



匿蹤與反匿蹤的理論基礎： 反匿蹤技術、戰術與部署

軍事專欄作家 楊政衛

提 要

了解了RCS的意義、RCS的方向性、以及RCS的量級與波段的關係後，有助於研究反匿蹤技術的可能性與戰法。自古以來矛與盾本來就是彼此競爭的關係，匿蹤科技在進展，探測技術也在進步，誰敢保證匿蹤飛機永遠可以像波斯灣戰爭時的F-117A那樣如入無人之境的作戰呢？當年F-117A的成功說穿了是用有世代之差的技術去打壓上一代技術，這不代表匿蹤科技也可以如法泡製的壓制同世代的探測技術。

前言一概論以及討論範疇界定

要如何「反匿蹤」？在很長一段時間，匿蹤戰機只有美國擁有，美國的盟邦也認為自己可以得到匿蹤戰機，所以自然不太會去公開研究如何反匿蹤。「反而深受其害」的中共與俄羅斯就有公開將反匿蹤研究發表到科普等級文獻。只是過去兩者科技層次不同，研究方向自然有差。俄國自己最先進的防空系統其實已經逐漸具備反匿蹤能力，所以俄國強調的是「不存在看不見的飛機，用我們這套系統就有機會打」，¹也就是以美國的等價對手的姿態，以技術的方法實現反匿蹤。

而中共在2000年前後的科普文獻則探討用光學、肉眼、聲音等方法找出匿蹤戰機

然後加以打擊，或是用大量的傳統飛機施以「狼群戰術」的戰法。這些文獻來自科普文獻，未必代表解放軍真正的意圖，只是體現了在技術方面真的無解的情況下，要基於不利的處境去與敵對抗的方法。這些方法理論上當然可行，例如用大量戰機去攔截F-22，F-22當然不可能對所有戰機匿蹤，總會有幾架可以發現F-22並打擊之。只是如果一開始不知道F-22要去哪裡，要在何時將成批的飛機派到何地去攔截F-22？此外，這又牽涉到大機群管制的問題。如果要用大量的防空飛彈或戰機去反匿蹤，理論上可以，可是硬體建置成本與人事成本會大幅提高，兵力規模也必須提高，這剛好與現代化軍隊的發展趨勢相牴觸，絕不是理想方案。

還有一類常在科普文獻看到的反匿蹤

¹ 類似言論可見於S-300系列的宣傳資料或介紹文。

技術，是多基雷達。有別於現代探測雷達將發射機與接收機整合在一起，多基雷達反璞歸真，像最早的雷達一樣將發射機與接收機分開，只是分得非常遠，隔個數十甚至數百公里，這樣一來，從匿蹤飛機反射的雷達波或許不會回到發射機的方向，卻會被遠離發射機的接收機所接收。這技術理論上可行，但多少有限制，例如發射機與接收機往往要隔得夠遠，那麼就必須要有夠大的領土來裝設，例如如果台灣要防禦來自日本的匿蹤戰機，台灣北部的寬度就不足以安裝多基雷達。

此外，發現匿蹤目標是一回事，還要能加以打擊才能反匿蹤。而實施攔截任務的，不外乎是戰鬥機與防空飛彈。如果有一技術能以操作現有防空飛彈、攔截機的習慣，就可以反匿蹤，那麼整套反匿蹤戰法就可以輕易的實用化，反之，如果發展一套需要全新戰法的反匿蹤技術，就會在將技術成熟化之餘，還需要複雜的人事訓練。

為此本文在這裡限制討論範疇，主要聚焦在可與現有防空系統、戰鬥機相結合的反匿蹤技術。具體的說，就是用發射機—接收機一體化的探測系統發現匿蹤目標，然後發射防空飛彈或派出戰機攔截的方法。再一次強調，這裡討論的不包括所有的反匿蹤方法，而是與現有防空習慣吻合，因此可以輕易實用化的方法。此外，以下主要討論的是

雷達，因為雷達畢竟是目前唯一能進行區域等級防空的探測系統。

此外，這裡討論的反匿蹤技術更嚴格的指「可以在視距外反制匿蹤戰機」的「區域反匿蹤能力」，所以像機砲纏鬥領域任何戰機都可以反匿蹤，但不在本文討論範疇。之所以要嚴格的界定在「區域反匿蹤」能力，也是為了與現代軍隊作戰習慣接軌：現代化的空軍與防空系統只需要部署在一個基地，就能負責至少是城市級範圍的防守，過程甚至可以高度自動化。如果反匿蹤技術僅具有視距內的點防禦能力，那麼就必須回到過去的多點部署、更仰賴人工的作戰型態，已不符合現代化軍隊的人力規模與操作習慣。

依據上述嚴格限定，則包括S-300PMU1、愛國者PAC2在內的先進防空飛彈，以及現役的F-15/16、Su-27/30MK、MiG-29系列、幻象2000等先進戰機通通不及格，這也反映出匿蹤科技的成功。只有若干最先進的系統方能一搏，這大約是指2000年以後服役的最先進系統。首先我們將具體的討論各個最先進的主要探測波長探測匿蹤目標的可能性，然後進一步討論如何射控。

各主要探測波段探測距離估計

概括的說，現代匿蹤技術主要是針對Ku、X、C波段，並部分涵蓋S波段，²特別是其中的8~12GHz的X波段，³越遠離這個波

2 Dave Majumdar, "Chinese and Russian Radars On Track To See Through U.S. Stealth", USNI.org, 29.JUL.2014, <http://news.usni.org/2014/07/29/chinese-russian-radars-track-see-u-s-stealth>

3 "Почему русские радары видят самолеты-невидимки", Российская Газета, 10.JUN.2014



段，效果就會越來越差，而越先進的匿蹤科技通常都是靠材料的方法去擴大可以匿蹤的波段。理論上只要遠離這個波段，就可以大幅抵銷匿蹤技術的優勢。遠離X波段而常用的有頻率更高的毫米波(40GHz)、或頻率較低的30MHz~3GHz。「俄羅斯報」在2014年6月一篇名為「為什麼俄羅斯雷達能看到匿蹤飛機」的文章便指出，30MHz~3GHz的波段發現匿蹤飛機的效果很好。⁴

2014年7月，美國海軍研究院網站(www.usni.org)引述前海軍高階軍官的意見，認為中俄等國已開始大量使用L波段及更低頻率的雷達，在新的電腦科技下，這些雷達已威脅到F-22、F-35的生存性。他指出，F-22、F-35的匿蹤科技特別針對Ku、X、C波段，並部分涵蓋S波段，但用L、UHF與VHF波段就能看到他們，只是以往這些較低頻的波段精確度不足以導控飛彈，所以被視為較無威脅，然而在現代電腦科技的幫助下，這些較低頻率雷達已越來越具威脅性，足以導引飛彈。「我沒辦法想像，在沒有對較低頻波段採取隱匿措施的情況下，要如何存活至2020或2030年」。⁵

以下詳細討論各主要波段探測匿蹤目標的可能性。

1. 米波與VHF

如果雷達波長在1m以上，波長與飛機大部分部位的尺度接近，回波並非來自反射，

而是繞射或共振，這時飛機的匿蹤外型效果大減，可以當做普通飛機。而1m波長與現代匿蹤科技主要針對的X~L波段差距太大，使得吸波塗料的效果也大為減少。因此對1m以上的波長而言，針對X~L波段的匿蹤措施可視為無效。

B-2轟炸機是特例，由於轟炸機體型龐大，因此對1m波長而言很多地方的匿蹤外形應該還是有效，因此B-2的外型對1m波長還是會有隱匿效果，只是會比較差，塗料亦然。而如果是到了VHF波段(波長10m)，則B-2的匿蹤外型效果也會大減。

米波、VHF甚至更長波長的雷達主要問題在於精確度。雷達的測距誤差與波長大約成正比，波長越長測距誤差必然越大，只是測距誤差再怎麼大，與飛彈射程、飛機航程相比幾乎為零，也就是說可以由飛機與飛彈的飛行來補償，不會影響攔截任務。方位誤差比較嚴重，常常造成數公里甚至數十公里的誤差。例如1度的誤差在100km外就可以造成約2km的橫向誤差。

如前文討論過的，方位誤差與探測波束寬度有關，後者與波長—孔徑比成正比。也就是，長波長雷達的口徑要更大，才能有小波長的指向性。例如戰鬥機的X波段雷達波長為3cm，天線30~100cm可以有射控級指向性，以此換算，波長1m的雷達的口徑要有10~30m才能有上述X波段雷達的指向性，

4 "Почему русские радары видят самолеты-невидимки", Российская Газета, 10.JUN.2014

5 Dave Majumdar, "Chinese and Russian Radars On Track To See Through U.S. Stealth", USNI.org, 29.JUL.2014, <http://news.usni.org/2014/07/29/chinese-russian-radars-track-see-u-s-stealth>

VHF所需的口徑會更大。很顯然這種等級的天線不可能用在飛機上，所以僅限於陸基。

通常因為天線結構強度的限制，高度不會建得太高，而寬度則是只要有土地就可以放天線，所以寬度往往足夠。因此1m波長以上的陸基雷達通常可以藉由很大的橫向尺寸來獲得很精確的方位指向性，而垂直方向會差得多，因此會以方位探測為主。

另一方面，長波長雷達在波束指向性與短波長相同的情況下，由於元件與單元間距更大的緣故，通常可以有更大的功率而不用擔心過熱，這也有助於提升距離。

例如俄製Nebo「天空」VHF波段雷達，就是一種車載機動型雷達，其天線可折收而利於機動，使用時則展開，其尺寸非常大，使得精確度足與機載X波段媲美。其較新改型Nebo-UE對10,000~20,000m高的戰機類目標探測距離達310~400km，由於對VHF波長達10m，幾乎與戰鬥機尺寸相當，因此匿蹤外型幾乎無效，所以這套雷達對匿蹤戰機的發現距離也大約在這一範圍。對RCS=1.5平方米的目標的測角精度達0.2度(12角分)，⁶已超越許多機載X波段射控雷達(0.5度)。有了這樣的雷達，至少就可以進行最早期的預警，就算垂直精確度不足，也足以指派攔截機前往攔截。

