



前瞻科技與管理 13 卷 2 期，73-86 頁（2025 年 5 月）
Journal of Advanced Technology and Management Vol. 13, No. 2, pp. 73-86 (May, 2025)
DOI:10.6193/JATM.202505_13(2).0005

低軌衛星通訊發展與傳輸層協定之挑戰

詹益禎^{1,*} 羅翊軒²

¹ 國立彰化師範大學資訊工程學系副教授

² 國立彰化師範大學資訊工程學系研究生

摘要

隨著通訊需求的快速增長，低軌（Low Earth Orbit, LEO）衛星通訊已逐漸成為全球無縫網路覆蓋的解決方案。由於 LEO 衛星具備較低的延遲和更廣泛的訊號覆蓋範圍，相較於地球同步軌道（Geostationary Earth Orbit, GEO）衛星和中軌（Medium Earth Orbit, MEO）衛星在許多應用場景中顯得更加優越，隨著如星鏈（Starlink）、一網（OneWeb）等計畫的推動，LEO 衛星通訊正處於快速發展階段。然而，LEO 衛星網路的動態環境卻對當今網際網路上被廣泛使用的輸層協定 TCP（Transmission Control Protocol）衍生新的挑戰。LEO 衛星網路頻繁的衛星換手、較高的位元錯誤率以及變動的往返時間等諸多問題，導致其效能顯著下降。本文整理了 LEO 衛星通訊發展歷史與現況並描述 LEO 衛星通訊對於傳輸層協定 TCP 之挑戰。

關鍵詞：一網、低軌衛星通訊、星鏈、傳輸層協定、網際網路

* 通訊作者：詹益禎

電子郵件：ycchan@cc.ncue.edu.tw

（收件日期：2025 年 2 月 3 日；修正日期：2025 年 3 月 17 日；接受日期：2025 年 3 月 17 日）



Development of LEO Satellite Communications and Challenges of Transport Layer Protocols

Yi-Cheng Chan^{1,*}, Yi-Hsuan Lo²

¹Associate Professor, Department of Computer Science and Information Engineering,
National Changhua University of Education

²Postgraduate, Department of Computer Science and Information Engineering, National Changhua University of Education

Abstract

With the rapid growth of communication needs, Low Earth Orbit (LEO) satellite communications have gradually become a solution for seamless global network coverage. Due to the lower latency and wider signal coverage of LEO satellites, they are superior to geostationary Earth Orbit (GEO) satellites and medium Earth Orbit (MEO) satellites in many application scenarios. With the promotion of projects such as Starlink and OneWeb, LEO satellite communications are in a rapid development stage. However, the dynamic environment of LEO satellite networks has brought new challenges to the transmission layer protocol TCP (Transmission Control Protocol) widely used in the Internet today. The LEO satellite network has many problems, such as frequent satellite handovers, high bit error rates and variable round-trip times, which cause its performance to be significantly reduced. This article summarizes the development history and current status of LEO satellite communications and describes the challenges that LEO satellite communications pose to the transport layer protocol TCP.

Keywords: OneWeb, LEO satellite communications, Starlink, transport layer protocol, internet

* Corresponding Author: Yi-Cheng Chan
E-mail: ycchan@cc.ncue.edu.tw

壹、前言

回顧過去衛星通訊的發展歷程，早在 1990 年代低軌（Low Earth Orbit, LEO）衛星通訊網路的構思就已經浮現。然而當時全球行動通訊（Global System for Mobile Communications, GSM）系統在地面上的覆蓋率逐漸提升，人們能夠在各國漫遊使用行動電話通訊，這對於當時 LEO 衛星的通訊服務構成一大外部挑戰。儘管衛星服務也能夠提供全球通訊，但昂貴的資費卻降低了其使用率。同時火箭發射成本高昂、衛星設計困難、科技技術有限等因素，導致一些公司如鉅衛星（Iridium, n.d.）和全球星（Globalstar, n.d.）對於 LEO 衛星通訊服務的發展以停止告終。

近年來科技領域蓬勃發展，尤其是太空探索技術公司（SpaceX, n.d.-b）所帶來的技術創新。可回收的 Falcon 9 火箭成為焦點，這項技術降低了火箭發射成本，同時推動了 LEO 衛星通訊的發展。再加上衛星設計的小型化，結合可回收的發射技術，單次發射能攜帶更多衛星，降低了建立 LEO 衛星通訊系統的成本，使 LEO 衛星通訊成為可實現的選擇。

在上述技術突破的推動下，LEO 衛星網路通訊進一步彌補了地面 5G 覆蓋率低及訊號易受物體遮蔽影響等問題，成為偏遠地區、天空和海上通訊的理想方案。尤其在近期的俄烏戰爭等地緣政治事件和東加火山爆發等自然災害中，LEO 衛星通訊憑藉其快速部署的特性，維持了災害期間的網路連結，展現出卓越的網路韌性。近期隨著 6G 技術的發展，全球網路通訊正朝無縫覆蓋的目標邁進，LEO 衛星通訊不僅提供了地面基站的備援方案，還更擴大了網路覆蓋率，儼然成為了現代通訊發展的關鍵技術。

