

Instruments Today 2024 Q1

# 科儀新知



立方衛星與儀器酬載

*CubeSats and Payloads*

【人物專訪】

中央研究院 葉永烜院士

238

ISSN 1019-5440

# Mitutoyo

以精密量測技術貢獻社會



▲ 座標測定機

光學尺 ▶



◀ 現場型  
座標測定機



輪廓形狀 ▶  
及表面  
粗度測定機

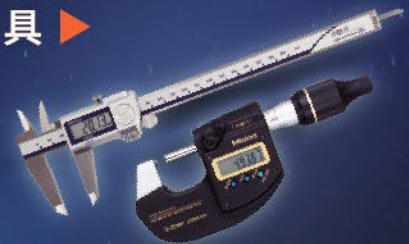


◀ 高精度CNC  
影像測定機

更多詳細資料



測定工具 ▶



傳承 創新 跨越

台灣三豐儀器  
www.mitutoyo.com.tw

# GMM

## 均華精密工業股份有限公司

Gallant Micro. Machining Co., Ltd.

(股票代號：6640)

### 2010

總部成立於土城工業區內

主要從事半導體相關生產設備及模具之研發、製造及銷售。  
主力產品>>精密取放技術之晶粒挑揀機與黏晶機、精密加工技術之沖切成型機與自動封膠機、光電整合技術之雷射刻印機與光學檢測機等。

### 2018

正式掛牌上櫃(6640)

均華不斷致力新製程需求的設備研發，深受客戶肯定。開發先進的封裝設備關鍵技術，也結合國外關鍵模組廠商技術優勢，以優異的整合能力憑藉有限資源發揮最大研發成果，因而建立良好的獲利基礎。更因長年的技術積累，相關核心技術亦居於國內相關產業之領先地位。

## 半導體先進封裝、異質整合

### 主要商品/服務項目

半導體先進封裝精密取放設備設計、製造、銷售  
自動雷射刻印機、自動沖切成型機設計、製造、銷售  
精密模具及機械設備之設計、製造、銷售

歡迎各界菁英加入 共創產業未來



#### ★完善的獎勵

年終獎金、員工分紅(視公司年度營運狀況、個人績效表現分發) / 三節禮金 / 生日禮金

#### ★完善教育訓練

新進人員基礎訓練(師徒制) / 強化研發技術能量(內部教育訓練課程) / 個人潛能提升課程

#### ★完整的保險福利

勞工保險 / 勞工退休金(新制) / 全民健康保險 / 公司團體保險(壽險、意外傷害險、意外醫療險、住院醫療險、癌症醫療險) / 員工及眷屬保險(提供優惠方案給予眷屬納保)

#### ★休假

有薪病假3天 / 生理假 / 產檢假 / 陪產假

#### ★職工福利

公司及福委會提供結婚禮金、生育禮金、喪葬補助金 / 員工家庭日 / 部門聚餐、歲末尾牙餐會 / 員工健康檢查 / 哺乳室 / 職工福利委員會特約廠商優惠 / 員工子女獎助學金 / 提供書刊及雜誌借閱 / 國內外旅遊



# GMM

236 新北市土城區民生街2-1號  
TEL : 02-2268-2216 FAX : 02-2268-0665

302 新竹縣竹北市台元一街8號7樓之9  
TEL : 03-5601222 FAX : 03-5601292



高科技領導廠商

# CONTROL

## 東捷科技



### 專注研發核心技術

- 自動化整廠規劃與製程設備
- 雷射應用設備
- 光學檢測設備
- 物流規劃與設備
- 真空製程設備
- 巨量轉移/巨量修補設備

以研發為主的設備製造商  
專注於新型雷射應用與雷射微加工技術  
擅長LCD製程設備整合整廠自動化  
近年將技術應用擴展至 ( micro ) LED及半導體產業  
為國內高科技領導廠商!

完善服務網絡·服務據點在地化  
維修保養、定期設備調校、客戶問題即時對應!

[WWW.CONTREL.COM.TW](http://WWW.CONTREL.COM.TW)

06-5051188(台南總公司) 服務據點:新竹.台中.台南.高雄

關注東捷



# CNC控制器·自動化控制器· 機械手臂·雲端 整合方案



ONE FOR ALL  
ALL IN SYNTEC

最值得信任的電控夥伴

新代科技股份有限公司  
SYNTEC Technology Co.,Ltd.

台灣新竹市東區研發二路25號

☎ 886-3-6663553  
☎ 886-3-6663505

✉ sales@syntecclub.com.tw



SYNTEC



LEANTEC



LINE

HIWIN®

# 實現您的智慧工廠

HIWIN 為工業 4.0 提供高附加價值的整體解決方案  
全方位系列產品，實現您的智慧工廠。



關節式機器手臂  
Articulated Robot



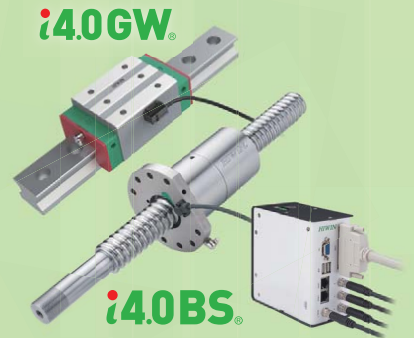
史卡拉機器手臂  
SCARA Robot



晶圓機器人  
Wafer Robot



晶圓移載系統  
EFEM



智慧型滾珠螺桿  
Intelligent 4.0 Ballscrew  
智慧型線性滑軌  
Intelligent 4.0 Guideway



諧波減速機  
DATORKER® Strain Wave Gear  
旋轉致動器  
DATORKER® Strain Wave Gear System



RCH系列



RCV系列



RAS系列

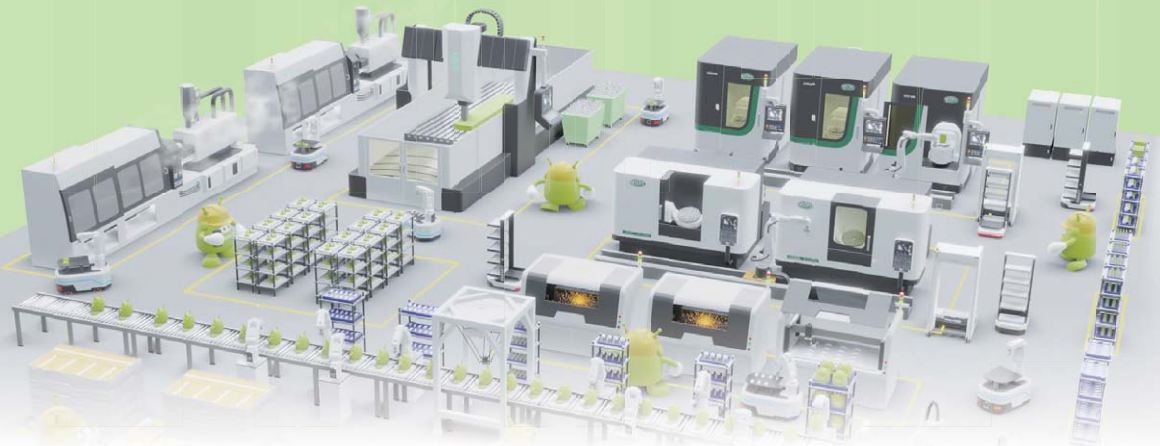


RAB系列

Torque Motor 迴轉工作台  
Torque Motor Rotary Table



了解更多  
HIWIN產品



## 全球營運總部

上銀科技股份有限公司  
HIWIN TECHNOLOGIES CORP.  
台中市40852精密機械園區精科路7號  
Tel : (04) 2359-4510  
www.hiwin.tw  
business@hiwin.tw

## 關係企業

大銀微系統股份有限公司  
HIWIN MIKROSYSTEM CORP.  
台中市40852精密機械園區精科中路6號  
Tel : (04) 2355-0110  
www.hiwinmikro.tw  
business@hiwinmikro.tw

## 全球銷售暨服務據點

德國 www.hiwin.de	日本 www.hiwin.co.jp	美國 www.hiwin.us	義大利 www.hiwin.it
瑞士 www.hiwin.ch	捷克 www.hiwin.cz	法國 www.hiwin.fr	新加坡 www.hiwin.sg
韓國 www.hiwin.kr	中國 www.hiwin.cn	以色列 www.mega-fabs.com	

# TILTdot 無線傾斜儀

TILTdot 為一款具有 NB-IoT 無線傳輸功能之無線傾斜儀，同時提供雙軸向角度及溫度量測功能。

TILTdot 具有堅固的防水外箱及低耗電量的設計，使用2顆 18650 鋰電池可提供長時間量測記錄及資料上傳至 dot雲端網頁服務，其內建 32 GB Micro SD卡可備份儲存一佰萬筆以上資料。

- 大樓結構物傾斜監測
- 捷運、高鐵、橋梁等墩柱傾斜監測
- 捷運、高鐵等隧道結構傾斜監測
- 邊坡擋土牆傾斜監測
- 地表滑動監測



都市土木新建工程



河川水利工程



橋梁工程



邊坡安全

# pALERT F330 一體化力平衡式地震儀

擁有高精度的三軸力平衡加速度計，擁有早期警報技術和先進功能，用於全面的地震防備。提供三種觸發邏輯 (Pd, PGA, STA/LTA) 和過濾選項，包括高通濾波器和低通濾波器，以減少非自然地震噪音。

- 地震預警系統(EEWS)
- 結構健康監測(SHM)
- 工業風險管理增強
- 生產線地震安全停機機制



住宅建築



工業基礎設施



製造廠



公共設施



應用奈米科技股份有限公司  
APPLIED NANO TECHNOLOGY SCIENCE, INC.



in 公司專頁

我們矢志成為光電及半導體產業中，  
真空設備核心技術提供者。

我們目標是整合高科技產業真空設備  
元件，提供有信賴感的產品，登上全  
球領導品牌。

### 磁流液軸封



#### 特點

- 台灣設計/製造
- 高度密封性與高潔淨度
- 可依需求進行客製化設計
- 可提供維修服務
- [選配] 軸封洩漏檢知系統

### 接觸角影像分析儀



#### 應用領域

- 生物相容性研究
- 奈米抗潑水表面驗證
- 玻璃基板潔淨度驗證
- 晶圓潔淨度管制
- HMDS製程管制
- 光阻與顯影製程開發
- BGA接合點潔淨度驗證
- 封裝接合面前處理



快速升溫/退火爐  
(RTP/RTCVD)



AS-One 100



直接液體注入  
(DLI)模組

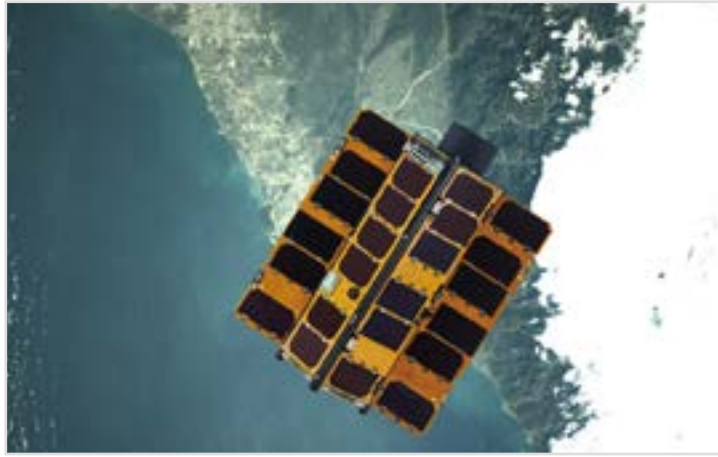
VAPBOX 300



# 科儀新知

INSTRUMENTS TODAY 季刊

中華民國 113 年 3 月 31 日出版



## 封面說明

LILIUM-1 立方衛星之命名是取台灣百合所具備之原生、堅忍與綻放的意涵，係由國立成功大學電機系莊智清教授團隊所研製，主要技術整合了衛星導航定位、姿態控制、光學取像、星上資料處理與高速率通訊等功能，建立了衛星緊急應變偵照之應用潛力。於 2023 年 12 月 2 日搭載美國獵鷹九號火箭自美國加州范登堡基地發射至 520 公里之低地球軌道。此圖以 LILIUM-1 立方衛星為前景，搭配所拍攝回傳之台灣南部照片為背景。

• 發行人：潘正堂

• 客座主編：莊智清

• 執行編輯：林麗娥、陳柏荔、魏崇倫

• E-mail：tiri-editor@narlabs.org.tw

• 網址：<http://www.tiri.narl.org.tw/Publication/InstTdy>

• 地址：新竹市科學園區研發六路 20 號

中華民國 68 年元月創刊

• 電話：(03) 5779911 轉 304, 313

• 傳真：(03) 5789343

• 設計排版：宇豐廣告實業社

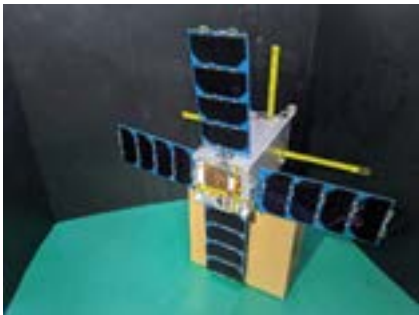
• 電話：(03) 5306633

# 238 科儀新知

中華民國 113 年 3 月



16



22

## 人物專訪

- 4 中央研究院院士－葉永烜教授  
尋找具有大潛力及突破性的事來做  
林麗娥

## 立方衛星與儀器酬載

- 10 「立方衛星與儀器酬載」專題介紹  
莊智清

- 11 立方衛星之演進  
莊智清

- 20 漫談我國大學衛星科技教育與虎科大的立方衛星的發展  
呂文祺

- 28 立方衛星之智能遙測酬載系統與邊緣運算電路設計  
李佩君、徐培翔

- 45 應用於微衛星的電力推進系統介紹  
李約亨、劉勝文、黃丙翰

- 54 衛星光通訊簡介  
張家豪、林語萱、陳彥涪、林千喜、林世千、朱冠瑜、鄭健一、林俊廷

- 72 創造性思考－立方衛星的挑戰與機會  
陳嘉瑞

- 82 台灣太空產業於商務發展之觀察  
翁謙松

## 科普大觀園

- 90 突破半導體製程維度限制新契機－二維材料  
魏崇倫、林麗娥、莊子右、陳維鈞

# INSTRUMENTS TODAY

March 2024

## People

- 4** **Dr. Wing-Huen Ip, Academicians of Academia Sinica  
Look for Research Areas with Great Potential for Making  
Breakthroughs**

Claire Lin

## Special Issue: CubeSats and Payloads

- 10** **Special Issue Introduction of "CubeSats and Payloads"**

Jyh-Ching Juang

- 11** **The Evolution of Cube Satellites**

Jyh-Ching Juang

- 20** **Brief Review of Satellite Technology in University  
Education and the CubeSat Development at National  
Formosa University**

Wen-Chi Lu

- 28** **CubeSat Intelligent Remote Sensing Payload System and  
Edge Computing Circuit Design**

Pei-Jun Lee, Pei-Hsiang Hsu

- 45** **Introduction to Electric Propulsion System Applied Small  
Satellites**

Yueh-Heng Li, Sheng-Wen Liu, Ping-Han Huang

- 54** **Introduction to Satellite Optical Communications**

Chia-Hao Chang, Yu-Hsuan Lin, Yen-Fu Chen, Chien-Hsi Lin, Shih-Cian Lin,  
Kuan-Yu Chu, Chien-Yi Cheng, Chun-Ting Lin

- 72** **Think Outside the Box - The Challenges and Opportunities  
of CubeSats**

Chia-Ray Chen

- 82** **Observations on the Business Development of Taiwan  
Space Industry**

Albert Weng

## Popular Science

- 90** **New Opportunities to Break Through the Dimensional  
Limitations of Semiconductor Manufacturing-2D Materials**

Chong-Lun Wei, Claire Lin, Tzu-Yu Chuang, Wei-Chun Chen



29



48



中央研究院院士

葉永烜 講座教授

## 尋找具有大潛力及突破性的事來做

### Look for Research Areas with Great Potential for Making Breakthroughs

撰文：林麗娥

「立方衛星」具備體積小、成本低等特性，問世至今，已有很多國家的科學家成功發射到太空，功能五花八門，從微重力環境下的生物醫學實驗到研究高層大氣都有，可說是學術研究或新創測試的入門款。《科儀新知》238期即以「立方衛星與酬載儀器」為主題，介紹台灣的技術與發展現況。在台灣提到衛星發展、甚至在人類整個太空探求的發展史上，必定會提到「卡西尼探測土星計畫」(Cassini Saturn Orbiter)。這個計畫正是葉永烜院士於1982年向美國太空總署(NASA)與歐洲太空總署(ESA)提案，促成雙方的合作。能夠成就這樣偉大的計畫、被譽為全球五大傑出彗星研究的專家，大腦是不是真的異於常人？還是有些好習慣可以讓大家仿效學習的。本期「人物專訪」為讀者邀請到中央研究院院士、現任國立中央大學太空科學與工程學系—葉永烜講座教授，讓大家好好認識一下葉院士的所思所想。

葉永烜院士是在美國加州大學聖地亞哥分校 (University of California, San Diego, UCSD) 拿到應用物理及資訊科學博士。在那裡，院士認識了影響他最深的兩位老師。一位是教他不要向權威知識屈服、諾貝爾物理學獎得主漢尼斯·阿爾文 (Hannes Olof Gösta Alfvén) 教授；另一位是帶他進入德國馬克斯普朗克高層大氣研究所 (Max Planck Institute for Aeronomy, MPAe) 從事研究工作的伊恩·艾克斯福德 (Ian Axford) 教授。院士笑說：「我一輩子都在這兩位老師的『陰影』之下，他們不到 30 歲就已經是世界頂尖的科學家，念博士時在那個系所當研究生，顯得我們都像是『廢才』一般」。葉院士表示，至今遇到一些研究問題，都會回想一下，如果是 Alfvén 會怎麼回應，Axford 會怎麼思考。

## 總是和自己的指導教授 Alfvén 吵架

葉永烜院士剛到 UCSD 念博士的時候，在台灣學長姊的建議下，是先找 Axford 當指導教授。拜訪 Axford 教授時，因為 Axford 是從事太空研究，當他敲門進去老師的辦公室時，葉院士一開口就跟老師表明：「I am interested in Space.」Axford 可能還被葉院士的拜訪有些摸不著頭緒，不知如何回覆之際，隔壁一位助理教授很興奮地跑來向 Axford 分享，他剛剛拿到 NASA 的計畫，於是 Axford 就順勢介紹葉院士給這位助理教授當博士生。院士回去後愈想愈不對勁，他連這位助理教授做什麼研究都不是很了解。於是台灣學長姊又建議他去找也拿到計畫經費的 Alfvén 當指導教授。Alfvén 丟了一本厚厚的講義給葉院士，請他看完再來決定是否有興趣加入研究團隊。「我隨手翻了幾頁，就去告訴 Alfvén，我有興趣。」就這樣葉院士成為了 Alfvén 的博士生。

就在葉永烜院士加入 Alfvén 教授研究團隊之後的兩星期，Alfvén 因為開創了磁流體力學 (Magnetohydrodynamics, MHD) 於 1970 年獲得諾貝爾物理學獎。磁流體力學是研究電漿體和磁場相互作用的物理學分支，主要是指運動的導電流體中，磁場能夠感應出電流。宇宙的一般物質大約有 99% 是以電漿形式存在，因此要研究天文學，對電漿的瞭解是不可或缺的。為了研究太陽系、土星的起源，Alfvén 發明了磁流體力學來驗證他的假設。

Alfvén 教授的思考經常超越時代，與當時的論述格格不入，因此經常與人爭論、吵架。像是他在 1939 年發表了一篇電流相關的文章，贊同挪威科學家 Kristian Olaf Bernhard Birkeland，在 1908 年主張極光裡的電流是由太陽延伸出來的帶電微粒進入所引發的主要次級效應。當時英國物理學家 Sydney Chapman 力斥這種主張是無稽之談，而 Alfvén 的文章也遭到退稿。Birkeland 的極光理論在 1963 年探測器進入太空之後，1967 年 Alex Dessler 和 David Cummings 寫了一篇論文，討論所發現的場向電流，終於讓 Birkeland 所提出的理論得到證明，也支持了 Alfvén 的見解。

葉永烜院士說 Alfvén 可能有 10% 是在想研究、90% 是在跟人吵架，這種吵架習慣幾乎成為他的膝蓋反射動作。Alfvén 一方面非常強勢，總要求別人認同他的想法，一方面又要院士絕對不要向權威知識屈服，因此院士也經常跟 Alfvén 辯論。有時候 Alfvén 會打電話到院士家討論研究，兩個人講著講著就在電話兩頭吵了起來。只要聽到院士與人在電話中吵架，師母就會知道他剛剛是在跟指導教授講電話。不管怎樣，良藥苦口，Alfvén 也總是叮嚀團隊，現在大家覺得對的，並不表示以後也是對的，不要做別人已經做過的事。

## Ian Axford 給他研究上的自由與鼓勵

Alfvén 教授的電機工程背景與葉院士平常受的物理訓練思考模式不同。遇到應用數學背景的 Axford 就覺得很對味，因為數學讓物理現象的描述變得非常簡明而且容易從中得到基本的規律，讓他比較容易可以跟 Axford 對話，就像是他的導師 (mentor) 般地帶領他做研究。Axford 在擔任 MPAe 所長時，將他招募成為行星探索計畫底下的研究員，就此開啟了他博士畢業後長達二十年的德國研究生活。Axford 鼓勵研究員放手去做自己喜歡的計畫，原先 MPAe 已被視為風中殘燭的研究所，在 Axford 的帶領下，顯著提高了 MPAe 的國際聲譽，並吸引了越來越多的客座科學家，參與很多重要的國際太空任務。像是喬托號任務 (Giotto mission) 以及太陽探測器尤利西斯號 (Ulysses) 等貢獻，都是 Axford 擔任所長期間取得的偉大成就。

葉永烜院士在兩位恩師的帶領下開啟了天文研究之路，因此當我們提問院士是如何投入天文學領域的，是 DNA 就像住著天文研究嗎？葉院士坦率地笑說：「我從來沒有排斥任何事情。到了國外總是要找人給我飯吃，誰願意給我獎學金，我就跟誰做研究。」提到 DNA，葉院士也分享他與小孫女間的互動。當小孫女的數學成績不是很好時，為了鼓勵她，葉院士就跟她的小孫女說：「公公的爸爸是中學老師，小時候他的數學都是公公的爸爸教的，所以我們家族有這樣的 DNA，數學不會太差的。」後來小孫女數學考的還是不盡理想，小孫女很可愛地跟葉院士說：「公公說的 DNA 不管用」。

## 卡西尼執行過程

令人好奇的是，葉院士為什麼想要去探測土星？他又是如何說服美、歐放下歧見，攜手合作的？院士表示，可能是年輕時 *nothing to lose*，所以很有衝勁，但最主要還是來自念書時的訓練與見識。UCSD 聚集了很多頂尖的研究者，都是做比較前瞻、未來性的研究，讓他總是習慣會去找別人沒有做過的研究來突破，再加上指導教授 Alfvén 講授太陽系形成理論與博士後研究土星，讓他累積了很多土星的知識。進到德國 MPAe 研究之後，看到 1979 年、1981 年美國太空總署連續發射無人駕駛的航海家 1 號 (Voyager 1)、航海家 2 號 (Voyager 2) 進入土星系統，首次傳回土星及其衛星的高解析圖片，讓他非常興奮。可是，這兩艘太空船只是快速掠過，無法停留探測。當時有科學家懷疑泰坦 (Titan) 可能是太陽系中與地球最相近的星體，但無法證實。於是，葉院士於 1982 年大膽提出了卡西尼計畫。

在歐美比他大 20-30 歲的太空科學家，經過磨練，所以比較務實。當他提出這樣的計畫時，大都覺得不可思議，很少人看好這項計畫會被接受。葉院士說：「當時有位 50 幾歲的美國國家科學院院士一直反對，說這個計畫不會過的，如果成功便送你一箱香檳酒」，葉院士接著又笑說：「現在過了 40 幾年，會反對他想法、覺得不可行的也是 50 幾歲的。」葉院士一如指導教授性格，儘管在整個世界天文學發展上已佔有一席之地，他一路走來，仍然維持科學初衷，不斷在已知領域之外探索科學新發現。

當時歐洲研究泰坦第一把交椅的專家就屬法國的科學家丹尼爾·高迪耶 (Daniel Gautier)，為了取得與 Gautier 的合作，就打了電話與他聯繫。只是談到泰坦就好像侵入 Gautier 的領土一般，一開始 Gautier 並不願意合作。這個計畫所以名為「卡西尼」計畫，是因為法國天文學家喬凡尼·卡西尼 (Jean-Dominique Cassini) 是最先發現土星環之間有細縫的科學家。在歐洲，只要提到卡西尼就會聯想到土星。Gautier 是巴黎天文台的科學家，卡西

尼是巴黎天文台第一位台長，院士以「卡西尼」命名，喚起歐洲文化脈絡中的天文記憶，因此成功說服 Gautier 加入，而 Gautier 跟美國科學家托比·歐文 (Toby Owen) 是好朋友，兩個經常一起研究泰坦，於是三個人成為這項計畫主要的發起人。

Toby Owen 的兒子在其父親過世後，寫信問葉院士「他的父親之前在卡西尼計畫做了哪些事情？」。院士回覆：「你的父親做了很偉大的工作，當時美國 NASA 的副署長非常支持這項計畫，副署長給了你父親一些經費，要他開始去各地遊說議員支持這項計畫。沒有你父親的奔走，這計畫是不會成功的」。在大家共同的努力下，成功促成了 NASA 與 ESA 探測土星系統的合作計畫。1997 年卡西尼號成功發射，原本預計 2008 年結束，因為成效顯著，NASA 又主動延長至 2017 年，執行了 20 年的輝煌任務。

## 深夜加油站遇見蘇格拉底

除了引領入門的兩位教授，葉院士也分享了其他兩位影響他的人生導師。在美國求學時，有一輛代步用的紅色腳踏車。有一回腳踏車輪胎沒氣，他請加油站的師傅幫忙打氣。在他不注意之際，轉頭看了才驚覺發現他腳踏車的輪胎打氣過頭就快要破了。「師傅，腳踏車輪胎都要爆了，你為什麼沒有停？」「你沒有喊停阿！這是你的腳踏車，你要自己做決定。」儘管是偶然的事件，但真真確確地給上了一課。好比《深夜加油站遇見蘇格拉底》一書所描述的，時時有老師，處處得良師。讓他深切體悟到，在民主自由的世界，要謹慎作決定，一旦決定，就要有承擔責任的勇氣。

葉院士也提到 UCSD 第一任校長、核子物理學家赫伯特·弗蘭克·約克 (Herbert Frank York)，雖然沒有教過他，但曾經買過許多他的書籍來看，約克所經歷、所倡議的事情亦深刻影響著他。約克教授念博士時，師從歐內斯特·勞倫斯教授 (Ernest Orlando Lawrence)。勞倫斯發明了迴旋加速器 (cyclotron)，讓粒子束帶有天然放射源的高能量，打破至少數百萬電子伏特量級的粒子束，才有辦法分解原子核的限制，使得原子核物理的進步一日千里。間接促成了由奧本海默 (Julius Robert Oppenheimer) 領導、愛因斯坦 (Albert Einstein) 等人參與的秘密團隊－曼哈頓計畫的開展，該計畫研發出了第一顆原子彈。

1943 年，當約克還是博士生時，他就被加州大學輻射實驗室招募，為曼哈頓計畫從事鈾生產工作。1945 年美國以原子彈轟炸日本廣島及長崎，結束第二次世界大戰。戰後，約克於 1949 年在加州大學柏克萊分校完成了博士學位，並於 1950 年與休·布拉德納 (Hugh Bradner) 一起規劃和設計「溫室行動 (Operation Greenhouse)」，進行原子爆炸診斷測量的原子測試。1952 年才 31 歲的約克擔任勞倫斯·利弗莫爾國家實驗室 (Lawrence Livermore National Laboratory) 創始主任，1958 年離開利弗莫爾實驗室後，他在美國總統艾森豪 (Dwight D. Eisenhower) 政府任內擔任高級研究計劃局 (Department of Defense's Advanced Research Projects Agency, 今日 DARPA 的前身) 第一任首席科學家和國防研究與工程 (Defense Department Research and Engineering) 的第一任主任。

由於二戰結束後，美國和蘇聯成為兩個爭奪世界意識形態和政治經濟霸權的超級大國。因美蘇所持的大量核子武器可以為對方帶來相互保證毀滅 (mutual assured destruction, MAD) 的能力，雙方未有正式開戰，這段歷史時期被稱為冷戰時期 (1947-1991)。約克擔任政府要職期間，開始思考美國和蘇聯正在開發更多核武，可能只要擁有 1000 顆核彈就足以毀滅整個世界，多製造 1000 顆、10000 顆核彈，就已經不是 MAD，而是摧毀整個世界，安全性反

而越來越低，而且對先發制人 (first strike) 核武的反應時間縮短，將使影響全人類的核決策權簡單落到機器手裡。為此，約克開始於 1960 年代擔任軍備控制和裁軍機構的顧問，之後擔任瑞士日內瓦舉行的全面禁止核試驗談判 (1979-1981 年) 的美國首席談判代表。

葉院士表示，如今這些有發射核武能力的國家的決策者與約克他們的歷史背景不同。當年美國等國家為了避免被摧毀，搶在納粹德國先製造出核武器，而有了曼哈頓計畫。也經歷過美蘇核武軍備競賽，經常處於戰爭一觸即發的恐怖平衡，了解戰爭的殘忍。當時約克所擔心的事情，現在來看，都是世界可能會發生的事情，像是現在很多武器系統是由 AI 控制，全人類存亡的事情變得輕易由機器來決定。科技發展、工業製造等所帶來的全球氣候變遷，亦如美國天文學家卡爾·薩根 (Carl Sagan) 等人之前所預測的核子寒冬 (nuclear winter)，大量的輻射塵進入地球的大氣層，將可能導致非常寒冷的天氣，全球人口將因此餓死。從這個觀點來看，台灣對維持世界和平和永續發展實在有舉足輕重的地位！

## 每一次繪畫創作都是從頭開始

除了投身天文學術研究，葉院士閒暇時喜歡畫畫，是兼具理性與感性的科學家，可謂是有智慧也有浪漫。畫畫對他來說，每一張畫都是一張白紙，都是從頭開始。而且常常畫到一半不知道畫出來的結果是好是壞，是他最煎熬、最迷惘的時刻，亦如研究做到一半，不知道未來是成功還是失敗的焦慮、不安，但就是要堅持把它畫完。常常畫完一張畫，覺得自己畫的很糟糕，睡了一覺醒來再看，又覺得像樣一點。有些研究推動，現在無法蓋棺論定方向是不是對的。如同他的指導教授 Alfvén 研究小行星，隔了近三十年，才被美國政府重視，卡西尼計畫醞釀了十五年，終於在 1997 年從地球發射。同時，畫家所畫畫的顏料大家都買得到，但是每個人調和出來的顏色不一樣、畫出來的感覺也不一樣，端看如何運用這些材料。

## 量力而為、量利而為

臺灣是一個中小型國家，在很多研究領域所投入的經費與規模皆無法與歐美國家相比，因此要量力而為，同時要團結。葉院士表示，好比蒙古歷史上著名的「五箭訓子」的故事，成吉思汗其黃金家族的「三賢聖母」之一的阿蘭豁亞，曾經提醒五個兒子，一支箭易折，但把五根箭綁在一起，就很難折斷。以此比喻團結的重要性，唯有團結才能攻無不克、戰無不勝。特別的是，如果把量力而為力量的「力」改成利益的「利」，就會影響整個政策計畫執行的方向與結果。國家利益應優先於個人利益，必須考慮對於促進國家社會整體的福祉有無助益。因此，規劃國家政策發展要量力而為，執行國家計畫者要量利而為，以全民福祉為優先考量，投注於更高意義的事情上。譬如，隨著太空越來越擁擠，避免衛星相互碰撞或太空碎片造成損害是一大挑戰。如何透過數學精確計算衛星軌道，以及預測可能的交會點，必要時刻調整軌道，可降低衛星碰撞或損害的風險，是台灣發展小型衛星時可以著墨發展之處。

## 給邁入 50 周年的儀科中心的一些勉勵

早在 1992 年葉院士回到台灣擔任太空計畫室首席科學家的時候，就與儀科中心有了不解之緣。為了研製衛星科學酬載儀器，葉院士找了在 MPAe 認識的謝克強博士，謝博士被太

空計畫室聘為資深研究員，於 1993 年抵達台灣。兩個人就在儀科中心的前身—精密儀器發展中心一處作為研究辦公室。如今儀科中心成立邁入第 50 個年頭，葉永烜院士以曾經擔任 IBM 副總裁的劉英武博士在一次訪談中所講的話，來勉勵儀科中心的同仁及年輕學子。內容提到：(1) 在科技的世界裡，一定要實力掛帥。(2) 埋頭苦幹。(3) 找有大潛力及具有突破性的事來做。(4) 願意冒險，不要「騎著死馬」原地踏步。(5) 要一而再，再而三地做到他人所做不到的。(6) 要有樂於教導及提攜後進的良師。院士當時閱讀了這席訪問，深有所感，於是將劉英武博士所講的一些話筆記下來，並裱框起來掛在研究室，隨時提醒自己，這一掛就是 20 幾年。

院士也提到不同國家的人有不同的科學素養，德國人很守時、日本人很團結、瑞士人細心謹慎、印度人很會溝通，很多大公司的 CEO 都是印度人、美國人很 spontaneous，隨性不喜歡受到拘束常會出乎意料的發想、英國人遇到問題就想要如何去務實求取答案、法國巴黎高等師範學院則培育出高水準的學生，從事基礎或應用科學的研究。只是這麼多科學素養，我們不可能通通俱備，只要具有一項科學素養就會帶動其他面向的發展。有些東西就是要自己做自己發想，買得到的儀器就表示人家做過了。儀器自製發明，才可以量測一些人家量不到的東西。而這正是儀科中心的價值，服務學術、相互加值，找有潛力及突破性的研究來做。



# 「立方衛星與儀器酬載」專題介紹

## Special Issue Introduction of “CubeSats and Payloads”

客座主編－莊智清教授  
國立成功大學電機工程學系教授

立方衛星的出現，大大降低了投入衛星研發的門檻，成為各國競相投入的科研及商業活動，不僅創造了可觀的市場需求，也產生了許多的機會與挑戰。台灣學研界對於立方衛星技術亦積極耕耘且有相當多的成果，目前已有十枚立方衛星的發射紀錄。為精進台灣技術、激發更多的創新應用，本期特別推出「立方衛星與儀器酬載」專題。而在台灣提到衛星發展、甚至在人類整個太空探求的發展史上，必定會提到「卡西尼探測土星計畫」(Cassini Saturn Orbiter)。這個計畫正是葉永烜院士的提案促成美國太空總署與歐洲太空總署的合作。搭配專題內容，特別邀請中央研究院葉永烜院士擔任「人物專訪」受訪嘉賓，讓讀者瞭解葉院士是如何與團隊成就這樣偉大的計畫。

本期收錄之文章首先由鄙人所撰寫之「立方衛星之演進」以作為本期文章之敲門磚、引領讀者認識立方衛星。在太空人才培力上，國立虎尾科技大學飛機工程系呂文祺副教授：「漫談我國大學衛星科技教育與虎科大的立方衛星的發展」，介紹台灣近年對於大學太空科技教育的重視，虎尾科大如何參與研究生培育計畫，以建立基礎立方衛星次系統軟硬體開發能量。科研發展上，則有國立臺灣科技大學電子工程系李佩君教授團隊：「立方衛星之智能遙測酬載系統與邊緣運算電路設計」研究以基於邊緣人工智慧低功耗遙測酬載影像處理電路設計為目標，成功實現了人工智慧的邊緣運算。國立成功大學航空太空工程學系李約亨教授：「應用於微衛星的電力推進系統介紹」介紹脈衝式電漿推進器、真空陰極電弧推進器、離子網格推進器和霍爾推進器等多樣各有其優勢的推進器，並於文中展示目前研究成果。國立陽明交通大學電信工程研究所林俊廷教授團隊：「衛星光通訊簡介」，則透過光鏈路裕度的推導以及低軌道衛星對地傳輸的工作流程帶出光學酬載各次系統的設計以及連結。國家太空中心立方衛星計畫主持人陳嘉瑞博士則為讀者帶來「創造性思考－立方衛星的挑戰與機會」、台灣太空產業發展協會理事翁謙松博士則是分享「台灣太空產業於商務發展之觀察」。

科技不斷進展下，傳統以國家為基礎的衛星計畫將不再是唯一選項，轉而是政府、學術、產業和軍方都可觸及的新太空。期望在本期作者群深入淺出的介紹下，激發讀者新的研究想法與方向，善用台灣資通產業與智慧製造之優勢進行創新之研究與國際合作，以建構立方衛星為體之科研與產業應用機制並布局全球。

# 立方衛星之演進

## The Evolution of Cube Satellites

莊智清

Jyh-Ching Juang

立方衛星善用資通訊之優勢與標準化之規格，大幅降低衛星之體積、重量與成本，也因此於近年有相當快速之發展，除應用於太空教育與科技發展也引領太空產業之變革。台灣學研界對於立方衛星技術亦積極耕耘且有相當多成果，目前已有十枚立方衛星發射之紀錄。展望未來，可應用本土資源精進差異化之技術並與國際合作進行創新之應用。

Cube satellites (CubeSats) standards, and the consequent reductions of size, weight, and development time, have simplified the design of satellites and the arrangement of launch. In the past several years, the CubeSats have revolutionized the space industry and promoted a variety of space business models. Academic organizations in Taiwan have actively involved in the development and applications of CubeSats, leading to the launches of 10 CubeSats in the past 10 years. The CubeSats can be further explored from the upstream and downstream to take advantage of domestic industrial strengths, technological innovations, and international collaborations.

