

衛星技術與現代戰爭：俄烏戰爭中的應用、挑戰與未來發展

空軍中校 黃俊瑋 空軍上校 林明智

提 要

在俄烏戰爭中，商業衛星成為戰爭中的關鍵資產。烏克蘭利用星鏈等商業衛星系統，不僅實現了精確打擊，還確保了戰場通信和導航的穩定。這些商業衛星提供的即時數據使烏克蘭能夠快速調整戰術，並有效協調前線和後方行動，對俄羅斯的補給線和防禦設施造成了巨大損害。此外，SpaceX在克里米亞地區限制星鏈服務的決策揭示了私營企業在軍事行動中對技術應用的控制權和自主權，這種現象顯示出商業衛星的技術應用在國際軍事行動中引發了新的複雜性和挑戰。美俄在戰爭中的太空克制也體現出對太空資產的戰略敏感性，雙方避免使用反衛星武器進行破壞，以防止衝突升級，這反映了現代戰爭中避免全面對抗的戰略考量。隨著衛星技術的快速商業化，未來商業衛星的軍事應用潛力將愈加顯著，可能改變全球戰略格局。對台灣而言，俄烏戰爭帶來了寶貴的啟示：商業衛星技術可強化國防和通訊韌性，尤其在當前的地緣政治局勢下，台灣可藉由加強低軌衛星建設，確保在緊急情況下維持通信穩定，增強應變中共軍事威脅的能力。

關鍵詞：衛星技術應用、太空軍事戰略、商業衛星通訊、太空戰爭升級風險、指揮與控制系統

前 言

衛星技術在現代軍事行動中發揮了至關重要的作用，尤其是在俄烏戰爭中展現了前所未有的影響力。烏克蘭軍隊充分利用商業衛星技術來提升戰場作戰能力，¹尤其是衛星通信和導航的應用，使其在

面對俄羅斯軍事力量時保持了穩定的戰略優勢。星鏈系統提供的衛星通信，幫助烏克蘭在戰場上實現了快速的戰術部署和指揮協調，避免了傳統通信設施在電子戰中的脆弱性。由於星鏈系統能夠在全球範圍內提供低軌道衛星網路，²烏克蘭得以在網路攻擊和電子干擾中依然保持強

1 Amritha Jayanti, "Starlink and the Russia-Ukraine War: A Case of Commercial Technology and Public Purpose?", "Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, Mar.9,2023, <<https://www.belfercenter.org/publication/starlink-and-russia-ukraine-war-case-commercial-technology-and-public-purpose>>(檢索日期：2024年10月2日)

2 "SATELLITE TECHNOLOGY," Starlink Homepage ,2024, <<https://www.starlink.com/technology>>(檢索日期：2024年10月2日)



大的通信能力。這種穩定且抗干擾的通信網路使烏克蘭軍隊能夠在前線戰場上進行精確打擊，並與後方保持緊密聯繫，這在赫爾松戰役中表現得尤為明顯，烏克蘭利用衛星支持的無人機成功打擊俄羅斯的關鍵後勤設施，削弱了俄軍的進攻能力。這種衛星支持的戰術使得烏克蘭得以在面對兵力和裝備相對強大的俄軍時，依然能夠保持靈活性和戰鬥力，這充分展現了商業衛星技術在現代戰爭中的潛力和價值。³ 儘管如此，衛星技術的應用也伴隨著挑戰和風險，特別是在俄羅斯反衛星武器系統的威脅下。俄羅斯已多次測試其反衛星武器，這種技術包括動能攔截器和定向能量武器，旨在摧毀敵方的衛星或使其無法正常運行。這一威脅使得衛星技術的應用變得更加複雜，尤其是在衛星資源成為戰爭中的關鍵因素時，如何保護衛星免受攻擊成為各國軍事戰略的首要考量。美國和俄羅斯之間對反衛星技術的克制行為也展現了大國對太空戰爭升級風險的深刻認識，特別是雙方在涉及核指揮與控制系統的衛星時，都避免進行破壞性行動。摧毀衛星不僅會造成地球軌道中的太空碎片，對其他國家的衛星構成長期威脅，還可能被視為挑釁行為，從而引發更大規模的軍事衝突。因此，俄烏戰爭中的經驗顯示，各國在使用反衛星技術時必須謹慎行事，並考慮到太空碎片的風險以及太空戰爭升級的

潛在後果。除了衛星通信和反衛星威脅之外，衛星技術在情報收集和監視方面的應用也變得尤為重要。烏克蘭軍隊能夠依靠美國提供的商業衛星數據進行精確打擊，這些衛星數據包括高解析度的衛星影像和合成孔徑雷達數據，這使得烏克蘭能夠精確掌握俄羅斯軍隊的部署和行動。這些實時資訊大大提升了烏克蘭的戰場態勢感知能力，使其能夠在戰略上取得更大的優勢。烏克蘭軍隊的精確打擊行動，特別是針對俄軍後勤補給線的打擊，成功削弱了俄軍的進攻力量，這一切都得益於衛星技術的支持。未來，隨著衛星技術的進一步發展，商業衛星將在全球軍事行動中扮演更為重要的角色。然而，這也帶來了一些新的挑戰，尤其是私營企業在軍事行動中的自主決策能力。例如，SpaceX在烏克蘭戰爭中的自主決策曾引發爭議，該公司拒絕在克里米亞上空啟動星鏈系統，這一決策影響了烏克蘭的軍事行動，並反映出商業企業在現代戰爭中的戰略自主權。這一情況表明，私營企業在未來的軍事行動中將扮演更加複雜的角色，其決策將直接影響戰爭的進程和結果。隨著衛星技術的快速進步和商業化進程的加速，國家與私營企業之間的協調將成為確保軍事行動成功的關鍵。

衛星技術在現代戰爭中的角色

3 Christopher Miller, Mark Scott and Bryan Bender, "How Elon musk's space satellites changed the war on the ground," POLITICO, June 8, 2022, < <https://www.politico.eu/article/elon-musk-ukraine-starlink/> > (檢索日期：2024年10月2日)

一、衛星技術的重要性

衛星技術在現代軍事中的角色已經成為決定性因素(如表1)，尤其體現在情報、監視、偵察 (ISR)、⁴通信以及定位、導航和定時 (PNT) 的應用中。⁵衛星技術的應用已經變得至關重要，特別是在精確打擊、無人機操作及通信傳送方面。偵察衛星可以通過多種高解析度相機和雷達等傳感器，提供即時戰場情報、導彈預警、地圖繪製和天氣監測功能，這對於指揮官迅速作出戰術決策和調整行動具有關鍵作用。通信衛星則能確保戰場中遠程部隊的高效協作，並且還支援無人機的遠程操作，實現更加精確的打擊目標。定時衛星如 GPS，⁶為部隊提供定位與導航，並且支持精確制導武器進行精確打擊。2023年，俄烏戰爭展示了商業衛星在現代戰場上的突出作用，尤其是SpaceX的星鏈低

軌衛星網路，通過保障烏克蘭軍事通信的穩定性，⁷成為烏克蘭抵禦俄羅斯網路攻擊和電子干擾的關鍵力量。

烏克蘭依賴這一系統保持前線與後方的即時聯繫，並通過衛星支持的無人機操作(如圖1)，顯著縮短作戰反應時間，有效提升了烏克蘭對俄軍的精確打擊能力。

這一技術使得烏克蘭能夠在缺乏國家級衛星資源的情況下，仍然維持對戰場態勢的掌握，並精確識別和打擊俄軍的補給線與重要設施。中共對俄烏戰爭中星鏈系統的應用進行了深入研究，認為低地軌衛星在現代戰爭中的潛力巨大，並進一步加強了自身的低軌衛星技術發展。中共的北斗系統在2024年進一步挑戰美國主導的全球定位系統(GPS)，⁸並整合到其軍事通訊和導航系統中，這使得中共軍隊能夠在

4偵察 (ISR) 指的是「情報、監視與偵察」(Intelligence, Surveillance, Reconnaissance)，它是現代軍事行動中關鍵的功能之一，透過衛星、無人機、地面傳感器等技術手段來搜集並分析目標區域的情報，監視敵軍行動，並進行偵察。

