

俄羅斯“準五代”戰機—Su-35BM專題：

航電系統部分

軍事專欄作家 楊政衛

摘要

- 一、Su-35BM 採開放式航電架構，具多路訊息來源，採用為 PAK-FA 預研及已用在有“第一種服役的第五代戰機”之稱的 Su-32的多項航電技術、PAK-FA 的自衛系統、以及部分4+代改良系統如雷達等。另外在人因工程、航空醫學上亦大有著墨。
- 二、Su-35BM 採用了可每秒運算數百億次級之中央電腦，並引入光纖傳輸技術，不論在運算速度或傳輸頻寬上都達世界最先進水平。
- 三、Irbis-E 被動相位陣列雷達性能已直逼美製 APG-77主動相位陣列雷達，搭配獨特的機械掃描裝置使其具有極大的探測視野，甚至可作為飛彈預警裝置，其後續影響值得注意。
- 四、Su-35BM 裝有為五代戰機研製的 L 波段主動陣列，主要用於敵我識別。然其獨特的天線佈局使其理論上擁有 X 波段雷達等級的方位精確度，這可能與匿蹤設計有關，亦可能兼具一定程度的輔助探測能力，是種值得注意的新設備。
- 五、所用之 OLS-35光電雷達探距相當於現有系統之1.5倍，並具有超大瞬時視場，因此擁有很高的掃描速度與可追蹤目標數。

關鍵字：Su-35、第五代戰鬥機、航電系統

一、中央系統：YeKVS-E 與 Solo 系列電腦 (Solo 電腦數據全取自型錄)

俄係戰機最為人詬病的，就是有漂亮的機械性能(飛行性能、武器等)但卻有非常不友善的人機介面與非常落後的電腦。這使得分析俄係戰機與歐美戰機的性能差異時存在風險：經過好的射控電腦的安排，射程 50km 的

飛彈可經常發揮接近 50km 的射程，反之其射程可能掉到 20km 不到；但是如果飛彈射程硬是比別人多一倍兩倍，那麼即使電腦不夠好，讓飛彈實際射程大打折，其能打擊之距離甚至有時比前者大。那麼，何者為優？不打仗沒人知道。

自 Su-35 與 MiG-29M 等 4+代戰機開始引



試飛中的 Su-35-1(取自 Sukhoi 官網)

入玻璃化座艙及專家介面、西方商規處理器等。Su-30MKK，Su-27SKM 的 BTsVM-486 中央電腦(fig.1)進一步採用 Intel 486 DX2-50 晶片[1]，較幻象 2000-5 所用者為佳(據說為 16 位元處理器)，而幻象 2000-5 是當時電腦系統最佳的在役戰機。是以 Su-30MKK 甫一問世便被喻為“可立即投入使用的最先進戰

機”。但與當時仍在開發中的歐美開發中戰機相較，Su-30MKK 仍大有不足。例如 F-22、EF-2000 等均有每秒運算 100 億次或更快的中央電腦，這些戰機乃至僅為 3 代半的 F-16E/F 等甚至引入光纖做更高頻寬的資料傳輸。因此驗證俄國中央系統是否具備這些等級的設備在日後研析俄系戰機性能時相當重



fig.1 Su-27SKM 所用的 BTsVM-486-2 電腦(作者攝)



fig.2 Su-35BM 的 Solo 系列電腦。由左至右為 Solo 01~05 型(作者攝)



要。

俄國在設計 MiG 1.44 便應用了類似 F-22 上的“以單一的電腦系統處理全機資訊”之概念，並在其 Gamma-1106 數據紀錄器中引入光纖通訊技術[2]。100 億次級超級電腦則在 Su-33UB(1999 年)開始試驗[3]。這些技術確定落實於 4++ 代戰機上，如 2006 年問世的 4++ 代戰機 MiG-35 開始引入光纖通訊技術，傳輸頻寬提昇為舊系統的 100 倍[4]。Su-35BM 在各主要顯示器、部分電腦、以及導航系統上應用了光纖通訊技術，並確定擁有運算能力數百億次級之電腦。

Su-35BM 的中央電腦是被稱為“未來電腦系統”的 YeKVS-E[5]，其由多部功能不同的 Solo 系列電腦構成。Solo 系列電腦是設計來供航空、運輸、工業界解決複雜程序的 RISC 規格高速電腦，共有 5 款：Solo-01~05 (fig.2)，主要功能分別為信號處理、資料處理、影像處理、通信與自動控制、類比—數位轉換等。此系列電腦在運算速度、容量、傳輸頻寬上都大有進展。例如 Solo-01 便採用 1 個時脈 500MHz 的資料處理器與 8 個時脈 500MHz 的信號處理器，共 2.5GB 的隨機存取記憶體(RAM)以及共 1GB 的唯讀記憶體(ROM)，每秒至多能處理 800 億個浮點運算指令；Solo-02 則有 4 個時脈 500MHz 之資料處理器、共 2GB 的 RAM 與共 2GB 的 ROM。至於 03~05 型亦採時脈 300 或 500MHz 之處理器，03 型的浮點運算能力亦為每秒 800 億次，05 型則為 80 億次。大都配有符合 MIL-STD-1553B、ARINC-429、RS-232C、Ethernet 等規格之傳輸介面。其中 01、03、05

型各有 1 條用於圖表輸出的光纖頻道，03 型另有 4 條光纖資料交換通道。除 03 型重 20kg 外，其餘重量均在 10kg 上下，主要模組均以歐洲“Euromechanics”標準製造。除 04 型採普通空氣冷卻外，其餘均採加壓氣冷。

1. Solo-01 信號處理電腦(fig.3)

用以進行影像、數位信號處理。含 1 個資料處理模組(DPM, fig.4)與 4 個信號處理模組(SPM, fig.5)。耗電小於 150W。

資料處理模組含：(1) 1 個 MIPS R7000 或 SPARC R500 處理器，時脈 500MHz。(2) 512Mb 的隨機存取記憶體(RAM)。(3) 512MB 的 FLASH 型唯讀記憶體(FLASH-type ROM)。(4) 2 個 PMC 擴充插槽。

信號處理模組含：(1) 4 或 8 個數位信號處理器(DSP)，每個時脈最高達 500MHz。(2) 最大浮點運算能力：10Gflops(4 個 DSP)或 20Gflops(8 個 DSP)，即每秒 100 億或 200 億次浮點運算。(3) 512MB 的 RAM。(4) 128MB 的 FLASH 型 ROM。(5) 2 個 CMC 擴充插槽。

Solo-01 電腦每秒可處理 800 億次浮點運算。擁有 1 條用於傳輸數位圖形的光纖通道(解析度達 1024x768)，Q-bus、ARINC-429、RS-232C、LVDS 等資料傳輸介面，重 12kg。

2. Solo-02 資料處理電腦

含 4 個與 Solo-01 相同的資料處理模組。有 Q-bus、MIL-STD-1553B、ARINC-429、RS-232C 等規格之資料通道。重 10kg。耗電小於 150W。

3. Solo-03 影像電腦

用以進行影像、類比—數位信號處理、及控制問題。採與 Solo-01 相同的 MIPS



fig.3 Solo-01 信號處理電腦與 Solo-02 資料處理電腦
(作者攝)

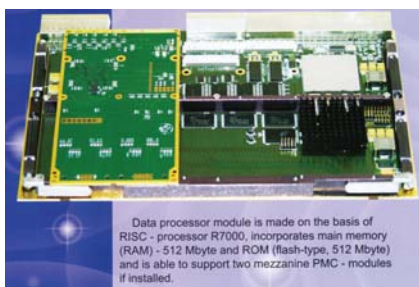


fig.4 Solo-01 與 02 電腦的資料處理模組(GRPZ 型錄)

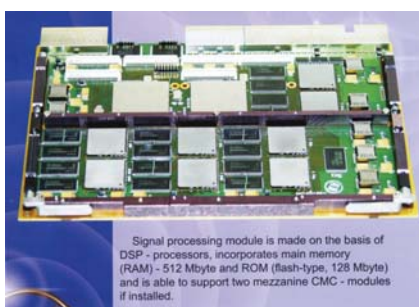


fig.5 Solo-01 與 02 電腦的信號處理模組(GRPZ 型錄)