反觀臺灣發展衛星的進程，係自 1999 年第一次發射福衛一號到 2023 年 10 月 9 日發射自行設計、製造的獵風者衛星來獲取氣象資料（國家太空中心，n.d.），證明了臺灣擁有自主研發衛星、衛星資料處理與通訊接收的能力；中華電信也於 2023 年 11 月 14 日正式與英國衛星公司 OneWeb 簽署了代理權（江明晏、蘇思云，2023），決定於國內離島、偏遠地區及重要行動通訊節點，建立與核心網路連線所需之衛星後傳網路（Backhaul），確保在緊急狀況下，國內重要通訊仍能正常運行。由此可見臺灣在太空科技不僅具有研發衛星的實力，也積極朝向太空通訊方向發展。

貳、LEO 衛星通訊概述

綜觀人類在衛星通訊的發展歷程中，通訊衛星的概念可追溯自 20 世紀中葉；隨著太空探索的進步，人類開始利用衛星技術進行通訊。1957 年蘇聯成功發射了世界上第一顆人造衛星 Sputnik 1 號進入行星軌道（Humphries, 1980），這標誌著進入太空時代的第一步；1960 年，美國發射了第一顆商用通訊衛星 Echo 1 號，實現了第一次通過衛星進行語音通訊和圖像傳播（Gao, Li, and Shi, 2021），進一步促進了衛星通訊技術的發展。隨著技術不斷進步，通訊衛星的數量和功能不斷擴展，涵蓋範圍也越來越廣泛，從電視轉播到全球互聯網，衛星通訊已成為現代社會不可或缺的一部分，隨後更高的系統傳輸量和更低延遲的需求日益增加，於是應用 LEO 衛星傳輸數據的概念被提出。

通訊衛星依其所處軌道高度進行分類可分為三種系統，如圖 1 所示。其中地球同步軌道

(Geostationary Earth Orbit, GEO) 衛星位於海拔超過 36,000 km 的軌道上，信號範圍較廣，並且與地球自轉同步，因此在移動時保持在地面上固定位置。GEO 衛星主要提供天氣數據、廣播電視和一些低速數據通信服務。另外，中軌道 (Medium Earth Orbit, MEO) 衛星位於海拔約 1,201 ~ 36,000 km 的軌道上，主要用於全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 和其他導航功能。而 LEO 衛星則位於海拔約 160 ~ 1,200 km 的軌道上，由於較低的軌道高度，使得 LEO 衛星具有以下較佳的傳輸條件 (Al-Hraishawi, Chougrani, Kisseleff, Lagunas, and Chatzinotas, 2023; Chotikapong, Cruickshank, and Sun, 2001)：一、較小的傳播延遲：相對於其他衛星系統，由於距離地球表面較近，LEO 衛星的傳播延遲較小，使其適合現代 5G 即時通訊或是互動應用；二、較小尺寸的接收器：LEO 衛星系統使地面站或使用終端能夠使用較小尺寸的接收器，因為軌道高度較低，不需要過大的接收器；三、較廣泛的訊號覆蓋範圍：LEO 衛星系統能夠實現更廣泛的覆蓋範圍，包括高緯度地區，因其地面站設置較為快速，能夠提供更全面的全球網路覆蓋。三種衛星通訊系統參數如表 1 所示。

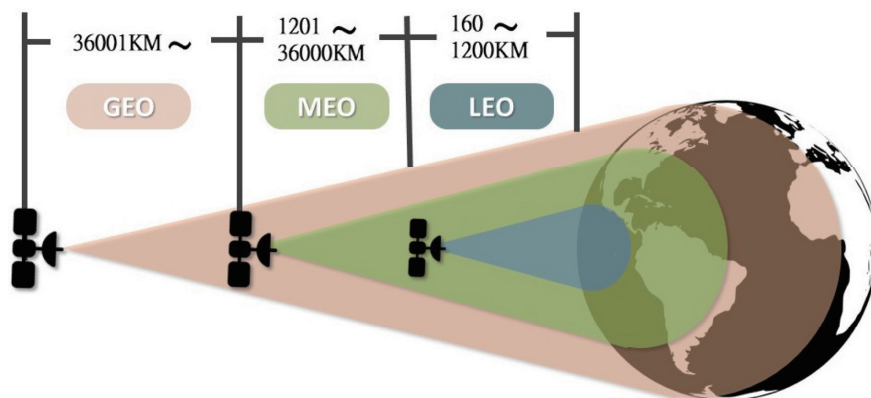


圖 1 不同衛星系統高度與信號範圍示意圖

註：GEO：地球同步軌道 (Geostationary Earth Orbit)；MEO：中軌道 (Medium Earth Orbit)；LEO：低軌道 (Low Earth Orbit)。

資料來源：作者自行研究整理。

表 1 三種衛星通訊系統參數表

參數	GEO	MEO	LEO
軌道週期 (小時)	24	6	1.5
衛星生命 (年)	15	7 ~ 12	5
衛星高度	高	中	低
RTT 往返延遲 (毫秒)	600 ~ 800	125 ~ 250	30 ~ 50
服務範圍	廣	中	窄
全球通訊服務所需衛星	3	6	數百顆
衛星應用	電視訊號廣播 衛星電話	衛星定位 位置導航	對地觀測 衛星通訊