可以做個概算，0.2度的方位誤差在400km外對應的橫向誤差約1.4km。而垂直方向上可能放大數倍，即若干公里，已在視距內。換言之戰機群接受Nebo-UE這類VHF雷達指引，前往威脅區，可以「無縫接軌」到自己的探測系統。

米波、VHF探測的另一優勢是隱匿性。一般戰術戰機的雷達預警接收器所能警戒的頻率下限是2GHz(西方)或1.2GHz(俄國)，極少數可以到500MHz(少數西方戰機如JAS-39NG)，^{7,8}均無法偵測米波與VHF。

2. L波段雷達

L波段(約1~2GHz)與S波段(約2~4GHz)常被用在船艦、預警機的探測雷達、防空雷達，或是飛機的自衛預警雷達上。他們的波長是X波段的10倍級，差距不上不下，所以匿蹤外型許多地方，如由大塊平面構成的部位，對這兩個波段都有效；而在少數部位，例如邊緣，就會產生無可避免的繞射。其中，S波段波長量級與X波段更接近，所以針對X波段設計的匿蹤形狀與吸波塗料仍然很有效，但L波段波長已達X波段的10倍，已有量級之差，不只會產生繞射的部位更多，主要針對X波段的吸波塗料的效果也差得多。因此L波段又比S波段更適合反匿蹤。若干新型俄製防空雷達大都是L波段。

6 «Радиолокационная станция "Небо-UE"», RusArmy.com, http://www.rusarmy.com/pvo/pvo_vvs/rls_nebo-ue.html

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

8 楊政衛，「玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機」，菁典有限公司，SEP.2012, p.402



圖一 MAKS2009展出的AFAR-L，為裝設於戰機翼前緣的L波段相位陣列雷達。(作者提供)

以波長20cm的L波段來說，口徑2m的天線就可以擁有30cm口徑的X波段雷達的精確度。這樣的口徑雖然不是太小，但足以用於戰鬥機以及機動防空雷達。例如Su-35S的L波段陣列天線以及T-50的AFAR-L相位陣列雷達就是約2m長的線型陣列，安裝在機翼前緣(圖一)，這樣的設計只能進行二維掃描(量距離與方位)，但理論上飛機可以用不同的滾轉角來探測一個目標，就可以獲得三維座標。⁹此外若干公尺的天線與卡車尺寸相當，可以大幅減少折收天線的複雜性，例如俄製Protivnik-GE、1L-222等L波段防空雷達的天線收納時直接「蓋上」就好，不需要像VHF波段的Nebo一樣將數十米的天線折收成幾公尺再收納。因此相當適合與機動防空系統搭配。

近年問世的俄製Protivnik-GE(圖二)操作

波長23cm的L波段，天線寬5.5m，高7m，對12~80km高的RCS=1.5平方米目標的探測距離達340km，方位角最大誤差12角分(0.2度)，俯仰角最大誤差10角分(0.17度，垂直解析度比較高是因為天線高度大於寬度)，¹⁰亦達到機載X波段雷達的等級。

按照前文估計，雙發重戰機對L波段的RCS正面下限會在0.01~1平方米，換算Protivnik-GE對12km高度以上的匿蹤戰機的探距會在100~300km。

至於T-50翼前緣的AFAR-L(也可能用於Su-35)對RCS=1平方米目標探據筆者估計在53~70km，¹¹據「澳洲空中武力」網站專家估計在73~110km。¹²在較真實的情況中，雙



圖二 Protivnik-GE雷達，採用L波段，擁有相當大的探測距離與X波段等級的精度。(作者提供)

9 楊政衛，“玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機”，菁典有限公司，SEP.2012, p.400~401

10 <http://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%F0%EE%F2%E8%E2%ED%E8%EA-%C3%C5>

11 楊政衛，“玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機”，菁典有限公司，SEP.2012, p.403~404

12 Dr. Carlo Kopp, Assessing the Tikhomirov NIIP L-Band Active Electronically Steered Array, Air Power Australia(網站), <http://www.ausairpower.net/APA-2009-06.html>

13 楊政衛，“玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機”，菁典有限公司，SEP.2012, p.405~406

發重戰機對L波段的先天RCS(不考慮塗料)可能達1~10平方米，較可能的塗料吸收能力則是90%，一消一長之下相當於1平方米的RCS，因此雖然正面物理下限可能低至0.01平方米，使得AFAR-L的探距不會太大，但較多情況下匿蹤戰機的L波段RCS量級極可能在1平方米上下，¹³這樣一來用Protivnik-GE較可能的探測距離約是170km，用AFAR-L則在50~100km。

類似地，大部分西方戰機的雷達預警接收器能偵測的最小頻率通常是2GHz，無法偵測L波段，少數升級版可以偵測500MHz以上的頻率，方能測得L波段，而俄製戰機雷達預警接收器偵測下限是1.2GHz，只能偵測一部分L波段。因此L波段也是相當具有隱匿性的波段。

X波段雷達

X波段雷達可說是最主要的探測波段，也正好是匿蹤科技首要的「整治對象」，如前文所估計，匿蹤戰機對X波段的RCS下限比其他波段都低。但另一方面，X波段雷達的探測距離也是最大的之一，例如俄製Irbis-E機載雷達以及S-400的防空雷達對普通戰機的探測距離分別達400與600km，就算RCS減到0.01平方米，也還有95與145km，就算RCS減到0.001平方米，也還有55與80km，雖然大幅減少，但也已是超視距等級。

現代匿蹤科技之所以對X波段特別有效，正是匿蹤外型的效果，也因為相當程度的效果來自匿蹤外型，所以RCS有顯著的方向性。那麼，只要匿蹤飛機不是永遠以最低的RCS方向面對對手，就難免曝露較高

的RCS方向。例如在匿蹤飛機尚未發現對手時、匿蹤飛機發射完武器準備迴轉脫離戰場時、匿蹤戰機同時面對相距很遠的兩架以上敵機時、以及匿蹤戰機深入敵方防空縱深時，這些時候匿蹤飛機都不可能以最低RCS面對對手，這時反而可以考慮平均RCS。如果平均是0.1平方米，就會在170km與255km外被上述高性能X波段雷達發現。

例如俄製S-300、S-400防空系統裡面本來就有若干具X波段雷達(圖三)，匿蹤戰機就算可以用最低RCS方向面對其中一具使其失效，也極可能在其他幾具面前現形。須注意的是，對於單一X波段雷達而言，機動中的匿蹤戰機的RCS變化很快，所以就算途中現形，有可能是「一閃即逝」，而在防空系統的多部彼此連線的雷達面前，匿蹤戰機算是可以穩定偵測的目標。



圖三 S-300PMU2的30N6E2(X波段)射控雷達，一套完整的S-300PMU2會有6部30N6E2，由搜索雷達接手射控任務，本身也可以充當搜索雷達。(作者提供)



需特別澄清一下，這裡提到S-400等俄式系統用多部X波段雷達探測匿蹤戰機，這與所謂的「多基雷達」是不同的，後者是將發射機與接收機分開，然後用特殊的方法整合不同據點的接收數據，以換算目標資料，在這裡發射機與接收機不是獨立運作個體，必須緊密的協同，不易進行機動部署；反之像S-400的X波段雷達則是獨立個體，他們固然可以用通信系統互通有無，但可以自主運作，機動部署能力強。

Su-35S的雷達對RCS=3平方米目標探測距離達400km，可以視為「飛在天上的S-400」，2架以上的Su-35S如果間隔夠大，就很有機會用X波段雷達對匿蹤戰機進行區預警戒，由於戰術戰機平時值勤架次本來就是2~4架編組，所以用Su-35S建立反匿蹤空中警戒網，並沒有違反平時出勤習慣，可行性很高。

3.毫米波雷達

針對X波段設計的匿蹤外型對毫米波理論上更有效，只是飛機上一定會有表面交界、艙門等，尺度剛好在毫米級，所以繞射效應很顯著。再加上對X波段有高效的吸波塗料對毫米波的吸收能力不會是最佳值，所以毫米波也可用來探測匿蹤戰機。

如前文所估計，雙發重戰機對毫米波的RCS下限是0.01~1平方米，考慮到吸波塗料對毫米波的吸波能力較X波段低，所以假設塗料只能降低10倍的RCS的話，RCS下限應該更接近0.1~1平方米。這一樣是比X波段

RCS下限高得多，也因此毫米波成為反匿蹤的可能波段之一。

只是目前毫米波雷達多用在短程防空雷達、直升機雷達等短距離用途，尚未見到運用於戰機的產品，俄國第五代戰機雷達系統將包括毫米波段，但也還沒有實品，因此沒有具體的探測距離數據可參考。

毫米波直升機雷達或防空雷達通常用於數十公里的探測，這有一部分是因為低空容易有水氣，而毫米波容易被水氣吸收，所以距離不易拉遠。但在戰鬥機上，如果在平流層以上飛行，水氣少，毫米波的探測距離其實可以增加。只是由於毫米波的元件必須做更小、元件間距也必須更小，因此在相同於X波段雷達的功率下，系統單位體積的熱能會更多，恐出現無法散熱的問題，因此在功率方面毫米波段應該遜於X波段。故可以合理推測在相同於前視X波段雷達的技術等級下，毫米波雷達的探測距離可以超越短程防空雷達，而遜於X波段前視雷達。

