

機載火控雷達發展與研析

空軍中尉 李佩珊

提 要

機載火控雷達自1930年代後期開始發展，但直到1950年代初脈衝都普勒技術的逐漸成熟，才使得雷達真正具備全空域工作的能力。脈衝都普勒雷達主要採用機械式馬達驅動天線，用以改變波束掃描方向；及至1960年代，電子相列雷達開始蓬勃發展，利用數位式波束合成的方法，在極短的時間內朝目標方位進行密集掃描，相較於傳統雷達，具有高靈敏度、多目標追蹤功能、體積更小、效率更高等優點，以取代機械掃描雷達，成為現代戰機火控雷達的主要裝備。本文針對機載火控雷達技術演進執行研析，並概述目前主要先進火控雷達發展現況。

關鍵詞：機載火控雷達、脈衝都普勒雷達、電子相列雷達

前 言

《孫子兵法》第四篇〈軍形篇〉：「昔之善戰者，先為不可勝，以待敵之可勝」，現代戰場大量使用科技性武器，如何掌握先機，為制敵之要點。臺灣是一個島嶼國家，海峽在空權時代已不構成天險；杜黑(Giulio Douhet)的《制空權》是源自義大利的地緣環境；英國於二戰中，由於保有空中局部優勢，使得德國進襲英倫三島的「海獅計畫」無法執行；日本於太平洋戰爭中，在喪失空權優勢後，以無條件投降做終；阿根廷於佔領福克蘭群島後，未能掌握空中優勢因而落敗¹；這些戰例一再述明，島嶼國「無空防即無空權，無空權即無國防」的概念，空權為當前我國國防安全首要議題，對軍隊的結構、規模、部署、戰略指導都有重大的影

響。

噴射時代的空軍，呈現電子時代的特點，質量並重，機載武器性能決定空戰的結果；其中火控雷達為獲取戰場情資與武器射控的重要管道，因此火控雷達性能優劣影響戰機作戰能力甚巨。本文將針對機載火控雷達發展進行分析，藉以明示未來空用AESA雷達發展方向。

機載火控雷達基本原理及功能

一、基本原理

雷達(Radio Detection And Ranging, Radar)目前偵測移動物體最普遍的方法之一是藉著高頻電路產生高功率電磁波，並經天線輻射出去形成雷達波²。當發射出去的雷達波在空間行進過程中，隨著觸碰到物體部分的散射及反射，電磁波經由雷達的接收天線

1 王長河，「空權百年—台海安全制空論」，空軍學術雙月刊568期，2004年，頁3-25。

2 Fawwaz T. Ulaby Eric Michielssen Umberto Ravaioli, "Fundamentals of Applied Electromagnetics", 6th ed. (臺北市，東華書局，2011年5月)，頁740。

回到接收端，稱之為回波；回波再經濾波、放大等程序處理，與發射波相對應比較，得以偵測出目標是否存在，進而決定其距離、方向、高度、速度等資訊，並藉顯示器加以顯示，此即為雷達基本原理。³

二、主要功能

空對空功能是火控雷達的基本功能，典型的目標是戰鬥機、轟炸機、運輸機、無人機等以螺旋槳或噴氣發動機推進的飛機。依作戰過程來看，一個完整的空對空任務至少包含搜索、截獲和追蹤三種子功能，雖然有些雷達將截獲功能也列為一種專門方式，但是它本質上是個過渡過程，雷達工作的主功能就是搜索和追蹤，而這些功能又對應了不同的功能子模式⁴，如表一：

1. 搜索功能

(1)搜索帶測距模式(Range While Search, RWS)⁵：又稱為突襲模式，用於檢測遠距離內小於天線波束寬度的多個目標，每次根據雷達距離方程和雷達的時間預算，將發射機波形和脈衝週期的持續時間調整到最大範圍的能量極限。主要使用低脈衝重複頻率獲得較明確範圍，使駕駛員儘早得知前方空域存在威脅並提早準備。

搜索的目標高度高於本機時，稱為上視搜索，反之稱下視搜索；當搜索的是迎頭目標時，又稱前半球搜索，反之稱後半球搜索。RWS模式往往還引伸出子模式的劃分，即正常搜索和增程搜索，增程搜索主要用於飛機上有較為完善的自動引導系統(如數據鏈)的情況，此時由於雷達得到的目標引導資訊相對準確，就可以自動設置較小的角度搜索範圍以利於儘早發現特定距離、特定高度和方位上的目標。

(2)搜索帶追蹤模式(Track While Scan, TWS)⁶：結合搜索和跟蹤功能的方法，與RWS模式基本原理相同。在這種模式下，可以在一個天線通道中安全地跟蹤多個目標，而雷達可以同時搜索新目標。該方式較適合傳統的機械掃描雷達，天線以某個固定速率進行掃描，每次掃描能夠獲得目標的距離、角度和速度資訊，如圖一。首批具有TWS功能的雷達最多能夠同時跟蹤5至10個目標，以AN/APG-68(V)9火控雷達為例，於TWS模式下，能夠區分和跟蹤10個空中目標⁷，並同時對其他空中目標進行探測。

(3)搜索加追蹤模式(Track and Search, TAS)⁸：該模式為相列雷達所特有，能夠充分

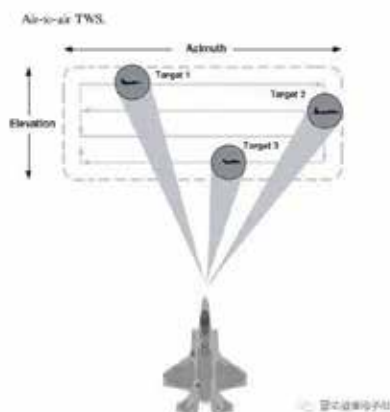
3 黃泓偉，「24GHz頻率調變連續波雷達系統之前端電路設計與整合」，國立交通大學碩士論文，2007年，頁3。

4 M. Zeeshan, M.S. Arif, M. Umair, M. Javed, "survey of systems engineering approaches for design and development of aesa radar for fighter aircraft", (IEEE International Bhurban Conference on Applied Science & Technology, 2019) (IBCAST)

5 Christian Wolff, "Common Requirements on Airborne Radars", <https://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab04.en.html>

6 James Constant, "Fundamentals of Strategic Weapons: Offense and Defense Systems", Springer, 1981, pp.193.

7 Krzysztof Woliński, "Krótkahistoria F-16", http://www.radary.az.pl/f-16_radar.php



圖一 TWS模式

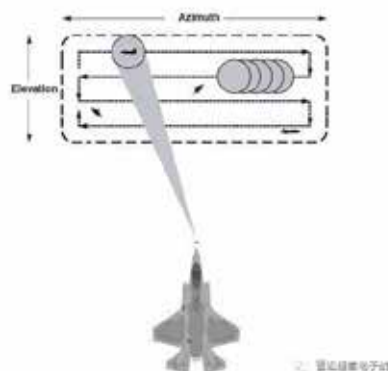
資料來源：機載雷達常用工作模式，你都知道嗎？
<http://5b0988e595225.cdn.sohucs.com/images/20171227/849cd9651850466489e147ee03d2596d.jpeg>

發揮相列天線波束捷變的潛力。雷達的搜索任務與跟蹤任務可利用時間的分割相對獨立的完成，也就是以時間交替的方式合理安排搜索波束與跟蹤波束。假設雷達監視空域內有2個目標，相列雷達對這2個目標的跟蹤數據率比搜索數據率要高，搜索任務執行一次的時間，可以將跟蹤時間安插到搜索時間，在需要執行跟蹤任務時中斷搜索任務，調整參數將天線波束用於目標跟蹤，跟蹤完畢後再繼續進行搜索。