### 一、前言

早期太空系統之發展與設計一直秉持著「失敗絕非選項」(failure is not an option)之不妥協精神，進行系統工程技術發展包含細緻的分工、完整的測試與嚴謹的審查。此一思維與作為雖成功地完成數項經典之太空任務，但往往也伴隨著高昂之成本與限縮了商業之發展。於上世紀 80 年代之前，太空科技與衛星系統，由於進入門檻高，一直處於相對封閉之生態圈。自 80 年代以後，資通訊產業之急速發展大幅改變人們之生活樣態，電腦應用、行動通訊以及穿戴裝置之普及均深深影響日常生活。而資通訊產業強調「輕、薄，短、小」之特點也相當程度地成為我國半導體晶片、微型感測、精密製造產業發展之契機。資通訊產業之發展影響到許多工業發展與商業活動；不過由於太空系統一直強調履歷與認證故在導入資通產品之過程一直很緩慢。雖然包括美國太空總署之許多專家學者於 90 年代提倡所謂 FBC (faster, better, and cheaper) 策略以期加速發展、優化性能與降低成本，惜此一策略並未全面性地造成改變。於 1999 年，美國史丹福大學 Bob Twiggs 與加州科技大學 Jordi Puig-Suari 兩位教授提出立方衛星 (cube satellite 或 CubeSat) 之構想<sup>(1, 2)</sup>。立方衛星為一以立方體為標準單位所建構之衛星，一單位立方衛星之長、寬、高分別為 10 公分，此一體積可容納衛星所需之電力、計算、通訊與控制功能之電路板而構成可以於太空運作之單元。此一立方衛星之倡

議主要解決衛星系統發展之兩項痛點。其一係此一規範是以電子電路為主要考量，有利於微型化與模組化之設計進而有機會發揮「以小博大」之精神，促成衛星微小化與星群化，另一則為此標準合理區隔衛星與火箭之介面有利於衛星以共乘 (ride share) 方式搭載於不同型式火箭送入太空。

衛星系統整合許多機械與電機之專業知識，立方衛星定義衛星尺寸之上限，採用立方體平面之外觀有利於太陽能板之貼覆而 10 公分尺寸亦符合習見工業電腦之標準，故此一標準實際引領電路板堆疊之參考設計構型；也因此衛星系統所需之電腦電路板、電力電路板、通訊電路板等均可以基於此一構型進行設計，間接引領產業之發展。衛星之發射一直是衛星系統發展之一重要項目。的確，衛星設計之軌道分析與機械分析均與衛星發射之火箭息息相關。也因此，衛星之設計根據系統工程得將發射火箭參數與限制納入考量。對於微小衛星之發射一般不容易順利協調出發射機會。相對而言，立方衛星之構型可以藉由彈射莢艙 (deployer) 包納，相當容易與發射載具整合，簡化發射協調程序並可以降低衛星發射與衛星設計之相依性。例如，衛星於設計之初可以將不同之潛在發射載具納入考量進行設計與測試，一俟衛星完成整合測試可善用不同之發射機會。由於立方衛星標準所引領之設計模組化與擴增性再加上發射靈活性與便捷性，此一標準於過去二十幾年已改變太空科技發展之生態也造就太空產業之良性發展。

立方衛星之模組化以及擴充性為一項重要特色。設計者可以根據任務之需求進行堆疊與擴充。目前以一單位為基礎可以擴充成兩單位、三單位、六單位、十二單位乃至更大。此一明確之標準以及擴充之性質促使此一立方衛星構型可適用於許多不同之衛星任務，也因此有些元件、電路與模組發展之廠商依據此一標準進行量產與製作，構成產業發展之動能。目前已有相當多市售立方衛星系統與次系統模組，發展衛星之單位可因此有許多選擇以顧及成本、品質與時程。整體而言，此一良性循環造就立方衛星發展時程之縮短、新創衛星單位之成立與衛星數量之增加。立方衛星之發展與發射載具之發展於此一階段也產生相輔相成之效果。由於彈射莢艙設計之相容性易於與發射載具整合，目前幾乎所有運載火箭均有共乘立方衛星之彈性。另一方面，隨著可回收火箭之發展，衛星發射之成本降低與機會增加。此一勇於接受風險與直球對決態度也引領出所謂 Fly-Learn-Refly 之思維，主要利用實際飛行快速吸取與累積經驗並經由持續飛試進行精進。立方衛星之發射與操作需求造就了發射服務商與地面接收網路等商業模式之興起。後者更與雲端服務充分結合形成完整之資料服務生態鏈。要言之，立方衛星之標準被廣泛採用且目前已形成一連貫衛星系統設計工具發展、衛星零組件生產、次系統電路製作、發射服務代理與資料接收分送之新太空 (new space) 產業生態系統。第一批之立方衛星於 2003 年發射，隨後每年發射之立方衛星個數呈現指數方式成長之趨勢。歷 20 年，立方衛星發射之個數已超過 2300 枚而相關之太空科技與服務公司亦超過 700 家<sup>(3)</sup>。立方衛星市場規模，由 2021 年之美金兩億一千萬至 2030 年之美金八億五千七百萬，年成長率為 15.1%<sup>(4)</sup>。

## 二、台灣之立方衛星發展

我國學界對於立方衛星之研究並未落後其他先進國家，表一列出我國歷年發射之立方衛星。此表顯示我國立方衛星之發展步調於近年來在政府之推動下有加速之現象，於過去十年台灣發射十枚立方衛星。以下針對部分立方衛星之實例與發展成果進行說明。

表 1. 我國立方衛星之發射情形。

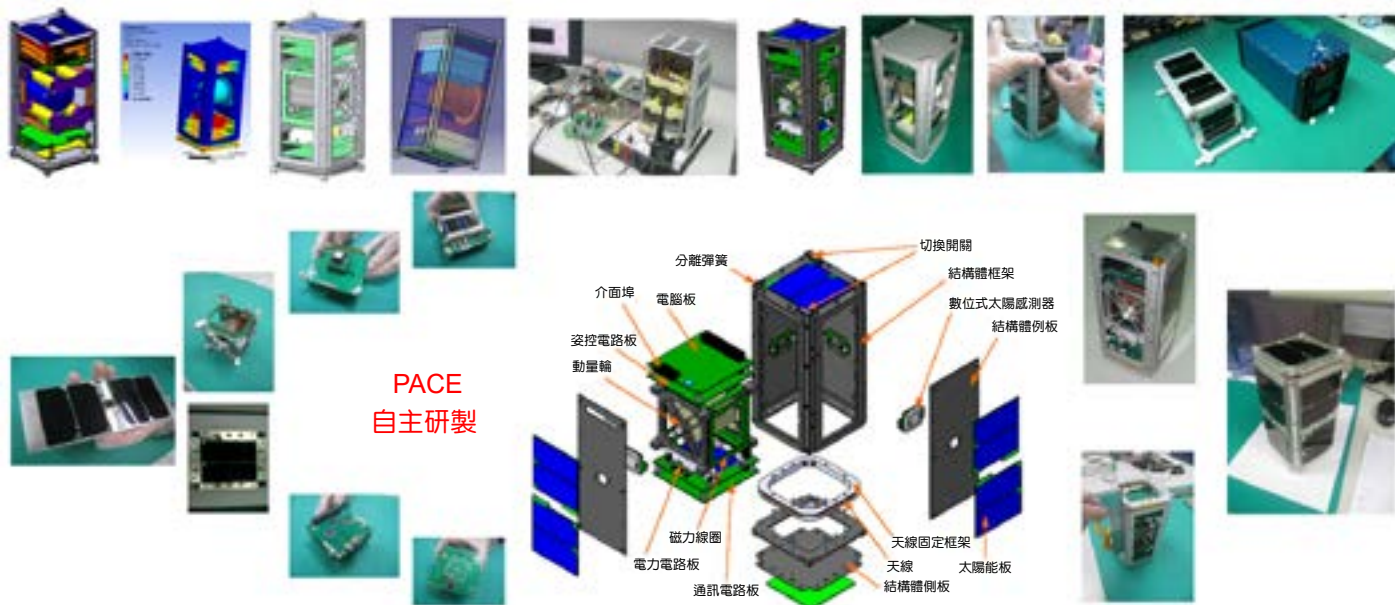
衛星名稱	發射年月	發射載具	執行單位
PACE	2014.06	Dnepr	成功大學
PHOENIX	2017.04	Altas V/ISS	成功大學
YUSAT	2021.01	Falcon 9	海洋大學
IDEASSat	2021.01	Falcon 9	中央大學
IRIS-A	2022.01	Falcon 9	成功大學
NutSat	2022.11	Falcon 9/ISS	虎尾科大
IRIS-C	2023.04	Falcon 9/Vigoride 6	成功大學
IRIS-C2	2023.11	Falcon 9	成功大學、智探太空
PEARL-1C	2023.11	Falcon 9	中央大學、鴻海
PEARL-1H	2023.11	Falcon 9	中央大學、鴻海
LILIUM-1	2023.12	Falcon 9	成功大學

國立成功大學立方衛星團隊自 2002 年開始進行立方衛星之研究，自 2014 年開始陸續發射 PACE、PHOENIX、IRIS-A、IRIS-C、IRIS-C2 與 LILIUM-1 六枚立方衛星<sup>(5)</sup>。PACE (Platform for Attitude Control Experiment) 為兩單位之立方衛星，主要任務為發展立方衛星三軸穩定技術平台並進行太空驗證。此一衛星於 2003 年開始發展並於 2014 年由 Dnepr 火箭發射，係第一枚台灣發射之立方衛星。PACE 立方衛星之發展與研製，全程經歷不同設計、審查、組裝、整合、發射均依系統工程之作法進行。圖 1 為 PACE 立方衛星由概念出發至產品完成之路程，此圖同時也說明由 PACE 立方衛星由地面發展經歷不同測試而進行發射之過程。圖 1 也說明此一立方衛星系統之內部構造並說明各自主發展模組之內容。

PHOENIX 鳳凰立方衛星為成功大學團隊於 2012 年開始參與歐盟 QB50 計畫<sup>(6)</sup> 所自主發展之二單位立方衛星。此一立方衛星於 2017 年 4 月 18 日由聯合發射聯盟 (ULA) 擎天神五號 (Altas V) 運載火箭運送至國際太空站 (International Space Station, ISS)，並於當年 5 月 17 日由國際太空站進行佈放至 400 公里高度之軌道。此一衛星持續正常工作近兩年，並持續下傳科學酬載與衛星本體之資料。於 2019 年 5 月進入大氣層也結束其任務。圖 2 顯示 PHOENIX 之發展歷程。QB50 計畫主要目的為於全球佈放近 50 枚立方衛星，以進行中低變溫層 (mid-lower thermosphere) 多點 (multi-point)、現地 (in-situ) 量測與進行重返大氣層 (re-entry) 之研究。除了科學研究之外，QB50 計畫亦具有技術發展、太空任務執行與教育之目的。成功大學團隊自主發展之 PHOENIX 立方衛星搭載離子／中性粒子質譜儀作為主要酬載，也搭配成功大學自行發展之太陽紫外線感測器以量測太陽紫外線之活動。圖 3 為 QB50 網頁摘錄顯示 PHOENIX (TW01) 衛星成功執行任務與資料下傳之狀況，彰顯此一衛星任務之成功以及團隊善盡國際參與之責任。

成功大學團隊之 IRIS (Intelligent Remote sensing and Internet Satellite) 立方衛星計畫主要發展具光學遙測功能、物聯網技術與人工智慧內涵之立方衛星，以精進前瞻關鍵之技術以利佈局太空產業。IRIS-A 立方衛星於 2022 年 1 月 13 日由獵鷹 9 號運載火箭順利發射至 520 公里高度之軌道。此一兩公斤等級 IRIS-A 立方衛星至今在軌成功運作兩年，除驗證衛星物聯網之功能也完成立方衛星之取像與下傳。IRIS-A 另也驗證國家太空中心所發展之衛星

PACE 由概念至成品



PACE 由地面至太空



圖 1. PACE 立方衛星之研發。



圖 2. PHOENIX 立方衛星之發展歷程。

QB50 DPAC Home Satellites Ground stations Upload interface Operations

### Legend

**About last data**

Code Description

■ Cubesat not operational

**About last data**

Code Description

■ Less than 3 days about the last contact

■ Between 3 and 7 days about the last contact

■ More than 7 days about the last contact

A All

SU Science unit data

WOD Whole orbit data

**About amount**

Code Description

■ Data received

■ Data not received

**About WOD**

Code Description

■ SU active / Voltage, current or Temperature inside range

■ SU inactive / Voltage, current or Temperature outside range

V<sub>Bat</sub> Voltage of battery

I<sub>All</sub> Average current of all components

T<sub>All</sub> Average temperature of all components

ID	Last data			Amount			WOD			ID	Last data			Amount			WOD		
	A	SU	WOD	SU	WOD	SU	V <sub>bat</sub>	I <sub>all</sub>	T <sub>all</sub>		A	SU	WOD	SU	WOD	SU	V <sub>bat</sub>	I <sub>all</sub>	T <sub>all</sub>
AT03	0	81	0	166	5674		4.030	-0.120	-2.67	GB03	226		0	0					
AU01				0	0					GB06	250		0	0					
AU02	12		248	0	3		8.250	0.157	16.67	GR01	256		256	0	2		8.300	0.102	11.33
AU03	6520		6520	0	6		8.250	0.528	31.67	GR02	305		0	0					
AZ01				0	0					IL01	1	1	1	3021	3404		8.250	0.228	1.0
AZ02	1	118	350	127	1		8.300	1.008	16.33	IN01			0	0					
BE05	289	289	330	1	0					IT02	318		0	0					
BE06	17			0	0					KR01	172		270	0	69		8.300	0.055	11.08
CA03	18	286	271	1	1004		14.800	-0.079	-0.67	KR02			0	0					
CN02	247		247	0	16		3.900	-0.181	6.0	KR03	1		0	0					
CN03	10			0	0					LT01	12		161	0	9		8.250	0.827	-1.0
CN04	69		69	0	18		6.650	0.307	15.17	RU01			0	0					
CZ02	267		267	0	3662		8.250	0.047	15.33	SE01	18		0	0					
DE02				0	0					TR01	339		0	0					
DE04			323	0	0					TR02	345		0	0					
EO79	169			0	0					TW01	0	0	52	3203	418		8.050	0.236	28.75
EO80	273		288	0	5		15.750	0.055	7.33	UA01	14		0	0					
ES01				0	0					US01	19		251	0	2018		6.550	0.000	10.17
F101	319			0	0					US02	47		0	0					
FR01	58			0	0					US03			0	0					
FR03	248		248	0	1		8.250	0.157	16.67	US04	65		0	2					
FR05	387			0	0														

圖 3. PHOENIX 立方衛星相較於其他衛星之資料下傳情形。

導航接收機於太空之性能。圖 4 為 IRIS-A 立方衛星發展之歷程而圖五為所拍攝與下傳之照片。基於 IRIS-A 之基礎，成功大學持續精進立方衛星技術並於 2023 年 4 月發射三公斤等級之 IRIS-C 立方衛星以及與新創公司智探太空於 2023 年 11 月發射三公斤等級之 IRIS-C2 立方衛星，亦均成功驗證衛星與酬載之功能。



圖 4. IRIS-A 立方衛星之發展歷程。



圖 5. IRIS-A 拍攝與下傳之照片。

成功大學團隊之台灣百合一號 LILIUM-1 立方衛星於 2023 年 12 月 2 日利用美國獵鷹九號火箭由美國加州范登堡基地發射至 520 公里之低地球軌道，執行任務。此一由國科會資助之 LILIUM-1 衛星為四公斤等級之三單位立方衛星，主要技術含量為整合衛星導航定位、姿態控制、光學取像、星上資料處理與高速率通訊之功能，建立了衛星緊急應變偵照之應用潛力。LILIUM-1 立方衛星之命名是取台灣百合所具備之原生、堅忍與綻放的意涵。圖 6 紀錄 LILIUM-1 立方衛星之發展歷程而圖七為該衛星自拍之照片。整體 LILIUM 計畫預計發射三枚立方衛星以驗證系統整合、衛星高頻通訊、星際通訊、智能遙測、太空推進、展開機構與衛星避撞/離軌功能。LILIUM-1 衛星所包含之系統整合、衛星通訊與智能遙測等技術將於後續 LILIUM-2 與 LILIUM-3 進一步精進。此一系列衛星可視為國家發展低軌通信衛星的先行實驗，可提供地面終端設備與物聯網裝置驗測之平台。



圖 6. LILIUM-1 立方衛星之發展歷程。

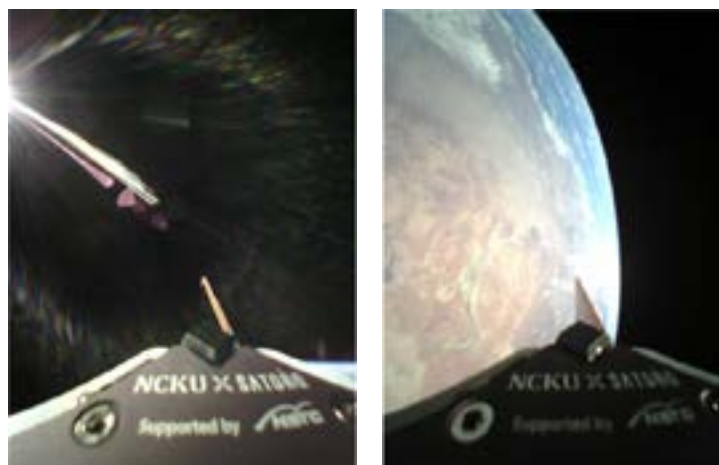


圖 7. LILIUM-1 立方衛星迎向太陽與拍攝地球之自拍影像。

由以上有關成功大學團隊發展立方衛星之經驗與結果可知，國內對於立方衛星系統之設計、製作、整合、組裝、測試、發射與操作已有相當基礎。由成功大學不同階段之衛星發展也可觀察到隨著知識與經驗之累積，衛星發展之期程 (由計畫啟動到衛星發射) 由 PHOENIX 之五年，到 IRIS-A 之三年再下修為 LILIUM-1 之一一年。此一技術掌握有利於快速反應衛星之發展也有益於新穎技術之太空驗證。此些經驗與成果，對於衛星關鍵技術之發展、立方衛星系統工程之實踐、立方衛星發展環境之建構、國內產業之鏈結、國際合作之開展、太空人才之培育均奠定良好基礎。

### 三、量變產生質變

由於數目之急速增加，立方衛星科研與產業已經過轉折點 (tipping point)，正處於「量變產生質變」之階段。立方衛星之發展早期主要以太空教育或技術驗證為目的，但經歷二十年之發展技術已有相當成熟度，故目前之趨勢主要朝創新科學與商業應用邁進。關於後者，有相當多商業公司應用立方衛星之平台佈署衛星系統以進行服務。立方衛星雖有尺寸與體積之先天限制但由於具有成本較低與佈署容易之優點，故可以利用滿天星之策略建構星系或星群以得到較好的時間解析度。比較有名之立方衛星星系包含地球觀測之 Planet 星系<sup>(7)</sup>，船舶識別訊號與導航衛星訊號反掩 (occultation) 之 Spire 星系<sup>(8)</sup>，射頻訊號偵測之 Unseenlabs 星系<sup>(9)</sup> 與 Kleos 星系<sup>(10)</sup>，衛星物聯網之 Lacuna 星系<sup>(11)</sup> 與 Sateliot 星系<sup>(12)</sup> 等。此些立方衛星星系應用星海戰術之優勢建構出衛星網路，又可以與大型衛星形成互補完善衛星資料服務。

除了商業發展外，由於立方衛星之技術已有相當成熟度，許多科學任務也嚴肅地看待應用立方衛星進行科學探索之機會。美國國家學院 (National Academies) 發表了 *Achieving Science with CubeSats: Thinking Inside the Box*<sup>(13)</sup>，主要針對太陽系與太空物理、地球科學與太空應用、行星科學、天文學與天文物理以及太空之生物與物理等學門領域之立方衛星應用進行盤點。這其中更指出立方衛星之低成本優勢以及所提供地球觀測之時間解析度、縮短資料取得時間即時性等均有利於地球觀測與太空科學之應用。美國太空總署也持續鼓勵學研界並啟動相當多立方衛星科研計畫。事實上，於美國重返月球之阿提米絲計畫 (Artemis program)<sup>(14)</sup> 之一部分就是利用立方衛星先行以取得資料與降低風險。此些立方衛星之任務

包含水冰偵測、氫氣測量、月表探測、月表撞擊量測、隕石探勘、太空輻射量測、輻射效應實驗、太空天氣量測與推進實驗等。可見大型太空計畫已槓桿立方衛星低成本與可容忍風險之特性，此一趨勢應會成為未來之常態。

以歐盟之 QB50 計畫<sup>(6)</sup> 為例，主要也期望善用立方衛星之可拋棄性於大型衛星無法停駐之中低變溫層空間佈署多枚立方衛星進行現地量測。此一跨國 QB50 計畫計畫應用三項科學儀器進行中低變溫層氣體分子成分與電氣特性之量測：分別為離子／中性粒子質譜儀 (ion/neutral mass spectrometer, INMS)、通量偵測儀 (flux probe experiment, FIPEX)、多探頭蘭摩爾探測儀 (multi needle Langmuir probe, mNLP)。這些儀器所量測之離子、中性粒子、電子、氧原子、溫度等之物理量可增進人們對於低變溫層物理現象的理解，包含地球大氣層與太陽輻射間的關聯性，所獲得的全球分佈資訊，可進而強化預測模型，有利於地球暖化、大氣科學、太空天氣、高超音速飛行、太空旅行乃至於衛星殘骸軌道估測之研究。目前全世界均相當關注淨零碳排之議題，溫室氣體之排放具有空間與時間之特徵，故有團隊發展溫室氣體監測之立方衛星星系，以 GHGSat 為代表<sup>(15)</sup>，以持續收集與累積二氧化碳與甲烷資料。

立方衛星與科學酬載實為一體之兩面，二者均充分導入輕薄短小之技術以利布建。可以想見，此一趨勢將持續發展。一方面，太空科學儀器可沿用立方衛星平台進行在軌實驗與研究。此舉也促成立方衛星技術之發展與精進，包含高速通訊、光通訊，精確姿態控制、大型電力產生、太空推進、高增益天線、大口徑展開機構等。另一方面，立方衛星技術所夾帶之軟體定義框架與人工智慧技術也讓許多任務可以更有效率地執行。未來之立方衛星與科學任務將因此在微小 (small)、聰明 (smart)、星群 (swarm)、軟體 (software)、標準 (standard) 等元素之堆疊下進行。

## 四、結論

基於立方衛星標準之應用可以導入具革命性之創新思維，進行技術突破並開發出新產品、程序或商模，進而產生正向循環，累積快速成長之動能。立方衛星之發展於太空人才之培力、科研之發展、新創之育成與商模之展開均產生破壞式之創新，間接奠定今日新太空發展之重要基礎。此一標準之推動讓太空不再陌生與遙遠，應用低成本即可以進行太空技術發展與科學研究，如此激勵更多之參與者建構出可觀之生態系。對於前沿太空科學研究，無論是地球觀測或外太空探索均可以看到立方衛星之角色。隨著低軌道通訊衛星之發展與 6G 通訊網路之需求，立方衛星所提供之通聯服務亦將可以與大型星系互補共構達到無間歇與無縫之服務。台灣可善用資通產業與智慧製造之優勢進行創新之研究與國際合作，以建構立方衛星為體之科研與產業應用機制並布局全球。

## 參考文獻

1. H. Heidt, J. Puig-Suari, A. Moore, S. Nakasuka, R. Twiggs, "CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation," *Proceedings of the Thirteenth Annual AIAA/USU Small Satellite Conference*, Logan, UT, August, (2000).
2. CubeSat Design Specification Rev 14.1, The CubeSat Program, Cal Poly SLO, (2022). Please refer to the website: <http://www.cubesat.org/>
3. Nanosats Database, (2024). Please refer to the website: <https://www.nanosats.eu/> (Accessed 2024/1/13).
4. CubeSat Market, (2024). Please refer to the website: <https://straitresearch.com/report/cubesat-market> (Accessed 2024/1/13).

5. NCKU Space Laboratory, (2024). Please refer to the website: <http://satellite.ncku.edu.tw/> (Accessed 2024/1/13).
6. QB50, (2024). Please refer to the website: <https://www.qb50.eu/> (Accessed 2024/1/13).
7. Planet, (2024). Please refer to the website: <https://www.planet.com/> (Accessed 2024/1/13)
8. Spire, (2024). Please refer to the website: <https://spire.com/spirepedia/cubesat/> (Accessed 2024/1/13).
9. Unseenlabs, (2024). Please refer to the website: <https://unseenlabs.space/> (Accessed 2024/1/13).
10. Kleos Space, (2024). Please refer to the website: <https://kleos.space/> (Accessed 2024/1/13).
11. Lacuna space, (2024). Please refer to the website: <https://lacuna.space/> (Accessed 2024/1/13).
12. Sateliot, Please refer to the website: <https://sateliot.space/en/> (Accessed 2024/1/13).
13. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Achieving Science with CubeSats: Thinking Inside the Box*. Washington, DC: The National Academies Press, (2016).
14. NASA Artemis program, Please refer to the website: <https://www.nasa.gov/specials/artemis/> (Accessed 2024/1/13).
15. GHGSAT Greenhouse Gas Emissions Monitoring Satellite, (2024). Please refer to the website: <https://www.ghgsat.com/en/technology/constellation/> (Accessed 2024/1/13).

## 作者簡介

莊智清先生為美國南加州大學電機博士，現為國立成功大學電機工程學系教授。

Jyh-Ching Juang received his Ph.D. in Electrical Engineering from University of Southern California, USA. He is currently a Professor in the Department of Electrical Engineering at National Cheng Kung University.

# 漫談我國大學衛星科技教育與虎 科大的立方衛星的發展

## Brief Review of Satellite Technology in University Education and the CubeSat Development at National Formosa University

呂文祺

Wen-Chi Lu

SpaceX 太空探索公司自創立以來的高知名度加上該公司建立的低軌通訊衛星星系 starlink 引發的全球低軌通訊衛星風潮，我國也順勢政府推動太空產業為我國六大核心戰略產業之一。我國大學太空科技教育在這股風潮中也受到重視，我國大學過去從微衛星到近年立方衛星的開發，研究已累積不少經驗，但所培育的人才仍相當少，去年在教育部的推動下由四所學校成立太空系統工程研究所，藉以擴大太空科技人才庫，而國立虎尾科技大學則有幸透過執行國家太空中心立方衛星計畫，經歷從設計到入軌運作的所有衛星發展階段，期間培育超過 10 位研究生，並建立基礎立方衛星次系統軟硬體開發能量。

Since its establishment, the high visibility of SpaceX, coupled with the global trend sparked by the low-orbit communication satellite system Starlink, has prompted our country to promote the space industry as one of our six core strategic industries. The education of space technology in Taiwan universities has also been emphasized in this trend. Taiwan universities have accumulated considerable experience in the development of microsatellites to cubic satellites in recent years. However, the talent cultivated in this field is still relatively scarce. Last year, under the promotion of the Ministry of Education, four schools established institutes of space system engineering to expand the talent pool in space technology. National Formosa University, through its participation in the National Space Organization's cubic satellite program, has had the opportunity to go through all stages of satellite development from design to orbit operation. During this period, over 10 graduate students have been trained and established capabilities in the development of basic subsystems for cubic satellites.

## 一、台灣衛星研究的發展沿革

近幾年美國太空探索公司 SpaceX 發展 Starlink 的低軌通訊衛星星系帶動我國太空科技發展熱潮，「太空產業」於 2020 年列為我國六大核心戰略產業之一，並於 110 年訂定通過「太空發展法」，宣示政府推動太空發展的決心。話說我國正式國家太空科技發展肇始於國家太空中心的設立，衛星是發展主軸之一，主要以科學應用為主要發展方向，而學術界發展衛星最早由國立成功大學開始，由國家太空中心在 2008 年公開遴選出國立成功大學 CKUTEX 微衛星團隊進行設計與製作 (30 公斤級) 微衛星，而後由於 2010 年因政策調整，自主發展微衛星計畫中止。而立方衛星發展歷史更悠久，最早由國家太空中心自 2001 年開始發展，第一枚蕃薯衛星 (YamSat)，但發射總是不順利，最終儲放於國家太空中心，後續國立成功大學所開發的 2U 立方衛星 (PACE) 則在 2014 年升空後失聯；我國第一枚成功發射並正常運作的衛星是由國立成功大學所研製的鳳凰衛星 (PHOENIX)，鳳凰衛星於 2017 發射入軌後持續運作了 2 年，是目前學術界研製最成功的衛星，隨後在 2021 年也有國立中央大學所研製的飛鼠衛星發射入軌後短暫地運作。回顧我國學術界開發衛星的歷程真是篳路藍縷，從技術、經費、政策到國際政治等因素不斷阻礙著太空科技在學術界的發展，太空科技在學術界主要以研究計畫形式展開，以科學應用為主的目標進行衛星的研製工作，因此學術界衛星科技發展在過去三十多年間始終是斷斷續續地延續著。

我國尚稱完整的太空工程教育應是從 1998 年始於國立成功大學航太空研究所的太空系統工程組，僅設立數年後即停止招生；後有國立中央大學於 2020 年設立太空科學與工程學系是少有完整課程規劃的大學學程；直到 2023 年教育部推動設立四所太空系統工程研究所，才算是有完整太空工程教育教學規劃，包括國立陽明交通大學、國立成功大學、逢甲大學、臺北科技大學等四所。其中國立臺北科技大學是其中唯一科技大學設立太空相關研究所，隨後 2023 年國立虎尾科技大學航空與電子科技研究所申請增設無人機與衛星科技組。在國家太空科技政策的推動下，太空工程的學程才由一般大學擴散至科技大學，擴大培育未來太空科技人才的來源。

## 二、立方衛星成為學生實踐太空工程的機會

立方衛星 (CubeSat) 是一種小型、標準化的人造衛星，其原始定義的尺寸為 10 厘米 × 10 厘米 × 10 厘米，稱為 1U (單元)，質量通常在 1 公斤左右。隨著應用需求的擴展，現最大擴展至 12U，最常見為 3U 及 6U 的尺寸。特別一提的是這種由美國大學提出的標準有一個重要的目的就是在大學教育推展使用公制單位系統 (metric system)，NASA 計畫已使用公制單位系統，例如軟體計算使用公制，但人機介面顯示仍可能為英制 (English/imperial unit) 單位系統。我國大學工程教育也普遍有公制與英制單位系統混合使用的現象，對於大型系統的發展而言同樣有潛在發生單位不一致的計算誤差風險。

由於立方衛星發展的初衷便是利用市售元件進行開發，而非以大型衛星必要的太空規格元件進行開發，成本相對較低，因此它們成為了大學、研究機構和企業進行太空實驗和科學研究的理想平台。立方衛星提供了實踐太空工程的機會，使學生能夠參與實際的設計、組裝和測試過程。這種實踐經驗可以強化學生的理論知識，培養他們的實際技能。開發一個立方衛星需要跨足多個領域，包括機械工程、電子工程、資訊工程等。這促使學生進行跨學科的

合作，模擬真實的太空工程團隊合作環境。由於立方衛星的尺寸和質量限制，學生需要在有限的條件下進行設計和工程，這推動了技術創新的需求。學生可能需要發展輕量、高效的技術，以滿足空間限制。面對立方衛星開發過程中的挑戰，學生需要解決各種實際的技術和工程問題。這種實際的問題解決能力對他們未來在航太工程領域的職業生涯非常有價值。透過發射立方衛星進行太空科學實驗，學生能夠參與科學研究，推動太空科學的進展。這有助於培養對科學研究的熱情和對太空探索的理解。總的來說，立方衛星為航太工程教育提供了一個實際而成本效益的平台，使學生能夠在太空工程領域中獲得實際的經驗，同時也激發了創新和團隊協作的精神。這有助於培養學生的領導能力、解決問題的能力以及在太空科技領域的發展中扮演積極角色的能力。

所以立方衛星的開發是一種問題導向的學習方法，缺點是發射成本仍是相當高昂，若衛星開發後無法進行發射，那麼就無法真正驗證開發過程所做的各項努力。針對發射費用高昂的問題，美國 NASA 便提供立方衛星發射專案 (CubeSat Launch Initiative) 供教育或非營利機構提出申請免除發射費用，值得我國借鏡以有效推動運用立方衛星作為工程實務教育的工具。

### 三、堅果衛星的設計過程

2017 年國家太空中心執行臺灣新興太空產業領航計畫，以委託研製方式提供國內三所大學及業者發展立方衛星，並為研製的立方衛星提供免費的發射機會，最後順利完成的立方衛星分別是玉山立方衛星 (1.5U)、飛鼠立方衛星 (3U) 與堅果立方衛星 (2U)。其中國立虎尾科技大學的教師和學生組成團隊研製一枚 2U 立方衛星，後定名為堅果立方衛星，如圖 1，這枚衛星主要任務為利用 ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) 接收機收集、儲存並轉發民航飛機的飛航資料，建立飛航大數據提供飛航安全相關的研究，如圖 2。堅果立方衛星團隊在太空中心專家群的指導下，歷經三年的設計、製造與測試等工作，發展歷程如圖 3 所示。最終在 2020 年將立方衛星順利遞交給國家太空中心並運送至美國等待發射。

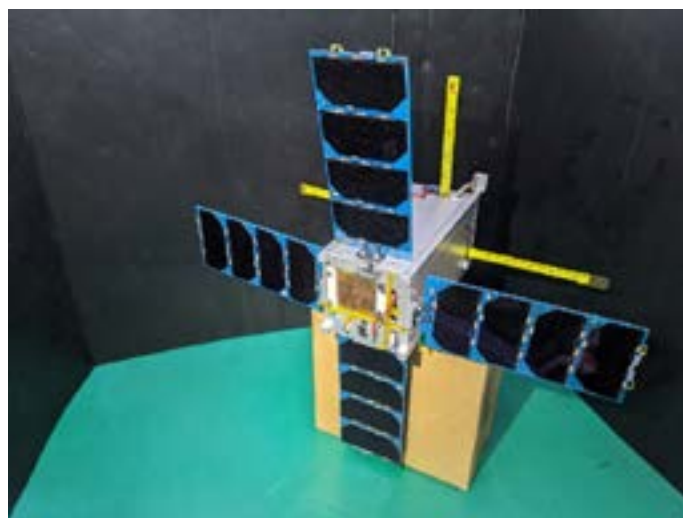


圖 1. 2U 立方衛星。

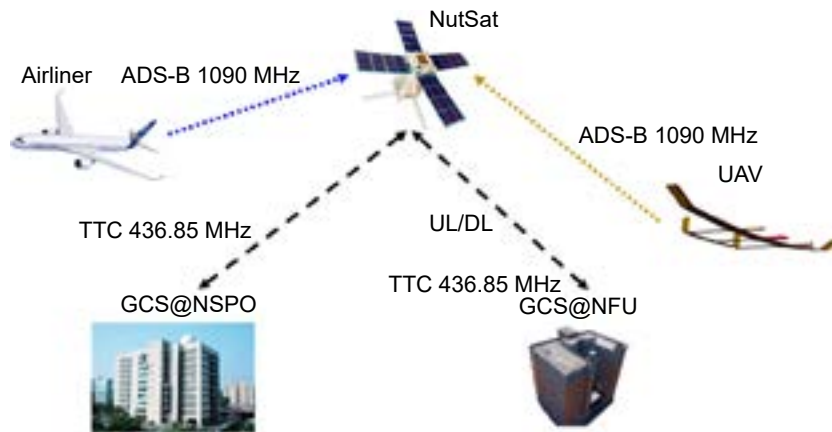


圖 2. 堅果立方衛星任務系統架構。

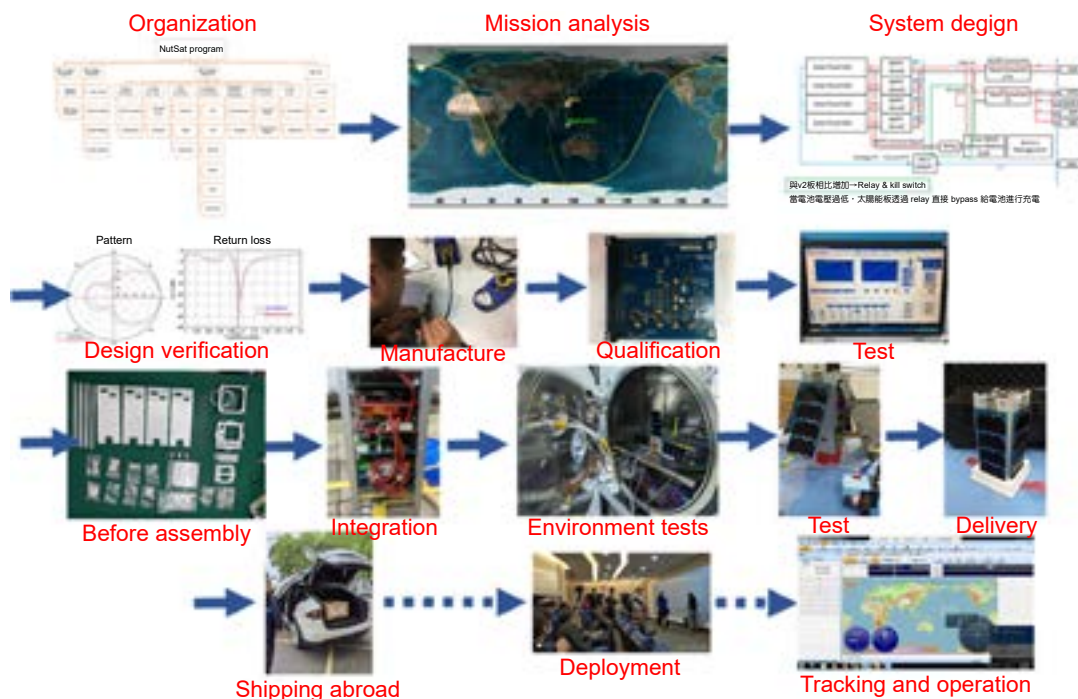


圖 3. 堅果立方衛星發展歷程。

然而由於美國發射代理商遲遲無法獲得發射許可，加上新冠疫情爆發，發射作業只能延宕，直到在發射代理商儲放一年的衛星進行發射前充電作業時發生異常，經國家太空中心專家建議運回衛星並進行檢修，在團隊成員的努力下，以六個月的時間進行衛星檢修作業，查明並修復充電功能並更新通訊模組，同時也完成複製另一枚衛星，兩枚衛星接續完成各項整合測試，也順利通過各項環境測試，最終，由太空中心專家選定其中一枚重新運送至美國進行發射作業。疫情緩和後衛星發射的作業在 2022 年 11 月 26 日順利由 SpaceX 的火箭運送至國際太空站進行衛星投放，衛星也同樣在太空站儲放遲至 2022 年 12 月 29 日才真正投放進入太空軌道中。衛星入軌後當天的衛星遙測資料便由國外業餘衛星追蹤者接收到訊號，訊

號如圖 4 所示；後續國家太空中心公布遙測訊號的解碼方式後，國際業餘衛星追蹤者便可直接將衛星訊號部分資料解碼出來，資料如圖 5。衛星訊號發射持續到 2023 年 3 月 30 日止，由於衛星軌道高度已低於 200 公里，如圖 6，美國北美防空司令部便不再追蹤。太空中心專家則判斷應已墜入濃密的大氣燒毀以致無法發射訊號，雖然不是我國存活最久的立方衛星，但仍是國家太空中心目前委託學術單位研製的立方衛星持續存活最久的一顆。這枚總共存活了三個月，透過國家太空中心地面站、虎科大地面站、國內及全球業餘衛星追蹤者的協力追蹤接收，讓堅果立方衛星團隊有機會透過大量遙測資料與衛星操作過程檢視設計的成果，如圖 7、圖 8、圖 9、圖 10。

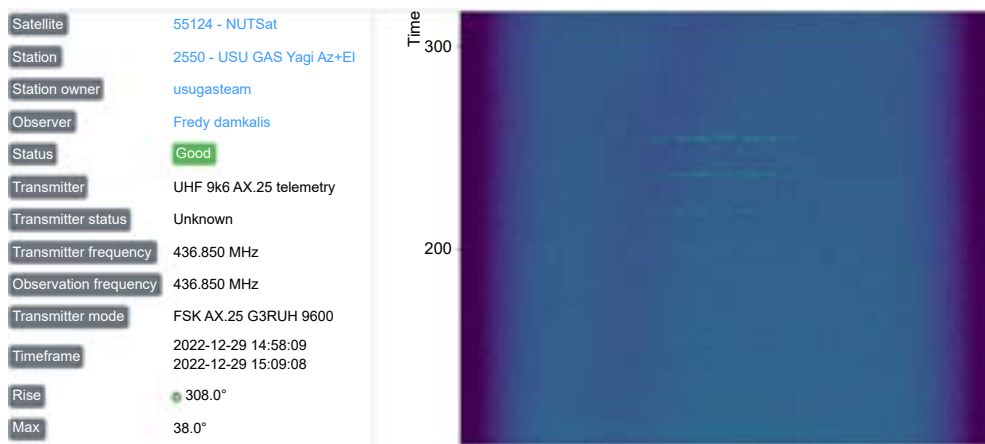


圖 4. 衛星發出的無線電訊號瀑布圖。

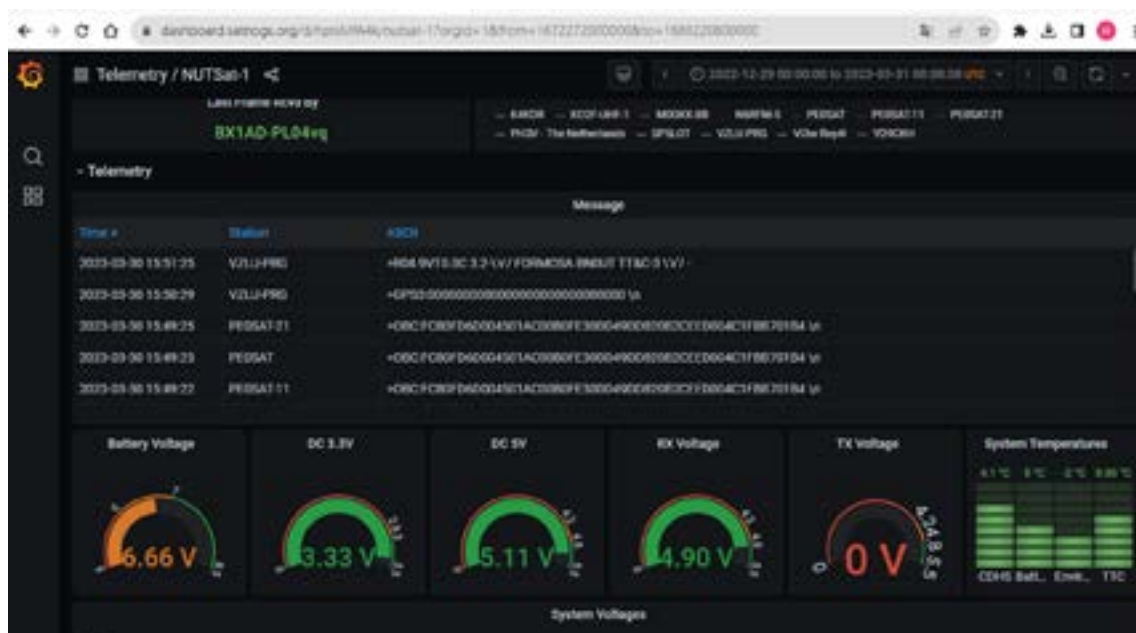


圖 5. 衛星訊號解碼資料圖形化界面。

回顧堅果立方衛星的設計過程，團隊共有五位教師分別帶領一至二位研究生進行研製工作，教師專業包括導航控制、通訊、電力、熱流與結構，國家太空中心則為三個團隊的師生辦理衛星工程相關入門課程，包括衛星系統工程、衛星姿態控制、衛星結構與熱控制、衛星環境測試等課程，課程以工程實務內容為主，對於大多數科技大學的學生而言是新奇的，這些短期的課程對後續衛星研製工作提供一定的基礎，也補足了校內的資源。

