

無人機反制概念與系統之發展

舒孝煌、許智翔

中共政軍與作戰概念研究所

壹、前言

面對無人機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）近年在安全領域所受到之關注，與戰場上展現的能力，建立能對抗各種不同尺寸、功能無人機的能力，成為各國當務之急。整體而言，大型無人機需以完整分層防空與電戰能力對抗，而難以偵測的小型 UAV，則成為各國部隊高度防範的新形態威脅。後者的軍民兩用特性，以及商售市場上小型機種的大量擴散，更使得相關威脅並不僅存在戰時，也包括承平時在關鍵基礎設施及要人的保護等層面上。正因建立反無人機能力的迫切性，各國紛紛投入相關概念與技術之發展；由於中國無人機的蓬勃發展，台灣實應加強相關技術研發，補足防空與電戰系統上的弱點，並強化小型 UAV 的偵測／反制技術，以面對平戰時都可能面對的威脅。

貳、無人機反制概念初探

無人機雖有多種分類方式，然依威脅與對抗之手段，則可分為中大型無人機、小型無人機兩種截然不同的威脅型態。

一、中大型無人機需完整防空與電戰能力對抗

近年各地武裝衝突的戰例中顯示，受到多個交戰方倚重的「窮人的空軍」，即偵打一體與情監偵（Intelligence, surveillance and reconnaissance, ISR）用之各式 UAV，是未來可預見的高度戰場威脅，而 2020 年外高加索的「納戈爾諾—卡拉巴赫」戰爭（Nagorno-Karabakh war，以下簡稱「納—卡」戰爭）及敘利亞、利比亞等地的

衝突，更可見偵打一體 UAV 肆虐、甚至多種不同類型的 UAV 及有人機協同作戰。就「納—卡」戰爭而言，亞美尼亞部隊遭 UAV 重創主要在於缺乏：現代化的分層防空體系、良好電戰能力、多頻譜偽裝與隱蔽能力。¹俄羅斯國防部分析近年各戰場之實戰經驗，認為整合多層防空系統、早期預警及電戰能力，是對抗 UAV 的最有效方式。²

此外，近年不論「納—卡」戰爭或利比亞及敘利亞等地內戰的中，多數參戰方空軍均不具規模，而一定規模之空軍實力，也是對抗中大型 UAV 的重要手段。

二、小型無人機為非傳統之新型態安全威脅

相較之下，小型 UAV 是 ISR 及攻擊的低成本手段，也因尺寸、結構材料、飛行速度及高度，難以用傳統防空系統偵測。商售 UAV 不僅被各地非國家武裝團體在戰場上靈活運用，³承平時期也能造成威脅，如英國希斯洛（Heathrow）機場就曾因小型 UAV 入侵、被迫停止班機起降超過 24 小時，也因此強化反制系統。⁴

針對這種新型態威脅，美國國防部制定了《反制小型無人機系統戰略》（*Counter-Small Unmanned Aircraft Systems Strategy*），強調小型 UAV 系統（sUAS）能成為國家、非國家行為者、罪犯的強大武器，即使合法操作也會因疏失產生危害，因此為保護人員、資產及設施，需研發整體戰略應對。⁵2019 年美國國防部更指定陸軍成立

¹ Shaan Shaikh and Wes Rumbaugh, "The Air and Missile War in Nagorno-Karabakh: Lessons for the Future of Strike and Defense," *CSIS*, December 8, 2020, <https://www.csis.org/analysis/air-and-missile-war-nagorno-karabakh-lessons-future-strike-and-defense>.

² Samuel Bendett, "Russia's Real-World Experience Is Driving Counter-Drone Innovations," *Defense News*, May 23, 2021, <https://www.defensenews.com/opinion/commentary/2021/05/23/russias-real-world-experience-is-driving-counter-drone-innovations>.

³ 相關資訊請見本特刊，許智翔助理研究員〈無人航空載具在台灣國土防衛作戰運用之探討〉一文。

⁴ Varsha Saraogi, "Heathrow Airport Installs Anti-drone Technology to Detect Threats," *Airport Technology*, January 14, 2020, <https://www.airport-technology.com/news/heathrow-airport-installs-anti-drone-technology-to-detect-threats/>.

