

使用 EGBVTD 分析颱風環流非對稱結構

張雅茹¹ 陳台琦¹ 廖宇慶¹ 李文兆²

¹ 國立中央大學大氣物理研究所

² 美國國家大氣研究中心

(中華民國九十五年一月三十日收稿；中華民國九十五年八月二十日定稿)

摘 要

本研究將陸基速度軌跡顯示(Ground Based Velocity Track Display, GBVTD)方法推廣至兩座都卜勒雷達，使得吾人可以將颱風環流本身與環境平均風場分離，進而計算出颱風徑向風場的非對稱結構，並提升反演所得的颱風切向風分量的準確性。與傳統的雙雷達合成方法相比，本方法可以在有資料缺失的情況下，較易於反演出較大區域內完整的颱風結構。本研究中將此方法(Extended-GBVTD；EGBVTD)用在分析兩個真實個案，即在洋面上的丹尼颶風(1997)，與登陸後的納莉颱風(2001)，以驗證其實際應用的可行性與優缺點。

關鍵字：GBVTD、颱風、都卜勒雷達

一、前 言

颱風(颶風)是具有強大破壞性的自然現象，因此一直是氣象界研究的重點。Barnes et al.(1983)、Jorgenson (1984)、Marks and Houze (1987)利用機載雷達對颶風作分析，瞭解其環流結構及降水特性。Marks et al. (1992)使用機載都卜勒雷達重複穿越颶風 Norbert (1984) 中心，解析出從颶風中心到半徑 40 公里處詳細的三維

風場資料，以分析颶風的不對稱量結構。Lee et al.(1994)發展出 VTD (Velocity Track Display) 方法分析機載雷達觀測熱帶氣旋的資料。周等 (1994)、Lee et al.(1999) 以及 Lee and Marks (2000)爲了提升陸基式都卜勒雷達的使用，根據 VTD 的架構發展出陸基速度軌跡顯示(Ground Based Velocity Track Display, GBVTD)方法，利用地面上的單一都卜勒雷達反演熱帶氣旋的主要

風場結構，包括軸對稱與非軸對稱的切向風，以及軸對稱的徑向風。

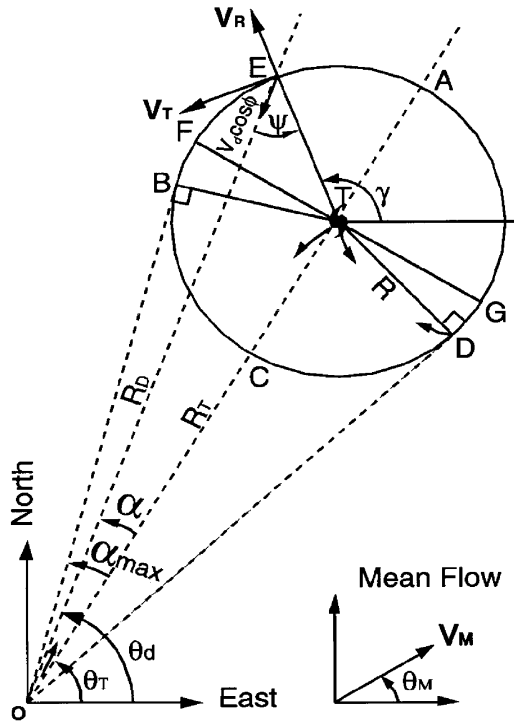


圖 1 GBVTD 方法平面幾何關係圖。摘錄自 Lee et al.(1999)。

$$\frac{\hat{V}_d}{\cos \phi} \approx V_M \left[\cos(\theta_T - \theta_M) \left(\frac{1 - \cos \alpha_{\max}}{2} \cos 2\psi + \frac{1 + \cos \alpha_{\max}}{2} \right) - \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \sin \psi \right] - V_i \sin \psi + V_R \cos \psi \tag{1}$$

\hat{V}_d : 扣除垂直速度、雨滴終端速度後的都卜勒速度

ϕ : 雷達天線仰角

ψ : 電磁波束與颱風徑向速度的夾角

$V_R(R, \psi, z)$: 颱風的徑向速度(向外為正)

$V_T(R, \psi, z)$: 颱風的切向速度(逆時針為正)

$V_M(z)$: 平均風場

在國內氣象界運用 GBVTD 分析熱帶氣旋結構已有許多很成功的例子，例如 Lee et al. (2000) 反演亞力士 (Alex, 1987) 颱風，張等 (2002) 分析賀伯颱風 (1996) 登陸北台灣時，其眼牆區域環流結構的演變與特性。江 (2003) 利用不同理想風場測試 GBVTD 方法，以評估當非軸對稱徑向風分量增加時，對反演結果的影響。然而，在 GBVTD 的運算中僅能算出颱風徑向風的對稱結構，且平均風場的貢獻，被混淆到颱風切向風的對稱結構中，無法被分離出來。本研究之目的就在改善前述的這兩個限制。

二、研究方法

(一)GBVTD 方法

本節簡單的介紹 Lee et al.(1999)提出的 GBVTD 方法，為方便閱讀起見，符號的定義均與 Lee et al.(1999)中相同。圖 1 為 GBVTD 的幾何示意圖，其中的都卜勒雷達觀測風場可以表示為下式：

