

現代戰機的紅外線搜尋追蹤系統簡介

空軍備役中校 魏楞傑

提 要

戰機上有各種精密的空電裝備，其中主動式電子掃描陣列雷達威力強大，可讓戰機同時接戰來自不同方向的目標，甚至具有成為高能量武器及快速資料鏈的潛力，賦予戰機前所未有的新戰力，但雷達波會洩露飛機的行蹤，妨害戰機遂行任務，甚至危及戰機的生存性。為兼顧搜索目標及避免敵方知悉我機的動向，不會向外發射電波的被動式紅外線搜尋追蹤系統，已成為現今新世代戰機的必要裝備。

前 言

基本上，戰機為高性能感測器及武器系統飛行平台，機上空電裝備及相關軟體的價格，就大約佔了全機總價格的一半，這些空電系統及感測器雖然很先進，卻會發射強烈的電磁波，縱然現今的戰機已採用匿蹤科技來大幅降低飛機蹤跡，但發射電磁波不啻是向敵方的偵察系統報告我機的方位及飛行方向，對戰機遂行任務非常不利。若因機上的電磁波發射管理不當，讓戰機現形於敵方的雷達或熱顯像儀上，之前為匿蹤所做的一切努力，將完全付諸流水。

要解決這個難題，基本方法是降低本身發射的電磁波，根本解決之道則是使用先進、不發射電磁波的被動式感測器，讓敵方偵察系統一無所悉。



雷達是戰機上必備的空電系統，卻也是妨害匿蹤的最主要裝備。(照片來源：參考文獻3)

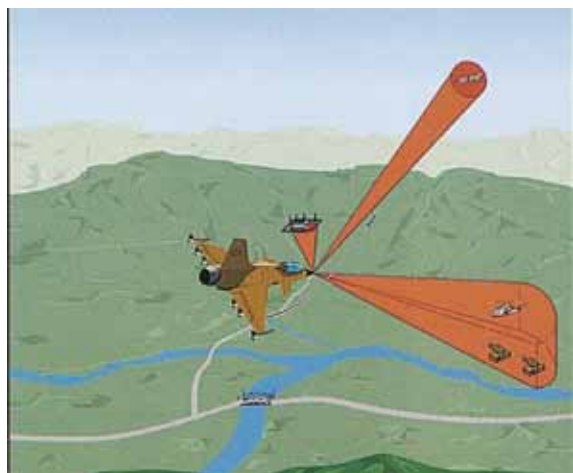
電磁波管理

雷達

現今戰機所發射的電磁波中，最主要的來源當然是尖峰功率可達數十萬瓦的雷達。先進的雷達警告接收機(Radar Warning Receiver)接收到雷達發射的電磁波後，不但

能定出發射源的位置，在與電腦資料庫比對後，還能定出雷達的型式和戰機的型號。雖然戰機可採「雷達靜默」的方式來躲避偵測，但這只能偶一為之，而且在躲避敵方偵測和偵測敵方目標間如何取得平衡，也是一大難題。

低攔截率(Low Probability of Intercept)雷達可以解決部分難題，這種雷達的發射頻譜很寬，使用最小的發射功率，並採取跳頻(frequency hopping)技巧，載波以特殊的傳輸順序，在多個頻段內變換發射頻率。這種傳輸方式有兩個優點：一、對窄頻干擾有強大的反制能力；二、對窄頻接收機而言，這種雷達波就如同多餘的背景雜訊，因此極難攔截。故低攔截率雷達在搜尋追蹤目標時，雷達警告接收機很難偵測，戰機因而能在不驚動敵方的情況下，進行偵測、辨識、以及追蹤敵方的目標。



主動式電子掃描陣列雷達的波束狹窄，頻率多變，波形變化多端，很難予以攔截。(照片來源：參考文獻3)

雷達還可用脈波壓縮(pulse compression)的技巧，來降低被偵測到的機率。這是一種增加傳輸距離和提高訊噪比(Signal-to-Noise Ratio)的訊號處理技術，將發射脈波先進行調變，並將反射訊號與發射電波相比對，在距離與解析度不變的情況下，尖峰發射功率可以大幅降低。

在設計雷達時，若能減少旁波瓣(side lobe)及後波瓣(back lobe)的功率，也能降低被攔截的機率。現今的相位陣列(phased array)雷達不但可控制旁波瓣的大小，還能以狹窄、移動迅速的電波進行型態複雜的搜索，用來對付雷達警告接收機效果斐然，即使被它偵測到雷達波，也會認為不值一顧。不過，相位陣列雷達仍然得有高功率的接收／發射模組，只是把機械式掃描天線(Mechanically Scanning Antenna)換成電子式的PIN二極體被動式移相器(phase shifter)，不再需要機械性的掃描動作，對雷達運轉或減低能量消耗，有相當的幫助。

最先進的低攔截率雷達是主動式電子掃描陣列(Active Electronic Scanned Array, AESA)雷達，這種雷達的發射及接收機功能，由多個自備電源及放大器的發射／接收模組所取代，每一個發射／接收模組結合功率放大器、低噪音放大器、相位控制器、及振幅控制裝置，因而不需要高功率中央發射系統，除了操作上更為便利之外，電波掃描非常迅速，因此很難予以攔截。譬如F-22猛禽號(Raptor)的AN/APG-77主動式電子掃描陣列雷達，據說對裝有雷達警告接收機或電子支援措施(Electronic Support Measure)的敵機

進行掃描時，敵機根本不知道已被雷達波籠罩。

傳統雷達是在一狹窄頻段內發射低能量脈波，AN/APG-77雷達則是以展頻傳送(spread spectrum transmission)技術，在一寬頻段內發射脈波，各頻段的回波由雷達訊號處理器整合，目標傳回的總能量與傳統雷達相差無幾，但每一個脈波的能量大幅縮減，而且也不符合一般的雷達波調變型態，因此目標很難察覺F-22就在附近窺伺。

其他發射源

無線電傳送也會驚動敵方，因而獲知我機的方位，且有可能由無線電特性知道飛機的型號。現今的戰機可藉由資料鏈接收語音或資料訊息，但戰機在網路中心化戰爭(Network Centric Warfare)場景下作戰，除了接收訊息外，也得傳送大量的資訊，只是資料鏈容易被偵測或攔截，減損了飛機的匿蹤性能。F-22因此有兩套資料鏈系統，一套使用標準的超高頻／極高頻(VHF/UHF)無線電頻率；另一套是低功率、低攔截性的飛行中



F-22的AN/APG-77主動式電子掃描陣列雷達不但威力強大，且具備成為超級資料鏈的潛力。(照片來源：參考文獻3)

