

美軍電磁頻譜作戰新概念－電磁機動戰發展與運用之研究

作者：徐榮駿、鄧宏年

提要

- 一、隨著上世紀美蘇冷戰結束，因缺乏主要軍事競爭對手，致使美國國防部逐漸減少電磁頻譜作戰方面預算，造成美軍喪失原有電磁頻譜軍事優勢，目前已遭中共、俄羅斯超越，為了重新奪回電磁頻譜優勢，除了增加預算，持續研發下一代低至零功率與被動電磁作戰裝備外，新的電磁頻譜作戰概念「電磁機動戰」也逐漸形成。
- 二、美軍電磁機動戰捨棄以往主動攻擊的電磁頻譜作戰模式，改運用被動技術來定位敵方的載台和系統，也可運用低偵測／低反制雷射進行多靜態載台的方式，或運用低功率雷射以混淆敵方的光電／紅外線偵測裝備，甚至以無人機射頻干擾敵方作戰，減少敵人主、被動偵測裝備的靈敏度。
- 三、未來電磁機動戰將在日趨成熟的 5G 網路通訊技術基礎上，結合人工智慧與無人化作戰理念，將持續研發新式電磁裝備，在有、無人載台交互運用下，可望帶領美國重返優勢電磁頻譜作戰。

關鍵詞：電磁機動戰、5G 通訊技術、低偵測、低功率雷射、電磁頻譜作戰

前言

在西元 2014 年 10 月美國海軍針對電磁頻譜管控提出新的發展策略，規劃由電磁戰鬥管理（**Electromagnetic battle management, EMBM**）系統中，以被動模式運用各類載台偵測敵方電磁波和紅外線，收集有關敵方信號的數據，經整合完成目標識別及定位，再由多處載臺發出干擾源（如發光誘餌）或電磁波以欺騙對手，最後以低偵測率之數據鏈路傳輸給各載台，對敵實施接戰。上述整合概念美國海軍稱為電磁機動戰（**Electromagnetic Maneuver Warfare, EMW**）。¹隔年美國戰略與預算評估中心（**Center For Strategic And Budgetary Assessments, CSBA**）智庫批評五角大廈在「電磁頻譜」領域發展已不符作戰需求，錯誤的戰略與運用模式恐導致駐外美軍暴露於敵軍電磁威脅下；智庫並表達中共與俄羅斯等國家在電磁頻譜領域的發展，已可與美國相抗衡，甚至超越美國；同時該報告重點闡述了低-零功率（**low-to-no power**）電磁頻譜作戰

¹Dney J.Freedberg JR. "Navy Forges New EW Strategy: Electromagnetic Warfare" Maneuver, breakingdefense,2014.10.10,<<https://breakingdefense.com/2014/10/navy-forges-new-ew-strategy-electromagnetic-maneuver-warfare/>>（檢索日期：2021 年 5 月 10 日）

的概念。²評估報告發表後，引起五角大廈高層注意，與先前海軍提出之「電磁機動戰」概念整合後，美軍開始著手規劃電磁頻譜運用改革。

2017 年 10 月 CSBA 智庫又發布研究報告《決勝灰色地帶》，首次提出電磁戰概念，並將此作為應對中共與俄羅斯「灰色地帶挑釁」(gray zone confrontation) 的有效手段。2019 年 11 月 CSBA 智庫再發布電磁評譜發展評估報告《贏得隱形戰爭》，再次對美軍提升電磁戰能力提出相關具體建議；上述三份智庫報告，對美國國防部電磁頻譜政策產生絕對性的影響。在 2020 年 5 月美軍官方出版聯合電磁頻譜戰準則 (Joint Publication 3-85)，將聯合作戰中電磁頻譜環境操作概念予以規範。同時在軍語辭典中以「電磁戰」(electromagnetic warfare, EW) 取代以往的電子戰 (electronic warfare, EW)，同時電子攻擊、電子防護、電子支援等都相應地改為電磁攻擊、電磁防護、電磁支援。

本研究旨在透過美官方及智庫文件探討美軍電磁頻譜作戰領域下之電磁機動戰概念與發展趨勢，並借鏡其建構電磁優勢之務實作法供國軍建軍備戰參考。

美軍電磁頻譜作戰

一、電磁頻譜簡介

電磁頻譜 (Electromagnetic spectrum, EMS) 是一個物理域，具有物理和時間屬性。電磁頻譜是電磁輻射從零到無窮大的頻率範圍。它由震盪的電場和磁場組成，以頻率和波長所構成。根據特定的物理特性，電磁頻譜頻率從低至高分別有無線電、微波、紅外線、可見光、紫外線、X 光和伽瑪射線 (圖 1)。³

電磁輻射無處不在。它不需透過物質來傳遞，我們每天見到的太陽就是最明顯的例子，雖然地球和太陽之間是一片真空什麼都沒有，但是我們仍然能感受到太陽的光和熱。輻射線係指從物體放出來的電磁波，例如紅外線、可見光與紫外線等。後來發現 X 光、伽瑪射線也屬於電磁波。但因波長較短，且具有穿透力和使分子帶電的能力，所以又特別叫做「游離輻射線」⁴。

許多軍事行動都大量使用頻譜，甚至可說幾乎每種現代武器系統（例如飛機、衛星、坦克和艦船）都取決於頻譜的功能。軍方使用跨電磁頻譜的應用程

²Bryan Clark/Mark Gunzinger, "Winning The Airwaves-Regaining America's Dominance In The Electromagnetic Spectrum", Center For Strategic And Budgetary Assessments(CSBA), December 1, 2015, p.1.

³John R.Hoehn/Jill C.Gallagher/Kelley M.Sayler, "Overview of Department of Defense Use of the Electromagnetic Spectrum(R46564)", Congressional Research Service, October 8, 2020, <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46564>> (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

⁴葉有財，〈輻射線的種類〉，《行政院原子能委員會》，2019/11/5，〈https://www.aec.gov.tw/%E4%BE%BF%E6%B0%91%E5%B0%88%E5%8D%80/%E5%8E%9F%E5%AD%90%E8%83%BD%E7%9F%A5%E8%AD%98/%E8%AA%8D%E8%AD%98%E8%BC%BB%E5%B0%84/%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E8%BC%BB%E5%B0%84%E7%9F%A5%E8%AD%98/%E8%BC%BB%E5%B0%84%E7%B7%9A%E7%9A%84%E7%A8%AE%E9%A1%9E--220_271_1085_1086_1169.html> (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

序來支持軍事行動通信和新興技術。這些應用範圍包括使用超低頻無線電波與水下潛水艇進行通信，到微波用於數據鏈路以連接武器系統。如圖 2 美國國防部在（1755–1850MHz）頻帶中之用途。⁵

