整體飛彈防禦構建回顧與發展趨勢

白捷隆

國家安全研究所

壹、前言

整體飛彈防禦（Integrated Missile Defense）不僅是現代軍事科技的尖端展現，更是大國間戰略心理博弈的核心。從 1944 年納粹德國以 V-2 火箭對倫敦實施恐怖轟炸開始，人類防禦思維便從二維平面防空，躍升至三維的彈道截擊。整體飛彈防禦系統的發展，實質上反映人類對於「絕對安全」的追求與科技極限的挑戰。在冷戰時期，這是一場關於核毀滅的生存競賽；進入 21 世紀，這場競賽演變為涵蓋網路、太空、電磁脈衝與人工智慧等的「多域防衛戰」。

隨著 2022 年俄烏戰爭爆發，傳統防空邏輯面臨前所未有的極限測試。極音速飛彈的非線性軌跡、匿蹤巡弋飛彈的低空滲透，以及每架僅需數萬美元的自殺式無人機所構成的「飽和攻擊」，正迫使各國防務規劃者重新定義「成本交換比」（Cost-Exchange Ratio）。本文將從構建規劃的視角，剖析整體飛彈防禦從起源到最新趨勢的演進過程，同時探究技術背後的戰略權衡。

貳、飛彈威脅與早期應對

一、冷戰前期的威脅圖譜

1940 年代末至 1960 年代，飛彈威脅的特點是高毀滅性，但導引粗糙。當時的技術主軸集中在洲際彈道飛彈（Intercontinental Ballistic Missile, ICBM）與潛射彈道飛彈（Submarine-Launched Ballistic Missile, SLBM）的突破。

（一）威脅載具與動力：早期 ICBM 如蘇聯 R-7 採用液體火箭

燃料，這意味飛彈發射前需經漫長且危險的灌注過程，不僅反應速度慢，且易被衛星偵獲。[1]隨後固體燃料的普及，如美國 ICBM「民兵」（Minuteman）系列，使飛彈能儲存於加固窖井中隨時待命，徹底改變了核打擊的隱蔽性與反應時效。[2]

（二）導引與軌跡：此時期尚無全球定位系統（Global Positioning System, GPS），飛彈完全依賴內部的慣性導航系統（Inertial Navigation System, INS），利用精密陀螺儀計算偏移量。這導致中遠程飛彈的圓形機率偏差（Circular Error Probable, CEP）高達數公里。[3]為了彌補精度不足，這些飛彈幾乎全部搭載數百萬噸級的核彈頭，目標在摧毀整個城市或核彈井陣地。其彈道遵循嚴格拋物線規律，一旦推進器關機，彈頭便進入慣性滑行狀態，其路徑在數學上可以完全預測。

（三）主要研發國家：美國與蘇聯是最初的雙極玩家。隨後英國、法國與中國分別在 1960 年代末掌握核三位一體打擊能力，形成初期的核武俱樂部，使全球戰略平衡陷入較為複雜敏感的狀態。

二、國際管控制度設立

1972 年簽署的《反彈道飛彈條約》（A*nti-Ballistic Missile Treaty*, ABM Treaty）是維持冷戰穩定最重要的法律框架，其核心的邏輯在於維持「相互保證毀滅」（Mutual Assured Destruction, MAD）。若雙方都具備完善的防禦系統，將會產生發動首輪核打擊的誘因，因防禦方可攔截敵方剩餘的反擊力量，而為了打破這種惡性循環，美蘇協議限制防禦陣地的數量與地點，從而確保誰也不敢

[1] Asif A. Siddiqi, *Challenge to Apollo: The Soviet Union and the Space Race, 1945-1974* (Washington, DC: NASA History Division, 2000), pp. 158-160, https://history.nasa.gov/SP-4408pt1.pdf.

[2] National Park Service, "History of Minuteman Missile Sites," *Minuteman Missile National Historic Site*, last updated 1995, https://npshistory.com/publications/mimi/srs/history.htm.