以俄製Pantsir-S1「鎧甲-S1」短程防空系統的毫米波雷達為例，對RCS=2平方米目標的探測距離是32~36km，¹⁴換算對0.1與1平方米目標探距是15~17與27~30km，只是近距空戰的範圍。如果考慮高空排除水氣影響、放大功率等先進技術而將距離增倍，最多也只有60km的距離，勉強可以用在視距外空戰，但無法用於一開始的「先敵發現」。

如何射控

14 俄文維基百科Панцирь-С1條目，<http://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%E0%ED%F6%E8%F0%FC-%D11>

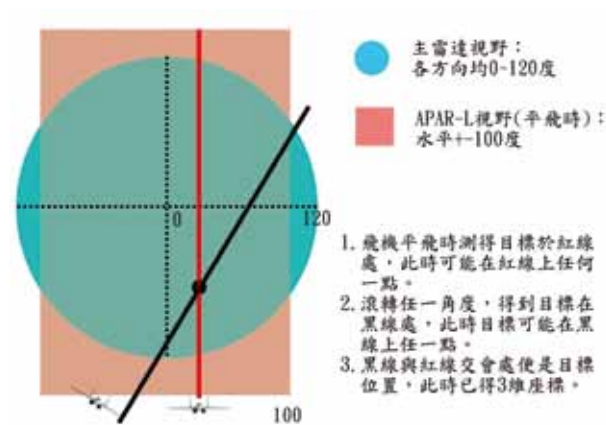
以上所提的是現在最先進的防空系統與戰機已能「發現」匿蹤飛機，而且操作距離達到區域級。現在要進一步探討如何以武器對匿蹤戰機發動攻擊。

1. 訂定三維座標

要發射導引飛彈攻擊目標的第一步，是要能定出目標的三維座標(3度空間的方向+距離)。這方面陸基X、S、L波段雷達都可以辦到，機載探測系統方面X波段、毫米波、光電系統均能辦到，唯L波段有討論空間。L波段有時拿來做快速預警，藉由非常寬的波束來快速掃描，概略的發現目標方位，這種設計中，天線尺寸很小，精確度非常差，不足以射控。唯一的特例是俄製翼前緣L波段雷達，利用2m長以上的線性陣列，達到X波段級的指向性，唯其由於是線性陣列，所以無法立即擁有三維定位能力，而是必須靠額外的裝設在垂尾的線性陣列，或是將不同的滾轉角下的探測資料融合而得三維資料(圖四)，雖然不直接，但可以辦到。^{15,16}

2. 可以射控的距離

傳統上，射控系統發現目標的機率為50%時的距離視為「最大距離」，而在探測機率為80%時才可以射控，其距離大約是最大距離的1/2~2/3。然而在第五代戰機上可以擁有多個探測系統，並且用人工智慧以猜測與分析等複雜演算方法，可讓探測機率50%



圖四 AFAR-L以不同滾轉角訂定三維座標示意。(作者製圖)

以下時也可射控。^{17,18}

前面提到X波段、L波段、毫米波、光電探測儀在50km處聯合發現匿蹤戰機的機率趨近1，相當於保證探距，這是就「探測」的立場而言的。如果論及射控，則個別射控系統的探測機率當然比較低。因此如果不使用特殊的演算法，則雖然50km幾乎能保證發現匿蹤戰機，但射控距離一樣要減少到其1/2~2/3，也就是25~35km。只是這些有複合探測系統的大都是第五代戰機，如Su-35S與T-50，上面也會有複雜的人工智慧，所以要在50km射控不至於是問題。

3. 武器系統的搭配

三維定位與射控問題解決了，就是武器系統接戰能力的問題了。

俄製9B-1103M-200與9B-1103M-350分別

15 楊政衛，「玄武雙尊－俄羅斯第五代戰機」，菁典有限公司，SEP.2012, p.400~401

16 Dr. Carlo Kopp, Assessing the Tikhomirov NIIP L-Band Active Electronically Steered Array, Air Power Australia(網站), <http://www.ausairpower.net/APA-2009-06.html>

17 Киреев В.П., «Системы управления вооружением истребителей», Машиностроение, Москва, 2005

18 楊政衛，「玄武雙尊－俄羅斯第五代戰機」，菁典有限公司，SEP.2012, p.423, 438

是最先進的空對空飛彈與防空飛彈導引頭之一，前者用於R-77/RVVAE中程空對空飛彈改良型，後者用於Buk-M2防空飛彈。他們對於RCS=5平方米目標的鎖定距離分別達25與40km。¹⁹對於RCS=0.1平方米目標，他們分別降至9km與15km，而對於RCS=0.01平方米目標，則分別降至5km與8km。

這樣的導引頭探測距離皆大於前述各項探測設備的誤差。例如誤差最大的VHF雷達在400km外誤差也不過幾公里，因此上述導引頭性能足以自射控系統手中接手，補償射控系統的探測誤差而自行導向。如此一來，整個防空體系從遠程預警、派機攔截、發射空對空飛彈，或是發射防空飛彈接戰，整個過程都是可以接上的，於是整套反匿蹤體系就有了可行性。

只是導引頭鎖定距離大幅縮小，意味著飛彈的自主作戰距離降低，防空系統與戰機必須更長時間盯著目標並指引飛彈接戰，恐怕會影響多目標接戰能力與作戰彈性。更麻煩的是，匿蹤目標因為反射特徵小，所以電戰反制的成功率也高。因此最先進防空系統與戰機如S-400搭配Su-35S、T-50雖已有辦法像S-300、Su-27攔截傳統戰機那樣發現並攔截匿蹤戰機，但打擊效果勢必減少。

要提升武器系統對匿蹤戰機的有效性，就必須提升反反制能力。方法之一是提升導引頭的性能，方法之二是增加戰機在飛彈接



圖五 9B-1103M-200PA半主動-主動複合導引頭，由主動天線與寄生的半主動接收天線構成。(作者提供)

戰過程中的介入時間。

俄國在MAKS2011公布的9B-1103M-PA半主動—主動雷達導引頭(圖五)，在主動雷達開啟前可以用半主動模式，²⁰這等於是整個接戰過程中戰機主導權更大，而複雜的戰機當然比飛彈導引頭「更難騙」，所以抗干擾能力應該較強。另外，毫米波導引頭、紅外線導引頭等能避開匿蹤科技最擅長的X波段，也是可以考慮的方向。目前歐洲的「流星」就是使用毫米波導引頭，而俄國9B-1103M-150甚至是小到可以用於短程飛彈的毫米波導引頭，²¹要放大用於中程飛彈當然可行。

此外，如果用相位陣列雷達當導引

19 Agat MRI型錄，或參考“玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機”，菁典有限公司，SEP.2012, p.175

20 楊政衛，“玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機”，菁典有限公司，SEP.2012, p.265~266

21 楊政衛，“玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機”，菁典有限公司，SEP.2012, p.266~267

頭，也可以大幅提升抗干擾能力。例如俄國「Detali」設計局為K-77M研製的數位式主動陣列雷達導引頭據稱就能緊咬著高機動目標，而能一發命中。²²只是是否值得在空對空飛彈上使用那麼昂貴的導引頭在先進國家還有爭議，能否順利量產還不好說。俄國這款主動相位陣列導引頭到2013年底還在招商，最快也要2015年2月才能量產。

方法之二是增加飛彈接戰過程中戰機介入的時間，這個方法不管對現有的還是未來導引頭都適用，畢竟戰機一定比飛彈更「聰明」，「更不好騙」。但另一方面，戰機在介入飛彈導引過程時，本身的機動彈性勢必受限，因為萬一機動過頭，失去與目標的接觸，導引過程就會中斷。為了解決此問題，戰機盡可能要有較廣的視野，例如Su-35S的主雷達搭配機械擺動，可以有 $\pm 120^\circ$ 的視野，T-50搭配側視雷達，也可以有 $\pm 120^\circ$ 的視野，相較之下一般戰機的雷達視野只有 $\pm 60^\circ$ ，這意味著Su-35S跟T-50可以做更複雜的機動而不丟失對目標的接觸。另一個方法則是匿蹤，本身匿蹤能力越好，敵方越不容易發動攻擊，這樣就減少需要做激烈反制機動的時機。

反匿蹤防空系統與戰機

掌握了每一個波段對匿蹤戰機的探測能力量級，就可以跳脫「匿蹤戰機無可擊敗」或是「某個反匿蹤技術可以全面克制匿蹤戰機」的迷思。就如同戰機這種複雜系統需要

機體、導航、射控、武器系統的合作才能發揮打擊能力一樣，各個反匿蹤技術也是需要協同使用才能真正發揮效果的。以下就來探討目前最好的技術所做出的防空系統與戰機的反匿蹤能力。

1. 防空系統

基於以上估算，可以發現，在現代防空雷達網中，VHF雷達幾乎可以像發現傳統戰機那樣發現匿蹤戰機，為整個防空體系提供初期預警。而L波段防空雷達可以在100～300km發現匿蹤戰機，就算取其下限100km計，也到了區域防空等級，可用於重要區域的防守。X波段雷達雖然剛好被匿蹤技術所克制，但以俄系防空系統同時使用多部分散的X波段雷達來看，平均可在250km左右發現匿蹤飛機。在這些波段的精確度都不差，VHF波段擁有X波段級的方位精確度，可以指示威脅方位，而L波段與X波段則是擁有射控級的三維精確度。這樣的精確度不論是指引防空飛彈攔截目標，還是指派戰機攔截都



圖六 S-300PMU2的拖曳式發射車，後面是其96L6E搜索雷達。(作者提供)

22 «Истребитель пятого поколения Т-50 оснастят цифровыми ракетами», Известия, 03.DEC.2013

