

海上守護者— 認識美軍新一代神盾系統 AN/SPY-6之雷達技術

Guardian at Sea-Knowing the Radar Technology of the
New Generation of Aegis Radar System, Spy-6

謝佳穎 小姐、劉書麟 先生

提 要：

- 一、美國神盾系統係全世界最先進的空中預警與地面整合系統，而配置新一代AN/SPY-6雷達是為了讓艦艇能有效對抗複雜的空中威脅，並彈性運用作戰武器系統。
- 二、AN/SPY-6具開放式架構與相關先進技術，且依據不同時程與作戰需求，不斷精進其作戰時的反應速度、抗干擾能力、監偵能力與整體防空、打擊能力；透過AN/SPY-6雷達研製過程可發現，美海軍雷達逐步朝此架構發展，提升對全空域目標的探測能力，並將彈道飛彈防禦與傳統防空模式整合進單一系統，以增進神盾級艦在多任務領域的作戰能力。
- 三、AN/SPY-6是神盾系統的眼睛，具備不同以往的高目標更新率、資訊整合能力、高靈敏度的目標識別能力等優越性能；另對於盟邦國家而言，除了多次在航行上展現美國的戰略底線外，更為我國新一代軍艦作戰系統提供明確的發展方向。

關鍵詞：防空暨飛彈防禦雷達、神盾系統、雷達模組裝配件

Abstract

- 1.The U.S. Navy's Aegis missile defense system is the most advanced early warning and ground integration system in the world, and the new generation AN/SPY-6 radar is configured to enable ships to effectively combat complex air threats and flexibly use combat weapon systems.
- 2.AN/SPY-6 has an open architecture and advanced technologies. Based on different time schedules and operational requirements, it is able to improve its reaction speed, anti-interference ability, monitoring capability, overall air defense and strike capability. Through the AN/SPY-6 radar development process, it can be found that the US Navy radar gradually

moves toward an open architecture, enhances the detection capability of the entire airspace target, and integrates the ballistic missile defense and the traditional air defense mode into a single system to enhance the Aegis ship's capability to Combat in the mission area.

3. AN/SPY-6 radar is the eye of the Aegis system. It has different superior performances such as high frame rate, information integration capability and high sensitivity target recognition ability. For the ally, in addition to showing the United States many times on the voyage beyond the strategic bottom line, it provides a clear development direction for Taiwan's new generation of warship combat systems.

Keywords: AN/SPY-6、AEGIS、RMA

壹、前言

美國防空暨飛彈防禦雷達(Air and Missile Defense Radar, AMDR)，正式名稱為AN/SPY-6，係「神盾系統」(Airborne Early-warning Ground Integrated System，簡稱AEGIS)空中預警與地面整合系統中重要的一環，而「神盾系統」肩負保衛航艦編隊或驅護編隊任務，是一種全天候、全空域、指管通勤整合之艦載防空系統。「神盾系統」的每次演進稱為基線(Baseline)，長期演進下來其功(性)能皆有長足進步¹，現已擁有Baseline 0-10共11種版本，最新版Baseline 10是新一代作戰系統²，此系統整合AN/SPY-6雷達、Link-16(協同作戰資料鏈)、標準系列攔截彈等軟硬體整合功能，並相容早期研發的AN/SPY-1神盾雷達系統，提

供主要作戰的能力包括：「AN/SPY-6雙波段雷達」、「海軍一體化火控防空(NIFC-CA)能力」、「AN/SLQ-32 SEWIP Block 3電戰系統」、近迫防禦武器系統(CIWS)整合、先進防空/反飛彈任務計畫能力(Advanced AAW & BMD Mission Planer)等³，系統中的AN/SPY-6雷達即在飛彈防禦、自身防衛中肩負重要角色。

國防戰力是衡量國力的重要指標之一，面對國際現實且嚴苛的環境，如何厚植國防實力以因應千變萬化的時局，並爭取國際局勢有利環境，方得以確保我國人民安全福祉，永保海疆安全無休。近年來，「國防自主」係政府大力推動之重要國家政策，空軍的「國機國造」及海軍的「國艦國造」更是重中之重⁴，而國防科技研發首重創新，其中國家中山科學研究院(簡稱中科院)更是擔負

註1：練學輝等，〈美國「宙斯盾」系統及主要感測器進展分析〉，《雷達與對抗》，第36卷，第3期，2016年9月，頁14-18。

註2：U.S. Navy，〈AEGIS Weapon System〉，2019年1月10日，https://www.navy.mil/navydata/fact_print.asp?cid=2100&tid=200&ct=2&page=1，檢索日期：2019年7月10日。

註3：同註2。

註4：游凱翔，〈潛艦國造首艘原型艦 預定於民國114年完成〉，《經濟日報》，2018年9月1日，<https://money.udn.com/money/story/5641/3343251>，檢索日期：2019年7月10日。

協助我國建立國防武器自製與研發能量的關鍵角色。經過半世紀的努力，中科院不論在防空、機載、攻船飛彈以及射控雷達系統研製，已由昔日的追隨學習，逐漸轉變為積極、創新與開發，未來更將繼續與國防部及各軍種攜手，向「國防自主」目標邁進。

考量神盾戰鬥系統是全世界第一種全數位化的艦載戰鬥系統，也是美國海軍第一種具備決策輔助功能的整合系統⁵，其所使用的AN/SPY-6雷達更是全系統的眼睛，肩負料敵於千里之外的重要使命。因此，撰寫本文的主要目的即在介紹美國神盾戰鬥系統中的AN/SPY-6雷達，尤其瞭解AN/SPY-6係如何設計與整合，其作戰觀點又是如何？尤以美軍除擁有先進的載具、武器外，搭配美國近期的「印太戰略」⁶，明顯劍指中共的「一帶一路」⁷，其海上戰略意義確實值得國人一探究竟；另一方面也期許中科院攜手同仁一步一腳印，共同承擔更多的責任。

