

「現代化雷達」：
是否一種雷達即可勝任全部任務？
Modern Rader：Can One Radar Fit All？
取材：《火力雜誌》2016 年 11 - 12 月號
作者：Retired Col. Kurt Heine、Dr. Phil Reiner
譯者：耿國慶

提要

- 一、美國陸軍當前使用之雷達系統既廣泛且多樣化，各別雷達之科技已超越時代，許多軍事規畫者企圖合併雷達系統至共同平台，期能執行多重任務。基於現代化「多重任務雷達」係集合多重目標特性為需求依據，其他如機動力、運輸力、持續力與重量權衡等，亦相對重要。目前正值新科技可支撐功能合併且實現機率大增之際，美軍開始思考單一雷達如何解決、滿足現在與未來需求？究竟多久方可研發成功適合全部任務之雷達系統？
- 二、美國陸軍自 2002 年初開始規劃「多重任務雷達」，目前仍持續發展，研發團隊將由雷達（物理、數學）方程式為起點，考量任務需求、電子系統整合、先進感測器必要條件、材料科學、設計彈性、其他技術、生命週期、科技與後勤等相關問題，期能律定研發構想與方向，盡早達成既定目標。
- 三、國軍砲兵「機動目標雷達」長期有編無裝，影響防衛作戰火力支援任務甚鉅，為能有效解決重大目標問題，除廣蒐商情外，亦委託國家中科院積極研發。「他山之石，可以攻錯。」，美軍「多重任務雷達」研發之精神、思維與經驗，可供國軍研發參考。

關鍵詞：現代化雷達、多重任務雷達（MMR）、敵對目標獲得（CAT）、主動電子掃描陣列（AESA）、被動電子掃描陣列（PESA）、「主動相位陣列雷達」（APAR）

前言

自第二次世界大戰起，無線電偵測與波紋（雷達）在指導戰爭與國土防衛作為上產生重大衝擊。時至今日，將單一平台雷達系統合併其他雷達功能且進化為多重用途，成為當前最迫切之目標。本研究就當前各種雷達系統之性能為基礎，探討未來致力重要方向，期能決定美軍何時「可以」（或「將會」）實現既定目標。

今日雷達系統提供空中、海上、基地與空間防衛、目標追蹤與提示、空中交通管制、天氣監視、射彈方向與信管、環境感知與其他數項功能，無論作戰、戰術或軍事戰略運用，皆可適時啟動雷達系統與裝備附件，俾能滿足各種武器系統與平台之支援需求。惟作戰物資開發須面對寬廣多樣化的選擇與限制，方

可符合各種任務需求。此外，目前科技快速提升，雷達科技與論述進展順利，務必儘快推動雷達系統硬體與軟體共同升級。

基於各別雷達之科技已超越時代，達到特殊性能、價格、體積與能力之需求，惟增大技術能力連帶影響系統價格。基於許多軍事規劃者企圖合併雷達系統進入共同的平台，期能執行多重功能。例如，美國陸軍防空雷達必須有能力戰勝全範圍的敵空中戰略飛彈威脅、作戰與戰術狀況。威脅包括戰術彈道飛彈、巡弋飛彈 (Cruise missiles, CM)、無人飛行系統 (Unmanned aircraft systems, UAS)、火箭、砲兵與迫砲 (Rockets artillery and mortars, RAM)、定翼與旋翼武器等。惟就設計考量而言，雷達任務以綜合目標特性為需求依據，致影響達成任務所需之體積、重量與功率等條件，且礙於預算額度與軍事迫切性等因素，迫使美軍接受以價格考量決定之「實際壽命」(Real life)。無庸置疑，許多「非功能性需求」與其他因素亦造成風險，如機動力、傳輸力、持續力與重量權衡等，在新式雷達系統之獲得上仍相對重要。基於新技術成熟之潛在條件，不僅顯示實現功能合併之能力，且倍增達成目標之機率。本研究聚焦問題在「如何使用單一雷達解決與滿足當前與未來之需求」？「究竟需要多久才可真實研發成功一部適合全部任務之雷達系統」？

雷達歷史

在 19 世紀初，由 Heinrich Hertz 實驗展示金屬目標反射無線電波，直至 20 世紀初德國發明家 Christian Hülsmeyer 設計與製造一種簡單船用偵測裝置，目的在協助大霧中避免碰撞。第二次世界大戰之前，雷達為首次出現工具，使用低頻率 20-30 兆赫 (Megahertz, MHz) 範圍無線電波段，屬於現在的 AM 與 FM 無線電波段。第二次世界大戰開始後，英國在東部沿岸裝配 21 部早期預警雷達，利用網狀系統可涵蓋 300 公里範圍且最大負載功率達 350 千瓦 (KW)，該系統為雙靜電干擾，重點在傳輸與接收天線系統採分離設計。1935 年德國電子專家發明「多重腔孔磁電管」(Multi-cavity magnetron) 後，雷達性能快速躍前。至 1937 年，英國物理學家 John Randall 將其發揚光大。

自發展 10 吉赫 (GHz)「短波」(X 波段) 後，雷達系統產生重大變革，因系統具備緊緻且傳輸方便之優點，故可安裝於飛機上操作。相對的，因為「磁電管」(Magnetron)、傑出的「外差式」(Heterodyne) 無線電接收與傳輸機之發展，為雷達信號提供重要的產生、偵測、增幅與處理功能。1960 年貝爾實驗室 (Bell Lab) 運用此種技術製造第一部「主動電子操控陣列雷達系統」(Active electronically-steered array radar system)，其中一個進展為提供有效技術取代可旋轉的笨重機械，且將電子操控陣列小型化。最重要的是貝爾實驗室科學家利用提升信號處理技術執行長距離偵測，產生目標追蹤資料、識別射彈或誘騙物體與

