

淺析匿蹤戰機及無人飛行載具對空軍雷達威脅暨防護作為之研究

陸軍少校 趙珀震 陸軍中校 李建鵬

提 要

- 一、國軍依「防衛固守，重層嚇阻」軍事戰略指導，亟仰賴空軍雷達做為第一線耳目，以掌握敵空情動態，進而即時應處有效嚇阻，確保我國土安全，故預警雷達之重要性不言可喻。
- 二、以近代戰爭為例，可知匿蹤戰機與無人飛行載具具備低傷亡、代價小、效率高等優勢，且其低雷達截面積更使雷達難以有效掌握，故對我防空預警雷達威脅甚大。
- 三、因應上述威脅，建議國軍可發展雙基雷達及無源雷達，組成綿密的雷達防禦網，並強化雷達系統偵蒐效能及快速機動化等被動式防禦手段，強化預警雷達之應對手段，提升戰場存活率。

關鍵詞：預警雷達、匿蹤戰機、無人飛行載具、戰場存活率

前 言

從1972年越南戰爭，美軍大量使用火蜂無人機執行軍事偵察，有效降低人員損傷及高效率戰場偵察，而於1989年巴拿馬行動，美軍F-117A夜鷹戰鬥攻擊機成功避開防空雷達偵蒐，對其重要軍事設施執行有效打擊任務，自此各國開始重視「匿蹤技術」及「無人飛行載具」這兩項技術，直至1982年的貝卡山谷之役及1991年波斯灣戰爭後，更加顯示了匿蹤戰機及無人飛行載具對雷達站及重要軍事設施的致命性，自此各國便開始大量投入匿蹤技術及無人飛行載具之研究。

我國空軍預警雷達區分為固定雷達與機動雷達兩種型式，搜索距離均可達400公里以上，其任務以空防監偵為主，可精準掌握空中動態目標。然而，我國預警雷達設定偵蒐標的仍以傳統戰機之雷達截面積(Radar Cross Section, RCS)為主，難以有效偵獲敵方匿蹤戰機及無人飛行載具之回跡，如調整雷達偵蒐RCS門檻值，除對雷達辨別系統造成辨識負擔，且近距離搜索干擾變大，將影響雷達整體偵測效能。因此，我戰管未來應思考匿蹤戰機及無人飛行載具之實質威脅，設法強化防護及應處能力，以提高雷達存活率。¹本文藉由文獻蒐整探討匿蹤戰機及無人飛行

¹ 劉昱呈，〈建置無源雷達對提升地面部隊防空預警能力之研究〉，《陸軍學術雙月刊》，第57卷，第578期，2021年8月，頁10-11。

載具軍事應用趨勢，進而分析雷達偵蒐暨防護作為。並探討雷達弱點分析與應處作為，後續提出策略與建議，以供爾後建軍發展及科技研發之參考。

匿蹤戰機及無人飛行載具探討

隨著戰爭型態改變，各型武器裝備不斷提升，期許以「代價小、傷殺力大、作戰效率高、速戰速決」達成作戰目的，而匿蹤戰機及無人飛行載具符合前述作戰訴求，儼然成為戰場主軸。本章以探討匿蹤戰機及無人飛行載具之發展歷程，了解各國現今在軍事上運用情況及成果，以利後續我策進研討。

一、匿蹤戰機

(一)匿蹤技術理論與運用

匿蹤技術又可稱為「低可偵測性技術」，²是經過特殊外觀設計、表面特殊材質或高科技裝置來降低被雷達電磁波偵測到的機率或無法測到高度及距離的科技，最終讓對方難以偵獲、辨別、掌握及打擊，以提高自己戰略及戰術目標之成功率及存活率。簡單來說，就是穿上「隱形斗篷」遮蓋或欺騙「空防之眼」，以針對雷達偵蒐系統而設計的反制方法。³然而，美國F-117夜鷹匿蹤戰機出現後，「匿蹤」已成為先進軍事科技的代名詞，

世界大國便已開始研發新一代戰機，縱然無法掌握全般匿蹤技術，外型上均以模仿匿蹤外觀而設計，其原理就是讓雷達電磁波無法或少量反射，降低RCS而使雷達系統難以辨別目標物的存在。⁴

除了上述以外觀設計達到匿蹤效果外，運用表面雷達吸波材料技術也是一種降低RCS之方式，當電磁波輻射到目標表面塗料時，一般會產生反射、吸收及透射等現象，為了強化電磁波吸收效率，表面塗料須具備兩種特性：一種為電磁波可射入塗層內，使其在內部造成能量衰減不易反射，而非在外層就被反射；另一種則為塗層內部塗料可快速吸收電磁波，使其轉化成熱能並消散掉。除此之外，塗料之密度、形狀、化學穩定性、抗高溫、耐低溫等特性均需嚴格把關，俾滿足戰機在空中高速移動，又能達到匿蹤效果。⁵戰機高速飛行時容易產生熱輻射，尤其以發動機為紅外線主要來源，加上引擎排放煙霧及高溫氣體在高空所凝結氣體容易遭受偵測及肉眼發現，所以匿蹤戰機具有獨特引擎設計及燃料添加物，結合前述設計方可達到真正匿蹤飛行。

(二)匿蹤戰機軍事發展

美國於1970年開始發展匿蹤戰機，至1983年美國洛克希德馬丁公司成功研發

2 楊豫台，2017。《我國發展匿蹤戰機之可行性研究》。新北市：淡大碩士論文，頁14。

3 〈匿蹤戰機隱形斗篷的原理〉，《青年日報》，2021年9月23日，〈<https://ssur.cc/iFuhe2b>〉(檢索日期：2023年10月19日)。

4 同註2，頁15。

5 徐劍盛、周萬城、羅發、朱冬梅、蘇進步、蔣少捷，〈雷達波匿蹤技術及雷達吸波材料研究進展〉，《中文科技期刊數據庫》，第九期，頁1-2。

出第一代匿蹤戰機(F-117夜鷹)，並投入戰爭中取得豐碩成果，後續研發B-2幽靈戰略轟炸機、F-22猛禽戰鬥機及F-35閃電戰鬥機等多型匿蹤戰機，成為世界上空軍武力最強國家。⁶反觀俄羅斯隨著1991年前蘇聯解體，空軍戰機發展呈現遲滯期，直至2010年俄羅斯第五代蘇愷-57匿蹤戰機首飛成功，迄今仍未實質運用在戰爭中。⁷

而中共戰機可追溯到1951年4月設立了航空工業局及同年7月與前蘇聯簽訂援助中國建設航空工業的協議，開始了第一代戰機自製發展，其中歷經數代戰機研製，於1997年第五代殲-20匿蹤戰機與美國第五代戰鬥機F22猛禽同年首飛成功，繼美國及俄羅斯後，成為全球第3個擁有自主研製匿蹤戰機能力之國家。⁸

(三)匿蹤戰機投入戰場實務

美國是世界上第一個研發出匿蹤戰機的國家也是將匿蹤戰機投入實戰經驗豐富的國家，在1991年第一次與第二次波斯灣戰爭給予世界各國震撼教育，更了解何謂現代化戰爭，空中戰力奠定戰局結果，各國與美國聯軍的空中作戰所攝取經驗中，體會到高科技技術、掌握制空權的重