註：GEO：地球同步軌道 (Geostationary Earth Orbit)；MEO：中軌道 (Medium Earth Orbit)；LEO：低軌道 (Low Earth Orbit)。

資料來源：作者自行研究整理。

參、LEO 衛星系統組成架構

LEO 衛星系統整體組成架構由小至大可解構為軌道面（Orbit Plane）、軌道殼層（Shell）以及衛星星座（Satellite Constellations）。軌道面是指由多顆衛星所組成的軌道平面，這些衛星均勻分布在相同的軌道上，並按照預定的軌跡依次運行。每個軌道面上的衛星彼此間保持精確的相對位置，以確保網路覆蓋的穩定性和一致性。軌道殼層是指一組部署在大致相同高度的多個軌道面的集合。為了最大程度的擴展通訊覆蓋範圍，一個殼層中軌道面的分布通常分為三種類型：極軌道（Walker Star）、傾斜（Walker Delta）與混合（Mixed）（Leyva-Mayorga et al., 2022），如圖 2 所示。極軌道殼層中的軌道傾角與赤道垂直，能夠較為完整的繞行至兩個極區，實現真正的全球網路服務；傾斜軌道傾角則小於 60 度，並且不會繞行到極區，服務的範圍考量了更密集的部署在有人口的地區；而混合係綜合上述兩種分布類型，衛星數量最多，覆蓋範圍也更為完整。衛星星座是由多個軌道殼層相互協同運作所組成的衛星群體，其目的是實現廣泛且穩定的全球通訊覆蓋。現今的星座設計進一步增加了衛星數量，以滿足 5G 甚至 6G 時代對低傳輸延遲和大量終端連接的需求，並最大化地覆蓋地球表面，提供更高效的網路服務。

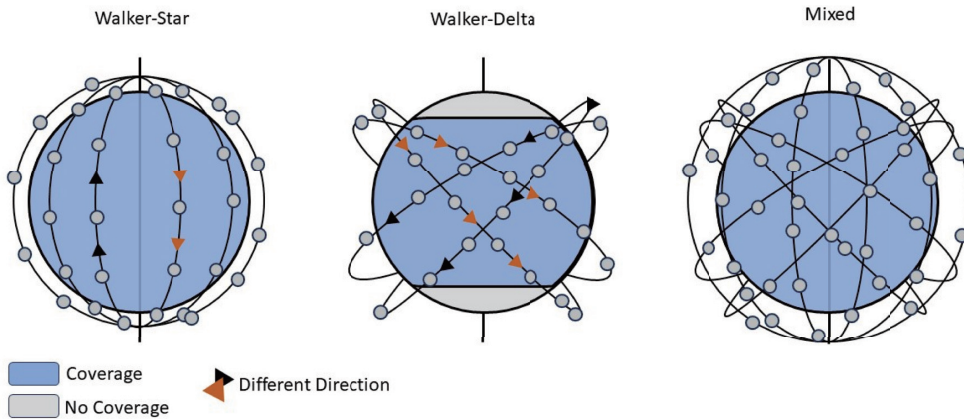


圖 2 極軌道、傾斜與混合殼層運行模式

資料來源：Leyva-Mayorga et al. (2022)。

LEO 衛星系統的傳輸架構由兩種連結組成，分別為使用者裝置（User-Equipment, UE）與衛星的連結，以及衛星之間的連結；前者的連結方式可分為直連與非直連，後者則可被分為彎管連結（Bent-Pipe）與星間連結（Inter-Satellite Connect），以下說明各個連結方式。

UE 與衛星的連結方式分為直連與非直連，直連顧名思義即為地面上 UE（例如：手機），符合 3GPP（3rd Generation Partnership Project）所公布的 NTN（Non-Terrestrial Networks）通訊協定並與通訊衛星直接連結；而非直連方式需要手機先連接於用戶終端（User Terminal, UT）或是大型的地面站，並且透過較大的衛星天線與功率跟可視最小仰角（Elevation Angle）範圍內的通訊衛星形成連結（林佑恩，2023），連結方式如圖 3。

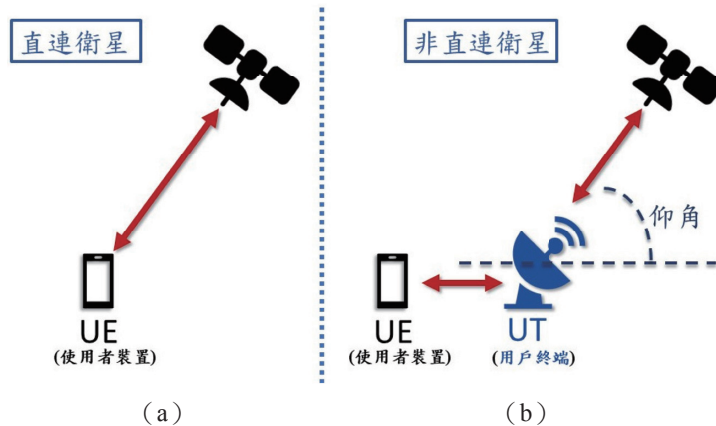


圖 3 (a) 直連、(b) 非直連架構與仰角示意圖

資料來源：林佑恩 (2023)。

衛星之間的連結方式分為彎管連結以及星間連結，彎管連結是一種衛星通訊技術，它指的是當地面設備或終端向衛星發送數據後，衛星攜帶這些數據直到它們可以被轉發至下一個預定的地面站為止。這個過程中，數據會在衛星和地面站之間形成一條類似於「Z」字形的路徑，如圖 4 中的灰色虛線。當數據到達下一個地面站後，它會被該站接收並重新發送到另一顆衛星上，並且持續這種模式直到最終目的地。而星間連結則是直接在衛星間建立無線通訊鏈路，藉此實現高效的數據傳輸，如圖 4 中的紅箭頭實線。