提供追蹤向外飛行的攔截飛彈等，許多技術仍沿用於今，如「現代化信號處理技術」即為貝爾之前衛創作。

1963 年 John Guin 發明 Gunn「整流半導體」可快速產生結果，開啟雷達系統革命性改變，至 1969 年則分別由 Jolius Lange 與 Cheng Wen 發展為「微波帶狀線條」與「CO-平面波導管」。另有兩項發明以小尺寸微波裝置最著名，如 1975 年由 Ray Pengelly 與 Jams Turner 發明之「整體微波整合電路」(Monolithic Microwave Integrated Circuits, MMICs)，此裝置通過超過「因素 10」(factor of 10)標準，為結合信號處理部署於載具上之雷達研發提供配置方法，且容許雷達系統縮小體積與重量。雷達最終的變革在 1970 年後期至 1980 年初期，由數個研發團隊發展「固裝」(Solid state)式相位陣列雷達系統，此項革新奠定所有現代化雷達之基礎。

當前「現代化軍事雷達」之運用快速擴張，將導致高度進化與科技集中，在少數 MHz 至 100sGHz 頻率範圍，可跨越電磁光譜全部路徑，提供各波段作業能力。雷達目前可執行廣泛多樣之複合功能，如目標偵測、分類與辨識複合目標波紋與追蹤頻率跳躍、干擾、增加雜音、截斷拒絕與其他等。目前商業電子與通信，已由「全類比」設計進化至「混合類比/數位」設計，並持續推動雷達系統能力與成效。

雷達信號通常經由逐漸增強靈敏度、信號格式化與調節規劃、脈衝與各種不同方面等，持續將其變成極度複合，以獲得在更多縮小光譜內要求廣泛帶寬之效果，增大秘匿戰區之商業波段使用。惟材料之極限亦將增大阻礙，以建構「主動電子操控陣列」(Active electronically-steered array, AESA)為例，須依賴提升高速、低損失之「半導體」(Semi-conductor)與其他材料，方可提供「相位陣列天線」執行龐大的光束形狀與光束操控。基於複雜的操作環境範圍必須符合任務條件，包括：地面、海上混亂、干擾與衝突、多餘的無線電傳輸信號與其他類型之電磁波雜訊等，致「現代化雷達系統」必須具備徹底執行複合目標之能力，且就目前許多使用材料與技術而言，已可降低雷達橫跨截面。

當前雷達系統

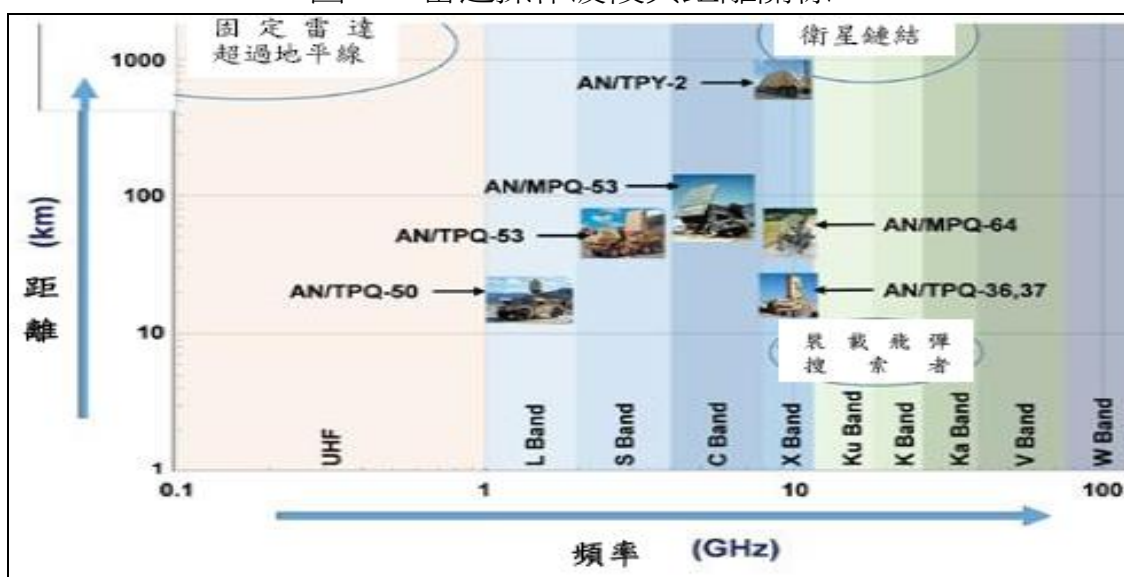
當前陸軍使用之雷達系統既廣泛且多樣化(表一)，其中包括若干砲兵部隊所熟悉的短、中、長距離系統。為符合議題，本研究僅納入「陸基雷達系統」(Ground-based radar system)，某些用於航空器與部分飛彈系統之雷達，則未納入。表一內僅顯示各型陸基雷達之任務、操作波段、有效距離、電力需求與(或)最大輸出功率等一般性能，因此部分系統之關鍵參數可能存在些許差異。陸基雷達系統通常限制在 L、S、C 與 X 波段波長(頻率)，範圍由 1GHz 延伸至 18GHz，原因有待探討。然就表內資料顯示，「長檢波距離」相對「電力需求」較大，惟

偵蒐距離與機動力之關係，為條件交換經常忽視之因素。通常長距離需求高電力惟相對系統則機動力較差，如 AN/TPY-2 為巨大的系統，為能運輸雷達與分置 1.3 兆瓦（MW）發電機，需要將雷達固定在一部重型牽引拖車（「重型展開機動戰術載重車」－Heave expanded mobility tactical trucks），以滿足長時間之作業需求。（雷達操作波段與距離之關係，如圖一，圖中部分系統因考量飛彈搜尋任務，致使用同款雷達固定座。）