(4)速度搜索模式(Velocity Search, VS)⁹：以高PRF信號進行掃描，通過方位角和速度在雷達屏幕上顯示目標。該模式主要是用於遠距離高速目標的前期檢測，起「警

示」的作用，但因高頻易受干擾，雷達無法確定距離，不具備測距功能。通常必須與其它工作模式配合才能最後完成武器攻擊的制導任務，隨著相列雷達的出現，此種模式有可能最終會變為雷達的一個處理過程，而不是一個可供飛行員使用的模式，如圖二。

(5)空戰格鬥模式(Air Combat Mode, ACM)¹⁰：ACM主要用於近距離空戰格鬥，此時作戰雙方距離很近並且伴隨較大的機動動作，誰掌握先機，誰就贏得勝利。因此，為適應近距離交戰這一特點，ACM相對於RWS和TWS模式有較高的技術要求：一是要求對一定距離上的目標自動截獲，且截獲速度要快；二是掃描圖形甚至掃描速度有嚴格限制；三是在近距離格鬥時，載機和目標機的相對機動大幅度提高，要求雷達在保證一定數據精度的要求下仍然保持穩定跟蹤。



圖二 VS模式

資料來源：如圖一

8 「雷達工作模式：TWS與TAS的聯繫與區別」，每日頭條，2019年6月2日，<https://kknews.cc/news/eyx36e4.html>

9 丁德宏，「空軍戰機先進火控雷達之發展」，新新季刊第48卷第三期，109年7月，頁111。

10 「一文讀懂戰鬥機空戰的勝負手-火控雷達」，每日頭條，2019年3月12日，<https://kknews.cc/military/pyrgyj2.html>

表一 搜索功能差異比較

模式	搜索帶測距	搜索帶追蹤	搜索加追蹤	速度搜索	空戰格鬥
PRF信號	低或中	中或高	高	低-高	高
搜索範圍	全方位	特定目標區域	特定目標區域	具備最遠探測能力	較窄
距離	近-遠	遠	近-遠	不具備測距功能	近
目標	無法有效攻擊目標	多個目標	多個目標	特定目標	特定目標

資料來源：作者製表

2. 追蹤功能¹¹

此功能的前提是雷達在搜索階段發現目標，並成功進行目標截獲，子模式劃分一般與雷達能同時跟蹤目標的個數有關，如表二。

(1)單目標跟蹤模式(Single Target Track, STT)：STT模式是火控雷達空對空方式的常用工作狀態。雷達自動控制天線保持對空中目標定點照射，同時向武器系統提供有關目標當前位置、速度和加速度的連續且準確的數據，這些數據都可能不斷變化，故通常針對距離、都卜勒頻率和角度建立單獨的半獨立跟蹤迴路。跟蹤迴路包含四個基本功能：測量，濾波，控制和響應，如圖三。

(2)雙目標追蹤模式(Double Target Track, DTT)¹²：此模式能提供飛行員同時攻擊兩個目標，雷達能保持對兩個空中目標的同時跟蹤，一般情況下天線的運動模式為「點到點」。

(3)多目標追蹤模式(Multiple Target

表二 追蹤功能差異比較

模式	單目標追蹤	雙目標追蹤	多目標追蹤
原理	鎖定單一目標進行持續照射與精確追蹤。	對兩個空中目標的同時追蹤，天線的運動模式為「點到點」。	以卡門濾波器為基礎，以資料相關結合技術(Data Association Technology)、變速度偵測結合適應性取樣間隔演算法，提高追蹤效能。 ¹³
功能特點	提供距離、速度、角度資訊。	可以看成兩個STT目標對雷達資源不同時段傳輸不同信號。	估計場景中目標的數目、狀態或其他屬性，並在一段時間內持續地進行估計。

(資料來源：作者整理)

Track, MTT)：由於雷達高速處理技術和相列技術的引入，使得設計人員開始研製具有MTT功能的雷達，為飛行員同時攻擊兩個以上的目標提供了可能，有利於飛行員掌握空中態勢並隨時切換攻擊對象，同時也是機械天線架構與相列天線技術最大差異處。

技術演進

一、脈衝都卜勒雷達¹⁴

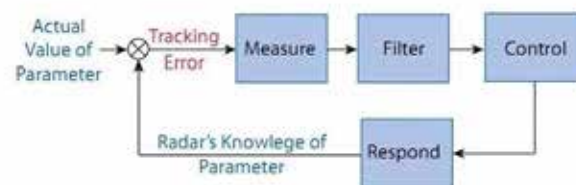


Figure 31-4. Basic functions performed by a single-target tracking loop provide feedback.

圖三 STT模式

(資料來源：如註釋10)

11 George W. Stimson, Hugh Griffiths, Christopher Baker, David Adamy, "Introduction to Airborne Radar", SciTech Publishing, 3rd, May 30, 2014, chapter 31 Automatic Tracking.

12 丁德宏，空軍戰機先進火控雷達之發展，頁111。

13 鍾翼能，「行政院國家科學委員會補助專題研究計畫報告書-適應性追蹤技術之研發與設計」，大葉大學電機工程研究所，2000年10月20日，頁2-5。

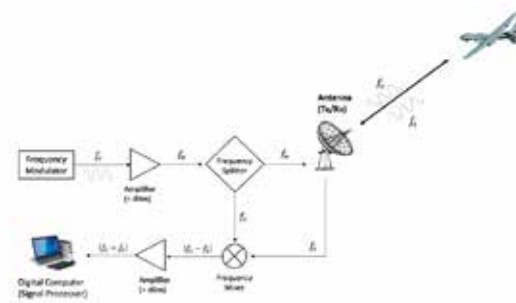
1.發展

脈衝都卜勒(Pulse Doppler, PD)雷達於1960年代研製成功並投入使用，至70年代，PD雷達廣泛用於機載預警、導航、飛彈制導、衛星跟蹤、戰場偵察、靶場測量、武器火控和氣象探測等方面，成為重要的軍事裝備。其中裝有PD雷達的預警機已成為對付低空轟炸機和巡航飛彈的重要裝備。

2.原理¹⁵

都卜勒效應(Doppler Effect)於1842年由奧地利物理學家J·C·都卜勒(Christian Andreas Doppler)發現，當波源和觀測者有相對運動時，觀測者接受到波的頻率和波源發來的頻率不同。波源和觀測者相互接近時，接受到的頻率升高；兩者相互離開時，則降低。

PD雷達原理即應用都卜勒效應，當雷達發射一固定頻率的脈衝波對空掃描時，如遇到活動目標，回波的頻率與發射波的頻率出現頻率差，稱為都卜勒頻率。根據都卜勒頻率的大小，可測出目標對雷達的徑向相對運動速度；根據發射脈衝和接收的時間差，可以測出目標的距離。同時用頻率過濾方法檢測目標的都卜勒頻率譜線，濾除干擾雜波的譜線，可使雷達從強雜波中分辨出目標信號¹⁶。所以PD雷達比普通雷達的抗雜波干擾能力強，能探測出隱蔽在背景中的活動目標，如圖四。



圖四 動作邏輯圖

資料來源：都普勒雷達系統https://www.researchgate.net/figure/Doppler-Radar-System_fig1_339200577