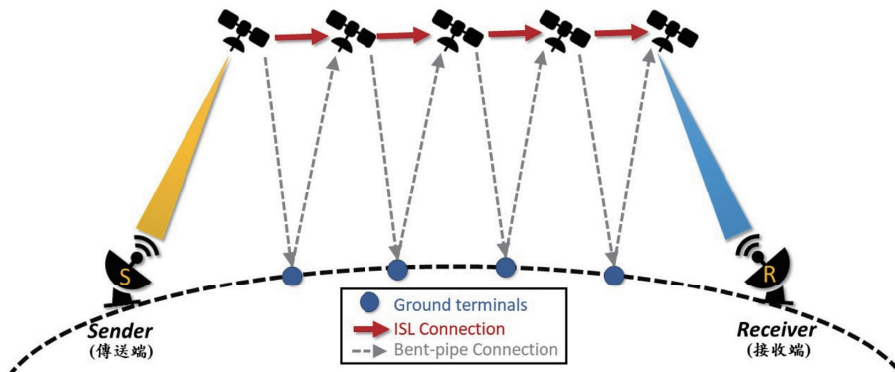


圖 4 彎管連結（灰虛線）與星間連結（紅箭頭實線）示意圖

資料來源：Hauri, Bhattacharjee, Grossmann, and Singla (2020)。

上述星間連結的每顆衛星至少配備了四個星際鏈路 (Inter-Satellite Links, ISL)，這些鏈路使其能夠與鄰近衛星進行連接。這些連接分為兩種類型：同一軌道面內的衛星之間的連接稱為面內星際鏈路 (Intra-Plane ISL)，而連接不同軌道面的衛星則稱為面間星際鏈路 (Inter-Plane ISL)，如圖 5。星間連結與傳統的彎管連結截然不同，在星間連結方式中，數

據傳輸無需反覆通過較低高度的大氣層回到地面，這大大減少了數據遺失的可能性，同時也提高了傳輸速度和傳輸容量（Hauri et al., 2020）。因以上優點，星間連結成為了眾多衛星公司積極追求的發展目標。

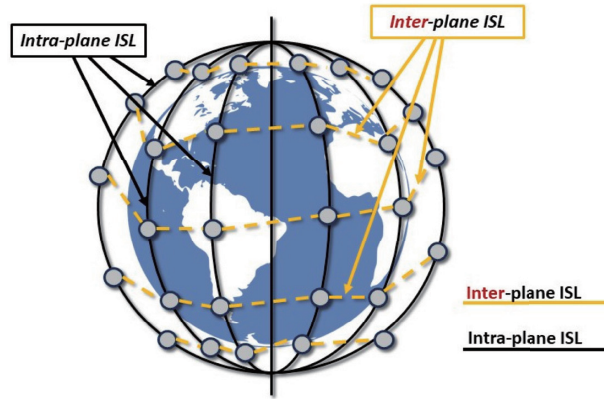


圖 5 Intra-Plane ISL 與 Inter-Plane ISL 示意圖

資料來源：The Network Simulator—ns-2 (n.d.)。

肆、LEO 衛星系統發展歷程

為了瞭解 LEO 衛星系統的發展沿革，我們彙整了從早期的 Iridium 系統到現代的 Amazon Kuiper 計畫等不同架構的 LEO 衛星系統，各系統之發展背景、技術架構和運行模式，最後統整各系統的衛星參數於表 2。

Iridium 衛星系統又稱鉅衛星系統（Fossa, Raines, Gunsch, and Temple, 1998），於 1998 年由 Motorola 公司為提供全球性的移動通訊方案所提出的計畫，起初設計是由 77 顆衛星共同組成，並且部署於離地表 780 km 之上的 7 個軌道面，採用極軌道運行模式。後期減少投資規模，在真正部署時衛星數量降低到 66 顆衛星（Pratt, Raines, Fossa, and Temple, 1999），軌道面降低為 6 個，最後因營運成本過高，再加上當時的衛星技術還未發展成熟，最後導致鉅衛星系統以失敗收場。

隨著火箭發射技術越發成熟，SpaceX 成功研發了可多次重複使用的運載火箭獵鷹 9 號（Falcon 9）（SpaceX, n.d.-a），此舉大幅降低了衛星發射的成本。此外無線通訊天線的持續發展也促進了 LEO 衛星系統的復興。其中由 SpaceX 創辦的 LEO 衛星系統 Starlink，以 Ka、Ku 頻段的衛星來提供服務（del Portillo, Cameron, and Crawley, 2019），採用 Mixed 的軌道運行模式，其發射計畫分為第一代跟第二代星鏈計畫，第一代衛星（v1, v1.5）預計最終發射 1.2 萬顆，現階段已發射多達 4,000 多顆以上的衛星，分別部署在不同高度的軌道面並且組成不同的軌道殼層（Pachler, del Portillo, Crawley, and Cameron, 2021）。從 v1 改良升級後的 v1.5 星鏈衛星具有星間連結功能，也因此提升了整體的傳輸能力；而第二代衛星（v2.0）將由新開發的星艦（Starship）發射系統來做部署（黃國華、王志強，2022），最終希望能