資料鏈(Intraflight Datalink)，讓各架F-22不需通過無線電通訊，就能自動彼此分享目標與系統的資訊。

為了消除資料鏈可能洩露行蹤的顧慮，F-22正在提升AN/APG-77的性能，在2006年9月由諾格(Northrop Grumman)、洛馬(Lockheed Martin)、L-3通訊(L-3 Communications)合作的一次測試中，F-22的AN/APG-77主動式電子掃描陣列雷達藉由通用資料鏈(Common DataLink)的數據機，模擬成無線網路中的一個節點(node)，以每秒548百萬位元和每秒1,000百萬位元以上的速率下載及上傳資料，較美國及盟邦現役傳輸速率每秒約一百萬位元的鏈十六(Link 16)強上幾百倍，能在極短的時間內將資料傳輸完畢，降低洩露飛機行蹤的風險。

飛機上的電子反制裝備，尤其是各種干擾器，也很容易洩露飛機的行蹤及方位，使得是否該啟動電子反制變成兩難。一般而言，若已被敵方偵測發現，就應該啟動電子反制以迷惑或矇騙敵方的雷達，但若敵方對我機仍毫無所悉時，就應該避免使用。

除了上述各種向外發射電波的裝備外，飛機上各個電子開關扳動時，也會發出少量的電磁訊號，這對全金屬飛機造成的問題較小，因為金屬結構會吸收這部分的雜訊，但對性質屬於絕緣體的複合材料而言，這就不容小覷。

解決方案。

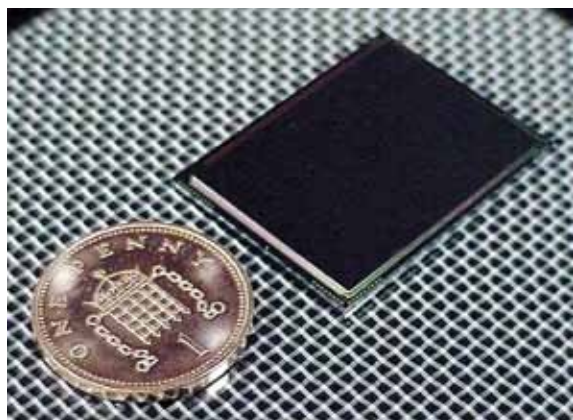
空用主動式電子掃描陣列雷達性能強大，又有傳輸資料的潛力，必然仍是機上最重要的感測器，但由匿蹤的觀點來看，雷達

發射的電波不論如何降低強度，或是多麼謹慎管理與控制，一旦被敵方偵測到，還是會成為敵方知悉我機行蹤及方位的洩密源，而隨著戰機對匿蹤性能要求與日俱增，這一部分已是戰機必須嚴肅以對的課題。

要確實解決電波發射的問題，唯有依賴全被動式感測器，在靜默中搜索、偵測、追蹤，不洩露任何訊息給敵方的偵察系統，因此新世代戰機都裝上先進的紅外線搜尋追蹤(Infrared Search and Track,IRST)系統與雷達搭配，有時完全取代雷達的工作，有時則偕同雷達進行搜索資料融合(data fusion)。紅外線搜尋追蹤與前視紅外線(Forward-Looking Infra-Red, FLIR)系統有些雷同，都使用紅外線科技，但前者很像雷達，能對整個空域進行搜索；後者則視野有限，主要用來產生影像畫面。

科技與材料

任何物體溫度高於絕對溫度零度均會發出紅外線熱輻射，尤其是飛機高速飛行時與



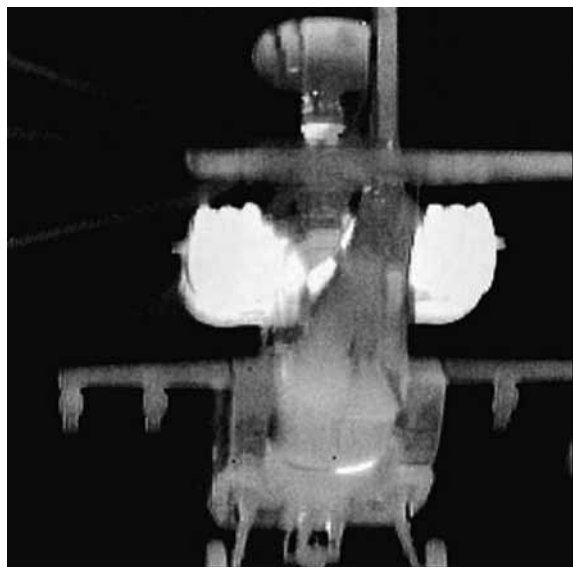
銻化銦中波紅外線感測陣列元件，一旁為英鎊一分錢。(照片來源：參考文獻17)

空氣摩擦產生的熱，無可避免的會發出紅外線，因此所謂的紅外線搜尋追蹤系統，就是一種被動式長波紅外線偵測感測器，可在一般或電子干擾的環境下，對遠距外的紅外線熱源進行監測及追蹤。換言之，紅外線搜尋追蹤系統就是被動式遠距離空中目標辨識感測器，主要應用於戰機空防任務上，不論在攻擊、防禦、或反制敵機的空優，都能強化戰機的生存性及致命性。

紅外線搜尋追蹤系統具備高解析度，當敵機大舉編隊來襲時，能比雷達更快提供各架飛機的位置，對移動式目標的追蹤較精確，偵測到的訊息可自行運用，也能與其他感測器偵得的訊息相融合，進一步強化戰機飛行員的情勢覺知，讓他在遠距離外即能偵測、辨識、接戰敵對目標，擁有夢寐以求的「先看見、先射擊」(first look, first shoot)先發制敵的能力。

紅外線搜尋追蹤系統用在空對地任務上也很稱職，可提供準確的地面移動目標指示(Ground Moving Target Indicator)，以及大範圍的地面圖像更新，這已逐漸成為北約空軍此系統的主要應用項目。

紅外線被動式系統的關鍵技術是紅外線追蹤儀，它會掃描視野所及之處，搜索特定波長或特定頻寬的紅外線，並精確量測發射源的角度座標，整個過程不會產生任何電磁波。最複雜的紅外線追蹤儀使用聚焦平面陣列(Focal Plane Array)偵測元件，它們是具有光電特性的小型半導體，隨照射光波長而有不同的電氣特性，偵測元件探測整個視野，攝得的影像由前視紅外線或影像處理軟體呈



紅外線感測器攝得的AH-64D阿帕契直升機影像，引擎排氣部分特別明顯。(照片來源：參考文獻18)現於顯示器。

紅外線波長範圍涵蓋0.75 - 1000微米，介於可見光與微波之間，大氣中某些分子(如二氧化碳、水蒸氣…等)及微粒子對於紅外線傳輸均能造成衰減，能夠順利透過大氣的紅外線輻射主要波段範圍為1 - 2.7微米(短波紅外線)、3 - 5微米(中波紅外線)、及8 - 14微米(長波紅外線)，此三個波段範圍稱為紅外線的大氣窗口，絕大部分紅外線軍事探測器工作波長都介於這二個波段內。現今紅外線偵測元件使用的材料有四種，汞鎘銻(mercury-cadmium-telluride)最佳，對長波紅外線有極佳的靈敏度，但製程很困難；次佳選擇是矽化鈦(platinum silicide)，靈敏度稍遜，但製程簡單許多；另外還有銻化銾(Indium antimonide)和矽化銲(Iridium silicide)。