5「定位、導航與定時 (PNT)」系統是現代軍事和民用技術中的核心技術之一，尤其在衛星導航中扮演著重要角色。PNT 是透過衛星技術來提供精確的地理位置(定位)、路徑規劃和運動控制(導航)，以及時間同步(定時)服務。這些功能對軍事行動中的武器控制、作戰計劃、物流調度等至關重要。全球定位系統(GPS)是目前最常用的 PNT 系統，但中國的北斗系統(BDS)、歐盟的伽利略系統、俄羅斯的 GLONASS 也是重要的 PNT 系統。

6 GPS(全球定位系統)是一種基於衛星的導航系統，能夠在任何天氣條件下提供地球表面或附近的精確位置和時間資訊。該系統最初由美國國防部開發，並於1995年全面運行。GPS系統由至少24顆衛星組成，它們繞地球運行並發送精確的微波信號給GPS接收器。這些信號允許接收器通過多顆衛星的三角定位來確定其精確的地理位置(經度、緯度和高度)、速度和時間。

7 Alex Horton And Serhii E Korolchuk, "Starlink is utterly essential in Ukraine — which further complicates Elon Musk's role," Stars and Stripes, Sep.9,2023, <<https://www.stripes.com/theaters/europe/2023-09-09/ukraine-starlink-elon-musk-role-11317144.html>>(檢索日期：2024年10月10日)

8 楊幼蘭，「雪恥！陸北斗挑戰美GPS系統已有贏面」，中時新聞網，2024年9月7日，<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240907001839-260417?chdtv> (檢索日期：2024年10月10日)



表1 衛星技術在現代軍事中相關因素表

軍事行動	衛星技術的應用	使用武器	軍事行動資訊
第一次波灣戰爭	GPS 導引、ISR 衛星	AGM-86 巡航導彈、MGM-140 ATACMS 戰術導彈	在波灣戰爭中，GPS 系統的首次大規模應用使得美軍能夠對伊拉克軍事設施進行精確打擊，尤其是使用 AGM-86 巡航導彈進行長距離攻擊。MGM-140 ATACMS 戰術導彈則利用 GPS 精確導航摧毀地面部隊和固定設施。同時，ISR 衛星持續監控伊拉克軍隊的動態，提供即時的戰場情報，這顯著提升了聯軍的決策速度與準確性，進一步壓制了伊拉克的防空系統。
科索沃戰爭	ISR 衛星、精確打擊、通信衛星	AGM-154 JSOW 精確導彈、B-2 轟炸機	北約部隊在科索沃戰爭中依賴 ISR 衛星對南斯拉夫軍隊進行實時監控，確保空中打擊的精準度。B-2 隱形轟炸機攜帶的 AGM-154 JSOW 精確導彈通過衛星導航系統進行目標定位，實現精確摧毀重要的敵軍指揮設施和防空陣地。通信衛星則保障了北約內部的協調與指揮控制，實現了多國聯軍的無縫合作與即時決策。這是首次使用衛星技術與隱形空中打擊結合的戰爭。
第二次波灣戰爭	ISR 衛星、通信衛星、GPS 導引	JDAM 精確制導炸彈、Predator 無人機	美軍在第二次波灣戰爭中進一步擴展了衛星技術的應用。JDAM 精確制導炸彈利用 GPS 導航系統對目標進行精確定位，攻擊重要軍事基礎設施。Predator 無人機在 ISR 衛星的支持下，實施了高效的戰場偵察和遠程打擊。通信衛星則保障了指揮系統的全球運營，讓多個戰區的指揮官能實時交流情報，迅速制定作戰計劃，並執行遠程精確攻擊。
敘利亞內戰	ISR 衛星、精確打擊	Kh-555 巡航導彈、Su-34 攻擊機	俄羅斯在敘利亞內戰中利用 ISR 衛星對反政府武裝進行精密監控，特別是在巷戰和城市攻堅戰中。Kh-555 巡航導彈通過衛星導航系統對戰略目標進行遠程精確打擊，Su-34 攻擊機則依靠衛星提供的即時情報進行高效打擊行動，尤其針對反政府武裝的戰略設施和武器儲備。
以巴衝突	高解析度 ISR 衛星、精確打擊	Rafael Spike 精確導彈、鐵穹防空系統	以色列在加沙衝突中利用高解析度 ISR 衛星對哈馬斯武裝分子的行動進行精密監控，特別是在地下隧道網路的運作中。Rafael Spike 精確導彈依賴衛星提供的即時情報進行精確打擊，成功摧毀哈馬斯的火箭發射設施和地下設施。鐵穹防空系統則利用衛星和雷達技術攔截來襲火箭，實現了極高的攔截成功率，有效保護以色列城市和軍事基地。

資料來源：1. 許劍虹，「波灣戰爭30週年：「沙漠風暴」空中作戰成功，讓「空權無用論」從此消失」，關鍵評論，2021年2月27日，<https://www.thenewslens.com/article/147626>（檢索日期：2024年10月10日）
2. 丁世傑，「北約1999年轟炸南斯拉夫 他現身指控非法不道德」，中時新聞網，2022年3月26日，<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20220326002023-260407?chdtv>（檢索日期：2024年10月10日）
3. 作者自行綜整資料製表。

更廣泛的戰場環境中有效作戰。同時，中共持續發展反衛星技術，特別是針對低軌衛星的防禦與攻擊能力，以期在全球太空軍事競爭中取得更大優勢。俄羅斯方面，雖然在衛星技術上落後於美國和中共，但其反衛星技術研發進展顯著。俄羅斯已進

行多次反衛星武器測試，針對低軌道衛星進行攻擊，並開發了動能武器與電子干擾系統，以削弱對手的衛星優勢。⁹然而，專家警告這些技術帶來的太空碎片問題，可能會對全球衛星網路的安全構成長期威脅，並進一步加劇太空領域的軍事競爭。

⁹ Simone McCarthy, "China and Russia are in a counterspace race to disrupt it" CNN, May 27, 2024, < <https://edition.cnn.com/2024/05/27/china/counterspace-us-china-russia-intl-hnk-scn/index.html> > (檢索日期：2024年10月10日)



圖1 烏軍用星鏈通訊系統操作無人機攻擊影像

資料來源：Stars and Stripes，2023年9月9日，<https://www.stripes.com/theaters/europe/2023-09-09/ukraine-starlink-elon-musk-role-11317144.html>

提升戰場的監視和打擊能力。然而，這也增加了國際間的軍備競賽風險，尤其是反衛星武器技術的發展。未來，國際社會在太空軍備競賽與技術升級風險管理上的平衡將成為一個關鍵議題，而商業衛星的快速崛起將繼續重塑傳統的太空戰爭格局。

商業衛星的崛起不僅改變了全球太空實力的分佈，還對無衛星國家的軍事行動產生了重大影響。以SpaceX的星鏈為例，其系統提供的高效、低成本通信支援，使得許多無衛星資源的國家能夠依賴這些服務，在戰爭中實現作戰優勢。然而，商業企業在戰爭中的自主性也帶來了一定的挑戰。2023年，SpaceX拒絕在克里米亞上空啟動星鏈的決策，展示了私營企業在戰爭中的戰略自主權，這一決定對戰爭行為和軍事策略產生了直接影響。這暴露出商業衛星在軍事行動中的雙重角色，既是軍事支持力量，又可能對作戰策略造成影響。隨著衛星技術的快速發展，各國將持續擴展其在太空中的影響力，進一步

二、俄烏戰爭背景

俄烏戰爭背景主要可追溯至長期的地緣政治衝突，特別是俄羅斯與西方國家在烏克蘭影響力的角力。自1991年蘇聯解體以來，烏克蘭逐漸與西方靠攏，表現出加入北約和歐盟的意圖。¹⁰然而，這一過程被俄羅斯視為對其勢力範圍的嚴重威脅，認為北約的東擴將使其在地區安全中處於不利地位。2014年，俄羅斯運用軍事力量強勢收回克里米亞，¹¹並公開支持烏克蘭東部的親俄分裂勢力，導致持續的武裝衝突。2022年2月，俄羅斯進一步升級了衝突，發動對烏克蘭的全面攻擊，並稱其為「特別軍事行動」。¹²這場俄烏近年來的衝突(如表2)惡化演變為西方國家與

10 Andreas Noll, 「昔日夥伴、今日對手：烏克蘭與俄羅斯關係何以發展至此」，關鍵評論，2020年2月19日，<https://www.thenewslens.com/article/162949> (檢索日期：2024年10月10日)