⁵ "Pentagon's Counter Small Drone Strategy," *USNI News*, January 8, 2021,

「聯合反制小型無人機辦公室」(Joint C-sUAS Office, JCO)，以領導協調相關活動，建立一套包括保護國土、盟國及部署人員、發展裝備及非裝備解決方案、擴大盟友關係之架構。⁶

美軍認為反小型 UAV 支柱有三，一是部隊戰備 (Ready the Force)，以風險途徑發展創新方案，側重使用通用架構的系統，評估風險及漏洞何在，針對特定情況採取適當對策。二是保衛部隊 (Defend the Force)，創立能防禦及對抗小型無人機的部隊，制定準則、作戰概念、建立培訓標準、完善現有訓練，並發展跨軍種聯合反 UAV 能力。三是建立團隊 (Build the Team)，強化公私部門在安全創新方面的合作夥伴關係，提高部隊反 UAV 效能。⁷

三、無人機威脅需綜合手段反制

美國陸軍 JCO 指出反制 UAV 為「系統化系統」途徑 (a system of systems approach)，整合各種手段，以多層次防禦的方式對抗威脅。其中「偵測」為首要關鍵，在對抗結構脆弱、用小口徑自動武器就能擊毀的 sUAS 時更為重要；目前偵測各種 UAV 的技術包括：(一) 光電、紅外線或聲音感測器；(二) 雷達偵測；(三) 偵測控制 UAV 之無線電訊號；由於其隱蔽性，偵測及預警需綜合運用。

目前用以擊敗 UAV 的手段則有：硬殺，如以飛彈、槍砲彈、直接能武器對抗；軟殺，如干擾無線電頻率、衛星導航系統等方式，甚至可透過類似電磁手段俘獲無人機。此外以無人機 (如捕捉或攻擊) 或訓練過的老鷹等，則為反制小型 UAV 也能運用之方式。⁸

這些反制手段同樣需整合運用，確保空防不會被 UAV 這種新型

<https://news.usni.org/2021/01/08/pentagons-counter-small-drone-strategy>.

⁶ “Pentagon’s Counter Small Drone Strategy,” *USNI News*.

⁷ “Army to Lead New DOD Strategy Against Drone Attacks,” *U.S. Army*, January 11, 2021, <https://www.army.mil/article/242276/?st>.

⁸ “Report on Pentagon Counter-Drone Weapons,” *USNI News*, February 14, 2020, <https://news.usni.org/2020/02/14/report-on-pentagon-counter-drone-weapons>.

科技裝備滲透。美國陸軍「機動短程防空系統」(Maneuver Short-Range Air Defense, M-SHORAD)就整合機砲、機槍，甚至雷射武器；瑞典 SAAB 以舉升臂升高偵測低飛目標的「長頸鹿 AMB」(Giraffe AMB)雷達整合，也可視威脅型態不同，結合RBS-15、或MBDA 公司的 EMADS 等飛彈系統加以對抗。雷神公司 (Raytheon) 也提出涵蓋雷達及光電偵測，由雷射、刺針飛彈，微波 (Phaser) 指揮管制干擾等，標定跨頻譜威脅，並可整合多種防空系統，如刺針飛彈、鐵穹 (Iron Dome) 系統、挪威先進飛彈系統 (NASAMS) 等。

參、相關反制系統發展

由於目前已有大量系統問世，以下由部分值得關注的系統為例，簡述相關發展：⁹

一、偵測及反制技術發展

(一) 固定、半固定及機動式反制系統

美軍目前研發者，包括「定置式低飛、慢速、小型無人機整合擊敗系統」(Fixed Site-Low, Slow, Small Unmanned Aircraft System Integrated Defeat System, FS-LIDS)，一種結合無線射頻、雷達、光學攝影機的系統化系統；空軍「消除非國家臨時聯合空中威脅」(Negation of Improvised Non-State Joint Aerial-Threats, NINJA)，也用射頻訊號阻斷 UAS 與操作者通聯、該系統可與其他軍種系統互通；海軍則有干擾訊號之「反遙控飛機整合防空網」(Counter-Remote Control Model Aircraft Integrated Air Defense Network, CORIAN)。¹⁰

美軍近年也投注在研發機動式動能、非動能擊殺系統。「輕型機

⁹ Sydney J. Freedberg JR., "Pentagon Plans 'Plug & Play' Drone-Killing Tech," *BreakingDefense*, June 26, 2020, <https://breakingdefense.com/2020/06/pentagon-plans-plug-play-drone-killing-tech/>.

