

航空氣象添神兵之氣象雷達介紹及運用

李佩蓉

空軍氣象聯隊第十一基地天氣中心

摘要

伴隨科技發展突飛猛進，新科技也廣泛應用於軍事領域，高科技武器裝備大量湧現，有效發揮出強大戰爭威力，惟高科技武器裝備強大，仍無法擺脫天氣制約，本文藉由氣象新工具-高科技產品氣象雷達，分析如何強化氣象預測報戰力，加大在空機天氣突變之預警時間，使航空氣象之用途與作戰價值提升，有效支援戰(演)訓及維護飛航安全。

關鍵字：氣象裝備、氣象雷達、降雨雷達、X-Band

1. 前言

空軍武器裝備的歷史，百年間從無到有，由弱變強，儘管空中軍事武器由二次世界大戰起，才開始運用於軍事作戰，但是飛機及相關技術都顯示出獨特優勢，並得到快速成長發展，空軍也由輔助兵種，成為獨立戰略軍種，在各式作戰任務中發展為戰略戰役主要攻擊手，進而將空軍推進為一體化聯合作戰的主要力量；隨著人類社會自工業時代進化為網路世代，戰爭型態也由機械化戰爭轉變為高科技技術戰爭，空中力量的發展，也轉變為高科技戰爭之決勝關鍵，綜觀世界空軍武器裝備發展史，可以觀察到空軍武器裝備發展，戰爭為強大原動力，科技發展則是源源不絕的推進力，促使軍隊現代化及革命性的跳躍。

隨著科技發展突飛猛進，新科技也廣泛應用於軍事領域，伴隨高科技武器裝備大量湧現，有效發揮出強大戰爭威力，然而高科技武器裝備雖然強大，卻仍然無法完全擺脫天氣制約限制條件，低雲、濃霧、沙塵暴、強降水、大風及雷暴等劇烈天氣現象，不僅嚴重影響高科技武器裝備作戰性能發揮，甚至將完全喪失作戰能力，因此，各國空軍均十

分重視氣象預測報能力及其對作戰之影響，藉由不斷提升航空氣象裝備，進而有效增進作戰實力，保障作戰任務順遂，促使部隊戰鬥力倍增；本文藉由氣象新工具-高科技產品氣象雷達，分析如何強化氣象預測報戰力，加大在空機天氣突變之預警時間，使航空氣象之用途與作戰價值提升，有效支援戰(演)訓及維護飛航安全。

2. 雷達的發展及觀測原理

雷達(radar)是無線電偵測與測距(Radio Detection And Ranging)的縮寫，表示以無線電波進行物體的探測及測距，蝙蝠在幽暗的洞穴中飛行，會一邊飛行一邊發出超音波接收回傳訊號，藉以探測物體，因此飛行時不會撞到同伴和牆壁，並捕捉獵物，就是利用這個原理，雷達技術常用於航空工業，包括飛機機載雷達，於起飛降落時提供飛行安全保障，日常生活中，球場的測速儀、警車移動式及公路固定式測速等，都是雷達運用產品，氣象雷達更是運用雷達特點觀測大氣中水相粒子的發展與分布情況，進而剖析大氣變化，以下將針對雷達的演進及觀測原理說明。

2.1 雷達的演進

第二次世界大戰期間，軍事雷達操作員

注意到了因雨、雪、凍雨等天氣因素接收到的回波反射訊號。戰後，軍事科學家得以繼續研究如何利用那些回波反射訊號。前美國空軍、後任職於麻省理工學院的大衛阿特拉斯，開發了第一個實用氣象雷達。在加拿大，馬修和道格拉斯於蒙特婁成立了「風暴天氣小組」。馬修和他的博士生沃特帕瑪(Walter Palmer)專精於研究中緯地區降水滴譜，並由此發現了降水速率和雷達反射率之間的關係。英國則繼續進行雷達回波模式和氣象要素(如層雲降水和對流雲)之間關係的研究，並試驗了1~10 cm範圍內的不同波段效果。

