

單雷達風場反演-【移動坐標法】的特性分析與應用

羅英祥 廖宇慶

國立中央大學大氣物理所

摘要

本研究主要的目的在於測試一種建立在移動參考坐標上的單雷達風場反演技術，以深入了解其應用在真實雷達資料時的表現和特性。在此反演法中，首先利用回波觀測資料找出一組最佳化的平移速度，而在以此速度移動的坐標系統上，回波被保守的程度最大。再來將所有的觀測資料內插到這個新的移動坐標上，並假設風場在密集的天線掃描時間間隔內為近似於恆定，則可以建構出反演三維風場的價值函數，其中用以規範待反演風場 (u, v, w) 的弱勢約束條件有：(1).回波保守；(2).徑向風 V_r 與笛卡爾風場 (u, v, w) 之間的幾何關係；(3).質量保守；(4).弱水平及垂直渦度；(5).水平風平均值近似 VAD 風剖面；(6).高階空間平滑函數。使用變分技術極小化這個價值函數後，便可以求出完整的風場分布。選取 1987 年 TAMEX 實驗期間 IOP#2 個案，使用其中 CP-4 和 TOGA 兩座都卜勒雷達的觀測資料對此反演法進行測試與驗證，並進一步了解此反演法之特性。

一、前言

隨著五分山新一代都卜勒雷達站 NEXRAD (Next Generation Weather Radar) 於民國 87 年 7 月的開始運作，我國中央氣象局的雷達網計畫預計於民國 92 年之前完成，屆時在北部有五分山雷達，東部有花蓮雷達，南部則有台南七股與墾丁雷達；若是再配合民航局位於桃園中正國際機場，空軍位於台中清泉崗與台東綠島的都卜勒雷達，以及中央大學大氣系的雷達升級計畫，則會有一個涵蓋全島的雷達網。但是都卜勒雷達只能觀測到徑向風場資料，對於垂直於天線主軸的切線風場是無法直接觀測的，所

以不容易對風場的完整結構做一個直接而且有效的判讀。為了能進一步利用雷達所提供的觀測資料來做分析研究，必須藉助一些反演的方法，來得知三維風場的結構，才能進一步的對一些天氣現象做分析與探討。

目前對於一些天氣個案的分析，普遍都是以兩個雷達的觀測資料來進行幾何上的合成以及分析，但是以雙雷達資料合成風場本身就存在著一些限制與困難，像是兩個雷達間校驗上的差異，以及兩者在掃描策略上的搭配等，還有各雷達站之間受限於彼此的距離過於遙遠，或是地形地物的阻隔，或是兩個雷達間基線 (base line) 的關係，而使得雙雷達可合成分析

的區域過小。有鑑於此，發展單一都卜勒雷達反演的技術，更有效的利用單一都卜勒觀測得到的徑向風場資料及回波場資料，藉以重建雷達所無法直接觀測到的切向風分量，便是一個重要的課題。

在利用雙都卜勒雷達資料合成風場的分析方法中，本身就存在著一些限制與困難，為了能在實際可運用的考量之下，更有效的利用單雷達觀測得到的原始資料，對天氣系統的風場結構做一個直接的判讀，而使得利用單雷達從事風場反演的技術蓬勃發展起來，其中以 Phoenix II 及在 1991 年於佛羅里達州所做的對流性雷雨實驗 CaPE (Convection and Precipitation/Electrification Experiment) 中的雷達觀測資料來對此法進行一連串的測試，結果顯示使用此移動坐標法於單雷達風場之反演確實是可行的。Liou (1999) 將 ZG-96 的移動參考坐標法加以改良，在利用模擬資料的測試中被證實的確有助於提升反演的準確度。兩者之間的相異性分敘如下：

- Liou (1999) 在計算上是一次求得分析區域上每個格點的擾動速度，但是在 ZG-96 中則是逐點計算出分析區域的擾動風場。
- ZG-96 在其價值函數中之約束條件沒有包含未知數的微分項，使得在求解上僅需令價值函數之於未知數上之梯度值為零。Liou (1999) 中的價值函數則包含有未知數的微分項，必須藉由變分分析來求解。
- Liou (1999) 所提出的改良式移動參考坐標法，由於可以在價值函數中加入包含有未知數的微分項，所以能依照個案的需求加入適當的約束條件於變分分析中，如此不僅能提高反演的準確度，同時亦能使得此法可以被

廣泛地運用於不同的個案中。

張 (1999) 採用 Liou (1999) 的改良式移動參考坐標法，以五分山雷達站於賀伯颱風侵台時期所做的觀測資料進行測試，證實加入無輻散及無渦度等弱約束條件，確實有助於提升反演結果的準確度，而且所反演出的風場與雙雷達合成的風場吻合度甚高，但是風速卻有偏小的情況。

在本研究中繼續沿用 Liou (1999) 所提出的一種建立在移動參考坐標上的單都卜勒雷達風場反演技術，利用單一雷達的觀測資料，在此移動參考坐標上做三維變分分析，來進行風場的反演。選取發生在 1987 年 TAMEX (Taiwan Area Mesoscale Experiment) 實驗期間 5 月 17 日的 IOP#2 個案之密集觀測資料對此建立在移動坐標上的反演方法進行分析與測試，並探討影響其反演優劣之因素。