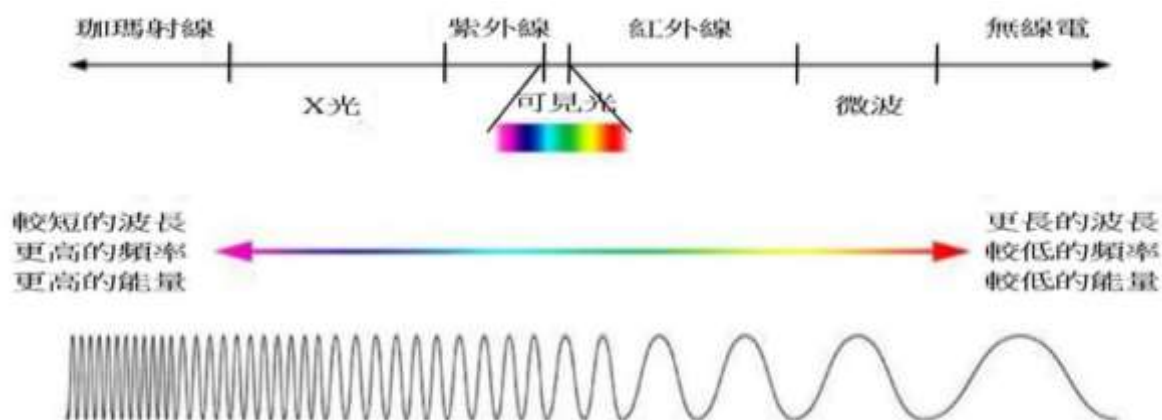


圖 1 電磁頻譜圖

資料來源：National Aeronautics and Space Administration, <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html/>；本研究整理製圖。

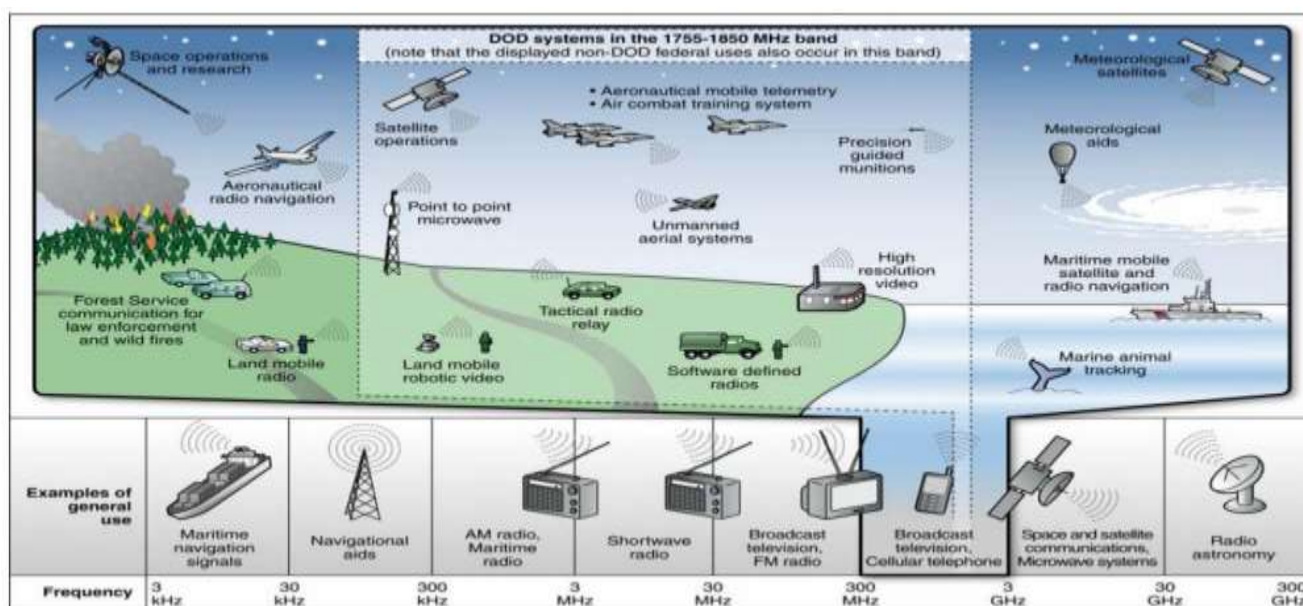


圖 2 美國國防部（DOD）使用無線電頻譜

資料來源：U.S. Government Accountability Office, Spectrum Management: Federal Relocation Costs and Auction Revenues, May 2013, p6, <https://www.gao.gov/assets/660/654794.pdf>.（檢索日期：2021 年 5 月 10 日）

二、美軍電磁頻譜作戰階段劃分

美軍在電磁頻譜的運用已有百年歷史，將其軍事行動依照時間、技術、運用模式等區分階段，分述如次。

（一）初始階段：主動網絡與被動對策

⁵同註 3

電磁頻譜作戰的初始階段要從 19 世紀末無線電發明後開始，大規模使用則是在第一次世界大戰時期，當時軍事部隊間戰術運動與火力射擊等行動大多使用無線電聯絡與管控，包括監聽敵我雙方無線電傳輸內容等軍事行為。獲取情資偵知敵軍行動，調整部隊以行反制。當時由於可運用頻寬及通信電子技術能力有限，因此較少使用通信干擾，且由於當時地面部隊進攻節奏緩慢，部隊運動速度受裝具限制，因此即使干擾無線電通信造成敵方通信中斷，敵方部隊仍可以使用旗號或其它手段來替代。在那個時空環境中，監聽與利用敵方的無線電通信所傳遞的資訊，遠比干擾敵方無線電通信顯得更為有效。⁶

（二）第二階段：主動網絡與主動對策

隨著軍事科技技術不斷發展及武器載台更新，使作戰節奏逐漸加快，單純無線電監聽已無法滿足作戰需求，同時專用的電子干擾設備也在第二次世界大戰後陸續發明納入作戰運用。直接使用干擾機來阻止敵方接收訊號，或者運用金屬箔條製造假雷達訊號來迷惑敵軍防空雷達為當時電子作戰之趨勢。因為本階段電子技術水平的提升，使電磁頻譜作戰系統的頻帶更寬、頻譜功率更大、波形也更為複雜，因此在實施電磁頻譜作戰首重主動干擾技術之運用。本階段重點發展運用時期在越南戰爭期間，美國空軍部署越來越多的主動干擾雷達系統，以制止並擊敗日益增長複雜的北越防空預警系統，再對各類載台等目標實施攻擊。⁷

（三）第三階段：隱身與低功率網絡

隨著美軍「全球戰略」布局，逐漸發現其電磁頻譜戰發展，已無法滿足未來作戰需求，並發現以下問題：

1. 美軍在境外遠征作戰中，受限於武器載台因素，僅可使用功率小的電磁系統，導致美軍電磁對抗中性能都無法直接佔有優勢。

2. 當對手的「反介入／區域拒止」威脅範圍隨著武器研發技術不斷擴張，為確保部隊安全，美軍需使用高功率的電磁對抗設備，自更遠距離開始作戰，在安全的前提下來保持自身電磁優勢，但從現有電磁技術無法滿足無止盡的大功率裝備需求，易在戰場上高功率輻射將更容易遭敵偵知。

3. 近年美軍武器不斷輸出世界各國，其各項電磁裝備參數數據、工作頻段或信號波形早已為中共、俄羅斯等敵人針對，並依美軍電磁頻譜戰系統的特點部署了相對性的抗衡裝備，從而致使美軍難以獲得絕對性電磁優勢。

