

頻譜管理與電子戰

曾怡碩

網路安全與決策推演研究所

壹、前言

在全球通訊走向 5G/6G 將蜂巢無線通訊與衛星通訊融合的同時，¹除了對頻寬需求持續增高，各式數位傳輸與終端裝置出現彼此干擾的狀況，滋生對生命、經濟與國家安全的風險。美國 5G 與航機高度表頻率干擾疑慮、²以及 2023 年台灣桃園機場 GPS 訊號遭覆蓋的案例，³都凸顯出頻譜管理的重要性。

另一方面，新型態戰爭的趨勢朝向多領域聯合作戰，指管通資情監偵構成共同作戰圖像的過程，離不開電磁頻譜的運用，網路戰與電子戰更愈來愈被視為電磁頻譜作戰。⁴根據 2020 年 5 月 22 日美軍參謀長聯合出版 3-85 號 *Joint Electromagnetic Spectrum Operations*

¹ 有關蜂巢式布置，「行動通訊基地台電磁波則是較高頻的射頻電磁波，穿透性較差、容易因建築物的結構阻擋而變弱，因為需要雙向傳遞，因此行動通訊系統採取「蜂巢式」建置來維持通訊品質。每一個通話地區依容量及環境的不同，被劃分為一塊塊小區域，每一個區域中都有一個基地台，負責收發訊號，整體看來就像蜂巢般緊密地串聯」，參閱：https://memf.ncc.gov.tw/files/site_node_content_file/429/%E5%85%92%E7%AB%A5%E7%89%88-%E5%B0%8F.pdf。5G/6G 的應用頻段分別在 0.1~0.3 THz 與 0.1~10 THz 範圍內，此頻段稱為太赫茲 (Terahertz) 頻段，因太赫茲頻段在太空不存在吸收損耗的問題，具有傳輸速度快和傳輸距離遠的優勢，更能應用於衛星間通訊。參閱：張麗敏、蔡政禹、官祺恩、鄭志龍，〈5G 材料發展〉，《材料世界網》節錄自《工業材料雜誌》418 期，2021 年 10 月 5 日，<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=47389>。

² 〈美國示警 5G 訊號恐擾飛安，為什麼 NCC 表示台灣的頻譜不受影響？〉，《關鍵評論》，2022 年 1 月 20 日，<https://www.thenewslens.com/article/161785>。

³ 〈桃園機場等空域遭 GPS 干擾 NCC：公務機關測試產生溢波所致〉，《自由時報》，2023 年 4 月 26 日，<https://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/4282607>。另參閱：〈漢光演習首度桃機操演 7 月 26 日擬禁航 1 小時〉，《中央社》，2023 年 6 月 27 日，<https://www.cna.com.tw/news/ahel/202306270182.aspx>。

⁴ 「電磁頻譜作戰是指使用電磁輻射能控制電磁作戰環境，保護己方人員、設施、設備或攻擊敵人，在電磁頻譜域有效完成任務的軍事行動。電磁頻譜作戰是基於電磁頻譜空間，實施電磁頻譜防禦和電磁頻譜攻擊，確保己方利用電磁頻譜的能力，同時阻止敵方有效利用電磁頻譜，實現戰場中『制電磁權』。電磁頻譜連接陸海空天各域協同作戰，電磁頻譜作戰與陸海空天等域作戰緊密結合，在平時即為典型無煙硝的對抗。」引用自：〈電磁頻譜是什麼？看美國國防部電磁戰鬥管理的十大願景就知道了！〉，《電子技術設計》，2020 年 7 月 2 日，<https://www.ednchina.com/news/5344.html>。

(Joint Publication 3-85，以下稱為 JP 3-85)，電子戰為電磁頻譜作戰的一環，而電磁頻譜作戰端賴有效的頻譜管理。⁵

有鑑於此，本篇著眼頻譜管理在電子戰中的重要性，依序介紹頻譜管理的重要性，分析頻譜管理的電子作戰軍事意義，最後檢視當代頻譜管理面臨之挑戰。

貳、頻譜管理

一、電磁頻譜特質

電磁波依頻率一般區分為無線電波、微波、紅外線、可見光、紫外線、X 射線和伽瑪射線等形式；而電磁頻譜就是電磁波按照頻率或波長分段排列所形成的結構譜系。作為無線通訊傳輸介質，電磁頻譜資源為人類共同擁有，國際共用、無疆無界，屬性上是自然資源，雖是大家共同使用的空間，但受限於技術，可使用空間有其侷限，一般以國際電信聯盟（International Telecommunication Union，ITU）規劃的可用電磁頻譜 10kHz-400GHz 為範圍。⁶