汞鎘銻：在8~12微米波段的靈敏度極佳，但要製成陣列很困難，製好的各元件靈

敏度差異很大，影像軟體非常難處理。

銻化銾：用在5.5微米波段內，比汞鎘銻容易製造，各元件的靈敏度也很均衡。

矽化鈦：限用於2.5~4微米波段內，靈敏度只有汞鎘銻的五十分之一。優點是各元件的靈敏度非常平均，容易製造且成本低廉。

矽化銲：適用於8~12微米波段內，靈敏度可與汞鎘銻相媲美，不過製程不夠成熟，不適用於大量生產。

紅外線偵測元件冷卻後所具有的溫度，決定它的靈敏度以及能偵測出的波長，因此紅外線追蹤系統使用時需要冷卻，戰機上的紅外線搜尋追蹤系統使用閉路式(close-cycle)冷煤，以縮短系統的整備時間(turnaround time)。大多數的偵測元件先天上對可見光很敏感，因而會產生一些問題，最簡單的解決方法是在探測器的鏡頭前方加個濾光片，濾除不需要的可見光及紅外線，一般是在探測器半透明外罩貼上數層很薄且厚度各異的玻璃膜，各層膜的反射係數不同，且厚度為欲偵測紅外線波長的倍數，如此一來，不需要的光線就會被反射排除，需要的紅外線則長驅直入。紅外線導向飛彈及紅外線搜尋追蹤感測器玻璃外罩上的一層金色薄膜，就是一種濾光膜。

戰機於高速飛行時，探測器的半透明外罩很容易因沙塵或雨滴吹襲而受損，使得探測訊號扭曲，減弱了系統性能。最好的解決方式是以硬度僅次於人造鑽石的人造藍寶石，做為外罩的製造材料，不過人造藍寶石很貴，要加工製成外罩的半球型，也不是件容易的事。

操作特性

紅外線搜尋追蹤系統的基本運用規則是雷達限定於作戰時使用，其他時間就由紅外線來搜索敵蹤，讓敵人毫無所覺，進而為空戰創造勝利的利基。當代的紅外線搜尋追蹤掃描空域的方式與雷達相近，發現敵蹤時，會在顯示器上呈現目標的位置及相關資訊；操作方式也與雷達相近，飛行員可設定僅追蹤特定的目標，或是追蹤疑有敵機出沒的特定方向。有些紅外線系統也會搭配光學瞄準器來辨識遠方的目標。

在敵機毫無所覺下發現它的蹤跡，我機就能飛到有利發射飛彈的位置，若再搭配使用雷射測距儀，則還能對更遠的目標進行偵測，或是提供完整的資訊，讓機砲射擊及發射飛彈，即使敵機懷疑遭受偵測，也無法對紅外線搜尋追蹤系統進行干擾。空戰時若能結合運用紅外線搜尋追蹤、大離軸角度紅外線空對空飛彈、頭盔瞄準／顯示系統，將能擴展飛彈可發射區，並在接戰時多出寶貴的幾秒，擁有前所未有的空戰優勢。

紅外線搜尋追蹤系統是採內置式或外掛莢艙式較好？這是個永無休止的爭辯。由於光電感測器的小型化，現在已能把紅外線搜尋追蹤或前視紅外線系統安裝於戰機的鼻錐處，不需於機翼下多掛一具特製莢艙，不但可減少風阻，也不會佔用原本可掛載武器的派龍。前視紅外線不論日夜或天候情況，都能提供精確的導航資訊，不需要地形追隨雷達或雷達高度計。在感測器日愈小型化的情況下，莢艙式紅外線搜尋追蹤系統對重量及

空間沒有嚴苛的限制，使用彈性、適應性、以及性能表現都較好。

然而，不論感測器安裝於何處，也不論是主動或被動式系統，最重要的是不能增加飛行員的工作負荷，並確定他能利用所有的可用資訊，完全掌控戰機週遭的情勢覺知，這也是開發新空電系統最大的挑戰。戰機任務日愈複雜，飛行員擔負的工作項目越來越多，因此要增加任何一項空電系統，並不像表面上的那樣容易，必須注意感測器所顯示的資訊足以讓飛行員一目了然，且符合飛行員的直覺反應。

要完成上述的目標，得藉助人因工程及人機介面科技，最理想的情況是全面的資訊融合，飛行員不需費心分析各感測器的資訊，由系統持續地將最佳的整體情勢畫面呈現在飛行員的眼前。

俄羅斯發展

空用紅外線偵測追蹤起源於1960年代中期，當時美國空軍的F-101B巫毒式(Voodoo)及F-102三角短劍(Delta Daggers)戰機，率先在機上安裝了雛型的紅外線搜尋追蹤。不過，把此系統發揚光大的卻是前蘇聯，全球首型安裝現代化紅外線搜尋追蹤系統的戰機，一般公認是俄羅斯的MiG-29，當此系統隨著MiG-29現身於1980年代的各國航空展時，西方軍事觀察家大為驚訝，甚至認為機鼻上半球型物體內裝的是電戰天線。

俄羅斯最先問世的紅外線搜尋追蹤系統，是安裝於MiG-29和Su-27戰機上的光電指向站(Optical Electronic Pointing Stations)。



率先安裝OEPS-29現代化紅外線搜尋追蹤系統的MiG-29。(照片來源：參考文獻17)

MiG-29和Su-27安裝的OEPS-29和OEPS-27，兩者基本上相同，只是OEPS-27較大、較重(OEPS-27重174公斤，OEPS-29重78公斤)、偵測距離較遠、視角較大。OEPS-29的水平偵測視角 ± 30 度，垂直偵測視角-15度到+30度；OEPS-27的水平偵測視角 ± 60 度，垂直偵測視角-15度到+60度。至於兩系統內的紅外線、電視攝影機、雷射感測器規格，目前都沒有公開的資料。

根據目標的紅外線蹤跡大小，OEPS-27的偵測距離可達50公里，相搭配的雷射測距儀偵測距離8公里，兩者都放在風擋前方的透明半球型罩內；OEPS-29的紅外線感測器較小，偵測距離15公里。OEPS-29和OEPS-27的功能大同小異，並已和俄羅斯早期的SHCH-3UM及近期的SURA頭盔式目標指定系統(Helmet-Mounted Target-Designations System)整合成一體。

OEPS-29和OEPS-27隨著載機的改良發展，也開發出性能強化的新版本，偵測距離更遠，辨識目標能力更強，也有了新的名稱—

光學定位站(Optiko-Lokatsionnaya-Stantsiya，英文為Optical Locator Station，OLS)。

OLS-30是OEPS-27的加強型，為Su-30系列戰機的客製版，更進一步的改良型為OLS-36Sh-01，裝有隔絕震動的接收機和新型冷卻系統，使用可靠度更好的進口零件，提昇平均損壞時間(Mean Time Between Failure)。OLS-36Sh-01搭配掃描式偵測器、雷射測距儀、以及整合式監視系統，可在電子干擾的環境下，排除地面雜訊、雲霧、以及水面反射的影響，日夜對空中目標做全方位的被動式搜索、偵測、追蹤。雷射測距儀可提供精確的距離數據，讓載機據以發射短程空對空飛彈，或對地面拋投炸彈。