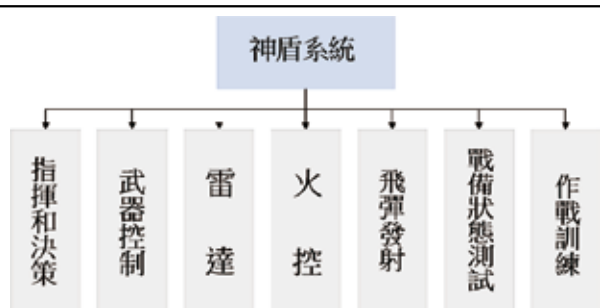
貳、新一代AN/SPY-6雷達研發緣起與沿革

神盾系統自1983年首次裝配於提康德羅加級飛彈巡洋艦(CG-47)至今，經過近20年的發展與創新⁸，其作戰能力益漸增強，並



圖一：暗房中進行組裝的SPY-6原型天線

資料來源：〈RAYTHEON STARTS PRODUCTION OF AN/SPY-6(V)〉，2017年5月5日，<https://www.monch.com/mpg/news/c5i/1349-raytheon-an-spy-6v.html>，檢索日期：2019年7月10日。



圖二：神盾系統組成示意圖

資料來源：GlobalSecurity.org，〈AEGIS Weapon System Mk 7〉，<https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/aegis-core.htm>，檢索日期：2019年7月10日，由作者自行繪製。

一直保持著世界領先的地位。自1997年至今，美國海軍利用神盾系統進行飛彈攔截試射不下數十次，成功率超過八成，而目前全球擁有神盾系統的國家則包括美國、日本、西班牙、挪威、韓國與澳大利亞等六國⁹。系

註5：〈神盾戰鬥系統〉，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/wiki/神盾戰鬥系統>，檢索日期：2019年7月10日。

註6：川普政府的印太戰略事是由歐巴馬時期的亞太架構的延伸，加強對印度洋周邊區域的經略，同時藉由凸顯自由與開放兩大元素，重新形構兩洋沿岸國家與區域整體的政經及戰略布局。詳見U.S. Department of Defense，〈Indo-Pacific Strategy Report (IPSR)〉，2019年6月1日，<https://media.defense.gov/2019/Jul/01/2002152311/-1/-1/1/DEPARTMENT-OF-DEFENSE-INDO-PACIFIC-STRATEGY-REPORT-2019.PDF>，檢索日期：2019年7月10日。

註7：「一帶一路」為絲綢之路經濟帶和21世紀海上絲綢之路簡稱，是中共於2013主導的跨國經濟帶。參閱〈一帶一路〉，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/wiki/一帶一路>，檢索日期：2019年7月10日。

註8：U.S. Navy，〈AEGIS Weapon System〉，2019年1月10日，https://www.navy.mil/navydata/fact_display.asp?cid=2100&tid=200&ct=2，檢索日期：2019年7月10日。

註9：Missile Defense Agency，〈Ballistic Missile Defense Intercept Flight Test Record〉，2019年4月，<https://www.mda.mil/global/documents/pdf/testrecord.pdf>，檢索日期：2019年7月10日。

統主要由數個分系統組成，分別是指揮和決策分系統、武器控制分系統、AN/SPY-6雷達(如圖一)分系統、火控分系統、飛彈發射分系統、戰備狀態測試分系統和作戰訓練分系統等¹⁰(如圖二)。

美國海軍開發新一代AN/SPY-6雷達主要目的，即是希望驅逐艦能有效對抗更複雜的空中和彈道飛彈襲擊。面對日益嚴峻的彈道飛彈與攻船飛彈威脅，美國海軍決定打造全新設計、並配備大型雷達的戰艦，做為海上飛彈防禦聯合部隊(Maritime Air and Missile Defense of the Joint Forces, MAM-DJF)的替代性方案。2007年美海軍公布一項新的巡洋艦發展計畫，並結合防空反飛彈雷達，此雷達須適應未來各種作戰需求，且基本的防空防禦能力須包括三部分¹¹：

第一、在現有的雷達系統基礎上，提升靈敏度和效能。

第二、能偵察、追蹤並能在一定範圍內防禦彈道飛彈。

第三、能抗電戰、能在惡劣陸地、海上和風雨干擾中，鎖定匿踪和超低空飛行的來襲目標。

因為，現有的神盾系統上配備的SPY-1雷達，即使進一步的改進也無法滿足這些要

求，故AN/SPY-6雷達即應運而生。美軍希望能以SPY-6取代AN/SPY-1雷達做為新一代艦載防空反飛彈雷達裝備，它可有效地對抗各類現役、甚至是未來的戰機、彈道飛彈及超音速攻船飛彈。2015年，部署於羅馬尼亞的陸基神盾系統(含SPY-6)已完成部署¹²；另一套在波蘭亦將於2020年開始運作¹³。雷達演進介紹如後：

一、AN/SPY-1雷達

SPY-1是美國研製的世界上第一部具有四面陣列天線的艦載相位陣列雷達，起源於1963年由美國國防部推動的先進水面飛彈系統(Advanced Surface Missile System, ASMS)，ASMS於1969年正式改名為AEGIS神盾系統。

ASMS計畫搭配相位陣列雷達系統的初期研發概念—先進多功能陣列雷達(The Advanced Multi-Function Array Radar, AMFAR)¹⁴，研發過程因電子技術日益成熟，改用相移器(Phase Shifter)構成的相位陣列天線，後端則用功率放大器(Crossed Field Amplifiers, CFA)，AMFAR為脈衝收發(pulse by pulse transmit/receive)，係由後端數位計算機控制的雷達系統，關鍵項目包含上述正交場功率放大器、序列調控技

註10：GlobalSecurity.org，〈AEGIS Weapon System Mk 7〉，<https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/aegis-core.htm>，檢索日期：2019年7月10日。