面對上述挑戰，美軍認為根據當前需求與困境，優先部署「隱身與低功率

⁶同註 2，頁 4-6。

⁷同註 2，頁 6-11。

網絡」(Stealth versus low-power networks)和電磁對抗措施，採取極低功率的工作模式以降低被敵方偵獲機率，進而在電磁頻譜中獲得相對性的作戰優勢，並規劃運用「無源和多基地發現敵方部隊」(Finding Enemy Forces Using Passive or Multistatic Detection)、「利用反射能定位敵方部隊」(Locating Enemy Forces Using Reflected Ambient Energy)等方法及運用網狀化、分佈式、低功率干擾系統破壞敵方電磁頻譜行動，俾利美軍在敵反介入／區域拒止區域內順利執行軍事任務。⁸

三、美軍電磁機動戰作戰概念

美蘇冷戰結束後，在沒有其他競爭對手的情況下，美國國防部停滯其電磁頻譜優勢發展，為中共、俄羅斯和其他競爭對手提供了機會，以針對美國軍方依賴的傳感器和通信網絡中的系統漏洞。經美國 CSBA 智庫批評美軍在「電磁頻譜」領域發展落後問題，結合先前美海軍提出之電磁機動戰作戰概念，美軍開始進行電磁頻譜運用改革，通過制定新的電磁頻譜作戰概念，開發新型電磁戰作戰裝備與能力，美軍將重獲電磁頻譜中的優勢地位。當有效利用低功率對抗措施來對付敵方有源和無源傳感器、低偵獲率／低探測機率傳感器與通信系統，從而降低被反探測的機率。

(一)電磁機動戰的必要性：中共和俄羅斯藉由經濟以及軍事力量的提高，試圖影響美國所主導的國際秩序。美軍面臨的巨大挑戰是：中共或俄羅斯在和平時期在其邊界(如中共在南海諸島嶼)部署了先進的遠程傳感器和武器網絡，不僅為了保護它們的領土，更降低了美國在反區域／拒止周邊地區的影響力。他們利用遠程打擊系統來保護各種低強度行動，在尚未達到引起區域衝突的程度，來擴張他們的領土與勢力版圖。這些攻擊為中共或俄羅斯提供在未來發生危機或衝突中的大國主導地位，遠程監視和武器網絡與低強度的灰色地帶作戰相結合，給美國帶來了巨大挑戰。這時電磁機動戰可用來對付或攻擊對手的傳感器和武器網絡，同時最大限度地減少衝突升級的可能性。⁹

(二)低功率到被動模式：美軍為取得電磁作戰優勢地位，首先要減少其電磁戰部隊遭敵反偵測的機會。將載台、雷達裝備、各式電磁戰武器系統配合電磁機動戰之低功率與被動作戰概念予以整合。運用多個被動式偵測裝備來偵測敵方雷達頻率與紅外線，以測得敵方精確位置(圖 3)。甚至運用靜態被動技術來定位敵方的載台和系統，也可運用低偵測／低反制雷射進行多靜態載台的

⁸同註 2，頁 11-13。

⁹Bryan Clark/Mark Gunzinger/ Jesse Sloman, Winning in the Gray Zone-Using Electromagnetic Warfare to Regain Escalation Dominance, Center For Strategic And Budgetary Assessments (CSBA), October 5, 2017, p.1-7.

方式，利用雷射信號波束聚焦較難以偵測特性。¹⁰例如，以 A 載台發射雷射，再由 B 載台負責接收，同時搭配有、無人載台混用，確保達成近距離偵測敵方之任務。

（三）在敵「反介入／區域拒止」情況有效執行任務：美軍在敵「反介入／區域拒止」作戰中，為阻止敵方的偵測，除使用低功率雷射混淆敵方的光電／紅外線偵測裝備，也可以無人機射頻干擾敵方作戰，減少敵主、被動裝備偵測的靈敏度。甚至運用無人機系統掛載美軍電磁裝備攻擊或反制敵的電磁偵測裝備。¹¹因為發射器和載具間的通信可有效降低敵「反介入／區域拒止」的能力，此時最有效的「誘餌和欺騙」系統，就是將潛艇與無人水下航行載具（Unmanned underwater vehicles, UUV）加裝水下電磁戰系統（AN／BLQ-10）。該系統可自動檢測、識別、分類和定位海上潛在敵對雷達和通信訊號。¹²

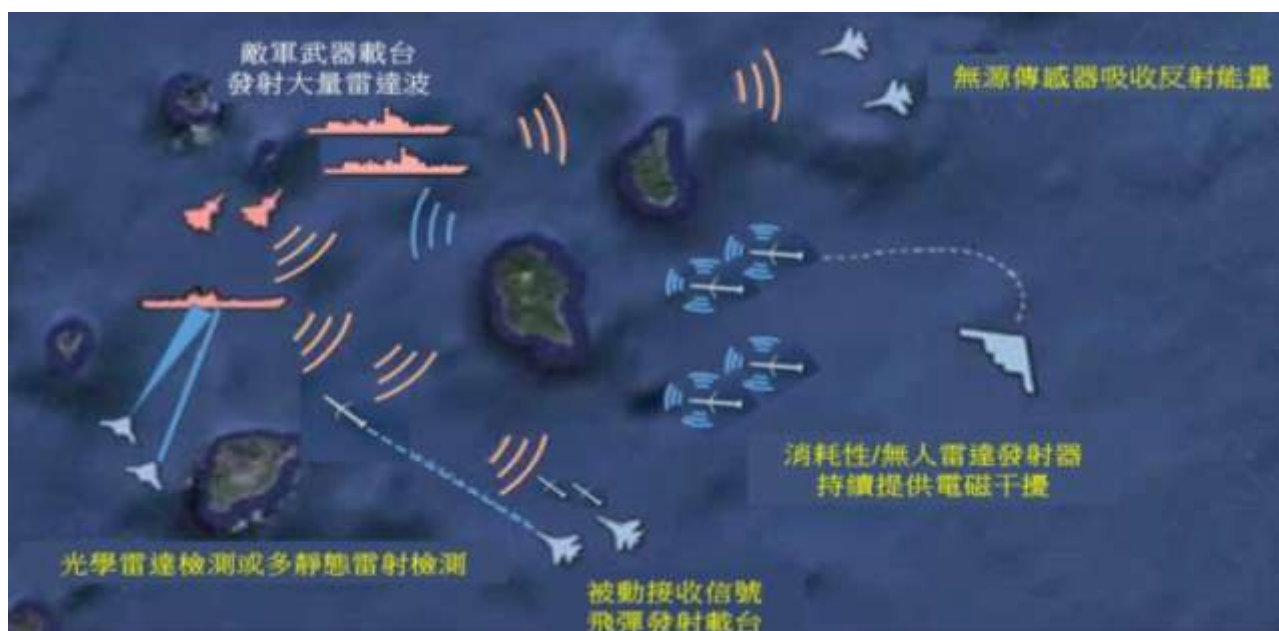


圖 3 被動和多靜態載台檢測與定位示意圖

資料來源：Bryan Clark/Mark Gunzinger, Winning The Airwaves—Regaining America’s Dominance In The Electromagnetic Spectrum, Center For Strategic And Budgetary Assessments (CSBA), December 1, 2015, p20；本研究整理製圖。

