



從雷達預警系統看 Su-35 與西方對手

軍事專欄作家 楊政衛

提 要

雷達預警接收器(RWR)是戰機在現代作戰環境中的第一道護身符。這是因為現代防空體系中，除了部分近距防空系統採用純光電射控外，在探測、射控、飛彈導引都會用到雷達波。在RWR正常發揮作用的情況下，飛機可以在敵方可以發射武器前、甚至在敵方發現自己之前就察覺威脅，及早防範，甚至也是發現匿蹤戰機的媒介之一。

RWR的作用機制簡單的說包括「察覺目標」以及「識別目標」兩個階段。前者顧名思義用來察覺威脅的存在以及概略的方位，後者則用來識別輻射源的種類、具體型號、工作模式等。現代戰場上輻射源種類太多，所以如果只是偵測而不加以識別，會變成「滿天都是威脅」，反而沒有預警效果，因此「識別」是現代RWR能否發揮應有效果的重要能力。而RWR進行威脅識別的依據，就是觀察輻射源的信號特徵，然後與資料庫加以分析比對，而這過程就與電子偵察類似，因此現代雷達預警接收器(RWR，俄國稱SPO)在西方常進一步稱為「電子支援系統」(ESM)，而在俄國稱為「無線電偵察系統」(SRTR)。

Su-35S的無線電偵察系統是「自動系統中央設計局」(TsKBA)研製的L-150-35，是在4+代戰機普遍使用的L-150的基礎上，針對Su-35大改而來。從硬體配置與研製年份可推測，這是一種與美國AN/ALR-94和AN/ASQ-239同級的系統。

本文先「縱向」的看俄國RWR的發展簡歷，以及L-150-35的技術特徵，接著再與西方系統進行橫向比較，進而推論L-150-35的使用特性與優劣勢。

關鍵字：雷達預警、電子偵察、RWR、Su-35

歷史回顧

一、四代機的SPO-15ML(L-006ML)

在越戰教訓下，蘇聯飛機在1970年代開始使用雷達預警接收器，這批初代預警器的精確度只到達「象限級」，而且完全沒有識別能力¹。也就是說，只能知道在哪個象限有輻射源，而這個輻射源是什麼？在什麼工作模式？通通不知道。

稍後做了改良，提升精確度、可以鎖定連續波照射模式的輻射源(當時的雷達導引飛彈導引時必定用到的模式)、並且可以識別若干種類的輻射源(是指概括性的種類，而非具體型號)。這種新規格的預警器稱為SPO-M，其輕量板就是用在MiG-25後期型、Su-27、MiG-29、MiG-31上的SPO-15「白

樺樹」系列預警器。

如Su-27、MiG-29所用的型號是SPO-15ML(L-006ML)。但對於現代作戰環境而言，SPO-15ML的頻率範圍太小、精度不足、威脅評估機制死板，而且最大致命傷在於，它無法區別追蹤暨掃描(TWS)模式與掃描模式，而現代戰機往往以後者為飛彈提供中途資料更新，因此將這兩種模式一視同仁是很危險的。

二、4+代機的SPO-32(L-150)

SPO-32(L-150)雷達預警接收器於1982年開始研製，初始型於1983年完成。其與SPO-15一樣至少能在敵雷達探測(或射控)距離1.2倍處發現之，在頻率範圍、識別能力、威脅評估方面都有顯著進展。(圖1)



圖1 Su-27SM(3)的L-150天線分佈。(攝影、製作：作者)

1 V.K.Babich等14人，”Авиация ПВО России и научно-технический прогресс”(Russian Air Defense Aviation: Scientific and Technological Advance), Дрофа(俄)，2005，p.500。

其數位化使得能輕易與全機資訊整合，也能透過軟體升級；能儲存128個型號的輻射源資訊，亦能用軟體來更新；擁有足以提供射控資料的精確度而能為反輻射飛彈指示目標；能顯示4個最具威脅的地面目標，引導6枚Kh-31P反輻射飛彈(同時最多2枚)；有3種警示模式：最具威脅的目標、預設目標(programmed target)、處理中目標(operational target)；能儲存輻射資訊，回基地供下載研究；接收頻率範圍擴增到1.2~18GHz(西方同時期警告器的接收範圍通常是2~18GHz)；能對處於掃描、追蹤、照明模式的脈衝、脈衝都卜勒、連續波發出警告。

在頻率範圍、導引反輻射飛彈的能力、識別能力方面，L-150與同時期西方產品同級。2000年代以後服役的改良型俄製戰機如Su-30MK系列、MiG-29K/KUB、Su-25SM都使用L-150。其原因基本上毫無疑問，因為比L-150還早的L-006不論是頻率範圍、精確度、威脅評估模式、識別能力等都比L-150遜色很多而且極難在現代戰場生存。

Su-35S的L-150-35

L-150-35(圖2,3)的研發案的名稱是「改良L-150預警器以用於Su-35的電戰總成」²，可見就是針對Su-35而研發，研發起始年份不會早於2003年。其於2009年完成設計文件，2011~2012年通過廠商初步試驗與聯合試驗³，在時程上也是完全與Su-35同步。雖然從型號看起來還是L-150家族，但性能實已天差地別。單就天線配置來看，L-150-35與F-35的AN/ASQ-239是同級的。

其偵察頻率範圍達1.2~40GHz，涵蓋L波段到毫米波段，依據頻率、脈衝重複頻率、觀測時間、脈衝持續時間、照射時間、輻射源座標來進行威脅評估，將6個最具威脅的目標顯示出來；能在飛行前依任務規劃制定偵察方式與威脅評估邏輯；能以相位差進行瞬間精確指向，為反輻射飛彈提供座標；儲存的雷達參數由L-150的128個型號激增至1024個；在架構與電腦方面已用上整合式模組化航電(IMA)架構，有很強的運算能力與擴充潛力；電力需求為115V、400Hz交流電60VA、27V直流電350W。最大壽命6,000小時或25年，平均故障間隔500小時⁴(F-35的AN/ASQ-239是440小時⁵)。

- 2 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.
- 3 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.
- 4 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное

可以說L-150-35在「性能上」滿足2010~2020年代的最佳標準，也可以說逼近第五代戰機標準，而在「架構上」才與五代有差，以下一一詳述。

一、硬體組成與天線分佈

L-150-35採模組化設計，由「基本模組」以及「擴充模組」組成。其中，「基本模組」本身已是完整的電子偵察系統，包括接收機、電源、電腦、載波頻率量測器、以及粗定位指向器。而「擴充模組」則是用來提升性能，包括毫米波模組以及相位式精確指向器。

前述各種設備，在硬體上只有三個層級(三大類)：最底層(外層)的天線、中間模組、以及後端處理模組。每一個天線或天線模組透過自己的一個中間轉換設備，連往後

端處理模組。基本上每一個雷達預警接收器都是這種整合方式，但L-150-35採用了「整合式模組化航電」(IMA)架構，因此不同的後端功能模組是以卡匣形式插在單一機殼內的。



圖2 L-150-35組成。TsKBA



圖3 第一批Su-35S的L-150-35天線分佈。(圖片來源：KAAPO, TsKBA,作者；製圖：作者)

конструкторское бюро автоматики », 2013 г.

- 5 “F-35 electronic warfare suite: more than self-protection”, Avionic International, 01.APR.2006, <https://www.aviationtoday.com/2006/04/01/f-35-electronic-warfare-suite-more-than-self-protection/>

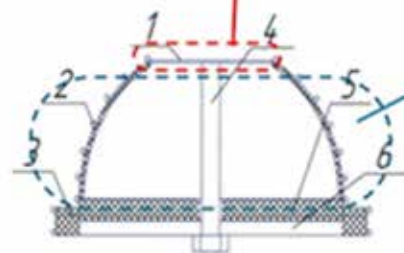
在天線配置方面，Su-35S的L-150-35共有4種，共計12個天線模組，分佈在10個雷達罩內。包括：

1.4個半球狀螺旋天線(圖4)：其中2個位在翼前緣、2個在垂尾後緣上端外側。這4個天線外觀上的明顯特徵是有半球型的天線罩，也是L-150-35在外觀上唯一與之前的L-150相通之處。這種天線採用複合式設計，相當於在「頂端剷平」的半球體表面做上

螺旋天線，也就是下半部是半球狀螺旋天線，頂端是平面螺旋天線。與傳統的螺旋天線相比，在剷平的頂端的平面螺旋可以優化高頻部分的性能(因為平面構造比較容易實現精密的天線幾何設計)，因此這種複合式螺旋天線的頻率範圍很廣，最大與最小頻率比值可達20⁶，在L-150-35上用來偵測1.2~18GHz範圍⁷。