3.結構組成

PD雷達主要由天線、發射機、接收機、伺服系統、數位訊號處理機、雷達數據處理機和數據匯流排等組成，

有著極高的載頻穩定度和頻譜純度以及極低的天線旁瓣，並採取先進的數位訊號處理技術，而且通常採用較高以及多種重複頻率和發射信號形式，在數據處理機中利用代數方法，並套用濾波理論對目標座標數據作進一步濾波或預測。

4.分類¹⁷

雷達執行搜索時會依據任務不同，採用不同的脈衝重複頻率(pulse repetition frequency, PRF)，其定義為測量在特定時間單元的重複信號時，脈衝重現的次數，低於 3 kHz的PRF系統被認為是低PRF信號，直接範圍可以測量到至少 50 km的距離。使用低

14 脈衝都卜勒雷達，華人百科，<https://www.itsfun.com.tw/%E8%84%88%E8%A1%9D%E9%83%BD%E5%8D%9C%E5%8B%92%E9%9B%B7%E9%81%94/wiki-7076826-1363706>

15 王俊乃、吳仲卿，「都卜勒效應（Doppler Effect）」，2009年9月18日，<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=2841>

16 丁德宏，空軍戰機先進火控雷達之發展，頁110。

17 Habibur Rahman, "Fundamental Principles of Radar", CRC Press, June 3, 2019, pp.25-27.

PRF的雷達系統測距效果良好，但在存在低速雜波的情況下降低靈敏度，雜波會干擾飛機在地形附近的檢測；高PRF信號則在測距上容易模糊，對目標物回波都卜信號辨識能力高；中PRF信號對目標的距離和速度都會產生模糊的情況，其依靠適當的濾波器及信號處理器對回波加以處理，故目前為機載雷達的最佳選擇，如表三。

二、合成孔徑雷達

1.發展

合成孔徑雷達(synthetic aperture radar, SAR)的思想首先是在1951年6月由美國固特異航空公司的Carl Wiley在「用相干移動雷達信號頻率分析來獲得高的角分辨率」的報告中提出的¹⁸。報告中提出將都普勒頻率分析應用於雷達，通過頻率分析可改善雷達的角分辨率，即「都普勒波束銳化」的思想。同年，美國伊利諾大學控制系統實驗室開始對SAR研究，並證實「都普勒波束銳化」的概念，從而在理論上證明了SAR原理。1957年密西根大學採用機載掛飛、膠片紀錄和光學信號處理的方法，得到了第一張公開發表的

表三 PRF信號比較

	低	中	高
測距	清晰	模糊	模糊
測速	模糊	模糊	清晰
測速精準度	很低	高	最高
主辦雜波抑制	差	良	優
允許方位掃描角	小	中	大
分辨地面動目標和空中目標的能力	差	良	優

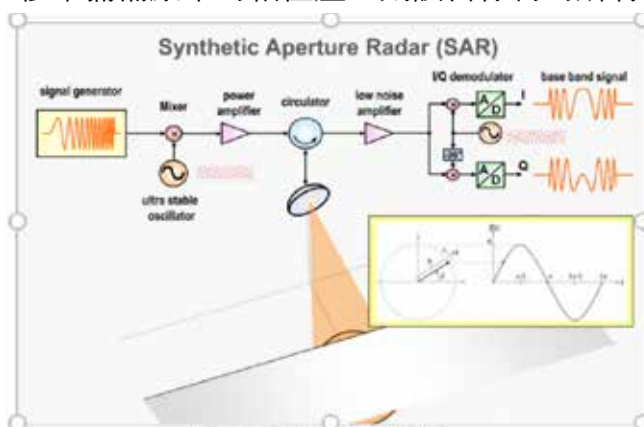
(資料來源：作者製表)

大面積聚焦SAR圖像，向世界證明SAR的高分辨成像能力。

2.原理

SAR利用合成天線陣列的想法來提高平行飛行方向的解析度，透過安裝在運動平臺上的雷達不斷發射脈衝，接收在地面的回波訊號，經訊號處理後就如同一個大型天線發射和接收訊號，大幅提高雷達在飛行方向的解析度，並能全天候工作，可有效地識別偽裝和穿透掩蓋物，如圖五。

¹⁹合成天線陣列的想法是假設雷達沿飛行方向前進時，有3個位置均能看到目標物，但由於雷達天線到目標物的距離各不相等，所以目標物的回波將會有不同的相位移。將其分別儲存在不同的記憶體位置，然後再通過一個相位平移器，分別施以反方向的相位平移來彌補原本的相位差，則該目標物的所有



圖五 SAR工作原理

資料來源:Alberto Moreira, "Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications", German Aerospace Center, July 2013, pp.30.

18 C. W. Sherwin, J. P. Ruina, and R. D. Rawcliffe, "Some Early Developments in Synthetic Aperture Radar Systems", IRE Transactions on Military Electronics, April 1962, pp.111-115

19 盧玉芳，「以雷達干涉技術監測雲林地層下陷」，國立交通大學碩士論文，2007年，頁20-21。

回波經處理後相位趨於一致，不同的目標物將有不同的相位，最後再將輸出結果加總起來，如圖六。

3.組成²⁰

用光學或數位信號處理成像的機載SAR系統通常由十個分系統組成：發射機、接收機、天線饋線、顯示器、紀錄器、平台、運動補償、定時器、導航和光學信號處理成像或數位成像處理系統，如圖七。

4.數位信號處理²¹

SAR是藉由載具以定速度移動，從天線發送短脈衝或通過脈衝壓縮技術濾波的長編碼信號，天線接收來自地面的返回信號並沿直線路徑記錄。通過信號處理，可沿直線路徑和橫向方向實現高分辨率。此條件是，天線的位置是已知的，或者可以在波長的一小部分之內進行計算，並且發射和接收的雷達



圖六 合成陣列示意圖

資料來源：什麼是合成孔徑雷達？一種可以成像的雷達—合成孔徑雷達，<https://kknews.cc/science/ym3b9rk.html>



圖七 SAR組成示意圖

資料來源：如註釋20，作者重製

信號的相對幅度和相位是已知的。而且，飛機經過時地面必須保持不變。SAR可以提供的最佳幾何分辨率取決於發射信號的中心頻率和帶寬，以及沿直線路徑通過天線照射地面區域的孔徑角，如圖八。

5.運動補償技術²²

SAR信號處理是假設雷達隨飛機做直線等速飛行。實際上，運載天線的航空器與典型直線等速飛行狀態是有偏差的，因此需要用輔助設備來補償非直線運動。運動補償設



圖八 數位訊號處理示意圖

資料來源：如註釋20，作者重製

20 向敬成、張明友、周俊杰，雷達系統，（臺北市，五南，2004年7月），頁374-396。

21 向敬成、張明友、周俊杰，雷達系統，頁374。

22 楊嘉豐，「機載合成孔徑雷達訊號之運動補償」，國立交通大學碩士論文，2004年，頁29。

備須包含能檢測飛行路線與直線路徑偏離的傳感器，可以用各種方式使用此敏感元件的輸出。為了完善運動補償，還必須調整接收信號的相位，以補償實際天線與理想的形成合成天線位置之間的偏移。

