

單一都普勒雷達鋒面之即時觀測 —— VAD 方法的應用

楊健生

魏運寶

交通部民航局飛航服務總台氣象中心
中正氣象台

(中華民國八十年六月一日收稿；中華民國八十年九月七日定稿)

摘 要

利用單一都卜勒氣象雷達之徑向風速，可使用 VAD 之方法估計各不同高度層之水平風場，同時求出各層之輻散場及變形場。為滿足作業之及時需求，使用多重迴歸最小平方法，求解風場展開之富氏係數，可節省寶貴時間，同時亦適用於雷達觀測資料量較少情況下（方位角上無資料區間不大於八十度或資料密度在六十度區域內不低於五個取樣資料下皆可適用）。本文以 1988 年 5 月 22 日梅雨過境之天氣型態詳細說明當梅雨鋒通過中正機場前後之水平風場、輻散場及變形場在垂直方向隨時間之變化情形。此種資訊將有利於短程與及時天氣預報的作業。

關鍵詞：速度方位顯示、空域極座標掃描、脈波頻率、譜和分析、多重迴歸最小平方法、定高面顯示

一、前 言

雖然單一都卜勒氣象雷達僅能偵測到徑向風速資料，但於近十多年之發展研究中諸如美國國家大氣研究中心（NCAR, National Center for Atmospheric Research）在各地所作實驗研究計畫（Wilson, 1980）及瑞典氣象水文研究所（SMHI, Swedish Meteorological and Hydrological Institute）於作業應用研究發展上（Persson, 1985）皆指出單一都卜勒氣象雷對許多天氣現象皆可提供極為重要及有效的觀測資料；預報人員並可藉由徑向風場特徵（Signature）之辨識能力（Browning & Wood, 1982）獲得大氣風場結構的即時預報（Nowcasting）資料，此外目前亦有多種方法及技術於發展及改良中可將單都卜勒徑向風速轉換

成大氣風場運動特性，如 VAD（Velocity Azimuth Display）技術（Lhermittle & Atlas, 1961; Browning & Wexler, 1968）於大範圍降水內可求得風向、風速、輻散場及變形場等風場的特性參數，由於此種分析技術可快速有效提供回波區域內詳細風場結構資料，因此對以往傳統觀測儀器於時效及空間上之資料不連續勢必可藉此種即時辨識能力而加以改進。本文主要目的是希望利用空域掃描極座標（Polar Volume Scan）徑向風場資料以 VAD 技術自動分析台灣北部鋒面系統特性參數，並經由即時彩色顯示系統顯示出鋒面系統風場參數之水平、垂直分布及時間序列高度剖面以輔助及增強直角座標徑向風場顯示系統之不足，並希望透過此種即時自動分析系統（Real Time Automatic Analysis System）之建立以冀於中正國

際機場單一都卜勒氣象雷達作業應用上對短程 (Short Range) 及即時 (Nowcast) 預報鋒面系統能提供即時觀測資料分析之參考。

二、資料蒐集與處理

中正機場都卜勒氣象雷達為一線上作業之雷達系統，波長5.3cm，波束寬0.86°。在都卜勒狀態下，解析度為一公里，在900Hz與1200Hz之PRF (Pulse Repetition Frequency) 交替使用下，最高可測風速±48.0m/s (負值表示風吹向雷達，正值表示風吹離雷達)；由於大部分天氣系統的風速都在此範圍內，因此風速摺返 (Folding) 的現象較不易發生。在即時系統中，採用雙PRF (Dual PRF) 之技術，不但可節省大量時間 (因速度解析能力提高，不需作Unfolding之計算)，而且亦可使風場回波圖更易判別。

本文使用中正機場都卜勒氣象雷達於1988年5月22日所偵測到鋒面之資料，雷達的掃瞄策略是每二十分鐘作一次都卜勒掃瞄，而掃瞄仰角則分別為0.5°、1.5°、2.5°、3.5°、4.5°、5.5°、6.5°、7.5°、8.5°、9.5°、10.5°及11.5°共十二層。我們選取了1245LST、1405LST及1645LST三組空域極座標 (Polar Volume) 的資料作較詳細的分析與討論。於1245LST鋒面距雷達西北面約40公里，以每小時19公里之速度向東南移動，1405LST通過機場上空，1645LST到達距雷達東南面約36公里處。在地形方面，中正機場東北東33公里及南南東35公里處有高度超過1000公尺之山脈，為了避免地表對雷達波束的影響以及降低因大氣介質不均勻而使電磁波產生不同折射角度所引起高度變化的誤差，我們取用了半徑30公里以內的資料，以提高資料的可信度。同時因水滴下降速度的不一致及較強垂直風切所造成垂直速度的誤差，我們採用較低的掃瞄仰角 (最大仰角11.5°時，水平風速最大誤差為百分之二，垂直速度可忽略不計)，使誤差降至可接受的範圍內。本文研究重點在短距離之即時預報，垂直剖面圖及高度時間序列圖均採用5公里以下之資料，高度之計算由以下公式可得

$$H = R \times (\sin(E) + R / (2 \times 1.33 \times Re))$$

其中H為海平面高度，R為斜距，E為掃瞄仰角，1.33為雷達波束折射修正常數，Re為地球半徑 (6363公里)。垂直剖面圖分析，高度以100公尺為一單位，風速、風向以VAD的方法求得，其高度與掃瞄仰角、斜距之關係如表一。

表一 高度與掃瞄仰角、斜距關係對照表

Table 1. Elevation, Slant Range & Height Mapping Table

H(Km)	E(Deg)	R(Km)	H(Km)	E(Deg)	R(Km)
0.1	0.5	11	2.6	11.5	13
0.2	1.5	07	2.7	8.5	18
0.3	1.5	11	2.8	11.5	14
0.4	1.5	15	2.9	7.5	22
0.5	1.5	18	3.0	8.5	20
0.6	1.5	22	3.1	10.5	17
0.7	2.5	16	3.2	11.5	16
0.8	2.5	18	3.3	7.5	25
0.9	2.5	20	3.4	11.5	17
1.0	2.5	22	3.5	10.5	19
1.1	3.5	18	3.6	11.5	18
1.2	3.5	19	3.7	10.5	20
1.3	3.5	21	3.8	11.5	19
1.4	3.5	22	3.9	8.5	26
1.5	3.5	24	4.0	9.5	24
1.6	4.5	20	4.1	10.5	22
1.7	3.5	27	4.2	8.5	28
1.8	3.5	29	4.3	9.5	26
1.9	4.5	24	4.4	10.5	24
2.0	4.5	25	4.5	9.5	27
2.1	7.5	16	4.6	10.5	25
2.2	10.5	12	4.7	9.5	28
2.3	6.5	20	4.8	10.5	26
2.4	6.5	21	4.9	10.5	27
2.5	7.5	19	5.0	11.5	25

三、VAD

Lhermittle 和 Atlas (1961) 曾於大範圍降水內利用單一都卜勒氣象雷達以一固定天線仰角雷達波束沿各方位角旋轉一圈，選定固定斜距(Slant Range) 可得到掃瞄圈上徑向風速與方位角關係而求出不同高度之水平風向、風速，此即VAD (Velocity-Azimuth Display) 技術；Browning 及 Wexler (1968) 並利用此種技術對大範圍降水之風場運動特性作譜和分析 (Harmonic Analysis) ，進而求得輻散場及變形場 (圖2) 。因此於一空域掃瞄極座標資料內選定不同仰角和斜距可顯示出不同高度之各風場特性參數垂直剖面，而利用不同掃瞄時間之極座標資料則可得出—時間序列垂直剖面風場結構。VAD 幾何理論式可由圖1(1) 導出雷達顯示徑向風速 V_r 為方位角 β 之函數

