



衛星軌道對通訊的影響

蔡一飛^{1,*} 徐美樺² 馮佳音² 吳仁銘³

¹ 鴻海研究院新世代通訊研究所組長

² 鴻海研究院新世代通訊研究所基礎研究員

³ 鴻海研究院新世代通訊研究所所長

摘要

隨著可回收火箭技術的發展，人造衛星成為全球標準通訊系統的重要載具。低軌衛星作為 6G 非地面網路的關鍵組成，對縮小數位落差、提供偏遠地區及發展中國家網路服務具重要意義。本文探討不同的軌道參數如何影響衛星通訊的訊號延遲、覆蓋範圍與服務品質。首先介紹軌道六元素，闡述這些參數如何影響衛星的軌道特性與通訊系統的設計考量，並指出低軌衛星須面對的技術挑戰，例如都卜勒效應導致的動態頻率偏移控制，以及衛星接力換手機制的複雜性。本文除分析現有衛星通訊服務商如 OneWeb 及 Starlink 不同星系軌道設計外，亦探討國際標準組織 3GPP（3rd Generation Partnership Project）對衛星通訊的相關技術規範。此外透過電腦模擬分析，顯示軌道傾角與通訊仰角對低軌衛星星系的部署策略影響顯著。

關鍵詞：6G、低軌衛星、非地面網路、軌道六元素、衛星星系

* 通訊作者：蔡一飛

電子郵件：alfred.if.tsai@foxconn.com

（收件日期：2025 年 2 月 13 日；修正日期：2025 年 3 月 7 日；接受日期：2025 年 3 月 11 日）



The Impact of Satellite Orbits on Communications

I-Fei Tsai^{1,*}, Mei-Hua Hsu², Chia-Yin Feng², Jen-Ming Wu³

¹Manager, Next-Generation Communications Research Center, Hon Hai Research Institute

²Research Assistant, Next-Generation Communications Research Center, Hon Hai Research Institute

³Director, Next-Generation Communications Research Center, Hon Hai Research Institute

Abstract

With the advancement of reusable rocket technology, artificial satellites are becoming crucial vehicles for global standard communication systems. Low Earth Orbit (LEO) communication satellites, as a key component of 6G Non-Terrestrial Networks (NTN), play a significant role in bridging the digital divide and providing network services to remote areas and developing countries. This paper explores the impact of satellite orbits on communication performance, analyzing how different orbital parameters affect signal latency, coverage area, and service quality. First, the paper introduces the six orbital elements and explains how these parameters influence satellite orbital characteristics and communication system design considerations. It also highlights the technical challenges faced by LEO satellite communications, such as dynamic control of frequency offset caused by the Doppler effect and the complexity of satellite handover mechanisms. In addition to analyzing the orbital designs of existing satellite communication service providers such as OneWeb and Starlink, this paper examines the technical standards related to satellite communications established by international standardization organizations like 3GPP. Furthermore, computer simulations demonstrate that orbital inclination and communication elevation angles have a significant impact on LEO satellite constellation deployment strategies.

Keywords: 6G, LEO satellite, non-terrestrial network (NTN), six orbital elements, satellite constellation

* Corresponding Author: I-Fei Tsai
E-mail: alfred.if.tsai@foxconn.com

壹、前言

國際電信聯盟（International Telecommunication Union [ITU], 2023）對於未來 6G 通訊標準的技術發展提出了六個重點，其中有三項是延續 5G 的三個應用場景，需求是將效能做出數量級的提升；另外三項分別是整合通訊與人工智慧（Artificial Intelligence, AI）、整合通訊與感測，以及非地面網路（Non-Terrestrial Networks, NTN）。其中發展 NTN 的目標是提供全球無所不在的連接服務（Ubiquitous Connectivity），目的是縮小全球的數位落差，特別是提供偏遠地區與發展中國家的急難救助、遠程醫療、教育與商業等機會。近年來因為 SpaceX 的可回收火箭技術，以及在低地球軌道部署了數千顆 Starlink 衛星，使得人造衛星出現了行業復興的趨勢，發展出了所謂新太空經濟。

人造衛星以功能分類可以是通訊、導航、氣象、地球觀測、科學研究等，但無論衛星的主要功能是什麼，與地面站通訊是每一顆衛星都必須具備的功能。我們可以從手機的行動通訊網路去理解衛星通訊網路，簡單的說就是在衛星上配備大型相位陣列天線，發射的波束（Beam）會如同探照燈般在地面形成基地臺訊號涵蓋的細胞（Cell）；我們可以將通訊衛星形容成是裝了太陽能板在空中飛的基地臺。

根據 ITU（2014）的技術觀察報告中指出，人類在互動行為中，不同感官可以察覺到的時間延遲有不同的數量級，按鈕的肌肉回饋反應為 1 秒、聽覺的回饋反應為 100 毫秒、視覺的回饋反應為 10 毫秒、觸覺的回饋反應為 1 毫秒，所以在訂定 5G 通訊標準時是以觸覺互聯網的概念訂出了 1 毫秒通訊延遲的需求願景，這對衛星通訊存在著物理的限制。

傳統的電視廣播衛星是放在距離赤道 35,786 公里的軌道上與地球同步旋轉，在這種軌道上的衛星相對於地面上的使用者是呈現靜止的狀態，使用者僅需固定式碟型天線（俗稱小耳朵）即可接收訊號，但遠距離造成的高傳輸延遲（ $35,786/C \approx 120$ 毫秒），不適合互動式通訊。若把通訊衛星拉近到距離地表 550 公里的低軌道（Low Earth Orbit, LEO）時，可使傳輸延遲縮短（ $550/C \approx 1.8$ 毫秒），適合互動式通訊，被認定是實現 6G NTN 的關鍵技術。但因 LEO 衛星涵蓋範圍較小，衛星服務商須要部署很多顆衛星才能提供完整的覆蓋，且衛星必須以大於 20 倍的音速運動才能使自身繞地球旋轉的離心力與地球的引力互相抵消，使其在軌道上保持慣性運動，因此使用者終端天線必須能夠動態調整方向，追蹤衛星方位。

用人造衛星提供通訊服務的國際標準已經在 B5G 會議中被逐漸制定，未來必定會被完善於 6G 的標準中。衛星通訊服務商會把成千上萬的基地臺裝在衛星裡送上太空，密集地部署在低地球軌道上，提供使用者全時段、全覆蓋、常態性的網際網路服務。ITU 與各國太空機構必須協調管理衛星軌道與通訊頻譜資源（ITU, 2024），防止碰撞與干擾，確保衛星通訊的可持續發展。

在接下來的內容，我們會先介紹計算衛星軌道的六個重要參數，提及 OneWeb 衛星星系以及鴻海的珍珠號衛星軌道，然後闡述地面站對衛星通訊仰角（Elevation）的概念與含意，之後開始探討衛星軌道對通訊的影響，其中包含軌道六元素與衛星通訊網路設計考量的關聯性、LEO 衛星通訊的優勢與挑戰、地面站經度緯度高度對衛星通聯的影響，以及 LEO 衛星通訊網路搜尋策略，之後是分享 LEO 衛星星系的通訊覆蓋模擬結果並總結重點，最後提供建議與未來展望。

貳、衛星軌道參數簡介

衛星軌道參數的基礎理論是克卜勒三大定律，以行星圍繞太陽運行的規律，應用到人造衛星繞地球運行的場景。本節簡介繞地球運行的人造衛星軌道參數、分類、通用數據交換格式，以及預測和追蹤的演算法。

衛星軌道可抽象成如圖 1 所包含的六個基本元素（Sellers, Astore, Giffen, and Larson, 2015）：

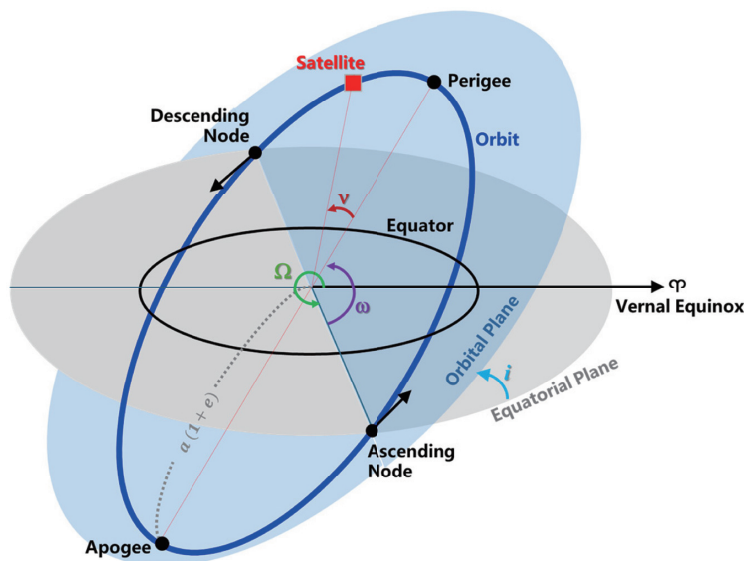


圖 1 軌道六元素

資料來源：本研究整理。

一、 a ：半長軸（Semi-Major Axis）：此參數決定衛星軌道的大小。根據克卜勒第一定律，衛星繞地球運行的軌道是一個橢圓，地球中心（GeoCenter）位於橢圓的兩個焦點之一。衛星與地心距離的最小值之處被稱作近地點（Perigee），最大值之處被稱作遠地點（Apogee）；近地點與遠地點距離為橢圓形的長軸，也就是半長軸的二倍。衛星軌道高度定義不是衛星與地心的距離，而是衛星與地表的距離，所以軌道高度等於衛星與地心的距離減去地球半徑。人造衛星以軌道高度（ H ）分類：

