

中正機場都卜勒氣象 雷達參觀實習記

陳啓川

國立臺灣師範大學地球科學系學生

一、前言

爲使課堂上所講習有關氣象雷達觀測的原理原則得以印證，並藉實際接觸了解，以引發進一步探討及興趣，乃於 77 年 4 月 23 日前往中正機場，參觀雷達的觀測過程及資料處理。

二、導言

氣象雷達可分傳統雷達 (Conventional Radar) 及新興的都卜勒雷達 (Doppler Radar)，傳統雷達可觀測各種天氣現象的位置、分布、強度、高度、立體結構、劇烈程度以及移動方向和速度等。而都卜勒雷達不僅具有上述功能，更能對風場加以觀測，提供亂流、風切等資料，對於保障財產安全及飛航事業提供不可或缺協助，在未來有逐漸取代傳統雷達的趨勢。本文擬就雷達波的特性，傳統雷達的主要元件與原理、都卜勒雷達的原理

、都卜勒雷達的風場分析以及雷達性能的比較等方面加以介紹。

三、雷達波的特性

雷達波是將電磁波以脈波 (pulse) 方式，由雷達天線發射用以探測目標物的一種波。而何以使用脈波而不用連續電磁波，乃因連續電磁波在雷達系統的運作上，有著相當多的缺點，如：發射機與接收機須分別安裝天線；對於緩慢移動目標缺乏敏感度；對於出現在同一方位角的不同目標，缺乏分辨能力等。由於雷達脈波是由電磁波組成，故在性質上兼具一般電磁波之特性及脈波之特別性質。脈波的傳播特性將於第四節中說明。

波在介質中傳遞時，因受到路徑上介質的吸收及散射作用，而使能量傳遞發生減小的現象，稱爲衰減 (attenuation)，在雷達上較確切的衰減定義爲： $10 \log$ (回收波電能 / 發射波電能)，單位爲分

表一

波段名稱	頻率 (兆赫)	波長 (公分)	用途
L	390 ~ 1550	76.9 ~ 19.3	天氣守視
S	1550 ~ 3900	19.3 ~ 7.69	豪雨或颱風觀測
C	3900 ~ 6200	7.69 ~ 4.84	雷雨鋒面及亂流觀測
X	6200 ~ 10900	4.84 ~ 2.75	輕至中度降水之探測
K	10900 ~ 36000	2.75 ~ 0.834	雲的探測

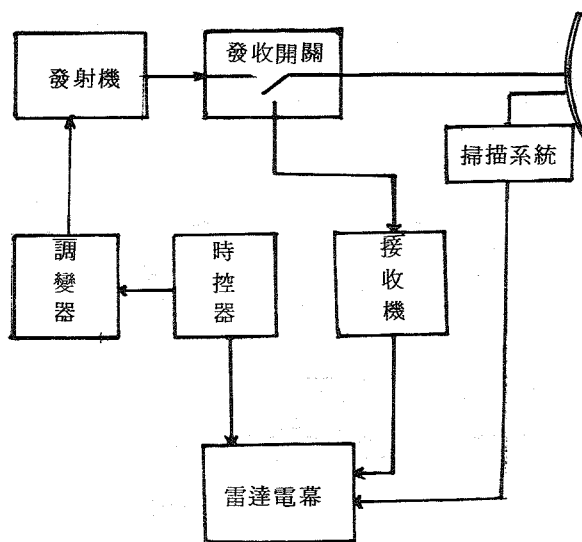
貝 (db)。雷達波波柱在大氣中傳播，受大氣分子、雲、降雨的吸收與輻散產生不同程度的衰減，而衰減程度會隨傳遞介質溫度之降低而減小，隨雷達波波長之增長而減小，隨探測路徑之增長而增大。

在其他條件均相同的狀況下，雲及降水的回波強度，與雷達波波長有反比的關係，而穿過雲、雨時，波柱內能量之衰減却隨波長之縮短而增大。各種因素交互限制，使得不同波長所適用的功能亦不同，故將雷達波依波長之分類及用途列於表一。