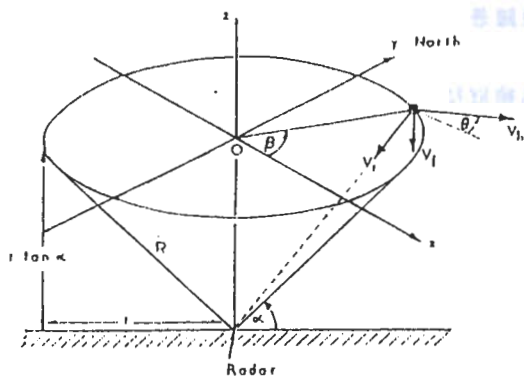


圖1(1) VAD 掃瞄幾何圖—垂直示意圖
(摘自 Browning & Wexler, 1968)

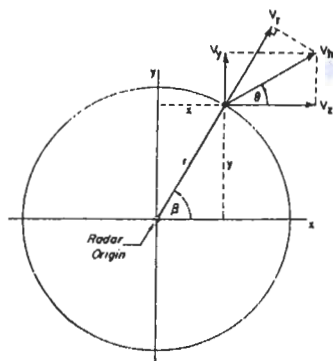


圖1(2) VAD 掃瞄幾何圖—水平示意圖
(摘自 Browning & Wexler, 1968)

$$V_r(\beta) = V_h \cos(\beta - \theta) \cos \alpha + V_f \sin \alpha$$

$$= u \cos \beta \cos \alpha + v \sin \beta \cos \alpha + V_f \sin \alpha \quad (1)$$

其中 α 為天線仰角， θ 為水平風向， V_h 為水平風速， V_f 為下降速度， R 為斜距， r 為水平距離，當 V_r 為負值示吹向雷達， V_f 負值時為下降。

假設回波目標下降速度於雷達掃瞄觀測時在定距離內 (掃瞄圈上) 為水平均勻分布 ($V_f = V_{f_0}$)，以及水平風分量 u, v 亦呈線性變化則由泰勒(Taylor)級數展開可得 x, y 軸方向風速

$$u = u_0 + \frac{au}{ax}x + \frac{av}{ay}y + \text{High order term}$$

$$v = v_0 + \frac{av}{ax}x + \frac{au}{ay}y + \text{High order term}$$

u_0, v_0 為VAD掃瞄圈中心之水平風分量，且由圖1(2)可知 $x = r \cos \beta, y = r \sin \beta$ 代入(1)式可得

$$V_r(\beta) = \frac{r}{2} \cos \alpha \left(\frac{au}{ax} + \frac{av}{ay} \right) + V_{f_0} \sin \beta$$

$$+ u_0 \cos \alpha \cos \beta + v_0 \cos \alpha \sin \beta$$

$$+ \frac{r}{2} \cos \alpha \cos 2\beta \left(\frac{au}{ax} - \frac{av}{ay} \right)$$

$$+ \frac{r}{2} \cos \alpha \sin 2\beta \left(\frac{au}{ay} - \frac{av}{ax} \right) \quad (2)$$

(2)式可用富氏級數(Fourier Series)表示

$$V_r = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\beta + b_n \sin n\beta)$$

Browning 和 Wexler 曾以VAD模擬大氣風場特性作譜和分析 (圖2)，發現於一般情況下甚少超過兩個波動 (WAVE) 現象；因此實際上富氏級數只截取至 $n=2$ 而忽略高次項

$$V_r = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \beta + b_1 \sin \beta + a_2 \cos 2\beta + b_2 \sin 2\beta \quad (3)$$

由(2)式與(3)式比較可得富氏係數(Coefficient)

$$a_0 = \left(\frac{au}{ax} + \frac{av}{ay} \right) r \cos \alpha + 2V_{f_0} \sin \alpha$$

$$a_1 = u_0 \cos \alpha$$

$$b_1 = v_0 \cos \alpha$$

$$a_2 = \left(\frac{au}{ax} - \frac{av}{ay} \right) \frac{r}{2} \cos \alpha$$

$$b_2 = \left(\frac{au}{ay} + \frac{av}{ax} \right) \frac{r}{2} \cos \alpha$$

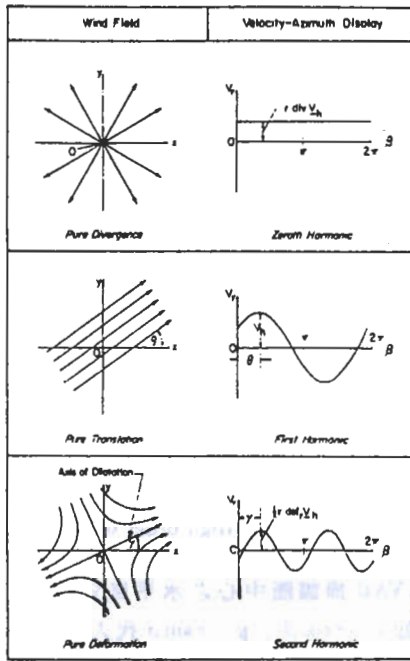


圖2 VAD 譜和分析圖 (摘自 Browning & Wexler, 1968)

(1)Zeroth (2)First (3)Second Harmonic

而風場運動特性則為

$$\text{輻散場 } \text{DivVh} = \left(\frac{au}{ax} + \frac{av}{ay} \right) = \frac{a_0}{r \cos \alpha} - \frac{2V f_0}{r} \tan \alpha \quad (1)$$

$$\text{水平風速 } Vh = (u_0^2 + v_0^2)^{1/2} = \frac{(a_1^2 + b_1^2)^{1/2}}{\cos \alpha}$$

$$\begin{aligned} \text{水平風向 } \theta &= \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{a_1}{b_1}, \quad b_1 < 0 \\ &= \frac{3\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{a_1}{b_1}, \quad b_1 > 0 \end{aligned}$$

$$\text{變形場 } \text{DefVh} = \frac{2(a_2^2 + b_2^2)^{1/2}}{r \cos \alpha}$$

$$\text{伸展軸 } \gamma = \frac{\pi}{4} - \tan^{-1} \frac{a_2}{b_2}, \quad b_2 < 0$$

由於各方位上之徑向風速 (v_{ri}) 與其方位角 (β_i) 可視為一線性關係，因此富氏係數可利用大量 (v_{ri}, β_i) 觀測資料作統計樣本，以多重迴歸最小平方法 (Multiple Regression Least Square Method) 求得；如 i 為方位角上之觀測取樣、 N 為總取樣數、 v_{ri} 為理論值、 q 為實際觀測值與理論值之平方差則

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_0}{2} N + a_1 \sum_{i=1}^N \cos \beta_i + b_1 \sum_{i=1}^N \sin \beta_i + a_2 \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i + b_2 \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i &= \sum_{i=1}^N v_{ri} \\ \frac{a_0}{2} \sum_{i=1}^N \cos \beta_i + a_1 \sum_{i=1}^N \cos \beta_i^2 + b_1 \sum_{i=1}^N \sin \beta_i \cos \beta_i + a_2 \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i \cos \beta_i + b_2 \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i \cos \beta_i &= \sum_{i=1}^N v_{ri} \cos \beta_i \\ \frac{a_0}{2} \sum_{i=1}^N \sin \beta_i + a_1 \sum_{i=1}^N \cos \beta_i \sin \beta_i + b_1 \sum_{i=1}^N \sin \beta_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i \sin \beta_i + b_2 \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i \sin \beta_i &= \sum_{i=1}^N v_{ri} \sin \beta_i \\ \frac{a_0}{2} \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i + a_1 \sum_{i=1}^N \cos \beta_i \cos 2\beta_i + b_1 \sum_{i=1}^N \sin \beta_i \cos 2\beta_i + a_2 \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i \cos 2\beta_i &= \sum_{i=1}^N v_{ri} \cos 2\beta_i \\ \frac{a_0}{2} \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i + a_1 \sum_{i=1}^N \cos \beta_i \sin 2\beta_i + b_1 \sum_{i=1}^N \sin \beta_i \sin 2\beta_i + a_2 \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i \sin 2\beta_i + b_2 \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i^2 &= \sum_{i=1}^N v_{ri} \sin 2\beta_i \end{aligned} \right\} (5)$$