- （一）極低地球軌道（Very Low Earth Orbit, VLEO）： $H = 100 \sim 400$ 公里，例如中國的天宮太空站（Tiangong Space Station）衛星的軌道高度約為 390 公里。
- （二）LEO： $H = 400 \sim 2,000$ 公里，例如國際太空站（International Space Station, ISS）¹、最早商用的 LEO 通訊衛星系 Iridium、支持 iPhone 單向緊急短訊的衛星系 Globalstar、臺灣數位發展部為數位韌性所採用的 OneWeb、全世界衛星數量最多密度最大的商用服務 Starlink，以及 Amazon 計畫建設的 Kuiper 等。

¹ ISS 與中國的天宮太空站的軌道高度非常接近。

- (三) 中軌道 (Medium Earth Orbit, MEO) : $H = 2,000 \sim 35,786$ 公里, 例如大家最常用的定位導航服務衛星, 包括美國的全球定位系統 (Global Positioning System, GPS)、俄羅斯的格洛納斯系統 (Global Navigation Satellite System, GLONASS)、歐盟的伽利略定位系統 (Galileo)、中國的北斗三號 (除導航外還支持華為手機收發雙向短信、發送圖片信息), 以及通訊服務衛星例如被臺灣數位發展部採用的 SES O3b 等。
- (四) 地球靜止軌道 (Geostationary Orbit, GEO) : $H = 35,786$ 公里, 例如中國的天通一號衛星, 支持華為手機雙向語音與雙向短訊。3 顆天通一號 Tiantong-1 1/2/3 衛星部署在東經 $101^\circ/125^\circ/81^\circ$, 僅服務東半球。
- (五) 高軌道 (High Earth Orbit) : $H > 35,786$ 公里, 例如美國的 TESS 衛星。

二、 e : 離心率 (Eccentricity) : 此參數決定衛星軌道的形狀。離心率的定義是橢圓的焦距除以橢圓的半長軸 ($e = c / a$)。在此定義下可用半長軸與離心率來表示衛星與遠地點間的距離 $a + c = a + a \cdot e = a(1 + e)$, 以及衛星與近地點間的距離 $a - c = a(1 - e)$ 。若以 R_e 表示地球半徑則衛星軌道高度的最大值為 $a(1 + e) - R_e$, 最小值為 $a(1 - e) - R_e$ 。人造衛星以軌道離心率 e 分類:

- (一) 圓形軌道 (Circular Orbit) : $e \approx 0$ 。
- (二) 橢圓軌道 (Elliptical Orbit) : $e > 0$ 。
- (三) 高橢圓軌道 (Highly Elliptical Orbit, HEO) : $e \gg 0$, 例如 MOLNIYA 1-91 衛星 (NORAD ID = 25485) 的 $e \approx 0.68$ 。
- (四) 地球同步轉移軌道 (Geosynchronous Transfer Orbit, GTO) : $e \approx 0.70 \sim 0.75$ 。

三、 i : 軌道傾角 (Inclination) : 此參數決定衛星軌道的傾斜角度。如圖 1 中所示, 軌道傾角 i 為軌道面 (Orbital Plane) 與赤道面 (Equatorial Plane) 之間的夾角。人造衛星以軌道傾角分類:

- (一) 赤道軌道 (Equatorial Orbit) : $i \approx 0^\circ$, 例如所有的 GEO 衛星, 以及 MEO 的 O3b 衛星。根據克卜勒第三定律, 衛星繞地球運行的週期的平方與其軌道半長軸的立方成正比, 由此可算出衛星的軌道週期, 也就是繞行地球一圈所需要的時間。若衛星軌道週期與地球自轉週期相同 (23 時 56 分 04 秒), 則此類衛星軌道被稱為地球同步軌道 (Geosynchronous Orbit, GSO)。若再將衛星軌道離心率與軌道傾角控制在接近 0, 則此類衛星軌道被稱為 GEO, 衛星軌道高度約在 35,786 公里。
- (二) 繞極軌道 (Polar Orbit) : $i \approx 90^\circ$, 例如 OneWeb 衛星的 $i \approx 88^\circ$ 。
- (三) 傾斜軌道 (Inclined Orbit) : 例如 Starlink Phase 1 在軌道高度 550 公里衛星的 $i \approx 53^\circ$ 。
- (四) 太陽同步軌道 (Sun-Synchronous Orbit, SSO) : $i \approx 98^\circ$, 適用於地球觀測。與太陽同步的意思是軌道面繞地球自轉軸的旋轉速率與地球圍繞太陽的公轉速率一致, 每天約 1° 。白話來說即衛星每天固定時段通過相同地區, 使太陽的光影保持一致, 便於地球影像比對, 例如分析氣候變遷與區域和平、促使環境保護與災害管理等; 成功商用化的公司之一是號稱販賣真相的行星實驗室 (Planet Labs)。

四、 Ω : 升交點經度 (Right Ascension of Ascending Node, RAAN) : 此參數決定衛星軌道面在赤道面上的旋轉定位。如圖 1 中所示, Ω 為軌道上升 (Ascending) 時經過赤道面交叉點

與春分（Vernal Equinox）方向的夾角。在 LEO 衛星星系中，同一軌道面的衛星群其軌道參數有相近的 RAAN。以 OneWeb 為例（如圖 2），衛星總數為 648，軌道面數目為 12，每個軌道面衛星數目為 $648 / 12 = 54$ 。我們可以將此衛星星系想像成有 12 串珍珠項鍊，每一串項鍊有 54 顆珍珠。這 12 串珍珠項鍊的升降點經度均勻分布於 360° 的經度範圍，看似地球南北向經線（但傾角不是剛好 90° 而是 88° ），在距離地表 1,200 公里左右的軌道上列隊繞行地球。

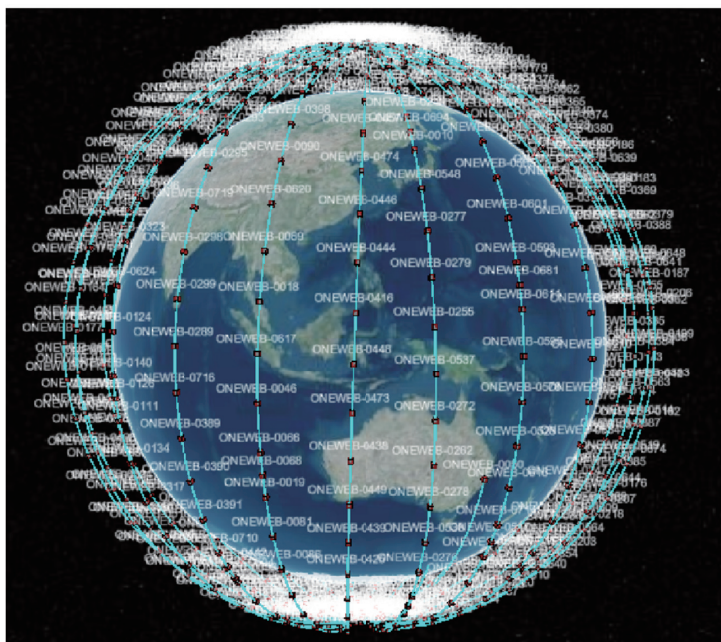


圖 2 OneWeb LEO 衛星星系

資料來源：本研究整理。

五、 ω ：近地點幅角（Argument of Perigee）：此參數決定衛星軌道在軌道面上的旋轉定位。

如圖 1 中所示， ω 為 RAAN 到近地點的夾角。

六、 v ：真近點角（True Anomaly）：此參數決定衛星在軌道上的旋轉定位。如圖 1 中所示， v 為近地點到衛星的夾角，是基於軌道參數生成時間的位置。衛星軌道參數會受太空環境的影響或衛星自身的控制而隨時間而改變，北美防空司令部（North American Aerospace Defense Command, NORAD）以雷達追蹤運作中的現役衛星、廢棄衛星、太空碎片、火箭本體等數萬顆物體估算其軌道參數；因為誤差會隨時間而漸增所以每日會更新軌道參數多次。軌道參數的數據交換通用格式為 Two-Line Elements (TLE) (Vallado and Cefola, 2012)，圖 3 為鴻海的珍珠號衛星（NORAD ID = 58265）於 2023 年 12 月 28 日 04:01:08 生成的 TLE 版本。在 TLE 中半長軸以每日繞地心幾圈（Mean Motion, n ）取代；真近點角以平近點角（Mean Anomaly, M_0 ）簡化計算。