¹⁰ "Army Selects Countermeasures Against Drones," *APG News*, July 8, 2020, <https://apgnews.com/inside-the-innovation/army-selects-countermeasures-against-drones/>.

動式防空整合系統」(Light-Mobile Air Defense Integrated System, L-MADIS)，為安裝在 Polaris MRZR 全地形車上之電子攻擊系統，¹¹有 360 度雷達、無線射頻干擾器、光電及紅外線感測器等，曾於 2019 年 7 月「擊落」伊朗無人機。¹²「遠征移動防空綜合系統」(X-MADIS) 則將反無人機、雷達和光電/紅外線 (EO/IR) 設備整合在民用車上，偵測、識別、追蹤及打擊威脅機場、關鍵設施或禁航區的無人機；「CM202U」則是光學識別系統，可在白天 3 公里和夜間 2 公里範圍內提供準確無人機識別，包括是否裝置武器等。

(二) 單兵操作系統

就美軍而言，特戰司令部的「套索陷阱」(Bal Chatri)、「無人機殺手」(Drone Buster)、「重擊」(SMASH) 等，為目前採用或測試中之單兵系統。「套索陷阱」為以無人機用網攔截另一架無人機，類似概念也用於荷蘭的「DroneCatcher」；「無人機殺手」是手持式射頻干擾器，供部隊、保全人員使用，透過壓制操控頻率並接管無人機的無線控制鏈路。「重擊」則是小口徑武器用射控系統、內建目標演算法，追蹤目標運動、鎖定並同步射擊，可攔截極小機種，¹³德軍也正測試此系統。¹⁴

(三) 指揮管制

反 UAV 綜合能力的建立，有賴指管系統 (C2) 強化，美國已推包括陸軍「前進區域防空指揮管制」(Forward Area Air Defense

¹¹ “US Marines Demonstrate L-MADIS Air Defense System Mounted on Polaris MRZR,” *Army Recognition*, August 05, 2021, https://www.armyrecognition.com/weapons_defence_industry_military_technology_uk/us_marines_demonstrate_l-madis_air_defense_system_mounted_on_polaris_mrZR.html.

¹² “The Marines’ New Drone-Killer Aces Its First Real World Test,” *the Wired*, July 22, 2019, <https://www.wired.com/story/iran-drone-marines-energy-weapon-lmadis/>.

¹³ Inder Singh Bisht, “US Marines Buy Israeli Rifle-Mounted Counter-Drone Systems,” *the DefensePost*, October 5, 2021, <https://www.thedefensepost.com/2021/10/05/us-marines-smash-systems/>.

¹⁴ Waldemar Geiger and André Forkert, “SMASH: Bundeswehr testet Drohnenabwehr mit Handwaffen,” *Europäische Sicherheit & Technik*, September 29, 2021, <https://esut.de/2021/09/meldungen/30047/smash-bundeswehr-testet-drohnenabwehr-mit-handwaffen/>.

Command and Control, FAAD-C2)、陸戰隊「空防系統整合者」(Air Defense System Integrator, ADSI), 以及空軍的「多重環境領域無人系統應用指揮及管制」(Multi-Environmental Domain Unmanned Systems Application Command and Control, MEDUSA C2) 等系統。¹⁵ 其中 MEDUSA 由康斯堡公司 (Kongsberg) 開發, 可監督友軍無人機、打擊敵軍無人機。FAAD-C2 則由諾格公司 (Northrop Grumman) 開發, 這 3 套指揮管制系統皆可互相相容。JCO 正設法建立管理反 UAV C2 系統的通用技術標準, 以便未來將符合之新產品與技術「隨插即用」、整合在現有裝備中。

二、「成本」為反無人機系統發展之重要考量

(一) 較低成本的反無人機方案發展

sUAS 成本低廉, 而大型 UAV 也有如土耳其「TB-2」般、僅需 1 至 2 百萬美元的相對廉價機種,¹⁶ 對高價先進防空飛彈等攔截方案形成挑戰, 因此降低成本為各國反 UAV 系統的重要發展方向。

