

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫：利用模擬風場資料評估移動式都卜勒雷達輔助反演
近地面三維風場之效益(1)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2625-Z-002-012-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：李天浩

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 11 月 1 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

利用模擬風場資料評估移動式都卜勒雷達輔助反演近地面三維風場之效益(I)

計畫編號：NSC 93-2625-Z-002-012-

執行期限：93 年 8 月 1 日至 94 年 7 月 31 日

主持人：李天浩 台灣大學土木工程學系副教授

Email：thlee@ntu.edu.tw

一、中文摘要

在多雷達觀測區域中進行風場反演，可以獲得多個都卜勒風限制式，但無法取得所有點的三維正交風速分量觀測值。為了彌補觀測資訊的不足，可以使用連續方程式或其他限制條件結合多個都卜勒風限制式一起聯立求解；或是假設風場具有某種特性下，採用迴歸方程式表現風的三維分量，以減少未知數的數量。Scialom 和 Lemaitre (1990) 提出三維解析風場的概念，將其代入泛函求極小值的問題中，使原本的變分問題轉換為待定係數問題，利用最小誤差平方和法即可求解風場 (MANDOP 分析)，本研究將其延伸應用到求解颱風風場，希望藉由依環流特性所選擇的圓柱座標系統來提升風場反演的準確度。

選擇颱風風場函數時，採用以颱風中心為中心軸的圓柱座標系統，並假設風場解析函數為三個多項式函數的乘積，在徑向方向使用冪次(Power)多項式展開，切向方向使用傅利業(Fourier)多項式展開，而垂向方向則使用勒尖德(Legendre)多項式展開。在限制條件方面，除了使用都卜勒風限制式與連續方程式限制條件外，還包括近地面、近對流層頂和颱風中心等三處垂直風為零的邊界條件。

在模擬實際應用時，除了使用均勻流與渦旋流進行測試外，並採用洪景山博士以 MM5 模式模擬賀伯颱風的三維風場輸出資

料，作為真實颱風的風場。在探討風場反演的效果時，假設有二到三個雷達，分別設在不同位置，模擬各雷達的都卜勒風速觀測資料，接著利用研擬的方法反演風場，比較反演風場與真實風場在不同條件下，評估風場反演的效果與權重因子的影響。

關鍵詞：都卜勒雷達、三維風場反演

ABSTRACT

Many Doppler wind constrains can be obtained in multiple radars observation area, but the three orthogonal wind components can not be acquired in full domain. In order to compensate the lost information of observation, continuity equation or other constrains combined with many Doppler wind constrains are used. Besides, under the assumption of certain characters of the wind field, regression equations can be applied for representing the wind components to reduce the unknown numbers. Scialom and Lemaitre (1990) addressed the concept of a three dimensional analytical wind field and brought it into the cost function, and thus converted the variational problem into the regression problem which can be solved by the least square error method. The present research is devoted to the application of MANDOP analysis in retrieving the typhoon wind field and introducing the cylinder coordinates to improve the accuracy of the result.

The present paper adopts the cylinder coordinates in which the center axis is typhoon center and assumes that the analytical wind components, with respect to each coordinate, may be written as a product of three functions of each coordinate. The base functions are power series in radial, Fourier series in tangential and Legendre series in vertical direction. In the respect of constraints, except for using Doppler wind and continuity constraints, the boundary condition at ground, top of troposphere and typhoon center are included.

Besides using uniform flow and vortex for testing, the simulated typhoon Herb data, produced from MM5 model, are used as the real typhoon wind field. Doppler wind observations are simulated from two to three radars which are at different places. The wind retrieval method above is used to evaluate the results and the affects by comparing the retrieval wind with the true wind under different conditions.

Keywords : Doppler radar、3D wind retrieval、MANDOP

二、目的與方法

1. 研究目的

本研究的目的在於引進 MANDOP 分析來反演颱風三維風場，並且針對颱風風場選擇適當的座標系統和解析風場函數，在適當的限制條件下希望可以得到不錯的風場反演結果。為了測試研擬的風場反演方法，將會評估限制條件誤差變異數在不同權重因子組合下的風場反演誤差行為，其中利用簡單風場和數值模擬颱風風場評估反演結果。並研擬修改 MANDOP 法正交函數類型與最佳化的方法，使其合適擬合分析颱風切向風主控的

風場類型，應用空氣連續方程式和合理的邊界條件，以模式模擬的海面颱風風場資料，測試 MANDOP-Typhoon 三維風場反演方法。

接著，建立圖形使用者介面，展示選定雷達位置對應的不同仰角雷達波束垂直剖面和地形的關係，以及多個雷達個別選擇仰角線、所有方位角受地形遮蔽的投影分布套疊圖。

最後，在近地形區域，因為存在地形遮蔽、雷達無法觀測的問題，以及地形影響造成風速和風向變化差異大，是風場變異量最大、卻又觀測最缺乏的空間。若加上空氣連續方程式和近地面下邊界條件，可能改進近地形區域的風場估計效果。本研究擬利用數值模式模擬產生地形區域颱風或非颱風三維、時變風場資料，模擬不同位置的雷達都卜勒風速觀測，再配合研究發展的三維風場反演模式，可以評估移動式雷達在假設擺放位置輔助反演近地面三維風場之效益。