要性，以下舉例美國與以色列使用匿蹤戰機所威攝、掌握制空權等戰爭案例。

1.1988年巴拿馬行動是匿蹤戰機第一次投入作戰任務，但F-117夜鷹匿蹤戰機該次主要任務是嚇唬諾瑞加精銳部隊，而非執行轟炸作業，故當時匿蹤戰機未被大眾討論。⁹

2.1991年波斯灣戰爭，美國多次使用F-117夜鷹匿蹤戰機造成伊拉克空防瞬間瓦解及1999年科索沃戰爭期間使用B-2匿蹤轟炸機執行精準打擊任務，快速摧毀敵重要設施，以掌握絕對空優及制空權，自此世界各國積極研發新一代匿蹤戰機，且外觀均參考匿蹤形狀設計，而軍艦也不例外。¹⁰

3.2011年敘利亞內戰，以色列空襲行動是匿蹤戰機與反匿蹤雷達首次對決，敘利亞在大馬士革機場部署大陸製JY-27預警雷達，並宣稱該系統可以捕捉匿蹤戰機位置，故以色列派出F-35匿蹤戰機與之對決，結局就是把敘利亞防空系統打得七零八落，由此可知，在戰場上，如果無法有效追蹤或掌握匿蹤戰機所在位置並給予威攝與擊落，那只有接受挨打的分。¹¹

4.2014年美國F-22匿蹤戰機首次實戰

6 同註2，頁15-17。

7 《中文百科》，〈<https://ssur.cc/t2WHfVE/蘇-57戰鬥機>〉(檢索日期：2023年12月8日)。

8 《今日頭條》，2019年9月29日，〈<https://twgreatdaily.com/9S4dfG0BJleJMoPMhcsa.html>〉(檢索日期：2023年10月25日)。

9 〈初代匿蹤戰機F-117再現51區〉，《中時新聞網》，2017年11月27日，〈<https://ssur.cc/YCzfQh3>〉(檢索日期：2023年10月25日)。

10 高從俠，2007。《科索沃戰後中共軍事現代化發展之研析》。淡大碩士論文，頁31-33。

11 〈以色列在敘利亞空襲期間摧毀JY27雷達〉，《中時新聞網》，2019年2月21日，〈<https://ssur.cc/aSKNE75>〉(檢索日期：2023年11月16日)。



對決敘利亞預警雷達，其任務是對敘利亞境內伊斯蘭國執行空中打擊，且當時敘利亞具有完整的防空裝備(如中國大陸製JY-27型預警雷達、JYL-1機動式3D預警雷達及雙坐標120型2D低空目標搜索雷達等)，¹²尤其在2013年之後，敘利亞引進俄羅斯先進的防空系統，故美軍派出F-22匿蹤戰機成功穿破敘利亞防空系統完成任務，同年9月至隔年7月總共執行204次任務，總計270餘枚飛彈，無任何損傷。¹³

(四)小結

結合上述內容分析，可知在傳統戰爭中，戰機的數量及配備的武器系統是決定戰場勝負的關鍵因素，然而隨著匿蹤戰機的出現和軍事應用，戰爭的面貌發生了顯著變化，匿蹤戰機不僅能深入敵方領土進行精準打擊，有效地威脅敵人，還能迅速獲得空中優勢和制空權，同時顯著降低人員的傷亡率，從而成為戰場上的決定性因素。除此之外，匿蹤技術降低了雷達可偵測到戰機的雷達截面積(RCS)，故對於雷達系統來說，大幅降低了偵測到匿蹤戰機的可能性，增強了戰機的生存能力和打擊效率，反而對防守方的防空雷達系統構成了嚴重威脅。因此低可偵測技術的發展和應用，不僅提升了匿蹤戰機的戰場效

能，也進一步改變了現代戰爭的戰略布局及戰術運用，為當代軍事科技創新不可或缺的一環。

二、無人飛行載具

(一)無人機起源構想

世界上第一架無人機於1918年第一次世界大戰中研發成功，¹⁴而到第二次世界大戰中期，無人機當作以空中射擊目標及假目標使用，以非攻擊任務性任務為主。除此之外，因無人機具備操作容易、飛行穩定性高、人力需求低、攜帶方便、任務用途廣、戰場運用彈性高、隱蔽性高、成本低廉及運用限制少等特性，20世紀後，各國相繼投入大量經費研發，促使相關技術取得突破性發展，逐漸成為現代戰爭中主要攻擊武器之一，因雷達截面積小，亦是預警雷達主要威脅之一。¹⁵

(二)無人機軍事運用演進

美軍在越戰期間，以雷恩147無人機執行高達3,400多次情監偵任務，是無人機軍事偵察用途始祖。正因如此，各國開始投入研發，在第二次世界大戰之後無人機發展出數種運用路線：第一種是將退役戰機執行改裝或是當目標機；第二種則是設計成擔任特殊任務偵察及試驗任務用之小型無人飛機；第三種以小型飛行載具取

12 〈中俄雷達在敘合作 遏美亞太部署〉，《中時新聞網》，2017年9月21日，〈<https://ssur.cc/xXjLJTA>〉(檢索日期：2024年5月7日)。

13 〈F-22實戰首秀為何是敘利亞?〉，《人民網》，2014年9月24日，〈<https://ssur.cc/52t4gzq>〉(檢索日期：2023年11月16日)。

14 韓東漳，2023，《無人飛行載具技術發展與軍事應用》，國防大學理工學院機航系碩士論文，頁4。

15 侯蓮塘，〈提升國軍無人機偵蒐與反制能力之研究〉，《海軍學術雙月刊》，2023年8月，頁11-12。

代戰機遂行偵打任務。¹⁶自此無人機科技快速進步，在擔任偵察的任務上開始展露其靈活性與重要性，各國也參考美軍在越戰期間，大量使用的無人機對高價值或者是防禦嚴密的目標進行偵察工作，不僅有效減少人員的傷亡，更是降低被俘虜的風險，尤其中共更藉此經驗大量研發，成為世界上最多軍事用無人機國家。¹⁷

1964年11月15日是世界上首次發生戰機與無人機之間空中交火，當時美軍使用火蜂無人機高空飛入中國大陸雷州半島附近，遭中共使用殲6戰機擊落，在此之後5年間，陸陸續續將近17架美國無人機在中國大陸執行偵察任務中被擊落。¹⁸

1983年以色列是世界上首次以無人機擔任偵察以外的其他角色去執行重要任務，黎巴嫩戰爭時期，以色列的偵察者無人機具有偵察、情報收集、跟蹤和通訊等多功能用途，¹⁹隨後更發展出著名的哈比無人飛行載具(反輻射無人機)，自此世界各國朝偵打一體無人機發展，其功能多樣化，也可依據任務需求選擇對空、對地攻擊型導彈或電戰莢艙。²⁰

在1991年波斯灣戰爭中，美國大量使用無人機執行作戰任務，也特地設計小型無人機作為誘餌來欺騙敵方雷達系統，間接削弱對方防空戰力，而在2001年911事件後，無人機戰略構想出現轉折，全力聚焦強化反恐行動的情監偵及打擊能力，故而在伊拉克戰爭期間，美國無人機此時已具備情資蒐集、戰場評估、目標辨別及精準打擊等高科技功能，未來為大國競爭作戰需要，無人機發展方向亦將隨之改變。²¹