θ_M : 平均風場與正東方的夾角

θ_T : 颱風環流中心的方位角

α : 通過颱風中心的電磁波束與任一電磁波束的方位角夾角

此外，將都卜勒風場，颱風的切向風、徑向風都使用 ψ 角予以傅利葉級數展開可得：

$$\frac{\hat{V}_d(\psi)}{\cos \phi} = \sum_0^L (A_n \cos n\psi + B_n \sin n\psi) \quad (2)$$

$$V_R(\psi) = \sum_0^N (V_R C_n \cos n\psi + V_R S_n \sin n\psi) \quad (3)$$

$$V_T(\psi) = \sum_0^M (V_T C_n \cos n\psi + V_T S_n \sin n\psi) \quad (4)$$

(2)式中的 A_n 與 B_n 可以經由對某一固定分析半徑(以颱風中心為原點)上的都卜勒風場觀測，作曲線擬合 (curve fitting) 求得。此外，(3) 及 (4) 式中的 $V_R C_n, V_R S_n$ 與 $V_T C_n, V_T S_n$ 分別代表颱風

風徑向風與切向風的第 n 個分量。現在取 $L=3, M=2, N=2$ ，再經數學整理後，可得到已知的變數 (A_n 與 B_n) 和未知變數 ($V_R C_n, V_R S_n, V_T C_n, V_T S_n$) 之間的關係：

$$V_M \cos(\theta_T - \theta_M) = A_0 + A_2 - V_R C_1 \quad (5)$$

$$V_T C_0 = -B_1 - B_3 + V_R S_2 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (6)$$

$$V_T C_1 = -2B_2 + V_R S_1 \quad (7)$$

$$V_T C_2 = -2B_3 + V_R S_2 \quad (8)$$

$$V_T S_1 = A_2 - A_0 + (A_0 + A_2 - V_R C_1) \cos \alpha_{\max} \quad (9)$$

$$V_T S_2 = 2A_3 - V_R C_2 \quad (10)$$

$$V_R C_0 = A_1 + A_3 - V_R C_2 \quad (11)$$

在公式 (5) ~ (11) 中因未知數的數目大於方程式的數目，為閉合此方程組，Lee et al. (1999) 省略徑向風非對稱結構 (即令 $V_R C_n = V_R S_n = 0, n \geq 1$)，並假設 $V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max}$ 遠小於颱風切向風，將上述公式簡化。由公式的左邊各項中可知原有的 GBVTD 設計中只能求出颱風 (颶風) 的軸對稱、非軸對稱切向風場 ($V_T C_n, V_T S_n, n \geq 0$) 與軸對稱徑向風場 $V_R C_0$ ，另外也沒有足夠的資訊來更進一步分離平均風場 V_M 與 θ_M 。

(二) Extended-GBVTD (EGBVTD) 方法

(2.1) 計算平均風場

本節介紹 EGBVTD 方法。由於 $V_T C_0$ 為颱風切向風的對稱分量，因此它的數值不會因為雷達與颱風的相對位置而改變，在這個條件下，當有兩座雷達可同時觀測同一個颱風 (颶風) 時，如圖 2 所示，它們分別所估計的颱風切向風的軸對稱分量，經由公式 (6) 可得到下式：

$$\begin{aligned}
J_i &= (V_T C_0)_i - (V_T C_0)'_i \\
&= [-B_1 - B_3 + V_R S_2 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \times \sin \alpha_{\max}]_i \\
&\quad - [-B'_1 - B'_3 + V_R S'_2 - V_M \sin(\theta'_T - \theta_M) \times \sin \alpha'_{\max}]'_i
\end{aligned} \tag{12}$$

上式中有上標一撇的代表由雷達 B 觀測或計算的變數（以後亦同），下標 i 是以颱風（颶風）為中心的第 i 圈上的結果。如果不考慮觀測誤差與 GBVTD 的幾何扭曲 (Lee et al. 1999) 等因素，則 (12) 式應為零。但因為前述等誤差來源，所以最佳的 V_M 與 θ_M 為可以使得 (12) 式有極小值的解。由於假設平均風場在某一固定高度上為常數，因此將公式 (12) 對每一分析半徑做累加，得到下列公式：

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} J_i^2 \tag{13}$$

其中 N_1 到 N_2 為選取區域內的分析圈數。現在尋找一組最佳的平均風方向 (θ_M) 與風速 (V_M)，使得公式 (13) 有極小值，此即為 EGBVTD 中分離平均風場的方法。

(2.2) 計算颱風非對稱徑向風

求出平均風場 (V_M, θ_M) 後，再利用 (5) 式可得到徑向風波數 1 之係數 $V_R C_1$ 。下一個步驟為，在圖 2 中，使用雷達 B 在 P_1 、 P_2 兩點之都卜勒風場觀測資料，以及公式 (1)。由於從雷達 B 觀測 P_1 (P_2) 時，它的 ψ' 等於 0 (π)，因此，(1) 式可簡化為：

$$\hat{V}'_d(P_1) = V_M \cos(\theta'_T - \theta_M) + V_R(P_1) \tag{14}$$

$$\hat{V}'_d(P_2) = V_M \cos(\theta'_T - \theta_M) - V_R(P_2) \tag{15}$$

公式 (14)、(15) 中的左邊為雷達 B 所觀測的都卜勒風場，由於平均風場已被求出，因此在 P_1 、 P_2 兩點的颱風徑向風 $V_R(P_1)$ 與 $V_R(P_2)$ 便可求出。

現在以 P_2 點為例，將此點的颱風徑向風利用從雷達 A 位置所量測的 ψ 角度 (ψ_{A2}) 展開到波數 1，如下式所示：

在 P_2 為：

$$\begin{aligned}
V_R(P_2) &= V_R C_0 + V_R C_1 \cos(\psi_{A2}) \\
&\quad + V_R S_1 \sin(\psi_{A2})
\end{aligned} \tag{16}$$