2. 研究方法

將 MANDOP 分析應用於圓柱座標系統時，原本的幾何關係式、連續方程式與邊界條件都會因而不同，尤其是連續方程式在圓柱座標的中心點是一個奇異點，這對於擬合函數的選擇會造成影響，因為無法對該點進行積分，對於正交函數而言就無法發揮正交性，換言之，就算選擇了正交函數也無法帶來好處。所以必須針對圓柱座標系統重新選擇適當的擬合函數，並重新推導幾何關係式、連續方程式與邊界條件。對於颱風系統而言，由於眼牆內的風速甚小，幾乎沒有上升或下降運動，因此本研究多增加了中心垂直風為零的邊界條件，希望藉以提升對於垂直風的反演效果。

2.1 解析風場函數

首先定義在圓柱座標系統中風速的三維正交分量：

$$v_r(r, \theta, z) = \sum_{ir=1}^{n_r} \sum_{j\theta=1}^{n_\theta} \sum_{kz=1}^{n_z} b_{ir,j\theta,kz}^1 P_{ir}(r) Q_{j\theta}(\theta) R_{kz}(z)$$

$$v_\theta(r, \theta, z) = \sum_{ir=1}^{n_r} \sum_{j\theta=1}^{n_\theta} \sum_{kz=1}^{n_z} b_{ir,j\theta,kz}^2 P_{ir}(r) Q_{j\theta}(\theta) R_{kz}(z)$$

$$w(r, \theta, z) = \sum_{ir=1}^{n_r} \sum_{j\theta=1}^{n_\theta} \sum_{kz=1}^{n_z} b_{ir,j\theta,kz}^3 P_{ir}(r) Q_{j\theta}(\theta) R_{kz}(z)$$

其中 v_r 為徑向風、 v_θ 為切向風、 w 為垂直風； $P_{ir}(r)$ 為 r 方向上第 ir 項的冪次函數； $Q_{j\theta}(\theta)$ 、 $R_{kz}(z)$ 分別為 θ 、 z 方向上第 $j\theta$ 、 kz 項的正交函數 ($ir=1\sim n_r$ 、 $j\theta=1\sim n_\theta$ 、 $kz=1\sim n_z$)，其中 $Q_{j\theta}(\theta)$ 為傅利業函數而 $R_{kz}(z)$ 為勒尖德函數，這些函數列於附錄 A 中介紹； $b_{ir,j\theta,kz}^1$ 、 $b_{ir,j\theta,kz}^2$ 、 $b_{ir,j\theta,kz}^3$ 分別為 v_r 、 v_θ 、 w 展開式中的待定係數，因此待定係數總共有 $3 \cdot n_r \cdot n_\theta \cdot n_z$ 個。由於勒尖德多項式的定義域為 $(-1, 1)$ ，所以必須將實際空間座標 z^{ob} 轉換到此區間內。定義：

$$z = 2 \cdot \frac{z^{ob} - z_{ground}^{ob}}{z_{top}^{ob} - z_{ground}^{ob}} - 1$$

其中 z_{ground}^{ob} 與 z_{top}^{ob} 分別代表實際空間座標中地面層與對流層頂的高度，利用上式可以將 z^{ob} 轉換到 z 。由於 r 、 θ 的定義域分別和冪次多項式、傅利業多項式的定義域相同，所以，並不需要進行空間尺度的轉換。

2.2 都卜勒風限制條件

$$V_{D,i} = V_{D,i}^o - L_{z,i} V_T = L_{r,i} v_r + L_{\theta,i} v_\theta + L_{z,i} w$$

其中 V_D 為雷達徑向風， V_D^o 為雷達徑向風觀測值， V_T 為雨滴落下的終端速度， L_r 、 L_θ 、 L_z 為方向餘弦函數，下標 i 表示第 i 個觀測點 ($i=1\sim N_m$ ， N_m 為全部的觀測點數)。則代價函數為：

$$J_{radar} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_m} [V_{D,i} - (L_{r,i} v_r + L_{\theta,i} v_\theta + L_{z,i} w + L_{z,i} V_T)]^2$$

將解析風場代入並對各待定係數偏微分可得：

$$\frac{\partial J_{radar}}{\partial b_{ir,j\theta,kz}^k} = \sum_{i=1}^{N_m} \{ V_{D,i} - \sum_{j=1}^{n_\theta} \sum_{k=1}^{n_z} [L_{r,i} b_{ir,j\theta,kz}^1 P_{ir}(r) Q_{j\theta}(\theta) R_{kz}(z) - L_{z,i} V_T] \cdot L_{r,i} P_{ir}(r) Q_{j\theta}(\theta) R_{kz}(z) \} = 0$$

其中 $k=1\sim 3$ 、 $ir'=1\sim n_r$ 、 $j\theta'=1\sim n_\theta$ 、 $kz'=1\sim n_z$ 。將上式表示為矩陣形式：

$$\underline{M}_{radar} \cdot \bar{b} = \bar{P}_{radar} \quad (1)$$

2.3 連續方程式限制條件

可壓縮流的質量守恆方程式為：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{q}) = 0 \quad (3)$$

其中 \bar{q} 表示速度向量，假設密度 ρ 隨時間的變化率很小 ($\partial \rho / \partial t \rightarrow 0$)，則上式簡化為：

$$\nabla \cdot (\rho \bar{q}) = 0$$

若假設空氣密度的空間分佈只與高度有關，並依照對數函數的形式隨高度而遞減

$$\rho(z) = \rho(z_0) \exp\left(-\frac{z-z_0}{H}\right)$$

其中 H 為尺度高度(scale height)， z_0 為密度分佈的參考高度(reference height)，將密度分佈 $\rho(z)$ 代入(10)中可得：

$$\rho(z_0) \exp\left(-\frac{z-z_0}{H}\right) (\nabla \cdot \bar{q} - \frac{w}{H}) = 0 \quad (4)$$

