

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⁽²⁾。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⁽³⁾。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⁽⁴⁾，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。

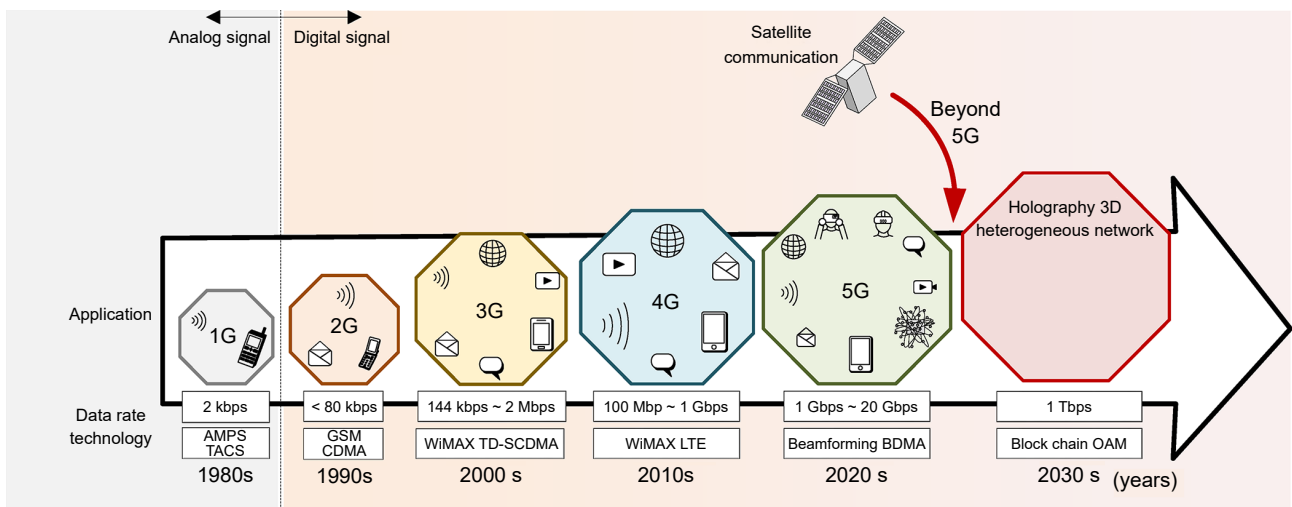


圖 1. 網路發展圖⁽¹⁾。

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路環境⁽⁵⁾。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路及光纖之區域，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

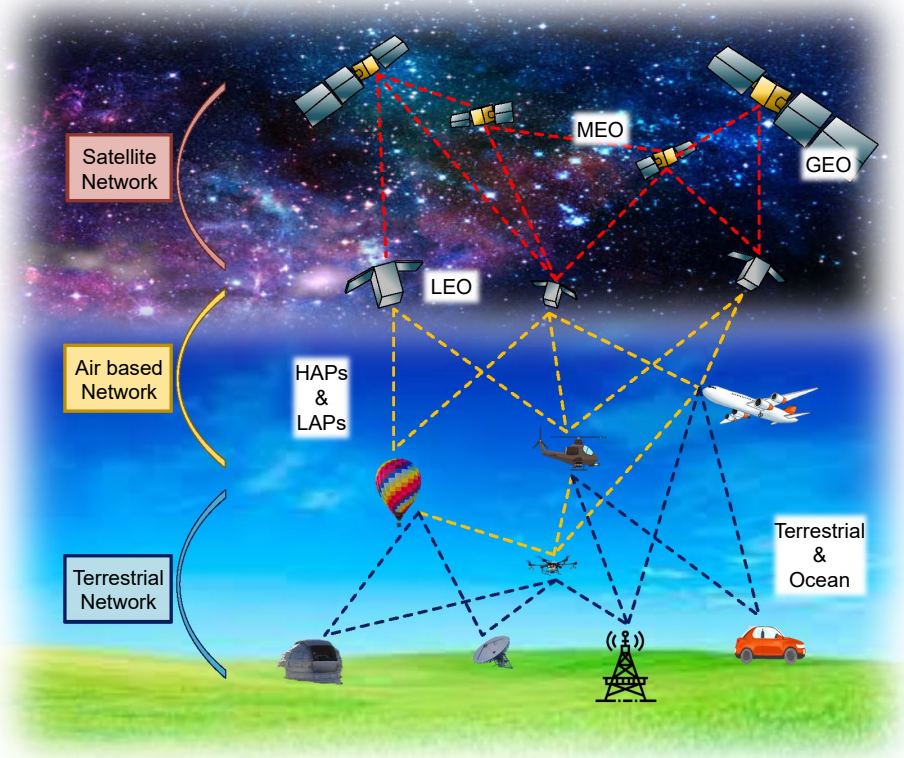


圖 2. 空對陸地異質網路系統架構圖⁽⁵⁾。

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⁽⁶⁾。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。

