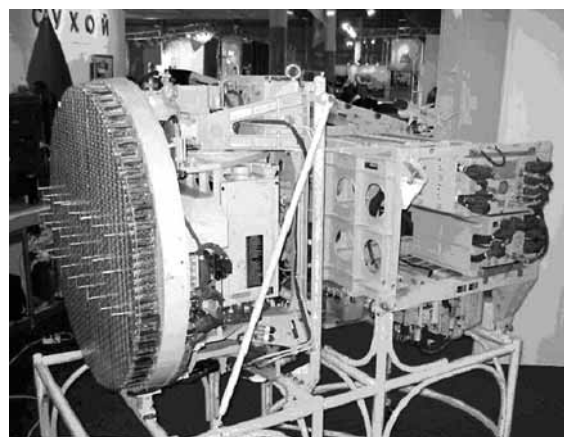


· 魏楞傑 ·

F-16的主動式電子掃描陣列雷達(下)

機械式掃描平面陣列天線的波束品質固然較好，但仍然需要機械裝置來轉動到要掃描的方向，變換方向的速度並不快，且和碟形天線有相同的機械可靠度問題。爲了滿足同時多目標接戰的作戰需求，天線必須在一定的短時間間隔內，以預定的掃描型態對不同的方位、空域輪流掃描，因此得用複雜的機械環架（gimbals）裝置及伺服馬達來推動。伺服馬達的快速推動會造成機械磨損，而它加諸於天線及機體支撐結構上的機械力量，也不時會造成材料的疲勞破壞。



Su-30MKI的NIIP-N-011M BARS「雪豹」被動式電子掃描相位陣列雷達。

空用雷達上。電子掃描平面陣列天線的設計，是在每一個槽型天線元件的後面，裝有一單獨的電子控制裝置，控制通過元件的微波訊號時間延遲及相位（phase），各天線元件在電腦的控制下，能在千分之幾秒內在所需的方位，產生所需的雷達波形。

被動陣列天線

第一代電子掃描平面陣列天線，以訊號的相位做為控制參數，因此稱爲相位陣列（phased array）天線。典型的設計方式與傳統的平面陣列天線很類似，但在陣列天線元件和元件背後的微波饋送電路間，加入一層由

電腦控制的相位控制模組。由於天線內使用的零件在電子工程上屬於「被動式」（passive）零件，這種天線就被稱爲「被動式電子掃描陣列」（passive electronically steered arrays）天線」。採用被動式電子掃描陣列天線的戰機雷達有：美國B-1B轟炸機的AN/APQ-164、B-2隱形轟炸機的AN/APQ-181、法國颶風（Rafale）戰機上的RBE2、俄羅斯MiG-31的Zbi-16 Zaslon、MiG-29的Phazotron Zhuk ph、以及Su-30的NIIP-N-011M BARS。其中於一九八三年進入MiG-31服役的Zbi-16 Zaslon，是全球首具裝於戰機上的被動式電子掃描陣列雷達（PESA）。

與機械式掃描平面陣列天線相較下，被動式電子掃描陣列天線的方向控制非常敏捷，若是設計得當，被敵方雷達照射時的雷達回波會大幅降低。由於雷達波束以電子式轉向或整形，波束敏捷無比，因此一具被動式電子掃描陣列雷達的功能，就如同多部有各自波形及掃描型態的雷達，可同時交錯進行不同的工作模式，譬如：此雷達可用某一波形及掃描型態追蹤空中目標，同時用另一種波形及掃描型態搜索地面目標。

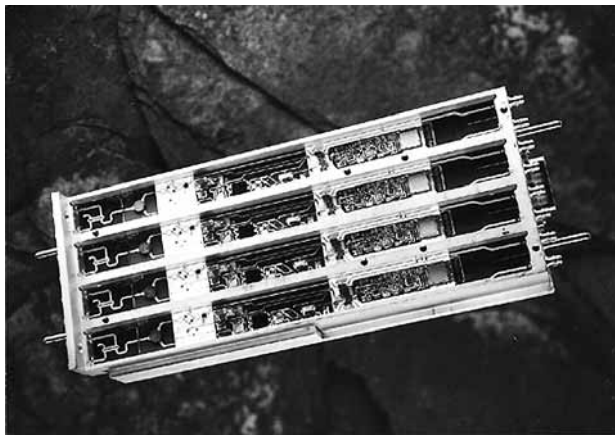
不過，被動式電子掃描陣列天線

對雷達的可靠度及效率毫無助益，發射微波仍然得靠發射機內的高功率行波管（Traveling Wave Tube），原本可靠度不佳的問題依舊無法避免，而把數位控制訊號傳送到各個相位控制模組的複雜電路，也是維護上的一大負擔，加上不論在收、發微波時，相位控制模組都會有訊號強度的耗損，因此它的靈敏度反而不如機械式轉動平面陣列天線，得有功率更高的微波管來驅動。

