

「大氣中氣膠流佈分析應用於光達風場測量
先期研究」

結案報告

崑山科技大學

中華民國 101 年 11 月 30 日

大氣中氣膠流佈分析應用於光達風場測量先期研究

摘要

鑑於全球氣候變遷、環保意識抬頭以及能源供需等問題日漸嚴重，全世界莫不以綠色能源為目標，而其中以風力發電為主流趨勢之一，然而風力發電需有準確之風力場，才能降低系統的負載，使系統更安全進而發揮其效益。因此欲利用光達遙測設備與理論演算進行先期風場研究，用以評估提升風力發電機效能之可行性。

(一)、簡介

2011 年日本福島核能輻射事件造成全球的恐慌，因此許多國內專家學者開始關心在地的核電廠若有意外時大氣的傳輸，污染的擴散範圍等該如何獲得相關資訊，並積極尋求綠色能源用以解決當前之問題。而風力發電被視為主流趨勢之一，然而風力發電需有準確之風力場，才能降低系統的負載，使系統更安全進而發揮其效益，而目前設置地面監測塔長期蒐集風場資訊，仍無法達到預警風力發電機前方數公里風場之變化和高空之風速風向，對於離岸之監測塔架設更是所費不貲。

而遙測技術與系統的開發將可解決上述之主要問題，過去較早期遙測風場有數個相關技術沿用至今如 Beneditti-Michelangeli 團隊在 1972 年利用干涉儀量測從大氣氣膠 (aerosols) 所散射回來之都卜勒(Doppler)位移訊號用以計算風速。然而都卜勒頻移量的量測即為都卜勒光達測風的關鍵，此技術在硬體上之需求較為複雜並且成本昂貴，若要廣泛地運用在沿岸多處的風場量測和特定區域將是一項龐大的經費支出。

本團隊利用在雷射遙測領域十多年之理論基礎與經驗，已開發出

3-D 掃瞄式光學雷達，利用三維空間遙測技術測量懸浮微粒流佈進行先期風場理論模式建置，協助風力發電之發展和獲得區域環境之風場等重要資訊。

1.1 光學雷達運用於風場量測回顧

過去遙測風場（風速與風向）有數個相關技術沿用至今如 Beneditti-Michelangeli [1] 利用干涉儀量測從大氣氣膠（aerosols）所散射回來之都卜勒(Doppler)位移訊號用以計算風速。其原理概述如圖 1 所示，慣性系統 B 以速度 V 移動，雷射光源相對 B 系統是靜止的。在 B 系統中若在時間 t'_1 到 t'_2 期間雷射發射的波數為 N ，在靜止的 A 系統中觀測雷射光於觀測期間 t_1 與 t_2 間觀察者接收到雷射光波的起始和截止時刻分別為

$$\tau_1 = t_1 + \frac{r_1}{c}$$

$$\tau_2 = t_2 + \frac{r_2}{c} = t_2 + \frac{r_1 + v(t_2 - t_1)\cos\theta}{c}$$

由愛因斯坦的相對論可知時間的相對性為

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

因此觀測者所接收到的雷射光頻率為

$$v = \frac{N}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{N}{(t_2 - t_1)\left(1 + \frac{v\cos\theta}{c}\right)} = \frac{N\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{(t'_2 - t'_1)\left(1 + \frac{v\cos\theta}{c}\right)}$$

$$\text{令 } v_0 = \frac{N}{t'_2 - t'_1}$$

$$\text{則上式可改寫為 } v = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v\cos\theta}{c}} v_0$$

上式中 $\cos\theta$ 為雷射光傳播方向與相對移動方向夾角的餘弦值，在 B 系統離開

A 系統時值為正值，靠近時為負值。考慮移動目標散射光的都卜勒頻移，

$$\text{第一次都卜勒頻移： } v_1 = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v \cos \alpha}{c}} v_0$$

$$\text{第二次都卜勒頻移： } v_2 = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + v \frac{\cos \alpha}{c}} v_1$$

我們可將 v_1 項展開為

$$v_1 = \left[1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + o\left(\frac{v}{c}\right)^4 \right] \left[1 - \frac{v \cos \alpha}{c} + \left(\frac{v \cos \alpha}{c}\right)^2 - o\left(\frac{v \cos \alpha}{c}\right)^3 \right] v_0 \approx \left(1 - \frac{v \cos \alpha}{c} \right) v_0$$