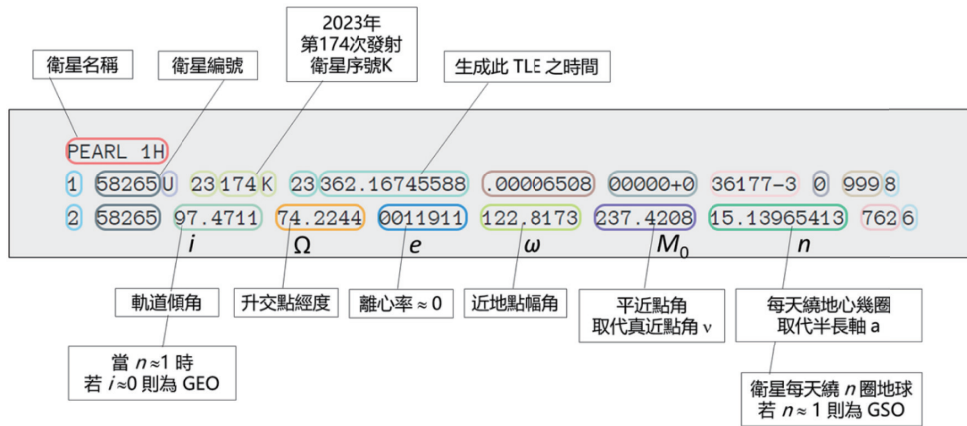


圖 3 繞地人造衛星軌道參數通用格式

資料來源：本研究整理。

繞（不很圓的）地球運行的人造衛星軌道預測是基於 SGP4（Simplified General Perturbations）（Vallado and Crawford, 2008）軌道模型，其中假設人造衛星的質量相對地球很小可忽略，繞地心近距離旋轉僅計算地球、太陽、月亮的引力以及稀薄的大氣阻力。簡化理念是計算複雜度小、精度需求相對較低，但短期內精度足夠高。

圖 4 為追蹤繞地人造衛星的演算法，對於給定的 TLE 與時間點，可計算出衛星的位置（經／緯／高度）；對於給定的地面觀測者位置（經／緯／高度），可計算出衛星相對於地面觀測者的方位角與仰角。

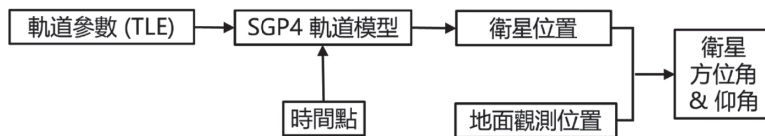


圖 4 追蹤繞地人造衛星的演算法

資料來源：本研究整理。

商用的通訊衛星有推進系統可維持軌道的穩定性，鴻海的珍珠號衛星沒有推進系統，所以軌道參數會因為大氣阻力等太空環境影響而逐漸改變。珍珠號衛星的長軸軌道高度在 2023 年 11 月發射之初約為 525 公里，到了 2024 年 11 月變成約 480 公里，軌道高度平均每天下降超過 120 公尺，下降的幅度隨時間而漸增。

圖 5 是珍珠號的一日軌道預測圖，軌道中每二點中間間隔 1 分鐘；衛星在日側時以紅點標示，方向是下降（Descending），由北北東向南南西飛；衛星在夜側時以藍點標示，方向是上升（Ascending），由南南東向北北西飛，軌道傾角 97.4° 。

因為地球與人造衛星間的萬有引力等於人造衛星繞地球運行所需要的向心力，由此可算出衛星的軌道速度約為 7.6 公里／秒（約 22 倍音速）；軌道週期約 95 分鐘，一天可繞地球約 15 圈。因為珍珠號的軌道傾角約為 97.4° ，所以具有太陽同步軌道的規律；臺灣地面站通聯的時段是早上 10:40 左右與晚上 10:10 左右。每次通聯時間約 6～8 分鐘，確切數字視通訊仰角而定。

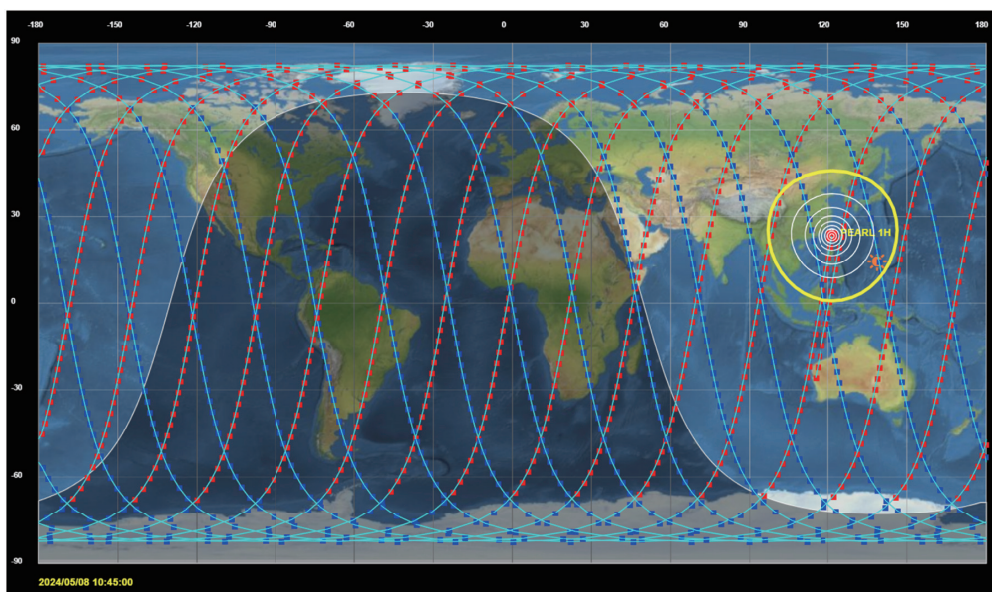


圖 5 珍珠號衛星一日軌道預測

資料來源：本研究整理。

參、衛星通訊的重要參數——通訊仰角

對地面站或使用者終端而言，追蹤人造衛星的方向通常是用二個數值的球體座標系統（Spherical Coordinate System）表示，一是方位角（Azimuth），二是仰角。方位角的定義是衛星方位與地理北方的順時鐘夾角，數值通常在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之間；仰角是指當地面通訊設備天線面向衛星的方位角時，衛星方向與地平面之夾角，數值通常在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。² 衛星在飛越地面站上空的通聯過程中，達到最大仰角之前是衛星從地平面升起並接近地面站的過程，達到最大仰角之後是衛星遠離地面站並向地平面降落的過程。仰角越小時與衛星距離越遠；仰角越大時與衛星距離越近。

根據給定的衛星軌道高度和仰角，我們可以用簡單的幾何數學估算出地面通訊目標與衛星的距離。同樣的我們可以根據給定的衛星軌道高度和最小通訊仰角，估算出衛星訊號覆蓋地區的半徑，以及衛星與地面通訊目標的最遠距離。衛星訊號的覆蓋範圍受限於通訊仰角，最小通訊仰角越小時訊號覆蓋範圍越大，最小通訊仰角越大時訊號覆蓋範圍越小。以高度 500 公里的圓形軌道為例，若最小通訊仰角為 0° 時衛星覆蓋地面半徑約為 2,500 公里， 10° 時約 1,500 公里， 20° 時約 1,000 公里。

以地面通訊設備為第一人稱，通訊仰角是衛星通訊系統最重要的參數之一，對不同衛星軌道高度的一般化效能指標可用最小通訊仰角度量。最小通訊仰角有兩層含意，第一是通訊設備效能的上限，第二是網路服務品質的下限。最小仰角的第一層含意是指通訊設備效能的

² 仰角也可能是負值或大於 90° 。當地面站高度很大且沒有通訊屏障時仰角會是接近 0° 的負值。在追蹤人造衛星時，方位角與仰角的數值可以有不同的表示方式。對地面通訊設備而言，若天線方位不掉頭（方位角在衛星遠離時亦保持與衛星接近時一致），則衛星遠離時通訊仰角的數值就可能大於 90° 。

上限，可通訊的最小仰角越小（距離越遠）表示通訊系統效能越好。大於最小通訊仰角的天際範圍，形狀像是一個從地面通訊目標向正上方擴展的圓錐形甜筒，我們稱之為可視範圍；在可視範圍內存在越多顆衛星表示星系網路服務品質越好。所以最小通訊仰角有第二層含意，表示網路服務品質的下限，具體定義是使用者在任何時間與地點於可視範圍內都至少存在一顆衛星的最小仰角；若衛星星系網路部署密度越高則此值越大、表示網路服務品質越好、越不容易因為周圍有屏障而失去訊號；當此值足夠大時（例如 30° ），基於相位陣列天線的使用者終端只需要電子式的波束方向控制（例如可支持 $\pm 60^\circ$ 的掃描範圍）即可涵蓋可視範圍，若能使天線視軸（Boresight）指向天頂（Zenith）則無須額外增加機械式的馬達控制天線基座方向。

目前 3GPP（3rd Generation Partnership Project）國際通訊標準的系統需求規格定義使用者終端與地面站的最小通訊仰角皆為 10° （3GPP, 2023）；但現有不同衛星通訊系統中的仰角規格（Starlink, OneWeb, TeleSat, Amazon）中，通常使用者終端的最小仰角會比地面站的最小仰角還大，這是因為通常使用者終端因為其設計限制而通訊效能較地面站差。當最小通訊仰角較高時，雖可提升通訊品質，但衛星訊號的覆蓋範圍會縮小而系統須要部署更多的衛星，因此衛星網路設計須在通訊效能與衛星數量之間取得平衡。