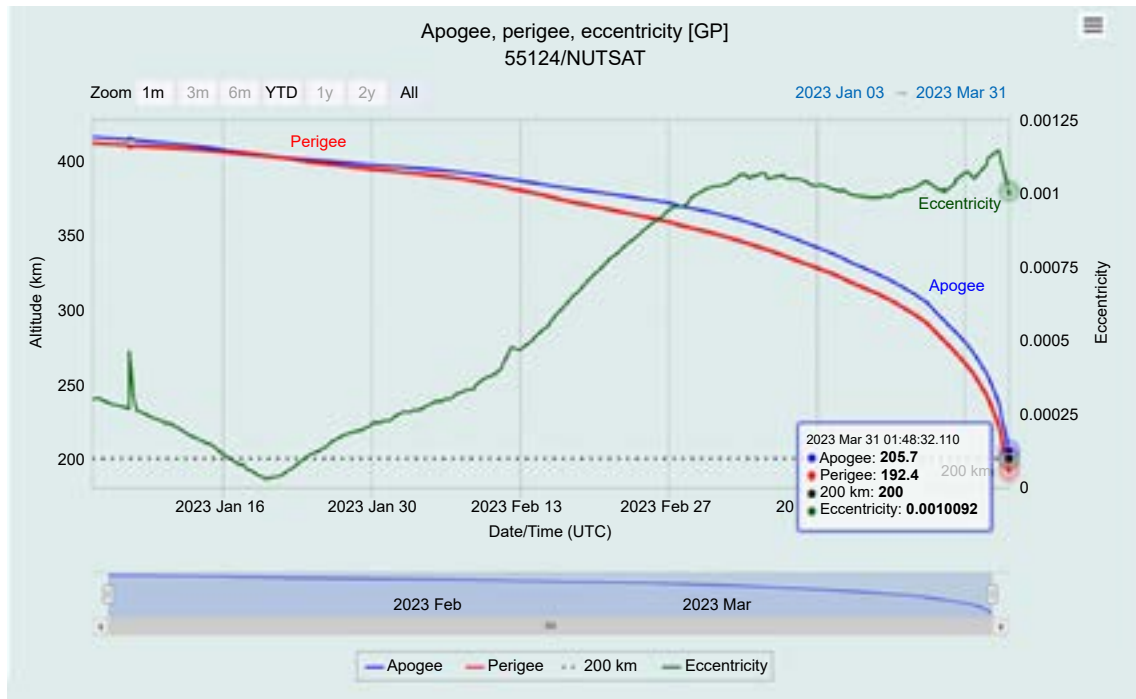


圖 6. 堅果立方衛星軌道高度變化圖。

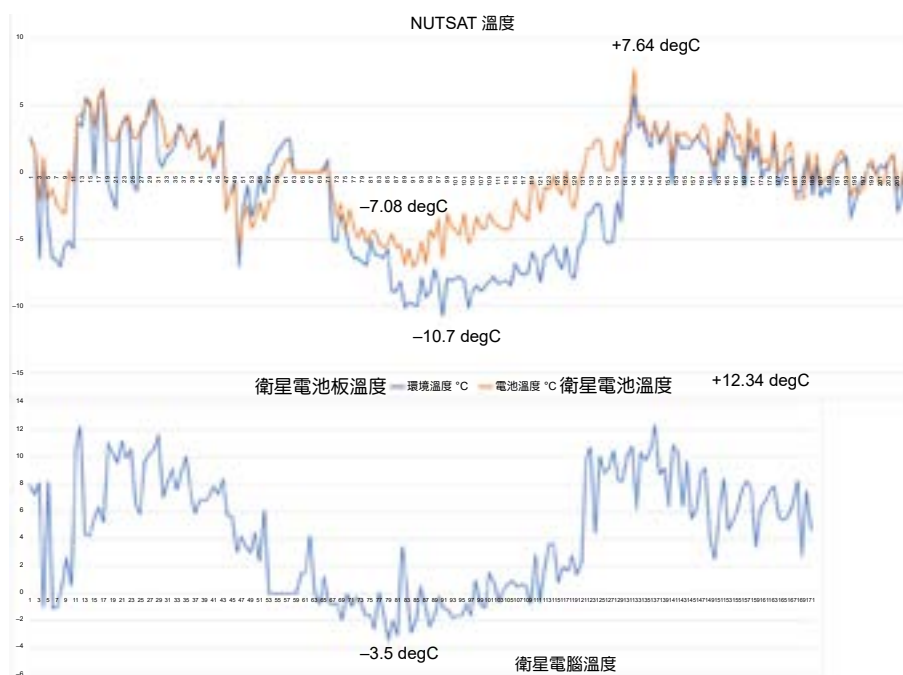


圖 7. 衛星本體溫度變化圖。



圖 8. 業餘衛星追蹤愛好者建立堅果立方衛星遙測資料儀表面板。

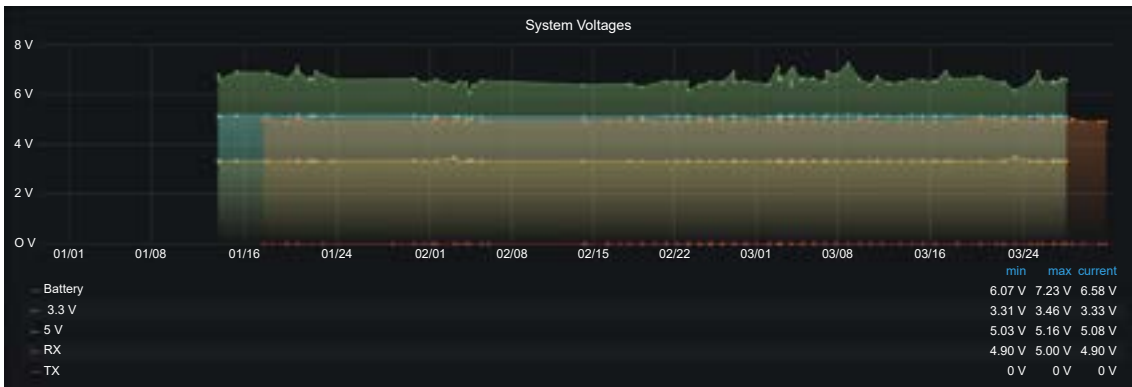


圖 9. 堅果立方衛星電壓變化歷程。

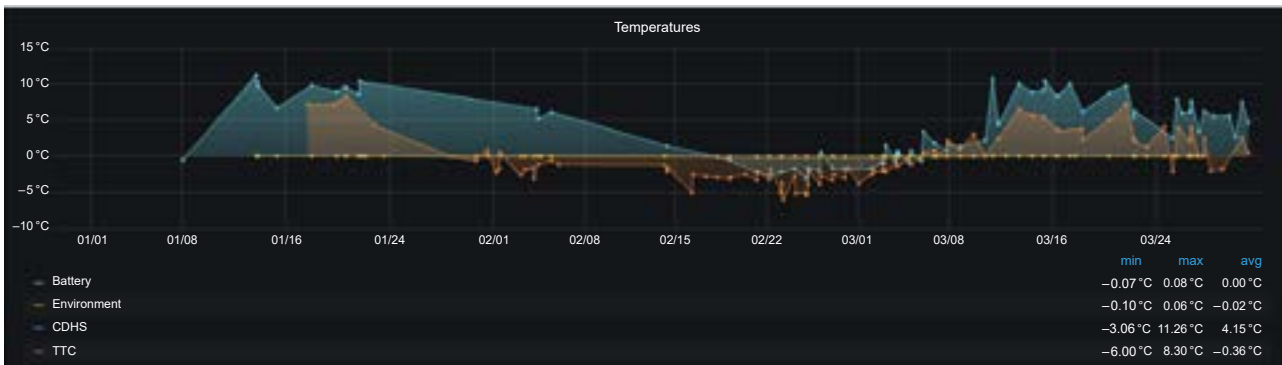


圖 10. 堅果立方衛星各次系統溫度變化歷程。

堅果立方衛星大致花了一年的時間完成設計工作，每個月的工作報告加上從任務設計、初步設計審查到關鍵設計審查，緊湊的各階段設計工作加上報告總算是逐步打造出衛星的雛形，在設計階段事實上也完成了衛星各次系統的設計實作與測試，自製次系統如圖 11 所示，因為在設計階段的次系統仍需驗證其硬體功能與性能滿足整體衛星規格需求，對於大多數科技大學的學生而言，與其建立複雜的數學模型與模擬不如直接實作以測試方式進行驗

證，因此堅果立方衛星多數的設計是建構在實作與測試的基礎上。此外，在國家太空中心專家的要求下，設計文件的撰寫也成為學生工程設計的重要訓練，而文件內容也反映著設計的過程與結果，從某種角度而言，衛星設計似乎是一種文件驅動的設計方式，而文件的架構與流程建立在太空中心累積的經驗之上，是一種標準化的設計流程，即便在我們僅善於技術實作的狀況下，仍然提升設計效率並降低錯誤的機率，加上師生的工作效率，確保了堅果立方衛星研製進度的良好控制。

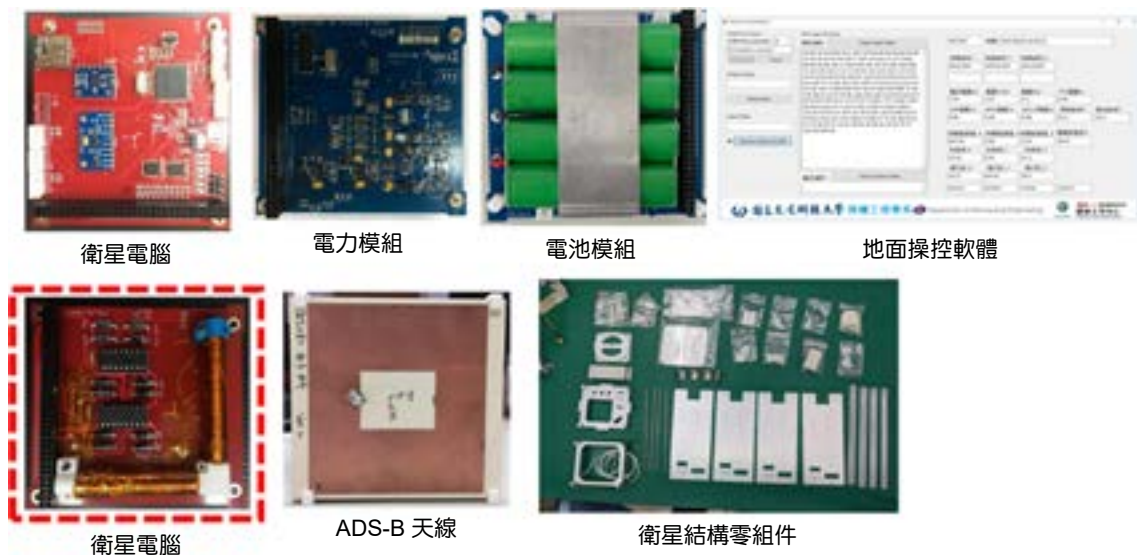


圖 11. 堅果立方衛星自製軟硬體次系統。

第二年的工作主要在持續次系統各項測試與修改工作，後期則進行衛星硬體組裝整合工作，其中關鍵電子元件與模組進行輻射測試對於團隊來說是最新奇的一項，第三年則主要進行包含常壓熱循環、真空熱循環與振動測試等工作，測試的準備工作繁複與費時絕對遠勝測試過程。除了設計文件的撰寫外，這階段又新增了測試計畫的撰寫。太空中心專家同樣費心的指引測試規劃，讓各項測試順利完成。三年多林林總總的研製工作已經產生出大量的文件報告，很難在這篇短短的文章中一言以蔽之。但是研製工作實實在在地推動著團隊所有人不僅在專業上完成工作，更要能在團隊中確保溝通與合作。堅果立方衛星研製計畫讓團隊中所有各有所長的研究生，透過執行專案過程學習所有與衛星相關的專業知識，而衛星發射後追蹤與操作收集而來的遙測資料也展現研製的成果，並為後續建立寶貴的經驗傳承。

以立方衛星研製方式推動工程教育是一種問題導向的學習方式 (problem based learning)，相當辛苦但也相當有效率地培養出即戰力的太空工程人才。相較於傳統科研計畫執行訓練學生而言，由專家指引加上長期而持續的研製計畫目標將是最好的太空工程教育模式。

## 作者簡介

呂文祺先生為法國土魯斯大學資訊博士，現為國立虎尾科技大學飛機工程系暨航空與電子科技研究所副教授。

Wen-Chi Lu received his Ph.D. in Computer Science from University of Toulouse. He is currently an Associate Professor in the Department of Aeronautical Engineering & Graduate Institute of Aviation and Electronic Technology at National Formosa University.

# 立方衛星之智能遙測酬載系統與 邊緣運算電路設計

## CubeSat Intelligent Remote Sensing Payload System and Edge Computing Circuit Design

李佩君、徐培翔

Pei-Jun Lee, Pei-Hsiang Hsu

將邊緣人工智慧 (edge artificial intelligence, Edge AI) 技術應用於智能遙測立方衛星的星載系統，進行衛星影像處理執行任務將成為遙測衛星技術發展趨勢。通過整合人工智慧邊緣運算，實現星載上對衛星取影的即時且低資源消耗的處理，研究的關鍵目標是設計基於邊緣人工智慧的低功耗遙測酬載影像處理電路，成功實現人工智慧的邊緣運算。為應對低亮度影像的挑戰，我們提出了一種有效的亮度增強演算法，透過與不同損失函數的比較確保處理後的影像更容易辨識。此邊緣計算採用實現於 FPGA 的卷積 (convolution) 架構，提供了高效的神經網路加速以及達到低亮度影像增強功能。

This project is dedicated to the application of artificial intelligence (AI) technology in the onboard system of intelligent remote sensing CubeSats, specifically focusing on RGB satellite image processing. By integrating AI edge computing, we have achieved rapid and resource-efficient processing of satellite images. The key objective of the research is to design a low-power remote sensing payload image processing circuit based on edge AI, successfully implementing AI edge computing. To address the challenge of low-light images, we propose an effective brightness enhancement algorithm, ensuring that the processed images are more easily recognizable through comparisons with different loss functions. The edge computation employs a convolution architecture implemented on an FPGA, providing an efficient neural network acceleration with the same functionality.

### 一、智能遙測酬載

#### 1. 邊緣運算於大型衛星和立方衛星上之應用

邊緣運算 (edge computing) 是一種將數據處理能力移到數據生成的地方，而不是依賴中央數據處理中心的計算模型。在衛星應用中，邊緣運算可以應用在大型衛星和立方衛星的不同情境中。大型衛星 (large satellites) 大型衛星通常攜帶較強大的計算資源，用於處理龐大的

感測器數據、進行影像處理、任務計畫和控制等。在大型衛星上，邊緣運算可用於即時的數據分析、壓縮、過濾，以減少對地球上的地面站的通信需求。這可以提高系統的效能和即時性，並減少對地球上的基地站基礎設施的依賴。

立方衛星 (CubeSats) 的邊緣運算可用於局部數據預處理、特徵提取或簡單的決策。例如當立方衛星偵測到特定事件或目標時，可以使用邊緣運算執行初步的分析，僅將重要的訊息或影像傳送回地球，而不是全部原始數據。但相較於大型衛星，立方衛星具有多方面的優點，這些優點使它們成為太空科學、地球觀測、科學研究和商業應用中越來越受歡迎的選擇。由於小巧輕便、標準化的結構和元件，設計和製造成本相對較低，立方衛星的標準化尺寸 (如 1U、2U、3U 等) 使得它們易於設計和製造。這種標準化促使了更快的開發週期，更容易實現大量生產，同時減少了工程師在設計和組裝上的困難，使得更多的機構可以參與太空探索。

## 2. 酬載處理單元與控制軟體

為了實現拍攝和即時影像處理，將致力於光學酬載系統以及超微型深度學習影像增強框架。這個系統將會符合立方衛星的規範，同時也能夠成為深度學習智能遙測的平台。光學酬載系統包含兩個部分，用以完成取像及影像增強處理，包含了以 Python2000 為主要取像單元以及以 Microsemi Smartfusion2 FPGA SoC 為主的影像處理及計算模塊。影像擷取單元為一高解析度 CMOS 感測的光學系統，此系統提供的解析度為  $1920 \times 1200$  像素。搭配 35 的鏡頭可提供單點解析度達 68 公尺的影像，而整幅影像可涵蓋的範圍為  $131 \times 82$  平方公里。運算處理單元為一搭配有 MCU 之高效能的 FPGA SoC (system on chip) 並採用抗輻射、低功耗與支援錯誤修正碼 (ECC) 記憶體之設計。故本光學酬載將提供多種介面以因應任務的調派、資料的儲存與資料之傳送等需求，因此擁有多種類的輸出入介面如 USB/UART/SPI/I2C/GPIO，且搭載高達 2GB 的抗輻射 NAND 快閃記憶體。如此，所擷取與處理過的影像資料可以有效地儲存並依規劃傳送回地面站。同時，可因遙測任務之需求更改相關之排程。圖 1 為酬載之影像擷取單元及運算處理與存儲單元。此兩單元以太空規連接線相連接，經由此傳輸線傳輸影像及控制訊號。

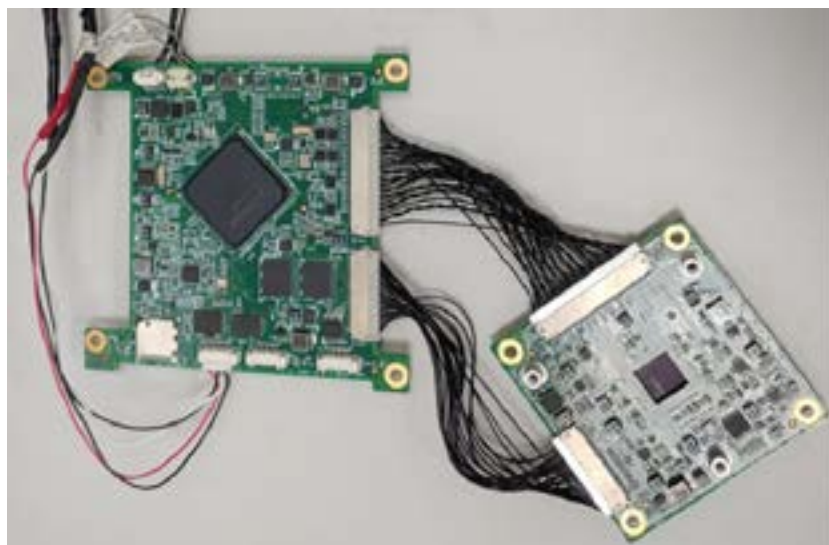


圖 1. 光學酬載之影像擷取單元及運算處理單元。

### 3. 酬載處理單元與控制軟體

利用神經網路影像增強功能，首先將拍攝後的影像資料經由 MCU 控制 FPGA IP 進行智能影像增強的計算，計算完的增強影像結果或是原始影像資料 (RAW data) 皆可經由 SPI 介面傳輸至衛星本體的酬載電腦 (on board computer, OBC)，留待可傳輸時再行將資料與影像傳輸至地面站。圖 2 為影像運算處理單元 IP 之關聯方塊圖，保留既有的 FPGA 運算 IP，且含有泛用性高的矩陣運算處理單元以達成提升影像運算處理 IP 之計算能力及泛用性之目的。

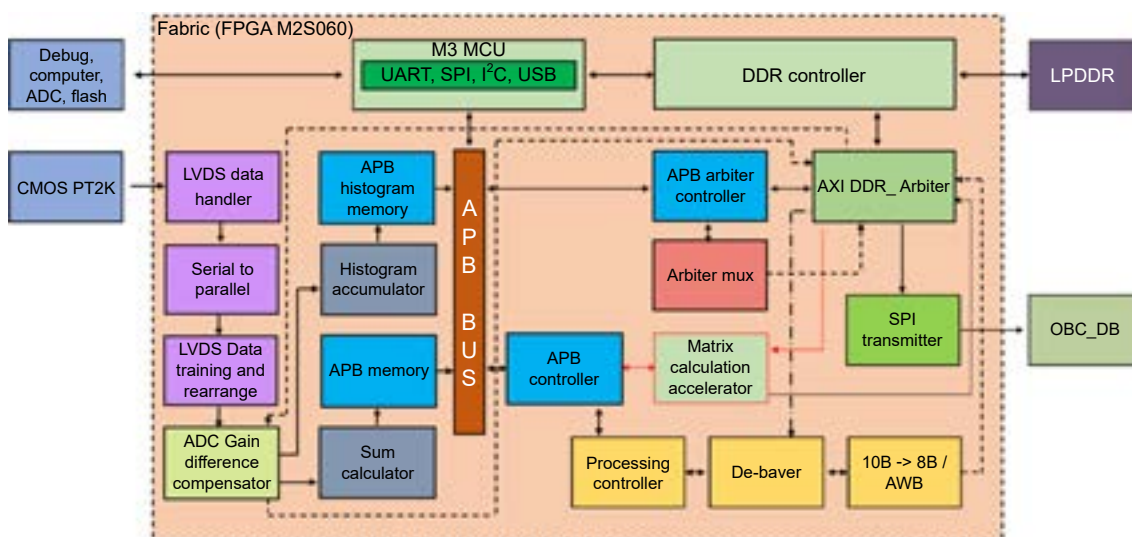


圖 2. 各影像運算處理 IP 關聯方塊圖。

酬載之控制軟體開發方面主要是為了能在惡劣的環境下操作，且須能符合任務的要求，因此在軟體的設計考慮上需注意大量的資料檢查跟通訊協定處理。系統方面主要使用常見於立方衛星的 FreeRTOS 來做為主要即時操作系統。圖 3 為操作系統的功能架構圖。

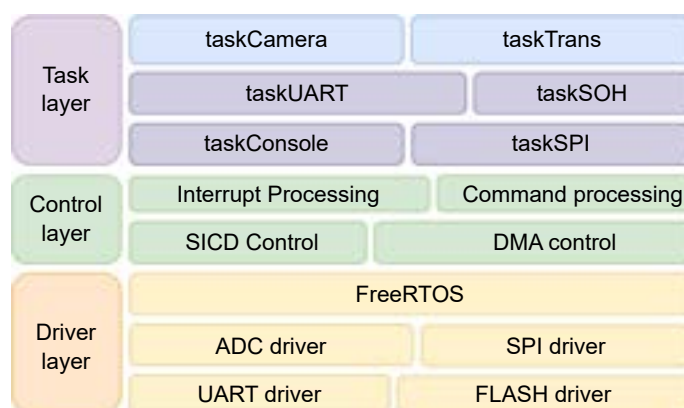


圖 3. 操作系統功能架構圖。

任務調度皆由 FreeRTOS 來控制。而操作系統也處理各種周邊 I/O 的控制如：SPI、ADC、UART、FLASH 等。酬載主要是經由 UART 通道和衛星本體間傳送控制命令跟回傳資料，如圖 5 命令經由 UART 介面傳輸，而影像資料則經由 SPI 介面傳輸。酬載影像數據

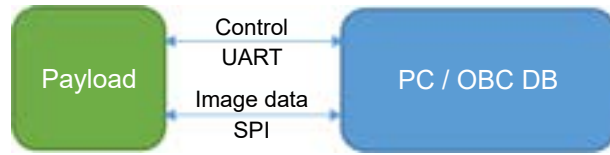


圖 4. 酬載和衛星本體間之連結通道。

傳輸方面則是需要利用 FreeRTOS 上之任務，來控制 FPGA 中之硬體來進行 SPI 界面資料的傳輸，圖 5 為酬載影像資料傳輸的結果。

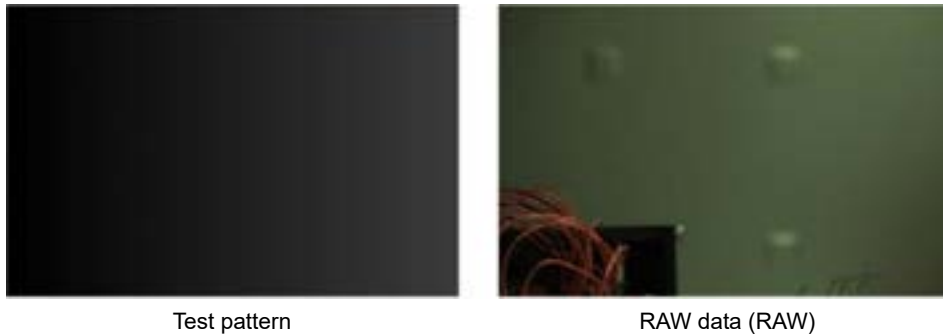


圖 5. 酬載經由 SPI 介面將影像資料傳輸至桌上型電腦之結果。

影像壓縮方面目前是採用 LZO 無損壓縮格式<sup>(1)</sup> 來處理影像，壓縮一張 9 MB 的影像約可壓縮掉 20% 資料量，壓縮率 (CR) 約為 1.25，執行時間約 14 秒。

## 二、增強低亮度影像之先進模型

### 1. 為何使用 ZeroDCE<sup>(1)</sup> 作為基本架構

衛星影像中的低亮度影像是需要透過增強影像的亮度、對比度以及清晰度來進行改善，改善時須保留影像的細節並減少雜訊，這是一大挑戰。為了增強低亮度影像的實現，有傳統的影像處理以及現在更先進的機器學習方法，傳統的影像處理技術包含了線性／非線性轉換、直方圖均衡化以及影像融合技術等等…。

基於機器學習的方法與傳統技術相比，實驗結果方面顯示出具有顯著的優勢，然而基於機器學習技術的效果取決於數據集，且模型的複雜性會增加計算時間。在低亮度影像增強的問題中，生成對抗網路 (generative adversarial networks, GANs)<sup>(3)</sup> 可以利用低亮度影像來產生新的影像，但 GANs 的計算成本很高，而且增強後的影像會受到顏色失真與雜訊的影響，這兩個問題進而限制遙感影像的使用。zero-reference deep curve estimation for low-light image enhancement (ZeroDCE)<sup>(2)</sup> 可以從低亮度影像中產生出高階色調曲線，可以調整動態範圍並且保留著影像的細節，同時減輕了雜訊和顏色失真的問題，且計算成本也比 GANs 還要低。Retinex-Net<sup>(4)</sup> 的步驟包含了影像分解與連續增強，達到增強影像的低亮度，但這種方法有可能會導致重建影像失真以及產生雜訊；在非監督機器學習模型被用於低亮度增強的基準評估中，三個架構相比，ZeroDCE 在人類主觀視覺、全參考影像評估指標和執行時間方面都有優異的性能，因此 ZeroDCE 適合被使用在遙感任務中。架構如圖 6。

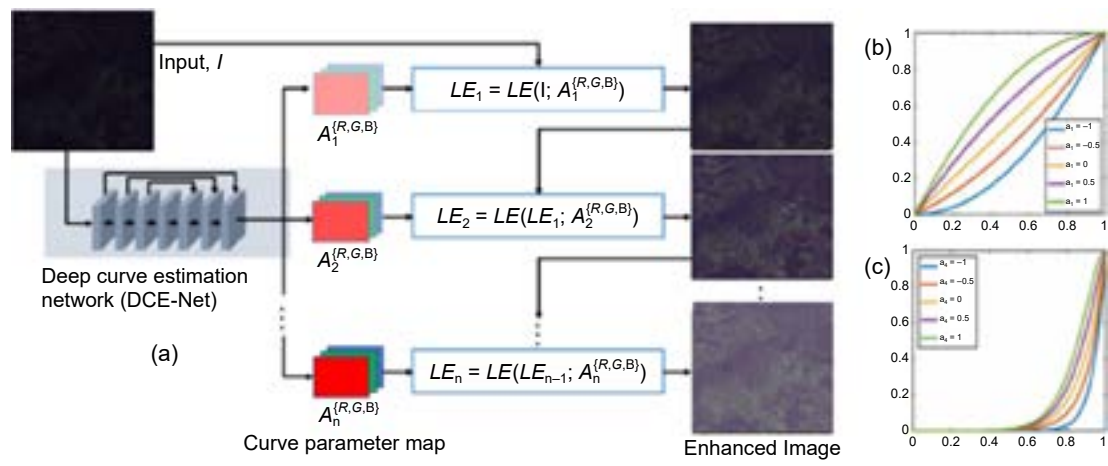


圖 6. ZeroDCE 之網路架構圖。

## 2. 前沿技術曲線估計 (cutting-edge curve estimation, CECe)

低亮度影像會降低對比度並且增加雜訊，這會使影像中的背景與物體難以辨別，通常物件偵測演算法是依據影像中的特徵和特性進行分類。因此提出可以被用於酬載的增強低亮度影像之曲線估計方法，擁有著低計算量的優勢，利於使用在有著資源量限制的衛星；此方法採用了後訓練方法進行神經網路的壓縮，將壓縮技術應用預先存放在神經網路模型的訓練權重以及偏差值中。使用地面站全精度的計算來產生權重與偏差參數，量化後被部署在酬載上，參考圖 7 的流程。

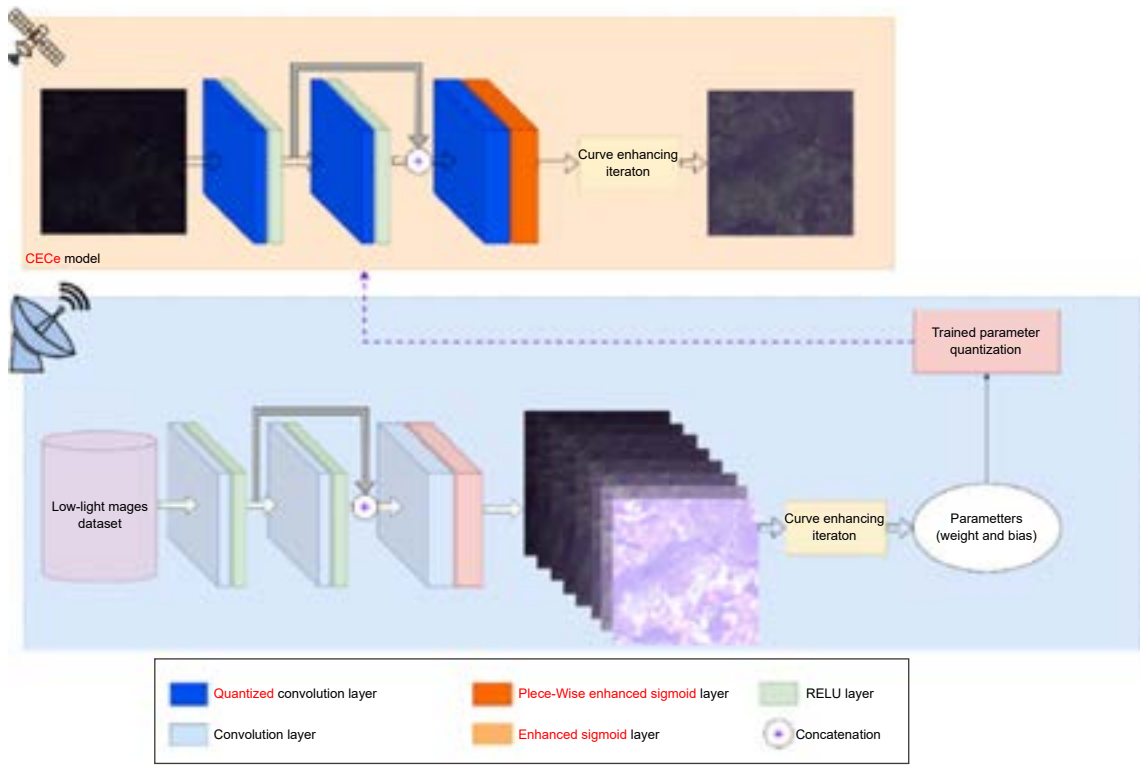


圖 7. 所提出的訓練模型與推理模型 CECe。

### 3. 訓練模型 (在地面站進行)

所提出的方法包括將訓練和推理階段劃分成不同的模型，訓練的模型是在具有無限資源的地面站進行訓練，相比之下 CECe 的推理模型在衛星上運作，衛星上的計算資源與功耗是有限的。此研究的主要目的是將基於 ZeroDCE 低亮度影像增強網路部署在衛星上，此研究減少隱藏層的數量，可以實現更小 DCE-Net 模型，達到明顯地降低隱藏層的複雜性與網路參數大小。圖 8 的內容呈現了原始的 DCR-Net 模型和減少隱藏層模型與第二個簡化層模型進行了比較。

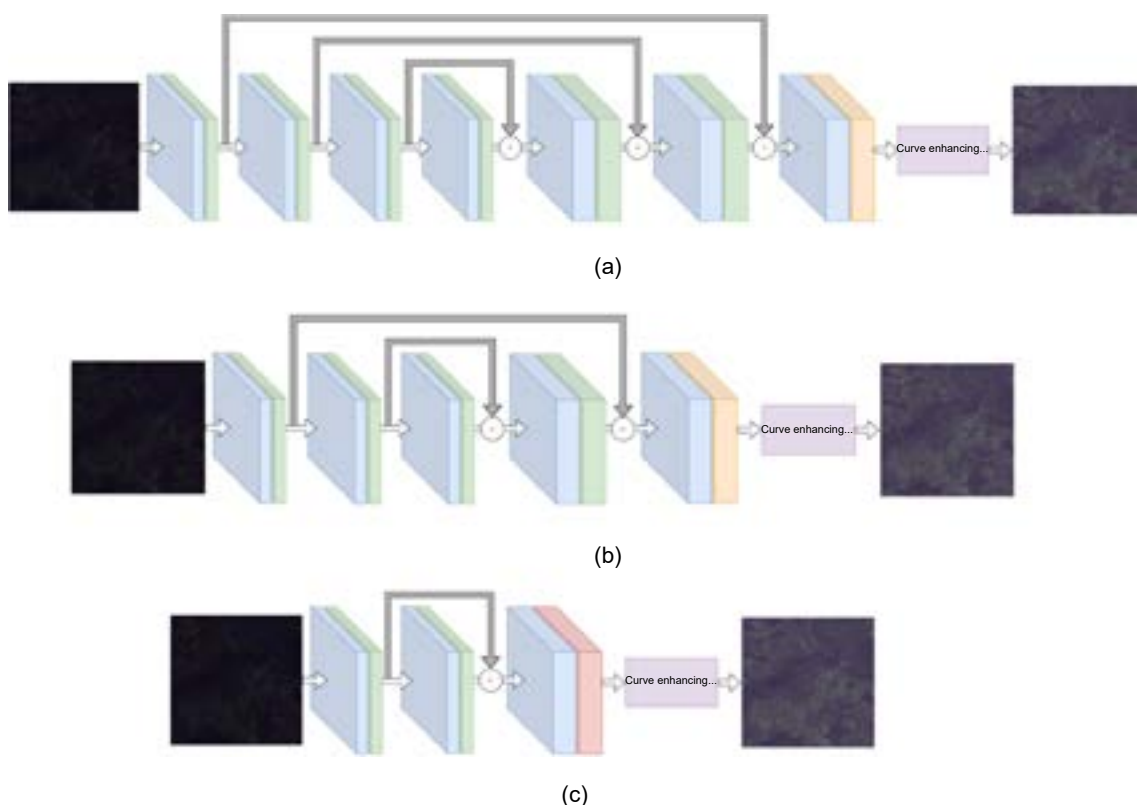


圖 8. 基於 DCE-Net 的減少隱藏層模型：(a) Original DCE-Net；(b) 1st minimalist layer model；(c) 2nd minimalist layer model with enhanced sigmoid layer, training model。

表 1. 比較乘法矩陣複雜度。

	Number of convolution layers	Multiply-accumulate operations (GMac)
Original DCE-Net	7	155.5
1st minimalist layer model	5	91.5
2nd minimalist layer model	3	25.52

表 1 將原始 DCE-Net 矩陣乘法複雜性與兩個簡化層 (minimalist layer) 進行比較。第一個簡化層模型由五個卷積層組成，乘法矩陣複雜度為 91.5 GMac，明顯的低於原始的 DCE-Net，第二個簡化層模型僅由三個卷積層組成，並且只有 25.52 GMac 的最低矩陣乘法複雜

度。在本研究中使用第二個簡化層作為訓練模型，因為它有最低矩陣乘法複雜度，更適合在有限資源的衛星酬載上實現。此外訓練模型使用 **sigmoid** 作為激勵函數，因為它比原先的 **Tanh**函數計算複雜度還要更低。

#### 4. 訓練損失函數

$$L_{col} = \sum_{\forall(p,q) \in \mathcal{E}} (J^p - J^q), \mathcal{E} = \{(R,G), (R,B), (G,B)\} \quad (1)$$

因為衛星影像的特點是暗的部分與亮的部分分布不平均，影像在塊之間有很高的區分性方程式 (1) 是原始的顏色損失函數，圖 9(a) 為原始影像，亮度非常低。為了更符合遙感影像的特性，因此在本研究引入了一種新的顏色損失函數，方程式 (2) 是新的顏色損失函數，結果為圖 9(b)，但顏色還是不利於肉眼判斷以及目標偵測。

$$L_{col} = \frac{1}{N^2 n(\mathcal{E})} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N \sum_{\forall(p,q) \in \mathcal{E}} [\lambda_{pq} (\bar{p} - \bar{q})^2] \quad (2)$$

$$\lambda_{pq} = \begin{cases} 0, & \text{if } p_{\min} > q_{\max} \text{ or } q_{\min} > p_{\max} \\ 1, & \text{else} \end{cases}$$

新的色彩損失函數比原始損失函數產生出更好的模擬結果。此外在本研究中還引入了一種新的增強色損失函數，該函數基於新的顏色損失函數方程式 (2) 和 **Kullback-Leibler divergence (KL)** 損失函數<sup>(5, 6)</sup>。方程式 (3) 是應用於每個成對影像通道 (R-B ; R-G ; G-B) 的 **KL** 損失函數。結果如圖 9(c)，雖然提亮了許多，但還是有些許色偏。因此最後提出目前所使用的損失函數。

$$L_{KL} = KL|R-B||R'-B'| + KL|R-G||R'-G'| + KL|G-B||G'-B'| \quad (3)$$

最新的增強損失函數結合了新的色彩損失函數和 **KL** 損失函數，使背景色彩更接近原始影像。並減少溫暖 (紅色) 的照明條件。圖 9(d) 將原始影像與差異損失函數進行了比較。結果發現，結合兩個損失函數的增強損失函數是最佳的損失函數，並在本研究中用於增強低亮度影像。

#### 5. 推理模型 (執行在衛星酬載上)

推理模型使用的方法是前沿技術曲線估計 (**cutting-edge curve estimation, CECE**)，所提出的 **CECE** 模型被設計為高效且可以直接部署在微衛星 (**CubeSAT**) 硬體上，具有低功耗和計算限制。此推理模型分成五個部分，首先是第一層對輸入的影像進行 **signed-16-bit** 的歸一化。第二個及第三個部分會使用卷積核大小為 3 的深度卷積 (**depth-wise convolution**)，接著逐點卷積和使用 **RELU** 作為激勵函數。第四部份包括量化的深度卷積 (**depth-wise convolution**) 以及使用激勵函數 **sigmoid**。第五部分是曲線增強迭代，用於估計低光度和增強影像之前的光增強曲線；為了實現上述內容，所提出的模型採用了最小的卷積核以及層數，並利用量化卷積和分段 **sigmoid** 函數在衛星酬載上的 **CECE** 部署期間實現硬體的最佳化。

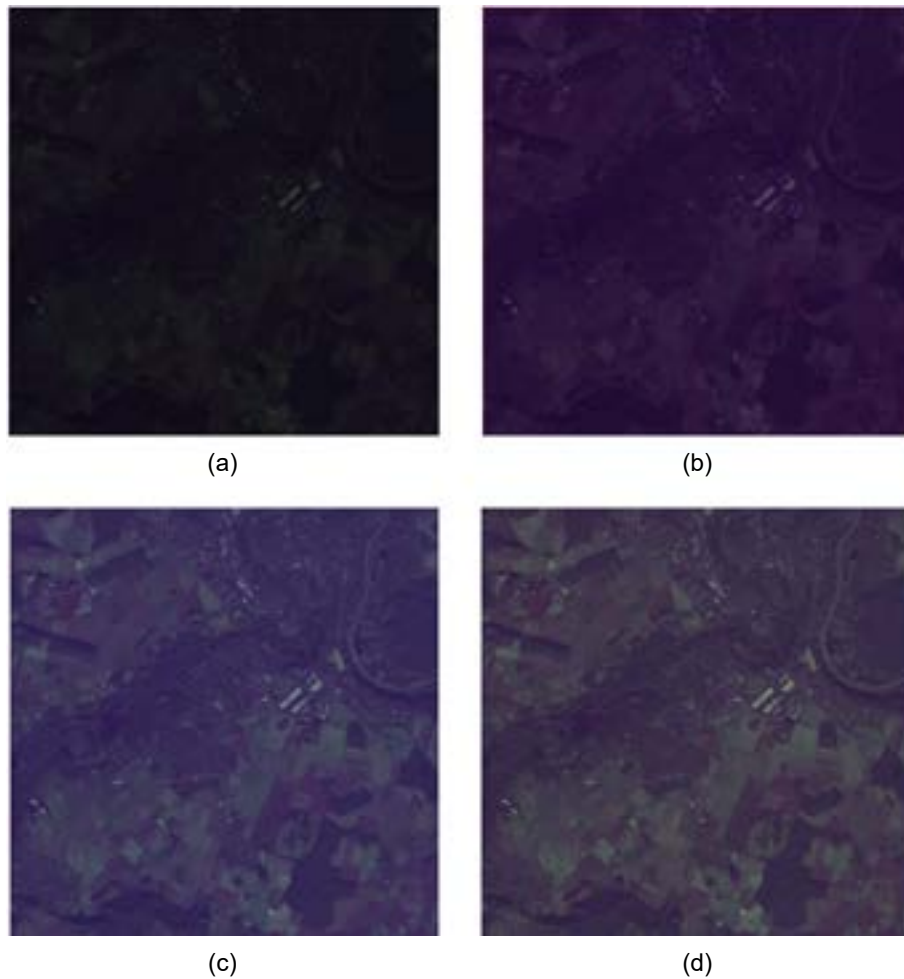


圖 9. 使用不同損失函數的增強影像：(a) 原始影像 (b) 使用原本的損失函數之影像 (c) 使用新的顏色損失函數之影像 (d) 使用新的增強顏色損失函數之影像。

### 量化卷積 (quantized convolution)

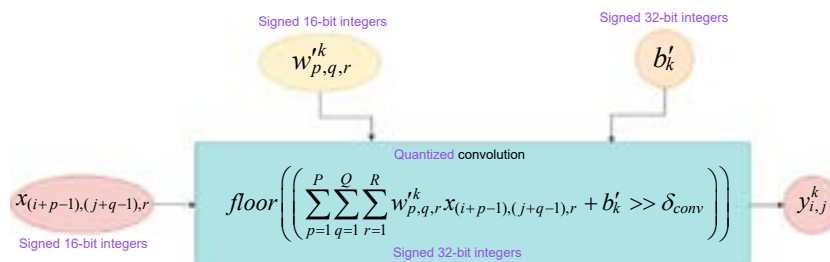


圖 10. 電路板上量化卷積之設計。

以下是所提出的量化卷積過程，首先將輸入數據量化為有符號整數，接著與卷積層的量化權重相乘 ( $w'_{p,q,r}$ )，然後將得到的值與量化的偏置值 ( $b'_k$ ) 相加，最後將上一步得到的和，配合量化比例因數 ( $\delta_{conv}$ ) 進行右移。圖 10 是量化卷積的詳細步驟，對權重、偏差進行量化，並對輸入影像進行正規化，然後使用 32 位有符號操作處理量化卷積。接著將得到的卷積值

使用  $\delta_{conv}$  進行量化，並使用 **floor** 函數進行四捨五入。 $\delta_{conv}$  的值被定義為  $\delta_w$  和  $\delta_{norm}$  的值相等，表示為  $\delta_{conv} = \delta_w = \delta_{norm}$ 。因此，特徵圖或輸出值只需要 16 位元有號數進行儲存，並可以快速地在一層進行處理。

### 分段 sigmoid 函數 (piece-wise sigmoid)

在深度學習的領域，光照圖的估計是一項關鍵的技術，被使用來增強低亮度的影像，透過增強亮度和對比度來提高影像細節。激活函數負責生成光照圖。常用的激活函數有 sigmoid 和 tanh 函數，分別將輸入值映射到 0 到 1 的範圍和 -1 到 1 的範圍。sigmoid 和 tanh 函數都具有 S 形曲線，但 tanh 函數相對於 0 對稱，而且飽和速度比 sigmoid 函數慢。

假設  $\text{sigmoid}(x)$  的計算複雜度近似為  $O(e^x)$ ，因為它涉及指數函數的計算。而  $\text{tanh}(x) = 2\text{sigmoid}(2x) - 1$  的計算  $\text{sigmoid}(2x)$  則涉及到  $e^{2x}$  的計算，近似為  $O(e^{2x})$ 。雖然  $e^x$  和  $e^{2x}$  函數都具有較高的計算複雜度，但  $e^{2x}$  函數由於需要進行額外的乘法操作。因此，tanh 函數的計算複雜度高於 sigmoid 函數。