表一 共用陸基防空與野戰砲兵雷達系統對照

雷達型式	任 務	操 作 波 段	距 離（公 里、英哩）	電 力 需 求 （ 千 瓦 ）	支 援 需 求
AN/TPQ-36	反火力戰目標獲得/迫砲	X	24 公里 15 英哩	10 千瓦 >23 千瓦 最大傳輸	2 部悍馬車 9 人操作
AN/TPQ-37	反火力戰目標獲得/火 箭、砲兵、迫砲	S	50 公里 30 英哩	60 千瓦 >120 千 瓦 最大傳輸	1 部悍馬車 1 部 M925A2 12 人操作
AN/TPQ-50 ★（如圖二）	反火力戰目標獲得/火 箭、砲兵、迫砲	L	24 公里 15 英哩	50 千瓦	人攜式 2 人操作
AN/TPQ-53	反火力戰目標獲得/火 箭、砲兵、迫砲/	S	10 公里 6 英哩	10 千瓦	1 部中型戰術載具 5 人操作
AN/MPQ-53	飛彈/巡弋飛彈，愛國 者導引，電子反制-反 制-測量	C	100 公里 60 英哩	2x150 千瓦 100 千瓦	1 部 M983 牽引車 1 部 M860 半拖車 4 人操作
AN/TPQ-64 ★（如圖三）	低標高、中距離防空	X	AN/MP-64 40 公里 36 英哩 AN/MP-64F1 75 公里 47 英哩	10 千瓦	1 部悍馬車 2 人操作
AN/TPY-2	彈道飛彈偵測，終端 高標高防空目標與追 蹤	X	1000 公里 600 英哩	1300 千瓦	2 部重型展開機動 戰術卡車 8 人操作

圖一 雷達操作波段與距離關係



圖二 AN/TPQ-50「輕型反迫砲雷達」(LCMR)



圖三 AN/MPQ-64「哨兵」(Sentinel) 防空系統雷達



資料來源：表一、圖一至圖三為原文附圖。

就歷史觀察，每一部雷達皆依據特殊任務設計，如技術改良建立在「專案經驗累積」之基礎上，即可升級增大距離與解析度。困難度在任務範圍、裝備應如何應變、維修、設定全部威脅種類與遇到威脅時相關應變作為等。「敵對目標獲得」(Counter target acquisition, CTA) 雷達原先設計為反砲兵連、反制砲兵與迫砲，然而基於「不對稱」之威脅，如飛彈與無人飛行系統，將刺激發展嶄新的系統能力、追蹤更多類型目標、連結整合空中與飛彈防禦狀況，以及指示相關系統傳輸其他防空指管單位，並授予「瞭解」完整防空作戰圖像之權力，俾利指揮官運用任何管制武器向指定之可疑目標射擊。

預算額度為現實問題，預算需求將影響陸軍實現增大支援效能、後勤、系統數量與經由聯合任務減少系統重複，因此 2002 年初規劃未來「多重任務雷達」(Multi-mission radar, MMR) 時，即要求須適時支援空中監偵、防空與敵對目標獲得 (CTA)、空中交通管制等任務。「多重任務雷達」發展目的主在彌補當前雷

達之「傳統間隙」(Traditional gaps)，包括：多重任務功能不足、單一雷達 360 度涵蓋、精確敵對砲兵與迫砲能力、威脅分類與明確認證等，現階段多重任務（模式）雷達仍持續發展，即使目前無法達成全部目標，惟可實現百分之百之防空任務。

雷達系統之物理學

試想「一級方程式」(Formula One Race) 賽車中，有人執意使用小型廂型車參賽，惟此型車輛無法在時速超過 100 公里時反複過彎，致下場淒慘。問題癥結在小型廂型車並未依據「一級方程式」任務設計，不符合賽車物理學要求。就如同雷達設計由「物理定律」控制，要求執行如：傳輸電力、增強傳輸天線、雷達橫跨扇形、雷達尺寸、孔徑、需求頻率帶寬、雷達質詢信號型式與預期任務至完成之演算執行等相關參數。此種參數提供交換空間，以決定系統如何執行與抗衡目標型式與距離、溫度、雷達噪音、雜訊與環境影響。當開始相關討論後，研發團隊將確定基本雷達距離方程式、瞭解雷達系統物理基礎，俾決定製造方向、確保執行功能與效果。基於方程式為雷達設計之起點，包括物理或數學原理在內，皆不允許任何變更。

基本雷達距離方程式

就概念而言，每部雷達發射天線傳輸與接收無線電振動外在的脈波，蒐集雷達視野內之目標反射信號。大多數的現代化系統，發射與接收天線「完全相同」(One and the same)，特殊開關則使用在「傳輸模式」與「接收模式」之交替。如全部傳輸脈波進行順利時，無線電頻率能源將反射目標再經由接收與分析。

一、基本雷達方程式所顯示返回信號大小，視下列四個關鍵變數而定：(一) 傳輸時的輸出功率；(二) 增加天線；(三) 操作波長；(四) 目標距離。

二、為將雷達最終信號與雜訊比對等，四項關鍵變數中亦包含數項限制，影響現代化雷達體積與功率之需求，且迫使美軍列出限制範圍與需要何種類型的雷達系統。如能符合「遠征的」、小型的、輕量化與價格低條件者將為首選。惟如何「小型化」，將依據討論所得之限制因素推動。限制因素分述如下。

(一) 輸出高功率與增加天線：高功率與增加天線後，返回信號變大（大信號為了雜訊比例）。惟相反的，傳輸與接收更遠的目標時返回信號將變小，即功率向外的距離減小了返回信號之強度。例如，雷達傳輸全部功率 1 千瓦，返回天線功率僅 100 瓦，當 1m^2 目標在 1 公里距離，最佳的返回信號為 100nW/m^2 （事實上信號發出每 1 瓦特，僅可返回接收十億分之 1 瓦特）。就實際合約條件而言，顯示美軍需要一對增大天線，盡可能發出大量傳輸功率（惟最終仍將面對如何驅動拋物線狀「共同雷達掃描系統」裝置的反射與相位陣列天線）。另須獲得最佳的雷達返回信號，則須增大接收天線盡可能蒐集返回信號（反射距離

