾世平

Shih-Ping Tseng

福爾摩沙衛星五號 (簡稱福衛五號)，是台灣第一顆自主發展之光學遙測衛星。其任務目標包含建立衛星本體自主發展能力及傳承設計，掌握核心元件設計與製造能量；建立光學遙測酬載儀器自主發展能力及傳承設計，發展關鍵元件與技術；落實衛星遙測技術與應用，延續服務福衛二號國內外遙測影像使用者族群；推廣太空科學任務，支援學術研究等。

FORMOSAT-5 (FS5) is the first space program that National Space Organization (NSPO) takes full responsibility for the complete satellite systems engineering development including payloads. FS5's success would significantly help NSPO in pursuing future space programs. FS5 mission goals include building up Taiwan's self-reliant space technology on optical Remote Sensing Instrument (RSI) and spacecraft; developing key components of the remote sensing satellite through integrating domestic technical capabilities; serving FORMOSAT-2 (FS2) global user community; promoting space science research.

一、前言

遙測衛星影像能真實的反應地表資訊，經由週期性對台灣陸地及附近區域的遙測作業，獲得遙測影像及科學資料，可提供相關單位進行研究與應用，滿足我國土地資源利用、環境短中長期監控、天然災害損失即時遙測作業等需求，因此福爾摩沙衛星五號規劃由我國自主發展對地解析度 2 米之光學遙測衛星，延續福衛二號發展經驗與建立的研發能力，以期建立衛星傳承設計及關鍵元件發展能量，繼續服務福衛二號民生使用者族群，推廣太空科學任務及支援學術研究。

福衛五號係「第二期國家太空科技發展長程計畫」所提出「遙測衛星計畫」中之第一枚衛星計

畫。此計畫之目標為：

- 建立衛星本體自主發展能力及傳承設計，掌握核心元件設計與製造能量。
- 建立光學遙測酬載儀器自主發展能力及傳承設計，發展關鍵元件與技術。
- 落實衛星遙測技術與應用，延續服務福衛二號國內外遙測影像使用者族群。
- 推廣太空科學任務，支援學術研究。

福衛五號計畫之系統可分太空、地面系統與發射載具等三部分。太空系統包括衛星本體、光學遙測酬載儀器及科學酬載儀器；地面系統包含遙傳追蹤指令 (S-Band TT&C) 地面站、X 頻段天線系統 (X-Band Antenna System, XAS) 遙測影像資料接收站、海外支援追蹤站 (Remote TT&C Station,

RTS)、衛星操控中心 (Satellite Operations and Control center, SOCC)，與影像處理中心 (Image Processing Center, IPC)；發射載具為美國的 Falcon-9，福衛五號衛星計畫系統架構如圖 1 所示。

雖然遙測衛星主要應用在民生及科學上，但由於其設備元件有一定的敏感性，許多關鍵組件不易從國外取得，因此太空中心團隊決心自主發展福衛五號衛星，其遙測酬載及關鍵元件，從設計、製造到組裝，都由國內團隊自主開發完成，這是我國極具指標性及挑戰性的自主研發計畫，成功地向世界證明我國自主的太空科技能量。

福衛五號衛星是一顆重達 450 公斤的光學遙測衛星 (圖 2，其特性如表 1)，屬於地球觀測衛星的一種，運行軌道為七百二十公里，傾角 98.28°，約 99 分鐘繞行地球一週，具有每兩日再訪特性之太陽同步圓形軌道。福衛五號因為軌道的特性，搭配本身可以在飛行方向左右各轉動 45 度角，所以福衛五號具有全球影像涵蓋的能力。福衛五號之主要光學遙測酬載，可提供 2 米解析度的全色 (panchromatic) 和 4 米解析度的多波譜 (multi-

spectral) 彩色影像。與福衛二號類似，主要酬載之波段 (spectral band) 仍然為可見光及近紅外光之範圍，包含一全色波段 (12,000 個像素) 及四個彩色波段 (每個波段 6,000 個像素)，採用互補式金屬氧化層半導體 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) 技術發展而成，所提供的高解析度光學影像將應用於政府施政、防災勘災、國土安全、環境監控及學術研究等。另外，有一個福衛五號搭載的科學酬載—先進電離層探測儀 (Advanced Ionospheric Probe, AIP)，是國內自製的單一探測儀，可以量測軌道上離子密度、離子速度、離子溫度、及電子溫度等參數，係由中央大學研發團隊開發完成。福衛五號衛星於 2017 年 8 月 25 日，由 SpaceX 公司之獵鷹九號 (Falcon 9) 火箭順利發射入軌 (如圖 3)。