以美軍而言, 目前正考慮發展以其成本 1 / 100 的武器, 如火箭彈或是槍榴彈, 對抗 sUAS 「本小效高」的不對稱優勢; 美國陸軍也在 2021 年 9 月開標發展使用雷射而非微波的反 UAV 武器, 可能正是考慮藉以減少附加成本。¹⁷ 前述槍械用之「重擊」射控系統, 亦是低成本方案。

前段曾提及之美軍 M-SHORAD 為在史崔克 (Stryker) 八輪甲車裝置李奧納多公司 (Leonardo DRS) 遙控武器站,¹⁸ 使用 30 公厘

¹⁵ Nathan Strout, "Army sSelects Eight Counter-drone Systems for the Joint Force," *C4ISR Net*, June 27, 2020, <https://www.c4ismnet.com/unmanned/2020/06/26/army-selects-eight-counter-drone-systems-for-the-joint-force/>.

¹⁶ Paul Iddon, "Cheap And Combat-Tested: The Growing Market For Turkish Drones," *Forbes*, July 26, 2021, <https://www.forbes.com/sites/pauliddon/2021/07/26/cheap-and-combat-tested-the-growing-market-for-turkish-drones/?sh=b68e7787ce02>.

¹⁷ Kelsey D. Atherton, "The Pentagon Wants a Bazooka that Can Take down Drones," *Popular Science*, June 2, 2021, <https://www.popsoci.com/technology/pentagon-anti-drone-weapon/>.

¹⁸ "Maneuver Short-Range Air Defense (M-SHORAD)," *LeonardoDRS*, <https://www.leonardodrs.com/what-we-do/products-and-services/m-shorad/>.

XM914 鏈砲、4 聯裝刺針飛彈、AGM114L 地獄火反戰車飛彈及 7.62 公厘同軸機槍，形成多層次、價廉火網，在極近距離對抗各種低空飛行器及 UAV。¹⁹

歐陸也正發展類似系統，針對 2023 年北約「高度戰備聯合特遣部隊」(Very High Readiness Joint Task Force) 需求，德軍整合「拳師犬」八輪甲車 (GTK Boxer) 與挪威康斯堡 Protector 遙控武器站 (Remote Weapon Station, RWS)、40mm 榴彈機槍，與 Hensoldt 公司 Spexer 3D 反無人機雷達，為基層機械化部隊提供反 sUAS 能力，²⁰ 法國也正發展類似系統；²¹ 此外，德國萊茵金屬 (Rheinmetall) 的新式防砲如「天空突擊兵」(Skyranger) 系列，也將反無人機作為重點項目之一。²²

(二) 以無人機對付無人機

低成本 sUAS 本身也可成為解決方案。雷神公司的「土狼」(Coyote) 為低成本徘徊式械彈 (Loitering Munition)，可偵測 UAV 並加以撞擊或炸毀，美軍改稱此機為「咆哮者」(Howler) 並進行測試。²³ 「土狼」原是美國海軍在 2015 年推動的「低成本無人機集群技術」(Low-Cost UAV Swarming Technology, LOCUST)，尺寸類似多管火箭或反潛機之聲納浮標，原為以集群 (Swarm) 概念大量發射的自動化、可返回基地回收之 ISR 機種。

¹⁹ 〈強化低空防禦 美陸軍敲定 IM-SHORAD 計畫 358.3 億訂單〉，《青年日報》，2020 年 10 月 3 日，<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1270250>。

²⁰ Thomas Wiegold, “Bundeswehr beschafft Drohnenabwehrsystem von Kongsberg,” *Augengeradeaus!*, December 4, 2019, <https://augengeradeaus.net/2019/12/bundeswehr-beschafft-drohnenabwehrsystem-von-kongsberg/>.

²¹ Jean-Marc Tanguy, “French Army Tests VAB Armed with 40 mm AGL Against UAVs,” *Jane’s Defence Weekly*, June 10, 2021.