6.操作模式^{23 24}

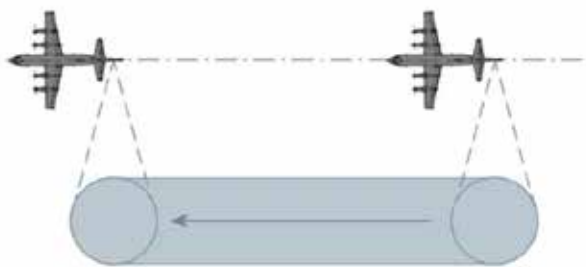
SAR可根據任務需求切換不同掃描模式：

(1)條狀圖模式(Stripmap Mode)：

此模式假設天線停留在固定位置，並可與飛行路徑正交或斜視，當天線孔徑沿飛行路徑行進時，信號以等PRF信號的速率傳輸。可提供大範圍區域的地圖成像，但其缺點為解析度較不足，對目標物分辨能力較弱，如圖九。

(2)聚束模式(Spotlight Mode)：

這是通過電子束轉向對特定區域進行集中掃描，從而導致更長的合成孔徑。其優點為解析度較高，對目標物分辨能力較強，如



圖九 條狀圖模式

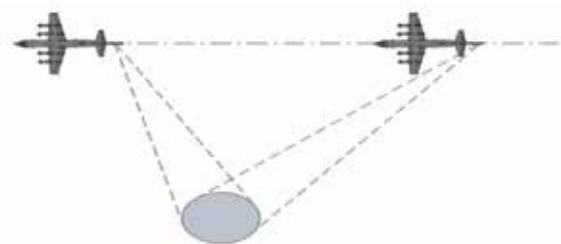
(資料來源：如註釋24)

圖十。

(3)掃描模式(Scan Mode)：

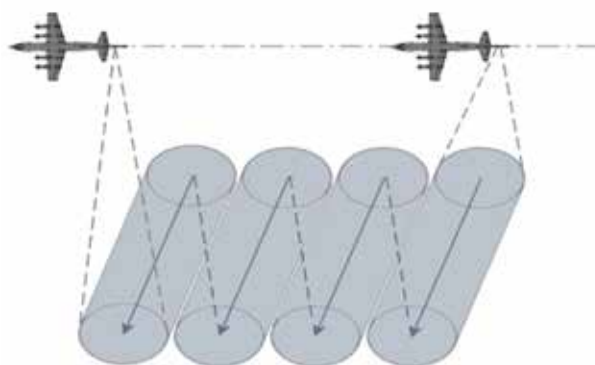
SAR於此模式時，天線波束會定期掃描，覆蓋的面積比聚束和條狀圖模式大得多。但由於減小了方位帶寬，方位分辨率變得比條狀圖模式低得多。此模式中方位角分辨率和掃描區域之間實現了平衡，如圖十一。

(4)地面移動目標指示模式(Ground Moving Target Indicator, GMTI)²⁵：



圖十 聚束模式

(資料來源：如註釋24)



圖十一 掃描模式

資料來源：如註釋24

23 Alberto Moreira, Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications, (German Aerospace Center, July 2013), pp.50-57.

24 Christian Wolff, "Synthetic Aperture Radar Modes", <https://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab08.en.html>

25 「SAR/GMTI-概述及常用抑制雜波方法DPCA」，2019年2月12日，<https://www.itread01.com/content/1549972448.html>

GMTI的概念是通過分析由目標運動引起的雷達接收信號的都卜勒效應。當雷達運動時，固定目標的回波也有都卜勒頻移。近年來，通過GMTI濾波與SAR結合，抑制了雜波。在SAR GMTI系統中，移動目標不僅會被檢測到，而且還會在周圍環境中以高分辨率成像，如圖十二。

三、相位陣列雷達

1.傳統雷達的限制²⁶

在介紹相位陣列之前，先歸納出傳統雷達的幾個重大基本限制：

(1)波束角太寬、旁波瓣太大

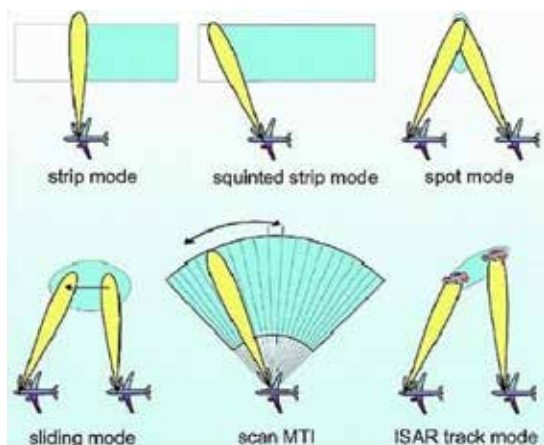
傳統雷達在輻射雷達波時，會產生一系列周邊的旁波瓣天線，對雷達而言，旁波瓣是有害無益的損耗，因為只有主波瓣才有偵測效益，不僅浪費射頻能量，更因旁波瓣散射他處而大幅增加被敵方察覺與干擾的機

率，故波束角越小，雷達射頻能量能集中在更小的面積上，雷達的偵測距離與解析度也越好，故旁波瓣是最容易讓雷達「露餡」的頭號元兇。干擾方面，如果進入旁波瓣的干擾強度高於主波瓣，使雷達誤以為是目標回波，雷達便失去偵測目標的能力。

(2)機械旋轉機構的限制

傳統雷達天線靠著旋轉來涵蓋所有方位，如果要持續追蹤同一個目標的軌跡，就要等天線完成一個旋轉週期回到原先位置後，才能作目標資料的更新。例如，美製SPS-49艦載對空搜索雷達的旋轉週期30秒/週，每分鐘只能實施兩次目標資料更新，此更新速率在面對高速突進的目標時，將顯得力不從心。

傳統戰機雷達天線也需要旋轉機構來改變天線方位，以掃描各個空域。雷達往往也會提供自動鎖定模式，在此模式下，天線靠著伺服機械的帶動持續對準目標的方位。由於機械運動的速率有限，導致目標更新速率過慢，使戰鬥機雷達在進行多目標精確追蹤等耗費較多資源的工作時，需將天線掃描範圍限制在左右各40度、上下各10度的範圍內，才能獲得可接受的目標更新速率。這種限制使戰機雷達專注於視距外多目標接戰時，能處理的空域範圍極為有限，也不可能同時兼顧空對空與空對地等不同需求。



圖十二 GMTI模式

資料來源：「精度」相控陣SAR-GMTI系統，參數及工作模式，<https://i1.kknews.cc/SIG=2t54fr9/5o16001701qrrs8m476.jpg>

2.發展²⁷

1960年代，正值美、蘇激烈的軍備競

26 Captain Picard，「相位陣列概述」，<http://www.mdc.idv.tw/mdc/information/par.htm>

27 張光義、趙玉潔，相控陣雷達技術，(北京：電子工業出版社，2006年12月)，頁32-34。

賽時期，美國急於解決對洲際彈道飛彈目標進行監視，預報彈道落點和發射點座標，增加預警時間已成為迫在眉睫的需求；此外，還希望能夠對所有入軌物體，尤其是各類人造衛星、載人飛船以及其末級助推火箭和太空碎片進行觀測、監視、跟蹤、編目等，將這些物體和真正來襲的洲際彈道彈頭進行識別和區分，更好地提高攔截效率，因此相列雷達獲得了很大發展。與常規雷達相比，雷達作用距離由幾百公里提高至幾千公里，並能夠對多批高速運動目標進行精密跟蹤。為此，須提高雷達數據率、解決邊搜索邊跟蹤及合理使用雷達信號能量等問題，此需求促成相列雷達初期的發展。