二、福衛五號搭載酬載

福衛五號衛星搭載了兩個酬載，主要的是執行遙測任務的光學遙測酬載及執行太空科學任務之科

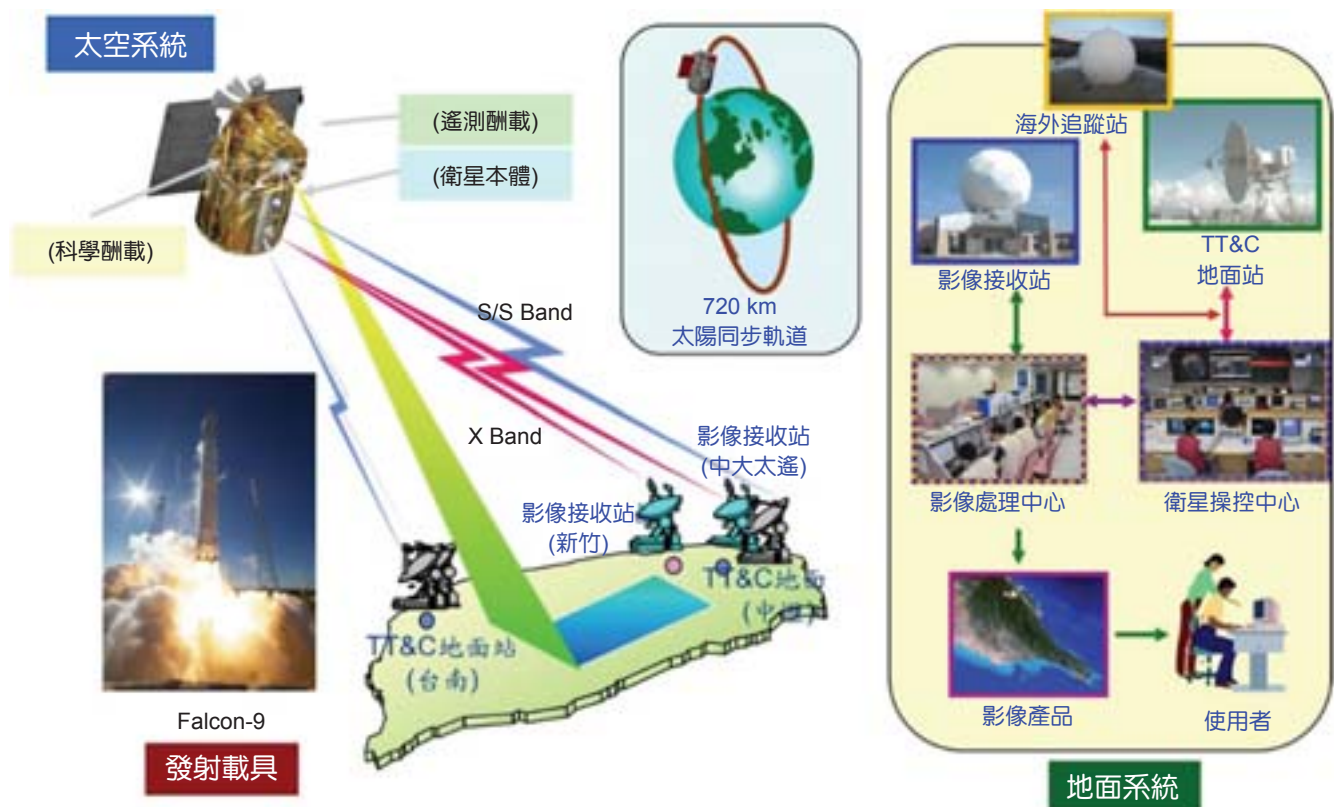


圖 1. 福衛五號系統架構。

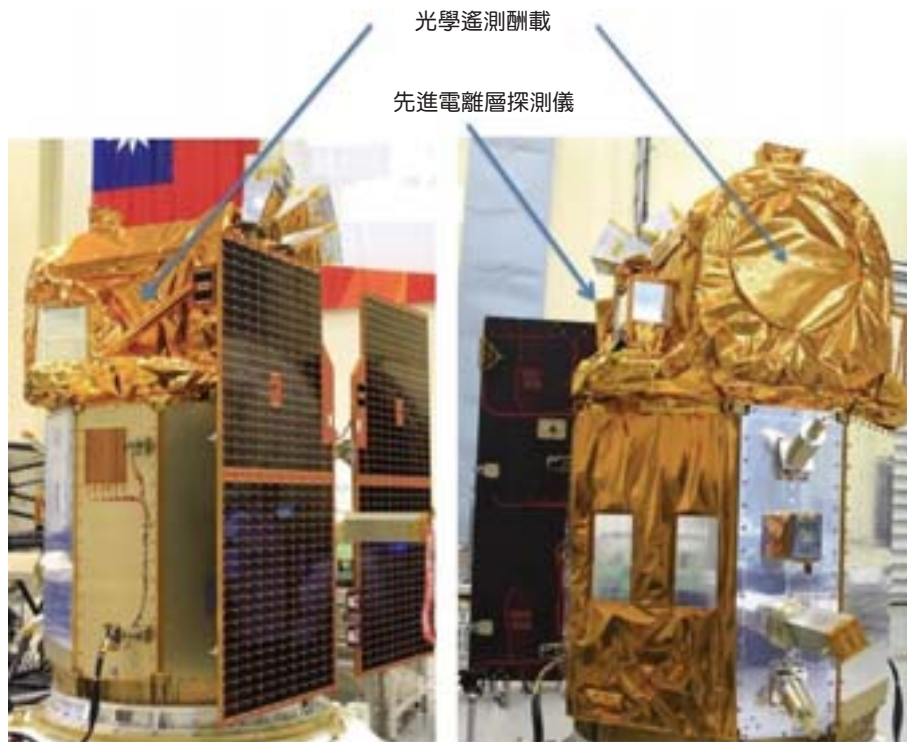


圖 2. 福衛五號衛星。

表 1. 福衛五號衛星特性。

項目	特性說明
重量	約 450 公斤(含酬載及燃料)
形狀尺寸	八角柱形，高約 2.4 公尺，外徑約 1.6 公尺
軌道	高度 720 公里，太陽同步圓形軌道
取像重複性	每兩日再訪 1 次
影像資料下傳速率	150 M 位元／秒
取像範圍	正對地表方向，前後及左右各 45°
繞行地球一週時間	約 99 分鐘
任務壽命	5 年
姿態指向精度	≤ 2 公里(正視地球)
姿態指向認知	≤ 390 m (無地面控制點)
姿態機動性	Roll : ≥ 24°/分; Pitch : ≥ 24°/分; Yaw : ≥ 7°/分
對地解析度	全色 : 2 米 (正視地球)、彩色 : 4 米 (正視地球)
刈幅	24 公里 (正視地球)

學酬載。

福衛五號光學遙測酬載是由遙測取像儀及電子單元組成，由太空中心與同樣隸屬於國家實驗研究院的儀器科技研究中心結合國內技術能量自主開發

而成。取像儀的光學設計採用折反射式望遠鏡的光學架構 (Ritchey-Chrétien Cassegrain telescope)，此架構包含兩片非球面反射鏡與一組由四片透鏡所組成的修正透鏡組。光學系統當中最大的鏡片直徑

