



● 作者/Christopher Stone

● 譯者/洪琬婷

● 審者/丁勇仁

為強化飛彈追蹤能力請命

Enhanced Space-Based Missile Tracking: America Needs a More Resilient Missile Warning System

取材/2022年10月美國空軍暨太空軍月刊(*Air and Space Forces Magazine*, October/2022)



美國國防部應開發應對新興威脅的新型太空基飛彈預警追蹤架構，發展橫跨全軌道系統的多層太空基感測器架構。美國國防部和太空軍應考量增加主動和被動能力，以嚇阻並反制敵軍攻擊。

美國現有的太空基紅外線系統(Space Based Infrared System, SBIRS)具備世界上最先進的彈道飛彈預警能力。不過，倘若未來僅倚賴太空基紅外線系統，會導致美國無法有效防範敵人針對其本土與境外基地所發動的飛彈攻擊。目前，中共與俄羅斯部署的低空飛行極音速飛彈，將促使美國陸基雷達無法追蹤並提供預警與啟動防禦作為。「中」、俄兩國也正在部署一款反衛星武器(Anti-Satellite, ASAT)，以干擾或摧毀美國太空基飛彈預警感測器之運作。美國現有的系統無法有效防禦這些威脅，軌道運行模式也可遭敵預測，進而暴露了系統弱點。中共與俄羅斯的現有能力的現有能力相較於美國的弱點，會讓美國在未來大型衝突時顯現相對不利之情勢。

為能有效抵禦大規模飛彈攻擊，我們必須先「看到」這些飛彈，才能及時提供預警以啟動反制作為。因此，自1950年代蘇聯首先研發具備核子彈頭之洲際彈道飛彈以來，偵測與追蹤對美所發射核彈的能力一直是美國國防部太空基飛彈預警系統主要的作戰需求。當時，美國發展了太空基紅外線與陸基遠程感測器提供預警能力。飛彈防禦警報系統(Missile Defense Alarm System, MIDAS)為初步架構，這由12顆衛星組成的衛星群，旨在提供美國領導層級事前預警，有效反制並防範前蘇聯之洲際彈道飛彈攻擊，避免美國國防部核子武力遭到摧毀。

2022年8月4日，美太空軍康格(Mark Conque)上尉在作戰中心督導紅外線地球同步軌道飛彈偵測暨早期預警衛星(Space Based Infrared System Geosynchronous Earth Orbit Missile Detection and Early Warning Satellite)發射任務。

(Source: USSF/Haley N. Blevins)



此為地球同步軌道上的次世代高空全時紅外線飛彈預警(Next-Gen OPIR)系統示意圖。此系統規劃取代現役太空基紅外線系統，預於2025年首度啟用。(Source: Lockheed Martin)

後續研發更為先進的系統稱為國防支援計畫(Defense Support Program, DSP)，自20世紀70年代以來以不同的構型配置運行，直到21世紀初葉，此系統併入了較大規模的太空基紅外線系統。國防支援計畫系統部署在地球同步軌道(Geo-synchronous Orbit, GSO)，輔助感測器則在高橢圓軌道(Highly Elliptical Orbit, HEO)上運行，以提供不間斷、覆蓋全球的彈道飛彈預警能力。敵方發射的

彈道飛彈火箭會發出紅外線能量，先進入衛星紅外線遮罩的開口處後通過校正鏡頭，再穿過光電感測器陣列反射至一面鏡子上，然後聚焦於探測器陣列。此計畫系統第四代構型，將衛星可攜帶的紅外線電池數量從2,000顆增加至6,000顆，進一步強化了系統對區分敵不同發射態樣的能力。

至冷戰後期，彈道飛彈科技在全球逐漸普及，故美國國防部升級了其飛彈預警系統，以便

偵測與追蹤較短程的「戰區」彈道飛彈。而後在1991年波斯灣戰爭期間，國防支援計畫系統成功偵測伊拉克所發射的多枚短程「飛毛腿」(SCUD)戰區彈道飛彈。而後美國國防部研發了太空基紅外線系統以偵測較短程、固定式發射的彈道飛彈，並提高預測飛彈命中點的準確度。到了1990年代中期，美國的太空基飛彈預警架構已從核威懾與防禦擴及至可發布戰區彈道飛彈攻擊警示。