在地圖上面標示衛星訊號的涵蓋範圍，除了以衛星為中心之外，還可以以地面站為中心；對每一次通聯機會，可以根據 SGP4 的模型算出衛星於地平面升起與降落的方位角與時間點。當衛星接近地面站時，地面站對衛星的仰角會漸增，越近時仰角變化速度越快；反之當衛星遠離地面站時，地面站對衛星的仰角會漸減，越遠時仰角變化速度越慢。地面站與衛星的通聯時間大部分處於低仰角狀態（如圖 6），原因一是衛星越接近地面站時從地面站觀測到衛星的角速度越快，原因二是衛星很少飛越地面站正上方（ 90° 仰角）。

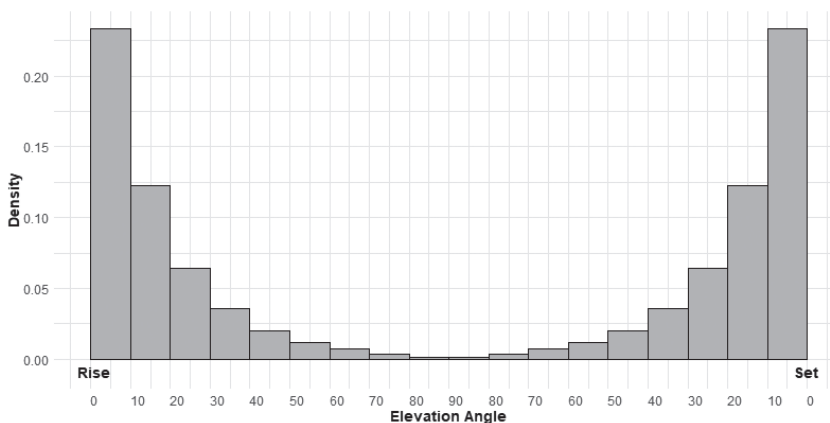


圖 6 衛星仰角時長占比直方圖（Histogram）

資料來源：本研究整理。

在衛星飛越地面站過程的中間點，仰角會達到最大值（通常遠小於 90° ）。對地面站而言，每次通聯都會有不一樣的通訊條件，主要由衛星飛越地面站的相對軌跡決定，數據可視化以地面站為中心的極座標表示，其中以方位角作為角度，以 90° 減去仰角作為長度。只要

知道某次通聯的最大仰角，就可以計算出衛星飛越地面站時的最近距離，以及可通聯的最大時長。若最大仰角越大，則通聯時的最近距離越小、可通聯的時間越長。所以我們除了可以用最小仰角這個指標代表衛星通訊的效能與品質之外，還可以用最大仰角這個指標代表某次與衛星通聯條件的好壞。

肆、衛星軌道參數對通訊網路的影響

一、軌道六元素與衛星通訊網路設計考量的關聯性

對衛星通訊網路的設計考量而言，不同軌道參數牽涉到不同的特徵，圖7總結對應關係，其中由半長軸決定的軌道高度影響層面最廣。

(一) 半長軸

1. 衛星軌道較高的優點：衛星訊號的覆蓋區域面積較大、所需部署的衛星數目較少（GEO衛星只要3顆即可覆蓋地球大部分區域）、通訊換手（Handover）頻率較低、所需地面閘道站數目較少。
2. 衛星軌道較高的缺點：衛星入軌成本較高、通訊距離較遠、路徑損耗較大、鏈路預算較高（需高增益天線補償）、傳輸延遲較長（不利於互動式通訊）。

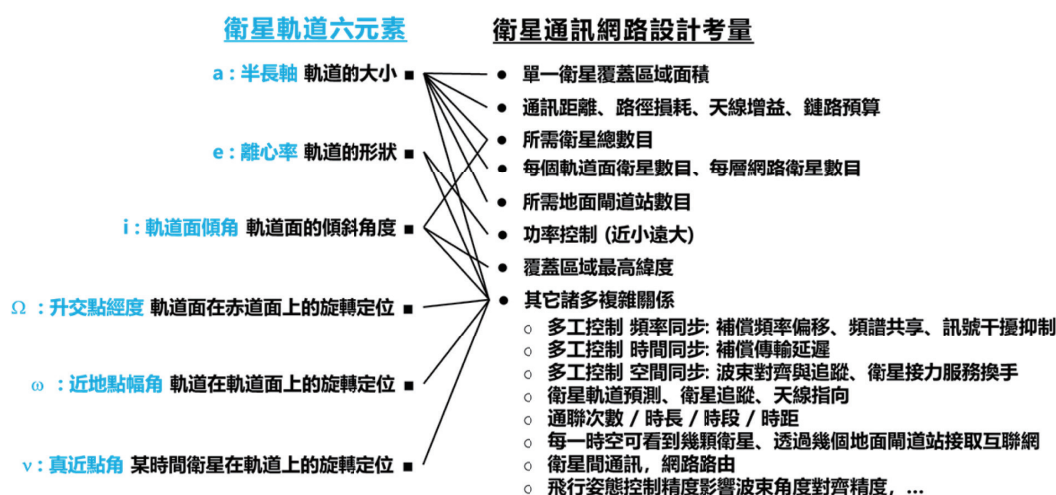


圖 7 衛星軌道參數對通訊系統的影響

資料來源：本研究整理。

(二) 離心率

蘇聯時期為了解決 GEO 衛星於高緯度覆蓋不足的問題，發展了高離心率／HEO 軌道，使衛星大部分的時間都在北半球高緯度的可見範圍內。軌道離心率對通訊的影響主要是高離

心率軌道的通訊距離變化很大，功率控制（近小遠大）的變化相對很大。現代衛星通訊系統軌道的離心率通常很接近 0（約為圓形軌道），如此衛星軌道高度變化很小，相關的控制幾乎可以省略。

（三）軌道傾角

軌道傾角對通訊的影響主要是衛星可以覆蓋地球區域的最高緯度。例如 Starlink Phase 1 在軌道高度 550 公里衛星的軌道傾角為 53° ，如此的星系設計可以減少衛星部署的數目，但在高緯度地區無覆蓋，從商業的角度考量影響不大，這是因為世界人口密度在高緯度較稀疏。對於低緯度的赤道／熱帶國家而言，衛星星系只需要一個 0° 傾角的軌道面即可，所需衛星總數較小。

（四）其他

RAAN、近地點幅角、真近點角對通訊主要的影響是衛星網路拓撲與路由，特別是衛星與衛星間通訊。

綜上所述，衛星軌道參數對 6G NTN 的設計具有關鍵影響，未來的衛星通訊系統應優化星系布局與頻譜資源管理，以提升全球網路覆蓋與服務品質。

二、LEO 衛星通訊的優勢與挑戰

LEO 衛星通訊有兩個優勢和三個挑戰。第一個優勢是和地面的網路比較，因為電磁波在真空中的傳輸速度比在光纖中還要快了將近 50%，如此計算下來，當端到端的通訊距離超過 2,200 公里以上的時候，使用 LEO 衛星網路的反應速度有機會比使用地面光纖網路還要快。第二個優勢是跟高軌衛星通訊比較，因為衛星與地球的距離比較近，所以訊號的傳輸延遲時間比較短、網路反應的速度會比較快。此外還因為電磁波的能量會隨傳輸距離的平方成反比，所以軌道越低的話，發射機所需的功率及接收機所需的靈敏度越小；這種特性對於體積小且使用電池電力的使用者終端（例如手機）的設計限制非常匹配。但把基地臺放在 LEO 衛星上提供通訊服務有一些技術上的挑戰，問題主要的根源都是因為衛星與地面使用者終端的相對位置與速度會隨時間而動態變化，在這種通訊條件隨時間動態改變的時變通道（Time Varying Channel）中，會有以下三個主要的挑戰，都可以被歸類為同步的問題：

（一）頻率同步：因為衛星對地面使用者終端的相對角度與速度會隨時間而動態變化，所以必須處理都卜勒效應所造成的頻率誤差，在發射端做頻率偏移的預補償，或在接收端作頻率偏移的後補償。3GPP 標準定義之初，4G LTE（Long Term Evolution）/5G NR（New Radio）中支持移動終端通訊是以時速 350/500 公里的高速鐵路應用情境作為效能需求上限，但在 NTN 中低軌衛星則有更高的最大相對速度（500 公里的軌道高度，衛星繞地速度約 $7.6 \text{ km/s} \approx 27,400 \text{ km/h}$ ），所以都卜勒效應在 LEO 衛星通訊比在地面網路中的影響更大，而且頻率偏移的數值大小會隨時間與不同仰角而動態改變，從接近到遠離逐漸降低。通訊頻段越高，補償的數值越大。

