

雷達觀測氣象之限制

曲克恭

The Limitations of Radar Observation of Weather Targets

由於雷達偵察氣象的對象為降水與雲系，和其他目標在性質、體積、特別是目標物對雷達波能量之消滅方面有很大的不同，所以雷達觀測氣象目標有一定之限制。如忽略雷達波之消滅，則雷達可能接收之回波能量與波長之六次方成反比（根據 *Battan* 方程），但降水與雲中質點對雷達能量之消滅却與波長成反比。因之，我們可以認為雷達偵察氣象目標之特質為「過量誇張最大之質點而幾乎忽略最小之質點」。例如雨滴之直徑 1m.m. 較 0.03 m.m. 直徑之質點所反射之電波強七億倍。

考慮降水強度之地區分佈，是故在熱帶地區多用波長為 10cm 之雷達，中高緯度多用 3-5cm 之雷達；若偵察雲系之狀況則以 1cm 以下之雷達為佳。

本文不在理論上探討雷達偵察氣象目標所受之限制，謹概略介紹一些有關之常識，俾我氣象同仁在利用雷達報告時有所判斷。

一、雷達距離分辨力與測距誤差

在雷達水平位置指示器（PPI）上所顯示的影像並不能完全代表降水雲系之分佈及其實際面積。例如我們使用 10cm 之雷達，則組成雲系或雲塊之細小質點常不可能顯示。至於雲塊彼此間之距離則受雷達分辨力（Resolution）之影響。雷達所發射之電波不同於普通無線電波，雷達之設計者盡可能的使雷達發出之脈波成為矩形，雷達脈波有其一定之寬度，若其所經之時間為 $5\mu\text{sec}$ ，則脈波之寬度為：

脈波寬 $k = r \cdot \theta$

r —— 脈波時距

c —— 光速

則 $5\mu\text{sec}$ 之脈波，其寬度為 1500 公尺。

若二目標對雷達有相同之方位角及高度角，僅距離不同，則其距離必須在 $k/2$ 以上時，方可在雷達指示器上予以分辨，否則只可顯示一個目標。以 $5\mu\text{sec}$ 之脈波為例，其最小之距離分辨（Range Resolution）為 750 公尺，亦即目標間之距離小於 750 公尺時只顯示一個目標。

使用雷達測定氣象目標時，目標朝向雷達之邊沿，其距離可靠，但目標之厚度則會發生誤差，但

不能超過 $k/2$ 。大部份氣象雷達皆有兩種脈波，可以相互使用，雷達之最大測距與脈波之寬度成正比，測距增加則分辨力減小。若脈波為 $1\mu\text{sec}$ ， $k/2$ 為 150 公尺，目標之厚度誤差亦減小。

二、雷達方位分辨力與方位誤差

若二目標之距離（對雷達言）相等，而彼此間之距離超過雷達波索之寬度，則二者可以在雷達指示器上分辨；若小於雷達波索之寬度，則二者顯示一個目標。

雷達波索寬度（beam width）以度數表示，多在 1 度至 2 度間。若以波索之中線為指示方位，則方位之最大誤差為 $\theta/2$ ， θ 為雷達波索寬度。以省氣象局之 WSR-64M 雷達為例，其波索寬度為 2 度，則其方位分辨力為 2 度，方位之誤差不會超過 1 度。除精確之小範圍天氣研究外，以目前我們近似於定性之預測，則雷達之距離與方位誤差可不考慮。但以雷達水平位置指示器上之影像判斷雲系之分佈範圍，却因雷達波之消逝作用而會產生驚人的誤差。

三、地球曲率與折射指數之誤差

由於折射指數 $n \approx 1$ 之原故，使雷達波之進行成向地球彎曲之狀況，若設一假想之地球半徑 R' ，使 $R' = \frac{4}{3}R$

R' —— 假想地球半徑

R —— 地球之平均半徑

則可視雷達波成一直線，而易於正確計算目標之高度，如果雷達之距離高度指示器（RHI）上無地球曲率訂正之設計，則測距在 35 哩以外時之目標高度應有測距高度之訂正。雖然經過訂正，雲頂之高度由雷達觀測仍有誤差，測距在 100 哩以外之頂高即不可相信。一般層狀雲頂高誤差較小，20 哩以內之目標用 RHI 測定其頂高結果較佳，陣雨及雷雨之頂常較實際者為高，平均言之，回波之頂較實際頂高出雷達波索寬度之一半，但是對個別之積雨雲頂高度却因其反射率分佈之關係，雷達測定之頂高減去波索寬度之一半並不一定可得到較真確的高度。

