



前瞻科技與管理 13 卷 2 期，39-55 頁（2025 年 5 月）
Journal of Advanced Technology and Management Vol. 13, No. 2, pp. 39-55 (May, 2025)
DOI:10.6193/JATM.202505_13(2).0003

低軌道衛星通訊演進與 臺灣切入高毛利衛星產業戰略

陳克任^{1,*} 黃士芳²

¹ 明新科技大學資訊工程學系副教授

² 明新科技大學資訊工程學系助理教授

摘要

本論文首先對全球中低軌道衛星系統作簡介，比較各種衛星座在應用層面的差異性，探討星鏈及其他已商轉低軌衛星網的競爭力，分析它們對市場的影響及未來發展趨勢。更特別針對臺灣資通產業鏈在全球低軌衛星產業定位，研究成果則剖析利用現有臺灣資通訊技術優勢布局將來高毛利市場，建議臺灣相關產業鏈必須突破高毛利低軌衛星產業鏈的挑戰，提出主宰產業未來發展的因應策略。建議資通產業鎖定臺廠優勢發展寬頻技術創新，用在低軌衛星產業新藍海的六大領域，包括抗輻射高功率基頻／射頻晶片、高效率功率放大器、高頻效轉頻器與光通訊模組，建構臺灣在全球衛星通訊市場中的重要地位，孕育寬頻通訊產業成為未來新興的兆元產業。

關鍵詞：光通訊、低軌道衛星、高頻效轉頻器、基頻／射頻晶片、寬頻通訊

* 通訊作者：陳克任

電子郵件：krchen@must.edu.tw

(收件日期：2025 年 2 月 8 日；修正日期：2025 年 3 月 12 日；接受日期：2025 年 3 月 12 日)





Evolution of LEO Satellite Communication and Taiwan's Strategy Entry into the High-Margin Satellite Industry

Ke-Ren Chen^{1,*}, Shyh-Fang Huang²

¹Associate Professor, Department of Computer Science and Information Engineering,
Minghsin University of Science and Technology

²Assistant Professor, Department of Computer Science and Information Engineering,
Minghsin University of Science and Technology

Abstract

This article first presents an overview of current developments of Medium-Earth Orbit (MEO) and Low-Earth Orbit (LEO) satellite systems, in which different applications among various satellite constellations are compared. We explore the competitiveness of Starlink and other commercially operational LEO satellite networks and analyze their market impact and future development trends. This paper specifically focuses on the position of Taiwan's Information Communication Technology (ICT) industry chain within the global LEO satellite sector. It analyzes how Taiwan can leverage its existing ICT technological advantages to strengthen itself in the future high-margin market. The study highlights the need for Taiwan's relevant industry chains to overcome the challenges of the high-margin LEO satellite industry and proposes strategic responses to the future development of the industry. It is recommended that the ICT industry focus on leveraging Taiwan's strengths to drive technological innovation in six key areas within the emerging blue ocean of the LEO satellite industry, including radiation-resistant high-power Baseband Frequency (BF)/Radio Frequency (RF) Integrated Circuit (IC), high Spectral Efficiency (SE) transponder, high-efficiency power amplifiers, and optical communication modules. By advancing in these fields, Taiwan can establish a significant position in the global satellite communication market and foster the broadband communication industry to become a burgeoning trillion-dollar sector in the future.

Keywords: optical communication, LEO, high SE transponder, BF/RF IC, broadband communication

* Corresponding Author: Ke-Ren Chen
E-mail: krchen@must.edu.tw

壹、全球低軌道（Low-Earth Orbit, LEO）

衛星通訊系統簡介

LEO 衛星網主要運行在 450 ~ 2,000 公里的高度範圍內，相比傳統的地球同步軌道（Geostationary Orbit, GEO）衛星遠在 35,786 公里的軌道高度低許多，而中軌道衛星（Medium-Earth Orbit, MEO）運行在 2,000 ~ 35,786 公里內。LEO 衛星具有延遲低、覆蓋廣和成本相對較低的優勢，因此在全球通訊領域的重要性日益增加。LEO 衛星網的發展歷史可追溯到 20 世紀中葉，最早的 LEO 衛星主要用於地球觀測和軍事偵察，例如美國的科羅納（Corona）衛星計畫。隨著技術的進步，LEO 衛星的用途逐漸拓展至網路通訊領域。1990 年代摩托羅拉公司提出了銨（Iridium）計畫，規劃使用 66 顆 LEO 衛星實現全球移動通訊服務，儘管最終因為高昂的建設和運營成本導致公司破產，但此計畫卻開創了 LEO 衛星網應用的商用啟蒙階段（陳克任，2013）。

進入 21 世紀，LEO 衛星網的發展步伐顯著加快，這得益於火箭發射成本的下降、小型化衛星技術成熟以及對全球互聯需求的快速增長。英國一網（OneWeb）計畫、中國大陸的鯤龍星座和亞馬遜的庫柏（Kuiper）計畫也在積極推進中。太空探索技術公司（SpaceX）提出的星鏈（Starlink）計畫是當前數量最大的 LEO 衛星星座（Constellations），目標部署近 42,000 顆衛星提供高速互聯網服務。截至 2025 年初星鏈計畫已成功部署超過 5,000 顆衛星，為全球超過 50 個國家和地區提供服務（鄭婕扉，2024）。OneWeb 計畫則部署 648 顆衛星以實現全球寬頻服務，至 2025 年已完成主要階段，並已涵蓋到北極地區及其他偏遠地區。Kuiper 計畫則規劃部署 3,236 顆衛星，目標是透過與亞馬遜衛星服務（Amazon Web Services, AWS）提供廣泛的商業應用（王致唯，2023）。大陸鯤龍星座計畫是中國 LEO 衛星星座的旗艦項目，預計到 2030 年部署 13,000 顆衛星，提供全球市場提供高速互聯網、增強導航和 IoT（Internet of Things, IoT）服務。

LEO 衛星網的快速發展對全球貿易和經濟增長不可忽視，根據各國商業機構預測，從 2025 年開始，LEO 衛星網每年可為全球提供至少 5,000 億美元的商用和服務，並在未來十年內突破 1 兆美元商機。這主要得益於幾個因素，LEO 衛星網可顯著縮小數位鴻溝，讓數十億未接入互聯網的使用者享受到高速寬頻服務，刺激電子商務和數位經濟的快速發展（林忻祐，2023）。LEO 衛星網為海事、航空、農業和能源等傳統行業提供高可靠性太空網路支援，大幅提升運營效率。全球海運業透過 LEO 衛星實現即時（Real Time）船舶通訊和遠距護航，每年節省數百億美元費用（張人偉，2022）。

LEO 衛星為 IoT 應用奠定通訊基礎，預計到 2030 年全球將超過 500 億個 IoT 設備通過 LEO 衛星實現連接，其中涉及的供應鏈、服務和硬體產值超過數千億美元（王致唯，2023）。此外 LEO 衛星網的普及還將推動線上教育、遠距醫療和數位娛樂的發展，增加可觀的經濟價值。然而，LEO 衛星網的快速增長也帶來挑戰，尤其是頻譜資源的分配是一關鍵問題，星座軌道和通訊頻譜需求競爭日益激烈，需要國際電信聯盟（International Telecommunication Union, ITU）和各國監管機構協調解決（彭夢竺，2024b）。

