

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

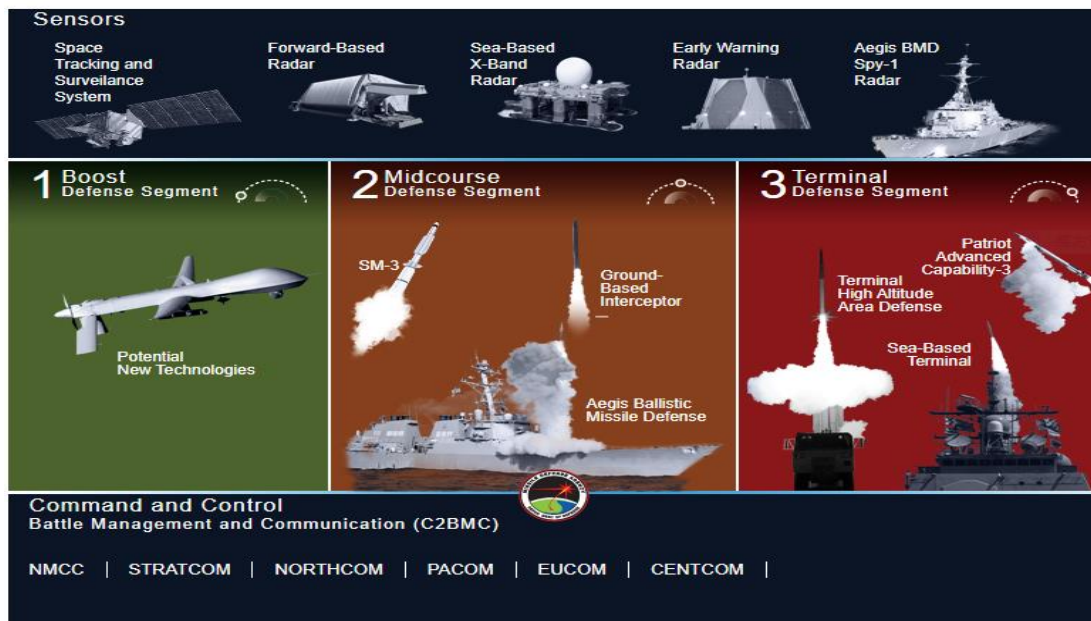


圖 1、美國飛彈防禦體系

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。

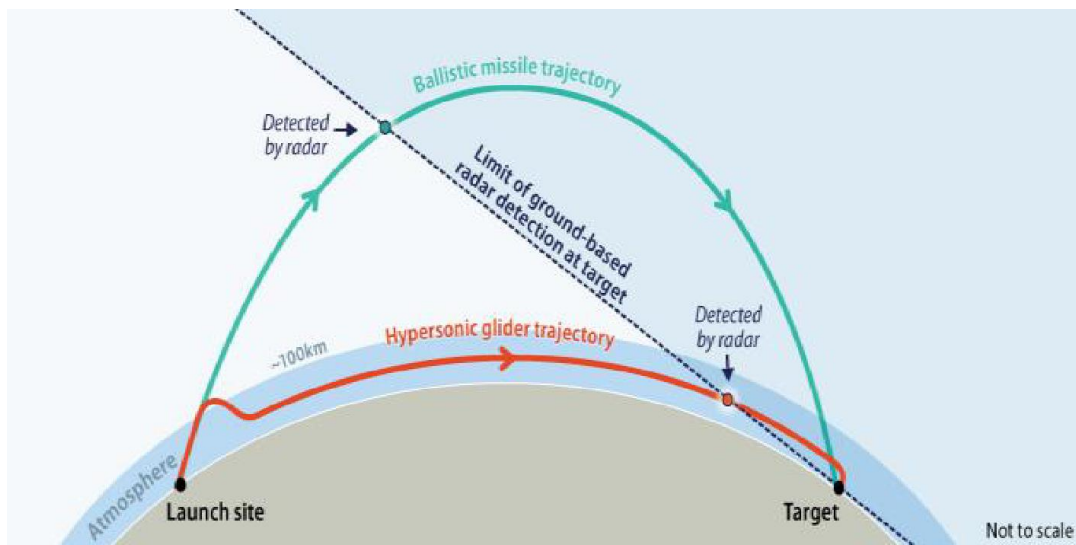


圖 2、雷達偵測彈道飛彈與極音速飛彈

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

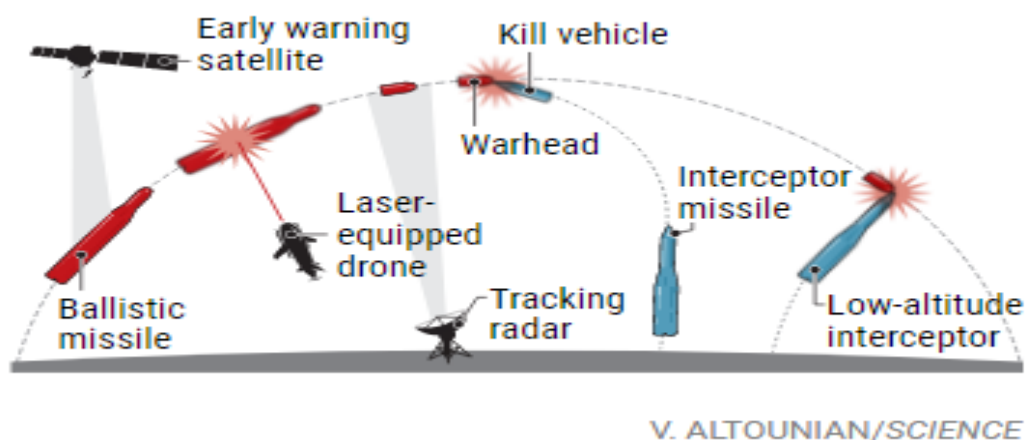


圖 3、結合衛星、動能與定向武器的飛彈防禦體系

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