頂面：平面螺旋天線，可用平面蝕刻方式製作以滿足高頻探測所需之精密度。圖為9B-1103M-200PS的導引頭

下半部：球狀螺旋天線。圖為Kh-31P的L-112E反輻射導引頭，頻率範圍2~11GHz。



L-150系列的「平頂」半球狀螺旋天線示意。結合半球狀螺旋天線與平面螺旋天線的特點，頻率範圍1~18GHz。

圖4 平頂半球面螺旋天線示意。其中球面天線約可負責1~10GHz範圍，頂端的平面螺旋天線可用蝕刻製程製作以滿足高頻探測需要，兩者合併可偵測1~18GHz範圍。(作者)

6 СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ СПИРАЛЬНАЯ АНТЕННА», RU patent, RU2687895, 16.MAY.2019, https://yandex.ru/patents/doc/RU2687895C1_20190516

7 «Сверхширокополосная спиральная антенна», ЦКБА, <http://www.ckba.net/405/>

2.4組成對天線(每組內含2個天線)：2組位在翼前緣半球狀螺旋天線旁邊，2個位在尾刺兩側突起的整流罩內。其天線單元口徑很小，研判就是涵蓋毫米波段的模組。這四組應該能定出比4個半球狀螺旋天線更精確的方位，但其天線單元尺寸比前述4個半球形螺旋天線小，因此低頻接收能力應該受限。與之對比，西方RWR如AN/ALR-67(v)3的低頻部分也是只有粗定位能力；

3.2組精確定位天線：每組包括2種尺寸不同的4單元不等距螺旋天線線列，位在翼前緣，緊鄰L波段相位陣列天線旁邊，兩種天線位在同一個天線罩內。其具有多頻段平行處理特性，故能無時間差瞬間發現輻射源、測定其所屬頻段、量測相位差並進行精確指向。

L-150-35的天線都採用螺旋式天線，這種天線的特點是頻寬很大、可接收任何極化方式(水平、垂直、左旋、右旋)的信號、方向性為軸對稱等，反輻射飛彈導引頭多採用此種天線。除了翼前緣的精確指向天線只負責前半球外，其餘2種天線都是以4組來建構360度視場。這意味著每一組的接收範圍至少 $\pm 45^\circ$ ，又由於螺旋天線的方向性是軸對稱的，因此理論上垂直方向視野不只 $\pm 45^\circ$ ，然而廠商型錄則只是保守的列出水平方向360度、垂直方向 $\pm 30^\circ$ 之數據。原因可能是天線罩等的影響限制了垂直方向的性能，或是需求上只要求優化到垂直 $\pm 30^\circ$ ，這仍

有待查證。值得注意的是，上一代L-150的標準配置也是垂直 $\pm 30^\circ$ 視野，但有的機種在飛機上下表面各裝一個圓盤狀接收天線，就能接收垂直方向 $\pm 90^\circ$ 範圍的信號。在量產的Su-35S的L-150-35上沒有上述垂直方向附加天線，因此在飛機上下方應該會有雷達預警盲區。然而實戰中威脅很難出現在該盲區，且Su-35S的光電偵察系統視野已涵蓋該盲區且精確度更高，可能因此L-150-35才不需在此著墨太多。

上述三種天線都是在水平方向上分佈來形成視野，因此在水平方向上能藉由相異天線信號比對的方式實現瞬間指向，然而垂直方向就無法進行瞬間指向，如果真要測定垂直方位，會需要改變飛機俯仰角，比對信號之後得出，但這種方式有其侷限且精度較差。

二、頻率範圍多出毫米波段

由於許多陸基防空系統與新一代雷達導引頭開始使用毫米波段，故毫米波段的預警能力日趨重要。為此，L-150-35增加了毫米波模組，而將頻率範圍擴增至1.2~40GHz⁸。

毫米波模組的預警部分應該就是前述4組成對天線，以及翼前緣精確指向器中口徑較小的部分。由於螺旋天線的頻寬很大，所以能接收毫米波的天線不會只能接收毫米波，而通常是涵蓋X波段到毫米波的範圍⁹。例如精確指向器中的小口徑平面螺旋天線的頻率範圍大約是8~40GHz¹⁰，包含X波段，而4

8 КнААРО官網的Su-35介紹頁。<http://www.knaapo.ru/rus/products/military/su-35.wbp>

9 «СПИРАЛЬНАЯ АНТЕННА», RU patent RU 2673319, 23.NOV.2018, https://yandex.ru/patents/doc/RU2673319C1_20181123

組成對天線的單元口徑更小，頻率範圍應該稍小。

相較之下美國海軍2020年的AN/ALR-67(v)3偵測範圍才擴展至2~40GHz¹¹，JAS-39基本型是2~18GHz，升級後可擴張至2~40GHz甚至0.5~40GHz¹²。可見L-150-35的偵察範圍吻合2010~2020年代的最高標準，硬要挑缺陷的話，L-150-35帳面上的缺陷是0.5~1.2GHz這一範圍的偵測能力，然而需注意當對手是美系防空系統時，幾乎不會有低於1GHz的作戰波段。

三、相位式精確指向器

具TsKBA的介紹，為了確保在自然與人為干擾環境下的精確指向能力與資訊可信度，無線電系統必須取得含有相位在內的資訊¹³。為此，研發了寬頻相位量測器，並在該相位量測器基礎上，研發相位式精確指向器(phase direction finder)¹⁴，能依據相位差瞬間訂出輻射源方位(不須經由天線旋轉或移動)。

相位式指向器的原理簡言之，是量測兩個天線信號之間的相位差，然後由於兩天線距離已知，故可根據相位差反推輻射源方向。乍看之下這與相位陣列天線雷同，實則不然。相位陣列天線在大量天線干涉下，具有很強的方向性，一次只能偵測特定方向的信號，但優點是增益大，所以距離遠，適合雷達定位；而相位式指向器只用兩個天線，不足以干涉出窄波束，但也因此可以接收大範圍的信號，然後一口氣抓到來自不同方位的輻射源，所以適合用在被動預警系統。

雖然只要有兩個天線就可以實現相位指向，但兩個天線的距離是要考究的。相位指向器與其他天線類似的是，「波長孔徑比」越小，方位誤差就越小。所以天線間距如果太小，誤差就太大。但間距也不能過大，如果天線間距超過半波長，相位差與方位就可能不是唯一對應，也就是一個相位差會對應兩個以上的方位。天線間距越大、方位角越大，上述「方位非唯一」現象就越嚴重。

10 根據網站型錄比對形式類似的天線而得，<http://www.ckba.net/406/>

11 AN/ALR-67(V)3 Advanced Special Receiver, GlobalSecurity.org, <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/an-alr-67.htm>

12 Griffin Radar Warning Receiver (RWR)/Electronic Support (ES) system (United Kingdom), AIRBORNE SIGNALS INTELLIGENCE (SIGINT), ELECTRONIC SUPPORT AND THREAT WARNING SYSTEMS, Janes, JREWS

13 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.

14 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.

了解了相位式指向器的基本原理與限制，就可以知道，位於翼前緣與垂尾頂端的半球狀螺旋天線彼此間距過大，用來實現相位指向並無意義。而位於翼前緣與尾刺旁的4組成對天線則可能用於相位指向，真相仍待查證。至於翼前緣的大型線列，則確定是寬頻相位指向器。

根據TsKBA在「2013航空產品競賽」的介紹文的描述，這裡用到的相位量測器的特點，是「帶有寬頻相位差量測器的直接放大式單脈衝接收機」以及「直接信號轉換，不經過轉頻」¹⁵。TsKBA的一個關於相位式指向器的專利(RU 2579757)所提到的原理以及架構，就與上述描述非常接近，基本上可確定與L-150-35翼前緣這兩個大天線有關。

在RU 2579757專利中所提出的相位式指向器¹⁶，包含兩個天線組，各M與N個天線，他們各有一個耦合器，耦合器會根據實際情況從上述M與N個天線中各取一個天線，以形成最佳的相位指向器配置(即最佳的天線間距)。兩組天線的信號直接被寬頻放大器放大後，平行輸入到多個不同的頻段濾波器(只過濾頻段，不是精確頻率)，量測該頻段的相位差，並且根據與閾值的比較來知道該頻段是否有輻射源。該量測出的相位差搭配由後端電腦傳來的精確頻率，就可解算出精確方位。這種指向器設計有以下特點：

1.其寬頻放大、多頻段同步處理的方式，使其可以無時差瞬間涵蓋天線能接收的整個頻率範圍，偵測出各個頻段內是否有輻射源並定出其方位(也就是知道「有目標」以及「在哪裡」)。但這種方式無法量出精確的載波頻率，所以要由後端電腦取得，以進一步取得精確方位；

2.承上，頻段式濾波的雜訊比窄頻濾波強，故探測距離較近。所以這種相位式指向器有作用時，輻射源的其他資訊如精確頻率可能早已被偵查出來，所以才能從後端電腦取得精確頻率。

3.由於其從M與N個天線中各取一個來組成相位指向器，因此可以有MxN種組合，每一種組合有自己的基線長度(天線間距)，因此可以優化指向能力，可視為「可變基線」的相位式指向器。例如當波長較長或目標方位角不大時(要進行射控定位時就可能出現目標在前方的情況)，就選用相距較遠的天線來提升精確度，而當波長較短且方位角較大時，就選用相距較近的天線以確保量出方位的唯一性。另一方面，如果不採用這種「可變基線」設計，則要獲得MxN種基線長度就需要2xMxN個天線單元，因此這種設計等於是用一半的天線數量達到需要的指向性能。

L-150-35位在翼前緣長天線罩內的，顯

15 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.

