

微微衛星酬載之微型光譜儀

Microspectrometer of the Payload for Picosatellite

黃吉宏、吳宗達、黃明鴻

Chi-Hung Hwang, Tzong-Dar Wu, Ming-Hung Huang

微微衛星係指重量小於 1 公斤以下之衛星。國家實驗研究院國家太空計畫室 (NSPO) 為開發及測試國內潛在之國產太空元件，並驗證國內衛星相關設計之整測資源，決定自行發展微微衛星。微微衛星在設計上採用史丹佛與 Cal Poly 所共同發展的 CubeSat 架構，主要計畫目標以測試國內整合並測試國產元件與系統為主軸，發展重量小於 1 公斤，外觀幾何尺寸為 10 cm^3 之微微衛星。本文將就國科會精密儀器發展中心所發展之微微衛星用微型光學酬載計畫進行說明。

The YamSat is the first CubeSat developed in Taiwan since early 2001. The program is managed by the National Space Program Office (NSPO), incorporated with Precision Instrument Development Center (PIDC) and other companies. The first objective of the YamSat is to qualify in space the components and technology developed in Taiwan. The second is to provide short message service through amateur radio communication frequency. And the third is to demonstrate the MEMS technology by using the micro-spectrometer payload developed by PIDC.

一、前言

從史丹佛大學成功發射第一顆微微衛星 (picosatellite) 以來，基於發展時程與經費等考量，現階段國際衛星發展逐漸朝向任務單一化與小型化發展。衛星小型化趨勢除得力於任務單一化外，另一要素則是因為積體電路製程與封裝技術的快速進步，以及逐步發展成熟的微／奈米元件與系統的微型化技術。

衛星計畫基於投入經費龐大，發射後幾乎無法進行元件更換，加上太空環境惡劣等因素，因此對系統可靠度之要求極高。微型化元件與系統在運用

於太空任務前，必須進行太空實測或測試平台的模擬測試，以評估微型化元件與系統可行性與可靠度。

基於微型化系統進行太空實測的需求，使得小型、發展時程短且低成本之衛星逐漸成為重要測試平台；另一方面，基於微小化技術的提升與完備，小型衛星具有用於執行太空科學研究以及太空工程應用的潛力。著眼於此，相關研究單位因而開始致力於微型衛星的發展，例如美國史丹福大學倡導的 CubeSat 計畫，參與的成員有美國猶他大學、日本東京大學等。尤其是英國蘇瑞大學 (University of Surrey) 多年以來致力於微衛星等級衛星的發展，

並且成立 SSTL 公司協助各國與研究機構發展微型衛星。

「國科會國家太空計畫室」現為財團法人國家實驗研究院國家太空計畫室，為開發並測試國內潛在國產太空元件、驗證國內衛星相關設計整測資源，擴大衛星運轉參與，決定發展微微衛星，並以史丹佛與 Cal Poly 所共同發展的 CubeSat 為架構，以驗證國內系統整合技術，並測試國產元件與系統為計畫主軸目標，發展重量不大於 1 公斤，外觀幾何尺寸不大於 10 公分×10 公分×10 公分之微微衛星。正因為如此，國科會精密儀器發展中心(以下簡稱精儀中心)終於有了第一個可以由自己嘗試設計製作太空酬載儀器的機會，也是中心的使命與榮譽。

二、回顧過去

回顧過去十年精儀中心參與衛星計畫任務，最令人難忘的成果，莫過於 YamSat 蕃薯號微微衛星酬載—微型光譜儀的開發研製。因為它代表了精儀中心在太空酬載系統研製技術的努力上有了初步的成就與結果。因為 YamSat 蕃薯號微微衛星代表的意義，是首顆由國人自行設計研製製作之衛星，而衛星中決定賦予衛星任務之酬載儀器—微型光譜儀正是由精儀中心來著手進行設計研製的工作。這對精儀中心是一種榮耀，也是自參與衛星計畫以來具有指標性的象徵，同時亦代表了我們將邁向另一個階段，迎接更困難的挑戰。