²² “Mobile Air Defence,” *Rheinmetall*, last retrieved: October 20, 2021, https://rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/systems_and_products/air_defence_systems/mobile_air_defence/index.php; Paolo Valpolini, “Rheinmetall Air Defence unveils its Skyranger 30 (upgraded),” *European Defence Review*, March 3, 2021, <https://www.edrmagazine.eu/rheinmetall-air-defence-unveils-its-skyranger-30>.

²³ Kelsey D. Atherton, “The Coyote Swarming Drone Can Deploy for Aerial Warfare—or Hurricanes,” *Popsi*, March 12, 2021, <https://www.popsi.com/story/technology/navy-swarming-drones-coyote/>.

類似概念還包括波音（Boeing）子公司 Aurora Flight Sciences 的「模組化攔截無人機航電設備」（Modular Intercept Drone Avionics Set, MIDAS），這種多旋翼 sUAS 以人工智慧輔助，配備光學感測器和一定酬載能力，每次飛行可以低附帶效應擊敗多個 sUAS。以色列艾爾它（ELTA Systems）的「無人機獵殺無人機」（Drone-Kill-Drone, DKD）概念，則讓 UAV 用金屬絲，在飛行中纏繞敵方 UAV 加以「絞殺」，可減少在人口稠密區擊落無人機造成的附加傷亡。

（三）雷射武器

雷射武器同樣是成本低廉的反無人機系統。以色列用於反火箭、砲彈及迫砲攻擊（Counter rocket, artillery, and mortar, C-RAM or counter-RAM）的低成本「鐵穹」（Iron Dome）系統，雖具反無人機能力，然飛彈仍達 5 萬美元，因此發展並於 2014 年展示輔助「鐵穹」、平均成本僅 1 美元的「鐵束」（Iron Beam）雷射系統。

近年雷射逐漸成為各國發展重點，前述美軍 M-SHORAD 防空系統，也配備了 5 呎雷射對抗 sUAS、更將升級為 50 呎，稱為「直接能機動短程防空系統」（Directed Energy-Maneuver Short-Range Air Defense, DE M-SHORAD）。²⁴通用動力陸地系統（General Dynamics Land Systems, GDLS）與 Epirus 公司合作的短程機動防空系統，也將雷射裝置於史崔克上。洛克希德馬丁（Lockheed Martin）發展配有光電尋標器的先進測試高能雷射套組（Advanced Test High Energy Asset, ATHENA），可配備在重要關鍵基礎設施，其雷射由 3 個 10 呎光束耦合而成，用於對付無人機或無人車輛。²⁵另外，美國空軍也正進行「高能雷射武器系統」（HELWS）測試，海軍也將為其水面艦

²⁴ Jared Keller, "The Army's First Laser Weapon is Almost Ready for a Fight," *Task & Purpose*, August 12, 2021, <https://taskandpurpose.com/military-tech/army-laser-weapon-stryker-combat-shoot-off/>.

²⁵ Jaleah Dortch, "Laser Weapon Tracks and Destroys Drones in Demo with Airmen," *Defense News*, November 9, 2019, https://www.defensenews.com/unmanned/2019/11/08/laser-weapon-tracks-and-destroys-drones-in-demo-with-airmen/?utm_source=Sailthru&utm_medium=email&utm_campaign=Unmanned%2012.4.19&utm_term=Editorial%20-%20Unmanned%20Systems%20with%20C4.

配備雷射近迫武器，反制無人機、無人艇、巡弋飛彈等威脅。

其他國家也有類似發展，如德軍近短程防空計畫，就將整合防空飛彈、防砲甚至高能雷射等能力合一，²⁶。土耳其也研發了 50 呎的「ALKA」雷射系統反 UAV，並在利比亞成功擊落中共「翼龍 II」偵打一體無人機，²⁷顯示相關裝備的研發並非歐美大國專利。

三、反制集群無人機

集群無人機可能會干擾基地或設施運作，即使部分故障仍可編隊飛行。中國曾在 2021 年 3 月展示，同時操作 3,281 架小型無人機的技術。若要防止載有爆炸物的無人機群造成損害，意味著要停止整個蜂群運作，而不僅是移除其中一部分。美國空軍正測試匿稱「索爾」(THOR)的「戰術高功率作戰傳輸器 (Tactical High Power Operational Responder)」，透過高功率微波擾亂電子系統，可削弱 UAV 相互通訊的能力，亦能「燒毀」電子系統、破壞整個蜂群。整套系統置於貨櫃中，可由 C-130 運輸。²⁸美國空軍也研究「反電子高功率微波增程空軍基地防空系統」(CHIMERA)，以打擊中長程無人機。²⁹