同理也可將 v_2 展開

$$v_2 = \left(1 - \frac{v \cos \theta}{c} \right) v_1 = \left(1 - \frac{v \cos \theta}{c} \right) \left(1 - \frac{v \cos \alpha}{c} \right) v_0 \approx \left[1 - 2 \frac{v}{c} \cos \frac{\alpha + \theta}{2} \cos \frac{\alpha - \theta}{2} \right] v_0$$

$$\Delta v = v_2 - v_0 = -2 \frac{v}{c} \cos \frac{\alpha + \theta}{2} \cos \frac{\alpha - \theta}{2} v_0$$

在光達系統中 $\alpha = \theta$ $v_r = v \cos \alpha$

$$\Delta v = -2 \frac{v_r}{c} v_0$$

$$\text{因此徑向速度為 } v_r = -\frac{\lambda}{2} \Delta v$$

都卜勒光達利用都卜勒效應測量雷射光束在大氣中傳輸之回波訊號的都卜勒頻移來反演空間不同高度處的風速分佈。回波訊號主要來源為大氣分子和氣膠粒子對雷射光的散射，若大氣氣膠粒子與雷射光源之間存在相對移動則所接收的氣膠散射光頻率不但取決於雷射光頻率還與氣膠粒子相對於雷射光源的移動速度、方向和散射角等有關。因此根據氣膠粒子所散射光子之都卜勒頻移就可以推算出氣膠粒子的移動速度和方向，也就是我們所求得風速與風向。此外還有以 3-D 掃瞄方式進行的 Velocity-Azimuth-Display (VAD) 技術 [2-4] 和 Doppler-Beam-Swinging (DBS) 技術 [5-6] 等較常見之技術，主要假設在光學雷

達掃瞄時間內風場均勻分佈，若以東向為 X 軸方向，北方為 Y 方向

和天頂方向為 Z 方向，如圖 2 所示，若徑向風速為 V_r ，掃瞄仰角與方位角分別為 φ 和 θ 。風場向量在座標上之分量分別為 u 、 v 和 w 。由幾何關係可得到

$$V_r = u \cos \theta \cos \varphi + v \sin \theta \cos \varphi + w \sin \varphi \quad (1.1.1)$$

若以三道雷射光束以固定之仰角量測且三個方位角分別為 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 ，

而三個掃瞄方向的徑向風速分別為：

$$V_{r1} = u \cos \theta_1 \cos \varphi + v \sin \theta_1 \cos \varphi + w \sin \varphi \quad (1.1.2)$$

$$V_{r2} = u \cos \theta_2 \cos \varphi + v \sin \theta_2 \cos \varphi + w \sin \varphi \quad (1.1.3)$$

$$V_{r3} = u \cos \theta_3 \cos \varphi + v \sin \theta_3 \cos \varphi + w \sin \varphi \quad (1.1.4)$$

因此風速向量的三個方向可分別表示為：

$$u = \frac{(v_{r1} - v_{r2})(\sin \theta_3 - \sin \theta_1) - (v_{r1} - v_{r3})(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)}{\cos \varphi [\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_2 - \theta_3) + \sin(\theta_3 - \theta_1)]} \quad (1.1.5)$$

$$v = \frac{(v_{r1} - v_{r2})(\cos \theta_3 - \cos \theta_1) - (v_{r1} - v_{r3})(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)}{\cos \varphi [\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_2 - \theta_3) + \sin(\theta_3 - \theta_1)]} \quad (1.1.6)$$

$$w = \frac{v_{r1} \sin(\theta_2 - \theta_3) + v_{r2} \sin(\theta_3 - \theta_1) + v_{r3} \sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin \varphi [\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_2 - \theta_3) + \sin(\theta_3 - \theta_1)]} \quad (1.1.7)$$