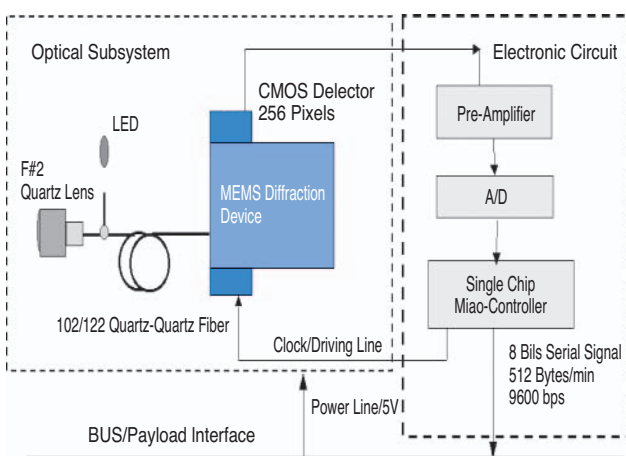


圖 1. 微光譜儀設計系統架構圖。

回首過去一路走來，精儀中心能有今日之成就絕非一朝一夕、一蹴可幾的，而是多年努力生根所獲得的結果。有句話說得好「凡事走過，必留下痕跡」，由檢視中心發展衛星儀器的過程中，可以發現酬載儀器的發展其最大困難在於系統工程與系統整合的能力，而高科技的精密電子、訊號處理、機械與光學設計等技術更是不可或缺的條件。環視微型光譜儀的發展過程，正可充分驗證此事實。以下簡述微型光譜儀系統架構。

三、系統架構

微型光譜儀系統架構如圖 1 所示，基本架構由光學系統與電子電路兩部分所構成。光學系統部分包含集光用光學鏡頭、LED 光源、分光鏡或光纖耦合元件、微繞射元件及感光元件等；光學系統各元件之功能與設計考量如下所述。

1. 集光光學透鏡

將光輻射收集進入微型光譜儀系統中，由於集光鏡頭於系統中並不擔負成像功能，因此鏡頭無需考量像差問題，但為求有效地將光導入導光光纖中，透鏡的數值孔徑 (NA) 必須與採用之導光光纖匹配；此外，由於透鏡裝置於 Z 邊板上，鏡頭將因 YamSat 自轉分別面對太空 (deep space)、太陽與地球，鏡頭將因此承受重複性熱負載與高能輻射，為避免鏡頭因熱負載與高能輻射而破裂與劣化，材料必須採用石英 (quartz)，且為避免鏡片與鏡座 (housing) 間因熱膨脹係數差導致鏡片破裂，鏡座材料應與鏡片相近或施以黏膠。

2. LED

LED 為監測微型光譜分光元件於太空中可能因溫度、大氣壓差與逸氣 (out-gassing) 等因素對光譜儀系統量測結果的影響，因此應用於地面測試過之 LED 為光源，耦合進入微型光譜儀系統中，作為校正光譜量測之用。此外，採用 LED 光源亦可於鏡頭失效後持續回報電子電路、分光元件與感測器等健康狀況，用以評估後續計畫電子系統壽命。由於 LED 將於微型光譜儀開機時同時開啟，因此

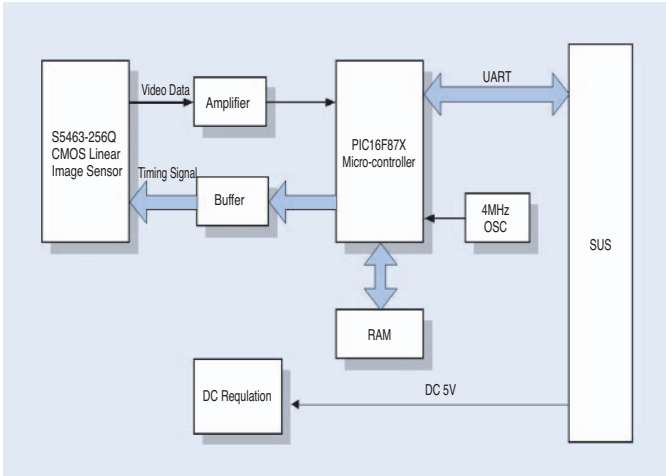


圖 2. 微光譜儀系統電路方塊圖。

LED 必須採限電流設計，並於地面完成 LED 光強與待測光輻射強度比對。

3. 微型光譜分光元件

微型光譜分光元件用以分離經由光纖導入之光強，由於光線離開光纖後為發散光，因此微型分光元件除應具備分離光譜之能力，亦應具備將光譜收斂至 CMOS 感測器之能力，感測器所得之光強度即為各光譜強度。