註11：GlobalSecurity.org，〈AN/SPY-6(V) Air and Missile Defense Radar (AMDR) Air & Missile Defense Radar (A&MD Radar)〉，<https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/amdr.htm>，檢索日期：2019年7月10日。

註12：〈U.S. Navy 6th Fleet Receives Aegis Ashore-Romania from MDA〉，DefenceTalk，2015年12月22日，<https://www.defencetalk.com/us-navy-6th-fleet-receives-aegis-ashore-romania-from-mda-66161/>，檢索日期：2019年7月10日。

註13：Lidia Kelly, and Marcin Gocłowski，〈Poland says U.S. missile shield site delayed until 2020〉，REUTERS，2018年3月23日，<https://www.reuters.com/article/us-poland-defence-usa/poland-says-u-s-missile-shield-site-delayed-until-2020-idUSKBN1GY2RE>，檢索日期：2019年7月10日。

註14：Kenneth W. O' Haver, Christopher K. Barker, G. Daniel Dockery, and James D. Huffaker, "Radar Development for Air and Missile Defense", Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 34, 2018。

術、天線面上控制輻射單元相位的磁滯閉鎖迴路(Hysteresis Loop Latching, 為一種高導磁材料特性)、陶磁相移器(Ferrite Phase Shifters, 利用稀土元素¹⁵製作高導磁材料, 調變電波相位)、相位陣列設計(指利用相位調整波束方向)、自動化故障隔離與重組、電子反反制波形與處理、複雜環境之目標識別等, 這些先進的技術組合, 成就此系統的超強功能。

進入作戰狀態時, 操作人員先用AN/SPY-1雷達對全空域進行搜索, 發現目標後自動地轉入追蹤狀態; 與此同時, 指揮決策中心會進行敵我識別、威脅評估及攔截武器的運用排序, 並將分析結果傳至武器控制系統。武器控制系統則依據資料自動地運算攔截數據, 並將運算結果傳送給飛彈發射系統, 該系統則按照命令自動地發射飛彈攔截, 同時系統並會自行再裝填。飛彈發射後, 射控系統借助AN/SPY-1雷達不斷計算並修正飛彈的飛行彈道, 當飛彈進入飛行末段後, 會由飛彈尋標器依據火控系統導引結果自動尋找目標。飛彈攔截後, AN/SPY-1雷達便會立即做出殺傷評估, 並同時決定是否需要再一次對目標進行攻擊¹⁶。

AN/SPY-1服役多年來一直是美國海軍神盾防空反彈道飛彈作戰系統的核心(裝配在「伯克」(Arleigh Burke-Class)級驅逐艦

及「提康德羅加(Ticonderoga-Class)」級巡洋艦上), 其工作波段為S波段, 使用四個固定式相位陣列天線, 能同時執行搜索、偵察、跟踪、控制和導引, 對目標的最遠探測距離大於325公里; 探測掠海目標距離大於80公里, 從早期僅做為防禦戰機、巡弋飛彈的雷達(指SPY-1、SPY-1A), 發展到SPY-1B具備有限的戰術彈道飛彈防禦能力, 到SPY-1F(V)具偵測掠海攻船飛彈能力, 其中SPY-1D(V)型雷達採用新型導波管(Traveling-wave tube)、目標識別及雜波抑制演算法, 能有效預警偵測距離約400至460公里, 可同時監視400個目標, 自動跟踪其中100個目標, 並同時引導飛彈攔截12至18個目標¹⁷。此型雷達從整體能力上講, 已具備對中、近程彈道飛彈的預警探測能力, 但就其自身結構功能而言, 仍存在著一定的侷限性, 包括發射器的功率有限, 能量大多耗損在陣列天線上, 且模組化、重量和可靠性方面均有不足。因此, 美軍才決定尋求新一代艦載防空雷達, AN/SPY-6計畫便由此產生。

二、AN/SPY-6雷達

AN/SPY-6的開放式軟、硬體架構與SPY-1屬於完全不同的新一代雷達, 模組化的架構利於部署在不同艦船平臺, 進而在雷達系統全壽命週期內實施技術與性能升級。SPY-6的發展概念來自2007年海上飛彈防禦

註15：稀土元素，是元素週期表第Ⅲ族副族元素鈾、釷和鐳系元素共17種化學元素的合稱。與其名稱暗示的不同，稀土元素（鈾除外）在地殼中的豐度相當高，其中鈾在地殼元素豐度排名第25，占0.0068%（與銅接近）。稀土元素並不稀有，但其傾向於兩兩一起生成合金，且難以將稀土元素單獨分離；另外，稀土元素在地殼中的分布相當分散，很少有稀土元素集中成為適合商業開採的礦床。參閱〈稀土元素〉，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/wiki/稀土元素>，檢索日期：2019年7月10日。

註16：蔣慶全，〈美海軍「宙斯盾」綜合防空作戰系統研析〉，《電子科學技術評論》，第1期，2004年，頁42-48。

註17：MDC，〈AN/SPY-1 3D相位陣列雷達〉，<http://www.mdc.idv.tw/mdc/navy/usanavy/E-Radar-SPY1.htm>，檢索日期：2019年7月10日。