主動陣列天線

早在二十多年前，美國國防部就體認到必須開發更好的天線科技，依此需求而開發的新天線仍然使用相位陣列的觀念，稱為「主動式電子掃描陣列」（active electronically scanned array, AESA）天線，每個天線元件內有由「主動式」（active）電子元件組成的發射機及接收機。

主動式電子掃描陣列天線科技已成為現今空用雷達發展的主流，它之所以能夠蓬勃發展，端賴砷化鎵微波單晶片（Gallium Arsenide Microwave Monolithic Circuit）的低成本大量生產。此晶片的製造相當困難，電子工業界幾乎整整花了二十年的時間，才讓它由昂貴的精品型生產，成為價格



主動式平面相位陣列天線的收發模組
（此處為一組四個之型態）。

合宜、且符合高可靠度要求的大量生產件。

傳統雷達以一高功率碟形天線發射及接收雷達微波，而主動式電子掃描陣列天線則採用數百、數千個低功率，單獨控制的收／發模組（Transmit/Receiver Module），以高速處理器鏈結。收／發模組在設計上，為天線元件內一獨立個體，內含一低雜訊接收機、功率放大器、以及一數位控制相位／延遲及增益元件，波束轉向極為靈活，還有非常小的旁波瓣，每個收／發模組在程式控制下可成為一發射機、一接收機、或是一部雷

達，全部收／發模組可同心協力成為一部強大的雷達，但也能各自同步執行不同的工作，如：一部份擔任雷達警告接收機，另一部份擔任干擾器，其餘部份擔任雷達。收／發模組可視需要擔任任何一種次系統的角色，其輸出功率或接收機敏感度和收／發模組的使用數量成正比，先進微處理器會來自眾多收／發模組的資料轉化成整合後的圖形，提供給飛行員。

機械式掃描天線由三、四個伺服馬達驅動的環架結構掃描天際或地面，一次只能將波束指向一個方向，而主動式電子掃描陣列天線則是固定不動，沒有任何活動零件，雷達波由電子方式以光速改變方向，在瞬間變換指向的位置，因此配上主動式電子掃描陣列天線的雷達，將能比現役機械式轉動天線雷達追蹤更多的目標，也能同時執行多種工作模式，此種最新式的雷達稱為主動式電子掃描陣列雷達。

主動式電子掃描陣列雷達的威力是機械式轉動天線雷達的十到三十倍，距離解析度、反制能力及工作彈性也強上許多，而且可靠度佳、維護簡易、全壽期成本較低。

作戰應用優點

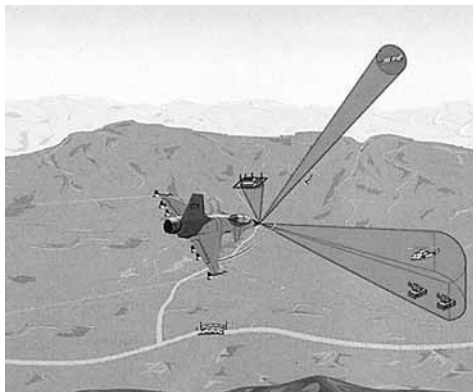
以作戰及功能的觀點而言，主動式電子掃描陣列雷達的主要優點有：

一、由於收／發模組（

transmitter/receiver module）的低雜訊接收機位在天線元件內，因此天線接收機的熱雜訊可降低為原有的一半到四分之一，提高雷達的靈敏度及偵測距離。公開的文獻資料中估計：F-22的主動式電子掃描陣列雷達可在兩百二十五公里外，偵測到雷達面積一平方公里的目標。