1953年，從事伊利諾州水資源調查工作的電氣工程師唐納史戴格，第一次利用雷達記錄到與龍捲風相關的鈎狀回波。

1950到1980年間，用於定位天氣系統及探測降水強度的反射雷達氣象服務在世界範圍內建立起來。早期的氣象學者透過陰極射線管來獲取訊息，到了20世紀70年代，雷達觀測開始標準化並組成觀測網。第一個雷達回波成像設備誕生後，雷達發展到可以掃描降水系統的三維層面，使等高平面的景象和垂直的狀況均能夠得以展現。加拿大的阿爾伯塔省冰雹計畫和美國的國家強風暴實驗室因此得以研究雷暴結構。

美國國家強風暴實驗室始建於1964年，起初研究雙偏振訊號和都卜勒效應在氣象雷達上的應用(如圖1)。

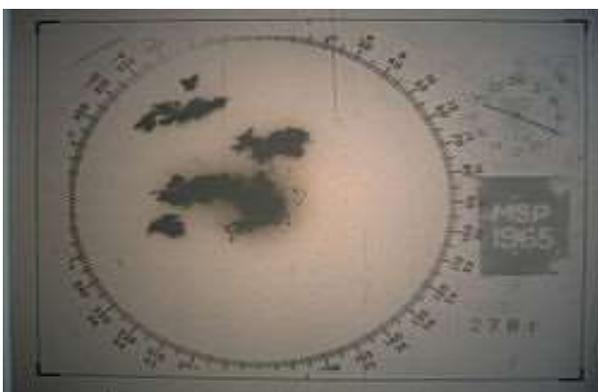


圖1 利用雷達技術探測到美國雙子城龍捲風

1973年5月，一個龍捲風襲擊了奧克拉荷馬市西部的尤寧城。該實驗室的10 cm波段都卜勒氣象雷達第一次記錄下了龍捲風整個生命週期。這一成果發現了龍捲風發生前高空雲的中尺度渦旋：龍捲風渦旋。這使得國家氣象局認識到都卜勒天氣雷達是極佳的龍捲風預報設備。而1974年4月4日龍捲風的超級爆發造成的毀滅性破壞使都卜勒雷達的研究得到了更多的資金支持。

1980至2000年，氣象雷達網在北美洲、歐洲、日本等已開發國家普遍建立，可探測大氣中微粒移動速度的都卜勒雷達也替代了只能探測天氣系統位置和強度的傳統雷達。美國於1988年正式進行10 cm波段氣象雷達的布網建設，稱為下一代氣象雷達或WSR-88D。1985年，加拿大建立了配備5 cm波段都卜勒氣象雷達的金城雷達站。1993年，麥吉爾大學的馬修雷達觀測站也採用了都卜勒雷達。完整的加拿大都卜勒氣象雷達網在1998到2004年間建成。法國和其它歐洲國家則直到90年代末21世紀初才逐步採用都卜勒網絡系統。期間，受惠於計算機技術的迅速發展，科學家們已經可以利用計算機算法分析惡劣天氣，並由此開發了一系列可供給媒體公開展示或科學研究的氣象產品。

2000年後，雙偏極技術投入了實用，增加了關於有效降水類型(如雨和雪的對比)的訊息獲取。「雙偏極」是指既能發射和接收水平偏振波又能發射和接收垂直偏振波的微波輻射。美國、法國和加拿大等國家則預期將在近10年大規模發展該技術。

2003年起，美國國家海洋和大氣管理局(NOAA)就開始著手用電子掃描陣列雷達代替傳統的拋物形天線，以便在大氣探測中獲得更高的時間解析度。這對獲取預測強雷暴發展過程的即時數據尤為重要。

同年，美國國家科學基金會(NSF)成立了合作自適應遙感大氣工程技術研究中心，這

是一個跨學科、涉及多所大學的工程師、計算機科學家、氣象學者和社會學家參與合作的機構，他們利用成本低廉、掃描迅速的雙偏振電子掃描陣列雷達，獲取較少為人探索的對流層低層資料，進行相關基礎研究、新技術開發並部署樣機，以加強現有的雷達系統。