表 2 低軌衛星系統參數彙整

系統名稱	軌道種類	軌道殼層高度 (km)	傾角 (°)	軌道面數量 (p)	衛星總數
Iridium	Walker Star	780	86.4	6	66
Starlink	Mixed	550 (Shell 1)	53.0	72	1,584
		570 (Shell 2)	70.0	36	720
		560 (Shell 3)	97.6	6	348
		540 (Shell 4)	53.2	72	1,584
		560 (Shell 5)	97.6	4	172
OneWeb	Walker Star	1,200	87.9	12	648
Kuiper (預計)	Walker Delta	590	33.0	28	784
		610	42.0	36	1,296
		630	51.9	34	1,156

資料來源：作者自行研究整理。

構成 3 萬多顆衛星的第二代星鏈系統，且目前美國聯邦通訊委員會 (Federal Communications Commission, FCC) 已批准 SpaceX 發射其中的 7,500 顆第二代衛星 (Tung, 2022)。就傳輸能力方面，官方 Starlink 提供了 25 ~ 100 Mbps 的下載速度，5 ~ 10 Mbps 的上傳速度 (Starlink, n.d.)。

OneWeb 是一家全球性的衛星通信公司，總部位於英國，致力於提供無縫的全球通訊網路，以 Ka、Ku 頻段的衛星來提供服務，採用 Walker Star 繞極軌道的運行模式，於 1,200 km 的高空部署 12 個軌道面，總共 648 顆衛星提供全球聯網服務。OneWeb 系統的傳輸能力能夠提供約 50 Mbps 的下載速度以及約 15 Mbps 的上傳速度 (Eutelsat OneWeb, n.d.)。

Kuiper 是由亞馬遜公司提出的 LEO 衛星計畫，預計於 SpaceX 的協助下在三個不同的軌道殼層部署 LEO 衛星，第一層位於海拔 590 km 和 33° 傾角，將容納 28 個平面，每個平面 28 顆衛星；第二層位於海拔 610 km 和 42° 傾角，將分為 36 個平面，每個平面 36 顆衛星；最後，第三層位於海拔 630 km 和 51.9° 傾角，將有 34 個平面，每個平面 34 顆衛星，由於使用的是傾斜軌道運行方式，缺乏高傾角軌道，因此系統無法提供全球覆蓋，換言之 Amazon 將集中提供服務在人口密集的地區。官方文章提及其傳輸速度將高達 400 Mbps (Amazon, n.d.)。

伍、LEO 衛星通信對於傳輸層協定 TCP (Transmission Control Protocol) 之挑戰

TCP 發展多年，為現今網際網路上使用最廣泛的傳輸層協定，其提供了連線兩端 (End-to-End) 可靠的傳輸連接，透過壅塞避免機制能夠自我調適傳輸速度，進而避免中間鏈路因為過多的資料而發生資料壅塞甚至導致網路崩潰，為了符合不同網路服務的特性，已發展出了各式版本的 TCP。如前文所述 LEO 衛星通訊具備了許多優點，然而當 TCP 協定運行於 LEO 衛星網路時，卻面臨了一系列挑戰。目前的 TCP 協定多半是針對相對穩定的地面網路所設計，而 LEO 衛星由於其高速移動的特性，使得地面終端需要頻繁切換服務衛星。此外在通過大氣層時，訊號會受到天氣或物體遮蔽的影響，導致位元錯誤率 (Bit Error Rates, BER) 上升，同時往返時間 (Round Trip Time, RTT) 也因中間資料繞送的路徑不同而時常變化，這些因素對 TCP 協定都構成了不利的影響，限制了其在 LEO 衛星網路中的效能表現，以下說明五項影響 TCP 效能的因素。

一、延遲

LEO 衛星與地球平面的距離雖然相比於其他通訊衛星系統 (GEO, MEO) 有著較為顯著的縮短，但是相比於發展多年的地面網路來說，地面終端與衛星之間的長鏈路連結還是存在著較高的延遲。在 TCP 壅塞控制的慢啟動 (Slow Start) 機制中，傳送端需要確實收到接收端的確認封包後方能增長壅塞窗口來探測網路的可用資源，LEO 衛星的長延遲環境也勢必會導致傳送端需要等待更長的 RTT 來獲取確認封包，慢啟動增長的速度也將會下降。

二、傳輸錯誤率

相比於較為穩定的地面網路，LEO 衛星的連接上會有著較高的 BER，通常是由信號干擾引起，這些干擾可能是因為自然現象的擾動，如大氣或電離層效應以及大樓的遮擋，很可能發生在地面終端與衛星的鏈結 (User Data Link, UDL) 上。對於傳統的 TCP 壅塞控制機制，封包的遺失勢必與網路中瓶頸點發生壅塞有著密不可分的關係，所以當 TCP 應用於 BER 較高的環境時，TCP 無法分辨封包是因為什麼原因所遺失，可能導致 TCP 無謂的降低壅塞窗口，進而引起整體傳輸的效能下降。

