

軍用運輸機的自我防護

空軍備役中校 魏楞傑

提 要

近年來的一些地區性非對稱軍事衝突中，參戰國都得依賴運輸機完成大規模軍事人員及物資的遠距離境外部署，使得運輸機頓時成為戰場後勤補給的命脈，也成為敵方游擊隊或反抗軍的第一攻擊目標。運輸機的體型大、速度慢，是地面防空系統的最佳攻擊目標，若遇上機動性強大的肩射防空飛彈，更幾乎難以倖免，因此運輸機的自我防護已成為許多國家空軍的重要課題。

二次大戰以來，運輸機的應用與日俱增，冷戰結束後，全球不斷發生地區性衝突的新局勢更助長了這個趨勢。運輸機隊是快速運送作戰部隊遠赴戰區的唯一憑藉，在各種軍事作戰中扮演著舉足輕重的角色，是現代化武裝部隊不可或缺的一部分，因此也成為敵人極欲除之而後快的第一目標。

運輸機的設計發展以往一向偏重於運量和航程，生存性和防護性則被認為沒那麼重要而被冷落一旁，1950和1960年代的一些主要國際衝突，如：越戰、韓戰、柏林危機…等，運輸機群都飛航於戰區外，不曾遭到敵方的威脅，因此上述看法當時似乎言之成理，但隨著肩射防空飛彈(man-portable missiles, MANPADS)的引入戰場並散播世界各地後，現在情況已完全改觀。

全球至今生產的肩射防空飛彈超過50

萬具，俄羅斯早期生產的箭式(Strela)(北約編號SA-7Grail(聖杯))，已經過多次性能改良，並授權多國生產，如：中共(HN-5)、埃及、北韓、巴基斯坦、前南斯拉夫，擁有它的國家超過60個；而俄羅斯最近生產的箭三(Strela 3，北約編號SA-16 Gimlet(手錐)/SA-18



現代化武裝部隊快速部署全得依賴運輸機，伊拉克戰爭中美軍的C-17運送大量軍事人員及物資到戰區。[7]

Grouse(雷鳥))，更以驚人的速度擴散。美國製造的刺針飛彈，至少在26個國家服役；法國西北風(Mistral)總生產量超過12,500枚，在21個國家33個軍種服役，估計全球至少有25個恐怖組織擁有這類型武器。

肩射防空飛彈的典型射程是5到8公里，可攻擊飛行高度12,000英呎下的飛機，1980年代中期的蘇聯入侵阿富汗戰爭中，讓世人充分領教了它的威力。戰爭初開始時，蘇聯空軍的Mi-24攻擊直昇機縱橫戰場上空，如入無人之境，阿富汗游擊隊在地面毫無還手之力，被打得潰不成軍，等到美國暗中提供雷神公司(Raytheon)的刺針(Stinger)肩射防空飛彈給游擊隊後，情況馬上改觀，游擊隊以刺針飛彈擊落了約270架的蘇聯軍機，除了Mi-24外還包括Su-25蛙足式(Frogfoot)對地攻擊機，獵殺率超過80%，蘇聯戰機從此不再低空飛行攻擊阿富汗游擊隊。

飛行速度緩慢的運輸機更是肩射防空飛彈的最佳目標，特種部隊及游擊隊持有肩射防空飛彈後，就能在機場附近任意攻擊起降中的運輸機。第一個受害者是入侵阿富汗的蘇聯，逼得蘇聯必須在喀布爾(Kabul)機場內，以繁複的措施來防護運輸機的起降安全；而美國及北約盟國在波西尼亞及伊拉克戰爭中，也有多架運輸機遭到肩射防空飛彈的毒手。

身處險境

在近年來的非對稱性軍事衝突戰爭中，雖然被攻擊國的傳統武力無法與多國部隊相抗衡，但戰場裡到處充斥著高機動性的游擊



原本是步兵防空武器的肩射防空飛彈，現已成為游擊隊或恐怖分子攻擊運輸機的利器。[2]