本文第二章將對反演方法做詳細的介紹；第三章則是說明資料的來源；第四章將探討其可能影響反演優劣的因素，並對於反演的結果進行分析；而最後一章則為結論與未來展望。

二、反演方法

2.1 使用移動坐標的概念

為了能更有效的利用雷達的原始資料，並解決雙雷達合成所遇到的瓶頸，近來許多學者都在嘗試著利用單一都卜勒觀測得到的徑向風場資料及回波場資料，做三維風場的反演，如 Sun et al. (1991)、Qiu and Xu (1992)、Xu et al. (1995) 與 Qiu and Xu (1996) 等，而他們所提出的方法都建立在雷達回波 (η) 為保守的假設上，其中的回波保守方程為：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + w \frac{\partial \eta}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

但是在真實大氣中，回波除了受平流效應影響外，還會受到其它因素的影響，如凝結或蒸發等一些微物理過程而有所消長，而且雷達是離散式的掃描，並非連續性的掃描，所以公式(2.1)在實際大氣中只是一個誤差甚大的理想化近似方程式，為了減少這誤差，Gal-Chen (1982) 提出使用移動坐標的概念，來從事單雷達風場的反演。

移動坐標的概念圖可以用圖 2.1 來說明，在這張圖上(a)、(b)分別表示在 t 及 $t + \Delta t$ 這兩個時間的回波掃描結果，回波值分布為由內向外遞減，假設此時風場僅為一簡單的水平風 U 而已。現在要用離散的觀測去估計回波的局地時間變化(亦即 $\partial \eta / \partial t$)。若站在 A 這個觀測點上，由 t 時間觀測到 $t + \Delta t$ 時間，可以看到回波值是由 2.5 到 3.5，隨後又從 3.5 遞減到 1.5，回波值是遞增後又遞減的情形，也就是回波在 Δt 這段時間的變化為正。但是若只採用(a)、(b)這兩個掃描時間的回波資料，則只看到回波值從原先的 2.5 遞減至後來的 1.5，中間遞增的情形並不能看到，回波的局地時間變化為負，這與在 A 點實際觀測到的情形是不符合的。Gal-Chen (1982) 指出，若可以找到一個隨系統移動的坐標，A 點仍舊可以維持它的觀測值 2.5，則使得回波的局地時間變化等於零，原本是負的誤差，現在變為零，如此便可以降低因雷達離散觀測所造成的誤差。

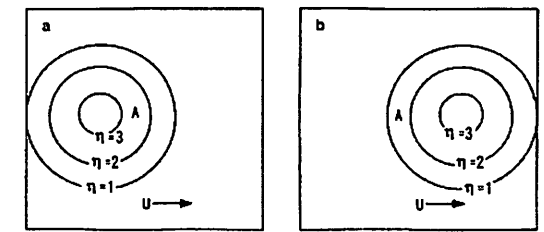


圖 2.1 在離散掃描下的回波示意圖，假設系統只有一向東平移的速度(U)，其等值線表示回波強度的大小。(a).在時間 t 之下的回波圖；(b).在時間 $t + \Delta t$ 之下的回波圖。

2.2 移動坐標的移速

在 Gal-Chen (1982) 中提出使用移動坐標的概念，可以藉由將回波場源/匯 (source/sink) 加以極小化的過程，找到一組移動坐標最佳的移速 (U, V, W)，使得公式(2.1)中回波被保守的程度達到最大。以價值函數 (cost function) 來表示的話，為了尋找一組最佳的 (U, V, W)，使得下式有極小值：

$$J(U, V, W) = \iiint_{\tau} \iiint_{\Omega} \alpha \left[\frac{\partial \eta}{\partial t} + U \frac{\partial \eta}{\partial x} + V \frac{\partial \eta}{\partial y} + (W + W_t) \frac{\partial \eta}{\partial z} \right]^2 dx dy dz dt \quad (2.2)$$

其中 Ω 為欲進行反演的區域， τ 則表示時間， α 則是權重函數， W_t 則為終端速度，其可經由回波間的經驗公式來估計，如 Shapiro (1995)。關於權重函數和終端速度，分別將其表示如下：

$$\alpha = \left\{ \frac{1}{\Omega} \iiint_{\Omega} \left[\overline{\left(\frac{\partial \eta}{\partial t} \right)} + \overline{W_t} \overline{\left(\frac{\partial \eta}{\partial z} \right)} \right]^2 dx dy dz \right\}^{-1} \quad (2.2a)$$

$$W_t(\eta) = -3.088 \times \eta^{0.0957} \quad (2.2b)$$

其中上標 ($\overline{\quad}$) 表示時間的平均。由於

(U, V, W) 對反演區域內的每一點而言是相同的，因此在求價值函數的極值時，可直接令 J 對 (U, V, W) 的微分為零，則可得下式：

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

其中

$$a_{ij(i=1\sim3)} = \iiint_{\Omega} \alpha \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_j} \right) dx dy dz dt \quad (2.3a)$$

$$b_{i(i=1\sim3)} = - \iiint_{\Omega} \alpha \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + W_i \frac{\partial \eta}{\partial z} \right) dx dy dz dt \quad (2.3b)$$

在上式中，為了方便起見，(x₁, x₂, x₃) 分別表示 (x, y, z)。 (U, V, W) 可由求解公式 2.3 得出，此即為該移動坐標的最佳移速。而在反演的過程中，需要計算 $\frac{\partial \eta}{\partial t}$ 、 $\left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z} \right)$ 等一些梯度量，其中對於時間的變化量是採用三次樣條函數 (Cubic-Spline) 來內插得到，所以在本文中需要使用連續三筆時間的雷達觀測資料來進行反演。