（二）時間同步：因為衛星訊號有傳輸延遲，所以必須提早發送，否則會干擾到其他分時多

工頻道的使用者。3GPP 標準定義之初，4G LTE/5G NR 中的使用者終端與基地臺間最大距離上限若以標準規格中的傳輸延遲補償（Timing Advance）的最大值計算約為 100/300 公里，實際網路布局低頻段的大型基地臺訊號涵蓋範圍（Macro-Cell）半徑約僅 30 公里，但在 LEO 通訊衛星網路中通常有更大距離（500 ~ 2,000 公里軌道高度相應的最大距離約為 2,500 ~ 5,500 公里），所以衛星傳輸延遲補償的數據長度必須比在地面網路中更大，而且補償的數值大小會隨時間與不同仰角而改變。

- （三）空間同步：通訊衛星以波束操控與跳躍（Beam Steering and Hopping）的方法形成細胞網路的運作，如同毫米波通訊的原則，衛星（基地臺）與使用者終端雙方的通訊裝置都必須即時追蹤彼此的相對位置，持續操控相位陣列天線的波束方向，彼此互相對齊才能建立與保持連線。而且當衛星飛離時必須要有另一個衛星接力服務，執行換手的無縫接軌控制程序。在空間同步的過程中，波束搜尋、對齊、追蹤的速度與精度是保持通訊效能的關鍵，會受限於衛星飛行姿態控制的精度。此外由於衛星持續運作需要使太陽能板面向太陽充電，³ 若太陽能板固定於衛星本體則充電時的飛行姿態調整可能會使得波束無法對齊通訊目標；若太陽能板可以獨立於衛星本體轉向充電則須額外對衛星質心位置的改變進行飛行姿態控制。

以上變化雖然都可以根據衛星軌道的可預測性加以控制，但是誤差必須要在多方協作的系統中即時精確地補償回來，才能保持穩定的多工連線。許多新創團隊趕在 6G 手機問世之前，致力修改空中基地臺的設計，使得原來沒有設計衛星通訊功能的 4G LTE 與 5G NR 手機用戶，也能夠直連相容於國際通訊標準的 LEO 衛星。

通訊仰角比較高時雖然衛星距離地面站比較近，理論上訊號品質會比較好，但此時通訊條件變化比較劇烈，若不能即時精確控制則無法確保通訊品質。地面站追蹤衛星的程序有二個重要的動態控制，第一是天線角度，第二是通訊頻率。在天線角度的部分，當衛星的仰角很大時，衛星的方位角度變化會比較快，導致波束對齊的誤差會比較大（如圖 8 所示），連線品質對角度誤差的容忍度視天線的半功率波束寬度（Half Power Beam Width）而定。在通訊頻率的部分，當衛星仰角很大時，對地面站的相對速度會比較快，導致都卜勒頻率偏移的變化幅度與誤差比較大，但偏離中心頻率的值較小，這是因為當仰角達到最大值⁴時是衛星接近與遠離地面站的拐點，頻偏值為零（如圖 9 所示）。在 3GPP 關於 NTN 的技術報告中有定義 GEO⁵ 都卜勒頻偏的最大值為 0.93 ppm；軌道高度 600 公里的 LEO 都卜勒頻偏的最大值為 24 ppm（3GPP, 2023），有別於 4G LTE 與 5G NR 地面網路的 ± 0.1 ppm（3GPP, 2020）。

³ 衛星軌道高度越高則陽光不被地球遮蔽的可充電時間比例越高。以鴻海珍珠號衛星軌道高度 500 公里為例，每天繞行地球約 15 圈，平均一圈是 96 分鐘，在這 96 分鐘的週期中衛星可以照到太陽的時間大約是 60 分鐘。

⁴ 不必要是 90°。

⁵ GEO 名稱中靜止的意思是衛星與地面通訊目標的相對速度約為 0，在通訊時頻率受到都卜勒效應的頻率偏移很小幾乎可以忽略不處理。

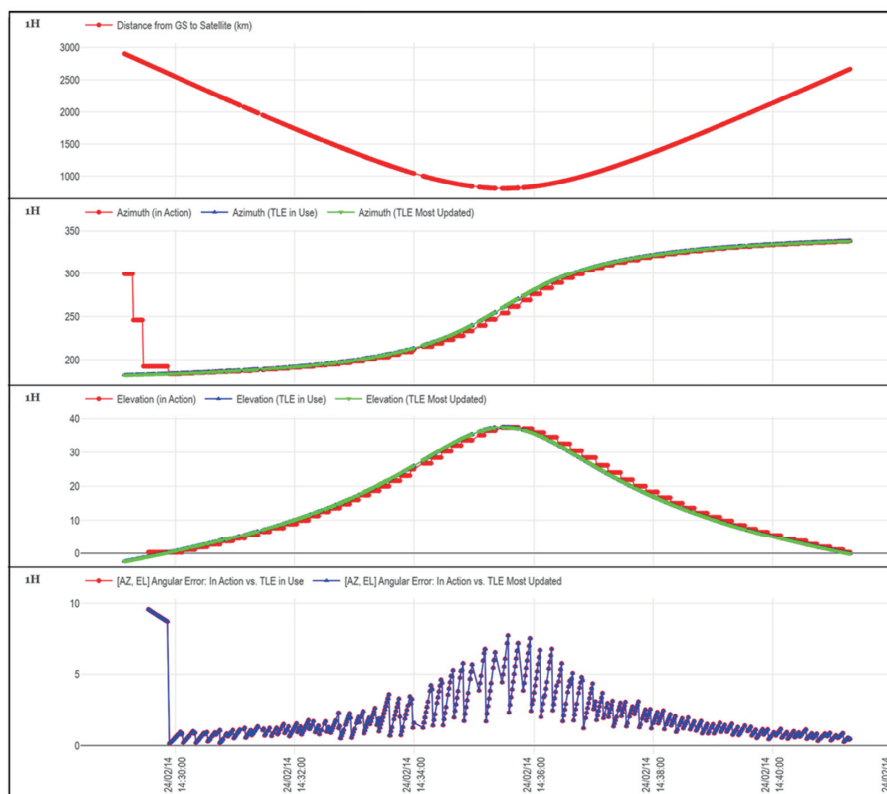


圖 8 地面站追蹤衛星時天線角度控制的過程

資料來源：本研究整理。

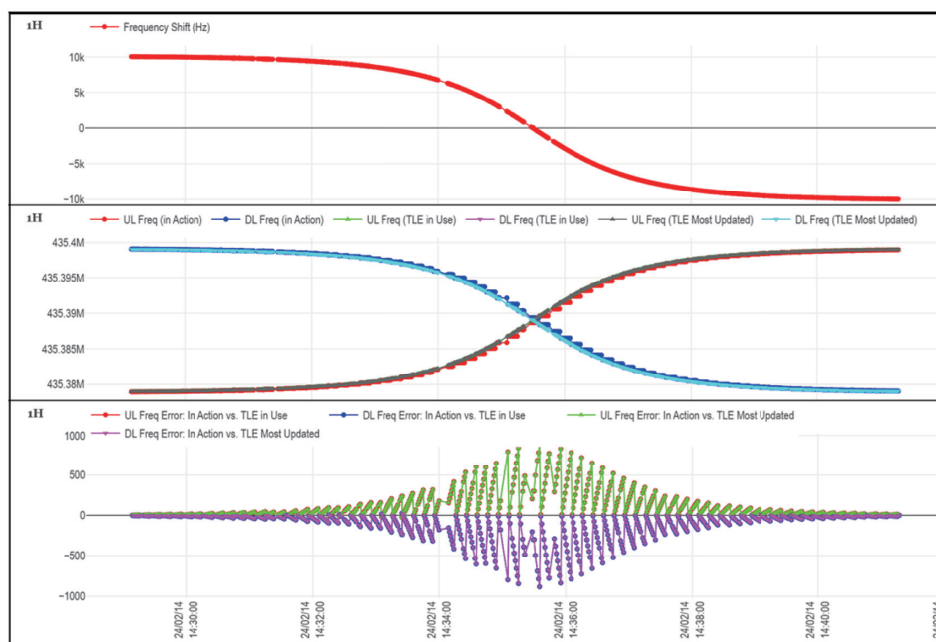


圖 9 地面站追蹤衛星時頻率偏移補償控制的過程（以 UHF 頻道為例）

註：UHF：超高频（Ultra High Frequency）。

資料來源：本研究整理。

衛星軌道參數會隨時間變化，若不頻繁更新 TLE 則會造成通訊控制誤差。如圖 10 所示，當衛星仰角越大（距離越近）時，地面站追蹤衛星的天線角度與頻率偏移補償的變化率與誤差越大。