水平風速 v_h 和風向 α （以 Y 方向順時針旋轉）

$$v_h = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1.1.8)$$

$$\alpha = \arctan (v/u) \quad (1.1.9)$$

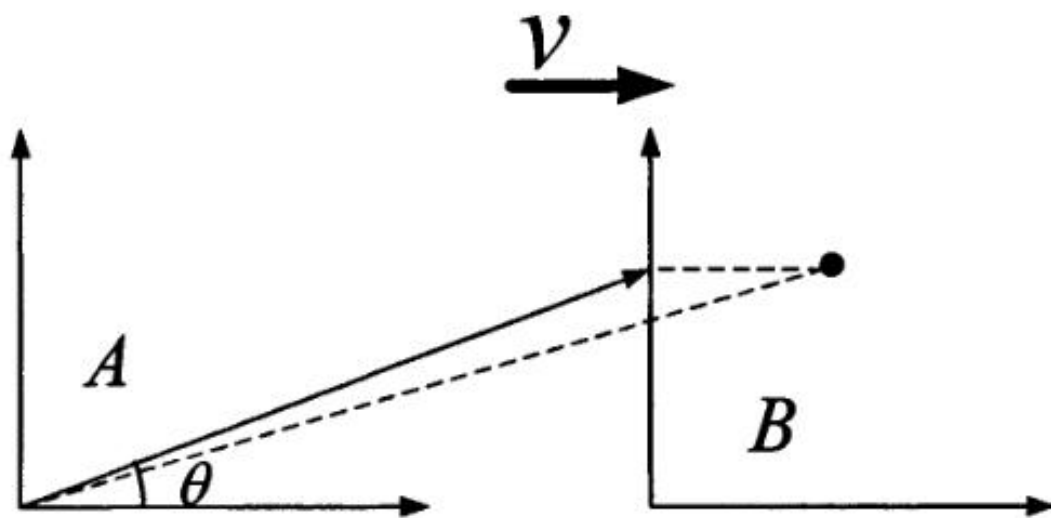


圖 1、慣性系統 B 以相對於慣性系統 A 以速度 V 移動之示意圖。

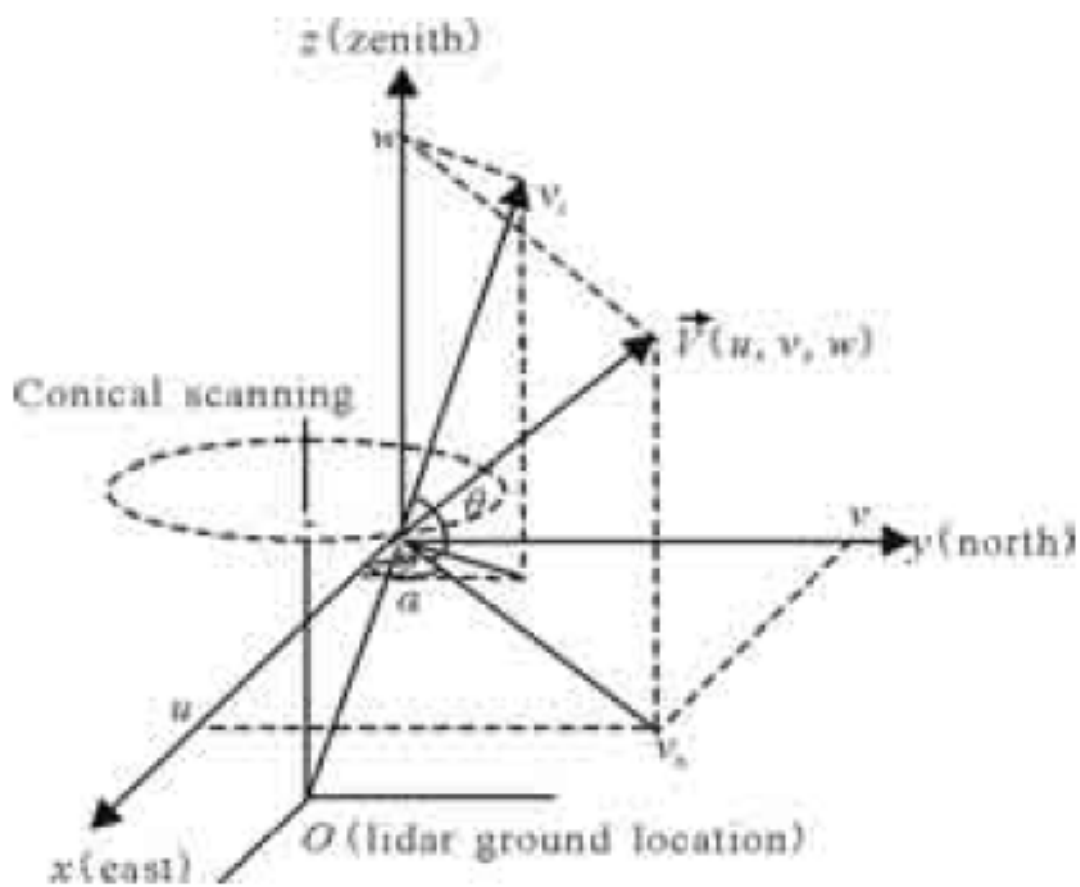


圖 2、光學雷達掃瞄示意圖

1.2 本計畫風場計算理論

目前所欲開發之光達測風技術則採用氣膠會隨風移動的特性所開發出測風光達，相似之技術可參考 Eloranta et al., 和 Matsui et al., [7-8] 等文獻。我們與以往相似技術差異較大之地方為此系統以掃瞄模式量測可大大降低量測風速時所需之硬體設備，說明如下：