2.3 擾動速度

假設風場在幾個密集的雷達掃描時間內之變化並不急遽，即風場為準靜止狀態。將總風速區分成平移風速 (U, V, W) 和擾動風速 (u', v', w') 的和，其中 W = 0 這裡先討論其價值函數，說明其中每一項的意義。在改良後的方法中，其價值函數表示如下，令每一格點上的 (u', v', w) 會使下列價值函數有極小值：

$$J = \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} \left(\begin{aligned} &\alpha_1 J_1^2 + \alpha_2 J_2^2 + \alpha_3 J_3^2 \\ &+ \alpha_4 J_4^2 + \alpha_5 J_5^2 + \alpha_6 J_6^2 \\ &+ \alpha_7 J_7^2 + \alpha_8 J_8^2 + \alpha_9 J_9^2 \\ &+ \alpha_{10} J_{10}^2 + \alpha_{11} J_{11}^2 + \alpha_{12} J_{12}^2 \end{aligned} \right) dx dy dz dt \quad (2.4)$$

在上式(2.4)中共包含了 12 個弱勢約束條件，以下分為六個部份來敘述：

1. 回波(η)保守方程：

$$J_1 = \frac{\partial \eta'}{\partial x'} + u' \frac{\partial \eta'}{\partial x'} + v' \frac{\partial \eta'}{\partial y'} + (w' + W_i) \frac{\partial \eta'}{\partial z'} + s \quad (2.4a)$$

在 J₁ 中加入的 s 為回波的源/匯 (source/sink)，由於回波本身並不保守，但是在短時間的密集觀測下可以假設其為保守，不過在考量方程式本身就有誤差存在的情況下，在此考慮加入 s 項來當做方程式的剩餘項 (residual term)。上標 (') 表示其為在移動坐標上的值。

2. 觀測到的徑向風 (V_r) 和笛卡爾風場 (u, v, w) 間的幾何關係：

$$J_2 = V_r' - u' \frac{x' - p_1}{r'} - v' \frac{y' - p_2}{r'} - w' \frac{z' - p_3}{r'} \quad (2.4b)$$

其中 (p₁, p₂, p₃) 為在移動坐標上的雷達位置；r' 為移動坐標上格點到雷達間的距離；V_r' 則是在移動坐標上的徑向風。

3. 質量守恆：

$$J_3 = \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} + \frac{\partial w'}{\partial z'} \quad (2.4c)$$

4. 弱垂直及水平渦度：

$$J_4 = \frac{\partial v'}{\partial x'} - \frac{\partial u'}{\partial y'} \quad (2.4d)$$

$$J_5 = \frac{\partial w'}{\partial y'} - \frac{\partial v'}{\partial z'} \quad (2.4e)$$

$$J_6 = \frac{\partial u'}{\partial z'} - \frac{\partial w'}{\partial x'} \quad (2.4f)$$

加入以上 3、4 中所包含的這四項弱勢約束條件，其具有平滑的效果，能避免計算中產生病態的情形和減少因為資料雜訊所產生的誤差，可以參考 Xu et al. (1995) 和 Qiu and Xu (1996)。

5. 水平風平均值近似 VAD 風剖面：

$$J_7 = (\bar{u}' - \bar{u}'_{VAD}) \quad (2.4g)$$

$$J_8 = (\bar{v}' - \bar{v}'_{VAD}) \quad (2.4h)$$

在 Xu et al. (1995) 中曾指出加入地面測站的觀測資料於反演中，可以有助於提升反演的準確度。本文主要的構想是在藉由單一雷達的觀測資料反演出三維風場，所以其最直接的方法就是利用 VAD 風剖面的結果 ($\bar{u}_{VAD}, \bar{v}_{VAD}$) 當作觀測風場，若是沒有 VAD 風剖面的資料，則可以使用測站的探空資料當作觀測風場，來約束反演出來的風場平均 (\bar{u}, \bar{v})。由於在此都是以擾動速度 (') 來計算，所以必須減掉先前求得的坐標移速 (U, V)，也就是 ($\bar{u}'_{VAD}, \bar{v}'_{VAD}$) = ($\bar{u}_{VAD}, \bar{v}_{VAD}$) - (U, V)，將 ($\bar{u}'_{VAD}, \bar{v}'_{VAD}$) 視為觀測的水平擾動風場的平均，希望能藉由它當作正確風場，來約束反演中求得的擾動風場平均 (\bar{u}', \bar{v}')。

6. 高階空間平滑函數：

$$J_9 = \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \quad (2.4i)$$

$$J_{10} = \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \quad (2.4j)$$

$$J_{11} = \frac{\partial^2 v'}{\partial x'^2} \quad (2.4k)$$

$$J_{12} = \frac{\partial^2 v'}{\partial y'^2} \quad (2.4l)$$

加入此四項關於拉卜拉士濾波 (Laplace filter) 函數的約束條件，主要是希望能濾掉短

波所造成的雜訊，對其空間分布產生一些平滑的作用，本身沒有任何物理意義。

在極小化(2.4)式的過程中，利用準牛頓共軛梯度法來決定出使得價值函數 J 達到最小值的 (u', v', w')，首先必須經由計算來得到價值函數 J 之於未知數 (u', v', w') 的梯度值，再來給定未知數 (u', v', w') 的初始值，進行疊代的動作，使價值函數達到極小值，以求得未知數 (u', v', w') 的值。最後將擾動速度 (u', v', w') 和移動坐標的移速 (U, V, W) 相加起來，即為所欲求得之風場。