OLS-30安裝於外銷中共的Su-30MKK及Su-30MK2上；OLS-36Sh-01安裝於外銷印度的Su-30MKI及外銷馬來西亞Su-30MKM上。

在最新開發的Su-35戰機上，烏拉光學機械廠(Urals Optical and Mechanical Plant)安裝了偵測距離及目標辨識能力大幅提昇的OLS-35，在2007年巴黎航空展首次現身。OLS-35



MiG-35戰機上的OLS-UE/M紅外線搜索追蹤系統。

(照片來源：參考文獻5)

有一掃描式紅外線偵測陣列、白晝型電視系統、多模式雷射測距／目標標定儀、全視野穩定系統、以及整合式監視螢幕。OLS-35強化了全方位搜尋、偵測、以及追蹤目標的能力。雷射測距／目標指定儀可精確量測斜距離(slant range)，將角度及距離傳輸給Su-35的光電瞄準導航系統，提供中程空對空飛彈及整合式機砲非同步射擊模式時，標定目標之用。

OLS-35系統組成包括一掃描式紅外線搜尋器(水平視角 ± 60 度，垂直視角-15到+55度)、辨識空中及地面目標的白晝型攝影機、適用於空中及地面目標的多模式雷射測距／定標儀、視野穩定系統、內建新運算法及先進軟體以立即計算精確度的整合式控制系統。系統功能包括：

- 搜索及追蹤前、後半球形區域內的空中目標，偵測距離分別為40及70公里
- 肉眼辨識8到10公里內的目標，20公里內測定距離、標定及自動追蹤運動中的空中目標
- 將角度座標及距離數據傳送給火控系統或飛彈尋標器
- 搜索、偵測、測距(最遠30公里)、自動追蹤地面目標

同樣的，烏拉光學機械廠也繼OEPS-29之後，為MiG-29SM和MiG-29SMT性能提昇機種，開發了OLS-13S和OLS-13SM。這兩項新產品的目標偵測、追蹤距離都更遠，可靠度更佳，尺寸及重量也縮減。系統組成包括一掃描式熱偵測儀、雷射測距儀、以及內建式測試系統；OLS-13SM的偵測器有人工藍

寶石整流外罩、新型護目式雷射測距儀、以及一現代化的照片接收機。

隨著最新世代的MiG-35問世，烏拉光學機械廠也在2007年巴黎航空展中展示MiG-35專屬的OLS-13SM-1，重量只有60公斤，包含一掃描式熱偵測儀、白晝辨識目標用的電視攝影機、一多模式雷射測距／目標指定儀、視野穩定系統、內建式測試系統。OLS-13SM-1的目標偵測及辨識距離都大幅度提昇，可對載機前、後半球面的空中目標進行偵測，並可鎖定及自動追蹤後半球面運動中的空中目標。OLS-13SM-1的水平視角 ± 30 度，垂直視角-15度到+55度，可對空中目標進行辨識及量測距離，將角度及距離數據傳送給瞄準導航系統，標定目標及機砲同步模式射擊。

但MiG-35選擇了由俄羅斯的精準工程儀器科學研究院(Naucho-Issledovatel'skiy



MiG-29性能提昇版安裝了由OEPS-29升級的OLS-13S。(照片來源：參考文獻16)

Institut Pretsizionnogo Priborostroyeniya，英文為Scientific Research Institute of Precision Instruments Engineering，NIIPP)生產的OLS-UE/M紅外線搜索追蹤系統，此系統除了在機鼻有個傳統半球形的隆起物外，在右進氣道下方半適形莢艙內還有個相搭配的OLS-K系統。OLS-UE/M負責對空中及地面目標的搜索、偵測、追蹤及測定距離；OLS-K專責執行地面、海面目標的偵測、雷射測距／定標外，在低高度飛行及地貌繪圖時，還能偵測地面障礙物。

實際飛試顯示OLS-UE/MK對未開啟後燃器的戰機，相對於機尾或機頭的偵測距離，分別為45公里和15公里，在最遠20公里處量測距離，8到10公里處肉眼辨識；地面戰車可在15公里外偵測，在8到10公里處進行肉眼辨識，較大目標的偵測距離可達20公里；海面上快艇大小的目標，可在40公里外偵測。

OLS-UE/M和安裝於MiG-29戰機上的OEPS-29重量都是78公斤，除有雷射測距／目標指定儀和雷射追蹤器外，另搭配一具



搭配OLS-UE/M裝於MiG-35右進氣道下方半適形莢艙內的OLS-K。(照片來源：參考文獻5)

320*256像素的熱偵測儀，和一部640*480像素的電視攝影機，這兩者共用一包覆於人工藍寶石半球形透明外罩的掃描式鏡片，水平掃描角度±90度，垂直掃描角度-15度到+60度。目標偵測距離分別為45公里(尾隨目標，追蹤引擎的紅外線)和15公里(迎面目標，引擎被機身遮住)。雷射測距儀工作波長為1.57微米(護目模式)和1.06微米(作戰模式)，據說偵測距離可達20公里。

OLS-UE/M所偵測的影像會呈現在特定的顯示器上，飛行員自行選擇可見光電視模式，或是調整電視、紅外線這兩種感測器輸入訊號比例的混合模式。OLS-UE/M下一階段的發展重點是與雷達的介面，讓雷達能呈現感測器融合的綜合畫面。

海盜系統

歐洲戰鬥機颱風號(Typhoon)於1990年代開始進行紅外線搜尋追蹤／前視紅外線雙工作模式的被動式紅外線空用追蹤裝備(Passive Infrared Airborne Tracking Equipment，PIRATE，以下簡稱為海盜系統)開發，由義大利斯勒伽利略公司(Selex Galileo)領軍的歐洲第一集團(EuroFirst Consortium)負責開發，團隊成員包括法國泰勒斯公司(Thales)以及西班牙的科技組合公司(Grupo Technobit)。

海盜系統號稱是西方國家有史以來最精良的系統，具備下述的功能：

- 在自然景物背景下，分析任何角度、亮度的目標紅外線蹤跡
- 標定及追蹤此目標
- 搜索空中目標及追蹤紅外線尋熱空對空飛彈

- 夜間惡劣天候下，在頭盔顯示器上呈現跑道畫面以協助飛行員降落

- 惡劣天候下執行空對面操作模式時，提供導航及地貌追隨畫面

- 在空對面操作模式時，偵測及追蹤所有發出紅外線的生物體

- 提供抬頭顯示器及多功能低頭顯示器所需的畫面影像

海盜系統於1992年開始開發，1999年以先導生產型硬體進行飛試，2000年到2001年間進行全系統測試，2003年12月簽訂生產合約，2007年8月第一套海盜系統正式安裝於義大利的颱風號戰機上，西班牙及英國的颱風號戰機隨後也跟進安裝。