隊或反抗軍，使得進攻國的低速作戰飛機—尤其是運輸機—隨時身處險境之中，與過去數十年間的情況迥然不同，下述就是一些典型的例子：

1993年9月3日，一架義大利空軍的G-222運輸機，在賽拉耶佛(Sarajevo)機場準備進場時，被1枚俄羅斯製造的SA-7肩射防空飛彈擊落。

2002年8月19日，一架俄羅斯的Mi-26軍用運輸直昇機準備在車臣(Chechnya)的格羅斯尼(Grozny)機場降落時，被車臣游擊隊以肩射防空飛彈擊落，機上117名軍人中有85名喪生，其餘32名重傷。

2003年11月，一架DHL的A300B4貨運包機，在巴格達機場起飛到約8,000英呎高度時，遭到SA-14 Grelmin（小精靈）肩射防空飛彈的攻擊，機上的3套液壓系統全毀，飛機失去控制，駕駛員靠著設定引擎推力，將飛機緊急降落。

2003年11月2日，一架美國陸軍的CH-47



2003年11月，一架DHL的A300B4貨運包機在巴格達機場附近遭到SA-14攻擊。[7]

契努克(Chinook)運輸直昇機，在巴格達西方被一枚SA-7肩射防空飛彈擊落，機上37名軍人中有16名喪生，21名重傷。

2003年12月，一架美國空軍的C-17運輸機，載著46名乘客和機組人員，也是在巴格達機場起飛時，遭到SA-14飛彈的攻擊，所幸飛機由駕駛員緊急安全降落。

2005年1月26日，一架美國海軍陸戰隊的CH-53海馬(Sea Stallion)直昇機，在伊拉克北方沙漠靠近約旦邊界處，遭防空飛彈擊落，飛行員和機上30名陸戰隊員全數喪生，造成美國自2003年3月入侵伊拉克以來，人員死傷最慘重的單一事件。

2005年1月30日，一架英國空軍的C-130K運輸機由巴格達機場飛往北邊的美軍後勤基地時，在機場西北方30公里處被防空飛彈擊落，機上10名軍人全數喪生。

2006年5月6日，一架英國海軍的大山貓(Lynx) AH.7 XZ614直昇機，在伊拉克巴斯拉市(Basra)上空以中高度飛行執行偵察任務

時，被游擊隊的肩射防空飛彈擊落，機上5名人員重傷。

2007年5月30日，一架美國陸軍的CH-47契努克運輸直昇機，載運北約的國際安全協助部隊(International Security Assistance Force)，在阿富汗的赫爾曼德省(Helmand)上空，被塔里班(Taliban)游擊隊的火箭擊落，機上7名人員全數喪生。

2009年1月26日，二架美國陸軍的OH-58D蓋瓦(Kiowa)戰場觀察直昇機在巴格達機場北邊約250公里處墜毀，機上4人全部喪生，伊拉克游擊隊宣稱是被他們擊落的，但遭美軍否認。

這些迭次發生的攻擊事件，清楚顯示慢速飛機已成為敵人最易攻擊的目標，運輸機的自我防護因而成為整體性能需求的一



美國空軍C-17運輸機發射火焰彈的壯觀場景。[7]

部分，新一代的運輸機如：C-17、C-130J、A-400M，已將上述情況列入設計考慮中，現役舊型運輸機也有多樣化的返廠改裝計劃，以安裝自我防護系統。具備最大程度的存活性，已是今後運輸機的基本需求。

戰場威脅

戰場上對軍用運輸機的威脅程度，根據戰區的情況一般分為輕、中、高這3級：

輕度威脅是指具有中、小口徑（不超過14.5公釐）的重型機槍，以及紅外線導向肩射防空飛彈。這是非常普遍的威脅，一般就是特種部隊在機場附近活動的場景。當敵軍無法維持一定的兵力部署時，這種是最典型的佈置，也是維和任務最可能碰到的情況。