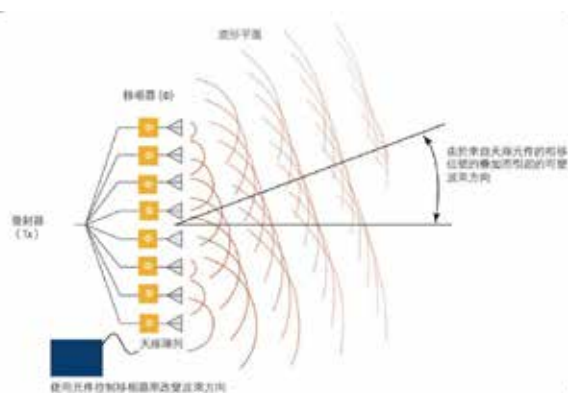
1970年代，採用一維線性陣列掃描天線的戰術相列雷達，由於簡化雷達設計、提高雷達性能且相對降低雷達成本，因而逐步在所有發達國家相繼問世。

1980年代，電子電路技術有更大的發展，成就今日的主動電子掃描陣列，相較於被動電子掃描陣列的單一運作頻率，其最大優勢在於多種運作頻率。相列天線由許多輻射單元排列而成，每個陣元或一組陣元後面接有一個可控移相器，利用控制這些移相器相移量的方法改變各陣元間饋電相位，從而改變天線陣面上電磁波的相位分布，使得波束在空間按一定規律掃描，可有效追蹤多數目標，如圖十三。此項優勢促成主動電子掃描陣列成為現今雷達主流技術。²⁸

3. 電子掃描相列技術

28 彭新晏，顏志恆，「大型主動相列雷達之技術發展」，新新季刊第48卷第三期，109年7月，頁16。

29 張光義、趙玉潔，相控陣雷達技術，頁25-31。



圖十三 相位陣列的基本原理

資料來源：許承澤，「5G通訊的關鍵技術：相位陣列」2020年7月，https://miro.medium.com/max/2400/1*c6EGBkcc1eLUvU-9eeqL_Q.png

電子掃描相列雷達是利用數位式波束合成方法，改變天線信號發射方向。現今電子掃描技術主要有兩種，第一是頻率掃描，第二是相位掃描。頻率掃描是透過發射機週期變換頻率的方式來改變頻掃天線的波束相位，使波束在垂直軸向進行往復掃描，但因仍需要機械式旋轉天線，加上波束只會規律地往復掃描，因此無法根除傳統式雷達的先天弱點。相位掃描則是利用小型天線元件排列成天線陣面，每個天線單元都由獨立的開關控制，藉由控制各天線元件發射的時間差，合成不同相位的主波束。

4. 相列天線主要技術特點²⁹

(1) 天線波束快速掃描：小型天線元件的開關切換能迅速完成，故能在極短時間完成波束指向的改變，並將天線對應到的搜索空域掃描完畢，因此在掃描範圍內能維持很高的目標更新速率，克服機械掃描天線波束

指向轉換的慣性及由此帶來對雷達性能的限制。

(2)天線波束形狀的捷變能力：通過改變陣列中各單元通道內的信號幅度與相位，即可改變天線方向圖函數或天線波束形狀。相列雷達天線根據工作環境、電磁環境變化而改變工作狀態，大都與波束形狀的結變能力有關。

(3)空間功率合成能力：採用相列天線後，可在每一單元通道或每一個子天線陣上設置一個發射信號功率放大器，依靠移相器的相位變化，使發射天線波束定向發射，即各單元通道或子天線陣通道中的發射信號聚焦於某一空間方向。此一特點為相位陣列雷達發射系統設計帶來極大的方便，也增加雷達的靈活性。

(4)天線與雷達平臺共形能力：相列雷達天線以平面相列天線為主，主因為平面陣列上按等間距方式安排天線單元可簡化相列天線波束控制系統，易於實現波束的相位控制掃描。主要缺點為天線波束掃描限制於60度左右範圍內。由於共形相列天線有利於實現全空域覆蓋，提高數據率，具更大工作靈活性，因此，共形相列天線的應用日漸增多，例如，採用共形相列天線的機載預警雷達在工作方式上更易實現全空域覆蓋，並將雷達、電子戰、通信、導航等電子系統進行綜合設計，構成綜合電子集成系統；採用與地形共形的相列天線有利於雷達偽裝，並利於抵抗敵方雷達偵察，獲得更大的天線孔徑面

積和提高雷達實孔徑分辨率。

(5)多波束形成能力：採用相列天線後，依靠相位轉換波束控制信號，可以在一個重複週期內形成多個指向不同的發射波束和接收波束。此一特點為相列雷達性能的提高帶來新的潛力。例如，可以提高雷達波束覆蓋範圍及雷達搜索與追蹤數據率。

(6)相列雷達的分散布置能力：將相列雷達天線的概念加以延伸，一部相列雷達由多部分散布置的子相列雷達構成，在各子相列雷達天線之間採用相應的時間、相位和幅度補償，依靠信號處理方法，從而改善或獲得新的雷達性能，如提高實孔徑角分辨率和測角精度，獲得更高抗毀和抗干擾能力，實現多視角觀察目標，提取更完整的目標特徵資訊等。

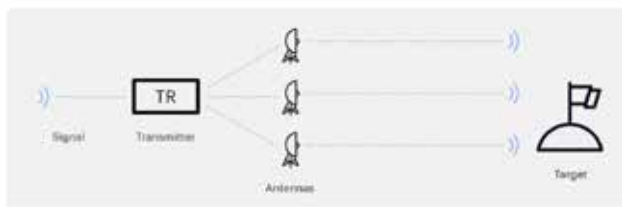
5.組成³⁰

目前典型的相列雷達使用移相器控制波束的發射和接收，共有兩種組成形式，一種稱為主動電子掃描相列，每種天線振源用一個接收機和發射功率放大器；另一種稱為被動電子掃描相列，它共用一個或幾個發射機和接收機。

(1)被動電子掃描相列雷達(Passive electronically scanned Array Radar, PESA)

PESA僅有一個中央發射機和一個接收機，發射機產生的高頻能量，經計算機自動分配給天線陣的各個單元，目標反射信號也是經各個天線單元送到接收機統一放大，如圖十四。

30 RADA Technologies, "The Advantages and Disadvantages of PESA Radar vs. AESA Radar" ,December 13, 2019 , <https://radausa.com/blog/pesa-radar-vs-aesa-radar>



圖十四 PESA基本原理

資料來源：如註釋30

A.優點

可完全以電子方式控制某些信號的延遲，意味著在不移動任何天線的情況下快速並精確地控制信號，同時比傳統機械雷達系統更快地掃描大面積區域。

B.缺點

儘管PESA在速度和面積方面都取得了突破性發展，但它具明顯劣勢，因發出的無線電波很寬，雖彌補範圍，但失去準確性，無法返回最精確的位置訊息；此外，因內部信號處理器與天線採分離配置架構，經由信號產生器將信號傳遞給發射機，再透過導波管饋送天線陣元，意味著它一次只能發送一個頻率，此配置方式可靠度較低，若發射機或導波管發生故障，會導致整組雷達系統故障。

(2)主動電子掃描相列雷達(Active electronically scanned Array Radar, AESA)

利用相列天線表面的每一陣列單元中的訊號產生、發射與接收能力，亦即將訊號產生器、放大器等縮小放於每一個陣列單元以內，天線不需要依靠訊號產生器以及導波管

饋送訊號。由於每個陣列單元都可以單獨作為訊號源主動發射電磁波，所以稱為主動相位陣列。

³¹每個天線單元都配裝有一個發射接收組件，每一個組件都能自己發射和接收電磁波。此外，主動相列雷達器具備移相器，它利用計算機控制，可以通過相位變化來改變波束的發射方向，這種方法被稱作電子掃描，如圖十五。

