



Su-35的光電系統及其與歐美產品之比較

軍事專欄作家 楊政衛

提 要

光電系統是21世紀戰機的重要子系統，過去的報導往往著眼於其探測匿蹤戰機的能力。然而實際上光電系統除了用在探測、射控外，在導航、預警、偵查等方面都大有用處，正因如此新一代光電系統開始朝多功能發展。又因不同功能的設計考量有時彼此衝突，使得同時期不同的光電系統的帳面性能有時有很大的不同，在研究分析上容易造成混淆。

本文將全面解構Su-35的光電系統，並藉由與俄國系統的垂直比較以及與歐美系統的橫向比較，來客觀的認識其優勢與不足，同時也對現代光電系統的發展有更系統性的了解。

關鍵字：光電系統、紅外線、Su-35

發展沿革

Su-35的光電系統是由「精密儀器系統科學生產公司」(NPK SPP)研製的成套方案。其包括一部OLS-35前視光電探測儀、I-222光電偵查系統(SOER)、以及KOEP-35對地瞄準莢艙¹。

1970年代「地球物理研究院」NPO Geofizika為Su-27和MiG-29研製光電探測儀，最終交由烏拉爾光學機械工廠(UOMZ)生產，在這之後所有的改良工作都由UOMZ

進行。2007年莫斯科航展時Su-35的光電探測儀與Sapson-E瞄準莢艙都是UOMZ的產品。然而量產型則採用NPK SPP的方案。

UOMZ是4代俄系戰機光電系統的「傳統」廠商，其演化出的產品在成熟度方面一定有獨到之處，其並於世紀交替前後與歐洲Thales公司有密切合作，引進生產該公司的光電系統，可能從中吸收部分先進光電技術。在戰機光電探測儀方面，其約在2000年代中期開發出MiG-29改良型用的13SM-1(圖1)與Su-35用的OLS(圖2)，他們

1 Sukhoi官網(約於2018年更新之版本), www.sukhoi.org/products/samolety/256

都採用量子式紅外感應元件，探測距離更遠，並且增大雷射測距距離，也增加用於晝間影像識別與瞄準的電視攝影機，而且極為輕巧：為Su-35開發的OLS整體性能

超越Su-27M的52Sh(OLS-30MK)，但尺寸766x540x763(mm³)，重僅71kg，(相較之下，以前 Su-27的重約173kg，Su-27M的重達220kg)。

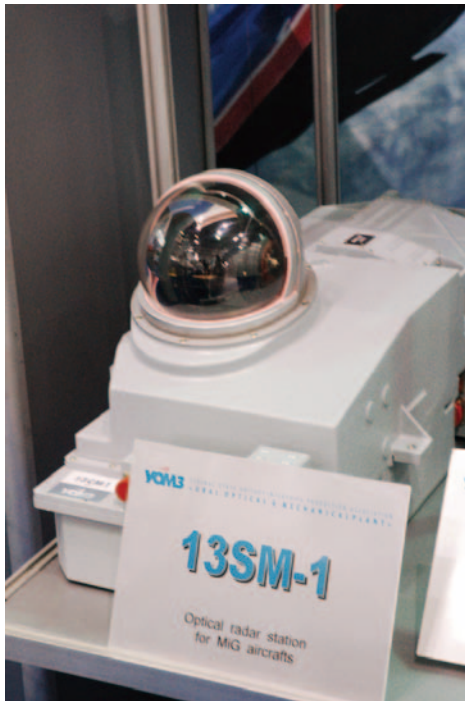


圖1(左)與圖2(右)：UOMZ為MiG-35研發的13SM-1(左)與Su-35原定的OLS(右)光電探測儀。(作者攝)

而NPK SPP的前身是「精密系統研究院」(NII PP)，其專精火箭、太空領域的光電系統，如量子光學系統等²。為什麼一個專門做太空光電系統的廠商要涉足航空領域，與壟斷大廠競爭，而且居然還得以「扶正」變成Su-35等4++代戰機光電系統的主要承包商？2000年，米格公司找上了「俄國NASA」—俄羅斯航太公司

(Rosaviakosmos)，要求推薦旗下適當的太空光電系統公司，來為下一代戰機研製光電系統。主要理由是MiG-29舊有的光電系統操作距離無法支援新一代長射程飛彈，而負責研改的UOMZ公司又無法顯著提升光電系統的性能。於是透過集團轉介，米格設計局找上了精密系統研究院(NII PP)³。在這之前NII PP從未涉足航空領域，但米格設計局總經理

2 ""Коситическая" оптика приходит к авиацию. Интервью с заместителем генерального конструктора АО "НПК СПП" Виктором Сумериным", Взлёт, JUL-AUG.2017

3 ""Коситическая" оптика приходит к авиацию. Интервью с заместителем генерального конструктора АО "НПК СПП" Виктором Сумериным", Взлёт, JUL-AUG.2017

對此的態度是「就是因為沒有經驗，所以可以做出全新的產品，而且太空系統的嚴格程度本就不下於航空系統」。

在NII PP針對米格的技術需求所提供的若干設計方案中，米格設計局專家最感興趣的就是前視光電探測儀(OLS)，於是在2002年邀請NII PP加入MiG-29的改良計劃。然而在技術答辯中，NII PP的方案因「前無古人」而被多數與會專家否決。2003年，NII PP自發性的參與蘇霍伊公司的第五代戰機光電系統競標案，結果蘇霍伊公司仍選擇了易於理解且較成熟的UOMZ的方案。但是，米

格設計局的專家對NII PP的方案還是念念不忘，所以在2004年逕自與NII PP簽約，為出口型MiG-29改型發展OLS-UE前視光電探測儀(圖3)。OLS-UE於2006年搭機首飛，年底完成測試，獲得很好的成果。2007年開始量產，用於MiG-29K/KUB⁴。

LS-UE的試驗成果激起蘇霍伊設計局的興趣，於是很快的與NII PP簽約(約2006~2007年)，製作實驗型光電探測儀OLS-LL，其在2007~2009年期間在Su-30MK上試驗。由於成效良好，因此雙方又在2010年正式簽約，為Su-35研製OLS-35⁵。在

2015~2017年，OLS-35已隨Su-35在敘利亞累積實戰經驗，在2017年1月前已通過所有檢驗⁶。

蘇霍伊公司最終選擇NPK SPP來承包OLS-35的具體原因並無官方解答。其實UOMZ的OLS與NPK SPP的OLS-35在紅外線探測距離、雷射測距距離方面看起來差異不大。特別還要考慮到航空產品相

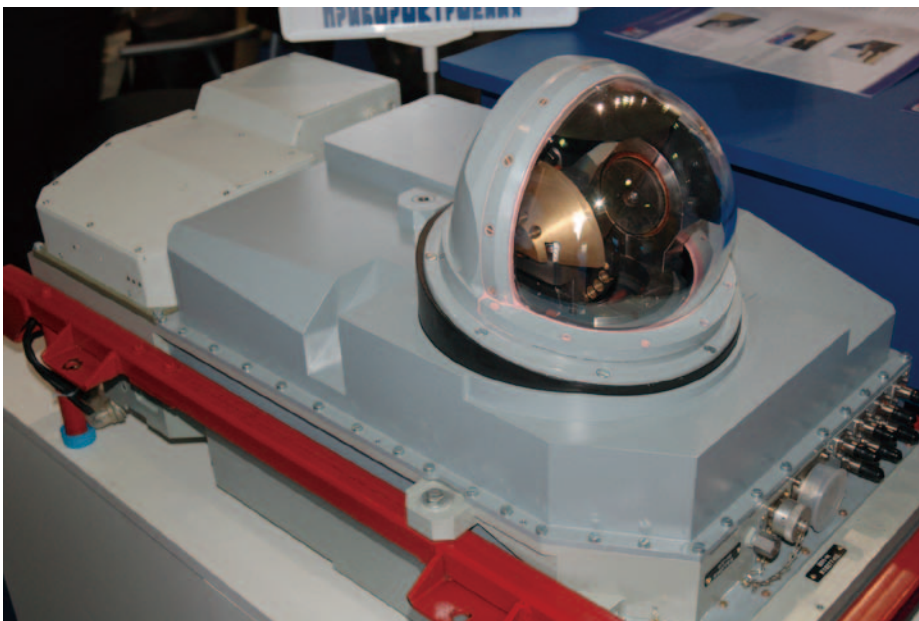


圖3：NIIPP為MiG-35研製的OLS-UE光電探測儀(作者攝)

4 ""Коситческая" оптика приходит к авиацию. Интервью с заместителем генерального конструктора АО "НПК СПП" Виктором Сумериным", Взлёт, JUL-AUG.2017

5 ""Коситческая" оптика приходит к авиацию. Интервью с заместителем генерального конструктора АО "НПК СПП" Виктором Сумериным", Взлёт, JUL-AUG.2017

6 " Су-35 получили новую оптико-локационную систему", Военное Обозрение, 18.JAN.2017, <https://topwar.ru/107407-su-35-poluchili-novuyu-optiko-lokacionnuyu-sistemu.html>

當重視尺寸與重量，這方面UOMZ的OLS重71kg⁷，OLS-35重83kg，可見UOMZ的OLS在尺寸與重量指標上有更大的優勢。因此飛機設計師會不尋常地將案子從「壟斷大廠」改成給「新手」，以及「捨輕求重」，一定有強烈的動機。吾人其實可從雙方的設計方案看出一些端倪。

UOMZ的OLS的紅外線探測器採用超大瞬間視場設計，一口氣凝視150x24度的範圍⁸，這種設計很適合穩定追蹤高度動態目標，且資料更新率大，在其視野內理論上足以充當飛彈預警系統。但解析度較差，用來測定空中目標的座標沒問題，但無法形成足以辨識的影像，也因此無法用於對地作戰甚至不易在地面為背景下探測空中目標。例如如果用320個像素看150度，則一個像素對應0.47度，比多數雷達都精確，訂定方位絕對沒問題，但在此條件下，一個尺寸5m的目標(如汽車)只要在625m以上看起來就是一個點，而現代對地攻擊戰機為了避開防空火炮與肩射防空飛彈，必須在3km甚至5km以上飛行，所以OLS的紅外線頻道的超大瞬間視場設計等於無法識別地面目標，算是針對空戰優化的設計。OLS要對地作戰只能用電視攝影機，故僅限於晝間瞄準。因此UOMZ版OLS的使用特性與Su-27M的52Sh(OLS-30MK)是一樣的：紅外線頻道只用來定空中目標方位，影像識別用電視攝影機，換言之在影像識別與對地瞄準能力方面是有天候限

制的。

而OLS-35採用折衷的視野設計(6x4.8度⁹)，對空使用時雖無法像OLS那樣一口氣凝視超大範圍，但仍足以穩定追蹤動態目標，又因能形成熱影像而能用於對地對海觀測與熱影像識別。在導航用途方面，熱影像在惡劣天候起降時能用做輔助觀測，而熱影像儀的方位解析度較高，在測定導航參考點的座標時較為精準，也就是提升複合導航系統的精準度。因此OLS-35相當於比UOMZ的OLS重12kg就多出全天候對地對海瞄準能力與精密導航校正能力。

而在對來襲飛彈等近距離目標的探測方面，由於目標方位變化快，所以講求即時性，也就是資料更新率。這方面OLS-35雖然沒有UMOZ版OLS那麼好，但NII PP的方案在OLS-35之外還有分佈式光電偵查系統(SOER)。因此從全套設計方向來看，NPK SPP的方案能兼顧對空、對面全天候作戰以及即時預警能力。

NII PP的光電偵察系統的雛型可見於2006年問世的MiG-35原型機，其包括位於翼尖的OLO雷射預警器，以及位於機背的OAR-U與機腹的OAR-L飛彈來襲警告器(圖4)。OAR-U與OAR-L均採用凝視設計，能連續監測指定空域(不須機械掃描)，只是採用魚眼鏡頭，一口氣凝視一個半球，因此實際上只能進行目標定位，不用於影像識別。這種架構與法國Rafale戰機的SPECTRA防禦系

7 УОМЗ представляет новое поколение оптоэлектроники для Су-35», Взлёт, №8-9,2007, ст.68

8 УОМЗ官網OLS-35型錄(<http://www.uomz.ru/index.php?page=products&pid=100175>)

9 MAKS2011看板數據

統的光電部分相同，顯然屬於純粹的飛彈預警系統。2008年起，NII PP在上述裝置的基礎上進行更動，保留OLO雷射預警器，並將OAR的視野縮小但數量增至6個，成為俄國版「分佈孔徑光電系統」(EODAS)，已超脫單純的飛彈來襲警告器的範疇。因此雖然6個熱影像攝影機仍沿用「飛彈來襲探測器」(OAR)的稱呼，但整套系統(6個OAR與2個OLO)改稱為「光電偵查系統」(SOER)。