三、變動的封包 RTT

在 LEO 衛星的網路環境中，由於衛星的高速移動和頻繁的換手 (Handover) 過程，兩個地面站之間的傳播延遲會隨時間不斷變化。此外衛星之間的連接路徑也可能發生變動，這些因素可能對 TCP 的 RTT 和超時重傳時間 (Retransmission Time Out, RTO) 的準確性產生顯著影響。

四、地面終端與衛星通訊連結的不穩定

UDL 對於地面無線網路的連結來說較為不穩，連結訊號因為透過大氣層的關係，天氣擾動與物體遮擋的機率較高，UDL 也會因此而被破壞。圖 6 說明了 UDL 破壞後可能造成封包失序的到達，導致發生 TCP 誤判封包遺失事件進而導致壅塞窗口下降。傳送端對衛星 A 送出了第 7、8、9 號封包，但是在 T1 時 UDL 因為連結不穩斷開了與衛星的連線，在 T2 時傳送端才又跟另一般層的衛星 D 送出第 7、8、9 號封包，這可能導致第 7、8、9 號封包比還在傳送的第 4、5、6 號封包還要早到達接收端，發生封包失序的問題。

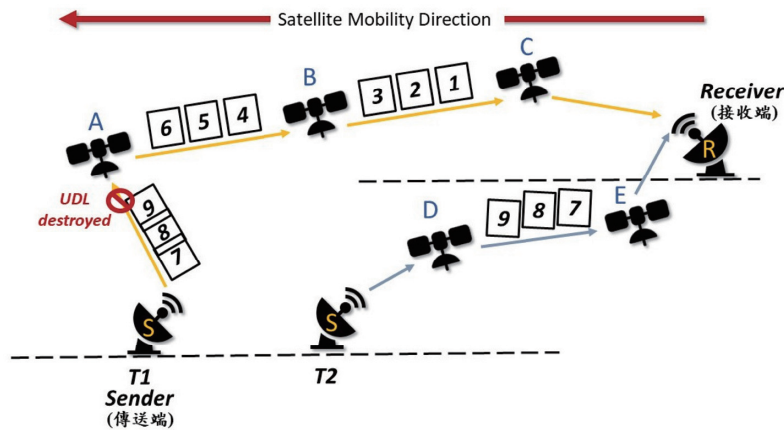


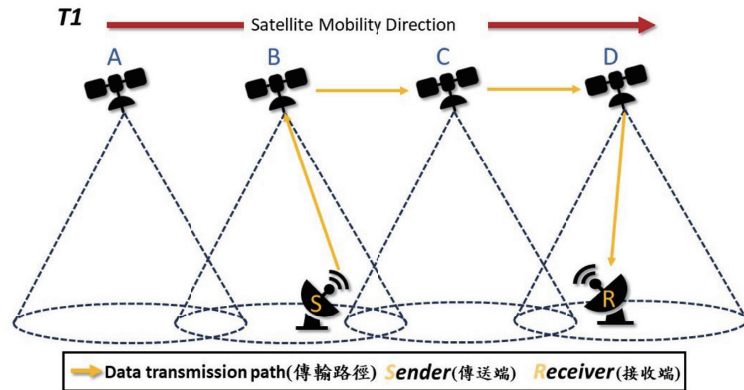
圖 6 UDL 破壞導致封包失序

資料來源：Wang, Wang, Liu, and Chen (2008)。

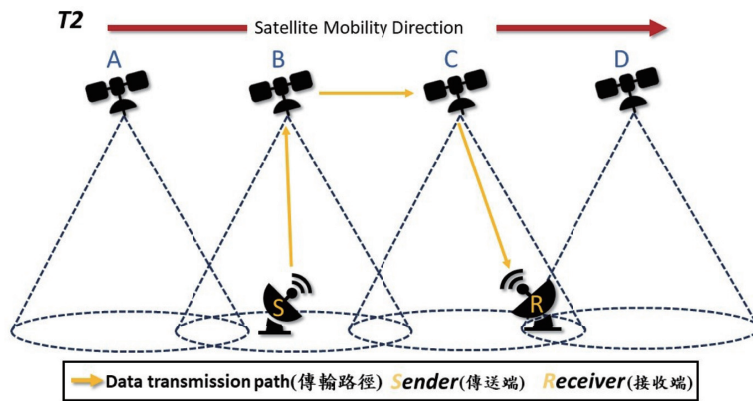
五、衛星換手

為切換服務衛星的特定程序，因為 LEO 衛星以較低的軌道高度環繞地球，相對於地面呈現出快速移動的特性，通常僅需幾小時便可完成一次地球環繞，這也意味著地面終端需要即時切換服務衛星以維持通訊。圖 7 說明了當傳送端與接收端使用 LEO 衛星傳送訊息時，中間連線的跳數 (Hop Count) 將會因為衛星換手的關係而出現伸長或縮短的現象，圖 7 (a) 表示在時間點 T1 時接收端與衛星 D 保持連線，但是到了 T2 時換手到了衛星 C 來維持連線如圖 7 (b)，此時連線的跳數減少，在 T3 時傳送端也進行了換手，從 T2 與衛星 B 連線轉為跟衛星 A 連線如圖 7 (c)，此時連線的跳數增加。從這些圖中可以觀察出，傳送端與接收端都會因為衛星移動的關係產生換手的動作。