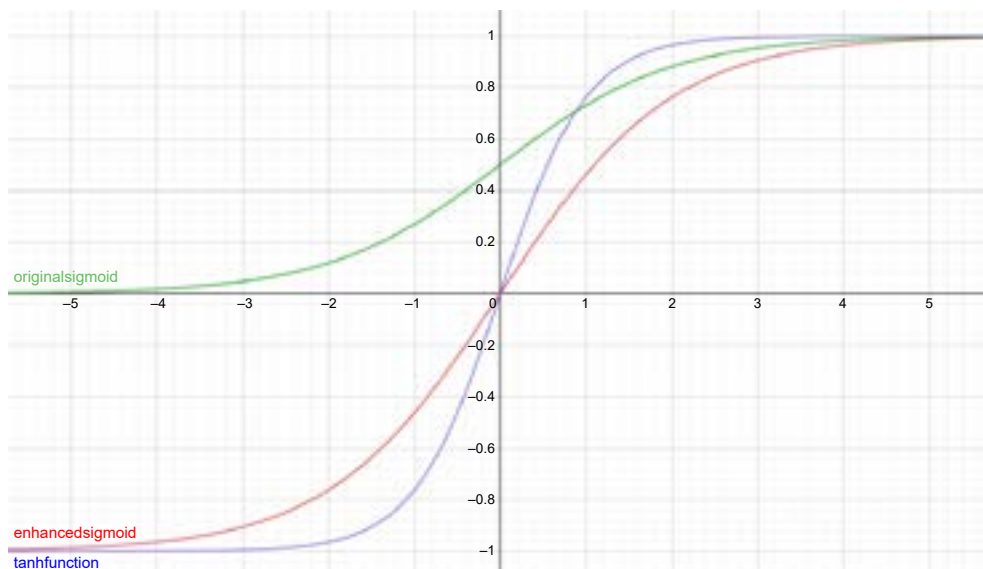


圖 11. 提出的增強 sigmoid 函數－方程式 (4)。

在基於深度學習的影像增強模型中，通常會使用 sigmoid 或 tanh 函數作為最後一層。但它們有著高計算複雜度的特性，例如除法和指數的運算，可能會成為深度學習模型的計算時間上的瓶頸。因此提出了一個增強 sigmoid 函數－方程 (4)，這個函數比原始的 tanh 函數只需要更少的計算資源量，並且在複雜度上與 sigmoid 函數相似。

$$\text{enhanced\_sigmoid}(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1 \quad (4)$$

$\text{enhanced\_sigmoid}(x)$  函數的計算複雜度近似為  $O(e^x)$ ，這近似於  $\text{sigmoid}(x)$  的計算複雜度。圖 11 比較了提出的  $\text{enhanced\_sigmoid}(x)$  (以紅色曲線表示)，該函數以零為對稱中心，其範圍在 -1 到 1 之間，與原始函數  $\text{sigmoid}(x)$  (綠色曲線) 和  $\text{tanh}(x)$  函數 (藍色曲線) 進行

了比較。提出的增強 sigmoid 函數不僅具有比 tanh 函數更低的計算複雜度，而且飽和速度比 sigmoid 函數更慢。在提出的 CECe 方法中，增強 sigmoid 函數被用作地面站的生成光照圖訓練模型的最後一層。

本研究提出了一個基於  $quantized\_sigmoid(x)$  的新的分段  $quantized\_sigmoid$  函數，以加快生成光照圖的推理過程。圖 12 展示了這個分段 sigmoid 函數。

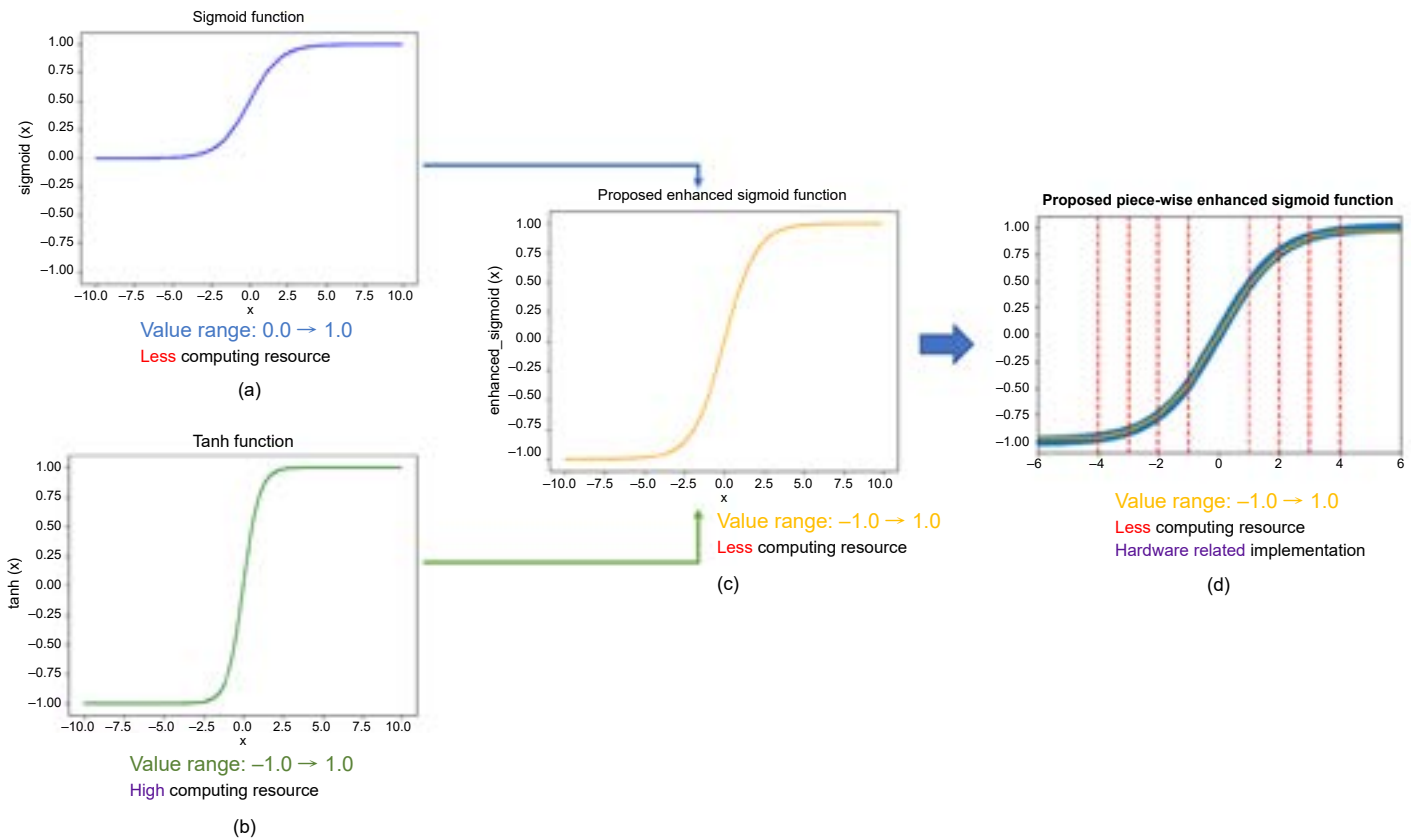


圖 12. 分段 sigmoid 函數 (Piecewise sigmoid function)。

## 6. 邊緣運算電路設計的結果進行船艦偵測定位比較

為了驗證在不同的增強損失函數下遙測影像是否達到預期效果，我們選擇使用船艦偵測定位進行評估，主要採用深度學習模型 You Only Look Once Version7 (YOLOv7)。在原始影像中未進行任何亮度增強，如圖 13(a) 所示。這不僅使肉眼難以判斷，同時深度學習模型在船艦定位上也表現不佳，僅偵測到其中一艘船，並在右上角發生了定位錯誤。圖 13(b) 展示了使用原始 ZeroDCE 增強的結果。由於色偏的原因，仍然僅能偵測到一艘船艦。然而，由於亮度的提升，成功減少了陸地上的錯誤偵測。儘管如此，船艦定位的效果並不明顯。為此提出了使用不同損失函數的架構。在這個架構中，我們應用不同的損失函數，如圖 13(c)(d) 所示，相對於原始亮度增強模型和原始影像，可以明顯看出船艦偵測定位的結果更好。而且值得注意的是圖 13(d) 甚至能夠準確定位到四艘船艦，同時沒有偵測到錯誤的物件。增強損失函數結合了新的色彩損失函數和 KL 損失函數解決了色偏現象，使模型更貼近原始影像的真實顏色。這樣的改進不僅提升了視覺判斷的可靠性，也使得深度學習模型在船艦定位方面取得了更優越的效果。

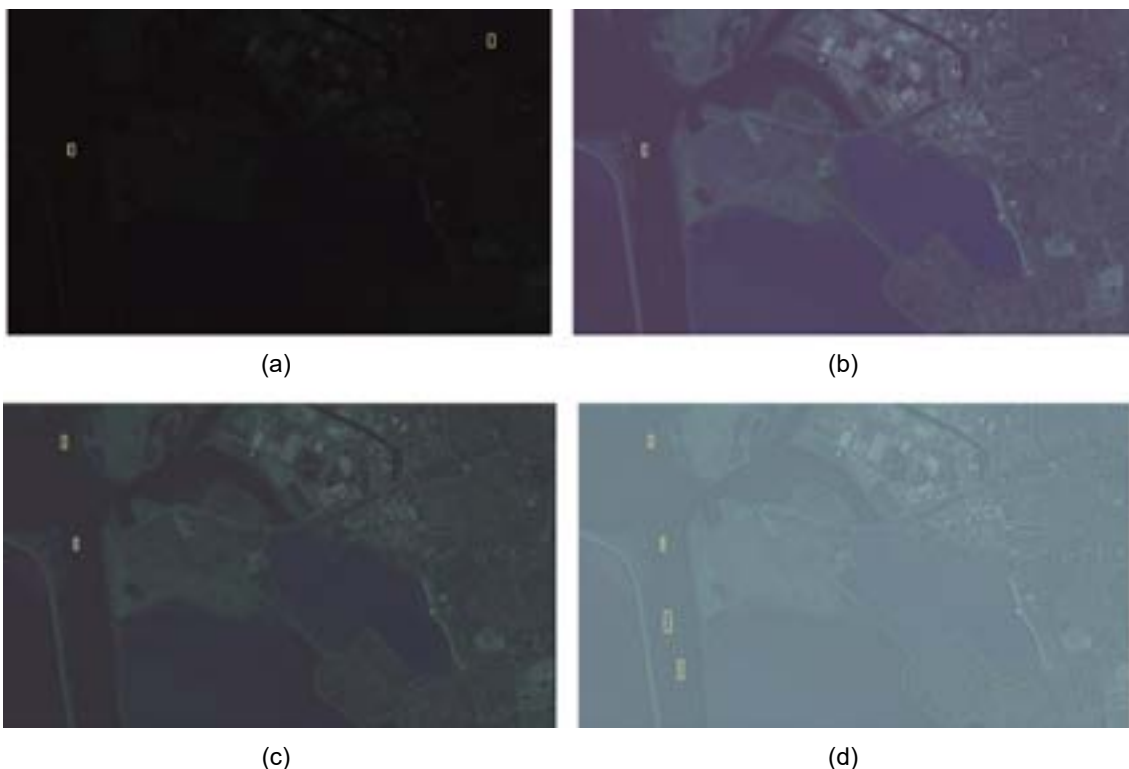


圖 13. 定位不同損失函數增強影像下的船艦：(a) 原始影像 (b) 使用原本的損失函數之影像 (c) 使用新的顏色損失函數之影像 (d) 使用新的增強顏色損失函數之影像。

### 三、實現於FPGA的卷積架構

#### 1. 整體運算單元的架構設計

近年來深度神經網路在 FPGA 的應用上得到很大的突破，和以前的 GPU 相比，無論在速度或功耗上皆有顯著地提升。由於本架構使用的深度神經網路為 ZeroDCE，在運算中進行了三次卷積 (convolution)，如圖 14 所示。

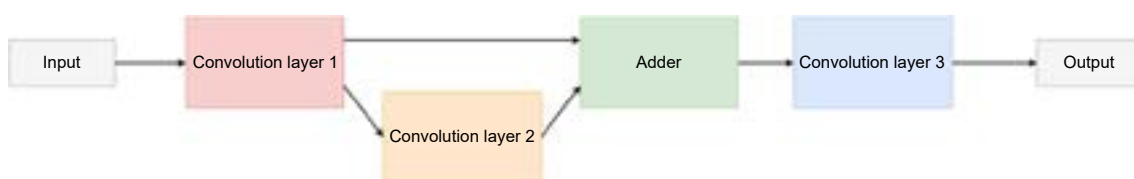


圖 14. 整體架構的流程方塊圖。

在深度神經網路的運算過程中最繁複的運算步驟是卷積的計算，在硬體上需要進行非常多次的乘累加運算，對於卷積的電路設計是首要目標，它將影響整體運算單元的計算複雜度、運算速度、資源使用量和功耗等。為了有效地提升運算速度，並適當地分配資源使用量，本架構將各步驟以 pipeline 的方式分成四等分，而每部分都以平行的方式進行資源分配，如圖 15。

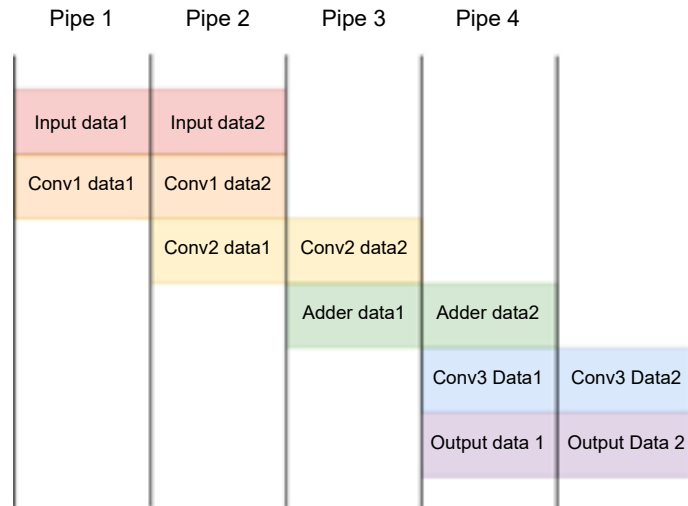


圖 15. 卷積架構的 pipeline 處理。

本架構是的資料流以單筆  $n$ -bit 的串列資料運行，為了更好地區分各運算單元的功能，圖 16 顯示了資料流在各運算單元的運作流程，值得注意的是，Conv Layer 運算單元會在每層卷積中重複使用，並依依輸入各層卷積的激勵函數 ReLU 和 Sigmoid。

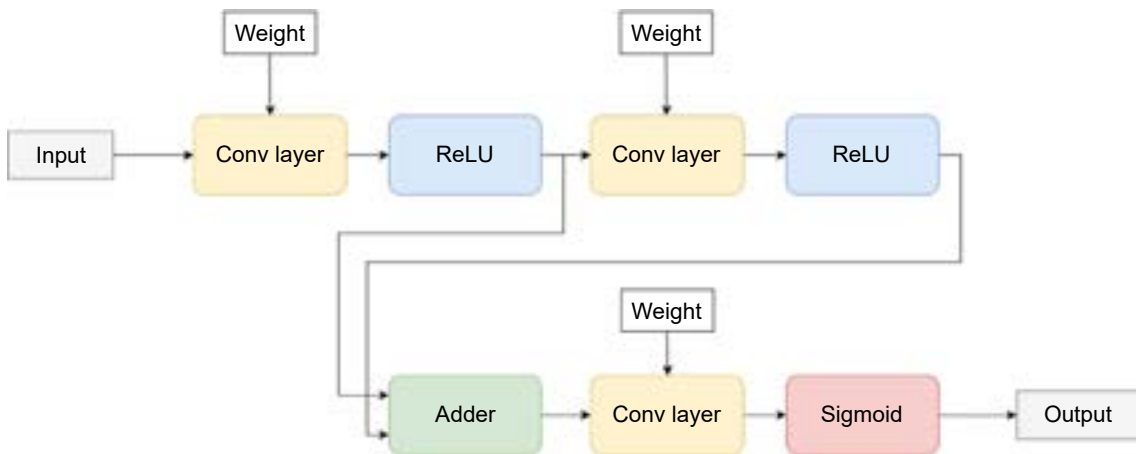


圖 16. 資料流運行與卷積主要運算單元運用之流程圖。

## 2. 各運算單元製作

由於卷積是基於圖片上的計算，會使用滑動視窗 (sliding window) 之方法，如果移動步長 (stride) 讓滑動視窗的方格仍重疊部分像素值，這樣一來必須得重複拿取同樣的資料。為了解決這個問題，本架構使用了 Line Buffer 的概念，其架構圖如圖 17 所示，藉由參考<sup>(7)</sup> 做法，此架構針對內核 (kernel) 的  $3 \times 3$  尺寸大小進行卷積運算，一般來說，在每次的運算需要 9 個乘法器和 8 個加法器的乘加電路，此架構將乘加電路 pipeline 成三部分：第一部分平行成 3 個乘法器的相乘，第二部分再將相成結果進行相加，而第三部分則是將相加結果再次進行相加，因此在乘加電路的運算過程中只需要三個 cycle 即可完成一次卷積的運算。

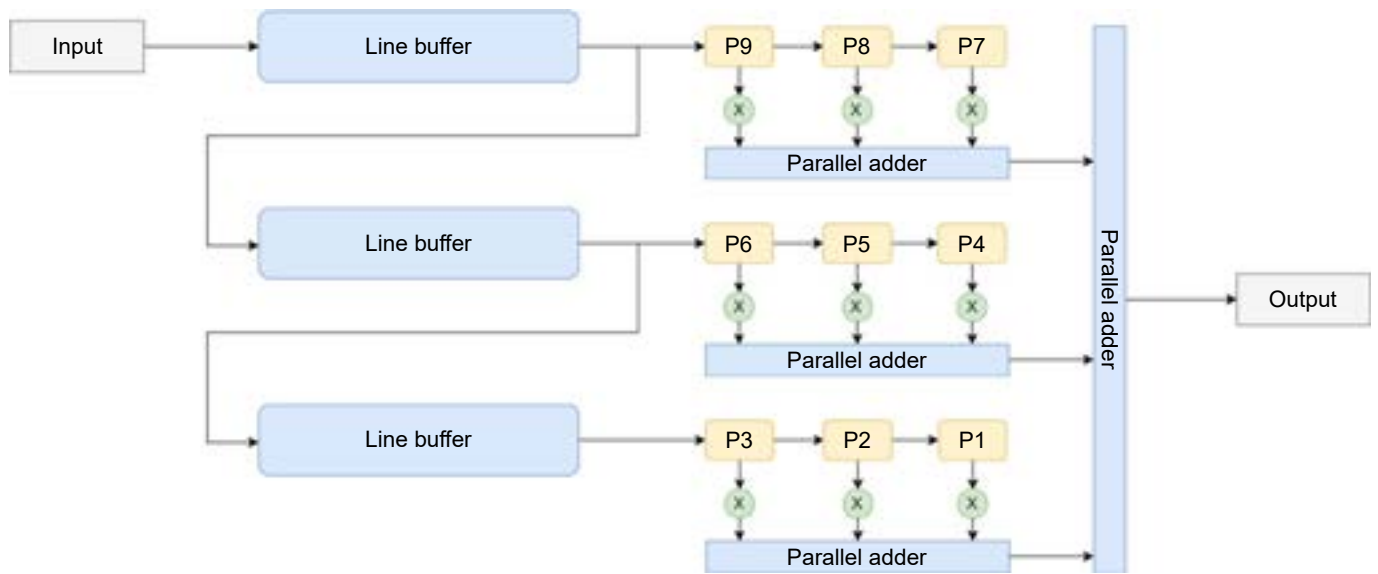


圖 17. 卷積單元在  $3 \times 3$  Kernel 尺寸大小下的架構設計。

主要運算單元 Conv Layer 流程架構如圖 18 所示，有鑑於卷積在滑動視窗後會有輸出和輸入尺寸大小的差異，為此本架構在主要運算單元 Conv Layer 內加入了填充 (padding) 的功能，填充運算單元在此架構中使用零填充的方式，為了讓串列資料按照填充的概念執行而加入同步 FIFO 的功能；在卷積輸出的部分，由於進行乘加後的位元寬度會提升至兩倍寬度以提高計算精確度，主要運算單元 Conv Layer 在卷積運算後會對輸出結果進行量化。

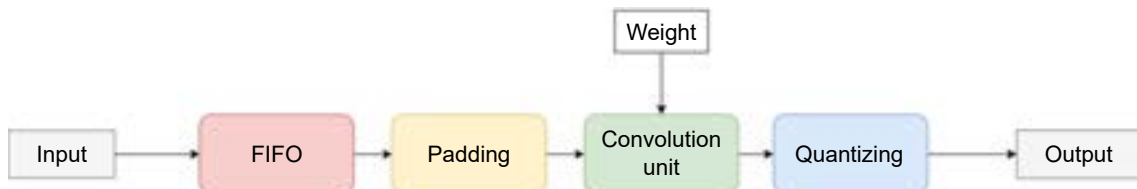


圖 18. 主要運算單元 Conv Layer 流程架構方塊圖。

接下來將 Conv Layer 運算單元進行組合，圖 19 顯示了整個卷積運算單元的架構，第一、二層卷積使用激勵函數 ReLU，而第三層卷積在輸入時需要的輸入資料為前面兩層卷積輸出結果的加總，並在輸出後使用激勵函數 Sigmoid。

## 四、在 FPGA 板上架構設計與實現

### 1. 流程圖設計

為了在硬體上達成物件偵測的功能，因此將神經網路在軟體上的操作流程逐項列出，並且對每一層進行評估與功能設計，如圖 20。在架構方面使用 Microsemi SmartFusion2 FPGA SoC<sup>(8)</sup> 實現，其中的細節如下：

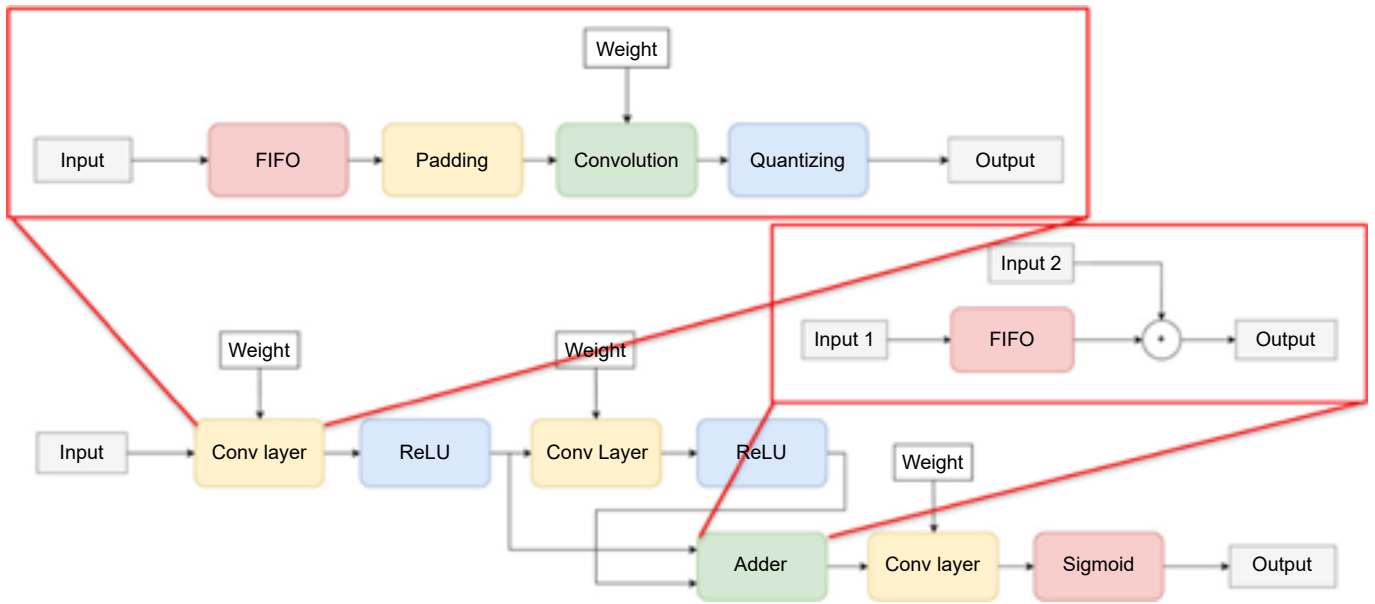


圖 19. 整體運算單元的流程架構方塊圖。

- 測試影像輸入：影像輸入的部分，使用 Microsemi 軟體中提供的 import/export tool 進行輸出入，將影像輸入到 off-chip memory 儲存後供 FPGA 以及微控制單元進行功能測試。
- 微控制器單元：利用微控制單元輸出訊號到 FPGA 後，FPGA 才開始進行指定的動作，直到訊號終止。
- 直接記憶體存取：直接記憶體存取使 FPGA 可以直接到記憶體存取影像資料，而不用透過微控制單元干涉，具有減少執行時間以及功率消耗的兩項優點。
- 輸入／輸出暫存器：由於直接記憶體存取是一次存取特定數量的影像資料，若是 FPGA 設計不當會導致資料遺失，因此必須要設計暫存器將資料先暫存。

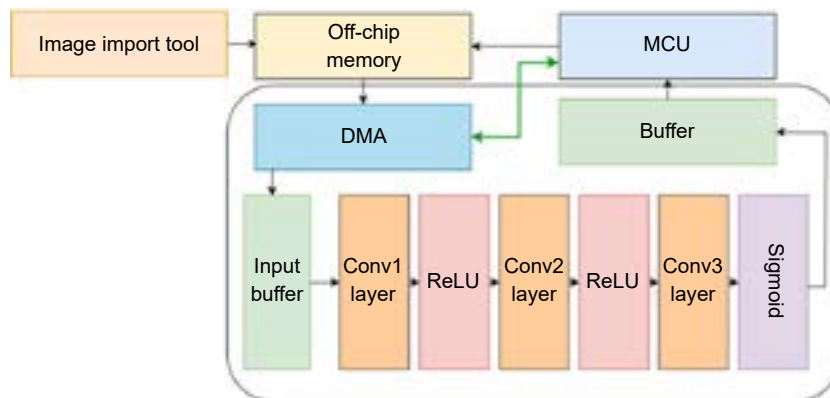


圖 20. 神經網路流程圖。

## 2. 卷積架構設計

架構是建立於圖 2 的系統架構，如圖 21 紅色方框部分，以及後來新版本所設計的神經網路架構為圖 22 之架構。

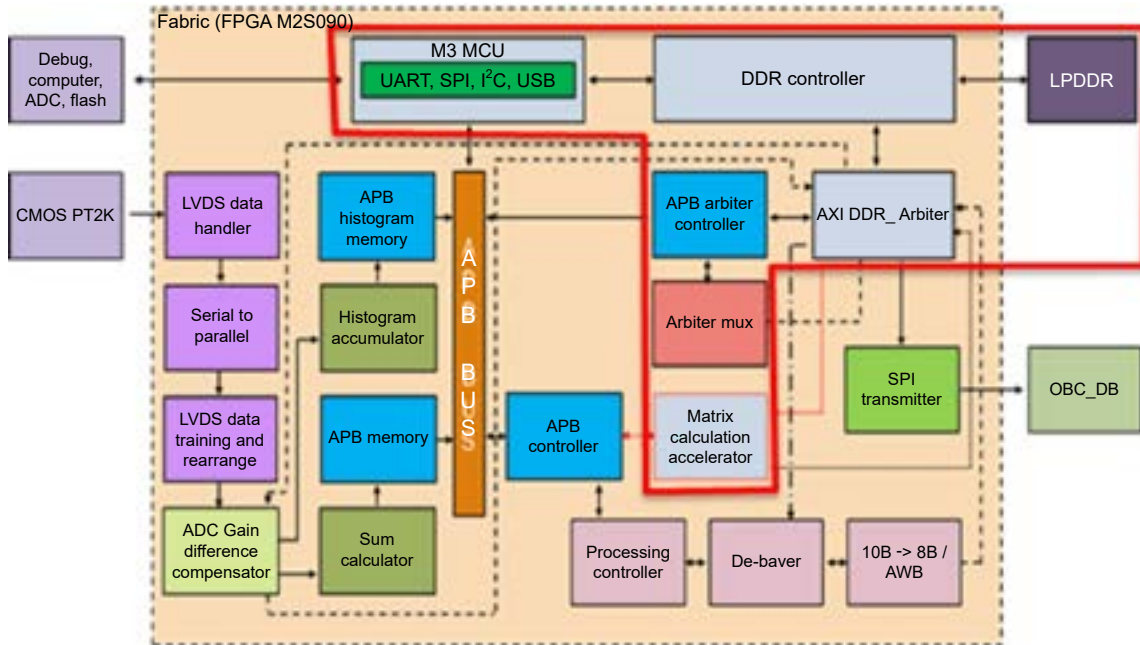


圖 21. 系統架構圖。

在影像資料進到暫存後，可以透過 FPGA 內部提供的 AXI\_DDR\_arbitrer 介面將影像輸入到 FPGA 中。接著依照神經網路架構設計  $3 \times 3$  的 kernel，讓影像資料可以完整排列成 3 行後分批進行乘法和加法。因此設計了 line buffer 架構，其中包含了 2 個跟測試影像長度相同的暫存器，當兩個 line buffer 資料都有效時，才進到下一個 MAC 模組進行卷積運算。MAC 模組的設計架構也類似於小型的 line buffer，裡面使用 3 組和內核長度相同的暫存器，當指定數量的資料進到暫存後，尋找表便會開始將每個影像像素和特定的內核值進行相乘後加總。最後將卷積結果送到輸出暫存器，準備將資料寫回 off-chip memory。

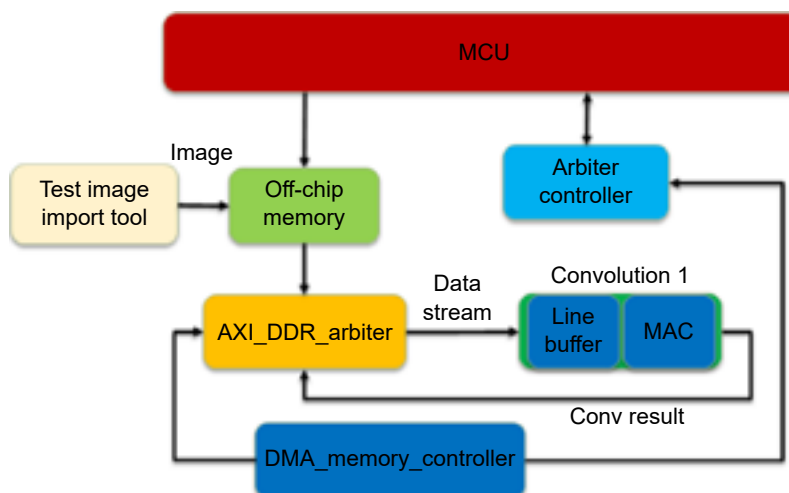


圖 22. 神經網路架構圖。

### 3. 實驗結果

設計完架構之後，透過微控制單元操控 FPGA，再到 Microsemi 軟體中所提供的導入／匯出工具將衛星影像匯入到記憶體，如圖 23 左圖。之後，微控制單元開始傳送訊號到 FPGA 執行卷積，一直到微控制單元終止傳輸訊號後到記憶體觀察結果，如圖 23 右圖，藍色底線部分為資料流的展示，可以發現資料有和滑動視窗一樣右移的效果，綠色底線部分則是卷積的結果，其中內核設計為  $3 \times 3$  也就是 9 個位元，前面的 6 個位元設定為 1 其餘為 0，在卷積執行時就會是將影像的前兩列橫行進行相加，最後得到結果。

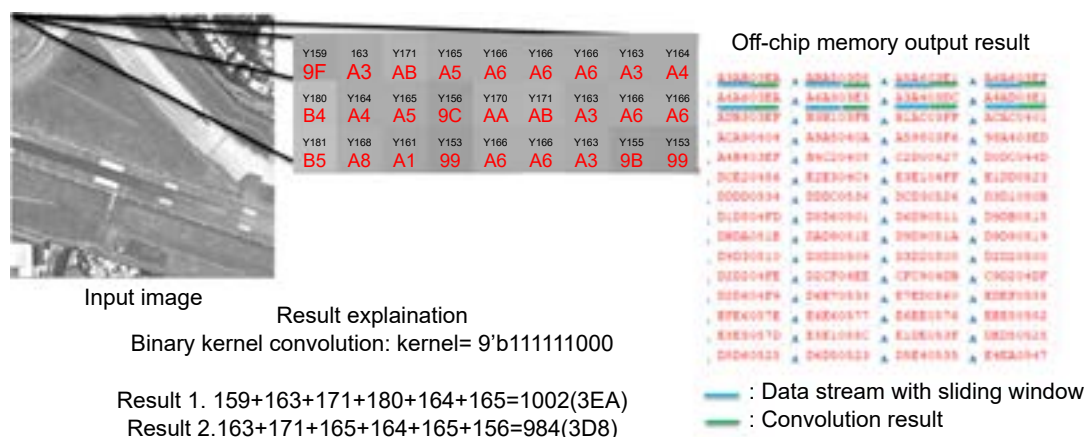


圖 23. 測試影像與執行結果圖。

確認完一層卷積的 FPGA 設計以及比較結果正確後，為了確認 FPGA 和微處理單元的執行時間，因此，在兩者都額外設計了計時器，表 2 為最終得到結果。可以發現在 FPGA 執行的結果和微處理單元的總執行時間相差了將近 175 倍。

表 2. 執行時間比較。

Execution speed comparison	
FPGA	MCU
1.97 m (sec)	343 m (sec)

### 五、結論

本研究以基於邊緣人工智慧低功耗遙測酬載影像處理電路設計為目標，成功實現了人工智慧的邊緣運算。為了應對低亮度影像的挑戰，本研究提出了一種有效的亮度增強演算法，通過與不同損失函數的比較，確保了處理後的影像更容易辨識。此外我們的硬體設計採用了實現於 FPGA 的卷積架構，為深度神經網路加速提供了高效的解決方案。這項研究的成果將有助於提升衛星遙測影像的品質和效能，同時克服硬體規格的限制。這為地球觀測領域的科學研究和實際應用提供了一個先進的工具，推動了遙測技術的發展。

## 參考資料

1. M. Oberhumer, LZO real-time data compression library, Please refer to the website: <http://www.oberhumer.com/opensource/lzo/>.
2. Chunle Guo, Chongyi Li, Jichang Guo, Chen Change Loy, Junhui Hou, Sam Kwong, Runmin Cong: "Zero-Reference Deep Curve Estimation for Low-Light Image Enhancement", In CVPR, (2020).
3. Yifan Jiang, Xinyu Gong, Ding Liu, Yu Cheng, Chen Fang, Xiaohui Shen, Jianchao Yang, Pan Zhou, and Zhangyang Wang, "EnlightenGAN: Deep light enhancement without paired supervision", In CVPR, (2019).
4. Chen Wei, Wenjing Wang, Wenhan Yang, Jiaying Liu: "Deep Retinex Decomposition for Low-Light Enhancement", In CVPR, (2018).
5. Taehyeon Kim, Jaehoon Oh, NakYil Kim, Sangwook Cho, Se-Young Yun, "Comparing Kullback-Leibler Divergence and Mean Squared Error Loss in Knowledge Distillation," In CVPR, (2020).
6. T.VanErven and P.Harremoës, *IEEE Trans. Inf. Theory*, **60** (7) , 3797 (2014).
7. Shi-Rou Lin, Wei-Hung Lin, Shih-Hsu Huang, Chun-Lung Hsu, Chitien Sun, "Low-Power Hardware Architecture for Depthwise Separable Convolution Unit Design," *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan)*, Taoyuan, Taiwan, Sept. 28-30 (2020).
8. Microsemi. Please refer to the website: [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_view/1244244-smartfusion2-fpga-product-brochure](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/1244244-smartfusion2-fpga-product-brochure)

## 作者簡介

李佩君女士為國立臺灣大學電機博士，現為國立臺灣科技大學電子工程系教授。

Pei-Jun Lee received her Ph.D. in the Department of Electrical Engineering from National Taiwan University. She is currently a Professor in the Department of Electronic and Computer Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.

徐培翔先生現為國立臺灣科技大學電子工程系碩士生。

Pei-Hsiang Hsu is currently a M.S. student in the Department of Electronic and Computer Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.

# 應用於微衛星的電力推進系統介紹

## Introduction to Electric Propulsion System Applied Small Satellites

李約亨、劉勝文、黃丙翰

Yueh-Heng Li, Sheng-Wen Liu, Ping-Han Huang

得益於小型衛星發射成本的大幅降低，多國政府與大量民間廠商投入開發，使得近年來低軌道衛星通訊快速發展。低軌道衛星通訊係部署大量小型衛星於低地球軌道形成星座提高覆蓋率，具有低延遲、高寬頻的特性。為滿足小型衛星在軌道上的姿態控制與軌道控制需求，對應的推進器系統發展需求應運而生。電力推進器的一種，具有高比衝值、高推力電力比等優勢，可以提供小型衛星任務所需的速率變化 ( $\Delta v$ )，被廣泛應用於各國的小型衛星。

Thanks to a significant reduction in the cost of launching small satellites, various governments and numerous private companies have invested in development, leading to the rapid growth of low Earth orbit satellite communication in recent years. Low Earth orbit satellite communication involves deploying a large number of small satellites in low Earth orbit to form constellations, increasing coverage with characteristics such as low latency and high bandwidth. To meet the attitude control and orbit control requirements of small satellites in orbit, the corresponding propulsion system development needs have emerged. One type of electric propulsion system, with advantages such as high specific impulse and high thrust-to-power ratio, can provide the necessary velocity changes ( $\Delta v$ ) for small satellite missions and is widely used in small satellites around the world.