LEO 衛星網在 21 世紀呈現爆發式增長，它的發展不僅改變全球通訊格局，也為未來數十年的全球經濟注入新成長動力。隨著 Starlink、OneWeb、Kuiper 和 鯤龍 星座等 LEO 衛星星座計畫逐步建置，LEO 衛星網將進一步推動全球互聯的普及和寬頻化，為貿易、科技和社會福祉帶來深遠影響。從 2025 年以後，每年由 LEO 衛星網的衍生商品和服務產值將成為全球經濟的新動力（蘇秋惠，2022）。由以上分析得知 LEO 衛星網已經百家爭鳴，發展中的 LEO 衛星星座計畫前仆後繼，底下再針對各種新舊 LEO 衛星星座作綜合性比較。

貳、LEO 衛星星座特性比較

LEO 衛星星座是當前全球通訊領域最受矚目的技術之一，它部署大量 LEO 衛星提供高速、低延遲的衛星通訊服務。這些星座的設計通常包含多層衛星網路，它能夠實現全球覆蓋，並根據需求提升容量與性能。全球知名的 LEO 衛星星座中，太空探索技術公司的 Starlink 是目前規模最大且成本上最領先的系統，它的最終目標是部署 42,000 顆衛星後，提供通訊總傳輸容量預計可達數百個 T 級比特（ 10^{12} bps）。知名 OneWeb 的 LEO 道衛星星座完整建置後，能提供高速寬頻服務，通訊總傳輸容量為數十個 T 級比特。建置中的亞馬遜 Kuiper 計畫，它的通訊總傳輸容量規模接近 Starlink 計畫（Li, Hofmann, Reder, and Knopp, 2023）。

LEO 衛星星座的高度搭配衛星數量與通訊容量有顯著相關性。因衛星運行高度越低，信號延遲越低，每顆衛星的覆蓋面積也相對縮小，就需要更多的衛星才能實現完整的地球覆蓋。例如 Starlink 衛星的運行主要平均約 550 公里左右，以保證低延遲和高寬頻容量，同時透過大量衛星的部署實現全球覆蓋（Liu et al., 2021）。相較之下，OneWeb 衛星的運行高度主要在 1,200 公里，每顆衛星覆蓋面積較大，因此所需的衛星數量較少，但是信號延遲相對較高。此外 LEO 衛星通訊總傳輸容量受制於衛星間的光通訊鏈路效率和地面站容量，又與衛星高度和數量的配置直接相關。高度較低的星座需要更密集的地面站網路支持，來彌補衛星換手切換高頻率的問題，而高度較高的星座則需考慮較大的信號損耗與更高的時間延遲，這對寬頻車聯網而言是一大限制。

實務上，全球知名的 LEO 衛星星座，其衛星並非固定運行於單一高度，這是基於軌道高度資源有限與需求的多重考量。例如 SpaceX 的 Starlink 衛星軌道高度，除了 550 公里之外，也分布在 330 公里與 450 公里的軌道上，這是為了實現多層次的網路結構。另外，OneWeb 衛星軌道高度除了 1,200 公里之外，也包含較低的 800 公里與 624 公里，以補償整體的通訊能力。LEO 衛星星座採用不同高度，既可提供高容量近地通訊，又能藉由中層軌道實現更廣的覆蓋，但是各層 LEO 衛星間的光通訊分流優化是確保整體個系統性能的關鍵（Lin, Cioni, Charbit, Chuberre, Hellsten, and Boutillon, 2021）。這種設計的靈活性源於 LEO 衛星訊號傳輸需要頻繁切換光通訊鏈路，更可以維持最佳動態提高衛星網路通訊的網路品質（Quality of Service, QoS）（Zhang, Zhang, and Tseng, 2019）。

此外衛星星座衛星數量越多，雖然覆蓋能力越強，星座的冗餘性卻也越大，當衛星繞行地球公轉的時候，軌道相對較低的 LEO 星座，因為地球 70% 海洋和人煙稀少的陸地占了地球表面總面積的大半，因此星座與地面使用者的通訊傳輸使用率偏低，換言之在海上與偏遠

低區衛星的有效頻寬利用率低，但 20% 人口密集都會地地區反而是頻寬使用的熱區，因此 LEO 衛星星座每個衛星之間光通訊的優化倍受重視，此外 LEO 星座上各衛星向上到 MEO 衛星與 GEO 衛星光通訊的最佳化連結（Kaushal and Kaddoum, 2017），就關係到整體 LEO 衛星通訊系統的 QoS。

混和高度 LEO 衛星系統，包括歐洲衛星（Société Européenne des Satellites, SES）公司 LEO 衛星星座等，也採用了類似 OneWeb 衛星星座的多層設計，使用混合各種軌道高度的衛星，雖然位於較高的 1,200 公里，也能實現高效率的覆蓋與整體通訊容量分配。衛星星座中包含不同高度主要是為了平衡以下因素：不同高度的衛星具有不同的特性，低高度衛星適合寬頻低時延需求，而較高的高度衛星則適合廣域覆蓋。基於市場需求的動態調整，有些計畫針對城市高密度區域和偏遠低密度區域分別設計不同高度的星座（Liu et al., 2021）。

全球發展中的 LEO 衛星星座，都將在未來數十年內成為全球通訊基礎設施的重要組成部分。隨著發射技術的進步，LEO 衛星星座的部署成本將大幅降低，尤其是大國都已具備一箭多星發射的功能，其中 SpaceX 公司獨一無二的可回收火箭系統，更是所有火箭發射公司成本控制的佼佼者，可實現太空寬頻網路的應用普及化。尤其 LEO 衛星星座將提供高容量通訊支援未來 6G 網路的發展，作為 6G 的太空輔助基地臺，前景更是被電信業者所重視，它將進一步推展 IoT、智慧城市和自動駕駛等領域的創新（Su, Liu, Zhou, Yuan, Cao, and Shi, 2019）。因此 LEO 衛星星座在未來將變得更加重要，加速實現全球市場的無縫互聯互通（Di, Song, Li, and Poor, 2019）。LEO 衛星星座的發展不僅改變通訊技術的無縫上網，也為全球經濟、社會和文化的融合創造機遇，以上願景讓世界各角落的人都能享受到寬頻通訊帶來的紅利，推動人類文明進入全新的太空經濟新時代。

參、MEO/GEO 衛星星座與 LEO 衛星星座應用比較

2024 年前使用中或初步商轉的各類型衛星星座應用領域有顯著差異，如表 1 所示，這些差異主要是衛星的運行高度、衛星數量以及衛星發射成本。這些不同高度的衛星星座在通訊、導航、觀測等領域各具有不同的特性和優勢（Su et al., 2019）。MEO/GEO 衛星的應用專注在廣域覆蓋，因此它們在全球定位、衛星廣播、氣象監測、導航以及通訊等領域發揮著關鍵作用。相比之下 LEO 衛星則利用低延遲和高容量的特性，主要應用於全球寬頻互聯網、自駕車聯網、IoT、緊急通訊、衛星影像等領域（Yang, Li, Jiang, Chen, and Hanzo, 2020）。