二、主動式電子掃描陣列雷達較機械式雷達更有工作彈性，幾乎可同時執行多項工作。發射模組以電子式進行雷達波束掃描，不是由一圓盤做機械性掃描，這意味著雷達的重掃速率不會受限於機械動作，而是取決於控制器的處理速率。譬如一部機械式掃描陣列雷達大約需時一秒鐘，才能將波束移轉到相隔一百度的另一處目標，而電子掃描陣列雷達則耗時不到千分之一秒，且幾乎可同時控制各自獨立、不同頻率的雷達波束方向，因此F-22的APG-77雷達瞬時涵蓋範圍為一百二十度，而F-15E上的APG-70雷達，則需時十四秒鐘才能掃完同樣的區域。

三、由於主動式電子掃描陣列雷達的掃描速率及資料處理速度快，可



主動式電子掃描陣列雷達可以交錯多種頻率不同的波形，近乎同時執行不同的功能。

以交錯多種頻率不同的波形，因此可近乎同時執行不同的功能，包括傳統的空對空雷達功能，如：掃描暨追蹤目標、飛彈導引、干擾、威脅警告、對地攻擊、地形繪圖……等，這意味著主動式電子掃描陣列雷達較傳統雷達的可靠度高、搜索距離遠，還有無與倫比的能力來同時執行飛機搜索、追蹤地面車輛、地形繪圖。

四、主動式電子掃描陣列雷達可同時執行多種戰鬥功能，因此戰機在空中戰時，不需其他飛機的電子支援（如：干擾）或是指揮及控制，這種自動化反應是空戰中率先接戰敵機很重要的一个要件。

後勤維護優點

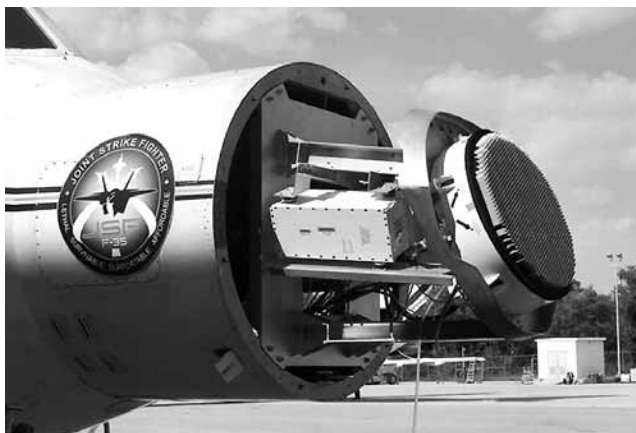
以後勤維修及壽命成本的角度而言，主動式電子掃描陣列雷達的優點有：

一、發射機功率分配於成百上千個收／發模組上，而非集中於單一功率發射管內，全部收／發模組可同心協力成為一部強大的雷達，但也能各自同步執行不同的工作，如：一部份擔任雷達警告接收機，另一部份擔任干擾器，其餘部份擔任雷達，即使有十分之一的收／發模組損壞，天線的功能仍然無礙，只是性能會稍遜。就可靠度及後勤支援的觀點而言，這種「優雅的衰退」（graceful degradation）非常可貴，即使雷達損失了一些收／發模組，仍能繼續工作，直到排定的維修日期再行更換。

二、傳統雷達由導波管將高功率傳輸到天線，發射機功率管需承受高電壓及大電流，很容易損壞；主動式平面相位陣列天線的每個收／發模組僅處理數瓦特的小功率，承受的電氣負荷小了許多，不容易損壞。這方面有個典型的比較數字：傳統的戰機雷達平均損壞時距（Mean Time Between Failure）大約在六十到三百小時之間，主動式平面相位陣列雷達則推進到超過一千小時以上。例如諾格公司（Northrop Grumman）對它

的F-35聯打機 (Joint Strike Fighter) AN/APG-81雷達就非常有信心，建議把雷達罩封死；同樣的，雷神公司 (Raytheon) 也表示F/A-18E/F上的AN/APG-79雷達，平均損壞時距為一萬五千工作小時，雷達天線在十到二十年內都不需要維修。

除了不易損壞外，更換收／發模組不需拆卸雷達，因此維修價格低廉，可以彌補較貴的天線初期建置費用。而主動式電子掃描陣列雷達不需機械掃描雷達上的轉向機構，也省下了製造高精度轉向機構的花費。



F-35聯打機的ANAPG-81主動式電子掃描陣列雷達。

其他優點

主動式電子掃描陣列雷達還具備成為高功率微波 (High Power Microwave) 武器的潛力，雖然戰機主動式電子掃描陣列雷達的尖峰功率，遠低於指向性能量武器的功率，但若讓它對準頻率特定的敵方電子系統，如：飛彈尋標器、機上雷達、電腦系統，仍足以摧毀這些系統的功能。

