



中華民國 110 年 7 月 5 日

第 10 期

國防情勢特刊

太空與國防---應用發展篇

太空、飛彈防禦系統與極音速武器	曾怡碩	1
全球衛星導航系統的威脅與因應	杜貞儀	11
中國太空遙測衛星發展初探—從「資源」到「高分」	蔡榮峰	23
衛星遙測技術於跨國流域治理之應用— 以「湄公大壩監測」計畫為例	劉翎端	38

Space & Defense on Application Development

Space, Missile Defense System, and Hypersonic Weapons	<i>Yisuo Tzeng</i>	1
Threats to the Global Navigation Satellite System and the Response	<i>Chen-Yi Tu</i>	11
A Preliminary Study of The Development of China's Space Telemetry Satellites — from the “Ziyuan” to the “Gaofen” Series	<i>Oddis J. Tsai</i>	23
Satellite and Remote Sensing Technology in Transboundary Water Governance: the Case of the Mekong Dam Monitor	<i>Linda Liu</i>	38

特邀導讀

劉正千*

「超前部署」是今日許多組織機構，甚至是政府國家的領導者所高舉的行動準則。身處在科技快速進步，人類活動、自然環境與國際關係都急遽變化的世界中，發生「史無前例」、「始料未及」的大型災難事件，機率越來越高，卻也讓許多宣稱「超前部署」的作為，顯得荒謬、脆弱而不切實際。就以重擊世界各國的 COVID-19 為例，在疫情爆發，病毒快速傳播之際，即便是先進之歐美國家，也只能消極地以效率不彰的反覆封城措施，坐視人民在崩潰的醫療體系中無助地受苦甚至喪命。若放下事後諸葛的嘲諷心態來虛心檢討，會發現如 Bill Gates 早在 2015 年就曾警告：「一種首次發現的未知病原體將導致另一場致命的全球性大流行」。只是這類如先知般的預言，鮮少能讓人們嚴肅對待，積極準備，總要等到災難發生後，才徒呼荷荷。儘管 COVID-19 的疫情終結還看不到盡頭，世界已受到深遠的影響，國際緊張對立的情勢越發提高，另一場可能發生的更大風暴正在醞釀成形中，身處又一個關鍵的時空，要問先知的預言何在？「超前部署」的積極作為又該如何呢？

國防情勢特刊延續前期介紹美英德法等國在航太產業發展、太空部隊建軍、與太空戰爭手段等主題的五篇論文，本期再聚焦衛星科技和太空武器，介紹了全球衛星導航系統的威脅與因應、衛星遙測技術的應用實例、中國遙測衛星的發展、以及各種先進的太空武器，總計四篇精闢的論文，彙整成為上下兩集的「太空專輯」。一般媒體多熱衷報導太空探索技術公司（SpaceX）的星鏈計畫、藍色起源公司（Blue

* 國立成功大學地球科學系特聘教授，全球觀測與資料分析中心主任，英國倫敦帝國理工學院 (Imperial College London)，環境、地球科學與工程博士。

Origin) 的「藍月」登月計劃、或是維珍銀河公司 (Virgin Galactic) 的私人太空飛行等太空科技在民生與商業的用途，很容易在閱聽人的心中為太空科技形塑出美好光明的前景。然而就如同所有高科技都可能有、甚至已經有軍事方面的應用，太空科技也絕不例外。雖然太空戰爭目前尚不存在實例，但回顧人類過去的歷史可知，若一方擁有武器上的絕對優勢，例如以槍砲對抗刀劍，則交戰雙方的高下立見，戰爭的勝負已分。從避免落入劣勢以阻止發生戰爭的角度來思考，認識並掌握太空科技在軍事方面的應用和未來發展，決不是「居安思危」的高調，而是保衛國家安全與人民幸福生活的「超前部署」。可惜一般媒體在這方面不容易有深入且有系統的報導，這也正突顯出國防情勢特刊這兩期「太空專輯」的重要性與獨特性。第三期十年之「國家太空科技長程發展計畫」已於 2019 年核定開始執行，「太空發展法」也在 2021 年順利三讀通過，國防情勢特刊這兩期「太空專輯」所載之重要論文，在臺灣正式邁入太空國家之際，恰為太空科技之前瞻發展，提供了先知灼見，更企盼能真正「超前部署」，引領出保護國家安全的積極作為。

太空、飛彈防禦系統與極音速武器

曾怡碩

網路安全與決策推演研究所

壹、前言

面對奔襲而至的（洲際）彈道飛彈、低空進擊的巡弋飛彈，不論來襲飛彈是否配備核彈頭，結合衛星偵測追蹤的飛彈防禦體系，若能有效運作攔截，將充分發揮（核）嚇阻力。這樣一套昂貴而複雜的攻防—嚇阻均衡態勢，從冷戰時代一直延續到後冷戰時期。極音速武器（hypersonic weapons）的出現，¹以其超過 5 倍音速的高速、加上低空穿透與靈活操縱機動的特點，讓現有飛彈防禦體系頓時陷入窘境，從而令人不禁質疑：「核嚇阻態勢會否遭到破壞？」由於過去衛星與飛彈防禦有一定程度的緊密關聯，鑑於近年太空衛星網絡布建數量趨增，在前述問題意識脈絡下，浮現以下研究議題：「極音速武器的出現如何改變太空衛星在飛彈防禦的角色？」

本文首先釐清飛彈防禦體系與核嚇阻關係，以及衛星與太空武器（space weapons）對於飛彈防禦、核嚇阻的影響；其次則分析極音速武器特性暨其對飛彈防禦體系可能造成的衝擊；最後則藉衛星與太空武器發展趨勢，解析衛星及反衛星武器在飛彈防禦體系偵知、追蹤並摧毀極音速武器過程中的角色，進而回應本篇研究議題。

貳、核嚇阻、飛彈防禦體系與太空衛星

一、核嚇阻

核嚇阻的生成與維持，端賴持有足以保證相互大規模毀滅的核武戰力，因此一國必須能保有遭受核武第一擊後的有效反擊／第二擊核

¹ 極音速武器(hypersonic weapons)也廣泛被稱為高超音速武器。

武戰力。除了要能在遭受核彈攻擊後，一國仍能保有一定數量的核武，以及陸基、空基、海基或水下遠程投射載具，還要確保相當數量的武力投射的有效性。能否有相當數量的核彈頭穿透敵方之飛彈防禦系統，成為維繫核嚇阻力的變數。

增加核彈固然有利加強核嚇阻力，但潛在的組織風險與人為操作疏失也為核武管控增添許多不確定變數，²因此美蘇兩國在冷戰時期簽署戰略核武裁減條約。另一方面，由於美蘇對於 500 到 5,500 公里的核子飛彈與傳統飛彈部署，憂心將造成預警時間大幅縮短並衝擊核嚇阻效力，故 1987 年美蘇簽訂《中程核飛彈條約》(INF Treaty)，期將彼此核攻擊的選項限縮於洲際彈道導彈，藉拉長預警時間以確保被攻擊方有更多機會保存戰力遂行核武報復，從而保證相互大規模毀滅的嚇阻戰略能持續下去，達到避免動用核武的最終目的。然而，由於美蘇競相發展及部署中程巡弋飛彈，美國前任總統川普已於 2019 年 8 月 2 日宣布美國退出《中程核飛彈條約》，這形同為極音速武器發展開了扇大門。³

二、飛彈防禦體系

飛彈防禦體系除在地表的雷達與動能武器外，還結合太空中的衛星進行監偵、預警、追蹤與打擊，其中尤以美國在冷戰尾聲鼓吹的「戰略防禦倡議（星戰計畫）」最具代表性。按照「星戰計畫」所勾勒的場景，攔截系統第一道防線是由太空衛星遂行偵察與反飛彈衛星構成，使用常規彈頭或定向武器攻擊尚處於發射階段與穿越大氣層階段的飛彈；由陸基或艦載雷射武器摧毀穿出大氣層的分離彈頭；由部署太空中的定向武器、電磁動能武器或陸基或海基雷射武器攻擊將重返

² 參閱：Scott Sagan, *The Limits of Safety: Organizations, Accidents, and Nuclear Weapons*, 1995, (New Jersey: Princeton University Press), pp. 259-264.

³ Manuel Francisco Herrera Almela, "The INF treaty and the new hypersonic revolution," *Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE) Opinion Paper*, 20/2019, March 8th, 2019, pp. 7-8, http://www.ieee.es/en/Galerias/fichero/docs_opinion/2019/DIEEEE020_2019MANHER-nuclear-ENG.pdf.

大氣層前飛行階段的核彈頭；最後以反飛彈、動能武器摧毀重返大氣層後的殘餘核彈頭。另外則以反衛星武器摧毀或癱瘓敵方軍事衛星，削弱敵方的監偵、預警、通訊、導航能力。⁴

美國於後冷戰時代迄今布建的飛彈防禦體系（Ballistic Missile Defense, BMD），雖同樣結合太空衛星與定向動能武器，但是論其中太空載台之應用層面與規模，則遠不及「星戰計畫」所勾勒描繪的範圍。現今的飛彈防禦體系，主要雖仍執行升空助推階段、中段與末段多層攔截（如圖 1），但除了部署在各地不同射程的陸基與海基反制飛彈之外，還因科技的精進而更著重由太空衛星偵測、陸基遠程預警雷達、前沿部署雷達以及海基神盾雷達所構成的多種感知探測裝置。隨著太空衛星部署量增加以及各地雷達部署增加，因而較以往更加需要先進的指管通信與戰鬥管理系統，迅速連結感測裝置所擷取之目標資料，做出火力攔截分配協調決策，並執行追蹤、攔截任務。⁵

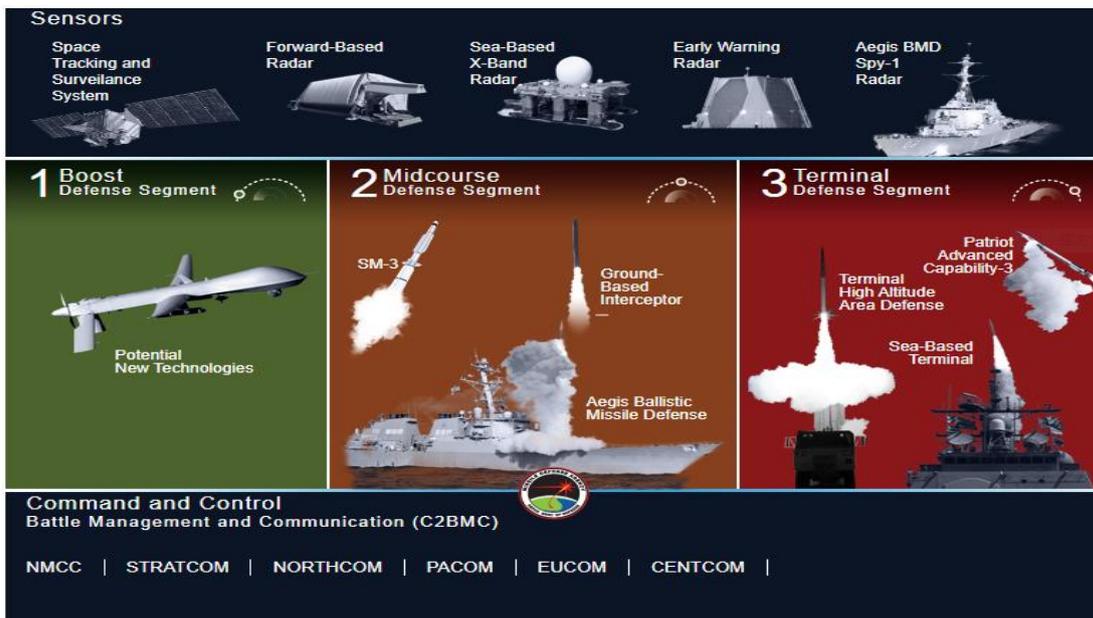


圖 1、美國飛彈防禦體系

資料來源：Missile Defense Agency, US DoD, <https://ppt.cc/fBZeLx>.

⁴ Bob Preston et al., “Space Weapons, Earth Wars,” *RAND Corporation Monograph Report* (MR-1209-AF), 2002, p. 14, https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1209.html#download. Also see Gabriel Popkin, “Decades after Reagan’s ‘Star Wars,’ Trump calls for missile defenses that would blast warheads from the sky,” *Science Magazine*, January 22nd, 2019, <https://www.sciencemag.org/news/2019/01/decades-after-reagan-s-star-wars-trump-calls-missile-defenses-would-blast-warheads-sky>.

⁵ 參閱：美國國防部飛彈防禦局網頁：<https://www.mda.mil/system/system.html>。

三、衛星與太空武器

地表雷達受限於地球曲度而有探測的距離與角度之限制（如圖 2 所示），但是在太空的衛星則不受此限。若能在距地表高度 1,000 公里內（或約為 500-2,000 公里）⁶部署足夠數量的偵查與通訊低軌衛星群（Low-Earth-Orbit, LEO Satellite Constellations），只要算準敵方彈道飛彈可能部署地點，變換軌道進入戰術位置並調整好角度與姿態，就能偵測追蹤來襲飛彈，並連通地面指管與地表海基、陸基火力應處，在進犯飛彈重返大氣層前的太空地帶（距地表高度為 80-100 公里之外），⁷即可予以攔截摧毀。

另源自冷戰時代「星戰計畫」的太空武器發展，包括定向雷射武器與動能擊殺武器，也在後冷戰時期持續不斷發展。這些裝備原為擊殺或癱瘓低軌衛星的反衛星裝置（Anti-Satellite, ASAT），由於設置／應用於太空之中，從而被視為太空武器（如圖 3 所示）。太空武器的發展與部署曾遭質疑會否藉由摧毀癱瘓或干擾敵方在太空中的偵查與通訊衛星、在地表的雷達站與衛星接收站、甚至直接干擾或摧毀來襲飛彈，進而削弱敵方偵測的預警時間、對來襲飛彈追蹤鎖定，以及對攔截裝置的導引擊殺能量。如此一來，極有可能造成受攻擊方不但無招架之力，也可能令其回擊報復的戰力遭削弱，造成核嚇阻態勢失效。⁸

⁶ Chris Daehnick, Isabelle Klinghoffer, Ben Maritz, and Bill Wiseman, “Large LEO satellite constellations: Will it be different this time?,” *McKinsey & Company*, May 4th, 2020, <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/large-leo-satellite-constellations-will-it-be-different-this-time#>.

⁷ 楊文君，〈太空高度要不要明確定義？科技部長回應了〉，《中央廣播電台》，2021 年 4 月 8 日，<https://www.rti.org.tw/news/view/id/2096420>。

⁸ 參閱：Bob Preston et al., “Space Weapons, Earth Wars,” *RAND Corporation Monograph Report* (MR-1209-AF), 2002, https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1209.html#download。

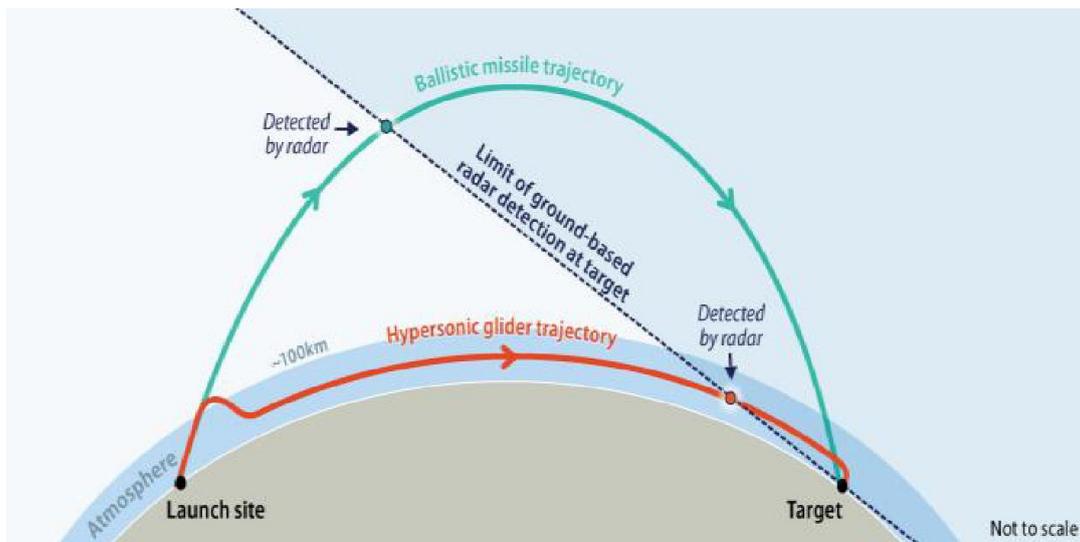


圖 2、雷達偵測彈道飛彈與極音速飛彈

資料來源：同註 8，CRS Report In Focus IF11623, <https://crsreports.congress.gov>.