圖4：NII PP為MiG-35發展的光電系統視野示意。NII PP

對地光電瞄準莢艙長期以來一直是俄國戰術戰機的軟肋，這主要是蘇聯「專機專用」的設計哲學所致。蘇聯時代戰機分工明確，對地攻擊有專用的飛機，因此傾向將光電瞄準系統內建，因為這樣可以減少外部突出物，又不占用外掛點。雖然內建式光學瞄準具的視野受機身結構限制而較窄，但在搭配無導引武器使用時這正好夠用(因為無導引武器本來就是對著正前方打)。然而進入多用途戰機與導引武器的時代後，內建式窄視野瞄準具難以發揮導引武器的離軸發射優勢。此外對多用途戰機而言，能視需要選掛的對地瞄準莢艙往往比內建的更合適，因此

俄國也不能免俗的開發瞄準莢艙，然而起步已經較慢，再加上電子技術落後，難以小型化，故而長期成為軟肋。

UOMZ於2000年代初針對此一需要開發Sapson系列瞄準莢艙，試圖搭配Su-30MK系列一同外銷，然而一直沒有客戶，原因很可能是技術層次不足：2000年代初當Sapson開始可以外銷時，西方光電瞄準莢艙已經普遍使用熱影像儀，而Sapson只有電視攝影機與雷射測距機，無法全天候使用。其完整版本Sapson-E問世時差不多趕上Su-35的發展，但最終也換成NII PP的KOEP-35。



圖5：UOMZ發展的Sapsan-E瞄準莢艙。2000年代，在歐美莢艙已普遍具有熱影像儀的時候，其仍只有電視攝影機與雷射測距機。瞄準莢艙確實是俄國的軟肋。(作者攝)

原因不難理解。當MiG-29改良型在UOMZ這裡只能獲得又大又重的Sapson-E時，NII PP於2006~2007年為MiG-35規劃的方案中，就包括位於進氣道邊的具全天候瞄準能力的OLS-K瞄準莢艙，其以適形莢艙方式裝設於MiG-35進氣道邊，整體大小與OLS-UE雷同，差不多只有Sapson-E的光電頭的大小。為Su-35研製的KOEP-35是外掛

莢艙形式，體型也明顯比Sapson-E小。

很顯然，如果使用UOMZ原來的方案，Su-35在需要對地瞄準時，就必須佩掛又大又重的Sapson-E。而使用NII PP(NPK SPP)的方案時，Su-35不必外掛莢艙也能對地瞄準，只有在需要更精確或更遠的識別能力時，才需要掛莢艙。NII PP的光電方案相較於UOMZ原來版本的優勢在此顯露無遺。

OLS-35光電探測儀

OLS-35設於風擋右前方(圖6)，有紅外線、電視、雷射三個通道，用於對空與對地探測、追蹤、鎖定、瞄準、影像識別(熱影像、電視影像與複合影像)、雷射測距與照明、雷射光斑追蹤等。尺寸為740x807x608mm³，重83kg¹⁰。電力消耗27V直流電500VA，115V三相交流電3500VA¹¹。

要特別強調的是他對空對地都有完整功能，也就是能用熱影像儀與電視攝影機觀察地面，探測、鎖定、追蹤地面與海面目標等。這對俄國戰機而言是革命性的：在這之前，俄國自製的對地光電瞄準莢艙都沒有服役，而Su-27與MiG-29系列內建的光電探測儀都沒有全天候對地影像瞄準模式。不管是Su-30MK的OLS-30MK還是UOMZ本來為Su-35設計的OLS，對地影像識別都只能用電視攝影機，所以沒有熱影像儀的全天候能力。



圖6：2011年版OLS-35。注意其本體與OLS-UE類似，唯在側面多出一個黑色的「盒子」。這個盒子可能就是其性能顯著勝過OLS-UE的關鍵所在。NII PP

10 MAKS2009與MAKS2011看板資料

11 Каталог продукции РПКБ 2013, p.110

一、熱影像儀

以西方光電系統的分類來說，OLS-35的紅外線部分兼顧了「前視紅外線」(FLIR)與「紅外線搜索與跟蹤系統」(IRST)雙重功能。這是非常重大的科技進步，也顯現其技術層次不遜於西方系統。在此之前，機載紅外線系統分成「只能提供熱影像」的FLIR，以及「不能提供影像，但可以當成雷達一樣搜索與追蹤並定出座標」的IRST。邁入21世紀，出現將兩者結合的系統，既可提供熱影像(FLIR模式，用於對空與對面識別、導航等)，又能抓出目標加以追蹤(IRST模式，用於空對空)。例如美國F-35的EOTS(AN/AAQ-40)、法國Rafale的OSF、歐洲EF-2000的PIRATE的紅外線部分皆然。從功能來看，OLS-35顯然也是FLIR與IRST兼容的架構，只是俄國紅外線系統沒有分那麼細，所以沒有特別強調。這顯見OLS-35在架構上是緊咬著西方先進潮流的，反觀UOMZ本來為Su-35提供的OLS則仍只是無法提供影像的純IRST架構。

熱影像儀是凝視焦平面陣列形式，解析度不明，但其前身OLS-UE與OLS-K是用320x256像素陣列¹²，可見OLS-35不會低於這個解析度。從2007年到2011年Su-35S量產型問世有好幾年的時間差，不排除會因技術進步而用更高解析度的感測陣列。NPK

SPP研製量子光學系統的部門後來獨立成「量子光學系統公司」，仍隸屬NPK SPP旗下¹³，根據該公司官網，在短波(0.9~1.7微米)、中波(3~5微米)、與長波(8~14微米)感測器方面，都有320x240與640x480兩個版本¹⁴。由資料的時間性可以推測，OLS-35如果採用較高像素，應不超過640x480像素(或640x512，兩者是同級規格)。但要注意，因為低解析度對動態目標的偵測能力不會比較差，所以如果主要訴求是對空，就不一定非要高解析度不可，因此就算有更高解析度的陣列，也不必然要用。

熱影像儀的波段是3~5微米中波紅外線(MWIR)。3~5微米波段在理想天候下對空探測距離雖然沒有8~14微米長波紅外線(LWIR)那麼遠，但搭配主流中程空對空飛彈已堪用(足以在進入飛彈最大射程後，搭配雷達緊咬目標，詳見稍後「操作距離進一步討論」段落)。另一方面，3~5微米的熱影像對比度較高(因為高低溫部件的輻射量差異較大，背景環境在3~5微米範圍的輻射量也少)，且水氣穿透性更好，更適合對地、對海觀測(因地面與海面通常水氣較重)，故能兼顧對空對面用途，例如根據Rafale戰機的OSF光電系統供應商Thomson-CSF Optronique的評價，OSF的3~5微米波段在潮濕環境下探測能力明顯較8~12微米波段好

12 MAKES2007，NII PP參展資料

13 "13 ноября – открытие технопарка «Прецизионные радиолазерные системы» на базе АО «НПК «СПП»", [www.npg-spp.ru](http://npg-spp.ru), 13.NOV.2018, <http://npg-spp.ru/news/701-otkritie-texnoparka-na-baze-ao-npg-spp.html>

14 http://www.qos.ru/ru/product_05.php

¹⁵。再者，選用中波紅外線時，就可以用藍寶石當光學窗口。藍寶石對中波紅外線到紫外光這整個區段的透明度都非常高，正好涵蓋中波熱影像儀、電視攝影機(可見光)、雷射系統(短波紅外線)的工作波段，這樣一方面三種子系統的光學性能都可以最佳化，二方面藍寶石抗磨損，窗口就算直接暴露在帶有砂石的起降氣流下也有夠長的壽命(根據UOMZ的OLS的數據，藍寶石窗口的壽命是舊型窗口的6倍¹⁶)。反之，如果選用8~14微米長波紅外線，則與之適配的光學窗口會犧牲電視與雷射系統的性能且沒有藍寶石耐磨，所以起降時要將窗口轉向，避免迎風，這樣就無法用於起降輔助觀測。另一方面，為搭配上轉向式窗口，整流罩通常要做成球形，這又不利於匿蹤設計，所以F-35的EOTS在權衡之下也是用3~5微米紅外線與固定式藍寶石窗口。

紅外線探測距離方面，不同官方資訊來源互有出入，NPK SPP原廠數據是對不開後燃器的Su-30迎面35km追擊90km¹⁷；KnAAZ

官網是50km與90km(無後燃器、15度範圍內、未指明型號)¹⁸；而2018年版蘇霍伊公司官網則是40km與80km(僅指無後燃器目標，未具體指出型號)¹⁹。能同時追蹤4個目標^{20,21}。上述探測距離並不算遠，但至少足以迎面使用中程空對空飛彈，而對敵機側面、後面的探測距離直逼AIM-120、R-77等主流中程空對空飛彈的最大射程，這意味著進入飛彈射程後，目標就算用不利於雷達觀測的側轉機動，也大都會被OLS-35死咬著。所以上述距離雖然不算特別遠，但實用價值非常大，或許是多方面需求平衡出來的結果，詳見下文「操作距離進一步討論」段落。

二、電視攝影機與雷射系統

電視攝影機操作波段是0.5~0.9微米(KOEP-35英艦數據，MAKS2011²²)或0.6~0.8微米(較早的OLS-UE數據，MAKS2007²³)或，解析度未公布，但不低於OLS-UE的640x480像素²⁴。

雷射測距與照明系統的操作波段是1.06微米與1.57微米(OLS-UE²⁵與KOEP-35的數據

15 "Tests begin on Rafale optronics", FlightGlobal, 05.MAY.1999, <https://www.flightglobal.com/news/articles/tests-begin-on-rafale-optronics-50879/1>

16 <http://npk-spp.ru/news/701-otkritie-texnoparka-na-baze-ao-npk-spp.html>

17 MAKS2011看板數據

18 <http://www.knaapo.ru/products/su-35/>

19 Sukhoi官網(約於2018年更新之版本), www.sukhoi.org/products/samolety/256

20 Sukhoi官網(約於2018年更新之版本), www.sukhoi.org/products/samolety/256

21 <http://www.knaapo.ru/products/su-35/>

22 MAKS2011看板數據

23 MAKS2007, NII PP參展資料

24 MAKS2007, NII PP參展資料

25 MAKS2007, NII PP參展資料

²⁶⁾，測距距離依原廠數據是對空20km對地30km²⁷，依2018年版蘇霍伊官網數據是對空20km對地35km²⁸。雷射系統除了自己發出光束來測距與照明外，也能追蹤外部雷射照射目標時的光斑，這可以在搭配外部雷射時，完全被動進行雷射定位。關於上述雷射測距距離的實用價值，詳見下文「操作距離進一步討論」段落。

三、光學焦段等特殊設計

OLS-35以單一焦段(不可光學變焦)凝視6x4.8度²⁹的瞬時視場，再搭配機械掃描而獲得俯仰-15~+60度，水平+/-90度³⁰之最大視野。6x4.8度這種不大不小的瞬時視場能滿足Su-35的「兼顧對空對地，但對空優化」的任務需求：因為夠小，所以足以在近距戰鬥與對地瞄準時成像，又因為夠大所以足以穩定追蹤動態空中目標，而由於採用定焦設計所以構造更簡單可靠。以與OLS-35的設計理念最接近的美國F-35的EOTS為例，其主要用途是對地瞄準，視野範圍比OLS-35大得多，又要有變焦系統來提供更小的瞬時視場，其光學系統的設計必然比較複雜，重量約91kg，比OLS-35多8kg。

由6度x4.8度的瞬時視場與像素數換算，OLS-35的方位解析度約是熱影像0.02度(如果保守取320x256像素計)、電視影像約

0.01度(640x480像素)，約是X波段雷達的10倍級。這個方位誤差的意義為何？在使用無導引武器攻擊時，通常在5km高空以避開地面火炮與肩射防空飛彈，而無導引炸彈的射程不超過10km，而熱影像儀0.02度的方位誤差意味著在10km處的誤差約3.5m，電視攝影的誤差則是1.7m左右，這表示其無導引轟炸的極限誤差有機會在3.5m(全天候)或1.7m(限白晝、良好視線)以內(當然還要有導航系統與射控系統的協助)，接近「用無導引武器達到導引武器精度」的標準。重要的是在此之前Su-34、Su-25SM3都達此一標準，因此有理由相信既然OLS-35解析度已有這能耐，Su-35的導航與瞄準系統要達此境界應該沒問題。因此OLS-35的方位解析度雖然沒有專業對地瞄準莢艙那麼高，但亦可滿足Su-35一般情況下的對地瞄準需求。

另一個重要技術是「基於虛擬陀螺穩定平台的高精度指向系統」，其意指光學元件不是安裝在傳統的陀螺穩定平台，而是以控制精度微米級的薄膜壓電陶瓷制動器來驅動與穩定³¹。這意味著OLS-35的穩定機構在精確度、反應速度、重量、可靠性方面都會有出色表現。