### 一、小型衛星 (small satellite) 推進器的發展需求

近年來，隨著發射成本的降低和電子元件的小型化，100–500 kg 等級的低軌道小型衛星發射量大幅增加，以建立衛星通訊網絡。如美國 SpaceX 的星鏈計畫和英國 OneWeb 的低軌道通訊衛星部署，小型衛星發射數量逐年上升。伴隨而來的是相關衛星次系統模組市場的擴大化，相較於傳統客製化規格，通用型或應用範圍較廣的次系統可藉由大量生產方式降低成本，增加商業化應用的效益。

推進系統通常應用於衛星的姿態控制和軌道控制二大任務分類，其中由於姿態控制系

統 (attitude determination and control system, ADCS) 主要目的在調整衛星的三個姿態軸轉向，以便修正衛星通訊、照相、光照等的需求角度，因此應用推進器作為姿態控制的執行器 (actuator) 時，所需最小量為 6 組 (每個姿態軸 2 組)，依據衛星尺寸和系統設計上的冗餘度 (redundancy) 通常使用 8–28 組。應用推進系統於姿態控制系統的成本過高，需要消耗大量功率和燃料，因此通常僅使用反作用輪 (reaction wheel) 和磁轉矩 (magnetic torque) 進行。

軌道控制的目的是在於修正衛星的任務軌道，包括軌道機動 (入軌修正、軌道變換，特別是部屬星群任務、閃避障礙物等任務)、軌道維持 (抵抗大氣阻力、輻射壓、潮汐力等因素造成的軌道變化)、脫離軌道 (進行報廢除役衛星)。軌道控制能力為推進系統的一大優勢，且軌道控制能力直接攸關於衛星任務的執行能力和生命週期，此外脫軌能力也是近年來被著重的一項重要議題，因此，本研究團隊擬發展的推進系統以應用於衛星軌道控制方面為前提進行考量。以下將特別針對推進器相關的各項任務進行重要性、功能性說明。

## 1. 軌道機動 (Orbit maneuvers)

多數小型衛星部署時需要考慮入軌修正的問題，因為在單一運載火箭攜帶大量衛星的情況下，無法準確將所有衛星送入預定運轉軌道。另外，低軌衛星星群部屬，低地球軌道至地球同步軌道的高度變換，閃避軌道上障礙物等涉及軌道調整的任務即為軌道機動。通常來說，軌道機動所需時間會短於軌道的運動週期，在此情況下，單位質量總比衝 (total impulse, change in momentum) 可以被視為速度變化 ( $\Delta v$ )。速度變化被視為衡量衛星進行機動能力的指標，根據牛頓第二運動定律可以寫作式 (1)，其中  $T$  為推進器推力， $m$  為衛星質量， $\Delta t$  為機動時間。在推力固定且燃料有限的情況下，總速度變化量 (total  $\Delta v$ ) 對於衛星而言是固定的。考量多數軌道機動包含了位面轉換 (plane change) 和高度變化的兩種組合，稱為組合機動 (combined maneuvers)，所需的速度變化如式 (2) 所示<sup>(1)</sup>。假設從 Cape Canaveral 發射，從 300 公里軌道高度轉換至 500 km，相位轉換 53 度，所需  $\Delta v = 6.84$  km/s。

$$\Delta v = \frac{T}{m} \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta v^2 = v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cos \Delta i, v_n = \sqrt{\frac{u}{r_n}} \quad (2)$$

## 2. 軌道維持 (Station-keeping)

任務中為了使主要酬載任務不受干擾，除了必須維持衛星姿態的穩定性外，另一項即是軌道的穩定性。軌道面會隨著外界干擾因素如大氣阻力、太陽輻射壓、地球扁平率的影響，而產生軌道高度、相位、進動、軌道面角度等發生變化，進而影響衛星任務覆蓋面或與地面站間的通訊，甚至降低衛星使用壽命，因此必須利用推進器進行修正，亦即軌道維持。在上述干擾因素中，主要影響本次推進器鎖定之低軌道 (low earth orbit, LEO) 小型衛星的因素為大氣阻力，大氣阻力的作用方向必然與衛星行進方向相反，意味著阻力會造成衛星動能減少並降低軌道高度，在無推進系統輔助下，運行於低軌道的小型衛星受到大氣阻力的累積效應，軌道高度逐步降低，最終會再次進入大氣層而造成衛星壽命終止。為了預測實際作用於小型衛星的大氣阻力，低軌道高度的大氣密度分布至關重要，最常見的預測方式為使用 NRLMSIS 經驗模型進行預測，以獲得軌道高度對應的大氣層參數<sup>(2)</sup>。作用於小型衛星上的大氣阻力為：

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 f A C_D \quad (3)$$

其中  $\rho$  為 NRLMSIS 經驗模型計算之大氣密度、 $V$  為小型衛星軌道速度、 $A$  為阻力作用面積、 $f$  為緯度修正項、 $C_D$  為阻力係數，根據氣體和作用面的作用，在衛星設計上通常為 2 到 4。考慮公式 (3) 所計算之大氣阻力，推進器之選擇必須考量克服所在軌道高度下的大氣阻力所需的推力和燃料的使用需求。以 TechSat21 計畫為例，在 600 km 低軌道運行下，在軌道維持上平均每年所需要的  $\Delta v$  約為 40 m/s。

### 3. 脫軌與複進入

隨著近年來低軌道衛星星群的大量發射，發射火箭殘骸和退役衛星脫離軌道的問題也日益受到重視。NASA 對軌道上殘骸碎片和衛星的統計表明，在地球靜止軌道 (geostationary orbit, GEO) 到低地球軌道 (LEO) 之間，存在直徑 10 cm 的物體高達 500,000 個、直徑大於 10 cm 以上的物體高達 25,000 個，而 11,370 顆進入軌道的衛星中，僅有 35% 仍在運行，但高達 60% 的衛星在失去功能後仍然停留在軌道上<sup>(3)</sup>。為了處理日益嚴重的太空碎片問題，避免碰撞的發生，美國聯邦通訊委員會提出新的規定，對美國許可和要進入美國市場的衛星須具備脫軌能力，並將原本 25 年的脫軌年限降低至 5 年內必須完成脫軌或進入 300 km 的墓地軌道 (graveyard orbit)。因此，攜帶推進器使衛星具備主動脫軌能力顯得越發重要<sup>(3)</sup>。

為了確保現役衛星的安全與永續經營，攜帶推進器的退役衛星通常保留部分推進劑以供脫離現有軌道使用，具體上的方法有二<sup>(4)</sup>：針對 35,786 km 地球靜止軌道的衛星可運行至 300 km 外側的墓地軌道，所需要的速度變化量  $\Delta v$  約為 11 m/s。針對低空軌道的衛星則利用減速脫軌方式降低軌道高度，並利用低高度軌道下的地球大氣進行被動衰減，最終進入地球大氣層 (通常會於高空中燒毀)，所需要的速度變化量  $\Delta v$  依據原有軌道高度而異，以 500 km 太陽同步軌道高度而言約為 100–200 m/s，此一減速脫軌方式又稱為任務後處置 (post-mission disposal)，範例如 2007 年的 TechSat21，在最後的脫軌任務，就需 120 m/s 的脫軌減速度。

### 4. 減滾、姿態控制與動量卸載

衛星在脫離運載火箭後可能會發生高速旋轉，必須藉由減滾使衛星保持安定姿態，在衛星保持安定前無法開展太陽能板、無法通訊，必須藉由衛星本體預載程式與相關次系統進行，且由於太陽能板暫時無法運作，僅能由電池的有限電力達成，因此任務上要求減滾必須在短時間內完成 (通常在數分鐘等級)。減滾手段可依靠衛星上的反作用輪 (reaction wheel)、磁轉矩 (magnetic torque)、推進器等方式進行，考量到減滾過程的時效性和有限的電力資源，反作用輪是最佳手段，且反作用輪亦可應用於快速姿態調整，但是反作用輪採用盤面或球體轉動方式抵銷衛星自旋，最大缺點在於轉動力矩存在上限值，亦即達到飽和 (saturation) 狀態，一旦達到此一狀態，反作用輪無法進行相同方向的轉動控制，因此需要藉由磁轉矩或推進器等手段，將儲存於反作用輪的角動量進行釋放，此一行為稱為動量卸載。

雖然在小尺寸衛星上較難在不同的轉動軸方向上裝設多組推進器，以達到個姿態軸的獨立控制，但本研究考慮在有限的資源 (空間配置、重量、電力) 等條件下，除了滿足軌道和衛星速度控制的主要目的外，並以輔助方式進行有限度地姿態控制，以便在以反作用輪和磁轉矩為主的姿態控制執行器發生故障時，仍可以推進器作為備用系統繼續執行任務。

## 二、電力推進系統

截至 2024 年 1 月為止，已有超過 2300 多枚立方衛星 (CubeSat) 發射至太空。並且這個數量仍然在持續增加。但目前這些立方衛星並沒有足夠的  $\Delta v$  可以執行地球軌道以外的任務並且被限制在預先所設計的軌道上運行<sup>(5)</sup>。而電力推進 (electric propulsion) 應用在立方衛星就是一項不錯的選擇。電力推進系統本身的推力範圍落在  $\mu\text{N}\sim\text{mN}$  範圍，對於推進劑的需求較低，同時也有較高的比衝以及效率。在空間體積較小的立方衛星中，電力推進系統所需的體積也較低。其中電力推進器又可以分為靜電式、電磁式以及電熱式。具代表性的靜電式推進器則有離子推進器 (ion thruster)、霍爾推進器 (Hall thruster)，電磁式推進器則有以脈衝式電漿推進 (pulsed plasma thruster, PPT)，電熱式推進器則有真空電弧推進器 (vacuum arc thruster, VAT)。

### 1. 脈衝式電漿推進器

脈衝式電漿推進器是最早應用於衛星中的電力推進系統。其結構簡單、無需動件、電力需求較低的特點成為了最早也最容易發展的電力推進系統<sup>(6)</sup>。脈衝式電漿推進器的幾何結構可以想像為在兩個平板電極上施加一電場，並在電流與磁場進行交互作用形成勞倫茲力 (Lorentz force)，藉由勞倫茲力加速流經電極之間的離子與電子。而脈衝式電漿推進器的組成主要是由點火器、主放電電極、推進劑與儲能電路所組成。脈衝式電漿推進器的衝量通常落在數個微牛頓-秒到數百個微牛頓-秒，比衝則是 800-1200 秒不等<sup>(7)</sup>。

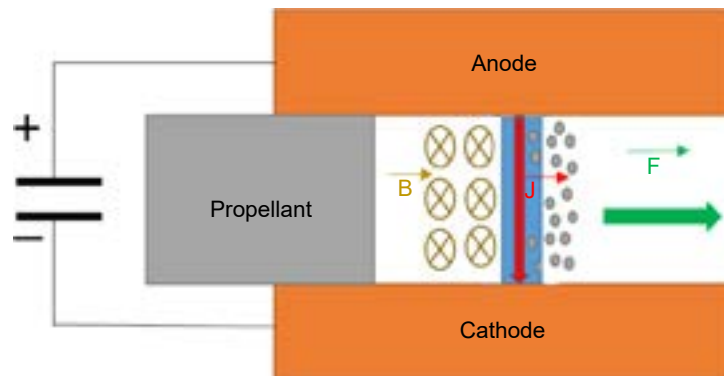


圖 1. 平行式脈衝式電漿推進器示意圖。



圖 2. 成大李約亨老師團隊所開發的新型脈衝式電漿推進器 VAI-PPT (a.與國家太空中心共同開發)。

## 2. 真空陰極電弧推進器

真空電弧推進器是電熱式電力推進器的一種，該推進器是利用高電壓脈衝電源生成電弧後燒蝕陰極金屬燃料產生推力，但在真空中要在相隔約 1 mm 的電極間擊穿並產生真空電弧約需好幾千伏特<sup>(8)</sup>，為了降低推進器在真空中的啟動電壓且提高穩定性，無觸發式的真空電弧推進器在 1998 年被提出<sup>(9)</sup>。該推進器主要由三個部分組成如圖 3，分別為一組陽極與陰極、一絕緣層置於兩電極之間與一層在絕緣層上的石墨薄層。當一高電壓差施加於兩電極間，則電流會通過薄石墨層並產生熱使石墨汽化，進而導致電將在陰極與陽極之間產生電漿。該設計可以使推進器產生電弧的電壓降到約幾百伏特。

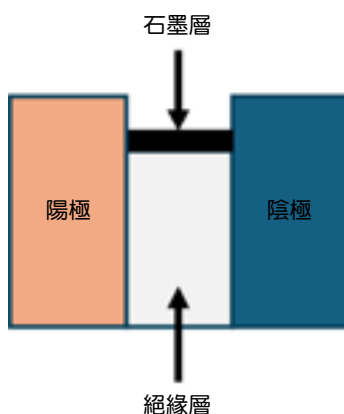


圖 3. 真空電弧推進器原理圖。

而在國立成功大學航太系李約亨教授的實驗中發現放置於絕緣層表面的薄石墨層是推進器是否穩定運作的關鍵：若該石墨層太薄，經過幾次點火後薄石墨即消耗殆盡，使得推進器無法繼續進行運作；而若石墨層太厚，則導致推進器短路而無法產生石墨蒸氣與電弧，因此推進器亦無法運作。因此本實驗室提出了多層絕緣層的結構取代經典真空電弧推進器中絕緣層與石墨層，多層絕緣層的設計是應用了「三結點」的物理原理，當一電壓施加於三種不同物質的兩側時，則在三種物質的交界面產生電場的扭曲使電漿更容易產生。本實驗的多層絕緣層由石墨片與鐵氟龍片相互交疊而成，該設計使兩邊的電極不會直接導通但電漿卻可以在兩物質的交界面輕鬆產生，這也解決了薄石墨層不易量化的問題<sup>(10)</sup>。最後，由本實驗室所研發的新概念真空電弧推進器在真空環境下點火的照片如下，該推進器經由間接量測得推力大小為  $50.867 \mu\text{N}\cdot\text{s}$ ；比衝值約為 850 s；效率約為 22.8%；所需功率則約為 5 W。

真空電弧推進器相較於其他的電力推進器有體積較小、重量較輕與耗電量較低等優勢，因此適合應用於立方衛星等奈米衛星的推進器。而隨著太空科技的發展，太空垃圾與衛星的數量大幅提升，其衍生的問題也變得不可忽視：為了避免衛星與衛星、或太空垃圾間的撞擊，立方衛星可安裝推進系統進行軌道變換；且為了解決太空垃圾累積的問題，對於除役的衛星最後亦可以利用推進系統脫離軌道、返回地球焚毀。此外，真空電弧推進器亦可以進行姿態控制的去飽和等等。而本實驗室目前致力於將推進器進行模組化，包含整合脈衝電路、推進單元等並將運作技術成熟度 (technology readiness leve, TRL) 達到 5 級，期待未來可以將新概念且台灣自行設計的真空電弧推進器發射上太空並且實際運作！



圖 4. 由國立成功大學李約亨教授實驗室所開發之多層絕緣層之真空電弧推進器放電圖。

### 3. 離子網格推進器

早在西元 1903 年，蘇俄的火箭科學家 Konstantin Eduardovitch Tsiolkovsky (1857-1935) 就有提出了「利用電能產生並加速帶電離子，以獲得高噴射速度之推進系統」的概念，然而過了一個世紀以後才有第一個離子推進器原型由美國科學家 Robert H. Goddard (1882-1945) 研發出來。

離子推進器運作原理，是在放電艙體內施加強大電場以解離中性氣體，產生離子和電子(即電漿)，並在推進器下游添加柵極系統 (grid system)，在電場作用下，電漿內離子將透過柵極 (grid) 產生庫倫力並沿電場線的方向加速，並透過牛頓第三運動定律獲得推力。在推進器出口處，使用中和器 (neutralizer) 將發射電子以保證整個推進系統維持電中性。對離子推進器而言，只要利用電場將離子加速發射出去，任何的電漿生成方式都可以被歸類在此種推進器中，依照電漿生成的方式離子推進器可以分為以下三種；考夫曼源 (Kaufman)、微波與 RF 射頻之離子推進系統。

柵極系統，又稱為離子光學系統 (ion optics system)，此系統由 至 3 層柵極組成，由內而外第一層稱為簾柵 (screen grid)，透過孔徑的設計篩選離子，並將電子束縛於放電艙體內部；第二層電網為加速柵極 (acceleration grid)，作用為加速離子及防止中和器的電子回流至放電艙體內部；第三層電網為減速柵極 (deceleration grid)，為防止高能電子以及慢速離子的轟擊而增設，將離子推進器的壽命延長至 10000、15000 小時或以上。

中和器，系統名稱為中空陰極管 (hollow cathode)，目的是將離子推進器噴出之離子羽流進行中和，若無中和器，離子推進器會因電子累積使得系統帶負電，將發射出之離子羽流又拉回到推進器本身，此系統將失去推力。

### 4. 霍爾推進器

霍爾推進器 (Hall-effect thruster, HET) 為靜電式電力推進器的一種，是利用電位差加速電漿中的離子形成推力。在電力推進系統中，具有高比衝值和高推力－功率比的優勢。霍爾推進器的結構如圖 6 所示，由中空陰極、放電通道，氣體擴散器 (同時作為陽極) 和磁極組成。中空陰極釋放出的電子被陽極的電位吸引進入放電通道，在磁場的影響下，電子做迴旋運動並和中性氣體發生碰撞形成電漿。電漿中的離子受到陽極的電位加速向外排出並和中空



圖 5. 由成功大學航太系李約亨教授實驗室開發之離子推進器 (上圖為 35 瓦 RF 離子推進器，下圖為 RF 離子推進器結合中空陰極中合器)。

陰極釋放出的電子中和形成推力。圖 7 為成功大學航太系李約亨教授實驗室所開發之低功率霍爾推進器運行之情況。霍爾推進器的概念由美國科學家所提出，但卻在前蘇聯受到大力的發展和應用，開發出兩種不同的型號。由 Fakel 設計局所開發的 SPT (Stationary Plasma Thruster) 系列是第一個在太空運行的霍爾推進器。此外同樣由前蘇聯所開發的另一型號被稱為 TAL (Thruster Anode Layer) 型的 D-55 系列。不同於 SPT 系列，TAL 型推進器將陽極和放電通道結合形成一體式的金屬通道。霍爾推進器的燃料主要是惰性氣體。其中以氙氣最常被使用作為推進劑，因為氙氣具有較高的原子量 (131.29 u) 和容易電離的優點，這代表著單位能量消耗能產生較多的推力。但是非常高昂的價格，也使得在近年來其他的替代推進劑開始被採用，包含氮氣 (原子量 83.79 u) 和氬氣 (原子量 39.95 u)。考量所需要的維持霍爾推進器的電力系統和推進器的推力範圍，霍爾推進器主要應用於微衛星等級以上的衛星執行軌道變換、高度維持和脫軌。最有名的使用案例為 SpaceX 的星鏈即使用霍爾推進器在其衛星任務上。

### 三、結論

總結而言，電力推進系統在太空科技領域擔任關鍵角色，對於立方衛星等微型太空器的推進系統至為關鍵。截至目前，數千枚立方衛星已進入太空，而電力推進系統憑藉其高比衝、高推力／電力比的優點，在軌道機動、脫軌、入軌、衛星減滾等多項不同任務上提供關鍵支持。

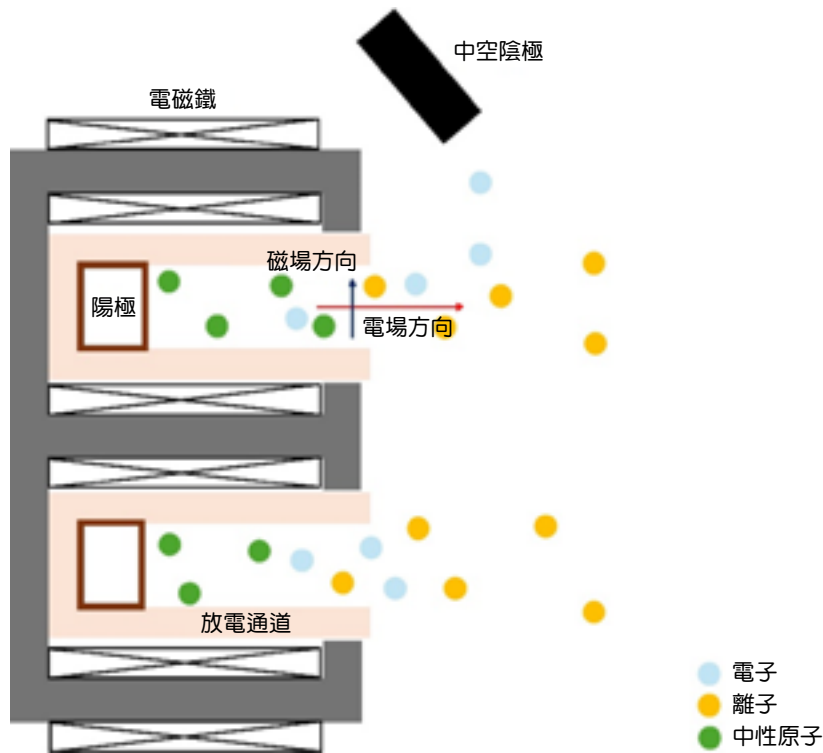


圖 6. 霍爾推進器結構示意圖。



圖 7. 國立成功大學李約亨教授實驗室所發展之霍爾推進器與陰極實際運作之情況。

在電力推進系統中，脈衝式電漿推進器、真空陰極電弧推進器、離子網格推進器和霍爾推進器等多樣推進器呈現出多樣性。脈衝式電漿推進器以結構簡單、低功率需求、推進劑消耗低為早期電力推進系統特色。真空陰極電弧推進器成功克服傳統推進器啟動電壓問題，實驗中展現出穩定運作的能力。離子網格推進器以高效率和高比衝值在太空任務中廣泛應用。霍爾推進器則以卓越的推力範圍和功率效率在微型衛星等領域廣泛應用。

這些電力推進系統的研發與應用為太空探索提供強大的動力支持。未來應專注於系統模組化和技術成熟度的提升，確保這些先進的推進系統在更多太空任務中發揮優勢。這不僅促進太空科技進步，還有望解決太空垃圾問題、提高衛星任務靈活性，推動太空領域邁向更高效、可持續的未來。

## 參考文獻

1. Michael D Griffin, James R French, M Griffin and J French, *Space vehicle design*, (AIAA Education) (2004).
2. Michael Matthew Micci, Andrew David Ketsdever, *Micropropulsion for small spacecraft*, Vol. 187, AIAA, (2000).
3. NASA. State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology, (2023), please refer to the website: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/deorbit-systems/>.
4. Bacon, John B., *Minimum  $dV$  for Targeted Spacecraft Disposal*, in Proc. 7th European Conference on Space Debris, Germany: Darmstadt, (2017).
5. Kristina Lemmer, *Acta Astronautica*, **134**, 231 (2017).
6. Akira Kakami, Hiroyuki Koizumi, Kimiya Komurasaki, Yoshihiro Arakawa, *Vacuum*, **73** (3-4), 419(2004).
7. R. L. Burton and P. J. Turchi, *Journal of Propulsion and Power*, **14** (5), 716 (1998).
8. R.L. Boxman, D.M. Sanders, P.J. Martin, *Handbook of vacuum arc science & technology: fundamentals and applications*, William Andrew, (1996).
9. André Anders, Ian G Brown, Robert A MacGill and Michael R Dickinson, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **31**, 584 (1998).
10. Ping Han Huang et al., Design of the Faraday cup for a Multi-Layer Insulator Vacuum Arc Thruster Characterization, *2023 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)*, IEEE, pp. 1-6. (2023),

## 作者簡介

李約亨先生為國立成功大學航空太空工程學系博士，現為國立成功大學航空太空工程學系教授。

Yueh-Heng Li received his Ph.D. in the Department of Aeronautics and Astronautics from National Cheng Kung University. He is currently a Professor in the Department of Aeronautics and Astronautics at National Cheng Kung University.

劉勝文先生現為國立成功大學航空太空工程學系博士候選人。

Sheng-Wen Liu is currently a Ph.D. candidate of the Department of Aeronautics and Astronautics at National Cheng Kung University.

黃丙翰先生現為國立成功大學航空太空工程學系博士候選人。

Ping-Han Huang is currently a Ph.D. candidate of the Department of Aeronautics and Astronautics at National Cheng Kung University.

# 衛星光通訊簡介

## Introduction to Satellite Optical Communications

張家豪、林語萱、陳彥涪、林千喜、林世千、朱冠瑜、鄭健一、林俊廷

Chia-Hao Chang, Yu-Hsuan Lin, Yen-Fu Chen, Chien-Hsi Lin, Shih-Cian Lin, Kuan-Yu Chu, Chien-Yi Cheng, Chun-Ting Lin

B5G/6G 透過運用無人機、飛機等高機動裝置之載具，使小範圍的資料傳輸可以更加即時並透過中／低軌衛星將光纖無法分布的空中區域通訊網絡佈置得更廣泛。衛星雷射光通訊技術其系統具有相對傳統射頻較窄的傳輸光束發散角，且能具有較高的資料傳輸速率 (> 1 Gbps)。憑藉衛星高覆蓋和高移動性等特性，並結合地表上多項通訊技術，即可實現太空／天／海／陸 4D 異質網路層。本文將透過光鏈路裕度的推導以及低軌道衛星對地傳輸的工作流程帶出光學酬載各次系統的設計以及連結。

By using highly maneuverable vehicles such as drones and airplanes, B5G/6G enables more timely data transmission in small areas and deploys more extensive communication networks in the air where optical fiber cannot be distributed through medium/low orbit satellites. The system of satellite laser optical communication technology has a narrower transmission beam divergence angle than traditional radio frequency, and can have a higher data transmission rate (> 1 Gbps). Relying on the characteristics of high satellite coverage and high mobility, combined with multiple communication technologies on the surface, a 4D heterogeneous network layer in space/sky/sea/land can be realized. This article will introduce the design and connection of each optical payload system through the derivation of optical link margin and the workflow of low-orbit satellite-to-earth transmission.

### 一、衛星通訊背景

#### 1. 通訊技術 B5G 與 6G 介紹

在高資料傳輸與物聯網 (IoT) 等推動下，無線通訊與設備的應用與服務已逐漸改變人類生活型態，從第一代至第四代的發展，全球行動通訊在資料傳輸速率、資料覆蓋範圍與穩定性不斷提升，一同推動消費互聯網的時代到來<sup>(2)</sup>。隨著互聯網時代的需求漸增，資料數據變得更加大量，故需要更加快速與低延遲，而 5G 在此方面的支援會逐漸面臨限制，故在這樣的時代不只需要極大的容量，且會有巨大的能源限制，使下代通訊技術 B5G/6G 迅速發展<sup>(3)</sup>。為了提升更高覆蓋率，與針對非陸地網絡的需求，B5G/6G 透過運用無人機、飛機等高

機動裝置之載具，使小範圍的資料傳輸可以更加即時，此外中／低軌道衛星在 B5G/6G 中亦扮演重要角色，透過中／低軌衛星將光纖無法分布的空中區域使用此方式將通訊網絡佈置得更廣泛。因為同步衛星具有最廣的覆蓋率，可以大規模的偵測地面資訊，將地面與空中進行連接，以形成完整的陸地、空中與海洋的立體通訊網絡，B5G/6G 中低軌衛星通訊網絡可將整個地球做覆蓋，且低軌道衛星通訊具有傳輸的低延遲性，在加上深度學習的應用，使傳輸可以達到最短路徑<sup>(4)</sup>，因此在異質性網絡中形成無縫轉接 (hand-off) 並且可與 5G 通訊系統產生互補結構，因此中／低軌衛星的發展對於未來在物聯網與 5G 通訊系統上的運用大幅增加，各國已將此研究視為重要發展項目。

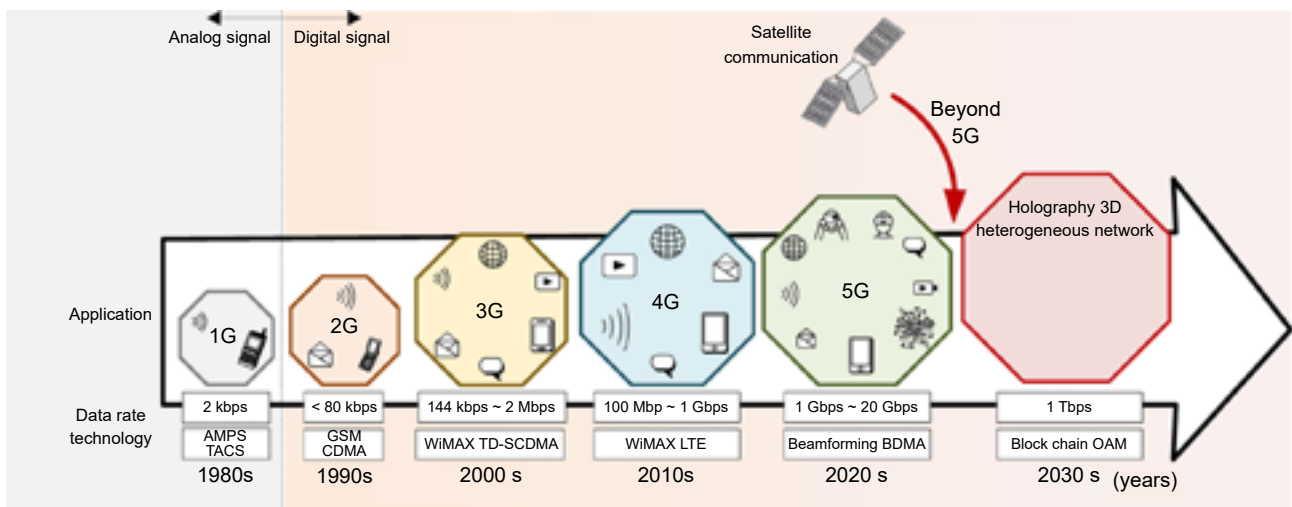


圖 1. 網路發展圖<sup>(1)</sup>。

異質網路層 (heterogeneous network layer) 是通訊與網絡領域所使用的術語，用於描述不同類型的網絡所組成的網絡環境<sup>(5)</sup>。透過此方式可以將不同網絡技術套用於同個環境中，將覆蓋範圍擴大，以實現在特殊環境下仍有通訊服務之需求，如：離島、貨船、遠洋漁船與沙漠地區等。

本文章所使用訊號傳輸方式為雷射光通訊傳輸，相較於傳統射頻通訊，光通訊具有通訊量大、傳輸速率高、隱蔽性高、安全性強，終端體積小與重量輕等優勢，是實現當訊號從衛星傳輸至地面時重要的路徑之一，將衛星間、衛星與地面或飛行載具間做為中繼網絡將訊號可以更加廣泛與有效的運用。例如：透過光通訊異質網絡連接技術將訊號傳送至難架設地面網絡及光纖之區域，使特殊地區亦可以藉此接收到訊號，此外當自然災害發生時，若地面通訊設備產生損耗導致通訊設備中斷而無法進行救援或無法得知受災戶時，可透過衛星通訊進行即時遠端管控。此時光通訊異質鏈接的技術就能有效提供緊急通訊的需求。利用衛星大面積的訊號覆蓋，可以在地面通訊中斷的當下，為救災方及災區提供即時的通訊服務。

## 2. RF vs. FSO

實現異質網絡將訊號覆蓋至全球，高傳輸速度與大容量傳輸已成為未來通訊傳輸上必要存在，亦是未來 6G 網絡研究發展的核心區塊，衛星發展技術隨著時間不斷進步已可以提供

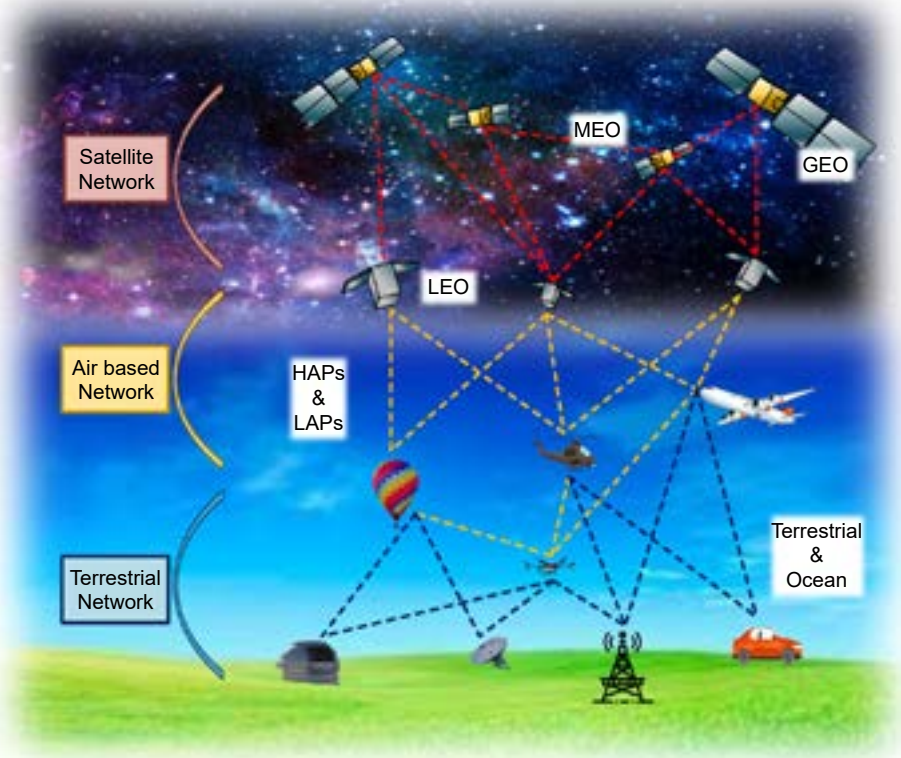


圖 2. 空對陸地異質網路系統架構圖<sup>(5)</sup>。

高解析度衛星影像的遙測酬載，且大規模發射衛星的需求，使得傳統射頻 (radio frequency, RF) 通訊已難以滿足整合資訊網路資訊的需求。各國彼此之間相互合作或競爭想使 RF 射頻轉換為光通訊進行傳輸；相較於 RF 傳輸，雷射光通訊具有 SWaP 的特性，大小 (size)、重量 (weight)、功率 (power) 的提升與精進，而雷射光通訊具有比 RF 更短的波長，因此在同等傳輸距離情況下會具有更小的發散角，使光通訊具有良好指向性與安全性，此外因為發散角小，接收端訊號可以有較高的功率以提升資料傳輸速率，相較於 RF 訊號，光通訊亦不具頻譜申請限制<sup>(6)</sup>。下列將射頻通訊與光通訊分為四點做比較。

### (1) 隱密傳輸

射頻通訊因波束較寬且容易受其他頻段干擾故保密性較差，若應用於隱密傳輸中，會造成訊號容易被截取的風險。而雷射光頻率高，發散角小，使雷射光載波訊號幾乎無法截取，具有極高的安全性。因為雷射光為直線定向傳播，其波束寬度僅為微弧度量級，且通訊的雷射通常選擇近紅外光波段，為不可見光，如圖所示。因此，雷射光通訊符合隱密傳輸要求，非常適合高速、安全、保密通訊。

### (2) 大量數據傳輸

目前射頻傳輸的最高速率是 kbps 的量級，使影像和數據無法利用現有的射頻系統進行即時傳送。雷射載波比射頻頻率高出多個量級，使其頻寬更大，足以支持高速傳輸，因此，採用雷射光通訊可實現高速率即時傳輸，滿足傳送高容量資訊等應用需求。

### (3) 頻譜資源

射頻進行高速數據傳輸存在頻帶受限的問題，使目前射頻的傳輸頻寬不能滿足需求，導致頻譜擁擠和重疊，使干擾嚴重，而雷射進行傳輸，則不受頻譜限制，其頻譜資源充足，並且無需申請即可使用。

### (4) 輕小型、低功率消耗

機載平台對其酬載的重量和功耗的限制要求十分嚴格，雷射通訊酬載一般採用半導體雷射元件，這類元件重量輕、功耗小、轉換效率高，雷射波長短，光學收發天線的尺寸小，減小了酬載的體積和重量，因此，雷射通訊酬載符合輕小型和低功耗要求。

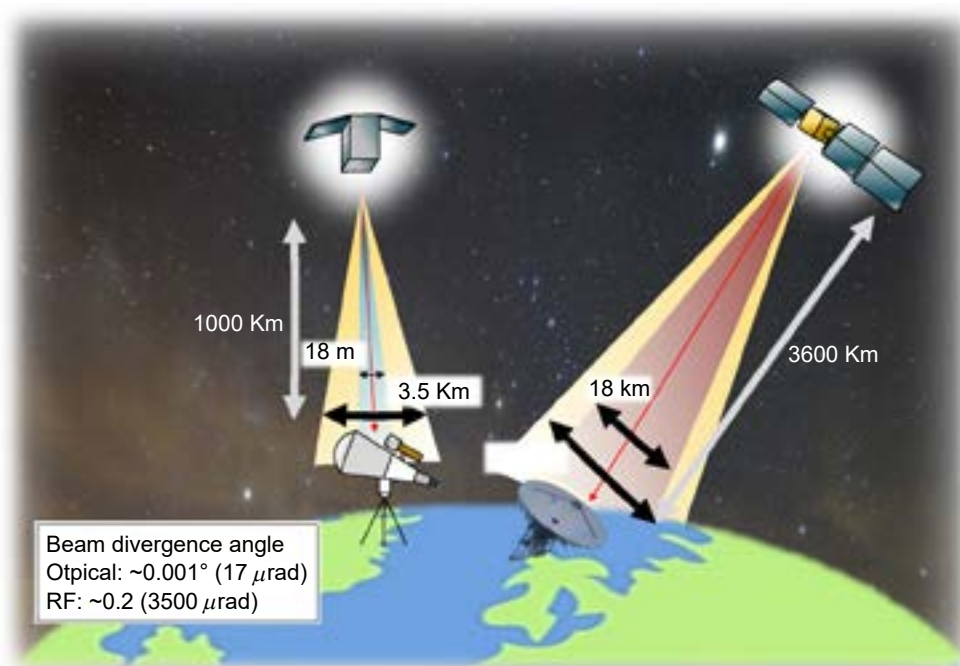


圖 3. FSO 與 RF 光束發散及光束大小比較圖<sup>(6)</sup>。

## 3. 衛星比較

衛星通訊具有多樣且靈活的方式進行通聯，透過不同軌道的衛星可以實現點對點、一對多或多對一等，多種方式與地面進行通聯。通訊衛星還具有空間無縫隙覆蓋能力、大區域的可機動性或可行動性通聯、特有的廣域廣播與多點同時連通能力、對急難救助及災難搶救靈活又快速。衛星依照距離地球高度可分為低軌衛星 (low earth orbit, LEO)、超低軌衛星 (very low earth orbit, VLEO)、中軌道衛星 (medium earth orbit, MEO) 與地球同步軌道衛星 (geostationary earth orbit, GEO)<sup>(7)</sup>。

## 二、各國衛星通訊介紹

### 1. 日本：

目前，國立研究開發法人情報通信研究機構 (National Institute of Information and

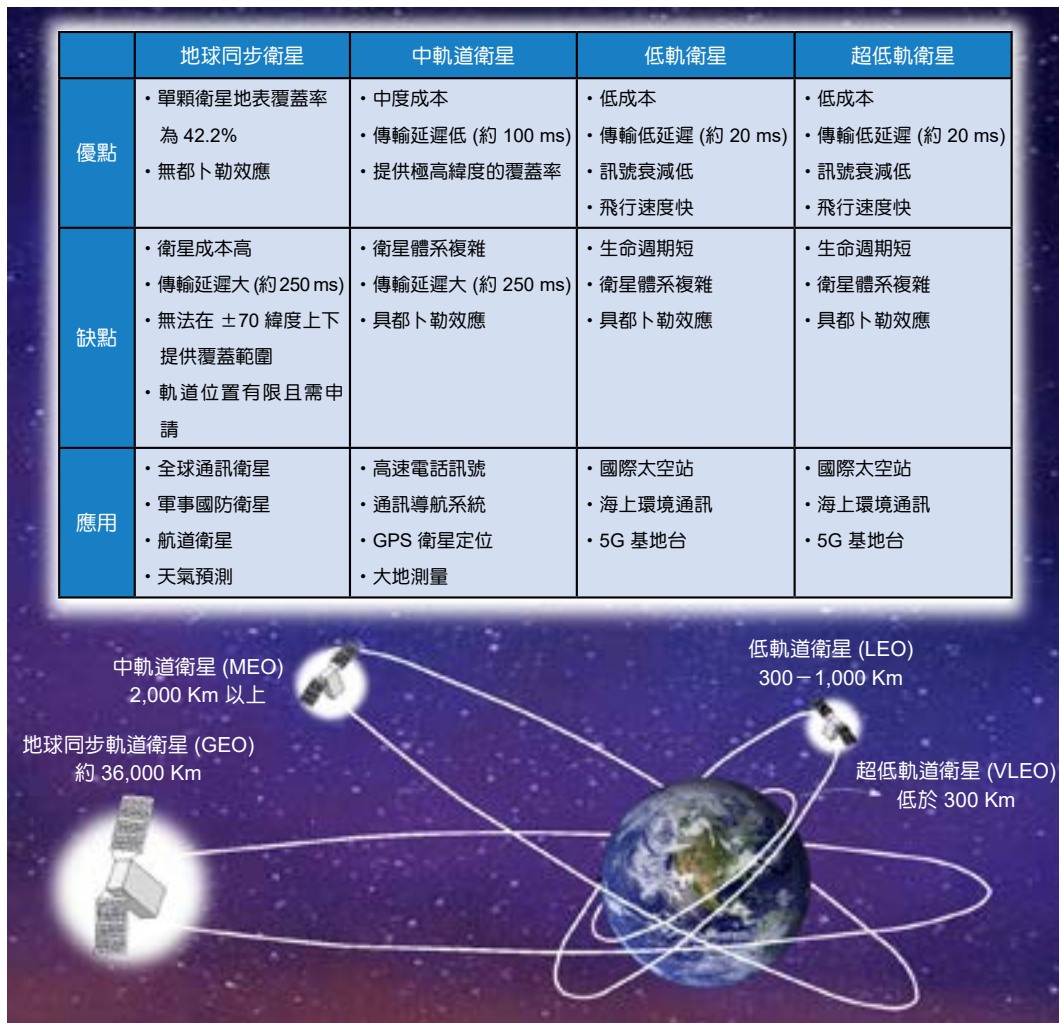


圖 4. 不同軌道人造衛星的種類及功能圖<sup>(7)</sup>。

Communications Technology, NICT) 正在設計和開發名為 CubeSOTA (Cube Small Optical Transponder) 的 CubeSat 版本的 FX 終端，以演示各種實驗，包括超遠距離 LEO-GEO 捕獲和追蹤測試、LEO-地面、LEO-HAPS 鏈路中透過大氣層和無大氣層的雙向 10 Gbit/s 通訊。同時，NICT 計劃在 LEO 星座中實施這些小型終端，以利用雷射鏈路以及在涉及高空通訊平台 (high altitude platform station, HAPS) 的場景中提供高速全球覆蓋，這些場景有可能促進非常廣泛的區域和區域的優化地面無線連接且延遲非常短。

自由空間光通訊預計將在未來的 5G/Beyond 5G 網路中發揮重要作用，該網路依賴 LEO 衛星星座和無人機 / HAPS 非地面網路。這促使了緊湊型雷射通訊終端的開發，這些終端可以安裝在對 SWaP 有嚴格要求的小型行動平台上。NICT 已開始開發一系列稱為全收發器 (FX) 和簡單發射器 (ST) 的雷射通訊有效載荷。FX 終端的開發始於安裝在 LEO 衛星上的計劃，該衛星需要與 GEO 中繼衛星的單向鏈路，從而允許非常高的連接可用性，以允許將 LEO 資料以短延遲連續傳輸到地面，如 CubeSOTA 概念。對於數千公里量級的鏈路，FX 終端實現高速雙向遠端通訊的關鍵組件是 9 公分小型望遠鏡，該望遠鏡接近立方體衛星框架允許的最大可能孔徑。與 ST 相比，FX 終端的鏈路預算餘裕多出 19 dB，允許 LEO-GEO 鏈路

和雙工 LEO-LEO 鏈路，而 ST 在 LEO-地面場景和 SWaP 為主導因素的較短鏈路方面仍然表現強勁<sup>(8)</sup>。

## 2. 美國：MIT、UF、NASA – CubeSat Laser Infrared Crosslink (CLICK)

美國國家航空暨太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 與麻省理工學院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 與佛羅裡達大學 (University of Florida, UF) 的合作任務：CLICK 任務旨在展示小尺寸、低重量和低功耗 (SWaP) 雷射通訊終端，能夠進行全雙工高資料速率下行鏈路和交叉鏈路，以及高精度測距和時間傳輸，CLICK 技術演示最終將實現包括空間無線電干涉測量、GPS 導航失效以及奈米衛星等 SWaP 有限平台上科學數據遙測頻寬的改進等任務概念<sup>(9)</sup>。

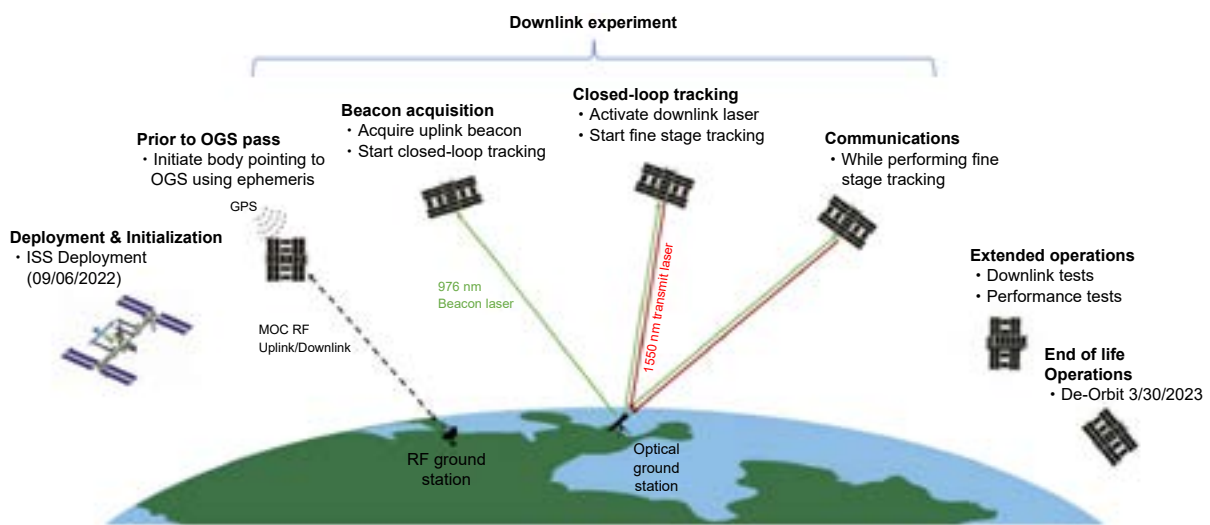


圖 5. CLICK 營運理念圖<sup>(9)</sup>。

CLICK 任務由三個立方體衛星組成：CLICK-A、CLICK-B 和 CLICK-C<sup>(10)</sup>。CLICK-A 於 2022 年 7 月首次發射，任務的主要目標是示範資料速率 10 Mbps 的光纖 LEO 對 OGS 下行鏈路能力 (downlink)，將驗證雷射發射器和精細指向級以及光學地面站的設計<sup>(10)</sup> (目前已公布通聯並未成功)。