太空基紅外線系統由五枚運行於地球同步軌道專用衛星及兩枚掛載感測器的高橢圓軌道衛星伺服器所組成。於地球同步軌道運行的衛星具有抗輻射外殼及五個獨立任務下行鏈路，可提升系統存活力與乘載力。由於戰區彈道飛彈的威脅持續增加，此系統目前仍具有舉足輕重的地位。在2020年1月伊朗大規模轟炸伊拉克北部時，即便是擁有此系統的駐地美軍仍然「匆忙閃避」。

太空基紅外線系統衛星在地球同步軌道及高橢圓軌道上可掃描除了南極地區之外的整個地球表面，以偵測飛彈發射後在助推階段的紅外線訊號。與過往的系統不同，此系統可以多工，即全時掃描與預警任務，同時監控戰區內的利害區。不過，此系統原規劃不是用以全程追蹤飛彈在與助推器分離後的彈道、非彈道、機動及超低空飛行的極音速彈頭。儘管地球同步軌道及高橢圓軌道

很適合將感測器覆蓋範圍擴及整個地球，但這些軌道在同時提供連續不間斷、高傳真的低空飛行機動彈頭追蹤表現上不盡理想，因這些彈頭與助推器不同，不會產生強烈的紅外線訊號。

追蹤飛彈之挑戰

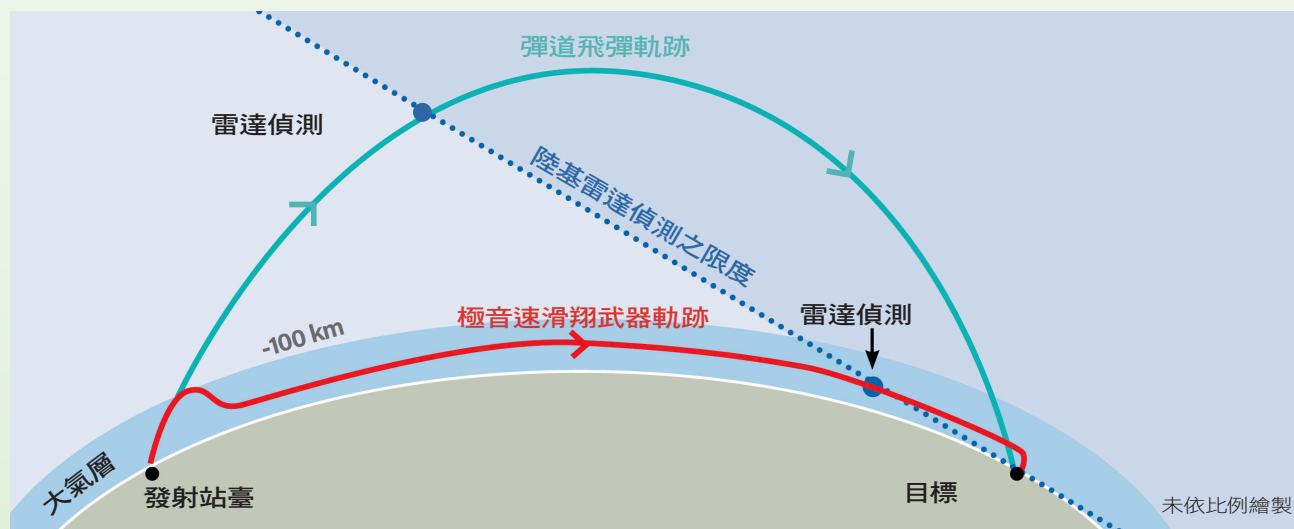
目前，美國已優化其太空基預警架構以偵測相對來說較容易預測之傳統彈道飛彈發射後軌跡，還可儘早追蹤並給予反制武器足夠反應的時間。中共與俄羅斯均瞭解這些預警系統限制，而且積極發展長程飛彈來規避太空基紅外線系統及其他感測器的偵測。

這些新型武器範圍包括低空超音速巡弋飛彈、速度超過五馬赫於大氣層飛行與機動的極音速飛彈。

極音速武器可從飛機、艦艇，以及陸基機動發

陸基雷達偵測彈道及極音速滑翔武器示意圖

現有的飛彈預警雷達設計用於監控彈道飛彈飛行路徑。中共與俄羅斯的新極音速武器，旨在透過低空飛行避免偵測，以縮短此類雷達反應時間然後擊毀目標。



射架上發射。敵軍也可以使用空中發射的遠程極音速飛彈掛載燃燒衝壓發動機(Scramjet)，自其以空優掩護的轟炸機上發射。這些武器的部署可視為軌道發射轟炸系統的一部分。多樣的發射選項意味著極音速武器所產生的紅外線訊號不夠強烈，現今的美國感測器可能無法偵測到相關訊號。