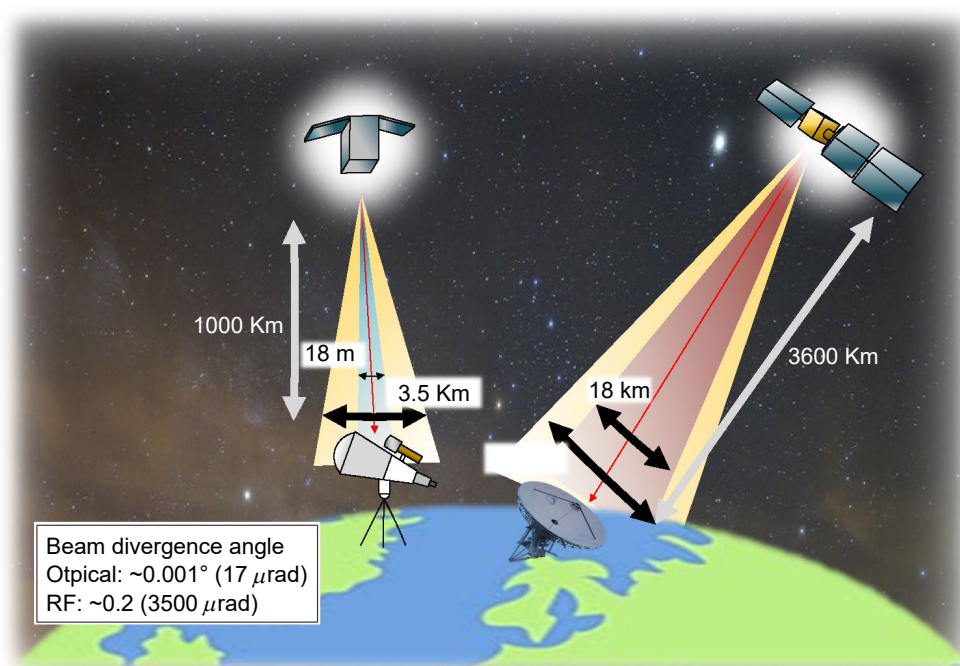


圖 3. FSO 與 RF 光束發散及光束大小比較圖⁽⁶⁾。

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)⁽⁷⁾。

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

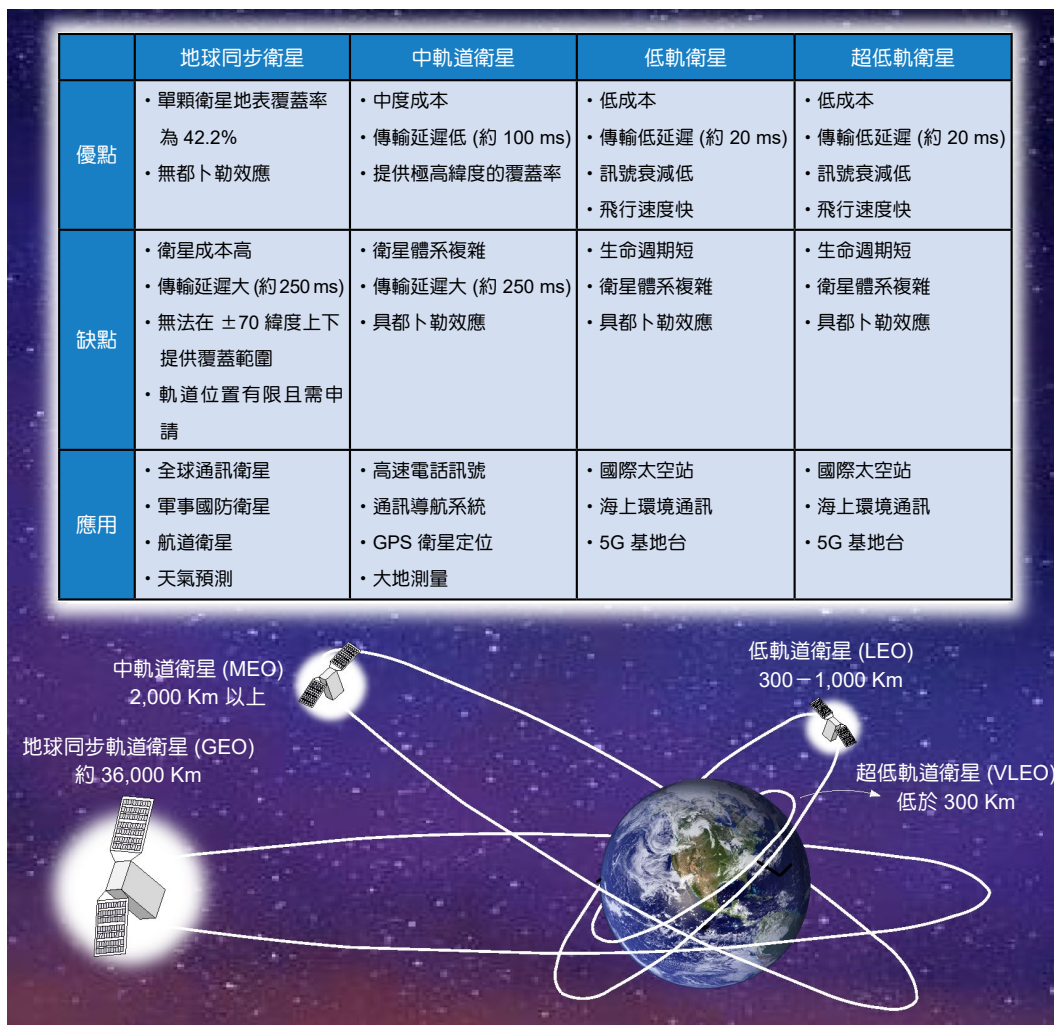


圖 4. 不同軌道人造衛星的種類及功能圖⁽⁷⁾。