R-7000 處理器及數位信號處理器，不確定 DPM 與 SPM 模組之數量分配，唯其浮點運算能力與 Solo-01 同為每秒 800 億次(故研判採用 4 個 SPM)。

這款電腦傳輸頻寬在家族中最大，有 4 條資料交換用的光纖通道及 1 條供影像輸出之光纖通道，ARINC-429、RS-232C 等通道。重 20kg，亦為家族之最。

4. Solo-04 通訊與自動控制電腦

用以解決通訊與自動控制（飛控、引擎控制、電力系統等）問題。採 MIPS R7000 處理器，但時脈為 300MHz。有 RS-232C、RS-343A、MIL-STD-1553B、SCSI-2、Ethernet10/100 等通道，重 8kg。

5. Solo-05 數位-類比轉換電腦

用以解決類比-數位轉換、信號處理、及控制問題。與 Solo-04 一樣採時脈為 300MHz 之 MIPS R7000 處理器，及數位信號處理器。每秒處理 80 億次浮點運算。有 1 條輸出影像的光纖通道，ARINC-429、MIL-STD-1553B 等通道。重 8kg。

6. 已預留成長空間

在一份討論五代航空電腦的俄國文獻[6]內有一幅“2005~2010 年間研製的 21 世紀初期戰機計算能力分配”概念圖。詳述各主要功能所需之運算量、記憶體、系統間傳輸頻寬等。將 Solo 系列電腦與之比對發現，Solo 系列在頻寬上大致符合該概念圖，資料處理能力略超過之（每秒 25 億次定點運算），信號處理能力則達需求值(每秒 460 億次浮點運算)之 3.5 倍，記憶體則遠大於需求值(資料與信號處理各需 100~150MB)。因此 Solo 系列已是較該概念圖所示（2005 年出版）還先進的電腦。另外值得注意的是，Solo 系列所用的 R-7000 係美國的商規處理器。依據前述文獻，這種“採用外國模組與商規產品”者，是一種性能略差但已符合前述概念圖的俄國國產電腦的後繼版本。

7. 與西方航空電腦相較

若要將 Solo 系列電腦動輒“80 億次甚至

800 億次” 運算能力之運算能力與 F-22 或 EF-2000 之電腦相比需注意單位一致性的問題。F-22 的中央電腦運算能力為每秒 105 億個指令(instructions)，其有 2 台 CIP[7]，故總運算能力約每秒 200 億個指令。但“指令”(instruction)與“浮點運算”(floating point instruction)意義不同，不宜直接比較。Solo-01 的信號處理部分總時脈為 16GHz，即每秒 160 億個週期(clocks)，並以每個週期 5 次浮點運算達成 80Gflops的運算能力。以 RISC 處理器通常 1 個週期對應 1 個指令(instruction)來看，

Solo-01 每秒能處理 160 億個指令(instructions)。若用上述方法換算成相同單位，整套 YeKVS-E 電腦在資料處理部分在每秒 25 億個指令(instructions)以上(僅算 Solo-01 與 02)，信號處理部分在每秒 320 億個指令以上(僅算 Solo-01 與 03) ❶。另外 F-22 的 1 號中央電腦記憶體為 300MB (同[7])，因此總記憶體約 600MB，而 YeKVS-E 則有數 GB 之記憶體。因此以運算能力看，YeKVS-E 電腦系統已優於 90 年代末期 F-22 的中央電腦 ❷。

Solo 系列電腦諸元					
	Solo-01	Solo-02	Solo-03	Solo-04	Solo-05
用途	信號處理	資料處理	影像處理	通訊與控制	數位－類比交換
處理器	R7000 x 1, DSP x 8	R7000 x 4	R7000x?, DSP x?(應為 8)	R7000 x?	R7000x?, DSP x?
每個處理器時脈(MHz)	500, DSP 者亦為 500	500	500	300	300
總浮點運算能力 (Gflops)(最大)	80	--	80	--	8
隨機存取記憶體 (RAM),MB	512x1(資料處理)+ 512x4(信號處理)	512x4(資料處理)	不明	不明	不明
唯讀記憶體(ROM),MB	512x1(資料處理)+ 128x4(信號處理)	512x4(資料處理)	不明	不明	不明
平行交換頻道(Q-bus)，個	1	1	--	--	--
MIL-STD-1553B 資料匯流 排，個	--	4	--	2	2

註❶ 雖然都是以一套電腦系統做中央處理，但 F-22 的 CIP 與 YeKVS-E 之架構並不完全相同。F-22 的每個 CIP 是由數十個含資料處理與信號處理器之模組構成之“單一”電腦，靠軟體分工(同[7])，而 YeKVS-E 在硬體上仍有分工，唯採用通用模組。故取 YeKVS-E 之總運算能力與 F-22 的 CIP 相較。

註❷ 美國於 1986 年問世的用於中央系統的通用處理器時脈為 100MHz[6]，由其 CIP 性能反算亦可得接近之結果，而 Solo-35 所用之處理器時脈為 300 及 500MHz，美國近年將採用之處理器為基於砷化鎵半導體的 500MHz 處理器[6]。由這些資料可知，YeKVS-E 已較早期 F-22 所用的 CIP 先進，至少在處理器部分與美方最新產品相當。但文獻[6]同時指出，F-22 的架構仍屬較先進之概念，仍為俄國研究者追隨之方向（例如美國採用的單一寬頻資料幹線概念，俄國缺乏相關經驗與規格，因此在資料傳輸上暫時是透過提升現有資料傳輸線路的頻寬來滿足需求。）

光纖資料交換頻道，個	--	--	4	--	--
ARINC-429 規格加密資料交換頻道，個	--	8 發/16 收	8 發/16 收	--	16 發/16 收
ARINC-429 規格一次性命令頻道(one-time command exchange channels)，個	8 發/8 收	8 發/8 收	--	--	8 發/8 收
RS-232C 規格加密資料交換頻道，個	2	8	8	8	--
圖表輸出光纖頻道(digital graphical information output fiber channel)，個	1	--	1	--	1
數位輸入頻道(16bits，LVDS，56MHz)，個	2	--	--	--	--
類比輸入頻道(sampling rate 180MHz，12bits)，個	--	--	4	--	--
類比輸入頻道(sampling rate 120MHz，14bits)，個	--	--	8	--	--
類比輸入頻道(輸入頻率 84MHz，sampling rate 112MHz，12bits)，個	--	--	--	--	2
重量，kg	12	10	20	8	8
其他	PCI 擴充卡(PMC)插槽 x2(資料處理)；擴充卡(CMC)插槽 x2x4(信號處理)	PCI 擴充卡(PMC)插槽 x2x4(資料處理)		RS-343A 數位圖表輸出頻道 x1，外接記憶體輸出頻道 x1，Ethernet 10/100 網路頻道 x1，聲音輸出頻道	

Solo-01 與 Solo-02 操作環境一覽	
操作溫度	-50~+60 度 c/-60~+85 度 c(極限)
氣壓下限	15mmHg
震動	10~2000Hz，5G 以下
衝擊(Shock)	15G 以下
線性加速	10G 以下
噪音	140dB 以下，50~10000Hz

二、人機介面及人因工程

座艙顯示器配置以正面兩個 15 吋的 MFI-35 液晶顯示器為主體，1 具含平視顯示器的抬頭顯示器 IKSh-1K，以及位在飛行員左

側、燃油桿前方之 MFPI-35 武器與次系統操作面板(fig.6~8)。上述顯示器均具有高對比度，於直射陽光下亦能判讀，均能手動或自動調整量度與對比度，也都具有光纖通道，



(fig.6,7,8 左至右) 4, 4+, 4++代 Su-27 家族座艙比對：由左至右依序為 Su-33(作者攝)，Su-27SM(作者攝)，Su-35BM(取自 Sukhoi 型錄)座艙，注意其操縱桿“歪一邊”的安置法；HUD 兩旁為頭盔瞄準具定位裝置。