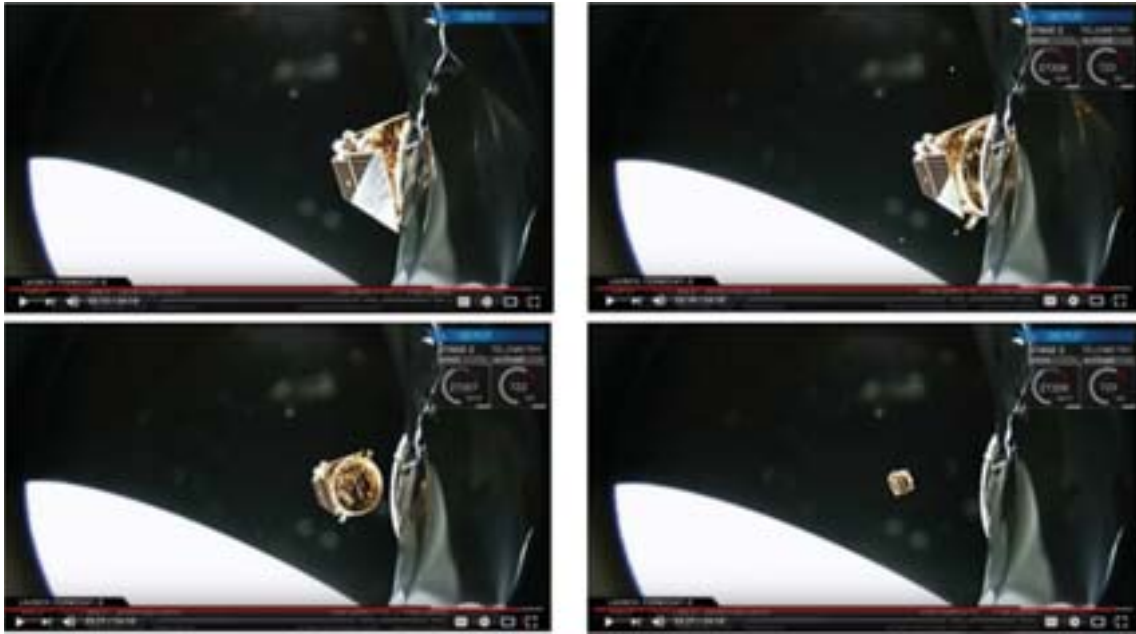


圖 3. 獵鷹 9 號火箭與福衛五號成功分離。

有 45 公分，是使用國外購入之 ZERODUR 低溫度係數之光學材料由儀器科技研究中心使用特殊拋光設備研製而成，它的特性是受溫度影響之變形量極低；同時為了建立高強度、低質量且不易受溫度影響而變形的光學結構體，於是選用了複合材料當素材，包括複合材料管件及複合材料蒙皮的蜂巢板 (honeycomb panel)。並且在成品的保存期間維持低濕度環境以避免吸收太多濕氣而變形；影像感測器則採用互補式金屬氧化層半導體 (CMOS) 技術於國內自行發展而成，全色波段的畫素尺寸為 $10\ \mu\text{m}$ ，

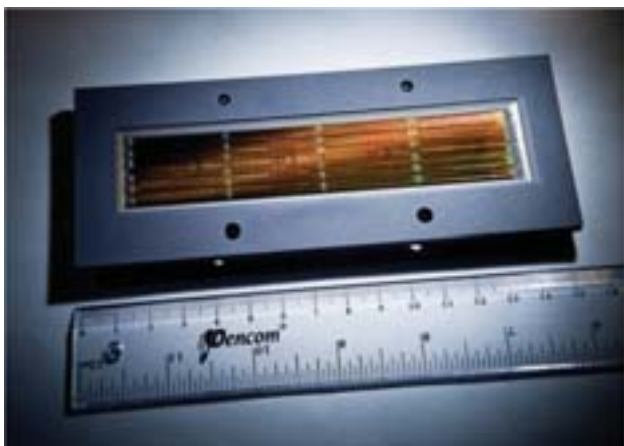


圖 4. CMOS 影像感測器。

其他四個多波譜波段的畫素尺寸為 $20\ \mu\text{m}$ (如圖 4 所示)。電子單元的功能則是用來控制遙測酬載的運作，包括：溫度控制、提供影像感測器電力、照相、影像壓縮和存取。它能精準控制光學遙測酬載在設定的溫度內，對高速影像進行即時的資料處理，並且提供大容量的影像資料儲存空間。

福衛五號除了擁有重要的任務酬載「光學遙測酬載」外，還搭載一具精巧的科學酬載「先進電離層探測儀」，是由國立中央大學太空科學研究所負責研製，為國內自製科學酬載首度登上福爾摩沙系列衛星，也是國內自製的單一探測儀，實現多合一的電漿量測儀器，可量測離子密度、離子速度、離子溫度、電子溫度等電離層相關參數。由於福衛五號的飛行高度約距地表 720 公里，正處於電離層頂部的位址，「先進電離層探測儀」在小尺度上可量測「電漿不規則體」的空間分布與暫態變化，在大尺度上可求得電漿參數隨經度、緯度、季節與太陽活動的變化，這些資料有助於改善太空天氣預報與提升全球通訊品質。先進電離層探測儀的「最高取樣率」可達每秒 8,192 次，當衛星在空中高速飛行時，量測電離層「電漿不規則體」的空間解析度可由公尺級邁向公分級，而可量測其細微結構，有助於對於電離層電漿不規則體的特性研究。