中度威脅是指具有較精密的自走式防空火炮以及地對空防空飛彈，一般搭配著追蹤搜索雷達，還有光電支援裝備，戰場上或多或少有些正規部隊。自走式防空火炮的機動性高，也許以自動模式操作，也可能納入中層級的指揮、控制架構下。在標準作業程序下，運輸機不應靠近中度威脅的戰區，不過現今的部隊運動非常迅速，因此難免有失算的時候。

重度威脅是指具有精密的防空指管架構，指揮高性能的面對空飛彈及戰鬥機。此種等級的威脅是激烈衝突中的典型場景，運輸機絕對不能飛臨它的上空。

要減輕運輸機執行任務的風險，所採取的反制措施取決於戰區情況和威脅程度，與運輸機的性能及飛行計劃也有關。

運輸機先天存活性就比戰鬥機差，體

型大、速度慢、動作遲鈍、還有大的雷達截面積(Radar Cross Section)、顯著的紅外線蹤跡…等。這些弱點有的可在設計階段設法加強，有的就只能在機上安裝自我防護系統，針對威脅的攻擊追蹤、導向方式，設法削弱它們的危害程度。

要裝用何種系統，得先對預期的威脅程度有正確的評估。配備一些基本防護裝備後，運輸機就能應付輕度威脅，若再增加一些先進裝備，也可以對付中度威脅，但在重度威脅的戰區，實在沒有運輸機活動的空間。

自我防護

運輸機的基本自我防護架構，至少要能對付紅外線導向面對空飛彈的輕度威脅，因此基本配備就是飛彈發射警告器(Missile Launch Warner)。此處要注意「發射」這兩個字，這種警告器為全被動式監測，因此無從發現地面有否飛彈，但能在飛彈發射的



英國空軍C-17運輸機艙門稍後方是大型飛機紅外線反制系統追蹤感測器及雷射干擾器機座，艙門正前方是飛彈逼近警告器。[12]

瞬間，察覺飛彈火箭推進器耀眼的紅外線蹤跡。飛彈發射警告器通常會與干擾絲及火焰彈相搭配，由警告器控制干擾絲及火焰彈的拋投時機。

這套基本自我防護架構還可以擴充，增加較複雜的裝備以追蹤飛彈的軌跡，在最適當的時間進行反制。譬如美國的先進威脅紅外線反制(Advanced Threat Infra-Red Counter Measures, ATIRCM)系統，就是以一搜索追蹤感測器和一雷射或紅外線光源，對飛彈的尋標器進行干擾。

飛彈發射警告器的反應必須非常迅速，以一飛行於15,000英尺(4,500公尺)高度的運輸機為例：當一距離約8公里外的肩射防空飛彈以它為攻擊目標時，目視確認耗時3秒鐘、啟動武器約1到2秒、讓陀螺儀旋轉3秒鐘、再用3到4秒鐘的時間來瞄準、發射。總計在發射前約耗時10到12秒，飛彈飛行的時間約為3到7秒，因此當敵方發現我方運輸機後大約13到19秒，飛彈就會擊中我機，飛彈發射警告器必須在飛彈發射後的短短數秒內，即時提出警告。

至於來自輕型武器的威脅，目前尚無任何系統可預先警示，唯一的反制方式就是遠離它（這點說比做容易），並在機上加防彈裝甲，以防護機艙及其他重要的部位。

美國空軍的C-17在派遣到波西尼亞執行運補任務前，就在駕駛艙的內部裝上由卡維拉(Kevlar)和陶瓷(ceramic)複合材料製成的裝甲，以抵擋輕武器攻擊。美國空軍也由1993年起，在C-130的駕駛艙內加裝由英國氣動顧問公司(Aero Consultants)所發展的裝甲罩



C-130駕駛艙內機組人員的防彈座椅。[1]片(Armourshield)和防彈座椅，它是由防彈級陶瓷和芳香族(Aramid)纖維強化複合材料製成，防護駕駛艙需80到100片。