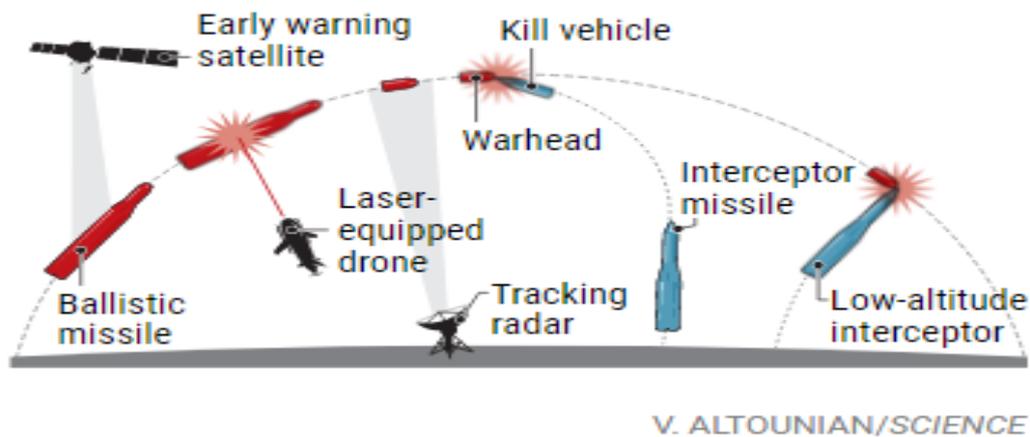


圖 3、結合衛星、動能與定向武器的飛彈防禦體系

資料來源：同註 3，Science Magazine, <https://reurl.cc/8yxDpM>.

參、極音速武器的衝擊

極音速武器特點為超過 5 倍音速的高速、低空穿透與靈活操縱機動變換航線，主要分為兩種類型，其一為極音速巡弋飛彈（Hypersonic Cruise Missile, HCM），另一種則為滑翔飛行器（Hypersonic Glide

Vehicle, HGV)，需要藉助彈道飛彈助推爬升到大氣頂層，之後一直到擊中數千公里外目標之前，可保持高速機動。中共東風 17 (DF-17)極音速滑翔式飛彈在 2019 年在十一國慶閱兵典禮中亮相，俄羅斯先鋒極音速滑翔飛行器(Avangard vehicle)在 2019 年 12 月亮相。美國極力追趕，一直到 2020 年 3 月在夏威夷測試成功極音速滑翔器(Common-Hypersonic Glide Body, C-HGB)。⁹

美國政界與軍方認為極音速武器勢不可擋(unstoppable)，已然成為改變遊戲規則的利器(game changer)，即使尚未撼動核嚇阻態勢，惟中俄恐藉此將對美軍行動構成「反介入／區域拒止 (Anti-Access／Area Denial, A2／AD)」的嚇阻戰力。因此，美國政界與軍方亟力呼籲必須急起直追中俄在此一領域的領先地位。美軍以 2023 年為目標，美國陸軍期望在 2023 年部署陸基極音速飛彈；美國海軍則希望在 2023 年部署艦射型極音速飛彈，並在 2024 年部署潛射型極音速飛彈；美國空軍最為積極，雖然 2021 年 4 月試射失敗，但仍期於 2022 年部署空射型極音速飛彈，期能以 20 倍音速的改良版 AGM-183 ARRW，大幅超越中、俄目前 10 倍音速之極音速武器。¹⁰

對於極音速武器的威脅，也有學者專家認為該威脅被刻意誇大，俾利各相關軍功科研領域爭取預算。¹¹對於相對於彈道飛彈，極音速武器的速度並非特別快，加上一路高速滑翔挺進，本身溫度相當高，以熱能感測裝置可予以目獲與追蹤。然而，如圖 2 所示，極音速武器即使

⁹ Kelley M. Saylor et al., “Hypersonic Weapons: Background and Issues for Congress,” *CRS Report R45811*, updated April 26th, 2021, <https://fas.org/sgp/crs/weapons/R45811.pdf>.

¹⁰ 同註 9，另參閱：John Hursh, “Let’s Make a Deal: How to Mitigate the Risk of Hypersonic Weapons,” *Just Security*, May 6th, 2020, <https://www.justsecurity.org/70025/lets-make-a-deal-how-to-mitigate-the-risk-of-hypersonic-weapons/>；關於美國空軍試射失利，請參閱：Valerie Insinna, “First flight test for US Air Force’s hypersonic booster didn’t go as planned,” *Defense News*, April 6th, 2021, <https://www.defensenews.com/air/2021/04/06/the-first-flight-test-of-the-air-forces-air-launched-hypersonic-booster-didnt-go-as-planned/>.

¹¹ Cameron L. Tracy and David Wright, “Don’t Believe the Hype About Hypersonic Missiles,” *IEEE Spectrum*, February 5th, 2021, <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/military/hypersonic-missiles-are-being-hyped>.

在助推階段都可能受地表弧度掩蔽而難以被偵知，一旦在大氣層中，則可以變換軌跡航線，讓地表各式感測裝置的目獲與追蹤鎖定難度大增。此外，極音速武器若藉助彈道飛彈助推，往往也是直到末段才能被地表雷達偵測到，更何況此後尚可藉助匿蹤戰機空射或者戰略核武潛艦潛射大幅壓縮預警與反應攔截時間。¹²

極音速武器對於整體空防及飛彈防禦體系造成相當大的壓力之餘，尚未因而改變核嚇阻態勢。主要原因在於，極音速武器發展主要三大國之中，美國各軍種雖全力研發測試，但迄今仍無意效法俄羅斯與中共，在極音速武器配置核彈頭。¹³此外，俄羅斯與中共雖於極音速武器發展處領先地位，且聲稱有意研發配置核武的可能性，但基本上仍投注資源在部署更多能攜帶大量核洲際彈道飛彈與巡弋飛彈的戰略核動力潛艦。這透露飛彈防禦體系與核嚇阻的緊密關聯，仍舊鎖定在傳統的主要核武投射方式；極音速武器或因酬載量、或因匿蹤與耐熱材料等技術限制，短期內難以預見其普遍攜帶核武並撼動核嚇阻態勢的場景實現。

肆、衛星與太空武器在飛彈防禦的角色

極音速武器在助推爬升階段，如圖 3 所示，可藉部署衛星予以偵測及追蹤，俾利提供早期預警。但如同傳統彈道飛彈的狀況，極音速武器助推段飛行時間非常短，如果又是在本土鄰近地域發射，攔截武器將更難以及時靠近擊殺目標。因此，飛彈防禦根據過去「星戰計畫」提出多層次攔截彈道飛彈的構想，而美國擁有當今最齊全的多層次反飛彈系統——中段攔截有陸基飛彈防禦系統及配備標準 3 型飛彈的海基神盾飛彈防禦系統，末端攔截則在末端高層有高空區域防禦系統（THAAD）攔截近程及中遠程彈道飛彈，而在末段低層則有愛國者三

¹² 同註 10，另參閱：Kelley M. Saylor et al., “Hypersonic Missile Defense: Issues for Congress,” *CRS Report In Focus IF11623*, updated January 13th, 2021, <https://crsreports.congress.gov>。

¹³ 同註 9。

型系統（PAC-3）攔截戰術彈道飛彈、巡弋飛彈及作戰飛機。¹⁴

為了因應極音速武器威脅，多層次飛彈防禦系統結合衛星偵測追蹤，在助推階段、中段或末段，為地表動能飛彈或配備定向雷射之無人載具，直接以資料鏈或透過地表指管系統傳輸目獲與精準導引資料，將來襲飛彈或極音速武器予以擊殺截阻。因此，未來將推展實測的配置，硬體上可在太空大量部署偵察／通訊／攻擊用途的低軌衛星將是，構建「追蹤極音速與彈道之太空感測裝置」（Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor, HBTSS），¹⁵以及在地表布建多種擊殺飛彈與配備雷射之無人飛行載具。由於需要布建數量眾多，如獲友盟加入研發，除可分擔經費，更能增加地表接收與管控裝置的重複配置，而日本對此已表興趣。¹⁶此外，還要在軟體下功夫—需將衛星感測裝置之目獲與追蹤的演算法予以更新，讓衛星與感測裝置足以辨識極音速武器；更重要的是，需要更新戰鬥管理系統，使其足以即時傳輸太空與地表之間大量感測資料，並同時進行複雜的太空與地表之間的火力協調管制決策。¹⁷

伍、結論

在檢視極音速武器的出現對於飛彈防禦系統與核嚇阻的影響後，初步釐清本文提出的第一個問題：極音速武器的高速、低空大氣層穿透與機動變換航線特性，的確會對飛彈防禦系統構成更大的壓力。然而，受限於極音速武器的這三項主要特性，極音速武器未必朝核武載

¹⁴ 歐錫富，〈比較中美飛彈防禦系統〉，《國防安全雙週報》第 24 期，國防安全研究院，2021 年 3 月 19 日，https://indsr.org.tw/Download/bi_Vol24.pdf。

¹⁵ John Keller, "Northrop Grumman to develop missile-defense prototype satellite sensor to detect, track hypersonic missiles," *Military & Aerospace Electronic*, January 7th, 2021, <https://www.militaryaerospace.com/sensors/article/14196262/hypersonic-missiledefense-satellite-sensor>.

¹⁶ Yukio Tajima, "US and Japan plan fleet of low-orbit satellites to track missiles," *Nikkei Asia*, August 19th, 2020, <https://asia.nikkei.com/Politics/International-relations/US-and-Japan-plan-fleet-of-low-orbit-satellites-to-track-missiles>.

¹⁷ 同註 5。

具的方向發展與部署，在關鍵材料技術未見重大突破之前，短期內極音速武器的出現還不能改變維繫數十載的核嚇阻態勢。

此外，本文檢視發現，太空衛星隨著技術發展的精進，部署數量也有所增加，這讓衛星得以逐步體現過去「星戰計畫」描繪的部分角色——在飛彈防禦體系中擔當重要的偵察與追蹤任務，至於太空武器關於雷射定向能武器的部署，現在多朝向地表地面、海上、空中載具配置，而非一味推進太空武器化。換句話說，不論極音速武器出現與否，都不能扭轉衛星在飛彈防禦體系中擔當重任的趨勢。

然而，極音速武器的迅速發展與部署，加上地表感測裝置偵測的物理與地理局限，可望讓衛星在飛彈防禦體系中，不僅可對於高速、低空、機動滑翔武器的偵測、辨識、追蹤，甚至可能就近施行干擾、癱瘓、打擊。易言之，極音速武器的出現，可望讓衛星在飛彈防禦體系中的角色更加重要。

本文作者曾怡碩為美國喬治·華盛頓大學政治學博士，現為國防安全研究院網路安全與決策推演研究所助理研究員兼所長。

Space, Missile Defense System, and Hypersonic Weapons

Yisuo Tzeng

Assistant Research Fellow

Abstract

The emergence of hypersonic missiles and their high speed plus low altitude and nimble operation present existing missile defense systems with a difficult challenge and beg the questions: “Will the nuclear deterrence posture be undermined?” and “How has the emergence of hypersonic weapons changed the role of space satellites in missile defense?”

With regard to the threat of hypersonic missiles, some believe it is being deliberately exaggerated to gain funding for related military research and development programs. Apart from the substantial pressure put on overall space defense and the missile defense system by hypersonic weapons, due to technical limitations in terms of payload, stealth technology and heat resistant materials, in the short term it is hard to see them generally carrying nuclear weapons and shaking the nuclear deterrent posture.

Also, hypersonic weapons may further single out the significant role of satellites in the missile defense system. In a missile defense system, satellites can detect, identify and track high speed, low altitude powered glide weapons and can even jam, paralyze and attack them close up.

Keywords: satellite detection and tracking, ballistic missile defense, hypersonic weapons, nuclear deterrence

全球衛星導航系統的威脅與因應

杜貞儀

網路安全與決策推演研究所

壹、前言

全球衛星導航系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）以覆蓋全球的衛星系統，透過通訊技術對全球各地提供即時且高精度的定位、導航及定時（Position, Navigation and Timing, PNT）服務。GNSS 技術發展以軍事用途為核心，但逐步拓展至民用領域。以美國之全球定位系統（Global Positioning System, GPS）為例，原先任務即是對美軍全球部署提供即時 PNT 服務，第一次波灣戰爭即是 GPS 首次大規模實戰運用，包括盟軍以 GPS 導航定位在沙漠中快速移動至戰術位置，由伊拉克軍未預料的翼側進攻；及以「聯合直接攻擊彈藥」（Joint Direct Attack Munitions, JDAM）等精準打擊彈藥（precision-guided munitions）展現其「如外科手術般精準」的打擊威力，而後採用 GPS 作為導引方式的類似武器不斷改良、精進。¹時至今日，GPS 幾乎是無處不在。美國防部 2000 年移除 GPS 系統民用訊號的選擇性提供（Selective Activity），不再針對民用訊號添加誤差、限制其精度範圍，民用的導航與定位等應用服務也因此得以快速增長。

由於軍民兩方對 GPS 的依賴，美國防部先進研究計畫署（DARPA）已將 GPS 視為「單點障礙」（single point of failure），一旦失效，其影響將難以估計。² 加上近年來軟體定義無線電

¹ Larry Greenemeier, “GPS and the World’s First “Space War”,” *Scientific American*, February 8, 2016, <https://www.scientificamerican.com/article/gps-and-the-world-s-first-space-war/>; “The JDAM Revolution,” *Air Force Magazine*, September 1, 2006, <https://www.airforcemag.com/article/0906jdam/>.

² Connie Lee, “DARPA Pursuing Global Positioning System Alternatives,” *National Defense*, May 31, 2018, <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2018/5/31/darpa-pursuing-global-positioning-system-alternatives>.