11 黃楷元，「2014克里米亞「混合威脅」 寫戰爭史新頁」，mnews.鏡新聞，2022年2月23日，<https://www.mnews.tw/story/20220223rep008> (檢索日期：2024年10月10日)

12 包國宏，「俄烏戰爭對防衛作戰之啟示：游擊戰理論與實踐」，國防雜誌，第三十八卷第一期(2023年3月)，頁27-45。



表2 烏克蘭與俄羅斯的重大事件表

年份	重大事件	詳細描述
1991 年	烏克蘭獨立	隨著蘇聯的解體，烏克蘭於 1991 年 8 月 24 日宣布獨立，並在 12 月的全民公投中得到超過 90% 的支持。烏克蘭成為獨立國家，並開始尋求與西方國家的合作。
2004 年	橙色革命	由於 2004 年總統選舉舞弊，維克多·尤先科的支持者發動大規模抗議，最終在國際壓力下重新選舉，尤先科成功當選，該革命象徵著烏克蘭親西方力量的崛起。
2010 年	維克多·亞努科維奇當選	亞努科維奇當選後轉向親俄政策，試圖推進與俄羅斯的更緊密關係，引發國內反對，烏克蘭的內政逐步分裂為親西與親俄兩大陣營。
2013-2014 年	歐盟廣場抗議運動	當亞努科維奇拒絕簽署與歐盟的聯合協議後，大規模親歐盟抗議爆發。2014 年，亞努科維奇逃往俄羅斯，親西方勢力控制烏克蘭政府，促成了國內局勢的深刻變革。
2014 年	克里米亞併入俄羅斯	2014 年 3 月，俄羅斯在未經國際承認的情況下佔領並吞併了烏克蘭的克里米亞半島，並隨即進行公投，這一行動引發了國際制裁，也導致烏俄關係惡化。
2015 年	明斯克協議	在德國和法國的斡旋下，烏克蘭、俄羅斯和頓巴斯分離主義勢力簽署停火協議。雖然該協議標誌著外交努力的高潮，但無法穩定實現長期和平。
2019 年	沃洛德米爾·澤連斯基當選烏克蘭總統	澤連斯基以壓倒性優勢當選，承諾打擊國內腐敗，恢復經濟，並解決與俄羅斯的衝突。他的領導強化了烏克蘭向歐盟和北約靠攏的政策。
2021 年	俄羅斯軍事集結	俄羅斯在烏克蘭邊境進行大規模軍事集結，準備發動進一步的軍事行動，這導致了全球對烏俄局勢的緊張關注。
2024 年	俄烏衝突持續	戰爭進入第三年，俄烏兩國均面臨重大損失，國際社會呼籲和平，但停火或和談尚未達成一致。

資料來源：1. 「俄羅斯入侵烏克蘭：歷史學家梳理20世紀烏克蘭歷史上六個關鍵節點」，BBC NEWS 中文，2022年3月9日，<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/world-60661810>（檢索日期：2024年10月10日）
2. 「烏克蘭危機：解讀頓巴斯、明斯克協議、北溪二號等五個關鍵詞」，BBC NEWS 中文，2022年3月1日，<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/world-60555056>（檢索日期：2024年10月10日）
3. 作者自行綜整資料製表。

俄羅斯的代理人現代戰爭。尤其在美國為首的北約，通過提供大量高科技裝備，改變了戰場格局，其中衛星技術的應用成為了戰爭中的關鍵因素之一。在俄烏戰爭中，衛星技術的重要性得到了充分體現。俄羅斯試圖通過網路攻擊和電子干擾破壞烏克蘭的衛星通信網路，以削弱其指揮和控制能力。然而，烏克蘭依賴美國及其盟友提供的商業衛星網路，尤其是SpaceX的星鏈系統，來維持通信和戰場協調。2022年3月，當俄羅斯針對烏克蘭的通信

基礎設施發動大規模網路攻擊時，烏國副總理兼數位轉型部長費多羅夫向馬斯克求助，要求提供星鏈衛星服務，以確保戰時的通信暢通。馬斯克迅速響應，提供了星鏈終端設備，並對衛星系統進行了調整，以確保在烏克蘭上空有穩定的衛星信號。¹³這些衛星能夠提供穩定且抗干擾的高速互聯網服務，使烏克蘭的軍隊能夠保持前線與後方的即時通信。星鏈系統的部署在烏克蘭戰爭中發揮了關鍵作用，尤其是在抵禦俄羅斯的網路攻擊和電子干擾方面。

13 許智翔，「【韜略談兵】低軌衛星 戰場新防線」，青年日報，2024年3月14日，<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1659357>（檢索日期：2024年10月10日）

該系統不僅使烏克蘭軍隊能夠在前線保持通信，還支持無人機的遠程操作，這大大縮短了烏軍的反應時間，提升了精確打擊能力。2024年10月，烏克蘭再次利用商業衛星提供的數據，精確定位了俄軍在克里米亞的一個主要石油碼頭，並進行了精準打擊，成功摧毀了俄軍的油料補給，這一行動顯著削弱了俄軍的進攻能力。¹⁴俄烏戰爭不僅展示了衛星技術在通信和監視中的作用，也顯示出其在戰場上對精確打擊的貢獻。烏克蘭通過商業衛星技術的支持，能夠持續獲取戰場情報，尤其是低地軌道衛星的廣泛應用，仍然能夠利用這些外部技術資源保持戰場優勢。

衛星技術在俄烏戰爭中的具體應用

一、情報收集與監視

在俄烏戰爭中，烏克蘭高度依賴衛星技術進行情報收集和監視，以保持對俄羅斯軍隊行動的精確掌握，這在戰場態勢感知和戰術反應中發揮了關鍵作用。烏克蘭並不擁有大規模的國家衛星資源，但通過與多家商業衛星公司合作，特別是利用

美國的Maxar Technologies和Planet Labs等公司提供的高解析度影像，成功實現了對俄軍動態的精確監控。具體而言，在2022年，Maxar Technologies每天為烏克蘭提供從太空拍攝的高解析度影像(如圖2)，¹⁵這些影像能夠清晰顯示俄羅斯軍隊的部署情況、車輛移動、武器裝備和補給線。在戰爭初期，這些衛星圖像幫助烏克蘭成功辨識了俄羅斯軍隊對基輔的進攻準備，包括俄羅斯軍隊的坦克集結以及供應車隊的路線。

透過這些衛星數據，烏克蘭能夠提前準備防禦，部署反擊策略，並針對俄羅斯的關鍵補給線發動襲擊，有效削弱了俄軍的戰鬥力。另外，Planet Labs的小型衛星座每日提供更新的衛星影像，¹⁶幫助烏克蘭持續跟蹤俄羅斯軍隊的移動。這些商業衛星數據使烏克蘭能夠將情報整合到其指揮和控制系统中，從而迅速做出決策並優化部隊的部署。例如，當俄羅斯軍隊在赫爾松地區建立防禦工事時，烏克蘭依靠衛星數據精確鎖定了俄軍的陣地，並對其後勤設施進行了精確打擊。這些行動有效地削弱了俄軍的後勤支援，使其進攻能

14 Illia Novikov and Hanna Arhirova, "Ukraine strikes a Russian oil hub as Zelenskyy says the war is in 'a very important phase'," AP, October 7, 2024, < <https://apnews.com/article/russia-ukraine-war-crimea-oil-terminal-1d78b9819d1c4680a3flab8b34a24a6a>>(檢索日期：2024年10月10日)

15 Maxar Technologies 是一家美國領先的太空技術公司，專門提供高解析度衛星影像、地理空間數據和太空基礎設施服務。該公司在全球衛星影像市場中具有重要地位，其衛星能夠拍攝到地球表面的精確影像，廣泛應用於國防、情報、環境監測、基礎設施規劃等領域。

16 Planet Labs 是一家專門從事小型衛星(CubeSat)設計與運營的美國公司，致力於提供高頻率、全球性衛星影像服務。該公司擁有數百顆小型衛星座，這些衛星能夠每日對地球表面進行覆蓋和拍攝。這些衛星影像廣泛應用於農業、環境監測、城市規劃、災難救援及軍事情報收集等領域。



圖2 Maxar Technologies提供烏克蘭布查鎮高解析度影像

資料來源：Via Satellite，2022年10月24日，<https://interactive.satellitetoday.com/via-november-2022/how-satellite-imagery-magnified-ukraine-to-the-world>。