附表：AN/SPY-6研發驗證重要時程表

重要時程	研發驗證事項
2010-2012	一、技術開發階段，包含四個關鍵技術： 1. 氮化鎵研製的高功率放大器和傳輸/接收模組。 2. 主動陣列物理結構。 3. 數位收發機。 4. 大孔徑數位波束合成和校準。 二、軟體關鍵技術包括：多工的時序排程和目標識別。
2013. 10	美海軍與雷神簽署AN/SPY-6工程、製造和研發合約，合約中還包含採購9套雷達系統的選擇權。該合約規範AN/SPY-6套裝將與現有的AN/SPQ-9B X波段雷達整合，主要內容為確定功率、靈敏度、動態範圍、功率管理和信號處理等。
2015. 5	完成關鍵設計審查(CDR)，從硬體價格、軟體發展、風險、生產分析、專案管理等進行評估。
2016年	1月完成首部AN/SPY-6防空反導雷達陣列建構。 5月完成近場靶場(NFR)測試，包含性能、校準，並驗證對真實目標的追蹤能力。 6月海軍在夏威夷考愛島的太平洋飛彈靶場(PMRF)的先進雷達研發評估實驗室(ARDEL)部署AN/SPY-6。 10月SPY-6成功追蹤多顆衛星，並在幾個月內通過同時追蹤飛機和衛星(綜合防空反導追蹤)驗證。
2017年	3月SPY-6在夏威夷太平洋飛彈靶場完成首次短程彈道飛彈(SRBM)防禦試驗。 5月SPY-6進入初期低量生產(Low Rate Initial Production, LRIP)。 7月完成偵測與追蹤中程彈道飛彈(MRBM)測試，這也是第二次實彈追蹤測試。
2018. 12	雷神公司獲得美國海軍1.14億美元整合與生產支援服務合約。
2019. 2	AN/SPY-6完成偵測與追蹤從夏威夷考愛島的太平洋飛彈靶場(PMRF)發射的短程彈道飛彈測試。
2018-2020	一、綜合試驗階段。 二、預計2023年服役，取代AN/SPY-1，並在DDG-124艦上具備初期作戰能力。

資料來源：參考Jane's 360, <http://janes.com>，檢索日期：2019年7月10日；Jacob Cohn, Ryan Boone, and Amber Oar, "FY 2018 WEAPON SYSTEMS FACTBOOK", CSBA, 2018.；Durbin, Chris, and J. Andrew Walker. "Weapon Systems Annual Assessment—Knowledge Gaps Pose Risk to Sustaining Recent Positive Trends (GAO-18-360SP)", United States Government Accountability Office, April 2018.，由作者彙整製表。

聯合部隊(MAMDJF)的替代方案—可擴充相位陣列雷達¹⁸，此型雷達可以依照任務調整相位陣列大小，美國海軍亦表達對綜合防空與飛彈防禦的迫切需求。2009年初，美國國防部發布一份備忘錄聲稱計畫採購更多可搭載SPY-6雷達的DDG-51驅逐艦(即伯克級)，並邀集洛克希德·馬丁公司(Lockheed Martin)、羅斯諾普·格魯曼公司(Northrop Grumman)和雷神公司(Raytheon)三家公司團隊，分別進行雷達、艦體的概念研究，以確

定哪些配置可以滿足低成本的防空反飛彈整合需求¹⁹。

AN/SPY-6從概念設計到生產歷時多年，從簡單的技術轉為成熟、先進、功能齊全的雷達，也由於SPY-6雷達系統的研改，估算自2012至2018財政年度共擷節2.71億美元(約合新臺幣84億元)的後勤維護費用，同時生產成本也降低約4.5億美元(約新臺幣139.5億元)²⁰。AN/SPY-6也將是未來幾十年內美國海軍水面作戰部隊雷達設備的基石(

註18：Ronald O' Rourke, "Navy CG(X) Cruiser Program: Background for Congress", Congressional Research Service, June 10, 2010.

註19：〈AN/SPY-6〉，維基百科，<https://en.wikipedia.org/wiki/AN/SPY-6>，檢索日期：2019年7月10日。

註20：Ronald O' Rourke, "Navy DDG-51 and DDG-1000 Destroyer Programs: Background and Issues for Congress", Congressional Research Service, Nov 30, 2015.

研發驗證重要時程，如附表)。

參、AN/SPY-6雷達系統功能概述

因應未來日趨複雜的海上作戰環境，美國海軍在1990年代末期開始發展雙波段雷達系統(Dual Band Radar, DBR)，2007年海上飛彈防禦聯合部隊(MAMDJF)方案提案過程中，美海軍意外得到可擴充陣列雷達構想，符合美海軍不同作戰艦艇的需求；再加上當時雷達關鍵技術陸續突破，例如雙波段共同資料處理、系統模組化、氮化鎵、數位波束合成等技術，更因為科技進步引導日後主要作戰艦艇開發新一代雷達系統的走向。

一、雙波段共同資料處理

雙波段雷達優勢在於將S波段與X波段雷達的後端信號處理(Signal Processing, SP)與資料處理(Data Processing, DP)設備結合在共同的DP後端設備之中，利於整合控制與電磁頻譜分配²¹；另外，對於探測低空、小型目標而言，雙波段雷達亦可同時處理兩個不同頻率與脈衝回復率的雷達信號：X波段使用高脈衝回復率，盡速確認目標信號；而S波段則使用中脈衝回復率，確認同一個接觸信號的確實距離，然後將兩個雷達信號送入同一個濾波處理器，以進行更精確的目標識別²²。

AN/SPY-6雷達即採用雙波段模式(如圖三)，整套系統包括一部用於大量搜索的四



圖三：雙波段AN/SPY-6雷達艦艇配備示意圖

資料來源：Christopher P.Cavas，〈US Navy: New Destroyers 'Looking Good'〉，2015年4月14日，<https://www.defensenews.com/digital-show-dailies/sea-air-space/2015/04/14/us-navy-new-destroyers-looking-good/>，檢索日期：2019年7月10日。

面陣列天線之S波段(2-4GHz)主動電子掃描陣列(Active Electronically Scanned Array, AESA)雷達，即稱之為AN/SPY-6-S、一部用於地平線搜索的三面陣列之X波段(8-12GHz)被動水平搜索電子掃描陣列(Passive Electronically Scanned Array, PESA)雷達，即稱之為AN/SPQ-9B(升級版)、以及一臺雷達套件控制器(RSC)，RSC為S波段和X波段雷達提供資源管理、協調與神盾作戰系統介面整合用²³。

二、RMA

AN/SPY-6-S是SPY-6雷達的核心，屬固態AESA雷達，具有極佳抗干擾、濾雜波能力，能在惡劣海象、天氣下追蹤低雷達橫截面(RCS)之空中目標。每個天線陣列高4.298公尺、寬4.145公尺、高1.524公尺，外形依舊

註21：MDC，〈DBR/AMDR/EASR相位陣列雷達〉，<http://www.mdc.idv.tw/mdc/navy/usanavy/amdr.htm>，檢索日期：2019年7月10日。

註22：Raytheon，〈Dual Band Radar (DBR)〉，<https://www.raytheon.com/capabilities/products/dbr>，檢索日期：2019年7月10日。

註23：同註17。

為類似AN/SPY-1的八角形。每個陣列由37個雷達模組裝配件(Radar Module Assemblies，簡稱RMA)構成，每個RMA長寬高均為2英尺(約61公分)，RMA的數量多寡決定雷達陣列的孔徑、發射功率與性能²⁴，可以分組集成，構建任何尺寸的雷達陣列，以滿足航艦和兩棲艦艇等不同艦船的任務需求。2018年8月起，雷神公司在麻薩諸塞州的新雷達生產廠已正式啟用，用來組裝AN/SPY-6相位陣列，廠區內的移動與搬運全仰賴智慧機器人自動運作。

單一RMA包含多個收/發模組集成(TRIMM)的數位接收放大器與相關單元。每面天線擁有超過5000個T/R模組。若干個T/R模組構成一塊可快速抽換的TRIMM，且內部有水冷系統，能在不關閉水冷迴路的情況下，直接更換天線陣列上的TRIMM；後端採低成本X86處理器處理數位波束合成，後端冷卻系統稱為冷卻設備單元(Cooling Equipment Unit，CEUs)²⁵。由於AN/SPY-6的T/R模組都集中在天線上，因此需要更強的天線冷卻能力；另雷達輻射組件與外罩(Radiator/Radome)也採用模組化設計，便於維修，其現場可更換單元(Line Replaceable Unit，LRU)能在6分鐘內完成更換，且僅需要兩項常見五金工具即可更換(如圖四)，其後端供電系統有三套，皆連結UPS不斷電系統與電池，確保維修保養系統極簡化²⁶。

三、關鍵技術

註24：Raytheon，〈7 Fast Facts About the Navy's Newest Radar—AMDR will help keep the world a safer place〉，https://www.raytheon.com/news/feature/7_facts_about_amdr，檢索日期：2019年7月10日。

註25：同註19。

註26：Raytheon，〈Meet the Navy's Enterprise Air Surveillance Radar〉，<https://www.raytheon.com/capabilities/products/easr>，檢索日期：2019年7月10日。



圖四：SPY-6的模組化設計，易於維修更換

資料來源：Gina Harkins，〈Sailors Get a Firsthand Look at the Navy's New SPY-6 Radar System〉，2019/5/8，<https://www.military.com/daily-news/2019/05/08/sailors-get-firsthand-look-navys-new-spy-6-radar-system.html>，檢索日期：2019年7月10日。

AN/SPY-6研製過程採用先進的氮化鎵技術、數位波束合成技術(Digital Beam Former，DBF)以及模組化元件(RMA)的標準模組，不但提高不同船艦任務運用的彈性配置，也大幅提升目標更新率，進而在有限空間內將作戰能力最大化；SPY-6還具備雷達導引和電戰能力。由此可見，AN/SPY-6雷達將是「伯克級」Flight III型驅逐艦的核心部分，也是未來裝備「福特級」核動力航艦的基礎型號雷達。AN/SPY-6歷時多年順利研發，係由於下列關鍵技術獲得突破：

(一) 採用靈敏度更高的數位波束合成技術

AN/SPY-6是美國海軍第一部專門用於同時執行防空和反彈道飛彈任務的一體化雷達系統，數位波束合成DBF依賴先進的軟體運

算法則，將雷達信號數位化，能同時產生和處理多種頻寬，增加用於多種任務的雷達資源，並能有效消除電磁環境中的干擾，通過提高系統的空間選擇性，增強信號並抑制干擾，也就是建構信號空間的濾波器，使所需的信號最大、干擾最小²⁷。

為了因應日益嚴峻的防空任務，海軍雷達需要調高增益(Power Aperture Gain, PAG)，使得從目標反射的回波增強。而來自地形背景回波、各式裝置的電磁波或敵方的干擾波都讓後端處理困難重重，包括高動態範圍(Dynamic Range)、相位雜訊(Phase Noise)、系統穩定、分離諧波(Isolation and Spurs)等²⁸。為此，AN/SPY-6使用數位化的後端處理組件，包含雷達波數位化(透過類比/數位轉換器[ADC]，使得偵測速率、信號動態範圍都增加)與數位化的自適應波形(Adaptive Beamforming)應用，將每個天線單元接收的回波轉為數位信號，並由數位波束合成來處理所有陣列天線回傳的數位信號而形成波束，以對抗複雜電磁干擾(Complex Electromagnetic Interference, EMI)，俾利在複雜干擾下依然能有效偵測到小型高速移動目標的回波²⁹。

數位波束合成的核心技術是基於單一頻率計算的發射數位波束形成技術，以及基於

數位/類比(A/D)轉換的接收數位波束形成技術。發射時，由即時信號處理機產生每個天線單元的振幅、相位程序，對各T/R組件的信號產生器進行控制，產生一定頻率、相位、幅度的射頻信號；輸出至對應的天線單元，最後由各陣列的輻射信號在空間合成所需的發射向量圖；接收時，每個T/R組件各單元的微波信號，經過降頻形成中頻信號，再經中頻採樣處理後輸出回波信號³⁰。

多路數位T/R組件輸出的大量回波數據，通過高速數據傳輸系統傳送至即時信號處理機，處理機完成自適應波形和軟體化信號處理，透過數位波束合成能增加波束成形的彈性，提供AN/SPY-1無法比擬的高靈敏度和能量資源管理(Time-Energy Management)、增加信號的動態範圍等。以AN/SPY-6相比AN/SPY-1D(V)，其靈敏度提高了30倍，如果沒有這項技術，在濱海或密集電磁干擾環境下，雷達效率肯定無法提升³¹。

(二) T/R模組採用氮化鎵半導體材料，提高功率與可靠度

傳輸/接收(T/R)模組為可發射雷達信號的獨立單元，該模組性能須包含：

- 第一、模組間的訊號振幅與相位一致。
- 第二、訊號振幅與相位的穩定性。
- 第三、功率轉換效率提高。

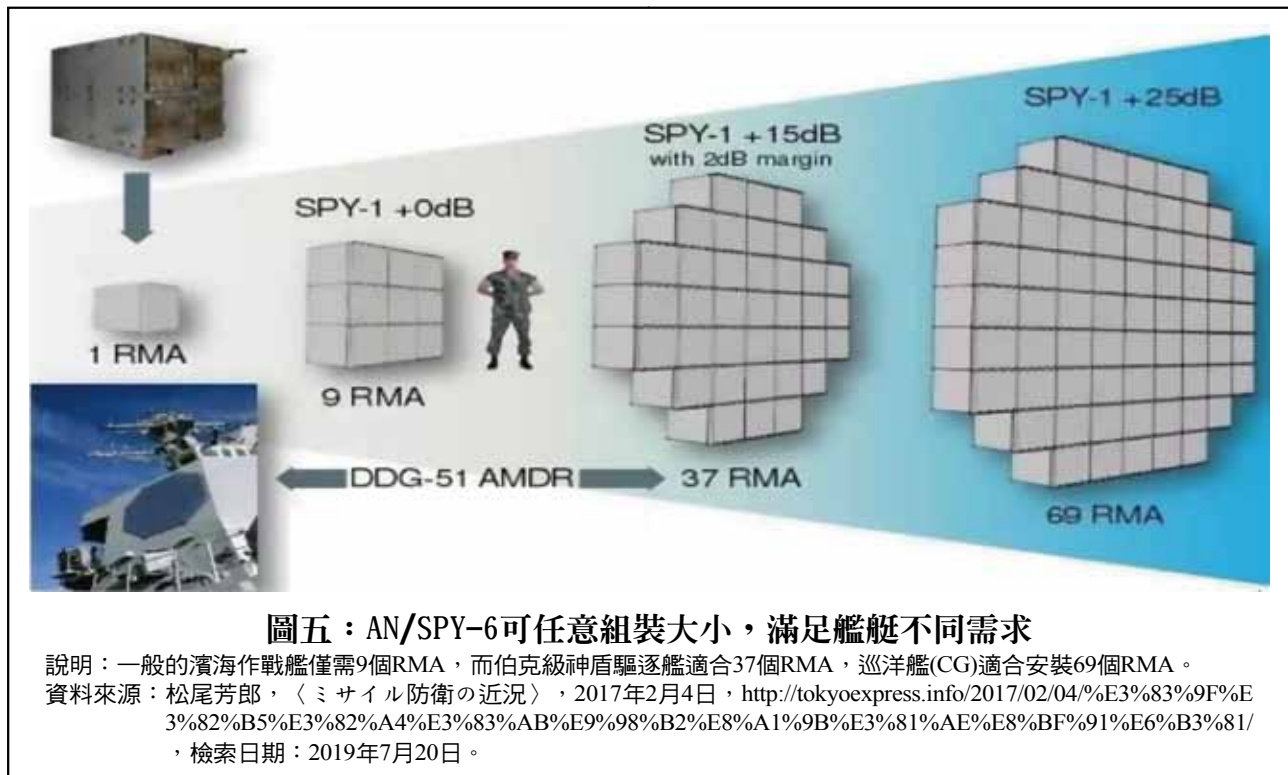
註27：Raytheon，〈Air and Missile Defense Radar (AMDR)〉，2015年11月30日，<http://www.raytheon.com/capabilities/products/amdr/>，檢索日期：2019年7月10日。

註28：GlobalSecurity.org，〈AN/SPY-4 Volume Search Radar〉，<https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/vsr.htm>，檢索日期：2019年7月10日。

註29：MDC，〈相控陣概述〉，<http://www.mdc.idv.tw/mdc/information/par.htm>，檢索日期：2019年7月10日。

註30：Peter Delos(ADI)，〈Digital Beamforming Techniques for Phased Array Systems〉，https://ez.analog.com/cfs-file/key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-02-22/01_2D00_25_2D00_17BeamformingforPhasedArrayWebcast.pdf，檢索日期：2019年7月10日。

註31：Tamir Eshel，〈Raytheon's next generation naval radar passes milestone〉，2015年5月12日，https://defense-update.com/20150512_amdr_cdr.html，檢索日期：2019年7月10日。



相比傳統雷達的大量搜索雷達中的模組，AN/SPY-6使用T/R模組可產生高功率電波頻率，且搭配使用氮化鎵材料以降低能耗與冷卻效率。AN/SPY-6採用氮化鎵半導體材料，在T/R模組中，不僅體積縮小也提高功率，是AN/SPY-6的一大創新³²。

氮化鎵(GaN)是一種較新半導體材料，原子體積約是傳統砷化鎵(GaAs)的一半，而成本僅砷化鎵的百分之六十六，且氮化鎵對於輻射環境的穩定性高，其電晶體比起砷化鎵的主要優勢是具備更高的功率容量和功率密度，相比上一代的砷化鎵設備，雷達在較小尺寸的同時，具有更寬的工作頻帶、更大的輸出功率、更強的訊噪比、更高的溫度、電壓耐受力以及更好的導熱性和導電性，是

極為理想的功率放大器(已應用於電戰干擾機、愛國者雷達等)³³，更使得雷達偵測範圍提高至原先的1.5倍，且其平均故障間隔時間延長10倍。

(三) 模組化設計

美國海軍的新一代綜合電力系統採用了開放式的結構，整個系統被分為六個子模組，可由不同的公司單獨研製，不但減少了研發成本與時間，可升級與擴充性亦大幅提升系統全壽期，AN/SPY-6壽期可達40年。隨著協同作戰能力(CEC)、海軍一體化火控防空作戰能力(NIFC-CA)、一體化防空反彈道飛彈能力(IAMD)以及岸基縱深攻擊能力的整合，美國海軍整體戰力將日漸完備。

AN/SPY-6雷達系統基本組成單位為雷達

註32：同註26。

註33：Raytheon，〈No blind spots〉，<https://www.raytheon.com/news/feature/no-blind-spots>，檢索日期：2019年7月10日。

模組裝配件(RMA)，RMA模組能堆疊、根據任務要求組成形狀各異的大型或小型雷達(如圖五)。功率上，37個RMA組成的AN/SPY-6(V)相當於SPY-1D(V)加15分貝的增益(依目前合約要求，是SPY-1D(V)加15分貝的增益，但是也可以將雷達任意組成，如9個RMA等效SPY-1D(V)；69個RMA等效SPY-1D(V)加25分貝的增益)³⁴。模組化設計最大優點在於大幅降低系統維護與除錯時間。

肆、AN/SPY-6相較於我國現行艦載雷達之作戰優勢

目前我國海軍所使用的艦載防空雷達皆為機械旋轉式的傳統天線，故對於目標處理能量、速度、更新與計算較慢，而AN/SPY-6計算資源較傳統天線更多、更穩定，海雜波抑制能力也更強；更由於我海軍的雷達系統零附件有消失性商源的危機。而AN/SPY-6的模組化設計，讓維修簡便快速之外，尤考量艦艇在海上需長時間服役，而裝備亦需長時間開啟，所以裝備系統高可靠度益形重要。SPY-6雷達相關優勢如下：

一、目標更新率更高

我國海軍基隆級艦使用SPS-48E 3D對空搜索/監視雷達，該雷達頻率掃描方式是透過發射機週期變換頻率的波束相位，使波束在垂直軸方向進行往復式掃描，鑒於頻率掃描只能讓波束在垂直軸進行規率掃描，而且雷達頻率捷變有限³⁵。例如我軍基隆級艦經

常部署在偵巡區域的邊緣，以便延伸偵搜距離。在任務中，倘若我方艦船必須駛向公海(距離本島約180浬左右)執行任務，在有他國的反潛巡邏機前來監視我行動時，我海軍艦船雖能全程掌握，然因海軍雷達為機械旋轉式與2D天線，目標位置尚不夠精確，且目標更新率亦不夠理想。因此，AN/SPY-6為T/R模組相位陣列雷達，由搜索模式轉為追蹤模式僅需0.00005秒，目標更新率大幅提高，除上、下鏈傳資料不易脫鎖外，更能夠攔截高性能飛機和超音速攻船飛彈，增加戰場存活機率。

二、偵追目標更多、防禦力更強

在歷次演訓中，若設計場景為多彈或多機的飽和攻擊，就海軍現有雷達能力，會受到相當大的限制；另在目標鎖定方面，必須在搜索雷達掌握後，交付射控雷達對目標實施攻擊，其偵追目標的距離有限、反應時間過慢，若威脅升高至對我猝然攻擊，我方反應不及將受重創。

AN/SPY-6雷達最大偵測距離超過400公里，與SPY系列相同，亦具敵我識別(Identification Friend or Foe, IFF)、非共同目標辨識(Non-Cooperative Target Recognition, NCTR)、搜索帶追蹤(Track While Scan, TWS)、動態目標檢測(Moving Target Indicator, MTI)、脈衝都卜勒雷達(Pulse Doppler Radar)回波運算能力³⁶。此外，AN/SPY-6雷達更具有全時段、360度全方位全空

註34：CAPT Okano(Program Executive Office for Integrated Warfare Systems)，〈AN/SPY-6(V) Air & Missile Defense Radar〉，<https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/Exhibits/SNA-AboveWaterSensors.pdf?ver=2017-01-12-142032-183>，檢索日期：2019年7月10日。

註35：MDC，〈AN/SPS-48 3D三維對空監視雷達〉，<http://www.mdc.idv.tw/mdc/navy/usanavy/E-Radar-SPS48.htm>，檢索日期：2019年7月10日。

註36：CMANO-DB，〈AN/SPY-1B MFR〉，<http://cmano-db.com/sensor/1507/>，檢索日期：2019年7月10日。

域內自動跟踪數百個目標的能力(四面雷達加總)，能力遠大於基隆級艦的SPS-48E，僅能跟踪100個目標；另與現用神盾系統使用的SPY-1雷達相抵，AN/SPY-6跟踪目標數比起SPY-1提升6倍、導引攔截彈(同時接戰數量)是SPY-1的3倍，比原有的SPY-1可探測距離更高了2.4倍，靈敏度更是SPY-1的30倍³⁷，因此能有效應對多彈飽和攻擊。

三、抗干擾能力強

AN/SPY-6雷達擁有比SPY-1系列更高的工作頻寬、飛彈識別能力和雷達波束轉換速度、穩定性與波束指向變換速度，正由於其使用先進的雙波段數位波束合成(Digital Beam Former, DBF)、GaN製作的T/R模組，以及可任意重組成更大型雷達。AN/SPY-6透過網路達成多部雷達組網、節點編制、工作調配、工作頻段、信號參數和處理控制，成為集合預警、隱身探測、對空、對地、火控、電戰、通信的整合型雷達。是故AN/SPY-6可以在嚴重的電子干擾(包括無源和有源干擾)、海浪雜波以及惡劣氣象環境下正常工作。依據過往經驗，我軍在複雜電磁波環境下的演訓場景下，當帶有電戰夾艙或天干擾機干擾情況下，即便我方有抗干擾作為，仍會讓我雷達在使用操作與目標掌握上受到一定限制，所以抗干擾能力對我軍現行雷達性能提升至關重要。

四、可靠性高

我海軍現役雷達大部分多為20多年前由美軍交付，或是由船廠直接建置，儘管在功

性能上已有提升，但欠缺模組化概念，並且也將面對消失性商源的危機。當故障問題發生後，艦船維修不但受到限制，且須泊港由廠方人員上船維修，無形中影響艦船戰力與妥善率。

相較而言，SPY-6雷達系統能夠在無後勤保障的情況下，在海上可靠地持續運作40~60天，採用模組化結構，配置靈活，且將近百分之九十五的陣列維護僅需要兩項工具，技術人員即可在6分鐘內換裝完畢，其特殊更換單元更是比SPY-1減少70%，後勤維修方便，節約泰半不必要的維修成本。AN/SPY-6具備兩種功率狀態，在高功率狀態時，所有雷達資源則全部可用；當驅逐艦不要求完全能力時，雷達可在較低的功率狀態下操作，減少能量消耗，以適應並執行戰區任務。

五、精準掌握高空快速及匿踪目標，強化作戰縱深

鑒於海軍現有對空搜索雷達脈波寬度與來復率等問題，致使對高、空快速及匿踪目標無法及時且有效掌握；而神盾系統雷達後端同時結合S/X波段，等於是同時處理兩個不同頻率與脈衝回復率的雷達信號。X波段使用高脈衝回復率，以盡快確認目標信號，而S波段則使用中脈衝回復率，確認同一個接觸信號的確實距離，然後將兩個雷達信號送入同一個濾波處理器。如此，雙波段雷達就不會發生選擇脈衝回復率的兩難³⁸，使探測並確認高空、快速目標及匿踪目標的速率

註37：李思平，〈伯克級Flight III SPY-6雷達完成第二次測試！比SPY-1靈敏30倍〉，《尖端科技軍事雜誌社》，<http://www.dtmtdatabase.com>，檢索日期：2019年7月20日。

註38：MDC，〈DBR/AMDR/EASR相位陣列雷達〉，<http://www.mdc.idv.tw/mdc/navy/usanavy/amdr.htm>，檢索日期：2019年7月10日。

大幅提高。

我國現用海軍雷達絕大部分都無法掌握與反制高速飛彈，且現代戰鬥機都在遠距離外投射飛彈，傳統火砲早已無法應付；而新型相列雷達既可遠距離計算飛彈、戰鬥機與巡弋飛彈彈道，且多具有遙控接戰的能力，除了導引率的提升，並能集中波束來增加平均功率，亦可迅速反應與反制，且不需多段式人為操作，補足早期以射控雷達導引火砲攻擊的不足。

伍、結語

AN/SPY-6在通過一系列複雜的作戰測評，包含隨機出現的綜合防空、反飛彈目標、衛星、戰機等，均能進展順利，透過AN/SPY-6雷達研製過程可發現，美海軍逐步朝向開放式架構與模組化設計，有了AN/SPY-6雷達的加入，以及未來持續的升級改造，神盾系統必將發揮更為優異的作用。

在美國確立「印太戰略」後，神盾艦多次出現於南海宣示其國威，例如2019年4月28日，美軍兩艘作戰艦航行經臺灣海峽，並在航行中開啟自動船位回報系統(AIS)³⁹，從監控雷達可清楚看到神盾驅逐艦沿著臺海中線向北行，並高調劃出戰略底線。此「印太戰略」舞劍(艦)中共的「一帶一路」戰略，美軍所面臨的挑戰明顯大於際遇，尤以今日面臨國際秩序重整，亟欲制衡中共崛起，除

了接納盟邦之外，亦期望相關地緣國家都能擁有自我防衛的能力與決心。盱衡我國嚴峻的地緣政治情勢，印證《孫子兵法》所說：「上兵伐謀」，國軍實有必要建立足夠的自我防衛能力，以維持地緣政治穩定。

為了國家永續發展，國防武器自製的重要性不言可喻，「國艦國造」係國家當前重大政策及未來方向。然就現階段而言，美國應該不會將神盾系統(含SPY-6雷達)軍售與我國，此時中科院即扮演舉足輕重的角色，如何積極協助國軍強化國防武器研發能量，達成國軍建軍備戰之長遠目標⁴⁰；再藉由「國防產業發展條例」推行，輔以關鍵技術的突破與創新，研發「武器精、戰力強」的高性能武器系統，是一條必須且必經之路，有賴國人共同努力。期許我國未來持恆透過軍民科技發展，提升產業技術研發能量，真正達成「國防自主、科技自主」之目標。 ↓

作者簡介：

謝佳穎小姐，海洋大學機械與機電工程學系90年班、臺灣大學海洋研究所物理組碩士95年班，曾任國家災害防救科技中心工程師、財團法人資訊工業策進會分析師，現服務於國家中山科學研究院。

劉書麟先生，備役海軍上校，海軍官校78年班、國防大學海軍指揮參謀學院88年班、國防大學戰爭學院96年班，曾任海軍司令部參謀官、康定級艦艦長、戰隊長、副艦隊長及國防部副處長，現服務於國家中山科學研究院。

註39：Idrees Ali，〈Two U.S. Navy warships sail through strategic Taiwan Strait〉，REUTERS，2019年4月29日，<https://www.reuters.com/article/us-usa-taiwan-china-military/two-us-navy-warships-sail-through-strategic-taiwan-strait-idUSKCN1S5003>，檢索日期：2019年7月10日。

註40：國家中山科學研究院，〈業務介紹〉，<http://www.ncsist.org.tw/csistdup/aboutus/page02.html>，檢索日期：2019年7月20日。