由於 $\rho(z_0) > 0$ 且 $\exp[-(z-z_0)/H] > 0$ ，所以上式可再簡化為：

$$\nabla \cdot \bar{q} - \frac{w}{H} = 0$$

若採用圓柱座標系統，則上式變為：

$$\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{w}{H} = 0$$

由於在 z 方向上使用勒尖德多項式來展開，所以必須先進行尺度的轉換才能建立代價函數，考慮一個微小區間 $\Delta z^{ob} \rightarrow 0$

$$\frac{\partial w}{\partial z^{ob}} = \frac{\Delta w}{\Delta z^{ob}} = \alpha_z \cdot \frac{\Delta w}{\Delta z} = \alpha_z \cdot \frac{\partial w}{\partial z}$$

其中 $\alpha_z = 2/(z_{max}^{ob} - z_{min}^{ob})$ ，則代價函數為：

$$J_{mass} = \frac{1}{2} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \left(\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \alpha_z \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{w}{H} \right)^2 dz d\theta dr \quad (6)$$

因為連續方程式在圓柱座標中心為一奇異點，所以積分式在該點的值為無窮大，為了避開奇異點 ($r=0$) 而選擇 $r=r_{min}$ 作為中心邊界。將待價函數代入後對各待定係數偏微分可整理為矩陣形式如下：

$$\underline{M}_{mass} \cdot \bar{b} = 0 \quad (7)$$

2.4 邊界限制條件

在本篇論文中僅考量海平面上的颱風系

統，沒有地形的影響，故下邊界近地面處風速在垂直方向上的投影量應為零；在上邊界對流層頂處為一水平氣流，因此垂直風的大小應為零，則上下邊界條件為：

$$w = 0, \quad z_{boundary} = -1 \text{ (bottom) or } 1 \text{ (top)}$$

上下邊界的代價函數為：

$$J_{ground} = \frac{1}{2} \int_0^{r_{max}} \int_0^{2\pi} [w^2]_{z=z_{boundary}} d\theta dr$$

對於颱風系統而言，眼牆內的風速微弱，垂直風的大小幾乎趨近於零，因此中心邊界條件為：

$$w = 0, \quad r = r_{min}$$

中心邊界代價函數為：

$$J_{center} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} [w^2]_{r=r_{min}} d\theta dz$$

將解析風場代入兩條代價函數後，分別對待定係數偏微分可整理得矩陣形式如下：

$$\underline{M}_{center} \cdot \underline{\bar{b}} = 0$$

2.5 最佳化分析

將幾何關係式、連續方程式與邊界條件一起進行最佳化運算，則代價函數為：

$$J = \lambda_{radar} J_{radar} + \lambda_{mass} J_{mass} + \lambda_{boundary} (J_{ground} + J_{top}) + \lambda_{center} J_{center}$$

其中 λ_{radar} 、 λ_{mass} 、 $\lambda_{boundary}$ 與 λ_{center} 為權重因子，其值可選用各個限制式標準偏差的倒數，其中 J_{ground} 與 J_{top} 分別為下邊界與上邊界條件的代價函數，因其誤差的來源類似，所以權重因子可以考慮採用相同數值；而 J_{center} 為中心邊界條件的代價函數，由於中心邊界條件限制的範圍與上、下邊界條不同，加上作用的機制也不一樣，因此令 J_{ground} 與 J_{top} 的權重因子為 $\lambda_{boundary}$ ，而 J_{center} 的權重因子為 λ_{center} ，但實際上難以求得各個限制式的標準偏差，所以各權重因子的影響將留在後面的章節中探討。將代價函數 J 分別對各待定係數偏微分後，所得到之聯立方程組寫成矩陣的形式則為：

$$\underline{M} \cdot \underline{\bar{b}} = \underline{\bar{P}}$$

其中 $\underline{M} = \lambda_{radar} J_{radar} + \lambda_{mass} J_{mass} + \lambda_{boundary} J_{boundary} + \lambda_{center} J_{center}$ 、 $\underline{\bar{P}} = \lambda_{radar} \underline{\bar{P}}_{radar}$ ，將矩陣方程式解出後，則可得到使代價函數為最小值的待定

係數，也就可以決定三維解析風場。

三、均勻流與渦旋流測試

本研究選擇圓柱座標系統的主要原因是以反演颱風三維風場為目的，然而颱風系統除了環流特性外，還會受到駛流(Steering Flow)的牽引而移動，所以在進行風場反演時必須同時考量駛流與環流的影響，此外，當環流中心定位發生偏差時，也會造成反演風場時的誤差。本研究使用均勻流(Uniform Flow)和渦旋流(Vortex)來進行分析，在不考慮觀測誤差的條件下，利用 MANDOP 分析來反演均勻流與渦旋流風場，藉以評估誤差大小，並同時探求在反演風場時可能會發生的問題與困難。均勻流與渦流風場範圍為在 x 方向與 y 方向上為 30 km，在 z 方向上為 6 km，假設均勻流的 u 分量在整個風場範圍內大小均為 10 m/s，而 v 與 w 分量均為零，渦旋流的 v_{θ} 分量在整個風場範圍內大小均為 10 m/s，而 v_r 與 w 分量均為零，而旋轉中心位於 (15km, 15km)。假設風場位於三雷達觀測範圍內，各雷達位置如下圖所示：