[3] 〈慣性導航完全解析：從核心原理到誤差修正與未來應用〉，《AmiNext 中文網》，2025 年 5 月 1 日，https://www.aminext.blog/post/inertial-navigation-system-explained。

輕易發動戰爭。[4]

三、飛彈防禦早期因應

（一）感測與預警：為了應對拋物線彈道，美蘇建立了龐大的遠程預警雷達（Ballistic Missile Early Warning System, BMEWS）。這些雷達站通常部署於北極圈或邊境，體積如同數個足球場，能在飛彈升空後提供約 15 至 30 分鐘的預警時間。這段時間對於決策者決定是否發動報復性打擊至關重要。

（二）攔截方式：當時的計算能力無法支持「碰撞擊殺」（Hit-to-Kill）。因此，如美國的「奈基—宙斯」（Nike-Zeus）或蘇聯的A-135，攔截策略是「以核制核」。攔截飛彈搭載中子彈頭，在太空邊緣引爆，利用核爆產生的強大 X 射線、中子流與電磁脈衝（Electromagnetic Pulse, EMP），直接癱瘓或偏轉來襲的敵方彈頭，而非物理碰撞。這種防禦方式雖然有效，但也會對己方通訊與衛星造成嚴重干擾。[5]

（三）指管體系：以美國北美防空司令部（North American Aerospace Defense Command, NORAD）為代表，早期指管體系高度依賴人工判讀、電話熱線與初級的大型計算機，決策鏈較長，容錯空間極小。

（四）反飛彈能力發展：美國的愛國者飛彈（PAC）最初在1970年代研發是為了防禦飛機，進入1980年代，開始研發PAC-1版本，這是第一種具備初步攔截短程戰術彈道飛彈能力的野戰系統，使飛彈防禦從保護戰略城市轉向戰區部隊。[6]另外，美國雷根總統於1983 年提議開發一套能從太空攔截蘇聯飛彈的全面防禦系統，宣告

[4] “The Anti-Ballistic Missile(ABM) Treaty at a Glance,” *Arms Control Association*, December 2020, https://www.armscontrol.org/factsheets/abmtreaty.

[5] “Antiballistic Missile Defense Systems,” *EBSCO*, last updated 2022, https://www.ebsco.com/research-starters/military-history-and-science/antiballistic-missile-defense-systems.

[6] “Patriot,” *CSIS*, last updated August 23, 2023, https://missilethreat.csis.org/system/patriot/.

啟動戰略防禦倡議（Strategic Defense Initiative, SDI），首次系統性構想多層、整合式的飛彈防禦架構，包含雷射武器、粒子束武器與天基攔截器（Space-based interceptors）等，[7]雖多數技術未能即時實現，但在感測器、指揮管制與系統整合方面，為後續整體飛彈防禦奠定理論與技術基礎。

參、整體飛彈防禦構建回顧

一、威脅種類與能力的轉化

冷戰結束後，大規模核戰風險降低，飛彈威脅重心由全面核戰轉向來自區域國家與非對稱威脅的有限飛彈攻擊，使飛彈防禦政治阻力相對降低。1990 至 2010 年代，飛彈技術擴散更加肆虐。

（一）威脅多元化：1991 年波灣戰爭中，伊拉克的「飛毛腿」（Scud）飛彈展示了區域性飛彈威脅的破壞力。這類威脅不再追求跨洲打擊，而是鎖定區域內政經要點。同時，GPS 衛星導引成熟，讓巡弋飛彈（如美國戰斧飛彈）具備了「精準外科手術式」的打擊能力，CEP 縮減至 10 公尺以內。[8]

（二）技術擴散：北韓（大浦洞、火星系列）、伊朗（流星系列）與印度、巴基斯坦等國，透過逆向工程與自主研發，掌握固體燃料與多目標彈頭重返載具（Multiple Independently Targetable Re-entry Vehicle, MIRV）技術。這意味著防禦方必須面對更多樣化的發射源與更複雜的突防手段，威脅已從「單點對抗」演變成為「區域多點滲透」。

二、防禦系統從感測到指管迭代

此時期是飛彈防禦「數位化」與「實戰化」的巔峰，感測器與

[7] "Strategic Defense Initiative (SDI), 1983," *U.S. Department of State*, January 20, 2009, https://2001-2009.state.gov/r/pa/ho/time/rd/104253.htm.
[8] "Tomahawk," *CSIS*, last updated April 23, 2024, https://missilethreat.csis.org/missile/tomahawk/.