(software-defined radio) 普及，訊號生成相關軟硬體均能輕易取得，使干擾 GPS 訊號的成本大為降低，全球各地已發現多起干擾案例，不僅對航行、飛行安全形成威脅，也揭示即時、穩定、精確且無所不在的 PNT 服務，可能已不再是理所當然。

部分國家基於 GPS 仍為美軍所控制為由，為掌握技術主導權、或在衝突發生時保有作戰所需的 PNT 服務，便發展自有 GNSS 系統。其中以提供全球服務為目標者，包括俄羅斯的格洛納斯系統 (GLONASS)、歐盟的伽利略定位系統 (Galileo) 和中國的北斗系統 (Beidou, BDI)。但具備此技術能量備援的國家僅為少數，對於其他國家而言，為減少可能衝擊，實需採行降低風險作為，並在 GPS 可能中斷的情況下，預擬 PNT 服務及相關系統的持續運作方案。

因此，本文將藉由介紹 GNSS 系統組成 PNT 服務的應用範圍，評估威脅來源，並就已知威脅案例與近期替代方案發展，瞭解現行的因應作為，以對未來可能的改善方向提供建議。

貳、無處不在的GNSS系統

GNSS 系統架構各異，但基本組成均包含太空 (衛星)、地面控制與使用者三大單元 (見圖一)。以 GPS 為例，目前太空 (衛星) 單元包括至少 24 顆中地球軌道 (Medium Earth Orbit, MEO) 衛星，軌道高度大約為兩萬公里，持續向地球發射電磁波訊號。衛星在民用訊號共有 L1 A/C、L2C、L5 及 L1C 四種不同訊號，並接受來自地面控制單元的操作指令。

地面控制單元則是由地面監控站、地面天線傳輸站以及主控中心所構成 (見圖 1)。地面監控站追蹤並監控衛星訊號，回傳至位於美國科羅拉多州的施里弗空軍基地 (Schriever AFB) 主控中心，計算衛星軌道資料再上傳至衛星更新。使用者單元則是 GPS 接收器，將接收到的 GPS 衛星訊號換算成位置、速度與時間。

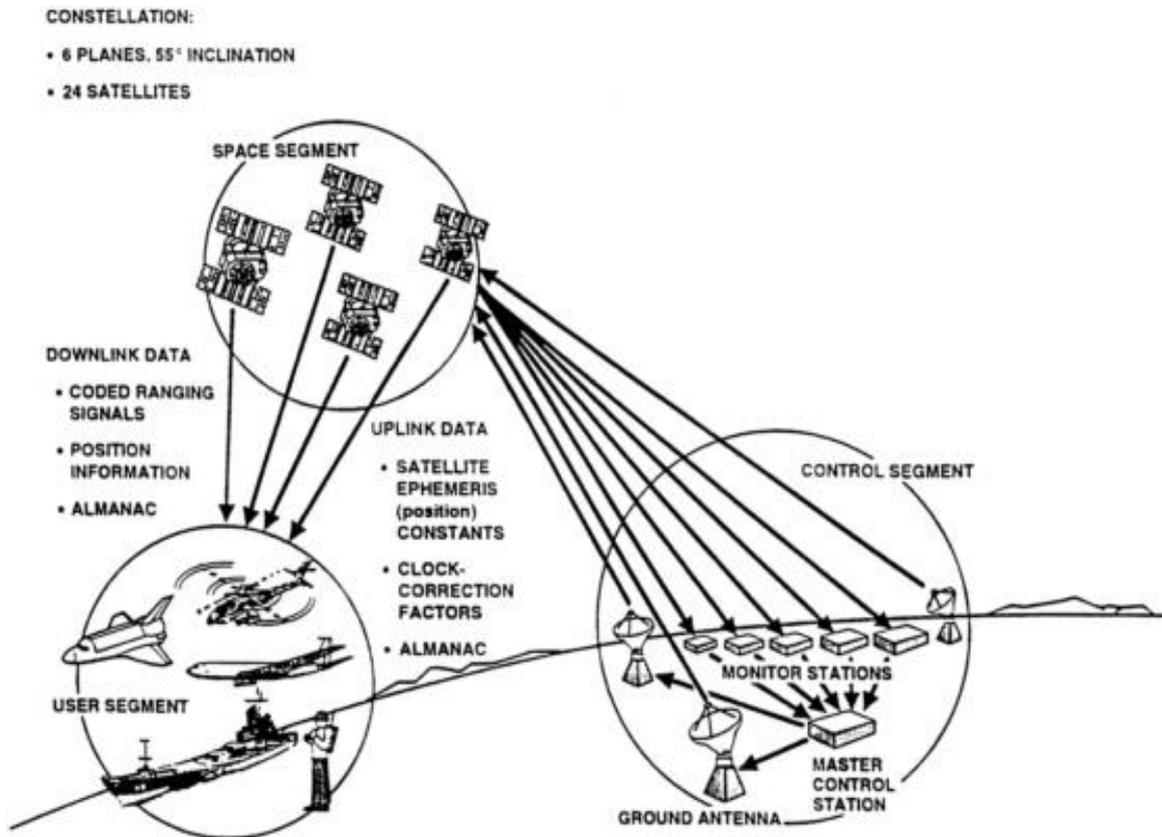


圖 1、GPS 系統基本組成示意圖

資料來源：Aerospace Corporation

基於 GPS 的工作原理，每顆 GPS 衛星皆必須在時間上完全同步，才能進行精確定位，因此在每顆 GPS 衛星上，均有至少各兩座銻/銣原子鐘，提供準確的時間與頻率訊號，又因所接收到的訊號須經過換算，GPS 接收器實際上可視為一台小型電腦，而非被動的接收訊號。若在地球上同一位置接收到三顆 GPS 衛星訊號，即能透過其訊號到達時間差進行定位，若增加至四顆，還能進一步推算出高度。³

在 GPS 提供的服務中，定位、導航兩項直接提供地理空間資訊，較為人所知，但定時服務的影響範圍更深遠。許多關鍵基礎設施如通訊、運輸、電網、金融等，均依賴 GPS 提供準確時間，成為「不可見的公共設施」(invisible utility)。就以網路服務的資料中心

³ Alain L. Kornhauser, "Global Navigation Satellite System (GNSS)", in course material of *ORF 467: Transportation Systems Planning and Analysis (Fall 2007)*, <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>.

來說，連網裝置和雲端應用將各種資料整合至相互連結的資料中心，以加速各地的資料存取與交換。為了讓各地資料能有效同步，所有裝置和伺服器均需透過網路時間協定（Network Timing Protocol, NTP）與時間伺服器（time server）對時，而此伺服器則再藉由 GPS 接收器所收到、換算之衛星訊號進行校正，確認所有裝置資料時間一致、各地資料均是最新、一致的版本。換言之，雲端服務的實現，是以定時作為基礎。

另外一個常見例子，則是金融服務的時間戳記，也就是進行股票、期貨等交易時的重要依據。⁴尤其近年在金融市場中，以自動化之高頻交易賺取價差相當盛行，要求時間精度達毫微秒（nanosecond）之譜。若無 GPS 校正後之精準時間，則此交易模式將無法維繫。因此，預期未來使用 GPS 提供之校時服務的設備有增無減的情況下，其潛在威脅層面亦隨之擴大。

參、定位、導航、定時服務威脅評估

根據其特性，對 GNSS/PNT 的威脅約有三種類型。首先是不經意造成的中斷，如太陽風暴、閏秒（leap second）、設備維護意外等，多半發生於 GNSS 太空單元及地面控制單元，以 GPS 而言，此二者均為美國政府的權責範圍。蓄意造成的中斷發生在使用者單元，包括 GPS 干擾（jamming）及欺騙（spoofing）兩種，有時混合採用；再來則是系統層級的攻擊，包括網路攻擊、惡意軟體、以及供應鏈攻擊等，針對 GPS 接收器本身或是藉由外部聯網環境進行攻擊。⁵以下對蓄意中斷的各項類型進行簡要介紹：

⁴ Rohit Braggs, “How resilient PNT protects global networks from attack or failure,” *GPS World*, June 24, 2019, <https://www.gpsworld.com/how-resilient-pnt-protects-global-networks-from-attack-or-failure/>.

⁵ Ernest Wong, “Responsible Use of PNT for DLT in the Financial Service Sector,” *GPS.gov*, January 28, 2020, <https://www.gps.gov/multimedia/presentations/2020/ATIS/wong.pdf>; “Improving the Operation and Development of Global Positioning System (GPS) Equipment Used by Critical Infrastructure,” Department of Homeland Security, 2020, <https://us-cert.cisa.gov/sites/default/files/2020-01/Improving%20the%20Operation%20and%20Development%20of%20GPS%20Equipment%20Used%20by%20Critical%20Infrastructure.pdf>.

一、GPS干擾

干擾指蓄意製造無線電波增加雜訊，繼而影響 GPS 接收器的訊號處理，達成降低或阻絕（degrading or denying）接收器正常運作的效果。雖然這些干擾有部分源於 GPS 訊號微弱，容易受到太陽黑子活動、電離層以及其他訊號影響，但在 2009 年以英國領港公會（Trinity House）所屬船隻 Galatea 號進行的一項測試顯示，船上一支功率僅有行動電話千分之一的裝置，就足以在電子海圖上顯示錯誤的船位，進而顯示至附近航行船隻的自動辨識系統上，並且使船上救生系統失效，電羅經、雷達也都受到影響。不過，直接進行干擾會出現明顯的訊號源，各項儀器突然失去功能，很難不引人注意而引發警訊。⁶

但在部分區域，針對 GPS 的干擾顯然已經成為新常態。挪威北部靠近芬蘭及俄羅斯邊境的芬馬克地區（Finnmark），自從 2017 年始便時常發生 GPS 干擾，使通信和導航系統無法運作。特別是該區地處偏遠，許多居家醫療設施、緊急救濟服務及救護車都仰賴 GPS 地圖，GPS 干擾很可能會使面臨急難的民眾無法得到及時支援。雖然挪威情報單位分析顯示，北約在 2018 年於挪威舉行冷戰結束以來最大規模之軍事演習—「三叉戟聯合軍演」（2018 Exercise Trident Juncture）期間，針對該區域的 GPS 干擾比前期明顯增加（見圖 2），推論干擾可能與演習有關。但該區警長則認為，此種干擾可能有各種成因，包括俄羅斯在北極圈內日益增加的軍事演習活動，但多年來，干擾持續發生，應非針對特定事件，而是企圖造成一個 GPS 無

fault/files/documents/Improving_the_Operation_and_Development_of_Global_Positioning_System_%28GPS%29_Equipment_Used_by_Critical_Infrastructure_S508C.pdf.

⁶ Alan Grant, Paul Williams, George Shaw, Michelle De Voy & Nick Ward, “Understanding GNS S availability and how it impacts maritime safety,” *Paper for International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, January 24-26, 2011, <https://rntfnd.org/wp-content/uploads/GNSS-Maritime-GLA.pdf>.

法使用的新常態，迫使該區居民必須仰賴羅盤與紙本地圖。⁷

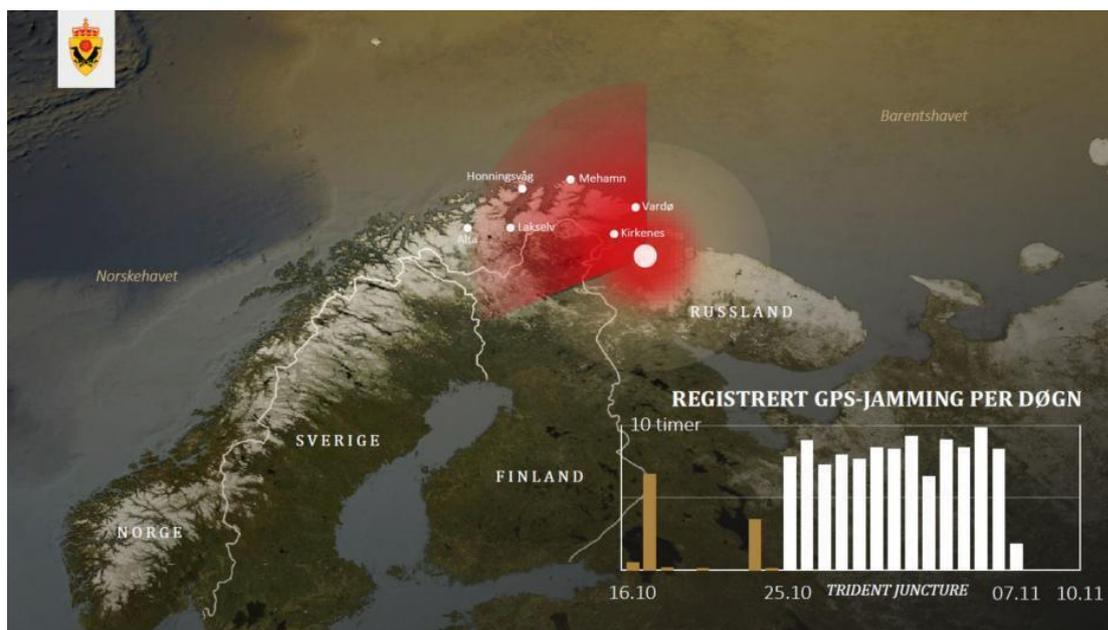


圖 2、北約「三叉戟聯合軍演」期間 GPS 干擾情形

圖片來源：挪威情報局

二、GPS欺騙

欺騙則是刻意製造假訊號以擾亂 GPS 系統，又可分量測欺騙（measurement spoofing）和資料欺騙（data spoofing）兩種。量測欺騙指偽造波形與真實 GPS 訊號類似的無線電波，使目標 GPS 接收器換算出錯誤的位置、速度與時間資訊。資料欺騙則是直接於目標 GPS 接收器引入偽造之數位資料進行換算。但無論何種欺騙形式，均可能對 GPS 造成從產生錯誤資料至接收器故障等多種影響。⁸

此種威脅並不僅限於 GPS，具相同工作原理之其他 GNSS 均有可能受影響。自 2016 年始，在世界各地的港口均有發現針對衛星定

⁷ Peter B. Danilov, “GPS Jamming Still Causing Problems in Finnmark,” *High North News*, November 19, <https://www.highnorthnews.com/en/gps-jamming-still-causing-problems-finnmark>.

⁸ National Cybersecurity & Communications Integration Center, National Coordinating Center for Communications, “Improving the Operational and Development of Global Positioning System (GPS) Equipment Used By Critical Infrastructure,” U.S. Department of Homeland Security, https://us-cert.cisa.gov/sites/default/files/documents/Improving_the_Operation_and_Development_of_Global_Positioning_System_%28GPS%29_Equipment_Used_by_Critical_Infrastructure_S508_C.pdf.

位導航的欺騙狀況。美國智庫 C4ADS 藉由其他民用衛星之 GNSS 訊號資料進行分析，發現至 2018 年 11 月止，在黑海附近有超過九千起船舶被定位至機場的案例，因而形成不正常的移動軌跡（圖 3）。此現象很可能是俄羅斯以電戰手段於境內、克里米亞等地，針對 GNSS 訊號進行欺騙。如此做法可能出於幾項原因，如保護重要人士出訪時不受未知無人機攻擊的威脅、重要政府機關防護、以及保護海外作戰基地等。⁹ 種種行為均顯示，俄羅斯不吝於展現其電戰能力，並且持續將此用於海內外的各種場景中。

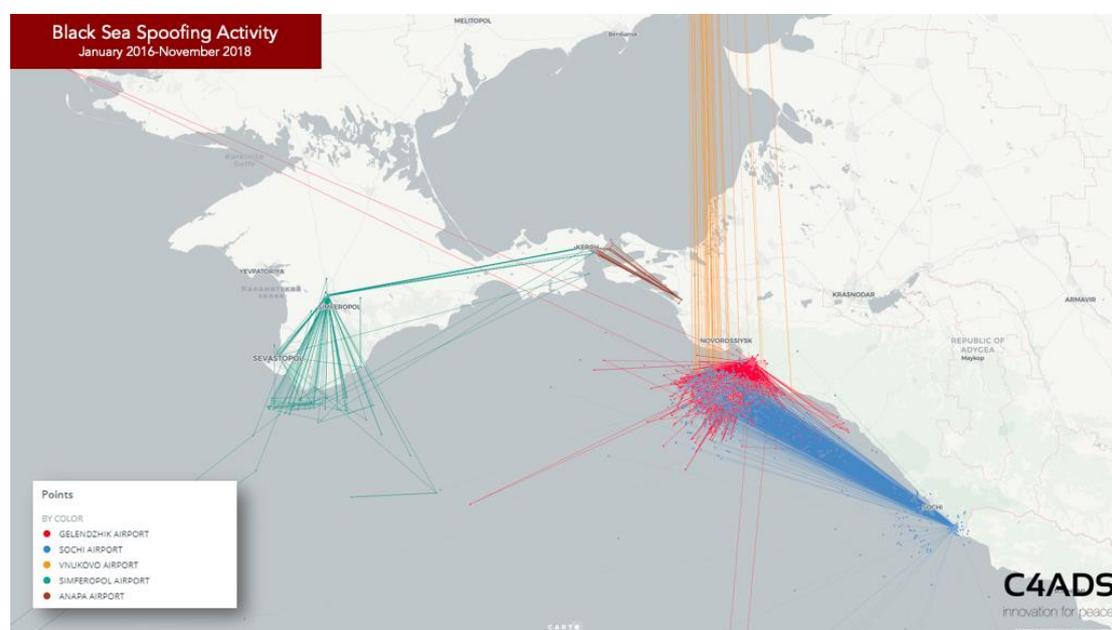


圖 3、黑海附近的 GNSS 欺騙狀況

圖片來源：C4ADS

三、系統性攻擊

針對 GPS 接收器的系統性攻擊，包括網路攻擊、惡意軟體、以及供應鏈攻擊等，以往並非 GPS 威脅所關注的重點，但 2020 年 8 月，GPS 裝置與服務大廠台灣國際航電（Garmin）遭勒索軟體攻擊，顯示除了訊號干擾與欺騙外，GPS 接收器作為小型電腦，傳統

⁹ “Above Us Only Stars: Exposing GPS Spoofing in Russia,” C4ADS, 2019, <https://www.c4reports.org/aboveusonlystars>.