2.2 雷達的觀測原理

雷達通常由天線、發射機、接收機、訊號處理器、伺服器、監控及數據處理器等部分組成，觀測主要可區分為3部分，分別敘述其原理如下：

2.2.1 發射雷達脈衝

氣象雷達透過空腔磁控管或調速管連接導波管，再連接一個拋物面天線而定向發射微波脈衝。氣象雷達所發射微波波長在1-10 cm範圍，是兩滴或冰晶直徑的10倍左右，在該頻率下，瑞利散射效應最為強烈。這樣可以確保雷達波的一部分能量能夠從微粒表面反射回雷達站所在方向(如圖2)。

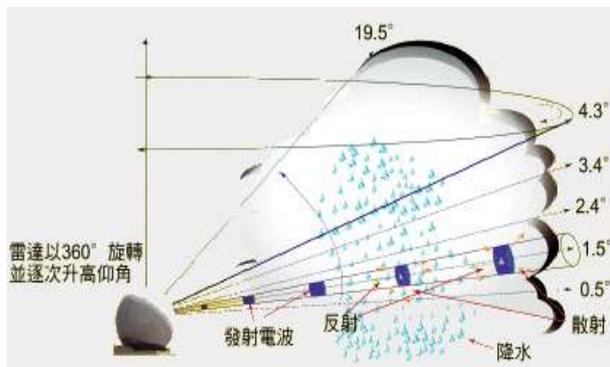


圖2 氣象雷達觀測基本原理示意圖

若雷達發射更短波長的脈衝，則可以用來檢測更加微小的雲滴，不過訊號的衰減也更為強烈。因此10 cm波段的氣象雷達被廣泛使用，但其成本也遠高於5 cm波段的雷達系統；3 cm波段雷達僅使用於超短距離範圍內的監控；而1 cm波段的雷達僅用於毛雨或霧等微粒天氣現象的研究。

雷達波會以球面波的形式從雷達站向外

傳播。這會導致在相同時間內，雷達波所穿過的空間體積會隨著遠離雷達站而增大，因此雷達的角坐標解析度也隨之下降。當雷達波射程達到150-200 km探測範圍時，單脈衝所掃描到的大氣體積可能會接近 1 km^3 ，稱為脈衝體積。

在任意時刻任意空間位置，一列給定的雷達波所佔據的體積可由下式大致計算：該公式假定雷達波是球面均勻發射的，「 r 」遠大於「 h 」以確保其在該列波起止點能夠大致相等，而所截得的幾何體為一個高為 h 的臺體。其中， v 代表該列波所佔據的體積， h 是指脈衝長度， r 指從雷達站到該列波所傳播到的空間位置的距離，經由公式運算出雷達反射的位置及物件體積。

2.2.2 確定高度

假定地球是一個球體，透過大氣折射率和雷達站與天氣系統間的水平距離，我們就可以計算天氣系統的距地高度。

雷達系統會根據需要掃描一系列的特定角度。每一次掃描過後，天線都會為下一次探測進行高度調整。雷達站會重複這種方式來掃描不同角度，以探測到其周圍儘可能大體積的空氣。通常情況下，探測方圓250 km、縱深15 km範圍內的大氣需要5到10分鐘的時間。比如加拿大的5 cm波段氣象雷達的掃描角範圍設定為0.3至25度。圖3示意了雷達站在一次多高度角掃描後所能探測到的大氣體積。