示意，如圖四）。圖中「藍色」脈衝表示離開或傳輸之雷達信號，「綠色」脈衝則為由目標返回之信號，可顯示信號因雷達波向外傳輸擴大而自然減弱，惟此反射發生與雷達系統之類型與體積（尺寸）無關。

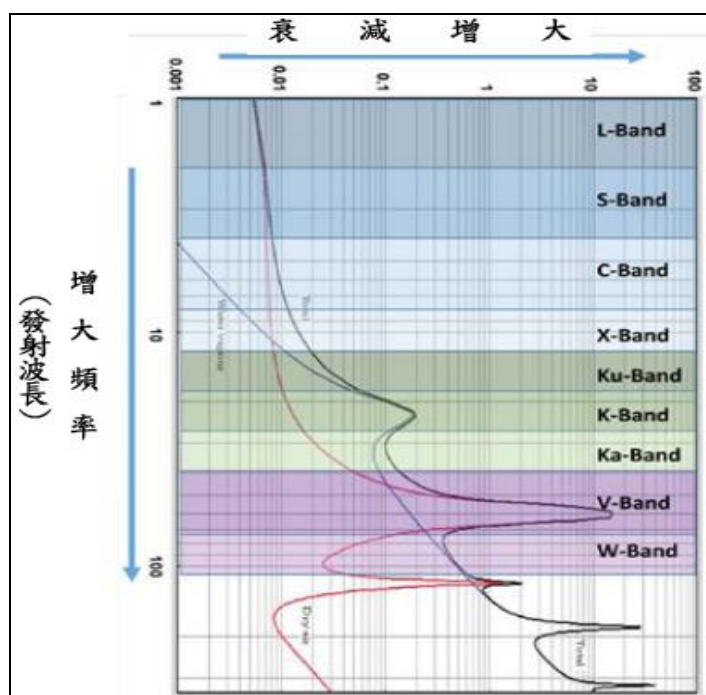
圖四 距離影響目標返回信號示意



資料來源：原文附圖

（二）返回信號變化絕對為「波長之平方」：返回信號變化絕對為「波長之平方」，為較小之特殊限制。表示可由增大波長達成增大距離，或採取加大傳輸與接收天線方式。如 S 波段雷達作業頻率為 4-8GHz（波長為 8-4 公分），缺少偵測長距離目標功能之先天條件；X 波段雷達作業頻率則為 8-12GHz（波長為 4-2.5 公分）。就雷達規格而言，X 波段較 S 波段雷達構成要素（體積項目）大兩倍，惟依案例推理（如圖五），天氣構成之要素（氧氣與水氣）仍將吸收雷達頻率能量。圖內「黑線」顯示高頻率、更多的合併發生，即使較小的傳輸能量即可到達目標位置。為能在既定距離內偵測目標，必須傳送更大能量或切換至低頻率，尤其在特殊地區波長吸收力特強，對雷達系統操作而言不切實際（圖中所顯示高尖端位置，為 K 與 V 波段非典型使用於陸基與海基雷達系統之理由）。

圖五 雷達信號之大氣衰減與頻率功能示意



資料來源：原文附圖

就前述論述，返回信號變化絕對為「波長之平方」，為現代化雷達體積與功率需求之重要考量。就「體積」而言，將由任務需求強制規定，例如希望獲得與追蹤接近 120 英哩偵測距離之彈道飛彈，同時需要偵測火箭、砲兵與迫砲大量之射彈（12-36 英哩），雷達設計為了距離與解析必須交換體積與功率（與作業頻率）。例如 AN/TPQ-53 為活動式 S 波段雷達系統（如圖六），為偵測火箭、砲兵與迫砲僅輸出少量 8 千瓦；AN/TPY-2 為偵測彈道飛彈距離獲得較佳之目標解析，使用 X 波段頻率作業與大功率輸出（典型輸出功率為 1.3MW），此兩種系統實為額外考量之典型範例，雷達系統基於體積與功率需求，迫使後勤進度須與機動性同步。因此 AN/TPY-2 系統需要多重牽引拖車，包括：發電機拖車、目標指揮模組與其他輔助（附屬）裝備。AN/TPQ-53 則為高機動性、自主性、雙重載具平台，無論何時皆可使用單一載具，惟該雷達並未列入未來作戰配備。

圖六 AN/TPQ-53 反火力戰目標獲得雷達



資料來源：原文附圖

（三）環境影響：「環境」（大氣擴散）影響為重大之限制，通常雨、雪、沙塵與煙霧在空氣中散布，雷達發送信號與目標返回信號強度皆減弱（如圖七），且雷達傳輸與接收信號受雨、雪、沙塵與煙霧減弱之情況，遠比想像中嚴重。另一個主要趨勢為雷達系統具備精確決定位置與距離之能力，位置係由若干填滿的雷達波束模型充分啟動，必要時高的天線增益，使填滿之雷達波束可更精確的決定目標位置。至於飛機掃描雷達為何使用「拋物線形狀天線」（Parabolic shaped antennae）？則不列入討論範圍。拋物線形狀提供製造雷達波束以暗示欺騙焦點之形狀，改善目標定位精度。同樣的高增益目前可使用「平板陣列」（Flat panel arrays）已命名為「相位陣列天線」（Phased arrays antennae），陣列由傳輸模組系列針對雷達波束減弱距離設計，優點為提升系統高敏捷旋轉拋物線狀反射器與同時支援更多的雷達功能，亦考量可較少或僅改變較少空間。