海盜系統兼具紅外線搜尋追蹤及前視紅外線功能，原本是要設計成兩個空電模組，後來為了機上安裝方便，合併成一體。海盜系統的感測頭安裝於機鼻上方，這是紅外線搜尋追蹤執行空對空任務的最佳位置，並稍微偏左以在對地攻擊時，執行有限度的前視紅外線偵測，也因此對地功能稍遜一籌，不過歐洲第一集團為此也做了許多努力，讓在



歐洲戰鬥機颱風號安裝於機鼻左側的「海盜」紅外線空用追蹤系統。(照片來源：參考文獻15)

前視紅外線工作時，機鼻吸收或反射紅外線所造成的干擾降到最低。

紅外線感測頭、掃描器、以及穩定裝置放在機鼻偏左隆起的半球形體內，稱為感測器前端。感測器有兩組工作頻段：7.5到10微米在空對面模式對迎面目標有最佳的性能表現；3到5微米用在加強型搜索、辨識、追蹤上。目前官方對系統的最遠偵測距離未提出任何數據，有人猜測遠達150公里，較合理的數字應該是70到90公里。

海盜系統使用中、長波紅外線，可偵測全視野內50公里外的飛機紅外線蹤跡。在紅外線搜尋追蹤工作模式時，它會自動進行偵測及追蹤暨掃描；在前視紅外線工作模式時，則提供紅外線影像給座艙內的多功能低頭顯示器(Head-Down Display)及飛行員的頭盔顯示器。

海盜系統在紅外線搜尋追蹤空對空模式下，以兩種方式偵測群聚目標。空中多目標追蹤：對全視野或指定空域內上／下視掃描以及被動式測距，找尋可能潛藏的目標；單目標追蹤：對選定的單一目標進行精確角度追蹤，讓飛行員以肉眼辨識目標。另外還能執行區域搜索及受控搜尋，這是感測器融合下的工作模式，前者由飛行員的頭盔顯示器或機上的捕獲者(CAPTOR)雷達指揮系統指定的角度，掃描某個空域，並隨之自動啟動單一目標追蹤；後者則是由其他飛行載台(如：空中預警機)來指揮掃描。

海盜系統可同時追蹤最多200個空中目標，它的工作模式有：多目標追蹤、單一目標追蹤、單一目標追蹤辨識、區域搜索及受



歐洲戰鬥機颶風號「海盜」紅外線空用追蹤系統。

(照片來源：參考文獻15)

控搜尋。在多目標追蹤模式下，系統會搜尋特定的空域，找尋可能潛藏的目標；在單一目標追蹤模式下，系統會對特定目標進行精確追蹤，讓飛行員以肉眼辨識目標；區域搜索及受控搜尋則是感測器融合下的工作模式，前者由機上的CAPTOR雷達指揮系統掃描某個空域，後者則是由其他飛行載台(如：空中預警機)來指揮掃描。

在功能有限的空對地前視紅外線工作模式時，海盜系統提供紅外線影像給下述各系統。導航：固定的前方紅外線影像呈現於抬頭顯示器上，與飛行員的對外視線相重疊；熱提示(Thermal Cueing)：對應飛行路徑或頭盔顯示器的視線，標示出發熱體位置及地面目標的熱對比；頭盔操縱(Helmet Steering)紅外線影像：目標的紅外線影像呈現於頭盔顯示器上，偵測器的偵測角度由追蹤飛行員頭部運動的追蹤器控制；辨識：在單一目標追蹤模式下，座艙內低頭顯示器會呈現凍結的目標紅外線影像，讓飛行員肉眼辨識。

海盜系統的訊號處理技術來自經實戰驗

證的泰勒士空防警告裝備(Air Defense Alerting Device)，能排除絕大部分的錯誤警訊。由於採全被動式偵測，因此載機能在敵方電子反制系統毫無所覺的情況下，早一步搜集敵情資訊，移動到有利的戰術位置以遂行空對空或空對地任務，不論是藏匿本身蹤跡來進行攔截，或是強化本身的情勢覺知，都是獲益良多。

系統的數據處理單元將處理後的資料直接傳送給機上的資訊系統，進而在相關顯示器及抬頭顯示器(或低頭顯示器)上產生影像畫面。處理單元會排除存心愚弄系統的錯誤或假訊號，估計出目標的遠近，並根據目標的紅外線蹤跡大小或是雷達資料，定出優先順序。另外在單一目標追蹤或是辨認工作模式時，系統工作類似飛彈逼近警告器(Missile Approach Warning)，警告載機紅外線飛彈來襲的威脅。

前區光電

颶風號戰機的海盜系統問世之時，法國空軍F2標準的颶風戰機，已於2007年5月派遣到阿富汗戰場，執行國際安全協助部隊(International Security Assistance Force)任務。2006年中開始服役的颶風戰機，最大特徵就是空電系統中的前區光電(Optronique Secteur Frontal, OSF)紅外線搜尋追蹤系統。

前區光電系統由泰勒士公司(負責電視攝影、全系統整合)和沙峻防衛公司(Sagem Defense Security，負責紅外線攝影、中央處理單元)合作開發。前區光電與大多數的紅外線搜尋追蹤有些不同，它有兩個感測器：



法國颶風戰機的前區光電感測器(右)及電視／紅外線感測器(左)。(照片來源：參考文獻9)

機鼻右側半球形體內的長距離紅外線被動偵測暨高解析度電耦合裝置(Charge-Coupled Device)電視感測器，工作於3~5及8~12微米兩個波段，負責遠距離目標偵測(非官方數據為約100公里)、追蹤(紅外線搜尋追蹤功能)、影像顯示(前視紅外線功能)；機鼻左側整流罩內的電視／紅外線感測器，可對最遠40公里的目標進行辨認及雷射測距。前區光電輔以颶風戰機翼尖雲母(MICA)飛彈尋標器的圖像，可強化目標偵測的能力，彼此共同合作下，可對多個目標同時進行搜索、辨識、遙測，最大偵測距離據說可達150公里。

前區光電提供對空中及地面、海面目標的搜索、搜尋、辨認、以及自動追蹤的功能，不論是空對空、空對地、空對海，都有好幾種工作模式，可由飛行員手動選擇，或是由任務電腦依據任務性質自動選擇。系統還另外提供一導航(前視紅外線功能)模式，

並與颶風戰機的導航／攻擊系統完全整合。

前區光電、頻譜(SPECTRA)電戰系統、RBE2雷達，是颶風戰機導航暨攻擊系統的三大支柱。颶風戰機武器系統以這些感測器遂行空對空及空對地的測距、追蹤、定標、紅外線／電視／雷射測距。前區光電使用多種波段，故上述某些功能可以同時執行，不過，就如它名稱所暗示的，前區光電只能搜索有限的前方空域，因此據說已經在開發改良型，改良方向是強化影像系統，新產品稱為改良科技型前區光電(OSF-IT, Improved Technology)，但詳情目前外界毫無所悉。