當大氣中的氣膠隨風穿過雷射光時由於大氣中氣膠分佈不均勻，因此藉由分析光達依時間序列在不同方向的回波訊號即可得知風速與風向。

由光達等式

$$P_R(z) = P_L * \frac{A_T}{z^2} * \beta_{\text{atm}}(z) * T_{\text{atm}}^2(z) \quad (2.1.1)$$

其中 P_L 和 P_R 分別代表發射與接收到的雷射光強度， A_T 為系統校正係數，包含望遠鏡與偵測器等光學、電子以及其他幾何上的因素，如果系統固定，我們可以將之視為常數， z 為高度， $\beta_{\text{atm}}(z)$ 與 $T_{\text{atm}}(z)$ 分別為大氣總背向散射係數和大氣穿透係數，包括大氣分子與粒子的貢獻。

由此我們可得知背向散射訊號正比於氣膠濃度，當雷射量測粒子濃度高之區域其背向散射訊號強，反之亦然。由於受風之影響氣膠會隨風移動，若藉由不斷發射雷射進行量測空間中不同地方氣膠的背向散射訊號就能得知氣膠分佈特性，亦即得之風速與風向之資訊。

以雷射光在空間依序在數處固定點處掃瞄（改良之 VAD 方法）如圖 3 所示（分別為 C、E、N、W、S、E、N、W...），計算光達掃瞄每一方向隨高度變化之標準差值（standard deviation），此標準差值之定義為由光達方程式定義

Range-Squared-Corrected-Signal (RSCS)：

$$RSCS = P_R * z^2 \quad (2.1.2)$$

式中 P_R 為接收到的雷射光強度， z 為高度。因此每個高度的 RSCS 隨時間擾動所計算出的標準差為：

$$\sigma_{RSCS} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1 \dots N} (RSCS_i - \overline{RSCS})^2 \right]^{1/2} \quad \text{式中 } N \text{ 為樣本數，每個樣本為數秒所累積}$$

的 RSCS 訊號強度。 \overline{RSCS} 為所有樣本數的平均累積訊號強度。因此以每 N 個樣本為一組計算其擾動標準差。

此標準差值可代表在量測期間內，個別量測方向上氣膠受風擾動影響之訊號。

因此風速可表示為 $v = \frac{R}{n * \Delta t}$ 其中 n 為量測空間不同點之個數(E、N、W、S)，R 為中心點 (C) 到任一點 E、N、W、S 之距離。在數據採樣間隔時間 Δt 一定的情况下 R 值將決定計算風速值之精確度。最小之風速解析度 $\frac{R}{\Delta t}$ ，最大之風速解析度 $\frac{2R}{\Delta t}$ 。

最後比較某一高度哪個方向的值與 C 中心點的相關度高即可知道風由 C 到吹往哪個方向，其中相關係數之定義為 $r = \frac{\sum x * y}{N * \sigma_x * \sigma_y}$ ，x 為 X 變量的離差 (deviation) $x = X - \bar{X}$ ，y 為 Y 變量的離差 $y = Y - \bar{Y}$ ， σ_x 為 X 的標準差 (standard deviation)， σ_y 為 Y 的標準差。

設定一個基準點 C 將 C 周圍的點 E、N、W、S 分別與其進行相關度分析，找到相關係數最大值 r_{max} 出現的位置並計算 C 與這點之距離 R，由於光達取數據的時間間格 Δt 是固定的，所以系統知道從位置 C 到四個方位中任一點所經過的時間 $t = n * \Delta t$ ($n = 1, 2, 3, \dots$)。因此由間距和時間間格就可以求得速度 = 距離 / 時間

