

空用氣象雷達與飛行安全

潘 大 綱

(空軍氣象中心)

摘 要

兩組空用氣象雷達PRIMUS450及RDR-1FB(AN/APS-113)已被裝置在本軍的航機之上，本文將從氣象應用協助偵測危險空域的角度來探討，如何執行掃描是最佳的掃描策略，如何迴避危險回波的空域，另外文中亦將特殊回波常常伴生惡劣天氣的型態逐一描述出來，以供航機機員在實際作業上可資參用。筆者更希望透過此文的討論，牽引出更多興趣於空用氣象雷達應用及探討的重要意見。

一、前 言

在第二次世界大戰期間，有二項突破的技術，革命性地影響到了日後氣象及航空發展，其一是使用雷達來觀測天氣，其二則是各型的飛機在戰後於運輸、交通等各方面大量的使用。就前者而言，雷達觀測對於劇烈對流的風暴來說，不但提供了許多風暴內部結構的資訊，對於飛航安全上亦將即時的預警以彩色圖示顯現於飛行員的儀表板之一角。近二十年來氣象人員之得以就對流系統有較以往更正確的認識，主要的功勞幾乎大部分都歸功於氣象雷達的進步與發展。

事實上，雷達觀測的基本原理早在19世紀末期就已經萌芽了，到了第二次世界大戰期間才愈趨成熟，至於應用在氣象觀測上則是第二次世界大戰之後的事。基本上，氣象雷達就其架設所在位置可分為地面氣象雷達與空用氣象雷達，若就其應用技術上而言，最為一般人所熟悉的則是傳統氣象雷達與都卜勒氣象雷達，其它的技術如多波長、多極化等雖在不同目的之需求及地域被使用，但畢竟不如上述分類來的簡易。無論是任意一種雷達，只要其目的是應用於天氣觀測上，基本上都不外乎波長為10公分(S-band)，5公分(C-band)，3公分(X-band)

與0.86公分(K-band)四種，前三者主要是以液態水滴為目標物(Target)，後者則可以探測到雲的存在與否，此種波長的氣象雷達比較屬於研究應用上的雷達。原則上氣象雷達是將電磁波經由天線發射出去，當此電磁波遇到有效目標(Effective Targets)時即會反射部分電磁波回到天線，此時雷達中硬體組件即會將所反射回天線的電磁波予以接收、放大處理及顯示。由於氣象雷達基本上假定雷萊散射(Rayleigh Scattering)是成立的，因此在雷達方程中(Radar Equation)說明了回波強度之大小決定於水滴粒子的大小與數目的多寡，通常粒子大小對回波強度的貢獻又比較粒子數目多寡來的明顯，因此回波強時主要是指雨滴大且數目多，從降水過程來看，這種情形必然與某些天氣系統有極為密切的關係，如雷雨、強烈發展成熟的對流雲團等。然而在電磁波發自天線射出去以偵測前方的降雨現象時，在這過程中，發射出去之電磁波會因水汽、空氣懸浮粒子，降水現象等多種因素而有不同程度上的衰減，為保持電磁波能量不受上述因素造成太多的衰減，唯有增大每一發射出去電磁波的能量，換言之，即是增長雷達波寬或加大發射機之功率，後者在經濟效益的考量上並不實際，而不幸的是增大了雷

達的波寬卻阻礙了雷達可以分辨個別目標物的能力。致於不同波長氣象雷達之選擇，主要是考量所欲偵測目標特性及減少因不同因素造成衰減程度兩者。

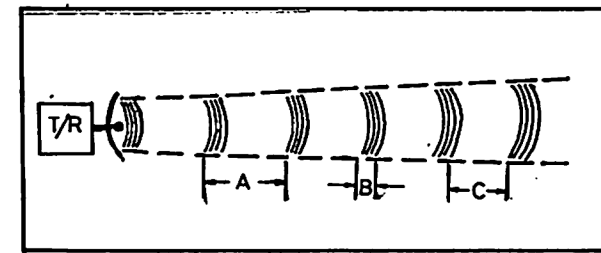
本軍在部分飛機上已裝置了3公分(X-band)的空用氣象雷達，這對於飛行中航路上安全航路之選擇，危險空域之迴避提供了極佳的參考資訊，本文之目的即在介紹、分析比較及從氣象觀點上討論如何來善加利用此一裝備，使其達到裝置此一雷達之最大的功效，此外筆者亦將數種值得留意之回波型式，逐一地描述出來，使作業人員在發現如是回波時及時迴避。