A.優點³²

(a)電子掃描天線固定：天線不需要機械驅動，尺寸通常可做得很大，故而提高雷達威力，增加雷達探測距離，不存在機械掃描誤差，角跟蹤和距離跟蹤精準度提高。

(b)波束理想靈活：波束掃描不受機械慣量的限制，可在幾微秒內指定預定的方向，比一般機械掃描快一萬倍。即使波束窄，由於波束移動快，在不降低測量精準度的條件下，可保持一定掃描數據率。此外，單個雷達可同時形成多個獨立波束，分別實現搜索、識別、跟蹤、制導、無源探測等多種功能。

(c)自適應能力強：能根據變化多端的空



圖十五 AESA基本原理

資料來源：如註釋30

31 National Instruments, 「4大技術趨勢推動先進雷達發展」, 2019年3月27日, <https://www.edntaiwan.com/20190327ta61-4-game-changing-underlying-technologies-for-advanced-radar/>

32 「相位陣列雷達工作原理」, 每日頭條, 2019年6月3日, <https://kknews.cc/military/9gqbr5b.html>

情即時確定最佳工作方案，對複雜目標環境的適應能力極強。

(d)可靠性高：由於天線陣列中輻射源多，並聯工作的發射源和電路也很多，即使其中的部分組件損壞時，對雷達性能影響不大。此外，由於大量採用低功率發射組件，且天線陣列不需使用故障率較高的機械轉動裝置，可有效解決高頻饋電部分的高壓擊穿問題，如此便可提高可靠性。

(e)抗高擾性能好：由於波束的形狀和掃描方式可以改變，這種信號處理和靈活的控制，便於綜合運用抗干擾技術。

B.缺點³³

目前平面天線陣產生的波束通常在 $90^{\circ} \times 120^{\circ}$ 立體角(俯仰角 $\pm 45^{\circ}$ 和方位角 $\pm 60^{\circ}$)範圍內掃描。為了在半球空域內監視目標，須採用三個或四個平面陣。

先進火控雷達介紹

本節介紹主要的先進火控雷達，並對相關性能及參數分析進行分析，以了解目前世

界發展概況，如表四：

一、PESA雷達

1.Zaslon雷達³⁴

Zaslon是第一個進入戰鬥機服役的相列雷達，由俄羅斯的蒂霍米羅夫儀器設計科學研究所(Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design)在1975年至1980年開發的全天候多模式機載雷達，並安裝於MIG-31戰鬥機，如圖十六，是一款PD雷達，具有被



圖十六 MIG-31戰鬥機

資料來源：維基百科，<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/DN-ST-92-02246.JPEG>

表四 各國火控雷達比較

雷達型別	Zaslon	APG-77	APG-80	APG-81
類型	PESA	AESA	AESA(SABR)	AESA
機型	MiG-31	F-22	F-16 E/F	F-35
生產國	俄羅斯	美國	美國	美國
製造商	Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design	Northrop Grumman	Northrop Grumman	Northrop Grumman
服役年份	1981	2005	2006	2008
TRM個數	1700個X波段雷達/64個發射器的L波段應答器	1,956個	約1,000個	1676
追蹤鎖定目標數	10個	11	6	23

(資料來源：作者製表)

33 David L. Adamy, "Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation", Artech House, 2001, pp.156-157.

34 MiG Alley Military Aviation News, "Zaslon Radar", <https://toad-design.com/migalley/index.php/jet-aircraft/mig31/mig31-zaslon-radar/>

動電子掃描陣列（PESA）天線和數位信號處理功能。Zaslon使用的天線是一個多通道系統，包括兩個單獨的電子控制陣列，一個帶有1700個發射器的X波段雷達和一個帶有64個發射器的L波段應答器，被集成到一個天線中³⁵。

雷達天線直徑為1.1公尺，與機械掃描天線相比，大幅增加空間覆蓋範圍。性能方面，擁有瞬時掃描和多目標接合能力方面的優勢，典型的機械掃描天線可能需要12-14秒才能完成掃描。Zaslon在9-9.5 GHz頻段內運行，可以檢測並打擊低至25m的目標，包括巡航導彈。大型機載目標的最大搜尋範圍為300公里。1978年2月15日，首次執行了檢測和跟蹤十個目標的任務，並於1983年全面投入使用³⁶。

二、AESA雷達

1. AN/APG-77

AN/APG 77是由美國諾斯諾普·格魯曼公司設計生產的先進火控雷達，目前配備於美國F-22戰機，並提供了空對空及空對地優勢，如圖十七。性能方面，提供了方位角和仰角120度視場，由1956個低功率X波段的發射/接收(T/R)組件構成低旁波瓣陣列，採用五位移相器控制每個組件的相位，使用四臺獨



圖十七 AN/APG-77

資料來源：維基百科<https://en.wikipedia.org/wiki/AN/APG-77>

立電腦統一控制波束的相移，每個電腦控制相列天線的四分之一，且能同時以寬視域、多模式工作。³⁷雷達傳感器主要組件是高可靠性的主動電子掃描陣列，具有快速的波束敏捷性，低雷達橫截面和目標檢測能力，使空中優勢戰鬥機能夠實現「先看先殺」能力，並能支持F-22的隱身設計。³⁸最大有效探測距離約為115浬的狀態下，可同時追蹤11個目標。平均失效間隔時間(MTBF)約為450小時

35 V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, "Weapon control system WCS "Zaslon" for MiG-31 fighter", https://web.archive.org/web/20150214014038/http://www.niip.ru/eng/index.php?option=com_content&view=article&id=12:-l-r-lr&catid=8:2011-07-06-06-33-26&Itemid=8

36 Владимир Ильин, "Дальний истребитель-перехватчик МиГ-31 / Самые скоростные истребители МиГ-25 и МиГ-31" 2001 год, <http://www.milrus.com/vvs/mig31/text.shtml>

37 向敬成、張明友、周俊杰, 「雷達系統」(臺北市, 五南, 2004年7月), 頁337。

38 Northrop Grumman, "AN/APG 77 AESA RADAR AND THE F-22 RAPTOR", <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/an-apg-77-aesa-radar/>

以上。

2018年，美軍為強化F-22作戰能力，進行名為「基線3.2B」(Baseline 3.2B)與「升級6」(Update 6)的軟硬體升級。目標在於提升空對地功能，整合最新的空對空飛彈，並提升F-22的網路戰力，預計讓F-22延長服役至2060年。針對雷達升級部分將具備SAR地圖的功能，戰機的任務能力將擴展到包含直接識別和瞄準敵方地面防禦和機動部隊，如圖十八。

2.AN/APG-80

AN/APG-80由格魯曼公司所研製，裝備於阿拉伯聯合大公國F-16 Block 60戰鬥機，如圖十九。此外，因APG-80技術變動性最大，其製造商洛克希德·馬丁公司更賦予此機F-16E/F新型號，並稱為沙漠隼(Desert Falcon)戰機，被認為戰隼家族發展的新里程碑³⁹。

AN/APG-80為可變敏捷波束雷達(Scalable Agile Beam Radar, SABR)，其固定陣列上裝有約1,000個諾普公司第四代砷化



圖十八 F-22

資料來源：Northrop Grumman, <https://www.northropgrumman.com/wp-content/uploads/AN-APG-77-AESA-Radar-banner.jpg>



圖十九 F-16E block60

資料來源：維基百科, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e0/F-16e_block60.jpg