雲頂高度之觀測應該繼續不斷，尤其對發生降

水之雲層，應隔一定之時距觀測一次，天氣預報人員可由雲頂高之變化而判斷降雨時間及強度之變化（定性方面）。

在RHI上之回波影像跳躍變化不定，必須有經驗的觀測員方能決定。

四、測距之影響

由雷達方程可知雷達所能接收的電波強度與目標之距離平方成反比，因之相同之目標因距離之不同而其影像有強弱之分。當一颱風接近雷達站時，在遠距離常成少數微小的單獨影像，漸次接近雷達站時始擴大而且增加影像之強度。因之在比較影像強度時必須考慮目標之距離。此外仍須考慮雷達波索對目標之涵蓋狀況，即光索是否全部投射於目標；以及波索經過長距離之消滅(Attenuation)——包括反射及吸收——情形。

研究雷達電波能量之消滅問題甚為複雜，且目前尚無法做定量的計算與測量。消滅之定義為「電磁波沿其運動途徑中強度之減弱」。若以db表示，其方程為：

$$db = 10 \log \frac{\bar{P}_r}{\bar{P}_{ro}} = -2 \int_0^r (k_g + k_c + k_p) dr$$

$\bar{P}_r$ ——雷達接收之平均電量 (Power)

$\bar{P}_{ro}$ ——若無消滅，雷達可接收之電量

dr ——距離之增量

k_g ——空氣之消滅係數

k_c ——雲之消滅係數

k_p ——降水之消滅係數

空氣對雷達電波之消滅以氧及水汽為主，雷達波長在3cm以上時，因氧之消滅近於常數，100哩之測距時，雷達波往復之消滅約為3db，亦即 $\frac{\bar{P}_{ro}}{\bar{P}_r} = 1.6$ ，水汽之消滅因其含量之大小而異。雲之消滅亦依雲中液態水之含量而不同，大致言之，雷達波長在5cm以上時，以上之消滅皆可忽略不計。

因降雨而發生之消滅隨雨滴之大小及降雨強度而定，消滅並與距離成直接之比例，是故利用此種性質而研究雷達觀測雨量及降雨強度之問題，晚近成為雷達氣象中很重要而需要繼續努力之一個目標。

平均言之，每小時50m.m.之大雨，10cm雷達50哩距離之往復消滅（等於100哩之單向距離）為4db，即 $\frac{\bar{P}_{ro}}{\bar{P}_r} = 2.512$ 。而3cm之雷達在10哩距離之

往復消滅，却高達40db，即 $\frac{\bar{P}_{ro}}{\bar{P}_r} = 1.0 \times 10^4$ 。

因降水而發生雷達波之消滅，使雷達指示器上之影像，更不能顯示真實之狀況，因此在發生大雨之地區，如熱帶，常採用10cm之雷達。

五、颱風中心之決定

雷達觀測颱風中心之位置並非完全絕對的準確，我們在使用其報告時必須予以考慮可能的誤差。颱風眼的直徑大約在10至30哩之間，但每一個颱風皆有其不同的眼，無論在結構與大小方面，很難完全相似。由於降雨之分佈並非完全對稱的分佈於颱風中心四周，若使用普通幾何圓之中心決定法，或估計其中心位置，常會發生誤差。我們在飛機偵察報告中發現有一句術語“Well-defined eye”，其意即為颱風眼四周皆顯示有降水的回波，但是此種眼並不常見，而且測距較遠，超過125哩—150哩以外，颱風眼很難偵知。若遇雷達指示器上顯示螺旋狀之雲系，而不易決定颱風中心時，一般多採用一種稱之為螺旋重疊板 (Spiral Overlay) 之設計而仔細研判調整定出中心位置。雖然此種決定方法之誤差可高達30哩以上，但仍不失為可用之方法。

颱風中螺旋狀之降雨雲帶約與颱風等壓線成10度到20度之交角，按對數螺旋線之公式（此法由美國Miami大學所創）

$$\ln r = A + B\theta$$

r 為颱風中心至螺旋雨帶一點之徑距。

A, B 為常數

θ 為徑距 r 之點與假定之原始軸間之角度（以弧度為單位）

$$B = \tan \alpha$$

α 為以此螺旋中心為中心之圓與螺旋線之交角，設 A 為零，則

$$\ln r = \theta \tan \alpha$$

解方程 $\ln r = \theta \tan \alpha$ ，設 $\alpha = 15^\circ$ （按過去之經驗以 15° 為最適當之角度），以任何 θ 值（按一定之值增加，如 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 等）代入解得 r 值，以 r 值與相對之 θ 值填於極座標圖上則可繪成之。

製圖之先最好先列一表，求出相應之值。茲以概數舉例如下表：

$$\tan 15 = 0.268$$

（下接第四頁）