波的電壓及波形，使其成為脈波以激發高頻發射系統。(3)發射機的振盪器受調變器輸出之電流激發而發出高頻脈波。(4)發收開關用以調節天線的收發工作。(5)天線負責收發雷達脈波。(6)接收機將反射回波放大、檢波及電力、電壓的再放大。(7)雷達電幕將探測所得資料如距離、高度、範圍、密度、厚度等表現於螢幕上。(8)掃描器用來轉動天線的方位角與高度(仰)角，常與天線控制系統以同步機械相連接。

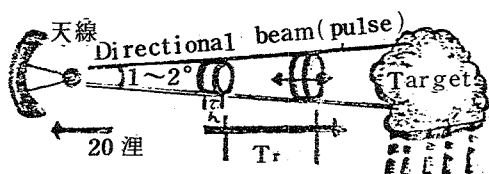
四、傳統雷達的主要元件和原理

雷達的內部結構相當複雜，在此僅簡略介紹其中較主要的組件(如圖一)及功能：(1)時控器(Timer)為雷達系統的心臟，它是決定脈波的來復頻率(pulse repetition frequency PRF)，因而控制著整部雷達系統的動作。(2)調變器(Mo-



圖一

雷達利用脈波發射與接收的時間差可算出目標物的距離，見圖二。



τ 為脈波時 (pulse duration) = $2\mu s$

h 為脈波長度 = $\tau \cdot c$ (c 為光速)

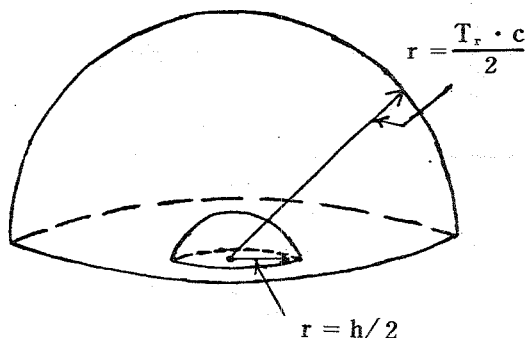
T_r 為聽時或脈波往復頻

圖二

$$2r = c \cdot T$$

$$\Rightarrow r = c \cdot T / 2$$

r 為距離 (m)， T 為發收時間差 (sec)
 c 為波速等於光速 (3×10^8 m/sec)
 在不考慮其他狀況時，雷達之觀測距離受單一天線的收發限制，而有最短觀測距離 $r_{\min} = h/2$ ，最長距離 $r_{\max} = T_r \cdot c/2$ 。
 所以雷達波的有效觀測範圍在 $h/2$ 與 $T_r \cdot c/2$ 之間。(如圖三)



圖三

五、都卜勒雷達的原理

都卜勒雷達比傳統雷達多了波頻檢測的儀器，而得到往返雷達波的波頻差 (f_d)，應用都卜勒效應的原理。可推得 $f_d = 2v/\lambda$ ，其中 λ 為雷達波波長，而 v 為目標物之徑向速度 (radial velocity)，由上式可得傳統雷達所無法觀測到的風場、風切等資料。而如何將都卜勒效應應用於雷達呢？普通物理學在討論聲學時曾提出都卜勒效應，其大義為：當一聲 (波) 源向觀測者接近時，觀測者所觀測到的波頻會較聲源所發出的波頻 (原波頻) 為高，反之若聲源遠離，則觀測到較低的波頻；這種因波源與觀測者的相對運動所造成觀測波頻改變的一般公式如下 (讀者可自行導出)

$$f' = f(v \pm v_o) / (v \mp v_s) \dots \dots \dots (1)$$

f' 為觀測波頻， f 為原波頻， v 為波速， v_o 為觀測者速度， v_s 為波源的運動速度。當波源與觀測者為同向運動時，用上面一組正負符號，若為反向運動則用下一組正負符號。若波源所發出的波為電磁波，則公式變為式(2)：

$$f' = f(c \pm v_o) / (c \mp v_s) \dots \dots \dots (2)$$

c 為光速，等於 3×10^8 m/sec

由於雷達波是經雷達發射，遇目標物再反射回到天線，故都卜勒效應於此需用兩次，其推導過程如下：

已知：雷達為不動體，其移動速度為零，令目標物沿雷達波束之徑向速度為 v

，而雷達所發出之波頻為 f ，波長為 λ 。

(1) 當雷達波由天線至目標物時，令假想觀測者位於目標物上，又波源為雷達，而得

$$v_o = v, v_s = 0$$

$$\begin{aligned} \text{故 } f' &= f(c \pm v_o) / (c \mp v_s) \\ &= f \cdot (c \pm v) / c \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