網路安全的議題也應受到重視。¹⁰ 在 Garmin 事件中，對方僅要求贖金，但已凸顯 GPS 相關服務的脆弱，容易攻破，亦有可能自內部破壞系統與資料完整性，造成更進一步的損害。

就定時而言，網路上的設備透過網路時間協定（Network Timing Protocol, NTP）與時間伺服器對時，此一協定亦有漏洞，攻擊者能藉此發送放大的流量，形成分散式阻斷攻擊（DDoS）癱瘓目標網路服務。¹¹ 而網路設備韌體設計缺陷，亦可能使單一時間伺服器以 NTP 重複查詢而癱瘓，使與其相接的 GPS 接收器的校時資料，無法透過網路提供服務。因此網路設備的供應鏈安全，也是維持定時服務的一項重點。¹²

肆、GPS 威脅之風險管理與替代方案

由以上實例可以看出，針對 GNSS 的威脅已經相當普遍，並不僅限於 GPS。近期改進並部署之 GPS III，在軍用碼（M Code）亦已提升其抗干擾能力。¹³ 美國國家標準和技術研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）為協助 PNT 服務供應與使用者評估自身風險，提高維運韌性，提出基於網路安全框架（Cybersecurity Framework, CSF）的《NIST 基礎 PNT 剖析》（*NISTIR 8323 Foundational PNT Profile*），從 CSF 五大構面—識別、保護、偵測、回應與復原（Identify, Protect, Detect, Respond and Recover）來評估風險，並提供落實風險管理的行動目標。¹⁴

¹⁰ Brian Barrett, “The Garmin Hack Was a Warning,” *WIRED*, August 1, 2020, <https://www.wired.com/story/garmin-ransomware-hack-warning/>.

¹¹ “NTP amplification DDoS attack,” Cloudflare, <https://www.cloudflare.com/zh-tw/learning/ddos/ntp-amplification-ddos-attack>.

¹² 此為 2006 年丹麥網路管理者與台灣友訊科技之爭議，詳見 John Leyden, “D-Link settles dispute with ‘time geek’,” *The Register*, May 11, 2006, https://www.theregister.com/2006/05/11/d-link_time_dispute_settlement/。

¹³ Theresa Hitchens, “GPS Anti-Jam M-Code Takes Two Steps Forward,” *BreakingDefense*, August 7, 2020, <https://breakingdefense.com/2020/08/gps-anti-jam-m-code-takes-two-steps-forward/>.

¹⁴ “NISTIR 8323 Foundational PNT Profile: Applying the Cybersecurity Framework for the Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Services,” National Institute of Standards and Technology, February, 2021, <https://csrc.nist.gov/publications/detail/nistir/8323/fin>

表 1、《NIST 基礎 PNT 剖析》評估項目與目標

CSF 項目	目標
識別 (Identify)	<ul style="list-style-type: none"> ● 識別企業/營運環境及組織任務 ● 識別所有資產，包括依賴 PNT 資料的各項應用 ● 識別提供 PNT 資訊的來源與基礎設施 ● 識別可能造成具體威脅的弱點、威脅與衝擊以評估風險
保護 (Protect)	<ul style="list-style-type: none"> ● 保護組成、傳輸與運用 PNT 資料的系統，基於應用需求支持所需之完整性、可用性與保密性 (integrity, availability and confidentiality) ● 透過依從資安原則，包括了解 PNT 來源、資料等各種訊息的基本特性與服務、管理系統開發生命週期、以及部署所需之訓練、授權與接取控制來保護 PNT 服務部署與運用 ● 透過認證的回應與復原計畫，在可能產生威脅的情境下，保護仰賴 PNT 的用戶與服務，以維持足夠營運層級 ● 就企業與營運需求，保護仰賴 PNT 服務與資料的組織
偵測 (Detect)	<ul style="list-style-type: none"> ● 透過監控與持續檢查確保偵測進行 ● 建立部署與處理偵測之異常與事件的處理程序
回應 (Respond)	<ul style="list-style-type: none"> ● 以經認證之回應步驟控制 PNT 事件 ● 與 PNT 資料用戶、應用與利益攸關者溝通 PNT 資料事件的發生及其影響 ● 發展回應與減低已知或預期威脅及/或弱點的程序 ● 基於來自事件的經驗逐步發展回應策略與計畫
復原 (Recover)	<ul style="list-style-type: none"> ● 以經認證之復原步驟將依賴 PNT 服務之系統回復至適當的工作狀態 ● 與 PNT 資料用戶、應用與利益攸關者溝通 PNT 服務復原行動與住況 ● 基於來自事件的經驗逐步發展復原策略與計畫

資料來源：作者整理自 *NISTIR 8323 Foundational PNT Profile*

《NIST 基礎 PNT 剖析》也建議使用 PNT 服務的單位，將替代 PNT 來源整合進企業架構，確保在 PNT 服務中斷時，可進行故障轉

移 (failover) 持續運作。對於各種仰賴 GPS 進行定位、校時等服務的關鍵基礎設施而言，整合 GPS 替代方案 (GPS Alternative) 以提升服務韌性，已經是刻不容緩的任務。在軍事應用部分，美國 DARPA 在近十年曾就各種替代方案進行研究。¹⁵ 而美陸軍為了在未來大國競爭下的大規模作戰行動中，保有 PNT 運作，取得資訊及決策的雙重優勢，已於 2020 年 9 月成立 PNT 現代化專案辦公室與研究室，尋求如以偽衛星 (pseudolite) 小型地面收發站建立區域定位系統等方式，來降低目前對 GPS 的依賴。¹⁶ 民用系統部分，由於科技進展使舊有羅遠系統 (Long Range Navigation, LORAN) 有新的突破，成為可靠、安全的 GPS 替代方案。

羅遠以地基無線電發射站為基礎，運用雙曲線進行定位以導航，並在後續持續演進至第三代 LORAN-C。尤其技術改進後的增強式羅遠系統 (enhanced LORAN, eLORAN，以下簡稱「e 羅遠」)，誤差約可達 10 公尺以內，工作範圍則約達 2,200 公里，並且使用 90 至 110 千赫的低頻段，運用地面發射站其訊號強度可達 1 百萬瓦，大大提高訊號干擾所需功率，不僅提升干擾難度，亦能提供無人載具應用，改善因 GPS 訊號太弱無法定位的問題。¹⁷

若將 e 羅遠系統各站點以光纖連結，並結合 IEEE 1588-2008 精確時間協定 (Precision Time Protocol, PTP)，即可形成分散且不易受無線電波干擾的 PNT 服務網路。¹⁸ 目前已有許多國家進行類似的 e

¹⁵ “Adaptable Navigation Systems (ANS) (Archived),” DARPA, 2017, <https://www.darpa.mil/program/adaptable-navigation-systems>; “Micro-Technology for Positioning, Navigation and Timing (Micro-PNT) (Archived),” DARPA, 2017, <https://www.darpa.mil/program/micro-technology-for-positioning-navigation-and-timing>.

¹⁶ Caitlin O’Neill, “Beyond GPS: PM PNT team test Pseudolite characterization and performance,” U.S. Army, November 7, 2017; Nathan Strout, “US Army launching new PNT Modernization Office and Open Innovation Lab,” *C4ISRNET*, September 10, 2020, <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/2020/09/10/army-launching-new-pnt-modernization-office-and-open-innovation-lab/>.

¹⁷ Jeff Shepard, “eLORAN a terrestrial alternative to GPS,” *MICROCONTROLLER TIPS*, October 26, 2020, <https://www.microcontrollertips.com/eloran-a-terrestrial-alternative-to-gps/>.

¹⁸ Marc Weiss, Patrick Diamond and Dana A. Goward, “A Resilient National Timing Architecture,” Resilient Navigation and Timing Foundation, October 16, 2020, <https://rntfnd.org/wp-con>

羅遠系統部署規劃，積極發展太空事業的英國，亦有 e 羅遠測試部署以分散風險。¹⁹ 自 2010 年起 GPS 訊號曾多次遭北韓干擾的南韓，多年來持續更新維護其 LORAN-C 系統，並陸續升級至 eLORAN，其以 eLORAN 為核心技術之一的海上 PNT 服務，預計將在 2021 年 6 月 1 日開始試點，由韓國海洋警察艦艇進行測試，再陸續推廣至漁船、商船等民用船隻，以替代系統降低北韓透過 GPS 干擾造成的海上安全風險。²⁰

伍、結語

由 GNSS 提供的 PNT 服務，具有廣泛的軍民應用，尤其眾多關鍵基礎設施運作，均仰賴準確的定位、導航與時間，干擾 GNSS 的潛在影響範圍極為深遠。在干擾成本已隨技術進展逐漸降低的今日，從俄羅斯近期於芬馬克、克里米亞等地的作為、以及北韓的事例可看出，透過影響 PNT 服務造成混亂，不僅能直接衝擊民眾日常生活，若在衝突情境下，可藉此大大影響敵方判斷與決策。衡量目前國際情勢，未來針對 GNSS 的威脅將有增無減，甚至亦應預期恐有服務長期中斷的新常態。為因應可能之威脅情境，使用端及服務提供者除可強化使用者單元的設計與網路安全規劃，並運用 NIST CSF 架構進行 PNT 服務風險管理、妥善使用外，政府亦可也思考以 e 羅遠等替代系統佈建 PNT 服務網路，平時與衛星系統互補，在衛星訊號因故中斷時進行備援，以降低 PNT 服務中斷所帶來的衝擊。

本文作者杜貞儀為國立臺灣大學海洋所理學博士，現為財團法人國防安全研究院網路安全與決策推演研究所助理研究員。

tent/uploads/Resilient-National-Timing-Architecture-16-Oct-2020.pdf.

¹⁹ “UK Government Supporting E-LORAN,” *MARITIMEJOURNAL*, February 16, 2018, <https://www.maritimejournal.com/news101/onboard-systems/navigation-and-communication/uk-government-supporting-e-loran>.

²⁰ Dana Goward, “South Korea partners with broadcaster on eLoran and 10-cm GPS,” *GPS World*, November 23, 2020, <https://www.gpsworld.com/south-korea-partners-with-broadcaster-on-elor-an-and-10-cm-gps/>; Lim Chang-won, “Terrestrial navigation system ready for use in S. Korea to cope with jamming and electric warfare,” *Aju Business Daily*, April 1, 2021, <https://www.ajudaily.com/view/20210401091701262>.

Threats to the Global Navigation Satellite System and the Response

Chen-Yi Tu

Assistant Research Fellow

Abstract

The Global Navigation Satellite System (GNSS) is a satellite system that covers the world and provides instant and high precision Position, Navigation and Timing (PNT) services to locations around the world through communications technology. The widely-use system is Global Positioning System from U.S.. Due to the high GPS dependence by both military and civilians, and fact that many critical infrastructures utilize these GPS related services, GPS has become a “single point failure” which would have profound impact when the service disrupts. With prevalence of GPS jamming, and only a few countries possessing the capability to establish indigenous GNSS as backup, risk mitigation should be in place along with formulating a continuous operation plan for PNT service in advance. This paper will discuss the threat to GNSS, including jamming, spoofing and systematic attack, by demonstrating the threat trends from recent case studies. The final part of this paper includes the risk management framework for PNT service providers and users, together with the current solution of alternative GPS.

Keywords: Global Navigation Satellite System, Position-Navigation-Timing, GPS jamming, GPS spoofing, Alternative GPS

中國太空遙測衛星發展初探— 從「資源」到「高分」

蔡榮峰

國家安全研究所

壹、前言

2021年3月長榮海運貨長賜輪擱淺造成蘇伊士運河阻塞，一度引來各國衛星競相展示其偵照能力，其中包括天儀研究院於2020年12月發射的合成孔徑雷達商用衛星「海絲一號」，引發外界對中國影像遙測技術的關注。¹事實上，中國的「高分辨率對地觀測系統重大專項」（下稱「高分專項」）才於2020年邁入總結階段，可以說中國衛星影像的自給率正逐步提高。

中國近年藉「軍民融合」戰略發展高解析度衛星影像能力，企圖建立對全球全天候偵照能力，本文嘗試從三個不同面向來分析中國在該領域的發展概況。本文第一部分綜整「資源」與「高分」發展策略、2015年以來遙測衛星政策之演進與產業概況，接著第二部分盤點解放軍衛星測控平台，第三部分檢視「資源」與「高分」系列衛星與中國衛星影像自給率，結論則總結其安全意涵。

貳、中國太空遙測近期主要政策

中國為強化遙測衛星偵照能力，先是透過與巴西聯合製造的「資源」系列追求技術自主，再藉由「高分」系列衛星來邁入亞米級（公分級）。2014年「高分二號」達到光學解析度1公尺，2019年「高分七號」則邁入亞米級，正式跨越西方國家現有商業衛照能

¹〈【長榮卡船】太空打卡熱點「大牌長榮」！各國衛星俯瞰 宇宙看見台灣〉，《蘋果日報》，2021年3月28日，<https://tw.appledaily.com/property/20210328/IV633Q4WCJGX5ELLIQKEOUPV6E/>。

力的基本門檻。此外，「資源三號」、「高分一號」兩者皆出自中國航天集團旗下「東方紅衛星有限公司」之手，資源系列與高分系列在製造技術上或有承接。

中國與巴西合作研發的「資源」系列衛星自 1999 年啟動，於 2007 年進入三枚衛星組網時期，被外界認為是當時中國傳輸型遙測偵照能力輸出國際的里程碑，例如 2010 年 4 月退役的 CBERS-02B 衛星配備的鏡頭最高解析度為 2.36 公尺。²不過在影像品質與解析度上，仍與西方技術有不小差距。³

中國政府為了強化技術水準，建立全球範圍內全天候對地觀測系統與軍民兩用數據中心、提高衛星遙測數據自主性，並扶植國有太空產業鏈等多重目的，因此將「高分專項」納入其 2006 年所公布的《國家中長期科學和技術發展規劃綱要（2006-2020）》十六個重大科技專項之中，這段期間同時以政策鼓勵民間參與遙測技術發展，初期多以國營企業工程人才搭配民間資本的模式推動，形成了今日的樣貌。