二、關於空用氣象雷達使用之幾項重點

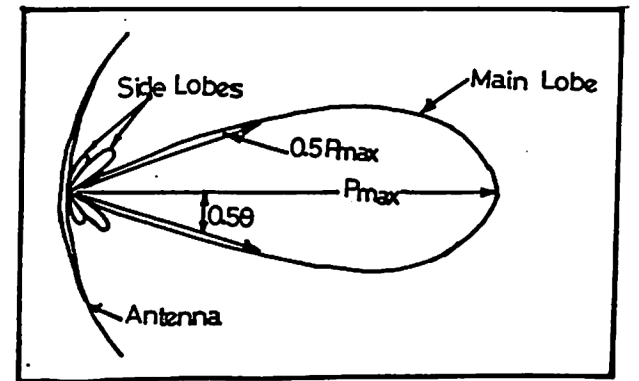
本軍的空用氣象雷達主要是 Honeywell公司的 PRIMUS 450及 Bendix公司的 RDR-1FB (AN/APS-133) 兩種均屬3公分波長之氣象雷達，雖然兩者除了對降雨區域及強度得以有效偵測外，另外亦有地型辨認或貝康(Beacon)的功能，但是就其主要功能仍是以偵測降雨範圍及強度為主要。氣象雷達之所以多採用10公分、5公分及3公分的波長，主要是在氣象上水滴對於電磁波在上述波長上就較好的反射效果，另外就發射電磁波的型式上來看，氣象雷達多使用脈波的波型，這是因為脈波型可以使回波的強度與位置正確地被估算以顯示予使用者。事實上脈波雷達電磁波之發射可由圖一來看，A代表的是一個脈波從開始至下一脈波開始之間的間隔，B則是電磁波的波寬，C是無波區，波寬的長短決定了雷達在分辨兩個獨立的有效回波之能力，或者說是水平的解析度，這與波長的選擇決定了雷達偵測目標物之性質特徵是不同的，圖二中即說明了雖然五單位波寬所可偵測之距離較1單位波寬來得遠(能量較高)，但是相對的在A、B兩處之回波，對五單位波寬之波則無法將兩者獨立顯示於回波顯示器上，對於1單位波寬而言，則A、B清晰可被辨認為各自獨立的兩個回波。圖1中的C則是用來接收反射自目標物的有效回波之時間間隔，在此一時間內若

有回波自目標物反射至天線並被接收，那麼目標物距雷達的距離則可立即地被計算出來。雖然許多雷達參數在將雷達裝置於飛機上時早已確定了，但是有關於波束寬如圖三 (Beam Width; θ) 影響到同一距離內偵測目標的水平解析度，圖三說明了天線發射波束在空間中分布的情況，原則上而言，波束寬之角度 (θ) 愈小表示此一雷達對同一個距離內兩獨立目標辨認的能力愈高，圖四可以說明此點。許多實際飛行情形時，有些回波往往在飛機接近時突然出現於顯示幕上，這種情況極可能是由於天線並未上下擺動以偵測在飛行高度以下正在急驟發展的對流雲團，故此透過天線在水平準線做上下擺動的目的，不僅可以仔細偵測到在前方對流具體的結構，另外也可以監視或觀察是否有正在旺盛發展的對流雲團存在，上述的情況若就圖五來看就十分清楚了，航路上有利飛安避免危險航路之選擇，唯有正確的認知到前方系統真正立體的结构方可能找出最佳的航路。有些情況下，如飛機在接近廣大回波區時，突然顯示幕上回波強度會急速增強，使飛行員僅能在有限時間內立即採取處置，這樣的情形可能肇因於二項因素(如圖六所示)，其一是接近機頭A的降雨極強或某些因素使得發射出去的電磁波在通過第一個主要對流降雨後大量衰減，使得電磁波無法在接觸到第二個對流降雨雲團時，正確地反映出其降雨的強度，雖然這種情形可以透過硬體對降雨或距離遠近給予強度上做一補償，而後再顯示在顯示幕上，但是這種功能往往並無法將真實的降雨強度表現出來，要不然則是容易造成錯誤的訊息；當飛機飛行至B點時(圖六)原來航路上(A點)所見到的第二個對流降雨雲團，此時已變成了最接近機頭的對流降雨雲團，此外，原來所看到(A點)的降雨強度之所以較在B點所見到者為弱，那是因為當飛機在A點與B點不同位置時，其所偵測之降雨強度實是由不同的兩個偵測體積所貢獻出來的。

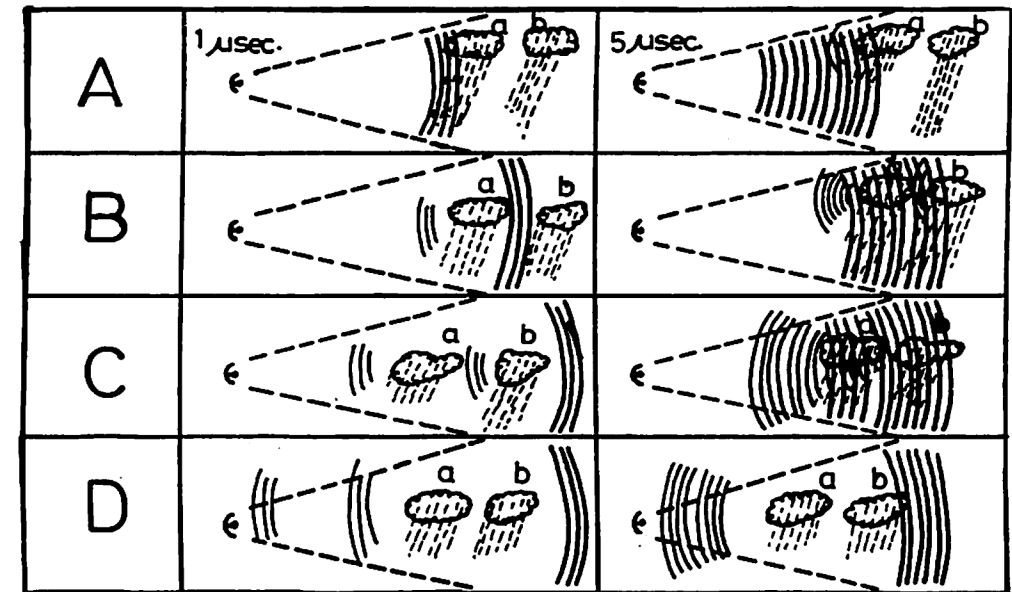
綜合而言，在操作空用氣象雷達時，除了要做水平上的掃描外，亦應同時執行上下的偵測，圖七可說明對流降水之立體結構可經由如此而獲得，對