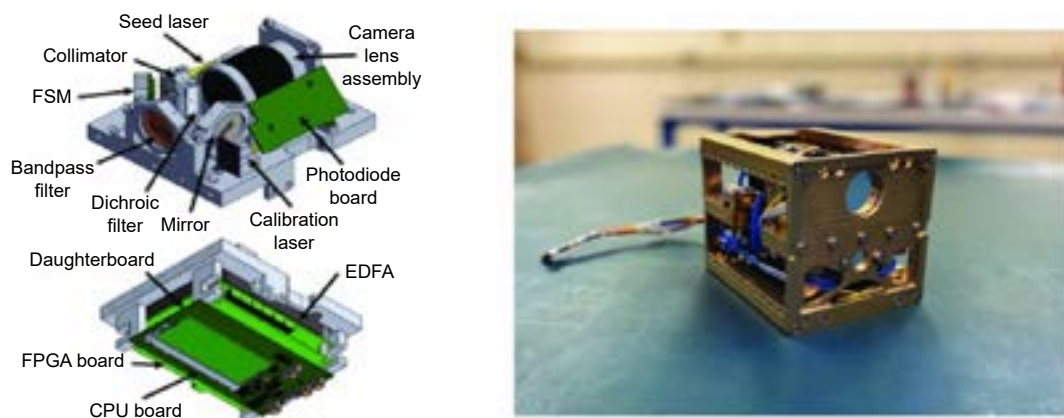


圖 6. 左：CLICK-A 光通訊酬載設計圖、右：CLICK-A 酬載模型圖<sup>(9)</sup>。

CLICK-B 和 CLICK-C 於 2023 年推出，並展示完整的交叉鏈路和下行鏈路能力。除了通訊鏈路之外，CLICK-B 和 CLICK-C 還能夠進行精確測距和時間傳輸。Data rate 超過 20 Mbps。Data rate 超過 10 Mbps 的空對地下行鏈路也將在光學地面站、LaserCom 便攜式望遠鏡 (PortTeL) 上進行演示<sup>(10)</sup>。

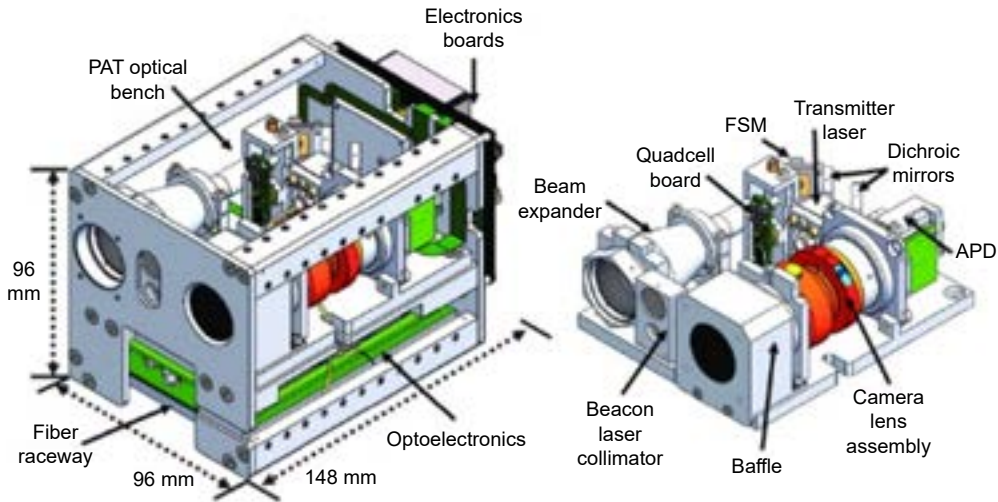


圖 7. CLICK-B/C 光通訊酬載設計圖<sup>(9)</sup>。

### 3. 德國航空航天中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR)

德國 QUBE 任務。在 QUBE 中，該團隊為立方體衛星雷射終端開發了雷射終端光學元件，可以傳輸量子 and 不同波長的通道。計劃於 2023 年發射<sup>(11)</sup>。QUBE 的目標是在三單元立方體衛星中測試兩個不同的、高度整合的量子金鑰分發 (quantum key distribution, QKD) 發送器模組以及整合的量子隨機數產生器 (quantum random number generator, QRNG)。計畫在距離地球約 500 公里的低地球軌道 (LEO) 衛星與位於德國 Oberpfaffenhofen 的 DLR 的光學地面站 (optical ground station, OGS) 之間交換 QKD 訊號<sup>(14, 15)</sup>。



圖 8. 左：衛星主要模組圖、右：3U 衛星 QUBE 照片<sup>(14)</sup>。

德國的 PIXL-1 任務，CubeL 3U 立方衛星主要任務為展示 OSIRIS4CubeSat (O4C) 技術<sup>(12)</sup>，裡面使用了德國航空航天中心 (DLR) 與工業化合作夥伴 Tesat Spacecom 共同為立方體衛星開發了世界上最小的雷射通訊終端 O4C，其動機是受到小型衛星和奈米衛星尺寸、重量和功率 (SWaP) 的限制<sup>(12)</sup>，它具有 100 Mbps 的 data rate，克服了小型衛星和奈米衛星上傳統射頻 (RF) 通訊的限制<sup>(13)</sup>。其尺寸只有 0.3U、重量 395 g、運行期間功耗為 8.5 W。

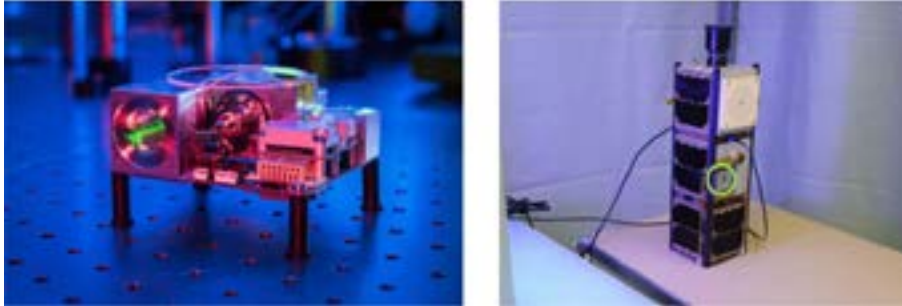


圖 9. 左：O4C 飛行模型圖、右：CubeL 最終整合圖 (O4C 孔徑以綠色標示)<sup>(13)</sup>。

德國航天航空中心未來決定將 O4C 技術轉移至另一個領域，並啟動了「CubeISL」計畫。CubeISL 的目標是為 CubeSats 開發 ISL 終端，其尺寸為 1U、重量 1000 g、峰值功耗為 30W，可在長達 1500 公里的距離上建立 100 Mbps 的雙向資料傳輸。除了 ISL 之外，CubeISL 還將直接對地 (direct to earth, DTE) 功能提高到 1 Gbps，並建立雙向通訊。CubeISL 仍然能夠在 L 波段 (1590 nm) 接收來自 OGS 的信標。對於 ISL，傳輸和接收光束也按波長分開。ISL 波長仍工作在 C 波段 (1536 nm 和 1553 nm)。這意味著有兩種類型的終端 A 和 B，其中終端 A 的發射波長是終端 B 的接收波長，反之亦然。下圖 10 展示了 CubeISL 雷射通訊設計<sup>(16)</sup>。

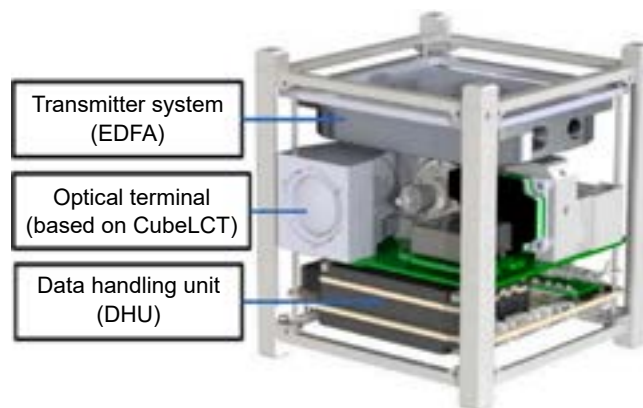


圖 10. CubeISL 終端設計<sup>(16)</sup>。

### 三、衛星光通訊光學酬載設計原理介紹

為了解決當前傳統 RF 傳輸的極限及諸多限制，無線雷射光通訊傳輸系統成為現在的發展主流，根據衛星對光學地面站的工作流程和使用雷射光進行通訊，因此對衛星的指向精準度需求提升，依工作流程和對指向精準度的要求，光通訊酬載設計將分為：(1) 訊號產生裝

置模組：發送訊號之雷射模組 (含半導體雷射電流驅動裝置、溫度控制裝置、散熱模組)、訊號調變模組 (signal modulator)、光放大模組 (含激發用之雷射二極體、電流驅動裝置、溫度控制裝置、散熱模組)；(2) 被動式光學模組：準直透鏡組、分色鏡組 (dichro mirrors)、光束擴束裝置；(3) 自動化光路追跡模組：崩潰光電二極體接收器 (avalanche photodiodes detector, APD)、快速控制反射鏡 (fast steering mirror, FSM) 系統、位置偵測器 (position sensitive detector, PSD) 系統、反饋控制器 (feedback controller) 系統、自動化程式驅動控制板 (field programmable gate array, FPGA)；(4) 追蹤信標雷射設計與光學架設；(5) 訊號接收模組用於傳送訊號的接收。

為確保成功傳輸訊號，必須進行鏈路裕度 (link budget) 分析，評估光學元件、大氣對通訊鏈路的影響，並提供相應的系統參數，以提升光通訊訊號品質。為實現 Link budget 的要求，衛星姿態控制和指向系統的精度需進一步發展快速控制反射鏡 (FSM)、位置偵測器 (PSD)、姿態控制和指向系統 (ADCS)，以及光學 pointing-acquisition-tracking (PAT) 系統，以使指向精準度達到  $10^{-2}$  至  $10^{-3}$  度水平，以確保輸出功率符合 Link budget 的要求。

為了計算詳細的通道鏈路裕度，將鏈路劃分為三個部分如圖 11，第一部分為：透過摻鉕光纖放大器 (erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA) 出光後的功率定義出原始功率  $P_T$  後，能量在衛星中於各個元件中傳遞，受到元件的吸收或鍍膜影響而產生損耗，其定義為元件損耗  $L_T$ ，最後以 Beam expander 控制光束發散角的同時，也會獲得傳輸增益  $G_T$ 。第二部分為：自由空間端，在衛星工程體傳遞能量至地面站的過程，其精準度會受到衛星的姿態控制系統影響產生誤差，此誤差所產生的損耗為指向精準度損耗  $L_p$ ，而能量在到達地面站之前會先通過地球大氣層，其中蘊含灰塵、懸浮物、水氣等因素會損耗能量，即為大氣損耗  $L_A$ ，最後到達地面站時，雖然透過 Beam expander 可控制發散角，但經傳輸一段低軌衛星的軌道高度或是同步衛星，其地面上的光束大小皆會遠大於地面站接收孔徑，因此將接收面積無法接收的光束能量定義為自由空間損耗  $L_S$ 。第三部分為：光學地面站端，衛星傳遞能量到達地面站後，首先透過望遠鏡接收光功率，此部分會因望遠鏡的口徑而產生接收增益  $G_R$ ，與衛星工程體端相同在地面站傳輸的過程也會有諸多的元件因吸收與鍍膜產生元件損耗  $L_R$ ，除此之外還需考量耦合進 APD 的光纖耦合損耗，最後在扣除 APD 的 sensitivity 便能獲得鏈路裕度，以下將進行詳細之衛星對地鏈路裕度分析：

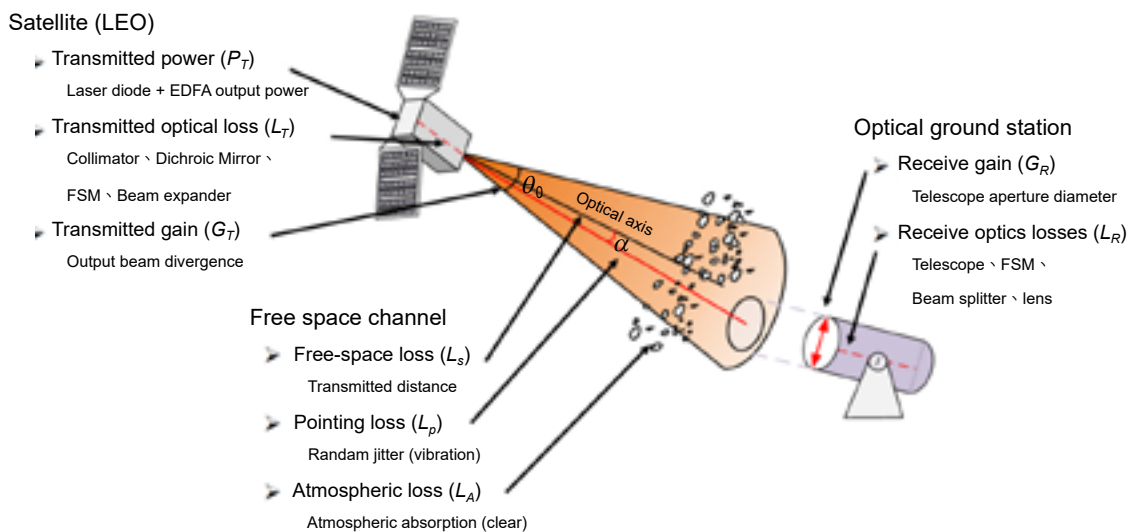


圖 11. 鏈路裕度鏈路劃分圖。

# 1. 衛星端 (Satellite)

## (1) Transmit Power ( $P_T$ )

目前光調變雷射包含直接調變雷射 (directly modulated laser, DML)、電致吸收調變雷射 (electro-absorption modulated laser, EML)、馬赫詹德調變器 (Mach-Zehnder modulator, MZM)，其雷射輸出功率可以透過摻鉕光纖放大器 (erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA) 來達到衛星光通訊所需的雷射輸出功率。

## (2) Transmit optical loss ( $L_T$ )

評估各個光學元件不同透射係數、鍍膜材質、能量轉換效率，計算光於衛星工程體中傳輸造成的光衰進一步得到整體衛星工程體系統之光損耗。

## (3) Transmit gain ( $G_T$ )

如圖 12， $G_T$  的定義為在一個單位面積下輻射總能量  $P$  以不同的傳遞形式之比值，也就是單位面積上指向性能量與均向性能量的比值。

$$G_T = 10 \times \log \left( \frac{I_{ave}(r)}{I_0(r)} \right) \begin{cases} I_{ave}(r) : \text{指向性輻射強度} \\ I_0(r) : \text{均向性輻射強度} \end{cases} \quad (1)$$

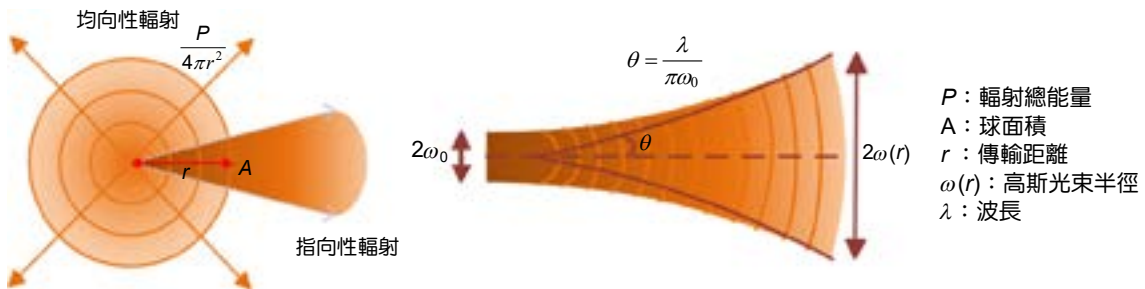


圖 12. 左：均向性輻射及指向性輻射能量示意圖、右：高斯光束示意圖。

均向性輻射能量可透過輻射總能量以及球面面積來做計算

$$I_0 = \frac{P}{A_0} = \frac{P}{4\pi R^2} \begin{cases} P : \text{輻射總能量} \\ A_0 : \text{球面積} \\ r : \text{球半徑} \end{cases} \quad (2)$$

指向性輻射能量則可透過高斯光束原理來做計算

$$I(r, \rho) = \frac{2P}{\pi \omega^2(r)} \exp \left( -2 \frac{\rho}{\omega^2(r)} \right) \begin{cases} \rho : \text{中心軸徑向距離 } (\rho^2 = x^2 + y^2) \\ \omega(r) : \text{高斯光束束寬} \end{cases} \quad (3)$$

透過光腰半徑與發散角的關係式，最終可得出 Transmit gain 與光束發散角的關係

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi\omega} \begin{cases} \theta_0 : \text{半發散角} \\ \lambda : \text{波長} \\ \omega : \text{光腰半徑} \end{cases} \quad (4)$$

$$\therefore G_T = 10 \times \log \left( \frac{I_{ave}(r)}{I_0(r)} \right) = 10 \log \left( \frac{4\pi^2\omega_0^2}{\lambda^2} \right) = 10 \log \left( \frac{4}{\theta^2} \right) = 10 \log \left( \frac{16}{\Theta^2} \right) \begin{cases} \theta : \text{半發散角} \\ \Theta : \text{全發散角} \end{cases} \quad (5)$$

## 2. 自由空間通道 (Free Space Channel)

### (1) Free-space loss ( $L_s$ )

定義為接收功率與傳輸功率的比值

$$L_s = \frac{P_r}{P_t} \begin{cases} P_r : \text{接收功率} \\ P_t : \text{傳輸功率} \end{cases} \quad (6)$$

傳輸端的雷射源以球面波的形式展開，因此可藉由傳輸功率與球體表面積算出面功率密度也就是輻照度，再藉由與接收面積相乘得到接收功率

$$I_0(r) = \frac{P_t}{4\pi d^2}, P_r = \frac{P_t}{4\pi d^2} \times A_{eff} = \frac{P_t}{4\pi d^2} \times \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \begin{cases} P_r : \text{接收功率} \\ A_{eff} : \text{接收面積} \\ d : \text{傳輸距離} \end{cases} \quad (7)$$

$$L_s = 10 \times \log \left( \frac{P_r}{P_t} \right) = 10 \times \log \left( \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \right) \quad (8)$$

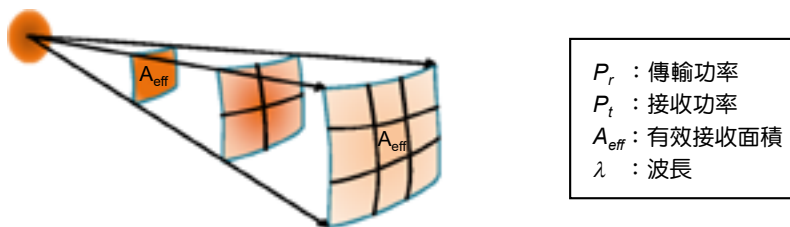


圖 13. 自由空間光損耗示意圖。

### (2) Pointing loss ( $L_p$ )

如下圖 14 為衛星與地面接收站具指向誤差之示意圖，衛星因有本體的三軸震盪，導致每一次指向地面站的方向都不太一致，但其指向機率為高斯分布。

透過高斯分布機率可得 Pointing loss 的公式，如下：

$$L_p = 10 \times \log \left\{ \exp \left[ -2 \left( \frac{\Delta\theta}{\theta} \right)^2 \right] \right\} \begin{cases} \Delta\theta : \text{Pointing accuracy error} \\ \theta : \text{發散角} \end{cases} \quad (9)$$

若考慮三個標準差下的指向誤差可得 Pointing loss 的公式，如下：

$$L_p = 10 \times \log \left\{ \exp \left[ -2 \left( \frac{3\Delta\theta}{\theta} \right)^2 \right] \right\} \begin{cases} \Delta\theta: \text{Pointing Accuracy Error} \\ \theta: \text{發散角} \end{cases} \quad (10)$$

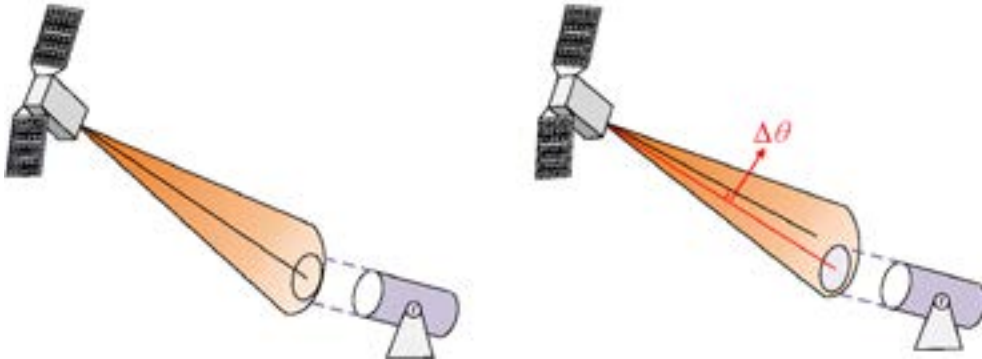


圖 14. 衛星工程體與地面接收站具指向誤差示意圖。

### (3) Atmospheric loss ( $L_A$ )

大氣層能分為增溫層 (電離層)、中溫層、平流層、對流層，共四層，其中電離層與對流層對光能量損耗較有影響。電離層含有大量的自由電子，並且可能形成電子雲，產生電離層擾動，使傳輸的光訊號會有 Polarization rotation、Scintillation effects、Absorption、Variation in the direction of arrival、Propagation delay、Dispersion、Frequency change 等影響，其中 Polarization rotation 的影響較為顯著，根據文獻 [Carlos Jorge Rodrigues Capela, PROTOCOL OF COMMUNICATIONS FOR VORSAT SATELLITE - Link Budget -, APRIL 2012]，Polarization rotation 的影響大約為 3 dB 左右，其餘影響在高頻訊號情況下可忽略。對流層由許多氣體分子、微塵組成，使傳輸的光訊號會有 Gas absorption、Scattering、Rain attenuation 等影響。在近紅外波段中，又以  $H_2O(g)$ 、 $CO_2(g)$  的穿透率變化最為劇烈。而影響此計畫所使用的 1550 nm 波段最顯著的是  $H_2O(g)$ ，如下圖 15 所示，且因為這些氣體分子的存在，所導致有 Scattering 的效應，根據 Beer's law 我們可以得知氣體吸收與散射的能量損耗。

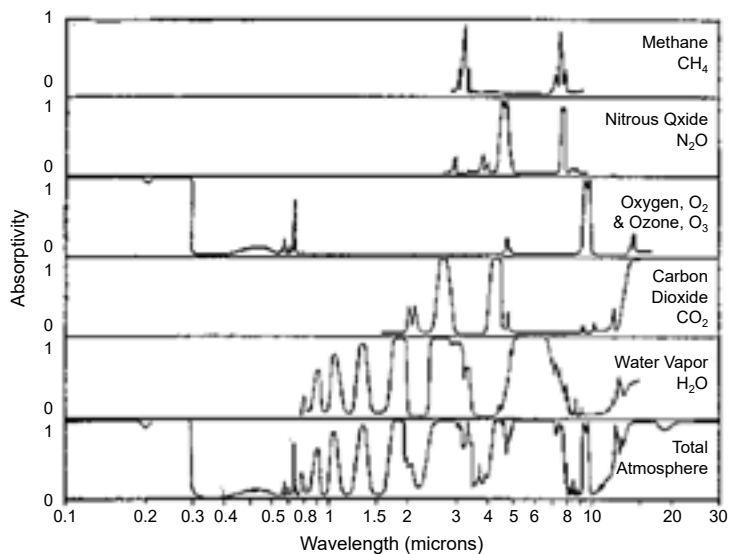


圖 15. 波長與吸收率之關係<sup>(18)</sup>。

Beerr's law :

$$L_a = e^{-(\alpha_a + \alpha_{sc})z} \begin{cases} L_a : \text{power loss} \\ \alpha_e : \text{the extinction coefficient} \\ \alpha_a : \text{absorption coefficient} \\ \alpha_{sc} : \text{scattering coefficient} \\ z : \text{propagation distance} \end{cases} \quad (11)$$

衛星傳輸的仰角也會影響光訊號的能量傳遞，在晴空條件下，沒有 Rain attenuation 的影響，圖 16 為晴空下只考慮氣體吸收與散射的情況下，1064 nm 和 1550 nm 處晴空衰減與仰角的關係，可以看出 1550 nm 波段的衰減會隨著衛星與地面站的仰角越大，衰減量就越小。

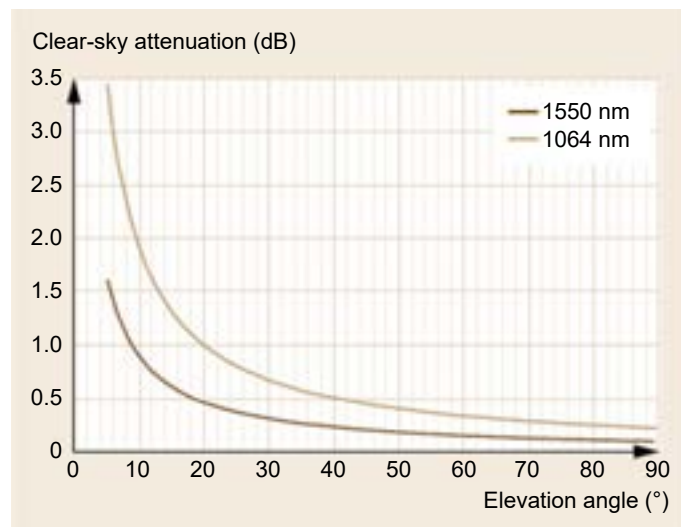


圖 16. 1064 nm 和 1550 nm 處晴空衰減與仰角的關係<sup>(17)</sup>。

Rain attenuation 是指降雨的情況下造成嚴重的衰減，自由空間光通訊 (free space optical communication, FSO) 傳輸系統性能對天氣非常敏感，易受天氣影響，因此在有降雨情況時不建議使用 FSO 傳輸。

### 3. 光學地面站 (Optical Ground Station)

#### (1) Receive gain ( $G_R$ )

計算結果與 Transmit gain ( $G_T$ ) 相同， $G_R$  與接收面積有關如圖 17，原單位接收面積 ( $A_d$ )，透過 Airy disk 與單位面積上指向性能量與均向性能量的比值所推導出的結果。

由上圖可知，從望遠鏡接收進來的雷射光藉由 Airy disk 的計算將光束集中在一點，再透過單位面積上指向性能量與均向性能量的比值可推導出 Receiver gain ( $G_R$ )

$$\text{Airy disk 半徑} : d = 1.22\lambda \left( \frac{r}{D} \right) \begin{cases} r : \text{繞射距離} \\ D : \text{繞射孔徑大小} \end{cases} \quad (12)$$

$$D = 1.22\lambda \left( \frac{r}{d} \right) \quad (\text{Eq5})$$

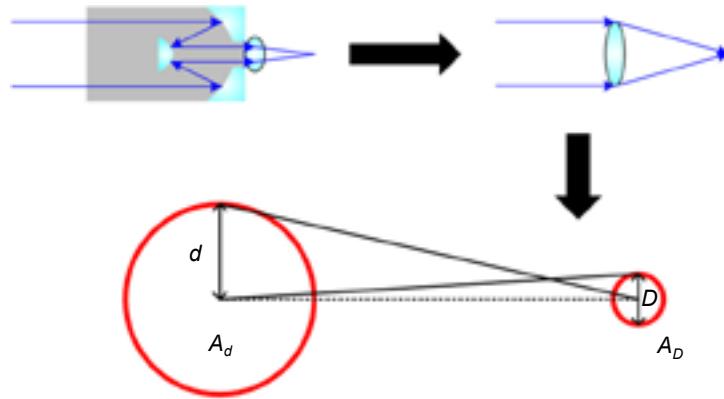


圖 17. 望遠鏡接收孔徑與 Airy disk 轉換示意圖。

$$\text{面積： } A_D = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 = 0.37\pi \times \frac{\lambda^2 r^2}{d^2} = C \times \lambda^2 ; C \text{ 為常數} \quad (13)$$

$$\text{相同面積下能量比值： } \frac{P / C \lambda^2}{P / 4\pi d^2} = \frac{4\pi d^2}{C \lambda^2} \sim \frac{4\pi A_d}{\lambda^2} ; P \text{ 為輻射總能量} \quad (14)$$

$$G_R = 10 \times \log \left( \frac{4\pi A_d}{\lambda^2} \right) \quad (15)$$

## (2) Receive optics loss ( $L_R$ )

原理如 Transmit optical loss ( $L_T$ )，透過各個光學元件不同穿透射係數、鍍膜的材質，計算光於光學地面站裡傳輸所導致的光衰，最後得到光學地面站系統整體之光損耗。

## 四、光學酬載次系統介紹 & 原理

本文章的立方衛星主要分為衛星本體以及光通訊酬載。其中衛星本體主要有 8 個衛星次系統包含：姿態控制次系統、飛行軟體次系統、資料處理次系統、電力控制次系統、通訊次系統、結構次系統、熱控次系統、推進次系統，衛星本體的關鍵元件包含電力控制單元、飛行軟體、通訊模組、GPS 導航接收機、星象儀、光纖陀螺儀、衛星結構體、以及符合空間的電推系統等衛星設備。而光通訊酬載主要有 3 個衛星次系統包含：望遠鏡次系統、光學 PAT 次系統、光通訊傳輸次系統，光通訊酬載的關鍵元件包含望遠鏡、快速轉動鏡 (FSM)、位置偵測器 (PSD)、二射鏡 (dichroic mirror)、光通訊收發調變模組、摻鉺光纖放大器 (EDFA)、各項控制單元等元件設備。

光通訊具有比 RF 更短的波長，因此在相同傳輸距離情況下會具有更小的發散角，使得它具有良好的指向性、安全性，在接收端可以獲得更高的功率，來提升資料傳輸率，然而雷射光通訊的高指向性卻也使衛星的指向精準度需求提升，其中光學指向、探測、追蹤 (pointing, acquisition and tracking, PAT) 次系統的除了主要的指向、探測和追蹤功能，另一重要功能是克服平台震動的干擾，保持追蹤狀態，以確保雷射連結不會受到外部環境的干擾而中斷，如圖 18、19 所示。光學 PAT 次系統在衛星與接收地面站各佔據相當重要的工作目的，並配合望遠鏡次系統，以及傳輸次系統來達到光通訊所需的鏈路裕度，以確保任務成功。本文將透過低軌道衛星對地傳輸的工作流程帶出光學酬載各次系統的設計連結，以下為衛星與光學地面站下傳訊號 (downlink) 測試與驗證的工作流程，如圖 20 所示。

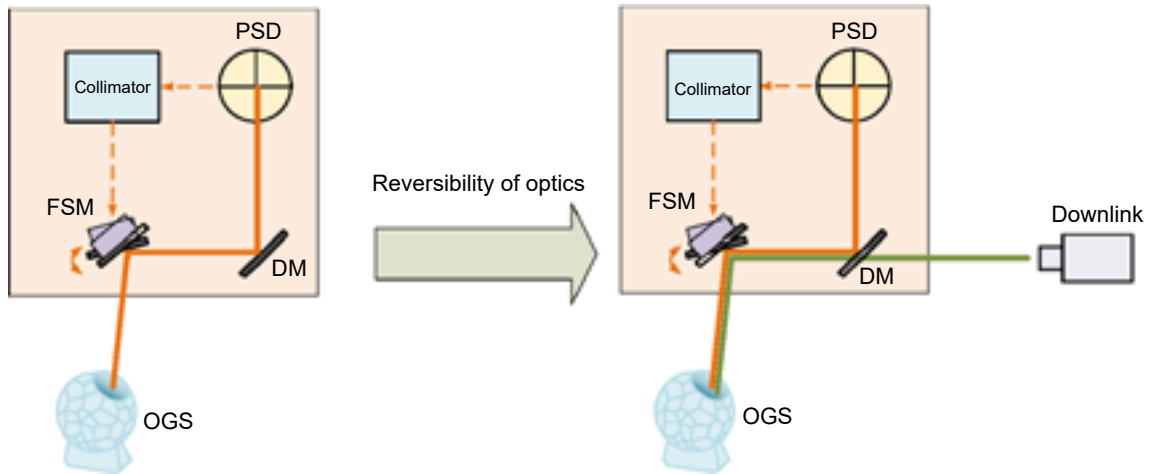


圖 18. 衛星工程體 PAT 系統工作圖。

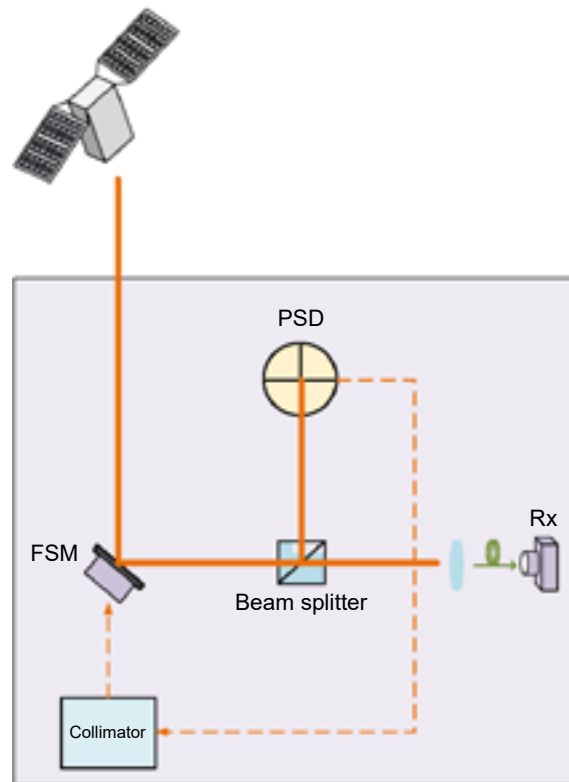


圖 19. 地面接收站 PAT 系統工作圖。

### 1. 望遠鏡次系統 (Telescope subsystem)

衛星端及地面站建立端對端連結之前，必須先取得軌道軌跡，透過視野範圍較大的恆星跟蹤器 (star tracker)，接收來自遠處的恆星星光提供天體參考 (celestial reference)，與電腦預期軌跡的實時天體圖 (celestial map) 完成校正比對，進行背景監視，調整經緯儀鏡座 (altazimuth mount) 初步提升指向精度。此時配合地面站所發射的信標雷射，透過衛星端的望遠鏡次系統接收其信標雷射，以達到對準的目的，最後再透過此系統將訊號成功的從衛星端發送至地面站。



圖 20. 衛星下傳訊號 (Downlink) 測試工作流程圖。

## 2. 光學 PAT 次系統 (Optical PAT subsystem)

當望遠鏡次系統中的望遠鏡開始接收來自地面站輸出的信標雷射時，雖然已經完成初步的指向誤差校正，但此時的指向誤差仍然不足以滿足光通訊鏈路的需求，因此藉由光學 PAT 次系統，透過位置感測器 (PSD) 及快速轉向鏡子 (FSM)，進行閉迴路追蹤校正，改善衛星因低頻振動所造成的影響，並建立穩定的光通訊鏈路。

## 3. 光通訊傳輸次系統 (Optical communication transmission subsystem)

當光通訊鏈路透過光學 PAT 次系統校正並趨於穩定後，此時透過指令驅動光調變雷射 (包含 DML 或 EML 或 MZM)，並透過 EDFA 來達到衛星光通訊所需的雷射輸出功率。

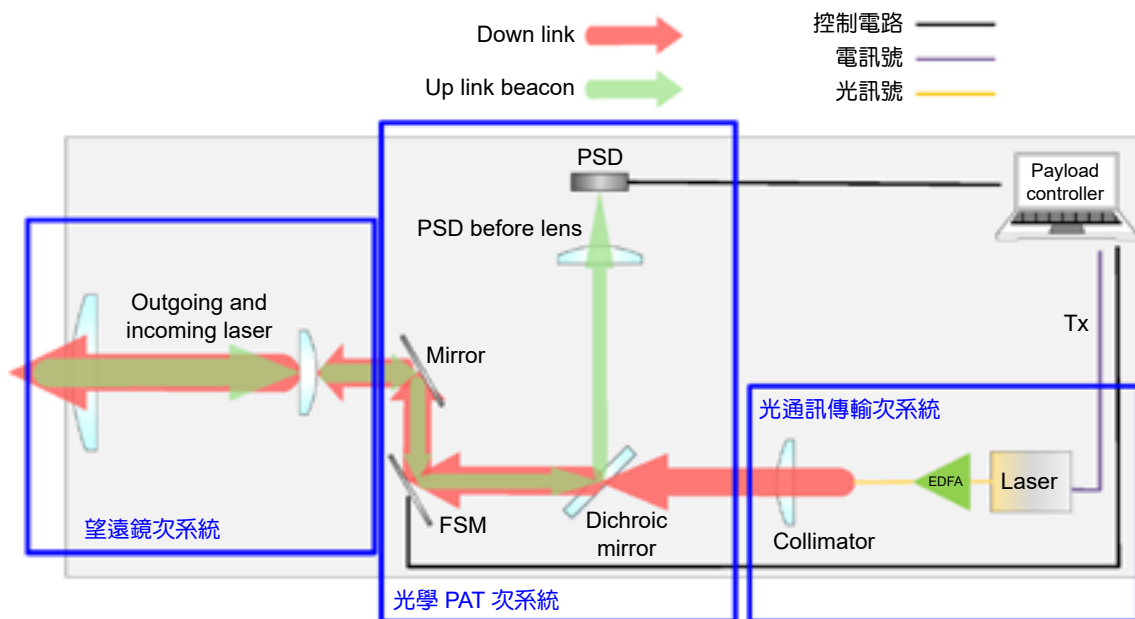


圖 21. 光通訊酬載示意圖。

## 五、未來展望

隨著互聯網時代的不斷發展，資料數據量日益龐大，對於更快速和低延遲的通訊需求逐漸增加。5G 在支援這方面可能面臨一些限制，尤其在能源方面的挑戰。因此，下一代通訊技術 B5G/6G 正在迅速發展。衛星通訊技術在這個過程中扮演了至關重要的角色。透過低軌通訊衛星，我們可以將高速網路擴展至未佈署光纖網路的區域，提高覆蓋率。未來，透過雷射光通訊的基礎建構，B5G 網路將進一步提升，並結合深度學習的應用，分析最佳資訊傳輸路徑，以減低陸地與衛星整合網路的延遲時間。

低軌通訊衛星的低傳輸延遲特性使其成為應對物聯網和 5G 時代網路傳輸需求增加的理想選擇。B5G/6G 低軌通訊衛星網路可覆蓋整個地球，實現異質性網路之間的無縫轉接，形成與 5G 的互補關係。隨著 5G 提供更高傳輸率和更廣通訊覆蓋範圍，透過第一顆衛星對地的鏈結經驗，不斷精進星際間的鏈結發展。衛星與衛星之間鏈結的 PAT 系統和姿態控制是 SpaceX 與 B5G/6G 發展的重要項目。資料傳輸速度和大小快速增長在各國之間促使合作和競爭，將 RF 傳輸逐漸轉向雷射光通訊。相對於 RF，雷射光通訊具有 SWaP 特性(大小、重量、功率的提升與精進)，並且具有更好的指向性和安全性，難以被截取訊號。在全球先進國家積極推動衛星光通訊的趨勢下，台灣應整合各產業先進，共同開發衛星與光通訊鏈路，提升與世界強國合作和競爭的實力。

## 參考文獻

1. Liu, Shicong, et al., *IEEE Communications Magazine*, 59 (7), 30 (2021).
2. Zixian Wei, Zhaoming Wang, Jianan Zhang, Qian Li, Junping Zhang, H.Y. Fu, *Progress in Quantum Electronics*, **83** (100398), (2022).
3. L. U. Khan, I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han and C. S. Hong, *IEEE Access*, **8**, 147029 (2020).
4. Huang, Hao, et al., *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **69** (1), 1065 (2019).
5. Xia, Dan, et al., *ACM Computing Surveys*, **55** (6), 1 (2022).
6. Aditi Malik, Preeti Singh, *International Journal of Optics*, **2015**,( 2015).
7. 人造衛星的種類及功能, please refer to the website: <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=38416>
8. C. Schmidt et al., “DLR’s Optical Communication Terminals for CubeSats”, *2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, March 28-31,( 2022).
9. D. R. Kolev et al., *Journal of Lightwave Technology*, **41** (2), 3750 (2023).
10. Siyuan Yu, Feng Wu, Qiang Wang, Liying Tan, Jing Ma, *Optics Communications*, **402**, 585( 2017).
11. Paul C. Serra, et al., “CubeSat laser infrared crosslink mission status,” *Proc. SPIE 11852, International Conference on Space Optics - ICSO 2020*, 118523D, June 11 (2021).
12. Paul Serra, et al., “Optical ranging and time transfer calibration on the CubeSat Laser Infrared Crosslink mission”, *Proc. SPIE 12777, International Conference on Space Optics - ICSO 2022*, 127777K, October 3-7 (2023).
13. C. Fuchs, F. Moll, J. Poliak, A. Reeves, C. Schmidt, “Optical satellite links at DLR,” *Proc. SPIE 12413, Free-Space Laser Communications XXXV*, 1241306, March 15 (2023).
14. Benjamin Rödiger et al., “High data-rate optical communication payload for CubeSats”, *Proc. SPIE 11506, Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans IX*, 1150604, August 22 (2020).
15. Lukas Knips et al., “QUBE-Towards Quantum Key Distribution with Small Satellites”, *Quantum 2.0 Conference and Exhibition 2022*, June 13-16 (2022).
16. Patricia Martín Pimentel et al., *Acta Astronautica*, **211**, (2023).
17. Biswanath Mukherjee, Ioannis Tomkos, Massimo Tornatore, Peter Winzer, Yongli Zhao, *Springer Handbook of Optical Networks*, 2522-8692 (2020).
18. Carlos Jorge Rodrigues Capela, *Protocol of Communications for VORSat Satellite*, Faculty of Engineering University of Porto, Portugal (2012).

## 作者簡介

張家豪先生現為國立陽明交通大學照明與能源光電研究所碩士生。

Chia-Hao Chang is currently a M.S. student in the Department of Institute of Lighting and Energy Photonics at National Yang Ming Chiao Tung University.

林語萱小姐現為國立陽明交通大學照明與能源光電研究所碩士生。

Yu-Hsuan Lin is currently a M.S. student in the Department of Institute of Lighting and Energy Photonics at National Yang Ming Chiao Tung University.

陳彥涪先生現為國立陽明交通大學影像與生醫光電研究所碩士生。

Yen-Fu Chen is currently a M.S. student in the Department of Institute of Imaging and Biomedical Photonics at National Yang Ming Chiao Tung University.