4. CMOS 感測器

記錄光譜強度並轉換成類比訊號輸出，由於集光鏡頭尺寸需小於 10 mm，且微型光譜分光元件將導入之入射光分離，加諸光纖耦合與傳遞所造成光強度損失，抵達感測器光強度將非常微弱，因此光譜儀所採用之 CMOS 感測器必須有極佳的光強度響應能力 (sensitivity capability)。

有關電子電路系統架構主要包含兩部分，一為 CMOS 前端電路，另一為時序驅動電路。電子電路必須具備：(1) 驅動感測器與相關電路所需時序、(2) 放大感測器所擷取之訊號、(3) 轉換類比訊號成為數位訊號、(4) 提供光譜資料暫存所需之記憶體、(5) 衛星本體資料傳輸介面等功能。此外，微型光譜儀後端之電子電路系統部分設計基於消耗功率限制與可靠度的考量，採最基本工作條件為電路設計之限制，方塊圖如圖 2 所示。

另受限於系統對於重量及空間的要求，在結構及型態 (configuration) 設計上均須簡化。初階設計階段以印刷電路板 (PCB) 直接作為結構體，用以承載電子元件、分光元件及感測器、集光鏡頭，並以螺柱與衛星本體結合。而型態設計 (configuration design) 則係將電子電路與光學系統各置於 PCB 一側的型態設計，如此微型光譜儀將有足夠的空間容納光纖。電子電路部分基於空間高度及重量等因素考量下，使用表面黏著 (SMT) 元件。

四、測試工作

關於微型光譜儀酬載的測試工作，可分為兩部分。第一部分為系統設定及功能測試，如前所述於微型光譜儀中將使用 LED 光源作為系統檢測與校正用，但 LED 光源強度與待測光輻射強度比必須於地面先行調整，此外，前端電路增益也必須透過