三、衛星本體

福衛五號衛星本體是由下列次系統組成：

- 結構及機構次系統 (Structure & Mechanisms Subsystem, SMS)：簡稱結構次系統，如同衛星骨架承載所有衛星元件以及儀器設備，主要包括衛星本體之骨幹，板面和各種形式之支撐體，以及太陽能板展開機構等。最重要的是設計須符合發射載具所產生的發射外力環境，包含音震環境、振動環境以及分離爆震環境。
- 姿態控制次系統 (Attitude Determination & Control Subsystem, ADCS)：姿態控制次系統提供衛星與發射載具分離後至任務全程，各種操作模式下之姿態控制。主要是以各種感測器，包括陀螺儀、太陽感測儀、星像儀、磁力計等，用以感應太空環境參數的輸入，搭配內建於飛行軟體的姿態估測法以導出衛星在太空中的相對姿態，再利用反應輪與磁力棒可以讓衛星在各種情況都維持至所需要的姿態。姿態控制次系統在正常拍照模式下須保持精確與穩定的衛星姿態，以及在安全模式下使太陽能板與太陽保持在一定的夾角之內以確保衛星能夠收到足夠的太陽能，產生足夠的電力。
- 熱控次系統 (Thermal Control Subsystem, TCS)：維持衛星內所有衛星元件以及儀器設備所需的溫度，福衛五號的熱控制設計主要是利用各種主被動熱控元件進行，包括利用多層絕熱材料 (Multi-Layer Insulator, MLI) 隔絕衛星內部與太空環境的熱輻射，同時利用散熱片將衛星元件的熱能輻射至外太空環境，此外亦利用溫度感應器 (thermistor) 及加熱片 (heater) 用以維持衛星元件以及儀器設備所需的溫度。
- 推進次系統 (Reaction Control Subsystem, RCS)：負責福衛五號推進次系統所使用之燃料為高純度氮氣，使用過程中無化學反應，燃料本身也未具毒性，相對傳統的聯胺燃料而言是相對安全與好操作。構成元件包括一個儲存氮氣的壓力桶、一個壓力調節閥、一組高低壓感測器、二個球閥、二個過濾器、四個噴嘴，負責提供衛星在任務操作期間軌道修正與任務軌道維持。