自我防護系統亦需有適當的飛行動作來配合，譬如：蘇聯運輸機在阿富汗戰場上，就以高空巡航和大角度進場方式，減少暴露於肩射防空飛彈和輕型武器中的機會。機場周遭的安全管制也同樣重要，必須經常直接監測，還有重覆性的長距離巡邏；當然，這些空中飛行動作和地面防護作為，是對戰區整個情況及威脅的可能位置皆已全盤掌握後的結果。在維和任務的初期階段，對當地的各種武力尚不清楚時，這種防護方式的成效甚微。

對付中級威脅要有雷達警告接收機(Radar Warning Receiver)，當發現敵方雷達站時，它會警告機員此雷達的位置、型態、

指揮的武器種類，並建議一較安全的飛行航線，彌補運輸機動作遲鈍的缺點。雷達警告接收機也能與干擾絲，火焰彈、誘標(decoy)相搭配。

此處要注意誘標的特性，因為大多數的誘標都是為戰鬥機而設計的，而運輸機和戰鬥機的雷達截面積差異甚大，彼此動作特性也不同，譬如：運輸機經常會做繞圈(circling)飛行，在空中形成一相當大的亂流面，若又是四螺旋槳大型運輸機，亂流與螺旋槳尾流產生的合成效應會讓誘標的效果大打折扣，所以誘標在運輸機上的使用會有所限制。比較全面性的自我防護系統，還應包括主動式干擾器，例如雷射警告接收機對雷射導向飛彈、雷射測距儀、及雷射定標器就很有效。

紅外線反制

不論是面對空、空對空紅外線導向飛彈，皆是運用被動歸向紅外線導引的原理，由目標的紅外線蹤跡，自動完成目標的搜索及追蹤。

根據英國航太系統(BAE Systems)一份解密的文件，由1973年到2002年的這30年間，全球共有1,650架的軍機(包括：戰鬥機、直昇機、運輸機)遭飛彈及地面防空砲火擊落，其中遭紅外線導向飛彈(包括空對空及空對地)擊落的佔49%，遭防空砲火擊落的佔29%，遭雷達導向飛彈擊落的佔14%，原因不明者佔8%。紅外線導向飛彈擊落的戰機最多，清楚顯示紅外線導向飛彈的危險。

就運輸機而言，最危險的紅外線導向威



英國空軍C-130機身兩側安裝的AN/ALQ-157紅外線干擾器。[1]

脅是地面發射的防空飛彈，尤其是肩射防空飛彈，因此紅外線反制被列為運輸機防護的第一要務。

■ 被動式反制

面對敵方威脅，自我防護系統的首要需求，就是偵測到飛彈發射的尾焰後，立即警告機員。飛彈發射警告器的典型工作波長為3到5微米，為提供360度的防護，通常採掃描模式或星形排列模式。掃描模式是以數量有限的換能器(transducer)和一組反射面，循序掃描特定的空域；星形排列模式則是用許多的換能器，直接監視所需的防護範圍。

飛彈發射警告器的關鍵技術，也是問題的發生點，就是警告器的誤警率，說白話一點，就是儀器靈敏度和錯誤率之間要如何取捨。這是因為飛彈發射警告器的工作負荷，遠比紅外線導向飛彈尋標器來得重，尋標器

只需由單純的背景中分辨出目標，飛彈發射警告器則須由地面混亂的背景，如：火焰或高熱物體中，分辨出飛彈發射的尾焰。要降低誤警率，提昇可靠度，目前沒有治本之道，只能強化訊號處理的方法，改變感測器的放置位置，以及在系統記憶體內，存放所有已知的飛彈發射紅外線蹤跡。

較根本的解決方法，是使用工作於紫外線(Ultra-Violet)波段的感測器，這種偵測器的優點是不需冷卻，而且雜訊來源少。自然界會發出紫外線的物體少之又少，因此若發現有紫外光，它若不是飛彈的尾焰，就必是其他的人造來源，如：電焊火焰，所以處理紫外線訊號的過程較簡易，也能迅速、正確地找到威脅的位置。紅外線偵測器得有個冷卻器，還得依賴大量的運算以去除眾多的雜訊，所以系統笨重且反應速度慢。