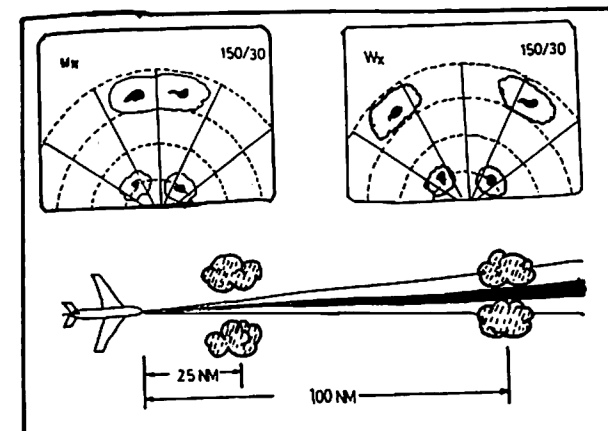
圖一：脈波雷達發射電磁波示意圖，A：波間隔，B：波寬，C：無波區(此段時間內天線接收反射自目標物之回波，T/R：為天線後方之發射與接收裝置。)



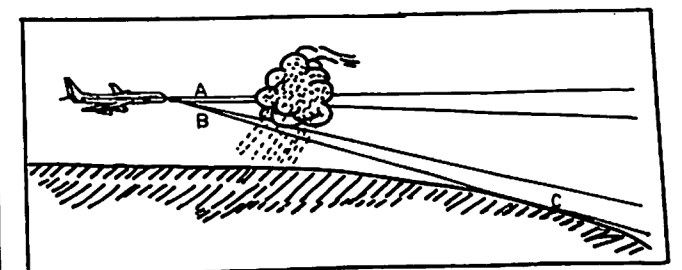
圖二：天線發射電磁波能量分布示意圖， θ 角代表波束角(Beam Width)，P是發射功率。



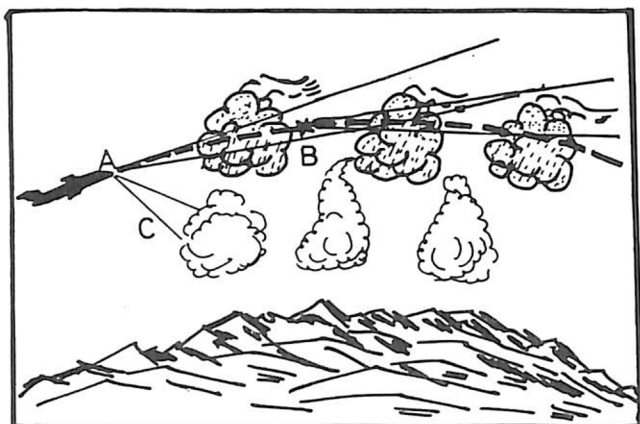
圖三：不同脈波寬時所造成不同之解析度示意圖， $1\mu\text{sec}$ 及 $5\mu\text{sec}$ 代表不同之脈波寬度，A：發射電磁波偵測到目標A，B、C、D為連續時間內回波與發射電磁波之相對應關係。