2015 年 10 月頒布的中國《國家民用空間基礎設施中長期發展規劃(2015-2025 年)》規劃了橫跨「十三五」與「十四五」的三步走政策，而依後來的實際發展，可分為：⁴

² 三星發射時間為 1999 年 10 月 14 日「資源一號 01 星」CBERS-1、2003 年 10 月 21 日「資源一號 02 星」(CBERS-2A)、2007 年 9 月 19 日「資源一號 02B 星」(CBERS-2B)日。〈中國政府宣佈中巴地球資源衛星資料對非完全共用〉，中華人民共和國中央政府門戶網站，2007 年 12 月 3 日，http://www.gov.cn/gzdt/2007-12/03/content_823452.html；〈資源一號 02C 衛星〉，中華人民共和國自然資源部，2013 年 10 月 10 日，http://www.mnr.gov.cn/zt/kj/kjfz/wxyy/201310/t20131010_2369605.html。

³ 最高解析度指的是衛星位於天底 (nadir) 位置，即觀測物體正上方時的最佳解析度。2000 年代西方商業衛星影像公司所提供的服務就已達到亞米級（即近地點拍攝可達一公尺以下解析度），例如美國 DigitalGlobe 公司的 Quickbird 全光譜影像之空間解析度在近地點可達 61 公分、多光譜影像（藍色可見光、綠色可見光、紅色可見光及近紅外光）近地點解析度為 2.44 公尺，遠地點則為 2.88 公尺，見〈EROS and Quickbird〉，國立中央大學太空及遙測中心，2021 年 4 月 11 日閱覽，<https://www.csr.ncu.edu.tw/rsrs/satellite/EROSandQuickbird.php>。

⁴ 「十三五」全稱為「中華人民共和國國民經濟和社會發展第十三個五年規劃綱要」，實施期間為 2016 年至 2020 年；「十四五」則為「中華人民共和國國民經濟和社會發展第十四個五年規劃綱要」，實施期間為 2021 年至 2025 年。

1、「十三五」初期，奠定民用太空基礎建設雛形，特別是衛星產業發展模式；⁵

2、「十三五」中後期，完成遙測、通訊廣播、導航定位三大衛星系統基礎建設建構，制定資料共用政策，定調商業化發展模式，並具備國際服務能力；

3、「十四五」目標則是追求在專業化、產業化達到國際先進水準，將特別聚焦在技術創新、滿足需求、拓展市場，企圖持續以軍民融合的方式吸收西方技術與資金強化軍事偵照能力，同時透過形成太空經濟生態圈來推動資源的正向循環（表 1）。

2010 年代全球太空新創產業蓬勃發展，西方商業衛星光學解析度達到 0.5 公尺，以雷達波技術為基礎的合成孔徑雷達衛星（Synthetic Aperture Radar, SAR）解析度則達到 1 公尺。有鑑於此，2015 年中國頒布《高解析度對地觀測系統重大專項衛星遙感資料管理暫行辦法》，重點主要有三：

1、首次定調非軍用精度放寬至光學遙測 0.5 公尺，雷達波遙測 1 公尺，推動國內衛星影像市場進口替代；

2、增加「高分」系列衛星數據使用管道，由原來單一中央管理改為國家、行業、省域、骨幹企事業單位四大類，並簡化國際應用程序，以促進規模經濟與產業化；

3、有利透過政府採購來扶持衛星數據服務龍頭企業。中共遙測衛星產業主要可分為周邊系統與遙測系統兩大部分。周邊系統由於資本技術密集以及國家安全等因素，由國有企業寡占，包括衛星與

⁵ 由於中國太空技術長期為解放軍體系所控制，在《中華人民共和國國家情報法》與「軍民融合」戰略之下，所有衛星資訊皆可為解放軍與中共情報體系所用。因此中方定義所指涉「民用」與「商業」者，並不表示未涉及解放軍資金或技術；「民用」者指涉所建資料庫「不以營利」為目的，開放給中國非國防部門與民間企業者所使用，或作為中國遂行太空外交之工具；「商用」者指「以營利為目的」對國內或國際市場開放購買其衛星圖資。必須注意的是，無論稱「民用」或「商用」者，皆可為解放軍所用。

運載火箭研發與測控、發射場營運等。遙測系統則開放民間資本參與的程度較高，包括衛星設備系統、地面系統與應用系統（表2）。

表 1、中國太空遙測近期相關政策

政策	頒布(年/月)	責任機關	主要相關內容
《中華人民共和國航天法》	預計 2025 年前	全國人大	以綜合性立法解決法源分散的情況。
《十四五新基建規劃》	預計 2021 年	國家發改委	深化公私協力夥伴關係 (public-private-partnership, PPP) 以促進民間投資新基建。
《十四五年規劃和 2035 年遠景目標綱要》	2021/03	國家發改委	加快建設新型基礎設施（新基建）：覆蓋全球的通訊、導航、遙測太空基礎設施體系，建設商業航天發射場。推動軍民共享科研基建、人才、創新、研究成果雙向轉化。
《民用衛星遙感數據管理暫行辦法》	2019/05	國家航天局	在《高分專項衛星遙感資料管理暫行辦法》基礎上增訂細部規定
《關於促進商業運載火箭規範有序發展的通知》	2019/05	國防科工局、中共中央軍委裝備發展部	從生產安全、發射安全、國家安全三方面來管制民企太空商業發射技術。
《關於推動國防科技工業軍民融合深度發展的意見》	2017/12	國務院	將太空領域列為三大重點建設領域，其中又以遙感衛星為破口，制定國家衛星遙感資料政策，促進軍民衛星資源和衛星資料共用。
《國家民用空間基礎設施中長期發展規劃(2015-2015 年)》	2017/02	交通運輸部	十三五期間建構遙測、通訊、導航三大民用太空基建系統。
《關於加快推進“一帶一路”空間資訊走廊建設與應用的指導意見》	2016/10	國家發改委、國防科工局	強化向國際推廣中國平台之應用。
《高端裝備創新工程實施指南(2016-2020 年)》	2016/08	工信部、發改委、科技部、財政部	加快遙測、通訊、導航產業化、國際化。
《國家信息化發展戰略綱要》	2016/07	國務院	定調遙測、通訊、導航三大應用領域為「信息化」必備的太空基建。
《國家創新驅動發展戰略綱要》	2016/05	國務院	發展太空經濟與產業鏈帶動創新，提升進入宇利用太空之能力。

《關於實施製造業升級改造重大工程包的通知》	2016/05	國家發改委	鼓勵民間資源導向《十三五規劃綱要》與《中國製造2025》施政重點，聚焦十大重點工程：智慧化改造、基礎能力提升、綠色製造推廣、高端裝備發展、關鍵新材料發展、航太航空能力建設、電子資訊升級、品質和品牌形象提升、服務型製造轉型、重大產業基地建設。
《十三五規劃綱要》	2016/03	國家發改委	定調測繪地理資訊產業重點：提升測繪能力、國情常態化監測、推展全球地理資訊之利用、加速北斗、遙測衛星商業應用。
《關於經濟建設和國防建設融合發展的意見》	2016/03	中共中央 政治局	推動軍民融合國家戰略。
《國家民用空間基礎設施中長期發展規劃(2015-2025年)》	2015/10	國家發改委、財政部、國防科工局	發展民用太空基建、促進民用太空實用化、產業化、規模經濟。
《高解析度對地觀測系統重大專項衛星遙感數據管理暫行辦法》	2015/08	國務院	鼓勵高解析度衛星數據研究與應用、強化市場機制與商業模式。
《高分專項衛星遙感資料管理暫行辦法》	2015/08	財政部、國家稅務總局	首次將非軍用標準放寬，光學遙測精度不得優於 50 公分，SAR 精度不得優於 1 公尺。

說明：本表保留原政策文件所使用之語彙。

資料來源：蔡榮峰整理自中國政府網、人民網、國防科工局官網、中航證券金融研究所網站。

表 2、中國主要航天企業

國營企業			
集團	二級單位	發展項目	項目立案時間
航天科工集團	航天科工火箭技術有限公司	「快舟」運載火箭研製	2016
	航天科工空間工程公司	「虹雲」工程衛星研製	2017
	航天行雲科技有限公司	「行雲工程」衛星研製	2017
航天科技集團	東方紅衛星移動通信	「鴻雁工程」系統整合與營運	2018
	中國長城火箭有限公司	「龍」系列運載火箭研製	1998
	中國運載火箭技術研究院	「長征」系列運載火箭研製	1967*
中國科學院	長光衛星	「長光」系列衛星研製	2014

技術有限公司			
民營企業（包括國有民營與私有民營）			
公司名稱	主要類型	發展項目	公司成立
藍箭航天	商業太空發射	「朱雀」系列運載火箭研製	2015
星河動力		「穀神星」系列運載火箭研製	2015
零壹空間		「靈龍」系列運載火箭研製	2015
星際榮耀		「雙曲線」系列運載火箭研製	2016
未來導航	導航增強星系	「向日葵」系列導航通訊衛星	2017
歐比特	衛星製造	「珠海」系列遙測衛星	2000
九天微星		「瓢蟲」系列通訊/遙測衛星	2015
歐科微		「翔雲」系列通訊衛星	2014
天儀研究院		「瀟湘」、「元光」系列實驗衛星；「海絲」系列遙測衛星；「北航空事」系列通訊衛星	2015
銀河航天		「銀河」系列通訊衛星	2016
千乘探索		「千乘」系列遙測衛星	2017
零重空間		「靈鵲」系列遙測衛星	2017

說明：本表保留原政策文件所使用之語彙。*1965年即由中國第七機械工業部第八研究院負責總體設計。

資料來源：蔡榮峰整理自各公司官網。

參、衛星測控平台

1960年代，為了配合中國首枚衛星「東方紅一號」的發射，中國西安衛星測控中心的前身「衛星地面測量部」，1967年於陝西渭南成立，當時與長春、閩西、廈門、渭南、南寧和喀什等共7個遙傳追蹤指令（Telemetry, Tracking and Command/Control, TT&C）測控站、2個機動站、3艘「遠望」測量船組成中國第一代太空測控網，此後中國不斷擴大測控站點，形成了目前的陸上測控站、海上測量船、空中測量飛機與中繼衛星四大類測控平台（表3）。⁶發射據點也由酒泉衛星發射中心一地增至目前的酒泉、太原（含東方航天港）、西昌、文昌等4個衛星發射中心，《十四五年規劃和2035

⁶ “China advances maritime space monitoring and control capability,” PRC Ministry of National Defense, June 23, 2017, http://eng.mod.gov.cn/news/2017-06/23/content_4783536.htm; 〈我國有幾個航太測控站？〉, 2008年9月17日, 中國載人航太工程官方網站, http://www.cmse.gov.cn/kpjy/htzs/bklt/200809/t20080917_37372.html; 黃慶橋, 〈中國航太日溯源：震驚世界的“東方紅一號”人造衛星〉, 《澎湃》, 2017年4月29日, https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1667459; 李媛, 〈印象陝西：西安衛星測控中心〉, 2007年1月8日, 《陝西新聞網》, http://web.archive.org/web/20120622055843/http://shaanxi.cnwest.com/content/2007-01/08/content_396633.htm。

年遠景目標綱要》於 2021 年 3 月公布後，第五個發射中心確定將設於浙江省寧波市象山。⁷

由於測控站或衛星訊號接收站可同時用於衛星通訊與飛彈追蹤，這種軍民兩用的特性往往會成為輿論焦點，例如甫與台灣斷交的吉里巴斯，位於塔拉瓦（Tarawa）的設施未來是否可能再度更新啟用，或是於南太平洋設置新站點等。中國戰狼外交引起國際齟齬後，瑞典政府擁有股份的瑞典太空公司（Swedish Space Corporation）宣布不與中方續約，2021 年中國衛星將無法再使用位於西澳當加拉（Dongara）和雅他拉加（Yatharagga）的衛星站傳輸資訊。⁸

表 3、中國衛星測控平台

組織部門與站點	座標
中國衛星發射測控系統部	
北京總部	39.962253, 116.385927
北京航天飛行控制中心	
北京總部	40.071983, 116.256847
西安衛星測控中心（第26試驗訓練基地）	
長春站	43.725332, 125.540836
青島測控站	36.194830, 120.302880
南寧測控站	22.888060, 108.304440
陵水測控站	18.439798, 109.874072
佳木斯站大型相控陣列雷達站(副站)	46.528092, 130.755276
渭南測控站	34.467904, 109.544941
霑益測控站	25.638159, 103.715123
活動測控回收部*	34.503420, 109.416442
第一機動站	34.482661, 109.487657
第二機動站*	37.164167, 79.871307
第三機動站（主站）	42.039565, 111.534044
西安衛星測控中心深空網路	

⁷ 馬蓉，〈中國將在浙江省象山建立第五個航太發射中心 滿足未來商業衛星發射需要〉，《路透社》，2021 年 4 月 8 日，<https://cn.reuters.com/article/china-xiangshan-space-center-0408-idCNKB S2BV0ML>。

⁸ Jonathan Barrett, “Exclusive: China to lose access to Australian space tracking station,” *Reuters*, September 21, 2020, <https://www.reuters.com/article/china-space-australia-exclusive/exclusive-china-to-lose-access-to-australian-space-tracking-station-idINKCN26C0HB>.

佳木斯站	46.493403, 130.770409	
喀什站	38.423420, 76.712207	
阿根廷內烏肯站 (Neuquén, Argentina)	-38.191439, -70.149627	
酒泉衛星發射中心 (第20試驗訓練基地)		
酒泉衛星發射中心	40.983507, 100.206390	
副著陸場*	40.536242, 101.022394	
大樹里雷達測量站	40.722291, 99.992276	
庫爾勒大型相控陣列雷達站	41.641194, 86.236749	
太原衛星發射中心 (第25試驗訓練基地)		
太原衛星發射中心	38.848333, 111.610278	
遙測站點	38.808858, 111.611199	
東方航天港	36.672862, 121.235374	
陽曲站	38.016892, 112.636536	
寧夏銀川移動雷達站*	38.494519, 106.277348	
興縣站*	38.507539, 110.920224	
西昌衛星發射中心 (第27試驗訓練基地)		
西昌衛星發射中心	28.245963, 102.028178	
牛頭山觀測站	28.196568, 102.069191	
觀測站*	27.911767, 102.209881	
宜賓測量站	28.743607, 104.611790	
白塔山宜賓測量站(副站)*	28.775649, 104.634663	
貴陽觀測站	26.409398, 106.670273	
文昌航太發射場		
文昌航太發射場	19.652510, 110.938741	
銅鼓嶺測控點	19.639694, 111.029314	
西沙測控站/三沙市西沙群島琛航島	16.451586, 111.713916	
中國科學院空天信息創新研究院		
喀什站	39.504344, 75.930372	
密雲站	40.451465, 116.858186	
中國國家衛星氣象中心		
北京總部	39.947675, 116.320940	
北京氣象衛星地面站	40.050972, 116.276899	
廣州氣象衛星地面站	23.164589, 113.338715	
廣州氣象衛星地面站(副站)	23.243476, 113.411842	
中國國家衛星海洋應用中心		
陵水站	18.490251, 109.931629	
海外站點		
阿根廷	內烏肯(Neuquén)	-38.192607, -70.148405
巴西	阿爾坎塔拉發射中心 (Alcântara Launch Center)	-2.334606, -44.419621
加拿大	因紐維克(Inuvik)	68.319464, -133.552426
智利	聖地牙哥站(Santiago Station)	-33.150239, -70.667962
衣索比亞	阿迪斯阿貝巴恩托托天文台	9.108695, 38.807249