與之對比，根據F-35的研發團隊在2018年AIAA航空論壇的論文，F-35的AN/AAQ-

26 MAKS2011看板數據

27 MAKS2011看板數據

28 Sukhoi官網(約於2018年更新之版本), www.sukhoi.org/products/samolety/256

29 MAKS2011看板數據

30 MAKS2011看板數據

31 "Су-35 получили новую оптико-локационную систему", Военное Обозрение, 18.JAN.2017, <https://topwar.ru/107407-su-35-poluchili-novuyu-optiko-lokacionnuyu-sistemu.html>

40(EOTS)仍是陀螺穩定的³²。對此的解讀不必拘泥在技術強弱，因為要注意到如前所述，OLS-35的對空優化需求讓他可以用定焦光學系統以及較小的掃描範圍，因此也許是構造簡單與發展較晚的因素，所以允許用上較新潮的「虛擬陀螺平台」。

值得討論的是，OLS-35與其前身OLS-UE在硬體配置上大致相同，但操作距離差距甚大。OLS-UE對不開後燃器的MiG-29探測距離是迎面15km³³追擊45³⁴~50³⁵km。雷射操作距離方面，OLS-UE是對空15km對地20km³⁶。為何同公司幾乎同時代的兩個型號會差那麼多？還有，OLS-UE尺寸是729x386x410mm³⁷，OLS-35是740x807x608mm³⁸，體積是前者的3倍多，但OLS-35重83kg³⁹只比OLS-UE的78kg³⁹多出5kg。究竟是差在哪呢？從外觀可以觀察到，OLS-35的主體與OLS-UE在大小與形狀方面其實差不多，只是在側面多出一個黑色的「盒子」，正因如此，他們的重量差異主要就是來自這個「盒子」，而「尺寸」所標示的是最外圍，所以這種多一個突出物的，尺寸就會比別人大很多。這個多出來的「黑盒子」可能就是OLS-35與OLS-UE性能差異

的主因所在，例如可能有更強的電源與冷卻系統來獲得更遠的距離。

四、操作距離進一步討論

了解了OLS-35的硬體性能與任務特性，現在回過頭討論他的操作距離。OLS-35在主要作戰性能上可理解為OLS-30MK的雷射系統升級、且具備熱成像能力、又大砍120kg而來。看起來除了重量大減之外，在距離方面的性能提升幅度似乎不是很大；此外，歐美的對空紅外線探測儀有140~190km的探測記錄。難道是俄國電子技術落後，所以改了老半天只實現了減重，然後作戰性能卻被西方遠甩好幾條街嗎？

由於紅外線光電系統的性能與操作波段以及光學系統的設計有關，所以就算是相同的科技層次，不同系統的差異會很大，盲目的橫向比較會讓人失去頭緒。因此與歐美系統的橫向比較我們將在稍後細說，這裡只進行縱向討論，也就是先只以俄國系統的考量點來看。

Su-27的OLS-27的優勢

在Su-27的時代，雷達對戰鬥機迎面探測距離約100km，並且到約60km才可以追蹤，所以飛彈能在50km發射已經很厲害

32 "F-35 Mission Systems Design, Development, and Verification", AIAA Aviation Forum, 25~29.JUN.2018, <https://pdfs.semanticscholar.org/b264/3c94a231786d8df626ac0a36ce99141e88a7.pdf>

33 MAKS2007，NII PP參展資料

34 MAKS2011看板數據

35 MAKS2007，NII PP參展資料

36 MAKS2011看板數據

37 MAKS2011看板數據

38 MAKS2009與MAKS2011看板資料

39 MAKS2007，NII PP參展資料

了；而追擊時探測距離會降到一半左右，例如Su-27的N-001雷達追擊戰鬥機時，探測距離是上視40km、下視30km，追蹤與可開火距離當然更短。當時的中程空對空飛彈的射程就剛好與之對應，例如俄製R-27R/T對戰機射程最多50~60km，追擊射程20km⁴⁰，同級的美製AIM-7也大致如此。

OLS-27迎面探距15km，追擊50km，雷射測距對空3km、對地5km。其追擊探測距離超過N-001雷達，再加上光電探測儀沒有都卜勒濾波的問題所以可以穩定探測側轉中的目標(目標側轉時會被都卜勒雷達當成砸波濾除)，所以OLS-27對目標側面到後面的探測能力都超越N-001與同時期雷達。上述特性有兩大戰術優勢：(1)可以打擊當時雷達難以處理的側轉中的目標。特別要注意50km的探距已經接近當時雷達對戰鬥機的接戰距離(60km以內可導引飛彈)，這表示進入飛彈射程後，敵機本來可以用側轉等方式來脫離雷達鎖定，卻剛好會被OLS-27咬住，所以此時Su-27可以用雷達與光電協同方式死咬目標；(2)就算追擊時可以看到50km，用R-27、AIM-7等級的飛彈也打不到，這時可搭配增程型追熱飛彈R-27ET，追擊射程達43km⁴¹，達到F-15等對手戰機的2倍左右。這兩個戰術優勢讓Su-27發射超視距武器的機會比對手多很多，進入50km內就會具有很大的優勢。

另一方面，OLS-27的迎面探測能力與雷射測距能力只能支援近距戰鬥，而且有侷限(例如雷射測距距離僅能支持機砲纏鬥)。

OLS-30MK的進展

到了Su-27M、Su-30MK的OLS-30MK，迎面探距40km、追擊90km，這一迎面距離已是超視距空戰範疇，且幾乎相當於主流中程空對空飛彈的有效射程(約50~60km)。而追擊探測距離已接近中程空對空飛彈的最大射程，也已逼近4+代戰機雷達能接戰(鎖定戰鬥機)的距離極限，所以同樣的具有「進入接戰距離後讓敵人無法以側轉方式脫鎖」的效果。而在雷射測距方面，對空8km不只能支援機砲纏鬥，而且基本上可適用於視距內飛彈纏鬥，但在8km以上若要訂定三維座標，就需要借用雷達的測距能力。

OLS-35雖不完美但取得平衡

OLS-35的探測距離與OLS-30MK相當，表示「進入接戰距離後死咬敵人」的能力基本不變。這裡必須討論的是，Su-35與同時期對手對戰鬥機的探測距離等已達Su-27時期的2倍以上，因此可以鎖定戰機的距離已超過90km，但主流的空對空飛彈仍以AIM-120、R-77系列為大宗，最大射程也只略超過100km，因此90km仍接近可接戰距離的極限。所以在搭配Su-35的R-77或R-77-1(RVV-SD)時，OLS-35基本上仍可確保「進入飛彈的最大接戰距離後，與雷達搭配死咬目

40 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.284。

41 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.284。

標」。

雷射對空測距距離增加到20km。這表示OLS-35進入20km範圍就可以完全獨立訂定三維座標，這個距離已稍微超視距，而且略大於主流中程空對空飛彈的不可逃脫射程(<20km)。這意味著即使在20km這種危險距離發生戰鬥，Su-35也可以用OLS-35應付，然後雷達卻仍繼續看著遠方的戰場。

而在對地模式方面，OLS-30MK對地雷射測距距離是10km，足以支援Su-30MK等4+代戰機的無動力武器如雷射導引炸彈。然而Su-35可使用的無動力武器有的加裝了滑翔裝置，使射程增加到30~50km(圖7)，在這裡OLS-30MK的雷射測距能力就有侷限，而OLS-35對地測距距離達35km就更能貼近需求。

到這裡至少可以知道，OLS-35的各種操作距離是可以滿足需要的。那為什麼不進一步增強，例如增加紅外線探測距離，以便在更遠處發現匿蹤飛機？我們不妨設想各種「改良方法」，看看帶來的後果，就會知道原因了。

用光學系統提升距離要付出代價

紅外線攝影與可見光學攝影原理一樣，只是波段不同罷了。所以就如同光學攝影，許多性能無法兼顧：例如用一樣的感光度

(敏感度)與光圈(進光量)要提高動態捕捉能力，影像就會偏暗；影像要亮，動態物體就會模糊、雜訊變多。

要提升OLS-35的探測距離，最簡單的做法是延長每一個畫面的信號累積時間，這



圖7：Su-35的新一代無動力彈藥往往加裝滑翔翼以延長射程，圖為PBK-500U集束炸彈，在RBK-500的基礎上加裝滑翔翼而來，最大射程達50km。(作者攝)

就像照相機在相同感光度(ISO值)、相同光圈下，增加曝光時間就可以提升影像亮度一樣，本來看不見的就變成看得見，但相對的，本來已經看得見的會變得更亮、不需要的背景信號也跟著更亮。此外，對相同空間的資料更新率會降低，近距離的影像也可能會模糊。因此要用延時方法增加距離就要犧牲掃描速度或視野，也犧牲成像品質。

增加光學系統的口徑也是很直覺的作法，這相當於在照相時增大光圈，藉由提升進光量，來得到更亮的影像，或是在影像亮度一樣的前提下，減少曝光時間，增加動態捕捉能力。美國F-35的A-EOTS改進方案之一就是增大口徑⁴²。但大光圈成像通常不銳利、雜訊也通常較明顯，所以他也是屬於「犧牲影像品質來換取距離」的措施。此外，紅外線光學元件的價格與口徑呈非線性成長，有資料指出是三次方成長，因此光圈大小也是需要取捨的。

還有一個做法是增大瞬時視場，也就是用一樣的感測陣列去凝視更大的範圍。這樣就可以在延長信號累積時間的同時，兼顧資料更新率。但這樣一方面解析度較差，二方面雜訊較大，會降低目標與背景的對比度，同樣是劣化影像品質。這個模式就很像照相機提升感光度 (ISO值)，可以讓影像變亮，但微小的雜訊也跟著被放大，導致畫面容易整個白濛濛的並且出現雜點。UOMZ

版的OLS就是用這種大凝視視野的設計，可以做得很輕巧，又有接近OLS-35的探測距離。但這種設計的缺陷是犧牲影像解析度，這在近距離影像識別以及遠距離軌跡追蹤方面較不利。例如UOMZ的OLS的紅外線通道就無法提供可供辨識的熱影像，故無法用在全天候對地瞄準。OLS-35的瞬時視場從原始設計的10度x7.5度改成6度x4.8度，就表示影像解析能力是OLS-35頗重要的需求之一，不是一味追求距離。

改用感光元件也有代價

所以要藉由光學系統的設計來延長距離，都必須「有所捨」。如要兼顧也是可以，就是讓感光元件更敏感。改用8~14微米長波紅外元件就是一個方法。在飛機表皮的溫度下，發出的長波紅外線總量比中波大很多，在天候良好時可以輕易延長探測距離。事實上，PIRATE、OSF、AN/AAS-42這幾款探測距離特別大的，都有用到8~12微米波長。但長波紅外線元件與光學窗口都不易製作，而且對地用途不易優化。反觀3~5微米中波紅外線在技術成熟度、對空對地雙用途方面都能兼顧。

五、實戰經驗看OLS-35的設計巧思

2018年9月網路上出現一張由飛行員釋出的Su-35S用OLS-35鎖定F-22的畫面(在2015年開始的敘利亞作戰中，Su-35S與F-22有多次遭遇之記錄⁴³)(圖8)。這個畫面透露

42 "Lockheed Martin Prepared to Enhance F-35 Targeting Capability", Defense Innovative Review, 17.SEP.2019, https://defenseupdate.com/20190917_aeots.html

43 "Американский F-22 мешал российским Су-25 в Сирии и имитировал воздушный бой", Звезда, 09.DEC.2017, <https://tvzvezda.ru/news/forces/content/201712091539-t2i9.htm>

OLS-35的一些設計巧思：(1)對目標反白處理以利追蹤辨識；以及(2)飛機滾轉時，光電

畫面在螢幕中同步旋轉，充當水平姿態儀，確保飛行員的空間感。



圖8：2018年網路上出現的Su-35用熱影像儀咬住F-22的畫面。從中可見目標物附近反白處理以利識別、以及熱影像畫面隨飛機滾轉等設計，都有利於單座機飛行員的操作。從此圖亦可反推，當時F-22距離Su-35約2km，而此時F-22的輪廓已很模糊，可見已是OLS-35的影像識別距離極限。網路抓圖，來源：Foghter_Bomber

首先，畫面的背景很顯然是地面，這是由空中往地面拍的圖。而在F-22附近的圖像有反白處理，讓地面背景物變得很白很模糊，而F-22變成明顯的深色。讓目標附近區塊反白，可能是在追蹤或鎖定模式下的特殊處理，讓目標形狀更清晰以利識別。這個功能很有用也很有趣，因為之前似乎是沒看過