此外，在一定的時間、地域和頻域空間內，一旦特定頻率被使用，就不能在相同的技術模式下運用該頻率，造成頻譜資源在本質上即具稀缺性與排他性。再加上 5G、物聯網、智慧自駕汽車、無人機、通訊衛星等新技術、新服務，造成頻譜需求急遽增加，進一步擴大頻譜資源的稀缺性。3GHz 以下應用早已趨於飽和，5G 使用 Sub 6GHz（應用頻率為 6GHz 以下），讓 3GHz-10GHz 的頻譜競爭更趨激烈；隨著 5G 從毫米波頻段（30-300 GHz）擴展到太赫茲頻段（100 GHz-30 THz），⁷讓 10GHz-60GHz 的頻譜之運用技術日趨成

⁵ 黃彥銘，〈國軍「電磁頻譜戰」未來發展之缺析-以美軍為例〉，《陸軍通資半年刊》第 137 期，2022 年 4 月 1 日，頁 5。

⁶ 〈電磁頻譜知識鏈接〉，《人民網-軍事頻道》，2015 年 7 月 8 日，<http://military.people.com.cn/BIG5/n/2015/0708/c397387-27273025.html>。

⁷ 季平，〈你今天 5G 了嗎？2030 年後迎接 5G/6G 時代〉，《CTIMES：零組件雜誌》378 期，2023 年 4 月 24 日，<https://www.ctimes.com.tw/DispArt-tw.asp?O=HK74OA7EFF4ARASTDQ>。

熟，搶佔優先使用權的趨勢也隨之愈加明顯。

約 90%以上的頻段都由多種無線電業務共用，當多種用頻裝備密集部署時，在一定的空間域、時間域和頻率域上，多種電磁信號同時存在並密集變化交錯，形成複雜電磁環境，容易導致用頻設備產生自擾、彼此互擾，也容易受到干擾。循此，避免用頻裝備彼此間干擾，可以規畫好空間域、時間域和頻率域這三域之一，並藉此達到頻譜共用。⁸此外，面對有限頻寬，利用不同的調變與多工技術，可讓相同頻寬的電磁波具有更高的資料傳輸率，達到更高的頻譜效率（spectrum efficiency）。⁹

二、頻譜管理原則

雖然電波無疆界，但由於無線電頻率在使用上具有排他性，為避免不同國家使用無線電頻率時相互干擾，世界各國制定頻譜管理政策時，均循國際電信聯盟所劃分區域與分配、指配頻段，在和諧共用原則下，以行政與技術手段，並與時俱進彈性因應使用環境與新興科技，甚至運用次級市場，以維護使用秩序及增進使用效率。¹⁰

按照我國 2020 年當時主管頻譜管理機關「國家通訊傳播委員會」之說明，頻譜管理工作主要包括：¹¹「（一）頻率分配：頻率分配係指在特定條件下，將某一指定頻段，指配給一個或數個地面或太空無線電業務使用；（二）頻率指配：頻率指配係指在特定條件下，指定頻道給予某一電台的核准過程。（三）頻譜規劃：頻譜規劃是為了達成頻譜管理的目標，使頻率資源的運用能兼顧國家發展

⁸ 〈電磁頻譜知識鏈接〉，《人民網-軍事頻道》。

⁹ 曲建仲，〈5G 前瞻通訊原理與應用〉，《科學月刊》，2019 年 1 月 1 日，<https://www.scimonth.com.tw/archives/227>。

¹⁰ “Developments in Spectrum Management for Communication Services,” *OECD Digital Economy Papers*, No. 332, October 2022, pp. 30-47.

¹¹ 引用自：〈中華民國無線電頻率分配表〉，《國家通訊傳播委員會》，2020 年 2 月，<https://naer.siim.org.tw/%E4%B8%AD%E8%8F%AF%E6%B0%91%E5%9C%8B%E7%84%A1%E7%B7%9A%E9%9B%BB%E9%A0%BB%E7%8E%87%E5%88%86%E9%85%8D%E8%A1%A8.pdf>，頁 7。

與安全，滿足持續增加的頻率需求。（四）頻譜監測：頻譜監測係維護空中電波使用秩序所採行之措施。（五）頻率收費：藉『收費機制』反映有限資源之使用效率，貫徹『使用者付費』之理念，促使無線電頻率公平分配，頻率資源有效利用。」