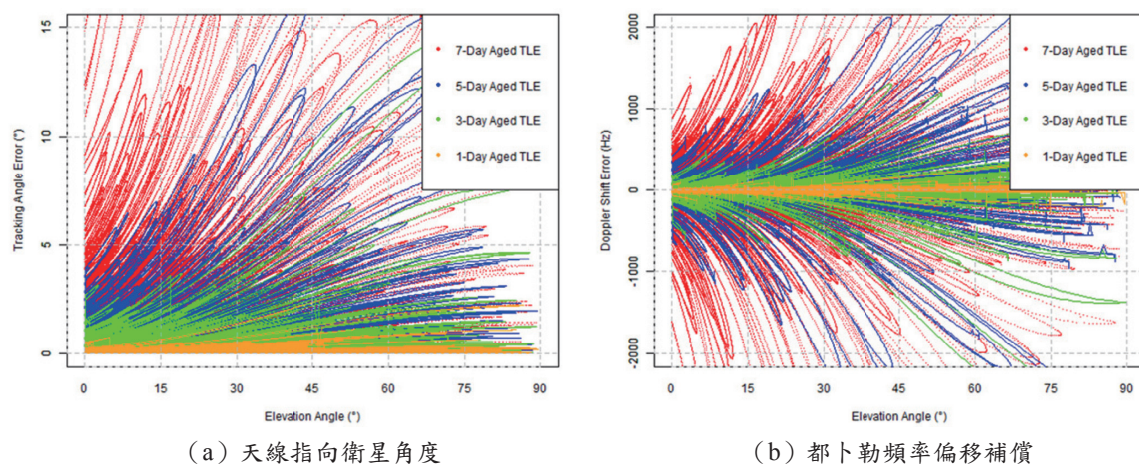


圖 10 衛星軌道參數未更新所造成的通訊控制誤差

資料來源：本研究整理。

三、地面站經度、緯度、高度對衛星通聯的影響

根據 SGP4 模型的演算法，我們可以透過衛星軌道模擬的程序，計算出地面站每日通聯時段、次數、時長。

- (一) 地面站經度會影響通聯時段：若為太陽同步軌道則同時差規律，向東／西移 15° 則通聯時段會提早／延後 1 小時。
- (二) 地面站緯度會影響通聯次數與時長：若為高傾角軌道衛星，緯度越高每日通聯次數 (N) 越大，每日通聯時間總和 (T) 也越長，但平均每次通聯時長 (T/N) 在不同緯度差異不大：
 1. 對地面通訊目標而言，一日可通聯次數依最小通訊仰角而定。計算的方式是將衛星軌道映射至地面後，在以地面站為中心的衛星覆蓋區域內，於最小通訊仰角的圓圈中，計算被含括在內的軌道路徑個數。對於繞極軌道衛星（如圖 11）或太陽同步軌道衛星（如圖 12）而言，在高緯度的地面站覆蓋圓圈中軌跡較密，每日通聯次數較多。
 2. 以珍珠號衛星為例，用最小通訊仰角 10° 去計算，在臺灣的地面站（緯度 25° ）平均每日通聯時間總和約為 16.3 分鐘，除以平均每日通聯次數 2.7 次，可以得到平均每次通聯時間 6 分鐘。而在挪威 Svalbard 的 KSAT 地面站（緯度 78° ）平均每日通聯時間總和約為 71.5 分鐘，除以平均每日通聯次數 10.8 次，可以得到平均每次通聯時間 6.6 分鐘。
 3. 綜上所述，Ground Station As A Service 網路運營商的地面中控站選址策略是緯度越高越好，可增加衛星操控時間，且適合衛星軟體更新。而客戶租用地面站的考量是：（1）若以每次衛星通過（Pass）計費，選用高緯度的地面站性價比會高一點點；（2）緯度越高每日通聯次數越多，可縮短等待通聯時間，加速工作進程。

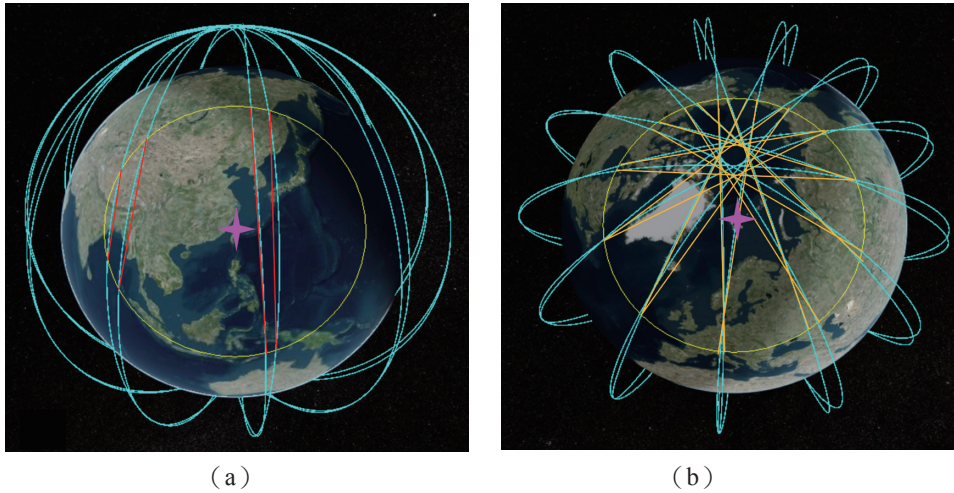


圖 11 OneWeb 繞極軌道衛星對於 (a) 臺灣及 (b) 挪威 Svalbard 地面站的一日通聯機會

資料來源：本研究整理。

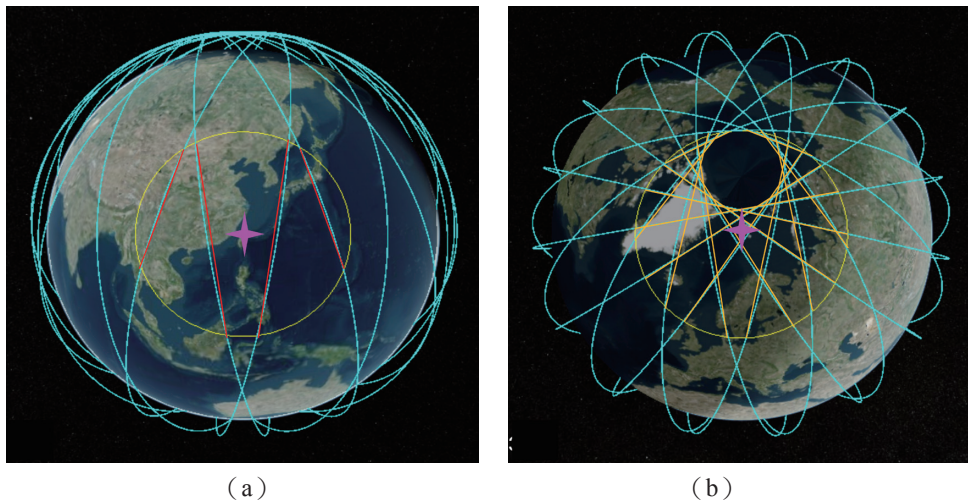


圖 12 珍珠號太陽同步軌道衛星對於 (a) 臺灣及 (b) 挪威 Svalbard 地面站的一日通聯機會

資料來源：本研究整理。

(三) 地面站高度會影響最小仰角：當地面站鄰近的建築物或地形高於最小通訊仰角時，通聯的時間會因為屏障而減小；此時增加地面站的高度或根據衛星升降方位角的分布，去微調地面站位置有機會可以減少屏障通聯的時間。當無鄰近屏障、衛星為直線視距 (Line of Sight) 時，地面站建於海平面高度 0 公尺時對衛星的最小仰角為 0° ；建於玉山高度 3,952 公尺時對衛星的最小仰角為 -2.02° ；建於珠峰高度 8,848 公尺時對衛星的最小仰角為 -3.02° 。

接下來我們進一步將軌道模擬從一顆衛星擴展到多顆衛星的星系，在每一單位時間對特定位置的使用者終端計算在其可見範圍 (最小通訊仰角) 內每一顆衛星的方位角與仰角，將

圖 6 時長占比的累計由一維的仰角擴展到二維的方位角與仰角，所得到的時長總和占比以熱圖 (Heatmap) 形式在之前所述的極座標⁶上呈現，其中以方位角作為角度，以 90° 減去仰角作為長度， 90° 仰角是極座標中心點，就是使用者終端的天頂。圖 13 (a) 與圖 13 (b) 是使用者終端分別在北半球與南半球的特定位置⁷可以見到所有的 OneWeb 衛星的時長總和占比熱圖；圖 13 (c) 與圖 13 (d) 則是對 Starlink 星系 Phase 1 軌道傾角 53° 的衛星模擬的結果；搭配本章之前所述的實驗心得，形成了下一節的通訊衛星網路搜尋策略，目的類似於縮短導航衛星訊號的首次定位時間 (Time to First Fix, TTFF)。

