



低軌衛星通信與 6G 技術的融合：文明的共生

■文：徐俊毅

低軌衛星通信與 6G 技術的結合並非簡單的技術疊加，而是一場重構全球通信格局的革命。6G 的地面網路與遍佈近地軌道的衛星星座形成有機整體，人類將首次實現“空天地海”全域無縫覆蓋，當南極冰蓋消融資料、亞馬遜雨林碳排放變化、撒哈拉地下水脈動通過這張空天網路即時聯動，

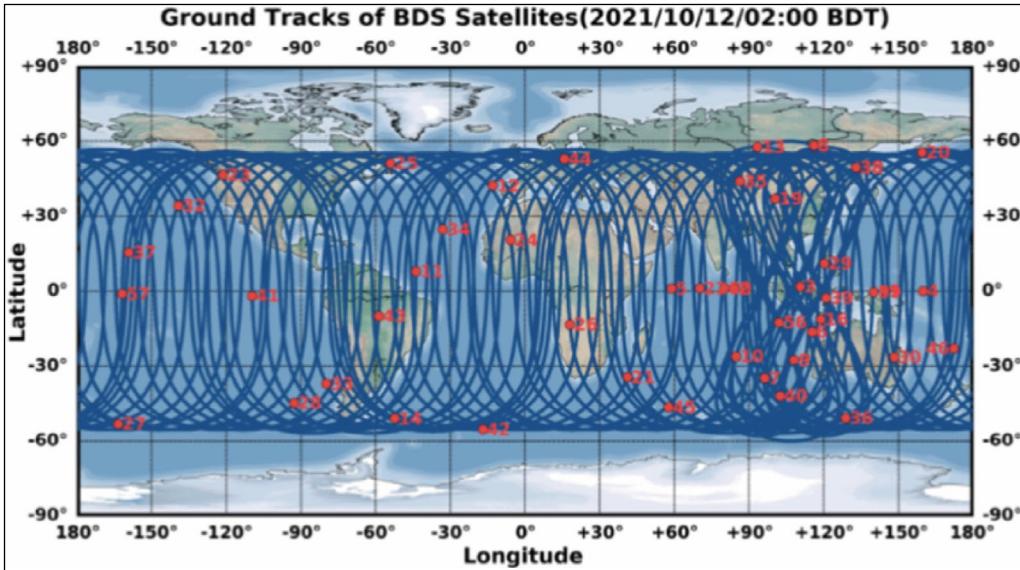
人類或許能真正讀懂地球的脈搏。如今，研究人員正努力讓這種連接能力實驗室走向產業實踐。

6G 覆蓋需要擁抱低軌衛星

如果 6G 的核心願景是“廣泛存在智慧連接”，那麼地面

網路在覆蓋範圍上存在天然局限。地球表面 71% 被海洋覆蓋，還有廣袤的沙漠、極地、森林等無人區，建設地面基站的成本極高。低軌衛星技術的出現恰好填補了這些空白——運行在 500-2000 公里軌道的衛星，單星覆蓋範圍可達數千公里，由數百顆衛星組成的星座即可實現全球無死角覆蓋。

圖：低軌衛星分佈示意



圖片來源：researchgate.net

從技術指標看，低軌衛星的傳輸延遲約為 50-150 毫秒，雖遠高於地面 5G 的 10 毫秒，但遠低於現有同步軌道衛星的 500 毫秒延遲，這一速率讓即時通信成為可能。配合 6G 的空中接口優化技術，未來低軌衛星鏈路的延遲有望降至 30 毫秒以內，有望支撐自動駕駛、遠端控制等對延遲敏感的應用。

頻譜資源的協同利用更是關鍵。6G 計畫使用的太赫茲頻段衰減快、覆蓋範圍小，而低軌衛星可承擔“高空基站”角色，通過中繼轉發擴展太赫茲信號的傳輸距離。美國聯邦傳播委員會(FCC)已將=28GHz、37GHz=等毫米波頻段分配給衛星通信，為衛星及地面協同頻譜使用鋪平道路。

讓衛星與地面網路“無縫連接”