著名的衛星星座如全球定位系統（Global Positioning System, GPS）、北斗、伽利略（Galileo）等衛星，GPS 衛星與伽利略衛星系統均為 MEO 衛星系統，其軌道高度分別為 20,200 公里與 23,222 公里，北斗衛星系統則是 MEO 結合 GEO 與傾斜地球同步衛星軌道（Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO）所構成的導航衛星系統。這些衛星系統主要優勢在於能提供全球範圍的座標信號，並且進行長時間的運行，可提供長期穩定的定位服務。然而這些衛星的缺點也很明顯，由於它們處於較高的軌道，信號延遲相對較久，在需要低延遲的應用上會帶來一定的劣勢。MEO/GEO 衛星的數量相對較少，每顆衛星的覆蓋範圍較大，因此適合大範圍的應用。歷史悠久的 GPS 系統只需要 31 顆衛星來提供全球覆蓋，就能夠達到

高精度的定位服務。定位導航服務廣泛應用於航空、航海、運輸和地圖測繪等領域（陳克任，2013）。相較之下 LEO 衛星在全球覆蓋、低延遲通訊等應用方面具有獨特的優勢，它們可以用更低的延遲進行通訊，能實現更為密集的衛星配置。相較於 GEO/MEO 衛星，LEO 衛星可提供較大容量通訊應用而極具競爭力。除了通訊外，LEO 衛星星座也在地球觀測領域發揮重要作用。因 LEO 衛星運行的距離較近，因此它們能夠以更高解析度進行地球觀測，適用於天氣預測、災難應對、農業監控和環境保護等領域（Kodheli et al., 2021）。

已商轉的賽特羅吉克（Satellogic）和艾塞（ICEYE）衛星公司，它們都是部署的 LEO 衛星星座。其中 ICEYE 衛星公司擁有合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）衛星技術，在衛星上使用雷達技術進行高解析度成像系統。SAR 透過發射電磁波並接收反射信號生成地面或物體影像，可以在各種天氣條件下運行，並且具有全天候、全天成像能力。SAR 在災害監測、環境變化、軍事偵察、農業監控、地表變化、海洋監測、基礎設施監測等領域具有重要應用（林忻祐，2023）。

Satellogic 衛星網則具有精密的成像能力，能夠提供即時且高解析度的地理空間數據，特別應用在需要快速獲得更新數據的場景中。如表 1 中的黑天（BlackSky）衛星網，則是一家提供即時地球觀測數據的公司，它的衛星網路能提供定期更新和高解析度影像，幫助各種行業進行監控、分析決策，因此在軍事、商業、災難應對和環境保護等領域中具有廣泛的價值。主要應用包括：災難管理、國防安全、基礎設施與資產監測、農業環境監測、商業市場分析等等（王致唯，2022）。

隨著近年來 LEO 衛星星座商用化的進程加快，這些應用在市場上的爆炸性增長愈加明顯，LEO 衛星系統已經逐步提供商業化服務（Boero, Bruschi, Davoli, Marchese, and Patrone, 2018）。這些衛星系統不僅為偏遠地區提供高速互聯網服務，還主宰現代戰爭的成敗，更促進全球數位經濟的發展。LEO 衛星系統的商業價值呈爆炸性增長，得益於 LEO 衛星運行在較低的軌道上，信號延遲大大降低，使在需要快速響應和高頻寬的領域，包括線上遊戲、視訊會議和遠距醫療等方面具有巨大的商業潛力（Xie, Tang, Wang, Liu, Yu, and Huang, 2020）。

LEO 衛星的低成本和快速部署為商業應用實現經濟規模，隨著一箭多星發射成本的下降，部署 LEO 衛星的成本大幅低於傳統的 GEO 道衛星系統。這促使更多企業和國家能夠得到 LEO 衛星發展紅利，進一步推動 LEO 衛星產業鏈爆炸性的增長。LEO 衛星的用戶優勢，尤其是在發射成本和服務優勢，使得 Starlink 系統獲得了大量的市場占比。Starlink 的衛星發射成本大約是每百公斤 2,500 美元，遠遠低於高軌衛星的發射成本（王致唯，2022）。這促使 Starlink 能夠以更低價格向用戶提供高速互聯網服務，尤其在網路基礎設施不完善的地區，如表 1 所示。

許多因素決定 LEO 衛星的運轉壽命，包括：軌道高度、大氣密度、太陽活動性（Solar Activity）、衛星本體質量和面積等，以高度 430 公里的圓形軌道為例，隨著太陽活動變動與衛星質量與面積比值不同，LEO 衛星壽命最短不到一年，最長可達十年變化極大。此外突發的太陽閃焰（Solar Flare）效應，以及太陽日冕物質拋射（Corona Mass Ejection, CME）會造成衛星壽命突發性的大幅減少，因此本論文表格中描述的衛星運行壽命是採用預估壽命。

LEO 衛星能實現高效的太空輔助 6G（Generation）基地臺角色，輔助地面基地臺的需求，進一步降低將來 6G 電信營運商在毫米波等更高頻段的營運限制（Giambene, Kota, and Pillai, 2018）。LEO 衛星星座在過去幾年從設計到商業化的迅速發展，在全球市場中展

現出巨大的商業潛力。這些星座的成功將不僅改變全球網通格局，還對經濟、文化及社會發展產生深遠影響（Hosseinian, Choi, Chang, and Lee, 2021）。隨著技術的持續進步和商業化應用的普及，LEO 衛星的發展將迎來更多的突破商機，並在未來的全球通訊和數位經濟中發揮更為重要的作用（Giambene et al., 2018）。

表 1 24 年前使用中或初步商轉的各類型衛星座

名稱	衛星總數	軌道高度 (公里)	預期商轉	主要網通 設備商	衛星預估 使用年限	每百公斤 發射成本約 (美元)
GPS 定位 星座	31	20,200	已投入使用	洛克希德馬 丁等	12 ~ 15	600,000
北斗定位 星座	55	21,150 + 35,786	已投入使用	華為、中國 太空科工等	8 ~ 12	1,000,000
伽利略定 位星座	24	23,222	已投入使用	空中巴士	12	500,000
格洛納斯 定位星座	24	19,100	已投入使用	俄羅斯航太 製造公司	7 ~ 10	300,000
Starlink (SpaceX)	規劃擴充到 42,000	340 ~ 580	2024 年初步商轉	SpaceX、諾 基亞等	5 ~ 7	5,000 (未使用 可回收火箭)
Satellologic	規劃 300	600 ~ 800	2024 年初步商轉	空中巴士、 SpaceX 等	7 ~ 8	10,000
ICEYE	規劃 18	500 ~ 600	2020 年商轉	SpaceX、空 中巴士等	5 ~ 7	10,000
Black Sky	規劃 60	430 ~ 500	2019 年商轉	空中巴士、 SpaceX 等	5 ~ 7	10,000