以 Cramer's Rule 求解聯立方程式 (5) 並利用 CHIO 方法求解矩陣

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} N & \sum_{i=1}^N \cos \beta_i & \sum_{i=1}^N \sin \beta_i & \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i & \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i \\ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \cos \beta_i & \sum_{i=1}^N \cos \beta_i^2 & \sum_{i=1}^N \sin \beta_i \cos \beta_i & \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i \cos \beta_i & \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i \cos \beta_i \\ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sin \beta_i & \sum_{i=1}^N \cos \beta_i \sin \beta_i & \sum_{i=1}^N \sin \beta_i^2 & \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i \sin \beta_i & \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i \sin \beta_i \\ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i & \sum_{i=1}^N \cos \beta_i \cos 2\beta_i & \sum_{i=1}^N \sin \beta_i \cos 2\beta_i & \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i^2 & \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i \cos 2\beta_i \\ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i & \sum_{i=1}^N \cos \beta_i \sin 2\beta_i & \sum_{i=1}^N \sin \beta_i \sin 2\beta_i & \sum_{i=1}^N \cos 2\beta_i \sin 2\beta_i & \sum_{i=1}^N \sin 2\beta_i^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N v_{ri} \\ \sum_{i=1}^N v_{ri} \cos \beta_i \\ \sum_{i=1}^N v_{ri} \sin \beta_i \\ \sum_{i=1}^N v_{ri} \cos 2\beta_i \\ \sum_{i=1}^N v_{ri} \sin 2\beta_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 q &= \sum_{i=1}^N (v_{ri} - v'_{ri})^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N \left(v_{ri} - \frac{a_0}{2} - a_1 \cos \beta_i - b_1 \sin \beta_i \right. \\
 &\quad \left. - a_2 \cos 2\beta_i - b_2 \sin 2\beta_i \right)^2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

假設實際觀測值與理論值之誤差期望值為零，因此對(4)式中各富氏係數作微分並令結果為零，則可解得下列線性聯立方程組

因此當富氏係數求出後，對某一特定方位角理論徑向風速值亦可由(3)式求得，而風場運動各參數值則可由富氏係數中求得。然利用此方法可省去繁瑣且耗時之資料內插亦可使用於觀測資料量較少情況下，因此較能符合即時作業應用上之需求，而觀測資料上取樣數量多寡與分布情形亦直接影響到各參數值計算之精確度，以此自動分析系統於發展測試應用中統計其安全適用性於方位角上無資料區間不大於八十度或資料密度在六十度區域內不低於五個取樣資料下皆可適用；此外在應用VAD技術時是假設垂直速度對水平上而言是均質的以及雷達觀測範圍內之風場是水平均質性，但是實際上下降速率於水平上的非均勻分布、天線仰角誤差、回波反射率之垂直非均質性及地表對雷達波束阻擋均會影響VAD之精確性，而這些誤差可經由選擇利用低仰角及近距離之資料而減低至最低程度(Browning & Wexler)。

四、結果與討論

本文所選取分析個案為1988年5月22日冷鋒過境之天氣型態，圖3所示為該個案0000UTC地面綜觀天氣圖及850毫巴、700毫巴、500毫巴高空天氣圖，地面天氣圖之氣旋中心位於日本九州南方，冷鋒由此低壓中心向西南延伸經台灣北端至華南沿岸呈東北東—西南西走向並向東南移動；850毫巴天氣圖氣旋中心位於日本九州北部伴隨之冷鋒及鋒面帶濕區由華南漸向東南移出，台灣地區則處於西南風盛行之暖區，而西南風最大強風軸亦由華南東移至台灣海峽上空。圖四則為中正機場都卜勒氣象雷達所偵測到500公尺高度之定高面平面(CAPPI)徑向風場顯

示圖，由圖中之零值等徑向風速線(白色)及正(暖色系)負(冷色系)等徑向風速分布可看出於1245LST(圖4(1))鋒面距離雷達北方約35公里而由雷達所測得中正機場0.5公里高度之西南風約達23m/s、於風變線後之北風分量則約為12m/s，而於1405LST(圖4(2))徑向風速顯示圖中之零值等徑向風速線則為東北—西南及西北—東南走向，且呈“X”型可明顯看出鋒面輻合帶正位於中正機場由顏色標尺並可輕易讀出鋒後風速約15m/s，表二為中正機場地面觀測記錄於1407LST風向西南風突轉為北風分量、風速則劇減爾後突增、雲幕降低以及溫度與露點漸顯著下降和氣壓逐漸上升，顯示冷鋒鋒面於該時正通過中正機場；而於1645LST(圖4(3))鋒面則南移至新竹以南雷達測得中正機場500公尺之東北風為15m/s，且冷空氣厚度增為1.5公里(參後VAD垂直分析)圖4(4)為同一時間高度2.5公里CAPPI徑向風速分布圖顯示該層仍為西南氣流，風速為18m/s

1. 水平分析

圖5(1)所示為利用VAD技術以仰角3.5度、斜距8公里所求得高度0.5公里之風速方位顯示圖，其時間、高度則與圖4-1相同，圖中x軸代表方位、y軸為徑向風速、紅點為雷達實際觀測值分布、藍線為理論值分布、紅線為只有變形參數值之分布、黑線則為理論值減去變形參數值之分布。理論上於一均勻大範圍降水內使用VAD技術所求得之最大負值(吹向雷達)與最大正值(離雷達)徑向風速之間方位差距應為180度且與零值徑向風速方位差為90度，由圖中理論值所求得最大正、負徑向風速之方位角為45度及225度、零徑向風速方位角為137度與315度，而其中於方位角137度之零徑向風速與理論上產生順時鐘兩度差異此乃由於雷達東南方山脈地形對西南氣流所造成之影響導致，此種現象於水平高度較高或北風分量時皆不存在(參圖5(3)、(4))而此種對稱關係於雷達實際觀測值分布上亦相當配合，因此利用第三節中所述之方法可求得該高度之風向理論值為225度、水平風速23m/s。