美軍電磁機動戰裝備發展現況

為了有效遂行電磁機動戰，美軍近年針對要執行這些新的作戰概念，持續整合各軍種電磁作戰能量，俾利在低功率到被動模式的電磁頻譜作戰環境中有

¹⁰宋吉峰，〈無聲無息的戰爭：電磁頻譜作戰的未來發展〉《海軍學術雙月刊》（臺北），第 51 卷第 1 期，2017/2，頁 63-64

¹¹同註 10，頁 65。

¹²John Keller, “Navy wants more AN/BLQ-10 submarine electronic warfare(EW)systems to detect hostile radar signals at sea,” Military&Aerospace Electronics, May 1st, 2020, 〈<https://www.militaryaerospace.com/sensors/article/14175041/submarine-electronic-warfare-ew-radar>〉（檢索日期：2021 年 5 月 10 日）

效運行。最重要的是，系統將需要由適應性強的智能處理器，開發出在維持美軍電磁頻譜作戰能力，同時破壞敵人行動的技術，以下分別針對空中、海上及地面裝備依序簡介。

一、美軍空中電磁機動戰系統

（一）機載電磁作戰系統

1.美空軍 EC-130H 與 EC-37B 新載機：EC-130H 利用其優異反資訊戰能力和電磁攻擊能力，旨在破壞敵方指揮控制通信系統並限制其協調行動，在歷次軍事衝突與作戰中保護美軍及盟軍作戰部隊。由於它在通信干擾和電子攻擊方面的獨特能力，使其在阿富汗、伊拉克和敘利亞衝突擔任關鍵要角。該機自 1983 年形成初始作戰能力，現有 14 架。隨著飛機老化導致機隊維持成本不斷上升，未來將逐步被新載機替代。新載機 EC-37B 機體使用灣流 G550 商用飛機，主要設備有 70%來自 EC-130H，30%是新設備；除具有更大的航程、速度、續航力和更高的作戰高度，並強化遠程作戰與戰場生存能力，使美國空軍能夠在「反介入／區域拒止」環境中有效地實施電磁攻擊行動；新載機計劃採購 10 架，自 2018 年開始採購逐年採購 1-2 架，最初 2 架預計在 2023 年形成初始作戰能力。¹³

2.F-35 聯合攻擊戰鬥機：戰機配有 AN / ASQ-239 電磁戰系統，該系統可同時跟踪多架飛機進行高增益電子攻擊。洛克希德公司表示該系統將提供寬頻覆蓋、高靈敏度、快速反應和攔截，以及精確定位、多機同時追蹤、自我保護和抗干擾等能力；由於 F-35 雷達孔徑的增益高，波束窄，可對目標雷達實施精確的高增益干擾。洛克希德公司宣稱其干擾能力是傳統飛機干擾能力的 10 倍。¹⁴由於擁有強大電磁戰能力，因而不需要專用電磁攻擊飛機為其提供支持，這將減輕電磁攻擊飛機的負擔，使其可專注於保護非隱身飛機。

3.下一代干擾機（Next Generation Jammer, NGJ）：美海軍正在設計功能更強大的干擾技術，該系統稱為下一代干擾機（NGJ）。其中頻段系統 AN / ALQ-249 將取代 EA-18G 咆哮者飛機現有之 AN / ALQ-99 戰術干擾系統吊艙，其運用氮化稼寬頻技術，可同時干擾多個不同頻率威脅目標，提升機載電磁戰攻擊能力，以應對迅速變化的威脅。NGJ 未來任務包括對全範圍的敏捷和自適應通

¹³John R. Hoehn, "U.S. Airborne Electronic Attack Programs: Background and Issues for Congress (R 44572)" Congressional Research Service, May 14, 2019, <<https://crsreports.congress.gov/product/details/Pdt/R/R44972/85>> (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

¹⁴J.R.Wilson, "Enabling technologies for airborne electronic warfare", Military & Aerospace Electronics, Feb 28th, 2020, <<https://www.militaryaerospace.com/sensors/article/14168864/airborne-electronic-warfare>> (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

信、數據鏈路和無線電頻率（Radio frequency, RF）目標進行非運動攻擊。¹⁵



圖 4 美空軍 EC-37B 新載機

資料來源：國際電子戰，〈美軍機載電子攻擊項目概述〉《微文庫》，2019/9/19，<https://www.gushiciku.cn/dc_hk/201393296>（檢索日期：2021 年 5 月 10 日）

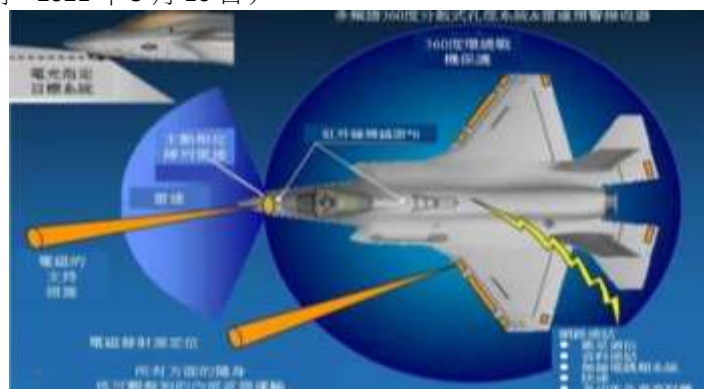


圖 5 F-35 電磁作戰系統分布

資料來源：高端裝備產業研究中心，〈美軍電磁機動戰裝備概述〉《每日頭條》，2019/9/5，<<https://kknews.cc/h-tw/military/qlxon5r.html>>；本研究整理製圖。



圖 6 雷神公司 NGJ-MB 吊艙內組件的分解圖

資料來源：JOSEPH TREVITHICK AND TYLER ROGOWAY, 〈Navy's Next Gen Jammer Is Three Pods, Not One, And Competition For One Of Them Just Heated Up〉《THE DRIVE》, OCTOBER 25, 2018, <<https://www.thedrive.com/the-war-zone/24475/navys-next-gen-jammer-is-three-pods-not-one-and-competition-for-one-of-them-just-heated-up>>；本研究整理製圖。

（二）反輻射飛彈（Anti-Radiation Missile, ARM）：反輻射飛彈是一種專門用來對付包括雷達、各種通訊設備或者是進行電磁干擾的發射裝置。自服役以來，先後衍生多個型號，最新的 AGM-88E 先進反輻射導引飛彈（AGM-88E Advanced Anti-Radiation Guided Missile, AARGM），採用全球定位系統

¹⁵Lt. Jonathon Parry, Aug 27, 2020, "VX-23 advances electronic warfare with AN/ALQ-249 NGJ Mid-Band" TESTER, <https://www.dcmilitary.com/tester/tenant_profile/vx-23-advances-electronic-warfare-with-an-alq-249-ngj-mid-band/article_446fe094-60bc-5cd9-a6c1-4ca4ad36c83f.html>（檢索日期：2021 年 5 月 10 日）