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⁽⁸⁾。

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⁽⁹⁾。

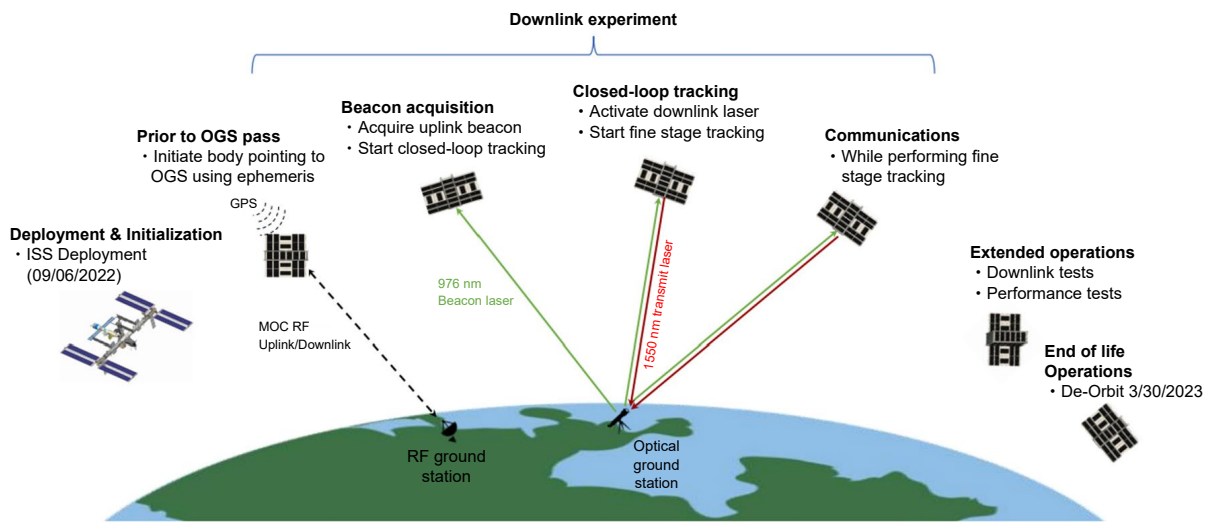


圖 5. CLICK 營運理念圖⁽⁹⁾。

CLICK 任務由三個立方體衛星組成：CLICK-A、CLICK-B 和 CLICK-C⁽¹⁰⁾。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⁽¹⁰⁾ (目前已公布通聯並未成功)。