長程彈道飛彈飛行軌跡通常包括發射後至太空且尚未再次進入大氣層的那300多公里。偵測與追蹤高度可預測的飛行軌跡及高空非變軌彈道飛彈，實屬容易。相較之下，極音速飛彈

可以在地球表面上僅以30至50公里(甚至更低)高度飛行；這代表著由於地球曲率緣故，今日雷達有效覆蓋區之預警架構可能無法偵測如此低空飛行的飛彈。

巡弋飛彈也具備低紅外線訊號的特徵，故當前的空中系統無法偵測到其訊號。此外，目前巡弋飛彈與極音速武器均可發送難以預測的飛行軌跡訊號。極低空飛行的武器系統也可「隱藏」於地球曲率之中，以避免遭陸基雷達偵測。結合低空與高速飛行，會限制偵測飛彈來襲、預判其撞擊區域、傳訊至

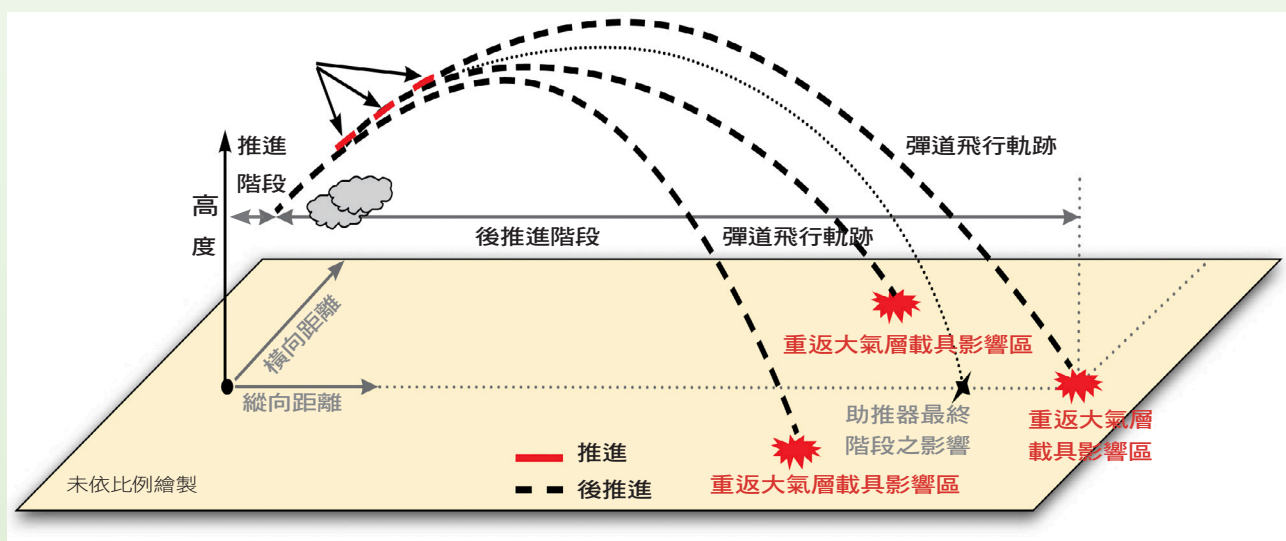
反制系統，以及發動反制作為的時效。今日，中共與俄羅斯大部分部署之長程飛彈可掛載一至多種在太空或大氣層(甚或兩者兼有)飛行的武器。

在未來美國飛彈預警架構將會面臨五項基本類別的威脅，必須發展相關追蹤能力：

1. 傳統無推進長程彈道飛彈。
2. 能透過多次大幅度推進燃燒而微調大氣層外軌跡的彈道飛彈，其多目標重返大氣層載具彈頭具獨立軌道，使影響區可間隔數公里。
3. 有後推進武器的飛彈系統，可於大氣層內的最終