MFI-35 與 MFPI-35 之大修週期(MTBF)均大於飛機本身。另有備份用的飛行資訊顯示面板。

座艙完全玻璃化，未見傳統儀表。人機介面屬於專家介面，機載電腦依任務需要改變資訊的選取與顯示方式，只顯示有用的資訊與策略建議給飛行員[8]。專家化座艙自 Su-35 開始陸續達成[9]，但 Su-35BM 有更強大的電腦故能應用更完善的專家系統，由文獻[6]所示數據研判，Sol0-02 資料處理電腦約 3/4 運算量(每秒 15 億次)便用於專家系統。

俄製頭盔顯示器(HMD)已在研製中[10]，但筆者向生產頭盔瞄準具的 UOMZ 公司及研製頭盔顯示器的 RPKB 訪問確知，Su-35BM 並不會採用頭盔顯示器(HMD)，而僅有頭盔瞄準具(HMS)(fig.9)。RPKB 參展人員表示，其 HMD 仍在研製中，並否認 HMD 未採用是來自技術性原因，僅表示現有的配置“已經夠用了”。事實上，Su-35BM 的對手機種的頭盔顯示器也大都尚在研發中。

1. MFI-35 液晶顯示器(取自型錄)

MFI-35(fig.10)螢幕尺寸 15 吋，能分割畫面顯示，能顯示 5 種尺寸之畫面，具光感應器而能自動調整亮度與對比。含 40 個操縱按鍵(顯視器週圍)與 2 個用於調整亮度與輸入參

數的旋鈕。重 12kg，連續工作時間 12 小時，大修週期(MTBF)7000 小時。其能顯示圖表、電視影像、或將兩者重合顯示。其高頻寬影像通道使其能顯示高品質的電子地圖，Su-35BM 之導航系統便含電子地圖模式，並有光纖通道對外輸出。

資料介面方面，MFI-35 有 1 條頻寬 1Gb/s 之光纖通道用於電視顯示；16 條 ARINC-429 輸入通道及 1 條 1Gb/s 光纖輸入通道；4 條 ARINC-429 輸出通道；MIL-STD-1553B 規格主線與備份線各一；並含 RS-232 及 Ethernet 介面。



fig.9 頭盔瞄準具配置(作者攝)



fig.10 MFI-35 顯示器(作者攝)

2. MFPI-35 武器與次系統操作面板(取自型錄)

MFPI-35 操作面板(fig.11)螢幕尺寸 4 吋 x5 吋，解析度 768x1024 相素，同樣具自動調光功能，含 22 個操縱按鍵與 1 個用於調光與輸入參數的旋鈕。重 5kg，連續工作時間 12 小時，大修週期(MTBF)8000 小時。其能顯示圖表、圖表與影像之合成。

資料介面有 1 條用於電視影像的 1Gb/s 光纖通道，12 條 ARINC-429 輸入通道與 1 條 1Gb/s 光纖輸入通道，2 條 ARINC-429 輸出，MIL-STD-1553B 主線與備份線各一，亦具有 RS-232 及 Ethernet 介面。



fig.12 IKSh-1K 抬頭顯示器(作者攝)



fig.11 MFPI-35 操作面板(作者攝)

MFPI-35 與 MFPI-35 目前用於 Su-35BM 與新式卡莫夫直昇機 (Ka-52 等)。

3. IKSh-1K 抬頭顯示器 (取自型錄)

IKSh-1K 抬頭顯示器(HUD)(fig.12)附加了用於顯示最重要導航與飛行資訊的平視液晶顯示器。其 HUD 部分最大可視範圍 30 度，距離 45cm 時為 25.4 度 x21.5 度。這款 HUD 除能顯示圖表外，還能顯示電視影像。複合顯示時，其可自行調整圖表亮度使達電視影像亮度之 1.5 倍以上以求清晰。其資料傳輸介面除 ARINC-429 與 MIL-STD-1553B 規格外，亦有傳輸電視影像的 1Gb/s 光纖通道。其耗電量 100W，重 22kg。

在 IKSh-1K 旁，RPKB 還展出了另一具幾乎一樣的 HUD，唯其圖形產生器改以固態技術製造(fig.13)，較現階段使用者輕巧許多，為另一有趣之展品。

4. 人因工程

Su-35BM 與 4+代很大的差別在人因工程著墨甚多。除了大部分工作由飛機自動完成（起降、空中加油）減少飛行員負擔外，他能隨時監測飛行員生理狀況，供機載電腦參



fig.13 採固態圖形產生器之抬頭顯示器與傳統者之大小對比(作者攝)

考並回傳至地面，減少事故發生，並設有語音輸入介面，能辨識飛行員在生心理壓力下之聲音變化。座艙內亦能藉調節溫度等參數以提供飛行員舒適環境（本段見[11]）。

雖然俄系武器常以“對使用者不友善”著稱，但在航空領域似乎並不全然如此。早在 Su-27 基本型，其操縱桿便已是“歪一邊”安置，而使飛行員手腕可不必過度偏折，長時間使用較不疲勞。而 Su-27 所用的 K-36DM-2 彈射椅雖被搭乘過的西方飛行員指為“座椅太硬”，但其是目前救生率最高的彈射椅，也是技術指標最能符合美製 F-22 超音速巡航需要者，故美國於 1994 年起提供經費要求俄方研製供 F-22 及 F-35 所用之下一代彈射椅，其結果便是目前用於 Su-30MK 等 4+ 代戰機的 K-36D-3.5E，雖然其最終未獲美方採用，但美方仍從中吸取技術用於自己的彈射椅。Zvezda 設計局在 MAKS-2007 展出了第五代彈射椅 K-36D-5(fig.14)，其對使用者倒是



fig.14 K-36D-5 彈射椅，後方右側為總設計師(作者攝)

非常友善——其座墊配有電熱裝置，以及按摩功能[12]！目前尚不確定 Su-35BM 採用 K-36D-3.5E 還是 K-36D-5。

三、資訊來源與射控系統

主要資訊來源包括前、後視雷達、光電探測、資料鏈、電子支援(ESM)系統等。

俄國五代戰機的雷達、電子支援、電戰、通訊等所有無線電系統將被視為一個統一系統設計，而不是分開設計後再加以整合。這種整合系統稱作“多用途整合式無線電系統”(Multifunctional Integrated Radio-electronic System, MIREs)，由提赫米諾夫-NIIP 主導。2005 年展出的 Epaulet-A 主動微型相位陣列雷達(又稱 AFAR-68，後面數字表示有 68 個天線單元)，以及 2007 年莫斯科航展展出的主雷達用 X 波段主動陣列天線(fig.15)、L 波段主動陣列天線等均是 MIREs 計劃下的產物[13]，此外，按早期 NIIP 總經理的說法，五代雷達系統還將添加毫米波段



fig.15 NIIP的主動X波段相位陣列雷達天線單元
(作者攝)

[14]。Su-35BM 已開始應用 MIREs 的局部技術，例如其中的 L 波段陣列。

1. “Irbis-E” 雷達

N-035 “Irbis-E”（雪豹-E）被動相位陣列雷達(fig.16)為提赫米諾夫-NIIP（儀表製造研究院）於 2004 年開始為 Su-35BM 與 Su-27SM-2 研製的。為 Su-30MKI 上所用的 RLSU-30MK “Bars” 的改型，在功率、視野、偵測距離（以下簡稱“探距”）、處理能力上都大幅提高，多數性能甚至直逼美製 APG-77 主動相位陣列雷達。其技術數據為（數據若無註解則同[5]）：

(1)發射機由 Oliva” 橄欖” 信號產生機與兩台 Chelnok” 獨木舟” 真空管放大器等構成，確保輸出功率峰值 20kW 及平均 5kW；



fig.16 Irbis-E 雷達實體(作者攝)

(2)工作頻率範圍為前身 “Bars” 之 2 倍 [15]。(Bars 有 12 種工作頻率，換言之 Irbis-E 工作頻率應約有 24 種)