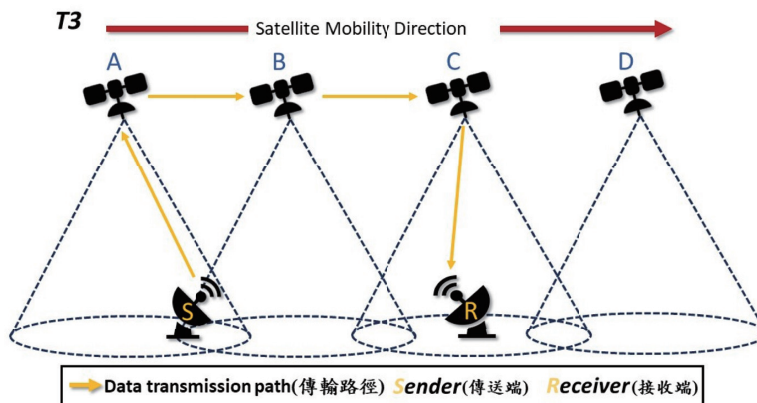
服務衛星的換手可能會導致 TCP 性能下降，當傳送端與接收端整體連線因為換手而縮短後，後面傳送的封包會比先前傳送的封包較快到達接收端，導致失序的問題造成傳輸效能下降。以圖 8 (a) 為例，第 1、2、3 號封包在 T1 時從衛星 C 傳送至衛星 D，但在 T2 時因為接收端換手，從與衛星 D 轉換到了與衛星 C 連線，先前還沒傳送到接收端的第 1、2、3 號封包也因此需要再一次的傳送回衛星 C 才能傳送到接收端，當下後面傳送的第 4、5、6 號封包較早抵達了接收端如圖 8 (b)。



(a) 接收端 R 與衛星 D 連線



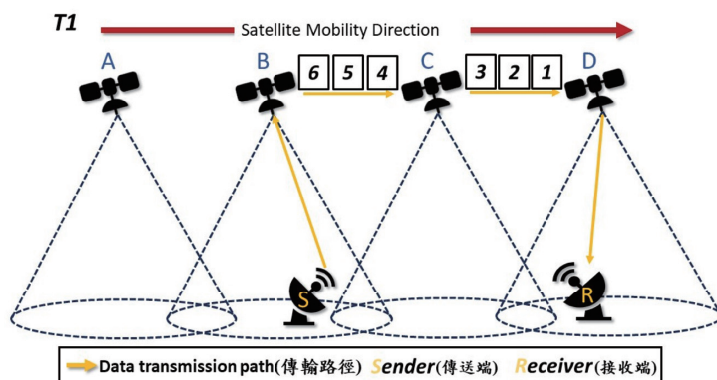
(b) 接收端 R 與衛星 C 連線



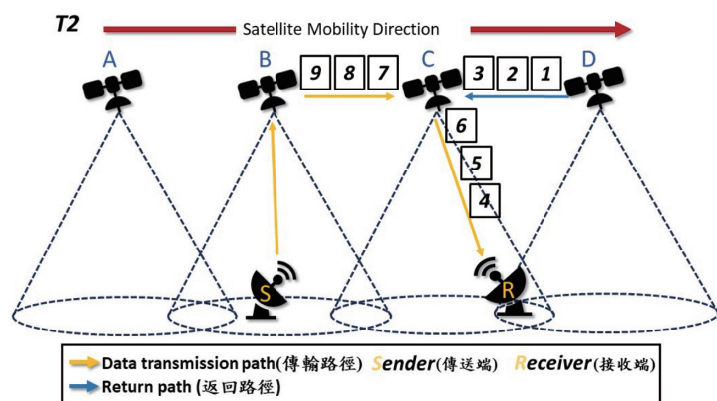
(c) 傳送端 S 與衛星 A 連線

圖 7 低軌衛星換手示意圖

資料來源：Chowdhury, Atiquzzaman, and Ivancic (2006)。



(a) 第 1、2、3 號封包由衛星 C 傳送至衛星 D



(b) 第 1、2、3 號封包由衛星 D 回傳至衛星 C

圖 8 低軌衛星換手導致封包失序示意圖

資料來源：Wang et al. (2008)。

陸、結語

現今 LEO 衛星系統正處於如火如荼的發展階段，此議題是臺灣在加強網路韌性上應當關注的方向。本文描述了 LEO 衛星系統的現況，包括 LEO 衛星的架構、過去到現在的 LEO 衛星系統的發展演進，以及 LEO 衛星相較於其他衛星系統的通訊優勢，此外還整理了 LEO 衛星環境可能對傳輸層協定 TCP 產生影響的原因。本文對 LEO 衛星的整理與討論意在拋磚引玉，希望能激發更多關於 LEO 衛星通訊發展的研究與落實。