- 電力次系統 (Electrical Power Subsystem, EPS)：負責提供衛星上所有元件以及儀器之電力需求及各項高低電壓保護。其元件包括兩片展開的太陽電能板、一組衛星電池與一套電力控制與配置單元 (Power Control and Distribution Unit, PCDU)。
- 遙傳／追蹤／通信次系統 (Telemetry, Tracking & Communication Subsystem, TT&C)：擔任衛星與地面站之間傳送與接收電訊的角色，主要元件包括天線、微波發射與接收機以及微波組件等。衛星指令與遙傳資料由 S 頻段之頻率傳輸，需要較高傳輸速率及頻寬之影像資料，則由 X 頻段來負責傳輸。
- 指令與資料處理次系統 (Command & Data Handling Subsystem, C&DH)：負責接收、處理來自地面操控中心之上傳指令，以管控衛星組態、調整衛星姿態、執行拍攝影像任務和科學酬載實驗；同時亦執行飛行軟體之電力、熱控、姿態控制功能，收集衛星狀態資料下傳地面站，以研判衛星健康狀況。主要元件為衛星電腦 (On Board Computer, OBC)。其核心處理器可達到 15MIPS 以上的速度、即時時鐘可與 GPS 訊號對時、並提供衛星遙傳資料之調變與編碼、衛星指令解碼，以及科學酬載資料之儲存等功能。
- 飛行軟體次系統 (Flight Software Subsystem, FSS)：福衛五號為國人首次自主發展之高解析度與高機動性遙測衛星控制軟體，經由完全掌握衛星系統與飛行元件控制技術，及飛行軟體整套開發與驗證作業，完成一套我國可傳承之衛星軟體平台架構，負責提供衛星包含測試、發射、安全操作、正常操作與軌道轉換等操作模式，同時具備自動或是地面操作方式在這些模式轉換的功能，以及依各次系統之軟體需求提供完備之軟體功能，搭配指令與資料處理次系統執行衛星完整的運作。

四、福衛五號整合與測試

福衛五號衛星在所有衛星元件都製作完成後，於國家太空中心之整合測試廠房中進行機械與電機組裝，衛星在完成組裝後則經歷包括太陽能板展開

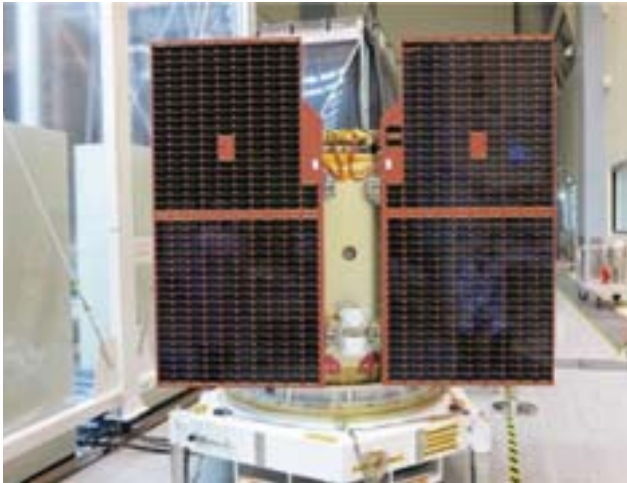


圖 5. 太陽能板展開測試。

測試、電磁相容測試、熱真空測試以及發射環境動態測試等各項環境測試以確保衛星可以通過嚴苛的發射環境，並且可在高低溫變化劇烈且真空的環境中正常工作。且在每次環境測試期間，都會重複的執行衛星功能與性能驗證測試以確保衛星發射後可於軌道上正常運作。