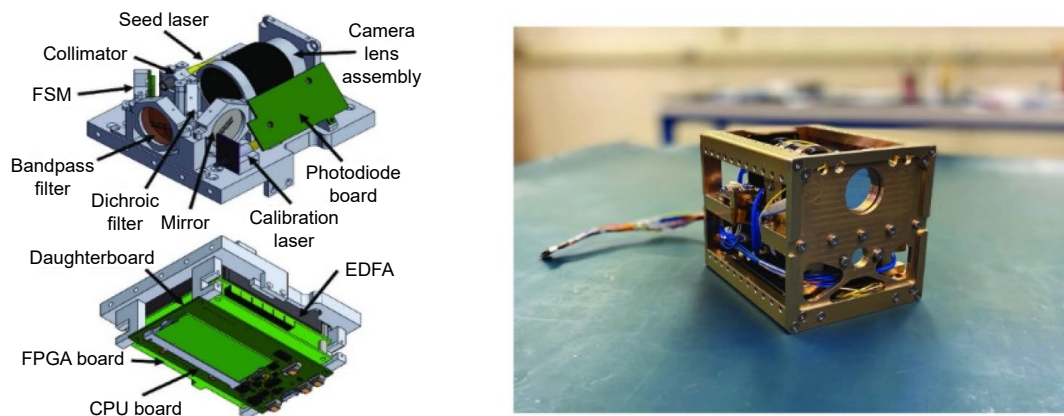


圖 6. 左：CLICK-A 光通訊酬載設計圖、右：CLICK-A 酬載模型圖⁽⁹⁾。

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⁽¹⁰⁾。

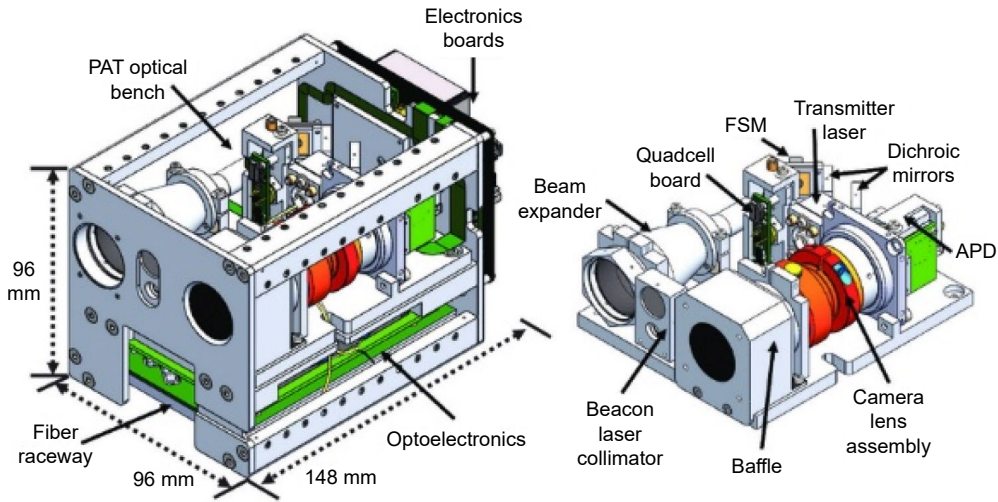


圖 7. CLICK-B/C 光通訊酬載設計圖⁽⁹⁾。

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⁽¹¹⁾。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^(14, 15)。

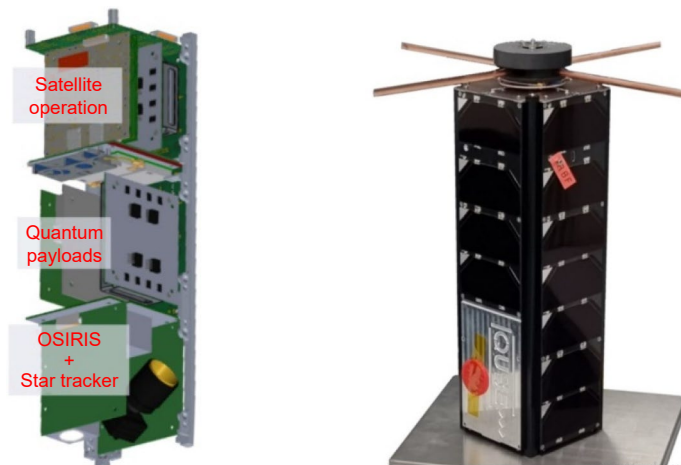


圖 8. 左：衛星主要模組圖、右：3U 衛星 QUBE 照片⁽¹⁴⁾。

德國的 PIXL-1 任務，CubeL 3U 立方衛星主要任務為展示 OSIRIS4CubeSat (O4C) 技術⁽¹²⁾，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⁽¹²⁾，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⁽¹³⁾。其尺寸只有 0.3U、重量 395 g、運行期間功耗為 8.5 W。