相當足夠。

換言之就防空系統而言，最新一代的防空系統如S-400對匿蹤戰機的探測距離相當於甚至超過S-300PMU1、愛國者系列對傳統戰機的探測距離。

S-400與S-300PMU2已是反匿蹤防空系統

相較於S-300初始型防禦半徑約50～100km，以及改良型PMU1與PMU2(圖六)的150～200km，完整的S-400系統可以攔截400km外的目標。做個誇張的想像：一套S-400防禦範圍就包括整個台灣，甚至包括福建上空！只是遇上匿蹤戰機時，就算VHF與L波段可以很遠就發現目標，最後負責射控的畢竟是X波段，所以除非有設計特殊的資料鏈導引機制，讓L波段搜索雷達的跟蹤數據能傳給飛彈，否則S-400系統的射控距離就必須受到X波段的制約。前面估計匿蹤戰機讓S-400的X波段平均探測距離減到250km以下，所以無法發揮400km攔截能力。只是就算是250km(圖七)，甚至再減半成125km，都相當於之前的S-300。



圖七 S-400所用的48N6E3防空飛彈，射程250km。可供外銷型S-400使用。(作者提供)

這意味著S-400可以比照S-300的方式部署在要地附近，攔截至少100km外的匿蹤戰機，也就是像S-300防禦傳統戰機那樣防禦匿蹤戰機，並且可以進一步攔截更遠距離的傳統戰機。也就是說，要用S-400來防禦匿蹤戰機的話，防空部隊幾乎不需要改變部署位置、作戰習慣、與人事編制。所以說S-400符合本文對實用反匿蹤技術的「可以用」以及「不需改變軍隊作戰習慣與編製」的嚴格標準。

事實上S-400與S-300系列有相當的共通性，其搜索雷達等也可用於S-300PMU2，換言之S-300PMU2在探測能力方面可以升級到S-400的等級，只是武器射程沒有增加上去，但要攔截匿蹤戰機，也用不上S-400的遠程防空飛彈，如果都是在100～200km攔截匿蹤戰機，那麼S-300PMU2與S-400是差不多的。因此S-300PMU2也幾乎可以視為實用的反匿蹤防空系統。

美式防空系統在反匿蹤方面的先天不足

美俄體系防空系統的反匿蹤能力有著本質的不同。以防禦範圍同級的美製愛國者與俄製S-300、S-400，或是美製「鷹式」與對應的俄製Buk為例，美式系統以單一雷達包辦整個接戰過程，而俄式系統本來就有若干部射控雷達。換言之，俄式系統本來就可以利用匿蹤戰機無法同時對所有方位隱形的先天弱點去發現匿蹤戰機，隨著雷達性能的提升，發現匿蹤飛機的能力也更強。而對美式系統而言，一旦匿蹤飛機是針對性的以最低RCS方向來襲，整套防空系統的防禦能力就可能破功。這樣一來就勢必要更換先進許多

的雷達系統，或是仿效俄式的多雷達配置。後者需要更改整個系統的設計，特別是操作方式，因此有一定的困難，至少一直到PAC3也尚未見到類似設計。因此筆者大膽斷言美式防空系統在反匿蹤方面有其先天不足。

2.戰機

戰機的尺寸不足以安裝VHF雷達，而L波段也只能安裝線型陣列，功率也較小，所以戰機用L波段雷達對匿蹤目標探距遠不如防空雷達，應該在50~100km。而毫米波雷達最多應該也在50km左右，X波段雷達對最佳狀態的匿蹤戰機(RCS=0.001平方米以下)探距也是50km。而如果匿蹤戰機不是最佳狀態，就可能在100~200km就被X波段雷達發現。

換言之，戰機雷達系統中，對匿蹤戰機探測距離最大的，應該還是X波段雷達，只是其探測能力遇上匿蹤戰機時不穩定，有可能大到200km以上，也可能小到50km以內。因此所謂的L波段與毫米波能用來反匿蹤，其實只是說他們跳脫匿蹤技術最擅長的波段，而不是說他們一定可以在很遠的距離發現匿蹤戰機。

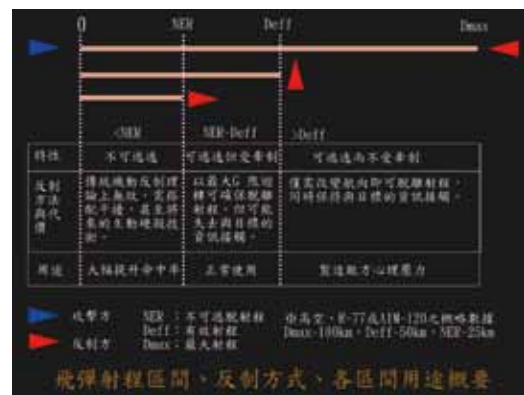
確保約50km內與匿蹤戰機對等

相當值得注意的是50km左右的距離，從以上分析可以發現，L波段、毫米波段、X波段在50km左右發現匿蹤戰機的可能性不低。事實上現代的光電探測儀在50km左右發現匿蹤戰機的可能性同樣不低。²³換言之在50km這個距離，幾乎可以保證發現匿蹤飛機。這個距離不算遠，無法發揮現代中程空對空飛

彈的射程優勢，但是足以用於超視距戰鬥，所以也不算近。而如果就整個防空體系的眼光觀之，就算是精確度較差的VHF波段的最大誤差也不過幾公里，因此50km的探測距離完全足以補償防空雷達的誤差，而接手攔截任務。

50km對先進空對空飛彈也是很特殊的距離。像AIM-120、R-77這類主流的中程空對空飛彈，最大射程大約80~100km，有效射程約50~60km，不可逃脫射程約20~30km。他們的改良型如AIM-120D、產品180不可逃脫射程約增加50%~100%，可能達到40km以上。因此50km在現代空戰中會是很重要的距離，超過這個距離，還可以用機動方式反制來襲飛彈，在這個距離內，機動反制效果會大幅減少(圖八)。

所以如果戰機能保證在50km發現匿蹤戰機，就幾乎足以打平匿蹤差距。因為匿蹤敵機就算能在50km以外率先發現並發射飛彈，這些飛彈因為是在有效射程外所以不難反



圖八 空對空飛彈射程區間、反制方式、使用時機概要。(作者製圖)

23 楊政衛，“玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機”，菁典有限公司，SEP.2012, p.163, 409~412



制，而進入50km內，雙方可以互視互射，幾乎對等。

要注意的是，如果匿蹤戰機在50km外發射飛彈，而被攻擊的一方無法發現這個飛彈，那匿蹤戰機仍然有優勢。反之如果被攻擊的一方有很強的預警能力，能在夠遠的距離發現來襲飛彈，並且準確掌握來襲飛彈的威脅等級以做出有效的反制，那麼就足以宣判50km外的攻擊幾乎無效，這樣一來，情況就大概是「50km以外匿蹤戰機有優勢但攻擊無效，50km以內雙方對等」。新銳的戰機如F-35、Su-35S、MiG-35、T-50、殲-20上都有全周界光電感測器，以Su-35與MiG-35所用者為例，能在50公里外發現飛彈，²⁴Su-35還多了大視野主雷達能將預警距離拉長到90km，T-50還有側視雷達等，因此在預警能力方面，各國的新式戰機都已相當優秀。

防禦距離其實可能更大

強調一下，前面是考慮到每一個探測系統最大探測距離50km的情況，所謂的最大探測距離通常是探測機率50%的距離，所以如果有3個這樣的系統，在50km的探測機率就是87.5%，可視為「保證發現」。如果能在50km「保證」發現，表示最大探測距離可能達到100km，因此其實有機會在50km以上對匿蹤戰機發射飛彈。

反過來說，要以現代最先進系統做到「保證50km發現」就不可能是單系統，至少要兩套系統。目前唯一兼具多波段探測、以及Irbis-E等級的主雷達系統的，就只有俄

製Su-35S、T-50。如果放寬考慮，雷達探測距離不像Irbis-E那麼大，那麼至少要是主動相位陣列雷達，這樣一來俄製MiG-35、美製F-35也勉強入闖。

換言之，最先進的科技已經足以在夠遠的距離發現匿蹤戰機(如Nebo-UE雷達)，並且指派戰機(如Su-35S)前往攔截，派出去的戰機又足以抵擋匿蹤戰機的單方面打擊至雙方公平對決為止，整個接戰過程與距離範圍與現代防空流程幾乎一樣。與之前的防空系統與戰機遇上匿蹤戰機時很可能剩下視距內點防禦能力相比，已是一與零的差距。然而，如果匿蹤戰機的匿蹤優勢太強，以至於總是能率先發現防守方的戰機，則匿蹤戰機就獲得主動權，這樣一來防守方仍然居劣勢。

匿蹤科技較差的一方有可能獲得匿蹤優勢

要再進一步削弱匿蹤戰機的主動權，防守方也需要一定程度的匿蹤能力，以盡可能削減甚至抵銷匿蹤戰機「先發現」的優勢。要特別注意的是，要削減甚至抵銷匿蹤戰機的「先發現」優勢，不必與匿蹤戰機拼「最佳匿蹤性能」(即最小RCS值)，而是「平均匿蹤性能」(平均RCS值)。這是因為，在發現對手之前，交戰雙方當然不知道要把最小RCS方向面對哪裡，所以相當於用平均RCS面對彼此，在發現對方之後，才有機會以最小RCS方向面對對手，以大幅削減對手的探測能力。因此，當F-22遇上Su-35S以及其他非匿蹤戰機時，理論上可以率先發現，然後提早以最低RCS方向示人，這樣一來在一對

24 楊政衛，「玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機」，菁典有限公司，SEP.2012, p.163, 414-416

一空戰場合，對於非匿蹤戰機而言，F-22的RCS可視為最小值，這時X波段雷達探距大減，就算是Su-35S的Irbis-E雷達可能也要到50km內才能發現F-22。