但紅外線偵測器也不是一無是處，它偵測來襲飛彈的到達角(angle-of-arrival)就相當精確，在大多數天候情況下的性能表現也都讓人滿意。紫外線容易受大氣干擾，尤其在

工業污染的區域，空氣中滿溢的臭氧會吸收紫外線輻射，而且偵測飛彈的到達角不夠精確。機型龐大、蹤跡顯著的運輸機，即使配有雷射干擾器，也得在飛彈尚未逼近的相當距離外進行反制，在污染的空氣中若使用紫外線偵測器，所測得的飛彈距離就會有失準確。

飛彈發射警告器常與飛彈逼近警告器相結合，形成一主動式雷達系統，追蹤逼近中的飛彈，由於任何雷達系統都會以適當的技術，如：高脈波重覆頻率(High Pulse Repetition Frequency)來抑制雜訊，因此此時的誤警率就比較不需費心。飛彈逼近警告器所提供的訊息，能補充飛彈發射警告器的警示功能，確定飛機的確受到飛彈攻擊；飛彈逼近警告器偵測到的飛彈航向、速度、距離…等資料，經由電腦計算分析後，就能建議適當的閃避動作，或是在最適當的時間拋投干擾絲及火焰彈。飛彈逼近警告器為主動式系統，持續向外發射電磁波，在某些情況下，可能會洩漏我機的行蹤，因此目前已在開發被動式系統。

現在的紅外線導向飛彈，已能分辨各種火焰彈和飛機尾焰的頻譜蹤跡，有些甚至還具備辨識目標運動的能力，能分辨火焰彈和飛機的飛行軌跡。美國因此開發了特殊材料誘標(Special Materials Decoys)，以往的鎂材火焰彈會產生大量、持續好幾秒的紅外線輻射，還伴隨肉眼輕易可見的火光及濃煙；而特殊材料誘標內部是許多的薄金屬箔片，在空中大約2秒鐘就會燒盡，所發出的紅外線輻射與載機的較接近，引誘飛彈的能力較強。



美國海軍陸戰隊C-130J擋風玻璃下方的AAR-47(V)2飛彈逼近警告器。[7]

■主動式反制

除了前述的被動式反制外，運輸機也能採取主動式反制來對付紅外線導向飛彈，在來襲飛彈的控制系統內產生大量雜訊，或是以錯誤的訊息迷惑它。

雜訊反制系統稱為飽和干擾器(Saturation Jammer)，為一工作於紅外線波段的發射器，所發射的能量會使飛彈的尋標器飽和，甚至損壞。這種干擾器需要很大的能量，還得有很精確的瞄準，才能在短促的時間內，把足夠的能量投射到體型小、快速飛行、動作靈活的飛彈，技術上極富挑戰性。

美國空軍各型運輸機現正安裝中的大型飛機紅外線反制((Large Aircraft Infra-red Countermeasure, LAIRCM)系統，是目前唯一可反制各種紅外線導向飛彈的機上系統，它是用3具諾格(Northrop Grumman)的AN/AAR-54(V)紫外線飛彈警告系統(Missile Warning System)感測器，偵測飛彈尾焰發出的紫外光以提出警告，每具感測器的防護範圍為120度，能清楚辨識飛彈或雜訊，機身上



美國空軍特種作戰司令部C-130運輸機機尾，安裝著大型飛機紅外線反制系統追蹤感測器及雷射發射器機座。[7]

搭配安裝數個內置微調追蹤感測器(fine-track sensor)及復仇者(Nemesis)雷射發射器的機座。當有飛彈發射時，飛彈警告系統將偵測的訊號傳送給系統電腦，若分析判定是敵方的飛彈，微調追蹤感測器會持續偏轉，讓感測器牢牢鎖定來襲的飛彈，再由雷射發射器射出一經調變的高能量雷射光束，干擾或破壞飛彈的導向裝置。