力受到了嚴重削弱。衛星技術在這場戰爭中不僅增強了烏克蘭的情報能力，也顯示出其在現代戰爭中的不可或缺性。

二、精確打擊與無人機操作

在俄烏戰爭中，衛星技術顯著提升了烏克蘭的精確打擊和無人機(如表3)操作能力，這成為了現代戰爭中運用衛星技術的典型示例。烏克蘭軍隊依賴商業衛星提供的高解析度影像，來精確識別俄羅斯軍隊的位置、補給線以及關鍵設施。這些衛星數據被整合到烏克蘭的指揮和控制系統中，2023年烏克蘭使用衛星技術與無人機進行了更大規模的軍事行動，包

括針對俄羅斯海軍艦隊的精確打擊，成功摧毀了多艘俄軍艦艇，進一步削弱了俄羅斯在黑海地區的軍事力量。

¹⁷2024年，烏克蘭的精確打擊能力得到了進一步提升，主要歸功於衛星技術全面應用和無人機操作的快速發展，¹⁸極大縮短了戰場反應時間，這使烏克蘭在戰場上能夠保持高度的靈活性和戰術優勢。根據2023年5月的數據，烏克蘭軍隊每月大約損失一萬架無人機。¹⁹這些案例展示了衛星技術在現代戰爭中的核心價值，還為無人機操作提供了關鍵支持。

三、商業衛星的貢獻

在俄烏戰爭中，商業衛星技術，尤其是SpaceX提供的星鏈系統，成為烏克蘭軍隊維持戰場通信和進行戰術協同的關鍵技術。自2022年俄羅斯特別軍事行動以來，烏克蘭的通信基礎設施受到了

17 Roman Romaniuk, " Sea drones, Elon Musk, and high-precision missiles: How Ukraine dominates in the Black Sea " Ukrainska Pravda, Jan 1, 2024, < <https://www.pravda.com.ua/eng/articles/2024/01/1/7435326/>>(檢索日期：2024年10月14日)

18 Mithil Aggarwal and Max Butterworth, " Satellite images show Russian setbacks: Arms depots hit by Ukraine and a failed missile test " NBC NEWS, Sept. 24, 2024, < <https://www.nbcnews.com/news/world/satellite-images-russia-arms-depot-ukraine-strikes-missile-test-failed-rcna172383>>(檢索日期：2024年10月14日)

19 Nicholas Slayton, " Report: Ukraine is losing 10,000 drones per month " TASK&PURPOSE, May 20, 2023, < <https://taskandpurpose.com/news/ukraine-10000-drone-losses/>>(檢索日期：2024年10月14日)

表3 俄烏戰爭中主要無人機相關數據表

型號	圖片	用途	續航時間	最大射程	最大速度	其他
TB2 (Bayraktar)		監視、打擊	27 小時	150 公里	222 公里 / 時	衛星通信、GPS 導航
Switchblade 300		自殺式攻擊	約 40 分鐘	10 公里	100 公里 / 時	便攜式，適合快速部署
Phoenix Ghost		自殺式攻擊、偵察	約 6 小時	約 50 公里	100 公里 / 時	具備偵察和打擊雙重功能
Warmate		自殺式攻擊	70 分鐘	30 公里	150 公里 / 時	可攜帶多種不同彈頭，適應性強
Shahed-136		自殺式攻擊	12 小時	2,500 公里	185 公里 / 時	低成本、遠程，主要用于自殺攻擊
Punisher		輕型攻擊	2-3 小時	45 公里	200 公里 / 時	適合輕型打擊，快速反應
Orlan-10		偵察、電子戰	16 小時	120 公里	150 公里 / 時	具備電子干擾和偵察能力，抗干擾性強

資料來源：1.Franz-Stefan Gady," How an Army of Drones Changed the Battlefield in Ukraine, " ANALYSIS, December 6, 2023, <<https://foreignpolicy.com/2023/12/06/ukraine-russia-war-drones-stalemate-frontline-counteroffensive-strategy/>>(檢索日期：2024年10月10日)
2.陳亦偉，「俄烏戰場啟示 無人機滿天飛戰車不再吃香」，中央社，2024年9月10日，<https://www.cna.com.tw/news/aopl/202409140093.aspx> (檢索日期：2024年10月10日)
3.作者自行綜整資料製表。

嚴重破壞，傳統的通信手段幾乎全部癱瘓，然而，星鏈系統憑藉其低地球軌道衛星網路，為烏克蘭提供了即時、穩定且可靠的通信保障，確保了戰場上指揮和控制系統的有效運行。星鏈成功確保了烏克蘭前線部隊和指揮中心之間的穩定通

信，這對基輔的防禦戰起到了至關重要的作用。星鏈的技術優勢在於其低地球軌道衛星能夠提供高帶寬、低延遲的互聯網服務，這使得它能夠在戰場複雜的電子干擾中依然保持通信暢通，²⁰這對於前線和指揮部之間的協同作戰起到了至關重要的作

20 Nick Paton Walsh, Alex Marquardt, Florence Davey-Attlee and Kosta Gak," Ukraine relies on Starlink for its drone war. Russia appears to be bypassing sanctions to use the devices too" CMM, March 26, 20 接續於下頁。



用，烏克蘭軍隊通過這一系統能夠快速傳遞戰場資訊並及時調整戰術部署。星鏈系統不僅提供了通信支持，還在精確打擊和無人機操作中發揮了重要作用。烏克蘭依賴於商業衛星提供的高解析度圖像來監控俄羅斯軍隊的部署、後勤補給線和戰場動態，這些數據幫助烏克蘭成功發動了一系列針對俄羅斯戰略設施的精確打擊行動。2024年9月，烏克蘭軍隊通過商業衛星數據發動了一次精確打擊，成功摧毀了俄羅斯位於克拉斯諾達爾的一個存放無人機的倉庫，²¹這一行動大大削弱了俄軍的無人機作戰能力，對其進攻進程產生了深遠影響。無人機作戰方面，星鏈與烏克蘭的無人機技術實現了深度整合，烏克蘭無人機依賴星鏈進行即時通信和GPS導航，從而實現了對俄羅斯關鍵目標的精確打擊。這些無人機不僅在偵察俄軍部署方面發揮了作用，還能夠發動自殺式攻擊摧毀俄羅斯的戰略設施，烏克蘭在俄羅斯彈藥庫和補給線的打擊行動中充分展示了無人機作戰的潛力。美國國際開發署 (US Agency for International Development) 在2022年3月份以約 300 萬美元的價格為烏克蘭購買了 1,508 個星鏈終端，交付了 SpaceX 捐贈的額外 3,667 個終端，²²這些終端為烏克蘭

軍隊和平民提供了穩定的互聯網服務，這些終端主要分布在前線和戰略要地，保證了烏克蘭在面對俄羅斯持續攻擊和網路干擾時仍能保持通信能力。星鏈系統的另一大優勢在於其經濟效益，與傳統的國家級衛星系統相比，商業衛星通過規模化運營和全球覆蓋，大大降低了使用成本，這使得經濟和技術實力較弱的國家也能夠以較低的成本獲得高效的通信和情報支持。此外，星鏈系統的靈活性和可擴展性使其能夠快速適應戰場變化，成為現代戰爭中的重要技術資源。從長遠來看，商業衛星技術正在改變未來戰爭的技術應用模式，這些衛星的全球覆蓋能力和抗干擾能力使得衛星通信不再局限於國家級資源，商業化的衛星技術已經能夠為現代戰爭提供強大的技術支援，特別是在衛星通信、情報收集和無人機作戰等領域，商業衛星技術正在迅速重塑戰爭格局。商業衛星技術的進一步發展將在未來戰爭中發揮更廣泛和深入的作用，改變傳統的戰爭模式，並為世界各國提供新的技術選擇，這一技術不僅改變了烏克蘭在俄烏戰爭中的通信和作戰方式，還為未來戰爭技術的應用提供了重要的示範效應。

2024, < <https://edition.cnn.com/2024/03/25/europe/ukraine-starlink-drones-russia-intl-cmd/index.html>> (檢索日期：2024年10月16日)

21 陳成良，「烏軍跨境奇襲！摧毀俄國境內「見證者」無人機庫存」，自由時報，2024年10月10日，<https://news.ltn.com.tw/news/world/breakingnews/4826900> (檢索日期：2024年10月15日)