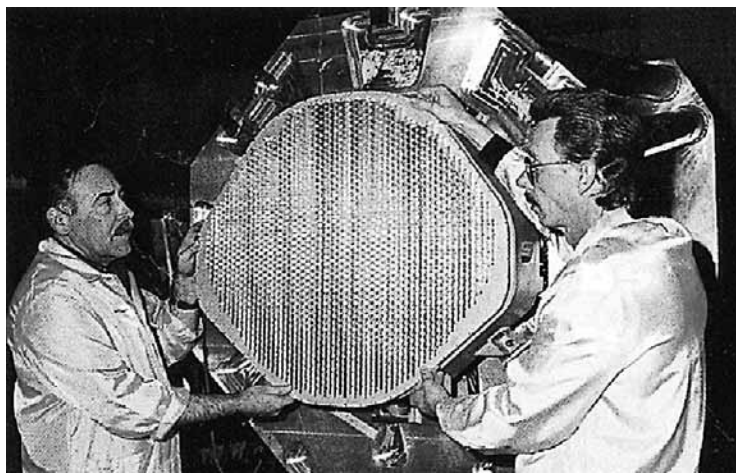
主動式電子掃描陣列雷達由於可控制旁波瓣和波束寬度，雷達波發射頻率多變化，波形也多樣化，故能提高戰機的存活率，降低敵方經由偵察雷達波發現戰機的機率。另外，主動式電子掃描陣列雷達在安裝時可向上傾斜某個角度，不會直接面向敵方雷達，減少戰機整體的雷達蹤跡。

主動式電子掃描陣列雷達還可成為高速資料鏈的潛力。空優戰機未來可能會以主動式電子掃描陣列雷達蒐集、處理電子資料，提供威脅位置、目標追蹤、攻擊成果評估，以及其他重要的偵察資訊給戰區內各作戰載台及指揮中心。F-22猛禽號 (Raptor) 上的APG-77經過驗證能以每秒鐘兩百七十四個百萬位元的速率，將七百二十個百萬位元的合成孔徑雷達畫面，在三點五秒內傳輸完畢，若是用

仍有缺點

主動式電子掃描陣列雷達有沒有缺點？主動式電子掃描陣列雷達除了採購成本較高外，零組件安置也非常緊密，有很嚴重的散熱問題。由於微波晶體功率放大器的天性使然，收／發模組發射機的功率效率通常不到百

美軍及北約的標準資料交換系統的鏈-16 (Link 16)，需花上四十八分鐘。



F-22的AN/APG-77雷達。

分之四十五，因此會產生大量的熱，若沒有適當的予以散發，砷化鎵微波單晶片會被高熱熔化。此時傳統雷達使用的氣冷式裝置已不敷使用，必須用液冷式冷卻裝置，因此整個雷達系統會較重，需要較大的安裝空間，也需要較大的電力，現役戰機想昇級改裝主動式電子掃描陣列雷達時，這是個最大的問題。

美國F-15C戰機在改裝AN/APG-63(V)2主動式電子掃描陣列雷達時，爲了平衡新雷達系統在鼻端造成的四百磅增重，必須在機尾裝上六百磅的配重，使得全機重量較原來增加了一千磅。

F-16號牌雷達

目前有能力爭奪F-16改裝主動式電子掃描陣列雷達市場的產品，僅有雷神先進戰鬥雷達和諾格的可變尺寸敏捷波束雷達，雖然目前在阿拉伯聯合大公國(United Arab Emirates)服役的第六十批次(Block 60)F-16E/F沙漠鷹隼(Desert Falcon)，一開始設計時就規劃安裝諾格AN/APG-80敏捷波束(Agile Beam)主動式電子掃描陣列雷達，但也僅限此一批次構型而已，其餘的F-16由於構型不同的緣故，只能遷就舊型機體