類似的處理方式，通常我們可以看到的熱影像，都是天空為背景下的飛機熱影像，這種條件下天空是低溫，本來就比較暗，飛機則很亮很明顯，所以不必特殊的處理也可以清楚辨識飛機(圖9)。然而當背景是地面時，如果沒有特殊處理，地面與飛機的熱影像亮度恐怕會很接近，難以辨識。



圖9：以天空為背景時，背景的热影像通常都比飛機還暗，故不需反白處理也能清楚識別。NII PP

另一個看點是，為什麼熱影像畫面是傾斜的？回答這問題之前，先探討一下這畫面是怎麼拍的。OLS-35的視野是水平 ± 90 度，俯視15度，仰視60度。所以要拍這種大角度向下的影像，無法用平飛方式拍攝，用大角度俯衝也不切實際。所以合理的方法是飛機滾轉以後，再把鏡頭往旁邊偏轉。例如「向右滾+鏡頭右擺」可以看到右下方的景物，「向左滾+鏡頭左擺」可以看左下方的景物。這時，如果畫面沒有跟著飛機滾轉，只是忠實呈現鏡頭拍攝的畫面，這當然做得到，但馬上出現問題：不管飛機是什麼姿態，畫面都不會回饋有關姿態的訊息。特別

是在追蹤模式下，鏡頭本來就會盡量追著目標，讓目標在畫面中間，結果就是不管我機怎麼飛，看到的追蹤畫面幾乎是一樣的，也就是說，飛行員會失去方向感，對單座戰機來說這是很嚴重的飛安危機！反之，如果讓畫面會在螢幕中與飛機同步滾轉，就可以藉由畫面旋轉的程度來反應飛行姿態。彷彿水平儀一樣。這樣飛行員就算低頭看著螢幕來追蹤目標，也可以保有方向感。

這種「把追蹤畫面變成水平儀」的巧妙設計，不知道是設計之初就考慮到還是實戰運用中發現的，但它勢必是頗為新穎的設計。畢竟在F-35、Su-35S之前的多用途戰機

是雙座為主，影像識別與武器操作都是後座武器官的事情，不影響飛行員操作，就不須用到這個設計。

六、小結

詳細剖析OLS-35後，為了方便後續的研究與參考，在此將主要的戰術價值整理如下：

1. 兼容前視紅外線(FLIR)與紅外線搜索與追蹤系統(IRST)的功能；

2. 全天候對空、對地工作模式；

3. 進入中程飛彈接戰範圍內與雷達搭配緊咬目標，目標極難用戰術機動方式脫離鎖定；

4. 進入中程飛彈不可逃脫射程後完全獨立訂定三維座標，雷達可集中資源對付遠方戰場；

5. 對地模式的被動觀測距離與主動測距距離足以支援新一代無動力滑翔彈藥；

6. 影像解析度勉強足以支援「讓炸彈有導引武器精度」之短距精密轟炸需求。

從Su-27到Su-35的光電探測儀性能比較表

	OLS-27	OLS-30MK	OLS	OLS-UE	OLS-35
廠商	Geofizika(研) UOMZ(製)	UOMZ	UOMZ	NPK SPP	NPK SPP
問世年代	1970's	1980's~1990's	~2007	~2007	2010~2011
搭配機型	Su-27	Su-27M、Su-30MK	Su-35	MiG-29K/KUB、 MiG-35	Su-35
尺寸(mm^3)		841x916x575	766x540x763	729x386x410	740x807x608
重量(kg)	173	220	71	78	83
紅外線感測器規格	點狀掃描	點狀掃描	掃描焦平面陣列	凝視焦平面陣列	凝視焦平面陣列
			量子式感測器	量子式感測器	量子式感測器
			波長3~5微米 (研判)	波長3~5微米	波長3~5微米
				320x256像素	320x256或640x480
紅外線探測距離(目標不開後燃器，km)	迎面15 追擊50 (F-15)	迎面40 追擊90 (F-15)	迎面40 追擊90	迎面15 追擊45~50 (MiG-29)	迎面35~50 追擊80~90 (Su-30)
電視攝影機	無	有	距離10~12km	0.6~0.8微米， 640x480像素	應該是0.5~0.9微米
雷射測距與照明 距離 精度	波長			1.06與1.57微米	1.06與1.57微米
	距離	0.3~3km(空)	空8km	空20km	空20km
	精度	3~10m	5m		
瞬時視野 (度x度)			150x24	10x7.5	6x4.8
最大視野 (度)	垂直	-15~+60	-15~+60	-15~+60	-15~+60
	水平	+60	+60	+90	+90
追蹤目標數量			4個		4個
全空域掃描週期			4秒		
工作溫度範圍(攝氏度)		-50~+60	-40~+60		

I-222光電偵查系統(SOER)

SOER是俄文「光電偵查系統」的縮寫，包含6個OAR紅外線攝影機與2個OLO雷射預警器，構成球狀的紅外線與雷射視野(圖10、11)。根據Sukhoi官網，這套SOER的制式型號是I-222⁴⁴。

SOER是由飛彈預警系統演化而來的。從其紅外線攝影機的名稱「OAR」就是俄文「來襲飛彈偵測器」的縮寫就可以知道最原始的用途，只是用了凝視焦平面陣列紅外

線感測器後，紅外線預警器等於是直接對周圍形成熱影像，既可看到飛彈，也可以看到空中目標甚至周遭景物，然後從中找出飛彈以做預警。這一過程已不只是單純的飛彈預警，而是「光電偵查」了。在MAKS2007展出的MiG-35原型機上，OAR-U、OAR-L、OLO的組合還是被視為飛彈預警系統，而在2008年起NPK SPP開始將2個魚眼鏡頭的熱影像儀改成6個分佈式熱影像儀後，就開始使用「光電偵查系統」(SOER)的稱呼。



圖10：SOER的6個OAR(紅色圈選處)與2個OLO(白色圈選處)構成球狀熱影像與雷射視野。sukhoi



圖11：Su-35S機首特寫，可清楚看到SOER的各個感測器。KnAAZ

44 Sukhoi 官網(約於2018年更新之版本)，www.sukhoi.org/products/samolety/256

一、OAR紅外線攝影機

配置與用途

紅外線攝影機(OAR)採用凝視焦平面陣列感測器(圖12、13)，工作波段為3~5微米中波紅外線(MWIR)⁴⁵，用至少6個來構成球狀視野：在Su-35S上採用最少數量的配置(6個)，一個位在座艙左前方，對著前上方；一個在座艙後方，對著後上方；兩個位在機首下方同一個整流罩內，分別對著前下方與後下方；兩個分別位在機首側面距離雷達罩不遠處，分別對著左側與右側。

根據原廠型錄，OAR用途條列如下⁴⁶：



圖12：MiG-35原型機的OAR-U，採用魚眼鏡頭，直接凝視半個球面，此設計與Rafale的SPECTRA類似。(作者攝)



圖13：Su-35S用6個OAR熱影像儀構成球狀視野，用途相當於每F-35的EODAS，但體型約只有後者的一半。新的MiG-35也採用此設計。(作者攝)

用途細說

OAR採用3~5微米紅外線，足以探測發動機尾流以外的低溫物體，因此他並不像短波紅外線或紫外線感測器那樣只能藉由尾焰來發現飛彈，而實際上是形成飛機周圍環境

- 連續觀測球狀周圍，形成影像；
- 自動偵測空中目標與飛彈發射時的紅外線信號；
- 訂定空中目標與防空飛彈發射位置的座標；
- 識別並追蹤空中目標與飛彈；
- 判定威脅等級；
- 將空中目標與威脅資訊顯示在多用途顯示器上，並透過語音系統警示；
- 對空中目標定位誤差<1度。

以下詳述之。

的熱影像，這包括飛機、飛彈等空中目標以及地面景物，然後從影像中根據目標特徵分析出空中目標與景物，訂定空中目標的方位並追蹤之，並從中抓出飛彈以及判定威脅等級，除在顯示幕上顯示偵測結果外，也過語

45 MAKS2011看板

46 MAKS2011看板

音系統發出警告⁴⁷。因此他實際上有多重用途：飛彈預警、近距空戰目標搜索、用周遭景物的熱影像來輔助導航、起降觀測、對地偵察(含攻擊結果識別)等。

除了藉由表皮熱輻射來發現飛機與飛彈外，也當然可以發現飛彈尾焰，而藉由偵測尾焰，就可以知道飛彈發射的起點⁴⁸，而這也是判定空中目標是飛機還是飛彈的依據之一(例如一個目標的信號從很強突然減弱，就可能是不會太遠處發射的飛彈的發動機熄火所致；如果一個方向上短暫出現一個目標，消失一段時間後又出現，就可能是在遠方發射的飛彈，所以一開始只能看到尾焰，尾焰熄滅後目標才會短暫失蹤)。此外，由於飛彈發射時尾焰的紅外信號比彈體更強，因此即使在OAR探測不到飛彈彈體的情況下，也有機會藉由偵測尾焰來判定飛彈發射當下的位置。航展看板特別指出，OAR可以藉由尾焰來確認防空飛彈的發射位置⁴⁹。至於為什麼特別強調是防空飛彈？因為防空飛彈的動力通常大於空對空飛彈，而且發射點與飛機位在不同海拔，以致發射時尾焰側面會暴露。反觀空對空飛彈如果是對著我機來的，尾焰大部分會被彈體屏蔽，因此發現防空飛彈的發射起點是比較能確定的，才敢寫進廣告。但當然不能排除以此發現空對空飛彈的發射起點(例如不是對我機發射的空對空飛彈、或是動力更強的長程空對空飛彈)。

另一方面，將最初的OAR-L、OAR-U雙魚眼鏡頭配置改成用6個視野較小的OAR來形成球狀視野，除了如前所述具有近戰、導航、偵查等多用途外，對於最基本的「飛彈預警」能力也有助益，能降低虛警率。當以地面為背景時，地面物體的熱輻射就是很大的雜訊，會造成虛警。採用熱影像儀後，就可以在信號強弱之外，多用影像處理方式協助區分背景與目標，以降低虛警率。

偵測能力與作用距離

在偵測能力方面，OAR對空中目標的定位誤差小於1度。而在距離方面，Su-35的新款OAR距離不明，但MiG-35原型機的OAR-U與OAR-L是50km發現飛彈、5km追蹤之。但要注意的是，上述OAR-U、OAR-L的數據並未載名是什麼飛彈？什麼條件？而且現在的OAR與當年的OAR-U、OAR-L的設計稍有不同，性能也不會完全一樣。因此需要仔細考量一番。

探測距離當然會跟目標種類有關，不妨參考曾安裝在Su-27M與Su-34原型機上的MAK-F(L-136)飛彈來襲警告器，其為安置於機背上的球狀物，內有一可360度旋轉的反射鏡，將目標的紅外輻射反射到下方的感測器上，藉此警戒20km內之短程空對空飛彈(AIM-9)、33km內之中程空對空飛彈(AIM-7)、55km內的區域防空飛彈(愛國者)或5.5km內之短程防空飛彈(刺針)⁵⁰。從以上

47MAKS2011看板

48MAKS2011看板

49MAKS2011看板

50Авиационное вооружение и авионика, издательский дом «Оружие и технологии», Москва, 2006, ст. 389-390

數據可看出，MAK-F對空對空飛彈的探測距離大約是區域防空飛彈的1/2，就數量級而言這不難理解：中程空對空飛彈的速度與區域防空飛彈類似，即表面熱源強度類似，而區域防空飛彈的正面截面積約為中程空對空飛彈的4倍，因此被偵測距離就大約是2倍（因為強度隨距離平方遞減）。因此MAK-F對各種飛彈的探測距離雖然不等於OAR，但比例關係值得參考。如果50km探距指的是區域防空飛彈，那對空對空飛彈就大約是25km。

而在對飛機的探測距離方面，或許基於保密因素而沒有公開，但從學理上看不會低於對空對空飛彈的探測距離。這是因為以OAR的方位解析度而言，除非飛機位在快要碰撞的超近距離，否則飛機、飛彈的所有熱源都是匯聚到一個像素上。這表示探測距離會跟紅外線輻射總量有關。飛機的速度雖然比飛彈低，但截面積是空對空飛彈的100倍級，熱輻射強度雖少但總量大，所以被偵測距離應當比空對空飛彈還遠。因此可以推測OAR至少可在近距空戰範圍發現戰機，而這也有利於密集編隊飛行。

至於「追蹤」，其用處是在一段時間連續觀察目標，藉此描繪出觀察時間內目標的路徑並預估其接下來的意圖。對雷達而言，要達到追蹤功能，探測機率需達80%，這通常是在最大探測距離的50~60%。前面提到OAR-U探測距離50km，追蹤距離5km只有