圖5(2)亦以仰角3.5度、斜距8公里所求得0.5公里高度之風速方位顯示圖，而時間則為1405LST，

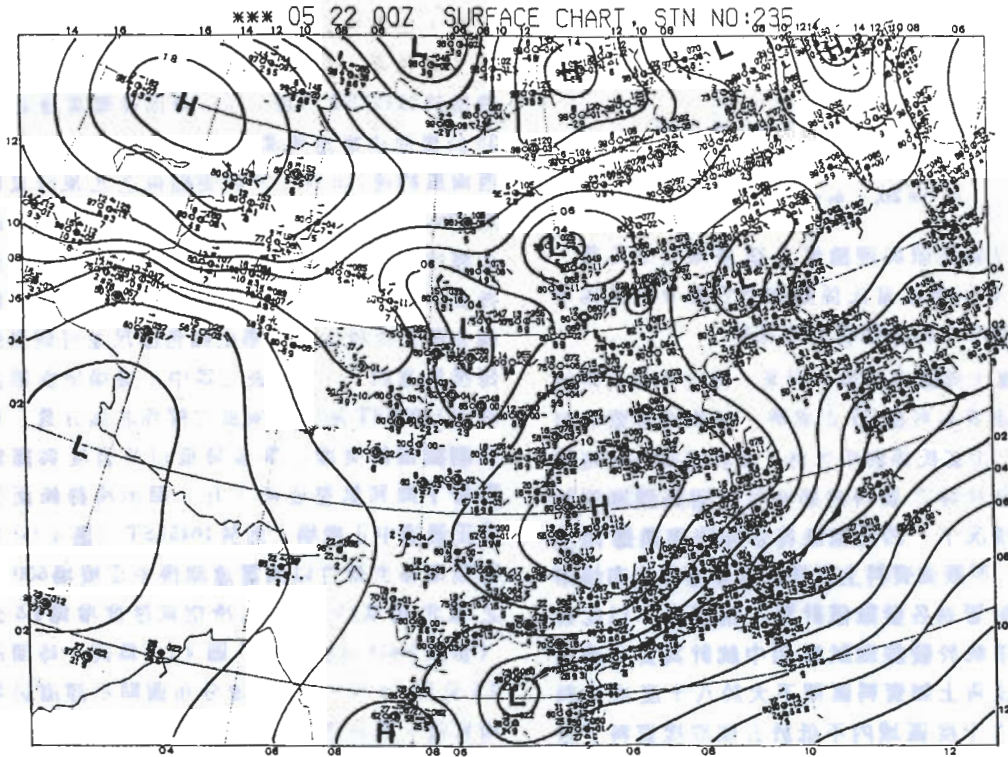


圖3 1988年5月22日0000UTC天氣圖(1)地面天氣圖

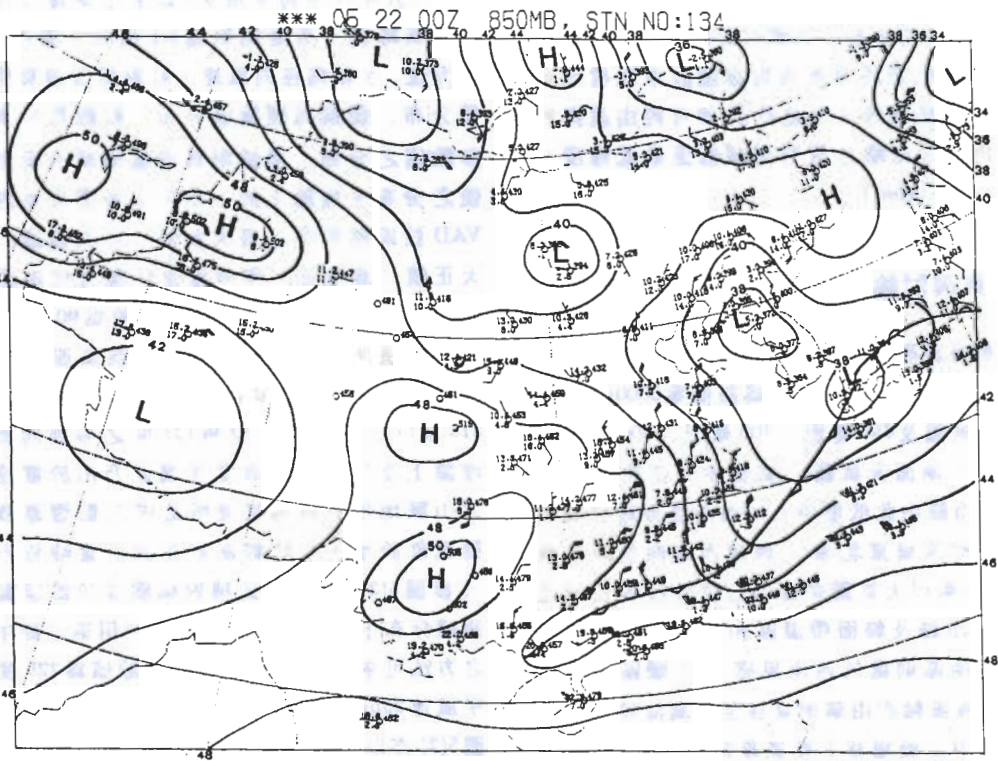


圖3 1988年5月22日0000UTC天氣圖(2)850 HPA

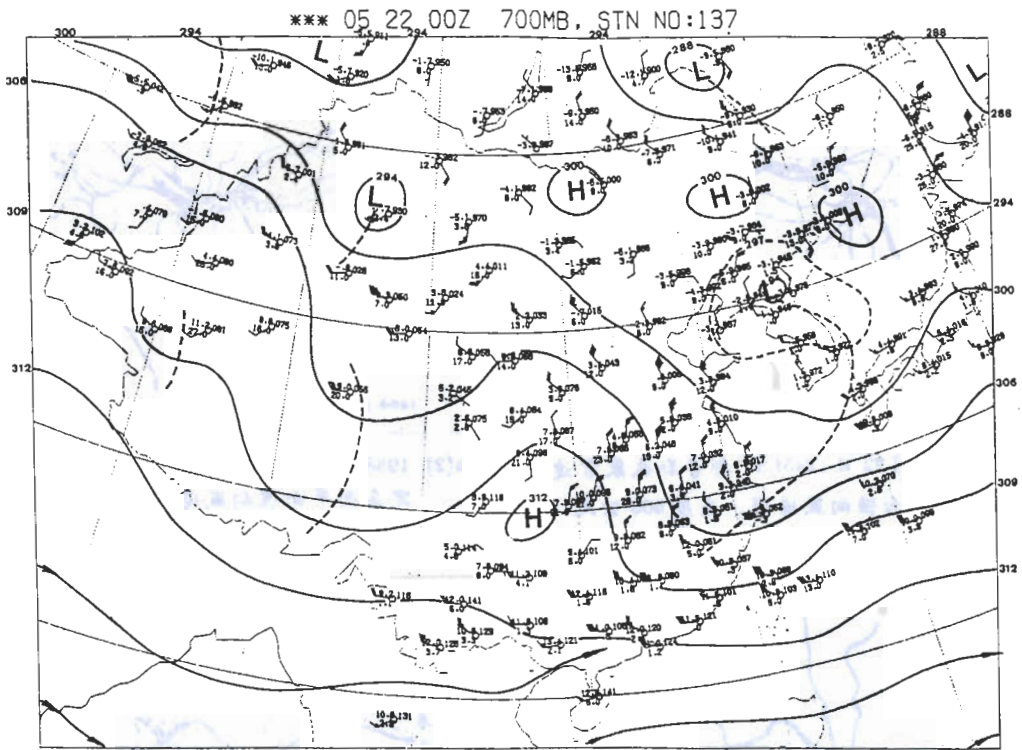


圖3 1988年5月22日0000UTC天氣圖(3)700 HPA

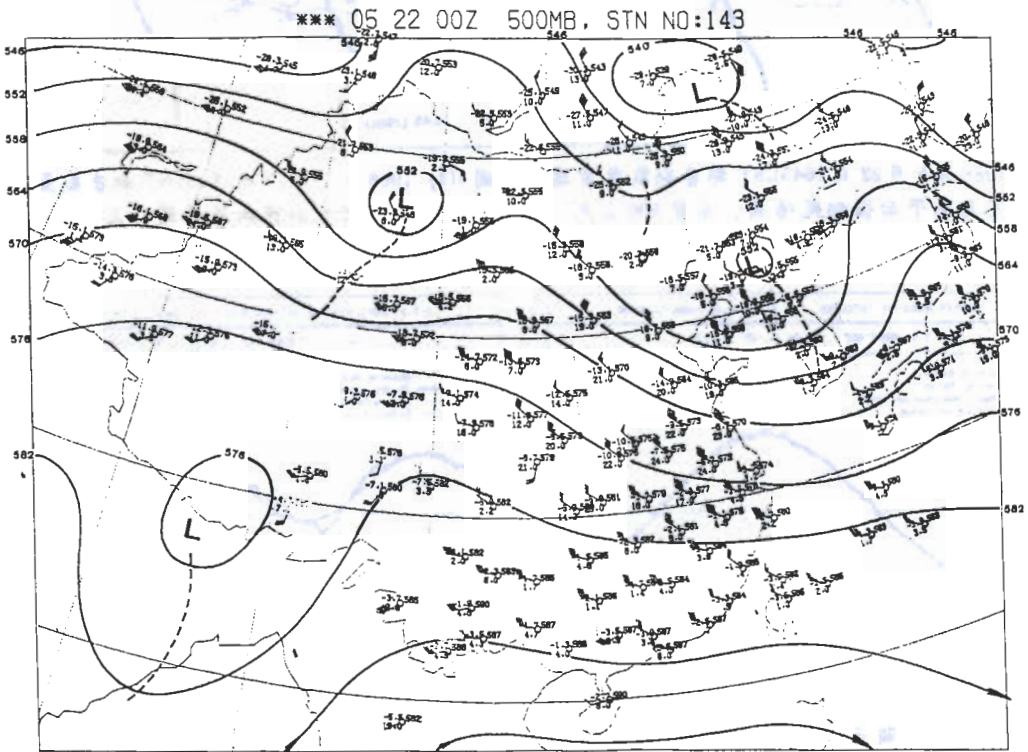


圖3 1988年5月22日0000UTC天氣圖(4)500 HPA

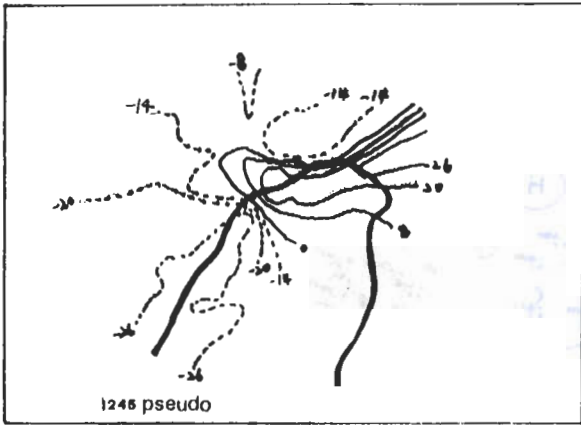


圖4(1) 1988年5月22日1245LST都普勒氣象雷達定高面平面徑向風場圖，高度500公尺

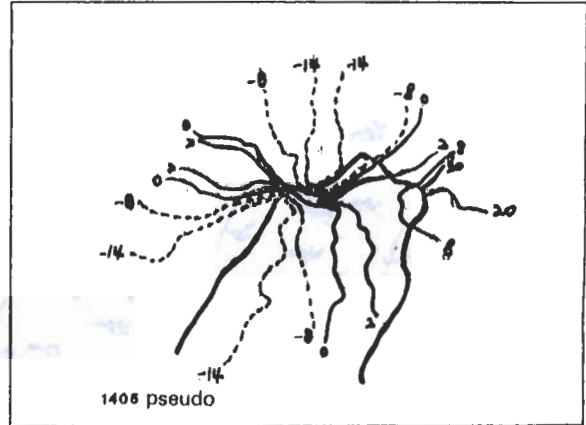


圖4(2) 1988年5月22日1405LST都普勒氣象雷達定高面平面徑向風場圖，高度500公尺

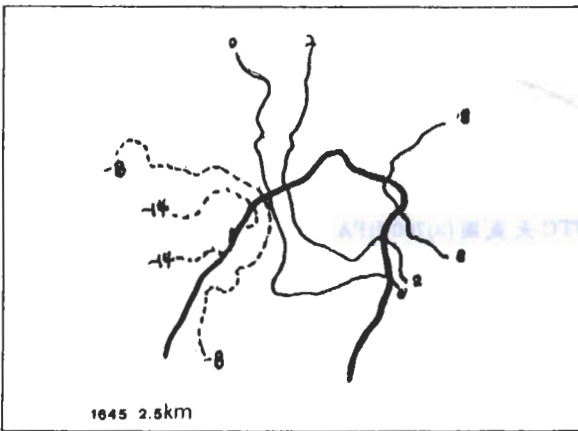


圖4(3) 1988年5月22日1645LST都普勒氣象雷達定高面平面徑向風場圖，高度500公尺

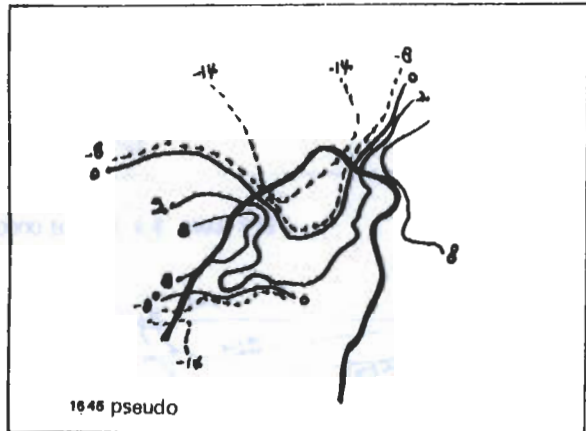


圖4(4) 1988年5月22日1645LST都普勒氣象雷達定高面平面徑向風場圖，高度2.5公里

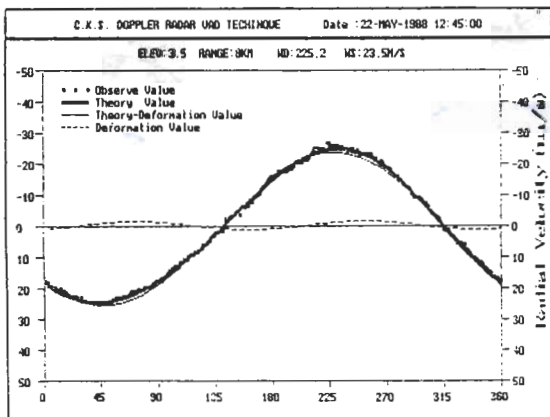


圖5(1) 速度方位顯示圖1245LST仰角3.5度斜距8公里，高度500公尺

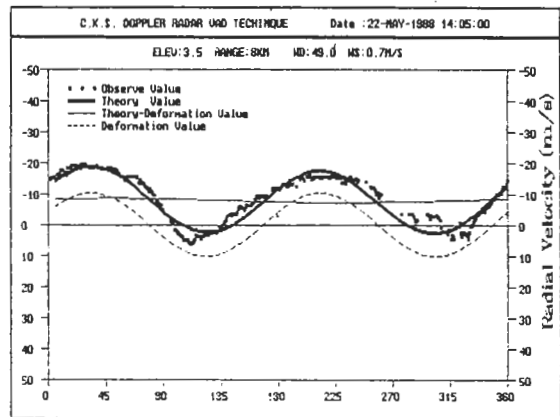


圖5(2) 速度方位顯示圖1405LST仰角3.5度斜距8公里，高度500公尺

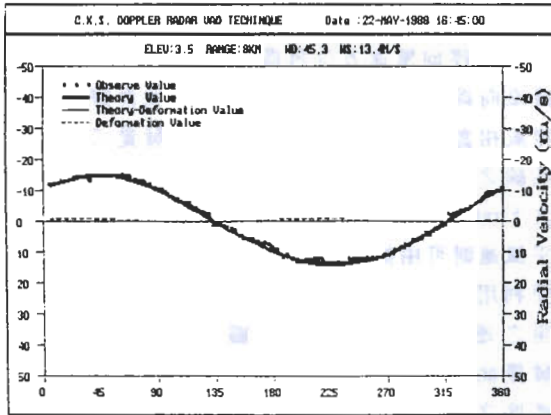


圖5(3) 速度方位顯示圖1645LST仰角3.5度斜距8公里，高度500公尺

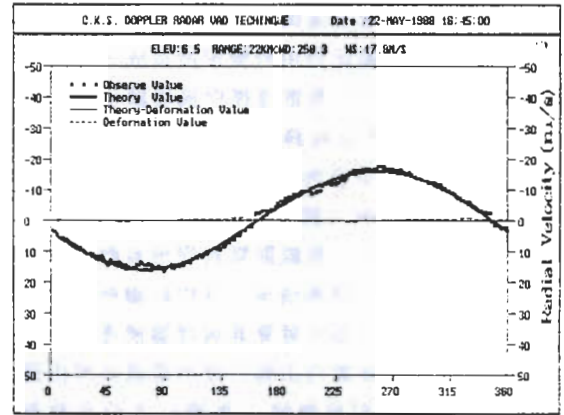


圖5(4) 速度方位顯示圖1645LST仰角6.5度斜距22公里，高度2.5公里

表二 1988年5月22日1230LST-1900LST中正機場地面觀測記錄

Table 2. 801C Table of C.K.S. Weather Station

時	分	LST	風向	風速	雲高	雲量	天候	第一層雲			第二層雲			第三層雲			氣溫	濕溫	露溫	濕度	壓	風速	風向	H
								雲高	雲量	雲底	雲高	雲量	雲底	雲高	雲量	雲底								
22	1230	230	19	29	13000	61RA	2	CU	13	5	SC	E35	7	AC	E80			27.0	22.0	1001.4				
	1242	220	24	32	7000	61RA	2	CU	11	6	SC	E25	7	AC	E80			26.0	22.0	1001.4				