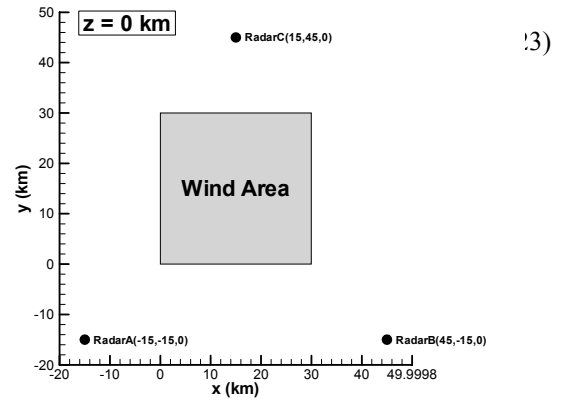


圖 1 均勻流與渦流風場範圍與三雷達位置示意圖

在不同的測試案例中會選擇適當的觀測解析度，在評估權重之影響與探討反演均勻流所面臨的問題時使用 $10 \times 10 \times 5$ 的觀測網格；在評估展開項數之影響與渦旋流中心定位誤差的影響時使用 $50 \times 50 \times 30$ 的觀測網格。茲將上述實驗設計整理於下表：

網格解析度	網格間距 (km)	相對應之展開項數 (n_r, n_θ, n_z)
10×10×5	dx=dy=3、 dz=1.2	(3,3,3)
50×50×30	dx=dy=0.6、 dz=0.2	(1,1,1)~(8,8,1)

表 1 網格解析度與相對應之展開項數

3.1 誤差評估統計量

為了將反演出來的風場與實際的風場作比較以評估反演的準確度，在比較反演風場與真實風場時，必須先將反演風場轉換到卡氏座標系統上。定義 $V_r(u_r, v_r, w_r)$ 、 $V_t(u_t, v_t, w_t)$ 分別代表反演風和真實風， N_{grid} 代表所有格點的總數，由於風場除了大小外還兼具方向性，為此定義反演風場與真實風場的均方根誤差 RMS_{diff} (m/s)為：

$$RMS_{diff} = \left(\frac{1}{N_{grid}} \sum [(u_r - u_t)^2 + (v_r - v_t)^2 + (w_r - w_t)^2] \right)^{1/2}$$

3.2 展開項數之影響

評估不同展開項數對於反演結果的影響時，圓柱座標中心定為(15km, 15km)，設定 $(n_r, n_\theta, n_z) = (1,1,1) \sim (8,8,1)$ ，因為均勻流與渦旋流都不含垂直分量，所以固定 $n_z=1$ 以節省計算時間，雷達都卜勒點觀測資料使用 50×50×30 的網格節點，在求解風場時利用 A、B 兩顆雷達的觀測值、連續方程式與上下邊界條件一起求解，待風場求出後計算 RMS_{diff} 的大小。

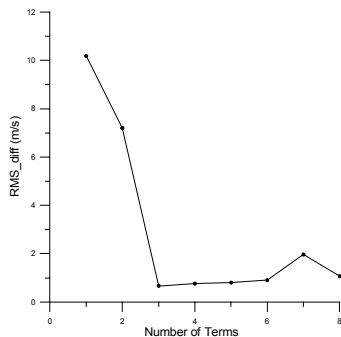


圖 2 均勻流 RMS_{diff} 隨展開項數 n 變化的情形

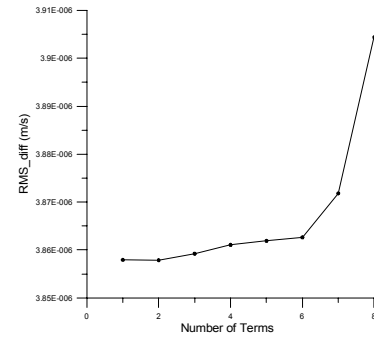


圖 3 渦旋流 RMS_{diff} 隨展開項數 n 變化的情形

對於均勻流或渦旋流而言，在增加展開項數的同時，也會連帶增加數值誤差，但是反演均勻流水平風的結果要比渦旋流來的差，所以在求解方程式時所產生的誤差也會較為明顯，導致 RMS_{diff} 的最小值約為 0.6 m/s；而渦旋流在圓柱座標系統中是相當容易反演的風場，因此 RMS_{diff} 的最小值約為 3.8×10^{-6} m/s。然而仔細比較均勻流與渦旋流 RMS_{diff} 隨 n 值變化的情形可以發現，在多展開項數時均勻流的 RMS_{diff} 會有上下震盪的行為，而渦旋流卻無此現象，可能的原因在於均勻流需要較多的展開項數才能描述風在空間中的變化，並且在風場反演的過程中缺乏完備的邊界條件，因此解析風場函數的特性會影響到風場反演的結果，使得新增加的待定係數對於風場而言具有解釋的能力，而新增加的高頻或高次項函數就會以其函數行為影響到風場的反演，導致最後的風場誤差可能會偏大，但也有可能會偏小，從而造成 RMS_{diff} 隨 n 值的增加而發生上下震盪的情形。對於渦旋流而言，雖然也缺乏完備的邊界條件，但是只需使用單一的常數項待定係數即可描述風場的變化，在風場反演中當該常數項待定係數的值已經可以完全代表渦旋流風場時，新增加的待定係數就不具任何解釋風場的能力，所以在渦旋流風場的反演中，每新增一項待定係數只會累積數值的捨位誤差，因而在圖 4 中 RMS_{diff} 僅隨著 n 值的增加而變大，並有發生上下震盪的情形。從均勻流與渦旋流的例子可以知道，當風場的形式與圓柱座標系統相契合時，對於風場反演而言是相當有利的。