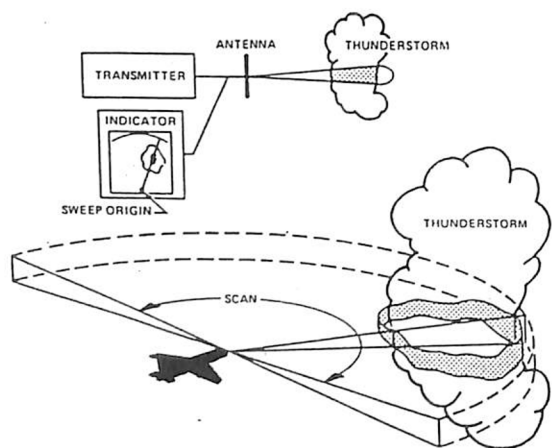
圖四：不同波束寬(Beam Width)下所得到的不同解析度。



圖五：掃描策略除水平掃描外(A)亦應執行上下擺動天線之掃描(B)，C點是地面與波束交角，用以做地型辨認之用。



圖六：說明顯示幕上回波位置、強度變化之可能原因，位置A及B時波束偵測之體積已顯然不同，另C可以發現航路上正在發展之嚴重對流雲團。



Antenna Beam Slicing Out Cross Section of Storm During Horizontal Scan

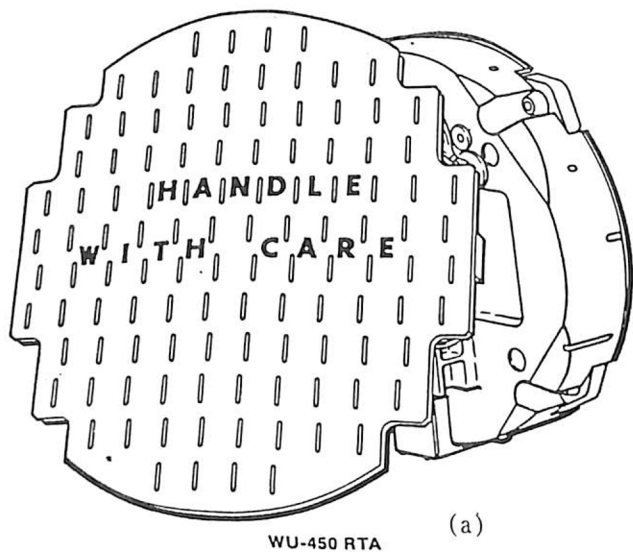
圖七：雷達掃描在空間範圍內所偵測之立體示意圖

於隱藏在飛機前方飛行高度以下的發展對流，在如此的掃描策略下亦可無所遁形了。

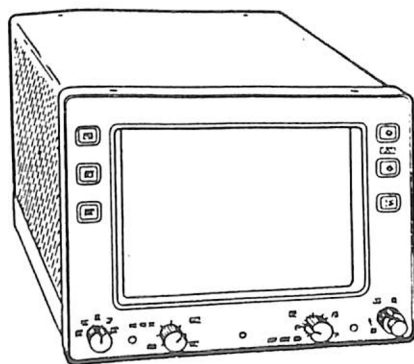
三、空用氣象雷達之功能及特性

RDR-1FB (AN/APS-133)與PRIMUS 450兩種空用氣象雷達的組成元件，基本上均包括了發射、接收器、天線及彩色顯示幕和控制選擇裝置等數大項，雖然功能上大致類似，但是就天線的型狀上而言，

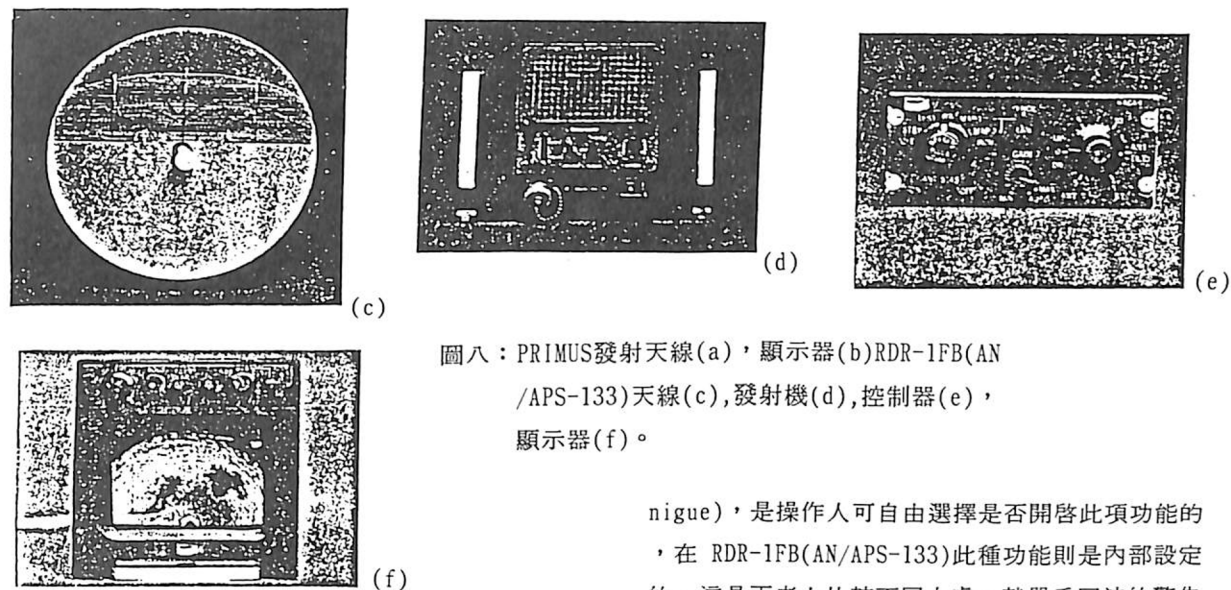
RDR-1FB是半弧狀的圓型天線，而 PRIMUS 450則是平面型天線，圖八為二組雷達的主要構成元件的示意圖。就其功能上而言，兩者均只能偵測到雨滴，和被液態水所包圍的濕冰雹，若是目標為乾燥之冰雹、乾雪；水汽、冰晶或體積小的乾燥冰雹都是這二種雷達所無法偵測到的，雖然造成飛機航行中飛航危險主要的是亂流及冰雹，然而這二者前者根本無法從這二種雷達上直接觀測到，後者也未必可以於操作雷達後在顯示幕得到明確的指示，故此對於造成亂流與冰雹天氣系統的完整之概念模式，實在有助於飛行員認知與使用在雷達彩色顯示幕上所顯示的訊息，若是天氣系統中並未包含降水的過程，那麼有了這種雷達並未有實質上的助益，這樣的天氣系統如晴空亂流，強烈水平或垂直風切，地型



WU-450 RTA (a)



WI-450 INDICATOR (b)



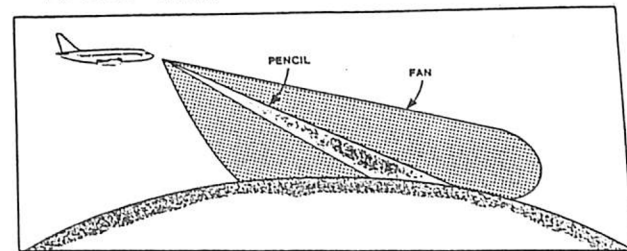
圖八：PRIMUS發射天線(a)，顯示器(b)RDR-1FB(AN/APS-133)天線(c)，發射機(d)，控制器(e)，顯示器(f)。