美國發展

1990年代中期，美國海軍的F-14D雄貓式(Tomcat)戰機安裝了AN/AAS-42 紅外線搜尋追蹤系統，是當時美軍唯一裝有此種系統的戰機，系統的作戰需求是針對俄羅斯TU-22M(北約命名：逆火式(Backfire))長程轟炸機上強大的電子戰裝備，當戰機上的雷達被



F-14D雄貓式戰機的AN/AAS-42紅外線搜尋追蹤系統，右邊是感測頭，左邊是光學放大辨識感測器。(照片來源：參考文獻13)

TU-22M干擾失效時，仍可利用機上的紅外線搜尋追蹤系統導引AIM-54鳳凰飛彈(Phoenix)攔截，因此它對TU-22M的偵測距離必須超過鳳凰飛彈的150公里射程。

AN/AAS-42可在極遠距離外，對發熱的目標進行多重掃描，補強傳統戰術雷達提供的資訊。它使用一系列複雜的濾波技術及軟體運算，篩選出待偵測目標，排除背景雜訊，讓飛行員在螢幕上看到確切的目標。

F-14D戰機的AN/AAS-42裝在機鼻下方，內有光學組件及長波掃描式線性陣列構成的紅外線偵測組零件，以三軸式慣性穩定環架支撐，系統可自動或由飛行員手控，進行精確的區域掃描，不論是水平、垂直掃描視角，或是掃描範圍，都可由飛行員個別設定並獨立操控。

隨著F-14戰機於2006年9月除役，也一併帶走美軍紅外線偵測追蹤的能力，但AN/AAS-42已被波音公司空用雷射(Airborne Laser)專案的YAL-1A載台選中，以它做為早期飛彈發射暨追蹤偵測器。南韓於2002年4月向波音採購F-15K鷹式(Eagle)戰機時，AN/AAS-42列在戰機的光電感測器項目內；而2006年4月新加坡向波音採購的F-15SG，也確定裝有AN/AAS-42。F-15K和F-15SG的AN/AAS-42安裝於左翼下方派龍的前端。

F-16系列戰機中，外銷阿拉伯聯合大公國(United Arab Emirates, UAE)的F-16 E/F戰力最強，它獨具的整合式前視紅外線定標系統(Integrated FLIR Targeting System)，包括座艙罩前方機鼻處一球型體前視紅外線，和進氣道下方外掛的迷你型定標莢艙，讓F-16 E/



F-16 E/F上的被動式感測器：A：導航前視紅外線；B：定標前視紅外線莢艙。(照片來源：參考文獻14)
F的飛行員不需戴上夜視鏡，就具備了夜間目視攻擊的能力；定標莢艙還內含雷射定標儀，可導引本機和其他戰機的雷射炸彈。至於其他欠缺紅外線偵測能力的F-16戰機，洛馬於2008年2月新加坡航展時，展出一莢艙式AN/AAS-42，可供全球的F-16戰機選用。

美國海軍於2006年春天喪失紅外線搜尋追蹤能量後，開始尋求替代方案，2007年5月與波音商討在F/A-18E/F超級大黃蜂號(Super Hornet)戰機上，安裝新世代紅外線搜尋追蹤系統，波音也在2007年7月選定洛馬為承包商，提供最多150套的紅外線搜尋追蹤系統給第二批次(Block II)的F/A-18E/F。



F-16 E/F上的被動式感測器：A：導航前視紅外線；B：定標前視紅外線莢艙。(照片來源：參考文獻14)

在美國海軍尚未正式簽定系統設計發展(System Design and Development)合約前，波音和洛馬於2007年就開始進行降低風險驗證，在一架美國海軍的F/A-18F中線派龍副油箱前端，安裝一具測試型紅外線搜尋追蹤系統，執行6架次飛試以蒐集數據。這種修改副油箱做為安裝空間的方式，成本效益甚佳，載機只需修改軟體，結構及線路都不必更動，且很容易應用於現役或未來服役的F/A-18E/F戰機上。

2008年12月時，波音獲得1,200萬美元的經費，以繼續進行科技驗證階段的先期研發工作。2009年3月完成進一步的降低風險飛試，證實F/A-18戰機上的紅外線搜尋追蹤系統具備相容性與作戰效益，飛試結果顯示在中線副油箱內容納系統完全可行，不但偵測距離遠，偵測資料還能與機上其他感測器的資料順利融合。波音也在2009年9月撥發400萬美元經費給洛馬，開始進行科技驗證。

F/A-18E/F 紅外線搜尋追蹤系統運用長波紅外線汞鎘碲偵測陣列，可搜索大角度視野內的一切熱源。系統裝在一480加崙的機身中線副油箱前端，以獲得最大的偵測視角，而副油箱還能裝載330加崙的燃油。與英鎗式紅外線搜尋追蹤系統比較下，這樣不會佔用可外掛武器的派龍。此系統目前尚未命名，組成件分為三部分；三軸慣性穩定環架支撐的感測頭及偵測器組合件、內建訊號處理軟體及大容量記憶體的商用微處理器、以及熱交換器型態的環境控制次系統。

超級大黃蜂號的紅外線搜尋追蹤功能強大，在各飛行階段以被動方式偵測多種目

標，不需擔心電子偵測及無線電頻率的反制，提供機上任務電腦各目標的追蹤資料，同時將圖像提供給座艙內顯示器。它可工作於追蹤暨掃描或單目標追蹤模式，飛行員藉由全功能飛行操縱桿(Hands-On-Throttle-And-Stick, HOTAS)，控制水平及垂直掃描角度。系統的人機介面與機上其他感測器雷同，可減輕飛行員的工作負荷。美國海軍預定此系統在2013年完成初級戰備(Initial Operating Capability)。

超級大黃蜂號的紅外線搜尋追蹤須返廠安裝，而洛馬的F-35未來正式服役時，機上將會內建現正由洛馬開發中的光電定標系統(Electro-Optical Targeting System, EOTS)，可對陸地及空中目標進行遠距精確偵測。

F-35 EOTS

F-35的光電定標系統(Electro-Optical Targeting System)重量不到90公斤，可進行主、被動式測距，還能提供對地攻擊所需的極精確地理座標，賦予F-35全天候24小時，敵方警示系統無法察覺的被動式感測能力。



美國海軍以F/A-18F測試安裝於中線派龍副油箱前端的紅外線搜尋追蹤系統。(照片來源：參考文獻16)

第一套光電定標系統已於2009年7月30日出廠，洛馬並展開低速率初期生產(Low-Rate Initial Production)，預定年產200套，總生產量會超過3,000套，不論是美國自用或是外銷的F-35，都會安裝此系統。

光電定標系統衍生自洛馬的增程型狙擊兵(Sniper XR)紅外線定標莢艙，使用最新的感測器科技，搭配具備聚焦平面陣列的第三代銻化銦(Insb)紅外線感測器、目標辨識雷射、以及白晝型電視攝影機，全容納於一多面體人工藍寶石玻璃罩內。系統還與機上的整合式中央電腦以高速光纖相連接，具備自動校靶及飛機對正的功能，擔負空對空紅外線搜尋追蹤及空對面前視紅外線的雙重任務。