由於大氣折射率隨高度的變化以及地表曲率的存在，雷達不能夠探測到最低測量角以下(圖3中綠色範圍)，以及雷達附近超出最大測量角(圖3中紅色範圍)的大氣。

2.2.3 確定強度

由於探測範圍內的目標並非單一個體，基本雷達方程式必須經過修調來重新分割物體，再經過複雜公式運算後，可以得知掃描出的物體個數與強度。



圖3 不同高度雷達掃描體積示意圖

2.3 雷達干擾

雷達掃描為雷達脈衝經由發射後回收訊號計算出的結果，因此很多原因均會造成回波干擾，進而影響計算結果，雷達回波的槽化現象為當低層大氣存在逆溫(Inversion)現象，或者剛下過雨使近地面的空氣相當潮濕的狀態下，空氣的折射率將隨高度上升而迅速減小，進一步使雷達電磁波在大氣中傳遞的過程向折射率大的一方偏移，這種電磁波偏移的過程又稱為超折射(Super refraction)現象。當偏移的狀況過於極端，造成雷達波下彎照射到海面或陸地，來自地表的反射能量被雷達接收到，使雷達螢幕上因此出現大範圍弱回波區，這種回波屬於非氣象回波，該處實際並無降雨發生。

科學家們在不斷的實驗中，修正問題與過濾資訊，進而提升雷達效能與回波精準度，並配合現代科技的進步，升級雷達功率，促使雷達技術的成熟，氣象學家進而利用雷達技術，發展氣象雷達，利用雷達掃描結果，研判大氣中水相粒子變化，增加預報準確率與提升劇烈天氣防災時間。

3. 氣象雷達應用

氣象雷達，強化數據回波圖像的處理能力，1980年都卜勒雷達已普遍運用於氣象探測及科學研究，1988年丹麥空軍裝備METEOR-

360AS天氣雷達，1995年義大利空軍裝備GPM-500C都卜勒雙極化天氣雷達，1990年美國逐步完成都卜勒天氣雷達WSR-88D全國布設，1998年更用C波段戰術都卜勒天氣雷達取代舊型雷達，2002年美國國家氣象局、強風暴實驗室、海軍海洋研究室、俄克拉荷馬大學等機構聯合研製相控陣列天氣雷達，針對發展變化快、生命週期短、危害性大的強對流天氣進行監測，隨著雷達技術的推展，氣象雷達的探測技術也不斷發展，採取雙偏極、快速掃描、多參數等技術，可提供更多的氣象訊息，且採集與辨識率也更為精巧，目前國內氣象雷達也因應各地需求，架設機動式及固定式的雷達系統，針對機場周邊、探空風場等，實施即時的觀測，俾利氣象資訊即時有效回傳運用。

地面及高空的氣象觀測設備中，又以雷達掃描為大宗，雷達原設計用於搜索飛機、艦艇及遠處的目標，伴隨科技進步，氣象學門也廣泛使用雷達技術，來探測各空層地面至高空的數據，更對雲、降水等更加重視，1941年英國最早使用雷達探測風暴，1942-1943年麻省理工學院專門設計氣象目的使用的雷達設備，1953年美國空軍設計X波段的天气雷達，用於機場天氣守視，1970年因傳輸及電腦處理速度提升，研製出數位雷達，各國在使用者需求下也紛紛跟進氣象雷達的家族，並發展氣象陣列雷達，研究發展變化快、生命週期短、破壞力強的對流天氣，進而提升天氣監控技術；以下將針對氣象雷達的種類及搭配現有科技運用模式來做介紹。

臺灣地區氣象作業用的大型雷達總計8座(如圖4及表1)，包括中央氣象局所屬氣象雷達，分別位於臺灣本島東南西北方向，10公分波長的都卜勒氣象雷達分別位於花蓮、墾丁、七股、及五分山(如圖5)，波長5公分的都卜勒氣象雷達位於民航局桃園機場，另空軍在綠島架設的都卜勒氣象雷達、位於馬公及

清泉崗的雙偏極化都卜勒雷達，雙偏極化都卜勒雷達不只可分析水滴大小與含量，更可瞭解水滴的形狀及移向，甚至連龍捲風攜帶的大量碎屑亦可分析，利用都卜勒效應知道雲雨團的移動方向，提供劇烈危險天氣預警；近期美國國家海洋大氣總署(NOAA)也運用偵測導彈的相位陣列雷達來做氣象觀測；臺灣這8座大型雷達所構成的觀測網，綿密的程度有利於減少因地形死角造成的回波空隙，提供氣象觀測更全面的監測；另外由於S-Band雷達無法針對局部性降雨(如機場周邊)即時有效供應精確度較高的訊息，因此空軍及中央氣象局亦針對局部性降雨設置X-Band降雨雷達。