肆、結論

無人機的快速擴散，成為一種新興威脅，因此反制無人機不但是軍事部門的重要課題，也是政府部門必需急迫處理的議題，從各

²⁶ Thomas Wiegold, “Planung für die Luftverteidigung: Schwerpunkt Drohnenabwehr, Entscheidung über TLVS ‚derzeit nicht im Fokus,“ *Augen geradeaus!*, March 23, 2021, <https://augengeradeaus.net/2021/03/planung-fuer-die-luftverteidigung-schwerpunkt-drohnenabwehr-entscheidung-ueber-tlvs-derzeit-nicht-im-fokus/>.

²⁷ Burak Ege Bekdil, “Turkey Eyes Directed-energy Weapons as Key Priority,” *Defense News*, March 15, 2021, <https://www.defensenews.com/industry/techwatch/2021/03/15/turkey-eyes-directed-energy-weapons-as-key-priority/>.

²⁸ Kelsey D. Atherton, “The US Military is Testing a Microwave Anti-drone Weapon Called THOR,” *Popular Science*, April 29, 2021, <https://www.popsci.com/story/technology/air-force-anti-drone-technology-thor/>.

²⁹ Theresa Hitchens, “THOR: Air Force Tests Counter-Drone Microwave In Africa,” *Breaking Defense*, December 17, 2020, <https://breakingdefense.com/2020/12/thor-air-force-tests-counter-drone-microwave-in-africa/>.

國軍方及民間公司的相關概念與技術發展而言，可注意到其「多層次防禦」之發展方向，同時偵測 sUAS 及低成本反制手段、更是目前發展之關鍵。

中共已大量運用各種型式的無人機，包括超音速偵察無人機、具匿蹤外型的大型偵打一體無人機、供運輸及後勤用途的無人機、執行防空制壓或自主攻擊的無人機、甚至是以舊式戰機改裝，可當成誘餌消耗防空彈藥等，對國軍防禦作戰形成挑戰。

就台灣未來的發展方向而言，首先應嘗試發展不同形式的主、被動偵測能力，並逐漸將短中長程等各層次的防空能力逐次強化，其中目前地面作戰區的野戰防空能力，及中低空的偵測、反制手段，可能是目前發展的當務之急。在未來，則更須進一步建立各軍種的戰場共通防空圖像，並針對無人機操作特性，發展多重反制手段，除降低成本外，也增加反制成功的機率，以及在承平時期的、消除 sUAS 可能造成的威脅。

本文作者舒孝煌為淡江大學國際事務與戰略研究所博士，現為財團法人國防安全研究院中共政軍與作戰概念研究所副研究員。作者許智翔為德國杜賓根大學博士，現為財團法人國防安全研究院中共政軍與作戰概念研究所助理研究員。

Anti-drone Concepts and System Development

Hsiao-huang Shu and Jyh-shyang Sheu

Associate Research Fellow and Assistant Research Fellow

Abstract

The importance of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) on the modern battlefield has been shown in conflicts in the Caucasus, the Middle East and North Africa, etc. These cases show that the side without anti-drone means can suffer serious setbacks and it may be a key factor that decides victory and defeat on the battlefield. In fact, drone systems do not only present a threat to security on the battlefield, in peacetime small drones pose a major threat to key infrastructure. In this situation, anti-drone concepts and technology are important security issues faced by many countries at present. In terms of use characteristics, there are different key points for countering large drones and small drones. The former requires enhanced layered aerial defense and electronic warfare capability, responding with complete air defense and electronic warfare. Although the latter are fragile, they are extremely hard to detect and the key to countering them lies with early warning. As the price of drones is gradually decreasing, small drones are much cheaper than air defense missiles, therefore, various low cost hard kill and soft-kill means to counter them are the focus of current development. As China is very active in the area of drone development, anti-drone concepts and means are key items that should be emphasized at an early date by Taiwan and for which resources should be provided.

Keywords: drone, anti-drone, key infrastructure protection