探測距離的10%，可見對OAR而言「追蹤距離」的標準與雷達並不相同。從學理上可以判斷，熱影像儀的「追蹤」能力與其解析度有直接關係。如果方位解析度很差，以至於在給定的觀測時間內目標始終停留在一個像素的視線內，這個目標在熱影像儀眼中就是一個不動的、距離不明的點，這連目標的移動方向都不明，更甯論追蹤。因此在觀測時間內，目標要能跨越若干像素，「追蹤」才有意義。所以在可以發現目標的前提下，OAR的追蹤距離會與方位誤差成反比。分佈式OAR的視野約是+45度，是OAR-U的+90度的1/2，所以在使用一樣的感測陣列時，方位誤差是OAR-U的1/2，那麼追蹤距離就是2倍，約10km。

二、OLO雷射預警器

OLO雷射警告器位在機首兩側，分別探測左、右半球（圖14）。以0.1~70Hz的頻率（指每秒照相0.1~70次）偵測脈衝時間小於60ns、波長0.9或1.7微米的雷射脈衝。能判定威脅等級，定位誤差依MAKS2011看板是小於1度⁵¹，但NPK SPP官網曾有5度之數據⁵²。

雷射預警器對現代多用途戰機而言相當重要，因為對地作戰會遇到的短程防空飛彈、肩射防空飛彈常常採用光電射控，會用到雷射測距或導引。而在空戰方面，許多現代戰機如Su-35、F-35、Rafale、EF-2000都能用光電系統進行完全電磁緘默作戰，這就會用到雷射測距。

51 MAKS2011看板

52 NII PP 官網。<http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/avionika/126-optiko-elektronnaya-razvedka-.html>



圖14：OLO雷射警告器特寫。在MiG-35上裝與主翼翼梢，在Su-35S上裝與機首兩側。(作者攝)

KOEP-35瞄準莢艙

KOEP-35是莢艙的制式型號，其中

「KOEP」是「光電瞄準莢艙」的俄文縮寫，「35」表示是Su-35。NPK SPP的廠商內部代號則是T-220(圖15)。

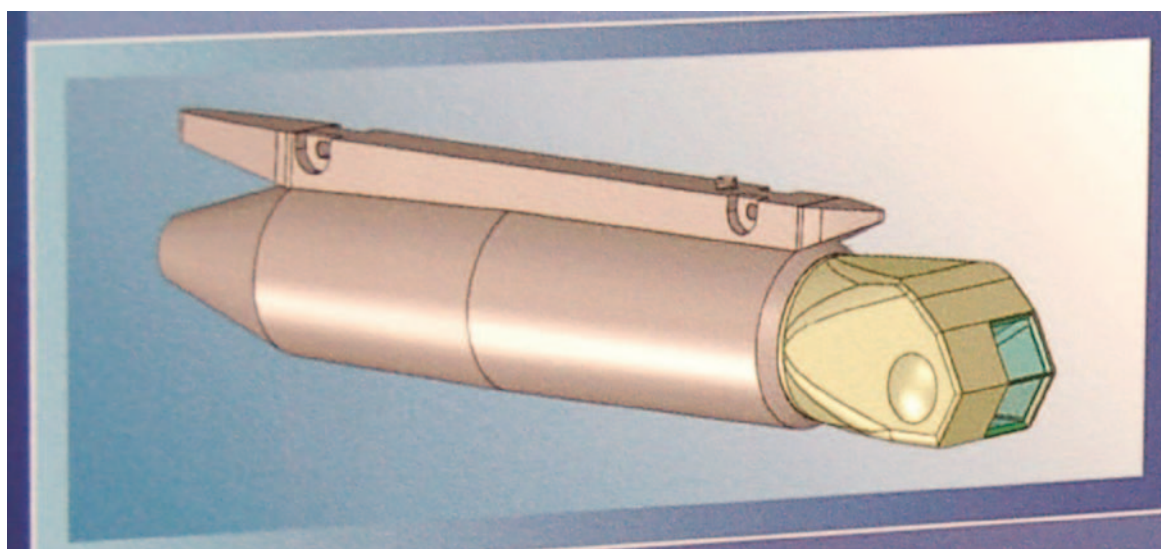


圖15：KOEP-35瞄準莢艙。NII PP

一、技術參數

KOEP-35與OLS-35的設計與元件大致是一樣的，主要的差別是有更大的掃描視野，並且有多焦段或變焦系統來提供更大的影像。他同樣有熱影像、電視攝影機、雷射三個頻道。最大視野是俯仰方向+10~170度，水平方向360度。尺寸為2,360mm x485mm，口徑340mm。電力消耗27V直流100VA，115V三相交流3,500VA⁵³。

其中熱影像的波段為3~5微米中波紅外線，瞬時視場有6x4.8度與2x1.6度兩個光學焦段，以及1x0.75度與0.5x0.4度兩個數位焦段；電視攝影機波段為0.5~0.9微米可見光，瞬時視場可在6x4.8度到2x1.6度範圍變焦；兩者均可用數位變焦放大到1x0.75度與0.5x0.4度窄視場。雷射測距與照明波段是1.06微米與1.57微米。至於偵測外部雷射照明的通道，波長是1.06微米，瞬時視野6x4度。

解析度方面，尚未公開KOEP-35的感測器像素。之前的OLS-K是熱影像320x256像素，電視攝影機640x480像素。KOEP-35的研製年份較晚、作用距離理論上較長(因為搭配Su-35)，再加上對地瞄準用途對影像解析度的要求會更高，因此KOEP-35如有更高解析度感測器可用，應該就會盡量提高解析度(這與OLS-35的考量點不同)。

在工作模式上，較重要的條列如下⁵⁴：

- 在手動鎖定目標後，能自動追蹤最多4個地面、海面目標；

- 自動追蹤條件被破壞時，改成「程式化追蹤」，也是同時對4個目標；
- 測定目標的方位座標以及視線角速度；
- 用雷射測定4個被追蹤目標的距離，或任一地面參考點的距離；
- 對1個目標進行「校正追蹤」(含「自動-校正追蹤」與「程式-校正追蹤」)；
- 偵測外部雷射所照射的目標，量測其方位、視線角速度、距離、以及接近速度。

在探測距離方面，KOEP-35數據不明，僅提供NPK SPP之前為MiG-35原型機發展的OLS-K的數據供參考。OLS-K採用320x256像素的3~5微米波長感測元件，視場10x7.5度與1x0.75度，對坦克探距20km，對船舶40km，雷射對地測距距離20km。KOEP-35的技術層次不會低於OLS-K，且更大更重，性能不會低於OLS-K。

二、用途與特性分析

如果KOEP-35還是使用320x256像素紅外線感測器，那麼2x1.6度的光學焦段意味著0.006度的方位解析度；1x0.75度與0.5x0.4度的數位焦段則分別表示0.003度與0.0016度的方位解析度。須注意，由於KOEP-35的研發年代與OLS-K差了許多年，不無可能用到640x480像素等級的感測器，若然，則上述方位誤差可以再減半，這裡先以較保守的數據為準。

53 Каталог продукции РПКБ 2013, p.110

54 MAKS2011看板

與之對比，Su-25SM3攻擊機的SOLT-25光電瞄準系統在6~8km外誤差0.5m⁵⁵，換算誤差不到0.005度。這個誤差搭配良好的導航與瞄準系統，足以讓飛機在5km高空投擲無導引炸彈時，擁有導引武器的精度甚至直接命中目標。採用這個系統的Su-25SM3的轟炸誤差會比Su-25SM的10~15m⁵⁶還小，能否達到Su-34的5~7m⁵⁷還未知，但應該不容易，因為Su-34有轟炸機專用的長焦距光學系統。保守估計Su-35使用KOEP-35投擲無導引炸彈時，誤差在10~15m與5~7m之間。

前面提到，OLS-35雖然與F-35的EOTS一樣可以對空對地兼顧，但OLS-35是對空優化，使得在對地作戰時相對於EOTS有一些侷限，例如視野侷限在前上半球，且缺乏能辨識更遠更小物體的窄視界模式等。而對地優化的KOEP-35能補此不足。

說到這，有人會以「EOTS可以內建於機身，用途同級的KOEP-35卻要用成外掛莢艙」來

抨擊俄國系統不脫「傻大黑粗」的缺陷。但這其實是飛機的任務取向不同所致的。其實只要讓OLS-35擁有變焦系統與超大掃瞄範圍，他就幾乎是EOTS了，而這之前的OLS-K就已經做到(圖16)。所以NPK SPP並非無法做出「內建的EOTS」，而是因為Su-35的優先任務是空優，優化方向當然不同。而既然NPK SPP可以做出OLS-K那樣緊湊的對地瞄準系統，如今卻做成較大的莢艙形式，或許表示KOEP-35會有某些性能強化，例如更好的冷卻系統來延長探測距離與提升影像品質。



圖16：NII PP為MiG-35研製的OLS-K，以適形莢艙形式掛於進氣道下，整體體型與OLS-UE相當，也具有窄視野模式，除了解析度較差外，非常接近F-35的EOTS。(作者攝)

55 "Боевая эффективность модернизированного штурмовика Су-25СМ3 увеличена почти в два раза - источник", Интерфакс-ИВН, 12.MAR.2018, https://vpk.name/news/208830_boevaya_effektivnost_modernizirovannogo_shturmovika_su25sm3_uvelichena_pochti_v_dva_raza_istochnik.html

56 "У российских штурмовиков Су-25 начинается новая жизнь", army-news.ru, 27.APR.2016, <http://army-news.ru/2016/04/u-rossijskix-shturmikov-su-25-nachinaetsya-novaya-zhizn/>

57 «Бондарев: Су-34 гораздо лучше предшественников», РИА Новости, 26.DEC.2013

作戰以外用途

前面對OLS-35、SOER、KOEP-35的介紹著眼於其各自的原始用途，也就是探測、瞄準、預警等。但在現代資訊整合技術下，他們其實有跨領域用途，其中最重要的額外用途就是導航。事實上，OLS-35與KOEP-35就是與導航設備、中央電腦等視為一個總成（稱為PrNK-35或KPrNO-35）來供貨的。

例如光電系統的熱影像可以用在惡劣天候時起降觀測用；熱影像也可以與雷達測高計搭配描繪出飛機下方的地形，然後與電子地形圖進行圖像比對而校正出精確座標。另一方面，OLS-35與KOEP-35可以對電子地圖上已知座標的參考物進行精確定位，藉此校正出我機的精確座標。可以說光電瞄準系統是電子地圖與電子地形圖導航模式中的重要環節，這在遠程攻擊、威脅迴避、精密轟炸方面非常重要。

了解了Su-35的光電系統本身的特點，現在進一步與歐美產品橫向比較。

與F-35的光電系統比較

F-35的光電系統包含裝在機首下方的AN/AAQ-40光電瞄準系統(EOTS)與分成6個的AN/AAQ-37分佈孔徑系統(EODAS)。前者與OLS-35一樣是內建的、使用3~5微米紅外線、可對空對地瞄準的光電瞄準系統；後者則與SOER中的OAR一樣是分佈式熱影像儀。雖然SOER中的OLO雷射預警器是F-35所無，但EOTS與EODAS的搭配，與OLS-35和SOER的搭配幾乎可一比一的對應比較。

一、EOTS簡介

AN/AAQ-40光電瞄準系統(EOTS)含兼具FLIR與IRST功能的熱影像儀、雷射測距機、雷射目標指示、雷射光斑追蹤。採用雙焦段設計，窄視野用來優化瞄準能力、寬視野用來優化搜索能力⁵⁸，並有數位變焦模式⁵⁹。尺寸493x698x815mm，重91kg⁶⁰。

熱影像儀的工作波段為中波紅外線(MWIR)⁶¹，據原廠介紹，是第一種融合FLIR與IRST功能的紅外線系統⁶²。關於其凝視陣

58 "F-35 Mission Systems Design, Development, and Verification", AIAA Aviation Forum, 25~29.JUN.2018, <https://pdfs.semanticscholar.org/b264/3c94a231786d8df626ac0a36ce99141e88a7.pdf>

59 http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi3n720v_jlAhUpCqYKHQfhA9YQFjAMegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.f-16.net%2Fforum%2Fdownload%2Ffile.php%3Fid%3D20956&usg=AOvVaw36kxErwulXybA7uMlCP_QL

60 http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi3n720v_jlAhUpCqYKHQfhA9YQFjAMegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.f-16.net%2Fforum%2Fdownload%2Ffile.php%3Fid%3D20956&usg=AOvVaw36kxErwulXybA7uMlCP_QL

61 "F-35 Electro-Optical Targeting System ", Naval research enterprise, <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=38&ved=2ahUKEwjc89qQ-vPIAhUQGAYKHQsDB4A4HhAWMAd6BAgHEAI&url=https%3A%2F%2Fwww.onr.navy.mil%2F-%2Fmedia%2FFiles%2FWork-With-Us%2FF-35-Electro-Optical-Targeting-System-Product-Sheet.ashx%3Fid%3Den&usg=AOvVaw15EqJg8zOOYckyFERHeh6A>