註：1. GPS：全球定位系統（Global Positioning System）。
2. LEO 高度 2,000 公里以下，GEO 高度 35,786 公里，MEO 高度大於 2,000 公里以上。
資料來源：王致唯（2022，2023）、彭夢竺（2024a）、林忻祐（2023）、蘇秋惠（2022）。

肆、星鏈與全球知名 LEO 衛星網競爭力分析

LEO 衛星的運行高度較低，使信號延遲相對較低，這對於高速互聯網、IoT 以及遠距無縫通訊等領域尤其重要。LEO 衛星能夠提供高頻寬、高速上網的通訊服務，並且實現高效率的全球覆蓋。因此 LEO 衛星非常適合用於偏遠地區的高速互聯網、災難救援、軍事通訊等應用（Chien, Lai, Hossain, and Muhammad, 2019）。LEO 衛星與 MEO/GEO 衛星的建置優點，因 LEO 衛星的發射和部署成本相對較低，這促使 LEO 衛星網路的建立更加靈活。隨著發射技術的進步，LEO 衛星系統已逐漸成為太空經濟的主流。

過去幾年 LEO 衛星的商業價值獲得爆炸性增長，主要得利於幾個因素。首先，LEO 衛星發射技術進步使得商用發展快速來臨。其次，傳統上衛星發射是太空行業中最昂貴的部分，但隨著 SpaceX 等公司陸續開發可重複使用的火箭，發射成本顯著降低。其中 SpaceX 的獵鷹

9 號 (Falcon 9) 運載火箭，每次發射成本不用數千萬美元，與傳統火箭發射成本相比大大減少。這使得許多企業能夠以較低的成本進行衛星星座的部署，更推動太空經濟起飛。

傳統 MEO/GEO 衛星由於信號傳播距離較長，導致較久的延遲，使得許多即時的應用中不具優勢。相較之下 LEO 衛星的低延遲特性，已成為高速互聯網、遠距手術、即時通訊等應用的理想選擇。LEO 衛星網路的廣泛應用，使全球數位基礎設施的無縫覆蓋得到顯著改善。許多偏遠地區和海上地區長期無法接入穩定的互聯網服務，多年來限制當地經濟發展和教育進步。LEO 衛星的普及為偏鄉地區提供平價的高速互聯網，進一步平衡全球數位經濟的發展。LEO 衛星信號延遲較低能夠為用戶提供更穩定、快速的互聯網服務，特別是在需要即時反應的應用，如視訊會議、線上遊戲等 (Shang, Yi, and Liu, 2021)。

表 2 和表 3 所示為建置中知名的 LEO 衛星星座，Starlink 與其他的 LEO 衛星系統相比，Starlink 的衛星數量和覆蓋範圍無疑占據了市場領先地位。Starlink 通過降低發射成本、提供低延遲的高速上網服務，已在 LEO 衛星通訊領域建立強大的競爭優勢。隨著可回收技術的不斷進步和市場需求擴大，Starlink 將在未來的全球 LEO 衛星網路市場持續發揮重要作用。

表 2 建置中衛星總數超過千顆以上的 LEO 衛星星座

星座名稱	衛星總數	軌道高度 (公里)	預期 商轉	主要 網通設備商	衛星預估預 估使用年限	每百公斤 發射成本約 (美元)
Starlink (SpaceX)	要擴充到 42,000	340~580	已初步 商轉	SpaceX、諾基 亞等	5~7	5,000 (未使用 可回收火箭)
Starlink (Star Shield)	要擴充到 數千	500~2,000	2026 年	SpaceX 等	5~10	5,000 (未使用 可回收火箭)
OneWeb	要擴充到 1,000	1,200	2026 年	索尼、NEC、 諾基亞等	8~9	20,000
Amazon Kuiper (Amazon)	要擴充到 3,236	590~630	2027 年	MDA 和 AWS 等	5~7	10,000
Starry	要擴充到 1,000	400~1,000	2027 年	Viasat、諾基 亞等	5~8	18,000
千帆星座 (千帆科技)	預估 12,000	500~1,200	2028 年	華為、中興、 航空航太	5~9	10,000~20,000
吉利太空星座 (吉利集團)	預估 12,000	500~1,200	2028 年	華為、中興通 訊、中國太空	5~9	5,000~10,000
SatNet 星座 (中國衛通)	預估 12,000	500~1,200	2028 年	華為、中興通 訊、中船重工	5~9	5,000~10,000
中龍星座	預估 13,000	500~1,200	2030 年	中國航太、華 為、中興等	5~9	10,000

註：各大陸星座細節與名稱可能變更。

資料來源：Li et al. (2023)、Liu et al. (2021)、Su et al. (2019)。

表 3 建置中衛星總數在千顆以下的 LEO 衛星星座

星座名稱	衛星總數	軌道高度 (公里)	預期 商轉	主要 網通設備商	衛星預估 使用年限	每百公斤發射 成本約(美元)
Telesat LEO	規劃 298	1,000	2027 年	Thales, Airbus 等	8~9	18,000
LeoSat	至少 108	1,400	2027 年	Thales Alenia Space and Airbus 等	10	25,000
AST Space Mobile	規劃 243	700~800	2026 年	三星、諾基亞等	5~7	10,000
Viasat (Globalstar)	規劃 150	1,400	2027 年	Hughes, Airbus, SpaceX 等	10	25,000
Omnispace	規劃 12	1,000	2027 年	Thales Alenia Space and OneWeb	8~9	18,000
Kacific	規劃 56	1,400	2026 年	Viasat, Airbus 等	10	25,000
Fleet Space	規劃 140	1,000	2026 年	Thales, Iridium 等	8~9	18,000
SES	12	400~1,200	2027 年	Hales Alenia Space OneWeb	5~9	20,000

註：LEO：低軌道（Low Earth Orbit）。

資料來源：Li et al. (2023)、Liu et al. (2021)、Su et al. (2019)。

此外 SpaceX 推出更高階的星盾（Star Shield）衛星計畫與 Starlink 區隔，Star Shield 可提供高安全性、加密的衛星通訊服務，尤其針對政府、國防及相關國安機構。這個計畫比 Starlink 更專注於軍事、政府及其他需要高度保密的通訊應用，因此它涉及特殊規格衛星設計、運營方式以及合作夥伴。

特殊規格衛星能根據不同任務需求（如通訊、遙感、偵察）進行客製化，它可搭載額外感測器（如光學或雷達）提供軍事與情報機構專用服務。Star Shield 計畫逐步部署多顆 LEO 衛星來實現軍武等級的高安全性通訊，衛星數量預計達到數千顆，未來具體數量會根據美軍需求和技術進展作調整。

