

桃園機場都卜勒氣象雷達性能與應用

飛航服務總臺 周鴻祺

壹、前言

都卜勒氣象雷達乃利用天線發射高能量電磁脈波(Pulses)，當電磁脈波在大氣中碰到雲中粒子(如雨滴、雪花和冰雹等)時，大部分能量會繼續前進，而僅一小部分能量被雨滴向四面八方散射，再經由雷達天線接收後向及散射回來之微弱電磁波能量(訊號)，就能探測大氣中的降水回波強度，根據雷達接收的降水回波特徵可以判斷降水的特性，如降水強弱(對流性或層狀性)、有無冰雹、龍捲風等。經由測量返回之微弱電磁波能量及發射之高能量電磁脈波間之頻率變化，計算雨滴在電磁波束方向上之移動速率，即是降水徑向速度。一般而言，反射回來的訊號越強，表示雨勢越大，至於雨滴與雷達間的距離，則可利用電磁波往返雨滴所需的時間而計算求得，即距離=光速×時間/2，光速(C)= $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ，時間為從發射至接收到回波間的時間差。

氣象雷達所採用的電磁波波段位於微波(Micro Wave)中，即波長在 10^{-1}m 至 10^{-3}m 間。通常波長較長之氣象雷達(如 S 波段，波長 10 公分)，偵測範圍較遠、電磁波衰減現象較小，但地表雜波(Ground Clutter)之抑制功能則較差；而波長較短之氣象雷達(如 X 波段，波長 3 公分)，偵測範圍較小、電磁波衰減現象較大，但地表雜波之抑制功能則較好。

因此，交通部民用航空局為加強臺灣北部地區兩大民航機場，即桃園國際機場與松山機場顯著危害天氣之偵測與天氣守視，以提高航空氣象服務品質，避免因天氣因素影響飛航安全，遂於民國 76 年 4 月在桃園國際機場架設全國首套、也是東亞地區第一套作業用之 C-Band (C 波段，波長 5 公分) 都卜勒氣象雷達系統。該 C 波段雷達係由瑞典 Ericsson 公司提供，於 76 年 4 月底架設完成，並隨即於 5-6 月間配合國際間氣象界合作之「台灣地區中尺度實驗計畫(TAMEX)」開始試運執行觀測作業，透過與會專家學者之技術指導與交流，讓氣象雷達作業人員獲取了許多的寶貴經驗，為同年 9 月正式啟用後之作業奠定了良好基礎。

民用航空局飛航服務總臺基於第一代都卜勒氣象雷達已超過使用年限，故於民國 90 年進行招標採購新氣象雷達系統，汰換舊有氣象雷達裝備。新都卜勒氣象雷達系統仍採用 C 波段雷達，由美國 BARON

公司得標，於 92 年 8 月架設完成(圖 1)，經由 720 小時信心測試後，同年 10 月 1 日正式啟用，開始提供桃園與松山機場近場地區及北臺灣航路上顯著危害天氣之守視、預報與警報發布服務。目前臺北航空氣象中心航路守視席負責都卜勒氣象雷達之監控與天氣守視，而桃園裝修區臺與北部飛航園區資管中心則共同肩負雷達系統之平日維護與故障維修，使都卜勒氣象雷達維持正常運作，發揮其守護北臺灣飛航安全之任務。

貳、都卜勒氣象雷達系統架構與性能

(一) 桃園國際機場新都卜勒氣象雷達 (Doppler Weather Radar, DWR) 系統，依其功能可分為下列幾個主要部分：

1. 發射機及數位接收機系統：含發射機、數位接收機、雷達天線、天線軸座及保護天線之天線罩(圖 1)。
2. 前置數位處理機 (RVP-7)：本處理機用以控制、處理發射機及接收機之各項功能，並負責回波信號之前置處理作業，將處理後之回波信號送至雷達氣象產品資料處理系統。
3. 雷達氣象產品資料處理系統：具有氣象處理分析特殊作業軟體，儲存並提供顯示系統所需之圖面及資料。
4. 顯示系統：雷達氣象產品資料處理系統所產生之雷達產品透過資料傳輸程序，傳送到終端使用者工作站，包括松山與桃園航空氣象臺、近場臺、桃園裝修區臺及桃園諮詢臺，並以彩色圖形視窗即時顯示各項雷達產品(圖 2)。