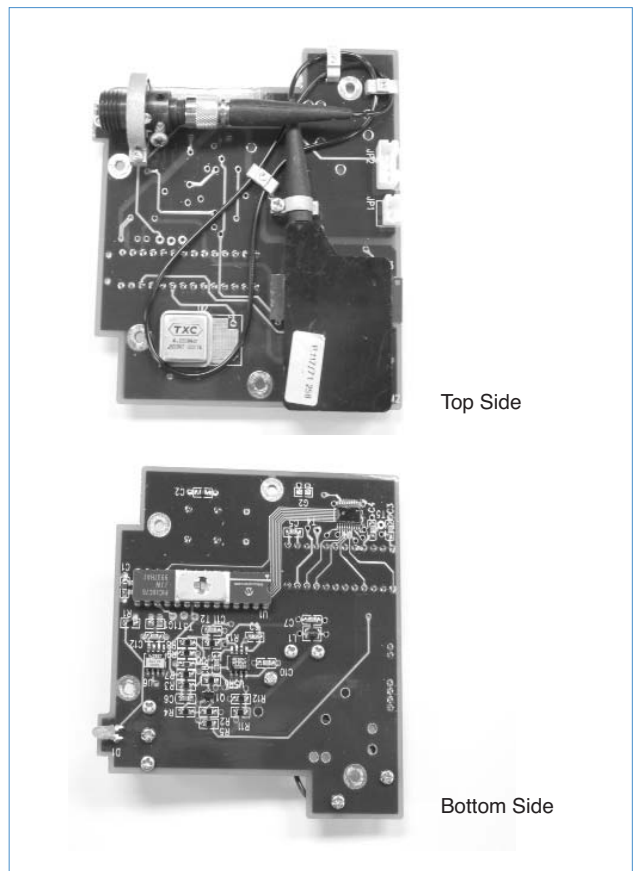


圖 3. 微型光譜儀飛行體。

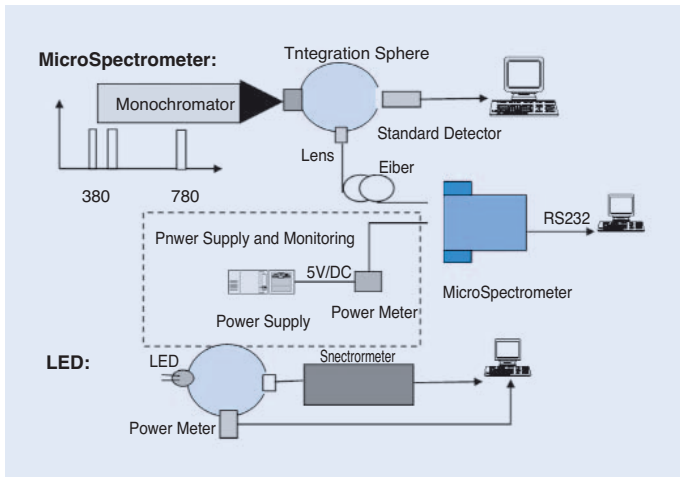


圖 4. 光輻射校正系統。

測試進行微調。第二部分則屬環境測試工作，由於微型光譜儀之機械結構直接以 PCB 取代，且所選用之元件大多未執行過實際太空任務，為增加系統可靠度與收集相關資訊供後續任務之執行，在設計階段亦規劃相關環境測試工作。

1. 光輻射校正測試

由於微型光譜儀經由集光鏡頭收光後，光線會經光纖及分光元件後才由 CMOS 感測器接受訊號，因此需以積分球或黑體為光源進行量測，結果並與光譜儀進行比對，以利真實光譜強度資訊取得。驗證過程如圖 4 所示。

微型光譜儀其光譜量測範圍為 380–780 nm、解析度為 12 nm。微型光譜儀之光輻射校正主要分為光譜對正校正 (spectral register calibration) 及光譜響應校正 (spectral response calibration) 兩個部分。

光譜對正校正測試係用以獲得在不同波長光源下感測器響應位置，以作為感測器所蒐集之光訊號轉換為有效之光譜資料。光譜響應校正則是量測不同波長入射光強度與感測器響應灰階值間之關係，量測所得之結果可作為日後感測器響應灰階值與實際入射光強度轉換之參考。以下分別針對兩個校正實驗設備及校正程序作進一步詳細的說明：

(1) 光譜對正校正實驗

光譜對正校正係由單光儀提供 380–780 nm 等

不同波長之光源，以測得微型光譜儀感測器各位置之響應強度，爾後再經由迴歸分析及搜尋響應峰值，可找出入射光經分光元件分光後投射於感測器上每一感光元之波長對應函數。測試架構如圖 5 所示。

此檢測系統包含：① 光源，光源為 250 W 之鹵素燈泡；② 單光儀，單光儀可掃描光譜範圍為 200–1100 nm，光譜解析度為 0.1 nm，焦長為 150 mm。③ 積分球；④ 標準感測器；⑤ 控制電腦等五個部分。

單光儀之出光量可由入瞳和出瞳處的狹縫寬度來進行調整，而單光儀的輸出波長則可經由步進馬達推動光柵旋轉角度來加以調整變化，同時藉由讀取標準感測器所得到之電流讀值，可將其轉換為輻射度單位。

(2) 光譜響應校正實驗

光譜響應校正測試系統架構如圖 6 所示，此校正測試系統使用的儀器有積分球光源與分光輻射度量儀。① 積分球光源 (integrating sphere)：採用的積分球均勻光源內部直徑為 100 mm，出瞳直徑為 30 mm。最大的可量測取像系統入瞳直徑為 30 mm，採用鹵素燈泡為其光源，最強輻射度在可見光的範圍內 (380–780 nm) 為 $10 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ 。其次