三、資料來源

每年五、六、七月，在台灣、華南、華中及日本地區出現的梅雨鋒面所伴隨的中尺度對流系統，經常會引發豪雨而造成嚴重的災害。而豪雨的發生往往與低層噴流、中尺度低壓及地形效應等有密切的關係。為了能更進一步的了解台灣地區的梅雨現象和中尺度豪雨的結構，台灣地區中尺度實驗 (TAMEX) 於 1987 年 5 月 1 日至 6 月 30 日於台灣地區實行，此計畫包含了台灣西部的三座都卜勒雷達 (CAA、CP4 和 TOGA) 觀測網，以及密集的高空測站，在此期間共做了 13 次的密集觀測 (Intensive Observing Period, 簡稱爲 IOP)。

本文選取 TAMEX 實驗期間 5 月 17 日的 IOP#2 個案的密集觀測資料，主要是使用 CP-4 與 TOGA 這兩座都卜勒雷達的觀測資料來進行以下的分析與探討，關於這兩座雷達，CP-4 雷達位於外埔海灘，標高 9 公尺，而 TOGA 雷達位於清泉崗，標高 206 公尺，其兩座雷達的特徵如表 3.1 所示。

表 3.1 CP-4 及 TOGA 兩座都卜勒雷達的位置及特徵。

雷達名稱 特 徵	CP-4	TOGA
Height (m)	9	206
Latitude (°)	24.64 N	24.28 N
Longitude (°)	120.76 E	120.62 E
Wavelength (cm)	5.94	5.38
Maximum velocity (ms ⁻¹)	+ 17.16	+ 16.65
Maximum range (Km)	120	120

將單雷達反演風場結果與雙雷達合成風場結果相比較，在分析範圍中以 CP-4 雷達為原點，TOGA 雷達則位於 (-14.66, -41.25) 公里處，分布位置如圖 3.1 所示。

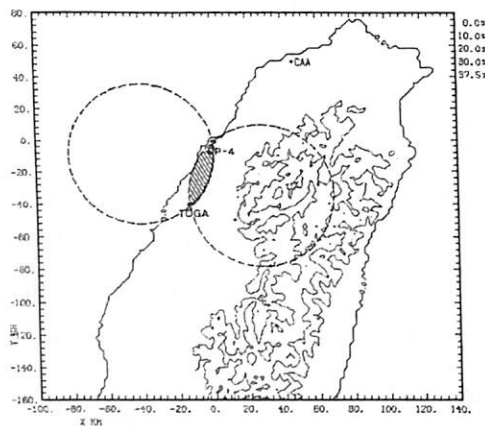


圖 3.1 TAMEX 期間台灣西北部三座都卜勒雷達的分布位置圖，由北到南分別為 CAA、CP-4 和 TOGA。本文採用 CP-4 及 TOGA 兩座都卜勒雷達的觀測資料，而圖中的斜線區用以表示基線區，為不利雙雷達合成的區域。

本文選取 5 月 17 日凌晨零點到一點這段時間中 CP-4 與 TOGA 兩座都卜勒雷達每間隔約 3~4 分鐘掃描一次的觀測資料，來進行單雷達的

風場反演，並與雙雷達的合成風場相對照，其中的分析區域主要是利用系統分布的範圍來做依據，由回波強度的圖中 (圖 3.2) 可以看到，分析範圍是以 CP-4 雷達為原點，x 方向從 -70 到 -20 公里，y 方向從 -30 到 30 公里。

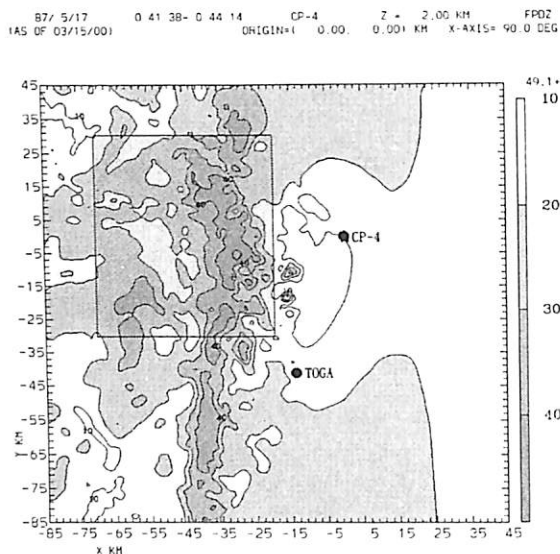


圖 3.2 IOP#2 個案 5 月 17 日 CP-4 雷達觀測時間 00:41:38~00:44:14 LST 的回波強度圖。其方塊表示本文所分析的範圍，圓點分別表示 CP-4 和 TOGA 這兩座雷達的位置。

四、結果分析

4.1 反演方法的測試

為了讓單雷達的反演結果能有比對的資料，必須進行雙都卜勒雷達的風場合成。本文選取 IOP#2 個案中 CP-4 雷達掃描時間為 00:41:38~00:44:14 以及 TOGA 雷達掃描時間為 00:41:48~00:44:59 的觀測資料來做幾何上的風場合成，合成範圍是以 CP-4 雷達為原點，x 方向從 -70 到 -20 公里，y 方向從 -30 到 30 公里，垂直高度取 0 到 15 公里，格點距均為 1 公里。在此為了讓 CP-4 雷達所反演出來之結果有時間

較接近的比對資料，選擇其合成時間為 00:42:00，圖 4.1 係利用雙雷達資料經過幾何上的合成之後，得到高度 2 公里處的風場向量圖，可以看到在圖中 x = -35 公里處有一呈南北走向的輻合帶。