圖七 信號因大氣散布額外減低示意

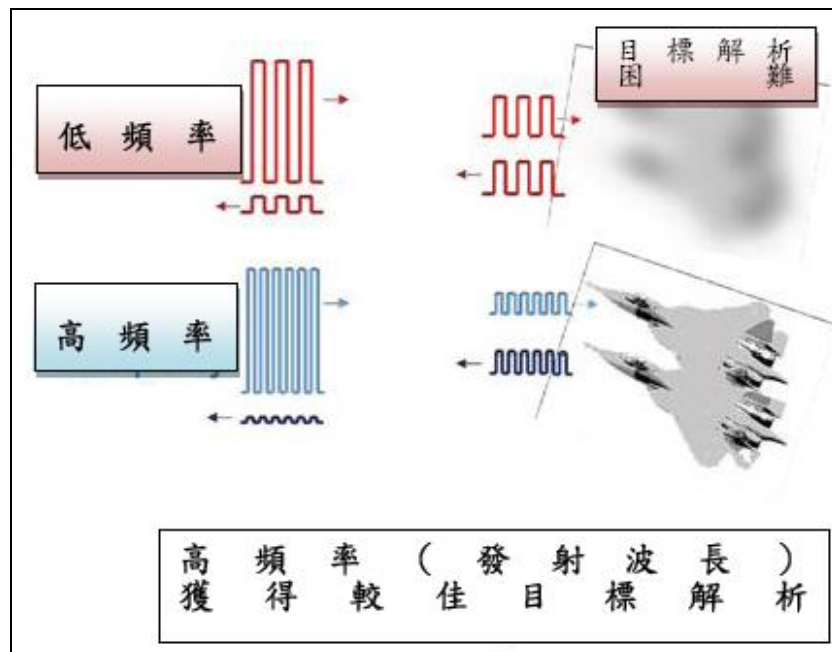


資料來源：原文附圖

三、決定偵測目標距離能力

決定偵測目標距離能力之兩個影響因素分別為：如何發射雷達脈波？雷達操作頻率為何？發射脈波與高操作頻率，可得到較佳之距離解析。同時雷達設計必須有能力提供解析多重、接近的隔離目標且使用精密的目標特徵分辨目標或誘餌。此外，高頻率表示較佳之目標解析與較佳能力可偵測目標之結構上特徵，指出必須針對雷達系統執行之主要交換分析，逐一傳遞我們預期使用低頻率傳輸信號且盡可能去獲得較佳距離涵蓋，惟需要高頻率獲得較佳之目標距離追蹤資料（如圖八），且顯示頻率影響分辨目標之能力。圖內低頻率信號可偵測某些類型目標，惟高頻率信號如分配在低部分則須解析進入兩個分離目標之返回信號。

圖八 頻率影響解析目標能力示意



資料來源：原文附圖

設計雷達：需求為何？

雷達系統次一考量為「預訂任務為何？」，美軍將重點置於需要具備不同偵

蒐距離之能力，惟不同雷達有其不同功能，且此功能領域仍不斷擴大，就現實面而言，難以討論，除非有能力提升科技至成熟水準且具備滿足需求之效能。設計雷達系統務必考量之必要條件，分述如下（其他需求討論則詳述於下一章節）。

一、設計雷達系統時，需考慮之重要因素：（一）天氣監視；（二）火力控制；（三）目標蒐尋與追蹤能力；（四）目標顯示；（五）目標照明；（六）目標辨識；（七）目標追蹤，包括單一目標與多重目標；（八）持續作業或短時間操作能力。

二、雷達必要之物理系統需求能力：（一）掃描能力，包括掃描角度與速率；（二）偵測或照明距離；（三）最大距離之目標解析；（四）目標追蹤速率與精度（如需求為「都卜勒」（Doppler）雷達其精度為何？）；（五）體積、重量與功率（Size, Weight, and Power, SWAP）限制；（六）機動力需求；（七）作業平台需求。

三、支援需求（依據實際要求）：（一）高機動力，如小型、輕量與低功率；（二）大或小的支援編組；（三）與高、低作戰單位之互相聯結性；（四）持續、解析作業；（五）輔助（備援）電力；（六）額外需求；（七）升級能力。

軍用電子系統之整合

「技術化狀態」之軍用感測器擁有史無前例之需求，須達到測量與處理大容量資料，俾掌握相關資料與盡可能提供戰士「戰鬥行動情報」（Actionable intelligence）。感測系統邏輯要求充分結合邏輯與「數位信號程序」（Digital signal processing, DSP）之密集、高速之收發兩用無線電機，講求「功率－對抗－執行」、設計彈性與高保證設計，貫徹滿足終端使用者之需求。美國軍用系統與載具，將容許雷達結合傳統倉庫中多數分離電子輔助系統。

對防空任務而言，目前多數「指向雷達」（Targeting radar）與「監視雷達」（Surveillance radar），其功能與重要性相同。雷達之多數能力中，長距離目標解析能力可快速偵測、評估與執行使用武器之數量與型式，由於增大材料科學、可計算的（摩爾法則－Moore's Law）與其他電子科技等，相關功能之作業時間將逐漸收斂。許多陸軍雷達系統目前已主動趨向多重模式之「主動電子掃描陣列」（Active electronically scanned array, AESA），¹此 AESA 系統充分提供優勢性能，當多重任務同時發生時，可使用各自的「傳輸與接收模組」（Transmit and receive module, TRM）快速處理多重波束，如同步掃描、偵測與製造「掃描陣列」

¹ 美軍「主動電子掃描陣列」（Active electronically scanned array）與「主動電子操控陣列」（Active electronically-steered array）英文縮寫皆為 AESA，惟技術內容不同。參考 Mr.Daryl Youngman, “Fires Radar Strategy,” Fires 2013 March-April（Fires Seminar 2013）。

等。無論如何，系統變為更多「合成體」，將需要增大系統之「數位與狀態邏輯」(Digital-and-state-logic)需求，對返回要求全力回應，歸功於擁有經驗證之成熟軟體解析、發電機、適切預置與「計畫邏輯裝置」(Programmable logic devices, PLDS)。