(二) 都卜勒氣象雷達規格性能表

要 項 (Item)	作業狀態 (Performance)
尖峰電力 (Peak Power)	250kW (minimum) ; 350kW (typical)
頻率 (Frequency)	5.6 ~ 5.65 GHz
往復波頻 (Pulse Repetition Frequency)	250 ~1666 Hz
發射頻寬 (Transmitter Bandwidth)	1.0MHz (Maximum)
最大工作周期	0.001

(Max Duty Cycle)	
脈波寬 (RF Pulse Width)	Adjustable 0.5 to 2.5 μ sec
最大未折錯速度 (Velocity Unfolding)	88.3 m/sec Dual PRF1666Hz with 5:4 stagger
最大監測半徑 (Maximum Range)	600Km with PRF 250Hz
天線罩損失 (Radome Loss)	0.5 dB max attenuation ; 0.1 milliradians distortion
天線 (Antenna)	4.5 m diameter ; 44.9 dB gain , typical ; Beam width 0.89° max at -3dB ; Side Lobe : - 26 dB ; Horizontal polarization
天線基座 (Pedestal)	Azimuth Coverage : 360° ; Elevation Coverage : 0° ~ 90(; Rotation Rate : 0 ~ 6 RPM, 36(/sec
發射機 (Transmitter)	Type : Pulsed Tunable Coaxial Magnetron Modulator Type : All solid-state Pulse Width : 0.6 、 0.8 and 2.0 (sec
接收機 (Receiver)	Type : Super heterodyne, Single Conversion Noise Figure : 2.25 dB typical ; IF Digitizer : Sigmet RVP7 ; STALO AFC : Yes Minimum Discernible Signal : -114 dBm ; Subclutter Visibility : better than -40 dB
信號處理器 (Radar Signal Processor)	Type : Sigmet RVP7 Digital Processor ; Data Moment Output : Z, V & W

參、氣象雷達資料之分析與應用

氣象雷達資料具有較高連續性、即時性，但亦具有較高之局部性與區域性，然氣象雷達資料於時間上以及空間上應用時，其資料密度性(取決於掃瞄間隔、使用仰角數…等)與解析度均較衛星雲圖為高，因此對於較小尺度或生命史較短之天氣系統，較易掌握天氣系統發展、成熟、消散之生命史演變。過去傳統雷達僅具備降水回波強度之偵測

能力，都卜勒氣象雷達除前述功能外，更可偵測出掃描範圍內徑向速度場(Radial Velocity)與波譜寬(Spectrum Width)之分佈情形，提供強烈對流天氣豐富的相關訊息；使用者(包括觀測員、預報員與航空駕駛員等)可應用之都卜勒氣象雷達資訊有下列三種：

(一) 降水回波強度或反射率因子(Reflectivity : Z)

一直是最重要的雷達回波資料，可偵測天氣系統之水平與垂直回波強度，透過回波強度及垂直發展高度，可以區分層狀或對流雲雨回波及其消長，以判斷是否為強烈對流(圖 2)，獲知強對流之移動方向與速度，對可能影響之機場與航路適時地發布即時預警；利用水平與垂直降水強度(降水密度與顆粒大小)估算之 Z-R 關係，可提供降雨量估計；亮帶(bright band, 0°C)高度位置。因此，降水回波強度可對顯著危害飛安天氣系統，諸如雷雨胞、冰雹、颱風、鋒面系統、颶風...等，提供即時且準確的偵測與預警。

THE RADAR EQUATION FOR WEATHER TARGETS

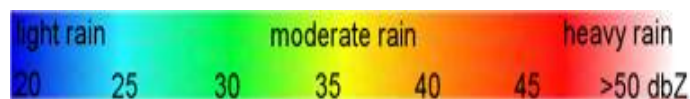
$$dBZ = 10 \log \left(\frac{Z}{1 \text{ mm}^6 / \text{m}^3} \right)$$