在 (16) 中，由於 $V_R(P_2)$ 、 $V_R C_0$ 、 $V_R C_1$ 均已知，所以可求得 $V_R S_1$ ，亦即在此分析半徑上，颱風徑向風的波數 1 結構可以被反演出來。

由以上介紹可知，EGBVTD 可以將平均風場與颱風環流加以分離，而且可反演出颱風徑向風的非對稱波數 1 結構。此外，在計算各波數的係數時，是採用曲線擬合法，也就是說，在某分析半徑上不必有完整的資料分佈，即使是在有資料區缺失的情況下，仍然可以進行分析。我們的測試結果顯示，在一圈上即使有 1/3 的區域（約 120 度）無資料，反演結果仍然可信。在實際個案中，若使用傳統的雙雷達合成法去計算颱風環流所在的平均風場，則雷達觀測區域必須涵蓋完整的眼牆及其附近區域，但是，常見的情形是，當颱風靠近陸地時，往往只有颱風眼的一側可被觀測到。

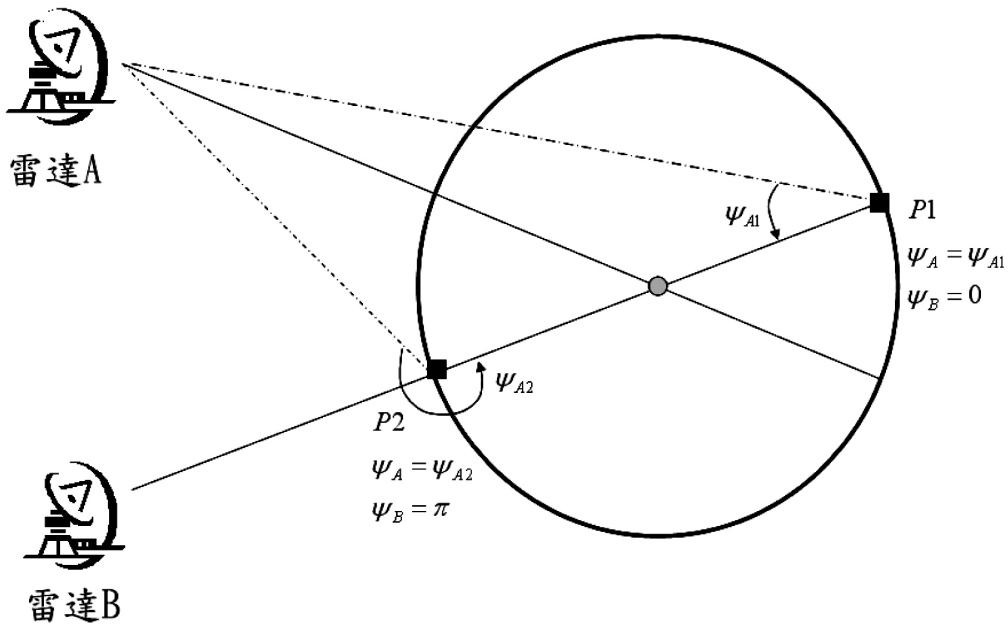


圖2 EGBVTD 方法概念圖。圖中所示為以颱風（颶風）為中心，某一固定半徑的分析圈。

因此，與傳統方法相比，EGBVTD 比較不受資料流失的影響，且可以分析出較大區域內，從平均風場中分離出包含非對稱結構的颱風環流本身。

三、丹尼颶風（1997）個案分析

本節分析一個發生在美國的丹尼颶風（Danny,1997）個案，目的在於驗證 EGBVTD 方法的表現。分析時間為 1997 年 7 月 18 日 1918 UTC，當時丹尼位於墨西哥灣洋面上，圖 3 為丹尼颶風在三公里高度的雷達回波圖。此時有 KLIX 與 KMOB 兩座都卜勒雷達同步觀測此颶風，所以可以利用雙雷達合成風場作驗證。KLIX 雷達位於美國路易斯安那州 Slidell 市，位置緯度 30.3 度、經度-89.8 度。KMOB 雷達位於阿拉巴馬州 Mobile 市，位置緯度 30.7 度、經度-88.2 度。雷

達資料處理使用美國國家大氣研究中心（NCAR）的 SPRINT 軟體將球面座標上的雷達資料轉到直角座標，再使用 CEDRIC 軟體作填補、平滑的計算，以及雙雷達的三維風場合成。另外，颶風中心位置利用 Lee et al.(2000) 提出的 GBVTD-simplex 演算法所求得。

（一）實驗 1：丹尼颶風理想風場測試

本實驗中先使用 EGBVTD 計算平均風，得到的結果顯示平均風風速為 1.4 m/s，風向為 193°，亦即是由颶風眼西南象限吹來。再將雙雷達合成的風場扣除掉此平均風後，得到丹尼颶風本身的環流結構。接下來，將颶風的切向風與徑向風加以濾波，只保留切向風的波數 0~2，徑向風波數 0~1 分量，經由此步驟吾人建構出一個“理想”的颶風。再使用 EGBVTD 對此“理想”颶風