國家管制層級以下，平時一般會區別軍用與民用頻段（如下圖示），戰時軍方可接管民用頻譜區段，軍民各單位之頻譜管理員則可以通過對於時間域、空間域與頻率域之區分，以規劃頻譜管理。例如：區分設備使用時段；裝置部署拉開間隔距離；制定用頻方案劃分、規劃、分配和指配頻率。¹²除了上述行政手段，頻譜管理在技術面須具備前瞻規劃思維，針對數位通訊傳播之新興科技載具、通訊手段、提升國安與數位韌性部署等技術，先行研析是否與現有裝置彼此之間頻率產生干擾，並預作規畫安排。例如：我國數位發展部在部署低軌與中軌通訊衛星之前，先行研析非同步衛星與 5G 行動通信使用頻段和諧共用與干擾排除機制。¹³

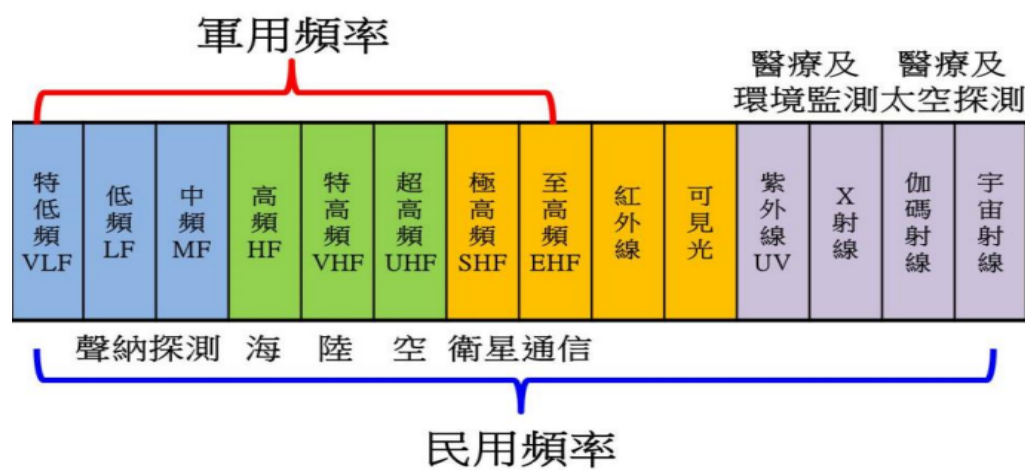


圖 1、頻率範圍示意圖

資料來源：黃彥銘，〈國軍「電磁頻譜戰」未來發展之缺析-以美軍為例〉，《陸軍通資半年刊》第 137 期，民國 111 年 4 月 1 日，頁 6。

¹² 〈電磁頻譜知識鏈接〉，《人民網-軍事頻道》。

¹³ 參閱：〈5G/B5G 數位通傳資源前瞻整備研究計畫〉，《數位發展部資源管理司》，2023 年 3 月 22 日，<https://www-api.moda.gov.tw/File/Get/moda/zh-tw/uktGes6T0fuwVSM>。

參、頻譜管理與電子戰

一、頻譜管理與電子戰之關聯

電磁作戰不論是電子攻擊、防護與支援，均需具暢通安全的指管通信系統，並確保其不會相互干擾，同時也避免受到敵方干擾的影響，而這都有賴於有效的頻譜管理，對有限的電磁頻譜資源的劃分、分配、指配和控制。¹⁴現代戰場上客觀既有及敵我各式電磁信號充斥於一定的作戰時間與空間，客觀上就使戰場呈現複雜電磁環境。若是敵方電磁干擾壓制而我方抗干擾差，或者是我方裝置電磁相容性差、電磁頻譜分配和管控不力而造成嚴重自相干擾，將讓戰場電磁環境愈形複雜。¹⁵

凡是電子戰強國均重視從源頭設計就建置電子和資訊化武器裝備的電磁相容性與抗干擾能力，從元件到武器載台均須具備防電磁脈衝輻射能力和電磁相容性。此外，美、俄等主要電子戰強國先後頒布了一系列頻譜管理法規，藉由不斷更新修正，建立權威電磁頻譜管理體系，更強化了對電磁頻譜的有效分配管控，讓電磁頻譜管理成為多領域先進戰鬥管理中電磁戰鬥管理的一環。¹⁶電磁戰鬥管理是多領域電磁頻譜作戰一環，其與電磁頻譜管理彼此不同但相關，電磁頻譜管理藉由調配戰場電磁頻譜資源，並協同電子戰、信號情報等部門，共同支援電磁戰鬥管理。¹⁷