鎵(GaAs) T/R模組，可瞬間對任何方向發射出雷達波束，具低截獲率特性。探測距離遠，探測範圍達到140度，可自動地形跟蹤。搜索模式中，具有20個目標追蹤的能力，可同時捕捉6個目標，最大有效探測距離約6浬(RCS=2m²)平均失效間隔時間約390小時⁴⁰，如圖二十。此外，雷達最大優勢是能同時進行多種模式的操作，例如雷達持續搜索和追蹤多個目標的同時，也能執行空對空搜索與追蹤、空對地標定、地貌追沿等多重功能；空對地工作模式中，雷達能產生高解析度的合成孔徑影像，使得戰機識別和設定目標的能力都獲得提高，而且戰機能同時追蹤和攻擊空中與地面目標。

2013年美國提出由美國空軍及中華民國空軍F-16A/B性能提昇計畫中，美商洛馬公司選擇了SABR為整個計畫的核心，讓原本使用傳統機械式雷達系統APG-66(V)3的F-16取得

39 南山，「F-16E/F沙漠隼戰機」，青年日報94年3月28日第3版，<http://www.youth.com.tw/db/epaper/es001005/cb0572.htm>

40 丁德宏，空軍戰機先進火控雷達之發展，頁116。



圖二十 APG-80

資料來源：Northrop Grumman, https://s3.amazonaws.com/cms.ipressroom.com/295/files/2016/6/578ff5a42cfac2624fbd08dc_pgL_AN-10136_001/pgL_AN-10136_001_cc06de9a-2ce8-4175-80f9-43c0e977b3b7-prv.jpg

AESA雷達能力，能大幅強化現有F-16的軟硬體抗干擾能力並降低故障率。

APG-83為格魯曼公司專為F-16戰機設計的SABR。SABR是一種功能全面的火控AESA雷達，旨在電子威脅環境中為下一代武器和戰術提供支持。2012年，SABR在美國愛德華空軍基地開始試驗，進行了17次連續驗證飛行，整個過程中沒有發生穩定性或冷

卻問題，任務成功率達到100%，由此證明其卓越的運行性能和可靠性。

APG-83初步性能提供了增強的態勢感知，更強的探測能力，高分辨率SAR測繪功能，自動目標提示，電子保護，交錯的空對空和空對地模式操作以及全環境精確打擊能力⁴¹。

3.AN/APG-81

AN / APG-81由格魯曼公司設計開發並用於F-35閃電II戰鬥機。2005年，APG-81首次在格魯曼公司的BAC 1-11機載實驗室上空飛行，並累計飛行了300多個小時，所有軟體模塊都已成熟。2008年，洛馬公司的CATBird航空電子測試臺飛機首次進行雷達飛行⁴²。

APG-81是APG-77的後繼雷達，主要功能包括APG-77的空對空模式、空對地模式、高分辨率映射、多地面移動目標指示和識別(GMTI)、跟蹤、電子戰爭和超高帶寬通信。當前F-22最新生產的雷達是APG-77(v1)，有很大程度借鑒了APG-81的功能。

⁴³雷達功能方面，APG-81背面安裝了先進的接收器與激勵器模組，能產生極端的波形捷變。該雷達系統沒有機械性可移動零件，不過其「可替換配件」的設計，能支援

41 Northrop Grumman, "SABR Will Provide Unprecedented Radar Capability to U.S. Air Force and International F-16s", <https://news.northropgrumman.com/news/releases/lockheed-martin-selects-northrop-grumman-s-scalable-agile-beam-radar-sabr-for-the-f-16-aesa-radar-upgrade-program>

42 BALTIMORE, "Northrop Grumman's APG-81 Radar Sensor Performs Flawlessly On First Mission Systems Flight of Lockheed Martin F-35 Aircraft" Jun 22, 2010, <https://archive.is/20160123050256/http://investor.northropgrumman.com/phoenix.zhtml#selection-63.11-63.23>

43 Steve Taranovich, 「F-35 Lightning II戰鬥機：最先進電子技術的設計結晶」，2015年12月16日，https://archive.edntaiwan.com/www.edntaiwan.com/ART_8800525982_3000005_NT_bb50ddad.HTM

硬體與軟體模組的快速維修或升級；由於具備在任何時間與任何方向指向天線波束的功能，AESA雷達能為戰機提供最大的靈活性。其中，雷達的心臟則是驅動位於系統前方1,676個砷化鎵(GaAs)T/R模組，同時為F-35提供了一個全天候的有源瞄準傳感器，光電傳感器系統(EOSS)則將白天與夜晚的無源傳感器合二為一，從而避免被敵機的警告系統探測發現。這個系統由光電瞄準系統(EOTS)和分佈式合成孔徑系統(DAS)組成，前者主要用於識別和瞄準戰場目標，後者更多用於探測飛機四周空域內的敵方威脅⁴⁴。

未來空用AESA雷達發展趨勢

一、第一代至第三代半導體介紹及比較

隨著科技需求的日益增加，第一階段以矽(Si)為主的半導體材料，其傳輸速度慢、功能單一等缺點便暴露出來，於是化合物半導體材料應運而生。1990年代，以砷化鎵(GaAs)為代表的第二代半導體材料擁有較佳電子特性，且電子移動率比傳統的矽快，並具抗干擾、低雜訊與耐高電壓、耐高溫與高頻使用等特性，比矽元件更適合操作在高功率的場合，使得GaAs可以運用在行動電話、衛星通訊、微波點對點連線、雷達系統等地方，並被廣泛使用於軍事領域。第三代半導

體材料以氮化鎵(GaN)為發展主軸，被稱為「寬能隙半導體」(WBG)，相對於以往的材料有著更寬的帶隙，帶隙越寬，越能耐高溫、高壓、高頻、高電流，能源轉換效率也較好⁴⁵。

GaN是一種較新半導體材料，其成本僅GaAs的百分之六十六，且對於輻射環境的穩定性高，電晶體主要優勢是具備更高的功率容量和功率密度，相比GaAs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，更使得雷達偵測範圍提高至原先的1.5倍，MTBF延長10倍。現已應用於電戰干擾機、愛國者雷達⁴⁶等，半導體比較如表五。

表五 第一代至第三代半導體比較

階段	第一階段	第二階段	第三階段
代表	矽	砷化鎵	氮化鎵
帶隙寬	約1.17eV	約1.42eV	約3.4eV
功率	低	中	高
導熱率(W/cmK)	1.5	0.55	1.3
電子遷移率(cm ² /V-s)	1350	7000	1500
可靠性	小	中	高
應用雷達		AN/APG-77	AN/APG-81

資料來源：劉青雲，「利用氮化鋁鎵/氮化鎵/氮化鋁鎵量子井電子阻擋層提升高速電子遷移率電晶體之崩潰電壓對於元件切換的應用」，國立臺灣師範大學碩士論文，2013年，頁9。

44 「世界當紅F35戰鬥機具有無與倫比的態勢感知能力」，每日頭條，2018年12月4日，<https://kknews.cc/military/6zxzyymm.html>