常數
雷達特性
目標物特性

Z 為雷達反射率因子 (reflectivity factor, mm^6/m^3)，主要取決於雷達與目標物之特性，其值越高表示目標物反射率訊號越強，dBZ 值越大。Pt 為雷達發射功率，Pr 為雷達接收功率。

$$Z = \frac{1024 \ln(2)}{c \pi^3} \left(\frac{\lambda^2}{P_t \tau G^2 \Theta \Phi} \right) \left(\frac{\bar{P}_r}{|K|^2} \right)^2$$

dBZ 為都卜勒氣象雷達降水回波強度值單位，一般用顏色標尺範圍顯示，如下所示，數值越大表示雨滴越大，45-50 dbZ = 豪雨、雷雨。



(二) 徑向風場(Radial Velocity : V)

都卜勒氣象雷達於掃描範圍內所偵測風速為沿電磁波束方向上之徑向風分量，並非實際風場；徑向風場亦是判斷強烈天氣系統的有效工具，特別是在分辨破壞性強風時(圖 3)。風

場應用於航空上可測得水平、垂直不連續風變帶（如鋒面、陣風鋒面）、風切計算、風場旋轉（如颱風中心、龍捲風母雲）及輻合輻散等特性。強烈對流系統的形成與發展往往與氣流的輻合(低層)、輻散(高層)以及氣流的旋轉有密切關連，此外由徑向風場特徵辨識可判讀出顯著危害飛安天氣，諸如風切、下爆氣流、外流邊界…等。而透過一次完整的空域掃瞄所獲得之速度分布，進行一定的資料反演處理，即利用 Velocity Azimuth Display(VAD)、Volume Velocity Process(VVP)等技術定量計算與分析，可以得到以雷達為中心三十公里範圍內之平均垂直風場運動特性，如水平風向與風速、輻散場、變形場與垂直項等參數，進而得知垂直風場隨時間的演變圖(圖 4)。

(三) 波譜寬(Spectrum Width : W)

亂流場分佈情形，波譜寬所代表的物理意義也就是解析體積內各目標物相對運動的情形，此即波譜寬越大表示此解析體積內各種速度都有、而波譜寬越小則表示此解析體積內目標物的運動越一致(圖 5)。1978 年 Richard J. Doviak 研究統計雷雨中的波譜寬，發覺平均大小約為 4 ms^{-1} ，且取樣中有 20% 超過 6 ms^{-1} ，並比對都卜勒波譜寬與飛機觀測到的亂流值，發現當波譜寬低於 4 ms^{-1} 時，相當於輕度亂流，而波譜寬為 5 ms^{-1} 時，則為中度至強亂流。

因此，綜合使用 Z、V、W 的資料，可以獲得天氣系統的水平與垂直內部結構之特徵，同時如有劇烈天氣系統（如雷雨）進入預警區，亦可經由 WARN 產品發出警告訊息(圖 6)。對顯著危害天氣系統提供更準確且即時地監控與預警，以減少飛航安全事故的發生。

肆、結語

桃園機場都卜勒氣象雷達裝置的主要目的為負責北臺灣桃園國際機場及松山機場兩大民航機場及附近航路劇烈天氣守視工作，其中劇烈天氣如鋒面、飆線、雷雨、豪雨、下爆氣流、水平或垂直風切等，都可經由都卜勒氣象雷達的觀測，提早預知劇烈天氣之整體位置、結構、發展及移向，並將這些天氣訊息即時且正確的提供給使用者，使用者包括航空公司、管制、航務、諮詢及氣象等單位。