16 ФАЗОВЫЙ ПЕЛЕНГАТОР», RU patent, RU2579757, https://yandex.ru/patents/doc/RU2579757C1_20160410

然就是這個專利所述的「寬頻、可變基線」相位指向器。每邊的長天線罩內有2個4單元不等距線列，且兩個線列分別使用不同尺寸的天線單元，分別是口徑1~2cm與3~4cm的螺旋天線，可以推測這兩個線列分別涵蓋不同的頻率範圍。參考專利的描述，4個天線單元可以是「1+3」或「2+2」的分組，故兩種線列各可組合出3或4種相位指向器(兩邊總共相當於6或8種)；而在Army2020軍事論壇展出的實體中，每個線列各只有3個單元，只能是「1+2」分組，所以每個線列可組合出2種指向器。

另外，從TsKBA網站型錄比對，一種與前述口徑1~2cm天線類似的平面螺旋天線頻率範圍是8~40GHz¹⁷，而口徑3~4cm的天線頻率範圍應是1~18GHz¹⁸，可見這兩種天線的頻率範圍在大約8~18GHz重合，涵蓋對戰機最具威脅的X波段。也就是對X波段能有更靈活的指向器配置。

此外，用預警系統要知道距離，就必須進行被動測距，這就必須用三角定位方法，也就是由兩個位置觀察目標的方位，反推目標距離。最傳統的粗定位方式，是用飛機的所有預警天線實現指向，這樣整架飛機就是一個「位置」，那要實現三角定位，就要飛一段距離後，從不同位置再偵查。而如果用相位式精確指向器，則一個指向器就是一個「位置」，那麼只要目標同時位在兩個指向

器的視野內，就能瞬間指向並且解算距離。從L-150-35翼前緣的相位指向器設計可以推測，當目標位在飛機正面一段範圍時，就會同時落在左右兩側的指向器視野內，理論上就能實現無時差被動測距，而且由於左右兩翼的指向器距離遠，精確度應當很高。

另一方面，每個翼前緣的兩組指向器線列的天線雖然頻率範圍不同，但應當有頻率交會，所以當輻射源的頻率範圍剛好是兩組線列都能抓到的範圍時，甚至可能靠一個翼前緣的兩組指向器就能實現被動測距，只是這時兩個指向器緊靠，測距精度較差。

四、AUTs-30-03目標指示管理裝置(圖5)

這是一種附加的硬體模組，由L-150-35取得偵察資料，並以特殊的演算法優化定位能力，並且能管理反輻射飛彈之使用(最多管理6枚，同時導引2枚)。其允許以反輻射飛彈打擊即時偵察到的目標之外，也能打擊事先知道座標的輻射源。搭配了AUTs-30-03後，L-150-35就具有被動雷達定位與射控系統之功能。以美國系統類比，AUTs-30的用途相當於F-16C/D的AN/ASQ-213高速反輻射飛彈瞄準莢艙(HARM Targeting System, HTS)，兩者都是藉由特殊的定位演算法來提升反輻射飛彈的作戰效能。差別在於AN/ASQ-213是外掛莢艙且有自己的天線，而AUTs-30是內建裝置，且沒有自己的天線(由電子偵察系統讀數據)。

17 Широкополосная плоская спиральная антенна сантиметрового и миллиметрового диапазонов», ЦКБА, <http://www.ckba.net/406/>

18 Сверхширокополосная спиральная антенна», ЦКБА, <http://www.ckba.net/405/>



圖5：AUTs-30系列簡單的說是用來優化被動定位能力的運算裝置，當L-150搭配AUTs-30後就相當於被動射控雷達。圖為AUTs-30，Su-35用的是AUTs-30-03。(TsKBA)

為什麼需要AUTs-30這樣的專門的反輻射飛彈管理裝置？要知道，電子偵察系統(預警系統)的著眼點是預警與識別，強調的是在信號特徵方面的處理能力，在定位方面不需要太精確，而且強調的是相對方位(例如，知道輻射源在飛機9點鐘方向，以供反制參考)；反輻射硬殺則完全相反，需強調精確定位能力，而且需要掌握目標絕對的地理位置，兩者用的是不同的演算法。例如，實際作戰時當然不可能一接收到敵對輻射源就直接發射飛彈，而敵方也不可能連續照射我機，因此要發射飛彈的當下，不可能剛好有即時方位資料可用，而目標相對於我機的相對位置也早已因我機移動而改變，因此如果只依照預警系統定出的相對方位去導控反

輻射飛彈，會有如「刻舟求劍」。因此反輻射射控系統必須結合導航資料，知道飛機怎麼飛，才能不斷掌握「我在哪？目標在哪？」，反推出目標的絕對位置(而非相對於我機的方位)。也因為結合了導航資料，因此AUTs-30也可以打擊事先知道座標的目標，就如同用自動導航前去轟炸事先輸入的座標一般，差別只在其使用反輻射飛彈。

五、「整合式模組化航電」(IMA)架構的後端系統

在後端系統方面，L-150-35已經用上了「整合式模組化航電」(IMA)架構¹⁹。IMA架構類似美國F-22的CIP中央電腦的架構，其特點是將軟硬體都標準化，不同的廠商依據公認的標準研製自己擅長的通用軟硬體，供應給下游系統研製者，而系統研製者則藉此輕易組合出所需的成品。例如有的上游廠商專門研製處理器模組、有的研製記憶模組、有的專門研製資訊傳輸介面等等，並且由於是標準化規格，因此下游系統研製者可以輕易藉由組合通用模組或附加少量自己研製的專屬軟硬體而做出產品，並且在服役過程中可輕易藉由更換通用模組與軟體來升級。採用這種架構後，標準模組可以盡量使用最好的商規元件而具有很好的性能，並且由於模組輕易通用因此能大量生產降低成本。

採用IMA架構的外觀特徵就是後端系統

19 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиационного строительства», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.

20 “CAPSTONE SENIOR DESIGN PROJECT ECE-4007 FALL 2010 SECTION L04”, <http://www.capstonedesign.info/projects/Serial%20Data%20Bus%20Decoder%20and%20Monitor.pdf>

只是「一台機器」，也就是所有有功能的模組，如電源、傳輸、運算等，都是做成卡匣形式安插在一個機殼裡。由於IMA架構盡量採用通用模組，因此主要是靠軟體來實現不同的功能，所以可以資源共享與資源重組，在性能優化以及抗故障能力方面會有較好的表現。並且，資訊顯示是透過多用途顯示器負責，因此沒有專門的預警系統顯示器。與之對比，在上一代或更早的雷達預警接收器上，後端系統往往是「好幾台」彼此相連的機器。例如美國AN/ALR-69雷達預警接收機的後端系統中，用來進行粗定位的與全系統整合的CM-479處理系統與用來進行精確頻率選擇的C10373接收機就是分開並且相連線的兩部機器^{20,21}。

俄國的IMA架構最早由航空系統研究院GosNIIAS於2004年開始主導制定規格²²，以電腦系統為例，拉緬斯基儀器設計局(RPKB)於2006年開始依據IMA規格開發各種通用模組，用來改良生產中的電腦，例如Su-35的Baget-53-31M中央電腦就有IMA計畫的模組，並在2009年展出完全採用IMA架構的電腦。而蘇霍伊公司自己約在2012年才開始為Su-57研製針對軍事用途優化的IMA架構電腦，稱為BTsVM IMA BK，於2016年搭機試驗²³。L-150-35用上了IMA架構可見

在架構上是很先進的。

在一個2000年代初出現的「2005~2010年間研製的21世紀戰機電腦系統運算能力分配概念圖²⁴」中可見，電戰系統的傳輸頻寬需求以及資料運算能力居四大底層系統(雷達、光電、電戰、飛行)之冠，大於或等於雷達與光電系統之總和(但信號處理需求較低)。雖然還不清楚L-150-35的電腦系統的具體規格，但IMA計畫的起點比Su-35計畫還稍晚，因此已公開的IMA模組在處理性能、記憶容量、傳輸速度等方面，都比Su-35的Baget-53-31M中央電腦以及Irbis-E雷達的Solo-35雷達電腦還強。可見用到IMA架構的L-150-35的處理電腦的能力應當是符合第五代需求，這點當無疑義。