反之，如果F-22遇上T-50、F-35，則由於平均RCS與探測能力在伯仲之間，使得匿蹤優勢不完全由匿蹤技術強的一方所有。例如T-50的平均RCS可能略大於F-22，探測距離則略大，因此平均而言有可能率先發現F-22，然後改以最低RCS的一面面對F-22，這時有如「上驕對下驕」(以最低RCS面對平均RCS)，就算T-50的最低RCS比F-22高，也反而擁有匿蹤優勢。在這種情況下，X波段雷達就是最遠的探測系統。以Su-35S的Irbis-E為例，對RCS=0.1平方米目標的探測距離可達170km，甚至大於Su-30MK等4+代戰機對普通戰機的探距。

防守方容易獲得匿蹤優勢

特別是如果T-50作為防守方，在VHF雷達等遠程警戒系統已經知道F-22方位的情況下，可以在一開始就以最低RCS方位飛向F-22，甚至過程中也不必開啟雷達，這時匿蹤優勢更是可能在T-50這邊。這意味著就防守方而言，有機會用較低的匿蹤科技取得匿蹤優勢，這與自古以來的戰爭經驗中，防守方可以用較少的兵力來進行防禦是類似的。

不對稱武器系統額外增加優勢

前面提到的還是假設交戰雙方戰機使用相同射程等級的武器系統，也就是AIM-120、R-77這一類武器。如果交戰方其中之一擁有射程長得多的武器系統，就可以獲得額外優勢，那麼前述結論都必須做相對應的

修正。只是目前只有俄羅斯在發展長射程武器，所以暫時只需考慮俄系戰機有此優勢。俄系戰機的長程空對空飛彈有射程200km的RVV-BD，射程250km的RVV-AE-PD、射程300~400km的KS-172以及「產品810」等。其中至少RVV-BD是可以外銷的，並且也可以裝備在MiG-31上。這樣的長程飛彈在射程上有優勢，其不可逃脫射程接近中程飛彈的最大射程，此外鎖定距離與爆炸威力也有優勢，因此搭配長程飛彈後，反匿蹤效果可望提高，甚至就算沒有「先發現」優勢，也可能具有「先發射」優勢。只是長程飛彈當然比較貴，是否會當反匿蹤的常備武器有待觀察。

防空系統與戰機的搭配

目前正陸續服役中的俄製防空系統與戰機，正是擁有反匿蹤能力的範例，而且彼此環環相扣而可以構築反匿蹤防空體系。其中包括Nebo-UE或同級的VHF預警雷達、S-400防空系統(包括L波段搜索雷達、X波段射控雷達等多種雷達系統)、Su-35S、T-50戰機，甚至「祖父級」的MiG-31。以下就簡單說明這些系統如何協同運作，以攔截匿蹤戰機。

1.以機動型預警雷達、防空飛彈、戰機構成的反匿蹤防空體系

在新一代的俄國防空系統中，加入了若干種機動指揮車，能進行跨系統的整合，甚至包括預警機與攔截機隊的整合。在這之中每個雷達都是可以獨立探測的，而機動指揮車有整合短程、中程、長程防空系統的，也有能跨系統的，因此整個防空體系內相當於



有多個備份指揮車，再加上指揮車可以用纜線通信而不發出電磁波，隱匿性很高，指揮體系極難破壞，使得整個防空體系總是可以構成作戰網路，基本上可以排除整合機制被破壞，各系統單打獨鬥的問題。

如果只考慮中遠程防空，則有VHF、L波段、S波段等搜索雷達，以及更多數量的X波段搜索暨射控雷達。根據本文的分析，VHF雷達與L波段雷達分別在400km與200km左右發現匿蹤戰機，其中VHF雷達可以精確的指出方向與距離，而L波段則可以定出三維座標。這還沒有考慮到被動雷達等偵測手段，因此實際上防空體系內處處是眼線。

在使用防空飛彈接戰的情況下，距離受制於X波段對匿蹤戰機的接戰距離，最遠有機會接近200km，保守一點估計在100km以上應無問題。這樣的防禦範圍足以守住重要戰略據點。

而在超過防空飛彈防禦半徑的範圍，就是戰機發揮的空間。就算是用精確度最差的VHF波段的定位資料，也可以將戰機準確的派到威脅方向，以Su-35S、T-50的探測能力，幾乎可以確保50km發現匿蹤戰機，甚至有機會擴大到100km，完全足以補償預警雷達的誤差。特別是由於匿蹤戰機的概略方位已經被VHF雷達定出，接戰戰機可以縮小搜索範圍，因而提高發現匿蹤戰機的機會或距離。在使用與匿蹤戰機同級的空對空飛彈的情況下，Su-35S與T-50在50~100km開始可與匿蹤戰機互視互射，相當於傳統戰機的對決，特別是在50km內可視為公平決鬥。在此雖然Su-35S與T-50的超大攔截範圍被匿蹤戰

機壓縮到50km內，但整個接戰過程非常類似第四代戰機(指F-15/16，Su-27這一代)的接戰過程。因此也不需要特別為了反匿蹤而改變作戰習慣與兵力規模，所以這裡提到的反匿蹤過程也具有實用性。

須注意以上考慮的是「Su-35S與T-50使用與匿蹤戰機同級的空對空飛彈」，但俄系戰機將可配備長程空對空飛彈，而獲得額外的優勢。此外，如果是T-50，由於其有匿蹤設計，可以在接獲預警雷達的資訊後一開始就以最低RCS方向逼近匿蹤戰機，這時T-50反而享有匿蹤優勢，再搭配內掛式的長程空對空飛彈，更是如虎添翼。

2. MiG-31：少數可以納入反匿蹤體系的傳統戰機

按照本文的標準，納入可靠的反匿蹤體系的戰機必須具有第五代戰機的航電等級，甚至本身也有匿蹤能力者，具體的說就是T-50、F-35。中共殲20/31性能不明確，但最起碼本身具有匿蹤能力，也許符合標準。而在非匿蹤戰機中，Su-35S擁有第五代等級的航電系統，屬於4++代，也可納入。其他4+代以下的非匿蹤戰機反匿蹤效果就算有也會差很多，例如法製Rafale也有多樣性探測系統，與強大自衛系統，但探測距離較短，且武器射程也短，所以雖然有機會防禦匿蹤戰機的攻擊，但反擊能力較差，大部分情況會居於被動態勢。其他非匿蹤戰機的反匿蹤能力應不會優於Rafale。

然而唯一的例外是俄製MiG-31，特別是新的MiG-31BM。這種飛機完全不具備匿蹤能力，而且升級成MiG-31BM也只是4+代，

然而他在搭配陸基預警雷達後，理論上能比照傳統攔截程序去攔截匿蹤戰機，因此擁有夠有效的反匿蹤能力。

如前所述，防守方其實可以靠陸基預警系統精確的知道匿蹤戰機的方位，並派機攔截，這些派出去的攔截機就算本身匿蹤能力與探測能力較差，但只要能在派到戰區後從預警系統接手，發射飛彈攔截匿蹤戰機，也無不可。因此MiG-31搭配長程飛彈，雖然不具匿蹤能力，但其實也可以擔任反匿蹤體系的一員，換言之，如果考慮到俄國的反匿蹤能力，則除了新的Su-35S與T-50外，還要把為數不少的MiG-31考慮進去，特別是配備射程200km的RVV-BD的MiG-31BM。

當然MiG-31因為完全不具匿蹤能力，且靈活性較差，遇上匿蹤戰機會吃大虧，但另一方面其獨特的速度與高度優勢可能改變局勢，搭配陸基防空雷達時，超視距空戰能力未必會遜於匿蹤戰機。

3.如何實現全領空預警

由此可見，陸續服役中的俄製機動防空雷達、機動防空系統、戰機，已可以構築實用的反匿蹤防空體系。這個防衛體系至少可以確保100~200km的防衛半徑而守護重要戰略據點(用防空飛彈)，甚至擴張到數百公里(用戰機)。對許多小國家而言，若干個這種系統已足以實現全領空防禦。但是對於俄羅斯、中共這樣的大領土國家而言，這樣的防

禦能力與預警能力無法覆蓋全領空，又不可能密集的部署。這裡就需要一些非機動式的大型雷達。

以俄羅斯為例，就使用電離層反射式超地平線雷達。這種雷達通常用於超遠距預警，使用可以被電離層反射的波段，藉由電離層的反射而實現超地平線探測。例如蘇聯的Duga雷達系統與最新的29B6「Konteiner(集裝箱)」系統。後者只需要10~12組就可以覆蓋全俄羅斯領空。^{25,26}

後者在2013年12月2日才交給俄軍做作戰測試。其採用3~30MHz(波長10~100m)的短波無線電，能擁有夠高的定位精確度以及較少的電離層反射損耗。雷達波經由電離層反射後打到目標，反射波再經由電離層反射後而被接收。採用收發分離設計，測試中的接收系統與發射系統分設於相隔300km以上的兩個城市。技術難點在於接收系統收到的信號非常微弱，裡面摻雜電離層造成的雜訊，甚至包括電戰干擾信號等，正因如此上一代的「Duga」系統無法進行精確定位。俄媒資料指出，29B6「Konteiner(集裝箱)」的視野180度，能偵測3,000km以上，高度達100km的目標。其精確度目前是機密，但遠高於之前的「Duga」系統，研製者指出其能發現小型飛機。俄太空防衛軍司令A. Golovko進一步指出，這種新型雷達甚至能追蹤西歐領空上的軍、民用飛機。

25 Рябов Кирилл, «Радиолокационные станции «Контейнер»: совершенствование головной и планы на строительство новых», Военное обозрение, 12.DEC.2013

26 Александр Братерский, «Европу накроет российским «Контейнером»», Газета.ру, 12.DEC.2013