Star Shield 使用 LEO 衛星，具有較低延遲和較快數據傳輸速度，特別適用於國安與軍武通訊。這些衛星預計軌道高度在 500~2,000 公里的範圍內。Star Shield 衛星使用年限約為 5~10 年。軍用衛星需要更高的通訊要求，並須具備更高的可靠性，以提供太空寬頻軍用通訊。Star Shield 的特殊性是它不僅可針對商業市場，更滿足政府和國防機構的嚴格需求。這些衛星將提供高度保密、低延遲的通訊服務，並強化抗干擾、防篡改技術。由於 Starlink 已經成為太空競賽的主角，提供高速互聯網應用，Star Shield 項目會更強調寬頻用途、軍事級通訊、機密信息的傳輸與數據保護。

伍、臺灣資通產業鏈如何搶進全球 LEO 衛星產業鏈

LEO 衛星產業鏈是當前全球太空經濟中最具活力且快速增長的領域，隨著需求的增加和技術的突破，LEO 衛星不僅提供大量的服務，還為其他領域的應用開闢全新的市場。

LEO 衛星產業鏈涵蓋多個關鍵零組件，不同零組件在整個價值鏈的毛利率有顯著差異。臺廠也將在 LEO 產業鏈中扮演非常重要的角色，尤其藉由過去在資通訊技術（Information Communication Technology, ICT）的優勢，使得臺灣在 LEO 衛星領域中具有獨特的競爭力。

全球 LEO 衛星的產業鏈主要領域包括：衛星的設計與製造、衛星發射與運營、地面基地臺與通訊系統。各領域中每一環節都涉及到大量的高科技設備和技術。其中衛星本體設計與製造，是整個產業鏈中毛利率最高的部分。衛星的核心部件包括衛星結構、電力系統、通訊設備、推進系統、衛星天線及各種積體電路。這些零組件毛利率相對較高，尤其商用衛星通訊設備積體電路，這部分的毛利率可達到 40～60%。至於衛星的發射和運營服務的毛利率則較低，約在 20～30% 之間（王致唯，2023）。

在 LEO 衛星產業鏈中，必須務實面對臺灣的角色定位。臺灣 ICT 產業鏈擁有全球領先的半導體技術和製造能力，晶片（Integrated Circuit, IC）製造技術更是全球頂尖，尤其在高效能處理器、無線通訊 IC 等領域具有顯著的技術優勢。因此臺廠在全球 LEO 衛星產業鏈的貢獻比重仍在穩步增長，隨著臺灣半導體技術的突破，國人都期望未來產值進一步擴大。但臺灣如何增加 LEO 衛星產業鏈產值，是當前太空經濟中的最重要問題。首先，臺灣需要加大在 LEO 衛星領域的研發投入，尤其是在衛星通訊 IC、天線技術和高效能積體電路等領域的創新。由於 LEO 衛星通訊對頻譜效率（Spectral Efficiency, SE）和功率消耗的要求非常高（De Sanctis, Cianca, Rossi, Sacchi, Mucchi, and Prasad, 2015），因此臺廠 LEO 衛星供應鏈應該針對這些挑戰進行新創技術開發，設法推動產業鏈整體高毛利的升級。

要在全球競爭中脫穎而出，臺灣的 LEO 衛星產業鏈仍面臨諸多挑戰，尤其是在高毛利零組件的技術突破和市場競爭面。特別在大容量衛星通訊基頻（Baseband Frequency, BF）IC 的研發，是當前 LEO 衛星產業鏈中的重大瓶頸。由於 LEO 衛星系統需要處理大量的數據流量，因此 BF IC 處理能力必須非常強大，但是臺廠現有技術尚未能有效解決高 SE 大容量通訊的挑戰。LEO 衛星產業鏈在此領域的研發還需要進一步突破，如此才能有效提升數據處理能力、減少系統整體功率消耗與最重要提升通訊的 SE（曲博，2025）。

本文特別建議，過去的多模多頻通訊模組無法提升 SE，它仍然是 LEO 衛星產業中面臨的技術瓶頸，因為它沒有辦法在單位頻率（Hz）下提供更高的通訊總容量，現有臺廠的通訊技術都使用更多頻段、更多操作模式，就是利用更多頻段、更多無線電資源來提供通訊傳輸總容量，實際上在每單位頻率下 SE 並未提升（曲博，2025）。尤其當 LEO 衛星本身體型較小，稍大型的多輸入多輸出（Multi-Input Multi-Output, MIMO）天線技術已經無法應用在 LEO 衛星上，至今衛星通訊總容量無法提升仍是無法突破的大挑戰（Maheshwarappa, Bowyer, and Bridges, 2018），因此臺灣 LEO 衛星產業鏈仍需加強技術創新，開發更先進的寬頻大容量 BF 通訊模組。MIMO 大型陣列天線因天線總體積過大，應用在 LEO 衛星上仍是一大挑戰（Sheng, Wang, Li, Liu, Zhou, and He, 2017）。

另一項因素是 LEO 衛星上缺乏極高效率的太陽能模模組電力系統，造成 MIMO 天線技術在 LEO 衛星上的應用受到限制。雖然 MIMO 大型陣列天線技在地面通訊中得到廣泛應用，但是 LEO 衛星相較於 GEO 衛星需要耗費更多電力在軌道修正之外，還要提供 MIMO 天線耗電的接收與發射，以上都造成在 LEO 衛星使用 MIMO 天線的限制。此外在 LEO 衛星的實際應用中，除了衛星本體空間受限之外，還要考慮頻率干擾（太多 LEO 衛星星座擠在 450～1,200 公里範圍內運作）和運行軌道的穩定性等許多挑戰。

臺廠 LEO 衛星供應鏈需要在寬頻大容量 BF IC 突破外，功率放大器（Power Amplifier, PA）也是需要突破的瓶頸。PA 是衛星通訊系統的關鍵組件，負責將信號放大至足夠的功率才能實現穩定的通訊。但是 LEO 衛星運行環境的特殊性，PA 設計和應用面臨挑戰，特別是高效率、低功耗的 PA。臺廠仍然面臨許多挑戰，特別是在高毛利零組件的技術突破，才能提升在全球 LEO 衛星產業鏈中的地位。未來臺廠必須加強創新、優化產業鏈、提升技術水準等多方面努力，才能為廣大的臺灣 ICT 產業帶來更多的獲利機會。

因臺灣在半導體、電子製造、ICT 硬體開發等方面具備全球競爭力，這些優勢可以延伸到 LEO 衛星相關產業鍊中，形成一個完整且高效的太空經濟產業鏈。現階段臺灣 LEO 衛星產業強勢崛起，目前能與臺灣 ICT 產業密切相連的七大產業包括：地面接收站設備、天線與射頻（Radio Frequency, RF）模組、印刷電路板（Printed Circuit Board, PCB）、電源供應模組、PA、結構零組件以及 IC 設計，這些產業在 LEO 衛星網路的建設與運營扮演重要的角色。以下個別介紹：

