

都卜勒氣象雷達及其應用之簡介

劉 廣 英

空 軍 氣 象 中 心

摘 要

都卜勒氣象雷達是觀測風暴內及晴空中小範圍風場的有利工具。此種雷達透過頻率的位移可測知目標物沿着雷達波束方向的運動，進而可求得相對於風暴或平均流的風場。此種觀測可由單、雙或更多的都卜勒氣象雷達完成之。因為由風場可推算出許多特徵量，所以此種特殊的氣象雷達不但可為龍捲風、風暴、颶線、冷鋒、颶風及強烈降水的工具，亦可提供短時預報很大的幫助。本文之目的即在介紹有關的文獻以供有興趣者參考。

一、前 言

都卜勒效應指出以 u 移向及離開固定波源的觀測者會觀測到與靜止時觀測到不同的波動頻率，其差值為（參閱Halliday & Resnick, 1966）

$$\Delta f = \pm f (u/v)$$

或 $f' = f (1 \pm u/v)$ (1)

式中 f 為靜止中的頻率， f' 為改變後的頻率， v 為波速，「+」及「-」分別表示觀測者移向及離開固定波源。同一效應又指出，如果波源以 u 移向及離開靜止的觀測者，則波長會改變，即

$$f' = f (1 \mp u/v)^{-1}$$
(2)

但就電磁波而言，波源移動或是觀測者移動結果都是一樣，即應顯出完全相同的都卜勒頻率。對波源與觀測者相互分離者，此時

$$f' = f \frac{1 - u/v}{\sqrt{1 - (u/v)^2}}$$
 (3)

式中 c 為光速。當 u 與 c 差別很大時，此式與公式(2)並無多大差異。都卜勒氣象雷達即利用此原理由雷達波的頻率變動（frequency shift）推算目標物沿着雷達波束方向的位移。

近十多年來的實驗與應用證明都卜勒氣象雷達

不但是觀測大氣運動的有利工具，亦是測定中小尺度驟烈天氣現象的最佳儀器。本文之目的即在介紹此種儀器及其使用概況。由於個人在這方面的學識有限，無法在文中涵蓋很多的資料，有興趣者請參閱文後的參考文獻。

二、都卜勒氣象雷達簡介

美國國家驟烈風暴實驗室（NSSL）於1971年將一架FPS-18 10-cm雷達修改為都卜勒雷達，並於該年5月15日至6月15日在奧克拉荷馬實施觀測並由而求得風暴中的風場（Brown et al, 1971），該雷達使用的波長為10.6 cm，最大功率500KW，最大測距115 km，可觀測之最大風速為±34 cm/sec。

脈波式都卜勒雷達（pulsed-Doppler radar）可分辨的（unambiguous）最大測距及速度分別由下二式決定（Wilson et al, 1980）

$$R_{max} = C / (2 PRF)$$
(2)

$$V_{max} = \pm PRF \lambda / 4$$

式中 C 為光速， λ 為雷達的波長，而 PRF 為脈波重覆頻率（pulse repetition frequency）。當年NSSL 改裝雷達的 $PRF = 1300 \text{ Hz}$ 。由式

(2)可知增大脈波中的頻數可增大觀測風速的跨距(Nyquist interval)但會使最大測距減小,因而欲加大 V_{max} 的跨距而不影響測距應增大波長,但波長影響回波,所以波長的選定與 PRF 的選定一樣是需要針對目的而審慎訂定的。

爲了計算目標物的移速,都卜勒氣象雷達需記錄下頻率變動的資料,此一資料的處理最初是先將有關資料數字化並記錄在磁帶上而後交由計算機處理(Brown, et al, 1971)。至1972年(Groginsky; Lhermitte)經濟有效而又快速的都卜勒處理(processing)發展完成,由頻變求得的速度分布乃能即時(real-time)顯示在雷達幕上。平面切變顯示器(plan-shear indicator) (Armstrong & Donaldson, 1969)及多矩顯示器(multi-moment display) (Burgess et al, 1976)均已證明很好用(Wilson et al, 1980)。Gray et al (1975) 曾詳細介紹過NCAR 的即時彩色顯示器,在此系統中 $\pm V_{max}$ 中的速度以15種顏色顯示之。爲增加顯示資料的清晰度,處理中使用軟體消去速度混淆(Barger & Brown, 1980)。顯示器上正值顯示目標物離開雷達,負值則顯示目標物移向雷達。顯示器對速度的解析度可調整,通常有0.25, 0.5, 1, 2 msec⁻¹ 不同的等級。