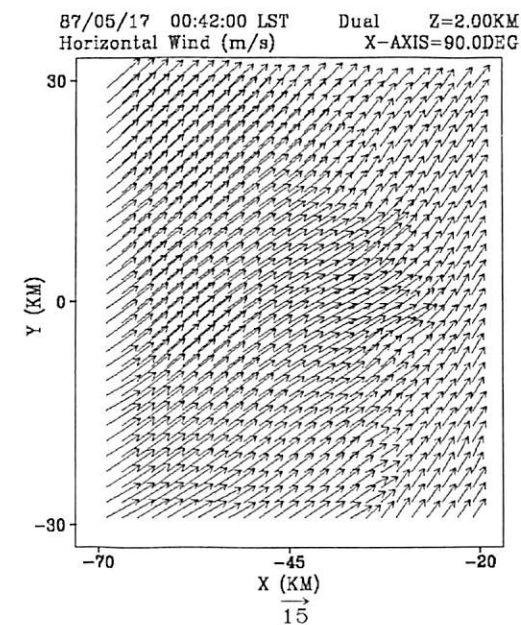


圖 4.1 5 月 17 日 00:42:00 LST 高度 2 公里處之雙雷達合成風場圖。

對於 IOP#2 個案所做的單雷達風場反演，其分析的範圍以 CP-4 雷達為原點，x 方向從 -70 到 -20 公里，y 方向從 -30 到 30 公里，高度層取 1、2、3 公里等三層，格點距均為 1 公里，來反演中間層高度 2 公里的風場。本節是使用 CP-4 雷達掃描時間分別為 00:38:56~00:41:33、00:41:38~00:44:14、00:44:19~00:46:55 這三筆間隔約 3 分鐘的觀測資料，利用本文所提出的反演技術來進行反演。另外，由於反演過程中對於邊界的約束力並不如內部格點那麼強烈，因此以下對於單雷達反演結果與雙雷達合成結果兩者間的定量分析，其所取的範圍皆是在經過反演之後的區域再往內縮一格，同時為了使

圖示清楚，在繪圖時皆將格距放大為 2 公里。

圖 4.2 則是利用 CP-4 雷達的觀測資料所進行之兩組實驗的反演風場結果。將此兩組實驗的反演結果與雙雷達的合成結果 (圖 4.1) 互相比較，之間的相似性是很明顯的，且輻合帶的位置確實有被反演出來。

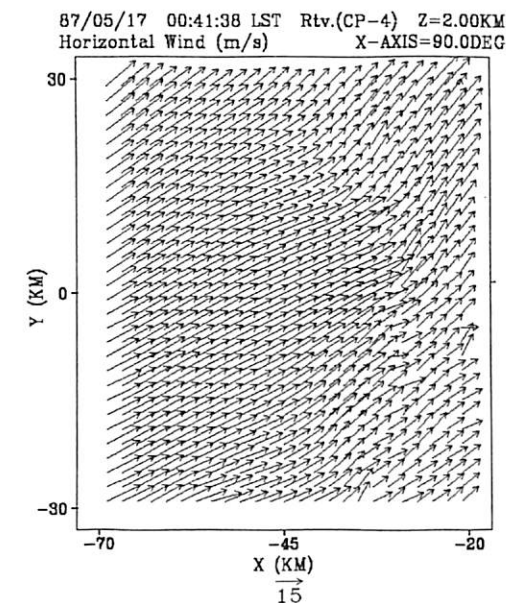


圖 4.2 利用 CP-4 雷達觀測資料反演出時間為 5 月 17 日 00:41:38 LST 的水平風場圖。

4.2 影響反演方法的因素

對於同一個天氣系統，在不同雷達位置所觀測到的徑向風大小也就不同，此時可能有三種情況：第一為觀測的徑向風大於未知的切向風；第二為觀測的徑向風與未知的切向風差不多；第三為觀測的徑向風小於未知的切向風。而當已知的徑向風分量較大時，是否代表可以提供較多的訊息，使得反演的結果會較好，反之當未知的切向風分量較大時，反演的結果是否就較差。

由於每一座雷達的特性不同，導致雷達彼此之間的觀測資料品質有所差異，如表 3.1 中關

於 CP-4 和 TOGA 兩座都卜勒雷達的特徵，其中 CP-4 雷達的性能就比 TOGA 雷達好，在此爲了對於不同雷達位置對於反演所造成的影響做進一步的分析，必須先解決因爲資料品質可能造成的影響。本文利用 CP-4 和 TOGA 兩座都卜勒雷達的觀測資料來進行雙雷達的幾何合成，得到三維風場 (u, v, w) ，再求取其投影到選定的雷達位置之徑向風資料，試圖模擬其雷達的觀測資料，如此模擬雷達就包含了 CP-4 和 TOGA 兩座雷達的特性，解決了雷達資料品質差異可能造成的影響。

對於雙都卜勒雷達的風場合成，是利用 NCAR 所發展出的 CEDRIC 這套軟體來進行，同時爲了進行單雷達的風場反演，重複做了三組時間分別爲 00:40:00, 00:43:00, 00:46:00 的三維風場 (u, v, w) ；在此是選取 CP-4 雷達回波強度的觀測資料，而以內插方式得到以上三組時間的回波場資料。其單雷達掃描時間與進行雙雷達合成的時間表如下：

CP-4 雷達	TOGA 雷達	雙雷達合成
(1). 00:38:56-00:41:33	00:38:29-00:41:41	00:40:00
(2). 00:41:38-00:44:14	00:41:48-00:44:59	00:43:00
(3). 00:44:19-00:46:55	00:45:29-00:48:39	00:46:00