要實現低軌衛星與 6G 的深度融合，首先要實現衛星地面一體化組網。傳統衛星通信採用專用協議，與地面移動通信的 5G/6G 協議不相容，導致手機等終端無法直接連接衛星。蘋果在 iPhone14 手機上推出了早期的衛星通信能力，允許使用者在沒有手機信號和其他地面無線信號的情況下，發送緊急短信並共用位置資訊，2025 年 1 月，Apple 與 SpaceX 計畫讓 iPhone 直接連接 Starlink (星鏈) 衛星網路，實現直接的組網連接，並已在 iOS 18.3 更新中正式支持。華為在 2024 年發佈的“星地一體協議棧”也採用相似的策略，通過設計統一的實體層和網路層協定，使普

通 6G 終端能自動識別衛星信號並切換連接模式，這一技術已在青海無人區的測試中實現手機直連低軌衛星通話。

波束成形與智慧跟蹤技術同樣重要。低軌衛星相對地面高速移動（約7.8公里/秒），需要終端天線能即時追蹤衛星位置。

中國電科研發的相控陣智慧天線，可在 0.1 秒內完成波束轉向，即使衛星快速移動也能保持穩定連接。在 2025 年的試驗中，這款天線實現了高鐵時速 350 公里狀態下與低軌衛星的持續通信，下載速率穩定在 100Mbps 以上。

衛星本身的資料處理能力也是非常重要的環節。傳統衛星僅作為信號轉發器，所有資料處理依賴地面站，導致時延增加。新一代低軌衛星搭載了基於 AI 的邊緣計算模組，可在衛星上直接完成資料預處理。例如，美國 **Planet Labs** 的衛星能在軌識別森林火災熱點，僅將關鍵數據傳回地面，使回應速度提升 80%。6G 時代，這種星上智慧將進一步升級，支持即時資料分析與決策。

應用場景：前沿科學先行

在應急通信領域，低軌衛星與 6G 的結合已展現出巨大價值。2024 年太平洋某島國遭遇強颱風，地面通信全毀，低軌衛星系統在災後 15 分鐘內恢復了該區域的通信，救援人員通過 6G 應急終端實現了高清視頻指揮，比傳統衛星通信的回應速度提升 3 倍。這種“天地一體”的應急網路，未來將成為全球災害救援的標配。

遠洋航運與航空領域正迎來變革。目前遠洋船舶的衛星通信頻寬普遍不足 2Mbps，無法滿足船員的高速上網需求。英國 OneWeb 與海事衛星組織合作，計畫在 2027 年前為商船提供 6G 級衛星服務，下載速率可達 1Gbps，相當於把地面 5G 基站搬到了太空。在航空領域，歐洲空客公司已測試通過低軌衛星實現飛機與地面的 6G 連接，乘客可在萬米高空流暢使用雲遊戲、VR 會議等應用。

在科學探索領域。南極科考站通過低軌衛星接入 6G 網路後，冰川監測資料的傳輸效率提升 20 倍，科學家可即時操控無人冰鑽進行深度探測。中國“悟空”號暗物質探測衛星與地面實驗室的 6G 衛星地面鏈路，使觀測資料的回傳時間從 3 天縮短至 4 小時，極大提升了科研效率。

在深海探測領域，6G 與低軌衛星的結合正打破通信瓶頸。傳統海底通信依賴光纜，鋪設成本高達每公里 50 萬美元，且易受地震破壞。中國科學院研發的“深海 6G 終端”通過低軌衛星中繼，可實現水下 100 米深度的即時通信。2025 年南海科學考察中，搭載該終端的潛水器成功將馬里亞納海溝 10909 公尺處的高清視頻通過衛星回傳，傳輸速率達 50Mbps，為深海生物研究提供了前所未有的資料支援。

太空探索也迎來新可能。國際空間站已通過低軌衛星接入 6G 試驗網路，宇航員可與地面控制中心進行 8K 超高清視頻通話，延遲控制在 200 毫秒以內。更具突破性的是“星際 6G”的預研——NASA 與 SpaceX 合作，計畫利用 Starlink 星座作為火星探測的通信中繼，使地球與火星車之間的通信延遲從 20 分鐘縮短至 10 分鐘以內，為未來載人火星任務奠定基礎。