起伏所肇生的地型機械性亂流，或是山岳後方的背風亂流等均是。因此即使是在雲中，若是沒有降水發生，飛機上的空用氣象雷達在偵測此範圍時，雲仍不會有回波的發生，但是這未必就顯示了雲中沒有亂流的存在，此點是必須深刻認知與瞭解的。

就降雨回波的彩色顯示上而言，PRIMUS 450將強度以黑、綠、黃、紅、紫紅等五色來表示，背景色為黑色，依次由綠至紫紅分別代表強度逐漸增强的回波性質，這與RDR-1FB (AN/APS-133)以四色（無紫紅色）表示大致相似，由於本來雷達所測到之回波是反射自目標物的電磁波，兩組雷達設計已將回波強度利用回波與降雨率間關係，轉換成為估計之每小時降雨量之大小而後顯示於彩色顯示幕上，值得一提的是PRIMUS450降雨強度之分類是採用NWS (National Weather Services)的VIP(Vedio Integrated Processor) 標準，VIP的等級3與等級4 (level 3, level 4) 均含於紅色強度顯示，等級5與6則屬紫紅強度範圍內。RDR-1FB (AN/APS-133) 提供了“畫面靜止停留”(Freeze)的功能，讓使用者在辨認系統或回波型態上有較充裕的時間及較清楚的指示。無論就兩組雷達任一組而言，其對發射出電磁波經嚴重降水所造成之衰減而後返回至天線的回波，均有補償的裝置，在PRIMUS 450上叫做REACT(Rain Echo Attenuation Compensation Tech-

nique)，是操作人可自由選擇是否開啓此項功能的，在 RDR-1FB(AN/APS-133)此種功能則是內部設定的，這是兩者上比較不同之處。就嚴重回波的警告裝置而言，PRIMUS 450上叫做目標警告 (Target Alert)，它是在 300海哩內的任一距離選定後，若是在機行航路前方水平 ± 7.5 度內有任一顯示紅色甚至更嚴重的回波時，即會警告飛行員，類似上述裝置在RDR-1FB (AN/APS-133)上稱之為飛行員警告 (Pilot Alert)裝置，此裝置對於在距離50至160海里的範圍內，若在機行前方水平 ± 20 度內有嚴重回波，此裝置會立即警告飛行員。

RDR-1FB (AN/APS-133)具有多種功能的事實，我們已在先前描述過了，然而在電磁波發射上，此一雷達卻可以於偵測降雨時使用波束寬 2.9度的束狀波 (Rencil Beam)，在對地面地型偵測時，為可涵蓋較大範圍以資地形比對而使用扇狀波 (Fan Beam)，這種因不同目的而改變天線所發射出之波束型狀可由圖九得到明確的概念。有關RDR-1FB(AN/APS-133)與PRIMUS 450的比較，我們可由表一中得到初步的認識。



圖九：筆狀波束（偵測天氣用）與扇狀波束（地型辨認）之示意圖。

機組 內容 項目	PRIMUS 450 (B-1900) x-band (3 公分) 天氣偵測、地型辨認。	RDR-1FB (AN.APS-133) (DC-130) x-band (3 公分) 天氣偵測、地型辨認、BEACON (貝康功能)
波長	300 海浬	300 海浬
功能	平面型	弧面圓型天線
最大測距	TARGET ALERT { 300 N M 之內，任一距離內。 監視飛機行進路徑前方，±7.5° 內任一顯示紅色 或更嚴重的回波。	1.天氣偵測時發射束狀電磁波 (波束寬 2.9°) 。 2.地型偵測時發射扇狀電磁波。
天線	同一機組	PILOT ALERT { 50 至 160 N M 距離之內。 監視飛機行進前方 ±20° 的嚴重回波。
警告裝置	回波強度以 5 色 (黑、綠、黃、紅、magenta) 逐次顯示強度程度 (黑色為背景色) ， (採用 NWS 之 VIP 分類強度) ，以 Z-R 回波強度與降雨強度關係顯示。	天氣回波以 4 色 (黑、綠、黃、紅) 逐次顯示強度。程度 (黑色為背景色) ，提供 "freeze" 功能以利辨認與分析，以 Z-R 回波強度與降雨強度關係顯示。
接收與發射裝置	REACT: (Rain Echo Attenuation Compensation Technique) 選擇性	內部設定 (Preset)
衰減補償裝置	不可調變脈波寬	天氣偵測 5.0 μsec / 波 Beacon 2.35 μsec / 波 地型辨認 0.5 μsec / 波
脈波寬		