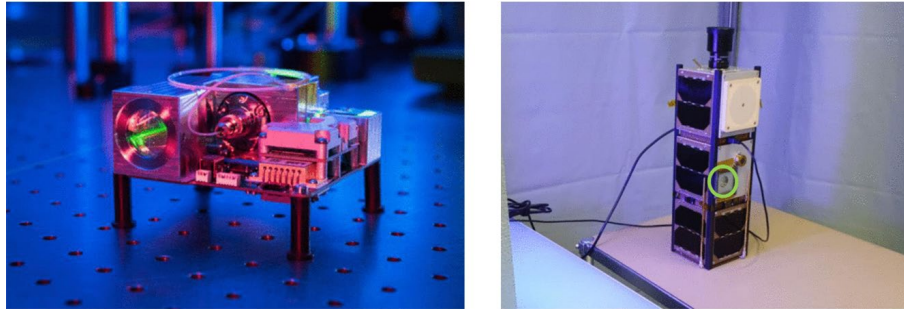


圖 9. 左：O4C 飛行模型圖、右：CubeL 最終整合圖 (O4C 孔徑以綠色標示)⁽¹³⁾。

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⁽¹⁶⁾。

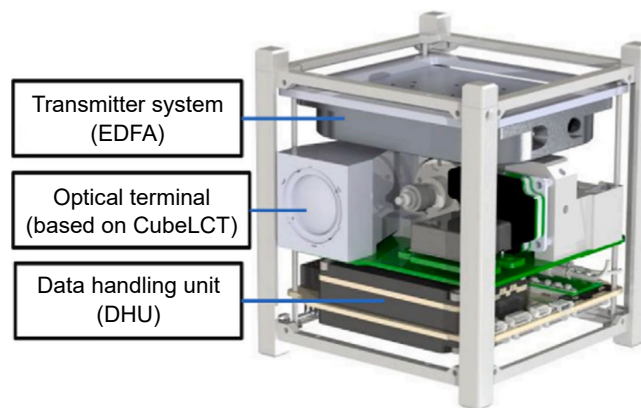


圖 10. CubeISL 終端設計⁽¹⁶⁾。

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：

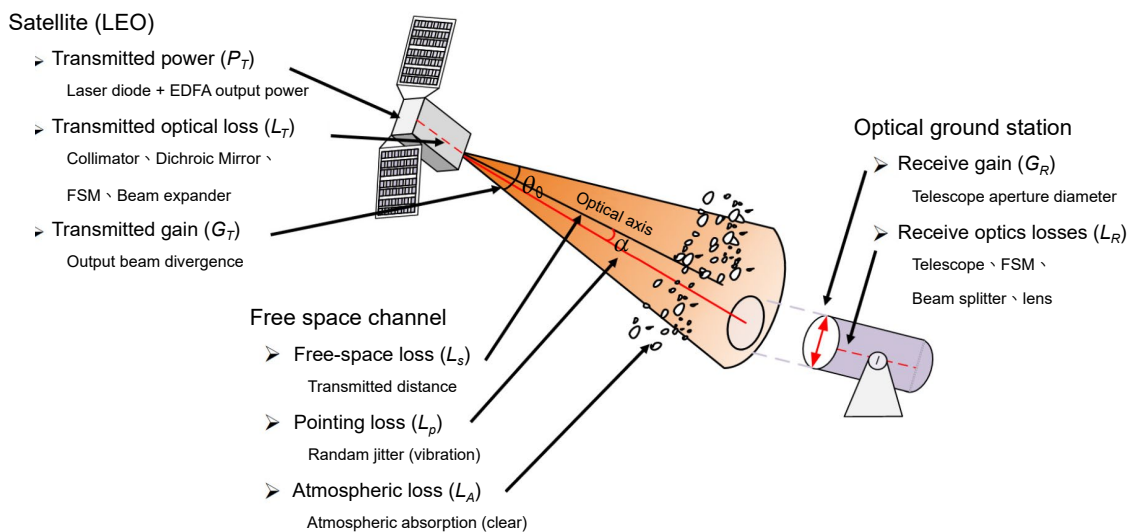


圖 11. 鏈路裕度鏈路劃分圖。

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。

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

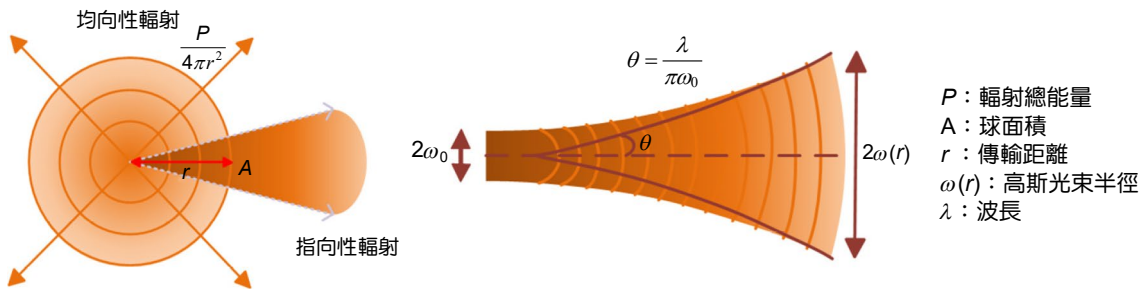


圖 12. 左：均向性輻射及指向性輻射能量示意圖、右：高斯光束示意圖。

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

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

指向性輻射能量則可透過高斯光束原理來做計算

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

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

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