參考文獻

- 江明晏、蘇思云，2023 年 10 月 2 日，〈中華電將代理 OneWeb 低軌衛星服務落地臺灣〉，《中央通訊社》，<https://www.cna.com.tw/news/afe/202310020090.aspx>（瀏覽日期：2025 年 4 月 6 日）。
- 林佑恩，2023，〈3GPP NTN 非地面網路通訊技術〉，《電腦與通訊》，196，頁 15-24。
- 國家太空中心，n.d.，〈首頁〉，https://www.tasa.org.tw/index.php?ln=zh_TW（瀏覽日期：2024 年 3 月 14 日）。
- 黃國華、王志強，2022 年 12 月 13 日，〈「星鏈計畫」(Starlink) 現況〉，《CASE 報科學》，<https://case.ntu.edu.tw/blog/?p=41187>（瀏覽日期：2024 年 11 月 18 日）。
- Al-Hraishawi H., Chougrani H., Kisseleff S., Lagunas E., and Chatzinotas S., 2023, “A Survey on Nongeostationary Satellite Systems: The Communication Perspective,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(1), 101-132. doi:10.1109/COMST.2022.3197695
- Amazon, n.d., “Here’s Your First Look at Project Kuiper’s Low-Cost Customer Terminals,” <https://www.aboutamazon.com/news/innovation-at-amazon/heres-your-first-look-at-project-kuipers-low-cost-customer-terminals> (accessed November 11, 2024).
- Chotikapong Y., Cruickshank H., and Sun Z., 2001, “Evaluation of TCP and Internet Traffic via Low Earth Orbit Satellites,” *IEEE Personal Communications*, 8(3), 28-34. doi:10.1109/98.930094
- Chowdhury P. K., Atiquzzaman M., and Ivancic W., 2006, “Handover Schemes in Satellite Networks: State-of-the-Art and Future Research Directions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 8(4), 2-14. doi:10.1109/COMST.2006.283818
- del Portillo I., Cameron B. G., and Crawley E. F., 2019, “A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband,” *Acta Astronautica*, 159, 123-135. doi:10.1016/j.actaastro.2019.03.040
- Eutelsat OneWeb, n.d., “Service Demos Online,” *Vimeo*, <https://vimeo.com/714217132> (accessed August 5, 2024).
- Fossa C. E., Raines R. A., Gunsch G. H., and Temple M. A., 1998, “An Overview of the IRIDIUM (R) Low Earth Orbit (LEO) Satellite System,” in *Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference (NAECON 1998)*, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 152-159. doi:10.1109/NAECON.1998.710110
- Gao Y., Li Y., and Shi P., 2021, “Research Status of Typical Satellite Communication Systems,” in *19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1-3. doi:10.1109/ICOON53177.2021.9563909
- Globalstar, n.d., “Home,” <https://www.globalstar.com> (accessed July 18, 2024).
- Hauri Y., Bhattacharjee D., Grossmann M., and Singla A., 2020, “‘Internet from Space’ without Inter-Satellite Links,” in *HotNets ’20: Proceedings of the 19th ACM Workshop on Hot*

- Topics in Networks*, New York, NY: Association for Computing Machinery, 205-211. doi:10.1145/3422604.342593
- Humphries T., 1980, "Direct Broadcast Satellite (DBS)—A Historical View from Sputnik to Now," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, CE-26(3), xxxii-xxxiv. doi:10.1109/TCE.1980.273349
- Iridium, n.d., "Home," <https://www.iridium.com> (accessed July 18, 2024).
- Leyva-Mayorga I., Soret B., Matthiesen B., Röper M., Wübben D., Dekorsy A., and Popovski P., 2022, "NGSO Constellation Design for Global Connectivity," *arXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.16597> (accessed August 16, 2024).
- The Network Simulator—ns-2*, n.d., <https://www.isi.edu/websites/nsnam/ns/> (accessed October 15, 2024).
- Pachler N., del Portillo I., Crawley E. F., and Cameron B. G., 2021, "An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband," in *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1-7. doi:10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473799
- Pratt S. R., Raines R. A., Fossa C. E., and Temple M. A., 1999, "An Operational and Performance Overview of the IRIDIUM Low Earth Orbit Satellite System," *IEEE Communications Surveys*, 2(2), 2-10. doi:10.1109/COMST.1999.5340513
- SpaceX, n.d.-a, "Falcon 9," <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/> (accessed August 5, 2024).
- SpaceX, n.d.-b, "Home," <https://www.spacex.com> (accessed August 5, 2024).
- Starlink, n.d., "Starlink Specifications," <https://www.starlink.com/legal/documents/DOC-1400-28829-70> (accessed August 5, 2024).
- Tung L., 2022/12/2, "US FCC Clears SpaceX to Launch 7,500 Gen2 Starlink Broadband Satellites," *ZDNet*, <https://www.zdnet.com/home-and-office/networking/us-fcc-clears-spacex-to-launch-7500-gen2-starlink-broadband-satellites/> (accessed July 25, 2024).
- Wang G., Wang J., Liu L., and Chen G., 2008, "Packet Reordering Analysis for LEO Satellite Networks," in *2008 International Conference on Embedded Software and Systems*, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 308-313. doi:10.1109/ICSS.2008.62