太陽能板展開測試 (圖 5)：福衛五號每片太陽能板上有三個點由太陽能板展開機構固定，兩片太陽能板共有六個固定點，每片三個太陽能板展開機構釋放後，太陽能板由絞鍊彈簧頂開至預設位置，展開機構的觸發由電力控制與配置單元啟動。太陽能板展開後，除目試檢查太陽能板與相關衛星線束沒有損傷外，另執行太陽能板照光測試，檢查每片太陽能板各 19 串太陽電池 (兩片太陽能板共 38 串) 功能，利用大功率探照燈照射在太陽電池串上產生的電壓差異，檢查所有 38 串太陽電池之通路，以確認太陽能板在衛星與火箭分離後，可依照飛行軟體自動程序完全展開至預設固定位置，且展開過程的震動不會造成太陽電池的損傷。

電磁相容測試 (圖 6)：為了確保衛星在太空軌道運作時，各個元件及次系統之間不會互相干擾，在地面進行整合測試時必須通過衛星層級的電磁相容 (Electromagnetic Compatibility, EMC) 測試。此電磁相容測試分兩種：導電性 (conductive) 測試與輻射性 (radiative) 測試。而此兩種測試又各分為發射性 (emission) 測試與耐受性 (susceptibility) 測

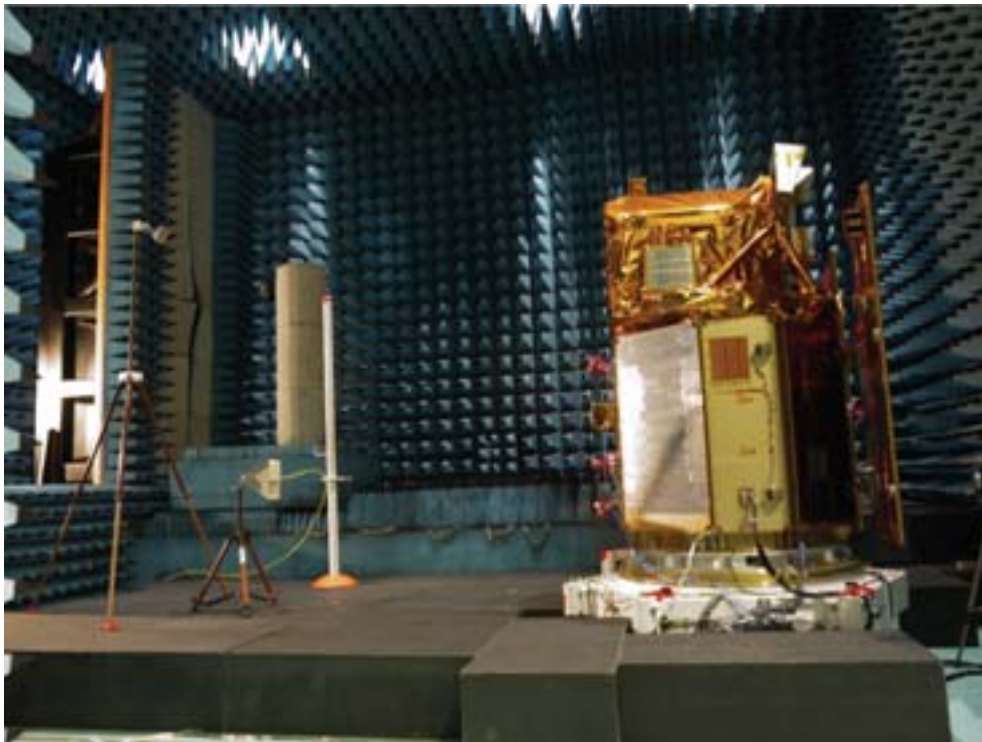


圖 6. 電磁相容測試。

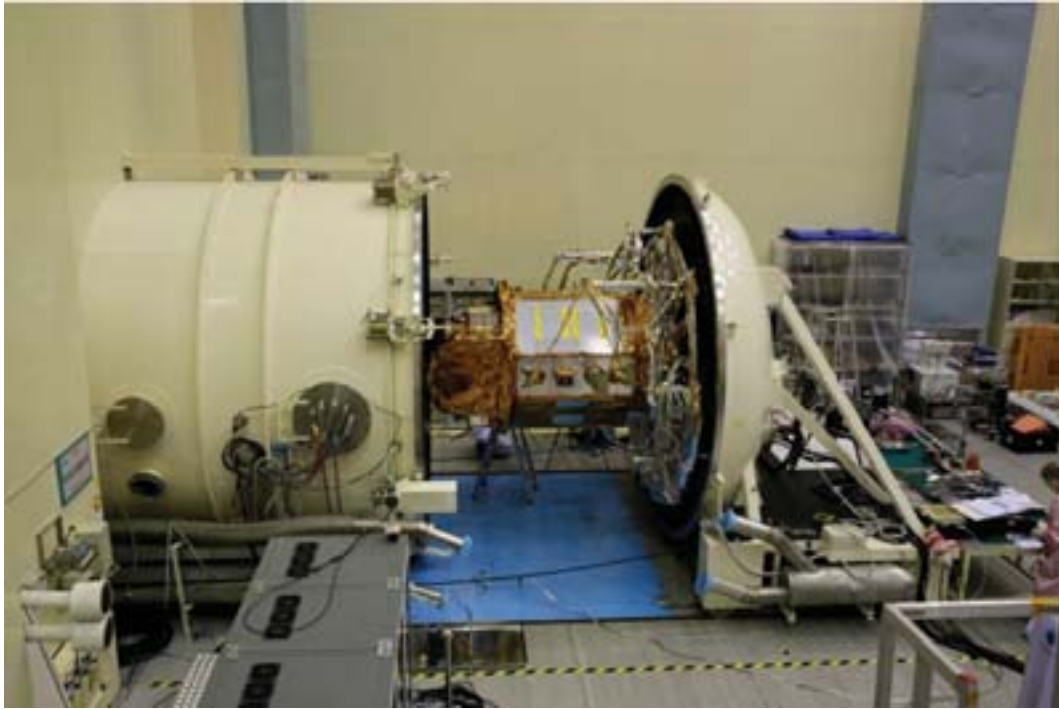


圖 7. 熱真空測試。

試。發射性測試在測試元件運作時所發射出來的雜訊強度；耐受性測試則在測試元件能正常運作而不受外界干擾的耐受程度。