科技朝向滿足逐漸增加的不同任務

陸軍任務內容重疊(複)之主因，歸咎「不確定敵人」與「不對稱」(Asymmetric)戰爭特性，原本傳統「前線」與「後方」區域之界定方式將不復存在，且預期狡猾敵人之攻擊系統已發展多樣化，傳統彈藥(如迫砲與無人飛行系統-UAS)已提升為高精密之先進飛彈與戰機之可能性甚高，因此為執行作戰而暴增記憶與半導體容量、能力，可證實增大「多重任務」(Multi-role)系統之迫切性。「戰場程式閘門陣列」(Field-programmable gate array, FPGA)與明確結構的「應用特定整合電路」(Application-specific integrated circuits, ASIC)持續擔負重任，將構建網路骨幹之固裝傳輸與接收模組，俾運用於美軍多數之現代化雷達，如「主動電子掃描陣列」(AESA)雷達與眾所周知的「主動相位陣列雷達」(APAR)。複合的相位陣列雷達可將一千個傳輸與接收模組並聯作業，並依賴多樣化的成熟科技進行性能改良，包括：側葉零錯開脈衝重複間隔、頻率靈活、即時波形優化、多種頻率波雜音與目標辨識能力等。

先進雷達感測器之必要條件

設計軍用先進感測器是極嚴苛之考驗，例如某些科技設計限制，將影響雷達的體積、重量與功率，且影響其他如價格、支持度、維持度、靈敏度等之決定。科技限制實例分述如下：

一、高連續資料一流動能力：數位天線科技發展進入類比—數位轉換接收機，且為執行數位過濾要求更多信號分析。

二、複合數學演算：信號預先處理與矩陣演算需要大數據數位信號處理區塊元素，將由數位信號處理器扮演傳統角色遞補。

三、靈敏度因高溫消散：感測系統經常長時間作業，因持續作業必須散熱，否則無法持續任務生命。

四、邏輯密集目的在多重任務電子操控：即使多數軍事任務目前由相同陣列執行，惟在傳輸與接收電子操控之邏輯需求極高。

五、加速與延遲執行：感測器陣列之速度等級、延遲邏輯裝置與全部延遲介面、邏輯裝置一樣，皆影響反應時間與光束排列演算執行。

六、零件使用：感測器系統極複雜且影響甚鉅，即使一部接收進度落後，仍將嚴重影響作業、維持成本與作業準備。

七、使用機械之流暢舒適：如同一百萬邏輯元素整合進入系統設計，將設

計、編輯與眾多的邏輯符號樣本測試等，作為成本與計畫期程之重要驅動程式。

八、信號完整性：接收機將資料提供至最終處理單元時，即使發生少量信號錯誤，對感測器演算仍造成重大影響，因此信號完整對數位元件而言，至為重要。

每一個最重要的創新，皆須經過不斷修正之過程。回想雷達系統在 1970 年進入「單一微波整合電路」(Monolithic microwave integrated circuits, MMIC) 技術後，提供我們減少組件體積與探究縮小雷達系統之道。當時雷達系統依賴沉重中空「波導管」(Waveguide) 系統與類似方形管構造，而「波導管」控制雷達信號由微波源、信號處理器與天線元件起始。「單一微波整合電路」(MMIC) 技術主要整合晶片水準提供降低微波系統體積，並透過極度規律之等級降低損耗波導管與組件。當信號減弱（雜音）發生逆向穿透雷達增幅器時，「單一微波整合電路」(MMIC) 電路可增大進入雷達信號，此技術之關鍵效益在提供產生敏捷之掃描系統（相位陣列雷達）能力，且大幅降低體積、電力與重量，惟天線無法保留原先相同之口徑尺寸。

材料科學改善雷達設計

在材料科學發生有趣的突破性成功，可提供與期盼持續提升雷達設計與技術。例如「變化材料」(Metamaterials)，工程師已確定「變化材料」(如人造的工程材料特性) 在自然界中並非尚未發現，原因在其特性並非等同主要材料之合成特性，而須經由嚴格之結構設計。

「變化材料」將可運用於多種用途，包括：遠端航太應用、感測器偵測與永久性軍事設施監視、智慧型太陽能管理、公共安全、雷達天線罩、高頻戰場通信、高水準獲得天線鏡頭與提供超音波感測器防震之屏蔽結構等。

新式材料之關鍵特點在提供雷達系統掃描 2 至 3 次元之能力，而此點為掃描雷達之兩個基本技術選項。現階段雷達為活動式（通常如此），因為老舊「機械掃描雷達系統」(Mechanically scanned radar systems, MSRs) 天線（前述拋物線形狀碟盤或溝槽波導引）須藉旋轉 360 度涵蓋寬廣戰場視野，已逐步被「電子操控掃描雷達」(Electronically scanned radars, ESRs) 取代。

老舊機械系統由於機械速度致掃描圖像不自然，然而「電子操控掃描雷達」(ESRs) 不論被動或主動相位陣列皆符合電子光束操作。如「被動電子掃描陣列」(Passive electronically scanned array, PESA) 或「主動電子掃描陣列」(AESA)，依據頻率與孔徑尺寸，由一千個獨立增幅器、相位變換與其他伸展交叉天線等組成，將增加部分價格與複雜性。陸軍如何期待以極低價格的雷達技術實現「電子操控掃描雷達」(ESR) 之「廣角」(Wide-angle) 性能？畢竟 ESR 採不同整合方式，通常被指定作為高價值運用。