62 "F-35 Lightning II Electro-Optical Targeting System (EOTS)", Lockheed Martin, https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/f-35-lightning-ii-eots.html?__hssc=186606006.0fb1dabf4b135b93568329ddfd44fc60.1519430400183.1519430400184.1519430400185.1&__hssc=186606006.1.1519430400186&__hsfp=528229161

列的解析度，在較早的資料是640x480像素，但在洛馬公司F-35系統研發團隊在AIAA2018航太論壇(AIAA Aviation Forum 2018)發表的論文中指出是1024x1024像素⁶³。可能是年份不同，用的感測器技術不同所致。

須注意的是，EOTS基本型的官方介紹中，並未提及電視攝影機。而在「先進EOTS」改良計畫(Advanced EOTS, A-EOTS)中，有提到添加電視攝影機，因此基本款EOTS應該沒有電視攝影機。此外，不論是早期資料所說的640x480像素還是新資料的1024x1024像素，其解析度都非常驚人：如果其窄視野是1度級，那麼感測器是640x480像素與1024x1024像素分別對應0.0016度與0.001度。

其最著名的「功績」之一，是在

80~90km外拍攝一間飯店，影像中窗框與窗戶的交界清晰可辨。一般窗框的尺寸約10cm級，換算得此時方位誤差必須小於0.00006度。

洛馬為F-35 Block4發展A-EOTS (Advanced EOTS)，在總體尺寸與EOTS不相上下的前提下大幅提升性能與可靠性，並且能以「隨插即用」方式替換舊的EOTS。A-EOTS增大光學口徑，並進一步裝備短波紅外線(SWIR，約1.4~3微米)、近紅外線(NIR，約0.75~1.4微米)波段紅外線感測器並提升解析度、高解析度電視攝影機、紅外雷射標記(laser marker)等。其識別能力更強，當EOTS攝得的影像還明顯有大顆粒雜點時，A-EOTS在同一情況可拍出「高清」畫面⁶⁴(圖17)。



圖17：EOTS(左)與AEOTS(右)對同一目標的影像對比。Lockheed Martin

63 "F-35 Mission Systems Design, Development, and Verification", AIAA Aviation Forum, 25~29.JUN.2018, <https://pdfs.semanticscholar.org/b264/3c94a231786d8df626ac0a36ce99141e88a7.pdf>

64 "Lockheed Martin Prepared to Enhance F-35 Targeting Capability", Defense Innovative Review, 17.SEP.2019, https://defense-update.com/20190917_aeots.html

二、EODAS簡介

AN/A A Q-37分佈孔徑光電系統(EODAS)由6個熱影像儀構成，每個鏡頭視場95度，組成球狀視野。在初期階段只有導航前視紅外線(NAVFLIR，能將外部熱影像透過頭盔顯示器顯示)與飛彈預警功能，完整版增加防空飛彈發射點偵測以及IRST(探測並追蹤空中目標)功能⁶⁵。其紅外線凝視焦平面陣列640x512像素，每個尺寸7x5x4英吋、重9磅(約4kg)，耗電20W⁶⁶。

EODAS曾在1,300km處發現並追蹤SpaceX Falcon火箭的第一級與第二級推進段與第一級重返段。以及在20km發現坦克開火時的火光⁶⁷。

需討論的是EODAS的操作波段，一些資料指出他是中波(MWIR)與長波(LWIR)雙波段，甚至具體指出波長是3~5微米與8~10微米⁶⁸。在一篇美國軍方研究院人員在「計算與建模期刊」(Journal of computation & modeling)發表的文章中，也提到EODAS是雙波段(中波與長波紅外線)系統⁶⁹。然而洛克希德馬丁公司的F-35系統研發團隊在2018年AIAA航太論壇(AIAA Aviation Forum 2018)發表的文章中指出，EODAS是中波紅

外線(MWIR)系統。

三、Su-35與F-35光電系統比較 整體架構異同

Su-35與F-35光電系統差異除了OLO雷射預警器的有無外，最大的差異是OLS-35與EOTS。僅看帳面數據的話，EOTS的最大視野比OLS-35大，涵蓋整個下半球，而瞬時視野方面因為有雙焦段，所以有OLS-35所無的窄視野模式，又有數位變焦能力，能識別更遠的物體。許多人據此認定，EOTS比OLS-35更好。但其實上述差異是用途不同導致設計不同。

光電系統的設計方向很大程度與用途有關，而對空與對地作戰的需求不盡相同，因此本來就很難兼顧，所以每一部光電探測儀有自己的優勢與侷限都是合理的。例如以空戰為主要訴求時，目標主要出現在前上方，所以最好的光電儀位置就是機首上方，而且由於目標與我機相對運動劇烈，所以需要很強的動態攝影能力，例如需要更高的敏感度或是更短的信號累積時間；而以對地作戰為主要訴求時，目標在下半球，所以最好的安裝位置是在飛機下方，而且目標與背景的對比沒有空中目標明顯、相對運動沒有空中目

65 "F-35 Mission Systems Design, Development, and Verification", AIAA Aviation Forum, 25~29.JUN.2018, <https://pdfs.semanticscholar.org/b264/3c94a231786d8df626ac0a36ce99141e88a7.pdf>

66 "Electro-optics System of F-35 ", airsuperiority, 19.MAY.2010, <http://pakairsuperiority.blogspot.com/2010/05/blog-post.html>

67 <https://f35.fandom.com/wiki/DAS>

68 "Electro-optics System of F-35 ", airsuperiority, 19.MAY.2010, <http://pakairsuperiority.blogspot.com/2010/05/blog-post.html>

69 "InfraRed Search & Track Systems as an Anti-Stealth Approach ", Journal of computation & modeling, Vol9 No1,p.33~53, 2019

標劇烈，這都與對空模式不同。可見要兼顧兩種需求差距那麼大的模式是不容易的。

EOTS裝在機首下方，顯然就是對地優先。他也使用3~5微米中波紅外線，搭配藍寶石窗口，讓熱影像、雷射的光學性能都最佳化，這樣的設計讓他也可以對空對地兼顧。然而，他畢竟是對地優先，所以一些設計自然不利於空戰，例如他的光學元件要有超大活動範圍，而且為了利於識別更遠更小的目標，他有雙焦段，這使其機構設計會較複雜，在敵我相對運動劇烈的空戰場合就比較不利。在一份2013年的測試報告中指出，2011年起EOTS與F-35作戰系統的整合飛行試驗中，有若干精確度問題就與其雲台有關⁷⁰。

因此站在EOTS的標準，OLS-35不能涵蓋下半球、沒有窄視野，但反過來說站在OLS-35的標準，EOTS的構造複雜、而且在空戰時較有侷限。Su-35如要改善上述缺點而優化對的瞄準，就要掛KOEP-35莢艙。因此就光學系統的設計(焦段、視野等)而言，Su-35的光電瞄準能力不輸給F-35，但感測器的像素就真的有差距，關於這點稍後詳述。

在光電偵察部分，Su-35的6個OAR熱影像儀功用對應於完整版EODAS。只是俄國不像美國廠商會用華麗的專有名詞縮寫來作介紹，才讓許多人認為EODAS的能力是其獨有。例如OAR的「對周圍形成熱影像」的能力就可以用在近距導航，其實

就是EODAS初期階段的「導航前視紅外線(NAVFLIR)」，而對空中目標與飛彈的偵測、識別、定位、追蹤能力，則對應EODAS完整版的「IRST」模式，至於飛彈預警、飛彈發射點定位等功能也是兩者皆有。所以OAR與EODAS的作用是完全對等，而SOER除了OAR之外還有OLO雷射預警器，比EODAS還要全面。但OAR的感測器的像素遜於EODAS，關於這點稍後詳述。

作用距離

「EOTS曾在80~90km識別酒店的窗戶」與「EODAS在1,300km外發現推進中的SpaceX Falcon火箭」這兩筆紀錄已經普遍見於相關的介紹中。這性能確實很好，但導致許多人因此「類推」出奇怪的結論。

例如EOTS在80~90km識別酒店窗戶一事，地面建築物的表面溫度一定沒有飛機高，與周遭景物的溫差比較小，而且輻射源又是在地面，紅外線衰減比較劇烈。那麼既然這樣都可以在80~90km發現建築物了，探測飛機似乎肯定不只OLS-35的90km？但其實對空與對地觀測根本是兩回事。對地觀測時，目標不動，那麼只要穩定機構夠好，就可以一直對著目標，信號累積時間也可以延長，這樣要看遠方物體並不難，但對於自己會動的空中目標而言，不論穩定機構多強，目標也很容易脫離窄視野。所以對空對地差距太大，根本不能用80~90km識別建築物窗戶來套用在對空模式。

⁷⁰http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi3n720v_jlAhUpCqYKHQfhA9YQFjAMegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.f-16.net%2Fforum%2Fdownload%2Ffile.php%3Fid%3D20956&usg=AOvVaw36kxErwuIXybA7uMlCP_QL

至於「EODAS在1,300km外發現推進中的SpaceX Falcon(獵鷹9號)火箭」也常被當成「黑科技」來看待。其實運載火箭的重量與動力跟空對空飛彈、防空飛彈差了好幾個量級，被偵測距離差幾個量級也很正常。作個粗略的估算，Falcon的重量是300~500噸，是中程空對空飛彈的2,000倍左右，所以即使是相同的速度，火箭功率差距也大約是2,000倍級，那麼被動偵測距離就大約差距45倍，換算起來1,300km變成28km，變成合理數字。事實上他對戰車砲開火時的火光探測距離是20km，也是遠小於1,300km，因此1,300km是目標量級的關係，並不是源自「黑科技」。

真正的差距：解析度與遠距偵察能力

美俄唯一明顯的技術差距，是凝視焦平面陣列的解析度。俄國在2005~2006年堆出的OLS-UE與OLS-K是320x256像素，OLS-35或許較大，但由廠商相關產品看，推測不會超過640x480或640x512像素。而EOTS早期就有640x480像素，2018年以後的資料更高達1024x1024像素。以預警為主的EODAS的640x512像素也比需要影像識別的OLS-UE、OLS-K大。以95度視野對應640x512像素計算，EODAS的解析度達到0.15~0.2度，而OAR的精確度則只是「小於1度」，這可能表示其解析度可能只是128x128像素等級。

很顯然OLS-35與SOER在像素解析度方面是遜於EOTS和EODAS的，更細的估計，OLS-35和SOER的方位誤差分別是EOTS與EODAS的1~3倍與5~7倍。很多人對此的直觀認定是「美國電子科技本來就比較好」，

這大致上是對的，因為要做出密集的像素又要滿足足夠的拍攝能力，確實處處要技術講究。但如果要說F-35的光電像素比較高所以作戰性能一定超越Su-35，就不完全正確。就多用途戰機對空對面瞄準、預警能力方面，如前文討論的，OLS與SOER的配置已經滿足需求。例如OLS-35的方位誤差約0.01~0.02度，即使在10km處，對應的誤差最多約3.5m，在5km處則誤差最多1.7m，這即使要引導無導引炸彈都勉強足夠。而EOTS則可在80~90km識別建築物的窗框(10cm級)，已經超過射控需求太多(那麼精密的定位誤差已非武器本身精度所能及，對射控的幫助已不大)，而是到了精密偵查的等級了！所以就瞄準、預警用途而言，Su-35的光電系統並不遜於F-35，光電偵查性能才真的是差一大截。

「Su-35的光電解析度像素比較少所以輸給F-35」的結論只適用於後者(偵察)。

另一方面，Su-35光電系統卻有「更簡單、更便宜、更緊湊輕巧」的好處。這就要從密集的像素的優劣性說起。在相同的光學系統配置下，用越密集的陣列(像素越多的陣列)就相當於在底片相機使用小感光度底片(感光顆粒小)，除了因為像素更密集所以解析度更高外，每個像素接收到的背景雜訊總量更少，所以有用信號與噪音的對比大(信噪比提高)，這兩個因素使影像品質(解析度、對比度)更好、虛警率更低。但相對的，在相同的信號累積時間(曝光時間)下，每個像素接收的總光量也少，所以光線不足時就會「拍不到」，就像在黑夜不容易拍攝一樣。這時，數位相機可以用信號放大的方

式(即數位相機提高ISO值)，來在光學系統不變時(光圈、快門不變)提升影像亮度，但這時雜訊也跟著放大，所以影像仍容易有雜點且看起來像素顆粒更大，但可以用後端信號處理等方式移除雜點並讓影像細緻。例如現在的數位相機比起十年前，像素更小，用更大的ISO值卻可以拍得跟十年前用較小ISO值拍的一樣細緻。