圖4 臺灣大型雷達分布圖

表1 臺灣地區大型雷達

雷達站	所屬單位	類型	波長 (CM)
五分山	中央氣象局	都卜勒	10
花蓮			
七股			
墾丁			
桃園機場	民航局	雙偏極化	5
綠島	空軍氣象		
清泉崗			
馬公			



圖5 五分山氣象雷達站

降水現象對於不同波段電磁波的衰減作業不盡相同(如表2)，簡單來說波長越短，訊號衰減越厲害，因此當訊號發射後遇到劇烈水相時會明顯衰減；反之，發射訊號波長越長，衰減程度越小，適合觀察大範圍天氣系統，但掃描的週期需要耗費較長時間，因此不同的氣象雷達，可以觀測到不同範圍及時效的天氣現象，S-Band降雨雷達可觀測較大範圍(遠距離)的水相變化，掃描週期較長，X-Band可觀測較小範圍的天氣變化，掃描時間較為密集，交叉使用各類氣象雷達觀測臺灣周邊水相變化，更可有效守視各尺度的天氣演變。

表2 雷達頻段種類表

雷達種類	波長 (cm)	測距 (km)	主要用途
S-band	10	400-500	遠距離監測
C-band	5	100-200	機場周邊飛安
X-band	3	50	研究使用

隨著航空產業及空軍作戰需求的發展，即時取得在空資訊為在空機的重要情報來源，因此機載氣象探測裝備與氣象探測飛機也成為必備的氣象設備，因應飛機行進速度快

，因此機載氣象雷達需有儀器靈敏度高、測量精確度高、自動化等效能，目前各軍事強國的空軍均配備專用於氣象探測的飛機，且軍民飛機上均配有氣象探測裝備，1990年美、英等國也廣泛運用小型無人氣象偵察機、機載氣象探測設備、空投氣象探測設備等進行站場氣象偵查，收集目標區天氣情況，發揮突襲等戰場優勢，因此空軍強大的國家都將機載氣象探測裝備及氣象飛機作為優先發展與採購項目。

天氣預報整合介面等裝備，為氣象最重要的彙整裝備，將各項氣象觀測所蒐整到的氣象情資，透過電腦處理後，輸出為氣象預報人員可加以運用之氣象情資，主要有天氣圖填繪及天氣系統分析、數值預報氣象自動化系統及機動氣象裝備，利用各組成將氣象因子以空層高度剖析大氣結構，分別繪製各高度至地面層的天氣圖，並將數據載入數值模式分析，依過去資料庫判斷未來天氣趨勢發展，預報人員再加以分析修正氣象預報情資，判斷未來天氣發展趨勢及地區天氣預報，輔以電腦網頁介面及目前手機APP軟體顯示，促使各飛行部隊及使用者可及時獲取天氣預報及測報資訊，提供即時氣象情報，以利任務執行及飛行安全保障。

4. 雷達回波圖生活應用

氣象雷達即時觀測掃描臺灣周邊水相變化，透過高密度的雷達網，及便捷的整合系統，蒐整不同來源雷達情資後，中央氣象局配合多媒體資訊，利用手機、網路等媒介，提供即時雷達資訊供民眾使用，但雷達回波圖該如何使用，下面將針對雷達回波圖實施解說分析。

雷達情資的產製原理已在前面文章介紹，藉由反射訊號來分析大氣中水粒子的大小及分布，依據反射的電磁波訊號，研判大氣中水相的分布與組成(如雨、雪、冰雹等)，產生雷達回波產品，而回波的強度也代表水粒