(2) 當雷達波由目標物折回天線時，則觀測者位於雷達天線上，而目標物變為假想波源，而得

$$v_o = 0, v_s = v$$

$$\text{故 } f'' = f'(c \pm v_o) / (c \mp v_s)$$

$$= f' \cdot \frac{c}{c \mp v}$$

$$\Rightarrow f'' = f \cdot \frac{(c \pm v)}{c} \cdot \frac{c}{(c \mp v)}$$

$$\Rightarrow f'' = f \cdot \frac{c \pm v}{c \mp v}$$

$$f'' = f \cdot \frac{c^2 \pm 2vc + v^2}{c^2 - v^2}$$

$$\because c \gg v \therefore \text{略去 } v^2 \text{ 項}$$

$$\Rightarrow f'' = f \cdot \frac{c^2 \pm 2cv}{c^2} = (1 \pm \frac{2v}{c}) f$$

$$\text{而 } fd = f'' - f = f \cdot (\pm \frac{2v}{c}) = \pm \frac{2v}{\lambda}$$

$$\text{故 } fd = \pm \frac{2v}{\lambda} \quad \dots\dots\dots(4)$$

fd 為都卜勒偏移頻率，亦即雷達接收到電磁波之頻率 f'' 與所發射電磁波頻率 f 之差值。

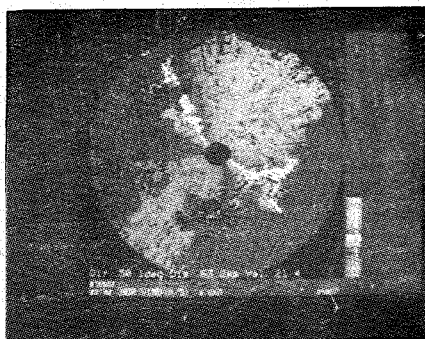
由式(4) $fd = \pm \frac{2v}{\lambda}$ ，我們可得對同一

波長而言，如波長為 5 公分的雷達，若測得 $fd = 1000 \text{ Hz}$ 則目標物之徑向速度為 25 m/sec ，若 $fd = 200 \text{ Hz}$ 則 v 為 5 m/sec 。由上例可知式(4)在應用上相當便捷，而式中的正負則表示目標物在徑向的方向，負號表示目標物向雷達接近，正則表示在徑向上遠離雷達。

六、都卜勒徑向風場觀測

由都卜勒波頻及波譜的分析，可求得每個解析體積的徑向風速，一般定義吹離雷達的風為正值，而吹向雷達的風定義為負，在螢光幕上通常以不同顏色代表大小、分級之徑向風速，以暖色系統代表正的徑向風，而以冷色系統代表負的徑向風，如圖四（取自中正機場都卜勒雷達簡介）顯示地面 2.5 公里高度西南風風場的情形

都卜勒作業狀態下風速圖 (m/s)