22 Jon Brodtkin, "Ukraine to get 10,000 more Starlink antennas; funding problems are "resolved" " ARSTECHNIA, December 21, 2022, < <https://edition.cnn.com/2024/03/25/europe/ukraine-starlink-drones-russia-intl-cmd/index.html>> (檢索日期：2024年10月16日)

商業衛星崛起與私營企業的主性

一、商業衛星在現代戰爭中的角色

商業衛星在現代戰爭中的作用愈加重要，特別是在俄烏戰爭中，私營企業提供的衛星系統已經展現出巨大的戰略價值。²³SpaceX 的星鏈系統成為烏克蘭軍隊的通信支柱，尤其在俄羅斯的網路攻擊和電子戰干擾下，該系統為軍隊提供了穩定的互聯網連接，確保通信不中斷。這不僅提升了烏克蘭的作戰反應能力，還加強了其行動協同效率，特別是在俄羅斯摧毀傳統通信設施後，星鏈成為烏克蘭指揮和控制系統的重要組成部分。此外，Maxar Technologies 等公司提供的高解析度衛星影像在戰場態勢感知和精確打擊中發揮了關鍵作用。這些影像數據幫助烏克蘭識別俄羅斯軍隊的部署、後勤補給線和重要目標，為其提供了進行精確打擊的機會，從而削弱了俄軍的戰場優勢。這些即時傳遞的影像數據顯著提升了烏克蘭的作戰效率，讓其在情報蒐集和戰略規劃上獲得了

優勢。商業衛星的角色不僅限於通信和影像支援，它們還支持無人機作戰。這些衛星提供了精確的定位和目標識別數據，使得烏克蘭的無人機操作更為精確和有效，進一步增強了其精確打擊的能力(如表4)。整體來看，商業衛星已超越了傳統的民用通信功能，成為現代戰爭中不可或缺的戰略資產，並顯示出私營企業在國防和戰爭中的關鍵地位。

商業衛星在現代戰爭中的角色愈加重要，但這也讓它們成為潛在的攻擊目標。俄羅斯多次指責西方國家將商業衛星用於軍事用途，²⁴並警告這些"準民用"基礎設施可能成為合法的軍事打擊目標。這反映出商業衛星的軍事化趨勢，尤其是在俄烏戰爭背景下，這一技術被廣泛應用於戰術協同、戰場情報和精確打擊。由於這些衛星大多位於低地球軌道(LEO)，²⁵其具有快速部署、低成本和靈活應用的優勢，這讓它們在現代戰爭中的應用愈發受到青睞。

戰場情報和精確打擊，由於這些衛星大多位於低地球軌道(LEO)，²⁶其具有

23 Julia Siegel, "Commercial satellites are on the front lines of war today. Here's what this means for the future of warfare" ATLANTIC COUNCIL, August 30, 2022, < <https://www.atlanticcouncil.org/content-series/airpower-after-ukraine/commercial-satellites-are-on-the-front-lines-of-war-today-heres-what-this-means-for-the-future-of-warfare/> > (檢索日期：2024年10月23日)

24 Kari A. Bingen, Kaitlyn Johnson, and Zhanna Malekos Smith, "Russia Threatens to Target Commercial Satellites" CSIS, November 10, 2022, < <https://www.csis.org/analysis/russia-threatens-target-commercial-satellites> > (檢索日期：2024年10月23日)

25 低地球軌道(LEO, Low Earth Orbit)是指距離地球表面約160公里至2,000公里之間的軌道範圍，這類衛星因其距離地球較近，與地面之間的信號傳輸延遲非常小，這使得它們特別適合需要即時性操作的應用，例如戰場通信、戰術協同以及無人機操作。



表4 烏克蘭運用商業衛星系統表

系統	用途	角色與貢獻	備註
星鏈	通信支援	在烏克蘭戰場中提供穩定且抗干擾的低軌道衛星通訊服務，尤其是當俄羅斯破壞地面通信基礎設施後，星鏈成為烏克蘭軍隊的重要通信工具。該系統幫助烏克蘭在網路攻擊和電子戰干擾下保持有效指揮與控制。除了軍隊使用外，星鏈還為烏克蘭的平民和重要基礎設施提供穩定的通信支持。	擁有超過 11,000 個終端設備，服務數十萬用戶。美國國防部接手部分資金以維持星鏈運作。
Maxar Technologies	偵察與高解析度影像	Maxar 的高解析度衛星影像使烏克蘭能夠精確監控俄羅斯軍隊的行動和部署，特別是後勤補給線和戰場態勢感知。這些影像數據幫助烏克蘭策劃精確打擊，削弱俄羅斯的戰場優勢。該公司提供的即時影像對烏克蘭軍隊的戰術決策具有關鍵作用，並在戰場上的準確打擊和戰略行動中發揮了重要作用。	Maxar 影像還應用於人道行動，如識別人道主義走廊和戰爭破壞
ICEYE	合成孔徑雷達 (SAR) 偵察	ICEYE 提供全天候的 SAR 影像，即使在夜間或惡劣天氣條件下也能穿透雲層和煙霧，為烏軍提供精確的戰場資訊。這些影像數據幫助烏軍識別俄軍的位置和行動，增強了夜間作戰的有效性。ICEYE 的雷達成為烏克蘭戰術部署和監控的關鍵資源。	SAR 技術具有高度穿透能力，適用於全天候監控和軍事設施監視
Planet Labs	地球觀測與監控	Planet Labs 為烏克蘭提供近乎即時的地表影像服務，幫助監視俄軍的行動和位置，特別是在部隊調動和設施部署方面。這些影像資訊能夠幫助烏克蘭進行戰術分析和規劃，在戰場上的應對更加靈活。	每天提供多次影像更新，確保戰場態勢的精確了解。
Capella Space	SAR 偵察	Capella Space 的 SAR 雷達影像技術能夠全天候提供高解析度影像，支持監控重要戰術設施變化，幫助烏克蘭軍隊應對俄軍在戰場上的動態變化。其技術還可以在天氣惡劣的情況下繼續提供高品質數據，保證作戰計劃的精確性。	影像數據能夠適應不同天氣條件，提供全天候支持。

資料來源：1.Jayanti, Amritha," starlink and the Russia-Ukraine War: A Case of Commercial Technology and Public Purpose?, " Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, March 9, 2023, <<https://www.belfercenter.org/publication/星鏈-and-russia-ukraine-war-case-commercial-technology-and-public-purpose>>(檢索日期：2024年10月23日)
2. Theodora Ogden, Anna Knack, M?lusine Lebre, James Black, Vasilios Mavroudis," The Role of the Space Domain in the Russia-Ukraine War, " Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, Feb, 2024, <<https://cetas.turing.ac.uk/publications/role-space-domain-russia-ukraine-war>>(檢索日期：2024年10月23日)
3.作者自行綜整資料製表。

快速部署、低成本和靈活應用的優勢，這讓它們在現代戰爭中的應用愈發受到青睞。它們能夠迅速提供戰場資訊並具備較強的抗干擾能力，這些特點使得商業衛星成為烏克蘭應對俄羅斯電子戰和網路攻擊的重要力量。隨著私營企業在太空技術

中的參與度日益提高，商業衛星的角色已超越傳統的通信支持，成為影響戰爭策略和軍事決策的重要資產。私營企業如 SpaceX 和 Maxar 等不僅提供技術支持，還積極參與戰略決策與行動，改變了太空的軍事與商業格局。然而，這也引發了國際

26 低地球軌道(LEO, Low Earth Orbit)是指距離地球表面約160公里至2,000公里之間的軌道範圍，這類衛星因其距離地球較近，與地面之間的信號傳輸延遲非常小，這使得它們特別適合需要即時性操作的應用，例如戰場通信、戰術協同以及無人機操作。

社會對太空軍事化的憂慮。商業衛星的快速軍事應用使其成為未來戰爭中可能的打擊目標，並促使國際社會重新考慮如何在促進太空技術和平利用的同時，防止其過度軍事化。總而言之，商業衛星已經對全球軍事力量平衡產生了深遠的影響，其靈活應用能力讓私營企業在戰爭中的影響力不斷擴大。

