

# 利用單一都卜勒氣象雷達重建完整風場之研究

廖宇慶

中央大學大氣科學系

## 摘要

本文介紹過去十年中，在單一都卜勒氣象雷達風場反演技術上的最新發展，並以其中的一種技術為例，來闡述其應用於實際天氣觀測時的重要性。

## 1. 介紹：

脈衝式都卜勒雷達(pulsed Doppler radar)的發展開始於二次大戰，最初的目的，自然是在諸如偵測敵機的軍事用途上。1953年英國劍橋大學Cavendish實驗室的科學家Ian C. Browne和Peter Barratt首次將都卜勒雷達應用於氣象的觀測。基本上，都卜勒雷達可以分析發射波與回波之間的相位差，又稱為都卜勒位移，進而計算出風的方向和速度。由於它可以在很短的時間內(可少於5分鐘)完成一次掃描，且資料的空間解析度很高(可小於1公里)，因此是觀測天氣現象的重要利器。但是都卜勒雷達的最大限制在於它只能看到一個方向的徑向風(radial wind;  $V_r$ )，如圖一所示。另外兩個和天線主軸方向垂直的風分量，即 $V_\theta$ 和 $V_\phi$ ，因為對雷達不會產生都卜勒位移，所以無法被直接觀測到。對於氣象研究及作業人員而言，要由單一分量的風去了解一個天氣系統內部完整的運動結構，可想而知是一件困難的工作。因此，如何利用都卜勒雷達去建構空間中完整的三維風場，就變成一個重要的課題。

## 2. 多都卜勒雷達合成：

使用兩個或以上的雷達對同一地區進行同步觀測，是解決前述問題最直接的方法。在空間中任一點的風具有三個分量(u, v, w)。如果每一點的u分量可以被雷達A看到，v分量可以被雷達B看到，則w分量可利用流體力學上的連續方程(continuity equation)推導出來。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

但是，使用多雷達合成技術，必須有足夠密度的雷達網，這在經濟的考量上，會造成極沈重的負擔。此外，在實際作業的情形下，個別雷達往往有獨立的掃描策略，因此，要協同各雷達對同一地區做長時期的同步觀測，也變得相當困難。而地形的阻隔，如台灣的中央山脈，也限制了可以進行合成的範圍。以上種種因素，都使得多雷達觀測的方式無法變成每日例行性的作業模式。這使得如何利用單一都卜勒氣象雷達可以測得的回波及徑向風資料，來反演(retrieve)垂直於雷達天線主軸的切向風分量(即圖一中的 $V_\theta$ 和 $V_\phi$ )，從而建構完整的風場分布，變成一個重要且有趣的問題。

## 3. 單都卜勒雷達反演：

早期的單雷達反演技術如 Volume Velocity Processing (VVP; Waldteufel and Corbin, 1979)法，或 Tracking Radar Echo by Correlation (TREC; Rinehart and Garvey, 1978)法，雖然可以反演出切向風分量，但是其結果會犧牲掉雷達資料高解析度的優點，因此只能得到風場大略分佈的情形。自 90 年代初期，由於變分法(Variational Method)的引入，使得單雷達反演技術有了長足的進步，以下便重點式地介紹幾種方法，並以其中的一種技術為例，說明這項工作的價值。

### 1.1 前向變分資料同化法(Forward Variational Data Assimilation)

Liou(1989)設計了一個把都卜勒風場觀測資料同化到一個數值天氣預報模式的流程。這個流程包含了：

- (1) 輸入都卜勒雷達觀測的一維徑向風到數值模式的每一個網格點上。
- (2) 使用變分技術調整輸入的風場與原有模式產生的風場，以避免因質量不保守而產生會擾亂數值預報結果的重力波。
- (3) 使用風場的資訊反演與之相對應的溫度及壓力等熱力參數場，並以之取代模式原有的熱力場。
- (4) 讓修正後的數值模式繼續預報，直到取得下一個時間的都卜勒雷達資料，再重覆(1)到(3)的步驟。

研究結果顯示經過多次循環這個流程後，完整的三維風場可以逐漸被重建回來。目前美國 National Science Foundation 所資助的 Center for Analysis and Prediction of Storms(CAPS)即根據此設

計來發展其數值模式 ARPS(Advanced Regional Prediction System)中的資料同化模組。

### 1.2 伴隨法(Adjoint Method)：

伴隨法 Sun et al. (1991)是目前處理單都卜勒雷達反演問題的方法中，數學上最為複雜的一種。它的主要內容介紹如下：

一個氣象預報模式可以用下式表示：

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial t} = F(\bar{\mathbf{x}}) \quad (2)$$