二、頻譜管理與電子戰技術

相對於海、空與太空作戰領域，地面部隊面對電磁環境相對複

¹⁴ Appendix A Electromagnetic Spectrum Management of “Joint Electromagnetic Spectrum Operations,” *US Joint Chief of Staff*, May 22, 2022. 另可參閱：諍聞軍事，〈只有高效的電子頻譜管理，才能有電子對抗作戰的勝利〉，《每日頭條-軍事》，2017年4月16日，https://kknews.cc/military/4q4yvmv.html#google_vignette。

¹⁵ 〈電磁頻譜知識鏈接〉，《人民網-軍事頻道》。

¹⁶ 陳勇、張余、柳永祥，〈電磁頻譜戰發展剖析與思考〉，《指揮與控制學報》第4卷第4期，2018年12月，頁319-324。

¹⁷ 郭蘭圖，〈從電磁頻譜管理到電磁戰鬥管理：演進與展望〉，《CIE 智庫》，2022年12月10日，https://www.cie.org.cn/list_42/11110.html。

雜。有鑑於此，以下將引用 2023 年更新的美國陸軍技術刊物（Army Technical Publications，ATP）3-12.3 《電磁戰技術》（*ATP 3-12.3 Electromagnetic Warfare Techniques*）中的準則，具體呈現頻譜管理在電子戰中的角色。

（一）頻譜管理員與電子戰指揮官

1. 頻譜管理員：頻譜管理員對電磁頻譜資源進行管理，以保證己方電磁頻譜的使用。頻譜管理員的職責包括：「（1）領導、制定電子戰行動，並且通過評估電子攻擊對己方設備的影響，制定電子防護措施。（2）與上級和下級單位進行協調，以減輕電子攻擊對己方的影響。（3）與同級、下級和上級組織合作，確定電磁輻射單元，並將其列入聯合限用頻率清單。（4）將電子攻擊的效果與情報進行整合，增加情報資訊。（5）編寫電子戰相關文檔，對電磁干擾展開調查，為聯合頻譜干擾解決方案提供支援。（6）參與網路電磁作戰工作組，解決電磁頻譜需求中的矛盾，並為電子戰作戰行動的規劃和執行中提供建議和協助」。¹⁸
2. 電子戰指揮官：戰鬥進行中電磁頻譜資源的效果瞬息變化，電子戰指揮官須注意更新電磁波的變動，在執行電子戰時考量：「（1）敵軍的電子作戰命令；（2）信號作戰指令；（3）聯合限制頻率清單；（4）電磁干擾預測與回報」。¹⁹

（二）電子戰準備—避免電磁頻譜衝突

避免頻譜衝突是電磁頻譜管理的一部分，避免頻譜衝突就是協調戰爭和通信中頻譜使用與情報功能的系統化管理過程。要避免電

¹⁸ “ATP 3-12.3 Electromagnetic Warfare Techniques,” *Headquarters, Department of the Army*, January 30, 2023 (Updates of ATP 3-12.3 July 16, 2019), <https://irp.fas.org/doddir/army/atp3-12-3.pdf>.

¹⁹ Appendix A Electromagnetic Spectrum Management of “Joint Electromagnetic Spectrum Operations,” *US Joint Chief of Staff*; “ATP 3-12.3 Electromagnetic Warfare Techniques,” *Headquarters, Department of the Army*.

磁頻譜使用衝突，需要瞭解任務需求。電子戰指揮官要考慮：「裝備的作用距離、定位精度和對友軍頻率以及受限頻譜依賴程度，並交付建議信號操作條例和聯合限制頻率清單。信號操作條例包括呼叫符號、呼叫語音、頻率分配、符號，並將其分配給友軍。針對信號操作條例和聯合限制頻率清單的避免衝突措施，電子戰指揮官需要考慮以下事項：頻譜的用途；波形特性；定位和使用時間」。²⁰