(Global Positioning System, GPS) / 慣性導航系統 (Inertial navigation system, INS) 導引, 換裝主被動雷達雙模導引頭, 在中段飛行時採用曲線路徑, 在靠近目標時會啟動雷達導引, 在末端飛行自動識別目標並攻擊。該彈飛控系統還安裝了數字式自動駕駛儀和機電控制舵機, 即便目標雷達關機也能計算飛行彈道, 繼續向目標飛行。目前部署在 F / A-18 戰鬥機和 EA-18G 電子戰機上, 未來配置於 F-35 戰鬥機。美軍計劃以 AGM-88E 飛彈為基礎, 研發陸射反輻射飛彈攻擊武器。¹⁶



圖 7 AGM-88E 反輻射飛彈

資料來源：詹氏年鑑電子資料庫

(三) 微型空射誘餌 (Miniature Air Launched Decoy, MALD) : MALD 主要任務是搶先式摧毀、反應式壓制、誘騙迷惑與飽和攻擊。通常攜帶箔條或射頻迴波增強器使其信號增強, 並通過模仿戰術飛機的雷達特徵和飛行特徵。在空戰前使用 MALD 刺激敵防空系統, 誘騙敵方攻擊, 俟判明敵方位置後, 再摧毀敵方雷達陣地。MALD 最初是於 1995 年開發, 其航程約為 500 海哩, 現已生產了 2000 多枚。目前開發的 MALD-X, 該型可以利用其自適應電磁戰載荷自動地對防空節點實施電磁攻擊, 或者以半自動方式遠距離向操作員方向實施電磁攻擊。未來計畫開發 MALD-N 裝載於美國海軍的 F / A-18E / F 戰鬥機上, 預判將具備更強大網狀化系統之誘餌能力。¹⁷



圖 8 微型空射誘餌 (MALD)

資料來源：軍事,〈美國海軍型微型空射誘餌增加雷達信號模擬功能〉,《北緯 40°》,2020/6/1,〈<http://www.bw40.net/15661.html>〉(檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

¹⁶日行一城,〈美國最先進反輻射飛彈,可攻擊已關機雷達,未來將裝備 F-35〉《人人焦點》,2020/12/17,〈<http://kknews.cc/military/qlbb28.html>〉(檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

¹⁷同註 14, 頁 16。

二、美軍海上電磁機動戰系統

(一) 整合桅杆系統 (Integrated Topside, InTop)：於 2009 年啟動，致力於開發一系列可升級的多功能孔徑和配套的電子系統，以創新的電磁頻譜使用方式來實現雷達、電磁戰、資訊戰和通訊功能。運用系統模組化整合概念，採用開放式射頻架構，可持續針對軟、硬體實施升級、研改及同步，以強化射頻功能的能力，並有效降低電磁干擾和滿足電磁兼容問題。¹⁸系統將多種射頻功能整合，以釋放艦上的空間及重量、減輕後勤維保的工作量。相對於將多個分立的系統組合起來的傳統方式，部署這種整合系統可以降低艦船的建造成本、人員規模、工程量和維護成本，此外還提升了系統用頻段範圍的靈活性，使美海軍能夠遂行電磁機動戰。

(二) 水面電磁戰改進項目 (Surface Electronic Warfare Improvement Program, SEWIP)：SEWIP 使用漸進式採購策略進行增量升級，提供先進的電磁支援和電磁攻擊功能，旨在通過模塊化、開放式的體系方法來升級 AN/SLQ-32 電磁戰系統，最終實現針對反艦飛彈的預警檢測、分析、威脅告警和防護的功能。SEWIP 項目分為 4 個階段進行改進研究：Block I 為針對現有與未來之戰鬥系統提供增強的電磁戰能力，以改善反艦飛彈防禦、反定位和反監視能力。Block II 升級電磁支援天線等系統，以增強電磁支援功能。Block III 提供 AN/SLQ-32 系統強大的電磁攻擊功能，使其能夠對敵方通信網絡、數據鏈路、雷達系統或其他電磁資源進行攻擊。Block 4 是未來計劃升級，將為系統提供下一代先進的光電與紅外線偵察能力。¹⁹SEWIP 可關閉發射信號進入被動和靜態模式，在不發出任何信號的情況下檢測到敵方信號源，交由其他載台實施攻擊。²⁰

(三) 水下電磁戰系統：潛艦電磁戰支援系統 AN-BLQ-10，用於探測、分類、定位和識別傳入所有雷達和通信信號。系統由多個子系統組成，用於在潛艇處於潛望鏡深度時進行信號情報收集和處理。AN/BLQ-10 具有開放系統架構，其硬體和軟體每兩年更新一次。系統初次升級是 TI-08，用於改進雷達信號的攔截。後續 TI-10 則對雷達頻帶和測向系統的升級以及對信號收集的研改。TI-12 則整合 TI-10 的功能及網絡安全系統。TI-14 更新了處理器和顯示器，也

¹⁸一點資訊，〈多功能射頻系統的發展〉，《Zi 字媒體/3C 科技》，2017/02/21，< <https://zi.media/@yidianzixun/post/WSkCyG>〉（檢索日期：2021 年 5 月 10 日）

¹⁹Naval Sea Systems Command, "Surface Electronic Warfare Improvement Program (SEWIP)" United States Navy, 28 Apr, 2020, < <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2167559/surface-electronic-warfare-improvement-program-sewip/>〉（檢索日期：2021 年 5 月 10 日）

²⁰Kris Osborn, "Surface Electronic Warfare is the Navy's Technology of the Future", The National Interest, August 12, 2020, < <https://nationalinterest.org/blog/reboot/surface-electronic-warfare-navys-technology-future-166697>〉（檢索日期：2021 年 5 月 11 日）

為電磁支援系統提供增強的態勢感知能力。未來 TI-22、TI-24 工作將持續研改以符合未來水下航行載具之電戰需求。²¹



圖 9 整合桅杆系統圖

資料來源：高端裝備產業研究中心，〈美軍電磁機動戰裝備概述〉《每日頭條》，2019/9/5，〈<https://kknews.cc/z-h-tw/military/qlxon5r.html>〉；本研究整理製圖。

三、美軍地面電磁機動戰系統

(一) 整合式電戰系統 (Integrated Electronic Warfare System, IEWS)：IEWS 系統包括多功能電磁戰系統 (Multi-Function EW, MFEW)、電磁戰規劃與管理工具 (EW Planning & Management Tools, EWPM T) 和防禦性電磁攻擊 (Defensive Electronic Attack, DEA)。美陸軍努力改良車、機載及無人載具等領域的電磁戰裝備發展更新，並整合網狀化、無人化等趨勢。並持續開發電磁戰計劃和管理工具的軟體，現系統不僅可顯示戰場電磁環境，同時具備干擾手機、雷達系統和空中無人載具數據鏈結的能力。²²

(二) 地面層系統 (Terrestrial Layer System, TLS)：TLS 係以車載電磁戰系統取代舊式地面和徒步系統，計畫於 2018 年由美陸軍啟動，規劃整合訊號情報、電磁戰和網狀化作戰系統。藉透過載台的發射器和滯空無人機系統，檢測敵方信號進行三角測量，並通過無線網路和欺騙性信號進行電子干擾與攻擊。陸軍計劃在 2022 年獲得裝備，目前由洛克希德與波音子公司「數位接收科技」 (Digital Receiver Technology, DRT) 兩家公司分別將電磁設備整合到陸軍提供的輪型裝甲車上。未來 TLS 一旦檢測到數據，便可選擇繼續監聽並嘗試對其進