(三)無人機現代戰場運用成果

1.1982年貝卡山谷戰役是無人機壓制防空雷達經典戰役，以色列先後出動各型無人機，執行戰場偵察、欺敵與誘導、電子干擾及戰場評估等，最終成功誘使敘利亞雷達開機，並精準摧毀多處雷達陣地，以極少傷亡代價贏得此次戰役，致使各國針對無人機戰場運用及防範更加重視。²²

2.2019年沙烏地阿拉伯油田攻擊事件，是著名無人機混和戰術運用攻擊成功案例，該戰爭屬於沙烏地拉伯國家介入葉門內戰而遭「胡塞運動」組織反制，該組

16 同註15，頁13。

17 張姝璇，〈中共無人飛行載具發展對我防衛作戰威脅之研究〉，《陸軍學術雙月刊》，第55卷，第568期，2019年12月，頁2。

18 同註17，頁2-3。

19 陳作舟，2009，《小型自主飛行無人飛行載具設計》，中華科大碩士論文，頁2。

20 翁翠蓮，〈中共無人飛行載具對我防空作戰影響之研究〉，《國防大學軍事專題研究》，2020年7月，頁26。

21 同註20，頁9-10。

22 〈無人機作戰成名曲：貝卡谷地之戰無人機的運用〉，《資訊咖》，〈<https://ssur.cc/bZue64Q>〉(檢索日期：2023年12月18日)。

織從葉門以無人機攻擊沙國二處設施，總計17處命中，造成重大損失，此次行動更配合信號干擾方式，以成功靠近目標而不被偵測，顯示出沙國防空預警、部署位置、低空目標及重要目標等防護能力均不足，也因此各國開始重視無人機威脅應處。²³

3.2021年以巴戰爭是無人機首次以大量編隊飛行「蜂群戰術」及執行飽和攻擊任務，並結合AI人工智慧執行辨識系統進行協同作戰，成功打擊哈瑪斯組織，此次戰爭可顯示以色列將無人機運用多元化，藉此各國以蜂群戰術視為決定戰爭結果必要關鍵手段之一。²⁴

4.2022年俄烏戰爭中，烏克蘭使用澳洲提供新型紙板無人機執行空襲行動，成功摧毀俄羅斯本土空軍基地內5架戰機、2部防空導彈發射車、1部防空預警雷達及對俄軍黑海艦隊基地彈藥庫等，且俄軍最先進S-300防空雷達螢幕顯示一片空白，幾乎沒有發現無人機來襲。除此之外烏克蘭大量使用無人機，成功發揮不對稱戰力，有效阻止了俄羅斯入侵，迄今戰爭仍未停止。²⁵為了避免俄羅斯無人機攻擊，烏克蘭部署16套由以色列製造的ieMHR戰

術雷達，此雷達系統可在10公里內測到小型無人機，一般無人機偵測範圍可達45公里，由此可知無人機對戰爭的影響頗大，必須嚴密防範。²⁶

(四)小結

綜上分析在現代軍事戰略中，無人飛行載具扮演著不可或缺的角色，其迅速部署的能力及擴大的作戰範圍，使其能在不危及人員生命的前提下進行偵察、監視，乃至精確打擊，隨著技術進步，無人機的多功能性進一步強化，其中包括誘餌、通訊、干擾、攔截和空中預警等能力，以及匿蹤和隱匿攻擊等特殊作戰能力，這些都極大提升了其在戰場上的關鍵作用，特別值得關注的是，無人機的低雷達截面積(Radar Cross-Section, RCS)技術發展，這使得無人機更難被敵方雷達所探測，從而大幅提升了生存率和作戰效能，低RCS技術不僅增強了無人機在敵方領空的隱蔽性，使其能夠有效穿梭於敵方防空網的縫隙中，而且提高了進行偵察、監視和精確打擊任務的有效性，對於提升軍事行動的突然性和成功率至關重要，因此，無人機的低RCS技術成為了現代軍事競賽中的一項重要進展，並直接挑戰了傳統的

23 洪安妮，〈2019年沙烏地阿拉伯油田遭無人機攻擊事件研究-論陸軍野戰防空〉，《陸軍學術雙月刊》，第56卷，第573期，2020年10月，頁1-5。

24 陳威奇，〈無人機蜂群作戰(以2021年以巴戰爭為例)〉，《空軍軍官雙月刊》，第228期，2023年2月，頁1-6。

25 〈新材質無人機毀俄多戰機，防空預警雷達偵測不到，竟詭異一片空白〉，《Newtalk新聞》，2023年8月29日，〈<https://ssur.cc/rCke6sT>〉(檢索日期：2023年8月29日)。

26 〈立陶宛民間相助，烏克蘭到手以色列ieMHR戰術雷達〉，《自由時報》，〈<https://ssur.cc/ju3ynUM5>〉(檢索日期：2024年1月18日)。

雷達監測和防禦體系，進一步強調了無人機技術及其應用在塑造未來軍事策略中的核心地位。

三、綜合分析

匿蹤戰機和無人飛行載具的發展及其在現代戰爭中的運用，標誌著軍事策略和戰術進入了一個新的時代，而這兩類飛行器共同的關鍵特性為「低雷達截面積(RCS)」，不僅為它們提供了在空中隱匿的能力，也顯著提高了它們的生存率和作戰效能，更能夠深入敵方領土進行精確打擊，同時保持低可偵測率，從而迅速獲得空中優勢。

匿蹤戰機和無人機的作戰效能挑戰傳統的雷達監測和防禦體系，迫使各國尋求新的偵測和防禦解決方案，此外，匿蹤戰機和無人機技術的融合，更開啟了對未來戰爭進行重新思考的大門，其中匿蹤技術的角色尤其關鍵，不僅是現代軍事競賽中的一項重要進展，更是塑造未來軍事策略的核心因素，意味著未來的軍事衝突將更多倚賴技術優勢，而非傳統的力量對比。

雷達偵蒐暨防護作為研討

近年來匿蹤技術成熟及無人飛行載具發展迅速，並能夠於雷達、紅外線及聲音偵蒐下達到隱匿行蹤之能力，而「匿蹤」的關鍵就在於降低RCS值，數值越小

代表著越不容易偵蒐，匿蹤戰機及無人機也依據此特性發展，在戰場上扮演重要角色。²⁷藉此探討「雷達偵蒐能力」及「雷達防護與反制作為」等二部分，以納入後續精進之參考。

一、雷達偵蒐能力探討

(一)主動式雷達偵蒐能力

主動式雷達又可稱為「有源雷達」，是目前各國通用防空預警裝備，其運作方式是通過主動發射電磁波，並接收從目標物反射回來的部分訊號，將訊號傳送到雷達運算處理單元，其進行放大、比對、過濾和分析，以從中提取有關目標的訊息，進而產生距離、速度、方位等資訊，藉此方式來探測、追蹤和識別在空中目標，²⁸此類雷達系統能夠獨立運作，不依賴於外界訊號或其他電磁波等，在各種環境條件下都能有效工作，包括夜間或惡劣天氣條件，而各主動式雷達功能皆有所不同，偵蒐目標也有所差異，茲以偵蒐距離區分簡介遠、中及近程雷達如下：