(3)四通道接收機在噪音係數 3.5dB 情況下接收並預處理高頻信號；

(4)被動相列天線由“Bars”及“OSA”相列雷達所用者修改而來，口徑 900mm（是近年推出供 Su-27 系列所用之同類雷達中最小的，如 N-011M 口徑 1m，Zhuk-MSFE 之 Sokol 天線口徑 980mm），電子掃描視野左右上下各 60 度；

(5)掃描 60 度扇形區域需時 0.4ms

(6)增設能+60 度掃描之 EGSP-27 機械掃描裝置使水平視野增至+120 度 [同 5]，並在 EGSP-27 之後再加一旋轉基座(MAKS-2007 展出之新設計)，使雷達具有幾乎不受慣性制約的上下左右各+120 度視野(fig.17)；

(7)在 10000m 以上高空，以 100 平方度之視野(約 10x10 度之波束)對 RCS=3 平方米目標（如 MiG-21）之迎面探距達 350~400km，追擊探距>150km；若以 300 平方度視野掃描則迎面探距降為 200km（空中）或 170km（低飛目標），追擊探距則降為 80km（空中）或 50km（貼地目標）；對 RCS=0.01 平

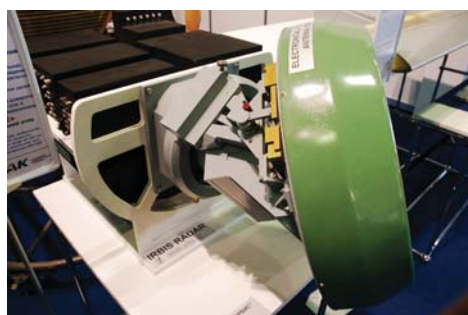


fig.17 Irbis-E 機械裝置運作示意(作者攝)



fig.18 Irbis-E 可探測來襲空對空飛彈(作者翻拍)
 方米之低被偵測率目標如部分隱形飛機及空
 對空飛彈之探距達 90km[同 5][16](fig.18)；

(8)對 50km 外密集編隊機群之解析能力
 為：間距 50~100m，速度差 5m/s，視角 2.5
 度；

(9)對空作戰時，在追蹤暨掃瞄模式下，
 可追蹤 30 個目標，並以 2 枚半主動雷達導彈
 打擊其中 2 個目標，同時以 8 枚主動雷達導
 彈打擊 8 個空中目標（其中包括至多 4 個
 300km 以上目標），即追 30 打 8 或 10（此前
 最先進的 Zhuk-MSFE 為追 30 打 6，Bars 為追
 20 打 8）。

(10)對面模式時，對 RCS=50000 平方米目
 標如航空母艦之探距 400km，對鐵路、橋樑
 類目標(RCS=1000 平方米)探距 150~200km，
 對快艇(RCS=200 平方米)為 100~120km，對戰
 術飛彈基地或坦克群(RCS=30 平方米)探距
 60~70km，可同時追蹤 4 個目標，打擊其中 2
 個[同 5][同 16]。

(11)合成孔徑模式解析度達 1m，對空對地
 模式可併行，但空地模式並行時對地追蹤目
 標數由 4 個降為 1 個[17]。

(12)航展影片指出，僅僅 4 架 Su-35BM 以
 資料鏈互通資訊便能構成 2500~3000km 防線
 (相較之下，4 架 MiG-31 僅能夠成 800km 的



fig.19 由 Su-35BM 構成之 2500~3000km 防衛正面
 (作者翻拍)

防線)(fig.19)。

(13)能識別目標機型，並以不同形狀及顏
 色之符號及數據標註之，影片內的模擬測試
 片段中，出現以紅色標出隱形目標(F-22)的畫
 面(fig.20)。

Chelnok “獨木舟” 真空管放大器便取自
 Irbis-E 之前身 Bars；相列天線改自 Bars 所用
 之 N-011M 天線；EGPS-27 機械掃描機構改自
 Bars 所用之 EGPS-6A（但操作範圍由+30 度
 增至+60 度）。這些均屬在 Su-30MKI 及
 Su-35 原型機 712 號上使用多年的成熟技術，
 Irbis-E 主要是在處理能力與訊號產生器上進
 行改良。Irbis-E 雷達除將用於 Su-35BM 外，
 也將用於 Su-27SM2 改良方案。Irbis-E 雷達已
 於 2007 年在 Su-30MKK 503 號原型機上進行
 飛行試驗。據稱第一階段試飛中已取得“正
 面的成果” (同[15])。

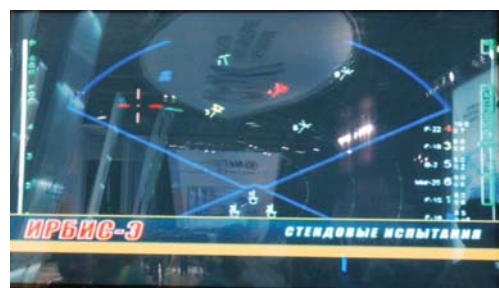


fig.20. 可見 Irbis-E 能識別目標型號，以及前後視雷
 達並用之狀況(作者翻拍)

考慮 Irbis-E 強大探測性能、天線的旋轉基座設計、以及 KS-172 超長程飛彈的技術特性可發現，Su-35BM 將因此擁有若干特性：下可壓制傳統戰機，上可抗衡隱形戰機。其對戰機性能的實質助益甚至可能高於主動相位陣列雷達與更徹底（但也更昂貴）的隱形設計，筆者將另以專文分析這些特性與優勢，在此僅列舉若干重要結論。

對傳統戰機達 350~400km 之探距搭配其 KS-172 的超長射程將對傳統戰機具備壓倒性優勢；對 RCS=0.01 平方米目標達 90km 之探距一方面令美製 F-22 以外的低被偵測率戰機難以發揮匿蹤優勢外，其可用來探測來襲空對空飛彈，搭配轉台帶來的超大視野，等於為戰機提供遠達 90km 的飛彈預警能力（後方+60 度除外），使其對隱形戰機之免疫力得以提高。

Irbis-E 雷達搭配機械掃描後視野擴增到左右上下各 120 度。且因轉台的使用使得其機械掃描速度可幾乎不受慣性制約，因而能輕易達到即時的探測性能。需注意的是，在 NIIP 的 Irbis-E 型錄中指出，“監視模式視野為+125 度”，“追蹤模式水平+-120 度垂直+-60 度”，似乎表示上述超大範圍探測能力僅適用於監視模式。不過經簡易計算研判，上

述限制可能只是第一階段的功能，這種限制理論上可排除③而使雷達在超大範圍內仍具有追蹤能力。

其中超大範圍的監視能力等於提供飛機遠程、幾乎不受天候影響的飛彈來襲主動預警功能，能讓戰機有更多時間、更多手段反制來襲飛彈。而大範圍追蹤能力讓武器發射後，只要目標仍在該範圍內，飛機便能維持對飛彈的最大導控性能（因為此時是用主雷達），即導控 KS-172 打擊最遠達 300~400km 外之傳統飛機，或 90km 外之低可視戰機。如此戰機於發射武器後便能進行更靈活的戰術機動，在維持對武器的導控的同時，降低敵機對其探測能力。倘若兩種功能能結合（即雷達在上下左右各 120 度視野模式時也能追蹤）則轉台設計的優勢將備發揮到極至。

2. 佈局獨特的主動 L 波段相位陣列雷達（數據取自航展看板）

NIIP 這種為五代戰機研製的 L 波段主動陣列天線(fig.21)操作波長約 20cm，已應用在 Su-35BM 上，裝設於翼前緣，主要用於敵我識別(IFF)。該陣列僅用於水平方向掃描，能接收來自左右各 60 度，與主頻 F0 誤差超過 30%的訊號。展方表示，該 L 波段主動陣列理論上也能探測飛機，然其不願透露探測飛機