其中  $t$  為時間， $\bar{\mathbf{x}}$  為空間中每一點上的所有氣象參數，如三維風場，溫度，濕度，壓力等， $F$  為  $\bar{\mathbf{x}}$  的函數，包含了平流，擴散，壓力梯度，科氏力(Coriolis force)項等。另外，我們還要定義一個所謂的價值函數(cost function)  $J$

$$J \equiv \iiint \left[ \left( V_r - V_r^{\text{obs}} \right)^2 + \left( \eta - \eta^{\text{obs}} \right)^2 \right] dx dy dz dt \quad (3)$$

其中  $V_r$  和  $\eta$  分別代表徑向風和回波，上標“obs”代表雷達觀測的值。

伴隨法的原理，是要為預報模式找出一組最佳化的初始動力和熱力條件，使得模式由此初始條件開始預報出來的徑向風和回波，與觀測得來的徑向風與回波，它們之間的誤差，在經過時間和空間的累積之後(即公式(3)中  $J$  所代表的量)，有一個極小值。就風的觀點來看，吾人輸入的是每一點的一維徑向風，但輸出則可以得到三維的完整風場( $u, v, w$ )，這樣就完成了單都卜勒雷達反演風場的工作。

伴隨法的優點在於反演出來的量，會滿足公

式(2)在物理上嚴格的約束，但前題是所採用的數值模式必須能準確掌握被反演的天氣現象。另外這個方法的計算量十分龐大，難以納入例行性的天氣守視作業。為了改善計算量的問題，遂有所謂的簡單伴隨法(Simple Adjoint; Qiu & Xu, 1992)的提出。這個方法是用一個簡單的回波平流方程來取代公式(2)中完整的流體力學與熱力方程組，因此可以大幅降低其計算時間。

### 1.3 雙純量保守法

此方法由 Shapiro et al. (1995)提出。它的原理是將圖一中未知的  $V_\theta$  及  $V_\phi$  風分量用一個待求的流

場函數(stream function)  $Q$  表示，亦即：

$$V_\phi = \frac{\partial Q}{\partial \theta}$$

$$V_\theta = -\frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial Q}{\partial \phi} - \frac{1}{r \cos \theta} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \int_0^\theta \cos \theta' V_r d\theta' \right) \quad (4)$$

其中  $\theta$  是以雷達為原點之球面坐標中的仰角， $\phi$  為方位角， $r$  為網格點至雷達的距離。若雷達掃描時間很短（如：小於 3 分鐘），則它所觀測的回波( $\eta$ )可被認為是近似保守的，亦即滿足以下方程：

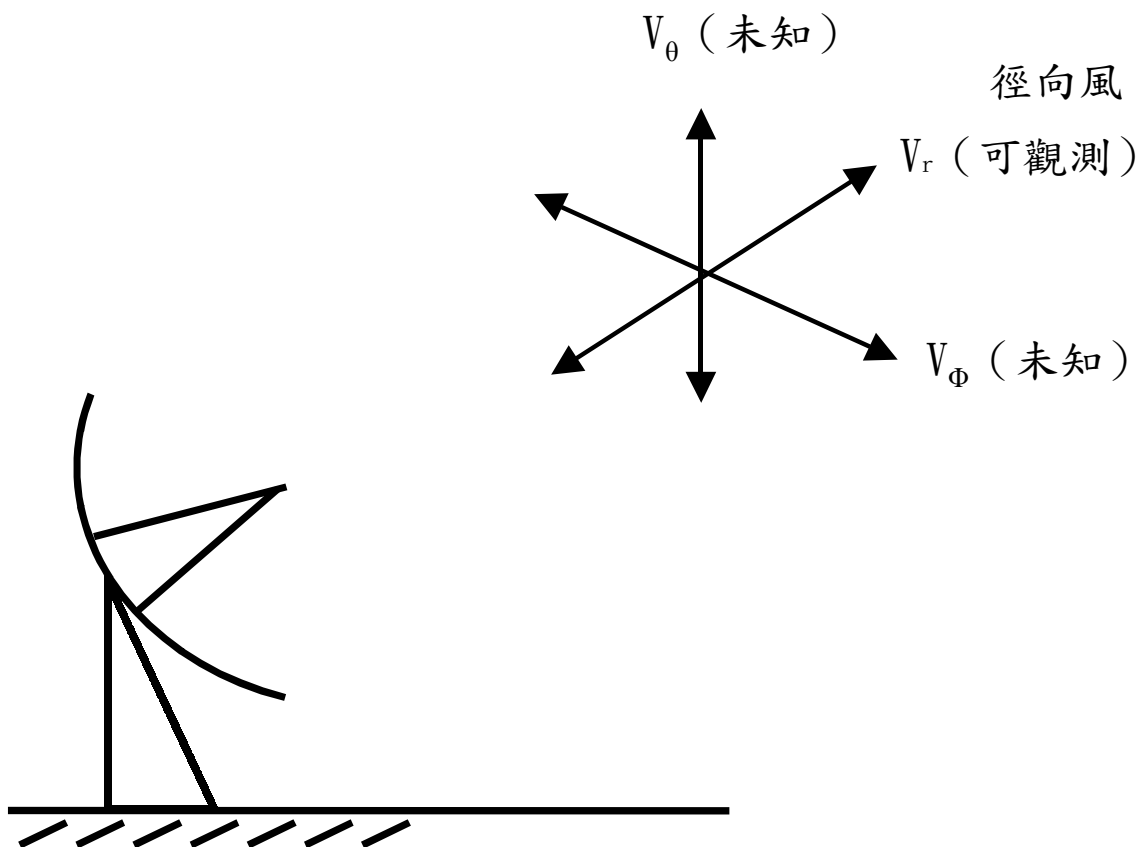


圖 1: 都卜勒雷達與徑向風（可觀測），切向風（未知）之間的關係示意圖

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \eta = 0 \quad (5)$$

如果可以再找到另一個保守的純量  $B$ ，則  $Q$  就可以求解出來。這便是此方法被稱之為雙純量保守法的原因。至於這第二個純量，如果吾人假設風場是近似恆定 (steady) 的，則  $B = \partial \eta / \partial t$ ，如果利用 Taylor(1938) 的 "Frozen Turbulence" 假設，也就是只考慮系統整體的平移速度 ( $U, V$ )，但忽略其內部風場的局地變化，則  $B = \partial \eta / \partial t + U \partial \eta / \partial x + V \partial \eta / \partial y$ 。

#### 1.4 移動坐標法：

由於雷達對目標區的觀測是離散式的，因此當掃描的速度太慢，或天氣系統移動得太快時，如使用雷達資料來估計某一個量的局地時間變化值 ( $\partial / \partial t$ )，便會產生極大的誤差。針對這個問題，Gal-Chen(1982) 提出了一種在移動坐標上進行運算的觀念。這個移動坐標的最佳移速，是可以由雷達資料客觀地被計算出來。而在此坐標上，雷達觀測參數 (回波或徑向風) 的局地時間變化為最小。Zhang and Gal-Chen(1996) 採用了這個概念來進行反演，Liou(1999) 則大幅地改良了他們的方法，以增加反演的精確度。基本上，在這個技術中吾人必須處理一個維數極高的極小化問題。這個待極小化的價值函數為：

$$J = \frac{1}{2} \int_V \int_{\Omega} (\alpha_1 J_1 + \alpha_2 J_2 + \alpha_3 J_3 + \alpha_4 J_4 + \alpha_5 J_5 + \alpha_6 J_6) dx dy dz dt \quad (6)$$

其中

$$J_1 = \left[ \frac{\partial \eta'}{\partial t'} + u' \frac{\partial \eta'}{\partial x'} + v' \frac{\partial \eta'}{\partial y'} + w' \frac{\partial \eta'}{\partial z'} \right]^2$$

$$J_2 = (v'_y - u'_x - v'_y - w'_z)^2$$

$$J_3 = \left( \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} + \frac{\partial w'}{\partial z'} \right)^2$$

$$J_4 = \left\| \nabla \times \bar{V}' \right\|^2$$

$$J_5 = \left( \bar{u}' - \tilde{U} \right)^2 + \left( \bar{v}' - \tilde{V} \right)^2$$

$$J_6 = \left( \nabla_H^2 u' \right)^2 + \left( \nabla_H^2 v' \right)^2 + \left( \nabla_H^2 w' \right)^2$$

$$\nabla_H^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

在上面的式子中，所有的變數以上標的一撇來代表它們已經被內插到移動坐標上。對每一點而言，公式(6)中包括了六個約束條件來規範三個未知的量 ( $u', v', w'$ )，其意義解釋如下：

- J1: 代表回波在移動坐標上仍維持保守的狀態。由於已經在移動坐標上進行計算，因此這個條件被滿足的程度為最大。
- J2: 被反演出來的 ( $u', v', w'$ ) 必須滿足與被雷達觀測到的徑向風  $V'r$  之間的幾何關係。
- J3: 被反演出來的 ( $u', v', w'$ ) 必須滿足代表質量保守的連續方程式。
- J4: 被反演出來的流場旋度有極小值。由於這個約束條件是用來降低解對輸入資料誤差的敏感度，其數學上的考慮多於物理上的意義，因此它的權重係數  $\alpha_4$  是其它的 0.1 倍左右。
- J5: 反演出來的  $u', v'$  場，它們的水平平均要儘量地滿足實測的 ( $\tilde{u}, \tilde{v}$ ) 值。其中後者可以經由釋放探空氣球來求得。

J6: 代表高階的平滑函數以濾除雜訊。

整體而言，公式(6)包含了  $3 \times N$  個變數，其中  $N$  為總點數，3 代表每一個點有  $(u', v', w')$  三個未知數。在普通的情形下， $N$  可以有數千至上萬點。使用變分技術，來找到一組包含了  $3 \times N$  的變量的最佳解，使價值函數  $J$  有極小值，這組解便是反演後的完整流場分佈。

#### 4. 實例：

本節利用一個實例來說明單雷達反演技術的價值。選取的個案為 1987 年台灣地區中尺度實驗 (Taiwan Area Meso-scale Experiment; TAMEX) 時，在 5 月 16 日深夜至 5 月 17 日凌晨，即第二個密集觀測時段(Intensive Observation Period; IOP#2)所觀測

的一個飆線系統。圖 2 展示的是經由雙雷達合成後的低層風場結構。我們可以很清楚地辨認出一條南北走向的輻合帶，這個輻合帶代表該處有強烈上升氣流，適合新生對流胞的成長。雙雷達合成的結果通常可被當成一個”正確”的答案，以供驗證。圖 3 則是使用一個位置在反演區域正東方，坐標為  $(0,0,0)$  km 的都卜勒雷達資料，代入前述的移動坐標技術，經反演後的結果，我們可以看到那條輻合帶被成功地反演出來。圖 4 則代表利用單一都卜勒雷達資料去反演一個更大範圍的區域。在圖中可以見到先前描述的輻合帶往南北方向繼續延伸後的位置。由於這個區域已經超出了雙雷達合成可以進行的範圍，由此可以見到單雷達反演技術在彌補雙雷達合

