

# 利用多都卜勒雷達風觀測

## 反演受地形影響颱風三維風場之研究

林忠義<sup>1</sup> 李天浩<sup>2</sup>

關鍵字：追隨地形座標系統、資料同化、變分法、三維風場反演、水平二維分層風場反演、觀測系統實驗

### 摘要

本研究之目的為在追隨地形座標系統 (terrain-following coordinate system) 下，反演颱風靠近地形時的三維風場，透過資料同化的方法將不同觀測資料，以誤差最小平方之概念建立在追隨地形座標系統下的代價函數，再加上各風場變數必須滿足的物理或是數學方程式當成限制條件，利用三維變分法求得代價函數對各控制變數的梯度，透過最陡坡降法等，求解最佳化風場變數。其中各項限制條件包括有：(1) 都卜勒風速限制條件；(2) 背景場風速限制條件；(3) 連續方程式限制條件；(4) TCVTD 風速限制條件；(5) 垂直風速上下邊界限制條件。除此之外，本研究採用以颱風中心為原點的極座標系統(稱之為 $\beta$ 座標系統)，發展出一套可使用於多雷達與不同展開階數的水平二維風場反演邏輯，命其名為 TCVTD (Tropical Cyclone Velocity Track Display)，透過 TCVTD 法求得的水平二維分層風場，可提供給三維變分法當成初始猜值，或是加入代價函數成為一項限制條件。本研究並參考 Marks et al.(1992)的方法，定義二維環流風場之面積平均風，探討面積平均風與切向風及徑向風之間的關係。

本研究以「觀測系統實驗(Observing System Experiments; OSE)」的概念，利用阮肯複合渦旋，和 WRF 模式以簡化地形模擬 2005 年龍王颱風的輸出等兩組不同的模擬資料，探討 TCVTD 法反演環流風場的效果，以及在受地形影響區域正確反演三維風場的能力。

---

<sup>1</sup>國立台灣大學土木工程研究所博士候選人, r89521312@ntu.edu.tw

<sup>2</sup>國立台灣大學土木工程研究所副教授、水工試驗所副研究員，10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號台大土木所，thlee@ntu.edu.tw

## 一、前言

颱風每年給台灣帶來許多重大的災害，強風引起的暴潮和巨浪威脅沿海地區居民生命財產的安全，而短時間內降下的豪雨使得都市排水不及，造成許多低窪地區每逢颱風必淹水的情況，另外，暴雨引發的山崩、土石流，更是重創台灣中部山區。例如，2008年7月的卡玫基颱風受颱風外圍環流伴隨西南氣流影響，連日豪雨造成中南部嚴重水患；同年9月的辛樂克颱風，豪雨重創中部地區，尤以南投最為嚴重，造成后豐斷橋、豐丘山崩及廬山溫泉區飯店倒塌等災情。面對如此劇烈的天氣系統，近年來國內已將防颱防洪列為天然災害防治之國家型計劃之一，對於颱風路徑預報、颱風結構分析及定量降雨預報等重要議題，均為目前國內颱風研究群致力發展的方向。

颱風產生的降雨牽涉許多複雜的物理過程，例如，水氣凝結與釋放、大氣與海洋交互作用等，除此之外也可能受到共伴東北季風或是引進西南氣流的影響，分別可能對台灣北部及中南部帶來局部的豪大雨，加上颱風遇到複雜地形，以及全球氣候變遷等環境不確定因素的影響，使得傳統水文模式中使用氣候法或是統計法推估定量降雨的能力不足。近年來無論是在計算軟硬體能力、海洋與大氣遙測、以及大氣動力的分析和研究等，皆有長足的進步，對於應用大氣物理方程式的高空間解析度中尺度數值模式進行即時定量降雨預報的能力有正面的助益。提高中尺度數值天氣預報模式計算的時、空解析度，可以更正確的描述大氣和地形的交互作用，有機會更真實的解析劇烈天氣系統的大氣動力和降水過程；但是各種參數化方法、數值離散與簡化等誤差，高解析度模式動力場仍可能偏離真實狀態，需要使用高解析度，時、空觀測不完整的動力觀測資料，結合資料同化方法，即時修正大氣變數，並使其達到熱動力平衡、模式熱啟動的目標，方有機會改進0-12小時的定量降水預估。