迷惑式反制系統則不會傷害飛彈的尋標器，而是讓它搞不清楚真正目標的所在。系統的設計方式有兩種：第一種稱為「熱塊」(hot brick)，是把一塊鋁材加熱到高溫，散發的紅外線輻射經一由微電腦控制的機械活門，在交互開關下調變出最適合的波長，以吸引特定的飛彈。實質上，此系統的行為很類似一強大的紅外線光源，遮蓋了飛機引擎的紅外線輻射，當飛彈偵測到此強大的紅外線光源時，會誤以為偏離目標而改向它飛去，結果是越來越偏離真正的目標。

紅外線誘標的設計必須注意一些關鍵性需求：

- 系統必須提供360度的遮蔽，或至少防護飛彈可能來襲的方向。

- 紅外線輻射必須強過飛機的紅外線，但又不能大到可分辨出是反制設施，而被飛彈棄之不顧。

- 機械式活門對紅外線輻射的調變，必須吻合被反制的飛彈尋標器。

最後一項需求點出了「熱塊」系統的侷限性。此系統的製造不難，但缺乏工作彈性，跟不上飛彈尋標器的科技變化。它的工作頻率與飛機的外形及活門速度都有關，若



俄羅斯開發的機尾火焰型誘標。[11]

要改變工作頻率，就必須重新設計製造新件。

新的設計是以電弧燈當做紅外線光源，並以特定的頻率將電弧燈開與關，調變出吸引飛彈的特定波長。開關的頻率很容易改變，因此極富工作彈性，能趕上飛彈尋標器的科技腳步，不過，缺點是由於快速且持續不停地開與關，電弧燈的壽命只有幾百小時而已。

只是不論是「熱塊」或是電弧燈都要蓋上濾光鏡片，不可發出可見光，否則不啻是向敵人招手，無疑是引狼入室。

俄羅斯在入侵阿富汗的戰爭期間，為了反制反抗軍以美製刺針肩射防空飛彈對其運輸機的攻擊，開發出另一種誘標設計：持續且均勻地將少量飛機燃油灑入飛機的尾流中，予以點燃形成一維持相當時間的大火焰。與引擎尾焰比較下，此火焰的紅外線散射能量是前者的數十倍以上，肩射防空飛彈的尋標器很難不被它吸引。由於這團火焰與飛機有相同的飛行速度，即使飛彈尋標器有辨識目標運動的能力，也無法分辨兩者的飛行軌跡；而火焰和引擎尾焰所散射的頻譜及波長完全一樣，縱然某些飛彈具備辨識頻譜



大型飛機紅外線反制系統中的復仇者雷射發射器。[12]

的能力，亦難以分出兩者的差異。

美國空軍現正進行美國飛機多功能光電防護(Multifunction Electro-optics for Defense of US Aircraft)計畫，預備發展更進一步的主動式防護。新系統是以多個光電感測器及多樣化脈波進行三階段的反制：系統先以雷射全區域掃描，搜尋包括肩射防空飛彈尋標器在內的光電、紅外線威脅來源，保持飛機在飛彈的攻擊射程之外；若不幸落於某飛彈的射程內，由系統瞄準並摧毀飛彈的導向感測器，讓它無法發射；倘若飛彈已發射，系統會瞄準地面的雷射乘波(laser beamrider)發射機，或是飛彈內的紅外線尋標器，予以干擾或破壞。

雷達反制

運輸機的最大威脅是地面的防空系統，要躲避地對空飛彈的突襲，消極方式是運用雷達警告接收機，以它所提供的資訊進行閃躲飛行；積極方式則是以干擾裝置迷惑地面



美國最新開發的全數位式AN/ALR-69A(V)雷達警告接收機，預備安裝於C-130運輸機上。[20]

的追蹤雷達，讓它無法鎖定目標。

雷達警告接收機的職責是接收敵方雷達發射的電波，警告飛行員敵方地面雷達正在追蹤他的飛機，可能會遭到地對空飛彈或火炮的攻擊。雷達警告接收機以畫面及聲響兩種方式發出警示，某些雷達警告接收機能對特定的雷達發出特定的聲響，因此理論上而言，一訓練良好的飛行員，光憑警示聲響就能知道雷達的種類。