²¹Brett Daniel, "U.S. Navy Submarine Technology Explained" Trenton Systems, Sep 18, 2020, 〈<https://www.trentonsystems.com/blog/navy-submarine-warfare-technology>〉 (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

²²同註 20

行解密；滲透至敵方無線網絡並侵入其中傳遞錯誤訊息；甚或以干擾信號破壞敵人的通訊傳輸。²³

(三)反簡易爆炸裝置(Counter-Improvised Explosive Devices, C-IED): 自伊拉克和阿富汗戰爭爆發以來，簡易爆炸裝置(Improvised Explosive Device, IED)或自製炸彈等威脅出現以來，陸軍已部署許多技術，阻止或干擾來自敵方的傳入信號。無線電控制的簡易爆炸裝置(Radio Controlled Improvised Explosive Device, RCIED)，從而延遲或防止爆炸和對士兵的潛在傷害。這些技術包括開發「雷神單兵便攜式平台-Thor III」，它是一便攜式 RCIED 干擾裝置，能夠識別和干擾在一定頻率範圍內工作的射頻信號。當多個 Thor III 系統相互串連成一網狀化安全區域，為戰區的士兵提供安全防護。²⁴而車載的 C-IED 干擾系統，如 CREW Duke Version 3 系統，可安裝在任何車輛，通常將其安裝在悍馬或防地雷保護裝置上的車輛。儘管這些車載的 C-IED 干擾器功能強大，但它們受到空間之限制，因此無法隨地面部隊進入城鎮或狹窄的區域。因此，常需要同時安裝兩個系統(車裝與背負式)操作。²⁵



圖 10 整合式電戰系統圖

資料來源：高端裝備產業研究中心，〈美軍電磁機動戰裝備概述〉《每日頭條》，2019/9/5，< <https://kknews.cc/zh-tw/military/qlxon5r.html>>；本研究整理製圖。

²³SYDNEY J. FREEDBERG JR., "Boeing & Lockheed Vie For Cyber/EW/SIGINT System, TLS" breakingdefense, August 17, 2020, < <https://breakingdefense.com/2020/08/boeing-lockheed-vie-for-revolutionary-ew-sigint-system-tls/>> (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

²⁴John R.Hoehn, "Ground Electronic Warfare: Background and Issues for Congress (R45919)", Congressional Research Service, September 17, 2019, < <https://crsreports.congress.gov/product/details?prodcode=R45919>> (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

²⁵同註 24



圖 11 洛克希德·馬丁 TLS 車輛原型設計



圖 12 波音 DRT TLS 車輛原型設計

資料來源：SYDNEY J.FREEDBERG JR, "Boeing & Lockheed Vie For Cyber/EW/SIGINT System, TLS" breakingdefense, August 17, 2020, <<https://breakingdefense.com/2020/08/boeing-lockheed-vie-for-revolutionary-ew-sigint-system-tls/>> (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)



圖 11 THOR III 便攜式反 IED 設備

資料來源：「THOR III」 C.T.S TECHNOLOGY CO, <<http://jammer.ctstechnologys.com/thor-iii>> (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)



圖 12 Duke Version 3 車載 CREW 系統

資料來源：SRC, <<https://www.srcinc.com/what-we-do/ew/crew-duke.html>> (檢索日期：2021 年 5 月 10 日)

美軍電磁機動戰未來發展趨勢

美國自二次世界大戰後即開始主導世界政治、經濟與軍事領域領先地位，尤其在冷戰期間，投入大量國家資源與蘇聯進行軍備競賽，更讓美軍創新作戰概念與跨世代先進裝備達到空前巔峰時刻。在近年歷次作戰中，美軍在與敵交戰前即運用大量主、被動電磁裝備優勢癱瘓敵方指管、通信、防空、雷達、情報等系統。尤其在波灣戰爭中美軍電磁戰相關裝備之優異性能得到充分印證，

當敵方遭受電磁攻擊後致無法獲得電磁頻譜相關優勢時，即無法遂行聯合作戰，使武器裝備瞬間喪失原有優勢，促使有電磁優勢方，美國輕鬆獲致戰爭勝利。因軍事武器裝備上的絕對優勢，也讓美國在世界霸權地位不可動搖。但在近年發生了一些變化，美方高層也因應大國威脅、新興科技、經濟發展等開始逐步調整。

一、因應國際對手威脅促使調整發展策略

自冷戰結束後，由於失去對手，加上 911 事件後，美國國防部專注於反恐行動，開始縮減其他方面軍事經費，尤其在電磁頻譜作戰方面的停滯造成俄羅斯、中共，甚至伊朗等國家電磁頻譜作戰能力都不斷向上提升，這些威脅開始挑戰美國在世界霸權的地位。

早在俄羅斯併吞烏克蘭的克里米亞半島，以及在敘利亞等地區嶄露俄製電子戰裝備之優異性能，尤其現代化軍隊大量依賴電磁頻譜，無論在電磁攻擊、電磁支援、電磁防護、資訊傳遞及網路作戰等，均依靠大量頻譜分配，透過有、無線網路來傳輸訊息使戰場透明化，進而運用各式電磁設備載台。如在戰場能掌握電磁頻譜控制權，基本就已立於不敗之地。在準軍事衝突如灰色地帶作戰時，優異的電磁頻譜能力將直接讓對手反應不及，甚至未形成大規模衝突就已結束戰事。2020 年是俄羅斯電戰裝備大放異采的一年，從 2 月的土耳其與敘利亞戰爭中電戰裝備與無人機系統相互干擾與攻擊，甚至看到俄羅斯製車載電戰系統，不僅能在 300 公里外干擾雷達，而且還可以控制無人機的頻段，顯見其電戰能力之強大；而在 2020 年 9 月高加索的納哥諾卡拉巴克（Nagorny Karabakh）衝突中，我們看見亞塞拜然的空中無人載具徹底躲避並摧毀了亞美尼亞嚴密的地面防空系統，隨後對其地面部隊無論坦克、火炮和車輛進行了攻擊，最後亞美尼亞只能無奈接受停火協議。²⁶亞塞拜然其無人空中力量獲得輝煌成就的關鍵就在於電子戰，它成功地干擾了亞美尼亞的雷達與情資傳遞網絡，為摧毀其防空飛彈部隊創造了有利條件，進而獲致戰爭勝利。

近年中共使用大量俄製裝備，並利用逆向工程複製研改，並於歷次軍演將電子對抗作戰納入重點演練項目，顯見中共相當重視電子作戰能力，使其在作戰中獲得電子優勢，料敵機先，主宰戰場。因此其電磁作戰裝備也開始讓美軍備感威脅。未來美軍如何有效應對俄羅斯、中共帶來的威脅，對抗灰色地帶衝突行動，除彈性運用電磁機動戰作戰方式，管控輻射排放量，並持續混用有無人系統掛載電磁裝備運用低功率雷射誘騙、干擾敵偵測裝備，減少敵人主、被