97/ 7/18 19 19 10-19 23 42 NONE Z = 3.00 KM DZ1
 (AS OF 05/31/04) ORIGIN=(0.00, 0.00) KM X-AXIS= 90.0 DEG

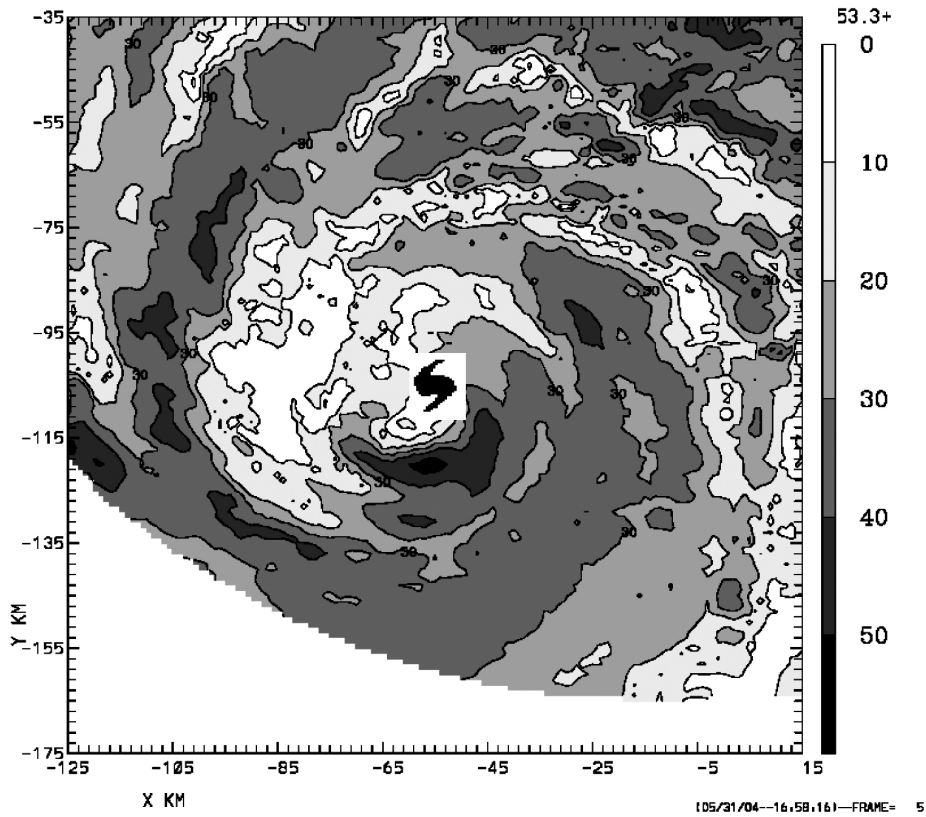


圖3 1997年7月18日1918UTC 丹尼颶風3公里高度雷達回波圖。
 圖中的颶風符號為颶風中心位置所在。

進行反演，比較反演的結果可顯示出 EGBVTD 的準確度。

圖 4a 與圖 4b 分別為在三公里高度“理想”丹尼颶風的切向風與徑向風分佈。由圖 4a 中可見一風速極大值 (~ 35 m/s) 出現在眼牆的南側，而圖 4b 顯示眼牆的西 (東) 側有徑向內 (外) 流。圖 5a 及圖 5b 為使用 KLIX 為主 (即圖 2 中的雷達 A)，KMOB 為輔 (圖 2 中的雷達 B) 所反演出來的颶風切向風與徑向風結構，與圖 4a、圖 4b 的真實風場相比，其相似程度非常高。如果將兩

座雷達的角色互換，也就是以 KMOB 為主，KLIX 為輔進行反演，圖 6a、圖 6b 為其結果，其中颶風的主要結構依然被很完整的反演出來。這個實驗的結果驗證了吾人對 EGBVTD 設計概念的可行性，也確保了計算流程的正確性。

(二) 實驗二：丹尼颶風真實風場測試

在本實驗中丹尼颶風的風場沒有經過濾波，因此允許更高波數的非對稱結構存在於環流中。圖 7a、圖 7b 分別為丹尼颶風在 3 公里高度的切向風與徑向風環流結構。圖 7a 顯示丹尼颶風在此

高度的切向風極大值位於颶風眼南方，而從 3 公里的回波場（見圖 3）看出最大切向風位置有強回波存在，此種強切向風與強回波的空間分佈一致的現象，與 Marks et al.(1992)利用機載雷達分

析 Norbert 颶風（1984）的結果相似。另外，圖 7b 亦指出颶風眼的西側有徑向內流，有利於造成上升運動以及雨帶的形成（Barnes et al. 1983）。