攔截彈等裝備實現了質的大幅飛躍。

（一）感測系統：天基紅外線系統（Space-Based Infrared System, SBIRS）取代了老舊的飛彈預警衛星（Defense Support Program, DSP），能精確區分飛彈發射時的熱源特徵與環境背景雜訊。[9]陸基方面，主動電子掃描陣列（Active Electronically Scanned Array, AESA）雷達（如美軍 AN/TPY-2）具備極高的掃描速率，能同時追蹤上百個目標，並具備分辨真假誘標（Decoy）的能力。

（二）攔截裝備：進入「碰撞擊殺」（Hit-to-Kill）時代。微電子技術發展讓攔截器具備自主尋標能力，不必再依賴核爆。美軍的代表裝備包括：大氣層外的標準三型（SM-3）、陸基中段防禦系統（Ground-Based Midcourse Defense, GMD），負責在太空階段將彈頭撞毀；中低層防禦的薩德（Terminal High Altitude Area Defense, THAAD）負責高空末端，愛國者三型（PAC-3）負責低空末端。這構成了完整的「分層防禦」體系。

（三）指管與整合：以美國飛彈防禦署（Missile Defense Agency, MDA）推動的連網工程為首，開發戰區高空防禦指揮系統。然而，此時期的不同系統（如陸軍的愛國者與海軍的宙斯盾）雖然能共享數據，但仍缺乏真正的「深度整合」，兩套系統無法直接共享同一發射控制邏輯。

三、此時期國際管控制度之演變

2002 年，美國因應流氓國家與非傳統威脅的興起，正式退出 ABM 條約。[10]這一舉動開啟了全球飛彈防禦網的部署潮，但也引發了俄羅斯與中國對於戰略平衡被打破的擔憂。隨後，2019 年《中程

[9] "Fact Sheet: Space Based Infrared System," *United States Space Force*, March, 2023, https://www.spaceforce.mil/about-us/fact-sheets/article/2197746/space-based-infrared-system/.

[10] "The Anti-Ballistic Missile (ABM) Treaty at a Glance," *Arms Control Association*, last reviewed December, 2020, https://www.armscontrol.org/factsheets/anti-ballistic-missile-abm-treaty-glance.

飛彈條約》（*Intermediate-Range Nuclear Forces Treaty*, INF Treaty）因美國與俄羅斯雙方互指違約而失效，[11]直接導致陸基中程飛彈重回歐洲與亞洲戰場，防禦壓力驟增。

肆、整體飛彈防禦發展趨勢

一、俄烏戰爭後的空中威脅分析

2022 年爆發的俄烏戰爭是現代戰爭史的轉捩點，揭示了防空系統在面對「高低搭配」威脅時的脆弱。

（一）極音速變軌威脅：極音速飛彈（Hypersonic Missile 如俄軍「匕首」Kh-47M2 Kinzhal）具備在高速下進行水平或垂直機動變軌的能力，這意味著它們不遵循拋物線，故傳統雷達的「彈道預測算法」完全失效。這種飛彈的負載大、衝擊動能極強，對航空母艦或指揮中心具備毀滅性打擊力。[12]

（二）飽和式無人機攻擊：自殺式無人機（如伊朗「沙赫德」Shahed-136）與無人機蜂群，雖然單體破壞力有限，但成本交換比極具殺傷力。使用價值 300 萬美元的愛國者飛彈攔截一架 2 萬美元的無人機，在長期消耗戰中是不可持續的。此外，敵方會利用廉價無人機先行誘發防禦方雷達開機並消耗彈藥，隨後再發射高價巡弋飛彈進行致命一擊。

（三）破壞威脅各有特性：彈道飛彈、極音速武器具有高破壞性與高殺傷性；匿蹤巡弋飛彈、貼地飛行無人機難以偵測，具較高隱蔽性；小型無人機蜂群、遠程多管火箭的飽和性運用，則可造成敵方高度消耗。

---

[11] "The Intermediate-Range Nuclear Forces (INF) Treaty at a Glance," *Arms Control Association*, last reviewed August, 2019, https://www.armscontrol.org/factsheets/intermediate-range-nuclear-forces-inf-treaty-glance.