電子偵察系統的資料運算量極為龐大是可以理解的：雷達所偵測的，是自己發射出去的信號，所以信號特徵當然是已知的，而雷達要做的，是在收到的訊號中析出微弱但特徵已知的信號。而電子偵察系統則是一口氣面對不同方位、不同頻率的輻射源，並且從這中找到特定規律，藉此析出不同輻射源、判定輻射源的種類、模式、甚至具體型號。而這就需要大量比對運算，這已不是「抓出信號」而是「處理資料」了。

例如雷達一定是以特定方式發射脈衝，

21 Kim Cole, "Introduction to radar warning receivers", Robins AFB, 23.FEB.2009, <https://forums.eagle.ru/attachment.php?attachmentid=48539&d=1299343068>

22 Интегрированная модульная авионика», Радиоэлектронные Технологии, 01.2015, p.66

23 Многоядерный Т-50: на новом российском истребителе ИМА БК заменила «Багет» », uacrussia.livejournal.com, 14.APR.2017, <http://uacrussia.livejournal.com/61632.html>

24 V.K.Babich等14人，"Авиация ПВО России и научно-технический прогресс"(Russian Air Defense Aviation: Scientific and Technological Advance), Дрофа(俄)，2005，p.549。

依據雷達載波頻率以及脈衝重複的方式可以判斷雷達的種類與模式。但如果在偵查系統處理的頻段與方位範圍內有兩個以上的雷達時，他們的信號就會混在一起，變得沒有規律。要從中分析出目標，就必須用到大量的資料庫進行比對、驗證、假設過程。而這種有「假設性」的問題，就會讓運算需求暴增。根據俄國航空系統研究院(GosNIAS)在2000~2005年代的研究，要實現第四代戰機的全機導航、通信、識別、飛控、設備控制、資訊處理等基礎功能，只需要每秒6,000萬次的處理能力與10MB級記憶體，但要處理複雜雷達信號、電子視覺、用人工智慧處理無法事先知道處理方法的問題(例如空戰時要針對各種可能情況做假設，分別分析可能的結果)，就需要每秒數十億甚至數百億次的運算能力²⁵。

就公開資料而言，L-150-35強大的運算能力體現在其資料庫上，其儲存的雷達數據從之前L-150的128種暴增到1024種，即提升至8倍。但要在8倍的資料庫中交叉比對、假設、驗證，所需的運算量絕不只8倍。

另外要注意的是，電子偵察系統所謂的「儲存種類」可以是指具體型號的參數，也可以是籠統的類別。例如Su-27的L-006預警器的「區分6類雷達」就是無法區分具體型號，但可以區分概括種類如戰機雷達、預警雷達等。全世界同時服役中的雷達型號、導引頭型號是有限的，所以L-150的128種參數其實已經很夠用，L-150-35的1024個則應是

考慮未來擴充。

另一方面，預警系統的評估依據不可能真的只是死板的資料庫比對。這是因為具體型號的參數勢必是事先依據情報蒐集好，再輸入到資料庫的。因此像是新型號、改良模式、或是沒有被事先偵查到的保密模式，就不可能預先存入資料庫，所以如果只是死板的相信資料庫，就是「盡信書不如無書」，反而會遭殃。所以即使資料庫能儲存大量具體型號的參數，預警系統一定會保有籠統類別的評估能力，而這當中也應當包括「現在還沒蒐集到，但根據科技進展可以預知的未來模式」，而且因為資料庫與運算能力龐大，所以或許可以有很多這樣的「未來模式」。這種「立足現在(剋制現在已知的模式)，放眼未來(剋制能料想到的未來模式)」本來就是電戰系統設計的常態(如果不這樣的話電戰系統就永遠只能「放馬後炮」了)。而對未來模式的推測準確性，就關係到自身的科技實力，簡單的說，如果科技走在前沿，自己就正在做最先進的系統，或是雖然自己做不出來但是因為科技實力到家所以知道對手在做什麼，就可以準確的「預知未來」。

對戰機生存性最直接相關的「未來模式」當屬第五代戰機與先進防空系統的主動相位陣列雷達的各種新穎模式，如所謂「低被截獲率」(LPI)模式。這方面看起來俄國好像因為電子科技落後所以居弱勢，但實則不然。俄國確實因為半導體工業落後，以至於在機載主動相位陣列雷達的主動元件的量產與

25 Авияция ПВО России и научно-технический прогресс, Дрофа, 2005, p.547~548

小型化上落後西方甚至中國，但這只是硬體元件量產問題，不等於無法做出少量樣本或針對特種用途用較高的成本生產(例如電戰天線就屬於特種用途，且需要的天線數量與功率比較少，量產難度遠低於一套就要上千個元件的雷達)，也不等於不知道主動陣列雷達的特點。事實上，Su-34、Su-30SM所用的SAP-518干擾莢艙就用上了主動陣列天線，此外，在NIIR的Zhuk-MSFE (Sokol)與NIIP的Irbis-E被動相位陣列雷達、甚至Kh-35UE反艦飛彈的導引頭上²⁶，就都實現了(LPI)模式。因此從運算能力以及科技背景來看，L-150-35應當足以識別第五代戰機雷達的信號，關於這點稍後將進一步討論。

六、可靠性

L-150-35的最大壽命是6,000小時或25年，與Su-35機體相當；平均故障間隔500小時²⁷。

這種平均故障間隔比起機載電腦系統、多用途顯示器的動輒10,000小時實在是「不堪入目」，但以機載無線電系統來說已經不差。現代非主動陣列雷達的平均故障間隔通常約100~250小時，而主動陣列雷達雖然理

論上可達1,000小時，但暫時只達到500~600小時。

如果與西方系統比較，F-35的AN/ASQ-239是在F-22的AN/ALR-94的基礎上發展的，特別強調可靠性是AN/ALR-94的2倍，其平均故障間隔則是440小時²⁸。可見L-150-35的可靠性也在世界頂尖之列。

七、L-150-35簡評及其與第五代系統的差距

L-150-35與第五代系統的差異有二：

首先是天線饋電系統的差異。Su-57、F-22、F-35這樣的第五代戰機的無線電系統的重要特徵是「共用天線口徑」，也就是射控、導航、通信、電戰等無線電系統的天線是有硬體連動的，由統一的天線饋電系統來管理，這樣不同功能但頻率相同的無線電系統就能盡量共用天線。例如射控雷達的主動陣列天線也可以用於無線電預警、通信、電戰等。Su-35的天線饋電系統仍是舊式的「各自為政」式，也就是每個無線電系統有自己的天線饋電系統。

第二天線罩的有無。天線罩的材質、厚度、形狀等對天線性能有顯著影響²⁹。在無線電偵察天線上，天線罩與天線艙內的電

26 «Ракета X-35 — одна из лучших в мире», Известия, 12.MAY.2017, <https://izvestia.ru/news/693812>

27 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.

28 «F-35 electronic warfare suite: more than self-protection», Avionic International, 01.APR.2006, <https://www.aviationtoday.com/2006/04/01/f-35-electronic-warfare-suite-more-than-self-protection/>

29 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.

磁波反射會影響定位精度，這曾是L-150-35的毫米波接收天線研製過程中的重大難關³⁰。此外，天線艙的形狀通常不單調，是所謂的「複雜腔體」，對雷達匿蹤不利。因此第五代戰機要盡可能採用無天線罩天線，也就是天線本身就融入飛機表面結構。TsKBA設計局在累積L-150-35的經驗後，就已開始研發無天線罩式天線³¹。

要注意上述L-150-35不及真五代系統的部分，影響的主要是重量、匿蹤性能方面，而非預警能力、精確度方面。對Su-35這種非匿蹤戰機而言，天線部分造成的雷達反射截面積(RCS)可以忽略不計。因此上述架構上的不足對Su-35的作戰能力並無影響。

八、重要特性研判：能否抓到LPI雷達？

L-150-35在硬體架構、頻率範圍等方面都已達同時代最高標準，與真五代系統在功能上的差距應該已不大。然而，L-150-35畢竟是電戰系統的一環，而電戰系統往往是最具機密性的，其真正的性能往往在看不見的軟體層面。一個無法查證但卻很重要的問題是：L-150-35能否抓到第五代戰機的「低被截獲率」(LPI)雷達信號？這個問題關係到他在主動陣列雷達日益普及的現代與未來戰場上的生存力。

這個問題現階段當然不可能確認，只能加以研判。而要判斷這個問題，不妨先知道新一代雷達是怎麼辦到「低被截獲率」(LPI)的。

LPI模式的原理

新一代雷達特別是主動陣列雷達的「低被截獲率」，顧名思義就是很難被發現。這又分成「敵方感測不到信號」(看不見)以及「抓得到信號但是當成雜訊濾掉」(看不懂)兩種情況，當然實際上是兩者混用。

第一種情況是，用低脈衝功率與較久的觀測時間，使自己的主動探測距離大於敵方被動偵測距離。我們都知道雷達功率越大探測距離越大，被偵測距離也越大，特別是主動探測時信號一去一回又被目標散射或吸收而衰減，而被動偵測時信號只有單程，且沒有被散射或吸收，所以目標所收到的信號會比雷達本身強很多，故通常雷達還沒發現目標時，目標已經發現雷達信號了，這也正是雷達預警的基本原理與優勢。但其實對雷達而言，影響距離的是累積的能量，也就是功率乘以時間，因此除了增加脈衝功率外，也可藉由增加信號累積時間來延長距離。而預警系統只是依據脈衝強度來偵測目標(如果

30 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.