由推導球坐標 (r, θ, ϕ) 與笛卡爾坐標 (x, y, z) 之間的關係中，可以得知徑向風 (V_r) 、切向風 (V_a) 與三維風場 (u, v, w) 之間的關係爲：

$$\begin{cases} V_r = \frac{ux + vy + wz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \\ V_a = \frac{uy - vx}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (4.1)$$

利用雙雷達合成得到的三維風場 (u, v, w) ，

經由上面(4.1)式中與徑向風的關係式，將其投影到所模擬的雷達位置，得到高度層爲 1、2、3 公里等三層的徑向風場資料，再結合回波資料，便可以得到其模擬雷達的觀測資料，在此共模擬了 11 座雷達的觀測資料，再將其引入本文所提出的單雷達風場反演技術，反演出時間爲 00:43:00 高度 2 公里處的風場，來與雙雷達合成結果相比較，針對以上的問題進行分析與探討。而模擬雷達位置的選取是以分析區域之中心點 $(-45.0, 0.0)$ 當做圓心，半徑 45 公里繞半個圓，每間隔角度 18 度取一座雷達，雷達標高皆取在 0 公尺，其雷達位置分布的示意圖如圖 4.3 所示，則 Radar1 位於 $(-45.5, 45.0)$ 的位置，Radar2 位於 $(-31.09, 42.80)$ 的位置，Radar3 位於 $(-18.55, 36.41)$ 的位置，Radar4 位於 $(-8.59, 26.45)$ 的位置，Radar5 位於 $(-2.20, 13.91)$ 的位置，Radar6 位於 $(0.0, 0.0)$ 的位置，Radar7 位於 $(-2.20, -13.91)$ 的位置，Radar8 位於 $(-8.59, -26.45)$ 的位置，Radar9 位於 $(-18.55, -36.41)$ 的位置，Radar10 位於 $(-31.09, -42.80)$ 的位置，Radar11 位於 $(-45.0, -45.0)$ 的位置。

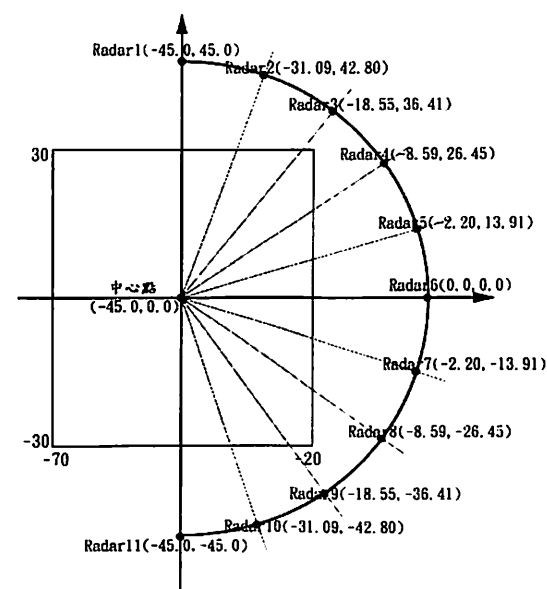


圖 4.3 11 座模擬雷達的位置分布圖。以分析區域的中心點 $(-45.0, 0.0)$ 爲圓心畫半圓，每隔 18 度選取一點作爲雷達位置。

表 4.1 爲 Radar1 到 Radar11 共 11 座模擬雷達所反演出之風場與雙雷達合成風場之間的定量分析比較結果，其中主要是針對徑向風分量和切向風分量進行討論。以下首先對於這 11 座模擬雷達中未知的切向風分量所佔之比例進行分組，共分作三組分別爲切向風分量較小的情況，切向風分量和徑向風分量兩者接近的情況，以及切向風分量較大的情況。利用分析區域中切向風分量平均值和徑向風分量平均值兩者間的比值，以表示其中切向風分量所佔的比例，如下式所示：

$$AoR = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum V_{\text{切向}}^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum V_{\text{徑向}}^2}} \quad (4.2)$$

其計算結果如表 4.1 中的第 6 欄所示，依反演結果求得的 AoR 值來將 11 座模擬雷達分爲三

個群組：(A).當 $AoR < 0.7$ 時，表示切向風分量較小的情況，包括有 Radar4、Radar3、Radar5 和 Radar2；(B).當 $0.7 < AoR < 1.4$ ，表示切向風分量與徑向風分量兩者接近的情況，包括有 Radar6、Radar1、Radar7 和 Radar11；(C).當 $AoR > 1.4$ 時，表示切向風分量較大的情況，包括有 Radar8、Radar10 和 Radar9。

由表 4.1 中的第 6 欄，利用雙雷達結果得到的 AoR 值來將這 11 座模擬雷達進行排序，並分爲三個群組來討論，可以注意到其反演結果進行排序所得到的結果與雙雷達結果有相當的一致性，這可以提供一項很重要的訊息，得知在所處的雷達位置上，是切向風分量較小或大的情況。對於雷達時務操作人員，在不知道真實風場的分布情況下，是可以根據反演的結果來判斷切向風分量是小於或大於徑向風分量。以下則是分析在此三個群組情況下的反演結果，同時爲了方便比較，選出其中切向風分量最小的 Radar4 來代表切向風分量較小的情況，而 Radar7 代表徑向風分量和切向風分量兩者最接近的情況，以及切向風分量最大的 Radar9 來代表切向風分量較大的情況，利用此三組模擬雷達的結果來做進一步的探討。而在 IOP#2 個案中的天氣系統是以每秒 16.5 公尺的速度由 250 度之方向移動，圖 4.4 爲雙雷達合成風場減掉系統移速後的結果，可以更清楚的看到系統內部結構有一條呈南北走向的輻合帶。