1.遠程雷達

主要以超視距方式偵測和追蹤空中之目標，包括飛機、導彈、甚至是太空物體，以下是著名的超遠程預警雷達「美國鋪路爪長程預警雷達」、「俄羅斯伏龍芝雷達」、「中共大堤雷達」及「澳大利亞超視距(OTH)雷達」等，尤其鋪路爪雷達能精準掌握北韓導彈試射全程，亦為我國

27 同註1，頁10。

28 王崇旭，〈空軍戰管TPS-117機動雷達性能提升之研究〉，《國防大學軍事專題研究》，2020年5月，頁9。



現役重要裝備。²⁹

2. 中程雷達

其系統以相位陣列雷達為主，用以預警及掌握飛機及其他空中飛行物體，以下是常見中程預警雷達「美國T/FPS-117雷達」、「美國TPS-75V雷達」、「中共JY-26天空監視雷達」等。³⁰

3. 近程雷達

主要用於偵測、追蹤及導引武器反制臨空目標等威脅，一些典型的近程防空雷達有「以色列EL/-M2084多功能雷達」、「俄羅斯9S18M1雪豹雷達」、「荷蘭FLY捕手雷達」及「瑞士Skyguard雷達」等。³¹

4. 偵蒐能力小結

主動式雷達之應用範圍廣泛，從空中和海上監控、目標追蹤、航空交通控制到天氣預測等方面，此雷達系統的主要優勢在於能夠即時提供精確的目標定位資訊，而其性能較不易受到複雜電磁環境因素的影響，然而根據不同的任務需求，主動式雷達的設計目的也各不相同，雖然都具有空中目標偵搜、識別和追蹤的能力，但功能上並不能互相取代，³²特別是遠程

和中程預警雷達主要聚焦於遠距離、全空域和全範圍的偵搜，而近程防護雷達則主要從事接收遠程和中程預警雷達發現的敵方目標、持續鎖定並進行攻擊的任務，更加著重於飛彈導引，而不是空中目標的偵查工作，因此近程防護雷達無法取代預警雷達的角色。³³

現代主動式雷達偵測技術方面，主要以評估目標的雷達截面積(RCS)來判斷其可偵測率，對於RCS較大的目標，如超過1平方公尺之物體，通常能較容易偵測。然而，隨著匿蹤科技發展，許多空中目標多採用匿蹤構型設計，大幅降低其RCS值，尤其是匿蹤飛機或無人飛行載具等RCS小於0.1平方公尺的目標，更難以偵測，³⁴而偵測距離的壓縮更直接影響了空防預警時間，因此對於具有匿蹤技術的空中目標，即使是先進的主動式雷達系統也面臨著艱難的挑戰，需要持續技術創新和改進。

(二) 被動式雷達偵蒐能力

被動式雷達又可稱為「無源雷達」，其在於不主動發射電磁波，而是利用外界電磁源(如商業廣播、電視信號或

29 何志威，彭群堂，〈從日、韓對北韓彈道飛彈威脅應處作為論對我之啟示〉，《海軍學術雙月刊》，第52卷，第5期，2018年10月，頁43。

30 洪國洋、蔡蓋芝、張慈、曾成立、吳泉生，〈主動相列雷達收發模組技術發展應用現況與未來趨勢〉，《新新季刊》，第42卷，第3期，頁12。

31 盧文豪，〈以色列鐵穹反火箭系統與戰略意涵〉，《國防雜誌》，第28卷，第3期，2013年5月，頁8。

32 同註1，頁32。

33 同註1，頁33-35。

34 于成森、蕭新武，〈中共反介入戰略對我防衛作戰影響之研究〉，《國防雜誌》，第29卷，第3期，2014年5月，頁11。

其他通訊信號等)進行匿蹤目標及小型無人機之探測與追蹤，此雷達系統的隱蔽性強、難以被探測，以及具備良好的抗電子干擾能力，使其在軍事偵查和環境監測等領域展現出廣泛的應用潛力，隨著匿蹤技術的發展，各國針對雷達性能也相對提升，³⁵列舉各式無源雷達簡介如後：

1. 「維拉」雷達

「維拉」雷達為捷克最新無源雷達，採用4個機動站臺與全向性天線組成，各信號接收站(SRS)與中央接收站(CRS)距離約50公里，分別負責120°範圍，達到360°全向偵測能力，系統利用CRS與各SRS接收到之目標無線電訊號的時間差實施鎖定，偵蒐距離最遠約400公里，³⁶目前使用「維拉」雷達計巴基斯坦、愛沙尼亞、馬來西亞、越南及美國等國家，其雷達系統作業僅需1至5秒即偵蒐400公里外約200個以上在空目標，另可在250公里外成功偵測到美軍B-2匿蹤轟炸機。³⁷

2. 「沉默哨兵」雷達

「沉默哨兵」雷達為美國洛克希德馬丁(Lockheed Martin)公司於1988年研發

的單站無源雷達，其原理是利用民用基地臺的無線電訊號，經多個訊號傳遞與目標折射後到系統的時間差，執行在空目標定位和追蹤，其定位精準度取決於外部無線電訊號的多寡、位置、頻率及資料彙整運算的模式，³⁸曾經一架DC-9貨機欲從墨西哥灣北部偷渡違禁品，且該機在毫無預警的情況之下，遭「沉默哨兵」雷達利用城鎮電台及無線電視台訊號，成功的偵獲該機行蹤。³⁹

3. 「鎧甲」雷達

這款由俄羅斯於1980年代末期開發的雷達系統，在1992年至1996年間，經烏克蘭進行了顯著的改造和升級，該系統擁有強大的偵測能力，能夠識別來自地面、水面及空中的目標，它的探測範圍可達到600公里。其通過指揮車來控制三部「鎧甲」雷達，並運用三角測量法，探測距離可以進一步擴展至1,000公里，此雷達系統擁有卓越的目標識別技術，配備了一個涵蓋多目標的信號特徵數據庫，這個數據庫能儲存300種無線電發射器信號及每種發射器的超過500種特定信號，其數字電腦處理系統能測量和比較40種不同目標信

35 劉晏慈，〈從中共飛彈對我防空雷達之威脅談無源雷達〉，《國防雜誌》，第25卷，第1期，2010年10月，頁15。

36 同註1，頁21-22。

37 〈中國欲購反隱身雷達被美國阻止〉，《壹讀》，2016年9月18日，〈<https://read01.com/Q28PxG.html#YAa7zegzZPY>〉(檢索日期：2024年2月25日)。

38 嚴明，〈利用電視調頻廣播載波信號的雙(多)基地雷達系統〉，《現代雷達》，2000年8月，第22卷第4期，頁23。

39 〈COTS 技術支援被動地基雷達〉，《Military&Aerospace Electronics》，1998年12月1日，〈<https://ssur.cc/kSajdkdY>〉(檢索日期：2024年2月25日)。