二、私營企業的戰略自主性

隨著現代戰爭的技術化發展，私營企業在軍事行動中的作用日益重要，尤其是在俄烏戰爭中，商業衛星系統的應用展示了其在戰場上的效能與戰略影響。SpaceX的星鏈系統在戰爭初期為烏克蘭提供了關鍵的低軌道衛星通信支持，這對於維持烏克蘭軍隊的指揮和控制至關重要，尤其是在俄羅斯進行的電子戰和網路攻擊破壞了地面通信設施後。星鏈系統的低延遲和抗干擾能力使其在無人機操作和精確打擊中發揮了重要作用，為前線部隊提供了即時戰術支援，幫助烏克蘭在戰場上保持高度的戰略靈活性。然而，這也揭示了私營企業在戰爭行動中具有的主權風險。2022年，SpaceX馬斯克拒絕啟動星鏈支援烏克蘭針對俄羅斯艦隊的無

人機攻擊，理由是擔心此舉會導致戰爭升級，甚至可能引發核衝突。²⁷因為這直接影響了其軍事計劃，並使俄羅斯艦隊得以繼續攻擊烏克蘭城市。同時，Maxar Technologies和Planet Labs等商業衛星公司也通過提供高解析度的衛星影像，²⁸為烏克蘭軍隊提供了精確的戰場情報支援。這些影像幫助烏克蘭預測並防禦俄羅斯對基輔的攻勢，在實際作戰中，這些數據與烏克蘭的指揮控制系統深度整合，顯著提升了其決策效率和行動精確性。從軍事專業的角度來看，這些商業衛星的快速部署、低成本和靈活應用使其在現代戰爭中成為不可或缺的資源，為國家軍隊提供即時數據支持，但也讓私營企業在軍事行動中擁有了潛在的干預能力。²⁹各國政府必須制定相應的政策來監管這些企業在軍事衝突中的行為，以確保其決策不會對戰爭進程和結果產生不可控的影響。

三、國家安全與私營企業的協調

在俄烏戰爭中，商業衛星技術的重要性得到了充分驗證，尤其是SpaceX的星鏈衛星網路對烏克蘭的支持發揮了關鍵作用。星鏈提供了穩定的通信網路，確保烏克蘭前線部隊能夠與後方指揮中心保持

27 Claudia Chiappa, "Musk biographer tries to 'clarify' details on Starlink in Ukraine after outcry" POLITICO, September 10, 2023, <<https://www.politico.eu/article/elon-musk-biographer-walter-isaacson-clarify-details-starlink-war-russia-ukraine-outcry/>>(檢索日期：2024年10月23日)

28 Sandra Erwin, "BlackSky, Maxar, Planet win 10-year NRO contracts for satellite imagery" SPACENEWS, May 25, 2022, <<https://spacenews.com/blacksky-maxar-planet-win-10-year-nro-contracts-for-satellite-imagery/>>(檢索日期：2024年10月23日)

29 德國之聲，「排除在台美軍使用「星盾」？馬斯克再惹議」，聯合新聞網，2024年2月27日，<https://udn.com/news/story/6813/7795330> (檢索日期：2024年10月22日)



密切聯繫，這對於戰場的指揮和控制至關重要。烏克蘭利用星鏈進行即時數據傳輸和視頻反饋，極大縮短了目標識別到打擊的反應時間，尤其是在無人機操作和導彈攻擊的精確度上。這種低延遲、高帶寬的網路支持，讓烏克蘭的戰場作戰能力得到了顯著提升。然而，私營企業的自主性在戰爭中也體現出一定的挑戰。而在克里米亞上空無法啟用星鏈的要求，這一決策直接影響了烏克蘭對俄羅斯艦隊的打擊行動。澤倫斯基顧問波多利亞克在2023年9月嚴厲譴責了馬斯克的決策，波多利亞克批評稱，這一行動使俄羅斯的艦隊得以繼續向烏克蘭城市發射導彈，導致無辜的平民，尤其是兒童的傷亡。³⁰而美國五角大樓對此未直接回應，只表示出於運營安全原因，無法提供更多細節。這一事件暴露了私營企業在戰爭中行使自主權時可能帶來的風險和挑戰，尤其是在國家安全利益和私營公司利益之間的矛盾方面。這也引發了美國政府的關注，開始探討私營企業在國家安全領域中的角色和責任，尤其是在涉及到關鍵技術和軍事支持時應如何協調。私營企業如SpaceX在提供軍事支持時，不僅影響到戰爭的進程，也影響了國家對於戰爭策略的制定和執行。這場戰爭突顯了商業衛星技術對現代戰爭的重要性，並同時揭示了在戰時如何有效協調政府和私營部門之間的關係，確保戰場需求

得到滿足而不會過度依賴個別企業的自主決策。

太空戰爭的挑戰與機遇

一、太空擴散與商業化的未來發展

太空技術的擴散與商業化正在重新定義現代戰爭的攻防格局，特別是低軌道星鏈的崛起，提升了衛星網路的抗毀性和技術冗餘。俄烏戰爭提供了關鍵案例：俄羅斯試圖干擾星鏈，但由於該系統的分散結構及其快速更新和重組能力，俄方干擾行動未能達到預期效果。這表明，傳統反衛星武器(ASAT)在面對現代商業衛星星座時，效果逐漸減弱，這將迫使國家軍事力量調整其太空戰略。由於商業衛星的生產和發射成本低廉，它們的替代速度快，進一步削弱了對單一衛星進行物理破壞的有效性。此外，這也增加了戰爭期間對衛星在提供服務的依賴(如圖3)。私營企業在自主決策中的潛在風險和挑戰愈發明顯，其獨立行動可能對國家戰略帶來不可預測的影響。以克里米亞事件為例，對烏克蘭的軍事行動計劃和執行產生了直接影響，這反映出私營企業在戰爭中的自主權可能帶來重大的戰略後果。³¹

在未來的太空戰爭中，國家與私營企業之間的協同合作將顯得越來越重要。這一現象為國家帶來了雙重挑戰：一方面，商業衛星技術的迅速進步和快速部署

30 "Ukraine: Musk defends Starlink decision on Crimea strike" DW, September 9, 2023, <<https://www.dw.com/en/ukraine-musk-defends-starlink-decision-on-crimea-strike/a-66764304>> (檢索日期：2024年10月23日)

31 於下頁。

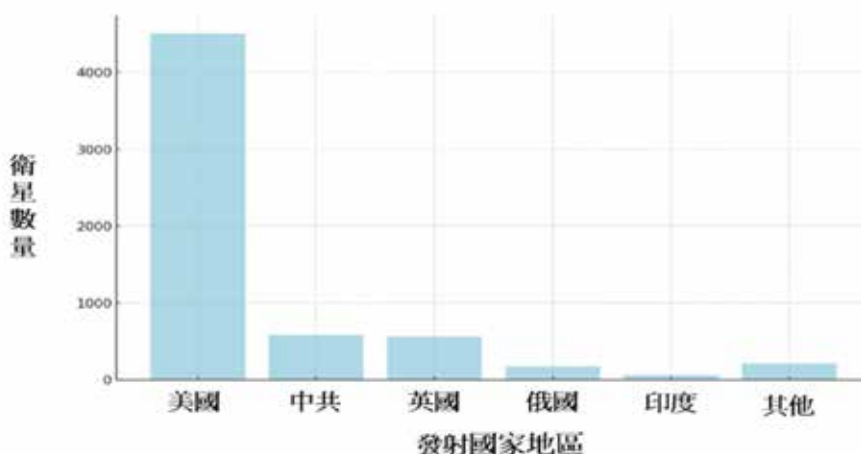


圖3 全球衛星數量圖

資料來源：1.Andy," How many satellites are orbiting the Earth in 2023?", "PIXALYTICS, July 5 ,2023, < <https://www.pixalytics.com/satellites-orbiting-earth-2023/> >(檢索日期：2024年10月24日)

2." SATELLITES BY COUNTRIES AND ORGANIZATIONS, "N2YO.COM, < <https://www.n2yo.com/satellites/?c=PRC&t=country> >(檢索日期：2024年10月24日)

3.作者自行綜整資料製圖

二、太空升級管理的挑戰

隨著衛星運營目的多元及商業化(如圖4)，太空戰爭的攻防態勢正隨著商業衛星的發展而快速轉變。商業衛星技術，如Maxar Technologies和Planet Labs提供的高解析度影像，在俄烏戰爭中展示了其重要性。這些衛星數據使烏克蘭能夠精確掌握俄羅斯軍隊的部署、補給線及關鍵設施，為其提供了戰略情報優勢。這種技術的冗餘性與抗毀性大大增強了軍事作戰中的信