臺北航空氣象中心服務電話：03-3841456

一、 圖片說明



圖 1、桃園國際機場新都卜勒氣象雷達外觀，上方白色球體為雷達天線罩。

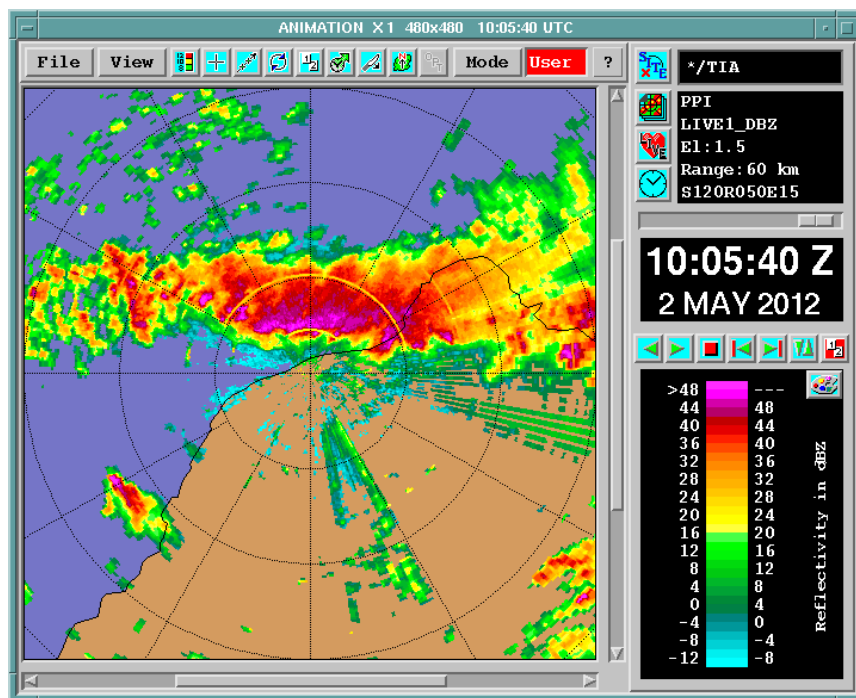


圖 2、2012 年 5 月 2 日下午 18 時 5 分（地方時，國際時 Z+8 小時）北臺灣地區仰角 1.5 度之降水回波強度平面位置顯示圖（PPI），單位為 dBZ，雷達站位於圓圈中心，圓圈為距離雷達站之距離，由內向外分別 20、40 與 60 公里，此圖為

一淺碗狀斜面，距雷達越遠，離地面高度越高(雷達站高度為 0、60 公里處高度為 1.8 公里)，此圖與圖 3、圖 4 皆為放大圖。

圖中顯示強烈鋒面雨帶已向南移動到桃園機場北方約 8 公里之外海上，強烈的對流胞已影響航路且即將移至桃園機場上空，伴隨之雷雨、下爆氣流及低空風切等(如圖 3)顯著危害天氣將影響桃園機場航機之正常起降。

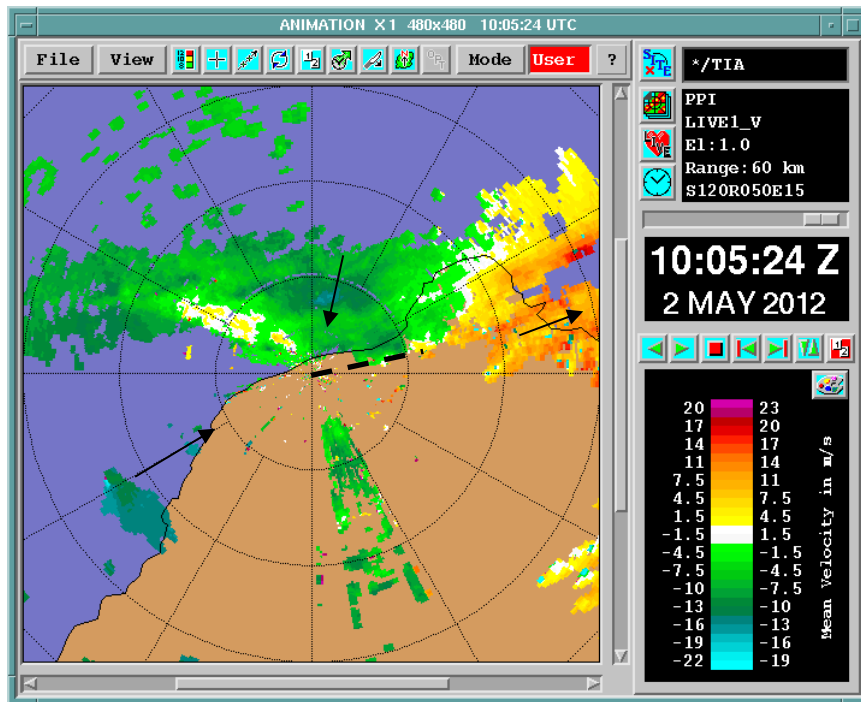


圖 3、2012 年 5 月 2 日下午 18 時 5 分(地方時)北台灣地區仰角 1.0 度之徑向速度平面位置顯示圖(PPI)，單位為 ms^{-1} 。冷色系(綠、藍)表示徑向風吹向雷達站，暖色系(黃、紅)表示徑向風遠離雷達站，如圖中箭頭所示，粗虛線為陣風鋒面位置。雷達站高度為 0、60 公里處高度為 1.3 公里。