號源的各種技術參數，並與系統內部的數據庫進行比對分析，從而實現對各種空中、地面或海面目標的精確識別。⁴⁰

4.「浮空器」雷達

浮空器也被稱作繫留式氣球系統，其歷史可追溯至1794年法國大革命時期，當時主要用於空中偵察任務，一直到第一次世界大戰期間，繫留氣球和飛艇才開始被廣泛應用於偵察、訊息傳遞、巡邏和轟炸等軍事行動。⁴¹時至今日，美國已開發出配備敵我辨識器、空中早期預警雷達和各種情報監測感應器的早期預警浮空器系統，這種設備能夠部署在高空，對各種可疑飛行器、飛彈及潛在威脅進行監控。⁴²此外，俄羅斯在敘利亞的赫梅明空軍基地部署了第四代防空預警繫留氣球系統，這個系統能在幾分鐘內將重達300公斤的設備送至高空進行任務，並能在空中滯留15天以上，且該系統還能將數千公尺高空的信息傳遞給特定的部隊，這些進步顯示了浮空器技術的不斷演進和其在現代軍事中

的重要作用。⁴³

5.「YLC-29」雷達

YLC-29雷達是中共2017年在巴黎航展展出，屬於收發分離式「雙基雷達」，⁴⁴利用多個不同方向部署，使匿蹤之目標在某一方向產生較強之RCS值而被定位追蹤，一來可強化系統偵測精準度，二來亦可提升系統存活率。⁴⁵

6.「DWL002」雷達

DWL002雷達是中共2018年珠海航展上展示新自主研發雷達，該裝備與捷克「維拉」雷達類似，分別由3部雷達車及1部指揮車組成，藉由在空目標所發出無線電訊號來實施定位、追蹤，對具匿蹤之目標探測距離可達400公里以上，一套系統至少可以覆蓋1,000多平方公里的偵測面積。⁴⁶

7.「DK-1低空探測」雷達

DK-1雷達是中共2022年珠海航展首次展示，主要專門設計用於探測低空目標的雷達系統，利用先進的雷達技術和信號

40 同註35，頁18-19。

41 賴秉聰〈-戰術無人浮空器導入陸軍作戰通信運用之研究〉，《國防大學軍事專題研究》，2020年6月，頁26。

42 〈美售波蘭早期預警飛船，傳美軍援台灣繫留式預警浮空氣球〉，《自由時報》，2024年2月10日，〈<https://ssur.cc/maPSPXA>〉（檢索日期：2024年5月12日）。

43 〈俄開始打造「氣球部隊」，攜帶裝置全世界獨一無二，可全天候運行〉，《每日頭條》，2018年6月13日，〈<https://ssur.cc/ff3pRFN>〉，（檢索日期：2024年5月12日）。

44 〈中國電科將攜多型雷達參加2017巴黎航展 YLC-29反隱身雷達將首度亮相〉，《千龍網》，2017年6月15日，〈<https://ssur.cc/ZsPY2sz>〉（檢索日期：2024年2月25日）。

45 〈中國 YLC-29無源雷達亮相，強於「維拉」雷達〉，《澎湃》，2017年7月19日，〈<https://ssur.cc/grimej>〉（檢索日期：2024年2月25日）。

46 〈中國公開展出反隱身雷達並不是最強？B-2、F-22、F-35統統被降級〉，《壹讀》，2018年12月30日，〈<https://ssur.cc/riYqLhe>〉（檢索日期：2024年2月25日）。

處理能力，有效地在低空環境中識別和偵蒐飛機、直升機及小型無人機等各種目標，其性能特點包括高靈敏度、干擾性高，以及能夠在複雜的地形條件下進行有效探測，是目前偵測小型目標最先進雷達，可部署地面各重要區域，進行低空監視和目標識別。⁴⁷

二、雷達防護與反制作為探討

在現代戰爭的棋盤上，雷達是監視和預警的雙眼，更是導引精準打擊的鋒利長矛，隨著科技的不斷進步，匿蹤技術和小型無人機的廣泛應用，使得傳統雷達系統面臨前所未有的挑戰，為了應對這些新興威脅，全球各大軍事強國紛紛開發了一系列創新的防護與反制技術。其技術要求能夠提高對匿蹤戰機和小型無人機的偵測能力，更能夠在雷達受干擾或欺騙時，保持其穩定運作，確保戰場上的優勢，如今這些先進的雷達防護與反制手段已經成為現代軍事戰略中不可或缺的一環，以下探討雷達防護與反制作為：

(一)主動式防護手段

1.軟殺手段

現今發展反制無人飛行載具之趨勢大略相同，大多軟殺手段以干擾為主，常見的軟殺手段有「固定及半固定干擾系統」、「機動式干擾系統」、「手持式干擾系統」、「干擾通信鏈路」、「干擾導航定位系統」及「干擾導航定位系統」

等，其主要運用無線電訊號阻斷或干擾無人機和操作者之通聯及相關導航定位系統，或是運用手持式發射套索攔截及發射射頻干擾器來阻斷目標，使其癱瘓或喪失目標之控制權，以下簡介反制小型目標軟殺手段：⁴⁸

(1)固定及半固定干擾系統：以結合無線頻率、雷達電磁波及光學攝影機的反無人機系統，可利用無線電訊號阻斷無人機和操作者之通聯。

(2)機動式干擾系統：屬於輕型車載式防空整合系統，此系統配備360度偵蒐雷達、直接射擊武器、無線射頻干擾器及紅外線感測器等。

(3)手持式系統：可由單兵執行反無人機作戰之系統，其運用無人機網去攔截另一架無人機，或者運用手持式的射頻干擾器，透過阻斷無人機控制訊號，進而中斷控制，再者將小型光學射控系統安裝於小口徑武器上，藉以提升命中率，攔截臨空進犯之無人機。

(4)干擾通信鏈路：無人機的通訊系統主要依賴視距內(LOS)或超視距(BLOS)之地對空通信，以及衛星中繼通信系統。後者涉及從無人機到衛星的上行鏈路、衛星轉頻器以及從衛星到地面站的下行鏈路，形成一個完整的通信循環，這一循環的任何環節一旦遭受干擾或破壞，無人機的通信能力將受到嚴重影響，進而導致遠

47 〈全空域防空體系亮相珠海航展〉，《人民網》，2022年11月11日，〈<https://ssur.cc/aMy6X3j>〉(檢索日期：2024年4月8日)。

48 同註14，頁27-29。

端控制喪失，甚至無人機墜毀。

(5)干擾導航定位系統：小型無人機大多依賴全球定位系統(GPS)或類似的全球導航衛星系統來進行航線規劃和導航飛行，即使在人員遠距模式的操作下，無人機仍然需要利用GPS訊號來確定位置，同時將位置訊息與回傳的影像信號同步於操作者，因此GPS信號成為無人機定位與導航系統的關鍵環節，一旦受到干擾，將直接影響無人機達到預定目標的能力，甚至可能導致其偏離航線或墜毀。

(6)干擾偵察設備：目前許多無人機具備光學和紅外線偵察裝置，並成為標配的偵察工具，使得無人機能夠對指定區域執行長時間監視與偵察任務，這些偵察設備的有效運作對於無人機完成偵查、監視甚至是精準打擊至關重要，因此針對這些設備進行干擾，將直接影響無人機的作戰效能。

2.硬殺手段

目前各國使用硬殺手段對付威脅目標手段大致相同，而硬殺手段也是對抗小型目標最徹底的方式，更是反制任何威脅目標之首選，但傳統的硬殺手段大多以防空飛彈為主，其消耗的成本不符合作戰效益，隨著匿蹤技術與無人機發展，各國反