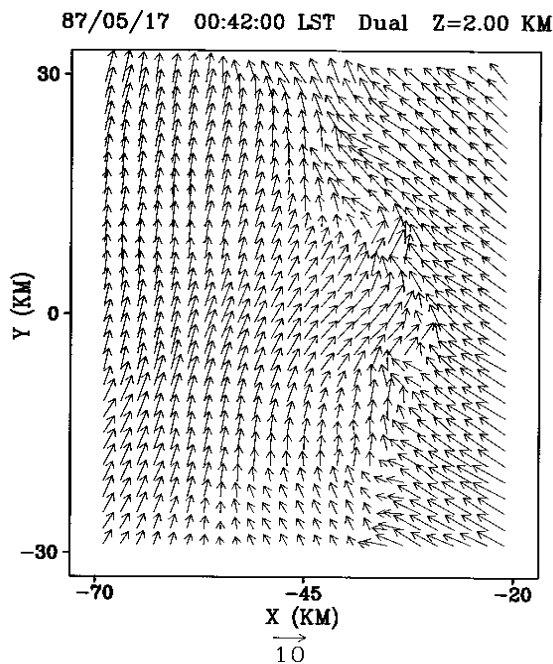


圖 2: 經由雙雷達合成後的 TAMEX IOP#2 低層風場結構

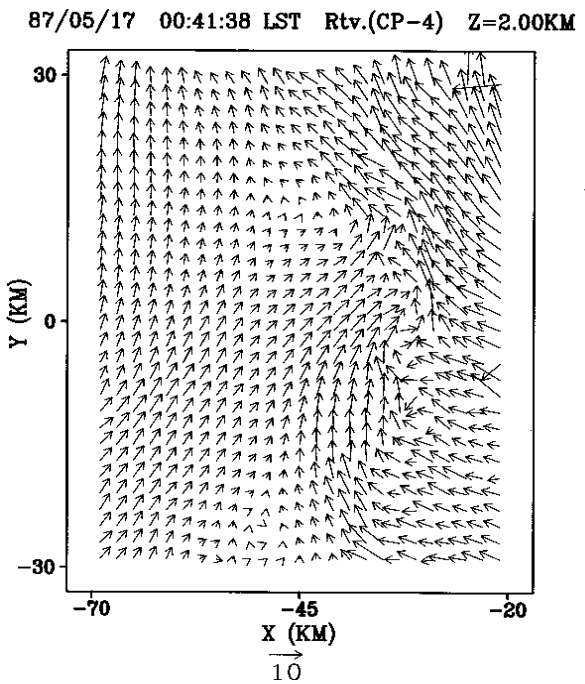


圖 3: 使用單雷達反演技術得出之 TAMEX IOP#2 低層風場結構

成不足處的价值。

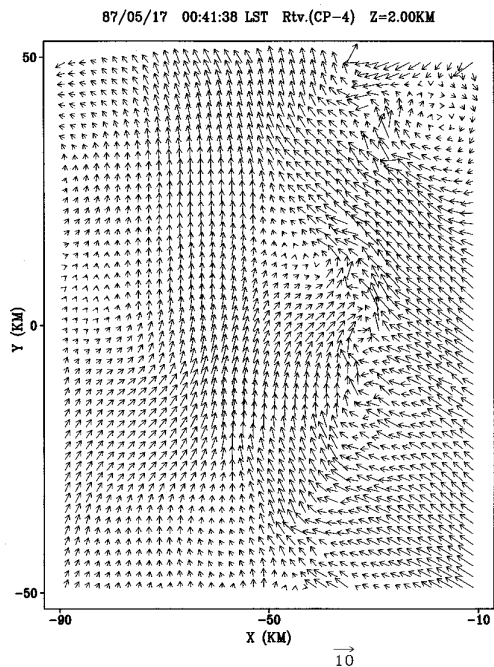


圖 4: 同圖 3, 但是是一個雙雷達無法進行合成的更大範圍區域

## 5. 結論與展望：

本文簡要地介紹過去十年中, 在使用單一都卜勒氣象雷達觀測資料反演風場技術上的發展。我國中央氣象局目前正在進行氣象雷達站的更新與設置, 第一座新一代都卜勒雷達站 NEXRAD(Next Generation Weather Radar)已經在基隆附近的五分山上運轉。預計在民國 92 年以前, 還要在花蓮、墾丁、台南七股設置都卜勒雷達。若是再配合空軍位於台東綠島, 台中清泉崗, 以及民航局位於桃園中正機場的都卜勒雷達, 屆時將會有一個環島的都卜勒雷達網, 不分晝夜地監視可能會對台灣產生危害的天氣系統, 並提出及時的預警。如何整合各種不同的觀測和反演技術, 以便最佳化地利用大量的雷達觀

測資料, 是今後我國雷達氣象的研究及作業人員努力的方向。

## 參考文獻：

- Gal-Chen, T., 1982: Errors in fixed and moving frame of reference: applications for conventional and Doppler radar analysis, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2279-2300.
- Liou, Y.-C., 1989: Retrieval of three-dimensional wind and temperature fields from one component wind data by using the four dimensional data assimilation technique, Master Thesis, 112 pp, available at School of Meteorology, University of Oklahoma.
- \_\_\_\_\_, 1999: Single radar recovery of cross-beam wind components using a modified moving frame of reference technique, *J. Atmos. Ocean Technol.*, **16**, 1003-1016.
- Qiu, C.-J., and Q. Xu, 1992: A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **9**, 588-598.
- Rinehart, R. E., and E. T. Garvey, 1978: Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar, *Nature*, **273**, 154-167.
- Shapiro, A., S. Ellis, and J. Shaw, 1995: Single-Doppler velocity retrievals with Phoenix II data: Clear air and microburst wind retrievals in the planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1265-1287.
- Sun, J., D. W. Flicker, and D. K. Lilly, 1991: Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated Doppler radar data, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 876-890.
- Taylor, G. I., 1938: The spectrum of turbulence, *Proc. Roy. Soc. London*, **A164**, 476-490.
- Waldteufel, P., and H. Corbin, 1979: On the analysis of single Doppler radar data, *J. Appl. Meteor.*, **18**, 532-542.

Zhang J., and T. Gal-Chen, 1996: Single-Doppler wind retrieval in the moving frame of reference, *J. Atmos. Sci.*, **18**, 2609-2623.