$$\left(V = \frac{R}{t} = \frac{R}{n * \Delta t} \right)$$

舉例說明：如圖 4 所示，在約第 21 次 (個) 量測時中心點 C 和 E 有最大的相關度，說明氣膠由中心 C 之位置往 E 方向飄移，其速度為

$$V = \frac{S}{n * \Delta t} = \frac{R}{21 * \Delta t \text{ (秒)}}$$

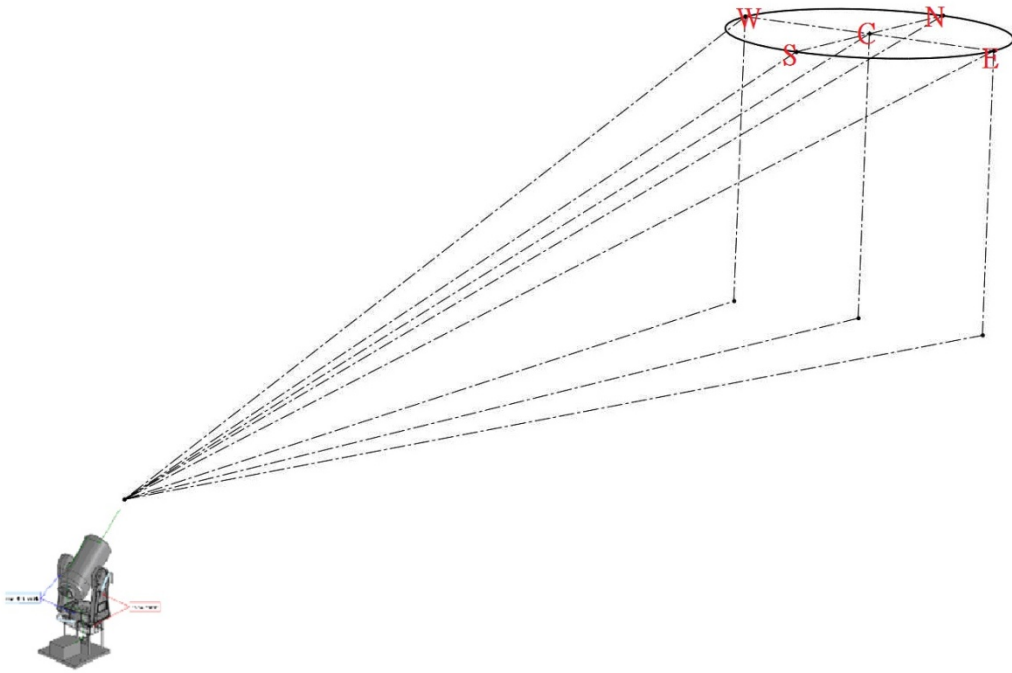


圖 3、雷射量測風速&風向之示意圖。

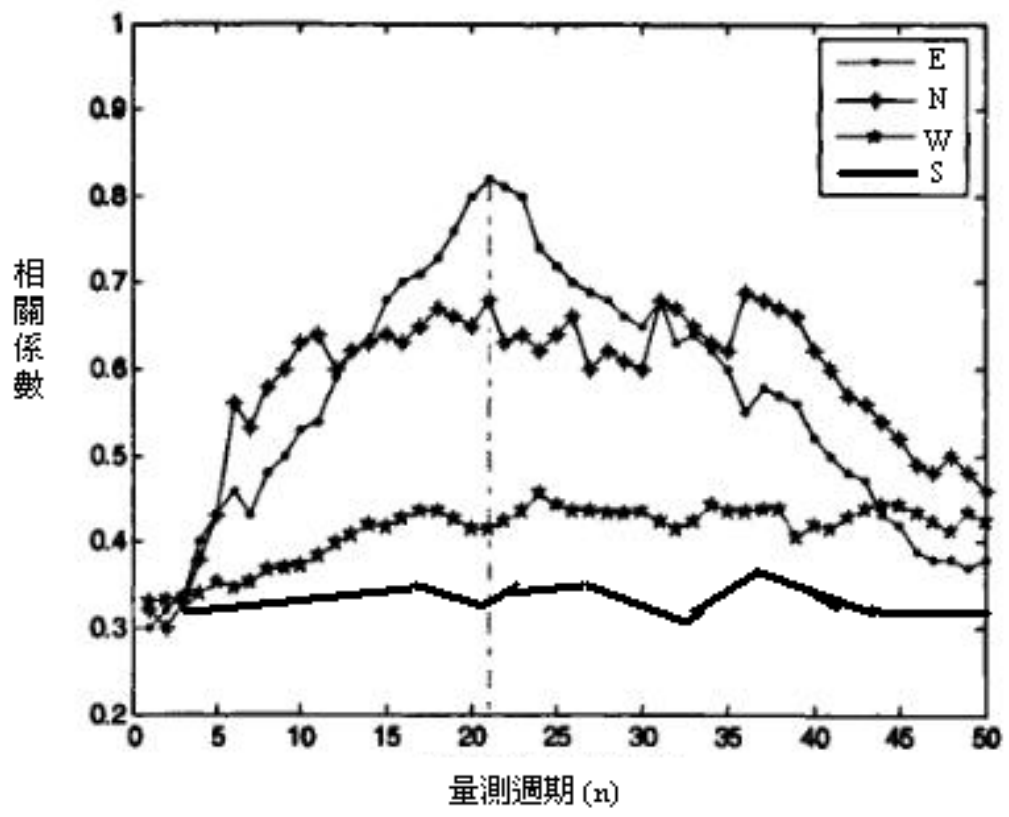


圖 4、不同方位相關性對比圖示意圖。

1.3 定點校驗風速量測方法

若未來將此自行開發之設備（如圖 5 所示）架設於風機上如目前先進國家如美國和德國已著手進行利用光學雷達（LIDAR）遙測設備建置光學遙測技術之風能評估（如 ASIT 和 FINO 1），我們可採用定點 Covariance 方法，進行預警風機前方不同距離之風速，以空間中定點某一角度進行光達機前方氣膠之隨風飄移速度，分別以時間 t_1 和 t_2 進行光達機前方分佈不均勻之氣膠隨距離之量測(如圖 6 