	(Entoto Observatory, Addis Ababa)	
法國	法屬圭亞那庫魯 (Kourou, French Guiana)	5.222222, -52.773611
	土魯斯(Toulouse) Issus-Aussaguel站	43.428655, 1.497401
	凱爾蓋朗群島(Kerguelen)	-49.351939, 70.256424
格陵蘭	南斯特倫菲尤爾 (Kangerlussuaq) *	67.018341, -50.708817
	努克(Nuuk) *	64.182770, -51.733997
吉里巴斯	塔拉瓦(Tarawa) – 設施中止 運行*	1.356354, 172.932916
肯亞	馬林迪(Malindi)	-2.996044, 40.194204
納米比亞	斯瓦科普蒙德(Swakopmund)	-22.574645, 14.548539
挪威	北極黃河站	78.9232, 11.9345
	斯瓦爾巴衛星站 (Svalbard Satellite Station)	78.230302, 15.395534
巴基斯坦	喀拉蚩(Karachi, Dehmandro)	25.193106, 67.099325
西班牙	馬斯帕洛馬斯 (Maspalomas Station)	27.7633, -15.6342
南非	南非天文台接收站 (Hartebeesthoek station)	-25.890095, 27.685227
瑞典	基魯納(Kiruna)	67.881219, 21.061046
中國南極科學考察站 Chinese Scientific Stations in Antarctica		
長城站		-62.216838, -58.961855
昆侖站		-80.41734, 77.116449
泰山站		-73.85, 76.966667
中山站		-69.373587, 76.37165
中國衛星海上測控部 (第23試驗訓練基地) China Satellite Maritime Tracking and Control Department (Base 23)		
江蘇江陰市總部		31.942827, 120.288723
遠望三號、遠望五號、遠望六號、遠望七號		
中繼衛星		
天鏈一號02星		1.75,170.88
天鏈一號03星		-0.80,20.27
天鏈一號04星		-0.12,176.90
天鏈二號01星		1.20,79.73

說明：*表示詳細資訊不足，或與現況有所出入。

資料來源：蔡榮峰整理自公開資訊，陸上測控站部分擷取自 Peter Wood, Alex Stone & Taylor A. Lee, China's Ground Segment: Building the Pillars of a Great Space Power, CASI of Air University, March 1, 2021, pp.79-81, <https://www.airuniversity.af.edu/CASI/Display/Article/2517757/chinas-ground-segment-building-the-pillars-of-a-great-space-power/>。

肆、「資源」「高分」與衛星影像

一、「資源」系列

中國-巴西「資源」系列共發射了六枚衛星，前述三星目前均已替換第二代。2019年12月20日發射成功的「資源一號04A星」最高解析度從上一代的5公尺提升至2公尺，幅寬從60公里，擴增至90公里。在與巴西聯合製造「資源一號02B」衛星之後，中國開始自主開發高解析度遙測衛星。中國2011年發射了自主研發的「資源一號02C」衛星，其性能與「資源一號02B」相仿，但是達到技術自主的目的。

2012年中國發射了第一顆民用高解析度光學衛星「資源三號01」，為中國第一枚可立體成像的民用遙測衛星，能測繪「1:5萬」比例尺地形圖，近地點最高解析度達2.1公尺，軌道行徑方向拍攝解析度為3.5公尺。2016年「資源三號02」衛星發射組網後，軌道行徑方向拍攝解析度增加到2.5公尺。2020年7月15日「資源三號03」發射後，全球覆蓋週期由59天縮短至15天，再訪率也由3-5天縮短至約1天。⁹

二、「高分」系列

「高分一號」和「高分二號」都是光學成像遙感衛星，惟後者全色和多光譜解析度提高一倍，首度達到全色1公尺、多光譜4公尺，且國產化程度為「高分」系列中最高者。

⁹ 〈資源三號衛星影像資料〉，中景視圖科技有限公司，2021年4月11日閱覽，<http://www.zj-view.com/ZY3>；“ZY-3A,” eoPortal Directory-European Space Agency, reviewed April 11, 2021, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/zy-3a>; Xinming Tang et al., “The China ZY3-03 Mission: Surveying and Mapping Technology for High-Resolution Remote Sensing Satellites,” *Geoscience and Remote Sensing Magazine, IEEE*, Volume 8, Issue 3, September 2020, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9044293/authors#authors>。

「高分三號」則為系列中唯一一枚低軌道合成孔徑雷達(SAR)衛星，重點是打破過去核心技術全仰賴外國的瓶頸。當時為中國首枚 C 頻段 SAR 衛星，解析度最高可達 1 公尺。

「高分四號」為中共第一顆地球靜止軌道 (GEO) 光學衛星，最大數據傳輸速率為每分鐘 3 張影像，全色解析度為 50 公尺；2020 年發射地的「高分十三號」則為第二枚 GEO 光學衛星。

「高分五號」則因其具有大氣污染控制應用的任務而裝有高光譜相機、大氣環境和成份探測設備；「高分六號」又與「高分一號」擁有相似性能。

2018 年 3 月 31 號發射的三枚衛星「高分一號 02 星」、「高分一號 03 星」、「高分一號 04 星」，組成了中國第一個民用高解析度光學衛星星座，成像能力達到了的再訪週期 2 天、全球覆蓋週期 15 天的頻率。這三顆衛星還可與 2013 年發射的「高分一號」衛星合作，將再訪率縮短至 1 天，全球覆蓋週期至 11 天。¹⁰

2020 年 7 月 3 日發射的「高分多模」衛星則為整個高分專項當中，解析度最高的光學遙測衛星，配有 1 個全色、8 個多光譜譜段，解析度優於 50 公分。¹¹

三、衛星影像自給率

中國目前對地偵照衛星達 177 枚，¹²並戮力發展影像仍供不應求的 SAR 衛星偵照。光學遙測已產生進口替代效應，SAR 部分仍落於西方商業公司之後。

¹⁰ 〈高分一號 02、03、04 星傳回首批圖像〉，中華人民共和國國務院國有資產監督管理委員會，2018 年 4 月 11 日，<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c8841167/content.html>。

¹¹ 馮華，〈高分多模衛星看得更清更准〉，《人民網》，2020 年 10 月 12 日，<http://ip.people.com.cn/BIG5/n1/2020/1012/c136655-31888246.html>。

¹² 《中國安全戰略報告 2021》，日本防衛研究所，2020 年 11 月 13 日，頁 38，http://www.nids.mod.go.jp/publication/chinareport/chinese_index.html。

在光學衛星部分，中共軍用遙測衛星主要使用可見光或近紅外光譜段，其最高解析度應已達 30 公分水準，民用遙測衛星則注重多光譜成像，以便識別各種資源特徵，其解析度按應用所需大多尚未達到亞米級。中國航太科技集團五院資源三號衛星總設計師曹海翊曾表示，在資源三號系列衛星發射之前，每購買一次 2.5 米解析度中國全境影像，成本可達 3 億人民幣，「資源三號 01 星」運行後至 2020 年為止，已拍攝了 8 次的中國全境影像，連帶使國際廠商相關報價一併壓低。¹³

在 SAR 衛星部分，繼 2016 年發射的「高分三號」，天儀研究院的「海絲一號」2020 年 12 月 22 日也成功發射，長沙天儀也成為中共首家、全球第三家運營 SAR 衛星的商業公司。¹⁴「海絲一號」，最高解析度為 1 公尺，為中國第一枚商用 SAR 衛星，也是世界上少數使用 C 波段的 SAR 商用衛星，中國官方稱是為了「跨大民用可能性」，間接確立了軍民通用的既有目標。為了達成全天候實時偵照的目標，長沙天儀計畫總共要發射 56 枚小型 SAR 衛星。

中共國防科工局重大專項工程中心主任高分專項總設計師童旭東曾提及 2018 年中國對於解析度 16 公尺的遙測影像數據已實現完全進口替代，而全色 2 公尺/高光譜 8 公尺數據自給率約 80%，全色 1 米公尺/4 公尺部分替代進口，亞米級幾乎完全為國外壟斷。當時 2.5 公尺以下解析度衛星數據直接消費總額約超過 5 億人民幣，70% 皆為外購。¹⁵未來隨著商業衛星如「高景」、「珠海」、「千乘」、

¹³ 胡喆，〈三星齊聚！資源三號 03 衛星發射三大看點〉，《新華網》，2020 年 7 月 25 日，http://www.xinhuanet.com/tech/2020-07/25/c_1126284631.htm。

¹⁴ 其它兩家國際 SAR 商業公司為芬蘭 ICEYE 公司（18 枚 X 波段，再訪週期 1 小時，解析度 1 公尺 X 25 公分）和美國 Capella 公司（36 枚 X 波段，再訪週期 1 小時，解析度 50 公分 X 50 公分）。在國家級 SAR 衛星方面，2007 年德國 TerraSAR-X、義大利 COSMO-SkyMed 及加拿大的 Radarsat-2 等 SAR 衛星陸續昇空，解析度都達到 1 公尺。COSMO-SkyMed 第二代也即將部署。

¹⁵ 〈中國“天眼”工程新進展 高分衛星數據已替代進口〉，《新浪網》，2018 年 6 月 11 日，<https://bit.ly/32uL5Ew>。

「銀河」、「靈鵲」等系列星系逐漸建成後，預料解析度不優於一公尺的中國衛星影像市場將邁向完全國有化。

表 4、高分系列衛星

名稱	NORAD 代號	COSPAR 代號	發射日期
GAOFEN 12-02	48079	2021-026A	2021/03/20
GAOFEN 14	47231	2020-092A	2020/12/06
GAOFEN 13	46610	2020-071A	2020/10/11
GAOFEN 11-02	46396	2020-064A	2020/09/07
GAOFEN 9-04	46025	2020-054A	2020/08/06
GAOFEN DUOMO (GFDM)	45856	2020-042A	2020/07/03
GAOFEN 9-03	45794	2020-039A	2020/06/17
GAOFEN 9-02	45625	2020-034B	2020/05/31
GAOFEN 7	44703	2019-072A	2019/11/03
GAOFEN 10	44622	2019-066A	2019/10/04
GAOFEN 11	43585	2018-063A	2018/07/31
GAOFEN 6	43484	2018-048A	2018/06/02
GAOFEN 5	43461	2018-043A	2018/05/08
GAOFEN 1-04	43262	2018-031D	2018/03/31
GAOFEN 1-03	43260	2018-031B	2018/03/31
GAOFEN 1-02	43259	2018-031A	2018/03/31
GAOFEN 3	41727	2016-049A	2016/08/09
GAOFEN 4	41194	2015-083A	2015/12/28
GAOFEN 9	40894	2015-047A	2015/09/14
GAOFEN 8	40701	2015-030A	2015/06/26
GAOFEN 2	40118	2014-049A	2014/08/19
GAOFEN 1	39150	2013-018A	2013/04/26

資料來源：作者整理自公開資訊。

伍、結論

對北京來說，「資源」系列最重要的意涵是讓中共能在衛星立體測繪上擁有自主性，而「高分」系列則是在光學遙測方面能夠拉近與歐美國家之間的距離。中國在光學觀測衛星公尺等級解析度，在能力門檻上達美國 2000 年代水準，特別是解析度亞米級衛照方面實現了部分自主，SAR 衛星則剛開始出現進口替代來源，但品質仍與歐美有差距。中國雖然在解析度上追趕西方衛星，但是其龐大的製造量以及部署速度與 AI 技術，將有利其迅速發展。

由於一般障地防護用的反偵照光學迷彩對於 SAR 衛星對說效果極為有限，中國 SAR 衛星若未來大量部署，將成為我國安全一大隱患。反制 SAR 衛星偵照目前主要有兩種方式：第一、「被動防護」，即利用複合塗料或雷達波散射偽裝網掩蔽，重點在於材質的雷達波吸收能力，複合塗料過於昂貴難以大量採用，雷達波散射偽裝網較為可行，然而需考量我國高溫多雨環境對材質之耗損，環境鹽度更高的海軍船艦就更不在話下。第二、「主動防護」，對於防護目標直接以電磁波散射干擾，或者利用 SRA 衛星成像特性進行電磁偽裝，如利用「雷達陰影」（Radar Shadow）面積來發射擬態雷達波，這類反 SAR 衛星偵照技術須結合電磁作戰與衛星偵照之專才，未來將是我國電磁作戰不容忽視的一大重點。

此外，我國也應特別觀察中國地球靜止軌道（GEO）光學衛星之發展，該類衛星能夠執行實質上的即時定點偵照，對於中國強化「反介入/區域拒止」（Anti-Access/Area Denial, A2/AD）具有難以取代的增強作用。現階段 GEO 光學衛星礙於軌道位置超過 36,000 公里，光學鏡片技術難以突破、對地訊號傳輸不夠即時兩大困難點，仍未達到實時功效，但是未來中國一旦在星地雷射傳輸、GEO 光學成像技術有所突破，屆時恐將見到太空級監控設備的誕生。

本文作者蔡榮峰為澳洲國家大學戰略及外交碩士，現為財團法人國防安全研究院國家安全研究所政策分析員。

A Preliminary Study of The Development of China’s Space Telemetry Satellites —from the “Ziyuan” to the “Gaofen” Series

Oddis J. Tsai

Policy Analyst

Abstract

In recent years, China has implemented the “Military-Civil Fusion” Strategy to develop high-resolution satellite imagery capabilities because of its ambition to build up global all-weather reconnaissance. This paper aims to analyze China’s telemetry capacities through discussing the “Ziyuan”(資源) and “Gaofen”(高分) series of satellites and newly launched commercial satellites.

This article consists of three sections. The first focuses on the evolution of the “Ziyuan” and “Gaofen” series and the policies for developing civil telemetry satellites since 2015. The second intends to create an inventory of satellite measurement and control platforms of the Peoples’ Liberation Army. The third examines the “Ziyuan” and “Gaofen” series of satellites and the self-sufficiency of China's satellite imagery. This article then concludes by addressing the security implications to Taiwan.

Despite their importance, telemetry satellites involved in ocean and weather observation, as well as the covert PLA reconnaissance constellation “Jiangbin”(尖兵), “Yaogan”(遙感) and “Shiyan”(試驗), are outside the scope of this paper.