子的大小、形狀、狀態、數量，通常回傳的訊號越強，雨滴越大，降水強度也較大，將雷達回波的訊號整合，製作出「雷達回波圖」，並將原本沒有顏色的回波訊號上色後，就是我們現在普遍看到的雷達回波圖產品，強弱轉化為色階後更容易看出水氣的變化差異，回波圖中的色階(如圖6)，越右側的暖色系，代表回波強度越強，dBZ表示雷達反射率比例的單位，代表訊號的衰減率，也可做為雷達回波的強度表示，大致推算回波強度與天氣現象，當dBZ小於0時，雖有降水粒子凝結，但幾乎不會有降水產生，15 dBZ通常開始形成水霧，超過20 dBZ將感受到毛毛雨，30 dBZ以下多屬於小雨等級，45 dBZ以上將有大雨、豪雨、雷雨等天氣現象，55 dBZ以上有機會出現冰雹天氣現象，然而每日的回波強度與實際的天氣現象也有些許差異，同樣都是30 dBZ今日為小雨，明日為中雨也曾發生，回波的強度可作為當日天氣的參考依據，卻非絕對的數值參考；雷達回波圖判讀時應考量訊號回傳時間，因此以現今中央氣象局雷達回波資料(QPESUMS)舉例，每10分鐘更新一筆回波位置及強度，但是考量電腦解析、上色及傳輸時間，因此我們看到的訊號，實際為15分鐘前的訊號，並利用靜態與動態產品，推斷未來回波走向及影響地區，回波移入後，降水機率會受到地形等因素影響，因此雷達回波圖無法百分之百確定降雨機率，僅能作為雨勢強度的參考依據之一。

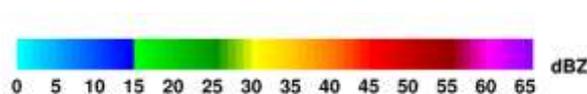


圖6 雷達dBZ回波色階

藉由2012年的天秤颱風雷達回波圖(如圖7)，紅色區域是大氣中水滴含量最豐富的區域，也是降雨及天氣變化最劇烈的區塊，因此用雷達回波圖來研判短時間的雨量預測

，將更貼近實際情況；過往臺灣颱風洪水研究中心，曾運用雷達回波圖資料，預測降水量，並利用過去觀測資料，將各地降雨與回波圖的連結建立資料庫，未來若有觀測的數據資料回傳，即可運用資料庫，以過去類似的雷達回波，比對出降雨預估。

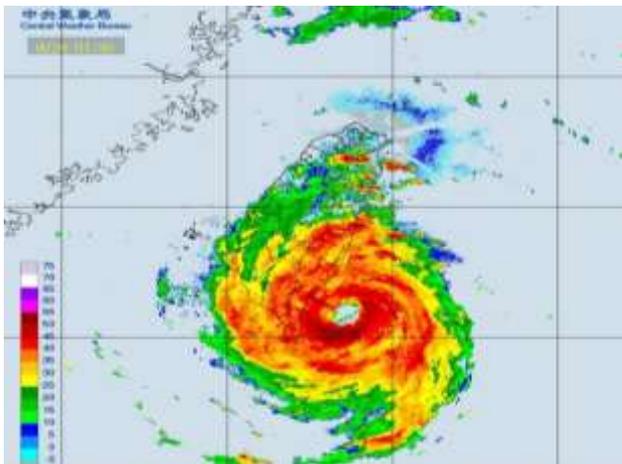


圖7 天秤颱風雷達回波圖

降雨量和雷達回波圖是否為直接關聯，我們可以天秤颱風當日累積雨量與雷達回波圖對照研析，由雷達回波圖及累積雨量圖相對應比較，可以看出主要降雨區域位於臺灣北部中央山脈東方，與雷達回波圖降雨回波分布相同。