熱真空測試 (圖 7)：熱真空測試除了可提供衛星系統在模擬外太空操作軌道環境下，驗證衛星的功能，也驗證衛星熱控次系統的溫控功能設計。熱真空測試包括熱循環及熱平衡測試，熱循環測試係用來模擬衛星在軌道運行時所面對的高真空及溫度變化大的外太空環境，測試衛星在該環境下的功能及系統組裝之工藝技術。熱平衡測試則是用來驗證及修正衛星熱控系統的設計與分析模型，及加熱片的溫控功能。

發射環境動態測試－含振動測試 (圖 8)、音震測試 (圖 9) 與分離爆震測試 (圖 10)：在火箭點火發射及升空過程中，福衛五號衛星會承受運載火箭引起的音震與振動外力，衛星與火箭分離時則會承受分離爆震外力，發射環境動態測試即用以驗證福衛五號衛星的設計製造及系統組裝之工藝具有承受火箭音震與振動外力，以及分離爆震外力的能力。

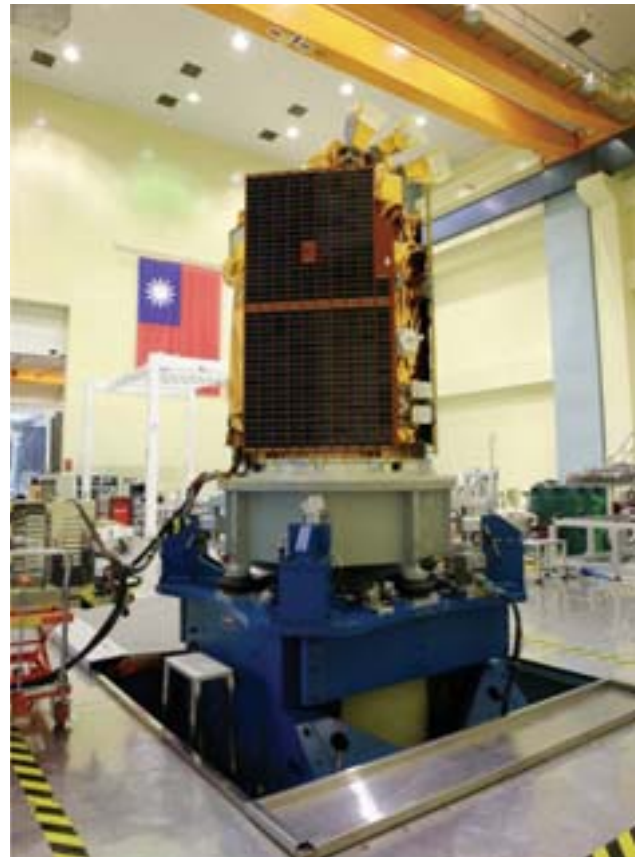


圖 8. 振動測試。



圖 9. 音震測試。



圖 10. 分離爆震測試。

五、福衛五號現況

國家太空中心任務操作團隊自福衛五號入軌迄今已完成衛星各次系統與酬載之在軌測試，並成功執行衛星各種功能及操作模式的驗證工作，並且於今年初藉由衛星推進次系統所攜帶的燃料將其調整至最佳之任務軌道，目前正常運作於 720 公里高之任務軌道，雙酬載正常運作中。其中遙測酬載於去年九月八日已拍攝及下傳第一張影像資料，並已完成對台灣全島取像 (圖 11)，截至今年六月底為止，福衛五號已成功取像累積超過 6500 組全色／