	1251	230	17	30	3500	63RA	2	CU	08	6	SC	E20	8	SC	E50			26.0	23.0	1001.7				
	1257	230	20	27	2400	63RA	2	CU	08	6	SC	E18	8	SC	E50			25.0	23.0	1001.7				
	1300	230	19	29	2400	63RA	2	CU	08	5	SC	E18	8	SC	E50			25.0	23.0	1001.7				
	1313	220	17	28	6000	61RA	2	CU	10	5	SC	E25	8	SC	E50			25.0	23.0	1001.7				
	1336	210	19	30	7000	60RA	2	CU	10	5	SC	E28	8	SC	E60			25.0	23.0	1001.7				
	1400	200	17	36	7000	60RA	2	CU	12	6	SC	E28	8	SC	E50			25.0	22.2	1001.4				
	1407	090	02	21	7000	80RASH	3	CU	06	5	CU	E10	1	CB	12	8	SC	E50	25.0	22.0	1002.4	CB NW PRES RR		
	1414	050	18	28	7000	80RASH	2	CU	05	5	CU	E06	1	CB	10	8	SC	E50	25.0	23.0	1003.1	CB NW PRES RR		
	1421	030	22	32	3200	81XXSH	2	CU	05	5	CU	E06	1	CB	10	8	SC	E50	21.0	20.0	1001.4	CB NW PRES FR		
	1424	030	24	34	1600	82XXSH	2	CU	02	5	CU	E03	1	CB	10	8	SC	E25	21.0	20.0	1001.0	CB NW PRES FR		
	1430	360	32	43	8800	82XXSH	2	CU	02	6	CU	E03	1	CB	06	8	NS	E20	21.0	20.0	1002.0	CB N PRES RR R0800/05 R0800/06		
	1452	030	22	32	1000	82XXSH	2	CU	02	6	CU	E02	8	NS	E25			20.0	20.0	1002.7	PRES RR R1000/05 R1200/06			
	1500	040	23	33	0900	82XXSH	2	CU	02	6	CU	E03	8	NS	E25			20.0	20.0	1003.1	R0900/05 R0900/06			
	1516	030	22	31	1600	81XXSH	2	CU	02	5	CU	E03	8	NS	E25			20.0	19.0	1003.1				
	1530	040	20	32	2000	81XXSH	2	CU	02	5	CU	E03	8	SC	E25			20.0	19.0	1003.7				
	1543	040	19	29	2400	81XXSH	2	CU	02	5	CU	E04	8	SC	E25			20.0	19.0	1003.7				
	1600	030	16	28	3000	80RASH	2	CU	02	5	CU	E04	8	SC	E25			20.0	19.0	1003.7				
	1630	040	18	28	3000	80RASH	2	CU	02	5	CU	E04	8	SC	E25			20.0	19.0	1003.7				