表一：PRIMUS 450 與 RDR-1FB (AN / APS - 133) 之功能與特性比較

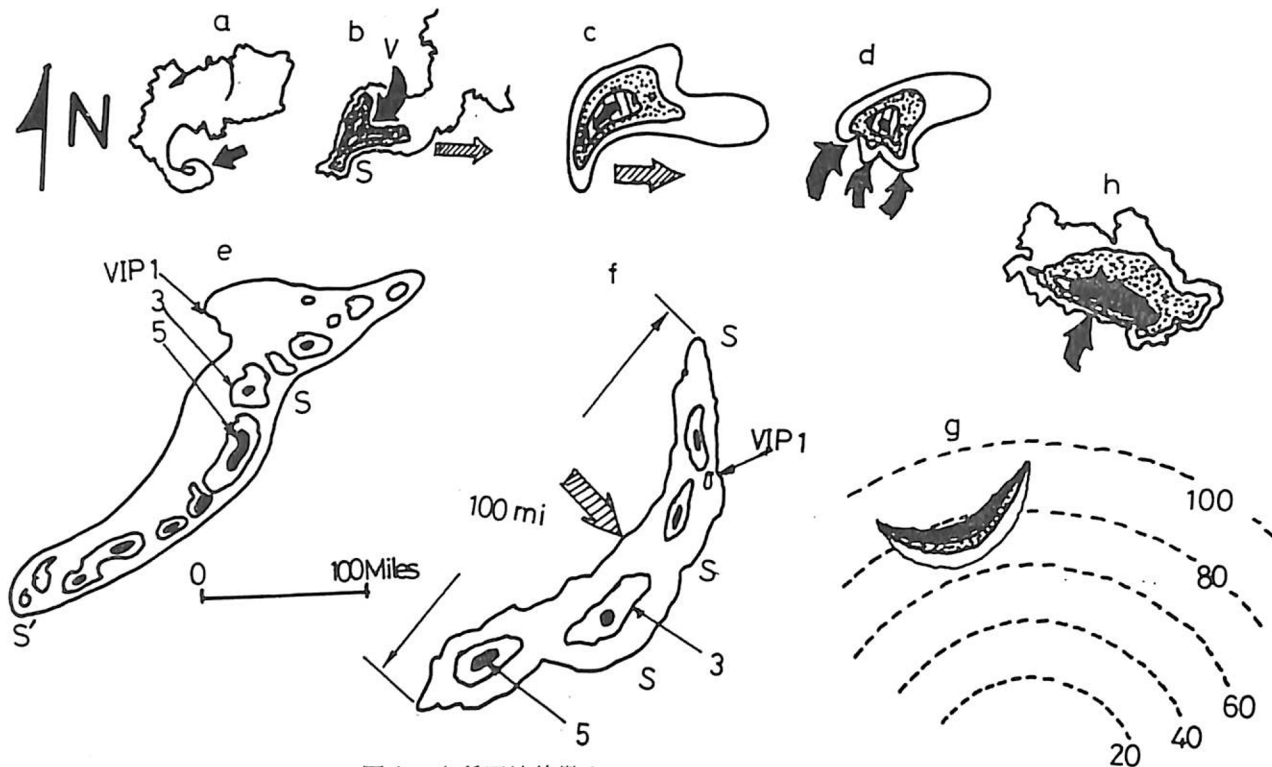
四、天氣現象與回波之關係

首先，我們應先強調，空用氣象雷達裝置的最主要目的並非是教導飛行員如何穿越回波或在雷雨胞雲間安全的飛行，而是要使飛行員在其航行路徑上遇到明顯有礙飛安天氣發生時，如何能安全地避開而降低不安全的可能性。前面已經說明了回波強弱，事實上只是水滴大小與數目多寡的函數，所有類似亂流、風切或具有危險性空域的認定，都是透過已知的天氣系統概念模式所推衍出來的，所以相當程度地瞭解諸如雷雨、颶線、對流雲團等的生命發展過程及其伴生天氣現象的時機與位置，對於應用回波以供危險空域判定來說是十分有用的。

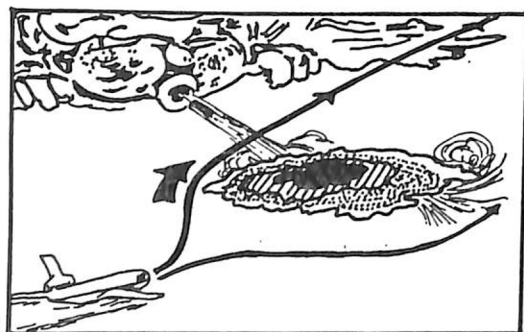
讓我們先看看值得注意的幾種回波型式，這種利用回波型態辨認危險天氣的技術，很早就為作業人員所採用了，這是因為類似這種範圍較大，形狀明顯的特殊回波型態，通常都伴隨著有相當程度的嚴重飛行天氣，如勾狀回波 (Hook Echo) 如圖十一 a，通常此種回波的勾狀部份存在著一個較小尺度的低壓區，直徑約在 3 至 10 哩左右，且維持時間很短約 5 ~ 10 分鐘左右，雖然研究與觀測顯示，勾狀回波與龍捲風之間有密切的關聯，但是未必每個龍捲風之生成必有勾狀回波或者說有了勾狀回波未必一定會有龍捲風的發生，不過在勾狀回波附近通常就是中到強烈亂流，強烈地風變，冰雹出現機率最高處，一旦在顯示幕上見到如是回波還是避之為妙，本省中南部在過去歷史記錄中也的確有過龍捲風的發生，因此這種回波型式與伴隨之天氣值得飛航人員多加留意的。另一種回波型式是 V 狀 (或稱 U 狀) 回波，有些人也叫它是「飛鷹」(Flying Eagle) 回波 (如圖十一 b)，若是雷雨回波中有這種 V 狀回波通常都是十分強烈的雷雨，伴隨著有很強的陣風、冰雹、漏斗雲、強到中度亂流等，通常嚴重天氣最常發生的位置如圖十一 b 中 S 所在位置，但是並非所有的 V 狀回波必有嚴重天氣，總之保持 20 哩或以上的距離應該是上上之策。第三種回波型態在本省應該並不常見，移之為懸狀 (Pendant Echo) 回波 (如圖十一 c)，這類回波在美國中西部而言較