3.3 應用於均勻流的問題

由於均勻流只有水平分量，垂直的分量均為零，因此只要當觀測點的高程甚小於觀測點與雷達的距離時，可以將其近似於二維平面風場的觀測，這時只需兩顆雷達的都卜勒風觀測就可決定風的大小與方向。對於高層風場而言，雷達指向觀測點向量的垂直分量不可忽略，則只有兩顆雷達的都卜勒風速觀測就顯然條件不夠充分，需要加入連續方程式一起求解；唯連續方程式需要結合邊界條件才能算是一條完整的限制式，所以在欠缺邊界條件的情況下可能無法得到良好的反演結果。為瞭解上述的情況，本節將採用五個實驗分別探討。

實驗一：三顆都卜勒雷達（A、B、C）觀測，僅使用都卜勒風限制條件求解風場；實驗二：兩顆都卜勒雷達（A、B）觀測，僅使用都卜勒風限制條件求解風場；實驗三：兩顆都卜勒雷達（A、B）觀測，使用都卜勒風限制條件與連續方程式，但不使用上下邊界條件來求解風場；實驗四：兩顆都卜勒雷達（A、B）觀測，使用都卜勒風限制條件、連續方程式與上下邊界條件來求解風場；實驗五：兩顆都卜勒雷達（A、B）觀測，使用都卜勒風限制條件、連續方程式、上下邊界條件與中心邊界條件來求解風場，在求解風場時使用 $(n_r, n_\theta, n_z) = (3, 3, 3)$ 的展開項數與 $10 \times 10 \times 5$ 的網格，由於前兩個實驗只使用幾何關係式，所以並沒有權重選擇的問題，而後三個實驗的權重選擇 $\lambda_{radar} = 1$ 、 $\lambda_{mass} = 1$ 、 $\lambda_{boundary} = 1$ 並選擇風場場域的中心 (15km, 15km) 作為圓柱座標系統的中軸，各實驗條件風場反演的結果如下表所示：

表 2 各實驗之 RMS_{diff} 值

組別	條件	$RMS_{diff}(m/s)$
實驗一	三雷達	2.9557×10^{-6}
實驗二	雙雷達	26.9131
實驗三	雙雷達 + 連續方程	89.4133
實驗四	雙雷達 + 連續方程 + 上下邊界條件	1.1098
實驗五	雙雷達 + 連續方程 + 上下、中心邊界條件	1.0820

由這五組實驗可以知道，利用三雷達反演的風場可以得到最好的結果，然而礙於雷達觀測上的困難，往往只能取得單雷達或雙雷達的觀測資料，所以合併連續方程式與邊界條件一起求解風場，為實際應用上最好的選擇。由實驗一與實驗四可以看出，將其中一條都卜勒風限制條件利用連續方程式結合邊界條件取代後，風場反演的準確度隨即下降了許多，雖然均勻流完全符合連續方程式的條件，但是在實際最佳化的過程中，對於需要較多展開項數的風場而言，連續方程式所能達到的準確度卻比都卜勒風限制條件低，並須配合邊界條件才能有效限制解析風場的變化。

比較實驗四與實驗五可以發現，多增加中心邊界條件對於整體風場反演的效果改善不多，主要是因為該邊界條件影響的範圍較小，只佔全部風場的中間小部份區域而已，不過對於該局部區域而言卻大大提升了反演風場的準確度，由於在圓柱座標系統中心選擇了以 r_{min} 為半徑的邊界，除非合理地於該處增加限制條件，不然仍會使風場反演產生較大的自由度，從而產生較大的風場誤差。

四、應用於模式颱風風場

在實際觀測資料與真實大氣動力條件下，在反演風場時會面臨資料缺漏、觀測誤差、連續方程式條件不符等等的問題。但是為了探討圓柱座標系統下 MANDOP 分析的適用性，本研究乃使用數值模擬風場的資料當作真實風場，藉由模擬雷達觀測的方式取得雷達徑向風觀測資料，然後再進行風場的反演，如此就可以將反演出來的風場與真實風場作比較，從而了解誤差的行為。

在產生雷達徑向風觀測資料時，是直接以三維風求得徑向風的觀測值，所以在反演風場時不考慮雨滴的終端速度；也排除地形的影響，模擬位於海平面上的雷達觀測資料來進行風場的反演；最後，產生觀測資料時，不考慮觀測誤差與體積平均問題，而是直接在模式格點上取得雷達徑向風的觀測值。

4.1 模式風場

測試利用 MANDOP 分析反演真實颱風風場是使用洪景山博士利用 MM5 模式模擬賀伯颱風的輸出資料，挑選模式 D03 範圍中模擬第 35 小時的風場。為了測試圓柱座標系統 MANDOP 分析對於颱風系統的適用性，使用颱風中心約兩倍眼牆半徑內的風場進行反演，由於在模式中颱風眼牆半徑大約 70 ~ 80 km，因此選取如圖 4 中粗方框所示，距颱風中心約 150 km 範圍內未受地形影響的區域，該區域的大小為 300 km×300 km。由於使用密度隨高度分層的連續方程式，因此必須先決定密度函數的尺度高度，這裡選擇 $H = 13 \text{ km}$ 。