[12] "Hypersonic Weapons: Background and Issues for Congress," *Congressional Research Service*, last updated February 9, 2024, https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45811.

二、AI 驅動整合的指管系統

未來的指管（C2）系統將從「連網」進化為「融合」，人工智慧（AI）扮演關鍵核心角色。

（一）指管融合系統：美國的整合戰鬥指揮系統（Integrated Battle Command System, IBCS）是目前全球最先進的整合防空指管系統，其核心在於「任何感測器對應任何發射器」。它能自動將海軍、空軍、陸軍的感測數據融合成一張單一的、無延遲的空情圖。[13]

（二）AI 自動化決策：當數百個目標同時出現在雷達螢幕上，AI 演算法將根據威脅等級、飛行速度、攔截彈剩餘數量與「成本交換比」自動分配任務。如 AI 可能會建議：使用電子干擾應對低價無人機，將昂貴的攔截彈保留給高威脅的極音速彈頭，從而避免防禦系統被輕易耗盡。

三、感測器全域擴展趨勢

未來的感測體系將打破單一雷達站的局限，擴展成全域式與分布式，甚至社會化運用。

（一）天基監視層：部署數以千計的低軌衛星（Low Earth Orbit Satellite, LEO），監控極音速飛彈全路徑的紅外線訊號，這種衛星群具備「打不完、攔不住」的特點。

（二）分散式與低成本感測：利用長滯空無人機作為空中雷達站，彌補地面雷達受地形阻隔的盲區。

（三）烏克蘭模式的社會化感測：烏克蘭民眾透過智慧型手機 App 即時回報各種空中威脅。這類數據雖然精度有限，但經 AI 處理後能形成極具價值的低空追蹤網絡，專門對抗低速巡弋飛彈與無人

[13] "Future Ready Command and Control," *Northrop Grumman*, accessed May 14, 2026, https://www.northropgrumman.com/what-we-do/missile-defense/integrated-battle-command-system-ibcs/future-ready-command-and-control.

機。[14]

四、資訊傳遞韌性發展趨勢

擊殺鏈的強弱取決於資訊鏈路（Data Link）的防護與穩定度。

（一）加密與抗干擾：現代通訊鏈路具備高度跳頻與寬頻帶特性，讓敵方無法預測下一個訊號頻率，並透過數位簽章機制，確保每一條指令皆來自授權終端。防止敵方截獲指令、實施電子壓制或欺騙干擾（Spoofing）與偽造假命令。

（二）雷射光學通信技術：為了應對飽和的電磁干擾環境，衛星間及衛星與地面的通訊正轉向自由空間光學（Free-Space Optics, FSO）通訊，利用極細的雷射束進行點對點傳輸，物理上幾乎不可能從側向截獲或干擾。雷射鏈路具備方向性強、頻寬大、無法被傳統無線電偵測與干擾的絕對優勢，是未來擊殺鏈的命脈。[15]

五、各類軟硬殺分層防衛趨勢

面對多種類高低搭配與複合式、飽和式空中威脅，防禦手段正從單一飛彈，走向物理摧毀（硬殺）與電磁干擾（軟殺）等的深度融合，除了原有的反飛彈系統、中短程防空飛彈、防空機砲與自動化遙控武器等之外，各類新創攔截科技持續發展：

（一）高端攔截器：發展大氣層外攔截極音速目標的專門截擊彈。[16]

（二）導引防空火箭：將廉價的 70 毫米火箭彈加裝雷射導引頭，以極低成本達成精準攔截。[17]

---

[14] “Ukraine’s Anti-Missile App -- ϵΠΠΟ,” *Youtube,* November 18, 2022, https://www.youtube.com/watch?v=r7dqpUC2S9s.

[15] “Enabling the Future of Space Communication with Laser Links,” *Payload Space,* September 20, 2023, https://payloadspace.com/enabling-the-future-of-space-communication-with-laser-links/.