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

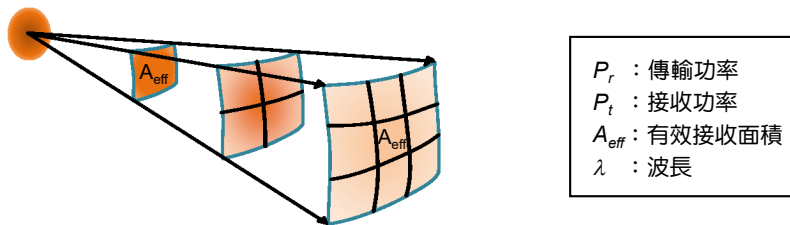


圖 13. 自由空間光損耗示意圖。

(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：

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

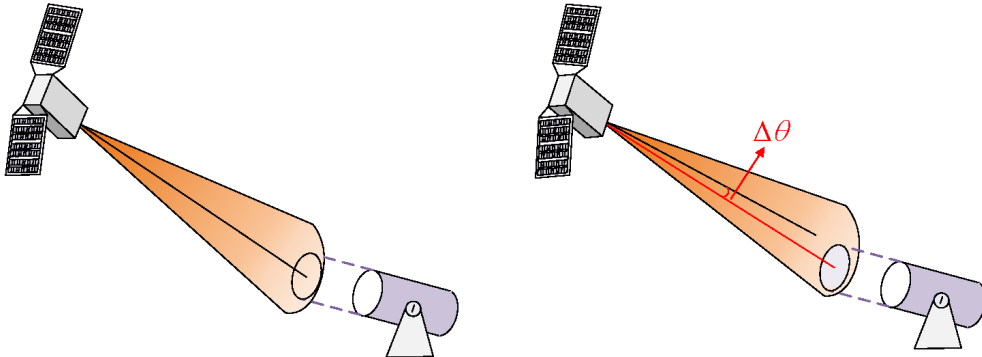


圖 14. 衛星工程體與地面接收站具指向誤差示意圖。

(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 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 、 $\text{CO}_2(\text{g})$ 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 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ ，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。

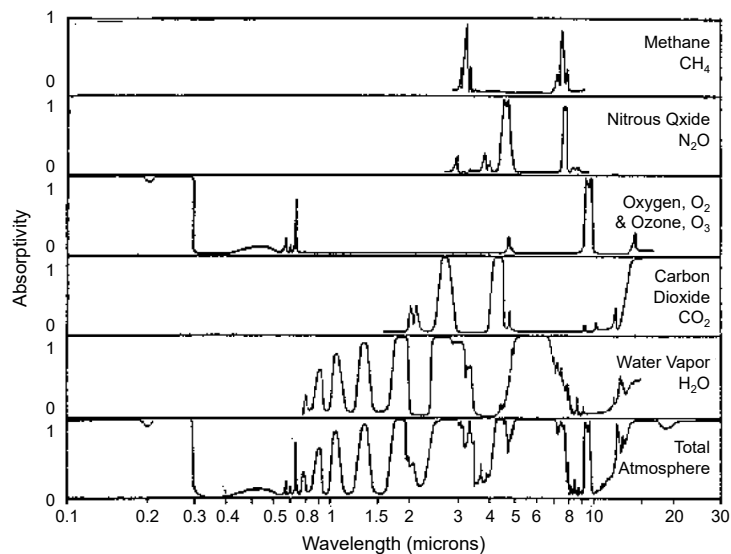


圖 15. 波長與吸收率之關係⁽¹⁸⁾。

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。

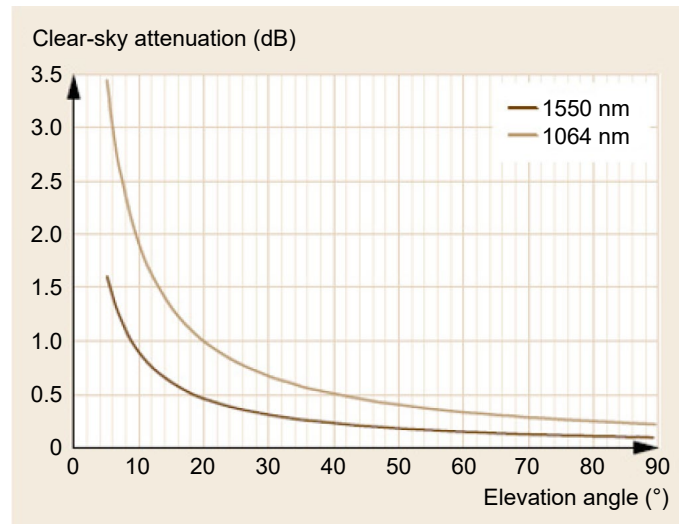


圖 16. 1064 nm 和 1550 nm 處晴空衰減與仰角的關係⁽¹⁷⁾。

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)