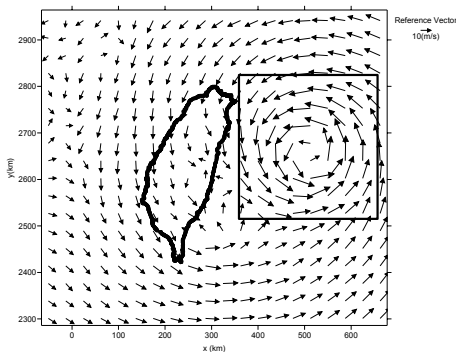


圖 4 應用 MM5 模式風場評估圓柱座標 MANDOP 反演風場方法之範圍 (UTM), $\sigma = 0.995$

在擷取 MM5 模式的風場資料時，先利用壓力場將各點的高度求出，並將經緯度座標轉為二度分帶座標，因為在颱風中相同壓力面上的高度值並不一致，而且模式風場的格點較密（水平解析度約 3 km，30 層等壓力面）。為求出同一高度面上的風場，並降低格點密度以節省計算時間，所以在取出真實風場時利用 Cressman 內插法算出 $30 \times 30 \times 30$ 真實風網格內各點的風速值；此網格的水平解析度為 10 km，垂直解析度為 0.47 km，最低層高度為 0 km，最高層高度為 13.63 km，並將此風場作為評估反演結果時的「真實颱風風場」，假設該風場位於雙雷達觀測範圍內，各雷達位置如下圖所示：

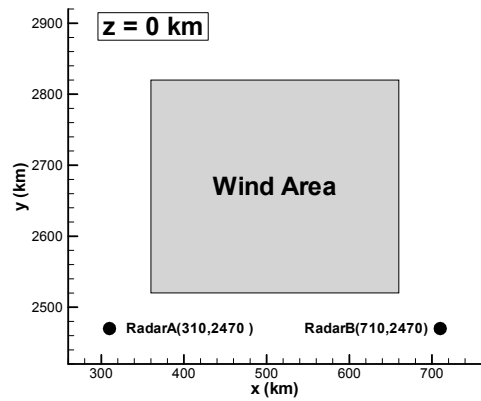


圖 5 真實颱風風場範圍與雙雷達位置關係示意圖

4.2 反演模式颱風風場實例

使用 A、B 兩顆雷達的觀測值、連續方程式、下邊界與中心邊界條件一起求解風場， $\lambda_{center} = 10$ 展開項數為 $(n_r, n_\theta, n_z) = (5, 5, 5)$ ，給定的中心位置為 (510 km, 2664 km)。為了與真實颱風風場比較，這裡將 $z = 0 \text{ km}$ 、 $z = 8.93 \text{ km}$ 和 $z = 13.63 \text{ km}$ 等高度的水平風場與在 $y = 2670 \text{ km}$ 垂直面處垂直風 w 的等值線圖繪出，如圖 7 至圖 10 所示。

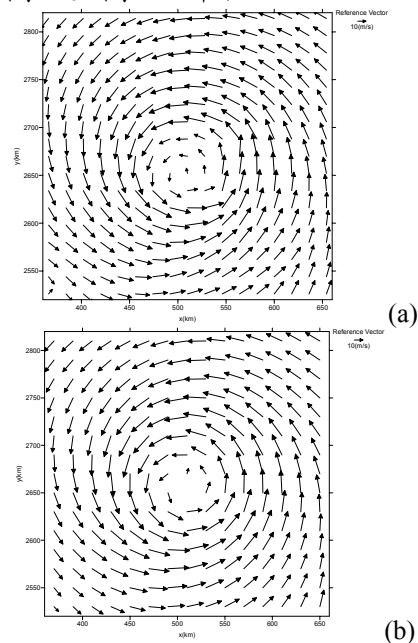


圖 6 $z = 0 \text{ km}$ 水平面之 (a) 真實颱風風場與 (b) 反演颱風風場

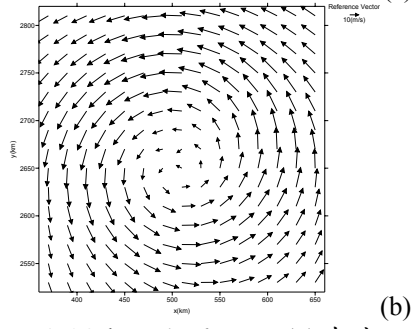
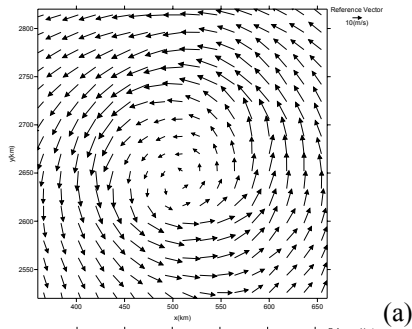


圖 7 $z = 8.93$ km 水平面之(a)真實颱風風場與(b)反演颱風風場

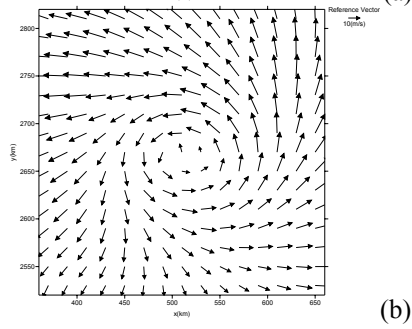
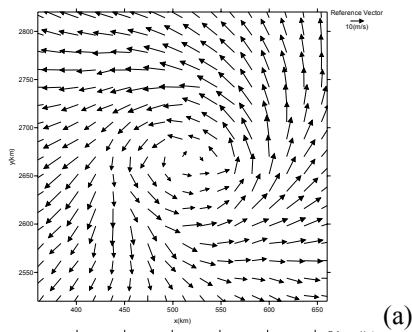