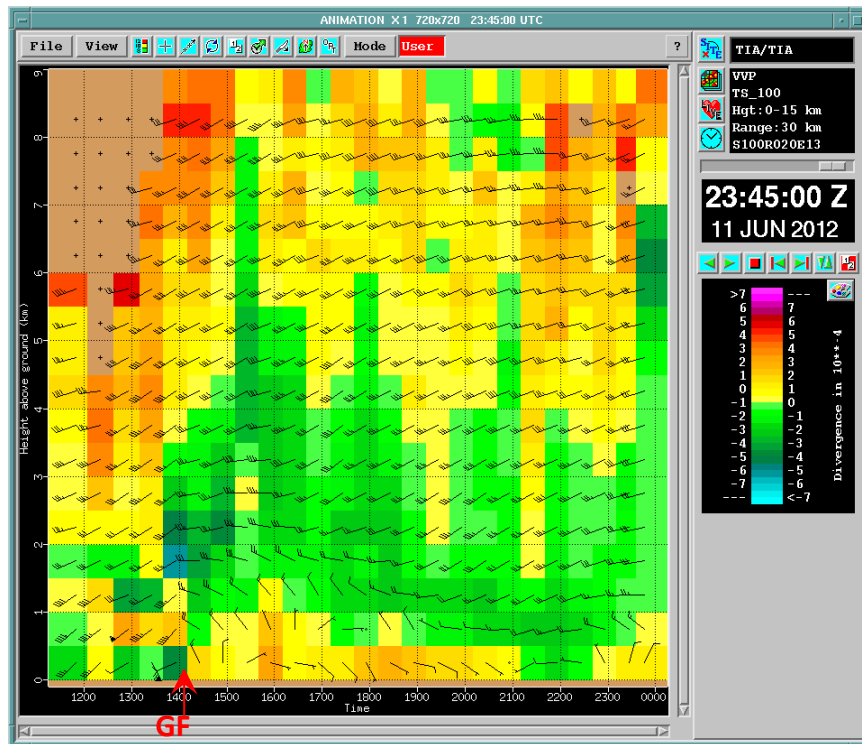


圖 4、2012 年 6 月 11 日晚上 7 時至 12 日上午 7 時 45 分（地方時）利用 VVP 技術求得雷達站上空之平均垂直風場與輻散場之時序列垂直剖面圖（橫軸為時間，縱軸為高度）。背景顏色標示為輻散場，負值（綠、藍）表示輻合區，正值（黃、紅）表示輻散區。紅色箭頭處顯示強烈對流雨帶所產生之陣風鋒面（GF）通過桃園雷達站之時間（約晚上 10 點），低層風向從通過前吹西南風，通過後轉為吹西北風、東南風。