31 Краткое описание выполненных работ, технологий «Создание станции непосредственной радиотехнической разведки Л-150-35 для самолета Су-35», Конкурс «Премия «Авиастроитель года» Номинация «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 2013 г.

累積信號的話，根本不知道累積的是不是同一個目標的信號)³²，因此如果雷達的脈衝功率夠小、信號累積時間夠長時，主動發現距離就有機會超過敵方的預警距離。主動相位陣列雷達就可以輕易視需要調整發射功率，在這方面相當有優勢。

第二種情況是，雷達信號的載波頻率不斷變化，甚至脈衝重複頻率也不斷變化，這使得敵方預警系統就算抓到信號，也難以量測出信號的規則，也就難以察覺雷達的工作模式，這樣就無法做出正確的警報，甚至可能當成雜波濾除。這種「抓得到信號但是看不懂」還不是跳頻模式的全部效果，事實上他也可以降低被發現的距離。這就要從無線電偵察的濾波機制說起：

無線電偵察系統的天線通常都能接收很大的頻率範圍，收到信號後，可以不濾波直接放大信號，也可以送入濾波器做篩選，而濾波器又分成「允許一個範圍的頻率通過」的頻段式濾波(寬頻濾波，例如8~10GHz)以及「允許極窄範圍的頻率通過」的窄頻濾波(例如10GHz $\pm$ 10kHz)。越窄頻的濾波方式，信噪比越高(因為允許頻率以外的信號會因非線性機制而劇烈衰減)，偵測距離就越高，但每次偵測能涵蓋的頻率範圍就越窄，就會需要越多個平行濾波迴路才能實現全頻率無時差覆蓋(例如如果濾波器頻寬範圍是2GHz，那麼用4~6GHz、6~8GHz、8~10GHz、10~12GHz四個平行濾波迴路就能涵蓋4~12GHz，但如果要用2MHz的濾波

頻寬含蓋該範圍，就需要1,000倍的平行迴路)，又由於濾波器是硬體迴路，數量是有限的，因此實際上只有寬頻濾波器才可能做到無時差覆蓋，至於窄波濾波器則是用頻率掃描方式(依序調整允許的頻率)對所有或特定頻率範圍進行掃描(例如用頻寬20kHz的濾波器依序掃100,000次以掃完2GHz範圍)，而這樣就無法無時差監聽，就有可能有信號會漏失。正因不同的濾波方式各有優缺點，所以通常電子偵察系統的天線收到信號後，信號會同步輸入好幾種迴路，其中至少會包括寬頻濾波以及窄頻濾波，用前者進行無時差連續警戒以及限縮頻率範圍，以及用後者訂出精確頻率或是有機會更遠發現。遇到跳頻式LPI模式時，窄波濾波迴路有可能漏接信號，而寬頻濾波迴路可以收到信號但發現距離較短。這兩者都會限縮偵測距離。

跳頻式LPI模式很類似通信系統中的「跳頻展頻」模式，這在現代無線電系統中已不罕見，而對主動陣列雷達而言，其工作頻率範圍很大(非主動陣列X波段雷達的頻率範圍通常是主頻 $\pm$ 1%，最多是主頻 $\pm$ 5%，而主動陣列雷達則高達主頻 $\pm$ 30%，是前者的6~30倍)，用這種模式更有優勢。

破解LPI模式的方法與其限制

大致了解LPI的原理就知道，所謂LPI模式並不是把信號「變不見」，他仍有信號，只是藉由「鑽漏洞」的方式，讓固有型號的RWR難以偵測或識別。可想而知，如果設

32 Принципы построения многофункциональных радиолокационных комплексов», Радиоэлектронные Технологии, 01.2015, p.95

計時就考慮到敵方有LPI模式，則沒有理由「規定」RWR不准發現LPI雷達信號。要抓到並且識別LPI模式其實不難，只是也會有使用限制：

對於第一種「低功率、長時間累積信號」的LPI模式而言，由於目標是動態的，因此實際上信號累積時間不能太長，例如凝視1毫秒或10毫秒，目標基本上都在原來的波束範圍內，但如果凝視1秒，目標很可能早就脫離波束範圍了；此外，藉由延長信號累積時間來探測，也表示相同時間能照射的目標數會比較少，因此在低被偵測率、探測距離、多目標能力(資料更新率)三個衝突性能的取舍下，LPI模式的信號累積時間一樣有上限。信號累積時間有上限就表示，信號強度有其下限。這表示，只要RWR的敏感度夠高，就還是可以在我機被發現之前先抓到LPI雷達信號。

而要調高敏感度，一方面是藉由硬體元件的設計，另一方面就是在軟體端降低報警閾值。這就可能造成大量的虛警，而為了降低虛警，就必須運用更大量的運算資源去除錯。降低報警閾值這項可以在舊系統升級時實現，而提高元件的硬體敏感度以及加強運算能力，就必須是新研製的系統。L-150-35研製時LPI雷達早已問世而且俄國自己具備該技術，再加上處理系統用了IMA架構，運算能力也是新一代的，應該有辦法抓到這種LPI模式的信號。

而在頻率變換型的LPI模式方面，如果在設計時已經考慮LPI雷達的存在，甚至在資料庫中已經預先考慮若干LPI雷達的模式

，再搭配強大的資料比對能力，那麼這種傳統RWR「看不懂」的模式是難逃新一代RWR的法眼的。例如主動陣列雷達的信號會在8.5~12.5GHz之間亂跳，這個範圍幾乎每一種RWR都抓得到，只是他的信號是沒有規則、不屬於任何一種已知雷達的，所以以前的RWR無法認知這種信號，甚至可能忽略之；然而既然已經知道有LPI這種模式，那麼RWR如果收到8.5~12.5GHz範圍內的信號，經比對又知道不屬於任何已知雷達，當然就可以用「疑似主動陣列雷達」來處置之，而不是將之忽略。

前面提到，L-150-35儲存1024種雷達模式，當中應當包括「現有雷達沒有，但是已經想到以後會有」的模式，所以對L-150-35而言，識別頻率變換型的LPI模式應當是沒問題的，關鍵是怎麼抓到不斷改變的載波信號。

很顯然，如果接收機同時允許所有頻率通過，那麼不管頻率怎麼變換，就都會無漏失的被抓到。這很容易達到，因為「用多個寬頻濾波器涵蓋全範圍、無時差連續警戒」正是RWR最基本的模式，而L-150-35在翼前緣的相位式精確指向器也可以用這種方式發現目標。當然這種寬頻濾波模式的距離「比較小」，但這個「比較小」是相對於窄波濾波模式而言的，後者偵察距離往往可達數百公里，所以「寬頻模式距離比較小」並不等於「小於被敵方雷達發現的距離」。

如果L-150-35能在載台被LPI雷達發現前就「先知先覺」發現LPI信號，那接戰狀況就跟傳統戰機遇上傳統雷達類似；而如

果L-150-35是「後知後覺」較晚發現LPI信號，那麼主動權就在LPI雷達手上，這時L-150-35只確保「不會不知不覺」，真相如何有待查證。但就常理論，被動偵查的距離很容易就比主動探測遠(因為光程較少且少了目標散射或吸收)，因此設計時已經有考慮LPI模式的情況下，L-150-35能「先知先覺」的可能性應當較高。

總結L-150-35反制LPI雷達之可能

由L-150-35的發展年份、俄國的相關技術背景、以及用到IMA電腦架構等事實，基本上可以確定：1.L-150-35抓到LPI模式的信號不成問題；2.抓到信號後也應當可以識別；3.敏感度也比以往的RWR高因此探測距離較遠。這至少表示主動陣列雷達的LPI模式對L-150-35而言不可能是隱形模式，也就是對上LPI雷達時不會「不知不覺」。而至於會「先知先覺」還是「後知後覺」，無法以帳面資料客觀證實，但以研發年分、技術背景以及常理推斷，應當是「先知先覺」的可能性較高。