OLS-35與SOER就像是用了高感光度底片或是較早的數位相機，感光顆粒大，解析度較差，但可以輕易觀測高動態目標；而EOTS與EODAS就像先進許多的數位相機，有更密集的像素，又有更好的信號處理能力來提升影像品質。這一方面表示後者的技術層次更高，另一方面則是更複雜更貴。從照片比對可以發現，OAR熱影像儀的尺寸差不多只有EODAS的鏡頭部分大小，明顯緊湊、輕巧得多，或許就是構造更簡單帶來的好處。

因此，OLS與SOER在紅外線陣列技術上應當確實不如EOTS與EODAS，但在這不足的基礎上已能滿足Su-35的作戰需要，又能把系統做得更緊湊輕巧，也算是很漂亮的工程解。

延伸探討一下，從這裡也可以管窺Su-35與F-35在使用上的若干優劣勢：

1.F-35相當於集攻擊、空戰、偵察三大功能於一身，或許個別能力上不一定是最

強，但可以簡化作戰規劃。例如傳統上高解析影像偵查需要動用無人機，而F-35自己可以包辦這些任務，作戰彈性很大。

2.那麼強的影像偵察能力要在對地作戰才有用武之地，這是因為對地作戰時目標可能是車輛甚至是人。而在空戰、制海、打擊大型地面目標等方面，這麼高的解析能力幫助不大。因此對於沒有必要深入敵境對地作戰的防空型或是海上作戰型使用者而言，比較像是在幫美軍等攻擊型使用者「當分母」，分擔造價。

歐洲的PIRATE與OSF

歐系戰機在光電系統的配置上沒有「OLS-35+SOER」或「EOTS+EODAS」這樣的完整配置。例如法國Rafale也有紅外線飛彈感測器與雷射感測器，但其紅外線感測器是雙魚眼鏡頭式，不具影像偵察能力；而EF-2000也有雷射警告器，但飛彈感測器是小型毫米波雷達，無紅外成像能力。因此與歐系戰機的比較將只侷限在前視光電探測儀。這之中最具代表性的就是EF-2000的PIRATE與Rafale的OSF。

一、PIRATE

EF-2000的光電系統稱為PIRATE，是「被動機載紅外線追蹤裝置」(Passive Infrared Airborne Track Equipment)的縮寫。其工作在3~5微米中波與8~11微米長波^{71,72}，

71 Boyd Cook: "PIRATE: theIRST for Eurofighter TYPHOON", Proc. SPIE 4820, Infrared Technology and Applications XXVIII, 897. January 1, 2003

72 "PIRATE: Penjejak Target Berbasis Elektro Optik di Eurofighter Typhoon dan JAS 39 Gripen", 2015, <https://www.indomiliter.com/pirate-penjejak-target-berbasis-elektro-optik-di-eurofighter-typhoon-dan-jas-39-gripen/>

最大視野150x60度⁷³，一說水平+/-60度，垂直-15~+60度⁷⁴。長680mm、寬591mm、高300mm⁷⁵，重48kg⁷⁶。

PIRATE有三種主要模式⁷⁷：(1)多目標模式：可以自動對空多目標追蹤、被動測距，此模式能追蹤500個空中目標⁷⁸；(2)單目標追蹤模式：對一個選定的目標做精確的角度追蹤；以及(3)從屬模式：依據外部指示對一個特定方向追蹤一個目標。

研發商之一的OESIA網站上指出對空中目標探測距離不低於74km，但未載明條件⁷⁹。在一份蘭德公司2008年的報告指出，EF-2000對次音速飛機的迎面探距達

50nm(93km)，追擊達90nm(約167km)^{80,81}。一說對次音速目標迎面90km追擊145km⁸²。識別距離40km⁸³。

二、OSF

Rafale戰機的光電系統稱為「前向光學系統」(法文原文簡寫OSF，英譯因文法關係單字順序有異，翻為Front Sector Optonics，簡稱FSO)。由兩部分組成：IRST/FLIR子系統以及電視、雷射子系統⁸⁴。前者位在風擋右側，後者在左側(方向以飛行員視線為準)。

OSF的紅外線子系統是西方第一種中波與長波雙波段紅外線系統⁸⁵，工作波長為

73 Boyd Cook: "PIRATE: the IRST for Eurofighter TYPHOON", Proc. SPIE 4820, Infrared Technology and Applications XXVIII, 897. January 1, 2003

74 "PIRATE: Penjejak Target Berbasis Elektro Optik di Eurofighter Typhoon dan JAS 39 Gripen", 2015, <https://www.indomiliter.com/pirate-penjejak-target-berbasis-elektro-optik-di-eurofighter-typhoon-dan-jas-39-gripen/>

75 Leonardo型錄。 https://www.leonardocompany.com/documents/20142/3149744/Pirate_IRST_Infrared_Search_and_Track_LQ_mm07797_.pdf?t=1538987504472

76 "PIRATE: Penjejak Target Berbasis Elektro Optik di Eurofighter Typhoon dan JAS 39 Gripen", 2015, <https://www.indomiliter.com/pirate-penjejak-target-berbasis-elektro-optik-di-eurofighter-typhoon-dan-jas-39-gripen/>

77 Leonardo型錄。 https://www.leonardocompany.com/documents/20142/3149744/Pirate_IRST_Infrared_Search_and_Track_LQ_mm07797_.pdf?t=1538987504472

78 <http://grupooesia.com/en/portfolio-productos-ingenieria/flir-irst/>

79 <http://grupooesia.com/en/portfolio-productos-ingenieria/flir-irst/>

80 John Stillon, Scott Perdue, "Air combat past, present, and future", RAND, AUG.2008, https://www.defenseindustrydaily.com/files/2008_RAND_Pacific_View_Air_Combat_Briefing.pdf

81 https://en.wikipedia.org/wiki/EuroFIRST_PIRATE#cite_ref-10

82 "Airborne IRST properties and performance", Defense Issues, 16.JUN.2015, <https://defenseissues.net/2015/06/16/airborne-irst-properties-and-performance/>

83 "Airborne IRST properties and performance", Defense Issues, 16.JUN.2015, <https://defenseissues.net/2015/06/16/airborne-irst-properties-and-performance/>

84 "IR Search & Track systems for combat aircraft", Safran, <https://www.safran-electronics-defense.com/aerospace/military-aircraft/optronics>

85 "InfraRed Search & Track Systems as an Anti-Stealth Approach ", Journal of computation & modeling, Vol9 No1, p.33~53, 2019

3~5微米與8~12微米⁸⁶。操作距離方面，據維基百科數據，對空中目標100km，對地與對海6km，電視識別距離40km⁸⁷。據 Flight Global在1999年的報導，探測距離細節當時仍是機密，不過已在20,000呎(約6,100m)發現70nm(約130km)目標，低空則是60nm(約110km)，雷射測距12nm(約22km)⁸⁸。而在一個2015年的報導則具體確認上述數據的目標是次音速戰鬥機：在20,000呎高空對次音速戰鬥機探測距離是迎面80km追擊130km，低空則降為110km。電視頻道識別距離45km，紅外線識別距離40km⁸⁹。

值得注意的是，在Rafale F3規格以後的OSF-IT解析能力與距離更強，例如有報導稱F3R規格(晚於F3規格)的OSF-IT的電視攝影機的操作距離達到55.6km，紅外線子系統最大距離185.2km⁹⁰。但在稍早的F3規格中，卻移除了紅外線裝置，原因據信是為RBE2主動相位陣列雷達騰出空間⁹¹。但在一份美國軍方研究院人員的論文指出，移除原因是舊有的紅外線系統已過時，在未來更新版的規格裡才會再加上⁹²。不論F3規格的OSF-IT移

除紅外線子系統的真正原因為何，有趣的在於，紅外線這種可以遠程探測又能晝夜使用的系統的重要性，竟排在只能白天使用的電視系統之後。也許是因為電視/雷射系統才可以被動定三維座標，IRST/FLIR不行，而探測距離方面IRST/FLIR也比不上AESA。

三、操作距離的比較

看到這，可以發現OLS-35跟歐洲產品的最顯著差異就是探測距離了。從上述資料看，PIRATE與OSF對次音速戰機的迎面探測距離分別約90km與80km，大約就是OLS-35對次音速戰機的追擊距離，是OLS-35迎面距離的2倍多；而他們的追擊距離分別達167與130km，是OLS-35的1.4~2倍。

首先要注意的數據是「官方數據」還是「實測紀錄」。官方數據的意思通常是「客戶可以接受、而廠商提供保證的數據」，也就是如果達不到該數據，就要算廠商責任，就無法驗收。而實測紀錄則可能有條件限制，不是保證達到，所以寫進需求或型錄裡可能永遠無法驗收。正因如此，研發時的技術需求與型錄上的數據通常會比實際能耐還

86 "Tests begin on Rafale optronics", Flight Global, 05.MAY.1999, <https://www.flightglobal.com/news/articles/tests-begin-on-rafale-optronics-50879/>

87 維基百科條目。 https://en.wikipedia.org/wiki/Optronique_secteur_frontal

88 "Tests begin on Rafale optronics", Flight Global, 05.MAY.1999, <https://www.flightglobal.com/news/articles/tests-begin-on-rafale-optronics-50879/>

89 "Airborne IRST properties and performance", Defense Issues, 16.JUN.2015, <https://defenseissues.net/2015/06/16/airborne-irst-properties-and-performance/>

90 "Rafale B - 2018, F3R", <http://cmano-db.com/aircraft/4361/>

91 "Radar and Optronics will define future Rafale", Flight Global, 18.JUN.2007, <https://www.flightglobal.com/news/articles/radar-and-optronics-will-define-future-rafale-214754/>

92 "InfraRed Search & Track Systems as an Anti-Stealth Approach ", Journal of computation & modeling, Vol9 No1,p.33~53, 2019

低。

OLS-35的數據就是屬於官方的型錄數據。而且如前文分析，這數據剛好滿足Su-35的作戰需要，所以這個數據未必是他真正的能耐。類似地，UOMZ版的OLS公開的探測距離是迎面40km追擊70km，筆者曾在MAKS2007問參展人員，「為何Su-27M的52Sh都已經做到40/90km了，最新的OLS卻還是只有40/70km」，參展人員的答覆是，「這個數據是保證距離，如果講最大距離，到140km都沒問題。」

反觀歐洲廠商都將光電探測距離視為機密，並未正式公開探測模式與距離。例如關於PIRATE的探測距離的官方資料只有「不低於74km」之描述，至於是在什麼情況對什麼目標都沒講清楚。而那些看起來有講清楚狀況的數據，大多來自2000年代以後的各種報導，這表示是實際上有測到的數據，不一定等同於實際使用時的多數情況：如果這些數據是偶然達到的紀錄，那實際使用時大部分都達不到這距離；反之也可能這些數據是輕而易舉可以達到的，那實用探測距離就會更遠。

操作模式對距離也有影響。只要目標訊號大於背景雜訊，那不管有多微弱，只要信號累積時間足夠，距離就可以很遠，這就像晴朗夜空下可以拍攝到肉眼看不到的天文距離外的星星一樣；反之，即使訊號很強，如果信號累積時間太小，一樣是拍不到影像。所以光電系統的信號擷取時間對距離是有影響的。當光電系統要自主搜索時，為了在夠短的時間掃描夠大的空域、以及防止目標脫

離凝視視野，信號擷取時間不能太長、或是解析度不能太大。反之，如果目標方位已知，使得只需在小範圍加強搜索，或是在外部資訊(如雷達)的引導下共同咬住目標時，可以延長信號擷取時間，或是藉由窄視場，進而提升解析度與訊噪比，這些都有助於遠距觀測。

OLS-35很顯然是第一種情況：他只有單一焦段，可以較快的掃描指定空域，而且其沒有窄視野，識別距離有限。例如在2018年9月網路上出現的OLS-35鎖定F-22的畫面中可以推測，當時F-22約位在2km外，而畫面中的F-22的輪廓已經不清楚，可見這已大約是OLS-35的識別極限了。可見OLS-35的熱影像功能主要是在近距離戰鬥、瞄準、導航之用，在超視距空戰時他主要是當IRST用的。而PIRATE與OSF的識別距離都達40km級，就是有窄視界模式之故。窄視界基本上沒辦法拿來自主搜索，因為會需要很長時間或只能搜索很小的區域，它倒是很適合對已知方位加強搜索。所以PIRATE與OSF那種幾乎2倍於OLS-35的距離也不無可能是與其他資訊源搭配時的距離。

因此，由於數據取用標準、操作模式都會影響探測距離，所以並不能單純依據OLS-35與PIRATE、OSF在探測距離上的差異，來定論好壞。

不過，OLS-35在技術上真的有一處導致其探測距離不如PIRATE與OSF，即探測波段。OLS-35只有3~5微米MWIR波段，PIRATE與OSF則是MWIR與LWIR雙波段，其中的長波段(LWIR)特別適合遠程空戰使