註③ 若要讓雷達搭配機械掃描後可以具備即時探測能力，轉台要有一定的轉速，這時雷達若需精確定位便須考慮轉台旋轉的影響，而不能僅視為固定天線般操作。以轉台每秒 3 轉為例，若雷達定位不考慮轉台影響，則在以 10x10 度波束監視空域時，轉台造成的方位誤差僅佔波束寬的 1/20 以下，相當於零誤差；而在以 1~2 度寬的波束進行追蹤時，轉台造成的方位誤差占 1/2 波束寬以下，可能影響定位精度，但由於誤差仍很小，理論上可修正回來。由於轉台對監視模式不構成影響，而雷達搭配水平機械掃描已在 Bars 雷達上應用多年，因此型錄所示之有限制的操作模式是即刻可應用的。研判上述限制係在雷達尚在研發而轉台又剛推出的階段為求簡單而設。

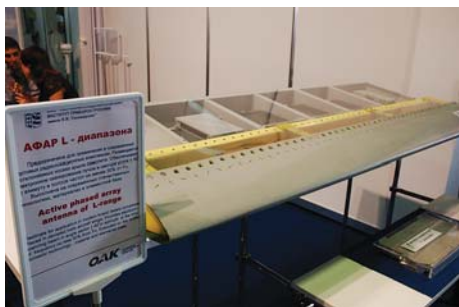


fig.21. NIIP 的 APAR-L 主動 L 波段相位陣列雷達
(作者攝)

時的操作距離，僅表示“操作距離很大，用於敵我識別時可達 400km”。

Su-35BM 上主雷達都可以先用被動相位陣列雷達暫代，而敵我識別器卻提前使用這種前所未見的五代系統，似乎頗不尋常。事實上經由對其天線安置方式的分析可知，其可能因應精確度與匿蹤性之需求而設，並非單純“追求流行”：

(1)配合選頻天線罩的設計：在俄系 4+代雷達如 NIIP 的 N-011M、NIIR 的 Zhuk 系列上，L 波段敵我識別天線陣列都是附加在主天線上的。不過在 Su-35BM 以及五代戰機上，天線罩要採用選頻技術以利匿蹤。如果繼續讓 L 波段與 X 波段天線共存，選頻天線罩顯然會更難、甚至不可能研製出來。將 L 波段移除，讓主雷達部分僅存 X 波段自然是最好

的方法。

(2)在水平方向具備 X 波段射控雷達等級的波束指向性：由展出的成品看，這款 L 波段陣列在左右翼前緣各一組，每組由約 12 個彼此緊臨的天線構成，整組陣列口徑約 1.5m (由戰機照片推算該雷達罩之長度，與現場所見相當)，亦即每組陣列的口徑相當於發射單元的 10 倍左右，且口徑內含十餘個發射單元。這與 X 波段相位陣列雷達用來構成波束的基本天線組數據相當^④。換言之，理論上其波束指向性與 X 波段射控雷達相同^⑤。能以 X 波段射控雷達之數據預測其指向性能：X 波段射控雷達可調製出寬度 1~2 度的波束，精確度可達 0.5 度級。需注意的是，這款 L 波段雷達只在橫向構成陣列，所以僅用於測方位，在垂直方向上並無指向性可言。

相較之下，傳統的敵我識別天線幾乎無指向性可言：如俄系 N-011M、Zhuk 等附加 L 波段天線的雷達，總口徑不超過 1m；美製 F-16 等則將敵我識別天線安置在風擋前方，總口徑甚至僅約 50cm；上述各式敵我識別天線之天線數通常約 5 個左右。其指向性自然遠不如這種安置在翼前緣的大口徑陣列天線。但俄製 MiG-31 之敵我識別天線也有陣列數較

註④ 一般相列雷達用來建立波束的基本天線組約含數十到上百個天線，即橫向與縱向各約 10 個天線。因此其“發射單元尺寸-總口徑”比與該口徑內天線數便與這裡提到的 L 波段陣列相當。真正影響波束性能的是“波長-總口徑”比，但天線口徑通常相當於波長，所以“發射單元口徑-總口徑”比之數量級相當於“波長-總口徑”比，在缺乏波長的精確數據時，可暫以“發射單元口徑-總口徑”比估計之。以 NIIP 的 Epaulet-A 微型相列雷達為例，其含 68 個天線，最大口徑約為 10 倍發射單元口徑，含約 10 個天線。

註⑤ 在干涉式天線中，“波長-總口徑”比約與主波發散角成正比，該值越小，主波越窄；此外，口徑內天線數越多，旁邊峰值越低但主波越強。換言之，“波長-總口徑”比越小，口徑內天線數越多，就表示主波越窄且旁波越弱，即指向性越好。

多的特點。

(3)承上，事實上敵我識別器本身並無指向性的需求，其只須發送信號，待友機收到信號後發出標示自身位置之信號以供確認，因此友機的精確位置其實可由其發送之識別信號得知，不需要敵我識別器有多高的指向性。不過，敵我識別器具備高指向性自然更具優勢：首先，高指向性表示能將大部分能量集中在小角度內，此即在相同發射功率下能有較大的操作距離，或是用較小的功率滿足所需之操作距離；其次，高指向性使戰機能僅對目標區發送信號，能大幅減少暴露自身電磁訊號的機會。此外，高指向性可能也有提升敵我識別精確度的效果。

(4)高指向性以及大操作距離使其具備作為高保密性寬頻通信天線之條件：現有 Su-27 系列之通信天線，VHF/UHF 波段操作距離約 400km，HF 波段約 1500km，而這種新的“L 波段雷達”操作距離便與 VHF/UHF 相當，故若能作為通信用途，理論上可部分取代後者（視 L 波段雷達當通信系統使用時實際操作距離而定，航展時展方所言之 400km 並無明確指出操作狀況）。由於 L 波段波長較 VHF/UHF 短得多，故理論上通信頻寬可以更大，加上這種 L 波段雷達能發出指向性波束，隱密性自然優於不具指向性的傳統通信天線，相當適合戰術資料之保密傳輸。由於這種雷達屬於五代戰機“整合式無線電系統”（MIREs）的一部分，該系統便是將所有無線電系統視為一個整合式系統來研製，既然這種 L 波段相列雷達具備上述通信優點，吾人自然不能排除其可能性。

(5)該陣列掃描範圍 $\pm 60^\circ$ ；Su-35BM 主翼掠角 42° ，換言之，在 Su-35BM 上 L 波段的操作範圍約在 $\pm 100^\circ$ ，搭配主雷達 $\pm 120^\circ$ 之操作範圍，能讓戰機在以側面面對戰場的情況下完成各項探測、識別工作。

(6)有助於傳聞中的電漿匿蹤系統之使用：五代戰機甚至 Su-35BM 可能使用電漿匿蹤系統。對 X 波段匿蹤的電漿必然會屏蔽 L 波段。將 L 波段外移至機翼，機身部分便能順利的使用電漿匿蹤，至於機翼部分即使為因應 L 波段之使用而不包覆電漿，不過由於其外型簡單之故，要進行匿蹤處理相對簡單。

(7)可能有助於反制匿蹤戰機：現有匿蹤戰機主要對 X 波段隱形，對於較長的波長，一方面會發生繞射的地方更多因而較難像對 X 波段那樣將雷達波反射到不易接收的方向；二來吸波塗料的研製也較困難（傳統吸波塗料之厚度與波長有關，波長越長，塗料往往要越厚），因此以 L 波段可能在較遠的距離發現匿蹤戰機。若然，則這種高指向性 L 波段雷達將能確認匿蹤戰機的精確方位（例如 L 波段探測到但 X 波段沒探測到的便視為匿蹤目標）。這將更有助於反制匿蹤飛機。甚至，在某些有限制的情況下還可能得到三維座標，例如經由滾轉理論上便能確定該匿蹤目標的俯仰座標，或是將目標“放”在兩具 L 波段雷達的交會處（飛機正前方約 $\pm 15^\circ$ 範圍）而綜合兩具雷達之資料求得三維座標，是否能以上述方法得到射控資料相當值得注意。