Su-27家族的雷達預警接收器性能比較			
	L-006	L-150	L-150-35
裝備機種	Su-27	Su-30系列、Su-34	Su-35S
頻率範圍	4.45~10.35	1.2~18	1.2~40
頻率解析度	20kHz	20kHz	
識別能力	6種	128個型號	1024個型號
導引反輻射飛彈	不能	最多6枚，同時2枚	能
顯示最具威脅目標數量			6個
視野		水平360度 垂直+30度	水平360度 垂直+30度
重量	25kg	52.44	
電力需求			115V,400Hz, 60VA 27V直流, 350W
壽命			6000小時或25年
平均故障間隔			500小時

與F-22、F-35比較

從天線配置與架構比較來看，不難發現L-150-35比起歐美4~4+代戰機的無線電偵察系統都有明顯差異。事實上L-150-35反而更接近美國F-22的AN/ALR-94與F-35的AN/

ASQ-239：AN/ALR-94與AN/ASQ-239的每一種偵察波段都至少有4組分佈天線，此外，在前半球也都有針對特定用途優化的額外天線組，因此雖然L-150-35、AN/ALR-94、AN/ASQ-239的具體天線設計和配置還是不同，但大方向接近，可視為同類系統。

理性的放下神話

AN/ALR-94是英國BAE公司為F-22研發的，有超過30個天線融合在表皮上³³，偵測波段0.5~18GHz³⁴。據Lokheed Martin前任F-22計畫主持人Tom Burbage的描述，「AN/ALR-94是機上科技最複雜的系統，探測距離遠達250海浬(約460km)比雷達多很多，可以讓雷達盡量少發射。當目標接近至100海浬內(約185km)時，AN/ALR-94可以指引APG-77雷達以細達2度x2度的窄波束在小範圍保持跟蹤。³⁵ ³⁶」另有報導稱，「若敵機持續使用雷達，則AN/ALR-94可提供射控參數給AIM-120執行反輻射攻擊³⁷」。

AN/ASQ-239是在AN/ALR-94的基礎上修改而來。在技術措施上他比AN/ALR-94更進一步與全機航電融合，包括與AN/APG-81主動陣列雷達融合成完整的電戰系統，並且嚴格要求低成本低重量，據2006年數據，其重量為84kg，比預計的還少10%³⁸。據BAE介紹，就電戰層次而言，AN/ASQ-239與AN/ALR-94是同級的，但可靠性與成本分別

是AN/ALR-94的2倍與1/2，據2006年數據，AN/ASQ-239平均故障間隔是440小時，其技術也被回流改良AN/ALR-94³⁹。有資料指出，其最大探測距離達480km，並在200km左右能精確定位⁴⁰。

乍看之下，很容易掉進一個神話邏輯：長期以來大家都知道F-22的強項之一就是AN/APG-77主動陣列雷達，而AN/ALR-94探測距離卻比APG-77雷達更遠，而且官方認證他是「機上最複雜的系統」，他甚至還可以自己實現射控定位，簡直是深不可測！而F-35的AN/APG-81雷達與AN/ASQ-239電戰系統又更先進，絕對穩坐空戰之王了！

實際上客觀的分析起來，AN/ALR-94與AN/ASQ-239的「神話感」說穿了就來自報導中種種技術描述，例如「460km探距」、「30個以上的天線」、「射控級定位」、「引導APG-77以2度x2度波束搜索」等等。這些描述在以前的RWR系統或者不具備又或者沒有提到，乍看之下很容易讓人認為是AN/ALR-94獨有的「黑科技」造成的。其實這些技術確實很先進，但也就是該世代系統

33 “The AN/ALR-94 is a passive receiver system capable of detecting the radar signals in the environment.”, 23.FEB.2009, <http://aadiairlines.blogspot.com/2009/02/anlr-94-is-passive-receiver-system.html>

34 ““猛禽”的第二双利眼：F-22电战系统”，19.DEC.2018, <http://www.yidianzixun.com/article/0KsAN7Mw/amp>

35 “The AN/ALR-94 is a passive receiver system capable of detecting the radar signals in the environment.”, 23.FEB.2009, <http://aadiairlines.blogspot.com/2009/02/anlr-94-is-passive-receiver-system.html>

36 ““猛禽”的第二双利眼：F-22电战系统”，19.DEC.2018, <http://www.yidianzixun.com/article/0KsAN7Mw/amp>

37 ““猛禽”的第二双利眼：F-22电战系统”，19.DEC.2018, <http://www.yidianzixun.com/article/0KsAN7Mw/amp>

38 “F-35 electronic warfare suite: more than self-protection”, Avionic International, 01.APR.2006, <https://www.aviationtoday.com/2006/04/01/f-35-electronic-warfare-suite-more-than-self-protection/>

39 “F-35 electronic warfare suite: more than self-protection”, Avionic International, 01.APR.2006, <https://www.aviationtoday.com/2006/04/01/f-35-electronic-warfare-suite-more-than-self-protection/>

40 “F-35肥電：體態臃腫不是事兒，內在美才是真的美”，<https://kknews.cc/news/bklv48j.html>

的必然，並不是什麼「黑科技」加持。AN/ALR-94與AN/ASQ-239都是英國BAE公司研製的，如果英國都有這「黑科技」，沒理由不用在EF-2000上，但是在EF-2000的電子偵察系統上卻沒見過類似的神話般的描述。以下不妨一個個解讀這些華麗的詞藻，先破除「迷信」方能理性討論。

AN/ALR-94與AN/ASQ-239動輒「探測距離460km以上」這個數據相較於Su-27的L-006或Su-30的L-150的「敵方雷達探測距離的120%處」相比簡直是在「虐殺」，但實際上這數據有講跟沒講一樣。「460km以上」數據是指最大距離，它必須是窄波濾波迴路才能辦到，但用窄波濾波器容易漏接信號(因為要用掃描方式)，所以不能保證預警。而如果要保證預警，就要用寬頻濾波迴路，距離就必然較小。L-006或L-150的描述是「保證在被發現距離的120%處告警」，指的就是保證警告距離。所以AN/ALR-94的460km與L-006、L-150的「120%」是兩種不同的距離，不具可比性。

所以從帳面數字自然無法比較AN/ALR-94與L-150-35的偵測距離，只能用科技層次進行評估。事實上被動偵測的最大距離要達到幾百公里是不難的，從L-150-35的研發年份、技術背景評估，他在偵察距離方面應當不遜於AN/ALR-94。但必須注意的是，沒必要落入比距離的迴圈裡，因為對預警系統而言，最重要的是察覺並且識別威脅，而如果

能在被發現前就察覺威脅那就更好。偵察距離與預警即時性有時是相衝突的，所以各家應會有不同的設計考量。

「精確定位」、「引導雷達限縮範圍」的描述讓不少人以為這是「獨家性能」，但其實每一個RWR的設計都是發現威脅方向，然後讓雷達等探測系統在該可疑區域加強搜索，這樣可以提升搜索效率，也可以減少雷達波暴露的機會，而RWR越精準就越能限縮範圍，雷達作用的時間就更短更隱匿，所以AN/ALR-94可能是有比以前好很多的精確度，才會在此大書特書。但他精確到多少呢？「雷達聚焦在2度x2度範圍」其實有說跟沒說一樣，因為X波段射控雷達本來就會以寬1~5度級的波束進行掃描，或許AN/ALR-94比以前的系統更精確，但這不等於他精確到2度x2度的範圍(註)，讓AN/APG-77「不必搜索」就鎖定目標。根據已公開天線配置資料至少可以確定，AN/ALR-94只有在前半球的較高頻(band4)部分具有二維指向(方位+俯仰)能力，其餘方位與其餘波段則只能定出水平方位，因此不論如何，AN/APG-77當然要稍微搜索一下，而不是「開機測距就取得射控資料」，只是從前半球有精確定位器以及band4波段的二維定位能力來看，他在前半球可以大幅限縮雷達需要掃描的範圍。

(註：1990年代有資料提到AN/ALR-94的精度可達2度x2度⁴¹。這數據立刻產生的疑

41 “EA-18G with F-22 Kill Mark: What is the Effectiveness of Growler's Jamming System Against F-22 and F-35 Stealth Fighters?”, The Aviation Geek Club, 19.MAR.2019, <https://theaviationgeekclub.com/ea-18g-with-f-22-kill-mark-what-is-the-effectiveness-of-growlers-jamming-system-against-f-22-and-f-35-stealth-fighters/>

點是：2度x2度是很好的X波段射控雷達才有的波束，預警天線有限口徑的指向性應不可能與之比擬。據Lokheed Martin前任F-22計畫主持人Tom Burbage在2009年的描述，比較明確指出所謂2度x2度的窄波束是AN/APG-77的波束⁴²。)