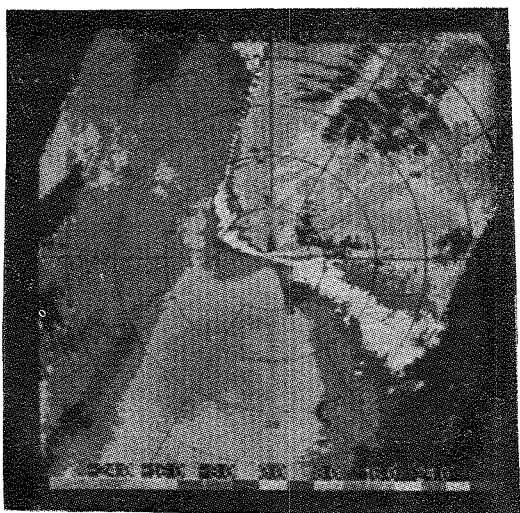


圖四 冷色系（負值）表示風吹向雷達，暖色系（正值）表示風吹離雷達。本圖例顯示離地面 2.5 公里高度（屬 CAPPI）之西南風風場情形。

，由圖中可大致看出風自西南方向吹來，向東北方向吹去，等都卜勒風速線（isodop）以零 isodop 通過雷達中心位置，成對角分開，左下方全是冷色而右上方全是暖色，而風場是一致的西南風，由此可知 isodop 的等值線特性和一般等風速線不同，以下介紹幾個以 isodop 分析風場情況的例子。

(1) 風變線（wind shift line）

這類風變線可能出現於鋒面或陣風鋒面。當界面進入雷達觀測範圍時，可由等都卜勒風速線明顯看出，參考圖五（取自 Wilson et al），此圖為等都卜勒風速圖，注意雷達西方的零 isodop 有一個由 290 度轉為 360 度的急轉彎，由此彎向西南延伸著一條隱含的直線分離不同值的風速，因實際風向會與都卜勒雷達所測得之零 isodop 垂直，故知上述顯示著風向由

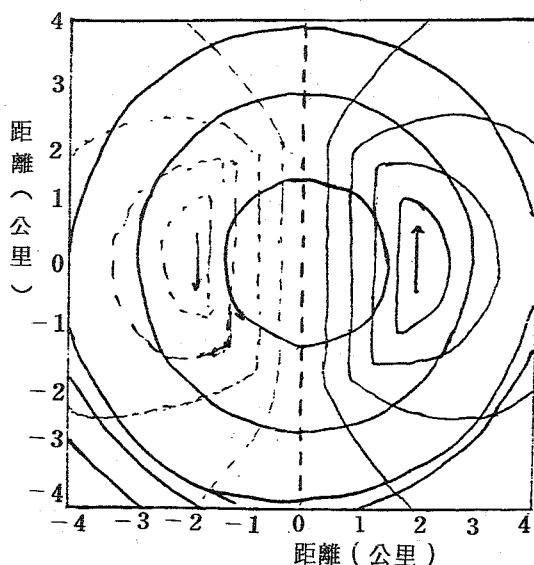


圖五 呈現於等都卜勒風速圖中的鋒面

200 度轉為 280 度的急變，觀察此隱含線右方的色系，可知其由西南方向東北方，吹著南南西風，由此可推測鋒面在此隱含線上。

(2) 渦旋（vortex）

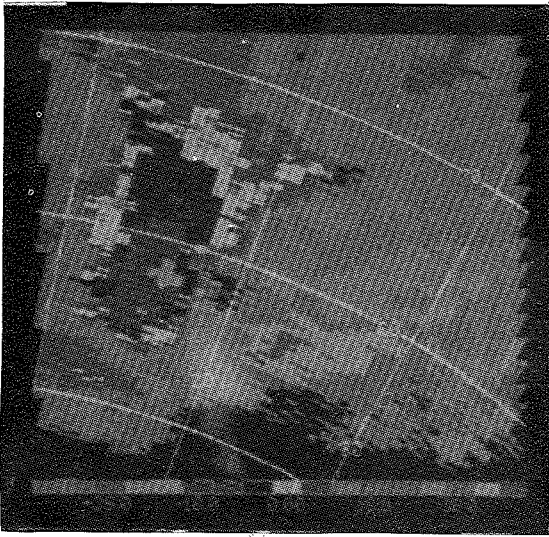
颱風、中尺度氣旋或龍捲風都具有此種渦旋風場的特性；一個離雷達有一段距離的渦旋的等都卜勒風速線，會形成兩個半圓的圖形，一半是負 isodop 區，一半是正 isodop 區，而中間隔著一條與雷達徑向平行的零 isodop，參考如圖六，實際觀測如圖七。