Keywords: China, satellite, telemetry

衛星遙測技術於跨國流域治理之應用 —以「湄公大壩監測」計畫為例

劉翎端

國家安全研究所

壹、前言

近年來衛星遙測技術隨著新觀測平台產生，以及開放資料（Open Data）的普及化，應用愈加廣泛多元，更成為跨國合作進行環境監測、災害救援以及打擊犯罪的利器：例如美國太空總署（NASA）、歐洲太空總署（ESA）、歐盟哥白尼地球觀測計畫（Copernicus Programme）合作之哨兵六號（Sentinel-6）衛星，用來觀測全球暖化導致之海平面上升變化，監測熱浪與颶風，及提供更精準的海象資訊以增進作業船隻安全。¹ 而由日本主導、28 國參與的守望亞洲（Sentinel Asia）倡議，旨在串聯跨國衛星能量，提供亞太地區近即時（near-real-time）自然災害資訊。² 另外，非營利國際組織—全球漁業觀測站（Global Fishing Watch）亦結合衛星與船舶自動識別系統（automatic identification system, AIS）偵測非法漁業捕撈活動。³ 國際刑警組織（INTERPOL）則自 2018 年起，每年執行「海上 30 天行動」（Operation 30 Days at Sea），透過衛星影像及遙測載具，查緝全球各地河川海洋廢棄物之非法傾倒與走私活動。⁴

除了上述案例外，衛星遙測技術也被運用在跨界流域的水體監測上，以平衡跨界水資源分配不均的問題。聯合國即指出，跨界流

¹ “Recent Developments in Remote Sensing and Earth Observation,” GIS LOUNGE, 2 August 2020 <https://reurl.cc/NX5pAp>; Sentinel-6 Michael Freilich satellite ensures continuity of sea-surface height measurements, UN-SPIDER, 30 November 2020, <https://reurl.cc/jqXk1n>;

² “JPT members,” Sentinel Asia, <https://reurl.cc/qm9Okp>

³ “Illuminating global fishing activity with satellite AIS tracking,” Spire Global, 4 June 2020, <https://reurl.cc/jqXD5m>

⁴ “Marine pollution crime: first global multi-agency operation,” INTERPOL, 13 November 2018, <https://reurl.cc/ZQRy1l>; “Operation 30 Days at Sea 3.0 reveals 1,600 marine pollution offences worldwide,” INTERPOL, 29 April 2021, <https://reurl.cc/pmQ5La>

域占地球上約六成的淡水資源，並提供全球近四成人口的用水需求。⁵ 氣候變遷對於水資源的衝擊，更突顯出合宜的流域治理，對維繫區域社經發展與政治穩定的重要性，而發源自中國、蜿蜒於中南半島的湄公河即為代表案例：1990 年代起，中國陸續於湄公河上游瀾滄江築壩、興建水力發電廠，大幅改變河川原有水文生態，其不透明的管理方式與無預警的水位調節，不僅影響下游地區的水稻、觀光與內陸養殖漁業，亦危及沿岸社區用水與居住安全。

由於湄公河流域範圍尚涵蓋泰國、越南、緬甸、柬埔寨、寮國等五國，當中除緬甸以外的其他四國，雖已自 90 年代中期已成立「湄公河委員會」(Mekong River Commission, MRC)，然受限於與中國之間既合作又多所疑慮的矛盾外交關係，多年來在水權的協商與對話上成效並不佳。而湄公河的流域治理亦提高美國對中南半島的關注，自 2009 年起偕同 MRC 提出「湄公河下游倡議」(*Lower Mekong Initiative, LMI*)，2020 年 9 月擴大為「湄公河-美國夥伴關係」(*The Mekong-U.S. Partnership*)，重點推動項目即包含湄公河水資源利用之揭露。同年 12 月 15 日進一步推出「湄公大壩監測」(*Mekong Dam Monitor*) 計畫，彙整下游各國所蒐集與分析之水文資訊，並透過衛星影像、地理資訊系統 (*Geographic Information System, GIS*) 之分析掌握上游水文變化，發佈於線上平台，提供全球使用者查詢參考。⁶

本文將以此「湄公大壩監測」案例，探討衛星影像與遙測技術於跨界流域治理之應用與成效，以及其對區域地緣政治及權力平衡可產生之助益。

⁵ “Reviewing progress on transboundary water cooperation in the world,” United Nations Economic Commission for Europe, 13 October 2020, <https://reurl.cc/pmqW3r>

⁶ “Launch of the Mekong Dam Monitor,” US Embassy in Cambodia, 16 December 2020, <https://reurl.cc/WEekN5> ; “Mekong Water Data Initiative (MWDI),” Mekong-U.S. Partnership, <https://reurl.cc/qm9On0>

貳、湄公河流域水位及流量監測

「湄公大壩監測」計畫是在「湄公河-美國夥伴關係」的資金贊助下，由華府智庫史汀生研究中心（The Stimson Center）及環境顧問公司「地球之眼」（Eyes on Earth）合作執行，針對湄公河主流 13 處已完工的水壩及水庫，以及湄公河支流發電量超過 200 百萬瓦（MW）之 13 座水壩，每週定期更新其高解析度衛星影像，以及水庫營運之水位高度變化。該計畫亦針對中國在湄公河上游瀾滄江所設 11 處水壩之梯級水力發電廠，進行視覺化分析、模擬河川自然流量，並與泰國清盛（Chiang Saen）及寮國永珍（Vientiane）兩處水位測量計作比較。另並繪製湄公河流域地表溫濕度、雪量與降雨量分佈，監控流域內超過 500 處規劃中或已完工的水壩與水庫，並對湄公河下游四個關鍵區域進行高解析度影像及水文分析。⁷ 相關監測指標簡述如下：

一、由衛星影像推估河川水位變化

本計畫採用谷歌地球引擎（Google Earth Engine）利於分析大數據地理資料的雲端運算平台，下載自歐盟哥白尼地球觀測計畫之哨兵一號（Sentinel-1）及哨兵二號（Sentinel-2）衛星所取得影像。哨兵一號衛星因搭載合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）系統，發射電磁波後，可穿透雲層覆蓋及接收地面回波，不受晝夜及雲量多寡的限制。而在哨兵一號衛星資料缺漏或品質不佳時，則以搭載多光譜影像儀（Multi-spectral instrument, MSI）之哨兵二號衛星取得補助影像，辨別水體後輸出至地理資訊系統軟體 ArcGIS，剔除被陰影遮蓋或照射角度不佳的河岸區段，以繪製出清晰的水庫沿岸線條。⁸

⁷ “Mekong Dam Monitor,” STIMSON Center, <https://reurl.cc/OX2pYA>

⁸ “Mekong Dam Monitor: Methods and Processes,” STIMSON Center, 10 December 2020, <https://reurl.cc/jqXk9L>

接下來則將水庫沿岸線條套疊至日本宇宙航空研究開發機構 (JAXA) 利用 ALOS 衛星所建構之 30 公尺解析度全球數值高程資料，並將資料網格化 (rasterization) 後，以中值濾波演算法 (median filter) 去除雜訊，得出現階段觀察期內估算之平均海拔數值，並與過往估算數值進行比對，以推估出正常運營情況下水庫水位之最大與最小值。⁹ 最後則分別取上述數值與每日實際觀測的水庫和河流水位進行校正，例如寮國南康二號水壩 (Nam Khan 2)，該水壩因位處湄公河中游的山區，而被選定為校正參考基準 (圖 1)。

10

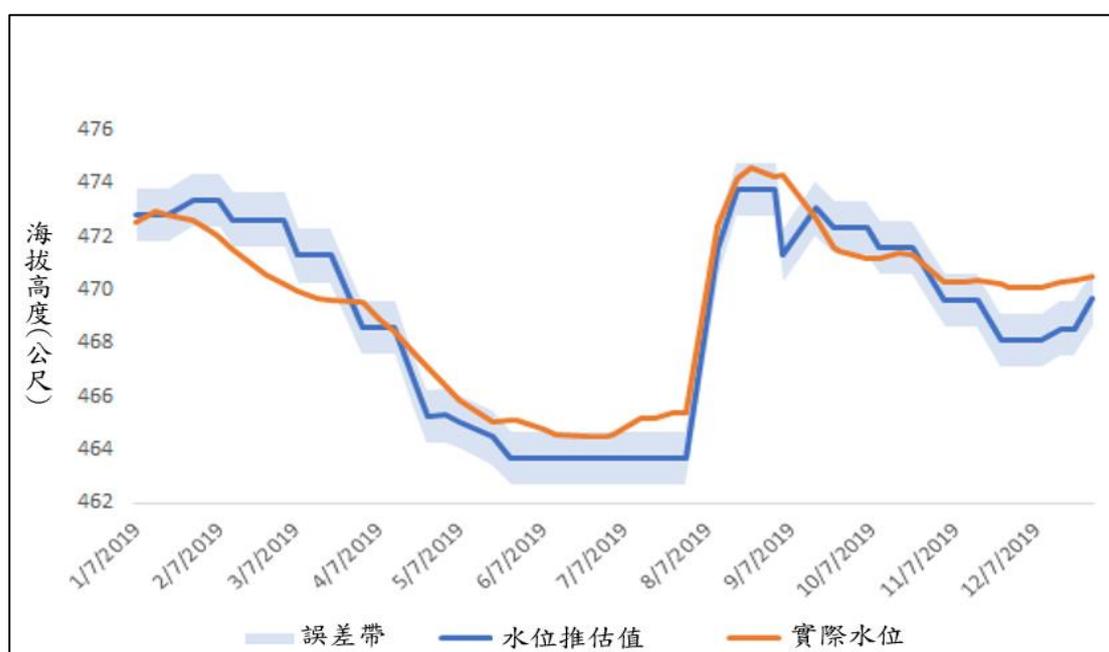


圖 1、2019 年寮國南康二號水壩水位變化

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹¹

另一個校正基準案例位於泰國清盛，從圖 2 中可看到推測值與實際觀測數值相似的水位變化，顯示出此衛星監測方式亦適用於推估附近沒有水壩或水庫的河段水位。¹²

⁹ As note 8.

¹⁰ As note 8.

¹¹ As note 8.

¹² As note 8.

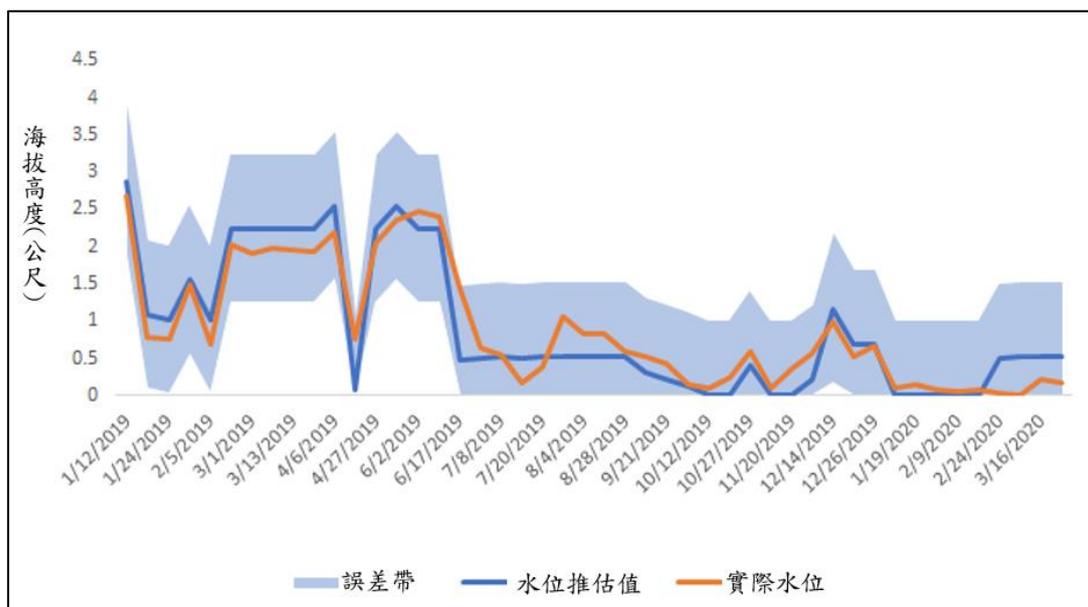


圖 2、2019 年至 2020 年 3 月中旬泰國清盛河段水位變化

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹³

二、監測瀾滄江梯級水力發電廠之流量變化

湄公河流域濕季約為 6 月至 11 月，乾季則在 12 月至隔年 5 月。然而濕季期間水量卻被大量限制停留在上游瀾滄江區段，進行水力發電以滿足中國東部省分用電需求，而下游柬埔寨、越南等國家則面臨缺水的窘境。反之在乾季期間，上游水庫經常無預警放水，造成下游洪患。

為探究中國於湄公河上游瀾滄江建設之梯級水力發電廠流量，監測計畫結合烏弄龍至景洪之 11 座水庫之水位推估值、泰國清盛河段所量測之實際水位值及模擬流量，視覺化後作成一剖面圖，並將每週或每月各水庫之推估水位海拔高度，與過去同時期資料作比較。若水位偏高，則判定為河川流量減少，並將箭頭標示為黃色；若水位偏低，則判定為河川流量增加，並將箭頭標示為綠色；若水位長時間處於滿水狀態或維持相同水位，則判定為正常流量。¹⁴

¹³ As note 8.

¹⁴ As note 8.

以此方式可得知 2020 年 7 月濕季期間，瀾滄江梯級水庫 11 處中 7 處放流量較正常偏低（黃色及紅色箭頭處），其中小灣及糯札度水庫 2 處因作為主要控制據點，放流量甚至降到最低（圖 3）。¹⁵

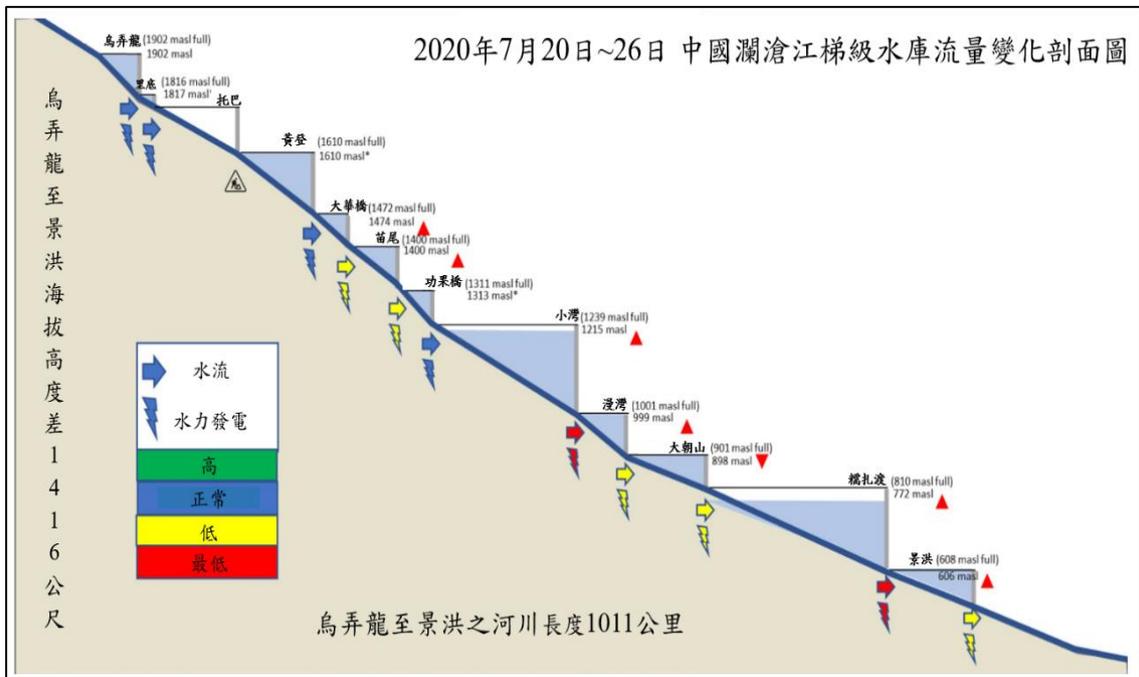


圖 3、2020 年 7 月 20 ~26 日中國瀾滄江梯級水庫流量變化圖

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹⁶

而在上游水庫攔截水源、限制流量以蓄水的同時，下游卻飽受旱災之苦，圖 4 即顯示柬埔寨境內、東南亞最大淡水湖的洞里薩湖（Tonle Sap Lake）水位近五年即呈現濕季偏低的變化，且整體水位有逐年遞減的趨勢，尤以 2019 年及 2020 年最為明顯，例如 2020 年 9 月期間湖泊水位（橘線）較往年明顯低落。比對湄公河計畫監測網站公佈之 2017 年 9 月 21 日及 23 日衛星影像，可看到該地區過往被湖水淹蓋區域正歷經大面積乾旱，衝擊沿岸漁村之稻種與捕魚生計（圖 5）。

¹⁵ Mekong Dam Monitor lifts the veil on basin-wide dam operations, STIMSON Center, 14 December 2020, <https://reurl.cc/Q71Ly9>

¹⁶ As note 8.