林千喜先生現為國立陽明交通大學影像與生醫光電研究所碩士生。

Chien-Hsi Lin is currently a M.S. student in the Department of Institute of Imaging and Biomedical Photonics at National Yang Ming Chiao Tung University.

林世千先生現為國立陽明交通大學照明與能源光電研究所碩士生。

Shih-Cian Lin is currently a M.S. student in the Department of Institute of Lighting and Energy Photonics at National Yang Ming Chiao Tung University.

朱冠瑜先生為國立陽明交通大學影像與生醫光電研究所

Kuan-Yu Chu received his M.S. in Institute of Imaging and Biomedical Photonics from National Yang Ming Chiao Tung University.

鄭健一先生為國立陽明交通大學照明與能源光電研究所

Chien-Yi Cheng received his M.S. in Institute of Lighting and Energy Photonics from National Yang Ming Chiao Tung University.

林俊廷先生為國立交通大學光電工程研究所博士，現為國立陽明交通大學電信工程研究所教授。

Chun-Ting Lin received his Ph.D. in Department of Photonics from National Chiao Tung University. He is currently a Professor in the Department of Institute of Communications Engineering at National Yang Ming Chiao Tung University.

# 創造性思考－立方衛星的挑戰與機會

## Think Outside the Box - The Challenges and Opportunities of CubeSats

陳嘉瑞

Chia-Ray Chen

立方衛星的標準化規範讓系統設計、製造和發射變得相對容易，這種技術標準不僅有助於節省設計時間，同時也為設計人員提供了更多客製化的靈活性。模組化構型使得設計人員能夠輕鬆地混合和匹配不同的組件和功能。經過 20 多年的發展，立方衛星已經成為太空產業中不可或缺的一部分，除了教育和技術展示的功能外，在遙測、物聯網與氣象等相關應用領域上亦成為扮演著重要角色。

The standardized specifications of CubeSats make system design, manufacturing and launch relatively easy. This technical standard not only helps save design time, but also provides designers with more customization flexibility. Modular configuration allows designers to easily mix and match different components and functionality. After more than 20 years of development, CubeSats have become an indispensable part of the space industry. In addition to their functions of education and technology demonstration, they also play an important role in related application fields such as remote sensing, Internet of Things, and meteorology.

### 一、背景說明

在 1957 年，蘇聯成功發射了人類歷史上第一顆人造衛星，即史普尼克 1 號 (Sputnik 1)，拉開了美國與蘇聯之間的太空競賽序幕。隨著數十年的太空科技發展，衛星從昂貴的國家任務逐漸轉變為普遍應用於商業領域，深刻地影響了我們的日常生活。

自 1999 年起，加州州立理工大學的 Jordi Puig-Suari 教授和史丹佛大學的 Bob Twiggs 教授提出了立方衛星的概念，旨在讓大學生和研究生能夠輕鬆設計和製造小型衛星<sup>(1)</sup>。立方衛星 (CubeSat) 是一種小型衛星的標準設計，每個模塊 (1U) 的尺寸為 10 公分×10 公分×10 公分。這種標準化設計不僅使立方衛星的製造更加迅速，同時降低了發射成本，也鼓勵更多的學術和研究機構參與太空任務。

美國太空總署 NASA 於 2010 年啟動立方衛星發射計畫 (CubeSat Launch Initiative)<sup>(2,3)</sup>，為美國教育機構和非營利組織研發的立方衛星提供發射機會，提供了太空飛試驗證的低成本

途徑，從而鼓勵更多學研單位投入太空領域發展，並獲得飛行硬體設計、開發和製造的實務經驗。自 2010 年啟動以來，立方體衛星發射計畫已發射了 150 多個立方衛星，對於美國在立方衛星先進技術的領先功不可沒。同樣的，歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 及日本宇宙航空研究開發機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 也分別在 2013 年及 2012 年開始提供產學研界立方衛星發射機會，也帶動了歐洲和日本的立方衛星研發熱潮(4,5)。

## 二、科技發展趨勢

近年來由於科技的快速發展，過去必須仰賴大型設備與電腦才能執行的工作也逐漸能夠在小型裝置如手機及穿戴裝置上執行。以下是一些近年來與衛星相關的一些科技趨勢<sup>(6-8)</sup>：

- 人工智慧 (artificial intelligence, AI) 與機器學習 (machine learning)：人工智慧和機器學習的發展是當今科技中的一個主要趨勢，相關技術也快速落實在衛星資料處理分析上，能夠更有效率的提升即時衛星服務，無論是地面端或太空端的太空科技發展都產生了重大影響。
- 大數據分析 (big data analysis)：為了能夠快速處理與日俱增的全球衛星資料，例如影像資料和氣象數據，大數據分析和應用成為衛星服務中一個重要領域，相關技術使得人們能夠更好地利用大量的衛星數據來進行分析、預測和決策，例如遙測服務公司能夠提供衛星影像內的重要資訊給客戶而非單純照片而已。
- 雲端 (cloud) 存儲與運算與邊緣 (edge) 運算：雲端運算與邊緣運算的出現對於太空科技發展與應用有了重大變革，地面的雲端提供龐大的資料存儲與計算資源，以及較高的安全性，方便衛星資料供應商與使用者在全球即時連線使用。而衛星端的邊緣運算則可進行即時資料處理與判讀，適用於需要低延遲、即時反應的場景，例如物件偵測與災害判讀。
- 物聯網 (IoT)：IoT 技術將許多設備連接到互聯網，彼此能夠相互通信和共享數據。衛星的特性能夠將此一應用由區域內提升到全球覆蓋，無論是高山、海洋或空中均能夠透過衛星連線來實現此一目標，為人們提供更便利生活。
- 精密機械製造：如精密磨削、雷射加工及 3D 列印技術等，可以實現高精度與提高生產效率，並適合多樣少量的客製化衛星發展，對於衛星小型化及先進酬載研發有重要幫助。
- 先進材料：如高強度、輕量、耐腐蝕和高溫特性先進合金和金屬材料，以及具有特殊的物理、化學和機械特性的奈米材料，可應用於太空環境，有利於特殊需求的太空產品研發。
- 輕巧省電晶片：在資源受限環境中，如立方衛星，晶片的大小、重量、和功率 (SWaP) 往往會受到嚴苛限制。目前電子產業朝向體積小、重量輕、和低功率發非常有利於立方衛星應用。

## 三、衛星發展趨勢

受到上述科技發展影響，衛星發展也出現了不同面貌，主要有以下幾個方向<sup>(9,10)</sup>：

- 小型化和輕量化：追求小型化和輕量化是目前的一個趨勢，特別在大量星系佈署的任務中，它們成本較低、製造周期短，能以較低的成本實現不同的任務。
- 低軌通訊衛星網絡：為縮短高軌衛星通訊延遲的問題，許多公司正在計劃建立全球低軌衛星互聯網，以提供全球無縫覆蓋的高速互聯網服務。
- 即時地球觀測和環境監測：衛星在地球觀測、環境監測和氣象預報等方面的應用持續擴大。這些衛星能夠提供高解析度的地球影像、環境變化監測、天氣預報和自然災害監測等

信息。

- 大型星系佈署：大量衛星部署在軌道上，以達到全球覆蓋與即時服務，如通信、導航和監測。

在此同時，也產生了有別於過往傳統太空的發展模式，一般稱之為新太空 (NewSpace)。

## 四、新太空

在本世紀的前十年，出現了多家私人發射公司，其中 SpaceX 的成功對後續太空產業的發展產生了決定性的影響。在 2008 年，Falcon 1 (獵鷹 1 號) 成為第一顆進入軌道的私人全液體燃料運載火箭，SpaceX 的核心策略是持續降低成本，首先通過工程和生產優化，然後是實現火箭的回收再利用。到了 2010 年，獵鷹 9 號的每公斤發射成本比其他公司降低了一半以上，這一成功引發了新的太空浪潮，使私人資本和太空新創企業在太空經濟領域迅速擴展<sup>(11)</sup>。

到 2013 年，商業發射的數量超過了政府客戶的數量，LEO 的發射數量超過了 GEO 的發射數量。SpaceX 低軌通訊星鏈 starlink 計畫的上萬顆衛星部署，引爆了太空產業的高速成長，同時吸引了更多資金與人才投入太空產業。傳統航太企業與具有創新能力和低成本結構的新進入者之間形成了新的合作關係。政府機構開始關注商業供應商，並轉向近地軌道新架構<sup>(11)</sup>。

此外，近年來，私募股權 (private equity, PE) 投資者和風險投資 (venture capital, VC) 積極參與太空產業，經濟利益成為推動太空活動的主要動力。因此，這表示太空企業以及其產品和服務的構想和實踐方式正在經歷典範轉移。這種轉變涉及技術、商業和政策層面的影響，這些影響共同形成了今天所謂的新太空 (NewSpace)<sup>(12)</sup>。

新太空的特點包括但不限於<sup>(12-14)</sup>：

- 商業化取向：新太空著重於商業化應用，重點放在太空活動的商業價值和商業潛力上，而非僅僅專注於科學研究或政府機構主導的太空探索。
- 創新和技術驅動：新太空業者不斷追求創新，尋求應用最新技術、工程和科學發現，以創建更有效、更可靠、成本更低的太空解決方案。
- 私人投資和風險投資：新太空活動通常依靠私人投資和風險投資，而不僅僅依賴政府資金。
- 多樣化的應用領域：新太空不僅局限於傳統的通訊、地球觀測和科學研究，還延伸到太空旅遊、太空採礦、環境監測、農業、教育等多個領域。
- 效率提升：不同於傳統太空任務的風險規避方式，為能夠降低成本與採用最新技術，對失敗的風險接受度有所提升。傳統太空機構發展衛星通常需要 3-5 年，新太空的公司通常在 1-2 年內完成衛星發射。
- 成本效益：新太空的任務成本通常是傳統太空的一成左右，主要是因為大量使用商規零件 (commercial off-the-shelf, COTS) 硬體及衛星小型化來實現。

整體而言，新太空具有創新、商業化、私人投資驅動和多樣化應用等特點。這種新型的太空活動模式為太空產業的發展帶來了新的可能性和商機，同時也為人類在太空探索和利用方面開啟了新的篇章。

## 五、立方衛星發展演變

### 1. 平台大型化

立方衛星最初由學術研究機構提出的概念，其低成本的進入方式迅速使太空領域成為政府機構和產業的熱門選擇。隨著更多工程人員的努力，立方衛星變得更加多樣化且具有更強的能力，使原本簡單的立方衛星能夠執行更為複雜的任務。為滿足更高的任務需求，立方衛星平台的發展已由早期以 1U 和 2U 為主流，逐步演變為 3U 和 6U，近期更包括 12U 和 16U 平台在內，如圖 1 所示<sup>(15)</sup>。這代表著立方衛星發展的重大突破，因為更大的平台意味著更強大的衛星能力，能夠提供更優越的應用服務和創造更大的商業價值。立方衛星已成為太空科技發展中不可或缺的一環。

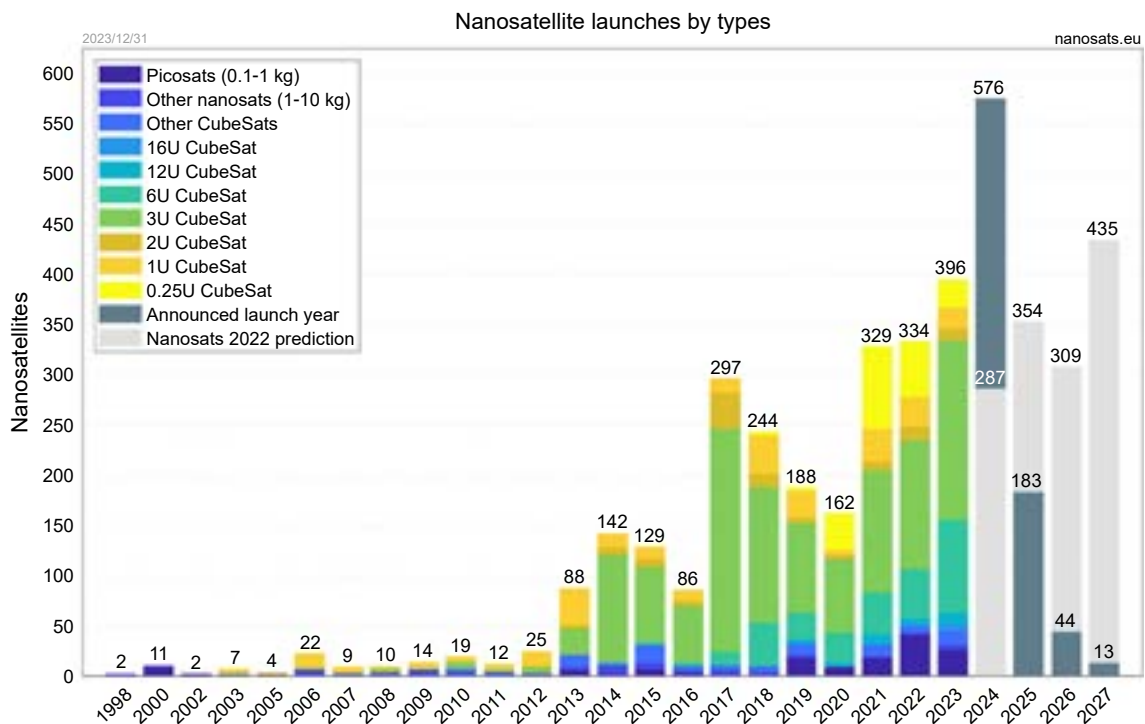


圖 1. 立方衛星發射尺寸，圖片來源 Nanosats Database<sup>(15)</sup>。

### 2. 平台超小型化

除了越來越多大型化的立方衛星出現外，從圖一也可看出，自 2020 年開始出現了大量超小型的立方衛星，其中包括 0.25U 的超小型立方衛星。這些衛星是衛星新創企業 Swarm Technologies 建立的 150 枚衛星物聯網星系的一部分。透過低成本的 0.25U 立方衛星的全球覆蓋星系佈建，可以提供低價及低流量的全球衛星物聯網服務。<sup>(16)</sup>

口袋衛星 (PocketQube) 是以 5 公分邊長的立方體，即一個單位 P (等於立方衛星體積的八分之一)，質量不超過 250 克。這個標準最初由 Morehead State University 的 Bob Twiggs 教授提出，旨在創造一顆可以裝在口袋裡的衛星。如圖 2 所示，2013 年首次發射了 4 枚口袋衛星，之後直到 2019 年才再度發射 6 枚口袋衛星。由於新冠疫情的影響，2020 年未有發射，但在接下來的 2021 到 2023 年間，口袋衛星的發射再度大幅增加。根據衛星類型來

看，1 到 3P 大小的口袋衛星是主流，如圖 3 所示。儘管口袋衛星體積極小，商業公司 Alba Orbital 已成功利用口袋衛星建立地球觀測星系，截至 2023 年底，已發射了 13 枚口袋衛星 (17, 18)。

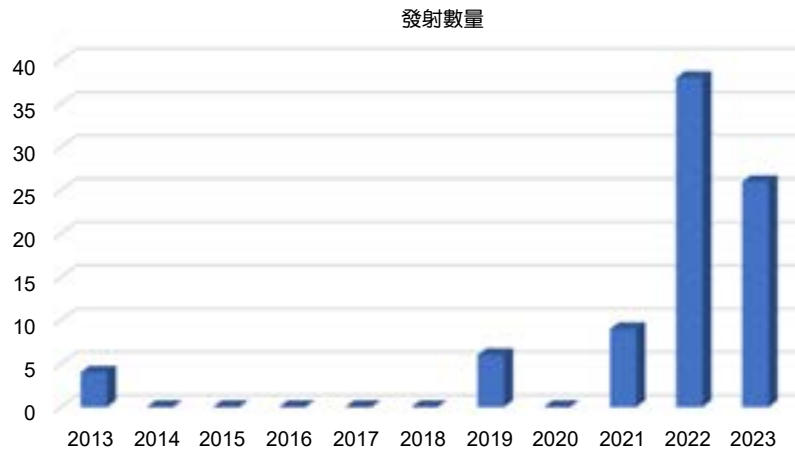


圖 2. 口袋衛星 (PocketQube) 發射數量。

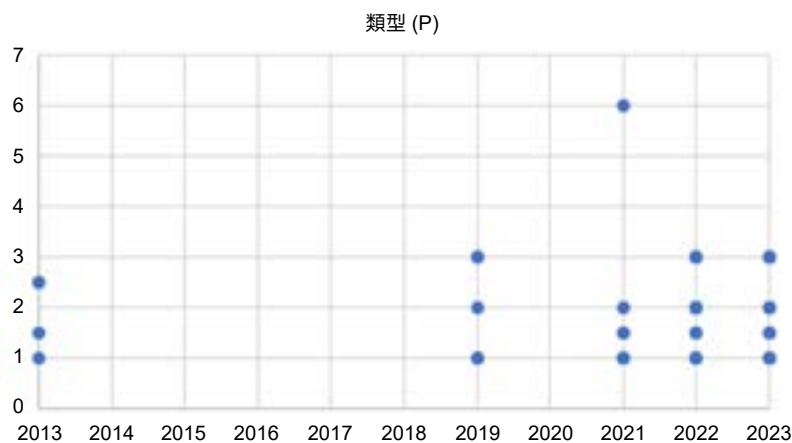


圖 3. 口袋衛星 (PocketQube) 發射類型。

### 3. 研發單位多元化

在過去的 20 年中，立方衛星的研發單位經歷了重大轉變。如圖 4 所示，在 2012 年之前，這些立方衛星主要由大學團隊主導開發，其主要目的是人員訓練和新科技展示。然而，隨著技術和應用的迅速發展，引起了業界和研究機構的關注。2013 年 4 月，商業公司 Planet Lab 發射了兩枚 3U 的光學遙測衛星 Dove，成功實現了以立方衛星提供地面採樣距離 (ground sampling distance, GSD) 為 3~5 米遙測影像資料。此後，每年發射數十枚衛星，這也解釋了為何 2013 年後 3U 立方衛星的發射量大幅增長 (見圖 1)，同時商業公司發射的立方衛星數量也迅速增加 (見圖 4)<sup>(15)</sup>。從 2014 年開始，商業公司發射的立方衛星數量正式超越了大學機構，標誌著立方衛星商業化時代的開始。

在過去的 10 年中，由於立方衛星的性能進一步提升，它不僅僅是學術研究的領域，更成為商業和科研應用的重要組成部分。許多企業和新興太空公司投入開發，利用這些小型平台進行科學研究、地球觀測、通訊和其他商業目的的任務。因此，立方衛星的研發單位已從

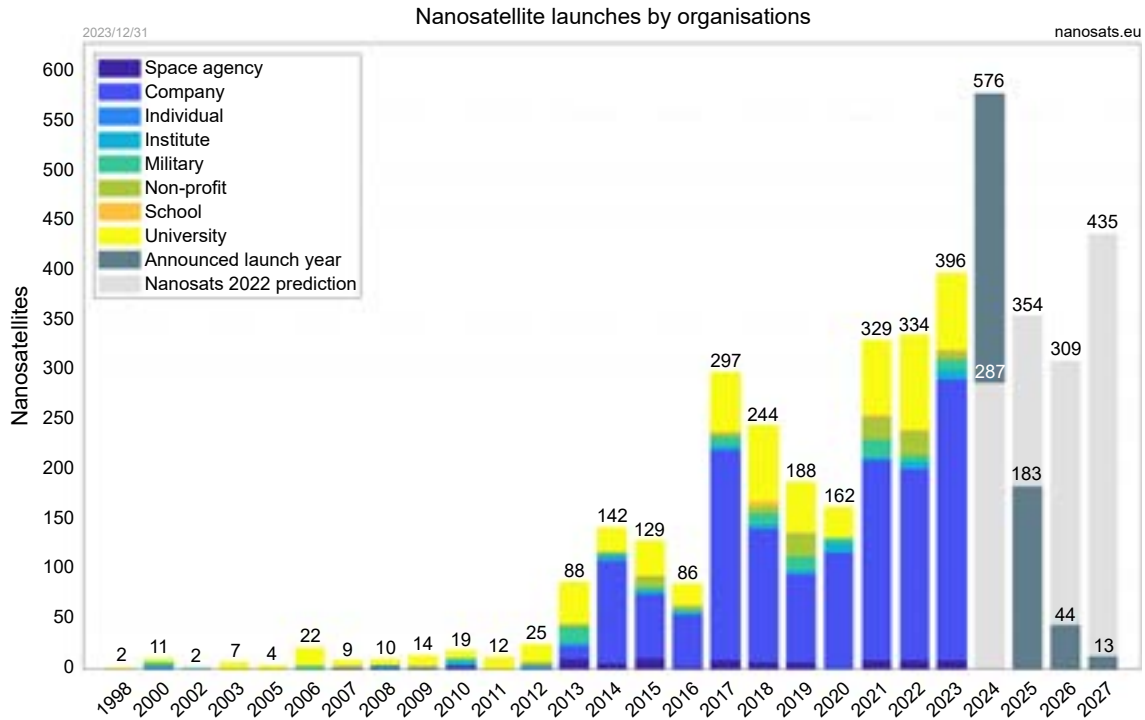


圖 4. 立方衛星研發單位，圖片來源 Nanosats Database<sup>(15)</sup>。

最初的大學團隊擴展到包括研究機構、企業和民間公司等多種參與者，形成了一個多元化的生態系統，推動著這種小型太空技術的不斷創新和應用。

#### 4. 任務多元化

伴隨著立方衛星的尺寸多元化與研發單位多元化，立方衛星所執行的任務也更多元，主要包含了下列應用<sup>(1-5)</sup> (15, 19)：

- 教育訓練：為學生或入門者提供了獲得衛星設計、開發和操作經驗的實用方法。
- 技術展示：太空進行新技術的驗證測試。
- 科學任務：進行太空科學任務。
- 遙測任務：提供低成本全球遙測服務，目前已有可見光及紅外光的多光譜與高光譜影像服務。
- 通訊中繼任務：主要為在軌資料中繼服務 (orbital data relay)。
- 物聯網 (IoT) 任務：提供低成本全球物聯網服務。
- 自動識別系統 (automatic identification system, AIS) 任務：透過衛星進行船隻自動追蹤，實現全球 AIS 覆蓋。
- 廣播式自動相關監視 (automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B) 任務：透過衛星 ADS-B 酬載來追蹤飛機的運動，用於空中交通管理。
- 氣象任務：提供低成本全球氣象觀測服務，如 GPS 電波掩星 (radio occultation, RO) 天氣資料。
- 無線電頻譜監測 (RF spectrum monitoring)：監測地表所發出之無線電頻譜訊號。
- 星際探索：立方衛星已在月球和火星探索任務上發揮輔助大型任務的功能。
- 空間監測 (space situation awareness, SSA)：主要用於與太空碎片監測和追蹤地球軌道上的物體。

根據 Nanosats Database<sup>(15)</sup>，從 2013 年到 2023 年底，多家商業公司推出了立方衛星星系計畫，應用範疇相當廣泛。圖 5 為這些公司首次衛星發射時間統計圖，從圖中可觀察到光學遙測、物聯網 (IoT)、氣象、AIS 及 ADS-B 等應用在 2013 年就已經開始佈署立方衛星星系。2018 及 2019 年明顯出現許多商業立方衛星公司及星系計畫。2020 年因受到新冠疫情的影響，新增商業立方衛星星系計畫有所減少，但到了 2021 年後已逐步恢復至疫情前水準。



圖 5. 首次商業立方衛星星系發射統計圖。

根據 2013 年到 2023 年底的所有商業立方衛星星系統計 (見圖 6)<sup>(12)</sup>，統計資料顯示物聯網 (IoT) 立方衛星星系案最多，高達 23 個。其次是光學遙測 (earth orbit, EO) 立方衛星星系，共有 17 個；第三是自動識別系統 (AIS) 的星系計畫有 9 個；第四則分別有 5 個在軌資料中繼的通訊任務，無線電頻譜監測 (RF spectrum monitoring) 及氣象任務；而廣播式自動相關監視 (ADS-B) 及空間監測 (SSA) 則分別有 2 個和 1 個。這些星系的任務應用領域相當廣泛。



圖 6. 所有商業立方衛星星系統計。

## 六、代表性商業立方衛星星系介紹

■**光學遙測**：全球第一家光學遙測立方衛星公司 Planet Labs 於 2010 年創立，最初的目標是利用從太空收集的資訊來幫助地球上的生命。該公司設計和製造了名為 Doves 的 3U 立方衛星，配備了相機，可以捕捉地球的不同區域。Planet Labs 於 2013 年 4 月發射了兩顆 3U 立方衛星，分別為 Dove 1 和 Dove 2，能夠生成地面採樣距離 (GSD) 為 3~5 公尺的影像。為實現全球覆蓋和快速取像的目標，該公司每年發射數十枚衛星升空，以提供商業應用服務。截至 2023 年底，該公司已發射超過 500 顆光學立方衛星，形成了最大的立方衛星商業星座，目前有 150 顆處於活躍狀態<sup>(15-17)</sup>。

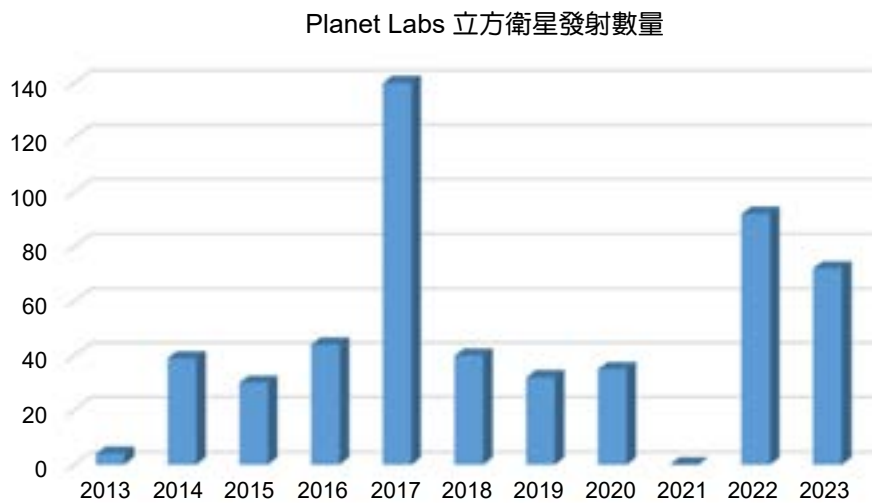


圖 7. Planet Labs 光學遙測立方衛星星系每年發射數量。

■**氣象**：Spire Global 成立於 2012 年，於 2013 年發射首顆 1U 衛星，隨後於 2014 年推出標準 3U 衛星第一代 Lemur-1。之後，該公司推出了第二代 Lemur-2 系列氣象立方衛星，以提供政府和商業客戶的天氣資料。透過測量 GPS 衛星訊號穿越大氣層，獲取大氣中的溫度、壓力和濕度剖面資料，並將這些資料納入天氣預報模型中。截至 2023 年底，該公司已發射 175 枚立方衛星，目前運營著近百顆立方衛星的艦隊，為主要立方衛星星系運營商之一<sup>(15, 22, 23)</sup>。



圖 8. Spire Global 氣象立方衛星星系每年發射數量。

■ **物聯網**：Swarm Technologies 成立於 2016 年，是全球最小的雙向通訊衛星 (0.25U) 公司之一。Swarm 提供全球連線的物聯網設備，並以全球最低成本提供這項服務。Swarm Technologies 的資料傳輸計畫每台連接裝置每年 60 美元，十分低廉。截至 2023 年底，Swarm Technologies 已經成功發射了 201 顆 Spacebee 立方衛星<sup>(16)</sup>。有鑑於 Swarm Technologies 所提供之低價的全球低速物聯網服務發展潛力，以及有別於 Starlink 的高速網路服務，SpaceX 於 2021 年斥資 5.24 億美元收購了 Swarm<sup>(24)</sup>。

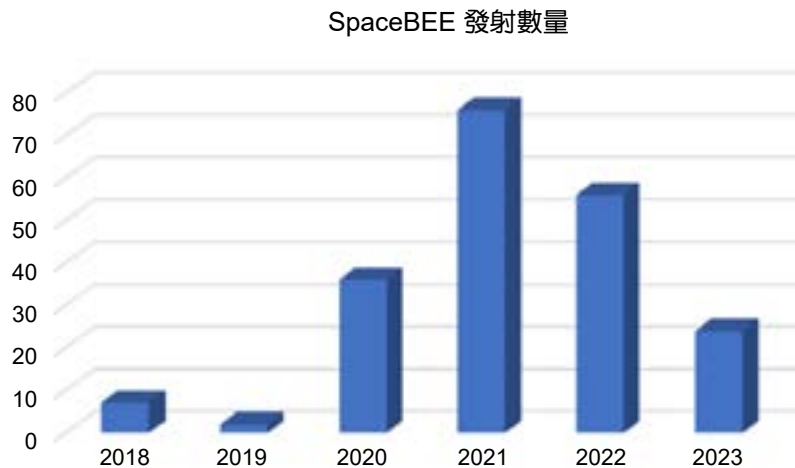


圖 9. Swarm Technologies 物聯網 IoT 立方衛星星系每年發射數量。

■ **無線電頻譜監測**：2015 年成立的 HawkEye 360 是一家地理空間分析公司，專責商業銷售衛星星系所收集的射頻 (RF) 訊號定位資料。其主要特色在於運用三顆編隊飛行衛星進行三角測量和繪製訊號位置。截至 2023 年 4 月，HawkEye 360 已成功發射了 7 個群 (包括探路者群)，目前在軌衛星總數達到 21 顆<sup>(15, 25)</sup>。

## 七、結論

立方衛星在過去十年受惠於科技快速發展與發射費用大幅下降之賜，產生了巨大的量變與質變，無論在衛星發射數量上和衛星應用領域上都大幅成長，未來將繼續扮演關鍵角色，廣泛應用於地球觀測、通信、氣象監測、科學研究等多個領域。其小型、模組化的特點使其成為各類任務和應用的理想選擇，預期將有更多產學研界及政府單位投入，並能持續吸引創投資金成立太空新創公司，加速立方衛星的發展與應用。

## 參考文獻

1. Please refer to the website: <https://en.wikipedia.org/wiki/CubeSat>
2. Jason Crusan, Carol Galica, “NASA's CubeSat Launch Initiative: Enabling broad access to space”, *Acta Astronautica*, **157**, 51 (2019).
3. Please refer to the website: <https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/>
4. Roger Walker, “ESA Technology CubeSats: Pushing the Mission Autonomy Envelope”, Oct 8, (2021).
5. Please refer to the website: <https://humans-in-space.jaxa.jp/en/biz-lab/experiment/strategy/j-ssod/history/>

6. B. Mazur, "10 major technological advances in the last decade", Dec 21, (2023). Please refer to the website: <https://www.ignitec.com/insights/10-major-technological-advances-in-the-last-decade/>
7. N. Duggal, "18 New Technology Trends for 2024: New Tech Horizons", Dec 5, (2023).
8. Mee Seong Im, Venkat R. Dasari, Lubjana Beshaj, Dale Shires, "Optimization problems with low SWaP tactical Computing", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, May (2019).
9. Greg Patschke, "Key trends shaping the future of space technology", Sep. (2023).
10. Settapong Malisuwan, Borwonrat Kanchanarat, *American Journal of Industrial and Business Management*, **12**, 1480 (2022).
11. S. Crow, "Navigating the 3rd Wave of the New Space economy", October 25, (2023).
12. Alessandro Golkar and Alejandro Salado, *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, **2** (1), (2021).
13. M. Thomas, "What is new space and how does it differ from traditional space? December 21, (2020).
14. Svetla Ben-Itzhak, "The Future of Space Technology and How It May Benefit Humanity", *Challenges and Opportunities at the Dawn of the New Space Age*, Spring (2022).
15. E. Kulu, Nanosats Database. Please refer to the website: [www.nanosats.eu](http://www.nanosats.eu).
16. Please refer to the website: <https://swarm.space/>
17. Please refer to the website: [https://en.wikipedia.org/wiki/Alba\\_Orbital](https://en.wikipedia.org/wiki/Alba_Orbital)
18. Please refer to the website: <https://en.wikipedia.org/wiki/PocketQube>
19. S. Weston, "State-of-the-Art Small Spacecraft Technology", NASA/TP-2022-0018058, January (2023).
20. Please refer to the website: [https://en.wikipedia.org/wiki/Planet\\_Labs](https://en.wikipedia.org/wiki/Planet_Labs)
21. Please refer to the website: <https://www.planet.com/>
22. Please refer to the website: <https://spire.com/>
23. Please refer to the website: [https://en.wikipedia.org/wiki/Spire\\_Global](https://en.wikipedia.org/wiki/Spire_Global)
24. M. Yang, "SpaceX 收購小型衛星連網新創業者 Swarm Technologies 佈局衛星物聯網應用市場 並延伸服務地區", Aug. 10, (2021).
25. Please refer to the website: [https://en.wikipedia.org/wiki/HawkEye\\_360](https://en.wikipedia.org/wiki/HawkEye_360)

## 作者簡介

陳嘉瑞先生為國立成功大學航太工程研究所博士，現為國家太空中心立方衛星計畫主持人。

Chia-Ray Chen received his Ph.D. in the Institute of Aeronautics and Astronautics from National Cheng Kung University. He is currently the Director of the TASA CubeSat Program.

# 台灣太空產業於商務發展之觀察

## Observations on the Business Development of Taiwan Space Industry

翁謙松

Albert Weng

全球太空產業自 SpaceX 於 2008 年成功發射可回收火箭後飛速發展，台灣於 2021 年通過「太空發展法」，正式將太空產業列入「六大核心戰略產業」，台灣太空界的產官學研積極投入，期能藉由科技業累積的產業實力，縮短太空產業發展的軌跡，加速趕上全球太空飛升的速度。商務發展 (BD) 的人才與能力培養，對新創事業相當重要。台灣太空業界目前先以系統工程課程培訓為主，借鏡盧森堡大學的太空碩士學程規劃，其中商務課程比重占約 18.89%，亦符合學程宗旨在培養工程與商務融合人才的目標，值得台灣太空相關大學參考。商務發展除了市場，另一項主要能力為募資，新創公司的創辦人或執行長多半同時身兼公司首任的 BD 角色，募資規劃與募資策略應針對選定的目標投資人量身定做，才能提高募資成功機會。

The global space industry has developed rapidly since SpaceX successfully launched a recoverable rocket in 2008. In 2021, the passage of Space Development Act by the Taiwan government as well as included space industry in its “Six Core Strategic Industries” as national initiative. Taiwan's industry, government, academia, and research institute devoted themselves to accumulating industrial strength of the technology industry to shorten the distance of space industry development. The cultivation of talent in the role of Business Development (BD) is crucial for startups. The current Taiwan's space educations emphasize more on engineering with a good success. However, taking example by the University of Luxembourg's space master program, the Master in Space Tech and Business, around its 18.89% of curriculum are dedicated for business courses, aligning with the goal to merge the talents from both engineering excellence as well as business success. This strategy behind the space industry development could serve as a reference for Taiwan's administrations and institutions. Following the market analysis of the space industry, fundraising is another top skill among the space startups one should master as BD. Founders or CEOs of the startups often assume the role of the first BD officer. To pitch successfully, the version of the pitch should be tailored per individual investor meeting, in order to address the concern specifically and precisely.

## 一、前言

台灣太空產業在全球太空產業發展的步調中，雖不具先行者優勢，惟近年來亦已加速追趕，同時基於台灣在全球半導體業的關鍵地位以及考量長期的地緣政治影響，台灣面對太空產業發展上，前有先鋒、後有追兵，處於機會與風險並存之勢。在國家層級方面，有必定投入、穩健發展的政策面需求，就產業界來說，亦可在衛星通訊邁向全球覆蓋的全新應用商機中，將已累積超過 30 年在資通訊產業的厚實技術與製造實力延伸到太空衛星通訊，讓台灣在半導體產業之後，順勢而上在下一個新興的重要產業再次建立關鍵定位，強化台灣未來的科技國力，同時確保在這項國際角力的新興科技產業發展上不會落於人後，亦或受制於人。此時此刻的太空產業發展對台灣極具國家級戰略意義，產業界亦隨近年來國際間在太空應用上的諸多突破與進展，明顯察覺到全球太空產業的熱度和速度，本文試圖以當前新興的太空產業形成初期，針對太空新創與太空學程在商務發展 (business development, BD) 的情形提出產業觀察，試提供學界與業界先進參考與交流。

商務發展 (BD) 的任務，根據 Business Development Association<sup>(1)</sup> 的定義：「Business development is the process of identifying and pursuing opportunities for strategic advancement in business.」商務發展是一個識別事業機會、並試圖達成策略進展的任務程序。這裡指的事業一般是指新創事業 (startups business)，或既有企業中的新事業 (new business)。實務上，在不同組織或企業裡，對商務發展這項職務或任務的定義有相當大的差別，所需的資格與能力也因實際任務而異，而因應台灣太空產業目前的發展階段，多數太空相關公司目前仍多處於未具明確且穩定的商業模式之初創期，本文即以台灣太空產業現況，將台灣太空產業目前主要的商務發展設定為新創事業型商務發展 (BD for startups)。實務運用時，商務發展這個稱呼亦多被用為對負責該職務的商務發展經理／主管 (Business Development Manager, BDM; Head or VP of Business Development) 的簡稱。後續內文將以商務發展或其英文簡稱 BD 依文意與實務溝通慣例交互運用，特此申明。

新創事業的 BD 可由市場分析先找出市場形成的脈絡，在後續的合作洽談與商機開發中，這樣的市場研究 (research) 與見解 (insight) 對擬定明確有效的商務發展策略影響甚鉅，也是手握特定技術或專利出身的創辦團隊，能避免因缺乏足夠的市場系統觀，而陷入先射箭 (有技術)、再畫靶 (找生意) 的經營風險。由此可見，對全球到台灣的整體太空產業之發展歷程與市場現況能有一定的分析能力與獨到見解，是身為 BD 必須先掌握的市場羅盤。在具備市場的理解與敏銳度後，新創 BD 最主要的任務在於市場與募資，以下從市場談起，結合募資的機會與挑戰，分述目前對太空產業於商務發展的觀察。

## 二、太空產業市場歷程與趨勢

全球太空發展從發射第一顆人造衛星開始到進入商用運載火箭歷經半世紀，台灣的太空產業也從 1990 年的科研計畫為主經過 30 多年，直到 2021 年通過太空專法，正式邁向產業化，其中包含幾個重要發展歷程是商務發展的產業知識基礎。

### 1. 全球太空產業的發展歷程

1957 年起，蘇俄與美國接連成功發射人造衛星入進太空，自此開啟人類研發與製造人造衛星、競逐宇宙的新里程<sup>(2)</sup>。惟太空科技發展彼時仍屬大國間的國力與科研對抗，對一

般的民生並無顯著的助益或改變。直到 2008 年，美國太空探索科技公司 (Space Exploration Technologies Corp., SpaceX) 在經歷三次火箭發射失敗後，成功發射獵鷹 9 號火箭，這次的成功，不僅讓 SpaceX 成為全球首家成功發射衛星進入地球軌道的私人公司，更重要的是其採用獨家研發的可回收式火箭技術，帶來低成本、高成功率、發射時程密集等突破過往衛星發射技術的重重限制，自此打開商業火箭運載衛星通往太空的大門，並快速吸引全球對太空探索與太空應用的興趣與企圖，加快推動各國相繼提升或擴大對衛星技術相關的研究和發展。

截至 2024 年 2 月，SpaceX 的獵鷹 9 號 (Falcon 9) 火箭以其約每兩周發射一次，每次發射可運載約 50 顆衛星的密集發射實力，在過去的 14 年間，已完成 300 次以上的衛星發射任務，更以達 99.4% 的高成功率，為太空衛星發射建立可信度高的常態發射量能，歷年來每次發射成功，都更激發全球太空界的信心，相繼加速發展以搶占太空商機<sup>(3)</sup>。

最近一次是在歷經兩次史上體積最大的火箭「星艦 (Starship)」發射失利後，SpaceX 終於在 2024 年 3 月 14 日成功完成「星艦 (Starship)」的第三次發射，這次的發射任務不僅達到預定的高度與速度，也順利進入預定的近地軌道，雖然星艦 (Starship) 回程並未依規劃進入太氣層降落回地球而失聯，但根據 Business Insider 在發射成功後的報導指出，依 SpaceX 過往的經歷，星艦可能需要再幾次的試發與修正，屆時發射成功之後，成本有望再降 10 倍<sup>(4)</sup>，可預期的成本優勢，除了勢必加速衛星發射的速度外，亦將提早實現太空採礦、太空旅行、太空清理等更多新興的太空應用和商業機會。

## 2. 台灣太空產業發展歷程

台灣於 1990 年成立國家太空科技發展長程計畫規劃小組，研擬國家級長期太空發展計畫，並於隔年 1991 年成立國家太空計劃辦公室籌備處，正式開始對於衛星通訊、遙測應用等太空計畫的推動。2003 年，國家太空計畫室籌備處整併於財團法人國家實驗研究院轄下，並由籌備處正式設立國家太空計畫辦公室 (National Space Program Office, NSPO)。2005 年，國家太空計畫辦公室更名為國家太空中心 (英文名稱沿用 NSPO)<sup>(2)</sup>。

時隔 15 年後，2021 年 5 月，立法院通過「太空發展法」，正式將太空產業列入台灣「六大核心戰略產業」<sup>(2)</sup>，不僅在政策方向立下明確目標，更在衛星與火箭的研發與製造之外，同步納入衛星發射場域、衛星應用服務、衛星星系通訊管理等相關配套措施的作業規範與推動辦法，自此皆有專法可依循，對於太空產業在國內的發展與邁向國際化，具有關鍵且深遠的助益，更直接影響相關業者的投入意願和投入規模。

2022 年 1 月，國內首座專供學術研究用途的火箭發射場，正式在屏東旭海啟用。根據目前國內太空產學單位的地理分佈，在旭海發射場成立後，也開始有「北衛星，南火箭」<sup>(2)</sup> 的產業聚落佈局說法。2023 年，國家太空中心改制為行政法人，英文名稱更改為 Taiwan Space Agency (TASA)，更改後的英文名稱縮寫 TASA 同步向美國太空總署 (NASA)、歐洲太空總署 (ESA) 等國家的太空最高指導機構看齊，在國際交流上更突顯台灣對太空發展的視野與重視。台灣太空的發展起步不算晚，中間雖幾經波折，也已在近年加速趕上，有機會緊追在全球太空產業起飛之際，借力半導體科技產業的基礎，建立在太空產業的關鍵定位，帶動全新的太空產業發展契機。