- 一、地面接收站設備：地面接收站負責接收與傳輸 LEO 衛星間數據，是衛星通訊系統的關鍵，隨著 LEO 衛星數量的快速增加，地面接收站的需求也大幅上升，尤其在全球性高速互聯網服務的建設中扮演核心角色。未來接收站設備的智慧化、模組化與高效能是技術發展的重點。
- 二、天線與 RF 模組：天線是衛星與地面站連接的核心設備，負責信號的發射與接收。RF 模組則處理信號的調變解調與放大。隨著 LEO 衛星對高頻寬、低延遲的需求增加，相控陣列天線和高效 RF 模組的開發成為技術主流。
- 三、PCB：PCB 是衛星和地面設備中的關鍵基礎零件，負責電子元件之間的連接與信號傳輸。由於 LEO 衛星的高密度與小型化設計，對高頻、高密度 PCB 需求日益增加。
- 四、電源供應模組：衛星及其地面設備需要穩定、高效的電源供應，尤其衛星小型化趨勢下，高效能電源管理模組至關重要。高效的太陽能電池、電池模組與電源轉換技術是發展重點。
- 五、PA：PA 在 RF 信號傳輸中扮演重要角色，提供信號足夠功率以實現穩定傳輸。LEO 衛星在高頻段通訊使用高效率的氮化鎵（GaN）和砷化鎵（GaAs）放大器成為主流技術。
- 六、結構零組件：衛星結構零組件主要包括衛星本體結構、熱控設備及抗輻射材料等，決定衛星本體的耐久性與穩定性，LEO 衛星的要求包括輕量化、高強度和成本可控的材料等。
- 七、IC 設計：LEO 衛星需要大量的專用 IC 進行數據處理、信號調變解調與功率管理。隨著 IC 的高效能和低功耗需求提升，特定應用積體電路專用 IC（Application-Specific Integrated Circuit, ASIC）和場效可程式化邏輯閘陣列（Field-Programmable Gate Array, FPGA）等深受重視。

根據國內外各種商業與產業分析機構預估，以上七大 LEO 衛星產業鏈到 2030 年總產值可高達每年 740 億美元（王致唯，2023）。臺廠 LEO 衛星產業鏈如果能更站穩擴大市場占有率，能幫助臺灣加速孕育新的兆元寬頻通訊產業，兆元寬頻通訊產業新藍海不是海市蜃樓，絕對會如雨後春筍般的興盛，但卻絕不是一帆風順。七大 LEO 衛星產業鏈仍有挑戰要克服。首先是市場壁壘，許多尖端技術被國際巨頭壟斷，尤其在衛星產業等尖端市場，臺廠往往難以突破取得競爭優勢。其次，資金與人才的不足也是一大挑戰，前期的研發投入需要大量的資本，而這些技術開發與人才培養並非一蹴可成，需要長期積累與投入。此外在衛星產品的國際認證極嚴格，這讓臺灣企業在進軍這些高門檻市場時面臨諸多挑戰。

針對這些挑戰建議臺廠專注核心技術，臺灣在 IC 設計、高效 PCB 和 RF 模組等領域具有較強優勢，可集中資源發展這些技術，發揮既有的競爭力打造差異化優勢。臺灣若能充分發揮 ICT 產業的優勢，並結合既有人工智慧（Artificial Intelligence, AI）與半導體產業基礎，將有機會在全球 LEO 衛星產業鏈占據重要地位，透過這些戰略的實施，臺灣 ICT 產業可以更有效地突破進入以上七大產業的供應鏈，並在全球市場中贏得更多太空經濟的機會與優勢。本論文底下推薦高毛利六大 LEO 衛星產業，因為 2025 年臺廠在全球市場的占有率都不到 5%，有的甚至不到 1%。因為高毛利產品的門檻較高，但這個部分是臺灣太空經濟產業早晚要跨過的瓶頸。

陸、臺灣 LEO 衛星產業鏈前進高毛利新藍海的挑戰和戰略

全球 LEO 衛星產業的新六大新藍海包括：抗輻射高功率 RF IC、抗輻射 ASIC、高效率 PA、多單元陣列天線與波束成型裝置、衛星光通訊模組及高頻效轉頻器。這些產業在全球市場占有率及競爭力，因技術壁壘、供應鏈結構和國際市場需求而有所不同。以下分別剖析臺灣在這六大產業發展的挑戰以及因應之道。

- 一、抗輻射高功率 RF IC：抗輻高功率 RF IC 是 LEO 道衛星通訊的核心元件，臺灣 IC 設計與晶圓代工在全球市場上占有主導地位，不過全球高功率 RF IC 設計仍由國外衛星 IC 大廠主導，臺廠挑戰主要來自技術專利壁壘。臺灣需要加強專利布局與技術創新，尤其是進一步提升抗輻射高頻 IC 設計至毫米波以上高頻頻段，以因應 6G 和 LEO 衛星的需求。
- 二、抗輻射 ASIC：抗輻射 ASIC 是衛星上重要的關鍵元件，它的抗輻射能力要求極高，臺灣在這方面起步相對較晚，市場主要由外國衛星 IC 大廠主導。臺灣面臨的挑戰是如何提升抗輻射 ASIC 的可靠性與抗輻射能力。臺廠應投入更多資源在耐輻射材料與設計技術上，同時爭取參與國際衛星計畫以提升設計實力。
- 三、高效率 PA：在傳統 PA 市場，臺灣的占有率頗高，主要依賴國內成熟半導體供應鏈及功率元件製造技術。然而高效率元件仍然由美國和日本大廠主導。挑戰來自高功率、高效率技術的門檻，臺廠可以通過整合上下游資源，加強高效高功率 PA 在衛星應用中的特製化設計逐步建立全球品牌形象。
- 四、多單元陣列天線與波束成型裝置：本裝置又簡稱微電子天線 IC，多單元陣列天線與波束成型裝置是衛星訊號傳輸的核心技術，臺灣目前的技術與市場占有率有限。美國、歐洲和以色列天線大廠在這些技術領域領先。臺廠挑戰包括高頻天線材料與製造技術的突破，以及高效切換波束成型演算法商用。臺灣應加強在天線設計及相關軟硬體整合應用，利用臺灣的 ICT 優勢來提升市場競爭力。
- 五、衛星光通訊模組：衛星光通訊模組是未來 LEO 道衛星極重要發展方向，主要是衛星間資料流量優化，臺廠在該領域的市場占有率尚待開發。目前美國、歐洲和日本光通訊技

大廠處於領先地位。臺廠挑戰包括高性能光電轉換元件技術、高穩定性光學模組，各模組必須在低溫、真空環境下可靠性測試。臺灣應加速發展相關光通訊技術，提升市場占有率。

六、高頻效轉頻器：它是 LEO 衛星最具潛力的子系統，臺廠在此領域市場占有率相對較低。該市場主要由歐美衛星大廠主導，首先是在高頻、高穩定技術上具有優勢。挑戰在於如何降低相位雜訊，提升 SE 同時達到高性價比。臺灣可借助現有的 IC 設計與高頻硬體製造能力，進一步優化轉頻器的設計，BF 訊號的大容量通訊 IC 必須整合在低雜訊轉頻器才能組成高頻效轉頻器。