	1640	040	18	28	3600	80RASH	2	ST	03	6	CU	E05	8	SC	E25			20.0	19.0	1004.1				
	1700	050	17	25	4500	61RA	2	ST	03	6	ST	E05	8	SC	E25			20.1	18.9	1003.7				
	1710	050	14	24	6000	60RA	2	ST	04	6	ST	E06	8	SC	E25			20.0	19.0	1003.7				
	1730	050	15	22	7000	60RA	2	ST	05	6	ST	E07	8	SC	E25			20.0	19.0	1004.1				
	1738	040	14	20	10000	60RA	2	ST	06	6	ST	E08	8	SC	E30			20.0	19.0	1004.4				
	1754	050	14	20	10000	60RA	3	ST	08	5	SC	E14	8	SC	E35			20.0	19.0	1004.7				
	1800	070	13	19	10000	60RA	3	ST	08	6	SC	E14	8	SC	E35			20.0	19.0	1005.1				
	1826	060	10	15	7000	60RA	2	ST	10	5	SC	E18	8	SC	E35			20.0	19.0	1005.8				
	1830	060	12	16	7000	60RA	2	ST	10	5	SC	E18	8	SC	E35			20.0	19.0	1005.8				
	1843	060	09	14	4800	60RA	2	ST	10	5	SC	E15	8	SC	E35			20.0	19.0	1006.1				
	1900	050	09	13	4800	60RA	2	ST	10	5	SC	E15	8	SC	E35			20.0	19.0	1006.1				

由圖中雷達實際觀測值與理論值之分布可看出其具有兩個正弦波動此乃由於變形所造成，而由地面觀測報告（表二）及雷達徑向風場顯示圖（圖4(2)）可明顯看出此時鋒面位置正位於中正機場上空；此種變形型態與Browning及Wexler於1968年所作之譜和分析（圖2中之Second Harmonic）相當近似，圖中紅、黑線則為將變形參數值由理論值中分離出來之分布情形，其中紅線所示則為只有變形參數項分布可發覺其與理論值產生一位移現象，而此位移實乃由輻合項所造成此可由圖中理論值除去變形參數值（黑線）之分布發覺其與x軸几呈平行，而此分布與圖2中所作純輻散（Zeroth Harmonic）分析情形相類似，顯示該層風場具強烈輻合上升運動，因此由圖5(2)中可明顯看出當鋒面接近時受變形及輻合之影響遠較其它風場運動特性參數為重，此可與圖5(1)鋒面尚未接近及圖5(3)鋒面遠離時比較此種變形和輻合分布情形皆未產生此種現象；而圖6則為該時間利用不同仰角及斜距求出不同距離和不同高度之變形參數值分布，其中x軸為距離雷達水平距離、y軸為高度、顏色標尺所示為變形值強度，由圖中可看出變形較大區域為距雷達21公里之內及高度1.5公里以下。

圖5(3)則為1645LST鋒面通過中正一小時又四十五分後，以相同3.5度仰角及斜距8公里求得高度0.5公里之風速方位顯示圖，其時間與高度與圖4(3)同而由圖中理論值與雷達觀測值之