「變化材料」具備特殊之優勢，預期將可開發嶄新類型，提供簡潔化、輕量化掃描雷達產品，例如：「變化材質表面天線技術」(Metamaterials surface antenna technology, MSA-T)、天線升級輻射功率設計與輔助雷達「廣角」光束操作等。前述性能之重要性，基於傳統天線尺寸與波長相比十分微小，通常僅將大部分信號反射回信號源。A MSA-T 天線作用則遠超過實際尺寸，且具備特殊儲存優勢與「再輻射」(Re-radiates) 能源。

AESA 使用之設計彈性

就前述資料所見，「主動電子掃描陣列」(AESAs) 為創造高適應性操控光束之有效技術，光束將有能力執行追蹤多重目標或對某一點集中電磁能量。設計者為能獲得系統操控性能之全部優勢，致力移動大量信號處理，例如包括波形創造與壓縮、光束列、交互作用與預先處理等，將盡可能進入前送系統輻射元素。「主動電子掃描陣列」(AESAs) 執行可充分運用更多與更多功能，包括並聯的「戰場程式閘門陣列」(FPGA) 邏輯、可加速光束形狀演算、波形適應與增大系統反應時間等。高密度連續之「戰場程式閘門陣列」(FPGAs) 為提升雷達系統性能之適切工具，高邏輯密度可提供單一晶片更多功能，增大「數位信號程序」(DSP) 元素流線型矩陣數學功能與增大彈性，且高性能之 18×18 位元 (bit) 放大器並聯可分離進入 9×9 位元 (bit) 單元，或為了「浮點」(Floating-point) 作業合併進入電力與邏輯效率高的 54 位元 (bit) 放大器。

其他技術考量

主動陣列之感應器日漸激增，主要技術趨勢集中在邏輯裝置。就系統而言，大數量之陣列元件代表更多設計工作、更多光束形狀、演算更多整合與測試，並為系統增加後勤負荷。為能集中多種不同之計算需要，將授予陸軍改裝權限，俾利執行前極與後極處理裝置。針對關鍵感測器需求，程式邏輯須建立過渡設計步驟。

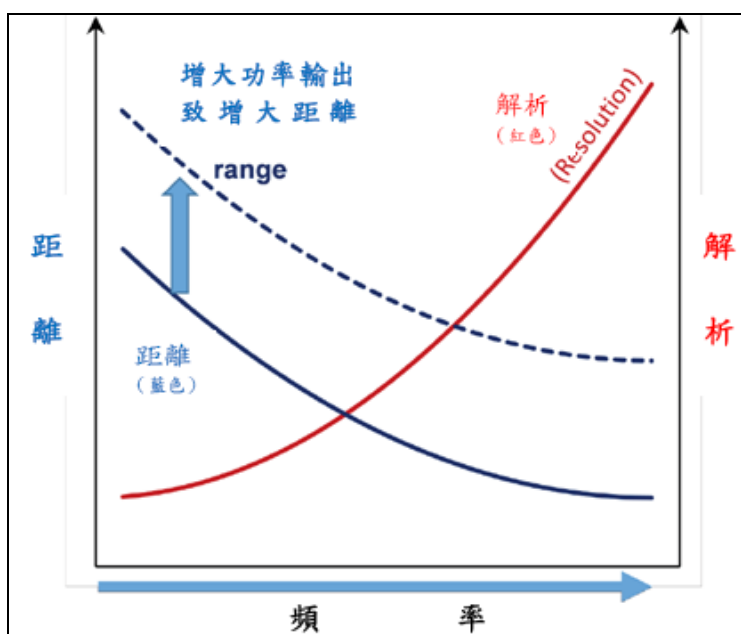
一種新式「多重輸入、多重輸出」(Multiple-input、Multiple-output, MIMO) 感測器陣列，已納入感測器設計實驗。其接收器在 MIMO 系統執行「相位延遲」(Phase-delay) 交互作用與多重矩形傳輸波形，開發先進的電子密集與計算能力。「委託製造商」(Original equipment manufactures, OEMs) 與開發方向將引導市場爭取更佳優勢、先進邏輯加強器裝置、簡單設計來源與更多有效率之編輯概念。

雷達設計須面對需求總數，大部分重要交換介於必要範圍與可獲得分析之間，此交換存在如同前述針對既定之功率標準、雷達減弱與增強頻率後之有效距離。同時目標分析因為頻率增強而普遍增大，因此設計務必選擇頻率，並考量解析效果適切平衡距離需求 (圖九)。「延伸點」(Sweet spot) 在距離對抗頻率

曲線圖以「藍線」表示，解析曲線對抗頻率曲線則以「紅線」表示。此「延伸點」可經由雷達系統增大功率輸出，而移動至高頻率，理由如 AN/TPY-2 雷達操作 X 波段、電力輸出 1.3 兆瓦特（Megawatts）一般，高輸出功率保證系統可維持高解析，需要提供 X 波段操作與達到超過 1,000 公里距離。如採另一種方式，將系統設計為 L 波段，達到 1,000 公里距離所需之電力則較少，惟系統僅獲得接近「因素 10」粗劣之解析。