表 4.1 11 座模擬雷達與雙雷達間之於徑向風分量和切向風分量的比較結果。

			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
			$\bar{V}_{\text{徑向}}$ (ms^{-1})	$SCC_{\text{徑向}}$	$\bar{V}_{\text{切向}}$ (ms^{-1})	$SCC_{\text{切向}}$	$\frac{m_{\Sigma Ra(0.6-1.2)}}{N}$	AoR
(A) 切向風分量較小	Radar4	Rtv.	17.963	0.986	7.625	0.900	0.434	0.424
		Dual	18.185		6.945			0.382
	Radar3	Rtv.	17.917	0.985	7.504	0.850	0.421	0.419
		Dual	18.088		7.182			0.397
	Radar5	Rtv.	16.783	0.990	9.138	0.937	0.617	0.544
		Dual	17.056		9.390			0.551
	Radar2	Rtv.	16.274	0.991	8.860	0.824	0.520	0.544
		Dual	16.391		10.502			0.641
(B) 兩者接近	Radar6	Rtv.	14.710	0.993	10.354	0.919	0.706	0.704
		Dual	14.979		12.445			0.831
	Radar1	Rtv.	13.280	0.993	11.200	0.651	0.639	0.843
		Dual	13.323		14.203			1.066
	Radar7	Rtv.	11.925	0.995	11.614	0.878	0.711	0.974
		Dual	12.157		15.219			1.252
	Radar11	Rtv.	11.292	0.994	12.535	0.871	0.732	1.110
		Dual	11.310		15.862			1.402
(C) 切向風分量較大	Radar8	Rtv.	8.884	0.997	13.018	0.704	0.743	1.465
		Dual	9.066		17.246			1.902
	Radar10	Rtv.	8.205	0.997	13.581	0.891	0.845	1.655
		Dual	8.282		17.638			2.130
	Radar9	Rtv.	6.995	0.997	13.633	0.712	0.845	1.949
		Dual	7.183		18.114			2.522

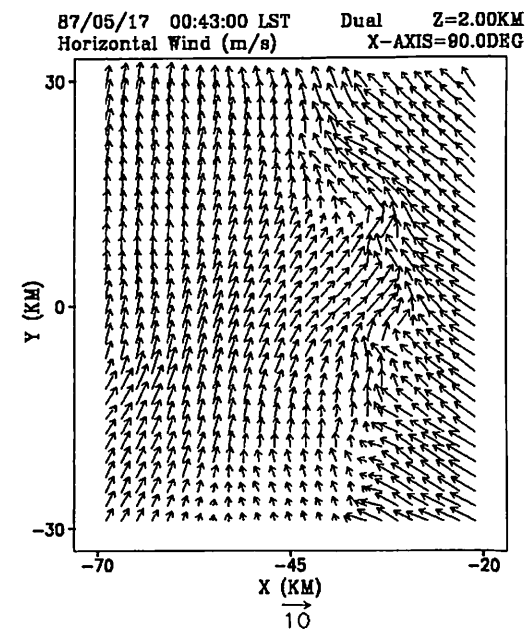


圖 4.4 5 月 17 日 00:43:00 LST 高度 2 公里處之雙雷達合成風場減掉系統移速後的結果。

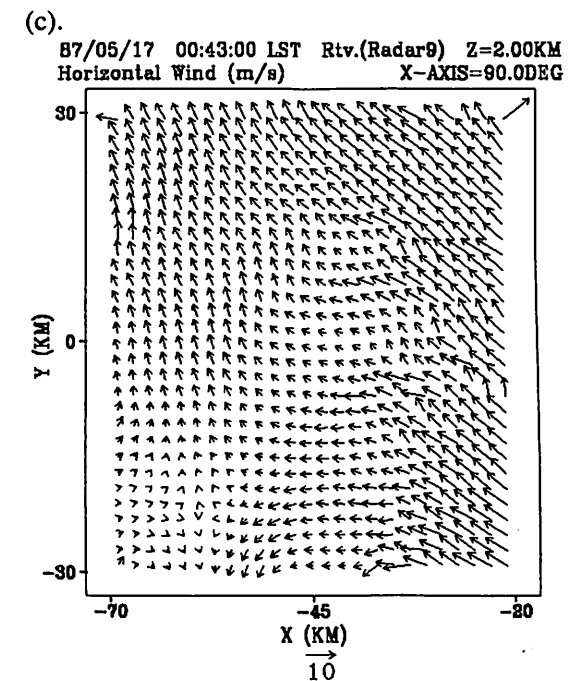
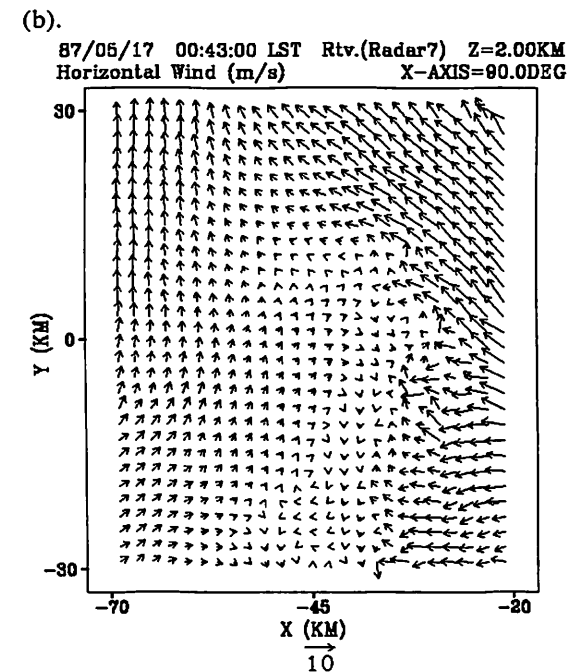
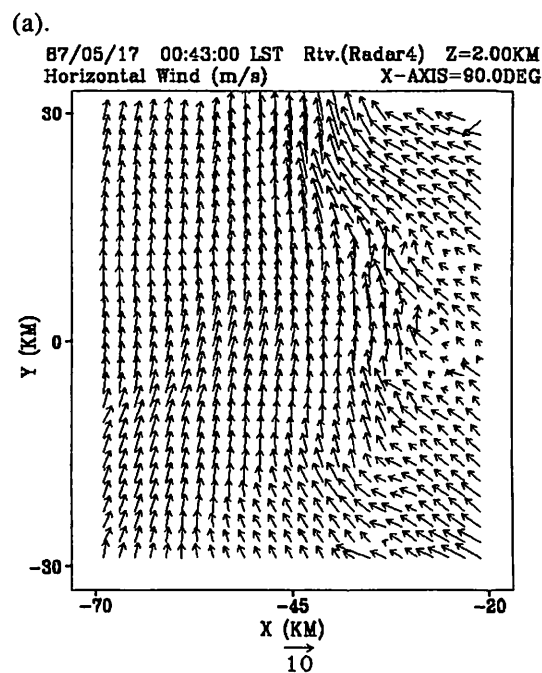