現代化的雷達警告接收機除了警示功能外，還會顯示此雷達所搭配的武器類型，所以它設計上最重要的功能之一，就是辨識不同等級的威脅，評估各雷達的威脅程度，避免對遙遠的雷達發出不必要的警訊。但在另一方面，運輸機不可能與戰機一樣，在敵方飛彈逼近時做出閃躲的大動作，因此雷達警告接收機必須能對各雷達的威脅程度訂出優先順序，以儘早提出警示。

雷達警告接收機同時接收到的雷達波愈多，延遲警示或誤警的風險就愈高，尤其當

警告器是以先後順序的方式處理這些雷達波時，更是如此。現今的戰場上充斥著各式各樣的雷達，不見得都有辦法反制或干擾，依序的處理方式非常危險，因此運輸機的自我防護系統必須能同時分析各種雷達波，對最危險的提出警示，而且還得有一預備頻道，以應付可能突然冒出來，我方未有電波情報以致無法辨識的新雷達波。

地面追蹤雷達一般都為脈波(pulse)、都卜勒(Doppler)、或圓錐掃描(conical scan)雷達，脈波雷達在追蹤到空中目標時，會設定一個特定時間區段的距離閘(Range Gate)，只有在此時間區段內接收到的雷達回波，雷達才會進行分析處理，早於或晚於此時間區段的雷達回波，雷達都不予以理會，因此要迷惑脈波雷達，可採用距離閘引離(Range Gate Pull-Off)的方法，由機上的干擾裝置發送模仿機體雷達回波的偽波，並逐漸提高功率以完全掩蓋真正回波，且緩緩延遲發送的時間，讓追蹤雷達誤認為目標正在飛離中，於是調整它的距離閘，一旦追蹤雷達的距離閘只能接收到偽波後，立即關掉干擾裝置，追蹤雷達就失去了目標。

都卜勒雷達追蹤目標是採用速度閘(Velocity Gate)的方式，它是在追蹤到空中目標時，設定一個特定頻率區段，只有落於此頻率區段內的雷達回波，雷達才會進行分析處理，因此可採用速度閘引離(Velocity Gate Pull-Off)的方式迷惑它。機上的干擾裝置逐漸提高偽波功率，並緩緩改變偽波的頻率，讓追蹤雷達誤認為目標正在改變飛行速度，於是調整它的速度閘，之後的結果就是完全失

去目標。

圓錐掃描雷達對電子干擾幾乎完全無招架之力，機上的干擾裝置只需根據接收到的追蹤雷達波強度，發送一強度與其成反比的偽波，就會在追蹤雷達上產生一追蹤錯誤的訊號，驅動追蹤天線偏離目標方位，進而喪失目標的所在。

後續發展

運輸機遭到肩射防空飛彈攻擊時，若機上裝有各種反制裝備，都能增強它的存活性，最近的發展重點放在以戰術、飛行動作、蹤跡控制來強化存活性。美國空軍第46測試聯隊(Test Wing)在美國國防部及聯邦航空總署(FAA)提供經費下，於2004年完成飛機對肩射防空飛彈存活可行性聯合研究(Joint Aircraft Survivability to MANPADS)，結論是：大型飛機的戰術、科技、和程序雖都能提高遇到攻擊的存活性，但還需改良飛機的脆弱性做為第二道防線，讓飛機即使已遭到攻擊，仍能安全落地。



雷神公司「警戒鷹」車載式雷射防護原型系統[16]

美國空軍因此偕同奇異飛機引擎公司(General Electric Aircraft Engines)，進行高旁通比渦輪扇引擎對肩射防空飛彈攻擊的脆弱性研究，重點包括引擎受損後對操縱、推力的變化，以及對飛行安全的影響，還有何種損壞會導致飛機墜毀。研究結果對未來大型軍用飛機的發展，如：E-10A多任務指揮控制飛機(Multimission Command and Control Aircraft)，以及選用的引擎會有重大影響。