「如果敵方持續啟用雷達，AN/ALR-94可以定出射控資料引導AIM-120飛彈」一事，讓F-22有機會完全不開雷達就打擊持續開啟雷達的敵機。在這之前與這功能最接近的是Su-27搭配R-27P/EP反輻射飛彈，他們同樣可以打擊持續開啟雷達的敵機。差別在於，Su-27是用R-27P/EP的導引頭鎖定目標，且R-27P/EP是純被動導引，所以如果在整個射控過程(從取得射控資料到飛彈命中的全程)中敵機關閉雷達或劇烈轉向，飛彈就會丟失目標；而F-22是用AN/ALR-94定出射控資料給AIM-120，所以即使飛彈發射後敵機關雷達或劇烈轉向，AIM-120仍有機會用主動導引頭自己咬住目標，但如果AIM-120發射之後敵機很快就關雷達或劇烈轉向，導引頭鎖定距離有限也是會丟失目標。可見想要完全不開戰機雷達就消滅敵機一事，限制都是很多的。特別是Su-35、Rafale、F-22、F-35等現代戰機都有額外的飛彈預警系統，飛彈不可能全程隱匿，所以全被動射控充其量只能「欺負」上一代戰機或給予其心理壓力，對有飛彈預警系統的戰機來說並無奇襲效果。

因此所謂「AN/ALR-94引導AIM-120」

一事，固然是讓F-22比別人多一種運用方式，但不至於是他的殺手鐮。但這個功能值得注意的是他的精確指向能力，精確到可以為AIM-120提前鎖定目標(相對於R-27P/EP要用自己的導引頭發射前鎖定)。但要注意的是，這個能力僅限於前半球。

「30個天線」是AN/ALR-94的一大特徵，不免讓人聯想是否是因為天線數量越多所以才具有神話般的性能。此外，「30個天線」不免令人聯想是否是有「30處」有安裝天線，才會具有那麼精確的指向能力。其實RWR的偵測機制並非是靠多天線干涉形成波束，所以探測距離並非由天線數量決定。與天線數量有關的是偵察涵蓋的方位範圍、以及方位解析度，例如只要4組天線就可以涵蓋360度環狀範圍並且獲得水平方向的指向性，而如果想要獲得球狀視野以及俯仰指向性，就會需要更多組天線。而在安裝位置的數量方面，天線位置越多，對匿蹤越不利，所以相同頻段的天線會盡量放在一起，不會真的「到處放」。事實上AN/ALR-94的預警天線只有10組，放在4個位置，可見所謂的「30個以上」是指天線「單元」數而非天線「模組」數。而以天線單元的數量而言，L-150-35是28個(半球狀天線1x4，成對天線2x4，相位式指向器8x2，共28個)，與30個相差不大。

因此AN/ALR-94與AN/ASQ-239固然是先進的第五代系統，但在許多中文資料裡往往將之過度神化。這樣反而無法知道他好在

42 “The AN/ALR-94 is a passive receiver system capable of detecting the radar signals in the environment.”, 23.FEB.2009, <http://aadiirlines.blogspot.com/2009/02/anlr-94-is-passive-receiver-system.html>

哪裡？有什麼限制？也無法客觀的與其他系統比較。

細節比較

AN/ALR-94(圖7)預警波段分成band3與band4，有10個陣列，位在4個位置(4個天線罩內)。主翼前緣內側(靠近翼身交界)有band3與band4的水平指向陣列以及band4的俯仰指向陣列(3種陣列裝在一起)，主翼後緣外側是band3與band4的水平指向陣列，他們形成水平360度視野之外，在前半球band4波段具有俯仰指向能力。從這樣的天線佈置可以推測：1.AN/ALR-94與L-150-35的基本方位定位都是用4組天線，因此基本定位精度兩者應當相當；2.AN/ALR-94與L-150-35在前半球都有額外的指向天線，差別在於AN/ALR-94多出的是band4俯仰指向天線，而L-150-35是額外的水平指向天線；3.承上

，AN/ALR-94在前半球具有band4俯仰定位能力，L-150-35則沒有俯仰定位能力。值得注意的是，二維指向(方位+俯仰)能力可以進一步限縮雷達需要掃描的範圍，而band4是其頻率的高頻部分，涵蓋戰機X波段雷達頻率，這確實讓F-22在面對敵方戰機時有更好的隱匿探測優勢。4.另一方面，AN/ALR-94的定位天線口徑都沒有L-150-35的精確定位天線那麼大，因此在最佳精度方面應該是L-150-35較佳。

AN/ASQ-239有6組陣列，安裝在6個位置：4組band3/band4天線位在主翼前後緣外側，用來形成360度視野；另有2組同樣是band3/band4波段，位在主翼前緣內側，用來定位。由天線佈局研判，各波段的基本定位精度應該與L-150-35、AN/ALR-94相當，而在前半球也與L-150-35一樣有額外的定位能力，應該也是精確定位之用。

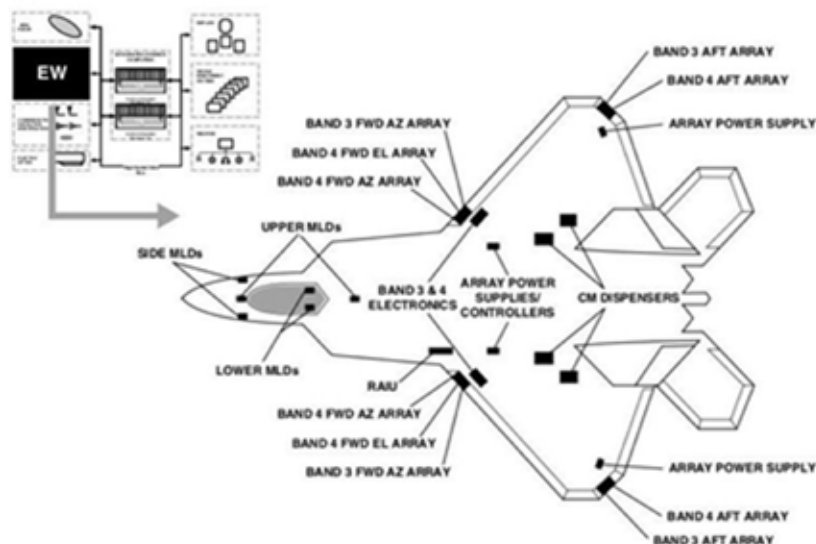


圖7：AN/ALR-94的天線分成BAND 3 AZ、BAND 4 AZ、BAND 4 EL共3種、10個陣列，位在4個位置。(網路圖)

要注意幾點：1.AN/ASQ-239的官方介紹中強調天線數量比AN/ALR-94少，可能是因為拓寬天線的頻譜範圍。例如據介紹AN/ALR-94的band3與band4陣列是分開的，而在AN/ASQ-239上則是稱「band3/band4陣列」，應該是一種陣列包辦兩個波段之故；2.AN/ASQ-239所有天線都只有水平方向定位能力⁴³，這點與AN/ALR-94不同但與L-150-35相同；3.在一些資料的圖示中，AN/ASQ-239還有band2波段，兩個位在主翼前緣，2個位在平尾後緣。但根據F-35計畫人員在2018年AIAA航空論壇的論文，AN/ASQ-239是只有6組band3/4陣列的⁴⁴。此外，其實F-22也有6組band2陣列，只是那是歸類在整合式導航/通信/識別系統(CNI)，因此F-35的4組band2陣列應該是屬於其AN/ASQ-242通信/導航/識別系統(CNI)的，而且應該是其識別天線。

至此我們基本上可以確定L-150-35的設計更接近AN/ALR-94與AN/ASQ-239，特別是後者，其異同統整如下：

1.每個波段都至少用4組天線建立360度視野。

2.AN/ALR-94在前半球多出band4(高頻)的俯仰指向能力，AN/ASQ-239與L-150-35則只有水平指向能力，但都有專門的精確定位天線。

3.L-150-35的頻率範圍最大，涵蓋L波段到毫米波段。

因此可以合理認定，L-150-35與AN/ALR-94、AN/ASQ-239屬於同世代系統。他們當然會因為發展年份與設計取向的不同而有差異，但既然是同級系統，有理由相信有共同追求的部分(例如距離、精確度、偵察模式等)不會差距太多。也可以藉由交叉比較方式互相推測性能與用途。例如可以推測當敵方持續使用雷達時，三者都可以在前半球精確指向，為反輻射飛彈指引目標以及限縮雷達所需掃描之範圍，差別在於L-150-35與AN/ASQ-239只有水平方位指向能力，因此Su-35與F-35的雷達在俯仰方向可能要掃比F-22多次。