經由以上對這種新的 L 波段陣列之設計的分析可知，將 L 波段外移至機翼，一來能滿足匿蹤設計需要，也能藉由超大口徑換取

較佳之波束指向性，這又有助於增強匿蹤性能甚至使 L 波段成為戰機另一種有效的探測手段。可謂一舉數得，而主動式相位陣列天線則是讓其能“想放哪就放哪”的最佳途徑。

3. 後視雷達

早期報導顯示 Su-35BM 將裝備 Kopyo-DL 作為後視雷達，為法佐特龍-NIIR 的 Faraon “法老”之改型，採用具非等距圓形天線陣列(fig.22)之 N-012 被動相列天線。Faraon 的初始型(又叫 Kopyo-F，“矛-F”)具左右上下各 70 度視野、對 RCS=3 平方米之戰機目標之最大迎面探距達 75km，追蹤暨掃描模式時能追 20 打 4，重 75kg，其中有一種改型 FARAON-M，降至 45kg。除此之外，NIIP 自己的 Osa “黃蜂”雷達(fig.23)亦可做為後視雷達。

雖然航展公布的原型機尚未安裝後視雷達，然 NIIP 的雷達操作模擬畫面中也出現與後視雷達並用的畫面(fig.20 與 24)，而 Su-35BM 模擬器上的空情顯示視野則達 360 度，因此應該僅是原型機尚未採用而已。另一方面，最終若採用後視雷達，其將為前述 Kopyo-DL 或新產品則仍待追蹤。

4. OLS-35 光電雷達與 Sapson-E 光電莢艙（數據若無註解表取自型錄）

綜合 OLS-35(fig.25)及 Su-35 型錄得知。其尺寸 766x540x763(mm³)，內含掃描式紅外線探測儀、電視攝影機、雷射測距儀。掃描範圍垂直-15~+55 或 +60 度，水平+ -60 或 + -90 度（詳見下文），視場（指瞬間的視場，非透過掃描達成）120 度 x24 度（但新版 UOMZ 官網記為 150x24 度[18]），全空域掃



fig.22 左 N-012 採用類似的非等距圓形天線佈局，圖為 NIIR 的 Zhuk-MSFE 雷達(作者攝)

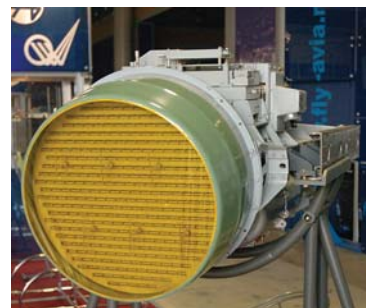


fig.23 右 NIIP 的 Osa “黃蜂”小型相列雷達，其天線技術被用於 Irbis-E(作者攝)



fig.24 Su-35 模擬器畫面，注意右上部，其空情顯示視野為 360 度

描週期 4 秒，操作溫度攝氏-40~+60 度，能同時跟蹤 4 個目標，雷射對空測距距離 20km (Su-27 則是 3km，老 Su-35 為 8km)，對地 30km(Su-27 為 5km，Su-35 為 10km)，測距誤差 5m，重 71kg(Su-27 的約 173kg，Su-35 的達 220kg)，且體型更小，因此裝機時所用的整流罩也更小(fig.26)。電視攝影機能用於畫間目標（對空對地）識別。

在探距與視野方面，OLS-35 與 Su-35 型錄有較大的出入。OLS-35 型錄上記載其視野為水平+ -60 度，垂直-15~+55 度，追擊與迎擊探距分別為 70 與 40km；Su-35 型錄則計為水

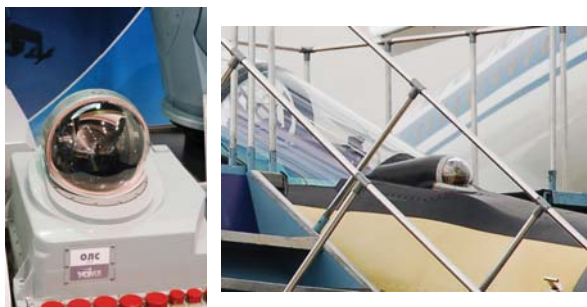


fig.25 左 OLS-35 光電探測儀(作者攝)

fig.26 右 OLS-35 外觀，體型與整流罩明顯較舊型號小 (作者攝)

平 $\pm$ 90 度與垂直-15 $\sim$ +60 度，追擊與迎擊探距分別為 90 與 50km。

探距的差異可能與數據取用標準有關。筆者向 UOMZ 展方詢問，為何之前 Su-30MKK 所用的 52Sh 都達到迎面 40km 追擊 90km 之探距，而 OLS-35 反而只有 70km。展方表示，那是數據取用標準的不同，52Sh 的 90km 是最大探距，而 OLS-35 的 70km 是“保證探距”(guaranteed range)，若以相同於 52Sh 的標準看，OLS-35 要探到 140km 都沒問題^⑥。Su-35BM 型錄所示之探距若非指改良型號，就是以不同標準取用數據。若以 40/70km 之保證探距換算回最大探距，則探距可達 80/140km。

視野的部分，筆者事後發現端倪：UOMZ 展出的 OLS-35 的玻璃罩形狀與之前 Su-27 用的 OLS 系統類似，都不到半個球面，

因此水平視野先天受到制約。但於戶外展出的 901 號 Su-35BM 的光電球玻璃罩則大於半球(fig.27)，與 MiG-29K、MiG-35 所用的視野達 $\pm$ 90 度之光電探測儀類似，這樣一旦機械性能許可，就足以達到 $\pm$ 90 度之視野。而在稍後的 UOMZ 官網中則提及水平視野“不小於 $\pm$ 60 度”，並指出其視場為 150x24 度[同 18]，這已超過 $\pm$ 60 度範圍。據此研判 OLS-35 之水平視野應取用 Su-35BM 型錄之數據，即 $\pm$ 90 度。

另外筆者也問得，OLS-35 之設計並非作為熱像儀，主要是用來測定方位。比較其視場(120x24 度或 150x24 度)與 MiG-35 的熱像儀(10x7.5 度)可推測，其或許是犧牲熱影像識別能力來換取對較大空間的凝視能力，以便有較快的掃描速度與較佳的多目標處理能力(全空域掃描 4 秒，能同時跟蹤 4 個目標)。另一方面，若此項推測為真，則表示 OLS-35 在



fig.27 OLS-35 玻璃罩外露部分超過半個球面，這是與舊型號(藍色虛線)很大的差異(作者攝)

註⑥ 雖然廠商未指出所謂“保證探距”的條件是指“任何天候下的保證探距”還是“在某些天候下具有很高機率的探距”，但依據其後來指出“以 52Sh 標準看其探距可達 140km”研判，其指後者，因為 70km 為 140km 之半，而一般雷達、光電系統對“最大探距”的定義約是探測機率 50%時之探距，而在最大探距之半探測機率則達到 80%、90%或更高，相當於“保證探距”。因此研判所謂“保證探距”係在正常天候條件下探測機率很高的探距。若換算成最大探距，則 OLS-35 迎面探距可達 80km。)



以 UOMZ 的型錄上的模式(水平+/-60 垂直-15~+55 度)掃描時只需動用垂直掃描能力因而能更快速掃描；而以 Sukhoi 型錄之模式(水平+/-90 垂直-15~+60 度)掃描時需動用兩個維度的機械掃描因而較慢^⑦。

在進行對地攻擊任務時，可攜帶 UOMZ 研製的 Sapson-E 光電莢艙，其配有電視攝影機、熱影像儀、雷射測距儀與照明儀、以及雷射定向儀。其口徑 360mm，長 3m，重 250kg，使用溫度攝氏-60 到+50 度。垂直視野+10~-150 度，水平視野+/-10 度，但探測頭可繞軸+/-150 度旋轉[19]，因此實際上可探測整個下半球。

5. SUO-35P 武器管理系統(若無註解表取自型錄)

“武器管理系統”(SUO)簡言之係戰機航電系統與武器系統之媒介，其收到射控命令後，負責武器的發射準備與發射工作。俄係戰機的武器管理系統均由庫爾斯克的 Aviaavtomatika 設計局研製，每一代都在功能性與自動化上有所提升。