用。這是因為飛機在LWIR波段的輻射強度本身就比MWIR波段強，而LWIR波段的範圍也比MWIR波段寬(MWIR波段是3~5微米，寬度是2微米，LWIR系統至少是8~10微米，通常上限可以到12或15微米，所以總寬度是2~7微米)，因此輻射總量更大，這當然有利於增加探測距離。雖然長波比中波容易被水氣衰減，但因為總輻射量較大，所以還是有一定的耐候能力；而如果是戰機作戰空域，特別是空優戰機與攔截機的空域，天氣現象已經不明顯，這時長波的優勢就會顯現出來。正因如此，西方戰機的對空紅外線系統大都是以LWIR為主，較新的系統如OSF、PIRATE才添加MWIR波段。

OLS-35之所以沒有長波紅外線波段，極可能真的是技術落後之故。LWIR的感測元件的性能很難一致，所以做成大規模陣列並不容易，而其對應的光學窗口要做大尺寸也不容易。但西方的前視紅外線(FLIR)英艦很早就使用LWIR波段(所以這些西方英艦的窗口大都是黃色的，就是與LWIR搭配的ZnS或ZnSe材質的窗口的顏色)，反而是近年的新系統才加入中波紅外線(MWIR)波段，反觀俄國戰機在MiG-35、Su-35以前都沒有熱影像儀(FLIR)功能，可見在相關的技術與經驗上是落後的。或許因此在有限的時間要開發熱影像儀時，像F-35一樣選擇可以兼顧對空對地的中波波段，並搭配相對成熟的光學窗口。

除了前視紅外線探測距離外，其餘性能

Su-35並沒有比較差。例如OLS-35的雷射測距距離是對空20km對地30~35km，OSF是對空22km。此外，Rafale F3構型的DDM-NG紅外線飛彈預警系統也是使用MWIR波段，有資料顯示其探測距離是27.8km，但具體情況不明⁹³；與之對比，Su-35的OAR預警器對空對空飛彈亦是25km級。從以上數據可發現，在工作波段類似時，Su-35的光電系統與西方系統性能伯仲之間，這更可以確定前視紅外線探測距離的差異是來自工作波段、工作模式等原因。

四、整體架構比較

如前所述，紅外線探測距離的差異，第一個牽涉到數據取用標準的不同、探測模式的不同等，這點難以查證，所以無法根據這些數據判定相同模式下距離是否差那麼多；第二個牽涉到使用的紅外線波段，這點OLS-35因為缺乏長波紅外線波段(LWIR)，所以在對空偵測上確實比較吃虧。但除了缺乏LWIR波段所致的距離弱勢外，OLS-35與PIRATE和OSF相比卻有不少架構上的優勢：能兼顧對空對地，而且很緊湊。

EF-2000的PIRATE雖然對空性能強大，也只有48kg，但他只是單純的紅外線系統，沒有雷射測距、照明、光斑追蹤，也沒有電視攝影機，並不是完整的光電瞄準系統，特別是在對地模式上主要只有觀測能力。Rafale的OSF則同樣具有完整的紅外線、電視、雷射功能，也能兼顧對空對地，然而紅外線與電視/雷射子系統是分開的，總體積

93 "Rafale B - 2018, F3R", <http://cmano-db.com/aircraft/4361/>

非常大，幾乎佔用了跟雷達一樣大的橫截面。在一部分的Rafale F3構型中，甚至為了提供RBE2雷達空間，必須犧牲OSF的紅外線子系統。反觀OLS-35的紅外線、電視、雷射系統整合在一個整流罩內，共用光學裝置，更為緊湊。也因為OLS-35共用光學裝置與窗口，所以各個子系統可以做到共光軸（這點與EOTS相同），而OSF的紅外線子系統與電視/雷射子系統顯然不是共光軸，在黑夜或天候不佳時，電視攝影機失效，要靠紅外線系統與雷射系統以不同的視線來進行定位時，這是否影響瞄準精度、進而造成某些使用限制則不得而知。

可見OLS-35雖然在紅外線感測器方面有先天不足，但在其餘的整體架構上，應該是比PIRATE以及OSF還先進的。這並不是在說俄國人跟歐洲人誰比較厲害，這只是科技進展的結果：OLS-35是2000年代中後期的技術，並在2010年正式發展，那時PIRATE與OSF早已量產多年了。用晚一點的後發優勢，加上是由專精太空光學系統的NPK SPP操刀，會有更先進的措施並不足為奇。

與美國AN/AAS-42與IRST-21比較

AN/AAS-42是一種IRST系統，最初於1990年代為搭配F-14D超級熊貓而發展。

在F-14D之後的美軍先進IRST系統多是由AN/AAS-42衍生而來，包括F-22本來要用的AIRST(Advanced IRST)。其中F-14D於2006年除役，同時美空軍也停止資助AIRST，但AN/AAS-42的血脈仍存留至今。F-15K、F-15SG的「虎眼」系統(Tiger eyes)、F/A-18E/F的IRST-21莢艙(2015年)、以及F-15C的Legion Pod莢艙(2017年，為IRST-21的變體)的感測器部分都是源自AN/AAS-42的技術⁹⁴。由於IRST-21等莢艙的問世年份已是2010年代以後，因此不少報導認為這是美國用來讓傳統戰機對抗中俄匿蹤戰機的利器。

AN/AAS-42是單純的IRST，沒有雷射系統、也沒有電視系統，所以體型很小，可以輕易改裝或擴充。例如在F-14D上它位於機首下方，有的版本還與電視攝影機並列；在F-15K、F-15SG的Tiger eyes系統上，他整合進派龍架內，該派龍架還可再掛Sniper瞄準莢艙；而F/A-18E/F的IRST-21則是在副油箱前端裝上AN/AAS-42改良型感測器。

AN/AAS-42採用1x256像素的掃描線列(64個4像素模組組成)⁹⁵，工作波段是8~12微米長波⁹⁶，視野+-75度⁹⁷。

AN/AAS-42最顯著的優勢是極大的探測距離。有報導指出，1996年測試中偵測到50km外的高速靶彈(2.4馬赫)，並持續跟蹤5

94 "InfraRed Search & Track Systems as an Anti-Stealth Approach", Journal of computation & modeling, Vol9 No1, p.33~53, 2019

95 "Advanced Infrared Search & Track (AIRST)", Electro-Optical Systems Forecast, 01.2003, https://www.forecastinternational.com/archive/disp_old_pdf.cfm?ARC_ID=455

96 <https://ja.wikipedia.org/wiki/AN/AAS-42>

97 "Advanced Infrared Search & Track (AIRST)", Electro-Optical Systems Forecast, 01.2003, https://www.forecastinternational.com/archive/disp_old_pdf.cfm?ARC_ID=455

分鐘，而在1998年測試中，發現42km外迎面而來的F-16⁹⁸。在最大探測距離方面，有資料是185.2km⁹⁹，另外在某些F-14D中，它與電視攝影機並列，距離可達176km(110英里)以上¹⁰⁰。

如此強大的探測距離，甚至超過晚幾年問世的、同樣採用LWIR波段的歐洲PIRATE與OSF，當然就把探測距離90km的OLS-35甩老遠了。而這樣的性能是美國在90年代就辦到的，是有什麼「黑科技」在裡面嗎？事實上美國科技再先進，也是有極限的，從AN/AAS-42只是用掃描線列而非凝視焦平面陣列就知道其元件技術仍舊受限於90年代的技術極限，沒有比PIRATE、OSF的好，所以經該是沒有「黑科技」。這樣的話要如何達到那麼強大的探測距離呢？

最直接的原因是波段。AN/AAS-42採用長波紅外線非常利於對空探測，特別是天氣現象較弱的高空，所以探測距離可以顯著超越採用中波紅外線的OLS-35。

但「波段因素」無法解釋為什麼AN/AAS-42的探測距離不下於更先進PIRATE與OSF等歐洲長波紅外線探測器。這就與操作模式有關。前文提到，即使是相同的感測器與光學機構設計，搭配不同模式就會有不同的性能，一如單眼照相一般。例如在1998年測試中，發現42km外迎面而來的F-16，通常追擊探距是迎面的2倍，據此算最大距離

約80km，不會到170~185km那麼多，可見這些數據的工作模式應當不同。偏偏各國紅外探測器的探測距離數據中都不會提到探測模式。

即使無法具體知道每一種紅外線探測器的探測模式，吾人也可以輕易知道，AN/AAS-42採用的掃描線列的探測模式與PIRATE採用的凝視焦平面陣列必然有很大的差異。例如AN/AAS-42的掃描線列是1x256像素，凝視陣列至少是320x256像素，差了320倍。以下舉若干例子來比較1x256像素與320x256像素的差異：

1.如果兩者有相同的角分辨率(即每個像素看的範圍相同)，則在相同的信號擷取時間下，探測距離、訊噪比(關係到目標與背景區別度與虛警率)都相同。然而前者要依序偵測320次才能看完後者凝視的範圍。這表示，要達到前述等價的探測效果時，前者大範圍掃描的資料更新週期會遠大於後者。反之，如果想要一樣短的資料更新週期，信號累積時間以及探測距離就必須小很多，所以此一模式(高角分辨率模式)不適合用來搜索未知空域，只能對已知方位精確搜索。

2.如果前者的角度誤差放大10~20倍，雖不完美，但與射控雷達相當，此時在信號擷取時間與後者相同下，探測距離仍可一樣(相同目標的累積信號一樣強)，但收到的背景雜訊較多(因為凝視較大範圍)，使得訊噪

98 "F14重出江湖！「貓眼」令F15超越F22 殲20要小心！"每日頭條,29.JUN.2018, <https://kknews.cc/military/6zonajl.html>

99 <http://cmano-db.com/pdf/sensor/636/>

100 "Tomcat Eyes", Navy matters, 31.DEC.2017, <https://navy-matters.blogspot.com/2017/12/tomcat-eyes.html>

比降低，虛警率會提高。而此時大範圍掃描週期與凝視陣相當，甚至更少。例如如果1x256線列的視野是0.58x150度，則角分辨率是0.58度(與射控雷達相當)，對75x150度視野全空域掃描只需依序探測130次，而如果是320x256陣列的視野是6x4.8度，則角分辨率是0.02度，對75x150度視野全空域掃描要390次，因此此時線列的更新率反而較高。

由以上可簡單總結，1x256像素線列可以犧牲資料更新率，來獲得與320x256像素陣列一樣的探測距離與品質；或是犧牲精確度與對比度，來獲得一樣的距離與更新率。此外還要考慮到，當每個像素看的範圍較廣(角度誤差較大)時，雖然擷取的背景雜訊變多而降低訊噪比，但也表示目標需要更多時間才能離開一個像素的範圍，即擷取時間可以延長，這一點可以延長距離。

因此AN/AAS-42的超長探測距離應該是性能取捨下的結果，或許是在已知方位(例如根據資料鏈或雷達預警器知道威脅方位)的情況下，小範圍加強搜索而得，又或許是犧牲方位解析度與影像對比度，在大範圍搜索而成。而即使是犧牲解析度的情況，也可與射控雷達相當，因此仍具實用性。

總體比較

總結以上，可見時代相近的每一種光電系統都有其著重點與優劣勢：簡單的結論是，AN/AAS-42與PIRATE強項在對空作戰；OSF可以對空對地，但體型巨大；EOTS可對空對地且體型精巧，但對空距離不是最好；OLS-35優劣勢與EOTS雷同但解

析度較差。更具體的說：

一、俄國應該是受元件與窗口材料技術的限制，在Su-35的時代無法實現長波紅外線探測器，因此在對空探測距離方面，OLS-35無法與AN/AAS-42、PIRATE、OSF等有用到長波段的系統媲美。

二、OLS-35的凝視陣列解析度應不會超過歐美產品，再加上其沒有窄視界模式，使得影像識別距離遜於PIRATE、OSF、EOTS。後三者的影像識別距離達40km級，已是超視距空戰範圍，OLS-35則只有2km左右，僅能視距內識別，因此在和平時期或複雜空域，當必須遵守「目視識別後才能開火」的規定時，OLS-35就會吃虧。

三、但除此之外，從整個光電系統的架構、緊湊性等方面可看出，Su-35的「OLS-35+SOER」比歐洲產品先進，除了紅外陣列解析度較差外，直逼屬於第五代戰機的F-35的「EOTS+EODAS」。而這個缺陷主要體現在光電偵察功能上，對探測、瞄準、預警等多用途戰機的基本需求影響較少。

基於上述因素，Su-35的光電系統不像歐美系統一樣具有「某種性能當代第一」，而是很折衷的產物。在這些折衷措施之下，可以滿足Su-35的作戰需求，又可以進一步簡化設計(例如OLS-35比EOTS構造更簡單、OAR體型比EODAS小)，這是其價值所在。

作者簡介

楊政衛，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。