多重獨立重返大氣層載具的彈道飛彈示意圖

後推進助推燃料酬載，可將各個重返大氣層載具置於不同的獨立目標彈道上



飛行階段微調彈道軌跡，又稱機動重返載具 (Maneuvering Re-entry Vehicles, MaRVs)。

4. 於大氣層之上以非固定彈道低空方式飛行的助推滑翔極音速飛彈，在飛行途中與最終階段具有機動力。
5. 發射後具有機動力的巡弋飛彈，可在大氣層保持長程飛行。

■ **大氣層外後推進機動力有限的彈道飛彈。**是一種具後推進系統的機動武器載具，可在大氣層上方投放多個獨立軌跡彈頭。配有多目標彈頭重返大氣層載具的洲際飛彈為此類武器之一例。此類飛彈在其火箭推進器頂部掛載多具重返大氣層載具。一部分重返大氣層載具可做為非武裝誘標，以使敵軍的飛彈防禦行動複雜化。因為若要區分「實彈」武器或誘標，將會是一項重大挑戰。

■ **掛載具機動力彈頭，能在大氣層中微調的後推進空氣動力飛彈。**這類武器是另一種機動式威脅，具有從外部操控的機制，可以更準確的瞄準其目標，其精度優於僅靠重力輔助且穩定旋轉的彈道飛彈。機動重返大氣層載具是具有空氣動能的機動式武器，可以改變其於大氣層內的飛行路徑，以滑翔方式擴大其射程。火箭助推極音速滑翔載具 (Hypersonic Boost-Glide Vehicle, HGV) 也可用於空氣動力機動方式，在助推器分離後，此型彈能夠在大氣層中的大部分飛行階段中以極音速滑行。

■ **結合後推進與空氣動力表面的飛彈系統。**此屬性進一步提升了彈頭向目標飛行的射程與機動力。範例包括中共自2010年以來即部署

的東風21D型反艦彈道飛彈 (DF-21D，又稱「航艦殺手」)。此型飛彈具有彈道推進器，其酬載可在分離後同時往指定目標前進。具有反艦與對地攻擊雙重作用的此型飛彈規劃包括後推進助推系統及特別的飛行表面，使其彈頭能改變目標或修正飛行路徑，以打擊移動目標 (比如海上艦艇)。

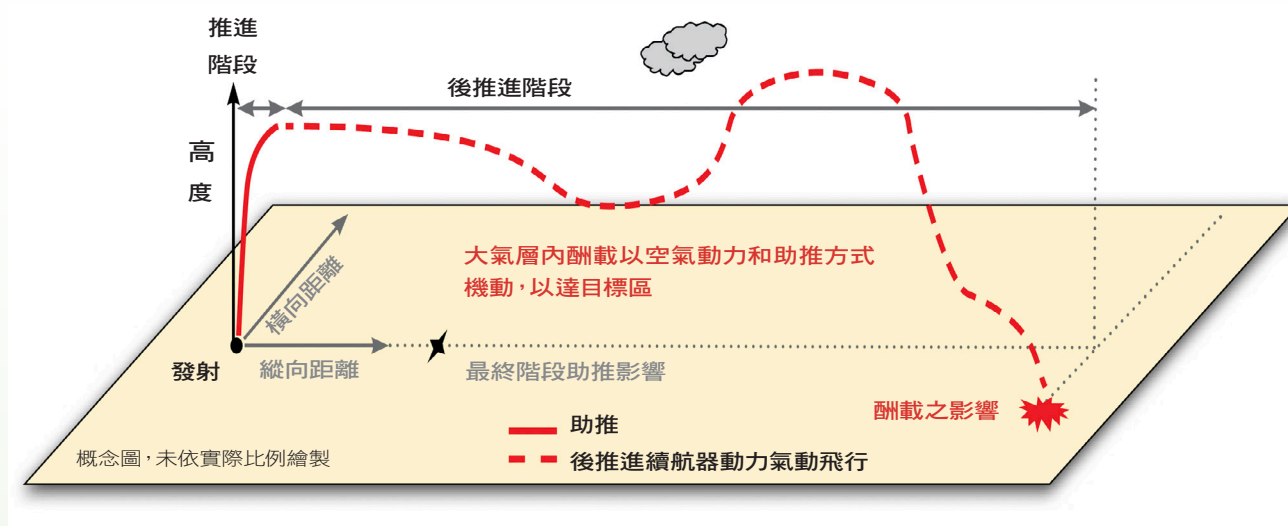
■ **巡弋飛彈。**最後，巡弋飛彈為一結合了空氣動力控制面與噴氣推進發動機的武器，可擴大其射程或增長大氣層飛行時間。此型飛彈具有很高的機動力，能增加目標攻擊的不同方向。