在民生領域，“全域位置服務”將重塑生活方式。北斗系統與 6G 衛星的協同，可實現亞米級定位精度，即使在城市峽谷、極地冰蓋等傳統 GPS 盲區也能穩定工作。2026 年試點的“全球戶外導航”應用，能

為徒步旅行者提供即時地形分析和救援預警，在阿爾卑斯山脈的測試中，成功將迷路救援回應時間從 4 小時壓縮至 30 分鐘。

搶建低軌衛星網路

全球各國都在實施自己的星地網路計畫。SpaceX 的 Starlink 計畫部署 4.2 萬顆低軌衛星，截止到 2025 年 6 月 18 日的資料，目前已發射 8987 顆，其最新版本的使用者終端支援與 6G 地面網路的雙模切換，在 2025 年美國鄉村地區的測試中，實現了 1.2Gbps 的峰值速率。亞馬遜的 Project Kuiper 專注於與電信運營商合作，計畫 2029 年前為全球移動運營商提供衛星回程鏈路，幫助偏遠地區的 5G 基站接入核心網。

中國的佈局呈現“國家隊 + 企業”協同模式。中國星網集團作為統籌者，計畫到 2030 年建成由 12992 顆衛星組成的低軌星座，與中國移動、華為等企業聯合研發 6G 星地融合技術。2025 年 6 月，中國移動在新疆塔城地區完成全球首次 6G 毫米波衛星回傳試驗，用衛星將地面基站的信號傳回核心網，覆蓋半徑擴大至傳統基站的 50 倍。

晶片與終端廠商也在加速

跟進。高通 2024 年發佈的驍龍 X75 數據機，首次集成衛星通信功能，支援手機直接連接低軌衛星。華為的 6G 終端晶片則採用“光子射頻”技術，將衛星通信模組的功耗降低 60%，使手機在無地面網路時仍能續航 12 小時以上。

從技術成熟到商業落地 尚有距離

儘管前景廣闊，低軌衛星與 6G 的融合仍面臨多重挑戰。頻譜資源的國際分配是首要難題——各國在衛星頻段的劃分上存在分歧，歐盟與美國就 Ka 頻段的使用已多次博弈。此外，衛星星座的建設成本高昂，單顆低軌衛星的製造成本雖已降至 50 萬美元（相比 2010 年下降 80%），但組建萬顆級星座仍需千億美元級投入。

低軌衛星與 6G 的深度融合，需要構建一套靈活適配空天地不同環境的網路架構。6G 星地融合網路採用分散式智慧架構。中國信通院提出的“星地雙迴圈”架構頗具代表性：地面網路構成“小迴圈”，負責高密度區域的高速通信；衛星星座構成“大循環”，承擔廣域覆蓋和應急中繼，兩者通過“邊緣雲-衛星雲”的協同實現資料無縫流轉。

動態資源調度是其中的核



心難題。太赫茲頻段的衛星鏈路易受降雨、大氣閃爍影響，信號衰減可達 20 分貝以上。中國華為公司研發的“智慧波束賦形 + 自我調整編碼”技術提供了應對方案：通過 AI 即時預測通道品質，在 0.5 秒內調整波束方向和編碼方式，使鏈路可用性從 85% 提升至 99.9%。2025 年在海南颱風季的測試中，該技術讓低軌衛星與地面終端的通信中斷時間縮短至日均不足 10 秒。

頻譜共用技術也在突破。6G 計畫採用“頻譜池”模式，將地面未充分利用的毫米波頻段動態分配給衛星使用。美國 Verizon 與 Telesat 合作的試驗顯示，通過動態頻譜接入技術，衛星可複用地面 5G 的 39GHz

頻段，在不干擾地面通信的前提下，使衛星頻寬利用率提升 3 倍。這種“地星頻譜共生”模式，有望解決頻譜資源緊張的困境。

從時間線看，2025-2030 年將是關鍵的技術驗證期，全球主要星座將完成初步部署，星地融合的 6G 原型網路有望建成；2030-2035 年進入規模商用階段，衛星通信將成為 6G 的標準配置，使用者無需更換終端即可在全球任何角落接入高速網路。