與圖 4a、圖 4b 相比，吾人發現徑向風的分

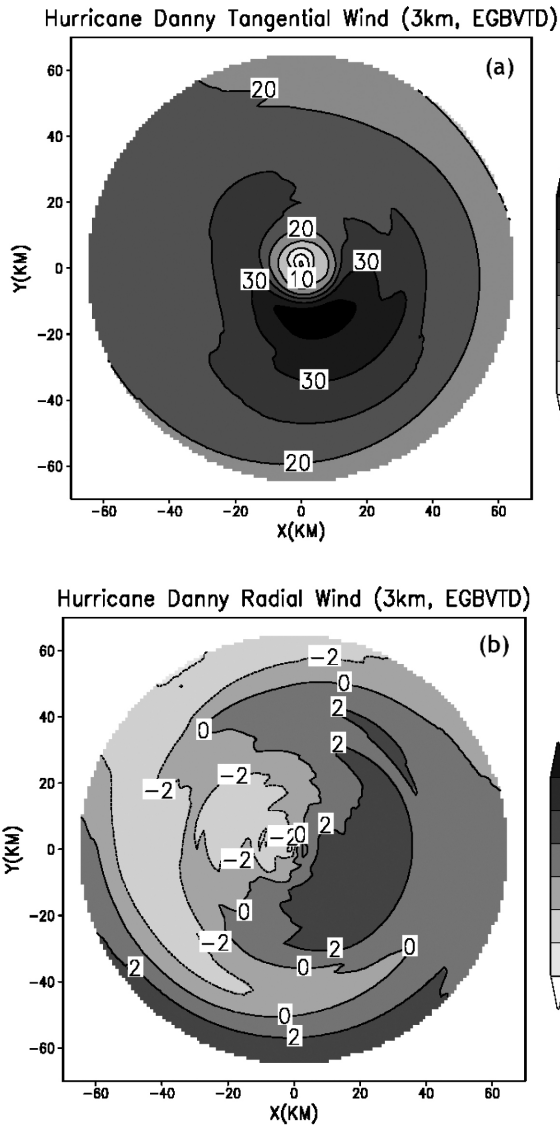


圖 4 實驗 1 中，使用雙雷達合成並經濾波後所得到的“理想”丹尼颶風在三公里高度的風場：
(a) 切向風；(b) 徑向風。

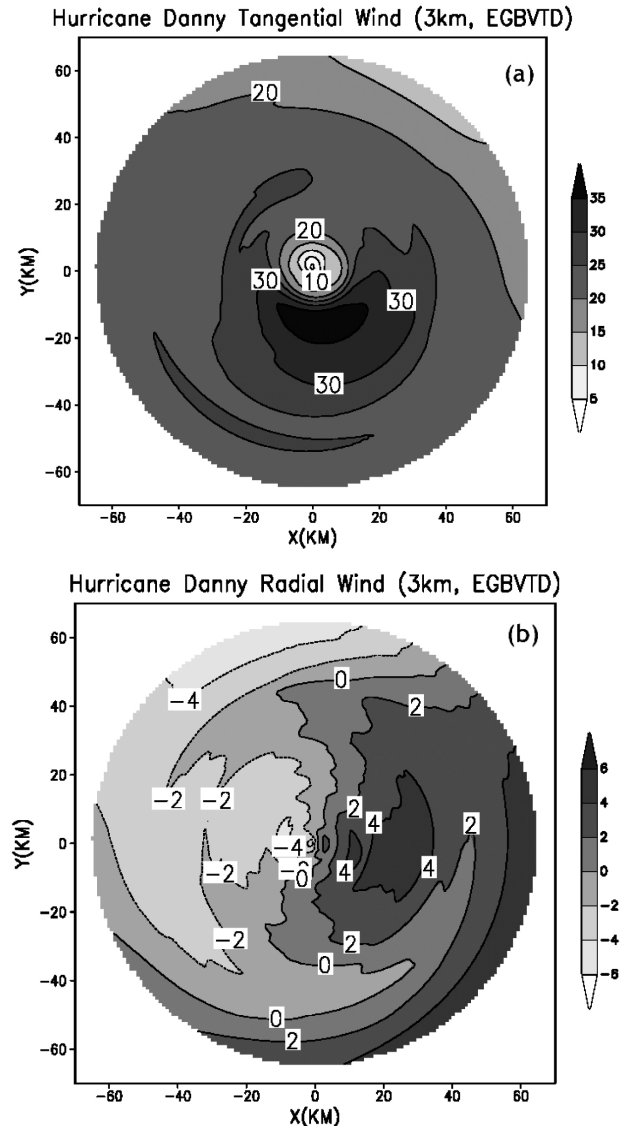


圖 5 實驗 1 中，使用 EGBVTD 方法，KLIX 雷達資料為主，KMOB 雷達資料為輔所反演的丹尼颶風環流結構：
(a) 切向風；(b) 徑向風。

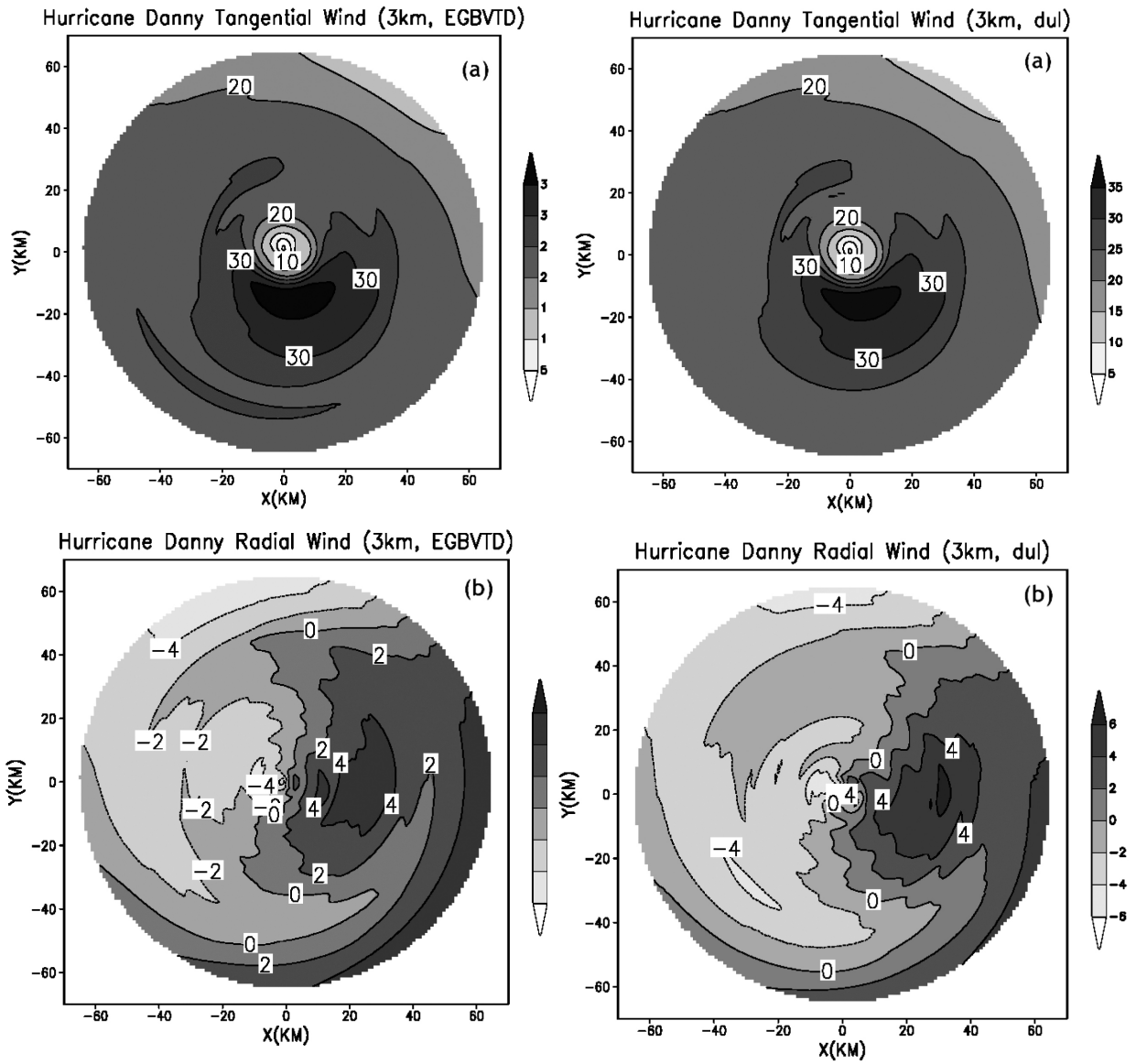


圖 6 同圖 5，但是是以 KMOB 為主，KLIX 為輔和 EGBVTD 所反演的丹尼颶風 (a) 切向風；(b) 徑向風結構。

圖 7 實驗二中，以雙雷達合成，但未經任何濾波的丹尼颶風在 3 公里高度的 (a) 切向風；(b) 徑向風環流結構。

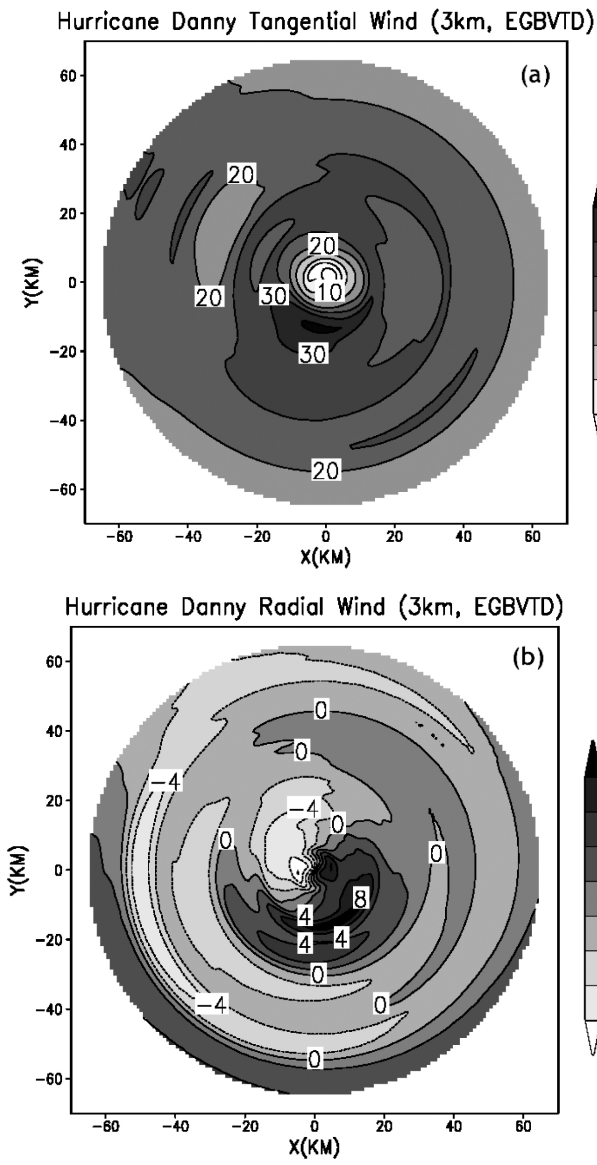