L-150-35除了頻率範圍較廣外，在運算能力上，可以推測其與同時期的AN/ASQ-239較接近，而兩者都比AN/ALR-94更好，不過這倒不是很重要的結論，畢竟採用開放架構的情況下運算能力是不難升級的。以美俄武器在全球多國都有使用且長期檯面上或檯面下都有對抗的情況來說，可以合理判定雙方在電子情報的掌握程度是同級的，那麼當天線佈局與運算能力都同級時，就更可以斷定其性能同級。

需特別注意的是，以上所謂「L-150-35與AN/ASQ-239同級」僅是就電子偵察能力

43 “F-35 Mission Systems Design, Development, and Verification”, AIAA Aviation Forum, 25~29.JUN.2018, https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/ea/documents/webt/F-35_Mission_Systems_Design_Development_and_Verification.pdf

44 “F-35 Mission Systems Design, Development, and Verification”, AIAA Aviation Forum, 25~29.JUN.2018, https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/ea/documents/webt/F-35_Mission_Systems_Design_Development_and_Verification.pdf

與預警能力論，實際上AN/ASQ-239架構上是真正的第五代：考慮匿蹤的天線設計、直接由全機中央電腦(ICP)整合⁴⁵、與AN/APG-81雷達融合，借用AN/APG-81來實施主動干擾等。只是這些差距對預警能力影響不會太大，所以不致於影響生存能力的評估。

另外值得一提的是，從L-150-35與AN/ASQ-239的對應性也可以推測L-150-35在可靠性方面也跟AN/ASQ-239一樣相對於AN/ALR-94有後發優勢。其中一個佐證是平均故障間隔，AN/ASQ-239是440小時(2006年數據)，L-150-35是500小時。

工作頻率的差異

前面主要是由天線分佈進行比較，這裡開始探討頻率範圍。不難發現歐美RWR的頻率下限通常是2GHz，上限是18~20GHz，部分型號的下限拓展至0.5GHz，而在20GHz以上的部分只有AN/ALR-67(v)3列為標配，其餘多是以「預留升級空間」處置。而俄國RWR在L-150就是1.2~18GHz，Su-34與Su-35的偵察系統則拓展到1.2~40GHz，但沒有往1.2GHz以下拓展。

在下限的部分，可能是因為西方戰機面對俄國防空系統時，容易遇到較低頻率的雷達，所以低頻偵測能力或許有其必要性，而俄國戰機遇上西方防空系統時，頻率通常不會比L波段低，所以1.2GHz的下限已經夠了。而在硬體設計上，俄國系統的頻率範圍可以只用一種天線就涵蓋，而西方RWR通常

有專門的天線來偵測低頻信號。

在上限部分，F-22、F-35、Rafale等2000年代前後服役的歐美戰機只有F/A-18E/F可以接收到40GHz(JAS-39NG則尚未服役)，看似並沒有很熱衷追求40GHz。這應該是毫米波段有技術門檻，且不偵測毫米波其實也沒那麼危險之故：

一、以L-150-35的發展經驗而言，毫米波在天線與天線罩之間的多次反射就會自己造成干擾，這還是俄國2000年代以後遇到的問題，可見毫米波預警天線有其技術難度。

二、毫米波算是較晚採用的波段，以俄國防空系統來說，直到2000年代發展的「鎧甲-S1」近距防空系統才使用毫米波，而在導引頭方面，「流星」空對空飛彈、R-77-1等有毫米波導引頭的，也都是2000年代以後的物種。所以2000年代或更早服役的戰機，要遇上毫米波的機會並不高。

三、最重要的是，毫米波系統的威脅距離都不遠：近迫防空系統的開火距離通常只有10餘km，毫米波主動雷達導引頭的作用距離也不遠，例如俄國9B-1103M系列的毫米波版本鎖定距離不超過15km，而這些距離通常都小於飛彈預警系統。例如近迫防空系統開火當下就會被紅外線預警系統發現，而空對空飛彈的毫米波導引頭開機前通常也已被飛彈預警器發現。

可見只要在RWR之外還有獨立的飛彈預警系統，特別是紅外線式飛彈預警系統，則無法偵測毫米波也是可以接受。而EF-2000

45 “F-35 electronic warfare suite: more than self-protection”, Avionic International, 01.APR.2006, <https://www.aviationtoday.com/2006/04/01/f-35-electronic-warfare-suite-more-than-self-protection/>

L-150-35與AN/ALR-94、AN/ASQ-239比較						
型號	L-150-35		AN/ALR-94		AN/ASQ-239	
用戶	Su-35S(俄)		F-22(美)		F-35(美)	
研製者	TsKBA(俄)		BAE(英)		BAE(英)	
頻率(GHz)	1.2~40		0.5~18		2~20	
360度預警天線	螺旋天線	4組	Band3 陣列	4組	Band3/4陣列	4組
	成對天線	4組	Band4陣列	4組		
俯仰指向天線	無		Band4 (前半球)	2組	無	
精確指向天線	2種波段 (前半球)	2組	無		Band3/4 (前半球)	2組

、Rafale、F-22、F-35都有獨立的飛彈預警系統，可見他們無法偵測毫米波也無傷大雅。

使用特性與優劣勢研析

既然知道L-150-35與AN/ALR-94和AN/ASQ-239是同級系統，特別是與後者更加接近，並且在頻譜範圍方面猶有過之，吾人便可進一步推論Su-35搭配L-150-35在作戰方面的若干特性：

一、L-150-35理論上可以對包括主動陣列雷達在內的先進雷達有效警戒，反之4代戰機的RWR若無升級則不見得能對Su-35的Irbis-E有效警戒。這是因為Irbis-E極可能具有若干LPI模式，使得早期RWR即使可以抓到信號也不一定能有效識別與評估。單從這點來看，Su-35的威脅性與生存能力應當相當頂尖；

二、以技術的同級性來評估，L-150-35在探測距離、精確定位距離方面的能力，應當亦與AN/ALR-94和AN/ASQ-239同級，即約在最大460~500km發現，並在最大距離之

半能精確指向。精確指向能力皆限於前半球，其中AN/ALR-94能二維指向，AN/ASQ-239與L-150-35則僅能水平指向。而L-150-35較大的指向天線口徑以及「類可變基線設計」，可能使其有更好的精確度；

三、精確指向能力都能限縮雷達需要掃描的區域，減少雷達開機時間之外，也讓雷達可以較無顧慮用一些「浪費時間」的模式，如以低功率延時方法來降低被偵測率(LPI模式)，或是以高功率延時方法來增加探測距離(遠程模式)。對Su-35而言就可以是後者，即使有平常不易發現的匿蹤戰機，只要匿蹤戰機的雷達信號被L-150-35發現並且限縮範圍，就能策動Irbis-E以遠程模式對該區域搜索，這時匿蹤戰機現形的機會很高。例如當匿蹤戰機自行開啟雷達取得射控資料，必然要在飛彈最大射程內，這通常是100km，很難超過150km，在這種距離下匿蹤戰機要躲過「專門盯著自己附近看」的Irbis-E會有困難。這會逼迫匿蹤戰機限縮戰術，例如盡可能以機群出擊，以後方戰機開啟雷達引導

前方戰機發射飛彈；

四、AN/ALR-94由於在前半球可以二維指向，因此更能限縮雷達使用時機(即暴露時機更少)，並且在完全使用被動方式引導反輻射飛彈時相當便利，而AN/ASQ-239與L-150-35只有水平定位模式，要進行全被動指向就較為麻煩，例如要以不同滾轉角進行被動偵測才能取得二維指向資料；

五、法國SPECTRA也有二維指向能力(不確定是前半球還是全部)，所以被動作戰時優勢類似AN/ALR-94，特別是Rafale戰機還有很遠的光電識別能力(40km級光電影像識別)，因此進入Rafale的光電影像識別距離內後，其在被動射控方面有相當大的優勢。

六、與F-22類似的是，Su-35的R-77-1(RVV-SD的俄軍版)可以使用9B-1103M-

200PS被動-主動複合導引頭，能讓戰機完全以無線電靜默方式導引飛彈，並且在彈道末端能使用主動雷達歸向，所以如果目標關閉雷達的時機太晚，就可能被導引頭重新咬住。此外9B-1103M-200PS的主動雷達是毫米波段，這讓絕大多數RWR都無法警戒。如果敵機的RWR無法偵測毫米波，又沒有專門的飛彈預警系統，則以電磁靜默方式引導的R-77-1對該敵機等於是全程隱形的，敵機在此基本上無招架之力。

作者簡介

楊政衛先生，國立成功大學物理系學士，俄羅斯聖彼得堡大學物理系碩士。自2003年起於期刊上發表俄系戰機研究與展覽報導等文章。



陸軍AH-64E攻擊直升機 (照片提供：葉秀斌)