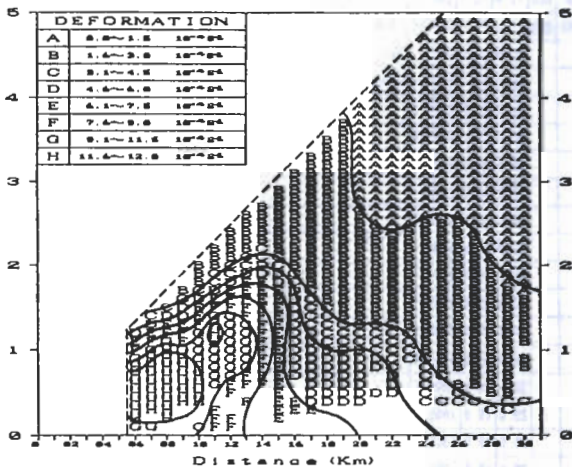


圖6 1405LST, VAD 分析之變形場水平、垂直分布

分布可求得最大正、負值之方位角為225度與45度、零徑向風速方位角為315度與135度，可求得風向為45度、風速13m/s，此與地面觀測瞬間陣風相當接近，而與圖5(1)比較可發覺二者正弦曲線之相位相差180度，因此由譜和分析（圖2之First Harmonic）可知風向可由相位獲得而水平風速則可由振幅大小得知，圖5(4)則為同一時間利用仰角6.5度、斜距22公里求得高度2.5公里之速度方位顯示圖，由圖中對稱分布關係可發覺此高度亦為一水平均勻風場，並可求得該高度之風向為260度、風速18 m/s。

2. 垂直分析

利用不同仰角或不同斜距或二者可求出不同高度的風場運動特性參數之垂直分布情形，圖7(1)為1245LST鋒面系統位於雷達北方35公里處尚未通過中正機場時，利用表一之關係以三十公里內資料所分析出每一百公尺高度之水平風向、風速及輻散場垂直剖面圖，由圖中可發覺於該時間在冷鋒前暖區中存在一強勁之西南風強風軸而其最大風速則出現於高度一公里處風速達27m/s，而由輻散場之垂直分布可明顯看出於一公里以下即最大風速下方呈一輻散現象，最大輻散值 $2.5 \times 10^{-4}S^{-1}$ 出現於一百公尺之高度而於高度一公里以上則為輻合現象，最大值 $-1.4 \times 10^{-4}S^{-1}$ 出現於高度1.9公里處。

於1405LST當鋒面到達中正機場時，由圖7(2)中之風向剖面可看出在500公尺以下風向呈逆轉現象，顯示冷平流注入，而於冷鋒上方之西南氣流亦隨之減弱，最大西南風風速22m/s則出現於2.7公里高度，而原由低層西南強風軸所造成之輻散現象消失，於1.5公里以下輻合現象顯著增強，近地面輻散值達 $-8.4 \times 10^{-4}S^{-1}$ 。

圖7(3)為冷鋒面通過中正機場一小時又四十分鐘以後由圖中垂直風向結構顯示由近地面50度之風向逆轉至1.6公里處之280風向，可明顯看出冷空氣厚度已達1.5公里其高度相當於850毫巴之高度，且於500公尺高度之東北風則增強為13m/s，而於冷鋒上之西南強風帶則減弱，平均風速約為17m/s，且於1.5公里以下冷鋒面正下方之輻合現象消失而呈微弱輻散現象，平均輻散值約為 $0.4 \times 10^{-4}S^{-1}$ 。