除了在運輸機上裝置各種反制裝備外，美國雷神公司也正研究建立一稱為「警戒鷹」(Vigilant Eagle)車載式雷射防護系統，車上有一和高速公路廣告看板大小相仿、由陣列式紅外線感測器驅動的活動式雷射光源，紅外線感測器偵測到地對空飛彈發射的尾焰後，引導雷射光源對準飛彈發射高功率雷射光。不過雷射光對飛彈產生的效應與一般人想像中不同，它並不會鎔化飛彈的電子零件，而是破壞飛彈的導向系統，因此飛彈被雷射光照到後，通常馬上會做個大角度轉彎，無頭蒼蠅似地亂飛，無法對目標再進行追蹤。

雷神公司在2007年6月進行了一次實彈測試，該公司在一處山腰上啟動一具模擬飛機尾管的噴射引擎，然後瞄準發射一枚型號不明的肩射防空飛彈，而等候在旁的雷射光則成功摧毀了飛彈的導向系統；美國國土安全部(Homeland Security)也在2008年中時，於美國境內一處未透露位置的民航機場，測試「警戒鷹」的紅外線感測器和指管系統，證實它不會干擾機場的雷達、通訊…等系統。後續則是準備結合上述二種場景，以一枚飛



雷神公司在2007年進行的實彈測試中，飛彈被雷射光摧毀導向系統後，立即向下大轉彎。[19]

彈追蹤一架在機場上空慢飛的測試機，驗證在真實情況下的系統功能。

雷射系統只要功率夠強大，應付各種波段的紅外線尋標器都綽綽有餘，且對付未來可能出現新的尋標方式(如：影像)具備擴充能力，要在遙遠的戰地機場建立此種防護系統也相當簡易，因此「警戒鷹」是個很不錯的構想，如果一切順利，預期幾年後就會出現在戰場上。

參考書目

- [1] "Surviving a SAM Attack", Jane's International Defense Review, June 01, 1996
- [2] "Shielding the airlifters", Interavia October, 1997
- [3] "Moderating MANPADS' Mean Streak", Jane's International Defense Review, March 01, 1998
- [4] "Survival of the Smartest", Jane's Defense Weekly, March 03, 2000
- [5] "Close support", Jane's Defense Weekly, October 03, 2001
- [6] "Survivability and Self-protection Systems for Military Airlifters", Military Technology, September 2002
- [7] "Russian Helicopter Downed by MANPADS", The Journal of electronic Defense, October 2002
- [8] "Protecting the Sky Trains", The Journal of electronic Defense, June 2003
- [9] "David versus Goliath", Jane's International Defense Review, April 01, 2004
- [10] "Ground-Based MANPADS Defense", The Journal of Electronic Defense, May 2004
- [11] "Iraqi insurgents claim to have shot down RAF special forces Hercules", Jane's Missiles and Rockets, March 01, 2005
- [12] "Debate rages as military seeks to counter transport aircraft threat", Jane's International Defense Review, July 01, 2006
- [13] "Airborne Electronic Warfare - Jam Tomorrow", Jane's Defense Weekly, July 19, 2006
- [14] "Russia develops IR countermeasure for airliners", Jane's Missiles and Rockets, August 01, 2007
- [15] "Rogue missiles - Tracking MANPADS proliferation trends", Jane's Intelligence Review, November 01, 2007
- [16] "High-Power microwave weapons - Full power ahead", Jane's Defense Weekly, August 30, 2006
- [17] "MANPADS used in RN Lynx attack", Jane's Missiles and Rockets, July 01, 2007
- [18] "Airborne Electronic Warfare", Military Technology, April 2008
- [19] "Beam on: directed energy weapons get charged up for use on the battlefield", International Defense Review, Aug 11, 2008
- [20] "AN/ALR-69A(V)", Jane's Radar And Electronic Warfare Systems, Feb 13, 2009.

作者簡介

魏楞傑先生，空軍備役中校，現任職中科院第一研究所。