彩色影像，地點涵蓋全球各地。為了調校取像儀的離焦問題，取像儀已調整至最佳操作溫度取像，並以利用銳利邊緣重建 (sharp edge construction) 數值方法找出模糊及光斑之核函數 (kernel) (對應光學上之點擴散函數，point spread function, PSF)，再以此核函數對原圖進行反迴旋 (deconvolution) 運算，進行還原拍攝區地表影像已有初步成效，並持續優化中，如圖 12 及圖 13 之處理前與處理後之比較⁽¹⁾。目前影像的清晰度已可符合防救災、農林漁牧的土地測量與都市計畫等民生需求。



圖 11. 福衛五號拍攝之台灣全圖。



圖 12. 9/8/2017 舊金山彩色影像處理前後比較。

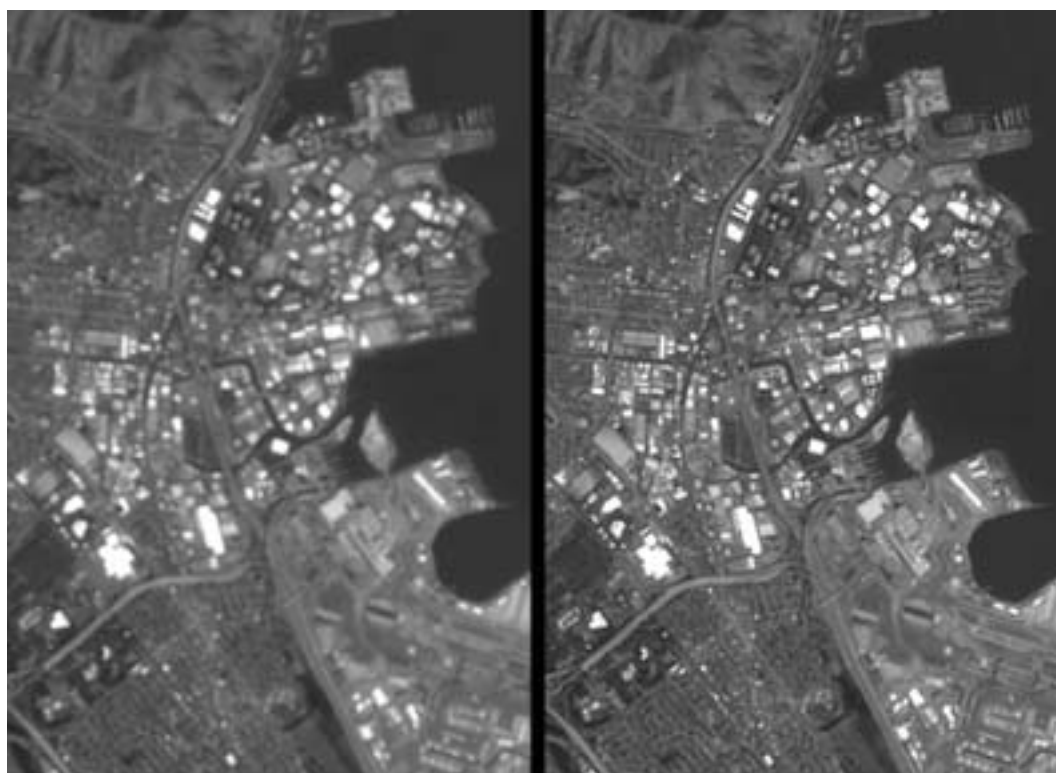


圖 13. 10/7/2017 舊金山機場全色態影像處理前後比較。

六、結論

福爾摩沙衛星五號，2017年8月25日在美國范登堡基地成功發射，歷經近半年的元件調校、軌道操作及影像處理，已成功執行全球電離層觀測及遙測取像任務，衛星遙測影像品質也符合各項預定需求。目前福衛五號運行於高度720公里的太陽同步軌道，約99分鐘繞行地球一週，每兩日通過台灣一次，所提供的高解析度光學影像可涵蓋全球，將應用於政府施政、防災勘災、國土安全、環境監控及學術研究等。此外，福衛五號搭載的「先進電離層探測儀」科學酬載，可進行電離層觀測及地震前兆研究，目前每兩天可合成一張全球電離層電漿參數分布圖，可有效地監控全球電離層的變異性。

參考文獻

1. FS5-RPT-0189, “福爾摩沙衛星五號遙測取像專案小組遙測影像品質改善結案報告”, 國家太空中心.



曾世平先生為國立台灣大學電機研究所碩士，現為國家實驗研究院國家太空中心正工程師。

Shih-Ping Tseng received his M.S. in electrical engineering from National Taiwan University. He is currently a senior engineer at National Space Organization, NARLabs.