都卜勒氣象雷達幕上也顯示回波強度,使用的單位是 dBZ (= 10 log₁₀ Ze ; Ze 爲 equivalent reflectivity factor, 其單位爲 mm⁶m⁻³)。

三、都卜勒氣象雷達的應用

都卜勒氣象雷達最突出的功能是可以利用頻率變動推算出風暴等系統內以及晴空中的空氣運動狀況,並由而導出一些與天氣變化有關的量。所以在本節中我們僅介紹都卜勒雷達在此方面的應用。

(一) 單一都卜勒雷達的應用

Wilson 等(Wilson et al, 1980)介紹了單一都卜勒雷達的各種應用。包括

1 測量大片降水(Widespread precipitation)區中的風速。觀測的方法是在仰角(

elevation angle) 固定下旋轉天線(PPI scan), 此時雷達由波束旋轉中獲得相對於方位角(azimuth) 的降水質點沿徑速度。此法稱爲 VAD (Velocity-Azimuth Display) 是 Lhermitte 及 Atlas (1961) 提出來的。可測定不同高度上的水平風速,並由急驟的風變上可以定出鋒面。

2 嚴重風暴的測定。都卜勒雷達可測出沿徑及不同方位上的強烈風變,即 dV_r/dr 及 $dV_r/d\theta$ 的值,故能測定嚴重風暴並據而提出預警。Donaldson (1970) 證明單一都卜勒雷達可分辨出風場中的中小尺度渦旋,而此種渦旋與內藏龍捲風的中尺度氣旋(mesocyclone) 是一個體系(Burgess, 1976; Brandes, 1978), 即由風場中渦旋可推測出可能已存在的風暴。與嚴重風暴相連的陣風鋒通常是由與低層環境氣流反向的外衝氣流所造成,即在陣風鋒(外衝氣流的前沿) 上有很強的 dV_r/dr , 都卜勒雷達可以顯示得出來。形成陣風鋒的下衝流(downburst) 在都卜勒雷達顯示器上就是一個等風速線密集的區(Wilson et al, 1980)。

3 晴空觀測。晴空中近地層內運動體的速度亦可在都卜勒雷達幕上顯示出來。有關的文獻有 Lhermitte (1966), Berger 及 Doviak (1979), Browning 及 Atlas (1966), Doviak 及 Jobson (1979), Wilson 等(1980)。

4 颶風觀測。Wilson 等(1980) 認爲都卜勒對颶風風場觀測應很有效,但尚未有實測記錄。Baynton (1979) 根據 Shea 及 Gray (1970) 的資料模擬過都卜勒雷達的風場顯示,效果很好。但實際使用中會如何尚待驗證。

5 風切及亂流的觀測。低層風切對進出場飛機的影響很大,許多嚴重失事與此有關(Fujita and Caracena, 1977) 曾分析過三次個案。McCarthy 等(1979) 指出影響落地中波音 727 飛機最大的是沿進場航線波長爲 2.8 km 的風變。

(二) 多雷達觀測

都卜勒雷達可相當正確的測定目標物沿雷達波

束方向的移動速度，因而測定水平風場可使用兩部都卜勒雷達同時觀測，而後由連續方程及已知未速度的條件下可求得垂直速度 (Ray et al, 1975)。關於更多都卜勒雷達同時觀測及分析效果 Ray 等 (1978) 亦曾加一比較，他們認為更多的雷達有增大涵蓋面及提高分析準確性的作用，但由兩部增加至四部改進就不大。Wilson 等 (1980) 也認為增多都卜勒雷達不但不經濟且資料合成 (combine) 也不易。有關利用雙都卜勒雷達觀測分析風場的方法可參考 Armejo (1969) 以及 Kropfli 及 Miller (1976)。有關多都卜勒雷達網的設計問題則請參閱 Ray 等 (1978) 的專文。

以上介紹偏重於對風場的分析，根據風場進一步可導出有關系統的運動 (kinematic) 及動力 (dynamic) 的徵候 (aspect)，有關這些問題可參閱 Kropfli 及 Miller (1975)，Heymsfield (1977)，Brandes (1978)，Matejka 與 Hobbs (1981)。

四、使用都卜勒氣象雷達應注意的問題

由前面的介紹可知都卜勒雷達在氣象觀測上有很大的用途，尤其是對於中小尺度的驟烈天氣現象，可能是最有效的觀測工具。但使用中有下列幾點值得注意。

(一) 先要確定都卜勒波譜的雜波水準 (noise level in Doppler Spectra)。Hildebrand 與 Sekhon (1974) 討論到為何先要將雜波水準並介紹了客觀的方法。

(二) 使用單一都卜勒雷達觀測時，沿徑速度 V 是水平風速 V_h ，風向 β_0 ，目標物下降速度 V_f ，天線仰角 α ，及方位角 β 的函數，即 (Wilson et al, 1980)。

$$V = -V_h \cos \alpha \cos (\beta - \beta_0) - V_f \sin \alpha$$

因而不但有關係的數據要準尚需有 V_f 。當 $\beta = \beta_0$ ， V_f 很小且 $\alpha \leq 25^\circ$ 時 V_h 很近似於 V 。

(三) 使用兩部或以上都卜勒雷達同時觀測時，要有正確的規畫，而且要選用良好的分析方法以求簡化 (Lhermitte & Miller, 1970)。

(四) 對於可能的誤差 (Doviak et al, 1975) 要有所瞭解。

(五) 與強度回波配合使用會有更好的結果。

五、結語及建議

觀測資料的完整是瞭解天氣系統及預測未來天氣的基礎之一。大氣中有不足尺度的系統，有些是傳統氣象觀測網可以觀測得到的，有些則需要特別的觀測工具與方法。根據前面的介紹可知，都卜勒氣象雷達是觀測大氣中小尺度運動及動力現象的最佳工具，可以觀測很多其他儀器所無法觀測到的嚴重天氣系統。尤值得一提的是有彩色顯示的都卜勒氣象雷達，給使用者很深刻的印象。近年來由於局部豪雨帶給我們很多災害，而大家由分析研究所獲得的初步印象又都認為中小尺度系統在此種災變上負有很大的責任，這也正是大家齊集一堂參加中央氣象局主辦之中範圍天氣研討會的主要原因，深信會有很大的收穫。但是，就另一方面來說，各位學者先進在撰寫有關的論文中，最感到有問題的可能是缺少可用的資料。這是今後必須設法克服的問題。那麼，請

中央氣象局或那一大學的相關研究所購買一部移動式 (portable) 都卜勒氣象雷達。該是值得考慮的問題了。

最後，個人要向陳教授泰然致謝，謝謝他的建議與協助。空軍氣象中心的秦弘能、台大大氣科學系圖書館的張小姐在複印參考資料上提供了極大的支援，李紀恩協助整理原稿，在此一併致謝。

參考文獻

- Armijo, L., 1969: A theory for the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radars. *J. Atmos. Sci.*, 26, 570-573.
- Amstrong, G. M., and R. J. Donaldson, Jr., 1969: Plan shear indicator for real-time Doppler radar identification of hazardous storm winds. *J. Appl.*

- Meteorol., 8, 376 - 383.
- Bargen, D. W., and R. C. Brown, 1980 : Interaction radar velocity unfolding. Preprints, 19th Conference on radar Meteorology, AMS, Boston, 278 - 285.
- Baynton, H. W., R. J. Serafin, C. L. Frush, and G. R. Gray, 1977 : Real-time wind measurements in extratropical cyclone by means of Doppler radar. J. Appl. Meteorol., 16, 1022 - 1028.
- Berger, N. I., and R. J. Doviak, 1979 : An analysis of the clear air planetary boundary layer wind synthesized from NSSL's dual Doppler radar data. NOAA Tech. Memo ERLNSSL - 87.
- Brandes, E. A., 1978 : Mesocyclone evaluation and tornado genesis : Some observations. Mon. Wea. Rev., 106, 995 - 1011.
- Brown, R. A., W. C. Bumgarner, K. C. Crawford and D. Sirmans, 1971 : Preliminary doppler velocity measurements in a developing radar book echo. Bulletin AMS, 52, 12, 1186 - 1188.
- Burgess, D. W., 1976 : Single Doppler radar vortex recognition : Part I - Mesocyclone signature, 17th conference on radar meteorology. AMS.
- Burgess, D. W., L. D. Hennington, R. J. Doviak, and P. S. Ray, 1976 : Multi-moment Doppler display for severe storm identification. J. Appl. Meteorol., 15, 1302 - 1306.
- Danaldson, R. J., Jr., 1970 : Vortex signature recognition by a Doppler radar. J. Appl. Meteorol., 9, 661 - 670.
- Doviak, R. J., and C. T. Jobson, 1979 : Dual Doppler-radar observations of clear air wind perturbations in the planetary boundary layer. J. Geophys. Res., 84, 697 - 702.
- Doviak, R. J., P. S. Ray, R. G. Strauch and L. J. Miller, 1975 .
- Fujita, T. T., and F. Caracena, 1977 : An analysis of three weather-related aircraft accidents. Bulletin, AMS, 58, 1164 - 1181.
- Error estimation in wind fields derived from Dual-Doppler radar measurement, J. Appl. Meteorol. Aug. 1976, 868 - 878.
- Gray, G. R., R. J. Serafin, D. Attas, R. E. Rinehart, and J. J. Bogajian, 1975 : Real-time color Doppler radar display. Bulletin AMS, 56, 580 - 588.
- Groginsky, H. L., 1972 : Pulse pair estimation of Doppler spectrum parameters. 15th Conference on Radar Meteorol., AMS, Boston, 233 - 236.
- Heymsfield, G. M., 1977 : Kinematic and dynamic aspects of the Harrah tornadic storm analyzed from Dual-Doppler radar data. mon. Wea. Rev., 106, 233 - 254.
- Halliday, D. & R. Resenick, 1964 : Physics, 台北歐亞書局。
- Hildebrand, P. H., and R. S. Sekhon, 1974 : Objective determination of the noise level in Doppler Spectra. J. Appl. Meteorol., Oct., 1974, 808 - 811.
- Kropfli, R. A., and L. J. Miller, 1976 : Kinematic structure and flux quantities in a convective storm from dual-Doppler radar observations. JAS, 33, 520 - 529.
- Lhermitte, R. M., 1972 : Real-time proc-

- essing of meteorological Doppler radar signals. 15th Conference on Radar Meteorology. AMS, 364 - 367.
- Lhermitte, R. M., and D. Atlas, 1961: Precipitation motion by pulse-Doppler radar. 9th Conference on Radar Meteorology. AMS, 218 - 223.
- Lhermitte, R. M., and L. J. Miller, 1970: Doppler radar methodology for the observation of convective storms. 14th Conference on Radar Meteorology, AMS, 133 - 138.
- Matejka, T. J., and P. V. Hobbs, 1981: The use of single Doppler radar in short-range forecasting and real time analysis of extratropical cyclones. Nowcasting: Mesoscale observation and short-range prediction. IAMAP Symposium, Hamburg Germany.
- McCathy, J. E., E. F. Blick and R. R. Bensch, 1979: Jet transport performance in thunderstorm wind shear conditions. NASA Contract Rept. 3207, Univ. of Oklahoma, Norman.
- Ray, P. S., R. J. Doviak, G. B. Walker, D. Sirmans, J. Carter and B. Bumgarner, 1975: Dual-Doppler Observation of a tornadic storm. *J. Appl. Meteorol.*, 14, 1521 - 1530.
- Ray, P. S., J. J. Stephens and K. W. Johnson, 1978: Multiple-Doppler radar network design. *J. Appl. Meteorol.*, 16, 706 - 710.
- Ray, P. S., K. K. Wagner, K. W. Johnson, J. J. Stephens, W. C. Bumgarner, and E. A. Mueller, 1978: Triple-Doppler Observation of a convective storm. *J. Appl. Meteorol.*, 17, 1201 - 1212.
- Ray, P. S., C. L. Ziegler and W. Bumgarner, 1980: Single- and Multiple-Doppler radar observations of tornadic storms. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1607 - 1625.
- Shea, D. J., and W. M. Gray, 1970: The hurricane's inner core region. I. Symmetric and asymmetric structure. *J. Atmos. Sci.*, 30, 1546 - 1564.
- Wilson, J., R. Carbone, H. Baynton and R. Serafin, 1980: Operational application of meteorological Doppler radar. *Bulletin*, AMS, 61, 1154 - 1168.

A Powerful Tool for Deducing Air Motions within storms
and Clear Air —An Introduction to Doppler Weather Radar
and Its Usage

Koung-Ying Liu
Weather Central, CAF.

Abstract

Doppler weather radar is proving enormously successful as a research and observational tool for deducing air motions within storms and in clear air. This specialized radar measures the Doppler frequency shift caused by the component of radar target movement that is parallel to the radar beam. Many applications have been proposed in the last decade or so. In this work the author reviews outstanding papers in the related field. Many of them are listed in the reference which may be useful for the interesting readers.