45 Daniel，「連台積電都搶進！第三世代半導體材料-氮化鎵GaN是什麼？」，科技說，2020年8月18日，<https://www.techteller.com/sci/gan/>

46 謝佳穎、劉書麟，「海上守護者－認識美軍新一代神盾系統AN/SPY-6之雷達技術」，海軍學術雙月刊第五十三卷第五期，108年10月，頁26。

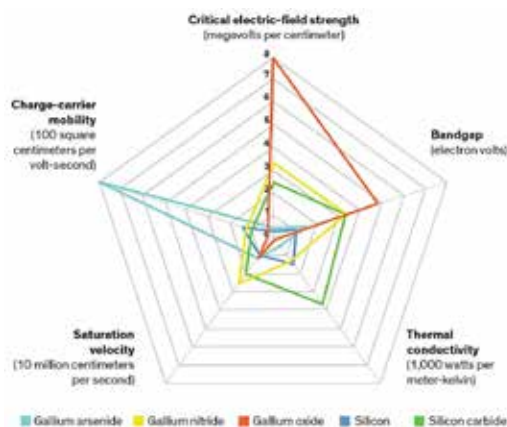
二、第四代半導體-氧化鎵(Ga_2O_3)介紹⁴⁷

隨著透明的導電氧化物-氧化鎵(Ga_2O_3)出現， Ga_2O_3 帶隙寬約為4.8eV，領先GaN(3.4eV)，也比Si(1.1eV)更具有大幅度優勢。

Ga_2O_3 有五種形態，其中 β - Ga_2O_3 是最穩定的形態。在對半導體至關重要的特性中，高臨界電場強度(EC)是 β - Ga_2O_3 的最大優勢，意味著可設計出功能強大的RF設備，如圖二十一。

Ga_2O_3 還可藉由摻雜(Doping)流程向其添加電荷載流子，增加其導電性。 Ga_2O_3 的另一個優點，就是在大型晶圓之結晶的 Ga_2O_3 實際上非常容易製造。日本的Novel Crystal Technology公司已經展示了150毫米的 β - Ga_2O_3 晶片。

在日本資訊和通訊技術(NICT)研究所的Masataka Higashiwaki，是第一個意識到 β - Ga_2O_3 在電源開關應用中具有潛力的人。



圖二十一 半導體特性

資料來源：如註釋47

2012年，報告有關於首顆單結晶的 β - Ga_2O_3 電晶體，其擊穿電壓大於250V。作為比較，GaN達到這一成就，花了近二十年的時間。2013年，研究人員演示了擊穿電壓為370V的金氧半導體場效應電晶體(MOSFET)。2017年，製造了擊穿電壓大於600V的MOSFET。2018年初，使用不同幾何形狀的MOSFET達到的高頻損耗值達到或超過了矽的理論極限。

但是， β - Ga_2O_3 的最大缺點是低導熱率(約為0.1-0.3W/cmK)，熱量可能會滯留在設備內部，限制設備的使用壽命；其次，因電子遷移率低，只能使 Ga_2O_3 傳導電子而不是電洞，難以製造p型半導體。但就作為功率半導體材料而言， Ga_2O_3 性能潛力仍是值得關注的技術。

結語

雷達最早起源於第一次世界大戰，並於二戰結束後快速發展。在戰場上，雷達無疑是最重要的感測器，能提供早期預警及追蹤，最能先偵蒐敵情並進行防禦者，就能主導戰場。現今空用火控雷達技術，已經發展為AESA雷達，主要優勢是具備波束靈敏性、遠距離偵蒐、感知能力多樣性及可靠性高，是目前各國空用雷達主要發展方向。

近年來，中共勢力迅速崛起，從2013年開始提出一帶一路戰略，由其倡議並主導的跨國經濟帶，除了看重經濟提升，最重要的是後續產生的地緣政治效應。2017年美國面

47 Gregg H. Jessen, "The Supercharged Semiconductor: Gallium oxide could make powerful radios and switch thousands of volts", IEEE Spectrum Volume:58, Issue:4, April 2021, pp38-42.

對中共威脅，提出印太戰略，由美、日、澳及印組成太平洋及印度洋戰略安全網，並計劃在第一島鏈內遏止中共的海空力量。臺灣位處第一島鏈核心，中美雙方關係可謂牽一髮而動全身，面對現今國際秩序的重整，我國提升自我防衛能力已是刻不容緩。

為了提升國防自主實力，國機國造是目前我國重大政策及未來發展方向。就空用 AESA 雷達技術發展方面，目前我國 IDF 戰機使用的 GD-53 雷達，仍屬於機械掃描雷達；F-16 戰機升級計畫尚在執行，尚未全面替換傳統機械式雷達。面對中共頻繁擾臺，上述情況皆是我國亟欲解決的問題，期許我國能不斷增強技術能量，除了達成國防自主的目標，更提升三軍整體實力，並在面對未來更嚴峻的挑戰時，能更有效抵禦外敵，完成保家衛國的任務。

參考文獻

1. 王長河，「空權百年—台海安全制空論」，空軍學術雙月刊568期，2004年，頁3-25。
2. Fawwaz T. Ulaby, Eric Michielssen, Umberto Ravaioli, "Fundamentals of Applied Electromagnetics", 6th ed. (臺北市，東華書局，2011年5月)，頁740。
3. 黃泓偉，「24GHz 頻率調變連續波雷達系統之前端電路設計與整合」，國立交通大學碩士論文，2007年，頁3。
4. M. Zeeshan, M.S. Arif, M. Umair, M. Javed, "survey of systems engineering approaches for design and development of aesa radar for fighter aircraft", (IEEE International Bhurban Conference on Applied Science & Technology, 2019) (IBCAST)
5. 丁德宏，「空軍戰機先進火控雷達之發展」，新新季刊第48卷第三期，109年7月，頁108-123。
6. George W. Stimson, Hugh Griffiths, Christopher Baker, David Adamy, "Introduction to Airborne Radar", SciTech Publishing, 3rd, May 30, 2014, chapter 31 Automatic Tracking.
7. 鍾翼能，「行政院國家科學委員會補助專題研究計畫報告書-適應性追蹤技術之研發與設計」，大葉大學電機工程研究所，2000年10月20日，頁2-5。
8. Habibur Rahman, "Fundamental Principles of Radar", CRC Press, June 3, 2019, pp.25-27.
9. C. W. Sherwin, J. P. Ruina, and R. D. Rawcliffe, "Some Early Developments in Synthetic Aperture Radar Systems", IRE Transactions on Military Electronics, April 1962, pp.111-115
10. 盧玉芳，「以雷達干涉技術監測雲林地層下陷」，
11. 國立交通大學碩士論文，2007年，頁20-21。
12. 向敬成、張明友、周俊杰，雷達系統，(臺北市，五南，2004年7月)。
13. 楊嘉豐，「機載合成孔徑雷達訊號之運動補償」，
14. 國立交通大學碩士論文，2004年，頁29。
15. Alberto Moreira, Synthetic Aperture Radar

- (SAR):Principles and Applications, (German Aerospace Center, July 2013), pp.50-57.
16. 張光義、趙玉潔，相控陣雷達技術，(北京：電子工業出版社，2006年12月)。
17. 彭新晏，顏志恆，「大型主動相列雷達之技術發展」，新新季刊第48卷第三期，109年7月，頁16。
18. David L. Adamy, "Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation", Artech House, 2001, pp.156-157.
19. 謝佳穎、劉書麟，「海上守護者－認識美軍新一代神盾系統AN/SPY-6之雷達技術」，海軍學術雙月刊第五十三卷第五期，108年10月，頁26。
20. Gregg H. Jessen, "The Supercharged Semiconductor: Gallium oxide could make powerful radios and switch thousands of volts", IEEE Spectrum Volume:58, Issue:4, April 2021, pp38-42.

作者簡介

李佩珊中尉，空軍官校航空電子工程學系107年班。現任於空軍航空科技研究發展中心中尉研發官。



日本陸上自衛隊CH-47J運輸機(照片提供：張詠翔)