Su-35BM 所用的 SUO-35P 系統(fig.28)採用五代戰機武器管理系統原型的開發經驗，在次系統功能分布、武器準備與武器發射程序等方面均採用新的概念，在製造技術上大量以固態技術取代傳統電機設備。其亦為首種以電腦進行初步設計的 SUO 系統。與 Su-30 的 SUO-30 相較，SUO-35P 內存武器參數種類由 30 種提升到 90 種。

SUO-35P 為俄國第一種多微處理器武器

管理系統，以往許多次系統的功能在此都整合進微處理器內，而以往的電磁式繼電器在此則換為固態繼電器(TKN)。這種固態繼電器於第三屆國際晶片展“ChipEXPO-2005”上以“足以取代進口品”為由得到金牌。

Su-30MKK 的 SUO-30PK 武器管理系統有一項相當特別的功能：以一種稱作 LZI 的外插模組模擬各項武器參數，讓戰機不需掛真實武器就進行武器發射訓練(同[1])。這將減少訓練成本。美國也基於同一理由而為 F-35 開發武器使用模擬軟體。只是 LZI 是以真實的外插模組來模擬武器使用，而 F-35 則計劃直接以軟體達成。Su-35BM 的 SUO-35P 理論上當然應繼承上述功能，且由於其擁有更大的記憶容量，故將上述 LPI 模組之功能整合進系統內並不無可能。

6. 通訊系統與三軍通用資料鏈

Su-35BM 採用 NPP Polet 研製的 S-108 通訊系統，含 2 個 UHF/VHF(垂尾頂端)與 1 個 HF(右側垂尾前端)頻道，以及 1 組 Link-16 等級的資料鏈系統[20]。資料鏈系統稱為 MT-3E，擁有 16 條通道[21]，且為三軍通用資料鏈[22]。側衛戰機開始使用 TKS-2(R098)資料鏈系統，能集結 12 架飛機作戰；Su-35 用的是 TKS-2-27，Su-27SM 與 Su-30MKK 用 TKS-2-16。其中 TKS-2-16 擁有連結 16 架飛機之能力，能讓僚機全程無線電緘默作戰[23]。較歐美新型戰機之 8 架為多。

7. 電子支援系統

Su-35BM 據稱採用全新的電子支援系統

註⑦ 本文所列之全空域掃描時間(4sec)取自 Sukhoi 型錄)



fig.28 SUO-35P 武器控制系統(部分)，電路版，以及 TKN 固態繼電器(作者攝)

(ESM)。按官方型錄，其預警系統包括雷達預警系統(RWR)、雷射預警系統、以及飛彈來襲警告系統。

這裡將“RWR”與“飛彈來襲警告系統”分開，暗示其飛彈來襲預警並非單靠 RWR，再加上舊版 NAPO 官網提及 Su-32 具有“能測知飛彈的紅外線雷達”，似乎更能確定 Su-35BM 上將具有感熱式飛彈預警系統。然事實上筆者環顧 Su-35BM 四周，在一般會裝設該系統之處(機首、機背、機腹)均未見其芳蹤。甚至連在光電球前方的飛彈來襲警告器也不復見。現場一位參展人員便指出這架飛機沒有飛彈來襲警告器。

不過筆者於室內攤位訪問到一位頗資深的參展人員，他指出“Su-35BM 具有幾乎球形的視野，能偵測來襲飛彈，感應範圍既在雷達波段，也在紅外波段……”。因此，可能係該機仍非完整版，故仍缺少部分設備。例如 901 號機的尾刺預定裝設誘餌發射器的地方尚未見到發射器。除紅外線預警，另一個相當重要的“飛彈來襲警告系統”便是以其 Irbis-E 相列雷達進行主動預警。Irbis-E 雷達採用新的設計而能對 240×240 度² 範圍內目標進行即時監控，對空對空飛彈探距甚至達 90km，詳見本文 Irbis-E 雷達一段。

歐美自四代機起亦紛紛將電子支援系統視為整合系統發展，其似乎已成為戰機上最複雜的航電系統，甚至幾乎已成為比雷達還重要的探測系統。雖然目前俄國有關第五代電子支援系統以及 MIREs 的其他細節可謂付之闕如，但由文獻[6]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”中可見，其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；其傳輸頻寬與資料處理需求大於等於雷達與光電系統之總和(但信號處理需求較低)，由此可窺見俄國在這方面正緊跟著潮流。而由 Su-35BM 的計算系統性能已達到或超越該圖所示數據推測，Su-35BM 可能已跟上這股潮流。

四、自衛系統

Su-35BM 採用卡魯加無線電工程研究院(Kaluga's Research Institute of Radio Engineering, KNIRTI，為俄國戰機電戰系統之主要研製單位)研製的 L-175M 主動干擾莢艙，以及 PAK-FA 所用之新型自衛系統。其主動干擾莢艙能保護自身，亦能保護機群[同 22]。

所謂“PAK-FA 所用之自衛系統”為何？依據有關俄國自衛系統發展之資料研判，可能包括：(1) KNIRTI 研製的拖曳誘餌(2)主動光電干擾(以雷射燒毀追熱導引頭)(3) Su-47 上測試的“電漿誘餌”。

在 MAKS-2007 期間，筆者於 KNIRTI 展區查證得知其拖曳式誘餌仍在試驗中，短期內將不會實用化。

相當值得注意的是 Su-47 測試的“電漿誘

餌”。據報導其是在飛機的某些部分建立“燃燒區”而產生電漿，依據電漿性質的不同而能干擾雷達、紅外線、雷射等。“燃燒區”這個用詞容易讓人誤以為是飛機要攜帶特殊物質去燃燒，但實際上靠燃燒物質的溫度不可能產生電漿，而所謂的“燃燒”其實是俄文中“維持電漿”的術語。因此這種“電漿誘餌”實際上是在飛機的局部產生電漿，透過電漿性質的改變去干擾敵人，因此並不是一般的“實體誘餌”。雖然目前無法得知這種“誘餌”的詳細機制與效果，但至少足以推測，這種“誘餌”的“數量”是很多或是無限量的^⑧。

不過並不能確認 Su-35BM 是否擁有這種電漿誘餌技術，此外，其仍在尾刺部分裝有傳統的誘餌發射器。

五、其他可能系統與特色

本段將介紹一些在 Su-35BM 相關報導中“名不見經傳”(尚不確定型號)但在 Su-30MKK 與 Su-33UB 等戰機上已落實的一些符合第五代戰機特性的設備或設計，這些設備或概念理論上亦會用於 Su-35BM。

1. 自動空戰功能

俄式戰機頗強調自動化，Su-35 便具自動逼近目標並發射武器之功能[24]。自動化的追求到 Su-33UB 發揮的淋漓盡致：飛行員於機砲空戰時只需選定目標並扣板機即可，不需

思考怎麼開飛機(同[3])。在歐美戰機中，JAS-39 之改良計劃包括此項。

2. 遙控檢測與即時資訊分析

F-22 所具有的資料鏈遙控檢測功能(即以資料鏈傳回戰機自我檢測結果，或由地勤遙控檢測機上狀況等)於俄國確定在 Su-30MKK 上實現，並可能可追溯至更早的 Su-35。Su-30MKK 憑藉的是由 Aviaavtomatika 設計局研製之 AIST-30 即時資料分析系統，包括機上的 BIAVS 分系統(處理器 16MHz，容量 32Mb)及地面的 NIAVS 分系統，兩者由資料鏈相連。簡言之，BIAVS 是飛機與 NIAVS 聯繫的媒介，讓 NIAVS 更快的運算速度和更大的資料庫(用 Intel 的 Pentium-200 處理器；處理速度 200MHz；RAM 容量 32Mb；紀錄器容量 2.1Gb)來“擴充”飛機的功能。遙控檢測只是 AIST-30 的附屬功能，其主要功能是分析資訊並以之規劃飛行路徑及提供建議等，也用於導航、編隊內精確定位、黑盒子(助於找到失事飛機)。據稱是功能最多的資訊分析系統(同[1])。除了 AIST-30 外，2007 年莫斯科航展時 Aviaavtomatika 設計局型錄中還有稱為 IASRV-R 的資訊分析系統，以及 KARAT-B 系列資料記錄與分析系統，兩者都具有空中與地面部分，能透過無線電讓地面站台得知飛機狀況並進行即時分析，其中 KARAT-B 其實本身就是一種“黑盒子”，也應用在運輸