這種藉由電離層反射來探測的雷達，在高度與距離精確度上應該很差，畢竟電離層的位置與反射特性不是定值，成為探測過程中的不確定因素，然而方位指向性幾乎不受影響，如果天線陣面夠寬(這不難做到，因為這種雷達固定安置，不講求機動性)，要精確指引威脅方向應該是不難。

此外，由於雷達波經由電離層反射，因此有可能以不小的俯角照射匿蹤戰機，加上波長又是10~100m，不用說匿蹤戰機，就連B-2轟炸機應該也要現形。

4.如何反制匿蹤轟炸機

前面提到的主要是針對匿蹤戰術戰機。這是現代高科技區域戰爭中很重要的「打手」，而隨著俄製T-50與中共殲20/31等匿蹤戰機的問世，匿蹤戰機將不會像上個世紀末一樣被單一國家壟斷，而是會成為高科技貿易的一部分而「全球化擴散」。²⁷類似地，S-300PMU2早已是可外銷系統，而S-400將來也可外銷，²⁸機動型VHF雷達也是可外銷的軍事展常客，因此這些反制匿蹤戰術戰機的防空系統也是會全球化擴散的。因此上述「矛」與「盾」的對決在將來可能會很常見：哪個國家有匿蹤戰機破壞區域平衡，周邊國家就裝備反匿蹤系統。就戰術戰機與局部衝突來看，匿蹤與反匿蹤大概平衡，只是美系的匿蹤強一點，俄系的反匿蹤強一點。

但如果涉及戰略空軍，那又另當別論。

目前美國B-2轟炸機是唯一的匿蹤戰略轟炸機，上述反匿蹤體系能否防禦B-2？該如何防禦？就要更小心的分析。

VHF或是更低頻的雷達要發現B-2應該不難，因為VHF波長10m也相當於B-2的尺寸，匿蹤外型效果大減。而像前述29B6「Kontainer(集裝箱)」超地平線雷達波長達10~100m，更可無視B-2的匿蹤設計。因此遠程預警雷達要發現B-2不至於有困難。

只是防空系統與戰機未必可以順利接手攔截任務。因為B-2尺寸大，也許可以更妥善的修型到連L波段都遵守反射定律，這樣匿蹤外型對L波段也還很有效，X波段更不用說。B-2其體型大、不必像戰術戰機那樣講求靈活度、加上執行的是戰略級任務，所以可以集最尖端技術於一身，隱匿性可以做到非常高。在沒有具體數據之前，不能樂觀的認為上述反匿蹤防空體系可以用一樣的方式攔截B-2。

比較保守一點的方法是，在遠程預警系統的指引下，派機群前往攔截，以多機多方逼近以增加發現機會，甚至可能會到更近的距離才能發射飛彈。這裡已經牽涉到稍微不一樣的接戰模式，過程也較為複雜。但如果考慮到B-2高達20億美元的價格，以及戰略轟炸機所攻擊的目標可視為無價，這稍微麻煩的過程似乎又沒那麼麻煩。

如果B-2的匿蹤能力真的強大到必須到非

27 楊政衛，“玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機”，菁典有限公司，SEP.2012, p.330~331

28 2014年莫斯科軍火外銷展中，S-400就在展品中，而同年初，俄羅斯總統普丁親自批准允許出口S-400給中國。

常近的距離才可以發射飛彈，那麼，Su-35S與T-50的優勢就不明顯，反而是MiG-31可以高速逼近的優勢(以2.35馬赫攔截700km外目標)顯得更為有用。特別是匿蹤轟炸機並無反擊能力與空戰能力，無法威脅MiG-31。因此在反匿蹤戰略轟炸機方面，MiG-31應該是當代最佳。

反匿蹤戰術與部署

前面是以純技術眼光分析各種新系統的反匿蹤能力。真實戰場不可能像運動場一樣是公平決鬥，戰術運用、甚至地理位置都會產生影響。

1. 以攻為守，釜底抽薪

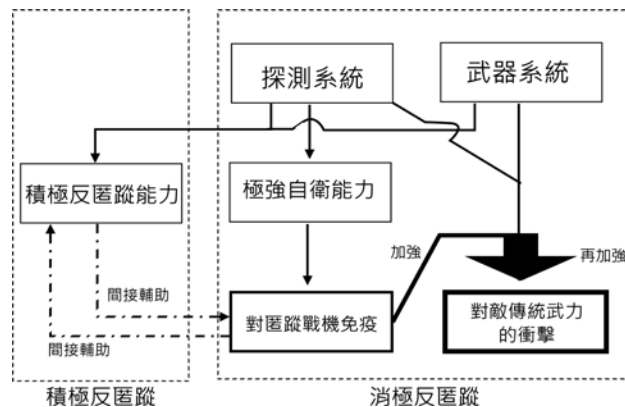
匿蹤戰機也是需要其他機種與地面支援的。例如現在的匿蹤戰機如果密集出勤，些微的戰損或是匿蹤塗料脫落都會破壞匿蹤性，因此需要更複雜的地面保養。如果沒有安全的後勤環境，匿蹤戰機的優勢就會被大幅削減。在可預見的未來，匿蹤戰機仍會是少數，各國空軍機隊中多數飛機仍不是匿蹤戰機，在這種時候匿蹤戰機相當於「奇兵」，靠著傳統機隊的掩護來保持安全的後勤條件。此外，在匿蹤戰機尚未普及時，許多吃重工作還是會由傳統戰機執行，例如大規模轟炸任務，這種情況下真正該打的反而是那些傳統戰機。

如果專門打那些支持匿蹤戰機的傳統戰機，就可能實質上的重挫對方的打擊能力，甚至破壞匿蹤戰機的後勤條件進而牽制之，

這樣一來空有匿蹤戰機也不能發揮作戰效果。

這就是反匿蹤領域的「釜底抽薪」，藉由壓制匿蹤戰機的友軍來反匿蹤。匿蹤戰機本身可以勝任這個任務，或是特殊的傳統戰機也可以。例如俄製Su-35S可以在遠達400km發現傳統戰機，在配備超長程空對空飛彈的情況下最遠可在300~400km發動攻擊，在100~150km甚至幾乎不可逃脫，而在100~150km傳統戰機就算看得到Su-35S也無法攻擊之。換言之Su-35S雖然不是匿蹤戰機，但卻有衝擊傳統戰機的能力。另外像俄製Kh-58UShKE反輻射飛彈最大射程245km，超過多數防空飛彈射程，且速度高達4,200km/hr，超過多數防空雷達可處理的目標速度上限，因此可以衝擊多數防空飛彈。

這種釜底抽薪的反匿蹤方法，筆者又稱之為「消極反匿蹤」能力。²⁹乍看之下只要有長程飛彈的載台都具備此一能力，例如轟炸



圖九 積極反匿蹤與消極反匿蹤能力彼此增益。(作者製圖)

29 楊政衛，“玄武雙尊—俄羅斯第五代戰機”，菁典有限公司，SEP.2012, p.152~159



機等，但這些載台萬一被匿蹤戰機先一步消滅，自然就不會有後續的「釜底抽薪」效果了，所以載台本身必須有很強的自衛能力，方能確保「消極反匿蹤能力」，Su-35S就符合這一條件。

如果戰機不只能防禦來自匿蹤戰機的威脅，甚至能進一步反擊匿蹤戰機，也就是筆者稱的「積極反匿蹤」能力，³⁰則會與「消極反匿蹤」能力彼此強化。具體的說，積極反匿蹤能力一定程度上得益於消極反匿蹤能力(正因為有消極反匿蹤能力，而能迫使匿蹤戰機進入積極反匿蹤能力的工作區間)，而積極反匿蹤能力又進一步強化對匿蹤戰機的免疫力(圖九)，這便更加確保各種特殊武器足以發揮「釜底抽薪」效果。

在非匿蹤戰機中，Su-35S兼具消極與積極反匿蹤能力，是「釜底抽薪反匿蹤法」的最佳選項。放寬一點看，MiG-35、Rafale、EF-2000、Su-34等也都有長射程攻擊武器，與很強的預警與自衛能力，也勉強可以。當然可以更放寬的把攻擊機、轟炸機都算進去，但載台本身自衛能力有限，面對的風險較高。

2. 地理位置影響

匿蹤戰機RCS的方向性就暗示著交戰雙方部署方式會產生重要影響。而部署位置當然與地理形勢有關。

如果探測雷達能部署在很寬的防衛正面，並且彼此連結成網路(而新一代防空系

統本來就會這樣做)，那麼匿蹤戰機要同時面對多個方向的雷達，相當於以平均RCS在進攻，匿蹤效果當然會打折。於是，領土廣大的國家，一方面可能空防漏洞多，另一方面卻有利於配置反匿蹤探測系統。例如前面提到的俄製超地平線雷達，發射機與接收機相隔300km，這就不是每個國家都可以部署的。

所以分析匿蹤戰機與反匿蹤體系的對抗時，除了要了解技術特點外，也必須加以考慮交戰雙方的地理位置，以及戰機作戰半徑。

以中國大陸來說，匿蹤敵機很可能來自第一島鏈以外，中國面對這個威脅方向有很寬闊的正面，有利於反匿蹤部署。再加上這個威脅方向有海洋屏障，使得大部分基地與中國本土的距離都超越戰機的作戰半徑，可供使用的機場進一步縮減，更適合針對性的部署反匿蹤防空網。

反匿蹤防空網可以包括陸基防空系統與防空戰機。陸基防空系統就算無法保證防禦，但在適當的部署方式下，至少可以大幅限制敵方匿蹤戰機的作戰彈性，使得敵方的匿蹤戰機的行為更好預測，並進一步以防空戰機與預警機來處理漏網之魚。