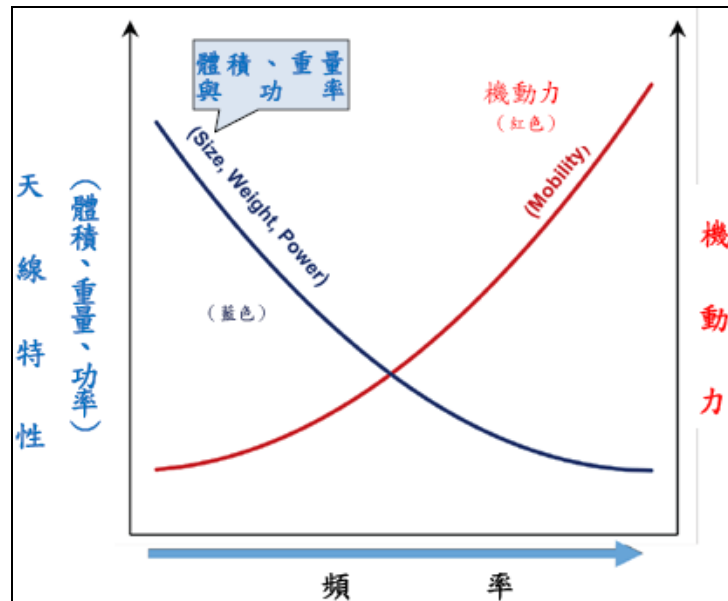
系統交換標準除包括「體積、重量與功率」(SWAP) 外，亦須瞭解依據標準製造之特殊支援硬體，如發電機、載具、雷達指示與上升控制平台等。通常為達到最大需求距離，例如增大操作頻率，惟體積、重量與功率元件隨之減少，絕大部分基於提高頻率致波長變短之事實，不得不在系統「組成縮小」與「較長波長」兩者中擇一為之。同理可證，通常雷達平台變小時，搭配發電機之需求電力亦變小，表示儘管使用高頻率，其機動性將顯著提升（圖十）。圖中「藍線」表示為何因增大頻率，須減少「體積、重量與功率」(SWAP) 需求，機動力（紅線）則同時提升。假設 PAC-3「愛國者」飛彈系統將原使用之 K 波段雷達改為 S 波段，須考慮 S 波段之系統不僅體積龐大且十分笨重。另一例為 AN/TPQ-64 與 AN/TPY-2 兩者支援需求不同，卻同樣使用 X 波段，惟 AN/TPY-2 偵蒐距離（100 公里）超過 AN/TPQ-64（64 公里），測量功率需求接近 20，致造成 AN/TPY-2 需要 2 部「重型展開機動戰術載重車」(HEMTTs) 運輸，AN/TPQ-64 則僅需 1 部悍馬車 (HMMWV) 之極沉重後果。

圖九 頻率與距離、解析間之關係



資料來源：原文附圖

圖十 頻率與天線體積、機動性之關係



資料來源：原文附圖

生命週期考量

複合式雷達系統與複合式感測器之發展趨勢採不同方案處理（參閱表一），當前雷達系統勢將逾越預定使用年限與野戰測試期程，惟仍須賡續改良與突破技術，持續創造系統更大效能。目前陸軍傾向使用現有老舊雷達，藉由先進工程升級技術，期能發展屬於現階段之雷達，先決條件則須有效整合多項技術。某些技術如「變化材料」方面，為尚未驗證之「原始雛形」（Initial brass board prototypes），且後勤體系、支援度與維持力等關鍵之「非功能性需求」，不僅影響製造成本，甚至在維修雷達方面，皆須慎重考慮。

科技與後勤

顯然賡續前期開發之機會仍然存在，包括「陸軍軍需指揮部」（Army Materiel Command, AMC）已與企業與學術界合作，且「陸軍訓練與準則指揮部」內之陸軍獲得、後勤與科技助理部長贊成陸軍需求相同之發電機，決定未來雷達相關科技逐漸改變方式與「陸軍軍需指揮部」（AMC）確實管制科技同步化之方案。惟科技「過渡」唯一方法則是達成最佳材料與科技解析，且一旦發生戰爭系統可立即支援戰場。為考量未來系統材料昂貴與複合模組、軟體開發等需求，可能與企業之最佳選擇不同，因此須適時賦予既定之明確方針，陸軍軍需系統亦將透過類似依據「生命週期透視法」（Life-cycle perspective）分析活動，協助確認是否「正確」？方可符合陸軍會議討論之邏輯順序，俾委託企業決定我們未來的雷達。

一種雷達是否可適應全部任務？不可能，但……

雷達距離方程式不改變時，物理學上亦不改變，其支配電子信號、波長與

頻率之法則將不改變。就「相近觀點」(Near-term)去製造雷達，期待滿足、符合當前任何等級單一系統之全部條件與(或)「關鍵性能參數」(Key Performance Parameters, KPPs)，極為困難，並非表示雷達設計與製造不可能符合所有當前雷達的「關鍵性能參數」(KPPs)，惟須能尋求有效之替代方案。由於現代化「主動電子掃描陣列」(AESA)雷達大部分設計受限，漫長設計期程與龐大計畫管理需要眾多設計與查證編組。雷達設計時可接受之重大讓步，即體積可因應雷達任務適切修改。單一雷達必須擁有多數功能，如雷達計畫實現多重包容之「多重任務雷達」(MMR)等級，將需要更多的複合硬體、工具製造與測試雷達之軟體附件，以及預估增加的單位成本，交換空間則為重量、運輸與持續力，將作為嚴格製造單一系統之附加要求。

期待未來雷達將可實施空中運輸、輕型載具機動、偵測接近之巡弋飛彈且距離遠到足夠進行反制，同時阻止進來的迫砲或砲兵射彈，保護前方作戰基地安全？雷達可穿透大氣中地面低角度，且精準成功的獲得小型目標或重要目標？儘管指揮權責為「全球視野」(Global view)，雷達仍可傳送任務範圍內與其他更多「戰略視野」(Strategic view)內之雷達系統？你也可以使用迷你廂型車參加「一級方程式」大賽？

作者簡介

Hurt Heine 退役上校，為「陸軍軍需指揮部」之資深分析師，科技首長辦公室軍官，曾任陸軍飛行員與專案經理，擁有丹佛大學系統碩士學位，並且畢業於美國陸軍戰爭學院且在德州大學擔任計畫研究員。

Phil Reiner 博士，為「陸軍軍需指揮部」之資深分析師，科技首長辦公室軍官，曾任美國陸軍軍需指揮部軍需品軍官，擁有紐約 Rochester 大學物理博士學位。

譯者簡介

耿國慶老師，陸軍官校 66 年班，歷任排長、測量官、連、營長、主任教官，現任職於陸軍砲兵訓練指揮部目標獲得教官組。