天線領域中以驅動天線波束（Antenna Beam）指向（Steer）的方式來區分，分成機械式與電子式。機械式係利用機械馬達的旋轉，帶動碟型天線（Dish Antenna, DA），將 DA 所形成的波束朝不同方向指向。電子式則是利用電子電路裝置（包括波束成型 IC 以及調變／解調模組等），給定相位陣列天線（Phase Array Antenna, PAA）中每根天線單元（Antenna Element, AE）適當的 RF 相位，再透過波束形成（Beam Forming）技術，將波束朝指定方向發射或接收，因此這種天線又稱電子式指向天線（Electronically Scanning Antenna, ESA），簡稱電子式天線（Electronic Antenna, EA）。轉頻器則是負責接收來自地面站的上行訊號，再轉換到另一個頻段回送下行訊號到地面站。轉頻器如採用多模多頻，只是運用更多無線電資源獲取更大通訊容量來傳送訊號，但是 SE 無法提升。所謂高 SE 轉頻器整合 BF 大容量通訊 IC，在 BF IC 訊號處理階段讓單位頻率就提高更大傳輸容量，搭配低雜訊轉頻器所整合而成的裝置。

以上現階段臺灣在 LEO 衛星高毛利六大產業中市占率相對較低，挑戰主要來自技術成熟度不足、國際市場競爭激烈以及產業鏈資源整合困難。然而臺灣具有成熟的半導體產業及靈活的企業創新能力，未來可通過底下四大戰略來因應挑戰：

- 一、加強產業鏈整合，提升上下游的協同效應，尤其是與 IC 設計製程、材料供應及系統軟硬體廠商的合作。
- 二、推動產學研合作，投入更多資金與資源於關鍵技術研發，尤其是在抗輻射材料、高頻元件及 BF 大容量寬頻通訊元件設計。
- 三、積極參與國際大廠的合作計畫，可提升市場話語權和品牌認知度，建立專利及技術壁壘，保障產業鍊技術朝高毛利產品發展。
- 四、政府應提供政策支持，例如稅收優惠、產業補助及搭建國際合作平臺，進一步推動 LEO 衛星產業鏈的發展。

唯有如此，臺廠才能在全球 LEO 衛星產業中建立強大的競爭力。LEO 衛星的全球總數量遠遠低於手機和電腦的總數量，導致衛星通訊相關的寬頻和抗輻射元件毛利率相對較高。但現階段臺廠在 LEO 衛星產業鏈集中在較低毛利的七大產業，包括地面接收站設備、天線與 RF 模組、PCB、電源供應、PA、結構零組件與及 IC 設計。這七大產業過去為臺灣相關供應鏈帶來營收和產業參與度，相對於高毛利的六大 LEO 衛星產業，臺廠所占的比例相對較低影響力也有限。這種結構失衡，對於臺灣未來在全球衛星通訊市場競爭力提升形成挑戰，因而臺灣應該著眼於長遠發展，充分利用在半導體和 AI 產業的競爭優勢，轉向具有高

附加價值和高毛利的 LEO 衛星關鍵元件。在高毛利 LEO 衛星相關產業中，有六大領域建議臺廠集中資源和技術進行深耕和開發。

以高功率 RF IC 為例，它是能在惡劣太空環境中穩定運作的核心元件，直接關係到衛星通訊的傳輸效率與穩定性。而抗輻射 ASIC 則是保障衛星運作壽命和可靠性的關鍵，隨著 LEO 衛星星座的普及，這類 IC 的市場需求將進一步擴大。多單元陣列天線與波束成型裝置，能大幅提升衛星通訊的傳輸能力和覆蓋範圍，是實現高效數據傳輸的核心技術。衛星上光通訊模組和高頻效轉頻器對提升衛星通訊容量與數據傳輸優化，以及頻率轉換效率具有關鍵的作用。

臺灣在半導體製造與 IC 設計擁有領先的技術能力和完善的供應鏈體系，因此具備突破這些領域的潛力。高毛利六大衛星產業的發展不僅能幫助臺灣在 LEO 衛星產業中建立技術領先地位，更能為將來衛星互聯網和全球寬頻大容量無縫通訊創造巨大的市場價值。如何從低毛利領域邁向高毛利領域成功轉型，臺灣需要制定明確的產業發展策略，並提升臺灣太空經濟產業自主創新能力。此外還要大力推動衛星通訊與 AI、IoT、大數據等新興技術的融合發展，打造以衛星寬頻通訊為核心的跨領域生態，進一步擴大 LEO 衛星市場應用範疇。

從全球寬頻通訊市場的發展趨勢來看，LEO 衛星產業處於快速增長的黃金期，臺廠如果能從較低毛利產業再跨進高毛利關鍵元件領域，將可抓住未來的太空經濟大浪潮，孕育出下一個寬頻通訊兆元產業。這不僅能提升臺灣在全球通訊市場的競爭力，還能進一步推動臺灣 LEO 衛星產業的升級轉型，為社會創造更多就業機會和經濟價值。因此相關臺廠應集中資源於高技術門檻、高附加價值領域，為將來的全球太空經濟競賽奠定堅實基礎。

柒、結論

根據 LEO 衛星系統過去的發展歷史，以及目前各國積極建置的 LEO 衛星星座計畫，未來該領域的發展潛力巨大。相較於 GEO 衛星，LEO 衛星的數量需求遠高於 GEO 衛星，主要特性與應用本文已詳盡剖析。因 LEO 衛星運行高度較低覆蓋範圍有限，需要透過大量衛星組成星座，以實現全球覆蓋的大規模服務；預估 LEO 衛星的使用壽命低於 GEO 衛星，這意味著在 LEO 衛星星座建置完成後，仍需不斷發射新衛星來替換過時或故障的衛星，以維持整體運作的穩定性與效能。

隨著各國衛星大廠加速建設 LEO 衛星計畫，包括 SpaceX 的 Starlink 和亞馬遜的 Kuiper 計畫等，未來全球 LEO 衛星產業鏈需求將呈現快速的增長。同時 LEO 衛星在通訊、遙測、地球觀測、IoT 等領域的應用不斷擴大，驅動 LEO 衛星產業鍊產值快速提升。由本文剖析得知 LEO 衛星高毛利六大產業附加價值可觀，但對臺廠相關產業鍊而言技術門檻較高。本研究評估「LEO 衛星產業鍊」未來的展望極其樂觀，有望成為將來臺灣經濟成長與太空經濟發展的驅動力。