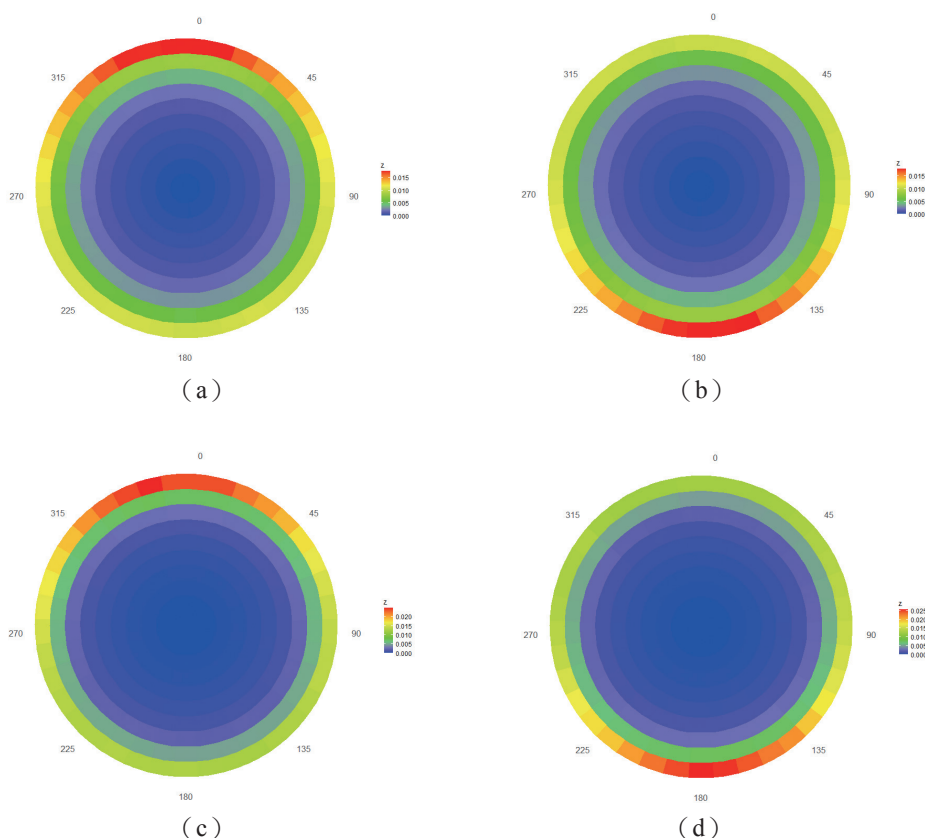


圖 13 OneWeb 及 Starlink 衛星網路搜尋熱圖

資料來源：本研究整理。

四、LEO 衛星通訊網路搜尋策略

在 5G 毫米波網路中，使用者終端開機、離開飛航模式或失去網路訊號後會開始搜尋網路，這個程序被稱為波束掃描 (Beam Sweeping)，也就是 3GPP 標準中初始接取 (Initial

⁶ 相較於經緯度地圖，使用這種極座標的好處是可以對不同軌道高度的衛星進行數據統計的正規化 (Normalization)。

⁷ 北半球的使用者終端位置是設定在臺灣的北緯 24.967881° 、東經 121.187576° 、高度 153 公尺；南半球的使用者終端位置是設定在對稱的澳洲南緯 24.967881° 、東經 121.187576° 、高度 153 公尺。

Access) 的第一個步驟。在尚未取得通訊衛星軌道參數之前，使用者終端不知道它附近基地臺的方位，在此條件下使用者終端會在所有可能的來波方向掃描基地臺的同步訊號。這種基於窮舉法的波束掃描程序在以 LEO 衛星為主的 NTN 中可以優化如下：

- (一) 優先搜尋低仰角：圖 13 與圖 6 的結果一致，對使用者終端而言衛星大部分時間處於低仰角狀態，且由圖 8 至圖 10 可知，衛星在低仰角時，通訊控制的同步誤差相對較小，因此在可見範圍內較低仰角的區域內搜尋到基地臺同步訊號的機率比較大，所以在此建議波束掃描的順序是從低仰角到高仰角。
- (二) 優先搜尋高緯度方位角：由圖 11 與圖 12 可知，在高緯度的地區衛星軌道密度相對較高，這種現象可以解釋為何圖 13 中衛星存在的方位角在較高緯度的地區機率較大，所以在此建議波束掃描的順序是從高緯度到低緯度。若使用者終端位置在北半球則優先於北方 (0° 方位角) 搜尋衛星波束，若在南半球則優先於南方 (180° 方位角) 搜尋衛星波束。

以上操作是假設通訊衛星使用者終端具備全球衛星導航系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 衛星訊號接收器，可以得到自己的地理位置，同時具備慣性測量單元 (Inertial Measurement Unit, IMU)，可以得到自己天線視軸的姿態角 (可能不會剛好指向天頂)。如此使用者終端可以在衛星搜尋熱圖 (中心指向天頂) 內匡列出有限的波束掃描角度範圍 (Scanning Angle Range)，對應到陣列天線半功率波束寬度量化 (Quantization) 過後的波束表 (Beam Table)，以由熱到冷的順序進行波束掃描。我們以電腦模擬程式統計三種不同的搜尋順序的網路搜尋時間長度，一是高仰角 (距離較近) 優先、不同方位角平等的搜尋時長 L_1 ，二是低仰角 (距離較遠) 優先、不同方位角平等的搜尋時長 L_2 ，三是依照熱圖由熱到冷的搜尋時長 L_3 ，比較結果如表 1 所示，搜尋時間可以被大幅縮減。

表 1 衛星網路搜尋時間長度比較

衛星星系	時間縮短比例		
	$\frac{L_1 - L_2}{L_1}$	$\frac{L_1 - L_3}{L_1}$	$\frac{L_2 - L_3}{L_2}$
OneWeb 星系	98.31%	98.83%	30.64%
Starlink 星系	98.95%	99.09%	13.53%

資料來源：本研究整理。

由於篇幅限制，本文並未顯示更多電腦模擬的衛星搜尋熱圖以及細節說明。簡而言之，優先搜尋低仰角與高緯度方位角的策略並非通則，例如在非常高緯度的地區並不適用，我們建議對於不同緯度區塊、不同傾角的衛星星系，以及不同半功率波束寬度的通訊終端天線產生不同的低解析度衛星搜尋熱圖，如同電子地圖預存在使用者終端內，可以有效縮短通訊衛星網路搜尋的時間長度。未來若用 LEO 衛星提供定位導航服務，則此方法可以縮短冷開機的 TTFF。

在初始接取成功後，使用者終端即可從其鎖定的衛星基地臺的系統資訊 (SIB19 及 SIB31) 讀取鄰近衛星的星曆或軌道參數，然後開始用圖 4 的演算法直接計算鄰近衛星的方位角與仰角，使得之後在連接或待機模式時無須再用窮舉法搜尋衛星基地臺波束。

伍、衛星星系軌道參數與通訊覆蓋區域

通訊仰角的限制會影響衛星對地面的通訊覆蓋範圍（如圖 14），且根據不同的軌道高度，如式（1），可計算出覆蓋範圍之半角 α ，從而決定單一衛星覆蓋區域的半徑與面積。式（1）中符號 R_e 是地球半徑、 H 是軌道高度、 γ_{min} 是最小通訊仰角（Dai, Chen, Wang, Fernández, Nguyen, and Reinelt, 2017）：

$$\alpha = \arccos\left[\frac{R_e \cos(\gamma_{min})}{R_e + H}\right] - \gamma_{min} \quad (1)$$

因為當軌道面與赤道面之間的夾角越小時，覆蓋地球的區域越小，所以我們可以根據通訊目標區域的地理緯度覆蓋需求，設計相應的軌道傾角，減少需部署的衛星數量。假設欲覆蓋的通訊目標區域分布在緯度 $[\varphi_l, \varphi_u]$ 之間，此覆蓋區域的最大地理緯度為 $\varphi_{max} = \max\{|\varphi_l|, |\varphi_u|\}$ 。給定最大地理緯度 φ_{max} 與單一衛星覆蓋區域半角 α ，式（2）可決定最小衛星軌道傾角 i_{min} ：

$$i_{min} = \max\{\varphi_{max} - \alpha, 0\} \quad (2)$$

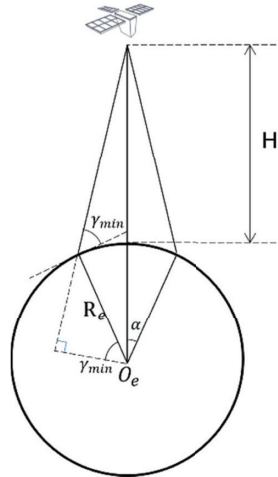


圖 14 衛星通訊覆蓋區域計算

資料來源：本研究整理。

除了欲覆蓋區域的最大地理緯度 φ_{max} 外，最小地理緯度 $\varphi_{min} = \min\{|\varphi_l|, |\varphi_u|\}$ 也會影響需部署的衛星數量。從圖 11 與圖 12 可知，緯度越高的區域衛星軌跡越密，所以 φ_{min} 越大時所需部署的軌道面數越少。

綜上所述，若欲覆蓋的區域地理緯度分布的範圍 $\varphi_{max} - \varphi_{min}$ 越窄小，則需要部署的衛星數量亦越少。表 2 是基於 Walker-Delta (Walker, 1984) 的衛星星系設計模擬結果，使用圓形軌道，軌道高度為 800 公里，通訊覆蓋區域以緯度 30 度內之地區進行比較：臺灣（21° ~ 26°N）、

沙烏地阿拉伯（ $16^{\circ} \sim 31^{\circ}\text{N}$ ）、泰國（ $5^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{N}$ ）、印尼（ $6^{\circ} \sim 11^{\circ}\text{N}$ ）。前兩者以軌道傾角 30° 設計衛星星系，後兩者則根據其最北端的緯度分別以軌道傾角 20° 與 10° 設計衛星星系。