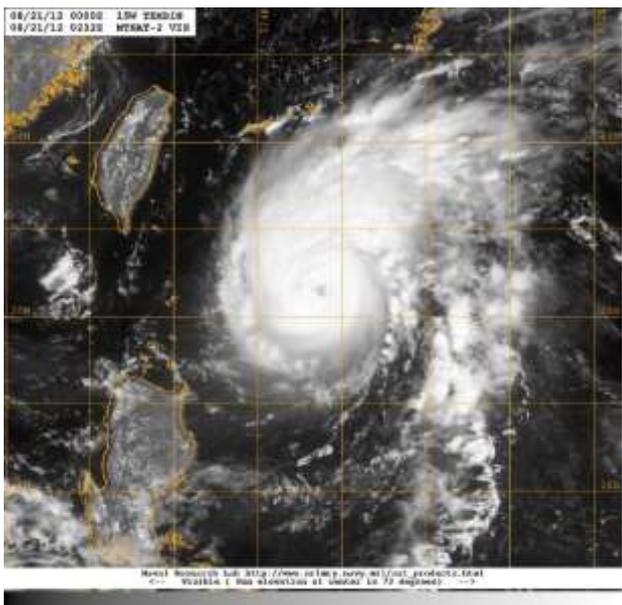


圖8 天秤颱風衛星雲圖

衛星雲圖也是氣象預報人員常用的工具，為何不用衛星雲圖研判降雨呢？由同日的衛星雲圖我們可以看到雲層主要集中於巴士海峽(如圖8)，況且雲圖是由在上層的衛星所照射，只能判斷出雲量、雲高，無法剖析大氣內部的水氣含量，雲多不代表會下雨就是這層涵義，因此衛星雲圖及雷達回波圖都是氣象人員的利器，缺一不可。

雷達的電磁波是否會傷身，一直是環保團體及雷達站周邊居民的疑慮，雷達的運作已於前面章節解釋，雷達運作時僅針對特定方位發射電磁訊號，大多時間都在接收反射的訊號，且與周邊建物距離也以法規規範，另外雷達掃描策略是由地平線逐步提升仰角，每小時大約只有7秒鐘的電磁波發射，看似對周遭環境無直接影響，且船隻與飛機大都有配備都卜勒雷達，卻鮮少聽到駕駛和雷達站人員因此而損害健康。

現今中央氣象局網站、手機APP(如中央氣象局的生活氣象APP)、新聞媒體氣象播報，都大量及廣泛使用雷達回波圖，生活及專業氣象也離不開雷達回波圖的使用，相信在瞭解雷達運作原理及回波圖判讀後，將使大家更即時獲取降雨資訊。

5. 結論

近年來，伴隨科學技術的迅速發展，氣象雷達投入氣象預測報作業，成為氣象觀測的強大兵器，由於氣象雷達具有全天候觀測特性，並可觀測大範圍的降雨與氣流特徵等能力，對於我空軍氣象觀測技術提供精準度與多樣性產品，並配合電視、廣播、手機、網路等傳播媒介，可即時發布與接收防災資訊，降低氣象災害造成的生命財產損失；空軍氣象更可有效預測機場周邊天氣發展變化趨勢，提升預報即時性、精準性並拉長預警時間，有效掌握劇烈天氣變化及影響層面，瞭解小尺度水相粒子演變趨勢，減少天氣守視盲區，俾利軍民共同運用，加大氣象災難預

警時間，保障空軍任務遂行。

6. 參考文獻

李子儀、曾德晉、黃國禎、吳俊緯，2021，氣象 X-Band 降雨雷達對機場天氣守視效益。

張孝怡、朱宗良、陳建達、黃洧欣，2022，嘉義機場 X-Band 雙偏極化都卜勒氣象雷達

介紹及應用。

劉艷芳，2009，航空氣象裝備，空軍裝備系列叢書。

李佩蓉，2022，航空氣象裝備對軍事作戰之影響。

張保亮，氣象雷達與應用，科學研習月刊，50-6。

Aeronautical Meteorology with Introduction and Application of Weather Radar

Pei-Rong Li

The 11th weather squadron of Weather Wing, R.O.C.A.F.

Abstract

With the rapid development of science and technology, new technology is also widely used in the military field. High-tech weapons and equipment have emerged in large numbers, effectively exerting powerful war power. The product weather radar, analyzes how to strengthen the weather forecasting and reporting capabilities, increase the early warning time of sudden changes in the air, improve the use and combat value of aviation weather, and effectively support combat (drill) training and maintain flight safety.

Keywords: weather equipment, weather radar, precipitation radar, X-Band