²⁶軍隊軍工，〈納卡啟示錄：無人機與電子戰改變戰爭〉《安全內參》，2021/1/9，< <https://www.secrss.com/articles/28594> >（檢索日期：2021 年 5 月 10 日）

動裝備偵測的靈敏度，在敵尚未反應，即完成攻擊或反制敵方偵查、指管、防空、雷達、情報等頻譜系統。獲得在電磁頻譜中的絕對優勢，使美軍能在所有任務領域內自由行動。

二、電磁頻譜與人工智慧整合

過往傳統電磁作戰在執行雷情或無線電訊號分析時，須由國防專業人士耗費大量時間比對，始可將訊號轉為有用情報，相當不符時效。因此美國國防部聯合人工智能中心近年致力於規劃推動人工智能、機器學習模式與未來作戰整合，透過定期對模組化平台進行升級，擴充數據、調整編碼和其他功能，使系統具備「自主運行能力」為終極目標，以跟上強大競爭對手的步伐。同時經由學術研究機構研究和商業合作獲得人工智慧、機器學習等技術，將理論應用到軍事電磁作戰領域，經由整合使雷達威脅分析的時間縮短至分秒，人工智慧的應用減少了運算識別時間並提升電磁戰的效能。美海軍電戰專家曾說：「未來電磁機動戰和電磁頻譜的指揮控制的關鍵，主要取決於對數據的截獲和破譯，將其轉換為有利我軍行動的訊息」。²⁷因此可知要獲得電磁頻譜軍事優勢，首先要建立大量傳感器與訊號源的資料庫，將大量資訊透過大數據分析，運用人工智慧中的深度學習和神經網絡等方法來解析非結構化數據。將人工智慧技術應用於電磁機動戰，提高目標探尋能力和快速識別。

美海軍水面電磁戰改進項目（**SEWIP**）就是電磁機動戰與 **AI** 人工智慧整合最好的例子。**SEWIP** 藉由軟硬體模組化架構實現快速、有效的升級，提升系統能力，再利用寬頻陣列拓展頻率覆蓋範圍，從而應對嶄新威脅、滿足未來作戰需求。²⁸

人工智慧與機器學習能力可將無人操作裝備戰力不段向上提升，尤其在其模組化的研改與升級，未來可望實現無人化軍隊。美海軍已規劃在 **2021** 年至 **2025** 年為無人機、無人水面艦艇和無人水下系統提供 **120** 億美元以上預算，並且持續加強與人工智慧和先進材料科學技術方面的公司之間的合作，這對於未來無人系統的構建相當關鍵。²⁹隨著 **AI** 技術的進步，無人載台扮演著越來越重要的角色，機載電磁戰系統功能也在不斷擴大，各種規模的無人系統都可擴充為新的電磁作戰平台，當無人載台日益強大時，電磁機動戰能力也同步向上提升，

²⁷海空視界，〈從二戰到今天，美軍電子戰實力從未停止增長，都經歷了哪些進化？〉《KKNEWS-每日頭條》，2019/02/01，〈<https://kknews.cc/military/69kbo83.html>〉（檢索日期：2021年5月10日）

²⁸同註 27。

²⁹Peter Suci, "How Drones Could Help the Navy Reach its Fleet Size Goals" The National Interest, January 24, 2021, 〈<https://nationalinterest.org/blog/reboot/how-drones-could-help-navy-reach-its-fleet-size-goals-176937>〉（檢索日期：2021年5月10日）

同時也需要 5G 系統提供更強大的通訊傳輸能力。

三、5G 頻譜釋出與網路共享

由於美國無線領導地位對美國經濟繁榮的重要性，5G 技術是頻譜政策、技術創新和國家安全的關鍵樞紐。五角大廈意識到傳統靜態頻率分配模型還不夠，需要一種新的模型來解決訪問日益擁擠和受限制的電磁頻譜的需求不斷增長。

2019 年 12 月美國國防部發布特別通知，徵求業界對 5G 技術的投入開發，包括動態頻譜共享技術。國防部和各軍種也正在尋求機載雷達系統與 5G 系統之間頻譜共享的相關方案。目的是評估機載雷達系統及其 5G 網絡的影響，同時採用主動和被動技術以實現共享，並避免相互干擾。在 2020 年 9 月美國國防部再次發布了促進軍民頻譜共享方案，重點如何在共享頻譜中避免干擾。隨著新用戶，技術和服務進入到頻譜中，潛在的干擾可能會增加。³⁰因此，當動態和雙向的實施定向共享時，如何透過通信網路協議減輕使用端雙方電磁干擾，並解決國防部與企業的網路實體安全風險，為現階段美國國防部努力之重點。未來國際頻譜政策和法規也必然配合 5G 技術發展檢討新的網路協定規範，以解決有限頻譜內，日益增加之用戶需求。

結語

一、研究成果

由探討美軍電磁機動戰未來發展趨勢可以發現，美國正努力將新興科技與軍工產業予以結合，運用人工智慧與機器學習能力實現無人化軍隊，並釋出部分 5G 頻段以拉攏民間商業夥伴出資共同開發 5G 市場，藉資源整合謀求雙贏，並樽節軍事投資預算經費。未來也將持續透過海內外軍事演習驗證與聯合作戰準則修訂，確保各類軍事規範與現況相結合，肆應未來電磁機動戰作戰需求。

另外也發現由於美陸軍部隊已體認目前電磁作戰能力之不足，近年已開始規劃建置旅級電戰攻擊系統，透過地面層次系統 TLS 車載與無人飛行載具搭載電戰裝備進行地空電磁作戰整合，來強化地面部隊電磁作戰能力，滿足未來更遠距且更強大之電磁機動戰作戰需求，以肆應隨時可能與中共、俄羅斯等發生之灰色地帶衝突。

二、對國軍資電作戰建議

我國自民 107 年 7 月整合三軍資電部隊人才成立資通電軍指揮部，平時負責統合三大領域（網路安全、電子作戰及資訊通信平台等），執行國軍網路系統安全維護、電磁頻譜偵搜及指管系統建置維護，確保各項指管通資情監偵管道暢通；戰時依令執行國軍資通安全防護任務為主。成立迄今在國防部參謀本部

³⁰同註 3

通信電子資訊次長室的戰略指導下，藉由中科院和民間產學的技術支援，逐步整合資訊戰及電子戰作戰能量。目前已具備相當電子戰支援能量，並可實施有限度之電子攻擊。

近年中共軍機繞臺時常伴隨運 8 或運 9 電子偵察機隨行，藉繞臺行動蒐整各機場電磁頻譜及飛機與戰管通聯運作之電子參數，甚至對雷達進行電磁干擾演練。此舉即代表中共軍方也相當重視電子作戰。筆者研判美軍電磁機動戰之作戰未來必遭對岸中共所學習模仿，故建議國軍可朝以下作為發展資電作戰，以為因應。