圖 8 使用 EGBVTD 反演的丹尼颶風在 3 公里高度的 (a) 切向風；(b) 徑向風分佈。

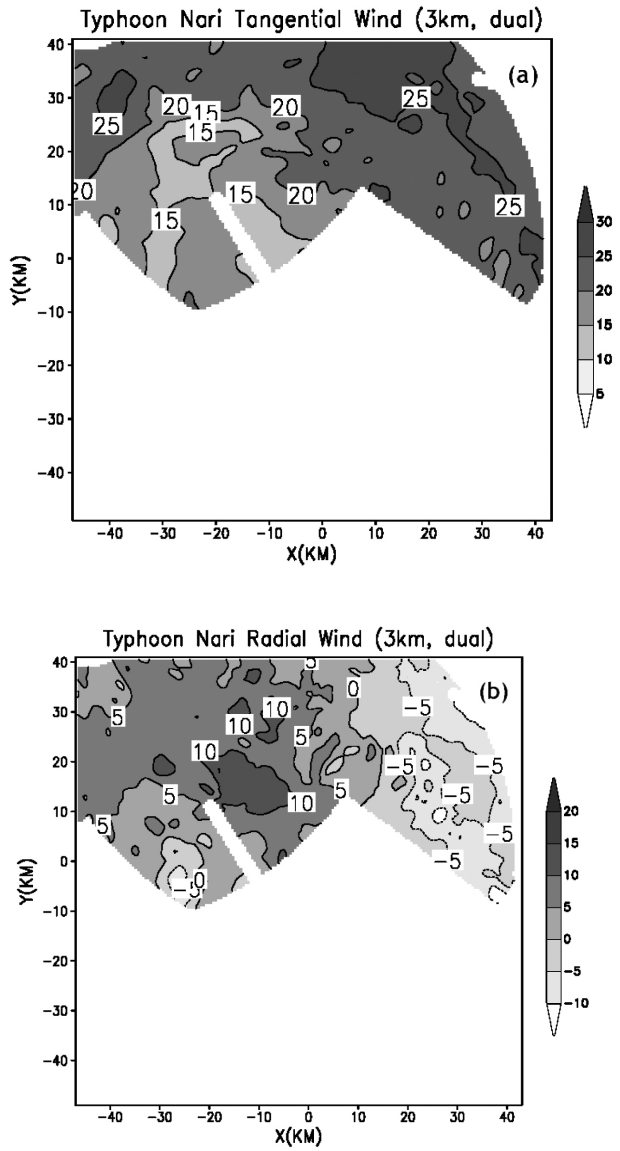


圖 9 納莉颱風在 3 公里高度，經由雙雷達合成且扣除平均風場後的 (a) 切向風；(b) 徑向風結構。

佈已有明顯的差異，這表示丹尼颶風中的徑向風應有波數 2 以上的分量。圖 8a、圖 8b 為 EGBVTD 反演的切向風與徑向風分佈，我們發現最大切向風的數值與出現位置與圖 7a 一致，另外圖 8b 顯示眼牆的西（東）側為徑向內（外）流，此分佈型態亦與圖 7b 相符，但徑向外流的極大值有高估的情形，且出現的位置往眼牆的東南邊偏移，而非如圖 7b 所示的出現在眼牆東側。以上結果表示雖然波數 2 以上的徑向風已影響了 EGBVTD 反演結果的精確度，但是颶風結構的主要特徵，如切向風的最大風速區、徑向內流與外流出現的方位，仍然能被正確地掌握住。

四、納莉颱風個案

本節分析納莉颱風（2001）登陸台灣後的結構，分析時間為 2001 年 9 月 16 日 1600 UTC，使用雷達資料由民航局中正機場雷達（CAA，緯度 25.1 度、經度 121.2 度）與氣象局五分山雷達（RCWF，緯度 25.1 度、經度 121.8 度）提供。雷達資料處理應用鄧(1999)所發展的 Radar Analysis System for Taiwan Area (RASTA)軟體，此軟體可在追隨地勢座標上進行風場偵錯、濾雜波、填補資料、以及雙雷達合成三維風場，其結果可以作為驗證 EGBVTD 方法的參考。

圖 9a、圖 9b 為納莉颱風在 3 公里高度，經由雙雷達合成且扣除平均風場(5.0 m/s、 80°) 後的切向風與徑向風結構，由於雷達資料少量重疊的問題，因此在此高度上，吾人只能求出反演區域內北半部的颱風結構。但是在此有限區域內，仍可以辨認出切向風有一極大值區（ ~ 25 m/s）位於眼牆北方，且徑向內（外）流出現在眼牆的東北（西北）方位。圖 10a、圖 10b 則為 EGBVTD

反演的結果，圖中眼牆以北的風場特徵，與圖 9a、圖 9b 相仿，而圖中顯示的為一包含了眼牆南半部，涵蓋區域較大的完整颱風環流。這個結果顯示出 EGBVTD 方法較不受資料流失與雙雷達分析時資料必須重疊的限制，因此與原本的雙雷