此系統在空對面時使用前視紅外線模式，空對空則使用紅外線搜尋追蹤模式，並提供訊號處理軟體強化過的高解析度紅外線圖像，具備多方面的功能：飛彈逼近警告、反制、被動式偵察、離軸紅外線空對空紅外



F-35主要任務為對地攻擊，故光電定標系統安裝於機腹上。(照片來源：參考文獻16)



F-35空對空紅外線搜尋追蹤系統攝得的畫面非常清晰。(照片來源：參考文獻10)

線飛彈定標、以及白晝和黑夜的寬視野畫面。

F-35的主要任務是對地攻擊機，因此光電定標系統的位置安排於機腹，而不是在機鼻上，主要功能是讓飛行員清楚觀察雷達發現的地面目標。在這個工作模式下，雷達先對地面目標做遠距離確認，再將目標座標傳給光電定標系統，由它做更進一步的遠距離辨識、偵測、及精確定標。

F-35機上還有一個開創性的被動式感測系統：AN/AAQ-37分佈孔洞系統(Distributed Aperture System)，它是在機身6處不同的位置上各安置一紅外線感測器，分別負責飛機的左側、右側、機背前方、機背後方、機腹前方、機腹後方的視野，運用先進的訊號處理運算法，對全機360度範圍內來襲的飛彈或逼近的飛機，進行紅外線偵測及追蹤，並將偵測畫面顯示於飛行員的頭盔顯示器上，讓飛行員能夠看見飛機周遭的空域情況，因此除

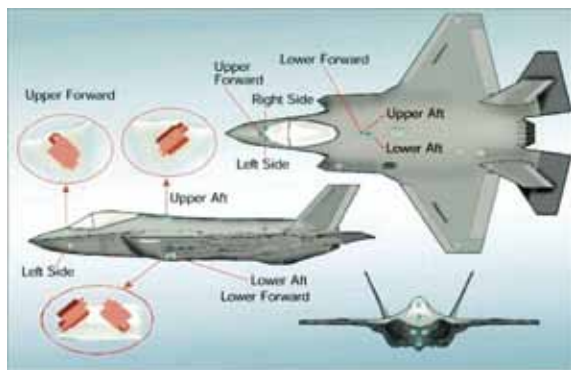
了讓飛行員具備全空域的情勢覺知外，也能提供導航、飛彈警告、以及紅外線搜尋追蹤的功能。

F-35各感測器傳送的資料，以及友機由高速資料鏈中繼而來的資訊，皆由機上的先進整合式核心處理器(Integrated Core Processor)進行感測器融合。整合式核心處理器是F-35的大腦，負責整合所有的空電系統，協調呈現給飛行員的畫面。

F-22對策

F-22沒有紅外線搜尋追蹤系統，但洛馬宣稱機上的AN/ALR-94整合式電子支援措施，是有史以來戰機上效能最好的被動式感測器系統，也是機上技術最複雜的裝備。

AN/ALR-94是由桑德士(Sanders)及奇異公司(GE)共同開發，藉由機身及機翼內嵌的30餘個先進天線，提供360度的全波段警示。敵機以雷達搜索F-22時，雷達尚未發現F-22，AN/ALR-94在450公里外就能偵測、辨識、追蹤發射雷達波的敵機。AN/APG-



F-35的AN/AAQ-37分佈孔洞系統，可同時執行多種被動式偵察。(照片來源：參考文獻12)

77雷達上的先進數位處理器綜整雷達、AN/ALR-94、以及由資料鏈中繼而來的目標方位資訊，整合成一追蹤檔案，並以最準確的感測器讀值做為目標的最終數據，譬如說AN/ALR-94提供的水平方位最精確，而雷達提供的距離數據最精確。F-22也因此具備提示追蹤(cued tracking)的功能，憑藉單一被動式感測器(如：AN/ALR-94或資料鏈)的數據，指揮雷達以極窄的波束(水平及垂直方向各不超過2度)偵測及追蹤，更進一步強化雷達低攔截率的性能。

感測器融合與電磁波發射管制息息相關，若能藉由AN/ALR-94及資料鏈來建構及更新情勢覺知，就無需動用雷達。F-22的飛行中資料鏈讓戰機在雷達靜默的情況下，接收來自其他F-22的雷達畫面，更進一步消弭洩露行蹤的顧慮。

他國情況

英國由1990年代初期開始發展紅外線搜尋追蹤，該國的馬可尼空電公司(Marconi Avionics)在1995年3月為英國國防部開發出一套紅外線搜尋追蹤科技展示系統，組件包括一指向暨穩定器、一新型高性能望遠鏡、紅外線搜尋追蹤演算組、目標偵測及追蹤演算軟體、以及一高性能熱顯像儀。

當時此系統安裝於一架旋風式戰機(Tornado)上，展示三種主要操作模式。自動搜尋模式：在寬闊的視野內標定及追蹤多種目標；驅使獲得模式：飛行員的全功能操縱桿、頭盔瞄準系統、或是其他的感測器(如：雷達)，透過機上任務電腦要求目標方位時，



瑞典JAS-39戰機的IR-OTIS，安裝位置稍微偏左，以允許有限度的對地下視。(照片來源：參考文獻11)

搜尋、追蹤所發現的目標；單目標追蹤模式：追蹤視野內的單一特定目標。

瑞典的紳寶動力公司(Saab Dynamics)在1990年代晚期設計開發一多功能的紅外線搜尋追蹤原型系統，稱為光學追蹤辨識系統(Optical Tracking and Identification System，IR-OTIS)，以協助JAS-39鉤喙獸(Gripen)戰機不分晝夜、不論對空中或地面目標，都能具備遠距離的被動式情勢覺知。系統的長波紅外線偵測器可工作於紅外線搜尋追蹤及前視紅外線模式，具備寬闊的視野，不過此開發專案在2000年代初期遭到擱置。

JAS-39戰機後續於2008年推出改良型下世代鉤喙獸(Gripen NG)時，改由義大利斯勒伽利略公司負責機上的紅外線搜尋追蹤系統，該公司根據歐洲戰鬥機海盜系統的開發經驗，為下世代鉤喙獸發展朝天G型(Skyward G)系統，預定2013年發展完成並進行飛試。

以色列的國防工業能量舉世知名，在紅外線搜尋追蹤系統的開發上當然也不會缺席，只是迄今還未推出任何相關產品。據說

以色列的艾柏特光電系統公司(Elbit System Electro-Optic)目前正以該公司自有的熱顯像、雷射、訊號處理…等科技為基礎，開發一型適用於多型飛機的紅外線搜尋追蹤系統。

以色列另一家在紅外線搜尋追蹤領域相當活躍的拉斐爾先進防衛系統公司(Rafael Advanced Defense System)，已經推出運用凝視聚焦平面陣列的海軍型紅外線搜尋追蹤器，稱為海上探照燈(Sea Spotter)，該公司正以此型為藍本，開發空用型紅外線搜尋追蹤。