反衛星武器的威脅

現在，中共與俄羅斯都將美國的太空基裝備視為高價值目標，可以在危機爆發時脅迫美國，或在衝突時攻擊這些目標以取得太空優勢。他們發展了動能反衛星等太空武器，把上述「易攻難防」的目標置於風險之中。這些可以使美國國防部現有偵測、追蹤大規模飛彈攻擊的能力失效，並將阻礙中繼火力管制資訊傳至美國空中與飛彈防禦系統的機會。這可能會使中共與俄羅斯在未來與美國的重大衝突中獲得決定性優勢。上述情況表明，美國必須確保未來的美國國防部飛彈預警架構及其他太空系統研發部署模式，有助於其在此競爭激烈的環境中存活與運作。

中共已研發部署其所謂的「多層攻擊架構」與武器系統，該武器系統跨越反太空威脅「連續體」。將前述架構及武器相結合，將可削弱、拒止或摧毀所有軌道區域上的美國太空系統。

機動巡弋飛彈軌跡示意圖



中共在此威脅連續體的非動能方面，其已具備現役陸基干擾系統，可截斷衛星通信、GPS信號、合成孔徑雷達、飛彈預警及其他衛星系統。如此干擾作為可以阻止用戶使用衛星通信網路，弱化或屏蔽太空基感測器向作戰人員傳輸重要的飛彈警報數據，並截斷指管太空航具所需對上與對下鏈路。

在威脅連續體架構範圍的動能方面，共軍部署了陸射反衛星飛彈，可攻擊近地軌道(Low Earth Orbit, LEO)上的裝備。中共也展示了打擊中地軌道(Medium Earth Orbit, MEO)與地球同步軌道之目標能力，以及共

軌反衛星太空船接近高價值美國太空系統之能力。

近似於中共，俄羅斯視太空是作戰領域之一，並且環繞此概念發展作戰準則，旨在獲得太空霸權，以預先建立對美衝突致勝的條件。為發展上述概念，俄羅斯致力發展太空能力，在戰爭伊始之時拒止美國與其盟國，以打擊其所屬太空裝備。

俄羅斯已部署全套非動能系統選項，以創造太空系統優勢，包括陸基系統以反制敵GPS訊號、戰術通信、衛星通信及雷達。據稱，俄羅斯也刻正發展一套空中雷射平臺來打擊太空基飛彈預警感測系統。更重要

的是，也許俄羅斯已然展現其擁有數種反衛星飛彈武器計畫，將於往後幾年具備作戰能力，可攻擊近地軌道上的目標。2021年底，俄羅斯在實彈射擊時展現其摧毀打擊能力。克里姆林宮看似無視此武力展示所造成在軌道上的殘骸；反之，強調其於危機爆發時，已擁有新選項可威脅敵軍太空系統。

太空追蹤能力多樣化

太空追蹤能力多樣化是前述挑戰的因應之道。現在，美國國防部已建立多軌道系統體系的技術，能偵測從發射階段伊始至指定目標區域間的非彈道飛

彈。最有效的方法是發展橫跨全軌道系統的多層太空基感測器架構，包括近地軌道、中地軌道、地球同步軌道及繞極軌道。如此多軌道架構必須可偵測飛彈發射、追蹤各種高度的飛彈機動，再即時向太空與飛彈防禦系統提供火力管制資訊。美國國防部也應部署能增強機動力的衛星來強化其彈性，以避免或用其他方式使反衛星武器攻擊失效；同時在近地、中地及地球同步軌道上部署誘標，讓對手無法輕易攻擊；發展其自身的動能和非動能太空反制能力，以擊敗對手的反衛星與其他反太空威脅。事實上，美太空軍已朝此方向前進，誠如美太空軍司令雷蒙(Jay Raymond)上將所述：「我們正在使架構多樣化，以減少在太空中發生的攻擊威脅。我們從少數非常精準且昂貴的衛星，轉向發展多樣化的架構，來因應新興的飛彈類別，以及目前已存在於太空中的威脅」。