內電源、冷卻系統的限制，安裝修改型的主動式電子掃描陣列雷達。

雷神的先進戰鬥雷達取材自該公司的AN/APG-79雷達，AN/APG-79是爲了汰換F/A-18E/F超級大黃蜂號(Super Hornet)上舊有的AN/APG-73機械式掃描雷達，以及爲新出廠的同型戰機而開發的。AN/APG-79雷達天線僅比AN/APG-73的重四十二公斤，但可靠度提高五倍，功率也大爲增強，空對空的偵測距離增加到原本的兩至三倍，也能追蹤更多的目標(數量仍爲機密)。此雷達還能爲F/A-18E/F機上的AN/ASQ-228先進定標前視紅外線(Advanced Targeting Forward-Looking Infra Red)提供定標及偵察目標位置；在空對地攻擊時，AN/APG-79的合成孔徑雷達工作模式配合地面移動目標指示追蹤，可提供最大達AN/APG-73111倍的合成孔徑雷達解析度。由於AN/APG-79具備多工模式能力，因此F/A-18F的前座飛行員在執行空對空任務時，後座的武器管制官(Weapon System Operator)則能同時執行空對地任務。

先進戰鬥雷達改良AN/APG-79雷達的冷卻方式，以一液體對氣體熱交換器(liquid-to-air heat

exchanger)取代系統內原本的液態冷卻系統，採用該公司爲德國空軍F-4F戰機執行增進戰鬥效率(Improved Combat Efficiency)專案所開發的熱交換技術，早期構型的F-16欲換裝先進戰鬥雷達時，完全不需更動機上的電源及冷卻系統。

諾格的可變尺寸敏捷波束雷達取材自該公司的AN/APG-80雷達，AN/APG-80是把F-16C/D上舊有的AN/APG-68(V)，換上具備有一千個收／發模組的天線，主要功能專注於空對地模式下，解析度優於一英呎的合成孔徑雷達地形繪圖，但它的空對空搜索距離也是AN/APG-68(



雷神於F-16上展示安裝的先進戰鬥雷達(RACR)。



諾格於F-16上展示安裝的可變尺寸敏捷波束雷達（SABR）。

△)的兩倍。

可變尺寸敏捷波束雷達的設計，與AN/APG-80雷達有所不同，它充份考量了早期構型F-16的電氣及實體界面，完全不需更動機上的電源及冷卻系統。此雷達名稱中的「可變尺寸」，就是指它可適應各種戰機內的空間限制，為不同戰機提供高性能的火控雷達。

上述兩雷達都具備大尺寸合成孔徑圖像的能力，它是一種高解析度的機載雷達新技術，可涵蓋地面大範圍內的單一影像，為F-16戰機提供更大且精準的數位化目標影像，飛行員可從座艙裡的大型圖像中掌握目標的精確位置，自動鎖定目標，提升飛行

員的情勢覺知與目標辨識能力。

二〇一三年四月十五日，雷神宣布該公司的「先進戰鬥雷達」獲得南韓F-16 C/D的青睞；二〇一三年七月三十一日，洛馬宣布美國空軍及我國的F-16 A/B機隊性能提升，將選用諾格的「可變尺寸敏捷波束雷達」。新加坡則在二〇一三年九月宣布該國的六十架F-16 C/D也有意進行空電現代化及結構延壽，國際航太業界普遍認為新加坡必將吸取南韓及我國的性能提升經驗，決定該國的選擇方案。

結語

F-16第一架原型機YF-16於一九七三年十二月出廠，一九七四年二月首次試飛，一九七六年十二月生產型首飛，一九七八年底開始交付美國空軍，現已成為美國空軍的主力戰機之一，並獲得全世界二十餘國空軍青睞，全球超過四千五百架的銷售成績，也讓它成為冷戰後西方戰機的代表作。

經過近四十年的演進，F-16已由原本的輕型戰機演變為一架多功能戰鬥轟炸機，全系列多達二十餘種的構型，不但能跟上國際戰機市場的潮流，在與上世紀晚期問世的歐美新型

戰機競爭時，還常能獲得勝出，可見其整體性能的卓越，而早期的F-16 A/B經過各種性能提升，搭配合宜的結構強化與空電改良後，整體性能也逼近後期的F-16 C/D，讓它足以在二十一世紀的各國天空中，開創另一個服役生涯的高峰。

參考資料

一、"Fighter Radars Get 'Active'", Jane's International Defense Review, October 01, 1997。

二、"AN/APQ-126 (V) airborne fire-control radar", Jane's Radar and Electronic Warfare Systems, October 19, 2000。

三、"AN/FPS-85 long-range phased-array radar", Jane's C4I Systems, April 6, 2001。

四、"Contributing to the common good", Jane's International Defense Review, January 01, 2002。

五、"Agile radar bemas", C4ISR Journal, May 2005。

六、"Modern Fighter Radars", Military Technology, July 2006。

七、"The Future of Radar has Begun", Military Technology, July 2006。