## 3. 全球太空市場規模

根據美國衛星工業協會 (Satellite Industry Association, SIA)<sup>(5)</sup> 於 2023 年 6 月公布的 2022

年全球太空經濟產值數據顯示，全球衛星產業的產值為 2,811 億美元，約占太空經濟產值 3,840 億美元中的 73%，其中的以產值規模排序，依序為地面設備 1,450 億美元 (51.6%)、衛星服務 1,133 億美元 (40.3%)、衛星製造 158 億美元 (5.6%)、衛星發射 70 億美元 (2.5%)。

#### 4. 運行中依軌道類型的衛星數量分佈

Orbiting Now 網站<sup>(6)</sup> 公布至 2024 年 3 月初，依衛星軌道類型區分，全球營運中的衛星達 9,022 顆，其中低軌衛星為 8,264 顆 (92%) 最多，高軌衛星 552 顆 (6%) 次之，最少的是中軌衛星 206 顆 (2%)，由此可見，低軌衛星的商機已迅速成為最重要的衛星市場，得益於低軌衛星的技術門檻低、研製與發射成本低、易於導入量產、生命週期較短等條件，成為吸引更多的業者加入與資金投入的主要因素。

#### 5. 未來成長趨勢

依據美國市場研究公司 Grand View Research<sup>(7)</sup> 於 2023 年 6 月的報告指出，2022 年全球太空科技市場為與 SIA 對 2022 年的統計產值相近的 4,202 億美元，並以年均複合成長率 (CAGR) 7.5% 的成長力道，到 2030 年估計將達 7,318 億美元。

相比之下，台灣國內太空產業的市場產值，依國科會統計<sup>(2)</sup>，2022 年為 2,158 億元，2025 年將再增 800 億元達 3,000 億元，2030 年有機會挑戰兆元級別產值，對比已具備護國群山規模的台灣半導體，工研院 2023 年時提出台灣半導體產業的產值在 2030 年預估達 6 兆元<sup>(8)</sup>，由此預測，說明 2030 年台灣太空產業約為半導體產業的六分之一，將具相當規模，而藉由 SpaceX 的星艦試射階段性成功，或許將會加速擴增太空產業的事業投資與市場規模。

### 三、商務發展的觀察與建議

#### 1. 台灣在航太工程的技術養成已具相當基礎，但太空人才仍不足

台灣的航太相關系所的學生合計每年約 1,700 名，其中學士生約 500 名、碩博士生約 1,200 名，據國家太空中心在 2021 年受訪時指出，其中 95%<sup>(9)</sup> 在課程規劃上都偏向航空領域，太空相關課程的不足，造成太空產業出現人才稀缺，直接影響太空業者的研發量能與技術創新。

因應太空產業發展需求，教育部 112 學年度核定成功大學、陽明交通大學、台北科技大學，以及逢甲大學四所學校成立太空系統工程研究所，招生名額均為 15 名，結果全數滿招<sup>(10)</sup>，即便如此，考量科技與半導體產業的人才磁吸效應，目前太空系所的畢業生實際投入太空產業的人才數量對業界來說仍遠遠不足，而學有專精的專業人才正是全球太空產業目前最迫切需要的關鍵資源。人才培養可分別由學校教育與企業培訓著手。太空產業目前多為新創，成立時間短，相關專業能力亦仍隨產業發展摸索養成中，而學校教育亦有機會因應太空產業現況與參考他國作法，在既有已相對完整且成效顯著的系統工程訓練之外，同時加強商務發展實務的能力養成。

商務發展對企業經營與成長發展的重要性為何？台灣積體電路創辦人張忠謀先生於 2021 年 10 月受邀到國立清華大學以「總經理的學習」為題的演講<sup>(11)</sup> 便說道：「在理工大學和理工教育上，台灣的程度跟美國程度相差不遠，你把清華、台大電機系與 MIT（麻省

理工學院) 相比相差不遠。」這點可呼應台灣在技術程度的養成具一定的國際競爭力，而後話鋒一轉，張創辦人接著說，「但是，若以 MBA 相較，那就相差相當大。」張創辦人談到在創立與帶領台積電的過程中(即台積電的「新創階段」)，他因為已具備多年的技術研發經驗，相對而言，這段期間讓他在總經理這個角色上最重要的成長是學習了業務與市場行銷(sales & marketing)，包含產品定價、具備領導力和經營策略。

張創辦人更提到，在他過去服務的公司裡，曾有一位總經理總抱持一個觀念：「只要產品好，客人就會自己來，根本不需要業務與市場銷，這是很錯誤的觀念。」張創辦人所言與新創執行長所需的條件完全契合，公司在新創階段的業務與市場銷其實是除了公司內部的產品開發和營運管理，幾乎包含對外的一切事務，用現在的職務名稱，其實就是由商務發展人員負責執行，台積電目前肩負開創新市場、新事業、新領域的職務，就是商務發展。而新創公司的第一任商務發展幾乎都是由創辦人／執行長或具商務發展能力的共同創辦人負責。由此可知商務發展的能力與工作對太空新創在初期的經營與發展之重要程度，也可以說，太空新創對商務發展的訓練，同時是太空新創執行長必要的訓練。

## 2. 商務發展可大幅增進太空產業的發展與合作

台灣的系統工程教育已倍受肯定，商務發展則有待加強，試著借鏡他國，找出在既有教學規劃上的加值作法。根據工研院發表的「盧森堡驅動太空產業之發展戰略與新創扶植作法研析」<sup>(12)</sup>，選擇盧森堡作為參考比較對象。

身為歐盟創始會員國和歐元區的盧森堡(Luxembourg) 全國人口僅 60 多萬人，卻以人均 GDP 超過 13 萬美元名列全球前三。盧森堡的太空產業在 30 年之間，從無到有打造出盧森堡獨有的太空產業網絡與縱深，並於 1985 年由政府支持創立全球最大的商業衛星營運商環球衛星公司(SES S.A.)，隨之發展出衛星生態產業鏈，同時經由提出《太空資源倡議》(SpaceResource.lu)，結合自身先進的國際金融中心地位，重新定義以新太空(New Space) 為主題的國家太空發展方向<sup>(13)</sup>。

盧森堡在太空教育特別強調工程與商務並重且融合兩項專長以解決複雜的系統與商業問題的養成訓練。經濟部中小暨新創企業署(中企署) 2022 年至盧森堡大學參訪的出國報告<sup>(14)</sup>提到：「盧森堡大學為全球百大排名大學之一，其中軟體研究應用更排行全球前 10 大。該校自 2019 年秋季與盧森堡太空總署合作，開辦為期兩年跨學科太空碩士課程，培養高階工程師和創業家人才庫，建議可將其相關專業人才培育課程資料提供與臺灣太空中心參考。」

進一步探究盧森堡大學(University of Luxembourg) 所開設的「太空科技與商業碩士學程」(Master in Space Technologies and Business)<sup>(15)</sup>，官網顯示最初的學程名稱是「跨領域太空碩士學程」(Interdisciplinary Space Master)，並與盧森堡太空中心(Luxembourg Space Agency, LSA) 共同規劃與推動，其新聞稿明確指出此太空學程的定位和特色：「這一獨一無二的跨領域太空碩士課程與其他大學的碩士課程有明顯區別。該課程旨在為已經擁有工程或科學背景的參與者提供更多相關必要的技術專長，以強大的商業知識為基礎，支持盧森堡太空產業的發展。」該學程設計配合盧森堡政府在全球太空經濟的策略定位，由此學程培養學生成為同時具備解決技術及商務挑戰的文武雙全型國際級太空人才。因此，課程內容在太空衛星系統工程之外，加入近 20% 的商務課程，包括：「太空政策、法律與倫理(3 學分)、太空經濟(3 學分)」、「太空商務(5 學分)」、「太空創業(3 學分)」、「創業實務(3 學分)」，合計 17 個學分，依歐洲學分互認體系(European Credit Transfer and Accumulation System, ECTS) 規定每學年 60 學分計，除畢業論文所要求的 30 個學分外，其餘課程共 90 學

分，此部分商務相關課程占 18.89%，約 1/5，課程比重亦反應商務專業的養成在其學程設計上之重要性。

若以盧森堡大學的太空碩士學程的課程內容與台灣教育部於 2023 年核定四所大學成立的太空工程研究所之課程內容<sup>(16-20)</sup> 相比，最大的差異即是因學程目標與定位不同，可見台灣的四所大學未納入商務發展相關的課程，而考量太空產業具一定的工程與技術難度，其商務相關的知識亦難由其他行業經驗移轉，因此，盧森堡大學的課程規劃可供台灣太空相關學界參考，或可借鏡盧森堡大學的作法，在課程規劃與實務培訓上與業界合作，依業界對太空商務人才的需求，合作培養同時兼具太空工程與商務專業的太空人才。

台灣創生平台在「2023 年台灣企業升級轉型調查白皮書」指出<sup>(21)</sup>，在可複選的調查中訪問 401 筆有效問卷，其中針對台灣企業所面臨的困難排名，相較於大環境與市場 (31.4%)、技術 (26.8%)、資金 (19.2%)，過半的受訪企業表示人才 (51.5%) 是最大的挑戰。如果綜合產業的調查結果如此，正值萌芽的太空產業的人才挑戰勢必更加嚴峻，需求更大。

### 3. 語言力就是移動力，英文就是國際移動力

商務發展需要極大的跨域、跨國、跨區移動力，特別是太空產業仍處於新興探索階段，除了專業的領域知識與一定的實務經驗，國際化的語言力亦是能否有效開展商務的關鍵。台灣過去的英文教育把英文視為學科，而非應用，應付考試尚可，實際應用要開口對話時，常是功力自動減半再打折。尤其在面對國際商務現場，例如國際會展、研討會、拜訪國際客戶、合作夥伴時，臨場的英文發揮更是影響商務發展的成敗因素。在學期間結合太空產業知識與案例的商務英文課程，將可為台灣太空人才培養關鍵的國際級專業實力。

### 4. 從商務發展 (BD) 的角度看策略與佈局

試想，如果 Elon Musk 在創立 SpaceX 時是以台灣常見的零組件等級 (component level) 思維和佈局，現在全球太空科技和產業很可能仍停留在 20 年前仍由國家主導、僅限於國防、科研和少數大型衛星公司投入的冷門小市場，甚至更可能影響近年戰爭進行的方式。台灣的太空產業發展，整體而言仍偏向由過去成功的技術思維所主導，慣於從技術突破找商業答案，也確實有為數不少的公司仍習於只專注在零組件等級的小而美作為主導策略，這些公司也因此有意無意地形成單打獨鬥居多的現況。

如果想要改變部分太空公司偏向技術主導的單挑模式，經由專業的商務發展對產業有更深入的理解與更精準的洞晰，就有機會依各自公司的經營目標、內外資源、現行規模等，找出獨特且有效的商業模式與策略佈局。而除了強化公司的商務發展外，對於目前多數太空公司仍處於新創階段來看，投資併購 (mergers & acquisitions, M&A) 以及募資 (fundraising) 是公司在建立紮實的商務開發基礎後，另一項更上層且更進階的商務發展作法。

新創公司除了技術 (產品) 與業務 (客戶) 之外，另一個具有極大價值的就是股權，如何擬定公司未來的發展的需求、規劃適當的階段募資計畫，再經由產業生態地圖分析找出合適的目標投資人組合，擬定策略進行募資，同樣是太空新創的商務發展關鍵任務，不論是由執行長或商務發展專才負責，都應審慎以對。

技術型創辦人多半較少投資與募資經驗，同時因為關係到敏感的股權控制與經營主導，不時會發生在公司資金不足，即將面臨斷炊的危險時，才被迫面對要開始想到要進行募資，可想而知，當下這家公司的表現較不樂觀的情況下，投資價值自然較難被公允評價，此時除了募資難度增高不說，也常出現雙方對估值認定有嚴重落差的情形，而無法繼續進行。

面對募資，除了一般可向熟悉的友人或具募資專業的企管顧問協助外，也可申請政府相關的創業輔導或產業服務資源相關的協助，另可參與太空主題相關的新創補助計畫，經由計畫辦公室協助安排具募資輔導經驗的顧問進行整體商務健檢。一般的募資規劃，可納入未來的整體募資需求進行評估。特別的是，針對評估後列入預計募資對象的目標投資人 (target investor)，建議擬定個別的募資簡報 (tailor-made pitch) 以及專屬的募資策略，切勿以同一套最新的、最強的募資簡報內容向所有的投資人進行簡報 (Say No to the “One-size-fits-all” Strategy)。

募資對象，除了一般以財務型為主的創投 (venture capital, VC)，亦可尋找具產業合作綜效之策略型投資人 (strategic investor)，後者對所評估投資的產業多半已有相關公司或投資佈局，而能與募資的新創進行合作綜效探討，對於合作機會的多元、開創與增值，較有具體務實的企業資源與管理經驗可協助新創。而策略型投資人因為已具相當的產業經驗，對投資案亦多半已有佈局與條件，新創若預計接洽策略型投資人進行募資，實應更有準備、更有策略，才能事半功倍。成功的募資，並不單只是順利獲得所需的資金就算，更是要能成功找到該輪募資最合適、最能發揮綜效的投資人組合 (investor portfolio)，在取得資金投資的同時，也讓該階段成長所需的主要股東與董事人選一起加入團隊陣容，更能加速擴大成長力道，此時，仔細研究後，評估加入已具一定產業佈局、且彼此有互補效益的策略型投資人，亦是值得新創認真評估的募資選項之一。

矽谷知名的新創加速器 YC (Y Combinator) 的合夥人 Kevin Hale 在一次主題為 “How to Pitch Your Startup” 的課程影片中便提醒，「募資簡報最重要的是，不是把自家公司的一切都說出來，而是要讓目標投資人覺得你是為他而來，至少抓到一件事打中他的投資意圖，而且要在聽完簡報後立即就想找你，就像當場讓他心想『嘿！我非得跟簡報這個人再聊聊才行啊！』那種效果。做到這樣，就是一場成功的募資簡報。」<sup>(22)</sup>

商務發展對正在興起的台灣太空產業可扮演關鍵的商務發動機角色，相關專業能力與培訓規劃仍待學界與業界合作組成國際太空教練團，結合政府太空相關補助計畫的資源，在台灣堅實的工程基礎上，也為太空專業人才裝上商務發展的兩隻翅膀：市場與募資，共同打造台灣下一個新興產業的護國群山！

## 參考資料

1. Business Development Association (2024), “Business development explained”, <https://www.bizdevassociation.com/what-is-business-development-definition>
2. 臺灣低軌衛星產業發展之機會與挑戰, 中技社 (2023), <https://www.ctci.org.tw/8838/research/26382/44826/>
3. Wikipedia (2024), “Falcon 9”, [https://en.wikipedia.org/wiki/Falcon\\_9](https://en.wikipedia.org/wiki/Falcon_9)
4. Business Insider (2024), “SpaceX is poised to make rocket launches 10 times cheaper with Starship, experts say”, <https://www.businessinsider.com/starship-launch-success-elon-musk-vision-cheap-space-travel-closer-2024-3>
5. Satellite Industry Association Report (2023), <https://sia.org/news-resources/state-of-the-satellite-industry-report/>
6. Orbiting Now (2024), LEO, <https://orbit.ing-now.com/low-earth-orbit/>
7. Grand View Research Inc. (2023), “SpaceTech (Space Technologies) Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2023 - 2030”, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/space-technology-market-report>
8. 工研院產科國際所曾預估 2023 年台灣半導體產業產值, 電子時報 (2023), [https://www.digitimes.com.tw/tech/dt/n/shwnws.asp?id=0000668529\\_7SD41F2Q3E7CBQ81GKNUU](https://www.digitimes.com.tw/tech/dt/n/shwnws.asp?id=0000668529_7SD41F2Q3E7CBQ81GKNUU)
9. 航太系所學生 95% 不懂太空 太空中心啟動「太空學苑」育才, 自由時報網站 (2021), <https://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/3740207>

10. 新增太空工程研究所 4 校滿招, Yahoo 新聞 (2023), <https://tw.news.yahoo.com/%E6%96%B0%E5%A2%9E%E5%A4%AA%E7%A9%BA%E5%B7%A5%E7%A8%8B%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%89%80-4%E6%A0%A1%E6%B%BF%E6%8B%9B-201000329.html>
11. 張忠謀「總經理的學習」: 輕視 Sales 和 Marketing, 公司根本活不了! 天下 Cheers 網站 (2021), <https://www.cheers.com.tw/article/article.action?id=5100101>
12. 盧森堡驅動太空產業之發展戰略與新創扶植作法研析, 工研院 (2022), [https://ieknet.iek.org.tw/iekrpt/rpt\\_more.aspx?actiontype=rpt&indu\\_idno=11&domain\\_id=86&rpt\\_idno=861642699](https://ieknet.iek.org.tw/iekrpt/rpt_more.aspx?actiontype=rpt&indu_idno=11&domain_id=86&rpt_idno=861642699)
13. 盧森堡將創立太空園區, 盧森堡台北辦事處官網 (2022), <https://www.investinluxembourg.tw/zh/news/%E7%9B%A7%E6%A3%AE%E5%A0%A1%E5%B0%87%E5%89%B5%E7%AB%8B%E5%A4%AA%E7%A9%BA%E5%AD%B8%E9%99%A2/>
14. 經濟部中小暨新創企業署 (2022), 赴歐洲考察太空產業鏈結單位暨串聯歐洲創新能量及資源, 頁35, <https://report.nat.gov.tw/ReportFront/ReportDetail/detail?sysId=C11100647>
15. 盧森堡大學太空科技與商務碩士學程, 盧森堡大學官網 (2024), <https://www.uni.lu/fstm-en/study-programs/master-in-space-technologies-and-business/>
16. 成功大學太空系統工程所課程資訊 (2024), <https://isse.ncku.edu.tw/var/file/216/1216/img/305772605.pdf>
17. 陽明交通大學太空總統工程研究所課程資訊 (2024), <https://isse.nycu.edu.tw/curriculum/>
18. 中央大學太空科學與工程研究所課程資訊 (2024), [https://www.ss.ncu.edu.tw/resources/Courses/NCU\\_ISS\\_Curriculum\\_Map\\_Ch-1080917.pdf](https://www.ss.ncu.edu.tw/resources/Courses/NCU_ISS_Curriculum_Map_Ch-1080917.pdf)
19. 逢甲大學太空系統工程碩士學位學程課程資訊 (2024), <https://space.fcu.edu.tw/space-curriculum/>
20. 台北科技大學太空系統工程研究所課程資訊 (2024), <https://iase.ntut.edu.tw/p/404-1133-130615.php?Lang=zh-tw>
21. 2023 台灣企業升級轉型調查白皮書, 台灣創生平台 (2023), 頁34, <https://www.tw-ren.com/file/1256/download?token=9NNPWIWZ>
22. Kevin Hale (2023), “How to Pitch Your Startup”, Y Combinator, <https://www.ycombinator.com/library/6q-how-to-pitch-your-startup>

## 作者簡介

翁謙松先生現為明基佳世達集團佳世達科技董事長暨執行長特助及台灣太空產業發展協會理事。 Albert Weng is currently the Special Assistant to the Chairman and CEO of Qisda Corporation and a Director of Taiwan Space Industry Development Association (TSIDA).

# 突破半導體製程維度限制新契機—二維材料

## New Opportunities to Break Through the Dimensional Limitations of Semiconductor Manufacturing-2D Materials

魏崇倫、林麗娥、莊子右、陳維鈞

Chong-Lun Wei, Claire Lin, Tzu-Yu Chuang, Wei-Chun Chen

### 一、前言

由於半導體製程技術來到奈米等級 (nanoscale)，電晶體裡的原子數量開始愈變愈少、科技逐步走進量子 (quantum) 層級，使得半導體微縮製程的腳步逐漸放慢，因此近年一直有摩爾定律 (Moore's law) 終將走到盡頭的疑慮，半導體製造業將迎來尺寸微縮的物理極限。電晶體主要由材料、製程及元件結構三個基本元素所組成。為了延續摩爾定律，在積體電路 (integrated circuit, IC) 成千上萬道製程中，製程的調整及精進是隨時在發生的。例如元件結構上的創新，從原先閘極 (gate) 在通道層 (channel) 的上方，改為到通道的上下兩側 (fin field effect transistor, FinFET)，到最後變為通道被閘極所全部包覆 (gate all around, GAA)。除此之外，科學家亦從材料的改變及創新著手，尤其應用在電晶體最為關鍵的通道層上，透過操縱材料的新物性或利用材料的新結構，找出與矽相同甚至更好的性能材料來開創新的發展方向。厚度僅原子等級，擁有導電性佳、高強度、可調電子結構等優異特質的二維材料 (two dimensional material)，像是石墨烯 (graphene)、過渡金屬硫化物 (transition metal dichalcogenides, TMDs) 被視為突破物理極限且優於矽等傳統半導體材料的潛力之星。

### 二、積體電路中的靈魂—電晶體

現代生活的舒適便利主要是靠半導體所驅動，像是手機、電腦、智慧家電等。我們把手機、筆電拆開來看，可以看到整排印刷電路板 (printed circuit board, PCB) (如圖 1(a) 所示) 上面都有許多大大小小不同功能的「積體電路」。積體電路主要是將電的主動元件 (二極體、電晶體) 與被動元件 (電阻、電容、電感) 縮小以後，製作在矽晶圓或砷化鎵晶圓上，再將許多電路 (circuit) 元件堆積 (integrated) 起來。而積體電路四周像蜈蚣長腳一樣，是為了固定在電路板上讓積體電路間可以彼此合作。我們以處理器為例，積體電路的邊長大約 20 毫米 (如圖 1(b) 所示)。打開積體電路黑色的板子，中間的小方塊就是積體電路的本體—晶片

(chip)，而晶片上面密密麻麻的元件稱為「電晶體 (transistor)」，晶片邊長大約 10 毫米 (mm) (如圖 1(c) 所示)，電晶體邊長大約 100 奈米 (nm) (如圖 1(d) 所示)。

實際上，電晶體不是一塊簡單的半導體，而是由不同類型的金屬和半導體所組成的立體結構。其結構形式有非常多種，而現在受到廣泛使用的場效電晶體 (field-effect transistor, FET)，是利用輸入電壓產生電場的場效應，來改變半導體的電導率，以控制電流輸出。以「金屬氧化物半導體場效電晶體」(metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 為例 (詳見圖 2)，包含了閘極 (gate)、汲極 (drain) 和源極 (source) 三個端點；當對閘極施加電壓時，電子才會由源極通向汲極。閘極的控制決定了電流是否通過，好比水龍頭控制水流開關，當我們打開上面的開關 (gate) 時，水會從供水的源頭 (source)，經過水管通道 (channel)，再從水龍頭出口 (drain) 流出來 (詳見圖 3)。

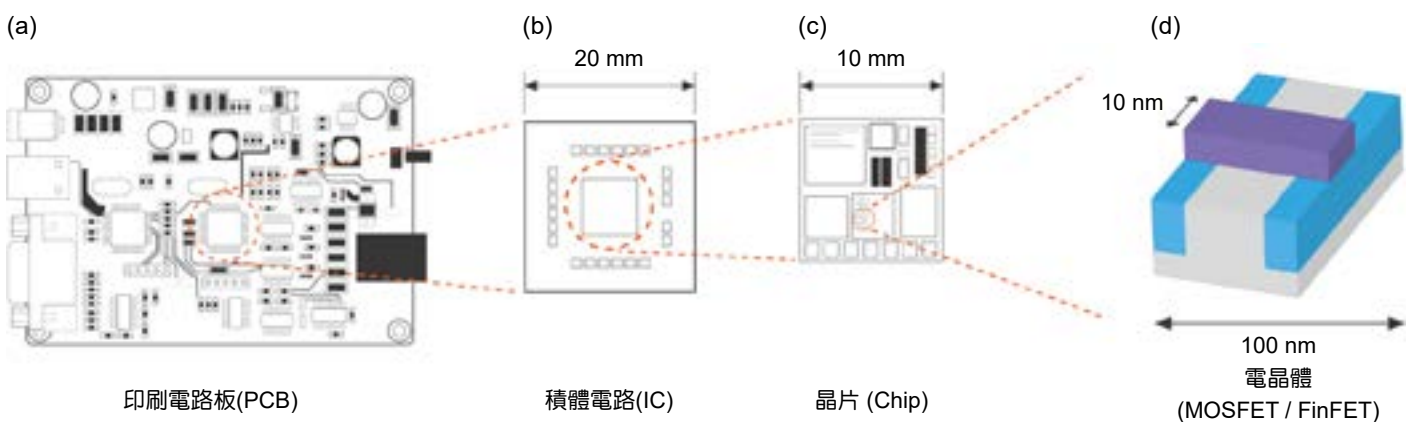


圖 1. 積體電路中晶片與電晶體的大小與結構。

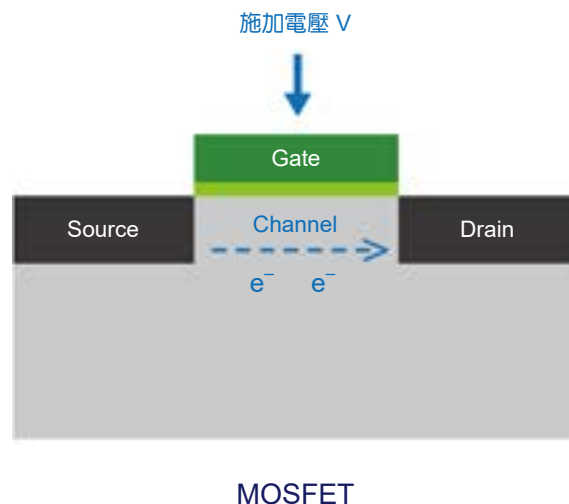


圖 2. 金屬氧化物半導體場效電晶體 (MOSFET) 結構。

只是這些像水龍頭的電晶體跟電腦、晶片有什麼關係呢？在數位電路裡都是「二進位的世界」，一切事物都會用 0 和 1 來表示，像是文字、照片、影片等。沒有電壓施加在閘極上，電子就無法通過，形成 0 的訊號；在閘極上施加電壓時，電子就會從源極經過通道再從

### 場效電晶體開關原理

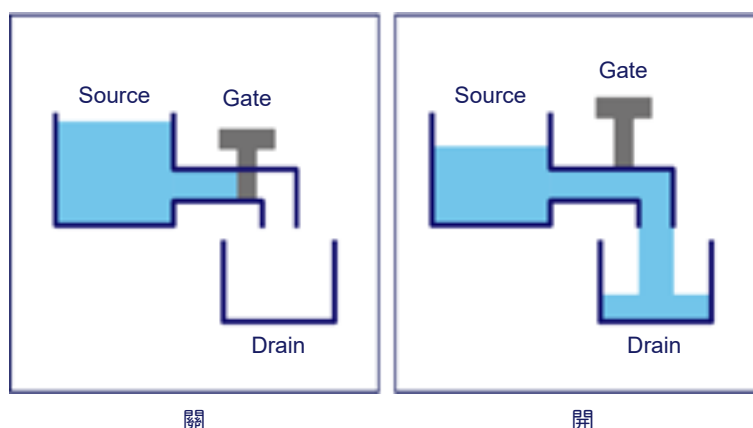


圖 3. 場效電晶體 (FET) 輸入電壓產生電場的示意圖。

汲極流出，形成 1 的訊號。因此電晶體的「關和開」，就對應到數位世界裡的「0 和 1」，透過電晶體，我們便能成功地搭起數位世界與現實世界的橋樑。因此在積體電路上，一顆顆的電晶體運作時，即可以表示一連串的 0/1 數列，再經過複雜的翻譯後，就變成影片、照片及許多訊號。一張照片的位元數就至少幾百萬個，因此每顆晶片上都有為數驚人的電晶體以及相當複雜的電路設計。

晶片誕生後，每年都以驚人的速度進步，單一晶片上能放入的元件數量越來越多。1962 年由美國無線公司 (Radio Corporation of America, RCA) 製作的實驗晶片只有 16 個電晶體，到了 2022 年，手機裡一個晶片，就擁有數十億到數百億的電晶體。<sup>(1)</sup> 英特爾創辦人之一的摩爾 (Gordon Moore) 在 1965 年便已大膽預測，同樣面積的積體電路晶片上，可容納的電晶體數目，大約每隔 18 個月會增加 1 倍，至此成為現代大家所知曉的稱為摩爾定律。

### 三、電晶體的結構種類

MOSFET 主要是以元件微小化為最大重點。元件縮小後，由元件所構成的電路或晶粒面積也可以隨之縮小，那麼同樣面積的晶圓可以生產的晶粒數量就會增加，如此一來每一個晶片的製造成本就會降低。同時元件變小了，在同樣的晶片面積上就可塞入更多的元件，就可以增加更多的功能，或是提供更大的設計空間來提升晶片內電路的效能。製程持續微縮後，電晶體的面積不斷被縮小、通道長度也縮短時，這讓閘極和下方通道的接觸面積變少，就越來越難控制下方的電子是否要通過。因此，當電荷在閘極沒有施加電壓時，也會從源極漏到汲極，就會產生漏電現象，好比把手機、電腦關機時他們還一直在耗電。同時伴隨而來的是焦爾效應產生的熱，這兩個主要的負面效應就稱為短通道效應 (short channel effect)。

原本的電晶體結構已無法滿足電性的需求，於是又開發出鱗式場效電晶體 (fin field effect transistor, FinFET)，從平面結構的電晶體改成立體結構的通道形狀。FinFET 相較於傳統的 MOSFET，它將源極和汲極從原本的平面往上拉高成像魚鱗的形狀 (FinFET 的 Fin 即是在形容像魚鱗的外觀)，而原本的閘極則直接包覆住中間高起的通道。用閘極將通道的兩面或三面包起來，這樣的設計大幅增加閘極和通道的接觸面積，閘極的控制能力也隨之加強，

就如同原本只能在很短的水管上施加很大的壓力才能關起來，現在我們將水管做的比較薄後，輕輕從兩邊用手一捏就可以關住水流了，因此大幅改善漏電流的問題。<sup>(2)</sup>

FinFET 可大幅改善電晶體尺寸縮小時因短通道效應所造成的漏電流，減少了電晶體在關閉狀態下的功率損耗。由於手持式智慧產品的流行，電子產品不須一直插著電源線，更是依賴電池提供電力運作，因此對於電路晶片的低功率損耗要求極嚴，這也使得半導體業者一直朝向低功率元件的目標持續開發新一代的電晶體。於是透過幾何結構的解決方法，像是閘極全環場效電晶體 (gate all around FET, GAAFET)、多橋通道場效電晶體 (multi bridge channel FET, MBCFET) 等將通道包得更密實等方式應運而生。但也有從利用二維材料做通道的先天優勢端著手改善的。由於電子在二維材料中運動，少了另一維度運動所造成的碰撞，因此在電場的作用下，可以有較快的移動速度，而提高導電率。只是僅有原子層厚度的二維材料，在元件的製作技術發展上仍有許多需要克服的地方，下文將介紹渴望延伸摩爾定律的二維材料的優點特性及製作困難。

#### 四、突破摩爾定律極限－二維材料

如圖 4 所示，原子透過不同的鍵結方式，可以形成許多不同構型的物質，例如：不與其它原子鍵結的單原子物質 (如 He 氦氣、Ne 氖氣，等惰性氣體)、與其它原子鍵結如雙原子物質 (如 O<sub>2</sub> 氧氣、CO 一氧化碳)、鍵結超過 2 個原子以上的多原子物質可以依幾何構型分成線型結構 (如 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 乙炔)、單層平面結構 (如 Graphene 石墨烯、WS<sub>2</sub> 二硫化鎢)，以及立體結構 (如 Si 單晶矽)，其中以單層原子平面結構的物質就是目前科學界的研究主流－二維材料 (two dimension materials)。在科學研究的過程中，科學家透過計算預測二維材料的存在，但從熱力學的觀點單層原子的平面二維結構受溫度影響是無法穩定存在。<sup>(3)</sup> 在 2004 年英國曼徹斯特大學 (The University of Manchester, UoM) A. K. Geim 教授研究團隊<sup>(4)</sup>，利用膠帶黏貼剝離石墨的方法，獲得單層原子石墨烯的平面二維結構，證實二維材料可以穩定存在，此項科學突破在 2010 年榮獲諾貝爾物理學獎桂冠殊榮！

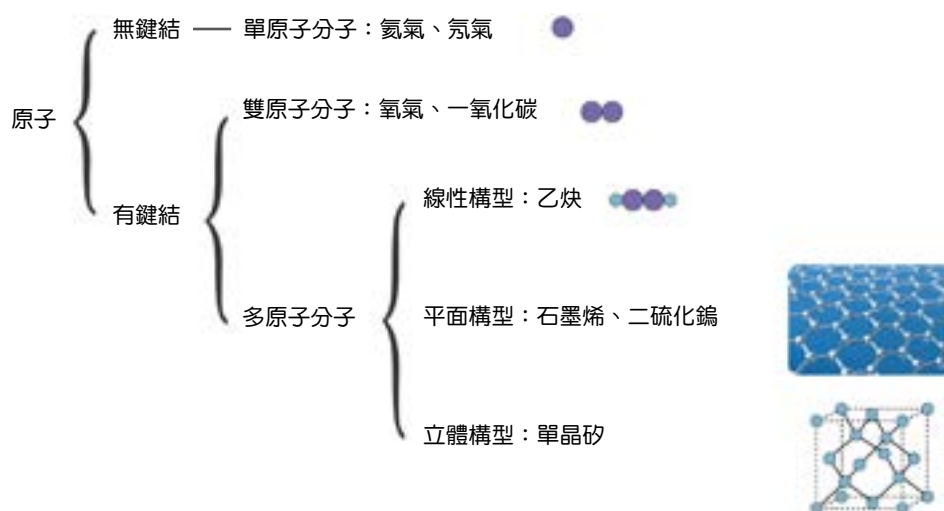


圖 4. 原子多樣態的鍵結方式示意圖。

自從科學界成功分離出單層原子石墨烯，對於石墨烯的各項研究席捲整個科學界，石墨烯的特性也被一一驗證出來，包含：最薄材料、導電度與熱傳率最高、電子遷移率最快、機械強度最高等各項物理特性之最。接著我們來看二維材料是如何進到半導體的視野，如圖 5 所示，當半導體通道 (channel) 從平面結構電晶體 (PlanarFET) 走向鱗式場效電晶體 (FinFET) 結構，半導體製程技術節點可微縮至 22 nm 以下，目前半導體製程技術要推升至 2 nm 以下製程時，半導體製造大廠都將希望放在閘極全環電晶體 (GAAFET) 製程技術<sup>(5)</sup>，透過改變半導體通道製程方式來推進半導體技術節點看似順利，但是，科學界普遍認為當半導體元件微縮至 1 nm 以下將面臨材料的物理極限—短通道效應，亦即微量電荷穿過通道，導致元件發生漏電流的現象<sup>(6)</sup>，找尋新的通道材料成為延續莫爾定律的一道曙光，因此科學家將目光投向具高平整度、單層原子厚度與高電子遷移率的二維材料<sup>(7)</sup>，石墨烯作為二維材料的代表，卻因為它的導電性太好屬於類金屬，無法像半導體具有能隙 (bandgap) 可以調節電荷移動，無法應用在半導體元件上。<sup>(8)</sup>

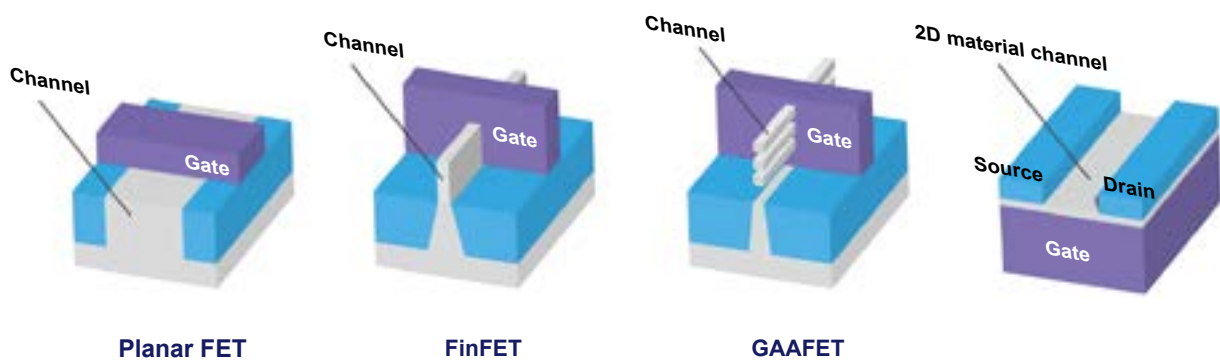


圖 5. 半導體元件結構示意圖。

經過一段時間研究，科學家發現過渡金屬硫族化合物其特性是具有能隙的半導體，因此 TMDs 的二維材料成為半導體材料研究的顯學，在 TMDs 二維材料家族中二硫化鉬 ( $\text{MoS}_2$ )、二硫化鎢 ( $\text{WS}_2$ )、二硒化鉬 ( $\text{MoSe}_2$ ) 與二硒化鎢 ( $\text{WSe}_2$ ) 都是熱門的研究材料<sup>(9)</sup>，目前研究顯示  $\text{MoS}_2$  與  $\text{WS}_2$  最適合做為半導體元件通道，相較於閘極全環電晶體 (GAAFET) 製程技術，二維材料本質為單層原子薄膜，其薄膜上、下層之間的作用力為微弱的凡德瓦力 (Van der Waals Force)，而且沒有未鍵結的懸空鍵 (dangling bond)，因其具有高電荷遷移率、電荷阻礙性低 (電荷不會被二維結構散射或捕捉)，有望將半導體製程微縮更推進一大步，但是，目前將  $\text{MoS}_2$  與  $\text{WS}_2$  成長為高品質大面積的二維材料仍是一大挑戰，此外，將成長好的二維材料轉移到元件上，以及二維材料表面不具懸空鍵，無法進行良好的電極接觸與閘極堆疊，這些都是未來將二維材料應用在半導體元件上需克服的困難。

國科會所揭櫫的《A 世代前瞻半導體技術專案計畫》<sup>(10)</sup>，其宗旨在於為下一個世代半導體產業所需的相關技術，由學術界領軍做超前部署。下一個世代的半導體技術勢必將進入了次奈米等級 (Angstrom, Å)，也就是原子的尺度。此專案計畫其中一個重點，就是開發二維材料為導電通道層 (channel) 的電晶體。而被譽為有機會突破物理極限的二維材料具有多項優越之特性，惟其結構品質一直以來為探測的難題，如何以非破壞的方式，精準分析半導體元件內各層超薄薄膜的晶體結構、界面型態與電子能帶，提供晶片材料特性與結構的設計基

礎，已成為次世代半導體技術需突破的關鍵技術之一。薄膜內的缺陷會導致電荷被束縛而增加元件的漏電現象，隨著半導體製程愈趨先進，積體電路對於缺陷的容忍度也越來越低，因此材料製程將進入原子尺度的精密調制與相應的檢測解析度。在國科會規劃架構下，國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心(儀科中心)與國家同步輻射研究中心，共同進行國際級半導體相關科研設施建置，並採自行設計、自行組裝方式建置半導體應用所需臨場檢測設施與技術，期望為半導體產業在新穎材料開發、核心製程技術、缺陷分析等科技研究做出突破性貢獻，並增進我國半導體產業實力與全球競爭力。

## 五、結論

在 2019 年台積電運動會上，久未受訪的台積電創辦人張忠謀先生被媒體問及摩爾定律是否已走到盡頭時，他巧妙借用「山窮水盡疑無路，柳暗花明又一村」來形容摩爾定律的發展。不斷微縮電晶體結構所面臨物理極限所帶來的挑戰，可望從二維材料的特性另闢蹊徑。使用二維材料於電晶體的應用仍需要進行許許多多待解決的工程技術挑戰，儀科中心長期深耕半導體前瞻設備開發，以可應用於半導體先進製程之二維材料為主要目標，並擴展到其他二維材料異質結構的成長，同時結合自主開發半導體設備的優勢，支援新穎二維材料特殊物理、化學、光電等材料性質之研究需求，攜手產學研界共同突破半導體材料維度限制!!

## 參考文獻

1. 參見 TECH CHIP 科技洋芋片: <一次看懂半導體是什麼?原來它比細胞還小,還有好幾億個開關?!半導體是如何幫助人類過好生活?> please refer to the website: <https://www.youtube.com/watch?v=ife-z2T9QLM>
2. <FinFET-摩爾定律的救世主> please refer to the website: <https://semiknow-official.medium.com/finfet-%E6%91%A9%E7%88%BE%E5%AE%9A%E5%BE%8B%E7%9A%84%E6%95%91%E4%B8%96%E4%B8%BB-b04b1a34d85b>
3. R. Wallace, Phys. Rev. 71, 622-The Band Theory of Graphite
4. A. K. Geim, "Graphene: Status and Prospects", Science, **324**, 1530 (2009).
5. <淺談先進電晶體:新一輪晶片製程中,誰勝出?有何發展趨勢?> please refer to the website: <https://technews.tw/2022/01/21/the-development-trend-of-fet/>
6. <人類陷入「製程焦慮」,但晶片真的越小越好嗎?> please refer to the website: <https://technews.tw/2021/06/11/is-the-chip-really-as-small-as-possible/>
7. <先進製程技術無止境的競逐!挑戰物理極限的半導體元件材料在哪裡?> please refer to the website: <https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=c49f0b92-d692-4948-80cc-340e6f735e31>
8. <二維材料在次奈米電晶體的應用> please refer to the website: <https://www.digitimes.com.tw/col/article.asp?id=3755>
9. <二維材料於半導體應用的現況及未來> please refer to the website: <https://www.digitimes.com.tw/col/article.asp?id=1298>
10. <從二維材料技術發展的觀點探討臺灣學研產業之前瞻發展及 Å 世代半導體專案計畫推動歷程研析> please refer to the website: <https://www.nstc.gov.tw/nstc/attachments/0c20540e-fb28-4cb1-8e0f-dcd9bcec1b3d>

## 作者簡介

魏崇倫先生為國立陽明交通大學料科學與工程學博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理工程師。

Chong-Lun Wei received his Ph.D. in the Department of Materials Science and Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently an Assistant Engineer at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

林麗娥女士為國立政治大學東亞所碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副工程師。  
Claire Lin received her M.S. in the Graduate Institute of East Asian Studies from National Chengchi University. She is currently an Associate Engineer at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

莊子右先生為國立成功大學工業設計碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理工程師。

Tzu-Yu Chuang received his M.S. in Industrial Design from National Cheng Kung University. He is currently an Engineering Assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳維鈞先生為國立陽明交通大學材料科學與工程博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Wei-Chun Chen received his Ph.D. in Materials Science and Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently a Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.