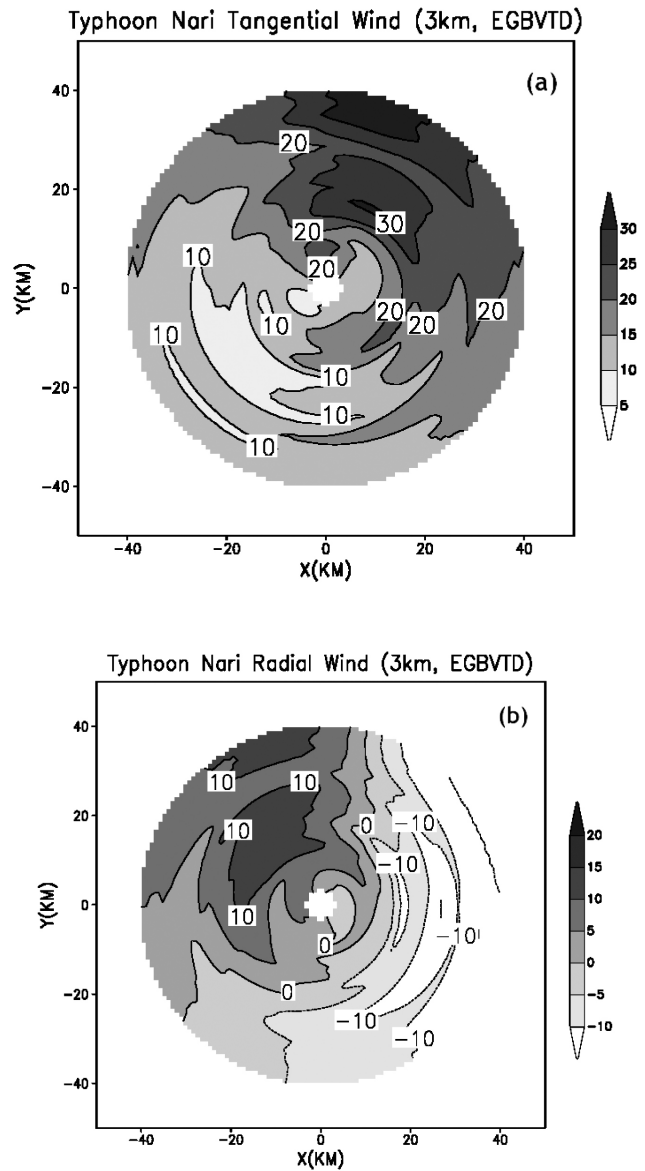


圖 10 使用 EGBVTD 反演的納莉颱風在 3 公里高度的 (a) 切向風；(b) 徑向風。

達合成相比較，可對於較大區域內進行分析，此為 EGBVTD 方法的優點。

五、結 論

本研究中所提出的 EGBVTD 是將 GBVTD 方法推廣到兩座都卜勒雷達，並經由分析兩個真實個案（丹尼颶風、納莉颶風），以驗證本方法的可行性與精確度。EGBVTD 的主要優點可歸納如下：

1. 可將颶風環流與平均風分離。
2. 可求出颶風徑向風波數 1 的非對稱結構，並利用此資訊進一步改善颶風切向風波數 1 的反演精確度。
3. 較不受資料流失與重疊的限制，因此可對於較大區域內進行分析，此為本方法優於傳統雙雷達合成法的特點。

原始 GBVTD 的設計使得吾人可利用單一都卜勒雷達即可分析颶風主要結構，此為其優點，但是反演的精確度會受到非對稱徑向風的干擾，因此 GBVTD 較可能適用的對象為仍在海面上的颶風，因為此時颶風未受地形效應的影響，所以非對稱徑向風分量比較有可能予以忽略。但是當颶風受到地形影響時，可預期的是非對稱徑向風的貢獻便極有可能比較顯著，此時若有兩座雷達可進行同步觀測，則本研究的結論也建議使用 EGBVTD 會優於傳統的雙雷達合成技術。未來將可利用本方法進一步分析侵台颶風的非對稱結構受到地形影響後的演變。

致 謝

本研究感謝交通部中央氣象局及民航局提供都卜勒雷達資料。前三位作者感謝台灣大學大氣科學系周仲島教授及中央氣象局張保亮博士協助使用 GBVTD 程式。本研究由國科會計畫 NSC 94-2111-M-008-012-AP1；NSC 94-2111-M-008-014-AP1；NSC 93-2119-M-008-011-AP1；NSC 93-2111-M-008-024-AP1 之經費資助。

參考文獻

- 江晉孝，2003：利用都卜勒雷達分析颶風風場結構-2001 年納莉颶風。國立中央大學碩士論文，94pp。
- 周仲島、張保亮與李文兆，1994：都卜勒雷達在颶風環流中尺度結構分析的應用。大氣科學，22，163-187。
- 張保亮、周仲島與李文兆，2002：賀伯颶風(1996) 中尺度分析：第一部份：眼牆環流結構。大氣科學，30，201-216。
- 鄧仁星，2000：RASTA(Radar Analysis System for Taiwan Area)使用說明書。
- Barnes, G. M., D. P. Jorgensen, and F. D. Marks Jr., 1983: Mesoscale and convective scale structure of a hurricane rainband. *J. Atmos. Sci.*, 40, 2125-2137.
- Jorgensen, D. P., 1984: Mesoscale and convective-scale characteristics of mature hurricanes. Part II: Inner core structure of hurricane Allen (1980). *J. Atmos. Sci.*, 41, 1287-1311.

- 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.
- , B. J.-D. Jou, P.-L. Chang, and S.-M. Deng, 1999: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single Doppler radar observations. Part I: Interpretation of Doppler velocity patterns and the GBVTD technique. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2419-2439.
- , and F. D. Marks, 2000: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part II: The GBVTD-simplex center finding algorithm. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1925-1936.
- , B. J.-D. Jou, P.-L. Chang, and F. D. Marks, 2000: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part III: Evolution and Structure of Typhoon Alex (1987). *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3982-4001.
- Marks, F. D. Jr., and R. A. Houze, Jr., 1987: Inner core structure of hurricane Alicia from airborne Doppler radar observations. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1296-1317.
- , R. A. Houze, and J. F. Gamache, 1992: Dual – aircraft investigation of the inner core of Hurricane Norbert. Part I: Kinematic structure. *J. Atmos. Sci.*, 49, 919-942.

The Analysis of Typhoon Asymmetric Structures Using EGBVTD Method

Ya-Ju Chang¹ Tai-Chi Chen Wang¹ Yu-Chieng Liou¹ Wen-Chau Lee²

Institute of Atmospheric Physics, National Central University

² National Center for Atmospheric Research, USA

(Manuscript received 30 January 2006; in final form 20 August 2006)

ABSTRACT

In this study, the Ground Based Velocity Track Display (GBVTD) method is extended to two Doppler radars. With this extension, it becomes possible to separate the typhoon intrinsic circulation from the environmental mean wind, and compute the asymmetric typhoon radial wind components. The latter can be used to further improve the accuracy of the retrieved typhoon tangential winds. Compared with the traditional dual-Doppler synthesis method, it is easier to use this extended method to infer the complete typhoon structure over a larger area when there are missing data. The performance and accuracy of this so-called Extended GBVTD (EGBVTD) method are verified by applying it to two case studies – the Hurricane Danny (1997) over the ocean, and the Typhoon Nari (1997) after landfall.

Key words : GBVTD · Typhoon · Doppler radar