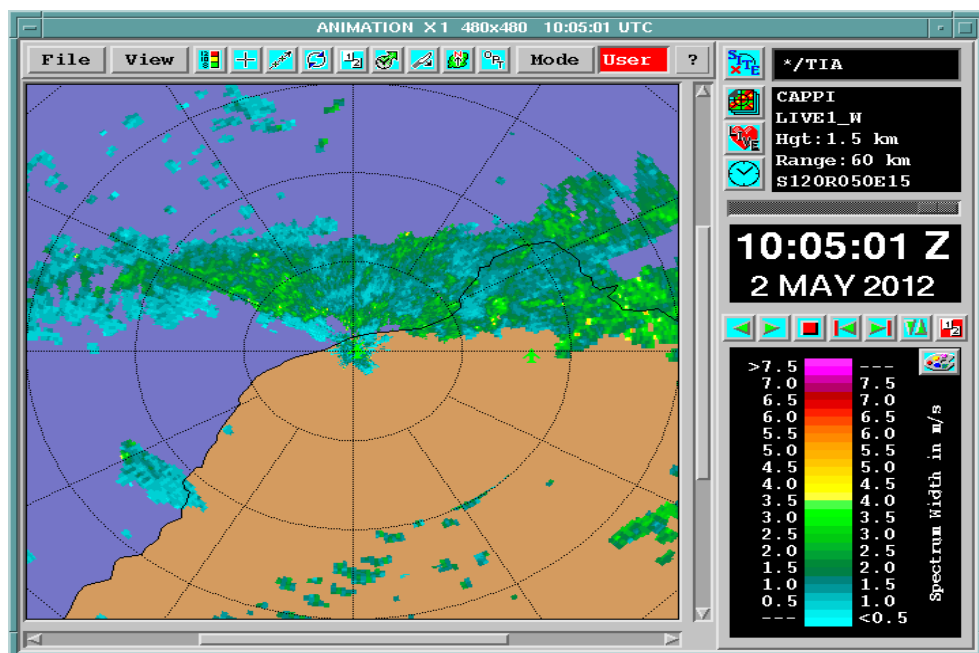


圖 5、2012 年 5 月 2 日下午 18 時 5 分（地方時）北台灣地區高度 1.5 公里之波譜寬定高面平面位置顯示圖（CAPPI），單位為 ms^{-1} 。圖中波譜寬均小於 4ms^{-1} 。

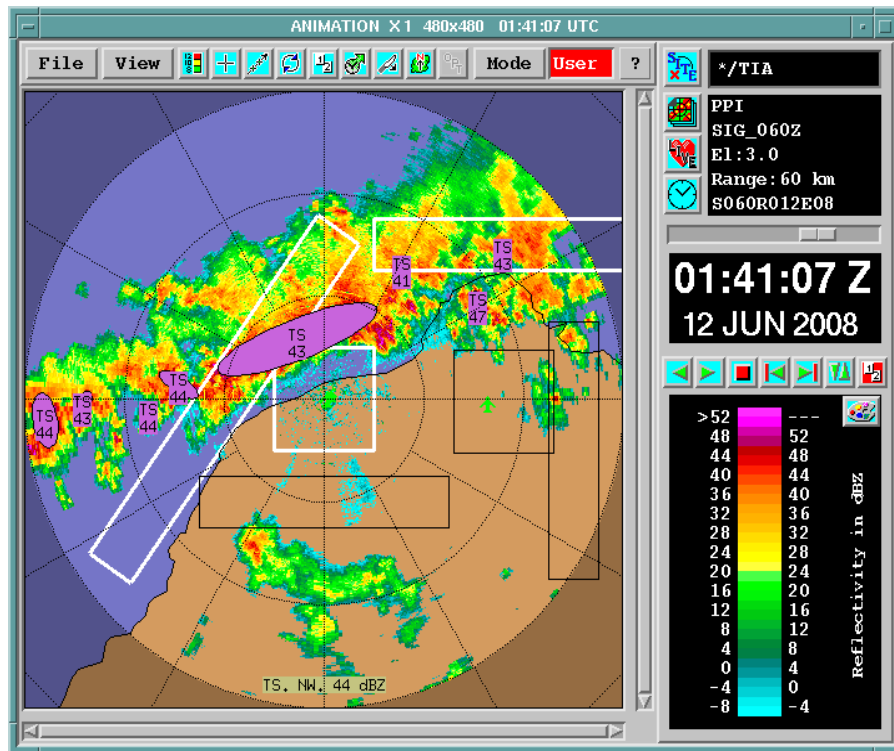


圖 6、2008 年 6 月 12 日上午 9 時 41 分（地方時）仰角 3.0 度之降水回波強度平面位置顯示圖（PPI）且疊加雷雨警報產品（WARN）。單位為 dBZ 正方形或長方形為警報區域，雷達站位於圓圈中心，圓圈為距離雷達站之距離，由內向外分別 20、40 與 60 公里。

圖中顯示強烈線狀對流雨帶已南移到桃園機場北方約 10 公里之外海上，特別突出之雷雨胞(紫色橢圓形區域)已影響航路，雷雨胞已逼近桃園機場警戒區，伴隨之雷雨、下爆氣流及低空風切等顯著危害天氣將影響桃園機場航機之正常起降。