另外，空間碎片問題也不容忽視。目前近地軌道已有超 10 萬片太空垃圾，6G 衛星星座的大規模部署可能加劇碰撞風險，這種情況的出現會導致整個星網的穩定性受到影響。

國際合作與競爭：從技術聯盟到規則制定

全球範圍內，6G 星地融合的合作與競爭並存。歐盟“歐洲 6G 計畫”明確將衛星通信納入核心技術體系，空客、愛立信、諾基亞組成“星地聯盟”，計畫 2028 年前發射 156 顆低軌衛星，專注於為歐洲山區和海島提供 6G 服務。該聯盟採用“開源衛星協議”，吸引了韓國三星、印度信實等企業加入，試圖在標準制定中抗衡中美。

中國則推動“金磚國家星地融合倡議”，與巴西、俄羅斯等國共建跨洲衛星通信走廊。2025 年啟動的“南美 - 非洲 6G 鏈路”專案，通過中國星網的衛星和巴西地面站，使南美內陸與非洲的通信時延從 400 毫秒降至 80 毫秒，跨境電商資料傳輸成本降低 60%。這種“技術 + 基建”的合作模式，正成為新興市場參與 6G 競爭的重要路徑。

日本的“Beyond 5G 推進聯盟”重點押注太赫茲通信技術，韓國的“6G 研發戰略”提出要在 2026 年完成關鍵技術驗證。

2023 年 5 月瑞典 Luleå 的 TTC 部長級會議上，歐美首次將 6G 合作寫入貿易協定，試圖在技術標準領域形成統一陣營。歐盟在 2023 年通過“智慧型網路與服務聯合事業 (SNS

JU) ”佈局 6G 研發，與美國簽署《超越 5G/6G 路線圖》，計畫 2025 年展開聯合研發專案。

規則制定的博弈愈發激烈。國際電信聯盟 (ITU) 2025 年召開的世界無線電通信大會上，關於“非地球靜止軌道衛星頻譜優先使用權”的爭論持續升溫。中國與俄羅斯聯合提出的“頻譜使用公平分配”方案，主張按國家人口和國土面積分配頻譜配額，遭到美歐反對。

消融數字鴻溝

6G 與低軌衛星的融合，正加速全球數位鴻溝的消融。在非洲撒哈拉以南地區，傳統地面基站覆蓋率不足 30%，而 OneWeb 的低軌衛星已為該區域提供 6G 預商用服務，使移動寬頻普及率從 2020 年的 25% 提升至 2025 年的 60%。肯亞的農民通過 6G 終端接入衛星網路，即時獲取全球農產品價格和氣象資料，農產品滯銷率下降 40%，年收入平均增加 300 美元。

新的產業形態也在湧現。“衛星物聯網”市場規模預計 2030 年將突破 500 億美元，低軌衛星可連接全球數十億台物聯網設備。中國“海絲衛星星座”已為東南亞 20 萬艘漁船提供定位和漁情服務，通過 6G 窄帶物聯網技術，每台終端的通信成

本降至每月 1 美元，漁民出海作業的安全事故率下降 70%。

在能源領域，“星地協同電網”實現智慧調度。沙特阿美石油公司利用 6G 衛星監測沙漠中的油氣管道，通過 AI 分析振動和溫度資料，洩漏預警準確率提升至 98%，每年減少損失超 10 億美元。這種“全域感知 + 智慧決策”的模式，正成為能源行業數位化轉型的標配。

展望未來，2035 年某一天，一位極地科考隊員戴著 AR 眼鏡，通過 6G 衛星鏈路向全球各地學生直播南極科考；遠在太平洋的貨輪船員，用 VR 設備與家人在晚餐時間共聚；深海探測器即時回傳的熱液噴口影像，通過衛星雲算力渲染後，呈現在全球科學家的虛擬實驗室中，阿根廷農場主遙控南極溫室種植藍莓……“數位地球的神經系統”將即時感知到這款藍色星球上發生的一切事情。

技術的進步永無止境。未來的低軌衛星可能搭載量子通信載荷，實現不可破解的全球保密通信；6G 終端或許會集成微型相控陣天線，讓手機像手錶一樣便攜卻能直連衛星。或許到了 6G 和低軌衛星構建的星地一體網路普及之時，我們就會感受到：真正的連接，不僅是信號的傳遞，更是文明的共生。 CTA