制武器也隨之進步，以下介紹各種硬殺手段：⁴⁹

(1)防空導彈

A.「鐵穹」防禦系統：其使用EL/-M2084多功能雷達來偵測約70公里範圍搜內的小型空中目標，且能夠精準識別來襲目標的性質，對真正構成威脅的目標進行攔截，而對於將落入無害區域的飛行物則不予攔截，這一戰略選擇性不僅顯示了鐵穹系統的智能判斷能力，也節約了防禦成本。⁵⁰

B.「愛國者」及「天弓」防禦系統：前者由美國雷神公司製造，射程範圍在5至150公里，可在10至27公里的高度內進行攔截，擁有全天候、全空域作戰的機動能力；後者由我國中山科學研究院自主研發的，具有200公里的射程和24公里的最高射高，同樣具備攔截戰術彈道飛彈、巡弋飛彈及航空器等能力。⁵¹

C.FK3000防空系統：該系統有效反制距離約12公里，主要反制臨空無人機等目標，可由車輛搭載主動相位雷達，以執行在空目標搜索，並配合導彈及短程防空火炮執行反制。⁵²

(2)高能雷射武器

A.50KW野戰防空系統：此系統是在

49 同註15，頁30。

50 同註31，頁2。

51 郭秉書，〈中共火箭軍巡弋飛彈發展對我地面防空作戰之影響〉，《空軍軍官雙月刊》，第228期，2023年2月，頁7。

52 〈FK3000 防空系統，擁有防空導彈等裝備，反無人機的剋星〉，《網易》，2022年11月20日，〈<https://ssur.cc/2mZk6X2>〉(檢索日期：2024年4月1日)

裝甲車上安裝50KW級雷射武器，並結合雷射導引器、紅外線偵獲目標系統以及Ku720 多功能雷達，利用低成本反擊手段，保護部隊免受空中小型目標攻擊。⁵³

B.300KW非直接火力防護系統：此武器主要負責目標體積大，且速度快的戰機及飛彈，相較於50KW的野戰防空裝備，此系統也可應付小型目標，且防禦距離可從1.6公里延伸大約10公里，攔截成本也可降低，更可縮短補充彈藥過程。⁵⁴

C.LW-30雷射防禦系統：主要針對空中任何小型之目標，該武器具有準確度高、反應快、成本低之優勢，並且可單一作戰或多車組合之聯合作戰。⁵⁵

D.鐵束雷射防禦系統：是以色列航太工業所開發研製，主要是對付臨空之短程火箭、砲彈及無人機之威脅，運用高能雷射來精準攔截並摧毀。⁵⁶

E.DragonFire雷射導能武器系統：該武器能夠遠距離發射高功率雷射，在雷達鎖定目標後，使用強烈光束能量將目標切

割並摧毀，該武器具有高精準度，即使是1公里遠的1英磅大小硬幣都能夠精準打擊。⁵⁷

(3)微波武器

A.高功率微波武器系統：此系統為美國空軍使用戰術高功率作戰傳輸器(Tactical High Power Operational Responder)，簡稱索爾(THOR)，主要運用高功率微波擾亂目標電子系統，削弱無人機相互通信及操控能力或使目標電子系統燒毀。⁵⁸

B.PHASER微波武器系統：此武器是一種高功率微波系統，以使用自身雷達來偵測及掌握目標，然後改變功率模式，轉成強大微波能量並攻擊，高能微波束在照射無人機時，會干擾無人機的收訊系統，甚至造成晶片過載而癱瘓。⁵⁹

(二)被動式防護手段

面對匿蹤戰機及無人機的威脅，被動防護手段成為重要的關鍵防禦策略，其核心在於不直接發起攻擊，而是透過一系

- 53 劉長威，〈中國大陸導彈發展對空軍戰管雷達威脅與因應策略之研究〉，《空軍學術雙月刊》，第695期，2023年8月，頁13。
- 54 宋吉峰，〈從作戰效益分析美軍新飛彈防禦概念〉，《海軍學術雙月刊》，第52卷，第3期，2018年6月，頁2-5。
- 55 〈解放軍「反無人機」雷射防禦車亮相能多車協同兼具軟硬殺傷力〉，《ETtoday 新聞雲》，2021年9月30日，〈<https://ssur.cc/x2EeC5v>〉(檢索日期：2024年4月1日)。
- 56 〈攔截1次112元！以色列加速部署「鐵束」雷射系統〉，《自由時報》，2023年10月26日，〈<https://ssur.cc/kJgEZbE>〉(檢索日期：2024年4月1日)。
- 57 〈雷射「噴火龍」防空武器！英國DragonFire命中1公里遠硬幣〉，《自由時報》，2024年1月200日，〈<https://ssur.cc/aRJ2kt8>〉(檢索日期：2024年4月1日)。
- 58 〈微波不只加熱便當！美海軍後年上艦實測「微波武器」〉，《自由時報》，2024年4月1日，〈<https://ssur.cc/GwPtSdY>〉(檢索日期：2024年4月2日)。
- 59 〈雷神將研發微波相位砲 對付無人機〉，《中時新聞網》，2019年9月24日，〈<https://ssur.cc/vRbKb2U>〉(檢索日期：2024年4月1日)。

列非攻擊性措施來降低損害，例如「靜態防禦結構」、「強化反輻射及精準攻擊防禦」、「心理戰和欺騙策略」及「動態位置變換」等，透過這些綜合性的被動防護措施，提升對抗匿蹤戰機和無人機威脅的總體能力，確保安全與防禦效能，以下介紹被動式防護手段：⁶⁰

1.靜態防禦結構：主要為重要設施執行強化或偽裝及增設地下設施，有效防護來自空中的威脅，尤其匿蹤戰機和無人機突然發起的攻擊。

2.強化反輻射及精準攻擊防禦：強化關鍵基礎設施免受匿蹤戰機及無人機搭載的反輻射武器攻擊的威脅，例如：使用雷達誘標器防禦，開啟時可誘使威脅源攻擊或航向偏移，⁶¹避免雷達主體遭敵鎖定攻擊；其次可部署衛星定位導引防護器，開啟時可形成半徑約8公里半球型防護網，可防護中共北斗衛星、俄國GLONASS及美國GPS等使用衛星導引之攻擊，可有效提升戰場存活率。⁶²

3.心理戰和欺騙策略：使用假目標、誘餌和其他欺騙手段來分散敵方的注意力和資源，降低真實目標被攻擊的風險。

4.動態位置變換：對於移動式防禦系統，如防空導彈系統及機動雷達系統，透過頻繁轉換戰術位置來減少被敵方精確定

位和攻擊的機會。

雷達弱點分析與應處作為

綜合前章分析，主動式雷達具有精確的目標定位能力和對環境的高度抗干擾性，可單一系統運作等優勢，但面臨匿蹤戰機或無人機目標偵測能力卻是有限，以及不同類型雷達之間的功能專業化導致的應用受到局限；而被動式雷達具有隱蔽性強、難以被探測，以及具備良好的抗電子干擾等能力，也可針對匿蹤目標及小型無人機執行有效偵蒐與掌握，然而我國預警雷達均屬於主動式雷達，因此本章節將探討出我雷達弱點分析，並提出相關應處作為，納入精進策略之參考。