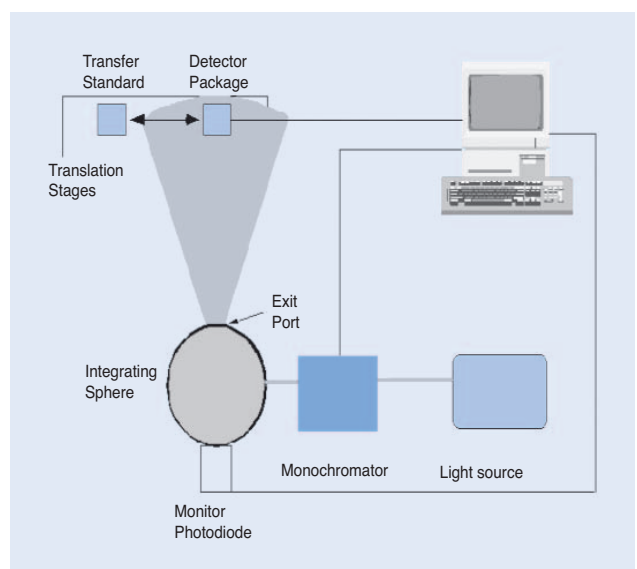


圖 5. 光譜對正校正系統架構。



圖 6. 光譜響應校正系統。

為出瞳輻射均勻度，測試結果出瞳光輻射均勻度達 99% 以上。② 分光輻射度量儀 (spectroradiometer)：分光輻射度量儀之功用為量測積分球的輸出輻射度及光譜組成。其光譜解析度為 4 nm，光譜範圍為 380—780 nm。

光譜響應校正則是利用一已經過校正之分光光譜儀作為量測標準，首先量測積分球所提供之光譜曲線，再將微光譜儀之收光鏡頭固定在積分球的出瞳處，輻射度監測標準感測器在積分球另一出瞳。同時量測該波長輻射度與微光譜儀的讀值，即可得到該波長的光譜響應。圖 7 與圖 8 分別為光譜對正校正及光譜響應校正後之結果。

2. 烘烤

由於光譜儀亦受到氣體干擾，為避免微型光譜儀於軌道上受逸氣所影響，需進行真空加溫烘烤 (baking)，以增加系統的可靠性。

3. LED 光譜測定

在系統中置入 LED 作為軌道上微型光譜儀校正使用，並據以判斷系統狀況，LED 光譜是否因 Aging 而有所偏移，必須於地面上進行測定收集資料，以避免誤判。

4. 環境測試

(1) 輻射測定—測定電子相關元件受高能粒子與輻射之影響，以確保系統受高能輻射狀況下仍能運作，此測驗將配合 NSPO 委託國立清華大學系統工程研究所進行，在非操作模式下經 20 keV 輻射照射後，測試其功能正常。

- (2) 真空測試—配合烘烤測試進行，用以檢視分光元件內腔體是否受氣壓影響。
- (3) 熱負載測試—用以確認光學系統、光纖耦合不因熱膨脹係數不同而有損壞與失效，如圖 8 所示，本測試已於 90 年 11 月配合 NSPO 以攝氏 [45, -5] 度範圍測試完畢。

五、展望未來

回首過去，台灣的太空科技發展始於民國八十年，由於起步較晚且經費有限，必不能依循美、俄、歐的發展方式進行，否則短時間內很難獲得優秀的成果。因此，台灣太空計畫的發展即著重於太空科學與民生領域應用兩大方面，如對電離層的探測、衛星遙測、高空大氣閃電觀察，以及利用衛星星系建立全球大氣量測網等。而精儀中心有幸能在國內太空計畫初始之際，得與太空計畫室合作，期間歷經中華衛星一號之海洋水色照相儀、中華衛星