此外，飛機的作戰半徑有限，因此有的地方匿蹤戰機很難飛到，就算可以飛到，方向也較可預測，因此反匿蹤防空網可以針對性的布置，建置成本不會太高。

30 楊政衛，「玄武雙尊－俄羅斯第五代戰機」，菁典有限公司，SEP.2012, p.160～172

反匿蹤「天下郡國利病書」： 以東亞為例

1. 台灣

中國大陸與台灣非常近，並且以非常寬闊的正面面對台灣，所以可以在台灣以北與以南部署S-400、S-300PMU2所用的探測距離400km級的機動式防空雷達，就能覆蓋整個台灣空域，而且就算是其中的X波段雷達，也因為以差異很大的不同角度照射台灣空域，所以台灣就算有匿蹤戰機，很可能一起飛就會被發現。除了確保台灣方面的防禦外，這裡提到的雷達網的防禦範圍還可以往北與往南各延伸約400km，也就是可以在超過1,000km的正面進行搜索。若使用S-300PMU2的飛彈，則台灣就算有匿蹤戰機也很難如想像般輕易越過海峽中線，如果引進S-400，則就算只使用射程250km的外銷彈，也能打到台灣上空的傳統戰機。反之，台灣不過以約300km正面面對中國大陸，甚至中共匿蹤戰機有可能來自更狹窄的南邊或北邊，因此台灣要偵測中共匿蹤飛機先天居於劣勢。

2. 日本本土與韓國

如果考慮匿蹤戰機來自日本，那麼日本離中國大陸較遠，除非用電離層反射式雷達進行粗略的觀測，否則是無法探測到日本領空的。日本只有南端與中國大陸最近且直接隔海對望，距離大約1,000km，其餘領土與中國大陸距離較遠，且中間隔著韓國、俄羅斯等。以距離中國大陸最近，特別是最接近首都的日本南端為例，與中國本土距離約

1,000km，與北京距離約1,500km。而現代戰術戰機僅依靠內燃油的作戰半徑約1,000~1,500km，而通常是1,000km上下，要掛副油箱才會到1,500km。這意味著日本本土與中國最近距離已經接近戰術戰機作戰半徑極限，真的要對中國本土產生威脅，很可能需要副油箱或空中加油，攜帶副油箱的情況下匿蹤性能會破壞，容易做早期預警，而可以藉由擊毀或逼退空中加油機的方式，讓匿蹤戰機在遠離中國本土加油，減輕威脅。因此如果僅考慮匿蹤戰機無外掛隱匿模式，則由於中日距離已接近戰機作戰半徑極限，所以由日本起飛的戰機真要威脅中國本土，幾乎不能迂迴行進，方向是可預測的、可能被威脅的區域也是可預測的。只要妥善利用地理位置進行反匿蹤防空網的部署，日本本土起飛的匿蹤戰機在還不能威脅中國本土時極可能已被反匿蹤雷達網發現。

例如北京與日本本土最近距離約1,500km，已達戰術戰機作戰半徑極限，再加上北京與日本之間又有陸上領土，又是首都要地，本來就會有密集的防空網，因此日本匿蹤戰機威脅北京前要先反制中國防空網，這樣勢必再浪費一些航程，基本上完全無法威脅北京。1,000~1,200km作戰半徑倒是能威脅到上海、江蘇等沿海經濟重鎮，以及山東半島的軍事基地。除了可以在以上兩區域建立反匿蹤防空網外，山東與江蘇的海岸線彼此以一角度交會，剛好形成一接近90度虎口，而這個虎口所面對的海域(大約就是黃海西部)的尺寸大約是500km見方，剛好在S-300PMU2、S-400所用的新式防空雷達的



探測範圍，這相當有利於反匿蹤雷達網的部署，使得山東半島與江蘇地區的反匿蹤防空網視野部分重疊，因而可以互助：要進攻山東半島的匿蹤戰機剛好曝露側面給江蘇地區的雷達網，反之亦然。

在最需要的地方部署反匿蹤防空網，將迫使匿蹤戰機必須耗用多餘的油料去進行反制或是繞路，而由於上述地區與日本本土的距離已接近戰機作戰半徑極限，所以匿蹤戰機如果要繞路就意味著可能根本無法執行任務。如果再佐以戰機的襲擾，就可以進一步壓縮匿蹤戰機的作戰效能。

如果匿蹤戰機再近一點部署到韓國，則雖然距離較近，但中國大陸以很寬的正面面對韓國，相對容易進行反匿蹤雷達網的部署。特別是，不論是日本還是韓國，相對於中國的方位類似，所以防空網類似(都是山東河北一帶的防空網)，不致於造成防空網的建設負擔。

3. 日本沖繩

如前所述，如果想用匿蹤戰機由東邊威脅中國本土，則礙於戰術戰機航程限制，必然要前進部署到第一島鏈，或是以航空母艦推進。由前面討論可知，匿蹤戰機不管是部署在台灣還是日本本土甚至韓國，中國大陸在地理形勢上具有先天優勢，不難針對性的部署很有效的反匿蹤雷達網。而航空母艦本身就是可供早期預警的大目標。

在東亞島鏈中，就地理形勢而言對中國最具威脅的，應該是日本沖繩縣。該處有自衛隊那霸基地以及美軍嘉手納基地，其中美軍從2006年開始已藉演習為由在嘉手納建立

F-22的操作能力。

以F-22、F-35等戰術戰機僅依靠內燃油的作戰半徑約1,000~1,200km計算，沖繩起飛的戰術戰機作戰半徑涵蓋江蘇、浙江、福建、安徽、江西、甚至包括台灣，都是經濟重地。江蘇到福建一帶不像山東、江蘇沿線是以「凹口」面對日本本土，而是以「凸出狀」海岸線面對沖繩，不利於雷達互助，地理形勢對中國先天不利。此外沖繩與上述省分的沿海地區距離通常不到1,000km，例如到上海便只有約800km，這意味著可以用迂迴的方式，以最隱匿的方式逼近目標。例如沖繩起飛的飛機如果先往北飛，再由正東方直逼上海，就等於避開福建浙江一帶的防空系統，直接威脅上海，這時匿蹤戰機要面對的防空系統相對較少，可以針對性的做戰術機動，大幅提升隱匿性。

因此就地理形勢而言，部署在日本沖繩的匿蹤戰機真正具有威脅性，不易進行全方面的反匿蹤。也無法像北京一樣，用本來就部署好的防空網就能反匿蹤。這個地區會需要比較細心的安排，先對最重要的地區進行防禦。以上海為例，如果在寧波一帶部署S-300PMU2或S-400，則由於寧波到上海距離約200km，而且是由側面監視由東往西通往上海的航道，因此如果沖繩起飛的匿蹤戰機採用前文所述的隱匿路徑逼近上海，在距離上海100km以上時就極可能被寧波地區的S-300PMU2或S-400發現，而寧波地區的S-300PMU2射程足以涵蓋上海多數區域、甚至距上海100km的海上區域，這樣的部署方式可以大幅提升上海的安全性。這裡提到



圖十 中國大陸S-300PMU/PMU1/PMU2與紅旗9防空飛彈陣地部署圖。(蘇冠群整理製圖)

的部署方式，等於是把匿蹤戰機當傳統戰機打，因此防空系統本身未必要專門考慮反匿蹤科技。反之，如果防空系統直接部署在上海，就必須與匿蹤戰機正面衝突，誰勝誰負就真要靠科技硬實力，或是部署多套系統以量取勝。

另一方面，沖繩在地圖上不過就是一個小點，沒有縱深，也沒有寬闊的正面，因此真要反制這一地區的匿蹤戰機，還有若干方法，例如(1)建立專門的雷達系統，針對沖繩地區空域加強搜索；(2)以匿蹤戰機威脅沖繩。由於沖繩的地理條件不允許反匿蹤防空網的部署，因此中國如果用較低等級的匿蹤戰機，對沖繩的威脅未必遜於沖繩起飛的美製高性能匿蹤戰機對中國的威脅。

4. 實際情況：中國的部署方式

圖十為中國大陸S-300PMU/PMU1/PMU2以及紅旗9的部署圖。³¹從中不難發現共軍的部署邏輯：最早的PMU首先用於京畿重地以及江西飛彈陣地的防守，PMU1加強北京防

禦，並進一步部署到上海、福建沿海，其中上海地區的PMU1相當密集。而最新的PMU2則繼續加強京畿重地以及台海西側的防守。而且圖中也可看出，隨著防空系統先進程度與數量的提升，部署位置也以上述要地為中心往外擴張。

目前，這三大區域都已被綿密的防空網覆蓋，其中渤海周圍的S-300PMU2防空網相當密集，防禦區彼此交會，那麼大的防禦區塊，日韓起飛的匿蹤戰機無法繞路威脅北京，穿越防空區的成功率更是微乎其微，因此北京幾乎可以高枕無憂，而位在山東、遼東一帶的海軍基地等也受這防空傘的保護。

台海西側的S-300PMU2陣地由台灣西北到西南部部署，台灣起飛的匿蹤戰機在這樣寬闊的防空網面前很難隱匿，因此台灣若用匿蹤戰機進行領空防禦尚可，要越過海峽中線以攻為守就很危險。