圖8則為擷取時間1245LST至1745LST六個小

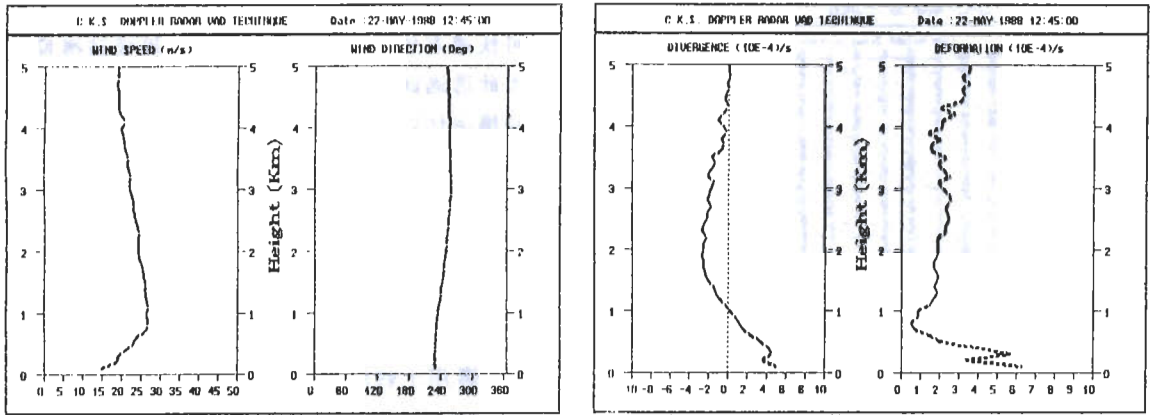


圖7(1) 1245LST, VAD 分析之水平風向、風速及輻散場、變形場垂直剖面圖

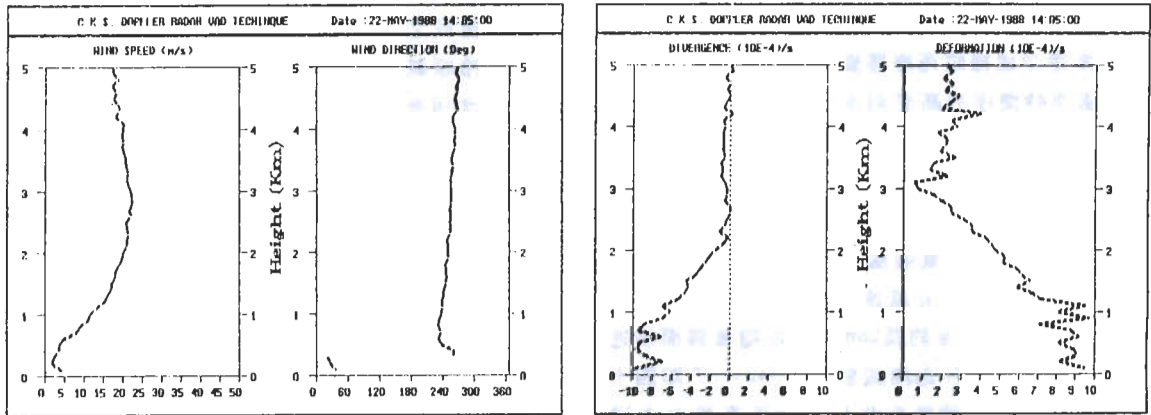


圖7(2) 1405LST, VAD 分析之水平風向、風速及輻散場、變形場垂直剖面圖

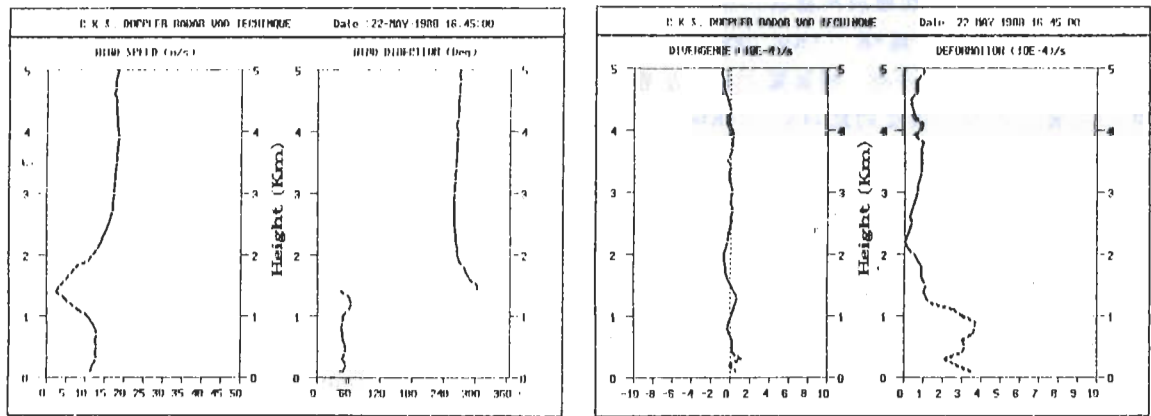


圖7(3) 1645LST, VAD 分析之水平風向、風速及輻散場、變形場垂直剖面圖

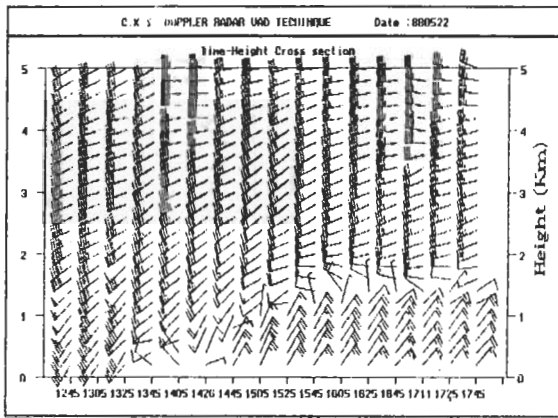


圖8 1988年5月22日1245LST-1745LST VAD技術分析之水平風向、風速(Kts)時間序列高度剖面圖

時之雷達空域掃瞄極座標資料所分析出之水平風向、風速時間序列高度剖面圖，圖中風速單位為哩/時，由圖中可明顯看出於1345LST 200公尺高度以下風向由西南轉為西北，顯示冷鋒面前緣已逼近中正機場，而由風速時間序列高度剖面分布中可發覺一西南風強風軸之存在，當鋒面未通過中正機場前其最大風速層介於高度0.6公里至1.6公里之間，強度約為26m/s，而隨著鋒面接近其並隨高度上升且逐漸減弱；於1425LST即四十分鐘以後風向已轉為東北風，由垂直風向之逆轉可知冷空氣厚度已達600公尺，而於三小時後東北風厚度增至1.5公里，東北季風風速並由地面向上遞增，至400公尺與600公尺間增至最大達13m/s，而最大風切層於冷鋒前出現於低層強風軸之下方，強度約為8K (8Kts/1000Ft)，而於冷鋒後則主要發生於冷、暖氣團之邊界及最強東北風層之上方，強度約為14K (14Kts/1000Ft)；因此由水平風向、風速之時間序列高度剖面圖中可明顯看出強風軸之存在以及區別出因冷、暖平流所造成之風向逆轉及順轉、冷暖空氣團界面垂直高度變化和冷空氣厚度。

五、結 論

VAD技術可將單一都卜勒氣象雷達徑向風速資料轉換成實際大氣風場運動參數，諸如水平

風向、風速、輻散場和變形場，由於此種分析技術可快速有效提供回波區域內詳細風場結構資料，因此透過此種即時自動分析系統之建立，對回波結構演化以及連續性分析可提供即時之觀測資料並可提高雷達作業於短程及即時預報之品質及準確度；而由以上分析討論可綜合下列幾點：

- (一) 利用多重迴歸最小平方法求解富氏係數可解決繁瑣且耗時之資料內插，亦可適用於雷達觀測資料量較少情況下，因此對作業應用上較能達到即時效果。
- (二) 以Harmonic Analysis分離出各參數項可比較其對鋒面系統之水平、垂直影響程度。
- (三) 由各參數值之水平、垂直結構分布以及時間序列高度剖面圖可區別出冷、暖平流所造成之風向逆轉和順轉、強風軸之演變、冷暖氣團界面水平及垂直變化、冷空氣厚度和風切層之高度及大小。
- (四) 透過都卜勒氣象雷達徑向風速資料即時自動分析系統可提供回波區域內風場參數定量分析以輔助及增強徑向風場顯示系統以利作業人員參考應用。

致 謝

本文研撰期間承蒙中正氣象台李台長金萬和中央大學陳教授台琦在技術上的指導及梁丕賢先生熱心的參與討論縮短模式研擬與程式撰寫時間及蔡永智先生協助製作天氣圖使本文得以順利完成，特此一併致謝。

參考資料

- Aoyagi, J. 1983: Wind measurements by a Doppler radar. Preprints 21st Conf. on Radar Meteor., Amer. Meteor. Soci., Boston, 536-541.
- Battan, L. T. 1973: Radar observation of the atmosphere. The university of Chicago press.
- Baynton, H. W. and D. B. Parsons, 1980: Radar-Derived Time-Height Cross Section of wind through

- a front. Preprints 19th Radar Meteor. Conf. *Amer. Meteor. Soci.*, Boston, 38-43
- Brown, R. and T. Wood, 1982: Single Doppler Velocity Signatures as Indicators of Storm Severity. Processings of the NEXRAD Doppler radar Symposium/ Workshop, 164-183
- Browning, K. A. and R. Wexler, 1968: The determination of Kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, 7, 105-113
- Dahlstrom, B. 1988: SMHI PROMIS Annual Report. Nr 7. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrkoping, Sweden.
- Doviak, R. J. and D. S. Zrnic, 1984: **Doppler Radar and Weather Observation**. Academic press, Inc.
- Lhermittle, R. M. and D. Atlas, 1961: Precipitation motion by pulse Doppler radar. Preprints 9th Radar Meteor Conf. *Amer. Meteor. Soci.*, Kansas City, 218-223
- Persson, O. G. 1987: Automatic wind field interpretation of Doppler radar radial wind components. PROMIS Report Nr 6. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrkoping, Sweden.
- Persson, O. G. and T. Andersson, 1985: Radar meteorologi. Nr 24. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrkoping, Sweden.
- Persson, O. G. and T. Andersson, 1987: A real time system for automatic single Doppler wind field analysis. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrkoping, Sweden.
- Trier, S. B. and D. B. Parsons, 1989: Observation of a cold front during TAMEX. Workshop on TAMEX preliminary scientific results, Taipei, 186-195.
- Udin, I. 1986: SMHI PROMIS Annual Report. Nr 3. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrkoping, Sweden, 31pp
- Wilson, J. W., R. E. Carbon, H. Baynton and R. Serafin, 1980: Operational application meteorological Doppler radar. *Bull. Amer. Meteor. Soci.* Vol 61, 1154-1168 atmosphere. The university of Chicago press.

Real-Time Observation of Front — Use
VAD Technique to Research and Analyze

Chien-Sheng Yang

Yunn-Pao Weih

C.K.S. Weather Station, ANWS, CAA

(manuscript received 1 June 1991; in final form 7 September 1991)

ABSTRACT

An automatic system for the real-time conversion of single Doppler radial wind velocities into standard meteorological wind field parameters. Using VAD technique to analyze radial wind velocities, determined Fourier coefficients by Multiple Regression Least Square Curve Fitting Method and computed kinematic properties values of horizontal wind direction, wind speed, divergence and deformation in radar echo area.

Key Words: Velocity Azimuth Display (VAD)、Polar Volume Scan、Pulse Repetition Frequency (PRF)、Harmonic Analysis、Multiple Regression Least Square Method、Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI)