

GBVTD與VDAD在非軸對稱渦旋風場反演之測試

劉素屏 高聿正 周仲島
台灣大學大氣科學系

摘要

周等(1994)和Lee et al. (1999)發展了地基速度軌跡顯示方法(Ground-Base Velocity Track Display, GBVTD)，利用地面都卜勒雷達觀測的徑向風場反演解析颱風近中心環流之中尺度結構，至今在實際應用上已有許多成果。由於GBVTD方法本身的假設，渦旋的中心定位與非軸對稱結構會影響渦旋風場反演結果。本文將以圖示了解渦旋結構與中心定位如何影響反演結果。

GBVTD方法由於本身所使用的坐標系統，會使所反演出的渦旋結構變形；本文將擷取周等(1996)所發展之速度距離乘積方位顯示法(Velocity Distance Azimuth Display, VDAD)之概念，以GBVTD的分析方法來反演渦旋風場。此方法可排除變形，但需要加入已知的平均風場才能反演出渦旋結構。本研究之測試即為分析GBVTD方法與加入VDAD概念後的方法在不同情況下的適用性。

關鍵詞：都卜勒雷達、颱風、GBVTD、VDAD。

一、前言

都卜勒雷達發展至今，在觀測颱風環流上已有許多應用。Lee et al. (1994)便利用WR-3D機尾雷達所觀測到垂直飛機軌跡的都卜勒速度場來分析颱風環流的非軸對稱結構，所發展的方法即為VTD (Velocity Track Display)。但礙於飛機觀測作業上的限制與不便，並著眼於地基雷達觀測在時間上的高解析度，又發展了以地基雷達所觀測之都卜勒速度場分析颱風環流的方法，即為GBVTD (ground-based Velocity Track Display) (周等，1994；Lee et al., 1999)。但由於地基雷達所觀測之都卜勒速度場有著較複雜的幾何關係，會讓所反演出的風場有些許變形(Lee et al., 1999)。本文試圖引入周等人在1996年所發展之VDAD方法 (Velocity Display Azimuthal Display) 中的概念，利用都卜勒速度與觀測點到雷達距離的乘積所得到的新變數，來分析颱風環流結構。

二、研究方法與實驗設計

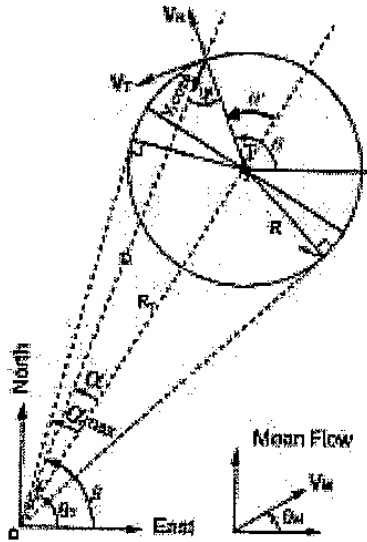
VDAD方法利用都卜勒速度與觀測點

到雷達距離的乘積(Vr*D)進行傅氏分析以反演渦旋風場。圖一為渦旋環流之切向速度及徑向速度、平均環境氣流與都卜勒速度的幾何關係圖。根據此圖的幾何關係，都卜勒速度與切向風、徑向風及平均風的關係如下：

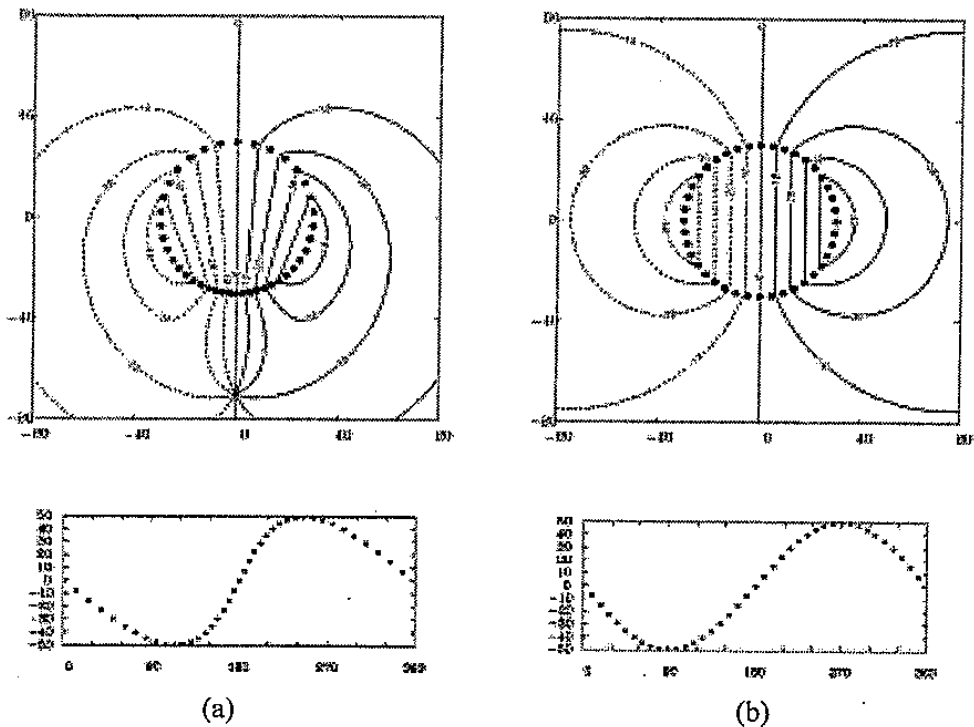
$$\begin{aligned} Vr &= V_M \cdot \cos(\theta_M - \beta) - V_T \cdot \sin\psi + V_R \cdot \cos\psi \\ &= V_M [\cos(\theta_T - \theta_M) \cos\alpha - \sin(\theta_T - \theta_M) \sin\alpha] \\ &\quad - V_T \cdot \sin\psi + V_R \cdot \cos\psi \end{aligned} \quad (1)$$

而Vr*D與切向風、徑向風及平均風的關係如下：

$$\begin{aligned} \dot{V}_r &= -V_T \sin\theta (R \cos\theta + Rd \cos\theta_r) / D \\ &\quad + V_T \cos\theta (R \sin\theta + Rd \sin\theta_r) / D \\ &\quad + V_R \cos\theta (R \cos\theta + Rd \cos\theta_r) / D \\ &\quad + V_R \sin\theta (R \sin\theta + Rd \sin\theta_r) / D \\ &\quad + V_M \cos\theta_M (R \cos\theta + Rd \cos\theta_r) / D \\ &\quad + V_M \sin\theta_M (R \sin\theta + Rd \sin\theta_r) / D \end{aligned} \quad (2)$$



圖一：渦旋之切向風 (V_T) 及徑向風 (V_R)、平均風 (V_M) 與都卜勒速度 (V_r) 的幾何關係圖。



圖二：厄肯渦旋之(a)水平都卜勒速度(V_r)分佈與 ϕ 坐標解析度表示圖；(b)都卜勒速度與距離乘積($V_r \cdot D$)分佈與 θ 坐標解析度表示圖。

由式(1)、式(2)可發現，都卜勒速度(Vr)是 ϕ 的函數，而Vr*D則成為了 θ 的函數。圖二則顯示了一個阮肯渦旋(Rakine vortex)固定半徑上Vr與 ϕ 角的關係，以及Vr*D與 θ 角的關係。從圖中可以看出 ϕ 坐標的解析度並不均勻：在遠離雷達的一側，解析度較差，而接近雷達的一側解析度較高。這也是造成GBVTD方法反演風場變形的原因。相較之下，可以看到 θ 坐標的解析度是均勻一致的，也因此，VDAD方法應可解決GBVTD方法反演風場變形的問題。

此時假設平均風為均勻一致，而切向風與徑向風為 θ 的函數且可寫成：

$$V_r(\theta) = V_r C_0 + \sum V_r C_n \cos n\theta + \sum V_r S_n \sin n\theta$$

$$V_\theta(\theta) = V_\theta C_0 + \sum V_\theta C_n \cos n\theta + \sum V_\theta S_n \sin n\theta \quad (3)$$

那麼對Vr*D進行傅氏分析(如下式)，

$$V_r \cdot D / Rd = A_n + \sum A_n \cos n\theta + \sum B_n \sin n\theta \quad (4)$$

則可以利用所得到的傅氏係數與式(1)的關係，來求得切向風與徑向風對 θ 的傅氏係數。從而反演渦旋環流。經過推導，Vr*D的各傅氏係數與 V_M 及 V_T 、 V_R 的各傅氏係數關係如下：

$$A_0 = V_M \cos(\theta_r - \theta_M) - \frac{1}{2} V_r S_1 + \frac{1}{2} V_r C_1 + V_R C_0 \frac{R}{Rd}$$

$$A_1 = V_M \cos(\theta_r - \theta_M) \frac{R}{Rd} - \frac{1}{2} V_r S_2 + V_r C_0 + \frac{1}{2} V_r C_1 \frac{R}{Rd}$$

$$B_1 = -V_M \sin(\theta_r - \theta_M) \frac{R}{Rd} + \frac{1}{2} V_r C_2 - V_r C_0 + V_r S_1 + V_r S_1 \frac{R}{Rd}$$

$$A_2 = \frac{1}{2} V_r S_1 + \frac{1}{2} V_r C_1 + \frac{1}{2} V_r C_1 - \frac{1}{2} V_r S_2 + V_r C_2 \frac{R}{Rd}$$

$$B_2 = -\frac{1}{2} V_r C_1 + \frac{1}{2} V_r C_1 + \frac{1}{2} V_r S_1 + \frac{1}{2} V_r C_1 + V_r S_2 \frac{R}{Rd}$$

$$A_3 = \frac{1}{2} V_r C_2 + \frac{1}{2} V_r S_2 + V_r C_3 \frac{R}{Rd}$$

$$B_3 = -\frac{1}{2} V_r C_2 + \frac{1}{2} V_r S_2 + V_r S_3 \frac{R}{Rd}$$

$$A_4 = \frac{1}{2} V_r S_3 + \frac{1}{2} V_r C_3$$

$$B_4 = -\frac{1}{2} V_r C_3 + \frac{1}{2} V_r S_3 \quad (5)$$

在此本文與GBVTD方法一樣假設渦旋(颱風)徑向風的非軸對稱分量遠小於其它分量，則可以得到下式：

$$V_r C_0 = \frac{(A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4)}{(1 + R/Rd)} \cdot V_M \times \cos(\theta_r - \theta_M)$$

$$V_r C_1 = -B_1 - B_2 - R/Rd \times V_M \times \sin(\theta_r - \theta_M)$$

$$V_r C_2 = -2 \times (B_3 + B_4)$$

$$V_r S_1 = 2 \times (A_2 + A_4)$$

$$V_r C_2 = -2 \times B_3$$

$$V_r S_2 = 2 \times A_1$$

$$V_r C_3 = -2 \times B_4$$

$$V_r S_3 = 2 \times A_3$$

(6)

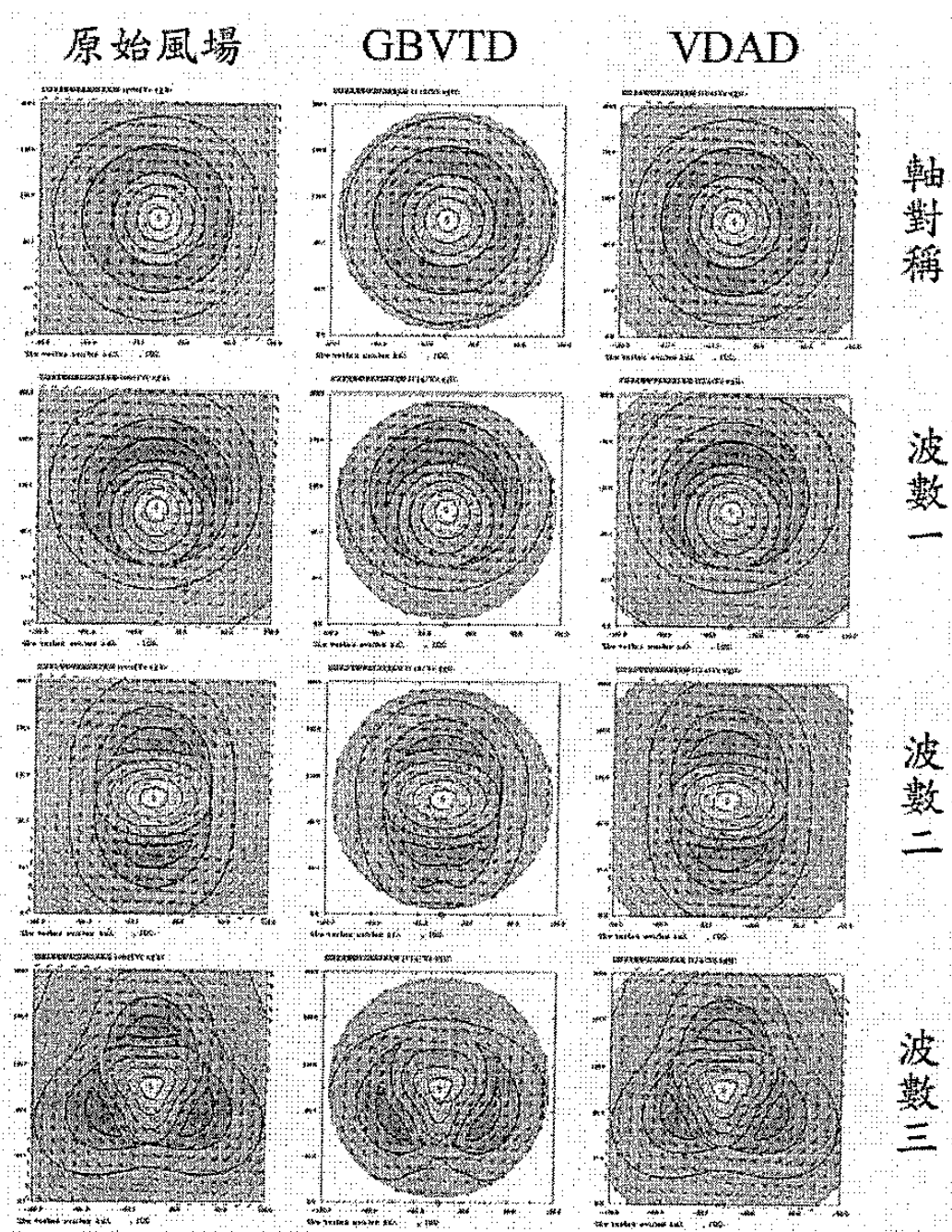
式(6)並非一完整閉合的方程組，因此本文在此假設平均風為已知，輸入此方程組以得到切向風與徑向風之傅氏係數。

綜合以上，GBVTD方法與VDAD方法同樣是以傅氏分析來反演渦旋之切向風、徑向風。但GBVTD方法使用 ϕ 坐標，無需輸入平均風場的資訊，但需假設反演半徑(R)與渦旋中心到雷達距離(Rd)的比值很小；而VDAD方法則是使用 θ 坐標，因此無需假設R/Rd很小，但需要輸入平均風場資訊可能引進不確定性。

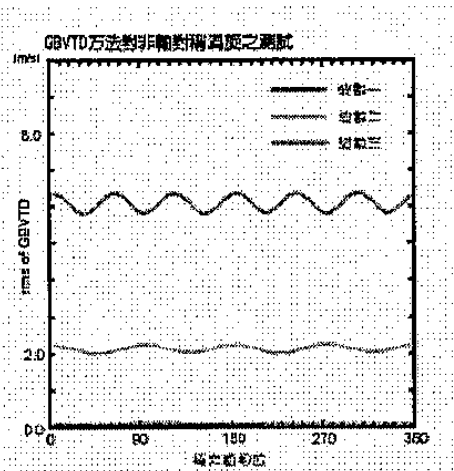
三、研究結果

為了更深入了解這兩個方法的異同，本文進行了一些測試，希望能從反演風場與原始風場的差異來了解這兩種方法的特性。

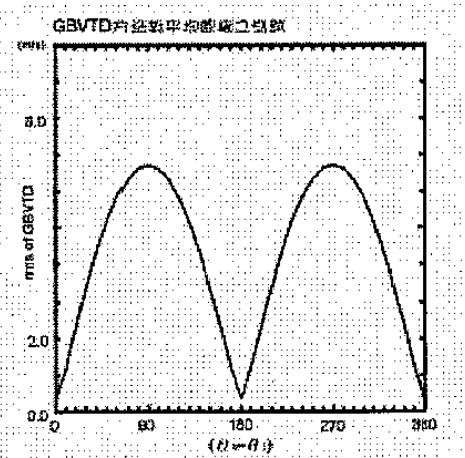
圖三是GBVTD方法與VDAD方法所反演非軸對稱渦旋風場與原始風場的比較。圖中可以看出GBVTD方法在非軸對稱結構明顯時，其反演風場有較大差異，且高波數結構較明顯。而圖四則顯示了非軸對稱結構其極值在不同相位時GBVTD方法反演的誤差。圖中顯示了GBVTD在反演波數一結構時，其誤差相當小，且誤差對極值相位仍不敏感。但在反演波數二與波數三結構時，其誤差便遠較波數一結構來得大，且會隨其極大值的相位變化。