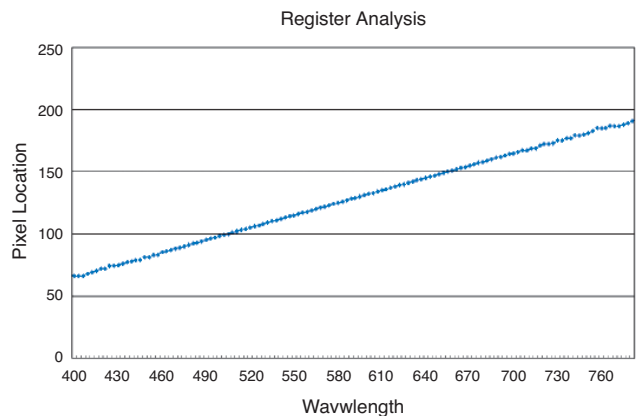


圖 7. 微型光譜儀光譜對正校正曲線。

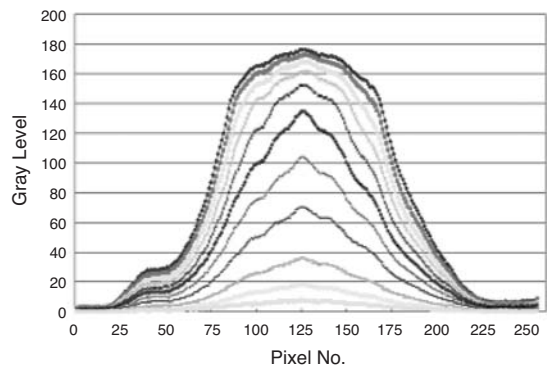


圖 8. 微型光譜儀光譜響應校正曲線。

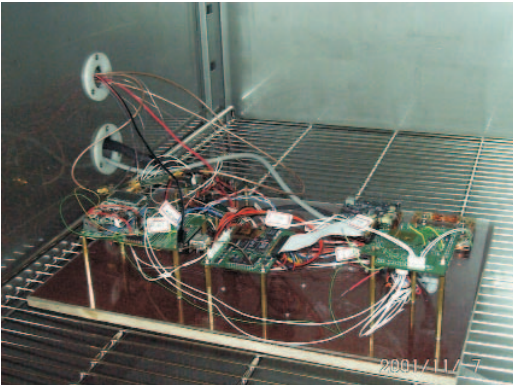


圖 9.
配合 NSPO 進行
微光譜儀環境熱
測試。

二號之高解析度遙測酬載，乃至於蕃薯號微微衛星酬載微型光譜儀之開發皆能有所成長，精儀中心於此獲益良多，也因此奠定精儀中心對於太空儀器技術發展的基礎。

而在精儀中心成立三十週年的今天展望未來，台灣的太空計畫已在衛星系統發展、整合測試及地面任務操作方面，奠定了良好的基礎，但在次系統設計與元件製造上則有待加強。面臨九十三年開始的第二階段十五年計畫，國家太空計畫室將整合產業界、學術界、研究機構等太空科技團隊，發展國內自主設計製造的衛星，屆時相信精儀中心必能在酬載儀器開發上貢獻出能力。

六、後語

太空科技的發展可說是一個國家於整體科技、經濟與工業實力的展現，其範疇涵蓋了系統工程、電子、機械、材料、通信、遙測、導航、推進、控制及資訊等先進科技，對於民生及國防等工業之推動更是具有重大之影響。而以人造衛星從事太空研究與應用，對於國家科技能力之提升、大型系統工程的整合、製造與管理能力的培養、長期經濟效益的衍生，以及科技水準的增強，均有莫大的助益。

綜觀台灣的太空計畫，一方面朝因應國家民生需求的遙測、寬頻通訊衛星發展，另一方面則是積極研究可以觀測自然現象的尖端太空科學，相信不久的未來將對全世界的太空科學研究以及國內的民生需求作出一番成就與貢獻。

參考文獻

1. H. Heidt, J. P-Suari, A. S. Moore, S. Nakasuka, and R. J. Twiggs, Cubesat: A New Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation, In Proceedings of the 14th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellite, Logan, Utah, USA, August 13-16 (2000).
2. 黃吉宏, 黃明鴻, 吳宗達, 陳明麗, 科儀新知, **23** (2) 27 (2001).
3. 黃明鴻, YAMSAT 微型光譜儀研製總結技術報告, 國科會精密儀器發展中心 (2002).

- 黃吉宏先生為國立清華大學動力機械工程博士，現任國科會精密儀器發展中心研究員。
- 吳宗達先生為國立中央大學電機工程博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。
- 黃明鴻先生為國立清華大學動力機械工程碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
- Chi-Hung Hwang received his Ph.D in power mechanical engineering from National Tsing- Hua University. He is currently a researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Tzong-Dar Wu received his Ph.D. in electrical engineering from National Central University. He is currently an associate researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Ming-Hung Huang received his M.S. in power mechanical engineering from National Tsing- Hua University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.