圖 8 $z = 13.63$ km 水平面之(a)真實颱風風場與(b)反演颱風風場

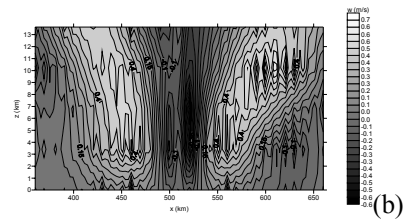
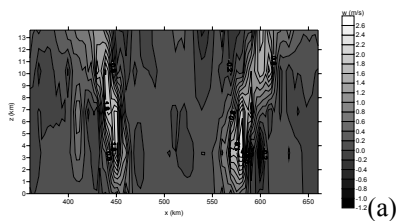


圖 9 $y = 2670$ km 垂直面(a)真實颱風風場與(b)反演颱風風場之垂直風等值線圖

在展開項數 $(n_r, n_\theta, n_z)=(5, 5, 5)$ 的條件下，平面風場的反演結果相當不錯，對於風場的大小與方向都能掌握； w 等值線圖中可以看出颱風眼牆大概的位置，解析風場可以捕捉到垂直風的趨勢，對於極值大小與複雜的空間變異而言均低估很多。由於真實風場的範圍在水平面上為 $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ ，而垂直方向上卻只有 13 km ，因此整個風場相當的扁平，所以無論雷達位於何處，絕大部分都只能取得風場的水平分量，此外，由於水平風的大小要比垂直風大上許多，尤其在颱風眼牆處水平風可達 50 m/s ，但是垂直風最大就只有 2.8 m/s ，因此在求解方程式時，只要水平風場的相對誤差超過 $2.8/50 = 5.6\%$ ，在使用連續方程式來計算垂直風的大小時就會發生問題，所以在進行三維風場反演時，必須先提升水平風場的準確度，然後才有辦法將垂直風反演得好。由於風場反演時展開項數不足，使得風場反演的結果受限於解析風場函數的特性，為了增進反演效果建議增加展開項數或選擇更適合的解析風場展開函數。由於目前都卜勒徑向風觀測的區域太小，所以無法對外側邊界進行合理的限制，如果範圍夠大則應該可以選擇適當的外側邊界半徑，另邊界上的垂直風為零，或許可以更進一步有效地限制解析風場函數的變化。

五、雷達觀測與地形關係圖形介面

王閔毅(2002)年的研究中發展出一套探討雷達波束與地形交會情況的模式，可用來分析雷達波束之行進在近地面時受地形之影響。透過虛擬雷達波束與地

形關係的展示界面，可以用人機互動的方式，顯現一條雷達波束在不同的方位角及仰角的情況下，和地形的關係，亦即使用者可以了解到雷達波束在空間中受到遮蔽影響的大小、範圍與位置。該研究使用 1 公里解析度的數值地形模型 (DEM) 資料，垂直方向上放大為五倍的方式，建立一個北台灣的數值地形模型。五分山雷達波束的寬度(-3dB)約為 0.95 度的張角，在界面中是以白色半透明區塊來表示；另外以波束軸心訊號強度減 6db 的 1.34 度張角寬度做為緩衝區間。

該程式設計的方式，觀察者的高度是隨著波束中心的高度變化而變化，觀察者與回波位置的距離始終保持 25 公里，觀察者與回波位置空間中的相對位置關係如圖 10。該圖形展示介面模式如圖 11 所示，透過上述圖形展示介面，可以清楚觀測到雷達波束在遇到地形時的情況。圖 12 為林忠義(2002)開發的五分山雷達分析與展示介面，有助於了解不同觀測仰角與數值地形模型之間的關係。

藉由上述輔助介面的展示，可以清楚了解雷達波束在空間中的行進路徑，以及地形如何干擾電磁波能量的反射，並可藉由地形效應處理的過程，了解山區雷達觀測徑向風受地形的影響。

六、結論

1. 雖然圓柱座標系統與採用的基底函數不利於反演均勻流風場，但是使用三顆雷達觀測、展開項數 $(n_r, n_\theta, n_z)=(3,3,3)$ 即可得到不錯的反演結果，表示圓柱座標系統與基底函數的組合並不會造成擬合均勻流的困難。