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

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

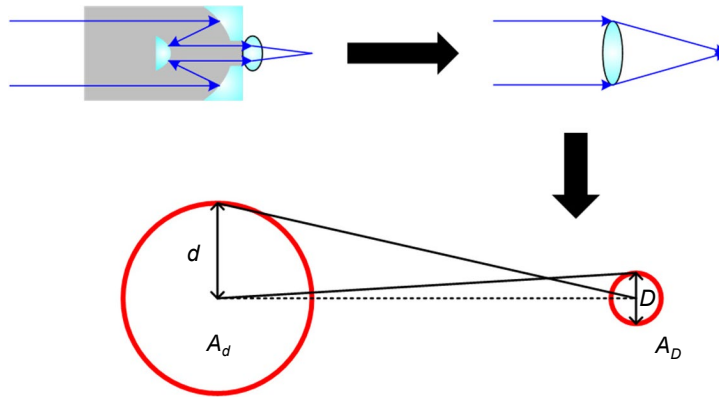


圖 17. 望遠鏡接收孔徑與 Airy disk 轉換示意圖。

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

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

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

(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、摻鉕光纖放大器 (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。

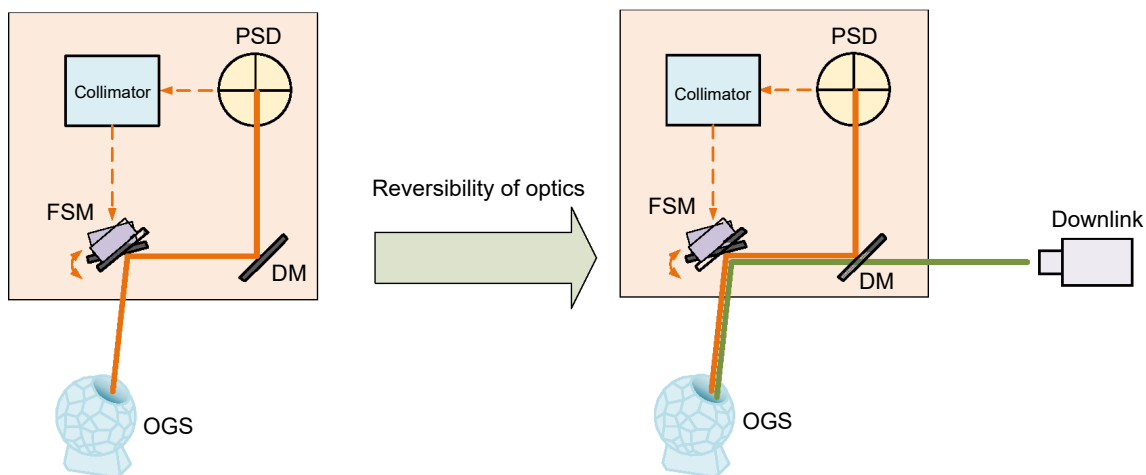


圖 18. 衛星工程體 PAT 系統工作圖。

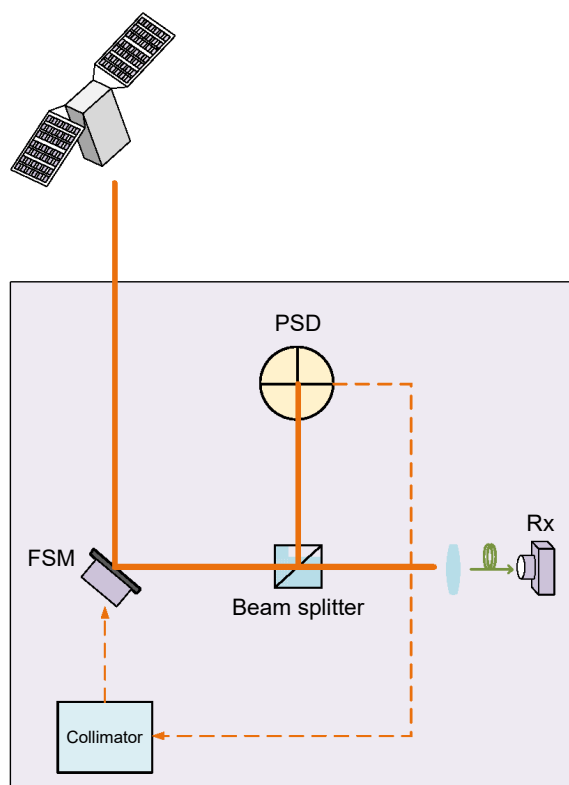


圖 19. 地面接收站 PAT 系統工作圖。

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。

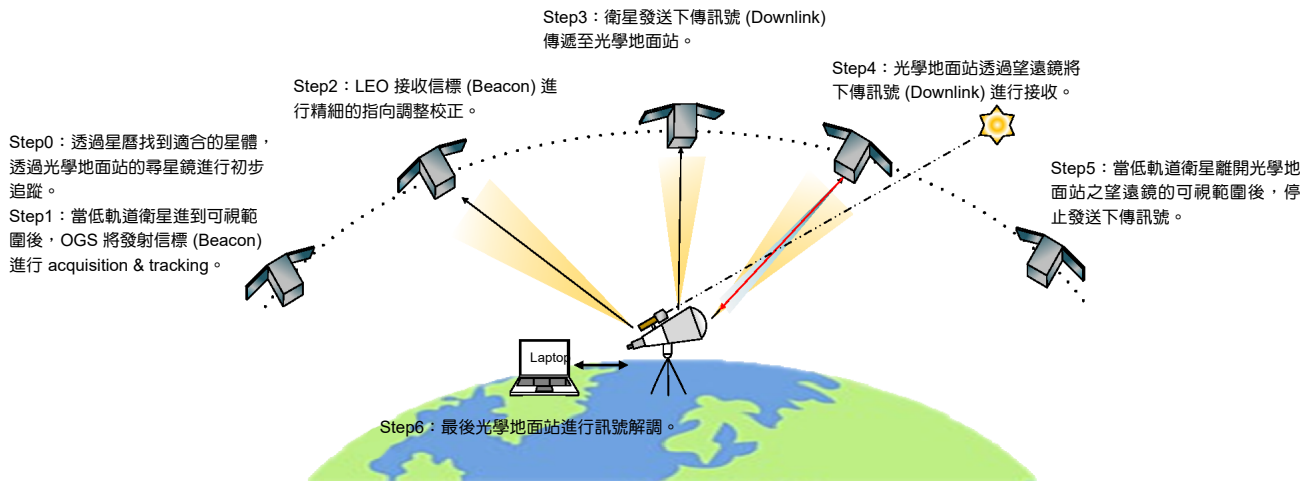


圖 20. 衛星下傳訊號 (Downlink) 測試工作流程圖。

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。

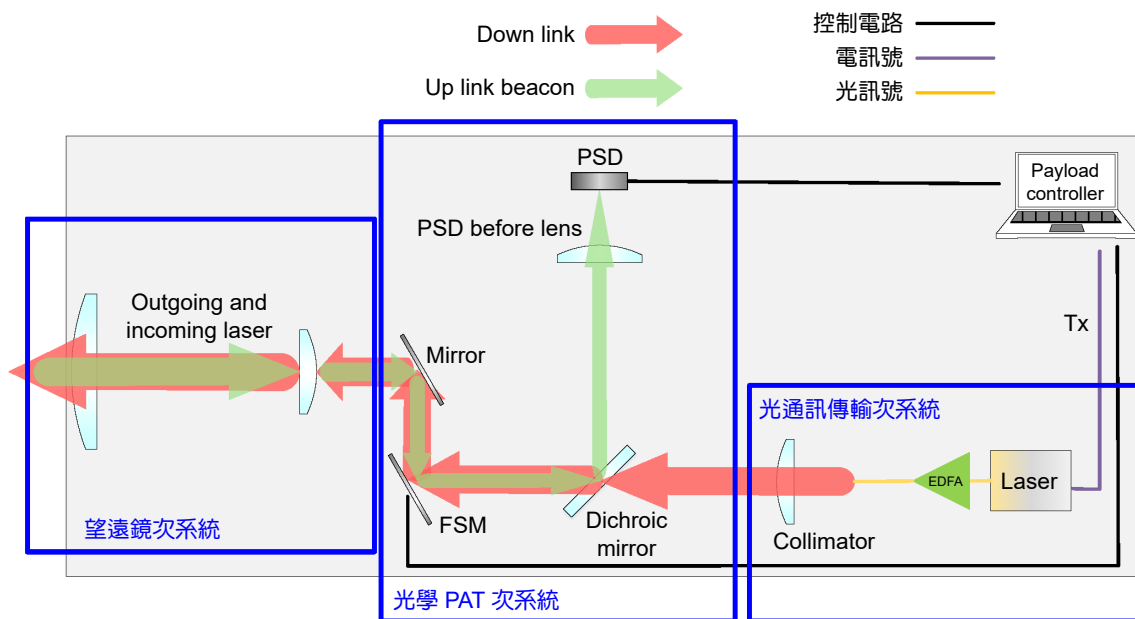


圖 21. 光通訊酬載示意圖。

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的高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.