一、雷達弱點分析

(一)雷達偵蒐原理受限

地球表面是球形，而傳統雷達電磁波是以直線方式發射，與地球表面形成切線，切線下方均為雷達盲區，如戰機或無人機以貼近海平面飛行，則不易發現；此外，海平面對電磁波也存在反射效應，會與發射出的電磁波相互抵消，以致低空區域的偵搜訊號相當微弱，匿蹤戰機或無人機利用盲區進行超低空飛行，雷達將無法即時發現蹤跡。⁶³雷達也有一些本質上的限制，首先無法提供目標詳細資訊(例如

60 〈重視「被動防禦」韌性需求〉，《國防安全雙週報》，2022年3月11日，〈<https://ssur.cc/GZvPLT8>〉(檢索日期：2024年4月11日)。

61 趙強，〈雷達抗反輻射導彈技術〉，《艦船電子對抗》，第32卷，第3期，2009年6月，頁44。

62 丁安邦，《衛星干擾技術與應用》(出版地：台北，國防科技發展推行委員會，2004年)，頁21。

63 陳柏勳，〈超視距雷達發展與運用〉，《海軍學術雙月刊》，第48卷，第5期，2014年10月，頁3-4。

目標形狀、目標材料及表面特徵等)，使得雷達回波的細節不如電子光學系統那麼精確，尤其在追蹤高速移動的小型目標時更為顯著，因為目標物的快速變化超出了雷達系統的處理能力，導致目標物的形態在雷達顯示上出現失真。⁶⁴其次，雷達系統在處理大量目標時，系統可能無法有效地對每一個目標進行作戰管制，這種情況使得雷達系統容易受到敵方的系統飽和攻擊，即敵方發射大量目標以超過雷達系統的處理能力，從而在短時間內使雷達系統失去作用。⁶⁵

(二)雷達截面積與測距之取舍

我國空軍預警雷達系統經過十餘年的發展和應用，建立了高密度的中遠程雷達防空網，並且可偵測雷達截面積(RCS)達到1平方公尺以上的多數空中目標，然而對於(RCS)低於1平方公尺之空中目標卻無法有效掌握，⁶⁶除非改變雷達系統部分參數限制，例如增強輻射功率系統，使電磁波能量增強，產生回波訊號更明顯；或者關閉雜波濾除限制，使雷達電磁波所偵搜到訊號均能於螢幕上顯示；再者以調整目標移動速度偵測抑制功能，使空中任何低速飛行物體均可顯示雷達螢幕，但上

述作為卻會影響雷達遠距離偵蒐穩定性與精準性，不符合作戰效益。另受限於發射功率、天線增益、系統轉速、接收機的靈敏度和脈波特性等技術因素，亦影響雷達對低RCS值目標的偵測範圍和效率。致使我國空軍預警雷達在面對匿蹤戰機和小型無人機時，顯得力不從心，對於早期預警和防禦系統構成巨大挑戰。⁶⁷

(三)雷達技術裝備發展受限

我國空軍預警雷達現今均為美方軍售裝備，相關雷達精密電子技術及機敏參數均無法掌握及自行研改，如何提升反制「軟殺手段」之效能是目前必須面對問題之一；其次，受限我國腹地不足及技術發展緩慢，強化反制「硬殺手段」之防護手段亦受限，因此審思如何提升自身技術，並研製(改)電子反制系統與相關防護設備，例如增加衛星定位導引防護器之效能、多重部署雷達誘標器及縮短部署時間及強化雷達電磁脈衝防護能力等，均為我空軍戰管預警雷達需努力克服之目標。

(四)遠程難以偵測、臨空無法防護

預警雷達雖能執行遠距離目標搜索，但對於匿蹤戰機和無人機等低可視度目標的掌握能力不足，顯示了技術面的缺

64 〈前線戰力吃緊？從「雷達原理」看東引空防的滲透危機【觀點】〉，《公視新聞網》，2022年2月21日，〈<https://ssur.cc/SjVpH6c>〉(檢索日期：2024年4月8日)。

65 〈哈瑪斯飽和攻擊 以色列「護國金鍾罩」無法施展〉，《BC東森新聞》，2023年10月9日，〈<https://ssur.cc/b3fsZpG>〉(檢索日期：2024年4月8日)。

66 黃盈捷，2023。《中共解放軍殲20匿蹤戰機對臺灣空防之威脅研究》。淡大碩士論文，頁77-78。

67 何應賢，〈共軍發展殲-20隱形戰機對我聯合防空作戰之影響〉，《國防雜誌》，第29卷，第3期，2014年5月，頁9。



口，此外雖有愛國者系統(射程約5至150公里內、射高約10至27公里)和天弓系統(射程約200公里內、射高約25公里)進行中、遠程防禦，⁶⁸惟200公里外無法先行攔截，且敵方匿蹤戰機或無人機突破防禦線，我方將面臨無法通過精確的雷達或武器系統進行有效補強。此外，我國雷達陣地的防禦同樣存在缺陷，固定雷達多位於不利於作戰的高山偏遠地區，初期易遭受戰損，即運用機動雷達彌補雷達作業，然而預備陣地缺乏足夠的火砲防護，一旦戰術位置暴露，極易成為敵方空中火力的目標，雖然理論上機動雷達應能進行移動，以避免敵方鎖定，但實際上由於撤收時間長，並且不是每一地點都適宜部署，使得這些雷達在實際機動性方面受到嚴重限制。

二、應處作為

綜合上述問題，我國的防空體系面臨著從遠程到近程的全方位威脅，缺乏一個多層次、綜合性的防禦機制來有效應對現代戰爭中的空中突破，這迫切需要通過技術創新和戰略調整來加強雷達偵測能力、提高機動雷達的實際運用效能，並建立更加堅固的多層次防空體系。列舉應處作為如後：

(一)強化匿蹤及無人機搜索能力

1.無源雷達系統

在當前的軍事防禦體系中，發展無源雷達技術成為了一項迫切的戰略需求，觀察美國的「沉默哨兵」、捷克的「維拉-E」以及烏克蘭的「鎧甲」雷達所取得的成就，我們可以看到無源雷達在雷達情報涵蓋範圍、搜索能力及機動性方面的顯著優勢，⁶⁹這些系統之所以能夠靈活且彈性地部署，並在結合現有預警雷達系統時顯著提升預警作戰能力及存活率，正是因為它們能夠有效應對當前如匿蹤戰機及小型無人載具等先進威脅，有鑑於此，進一步發展無源雷達技術，不僅能增強對匿蹤目標的偵測能力，降低被敵方發現和摧毀的風險，更能夠在預警雷達難以覆蓋的地區實現部署，藉此減少對高功率發射設備的依賴，從而降低成本和維護需求，⁷⁰如此一來，不僅提高了反制匿蹤和生存能力，還能在遭受攻擊時保持防空預警能力，展現出一種全方位的戰術靈活性與戰略深度。因此，對於任何致力於提升其國防能力和戰略安全的國家而言，投資無源雷達技術的發展是一個明智且必要的選擇。⁷¹