（三）電子攻擊、支援與防護之電磁頻譜規畫

鑒於敵軍須利用電磁頻譜下達指令與進行情監偵暨導航，我方可趁機藉由輻射源威脅定位進行態勢感知以及目標瞄準：電子支援可以借助測向定位威脅輻射源，一旦定位，指揮官便可以對目標實施致命火力打擊，也可以請求電子攻擊以達到預期效果。至於「電子防護，網路電子戰指揮官和通信部門需要考慮以下內容：電磁加固、電磁隱蔽、輻射控制、電磁頻譜管理、戰時預備模式、電磁相容。其中，電磁頻譜管理通過操作、工程和管理程式來計畫、協調和管理電磁頻譜的使用。電磁頻譜管理會影響部隊進行電子防護的能力。頻譜管理員準備並維護一個友軍頻率清單，並與情報部門聯繫交換取得威脅頻率清單。瞭解電磁頻譜資源的目的及其特性後，頻譜管理者可以在準備操作或執行電子防護任務時，協助網路電子戰指揮官瞭解操作區域中友軍發射機的類型和數量，以避免操作時產生電磁干擾」。²¹

肆、結語：頻譜管理面臨的挑戰與機會

未來的戰場電磁環境愈形複雜多變，頻譜管理的難度、所要求的即時決策支援愈發形成挑戰。首先是因應多領域聯合作戰，要求作戰頻譜規劃能同時應用於作戰、通信、情報、電子對抗等，及時

²⁰ “ATP 3-12.3 Electromagnetic Warfare Techniques,” *Headquarters, Department of the Army*.

²¹ Appendix A Electromagnetic Spectrum Management of “Joint Electromagnetic Spectrum Operations,” *US Joint Chief of Staff*; “ATP 3-12.3 Electromagnetic Warfare Techniques,” *Headquarters, Department of the Army*.

主動地發現與調整潛在頻率衝突和干擾。其次，未來頻譜規劃系統將朝向動態作戰頻譜規劃，貫穿聯合作戰全程，強調頻譜輔助作戰決策，藉頻譜分析提供戰場頻譜決策支援資訊。²²雖然迄今尚無任何國家足以將電磁頻譜單獨列為作戰領域以遂行電磁頻譜作戰，未來可望藉由運用雲端運算與人工智慧於認知頻譜管理、²³戰場頻譜決策支援，藉由人工智慧或機器學習輔助之監測頻譜、動態感知與品質量算，即時掌握通訊連結是否遭削弱，²⁴並適時發展部署補強體系，讓電磁戰鬥管理規劃系統功能更為強大。²⁵

本文作者曾怡碩為美國喬治·華盛頓大學政治學系博士，現為財團法人國防安全研究院網路安全與決策推演研究所副研究員。主要研究領域為：軍隊與網路安全、網電作戰、認知作戰、中國數位監控。

²² 郭蘭圖，〈從電磁頻譜管理到電磁戰鬥管理：演進與展望〉。

²³ Marcin Frąckiewicz, “The Future of Spectrum Management: Cognitive Radio Networks,” *TS2Space*, July 15, 2023, <https://ts2.space/en/the-future-of-spectrum-management-cognitive-radio-networks/>.

²⁴ Tim Fountain, “Space EW: a Practical Approach,” *Rohde & Schwartz Webinar*, July 14, 2023.

²⁵ “Air Force Doctrine Publication (AFDP) 3-51 Electromagnetic Warfare and Electromagnetic Spectrum Operations,” *Curtis E. Lemay Center for Doctrine Development and Education*, July 30, 2019, https://www.doctrine.af.mil/Portals/61/documents/AFDP_3-51/3-51-AFDP-EW-EMSO.pdf.

Spectrum Management and Electronic Operations

Yisuo Tzeng

Division of Cybersecurity and Decision-making Simulation

Abstract

Electronic operations, whether electronic attack, protection or support, require secure and clear command, control and communication systems that depend on effective spectrum management to prevent mutual interference as well as adversarial jamming. Spectrum managers manage electromagnetic spectrum resources to ensure their availability.

On the battlefield, commanders of electronic operations must focus on the dynamics of changing electromagnetic waves and electromagnetic spectrum resources, taking into account adversarial electronic combat order, signal operations directives, joint list of limiting frequency, as well as prediction and reporting of electromagnetic interference. Adversarial radiation sources can be located through such electronic support measures as situational awareness and target acquisition; once located, commanders issue lethal strike orders through electronic attack and kinetic means. In terms of electronic protection, electro-cyber combat commanders and communications units must take into account electromagnetic hardening, electronic masking, radiation control, electromagnetic spectrum management, combat-ready module, as well as electromagnetic compatibility.

To prepare for multi-domain joint operations in the future, complex and real-time decision-making support requiring spectrum management represents a growing challenge. With the support and application of cloud computing and artificial intelligence in cognitive spectrum management,

spectrum planning apparatus can move towards significantly more powerful dynamic battle spectrum management.

Keywords: Spectrum Management, Electronic Operations, Battle Spectrum Management