息透明度和精確度，顯示出商業衛星在現代戰爭中的不可或缺性。

這些商業衛星技術的運用不僅幫助烏克蘭進行了戰場監視，還支援了精確打擊，特別是透過無人機技術的集成，顯著提升了烏克蘭在戰場上的快速反應能力。此外，SpaceX的星鏈衛星系統在提供通信方面也發揮了至關重要的作用。當俄羅斯對烏克蘭的傳統通信系統進行攻擊時，星鏈系統成功維持了烏克蘭軍隊的通信，使其能夠在戰場上保持指揮和控制能力。

能力已成為戰場上不可或缺的資源；另一方面，如何在危機時期有效確保私營企業按照國家利益行動，避免其獨立決策對戰爭進程產生負面干擾，成為亟待解決的問題。從戰略視角來看，太空技術的擴散與商業化不僅改變了傳統戰爭的操作模式，也迫使國家重新評估其太空領域的防禦與攻擊策略。隨著更多國家和私營企業加入太空競爭，全球太空競爭格局將更加錯綜複雜，並且在動態變化中對全球戰略環境產生深遠影響。

31 Tara Copp," Elon Musk's refusal to have Starlink support Ukraine attack in Crimea raises questions for Pentagon, " THE ASSOCIATED PRESS, September 11, 2023, < <https://www.theglobeandmail.com/world/article-elon-musks-refusal-to-have-starlink-support-ukraine-attack-in-crimea/#:~:text=Excerpts%20of%20a%20new%20biography%20of%20Musk%20published,Russia%20would%20launch%20a%20nuclear%20attack%20in%20response.>> (檢索日期：2024年10月24日)

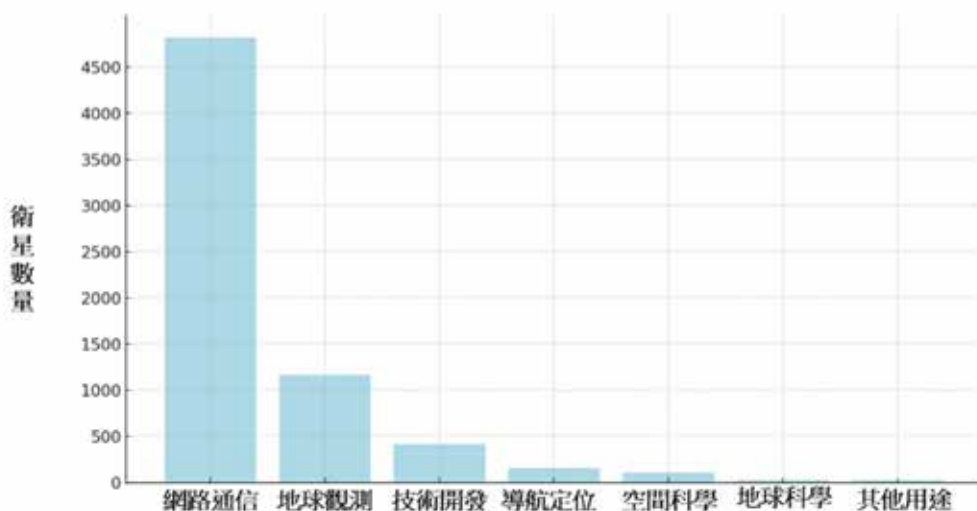


圖4 衛星數種類數量圖

資料來源：1.Andy," How many satellites are orbiting the Earth in 2023?, "PIXALYTICS, July 5, 2023, < <https://www.pixalytics.com/satellites-orbiting-earth-2023/> />(檢索日期：2024年10月24日)

2." SATELLITES BY COUNTRIES AND ORGANIZATIONS, "N2YO.COM, < <https://www.n2yo.com/satellites/?c=PRC&t=country>>(檢索日期：2024年10月24日)

3.作者自行綜整資料製圖

了太空中的戰略脆弱性，因為無法控制的碎片會威脅所有衛星，導致通信、導航和情報搜集系統受到嚴重損害，進而影響全球的太空安全。³³各國因此需要在發展反衛星技術的同時考慮到太空碎片問題的長期影響，並尋找更加精確的非破壞性對策，以避免

這一系統的抗毀性在於其擁有大量的小型衛星，即使某些衛星被摧毀，整個系統仍然能夠正常運作。這種技術特點使得商業衛星在現代戰爭中的地位越發重要。然而，隨著國際反衛星技術發展(如表5)，太空戰爭風險正不斷升級。2021年，俄羅斯進行了一次反衛星導彈試驗，摧毀了一顆退役衛星，產生了數千片高速運行的太空碎片，這些碎片在低地球軌道上構成了長期威脅。³²此類破壞性武器的使用顯示

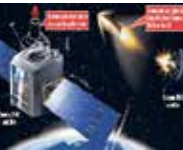
太空環境的進一步惡化。

未來的太空戰爭將成為技術競賽與風險管理的雙重考驗。在大國之間日益激烈的軍事博弈中，太空技術的應用需謹慎平衡，特別是當涉及核武器及戰略防禦系統時，技術決策的每一步都至關重要。俄烏戰爭已展示出衛星等太空資產在戰爭中的關鍵作用，不僅延伸了地面衝突，還使情報、監視及通信技術進一步深化，但伴隨的風險也逐步顯現。衛星技術的冗餘性

32 Jeff Foust," Russia destroys satellite in ASAT test" SPACENEWS, November 15, 2021, < <https://spacenews.com/russia-destroys-satellite-in-asat-test/>> (檢索日期：2024年10月29日)

33 Matthew Powell,Dafydd Townley," Russia's space weapon: anti-satellite systems are indiscriminate, posing a risk to everyone's spacecraft" THE CONVERSATION, February 19, 2024, < <https://theconversation.com/russias-space-weapon-anti-satellite-systems-are-indiscriminate-posing-a-risk-to-everyones-spacecraft-223935>> (檢索日期：2024年10月29日)

表5 國際反衛星技術發展表

國家	圖片	技術類型 主要武器系統	時間	發展進度及成就
美國		反衛星飛彈 ASM-135 ASAT	1985 年	利用 F-15 戰鬥機發射 ASM-135 ASAT 反衛星飛彈，成功摧毀 P78-1 衛星，證明美國具備反衛星能力。
		宙斯盾系統 SM-3	2008 年	從夏威夷附近的驅逐艦發射 SM-3 飛彈，成功摧毀一顆失控衛星，展示海基反衛星能力。
		軌道試驗載具 X-37B	2010 年	X-37B 太空飛機多次進行長時間在軌飛行，顯示其可能具備反衛星行動的能力。
俄國		反衛星飛彈 Nudol 反衛星系統	2021 年	成功發射 Nudol 反衛星飛彈，摧毀一顆失效衛星，展示了反衛星攔截能力。
		雷射武器 Peresvet 激光武器	2018 年	部署 Peresvet 激光武器，用於干擾敵方衛星的光學傳感器。
		軌道飛行器 Kosmos-2543	2020 年	Kosmos-2543 在軌道上靠近美國偵察衛星，顯示俄國具備反衛星干擾能力。
中共		反衛星飛彈 SC-19 反衛星飛彈	2007 年	成功發射 SC-19 反衛星飛彈，擊毀一顆氣象衛星，證明中共具備反衛星能力，但引發太空碎片問題。
		軌道對接技術 神舟系列及天宮	2011 年至今	神舟飛船和天宮空間站展示對接技術，具備反衛星用途的潛力。

資料來源：1.Talia M. Blatt," Anti-Satellite Weapons and the Emerging Space Arms Race, " HIR, May .26.2020, < <https://hir.harvard.edu/anti-satellite-weapons-and-the-emerging-space-arms-race/> > (檢索日期：2024年10月16日)
 2.歐錫富，「中共四大軍種的紅旗導彈家族」，國防安全研究院，2020年10月5日，<https://indsr.org.tw/focus?typeid=0&uid=11&pid=450> (檢索日期：2024年10月16日)
 3.作者自行綜整資料製表。



與抗毀性雖可強化情報優勢，卻也大幅提升了太空戰爭的升級風險，可能引發意料之外的對抗。針對外層空間裁軍的國際討論也揭示了在維持太空安全、防止太空武器化方面的分歧。³⁴未來，國際社會需加強規範，限制破壞性技術在太空中的應用，平衡各國之間的軍事技術競爭，避免太空成為不可控的衝突場域。各國在技術優勢與衝突管控之間尋求新平衡，將是決定未來太空安全格局的關鍵。