目前全世界許多國家相繼投入紅外線搜尋追蹤系統的開發與製造，此系統原本只是想讓戰機擁有被動式偵測目標的能力，但在作戰應用的需求下，原屬次要的空對地功能，將會成為未來發展的優先目標。

後續發展

紅外線搜尋追蹤系統雖然不會向外界發射電磁波，沒有洩露本身蹤跡的顧慮，但最大弱點是偵測距離會受到高度及天候的影響，在1萬公尺以上的高空，紅外線偵測距離可達100公里以上，但在低空或天候不佳時，偵測距離就會劇降為10到30公里，因此在實際操作時，常需與雷達相互配合。而毫米波(millimeter wave)在光譜中介於紅外線與雷達微波之間，頻率大約100億到1,000億赫茲，兼具紅外線系統及雷達系統的長處於一身，運用限制最少，也最受期待，是戰機先進感測器設計最後一塊未開發的領域。

相對於雷達而言，毫米波的波束較窄，在追蹤目標、鎖定及辨識的過程中，具有較



AH-64D阿帕契直升機旋翼上方圓餅狀的毫米波雷達。(照片來源：參考文獻18)

高的信號解析度，可分辨很接近的多個目標，且因為波束較窄，不易受到敵人干擾，加上系統元件較小，因此天線可縮小、整體重量也較輕。相對於紅外線系統而言，毫米波對雲霧及灰塵的穿透力是紅外線的數百至數千倍，完全不受天候的影響。毫米波系統還有另一項優點：它在大氣中的衰減程度遠大於雷達波，發射出的旁波瓣很低，可以減低機上感測器間的干擾，也可防止洩露本身的蹤跡。

毫米波感測器不僅可開發成被動式的紅外線系統，也可開發成主動式的雷達系統，較開創性的概念是將紅外線影像與雷達系統訊號處理相結合。美國航太總署(NASA)蘭利研究中心已與業界展開合作，研究運用毫米波之主動式感測器，成為機上影像暨偵察/追蹤系統。早期的實驗性系統由於天線與鏡頭尺寸的限制，影像解析度很差。現在最新的毫米波系統藉由先進的數位處理技術及空間頻譜外差這類複雜的科技，已能提供所謂的「超級解析度」影像，這些畫面經過分

析後，足以提供警示訊息、警示畫面、及完整的資訊給飛行員，讓他知悉所有潛伏的威脅。「超級解析度」畫面可提供地面電線的警示，讓低高度飛行的戰機閃避最危險的地面電線。

國防先進研究計畫署(DARPA)的戰術科技辦公室(Tactical Technology Office)更展開了前瞻的先進系統研究規劃，要經由高科技讓戰機的效率及效益有革命性的進步。研究項目中還包括被動式及低攔截率系統，這些系統將會統合多種感測器及相關科技，其中較為人知的有：

- 基於多頻或頻譜分類技術的光學感測器，用於定標及瞄準
- 目標偵測追蹤的先進低攔截率雷達
- 目標追蹤及辨識的雷射雷達
- 目標方位提示及辨識的電子支援措施
- 接收及傳播目標資訊，以及安全傳輸目標影像及追蹤數據的指揮、管制、通信、資訊與情報(C4I)

上述的系統開發還包括各感測器與飛機整合時的所有事項，完成上述研究後，未來將繼續鑽研目前未能開發的特殊目標追蹤、發射資訊處理。研究範圍除了感測器、資料處理、感測器系統外，也包括感測器數學模型、介面、多感測器的資料融合及運用，以及如何開發低成本的新能量技術。

結 語

新世代戰機的設計及作戰需求，越來越強調躲避偵測，但又必須對戰機週遭情況有完整的情勢覺知，因此必須儘可能不用雷

達，改用被動式感測器；而為了具備最佳的戰場情勢覺知，這些被動式感測器必須具備多樣性、多頻譜的匿蹤科技。

現代空電系統已可滿足如此的需求，若戰機上有一套低攔截率的主動式電子掃描陣列雷達、一部紅外線搜索／追蹤系統、以及一部智慧型接收警告機，飛行員就有3套感測系統可以運用，其中2套是被動式，當這些系統的能量發揮到極致時，要偵測到此戰機將極端困難，雙方戰鬥時敵機幾乎毫無招架的能力。2006年美國空軍進行的F-22與F-15、F-16、F/A-18模擬空戰中，一架F-22以144比0的懸殊比數大獲全勝，被擊敗的其他戰機飛行員均表示在載機被飛彈擊落前，皆未察覺到有被任何敵機飛彈鎖定的情況，這應該就是被動式感測系統威力的最好說明。

參考文獻

1. “New techniques in airborne target detection”, INTERAVIA, August 1994
2. “Israeli Litening success sends ripple through FLIR industry”, INTERAVIA, August /September 1996
3. “Fighter Radars Get Active”, Jane's International Defence Review, October 01, 1997
4. “Modern Sensors Packages for Combat Aircraft”, Military Technology, February 2002
5. “MiG showcases Indian MRCA offering”, Jane's International Defence Review, April 01, 2007
6. “AdvancedIRST is back on the fighter agenda”, Jane's International Defence Review, 04-Mar-2008
7. “Passive Sensors for Fighter Aircraft”, Military Technology, July 2008
8. “Lockheed Martin F/A-18E/F infrared search-and-track system”, Jane's Electro-Optic Systems, 20-May-2009
9. “Optronique Secteur Frontal (OSF) for the Rafael aircraft”, Jane's Avionics, 08-Jul-2009
10. “Lockheed Martin F-35 Electro-Optical Targeting System (EOTS)”, Jane's Electro-Optic Systems, Jane's Electro-Optic Systems, 23-Aug-2010
11. “IR-OTIS Infra-red Optronic Tracking and Identification System”, Jane's Avionics, 07-Jul-2009
12. “Northrop Grumman AN/AAQ-37 Electro-Optical Distributed Aperture System (EO DAS)”, Jane's Electro-Optic Systems, 05-Aug-2009
13. “Lockheed Martin AN/AAS-42 infra-red search-and-track system”, Jane's Electro-Optic Systems, 10-Sep-2009
14. “Northrop Grumman AN/AAQ-32 Internal FLIR Targeting System (IFTS)”, Jane's Electro-Optic Systems, 29-Mar-2010
15. “EuroFirst PIRATE infrared search-and-track (IRST) system”, Jane's Electro-Optic Systems, 08-Oct-2009
16. ” On track: airborneIRST prepares for leap into uncharted territory”, Jane's International Defence Review, 10-Oct-2009
17. “MiG-29”, Jane's Aircraft Upgrades, 02-Sep-2010
18. “Forward-Looking Infra-Red (FLIR) Systems”, Jane's Avionics, 09-May-2011

作者簡介

魏楞傑先生，空軍備役中校，現任職中科院第一研究所。