擴散式近地軌道衛星追蹤層

美國太空發展局(Space Development Agency, SDA)正在開發的太空防禦架構追蹤層，旨在提供美國國防部即時接收極音速武器攻擊情報與其他新興飛彈威脅的預警能力。該局之規劃隨著時間的推移而執行中。第一批次初始階段包括部署28具帶有紅外線感測器的追蹤載具，以偵測追蹤飛彈；超過100具傳輸層載具將「為全球範圍之下的所有作戰平臺提供可靠、有彈性、低延遲的保密數據鏈結」；此階段內還包括其他軌道衛星。此批次掛載火箭將在距離地球1,000公里的近地軌道上運行，傾斜角在80到100度之間。擴散式近地軌道太空兵力設計的優勢之一在於其數百顆衛

星所創造的額外作戰彈性。隨著時間推移，太空發展局將「擴大其在全球覆蓋範圍及各種飛彈威脅的監管鏈」。

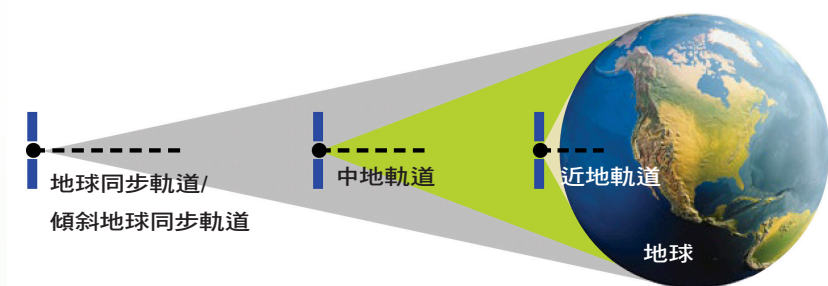
美國太空發展局的一項重要目標，是全般整合「衛星追蹤層」的資訊與其他太空基飛彈預警能力，為當前與未來的飛彈防禦行動提供高度準確的火力管制選項。這會成為每個追蹤層衛星中的戰場管理暨指管通信(Battle Management, Command, Control, and Communications, BMC3)任務。這些模組規劃用於支持關鍵任務功能，例如處理感測器數據，並將衛星群的多顆數據整合至三維空間，以及支援相關操作管理任務。

擴散式近地軌道衛星群將提升美國國防部未來飛彈預警行動的彈性，但是其自身不足以抵銷日益增長的反太空威脅。衛星群仍易於遭受非動能武器威脅，包括射頻干擾及高功率微波武器；上述武器可在很短時間內影響近地軌道的多個系統。

陸基射頻干擾系統包括阻絕頻率或破壞近地軌道衛星與其地面用戶站臺之間通信鏈路。干擾對下鏈路可以增強衛星訊號的「噪音」，以至於訊號無法解讀或地面用戶無法接收。干擾對上鏈路同樣可以阻絕或以其他方式干擾大型作戰指揮部從地面站臺向衛星傳遞之訊號，或是干擾地面站臺指揮管制載具的作為。上述干擾系統的目標通常是高價值的地球同步軌道衛星或通信衛星系統。

對於在近地軌道上運行的裝備，高功率微波武器是另一種新的威脅。地面發射器或安裝於船艦、飛機甚至其他衛星上的發射器，可能會產生

在近地軌道、中地軌道及地球同步軌道的衛星示意圖



高功率微波能量脈衝，而「破壞衛星電子設備或對其電路和處理器造成永久性損壞」。其反制武器的「摧毀」機制是在衛星的脆弱電路或電子元件上累積能量，一旦超出其耐受程度，衛星將停止作業甚至燒毀。

鑑於上述反太空威脅武器的增長，全球飛彈預警系統覆蓋範圍應包括在中地軌道及地球同步軌道上運行的系統。

中地軌道基礎概念

中地軌道位於地球上空2,000至35,766公里(地球同步軌道邊緣)之間的空間，也被稱作衛星系統的「甜蜜點」。

此軌道中的衛星相較於在地球同步軌道的國防支援計畫與太空基紅外線系統衛星更接近地球，如此減少了飛彈預警訊號上傳到太空與飛彈防禦系統

所需時間。相較於更遠的地球同步軌道上運行的感測器，中地軌道的感測器可提供更快、保真度更高的飛彈預警訊號傳輸。

反之，與近地軌道相較之下，於中地軌道運行之感測器在目標區域上的通過時間更長且視野更廣，因此可獲致更長的監管飛彈軌跡時間。與近地軌道衛星群相比，中地軌道需要九至36顆飛彈預警衛星，才能實現全時的全球覆蓋程度。