為常見，那是因為不穩定條件在該處明顯較本省地區來得強烈，另外上述兩種回波型式 (Hook Echo 和 V-Shape Echo) 在這種回波上均已有了雛型，這種懸狀回波比起上述二種所伴隨之惡劣天氣更為明顯且嚴重，因此一旦見到還是以 20 哩距離避之為上。第四種是指狀回波 (Finger Echo, Scalloped Echo) (如圖十一 d)，這類回波較為嚴重的天氣發生在回波的邊緣，一旦發現之後，宜以 15 至 20 哩以上的距離及早避開。第五種回波是回波具有線狀特徵且有個別強烈降水中心個體的回波 (如圖十一 e) 最惡劣的天氣現象主要是發生在圖中所示的 S 位置與 S' 位置。第六種回波是船首型線狀 (Bow-shaped Line Echo) 回波 (如圖十一 f)，此種回波通常移動迅速，伴生的惡劣天氣位置即在圖中所示 S 的位置，許多研究結果顯示，這種回波與小尺度下衝風之間有極高的相關性。第七種回波是如圖十中 g 類的回波，雖然看起來只是一種弧狀回波，回波兩邊緣向後方彎曲，然而這情形可能是因為強烈降雨將雷達輻射出的能量嚴重衰減後的結果，實際的雷雨胞雲已無法看到其全貌，這種情形尤其是在回波後緣有強烈梯度時至為普遍，若是調整天線上下擺動，可以看到在主要回波後方會有陰影 (Shadowing) 區，這種陰影的發生是在飛航路徑選擇時，務必要避免的。最後一個值得注意的現象是，無論回波形狀以何種方式表現出來，只要是回波梯度強烈處 (圖十一 h)，必然會有極高或然率的伴生亂流發生，因此這個原則是要時時牢記在心中的。

總之，回波特徵及性質可以是多元化，多形式的方式出現，有時甚至有成簇的對流發展，維持或消散，對於飛行員在選擇最佳迴避路徑時應先認知到，為避開危險空域時選擇在系統移動的上風處通過比在下風處通過要安全 (如圖十一) 這一情況往往都是十分有效的。當然除了上述的一些回波特徵和及早趨避原則之外，對於遭遇雷雨、亂流或積冰等情形時，飛機、飛行員所會受到那些影響，由於篇幅關係，我們將於以後另文討論。畢竟，在我們開始時即強調的一件事，裝置「空用氣象雷達之目的，是要及早避開可能造成飛航危險的任何空域」，決非是教導如何成功地穿越它或徘徊於其間。



圖十：各種回波特徵之示意圖，詳述請參考原文。



圖十一：最佳航路選擇時宜選上風處通過，下風處選取時宜偏移回波較大距離，以策安全。

五、結語

空用氣象雷達之裝置，固然提高了飛行員在飛行中警覺危險的能力，然而諸如因降雨系統中風切所造成的亂流仍然是靠間接地推測所得，若是空用都卜勒雷達成功地予以應用於航機任務之中，由於此類雷達可以偵測到回波中風場的情況，那麼風切的事實就可以直接地被偵測到並提供機員警告，不過仍有許多危險的天氣現象是無法從現有裝備上可

以看得到的，例如晴空亂流等，因此航機人員於任務執行中保持高度的警覺、沈著的態度、充分的信心，掌握著一切細微徵兆，見微知著，及早反應下達判斷及處置，當然如果遇到了具有任何危險性的回波指示，最佳的處理之道仍然還是避開它為上策。

參考文獻

1. Atlas D. 1990: Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference, AMS. PP.806.
2. Bendix Co., RDR-1FB(AN/APS-133) Multi-Function Digital Color Radar, Pilots' Manual with Radar Operating Guidelines Bendix Company PP.46.
3. Hiser H.W and W.L. Freseman 1959: Radar Meteorology Institute of Marine Science, University of Miami Florida PP.267.
4. Honeywell Co. PRIMUS450 User's Guide PP.64