三、國際合作與太空管理

國際合作在太空管理方面尤為關鍵，特別是在衛星數量迅速增長和軌道碎片帶來更高風險的背景下。隨著太空商業化和技術擴散，政府與私營企業的協作變得至關重要，以保障太空環境的穩定性和安全性。反衛星武器的發展，尤其是產生大量碎片的破壞性攻擊，突顯了太空武器可能引發的威脅，這些威脅已推動國際社會對多邊協議的討論。³⁵聯合國和平利用外層空間委員會(COPUOS)制定的國際準則是目前太空行動管理的核心框架，涵蓋了衛星登記、軌道交通管理以及對反衛星武器測試的限制。聯合國也正致力於推動

統一的太空交通管理系統，以減少潛在衛星碰撞風險。負責任的太空行為倡議，提倡提升衛星操作的透明度並限制破壞性行為。此外，Astroscale 和 ClearSpace企業在太空碎片清理方面的技術開發也取得進展，³⁶包括利用機器人和雷射處理技術來移除軌道碎片，這些技術對於減少太空中潛在的碰撞危險和確保資源的可持續性發揮了重要作用。隨著太空技術進一步發展，國際合作和多邊協議將在全球安全和經濟發展中發揮更大的作用。

結語

在當前複雜的地緣政治環境中，商業衛星在現代戰爭和國家安全領域中扮演著日益重要的角色。這一趨勢在俄烏戰爭的背景下更加明顯，為包括中華民國在內的許多國家提供了寶貴經驗。商業衛星技術的廣泛應用不僅展示了其在戰爭中恢復通信、支援作戰和提供資訊優勢的潛力，同時也突顯了依賴私營企業的風險。本文將從三個主要層面探討這一經驗對我們的啟示，包括低軌衛星的戰時通信恢復能力、軍事用途增強、以及提升應對私營企

34 Meetings Coverage and Press Releases," Debate on Disarmament Aspects of Outer Space Exposes First Committee Rift over Ways to Sustain Space Security, Prevent Domain's Weaponization" UNITED NATIONS, October 20, 2023, < <https://press.un.org/en/2023/gadis3723.doc.htm>>(檢索日期：2024年10月29日)

35 Andrew Jones," Fighting space junk: More than 100 partners sign Europe's 'Zero Debris Charter'" SPACE, October 25, 2024, < <https://www.space.com/europe-space-junk-zero-debris-charter-100-partners-iac>>(檢索日期：2024年10月29日)

36 UK Space Agency," Case studySpace sustainability " GOV.UK, October 11, 2024, <<https://www.gov.uk/government/case-studies/space-sustainability>>(檢索日期：2024年10月29日)

業自主性帶來的挑戰。

首先，低軌衛星的高速、低延遲及全球覆蓋特性在俄烏戰爭中展現了強大的戰時通信恢復能力。當俄羅斯在戰爭初期破壞烏克蘭的地面通信基礎設施後，SpaceX的星鏈網路在數小時內恢復了關鍵通信，使烏克蘭軍隊及政府保持聯繫，並保障無人機等戰術設備的正常運行。這一經驗表明，低軌衛星具有應對通信中斷的巨大潛力。對政府而言，這是一個寶貴的參考案例，特別是面對潛在威脅時，快速恢復通信網路將成為保障國家安全的重要一環。數位發展部的多項計劃開始建設低軌衛星接收站點，包括全國各地的700多個衛星接收點和若干海外站點，目的在於確保緊急情況下的通信穩定性。隨著OneWeb在泰國地面站的建成並預計在年底全面啟用，我們將具備24小時的低軌衛星訊號覆蓋。這一佈局將進一步增強台灣面對突發災害或外部攻擊時的應變能力，使低軌衛星成為重要的通訊備援工具。

其次，低軌衛星技術在增強軍事作戰能力方面也具有重要意義。低軌衛星憑藉其低延遲和快速更新數據的特點，在戰場指揮、控制、通信和情報領域提供了巨大優勢。例如，俄烏戰爭期間，烏克蘭依靠商業衛星技術獲取高解析度的戰場影像和敵方動態，這些信息支援其軍隊進行精

確打擊並保持戰場優勢。這種技術同樣可以應用於國軍的作戰體系中，通過引入低軌衛星技術，國軍可進一步提升對共軍動態的監視能力，確保軍隊作戰的靈活性和信息主導權。此外，數位發展部的四年期計劃也著重於強化低軌衛星的軍事用途，包括在離島、偏遠地區和行動通訊基地設置更多的後傳鏈路，使得國軍的指揮和通訊網路能夠在緊急狀況下持續運行，保障戰略指揮體系的穩定性和應變力。

最後，俄烏戰爭中的商業衛星應用也暴露出了一個關鍵問題，即私營企業對技術應用的自主控制權。俄羅斯在克里米亞地區的行動被SpaceX限制星鏈的使用範圍，這使烏克蘭無法依賴該系統來支援該地區的行動，這反映出私營企業在戰爭中的主權決策空間可能成為戰時風險。對我們來說，這一風險尤為值得重視，因為我們對海外商業衛星供應商的依賴度較高。為降低這類風險，政府應自主發展衛星技術(表6)，並與國際商業衛星服務供應商合作，以確保戰時或災害應對中能獲得穩定支援。此外，我們也應考慮逐步發展自主的低軌衛星網路，即「台版星鏈」，以減少對外部供應商的依賴。也符合總統推動「全社會防衛韌性」重大指導方針中「資通、運輸及金融網絡安全」，³⁷這將不僅增強通訊韌性，同時也能確保

37 丁世傑、崔慈悌、范揚光，「五大主軸推全社會防衛 賴清德要求開放引進民間人才資源」，中時新聞網，2024年9月26日，<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240926004774-260407?chdtv> (檢索日期：2024年12月2日)



表6 我國研發相關衛星資料表

衛星名稱	發射年份	用途	運營單位	國際合作	軌道類型
中華衛星一號	1999	氣象、地球觀測	國家太空中心	美國	低地球軌道
中華衛星二號	2004	地球觀測（高解析度影像）	國家太空中心	法國	低地球軌道
中華衛星三號	2006	氣象、電離層觀測	國家太空中心	美國	低地球軌道
福爾摩沙衛星五號	2017	地球觀測（光學遙測）	國家太空中心	無	低地球軌道
福爾摩沙衛星七號	2019	氣象數據、全球定位系統	國家太空中心	美國（NOAA）	低地球軌道
玉山衛星	2023	地震監測	國家太空中心	日本（JAXA）	低地球軌道
飛鼠衛星	2020	立方衛星技術驗證	國立台灣大學	法國（CNES）	低地球軌道
Nut 衛星	2023	科學數據收集	國家太空中心	德國（DLR）	低地球軌道
台灣立方衛星一號	2021	科技實驗、教育訓練	國家太空中心	無	低地球軌道
台灣立方衛星二號	2022	科技實驗、教育訓練	國家太空中心	無	低地球軌道
福爾摩沙衛星七號 R	2023	海洋風場觀測	國家太空中心	無	低地球軌道
福爾摩沙衛星八號	預計 2025	高解析度地球遙測	國家太空中心	無	低地球軌道
福爾摩沙衛星九號	預計 2026	全球衛星影像服務	國家太空中心	無	低地球軌道

資料來源：1.低軌衛星產業推動平台，<https://tleosia.org.tw/About/origin>（檢索日期：2024年12月2日）

2.國家太空中心網站，<https://www.tasa.org.tw/>（檢索日期：2024年12月2日）

3.作者自行綜整資料製表。

在國家安全層面的技術主導權。

總而言之，俄烏戰爭中商業衛星技術中為台灣提供了關鍵的國防及應變啟示。低軌衛星技術的通信恢復能力、軍事作戰支援優勢，以及對私營企業自主性的應對措施，都是政府未來加強國家安全及應變能力的重點方向。隨著數位發展部的計劃推進，我們在低軌衛星布建方面不斷

完善，並預計在不久的將來實現全面低軌衛星信號覆蓋，以有效應對未來的地緣政治挑戰和兩岸軍事衝突的風險。

作者簡介

黃俊偉中校，國防大學空軍學院中校教官
林明智上校，國防大學空軍學院上校教官。