（一）軍民產業資源整合：國軍為確保國家安全，藉由可恃戰力，建構國家防衛及嚇阻之力量，除配合政府「國家科學技術發展計畫」結合軍事戰略等目標積極推動國防科技發展研究策略，整合中科院等國防科技發展單位，逐步提升科研能量，再藉由科技部、教育部、經濟部等部會協調，整合產、官、學、研能量合作，驅使國防科研發展，達成階段目標。近年人工智慧與機器學習已被世界主要國家視為重要國家戰略，並投入大量資源與預算加強發展，以提升軍事技術革新。建議國軍應藉軍民產業資源整合，研發陸地、空中或海上人工智慧武器，例如運用電磁砲或電磁脈衝波等；舉例在電磁脈衝衝擊下，國家的指管通情偵監電腦有可能全面毀壞，軍方與民間資訊系統癱瘓，整體戰力與運作機制將立即破壞。

（二）導入 5G 進入國軍：隨著科技的發展，戰爭型態亦不斷調整，數位化、資訊化、無人化一直以來是軍隊現代化的代名詞，尤其是無人化接戰系統可精簡人力成本，減少第一線人員傷亡。以民間自動化無人搬運車（Automated Guided Vehicle, AGV）來舉例，其以往大多使用 4G 網路或 Wi-Fi 方式連線驅動，但連線品質亦受其他設備干擾，同時也有資訊安全風險，在基地台切換時常造成斷線等問題，但自從引進 5G 技術後就完全不同。5G 資訊平均傳輸速度達 1Gbps，最高甚至可達 10Gbps，且具有多連結、低功耗和低延遲之特性，適合發展各型態無線通訊應用，並直接解決 AI 人工智慧與機器學習所需大量資料彙整處理分析之問題。因此如國軍結合民間電信業者，引進 5G 技術，導入現有國防軍事運用，利用 5G 快速反應與即時數據傳輸特性，應用於實現如戰場透明化、即時作戰影像、數位遠端操控、智慧目標識別及各項作戰相關數據分析等能力，達成戰場數位化之軍事優勢，提供作戰指揮官各項資訊，俾利其作戰指揮及決心下達，未來結合後續中科院各項無人化裝備研發使用。平時精進災害防救能量，戰時強化國土防衛能力，展現國軍創新不對稱之優質資電戰力。

雖現階段 5G 建設未達完備，仍需建設部分新的無線網路通訊架構，但至少

現階段規畫方向，可擁有更多遠景。為了避免後續 5G 網路工程受到阻礙，是否可由政府監督民間及軍方單位共同義務提供相關設施，如光纖、電線桿、通訊機房等，以架設 5G 網路；如此一來，電信業者共享既有管線與電線桿、纜線等電信基礎設施外，未來合作共建，以有效利用資源減少重複投資；後續加強技術與多國合作研發，在基於標準規格下，明確發展方向，因應未來多元化，應思索自主技術開發，深化我國與國際連結。

（三）落實頻譜資源管理：國軍部隊在數位化趨勢下逐漸轉型，三軍各型新式武器裝備也陸續籌建，未來在有限頻譜資源運用下，必然也會遇到與美軍頻譜不足之相同問題，尤其臺灣本島各類型無線電台遍佈，頻譜波段頻率經常相互干擾，影響通信語音品質與數據傳輸時效。顯見我國平時在軍民頻譜管理並未落實區隔與管控，戰時頻譜管控將更顯困難。而我國向來以經濟發展為導向，國家通訊傳播委員會（National Communications Commission, NCC）在「頻率資源分配」大多以商業利益考量，國軍無法獲得更多的頻率資源，甚至未來在 5G 通信技術發展下，恐將更加壓縮軍用頻段，影響戰時作戰指管甚鉅。建議可於平時訓練時彙整作戰地區民用通信頻率參數資料庫，分析各頻率波段在該地區是否有被干擾情事發生，以建立戰時可用頻率，確保指管通連暢通。戰時配合全民防衛動員機制，整合民間資源，滿足作戰需求。

參考資料

一、宋吉峰，〈無聲無息的戰爭：電磁頻譜作戰的未來發展〉《海軍學術雙月刊》（臺北），海軍教準部，2017 年 2 月。

二、美國國會文件

1. John R. Hoehn, May 14, 2019, "U.S. Airborne Electronic Attack Programs: Background and Issues for Congress (R44572)", Congressional Research Service
2. John R. Hoehn, September 17, 2019, "Ground Electronic Warfare: Background and Issues for Congress (R45919)", Congressional Research Service,
3. John R. Hoehn/Jill C. Gallagher/Kelley M. Sayler, October 8, 2020, "Overview of Department of Defense Use of the Electromagnetic Spectrum (R46564)", Congressional Research Service

三、美國智庫文件

1. Bryan Clark, Mark Gunzinger, December 1, 2015, "Winning The Airwaves—Regaining America's Dominance In The Electromagnetic Spectrum", Center For Strategic And Budgetary Assessments (CSBA).
2. Bryan Clark, Mark Gunzinger, Jesse Sloman, October 5, 2017, "Winning in the Gray Zone—Using Electromagnetic Warfare to Regain Escalation Dominance", Center For Strategic And Budgetary Assessments (CSB

A) .

四、網際網路

1. Bryan Clark, Mark Gunzinger, December 4, 2015, "Winning the Airwave s: Sustaining America's Advantage in the Electromagnetic Spectrum" , The National Interest,
2. Brett Daniel, Sep 18, 2020, "U.S. Navy Submarine Technology Explained" , Trenton Systems,
3. Dney J. Freedberg JR., 2014/10/10 "Navy Forges New EW Strategy: Electromagnetic Maneuver Warfare", breakingdefense,
4. John Keller, May 1st, 2020, "Navy wants more AN/BLQ - 10 submarine electronic warfare (EW) systems to detect hostile radar signals at sea" , Military&Aerospace Electronics,
5. J.R. Wilson, Feb 28th, 2020, "Enabling technologies for airborne electronic warfare" , Military&Aerospace Electronics,
6. Kris Osborn, August 12, 2020, "Surface Electronic Warfare is the Navy's Technology of the Future" , The National Interest,
7. Lt. Jonathon Parry, Aug 27, 2020, "VX - 23 advances electronic warfare with AN/ALQ - 249 NGJ Mid - Band" , TESTER,
8. Naval Sea Systems Command, 28 Apr, 2020, "Surface Electronic Warfare Improvement Program (SEWIP)" , United States Navy,
9. National Aeronautics and Space Administration (NASA) ,
10. Peter Suci, January 24, 2021, "How Drones Could Help the Navy Reach its Fleet Size Goals" , The National Interest,
11. SYDNEY J. FREEDBERG JR., August 17, 2020, "Boeing & Lockheed Vie For Cyber/EW/SIGINT System, TLS" , breakingdefense, SRC
12. U.S. Government Accountability Office, May 2013, Spectrum Management: Federal Relocation Costs and Auction Revenues,

作者簡介

徐榮駿少校，陸軍官校專科 92 年班、砲校正規班 196 期，曾任排長、裁判官、作戰官，現任職於陸軍專科學校軍事教育組。

鄧宏年中校，陸軍官校專科 92 年班、砲校正規班 197 期，曾任排長、連長、營長、副處長，現任職於陸軍關渡地區指揮部。