註⑧ 倘若其僅是單純的將周圍空氣電離成電漿，則其運作僅耗電能，且“誘餌”僅在被攻擊時才使用，因此使用時間很少，“數量”理論上無限；若有特殊需求而需自帶特殊氣體，則氣體的總量會限制“誘餌的數量”，但如在低溫電漿的濃度範圍內(干擾雷達波之電漿，理論上便在低溫電漿範圍)，以及誘餌“局部”及“短時間”使用情況下，所需的氣體量極為稀少，理論上幾公克或幾十公克的原料就可以提供極為“大量”的誘餌。

機上。由以上資訊可知，透過無線電讓地面隨時掌握機上資訊已成為目前俄系戰機的標準配備。

這種功能在軍事上有助於提升後勤效率：由於地面站台在飛機著陸前便了解飛機狀況，故地勤可省略許多檢測工作。甚至飛機未落地，料件便已送達。而在平時這種功能有助於提升軍民用飛機之飛安：當前的軍民用飛機在失事後，在飛機殘骸未尋獲之前，往往只有失事前與飛行員的無線電語音通信得到的片面資料可供分析，因此空難的真正原因以及空難當時的機上狀況須待尋獲“黑盒子”後方能知曉。而上述將黑盒子資料及時傳給地面的功能讓地面人員能隨時掌握機上資訊，在有危安因素時提供飛行員解決之道，如此便可降低空難發生機率。

3. 自動著陸

早期報導指出 Su-35BM 將具有自動著陸功能(同[11])，這種消息的可能性為何？俄方又有何技術背景？

俄格洛莫夫試飛院於 1996 年起因應空中加油的導航需要(在大空域搜尋加油機，以及加油時精確定位)開發了“衛星-無線電導航系統”(Satellite-Radio-Navigation-Kit, SRNK)，是一種以衛星、無線電進行不同 SRNK 系統之間精確定位的系統，該系統在滿足空中加油需求後(相對位置誤差 2m，速度誤差 0.01m/s([25])，開始朝全自動降落功能發展。至 2000

年至少完成 34 次全自動降落試驗。據稱將裝備於所有飛機，包括改型飛機和未來飛機。2007 年莫斯科航展上梁贊儀器工廠(GRPZ)的型錄上便有一種稱為“著陸衛星系統”(Landing Satellite System, LSS) 的相對定位系統，雖然不能確定其與上述 SRNK 系統的關連，但其運作原理是一樣的。LSS 分為機上的 LSS-A (3kg) 以及地面的 LSS-LS (15kg)，系統自主定位時位置誤差 20m，速度誤差 0.1m/s，但當啟用雙系統進行相對定位時(以無線電相連彼此校正)，位置誤差降至 0.5~0.7m 以下，速度誤差 0.05~0.07m/s。參考美德 X-31 自動著陸研究計畫開出的需求，LSS 系統僅數十公分的位置誤差已大致滿足全自動降落的定位需求^⑨。因此在 Su-35BM 量產前這種技術應已有一定的成熟度。

六、結語

Su-35BM 的中央系統已達到歐美最先進水平甚至有過之，部分航電設備亦同歐美最先戰機般採用光纖以進行超高頻寬之資料傳輸，此項訊息使吾人在分析 Su-35BM 乃至五代戰機與其西方對手之性能差異時，能排除航電設備這項傳統上的不確定性。電腦系統是俄系 4+ 代戰機(Su-30MKK 等)與西方最先進戰機(F/A-18E/F、F-16C/D Block 60、EF-2000 等)最主要的劣勢，排除這項劣勢後，Su-35BM 之超機動性與武器系統優勢將足以充分發揮。

註^⑨ 用於自動著陸研究的 X-31 的相對定位需求在“公分級”[26]，精度可能比 LSS 系統還高，不過進行該研究的 X-31 探索的不只是自動著陸，而是超短距高攻角著陸，其已測達以 45 度攻角著陸，並朝“以 70 度攻角著陸”邁進。因此 LSS 數十公分級的誤差仍不無可能賦予其實用的全自動著陸能力。



參考文獻

- 一、楊政衛,“從 Su-30MKK 看俄國新型機載航電系統”,空軍學術雙月刊(民 95.08)
- 二、Yefim Gordon,“Sukhoi S-37 and Mikoyan MFI”,Midland Publishing (England,2001)
- 三、“SU-33UB SHIP-BASED COMBAT TRAINER”, ВЕСТНИК АВИАЦИИ И КОСМОНАВТИКИ (航太學報), Russia (6 .2000),p34~35
- 四、“Сосер” Avionics”, ВЕСТНИК АВИАЦИИ И КОСМОНАВТИКИ(航太學報), 2008.2,p43~45
- 五、Андрей Фомин,“Новый подробности о б РЛСУ «Ирбис» для истребителя Су-35”,Взлёт,2006.4,p41.(Andrei Formin, «更多 Su-35 的 Irbis 雷達的細節»)
- 六、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。(本書審閱者有 Zhukovsky 軍事航空技術大學副校長,第二中央研究院(TsNII)院長,及俄國空軍科學技術委員會主席等,極具參考價值)
- 七、“F-22 Raptor Avionics”, <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/f-22-avionics.htm>
- 八、“Су-35 - четыре с двумя плюсами.”, Аэрокосмическое обозрение 02/2005
- 九、楊政衛,“Su-35 型戰機”,空軍學術雙月刊,民 96 年 2 月
- 十、“Su-34 trails”,AirFleet 3.2004, p5
- 十一、“Су-35 - четыре с двумя плюсами.”, Аэрокосмическое обозрение 02/2005
- 十二、2007 莫斯科航展看板資料
- 十三、“Су-35 в шаге от пятого поколения”(«5 代戰機腳邊»的 Su-35),Взлёт, 8-9.2007, p.44~51
- 十四、“Yuri Bely, Tikhomirov-NIIP's Director General:Our Main Priority Is The Radar For The Fifth-Generation Fighter”, AirFleet2004.3, p34 (Tikhomirov-NIIP 總經理訪談)
- 十五、“«Сухие» В Китае --Сегодня и Завтра» (Sukhoi 在中國,今天與明天), Взлёт, 2006.11, p.28~31
- 十六、“Су-35 в шаге от пятого поколения» («5 代戰機腳邊»的 Su-35), Взлёт, 8-9. 2007, p.44~51
- 十七、2007 莫斯科航展期間 Irbis-E 型錄
- 十八、UOMZ 官網 OLS-35 型錄(<http://www.uomz.ru/index.php?page=products&pid=100175>)
- 十九、UOMZ 官網 Sapson-E 型錄 (<http://www.uomz.ru/index.php?page=products&pid=100065>)
- 二十、“Су-35 в воздухе!»,Взлёт,2008.3(№39),p26~31
- 二十一、漢和防務評論,2006.3
- 二十二、2007 年莫斯科航展, Su-35 型錄(可至以下網頁下載 <http://www.knaapo.ru/rus/products/military/SU-35.wbp>)
- 二十三、1998~2000 期間之 AirFleet 雜誌
- 二十四、Sergei Drobyshhev,“Sukhoi Su-35”, <http://www.sci.fi/~fta/Su-35.htm>
- 二十五、Andrei Formin,“Flanker Story”, AirFleet
- 二十六、<http://www.flug-revue.rotor.com/FRHeft/FRH0307/FR0307f.htm>

作者簡介

楊政衛先生,筆名楊可夫斯基為尖端科技專欄作家。