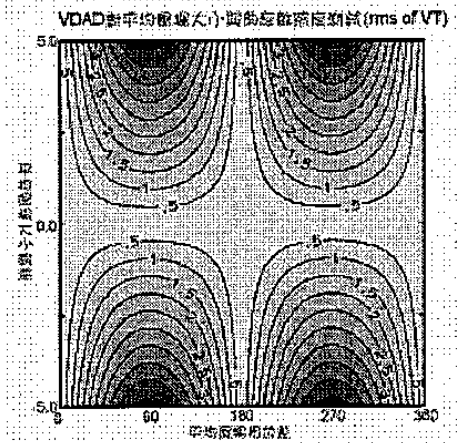
圖三：GBVTD方法與VDAD方法所反演軸對稱、非軸對稱風場與原始風場的比較。



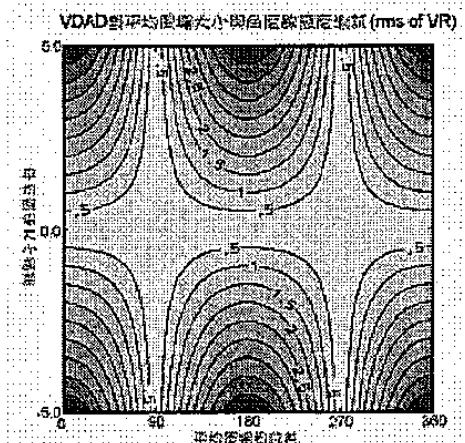
圖四：GBVTD方法在非軸對稱渦旋上的反演對於其極大值相位的敏感度。



圖五：GBVTD方法對於平均風方向的敏感度。



(a)



(b)

圖六：VDAD方法對於輸入之平均風場資訊的敏感度。(a)為切向風反演誤差與平均風場資訊誤差的關係；(b)則是徑向風反演誤差與平均風場資訊誤差的關係。

而GBVTD除了反演非軸對稱結構時，因坐標解析度不均勻而造成風場變形產生誤差外，由於其假設 R/R_d 很小，而忽略了平均風垂直 R_d 的分量，造成在反演時，軸對稱切向風的誤差。圖五即為此種誤差對平均風方向的敏感度。圖中顯示，當平均風方向與 R_d 平行時，其誤差極小，但是當平均風方向與 R_d 垂直時，其誤差可達約7m/s。

圖六則為VDAD方法在輸入平均風場資訊有誤差時的反應。由圖六可以看出，當

輸入的平均風方向誤差很小時，平均風大小對於徑向風有較大影響。而若是平均風大小誤差很小時，對切向風或徑向風反演的影響皆不大。

四、討論與結論

由上一節的結果可以發現，VDAD方法的確可以改善GBVTD方法在反演非軸對稱結構之渦旋時所造成的變形，但由於必須輸入平均風資訊，同時也引進了不確定性，而造成反演上的誤差。另一方面，雖然GBVTD

方法會造成變形，也會因忽略了平均風垂直 R_d 的分量而使反演的軸對稱切向風出現誤差，但同時 GBVTD 方法並不需要輸入其它資訊，且仍可求得平均風平行 R_d 的分量。

所以這兩種方法可能在不同的情況下分別有較好的結果。而這兩種方法所反演風場的差異可能可以反應出原始風場的細節。因此，未來若是能以實際資料加以測試，更進一步了解兩種方法的極限與適用範圍，那麼應該可以更徹底發揮兩種方法之所長，從而得到更進一步的渦旋風場結構。

結謝：

本文在國科會專題研究計畫
NSC92-2111-M-002-020-AP2 支援下完成。

參考文獻：

- Lee, W.-C., F. D. Marks, and R. E. Carbone, 1994: Velocity Track Display - A technique to extract real-time tropical cyclone circulations using a single airborne Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 337-356.
- Lee, W.-C., B. J. Jou, P.-L. Chang, and S.-M. Deng, 1999: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observation. Part I: Interpretation of Doppler patterns and GBVTD technique. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3982-4001.
- 周仲島、張保亮與李文兆，1994：都卜勒雷達在颱風環流中尺度結構分析的應用。大氣科學，**22**，163-187。
- 周仲島、鄧秀明與張保亮，1996：都卜勒雷達在颱風中心定位與最大風速半徑決定的應用。大氣科學，**24**，1-24。