[16] 〈美日共同研發極音速攔截彈 各出 5 成技術細節曝光〉,《自由時報》, 2026 年 4 月 24 日, https://def.ltn.com.tw/article/breakingnews/5414364。

[17] 〈EAGLS 搭配導引火箭 精準摧毀無人機〉,《青年日報》, 2026 年 1 月 17 日, https://www.ydn.com.tw/tw/News/ugC_News_Detail.aspx?ID=626329。

（三）高性價比硬殺：運用皮卡化機動防空單元（Mobile Fire Groups），如烏克蘭展示了將重機槍或輕型機砲安裝於機動皮卡上，搭配簡易熱顯像儀，能有效且廉價地摧毀 Shahed 等無人機。[18]

（四）定向能武器（Directed-Energy Weapon, DEW）：這是改變遊戲規則的武器，高能雷射每次射擊成本僅約數美元，且「彈藥」近乎無限，是應對蜂群攻擊的最佳解方。[19]

（五）高功率微波與 GPS 干擾：微波武器能瞬間燒毀大範圍無人機的電子控制板；而針對特定頻段的 GPS 誘騙，發送偽造定位信號接管飛彈導航系統，則能使敵方飛彈在終端導引階段失去目標，陷入盲飛。[20]

伍、結語

探討整體飛彈防禦體系之構建，必須體認已不再是單獨的武器性能競賽，而是關於「數據優勢」與「經濟消耗」的全方位對抗。未來的飛彈防禦必須具備高度的融合彈性，靈活運用 AI 決策、分散式感測與多元軟、硬殺攔截手段。在極音速武器與無人機蜂群擅場的情境下，雖不易建構「絕對無法穿透」的護盾，但仍可透過科技迭代與整合，型塑「讓敵方攻擊成本高到無法承受」的戰略效應，以使妄動之敵付出得不償失代價。

本文作者白捷隆為政治大學碩士，現為財團法人國防安全研究院國防安全研究所委任資深研究員。主要研究領域為後備動員、國防戰略、作戰概念。

[18] "The Fight Against Shaheds: Why Mobile Fire Groups Need to be Modernized," *Frontliner*, March 6, 2026, https://frontliner.ua/en/the-fight-against-shaheds-why-mobile-fire-groups-need-to-be-modernized/.

[19] 〈德「木星」防空系統 強化反無人機能量〉，《青年日報》，2026 年 5 月 10 日，https://www.ydn.com.tw/tw/News/ugC_News_Detail.aspx?ID=634988。

[20] 曾怡碩，〈電磁干擾、欺騙衛星偵察、導航與通訊對島嶼防禦的威脅與因應〉，《國防情勢特刊》，第 45 期，2025 年 12 月 15 日，https://indsr.org.tw/respublicationcon?uid=13&resid=3041&pid=5714&typeid=3。

Construction Review and Development Trend of Integrated Missile Defense

Chieh-Lung Pai

Division of National Security research

Abstract

Missile defense is not only a cutting-edge display of modern military technology, but also the core of strategic psychological competition between major powers. Since the Nazi German V-2 bombing of London in 1944, human defensive thinking has leaped from two-dimensional planar air defense to three-dimensional ballistic interception. The development of missile defense systems essentially reflects humanity's pursuit of "absolute security" and the challenge to the limits of technology. During the Cold War, this was a survival race against nuclear annihilation; in the 21st century, this race has evolved into a "multi-domain defense war" encompassing cyberspace, space, electromagnetic pulse, and artificial intelligence etc..

With the outbreak of the Russia-Ukraine war in 2022, traditional air defense logic faced an unprecedented and devastating test. The non-linear trajectories of hypersonic missiles, the low-altitude penetration of stealth cruise missiles, and the "saturation attacks" posed by suicide drones costing only tens of thousands of dollars, each is forcing defense planners worldwide to redefine the "cost-exchange ratio." This article will analyze the evolution of missile defense from its origins to the latest trends in 2026 from the perspective of planning and construction, while exploring the strategic trade-offs behind the technologies.

Keywords: Integrated Missile Defense, Ballistic Missiles, Cost-Exchange Ratio, ABM Treaty, INF Treaty