都卜勒雷達觀測資料可提供高時、空解析度的風場觀測，然而都卜勒風速僅為一維向量，仍須透過反演方法求得真實風場。Lee et al. (1999)發展的GBVTD

(Ground Based Velocity Track Display)法利用單雷達都卜勒風速觀測資料，可反演颱風環流二維風場。本研究擬參考GBVTD法，發展一套可使用於多雷達觀測資料的水平二維風場反演邏輯。但是台灣地形複雜，無法以上述反演方法的簡單函數描述颱風靠近地形時的二維風場，也無法求得真實垂直風速。故本研究在上述多雷達水平風場估計基礎之下，再利用三維變分法發展一套可反映颱風受地形影響的三維風場反演邏輯。

## 二、研究方法

本研究首先採用原點在颱風中心的極座標系統(稱為 $\beta$ 座標系統)，如圖1所示，發展出可使用多雷達都卜勒風觀測、反演颱風水平二維風場的算式。作法是每次取半徑範圍 $(r - \Delta r, r + \Delta r)$ 的同心水平環為一個反演單元，假設半徑 $r$ 為常數；首先，將雷達 $k$ 在所有不同位置 $(r, \beta_i)$ 的都卜勒風速觀測值

$V_{dk}^H(r, \beta_i)$ 乘上一個無因次化的參數 $\rho_k' = \rho_k / \rho_{ko}$ ，將各環中此組資料迴歸得到都卜勒風的傅立葉展開式各階係數 $A_{kn}$ 、 $B_{kn}$ ，如(1)式

$$\rho_k' V_{dk}^H = \sum_{n=0}^{N_d} [A_{nk}(r) \cos n\beta + B_{nk}(r) \sin n\beta] \quad (1)$$

接著，將半徑 $r$ 的切向風 $V_T$ 和徑向風 $V_R$ 兩個分量都表示為自變數 $\beta$ 的傅立葉展開函數，係數分別為 $a_{Tn}$ 、 $b_{Tn}$ 和 $a_{Rn}$ 、 $b_{Rn}$ ，如(2)式

$$V_T(r, \beta) = \sum_{n=0}^{N_T} [a_{Tn}(r) \cos n\beta + b_{Tn}(r) \sin n\beta] \quad (2a)$$

$$V_R(r, \beta) = \sum_{n=0}^{N_R} [a_{Rn}(r) \cos n\beta + b_{Rn}(r) \sin n\beta] \quad (2b)$$

經過三角函數積化和差後，由相同階數傅立葉函數的係數必須相同，可建立 $A_{kn}$ 、 $B_{kn}$ 和 $a_{Tn}$ 、 $b_{Tn}$ 、 $a_{Rn}$ 、 $b_{Rn}$ 的聯立方程組；再利用迴歸法求得該環的

切向風和徑向風展開係數。逐環反演分析範圍內所有不同水平層、不同半徑的環展開係數，即可得到水平二維風場。本研究參考 Marks et al.(1992)的面積平均風定義，由相同水平面的切向風  $V_T$  和徑向風  $V_R$ ，導出卡氏座標平均風分量與傅立葉函數係數的關係。

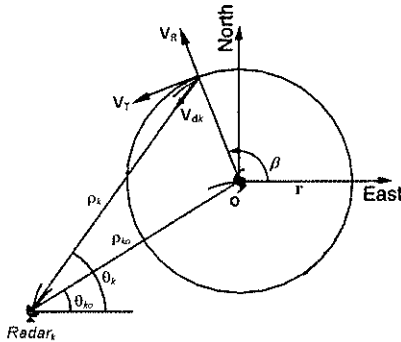


圖 1 以颱風中心為原點的極座標系統和切向風、軸向風示意圖，其中  $\rho_{ko}$  及  $\theta_{ko}$  為颱風中心到雷達  $k$  的距離與方位角， $V_T$  及  $V_R$  為在任一極座標位置  $(r, \beta)$  的切向風與徑向風， $\rho_k$  及  $\theta_k$  為該位置至雷達  $k$  的距離與方位角， $V_{dk}$  為該位置雷達觀測都卜勒風速

其次，在追隨地形座標系統下，建立反演三維風場的代價函數，限制條件包括：(1)都卜勒風速限制條件，(2)背景場限制條件，(3)連續方程限制條件，(4)TCVTD 水平風場限制條件，(5)垂直風速上下邊界條件限制式。本研究採用之限制條件為弱限制約束式，表示分析結果不會完全滿足各項限制條件，各項限制條件的滿足程度則受到該項之權重係數的影響。本研究參考鍾德霖(2005)的研究，基本上使用「正規化權重係數」，但在都卜勒限制條件項與背景場限制條件項之權重係數容許隨著空間變化的設定，在有利於雷達觀測之處給予都卜勒限制條件項較高之權重係數，而背景場限制條件項則給予較低之權重係數。以三維變分法求代價函數對各控制變數的梯度，配合最陡坡降法等最佳化方法修正變數值，反覆迭代到滿足收斂條件為止，所得之結果即為反演的颱風三維風場。

本研究以「觀測系統實驗(Observing System Experiments; OSE)」的概念，利用兩組不同的模擬資

料，分別探討 TCVTD 法反演環流風場的效果，以及在受地形影響區域正確反演三維風場的能力。第一組模擬資料為平滑化之理想阮肯複合渦旋(Rankine combined vortex)，透過不同實驗設計檢驗輸入條件、反演參數對於 TCVTD 法反演效果和誤差的影響。第二組資料為利用 WRF 模式模擬 2005 年龍王颱風的模式輸出計算雷達都卜勒風速，為了簡化在追隨地形座標下風場的反演，本研究特地自製較平滑的地形資料取代原本模式中的台灣數值地形資料。首先利用此組資料檢驗 TCVTD 法反演模式輸出颱風二維風場的結果，接著檢驗本研究三維變分法反演近地形颱風三維風場的能力，以及了解代價函數中各項限制條件之作用。

### 三、 結果與討論

在 TCVTD 法反演理想渦旋案例中，結果顯示只要兩個或兩個以上雷達同時觀測某一反演環資料，即可反演該環的傅立葉展開項係數。由於使用多變數迴歸法求解係數，在觀測資料足夠的條件下，可求得任意展開階數之切向風及徑向風係數，不需對徑向風展開階數做假設。透過以颱風中心為原點的極座標系統，以及參考 Jou 等人(2007)的研究將都卜勒風速乘上一個無因次參數後，使得 TCVTD 法反演半徑不再受限於雷達至颱風中心連線之距離，同時可有效避免外圍高階非軸對稱項風場扭曲的現象。

經過實驗測試若雷達觀測資料足夠時，反演風場幾乎等於真實風場。當反演階數改變時，若反演階數大於實際風場階數，則不會反演出不存在的高階風場，然而若是反演階數不足，則會產生反演誤差，其誤差將出現於各低階項中。本研究發現平均風兩個水平分量會分別進入切向風及徑向風一階傅立葉展開項係數中，在反演各環係數時無法單獨將其分離，然而透過面積平均風的概念可正確反演出平均風場的大小和方向。當反演的颱風中心與真實颱風中心位置具有誤差時，則反演誤差會傳遞至各階項，本研究發現估計颱風中心偏移產生之風場反演誤差主要發生在切向風及徑向風之第一階項中。若觀測資料不足，本研究

實驗顯示雙雷達重疊觀測部份至少 10%以上即可反演該環係數，而本研究另外發現透過增加觀測資料水平網格解析度，可有效改進反演效果。

在 TCVTD 法反演龍王颱風案例中，當雷達可觀測全部分析範圍時，反演結果很接近真實風場。而在有限的雷達觀測範圍時，本研究利用雙線性內插法增加觀測資料解析度證實可有效改進反演結果。利用面積平均風的定義計算各水平層之平均風場，和真實颱風中心移動速度比較得到相當近似的結果。

使用三維變分法反演龍王颱風的案例結果顯示，僅利用雙雷達觀測資料即可得到正確的水平風場反演結果，使用三顆雷達觀測資料雖然可解決雙雷達連線區域觀測自由度不足的問題，但仍無法正確反演垂直風速分佈。由於垂直風速分量沒有直接觀測資料，本研究利用連續方程及垂直風速上下邊界條件，在水平風場反演良好的條件下，可有效改進垂直風場反演結果。水平風場對於初始猜值場的誤差較不敏感，而垂直風速則易受到初始猜值場的影響，若初始場偏離真實場太遠，可能會使垂直風速反演結果收斂至其他局部最小值而非真實垂直風場。在雷達有限觀測範圍的條件下，無法透過連續方程修正沒有雷達觀測資料區域的誤差，若將反演範圍設定在至少有雙雷達觀測區域內，結果顯示反演結果和真實風場相當接近。

總結來說，本研究在追隨地形座標系統下建立代價函數，使用數值天氣預報模式模擬之龍王颱風資料透過三維變分法進行風場反演，首先利用雷達完整觀測探討各項代價函數的作用和反演結果，其次利用有限雷達觀測範圍，探討反演誤差和可能改進的方法，結果顯示本研究使用方法使用追隨地形座標系統和三維變分法，可在靠近地形處正確反演 WRF 模式模擬龍王颱風的三維風場。

## 參考文獻

1. Jou, B. J. -D, W.-C. Lee, S.-P. Liou, and Y.-C. Kao. 2007: Generalized VTD Retrieval of Atmospheric Vortex Kinematic Structure. Part I: Formulation and Error Analysis. *Monthly Weather Review.*, Vol. 136, No. 3, pp. 995–1012
2. Lee, W.-C., 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. *Monthly Weather Review.*, Vol. 127, No. 10, pp. 2419–2439
3. Lee, W.-C. and F. D. Marks Jr. 2000: Tropical Cyclone Kinematic Structure Retrieved from Single-Doppler Radar Observations. Part II: The GBVTD-Simplex Center Finding Algorithm. *Monthly Weather Review.*, Vol. 128, No. 6, pp. 1925–1936.
4. Liou, Y. C., T.-C. C. Wang, W. C. Lee, and Y.-J. Chang, 2006: The retrieval of asymmetric tropical cyclone structures using Doppler radar observations and the method of Extended GBVTD. *Monthly Weather Review.*, 134, 1140–1160.
5. Marks, F. D. Jr., Robert A. Houze Jr., and John F. Gamache: Dual-Aircraft Investigation of the Inner Core of Hurricane Norbert. Part I: Kinematic Structure. *Journal of the Atmospheric Sciences.*, Vol. 49, No. 11, pp. 919–942
6. 江家慧，2002，「應用單都卜勒雷達觀測資料初始化颱風渦旋之研究」，國立台灣大學土木工程研究所博士論文。
7. 劉素屏，2003，「GBVTD 與 VDAD 方法在非軸對稱渦旋風場反演上的測試」，國立台灣大學大氣科學研究所碩士論文。
8. 鍾德霖，2005，「利用雷達觀測與三維變分法分

析颱風風場」，國立台灣大學土木工程研究所博士論文。

9. 劉岳欣，2006，「利用多雷達都卜勒觀測反演颱風

風風場」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。