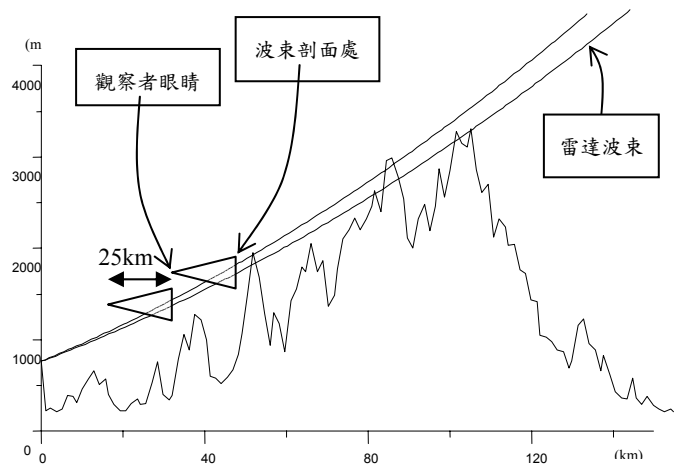


圖 10 觀察者與回波位置在空間中的相對位置圖

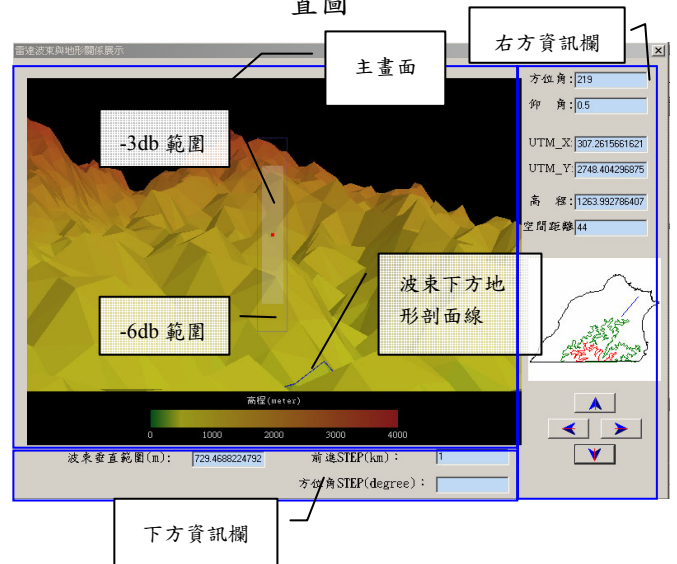


圖 11 虛擬雷達回波與地形關係展示程式與操作畫面。

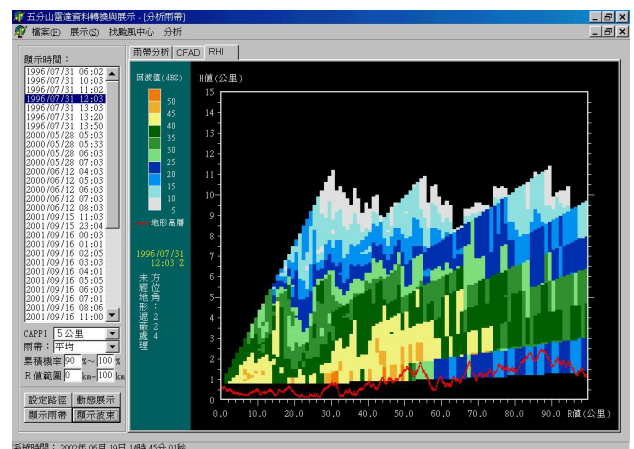


圖 12 不同仰角雷達波束與數值地形之關係

2. 圓柱座標系統 MANDOP 反演渦旋流風場的誤差很低，表示選擇的座標系統與基底函數，有利於反演渦旋結構的風場。
3. 同樣使用兩顆雷達觀測，連續方程式限制條件、上下邊界垂直風為零、內邊界垂直風為零等限制條件，和展開項數 $(n_r, n_\theta, n_z) = (3, 3, 3)$ ，發現圓柱座標 MANDOP 反演均勻流風場之誤差較大，反演渦旋流風場的誤差很小。究其原因，認為是邊界限制條件仍不充分，在不考慮解析風場函數下，使代價函數微分得到的聯立方程式有近似線性相依 (multi-colinearity) 的問題。
4. 因為地面雷達觀測到的徑向風主要是水平風的投影，難以觀測到垂直風分量，在反演邏輯中，垂直風主要是由連續方程式來決定其大小，因此當水平風場出現誤差時，會影響垂直風的反演結果，使正確地反演垂直風變得更為困難。
5. 在限制條件不足的狀況下，增加展開項數會更增加風場的自由度；採用不同權重因子組合，偏重不同代價函數項，在不同自由度之下可能反演出非常不同的風場結果。因此在增加展開項數時，必須確定問題有足夠的限制條件。

七、參考文獻

1. Caillault, K., Y. Lemaître, 1999: Retrieval of Three-Dimensional Wind Fields Corrected for the Time-Induced Advection Problem. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: Vol. 16, No. 6, pp. 708–722.
2. Dinku, Tufa, Anagnostou, Emmanouil N., Borga, Marco. 2002: Improving Radar-Based Estimation of Rainfall over Complex Terrain. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 41, No. 12, pp. 1163–1178.
3. Gal-Chen, Tzvi. 1982: Errors in Fixed and Moving Frame of References: Applications for Conventional and Doppler Radar Analysis. *Journal of the Atmospheric Sciences*: Vol. 39, No. 10, pp. 2279–2300.
4. Ishihara, M. Z. Yanagisawa, H. Sakakibara, K. Matsuura and J. Aoyagi: Structure of Typhoon Rainband Observed by Two Doppler Radar. *Journal of the Meteorological Society of Japan*: Vol. 64, No. 6, pp. 923–938.
5. Lee, Wen-Chau, Marks, Frank D. 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.
6. Liou, Yu-Chieng. 1999: Single Radar Recovery of Cross-Beam Wind Components Using a Modified Moving Frame of Reference Technique. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: Vol. 16, No. 8, pp. 1003–1016.
7. Montmerle, Thibaut, Lemaître, Yvon. 1998: Three-Dimensional Variational Data Analysis to Retrieve Thermodynamical and Dynamical Fields from Various Nested Wind Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: Vol. 15, No. 2, pp. 360–379.
8. Scialom, G., and Y. Lemaître, 1990: A new analysis for the retrieval of three-dimensional mesoscale wind fields from multiple Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 7, 640–665.
9. Tabary, Pierre, Scialom, Georges. 2001: MANDOP Analysis over Complex Orography in the Context of the MAP Experiment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: Vol. 18, No. 8, pp. 1293–1314.
10. Zhang, Jian, Gal-Chen, Tzvi. 1996: Single-Doppler Wind Retrieval in the Moving Frame of Reference. *Journal of the Atmospheric Sciences*: Vol. 53, No. 18, pp. 2609–2623.