表 2 LEO 衛星星系設計模擬

設計模擬項目	覆蓋區域				
	右列所有地區	沙烏地阿拉伯	臺灣	泰國	印尼
地理緯度	$5^{\circ} \sim 31^{\circ}\text{N}$	$16^{\circ} \sim 31^{\circ}\text{N}$	$21^{\circ} \sim 26^{\circ}\text{N}$	$5^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{N}$	$6^{\circ} \sim 11^{\circ}\text{N}$
軌道傾角設計	30°	30°	30°	20°	10°
軌道高度 800 公里，最小通訊仰角 30°					
軌道面數	11	11	7	8	8
各軌道面衛星數	20	19	16	16	8
總衛星數	220	209	112	128	64
軌道高度 800 公里，最小通訊仰角 45°					
軌道面數	19	17	11	11	11
各軌道面衛星數	28	28	25	24	14
總衛星數	532	476	275	264	154

資料來源：本研究整理。

當最小通訊仰角在 45° 與 30° 時，前者的覆蓋區域面積小於後者的 $1/2$ ，需要的總衛星數量為後者的兩倍以上；而沙烏地阿拉伯相較於臺灣，地理緯度的分布範圍較大（ φ_{max} 較大、 φ_{min} 較小），因此在使用同樣為 30° 度傾角的星系時，需要更多的衛星才能覆蓋；若欲以 30° 傾角之星系覆蓋泰國或印尼等低緯度區域，則相較於使用 20° 與 10° 傾角的星系，須用更多的衛星才能完成覆蓋（表 2 資料使用窮舉方法，在一天時間內能連續覆蓋列舉之區域）。

陸、結論、建議與未來展望

試問全時覆蓋臺灣需要多少顆 LEO 衛星？國家太空中心（Taiwan Space Agency, TASA）估計 120 顆（林克倫，2023）；臺灣數位發展部採用 OneWeb 星系有 648 顆可覆蓋全球；鉅（Iridium）計畫星系有 76 顆可覆蓋全球；Starlink 星系 Phase 1 軌道傾角 53° 有多於 1,500 顆可覆蓋中低緯度（包含臺灣）。以上莫衷一是的答案是因為問題中沒有明確定義需求與現實條件。此問題的影響因子眾多，大體上包含五個重點：一、衛星軌道參數：例如軌道高度、軌道傾角等；二、通訊系統效能：例如最遠通訊距離或鏈路預算等；三、網路服務品質：在任何時間與地點於通訊仰角範圍內最少需要有幾顆衛星；四、基礎建設：境內外何處部署地面開道站用以轉接網際網路，這牽涉到地緣政治，不是單純的技術問題；五、技術支持：星系內是否有衛星與衛星之間的通訊，若有支援則可減少地面開道站的數量，否則想要減少地面開道站的數量必須要增加軌道高度。

由於通訊衛星與地面 5G 毫米波網路的陣列天線技術一脈相承，所以整合地面網路與

NTN 時可以共用波束管理的框架；而其中因為通訊衛星是扮演基地臺而非手機的角色，所以建議技術研發團隊可以將基於 O-RAN（Open Radio Access Network）架構的 5G 毫米波小基站改造為 6G NTN 的衛星通訊酬載。之所以建議要基於 O-RAN 架構的原因，除了採用開放介面有助於以標準相容產品打入傳統封閉式供應鏈之外，通訊衛星與地面網路的協同運作模式可以用 O-RAN 功能切分（Functional Split）的不同選項進行彈性部署；第一個用例是通訊衛星的 Transparent 操作模式（3GPP, 2023）相當於 O-RAN 的 O-RU（Radio Unit），而 Regenerative 操作模式相當於 O-RU 加 O-DU（Distributed Unit），或是 O-RU 加 O-DU 加 O-CU（Central Unit）。第二個用例是混合低、中、高軌衛星形成的分散式系統，可以用 O-RAN 的 O-RU、O-DU、O-CU 等階層式架構實現，其中牽涉到的通訊協定（如圖 15）除 3GPP 之外還包含 O-RAN Alliance（O-RAN, 2025）與 Small Cell Forum（2022）所制定的規格。

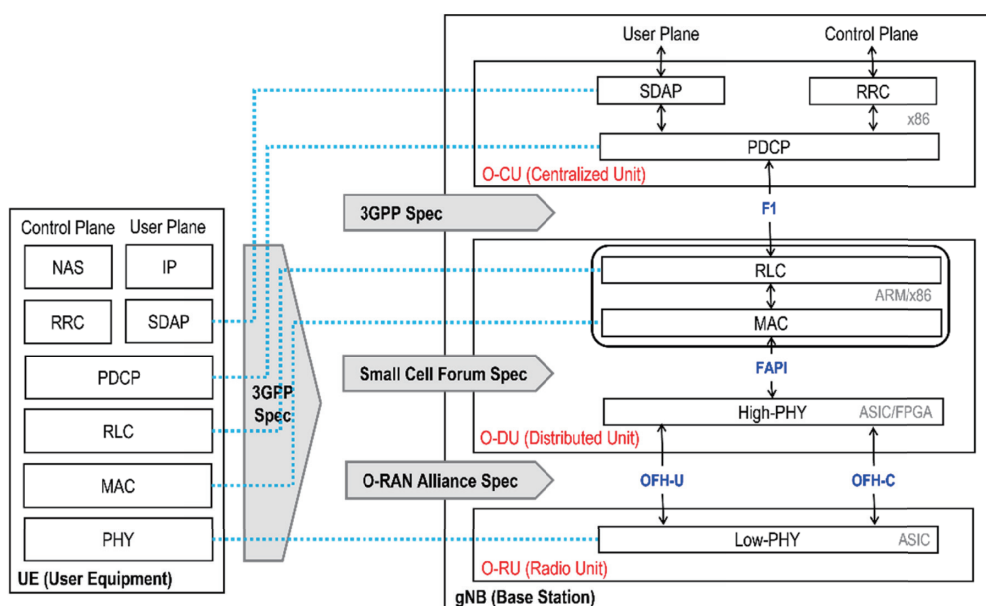


圖 15 基於 O-RAN 架構的行動網路通訊協定介面規格

資料來源：本研究整理。

本篇論文以科普的方式簡介衛星軌道對通訊效能的諸多影響，並分享珍珠號衛星的實務經驗與理論印證，期望能夠成為太空科學與通訊工程人才跨界合作的催化劑。展望 6G，整合了 AI 與感測功能的 LEO 通訊衛星將逐漸擴展成為巨型星系（Mega-Constellation），除了商用通訊服務外，也可以在國家安全與環境監控等議題上發揮重要的功能。從衛星通訊運營商開始與行動網路運營商合作提供手機直連服務的趨勢中，我們預期現有非國際標準的衛星通訊服務在經過幾年的競合後終將統一到 3GPP 的技術框架中。我們相信在 2030 年左右，3GPP 組織將 6G NTN 的國際通訊標準制定完善後，衛星通訊酬載的商機會隨著 6G 手機的問世而有跳躍式的成長。

參考文獻

- 林克倫，2023年9月12日，〈俄烏戰爭殷鑑 太空中：臺灣需120枚低軌衛星確保通訊不中斷〉，《中央通訊社》，<https://www.cna.com.tw/news/ait/202306160324.aspx>（瀏覽日期：2024年8月12日）。
- 3rd Generation Partnership Project, 2020, “Study on New Radio (NR) to Support Non-Terrestrial Networks (TR 38.811),” <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3234> (accessed August 15, 2024).
- 3rd Generation Partnership Project, 2023, “Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN) (TR 38.821),” <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3525> (accessed August 15, 2024).
- Dai G., Chen X., Wang M., Fernández E., Nguyen T. N., and Reinelt G., 2017, “Analysis of Satellite Constellations for the Continuous Coverage of Ground Regions,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, 54(6), 1294-1303. doi:10.2514/1.A33826
- International Telecommunication Union, 2014, “The Tactile Internet: ITU-T Technology Watch Report,” https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/gen/T-GEN-TWATCH-2014-1-PDF-E.pdf (accessed August 15, 2024).
- International Telecommunication Union, 2023, “IMT Towards 2030 and Beyond (IMT-2030),” <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/Pages/default.aspx> (accessed August 15, 2024).
- International Telecommunication Union, 2024, “Radio Regulations,” <https://www.itu.int/hub/publication/r-reg-rr-2024/> (accessed August 15, 2024).
- O-RAN, 2025/2, “O-RAN Base Station O-DU and O-CU Software Architecture and APIs 14.0,” <https://specifications.o-ran.org/specifications> (accessed February 28, 2025).
- Sellers J. J., Astore W. J., Giffen R. B., and Larson W. J., 2015, *Understanding Space: An Introduction to Astronautics*, 4th ed., New York, NY: McGraw-Hill.
- Small Cell Forum, 2022/7, “5G nFAPI Specifications,” <https://www.smallcellforum.org/docs/5g-nfapi-specifications/> (accessed August 15, 2024).
- Vallado D. A. and Cefola P. J., 2012, “Two-Line Element Sets—Practice and Use,” in *63rd International Astronautical Congress 2012 (IAC 2012)*, Red Hook, NY: Curran Associates, 5812-5825.
- Vallado D. A. and Crawford P., 2008, “SGP4 Orbit Determination,” in *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 6770. doi:10.2514/6.2008-6770
- Walker J. G., 1984, “Satellite Constellations,” *Journal of the British Interplanetary Society*, 37, 559-571.