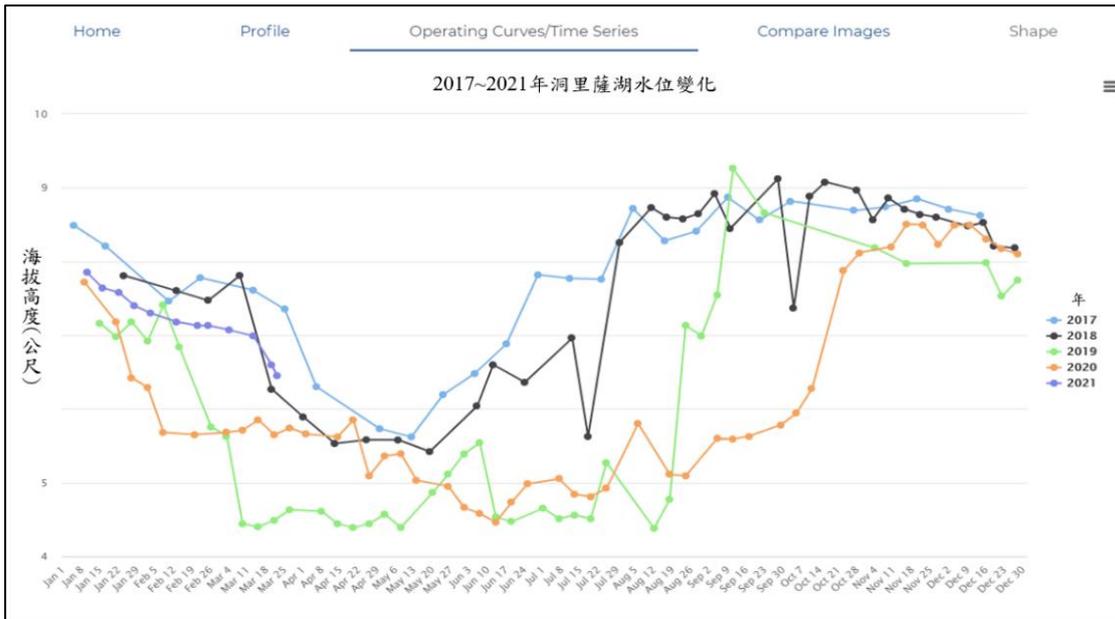


圖 4、2017 至 2021 年 3 月柬埔寨洞里薩湖水位變化

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹⁷

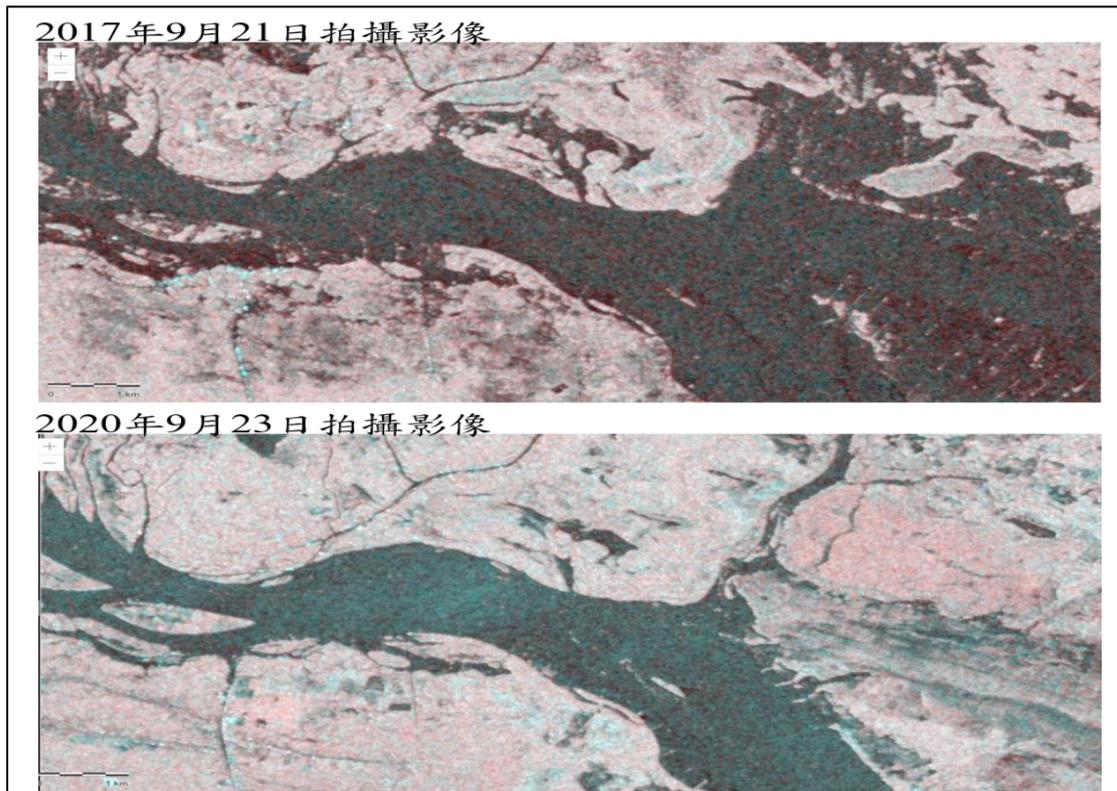


圖 5、2017 年 9 月與 2020 年 9 月洞里薩湖衛星影像對照

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹⁸

¹⁷ As note 7.

¹⁸ As note 7.

參、湄公河流域氣候因子監測及水利工程紀錄

一、以國防氣象衛星微波成像器推估溫溼度、降雨與積雪覆蓋變異

為全面掌握影響湄公河流域農漁業的氣候變化因子，以提供農耕業者及水利局參考，監測計畫亦納入地表溫度、地表濕度、降雨與積雪覆蓋變異等數項指標。地表溫度資料取自美國國防氣象衛星計畫（Defense Meteorological Satellites Program, DMSP）透過搭載特殊感應微波成像器（Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I）衛星所量測之氣候數據記錄（Climate Data Record），並剔除受水體區域受地面水氣影響而被低估的地表輻射率偏差值，以 1992 年至 2018 年的長期溫度變化趨勢作為基期，每週繪製出流域之地表溫度異常圖。¹⁹

此外，地表濕度及積雪覆蓋亦取自國防氣象衛星微波偵測資料，再以電腦運算得出水體面積，或搭配濾波器接收並辨別冰雪所反射之微波，以偵測上游區域的積雪面積與冰川融化情形。²⁰ 降雨資料則取自美國太空總署及日本 JAXA 合作之全球降水觀測計畫（Global Precipitation Measurement, GPM）每月觀測值，並與 2000 年至今的降雨量中位數做比較，繪製降雨量變異分布圖（圖 6）。²¹

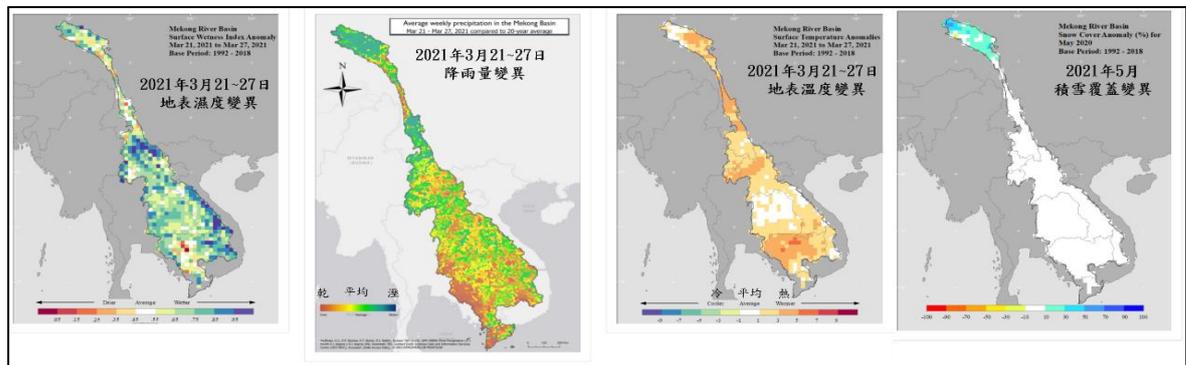


圖 6、湄公河流域地表濕度、降雨量、地表溫度和積雪覆蓋變異

¹⁹ As note 8.

²⁰ As note 8.

²¹ As note 8.

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站²²

二、系統性紀錄流域內各國水利工程進度

除了掌握湄公河流域內各項氣候因子變異外，監測計畫亦紀錄流域內逾 500 處規劃中或已完工的水壩與水庫資訊，項目包含庫址所在地、發電量、完工年份、建案數量、出資國家、貸款銀行、營建與供應商等，定期更新相關新聞報導連結，以利使用者查詢（圖 7）。²³

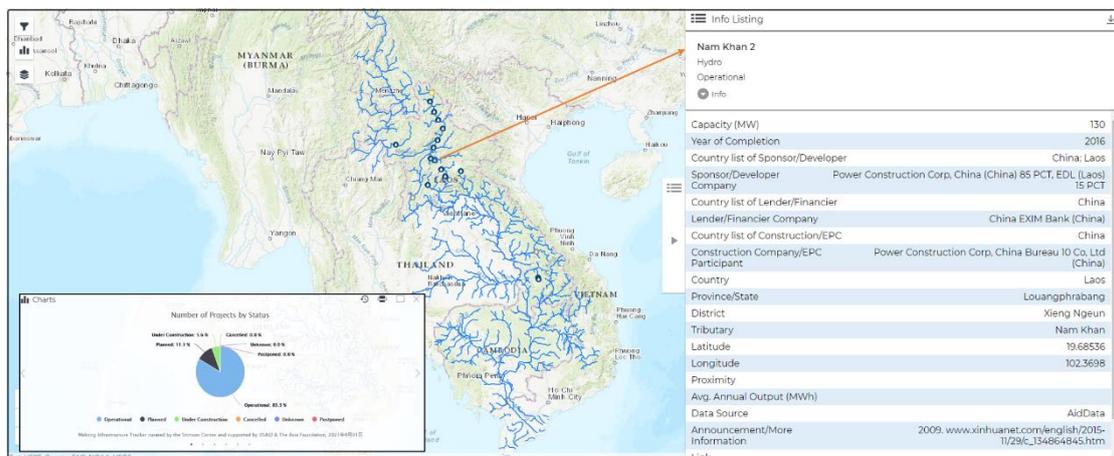


圖 7、寮國南康二號水壩位置及建造資訊

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站²⁴

肆、結語

透過衛星遙測技術及地理資訊系統的整合與應用，湄公河流域水資源利用情形得以被透明化，也進而影響地緣政治的權力分配。而湄公河大壩監測計畫藉由開放資料的能量，亦即將水庫監測水位、流域全體之溫度、溼度、降雨與積雪覆蓋變異作成公開資訊發佈，則能使相關利益關係人，包含農漁業者、流域周邊社區清楚檢視上游至下游的水資源分布，並能提前預防乾旱與洪患事件，或將損害風險降低。

²² As note 8.

²³ As note 8.

²⁴ As note 7.

湄公河流域水文監測之資訊揭露，亦提供客觀且有力的數據佐證，使長期無法獲得合理水資源分配、抗爭力量有限的下游國家，得以對坐擁上游流域、占有豐沛發電水量及地理優勢的中國，進行有效的輿論施壓。例如湄公河監測計畫於 2020 年 12 月 15 日開始運作後，即偵測出 12 月 31 日起至 2021 年 1 月 4 日之間，泰國清盛、緬甸與寮國接壤的金三角地區，水位即無預警顯著下降超過 1 公尺，然對照同時間上游中國境內瀾滄江梯級水力發電廠之景洪壩，卻正進行蓄水，且中方並未在第一時間將攔壩蓄水之訊息通知下游國家。²⁵而在該事件被國際媒體報導後，中方迫於輿論才在 1 月 5 日發出聲明，將 1 月 5 日至 24 日擬蓄水的措施，告知泰國、緬甸、寮國及越南所組成的湄公河委員會。²⁶此顯示出湄公河流域之衛星和遙測技術應用範例，有助於達成區域資源平衡分配、減少人為因素引起之旱澇災損程度，值得作為其他地區跨界流域治理的參考：例如北韓於臨津江（Imjin river）上游築壩影響下游南韓之蓄水量，以及多次無預警洩洪，造成下游南韓人員傷亡事件。²⁷此即可藉由類似湄公河監測計畫之模式，有效掌握整體流域水資源變化、提前作好疏散或抗旱措施，以降低區域衝突或軍事摩擦的可能性。

本文作者劉翎端為英國劍橋大學環境、社會與發展碩士，以及倫敦政治經濟學院社會與發展碩士，現為財團法人國防安全研究院國家安全研究所政策分析員。

²⁵ China Belatedly Notifies Mekong Nations of River Disruption, *The Diplomat*, 8 January 2021, <https://reurl.cc/ZQRAD6>

²⁶ As note 25.

²⁷ Kim D, Lee H, Jung HC, Hwang E, Hossain F, Bonnema M, Kang D-H, Getirana A. Monitoring River Basin Development and Variation in Water Resources in Transboundary Imjin River in North and South Korea Using Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2020; 12(1):195. <https://doi.org/10.3390/rs12010195>

Satellite and Remote Sensing Technology in Transboundary Water Governance: the Case of the Mekong Dam Monitor

Linda Liu

Policy Analyst

Abstract

In September 2020, the US State Department, together with five ASEAN countries, namely, Thailand, Vietnam, Myanmar, Cambodia, and Laos, launched the "Mekong-US Partnership" to continue and expand the "Lower Mekong Initiative" (LMI) that was implemented from 2009 to 2020. The Partnership is intended to enhance water and natural resources management in the Mekong River Basin, promoting regional economic development and social security, thereby consolidating the power of the United States in Indochina and the Indo-Pacific region. This is mainly a response to the fact that China has built multiple dams and hydroelectric power plants on the Lancang River on the upper Mekong in recent years, which has greatly changed the ecology of the river, causing water resource disparity in the region.

China's unwillingness to share transparent water management information has not only impacted agricultural and aquacultural industries downstream, but increased drought and flooding risks for the riverine communities. Thus, the first priority for the US and member states in the Mekong-US Partnership is to improve the use of water resources in the Mekong River Basin. On December 15, 2020, the "Mekong Dam Monitor" project was thus launched; through the application of satellite images, remote sensing technology and Geographic Information System (GIS), the project will serve as a powerful tool to disclose the hydrological information of the entire basin.

The article examines the case of the "Mekong Dam Monitor" project and the effectiveness of satellite and remote sensing technology in the governance of transboundary river basins, as well as the benefits they can contribute to regional geopolitics and power balance.

Keywords: Mekong Dam Monitor, Satellite Image, Open Data, Geographic Information System (GIS)

出版說明

「財團法人國防安全研究院」設立宗旨為增進國防安全研究與分析，提供專業政策資訊與諮詢，拓展國防事務交流與合作，促進國際戰略溝通與對話。

現設有 4 個研究所，本院研究範圍涵蓋：國家安全與決策、國防戰略與政策、中共政軍、非傳統安全與軍事任務、網路作戰與資訊安全、先進科技與作戰概念、國防資源與產業、量化分析與決策推演等領域。

本刊各篇文章由本院研究人員、以及外部學者、專家撰擬，以 3,000 至 4,000 字以內為度，稿件均經審稿程序，其著作權為本刊所有，未經同意，請勿轉載。

※本特刊內容及建議屬作者意見，不代表財團法人國防安全研究院之立場。

發行人：霍守業 | 總編輯：林成蔚 | 副總編輯：柏鴻輝

編輯主任：蘇紫雲 | 執行主編：洪瑞閔、蔡榮峰

責任校對、助理編輯：陳亮智、林彥宏、江炘杓、劉姝廷、陳力綺

出版者：財團法人國防安全研究院

院址：10048 臺北市中正區博愛路 172 號

電話：(02) 2331-2360 傳真：(02) 2331-2361

Institute for National Defense and Security Research

No.172, Bo-Ai Road, Chongcheng Dist., Taipei City, Taiwan (R.O.C.)

Tel:886-2-2331-2360 Fax:886-2-2331-2361



財團法人國防安全研究院

Institute for National Defense and Security Research