上海被綿密的S-300PMU1保護。PMU1射程相對較小、也較老舊，反匿蹤能力本來較差，但綿密部署的結果，匿蹤戰機真想威脅上海難度也相當高。

因此以圖中的部署方式來看，北京幾乎可視為絕對安全，而福建、江西飛彈陣地、上海面對匿蹤戰機也已算相當安全。

5. 中國引進S-400對反匿蹤防空網的助益

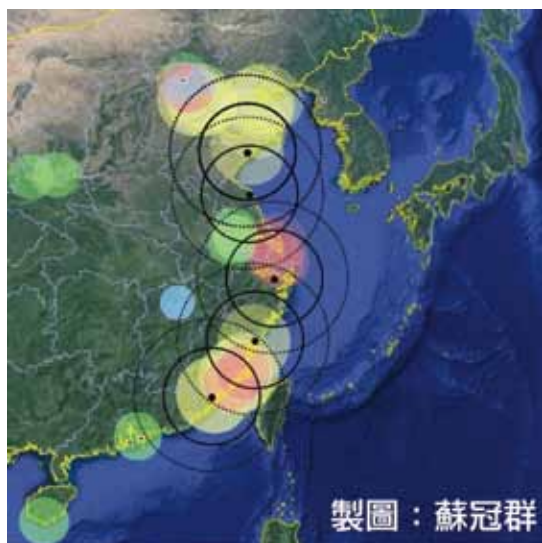
目前俄羅斯高層已做出出口S-400給中國的政治決策，這種飛彈遲早會在中國出現。根據以往的習慣，中國應該還是將S-400放在北京、上海、台海西側一帶，進一步加強防

31 蘇冠群先生整理google地圖後提供。

守，但可能更往外推，以擴大防衛正面。

由於上述主要區域已經各自被綿密的防空網所保護，因此S-400或許可以用「輔助要地、擴大防衛區域為先，要地部署為後」的原則加以部署，以用最少數量換取最大效能。以S-400的遠距離性能，可以稍微遠離上述要地，而防禦範圍仍能涵蓋之，並進一步保護本來不受保護的區域，甚至由於是由側面掩護要地，容易探測到匿蹤戰機的非隱匿面，因而加強要地的反匿蹤能力。

筆者估計，只要5個S-400陣地，就能在北自遼東南至福建南部的海岸線建立無縫雷達警戒區，並且以更積極的方式反匿蹤：直接攔截台灣上空的戰機、或是在匿蹤戰機對上海發射飛彈之前就攔截之。這五個地區大約是：山東青島以東、江蘇鹽城、浙江寧



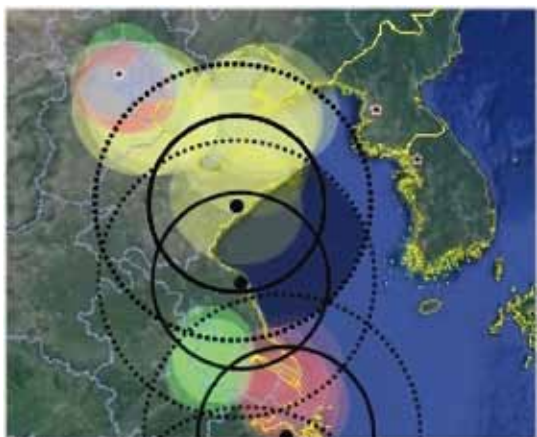
圖十一 5個S-400的優勢部署點推測。虛線圓圈半徑為400km，表示S-400射控雷達距離與俄軍版的射程，實線圓圈半徑250km，表示外銷版射程。由圖可見警戒區域涵蓋朝鮮半島與台灣連線以西，外銷型射程範圍也能無縫對接。(蘇冠群)

波、福建東北方、福建東南方(圖十一)。

青島本來就已是S-300PMU2的部署地，這裡有海軍基地、潛艦基地等，這可說是山東半島絕佳的防空陣地部署點：這裡的S-300PMU2防衛範圍涵蓋山東全境，又位居黃海往北京方向之要衝，又能直接保護海軍、潛艦基地。如果在這部署S-400，則探測範圍甚至涵蓋渤海、遼東半島南端、直逼朝鮮半島。就算配備射程250km的外銷型飛彈，射程也可達遼東半島南端、江蘇沿海並且進一步往黃海推進。也可以部署在青島以東，防衛區進一步往朝鮮半島推進，而且可以由側面掩護青島。

江蘇鹽城一帶目前並無S-300系列駐守，可能是缺乏不防不可的要地之故。此處若部署S-400，則其警戒區在黃海海域與青島一帶的S-400大量重合，而且由日本或韓國起飛的戰機若直奔青島方向而去，側半球剛好會暴露給鹽城一帶的防空雷達。因此青島、鹽城一帶的S-400將可精確掌握黃海一帶的匿蹤戰機的行蹤。如果使用外銷型飛彈，則鹽城的S-400只能勉強打到青島南端，若能將發射器部署在鹽城以北，就有機會掩護青島。另一方面，鹽城一帶的S-400也可抓到部分由韓國進犯上海的戰機，防區南端也剛好接上上海地區的S-300PMU1防空網。簡言之江蘇中部的S-400可以同時輔助山東、上海的防空網(圖十二)。

浙江寧波距離上海不到100km，部署在這的S-400就算只用外銷型飛彈，射程都可以涵蓋上海全境。此外，由於地理位置的關係，來自東海由東往西進犯上海的匿蹤戰機



圖十二 若在青島與鹽城一帶都部署S-400陣地，則黃海西側大部分區域(途中黑色陰影)的匿蹤戰機將可能被X波段雷達精確探測。鹽城一帶的S-400就算只使用外銷彈，也可往北掩護青島，往南與上海防空網對接。(蘇冠群)

在還不能發射飛彈時，側半球通常就已曝露給寧波一帶的雷達，因此寧波一帶的S-400應可相當有效的保護上海。另一方面，寧波一帶S-400的防區南端與台海西側的防空網對接。

台海西側，若在北邊與南邊目前部署S-300PMU2的區域部署S-400，則探測區域幾乎涵蓋全台灣，而且因為是由兩個差異很大的方向探測台灣空域，使得匿蹤戰機難以隱藏，這樣一來將可精確掌握台灣上空的匿蹤戰機行蹤。在使用外銷型飛彈的情況下，射程涵蓋整個台海。

由圖十一可見，以上所提的5個S-400陣地，可以在遼東南端至福建南端建立無縫警戒區，甚至就算只用外銷型飛彈，也可以建立無縫防衛區，並且在要地以X波段精確掌握匿蹤戰機行蹤，增加反匿蹤防空效率。這5個陣地搭配固有防空網，已經足以嚴密的守

護沿海精華區。如果使用俄軍版射程400km的防空飛彈，則上述無縫警戒區甚至就是防衛區，也就是朝鮮半島與台灣連線以西的海域都在S-400射程內！如果進一步在福建中部部署S-400，則外銷型飛彈的射程亦可涵蓋台灣本土西半部台南以北地區。

5. 搭配防空戰機

陸基防空不可能滴水不漏，上述部署方式難免仍有漏洞，特別是考慮到防空飛彈的最大射程當然只是用於高空目標，因此如果敵機低飛，防空射程必然減少。但另一方面，低飛的敵機作戰半徑也減少，作戰彈性大受限制。目前看來只有日本沖繩一帶起飛的戰機才有辦法用低飛模式還能威脅中國本土。

對於這些空防漏洞，可以用防空戰機甚至搭配預警機構成的機動防空網來彌補。由於陸基防空網已相當嚴密，漏洞較少，更好預測，可以用較少的空軍基地就彌補空防漏洞。

6. 其他

目前中國唯一沒受S-300系列防護的沿海要地，就屬廣州、香港一帶，這一代僅由國產紅旗-9守護。事實上這個區域相對安全。以廣州為圓心，1,200km半徑內只有越南東南部以及菲律賓西部。由越南進犯的戰機要越過海南的防空網，可行性很低。菲律賓起飛的戰機倒是可以直衝廣州香港一帶，可說是繼日本沖繩縣以外，對中國本土威脅最高的部署點。也可以說，中國東南方是目前反匿蹤能力相對較薄弱的，這又正好是B-2轟炸機有可能來自的方向之一。也許這會是共軍未

來的建設方向，如果用S-400，只要1套部署在廣州，1套部署在海南，就可以守住南方，並且與前述沿海防空網無縫接合。

總 結

總結以上，就技術而言，已在量產中的S-400防空系統、Su-35戰機已具有在不改變部署與出勤習慣以及兵力規模的前提下反制匿蹤戰機。而在考慮地理位置並妥善選擇防空系統與戰機的部署位置後，匿蹤戰術戰機其實非常難威脅中國本土。倒是B-2戰略轟炸機才真正能產生威脅。

此一結論似乎相當另類，但這並不是說匿蹤技術發展方向錯誤，因為匿蹤技術確實在過去十幾年賦予優勢，只是隨著科技進展，這幾年反匿蹤技術已趨成熟並且與匿蹤戰機一樣陸續服役。

在新型俄式防空系統與戰機面前，美式匿蹤戰機優勢已被抵銷，他們將無法單靠匿蹤性能取得作戰優勢，而需要搭配戰術與輔助科技的搭配。例如最新的F/A-18G電戰機，搭配最新型電戰系統，並且具有戰機級的運

動性，因此能更積極的與作戰機隊搭配。F/A-18G可以干擾L波段甚至更低頻率的反匿蹤雷達波，匿蹤戰機的低可視性搭配F/A-18G的電戰輔助，生存性可以大幅提高。

但另一方面，F/A-18G沒有匿蹤能力，本身大肆放出電磁波，相當於傳統戰機，可用對付傳統電戰機的方式加以反制，例如被動雷達、反輻射飛彈等。這已相當於匿蹤戰機問世前，交戰雙方都用傳統戰機搭配電戰系統或專業電戰機的戰況。

至此，本系列文章由匿蹤技術基礎、RCS量級估計、反匿蹤系統分析、反匿蹤戰術、到考慮地理位置的反匿蹤部署做一總覽。這整串內容本是極大範圍的課題，在這裡濃縮成三篇文章，系統性的化繁為簡加以討論，期能拋磚引玉，帶動不受制於意識形態的相關研究熱潮。

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博士生，筆名楊可夫斯基，為尖端科技專欄作家。



日本航空自衛隊KC-767空中加油機(照片提供：張詠翔)