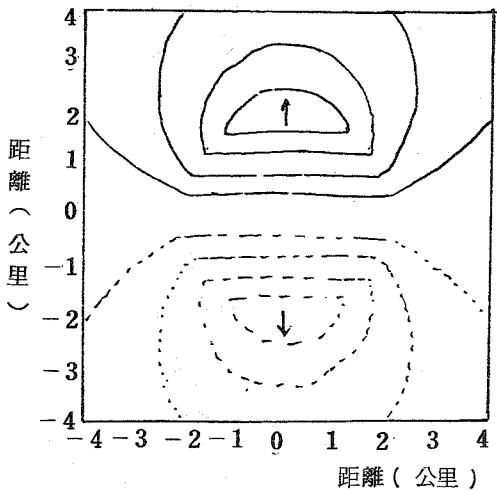
圖六 渦旋風場等都卜勒風速模擬圖

(3) 輻散與輻合（divergence and convergence）

在雷雨頂端常有輻散，而在雷雨底側則為輻合，但在雷雨底側後方又常有下爆氣流（downburst）產生的輻散，這一類



圖七 渦旋風場等都卜勒風速實際觀測圖



圖八 輻散與輻合風場的等都卜勒風速模擬圖

風場在螢幕上顯示的圖形，也是一正一負兩個半圓，而中間一分為二的零 isodop 則與雷達徑向垂直，模擬參考圖八，而實際觀測到之下爆氣流也有清晰的圖形，如圖九中可看見零 isodop 在水平距離 26 公里處與雷達徑向方向垂直，而左右則為暖冷兩色的半圓。這類下爆氣流對飛航安全有極大的影響，由於下爆氣流範圍小、時

間短，故僅能由都卜勒雷達偵測得出，對航空意外事件的防範是有極大幫助的。



圖九 下爆氣流（輻散風場）的等都卜勒風速實際觀測圖

七、雷達性能的比較

如表二所示，就雷達之性能及作業狀態加以比較，可發現都卜勒及非都卜勒的主要不同點在於：都卜勒雷達有較短的脈波寬，而有較高的解析度；有較高的往復波頻，而涵蓋的範圍較小；而最大的不同點則在於都卜勒雷達具有觀測風場的能力。

八、結 語

單一都卜勒雷達只能觀測徑向風速，若成立都卜勒雷達網，則能將三維風向風速更加明確的分析與了解；利用雷達觀測資料作天氣分析時，應配合雷達降水回波圖，運用附近的探空資料及衛星雲圖，來彌補雷達功能的不足及尺度上的限制。如能加上天氣圖及數值模式預測圖的應用，必可做出較正確的天氣預報。

表二 雷達性能表

性能要項	作業狀態	
	非都卜勒	都卜勒
頻率範圍	5.60 至 5.65 GHz	
往復波頻	250 Hz	900/1200 Hz
脈波寬	2 μ S	0.5 μ S
尖峰電力	250 KW	250 KW
天線罩損失	< 0.5 dB	< 0.5 dB
天線轉速	2, 4, 6 rpm	2, 4 rpm
天線增益	43 dB	43 dB
波束寬	0.9°	0.9°
側波	-27 dB	-27 dB
天線極化	horizontal	horizontal
天線仰角	-1 to 90°	-1 to 90°
接收器	logarithmic	linear
雜訊	5 dB	5 dB
動力範圍	> 85 dB	> 85 dB
可測最低信號	-109 dBm	-114 dBm
涵蓋範圍	480 KM	120 KM
解析度	2 KM	1 KM
最高可精測風速	-	± 48 m/s
地面回波消除能力	> 32 dB	> 26 dB
風力差級數	-	6 級

參考資料

1. 中正機場都卜勒雷達啓用特刊(七十六年出版)。
2. 氣象學報, 三十一卷, 第一期; 都卜勒雷達之評介, 劉復誠著, P 32~50。
3. 雷達氣象學, 第二章, 何禮和譯著。
4. 新航空氣象學(下), 第十章, 林政宏譯著, 徐氏出版社出版。
5. Esa journal (85/2) Use of Doppler Radar and Radar Networks in Mesoscale Analysis and Forecasting (P125 - 146) J. Wilson H. P. Roesli。