2.多基雷達系統

我國防空預警系統的全球領先地位，其依靠高密度、多方位、多頻段、遠

68 同註51，頁8。

69 同註35，頁17-19。

70 陳柏勳，〈超視距雷達發展與運用〉，《海軍學術雙月刊》，第48卷，第5期，2014年10月，頁16-17。

71 同註1，頁43-44。

距離雷達偵測能力，成功地覆蓋了臺灣本島的廣大空域。然而，儘管雷達裝備在大範圍的空域覆蓋方面表現卓越，近距離目標的掌握仍然存在挑戰，為了有效彌補這一缺陷，建議在雷達陣地周圍部署專門的近距離偵蒐雷達，多基雷達系統不僅能強化對任何接近雷達的小型無人飛行載具的偵測能力，也將大大提高雷達站在面對無人機攻擊時的存活率，透過這種整合近距離偵測能力的方法，可以確保即使在面對密集和低空之飛行目標威脅時，我國的防空系統也能維持其全面的偵測和防護能力，從而在維護國家安全方面發揮更加關鍵的作用。

3.浮空器雷達系統

在探討提升我國防空偵測能力的過程中，借鏡國外先進經驗顯得尤為重要，以美國在雷達防禦領域的發展揭示了一項關鍵發現即為地面防空雷達由於部署條件和地球曲線的限制，對低空目標的辨識能力受限。因此在眾多解決方案中，使用浮空器(高空氣球)作為雷達載具展現了獨特的優勢，如長時間連續工作的能力、低能源消耗、高存活率及優秀的低空探測性能，使其成為偵測低空威脅的理想選擇。⁷²相對於我國現有的E-2K預警機，雖然後者結合了空中活動雷達站和空中指揮中心的雙重優點，但在工作時間、成本及

維修方面，氣球載雷達顯著具有優勢，受到中共間諜氣球事件的啟發，部署氣球監控雷達系統將為我國帶來多重益處，不僅能有效進行定點監控，捕捉空中目標，防止敵方雷達偵蒐，還能透過偽裝技術混淆敵方信號，耗損敵方武器資源，為我國的雷達系統贏得更多的預警時間。⁷³

因此，發展浮空器雷達技術不僅是對現有防空系統的有效補充，也是提升我國綜合防禦能力的戰略舉措，通過整合和創新，我國能夠在確保空域安全的同時，有效提高對低空快速移動目標的偵測與反應能力，為防空體系增添一層關鍵的保護網。

(二)提升雷達性能及整體防禦系統

1.雷達性能升級與多樣化部署

鑒於現代戰機朝低雷達截面積發展之特性，我國需要進行雷達性能全面升級，包括提高發射功率、優化天線設計、提升轉速和接收機靈敏度等，以及改進脈波處理技術。此外，應考慮部署多樣化的雷達系統，包括低空探測雷達和移動式雷達，以彌補固定式雷達的盲點。

2.發展雷達技術與自主研發能力

我國面對依賴國外軍售裝備的局限性，應加強自主防禦技術的投資，發展自主雷達和電子反制系統，如提升及強化衛星定位導引防護器、雷達誘標器以及電磁

72 越東、陳陽曄、陳襲，〈氣球載雷達在抗巡航導彈中的運用〉，《現代防禦技術》，38卷2期2010年4月，頁5-8。

73 〈俄國馬上學會！間諜氣球掛載雷達反射器，大量奔向烏克蘭領土情蒐〉，《YAHOO!新聞》，2023年2月16日，〈<https://ssur.cc/mzyd2vfS>〉(檢索日期：2024年2月6日)。



脈衝防護裝置等裝備，以增強硬殺與軟殺手段的綜合防護能力。

(三)提升我國機動雷達整體效能

1.戰術陣地多元化

(1)整合交通與通信：建議優化戰術陣地選擇，充分考慮交通便利性與通信效率，確保緊急部署的迅速性和通信的穩定性，並對戰術陣地進行全面評估，優先選擇方便快捷機動及可保持良好通信連接的位置。

(2)加強預先規劃與環境適應：詳細對戰術陣地的勘察、評估及環境參數，並對電力和隱蔽設施進行建設或改善，以快速適應不同戰場環境的需求。

(3)提倡靈活運用與戰術創新：結合與發展人工智慧技術，針對專業修護人員進行模擬訓練，提高對各種環境條件下部署策略的理解和應用，以提升戰術的靈活性和效率。

2.強化防禦能力的發展

(1)深化地形選擇與防護工程：建議在機動雷達部署過程中進行詳細的地形分析，並建立相應的防護措施，如建造掩體和實施迷彩偽裝，以減輕敵方的視覺和雷達偵測。

(2)加強專業攻防訓練：建議為機動雷達操作人員提供專業的自衛與應急反應訓練，同時建立與友軍的支援協定，確保在遭遇攻擊時能迅速獲得援助。

3.提升存活率的協防支援

(1)整合空防資源：建議將機動雷達陣地納入周邊防空系統的覆蓋範圍，特別是對於偏遠陣地，確保能夠獲得有效的空中防護。

(2)部署近程防空系統：考慮為關鍵的戰術陣地配備近程防空武器，如便攜式地對空導彈，以增強低空威脅的防禦能力。

(3)實施轉場防禦戰術：鼓勵機動雷達單位培養在感知威脅時能快速撤離並轉移，提升重新部署的能力，以「打帶跑」戰術靈活應對敵方攻擊。

結語

從現代戰爭得知，雷達是戰場情、監、偵重要來源之一，也是掌握「制海權」、「制空權」及「制電磁權」之必要關鍵裝備，而我預警雷達勢必為首波攻擊的主要目標。隨著匿蹤戰機及無人機的發明，並投入戰場運用，徹底改變傳統戰爭的策略、戰術及戰場本質，兩者可憑藉「低可探測性」、「快速部署」、「遠距打擊」等特性，對雷達產生一定程度之威脅。而為了對抗匿蹤戰機和無人機帶來之威脅，各國加快了雷達防禦技術發展，對此《中華民國108年國防報告書》內也闡明了戰力整建重點，其中便有「籌建具偵獲匿蹤及小型目標能力之雷達系統」，⁷⁴為此，建議國軍可建置「無源雷達」、「多基雷達」及「提升機動雷達機動性」

74 中華民國國防部，〈中華民國108年國防報告書〉，頁65。

等提升存活率，爭取更多空中優勢，且因應未來戰場變化，亦可增加各種反制手段如「雷射武器」及「高功率微波武器」等，⁷⁵發揮聯合作戰效能，定能具體實現「防衛固守、重層嚇阻」之軍事戰略指導，使敵難應付的我國防空戰力，更不敢輕易飛越我領空，達到真正嚇阻，並在作戰效益及成本考量下發展符合我國空防模式的兵力配置，讓兵力運用達最大效益，實現「以小搏大，以弱擊強」之不對稱戰術，為我國創造勝機。

作者簡介

趙珀震少校，航空技術學院99年班、通參正規班105年班。曾任陸電官、通參官、組長、分隊長，國防大學空軍指參學院113年班。

李建鵬中校，中正理工學院正87年班、管院指參班101年班、國防大學理工學院資工所網路安全在職碩班108年班。曾任電子官、修護組長、分隊長、科長、資參官、電戰官。現為國防大學管理學院中校教官。



勇鷹高教機(照片提供：葉秀斌)

75 〈雷射武器國造有望？雷護專案進入第二階段 助我研發「友好國家」是它〉，《TVBS新聞網》，〈<https://ssur.cc/Mb7DvyG>〉(檢索日期：2024年4月8日)。