5. MATS, 1965: General Application of Meteorological Radar Sets, Tech. Rep. 184, USAF, PP.126.

6. Skolnik, M.I. 1962: Introduction To Radar System, McGraw-Hill Book Company PP.581.

The Aviation Safety and the Airborne Radar Usage

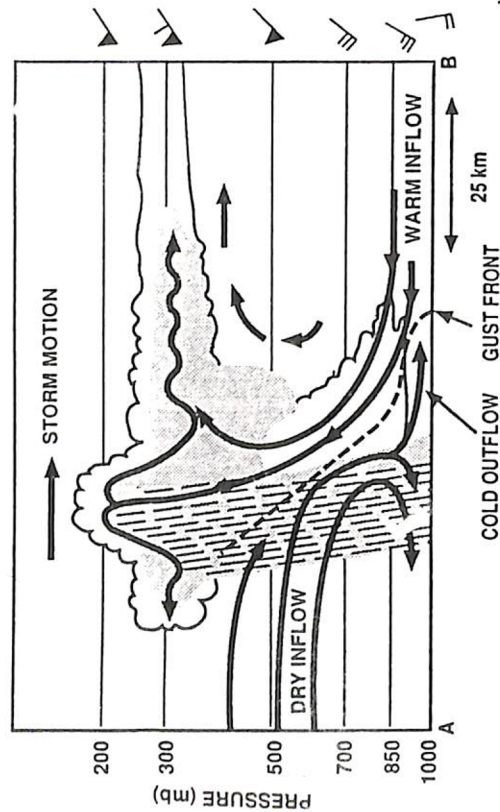
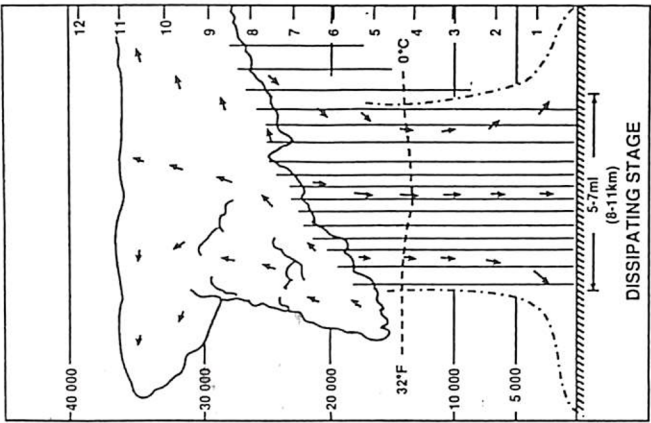
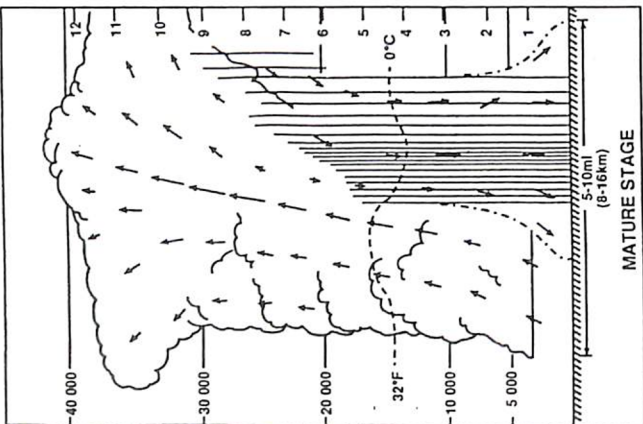
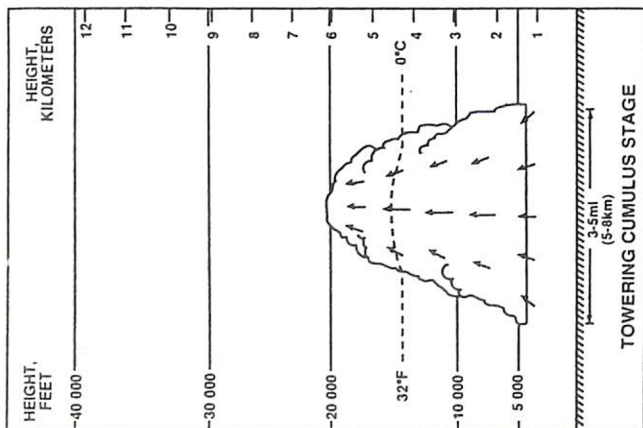
PETER DAGANG PAN

Weather Central, Weather Wing

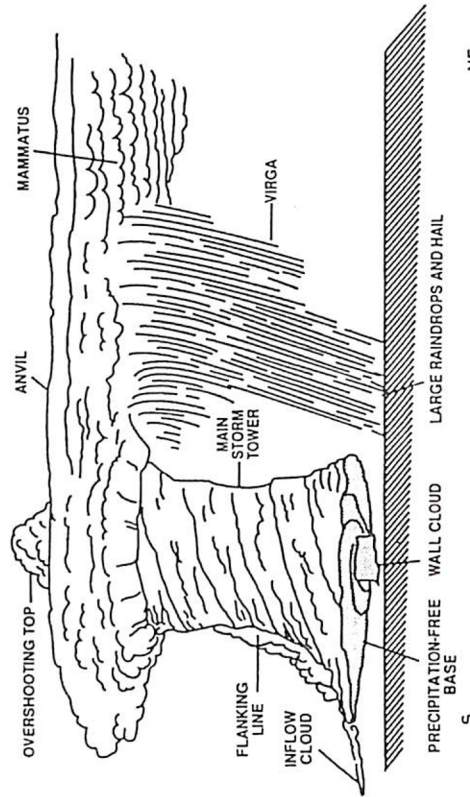
ABSTRACT

Two sets of airborne radar, namely PRIMUS 450 and RDR-1FB were concerned and discussed in this paper. In addition to discussing the relevance of the usage of the radars and aviation safety the author also stressed what a better antenna scanning strategy is. Specific echo patterns which always accompanied with aviation hazard weather were also illustrated.

The author would like to emphasize that equiped X-band airborne radars are used to give warning to pilots in order to escape before encountering aviation hazard weather. Therefore, the best policy while flying is to always keep alert and not try to penetrate any region which posses danger.



Cross section through gust front illustrating updraft along leading edge of the gust front.



Low-Precipitation (LP) Supercell Storm. The low-precipitation (LP) storm is a variety of supercell storm that forms in the vicinity of the dryline. The LP storm usually does not possess a pendant or hook on the low-level radar reflectivity echo. The rotating updraft is usually situated to the south and west of the storm precipitation echo.