圖 4.5 3 座模擬雷達反演風場減掉系統移速之後的結果。(a).Radar4 的結果；(b).Radar7 的結果；(c).Radar9 的結果。

圖 4.5 則為三座模擬雷達所反演出之風場扣掉系統移速後的結果，(a)為 Radar4 的結果，(b)為 Radar7 的結果，(c)為 Radar9 的結果。將此三座模擬雷達所反演出的風場圖來與雙雷達風場相比較，分析其內部結構中輻合帶之位置，其中以 Radar4 所反演出來的結果與雙雷達結果最相似；其次是 Radar7 所反演出的結果，雖然還是可以看出其輻合帶的位置，但是其輻合帶附近的風場有些許雜亂的現象；最後是 Radar9 所反演出來的結果，其輻合帶相當不明顯，且在圖的下方部份區域中，原本應為偏南風的分量，卻出現有東北風的情形。由以上反演風場中輻合帶的表現，可以看出代表切向風分量較小的 Radar4，其反演結果有較好的表現，而當切向風分量愈來愈大時，反演結果有較差的情形。

五、結論與討論

在本研究中使用移動參考坐標法從事單都卜勒雷達的風場反演，選取 1987 年 TAMEX 實驗期間 IOP#2 個案，主要是利用 CP-4 和 TOGA 兩座都卜勒雷達的觀測資料來對此反演法進行測試以及問題的探討。

由於每一座雷達的特性不同，所造成的資料品質也就不同，為了對影響反演優劣的因素做進一步的探討，必須先解決這個問題，本文利用雙雷達進行幾何合成以得到三維風場，再將其投影到選定之模擬雷達的位置上，來求得徑向風場當作它的觀測資料，則此觀測資料便包含兩座雷達的特性，使得以下對於雷達位置的不同所造成的影響所做的分析能處在相同的起點，本文共模擬了 11 座雷達的資料進行分析與討論。由 4.2 節的分析結果顯示，單雷達反演

結果是會受到雷達的位置而有所不同。相對於分析區域，若是雷達因所在的位置而使得未知的切向風分量小於可觀測得到的徑向風分量，反演出來的風場普遍有較好的結果；反之，在未知的切向風分量較大的情況下，其反演出來的風場結果有較大的誤差量。對於雷達實務操作人員，在不知道真實風場的分布情形下，究竟未知的切向風分量小或大於已知的徑向風分量，是可以根據反演的結果判斷出來的，而在切向風分量較小的情況下，反演結果普遍是可信的，但是當切向風分量較大時，反演出的切向風分量有較大低估的現象，在原本切向風分量就很大的情況下，低估的量又較大，使得反演出的風場結果並不理想，因此必須注意此種情況下的反演結果可能不太正確。

在後續的研究中，希望能對於其它不同類型的天氣系統進行測試，利用各式各樣的風場配置以及各種變化快慢的系統之雷達觀測資料來測試此反演法，能再進一步的了解此反演方法的特性，以便在雷達網連的建立後，對於即時天氣分析可以提供進一步的資訊。

參考文獻

- 張文綺，1999：1996 年賀伯颱風之單都卜勒雷達風場反演實驗—移動坐標法。國立中央大學碩士論文，73pp。
- 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., 1999: Single radar recovery of cross-beam wind components using a modified moving frame of reference technique. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 1003-1016.
- Qiu, C.-J., and Q. Xu, 1996: Least squares retrieval of microburst winds from single-Doppler radar

data. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1132-1144.

Xu, Q., C.-J. Qiu, H.-D. Gu, and J.-X. Yu, 1995: Simple adjoint retrievals of microburst winds from single-Doppler radar data. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1822-1833.

Zhang J., and T. Gal-Chen, 1996: Single-Doppler wind retrieval in the moving frame of reference, *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2609-2623.