參考文獻

- 王致唯，2022 年 9 月，〈全球衛星服務市場與低軌衛星主要營運商布局〉，《MIC：AISP 情報顧問服務》，<https://mic.iii.org.tw/aisp/ReportS?docid=CDOC20220829006>（瀏覽日期：2025 年 1 月 30 日）。
- 王致唯，2023 年 11 月，〈國際低軌衛星推動政策與生態系發展研析〉，《MIC：AISP 情報顧問服務》，<https://mic.iii.org.tw/aisp/ChartS?docid=PPT1121117-1>（瀏覽日期：2025 年 2 月 6 日）。
- 曲博，2025 年 2 月 3 日，〈聯發科布局 6G！【雙博聊通訊】寬頻通訊新藍海，6G 步步為營曙光乍現！ft. 明新科大陳克任教授〉，《YouTube》，<https://www.youtube.com/watch?v=p5zL1hXV4Ic>（瀏覽日期：2025 年 3 月 2 日）。
- 林忻祐，2023 年 5 月，〈2023 年 LEO 發展趨勢分析〉，《MIC：AISP 情報顧問服務》，<https://mic.iii.org.tw/aisp/ChartS?docid=PPT1120515-3>（瀏覽日期：2025 年 1 月 10 日）。
- 張人偉，2022 年 12 月，〈國際低軌衛星應用解決方案創新方向觀察〉，《MIC：AISP 情報顧問服務》，<https://mic.iii.org.tw/aisp/ReportS?docid=CDOC20220829007>（瀏覽日期：2025 年 1 月 20 日）。
- 陳克任，2013，《通訊系統：4G 基礎通訊》，第 5 版，臺北：高立。
- 彭夢竺，2024a 年 12 月 13 日，〈低軌衛星商機崛起！但大容量衛星通訊遇瓶頸 學者籲：善用 ICT 優勢突圍〉，《科技島》，<https://www.technice.com.tw/technology/space/155213/>（瀏覽日期：2025 年 2 月 7 日）。
- 彭夢竺，2024b 年 12 月 13 日，〈迎接 6G 時代！臺灣正在默默練兵 學者籲：政府應多孕育產業鏈〉，《科技島》，<https://www.technice.com.tw/techmanage/telecom/155205/>（瀏覽日期：2025 年 2 月 1 日）。
- 鄭婕扉，2024 年 10 月，〈臺灣低軌衛星地面設備發展機會觀測〉，《MIC：AISP 情報顧問服務》，<https://mic.iii.org.tw/aisp/ChartS?docid=PPT1131030-2>（瀏覽日期：2025 年 1 月 26 日）。
- 蘇秋惠，2022 年 9 月，〈全球衛星通訊產業發展與供應鏈廠商布局方向〉，《MIC：AISP 情報顧問服務》，<https://mic.iii.org.tw/aisp/ChartS?docid=PPT1110903-1>（瀏覽日期：2025 年 1 月 16 日）。
- Boero L., Bruschi R., Davoli F., Marchese M., and Patrone F., 2018, "Satellite Networking Integration in the 5G Ecosystem: Research Trends and Open Challenges," *IEEE Network*, 32(5), 9-15. doi:10.1109/MNET.2018.1800052
- Chien W.-C., Lai C.-F., Hossain M. S., and Muhammad G., 2019, "Heterogeneous Space and Terrestrial Integrated Networks for IoT: Architecture and Challenges," *IEEE Network*, 33(1), 15-21. doi:10.1109/MNET.2018.1800182
- De Sanctis M., Cianca E., Rossi T., Sacchi C., Mucchi L., and Prasad R., 2015, "Waveform Design

- Solutions for EHF Broadband Satellite Communications,” *IEEE Communications Magazine*, 53(3), 18-23. doi:10.1109/MCOM.2015.7060477
- Di B., Song L., Li Y., and Poor H. V., 2019, “Ultra-Dense LEO: Integration of Satellite Access Networks into 5G and Beyond,” *IEEE Wireless Communications*, 26(2), 62-69. doi:10.1109/MWC.2019.1800301
- Giambene G., Kota S., and Pillai P., 2018, “Satellite-5G Integration: A Network Perspective,” *IEEE Network*, 32(5), 25-31. doi:10.1109/MNET.2018.1800037
- Hosseinian M., Choi J. P., Chang S.-H., and Lee J., 2021, “Review of 5G NTN Standards Development and Technical Challenges for Satellite Integration with the 5G Network,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 36(8), 22-31. doi:10.1109/MAES.2021.3072690
- Kaushal H. and Kaddoum G., 2017, “Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques,” *IEEE Communications Magazine Surveys & Tutorials*, 19(1), 57-96. doi:10.1109/COMST.2016.2603518
- Kodheli O., Lagunas E., Maturo N., Sharma S. K., Shankar B., Montoya J. F. M., Duncan J. C. M., Spano D., Chatzinotas S., Kisseleff S., Querol J., Lei L., Vu T. X., and Goussetis G., 2021, “Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(1), 70-109. doi:10.1109/COMST.2020.3028247
- Li K. T., Hofmann C. A., Reder H., and Knopp A., 2023, “A Techno-Economic Assessment and Tradespace Exploration of Low Earth Orbit Mega-Constellations,” *IEEE Communications Magazine*, 61(2), 24-30. doi:10.1109/MCOM.001.2200312
- Lin X., Cioni S., Charbit G., Chuberre N., Hellsten S., and Boutillon J.-F., 2021, “On the Path to 6G: Embracing the Next Wave of Low Earth Orbit Satellite Access,” *IEEE Communications Magazine*, 59(12), 36-42. doi:10.1109/MCOM.001.2100298
- Liu S., Gao Z., Wu Y., Ng D. W. K., Gao X., Wong K.-K., Chatzinotas S., and Ottersten B., 2021, “LEO Satellite Constellations for 5G and Beyond: How Will They Reshape Vertical Domains?” *IEEE Communications Magazine*, 59(7), 30-36. doi:10.1109/MCOM.001.2001081
- Maheshwarappa M. R., Bowyer M. D. J., and Bridges C. P., 2018, “A Reconfigurable SDR Architecture for Parallel Satellite Reception,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 33(11), 40-53. doi:10.1109/MAES.2018.170014
- Shang B., Yi Y., and Liu L., 2021, “Computing over Space-Air-Ground Integrated Networks: Challenges and Opportunities,” *IEEE Network*, 35(4), 302-309. doi:10.1109/MNET.011.2000567
- Sheng M., Wang Y., Li J., Liu R., Zhou D., and He L., 2017, “Toward a Flexible and Reconfigurable Broadband Satellite Network: Resource Management Architecture and Strategies,” *IEEE Wireless Communications*, 24(4), 127-133. doi:10.1109/MWC.2017.1600173
- Su Y., Liu Y., Zhou Y., Yuan J., Cao H., and Shi J., 2019, “Broadband LEO Satellite Communications: Architectures and Key Technologies,” *IEEE Wireless Communications*, 26(2), 55-61. doi:10.1109/MWC.2019.1800299

- Xie R., Tang Q., Wang Q., Liu X., Yu F. R., and Huang T., 2020, “Satellite-Terrestrial Integrated Edge Computing Networks: Architecture, Challenges, and Open Issues,” *IEEE Network*, 34(3), 224-231. doi:10.1109/MNET.011.1900369
- Yang J., Li D., Jiang X., Chen S., and Hanzo L., 2020, “Enhancing the Resilience of Low Earth Orbit Remote Sensing Satellite Networks,” *IEEE Network*, 34(4), 304-311. doi:10.1109/MNET.001.1900550
- Zhang Z., Zhang W., and Tseng F.-H., 2019, “Satellite Mobile Edge Computing: Improving QoS of High-Speed Satellite-Terrestrial Networks Using Edge Computing Techniques,” *IEEE Network*, 33(1), 70-76. doi:10.1109/MNET.2018.1800172