然而，基於中地軌道衛星系統容易遭受許多反太空威脅攻擊行動。自2014年以來，美國的對手已經展示其具備反制中地軌道能力的衛星武器。中共與俄羅斯的共軌反衛星武器及可跨多軌道攻擊目標的反太空系統，是中地衛星的顯著威脅。一個具有彈性與存活力的太空基

飛彈預警追蹤兵力設計規劃，應基於現有防禦能力持續發展，例如讓所有軌道均具備機動、誘標或主動防禦武器，並強化應對中共與俄羅斯所致力建造「快速且破壞力高」的太空動態作戰環境。

地球同步軌道基礎概念

在地球同步軌道運行的衛星具有優勢，可替處於助推階段彈道飛彈提供全時覆蓋，同時監控特定戰區的短程彈道飛彈事件。

美國國防部目標是建立多個指定區域或特定目標區的視角，而不必將大量衛星群部署至地球同步軌道。次世代高空全時紅外線飛彈預警感測器的靈敏度將是太空基紅外線系統的三倍，精度達到兩倍，強化了偵測追蹤極音速武器等非彈道飛彈的微弱紅外線訊號。次世代高空全時紅外線飛彈預警系統的對下鏈路傳輸速率將高於太空基紅外線系統四倍之多。

次世代高空全時紅外線飛彈預警系統在飛彈攻擊的初始階段所蒐集的數據，可用以提示位於其他層的感測器。部署在

中地軌道的衛星則可利用這些數據，在飛彈威脅至後推進及途中等階段時開始追蹤飛彈威脅。中地軌道的低高度紅外線感測器，有助於提升飛彈軌跡保真度，以利於提示近地軌道層感測器準備接收威脅訊號。最後，未來會擴散為數百顆衛星的成熟近地軌道衛星群，將提供更高保真度訊號，為地面、太空及海上的防空與飛彈防禦實現精準火力管制解決方案所需資訊。

結論與建議

美國國防部擁有技術，可以開發應對新興威脅的新型太空基飛彈預警追蹤架構；也須準備反制作為。美國國防部與美太空軍應考量增加主動與被動能力，方可有助於拒止對於美軍兵力的攻擊，並在拒止失效時，實施反擊。

- 美國國防部應採用多層衛星架構，結合傳統彈道飛彈預警能力，以及近地、中地、地球同步與繞極軌道上的強化感測器，在全程飛行階段偵測追蹤極音速武器與其他新興飛彈威脅。多層互補感測器應設為未來飛彈預警追蹤架構需求最低門檻，以在未來競爭的太空環境中運行與存活。
- 美國國防部應在近地與中地軌道區域發展部署誘標衛星之能力，以迫使中共與俄羅斯的太空反制行動複雜化。如此防禦措施可強化拒止能力，並提高太空基飛彈預警架構在未來衝突中的彈性。如同冷戰後期時洲際彈道飛彈可掛載誘標重返載具，迫使敵軍的飛彈防禦行動複雜化，尤其是在中地與地球同步軌道上，可混合運用誘標、主動飛彈預警追蹤

衛星。此作為可能導致中共與俄羅斯瞄準困難；也可能導致其將高價值的反衛星武器浪費在低成本誘標上。

- 美國國防部應利用其成熟的技術，提升中地與地球同步軌道衛星的機動力。囿於部署至上述軌道的衛星數量有限，為提高其存活力，使其具備快速機動力以避免威脅，並令其能夠填補攻擊後環境中的罅隙，這非常重要。在中地與地球同步軌道基礎層中的飛彈預警追蹤衛星，應從使用壽期有限的化學推進劑改用其他更先進的推進能力，以強化其機動力及避免遭受攻擊，並於攻擊事件發生後改變衛星運行軌道。
- 中共與俄羅斯在許多戰略太空著作均表述，其軍隊認為有效太空拒止，必須包括能以「快速且具破壞力高」的方式，攻擊對手太空架構能力。同樣地，美國國防部應迅速且公開部署數量足夠的動能與非動能反衛星武器，使敵太空系統處於風險之中，增強其拒止能力，並在拒止失效的情況下亦能致勝。以上能力不僅會拒止實力相當的對手攻擊美國太空基飛彈預警跟蹤裝備，而且也會增加反制太空攻擊的選項。

作者簡介

Christopher Stone先生為美國空軍暨太空軍協會智庫米契爾研究所資深研究員。

Reprinted by permission from *Air and Space Forces Magazine*, published by the Air and Space Forces Association.