所示)，選取預計算的距離範圍資料，例如選取離光達機前方 1-2 公里區間之資料，在時間 t_1 時，此段區間之資料可進行快速傅利葉（FFT）轉換求得在此區間內氣膠出現最大之頻率 a ，同理於時間 t_2 也對此段區間之資料進行快速傅利葉（FFT）轉換求得在此區間內氣膠出現最大之頻率 b ，將此兩段時間內所得到之 a 和 b 相乘(重疊的部份相乘累加起來)，再將其值進行逆向快速傅利葉（FFT）轉換得到 $A*B$ ，此即為此區間內氣膠在時間間格 t_1-t_2 內移動之距離，最後再將此值除上時間間格（ t_1-t_2 ）此即為風速。



圖 5、自行開發之光學雷達 (LIDAR) 系統

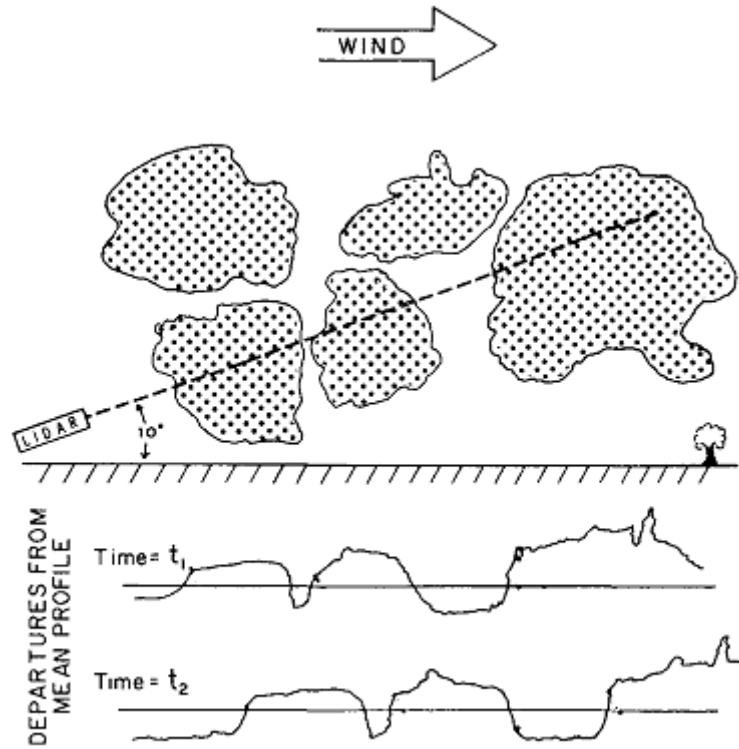


圖 6、以空間中定點某一角度進行光達量測氣膠之隨風飄移速度，分別以時間 t_1 和 t_2 進行氣膠訊號強度隨距離之量測。

2、本計畫開發成果

2.1 量測程式開發

圖 7 為利用上述 1.2 節於本計畫中使用的風場計算理論所進行開發的程式介面，於此開發程式中可**連續即時**對光學雷達回傳之訊號進行分析，圖中顯示光學雷達在每個方向進行掃瞄時訊號之間的相關度，可利用此即時相關度瞭解目前風向與風速相關訊息。

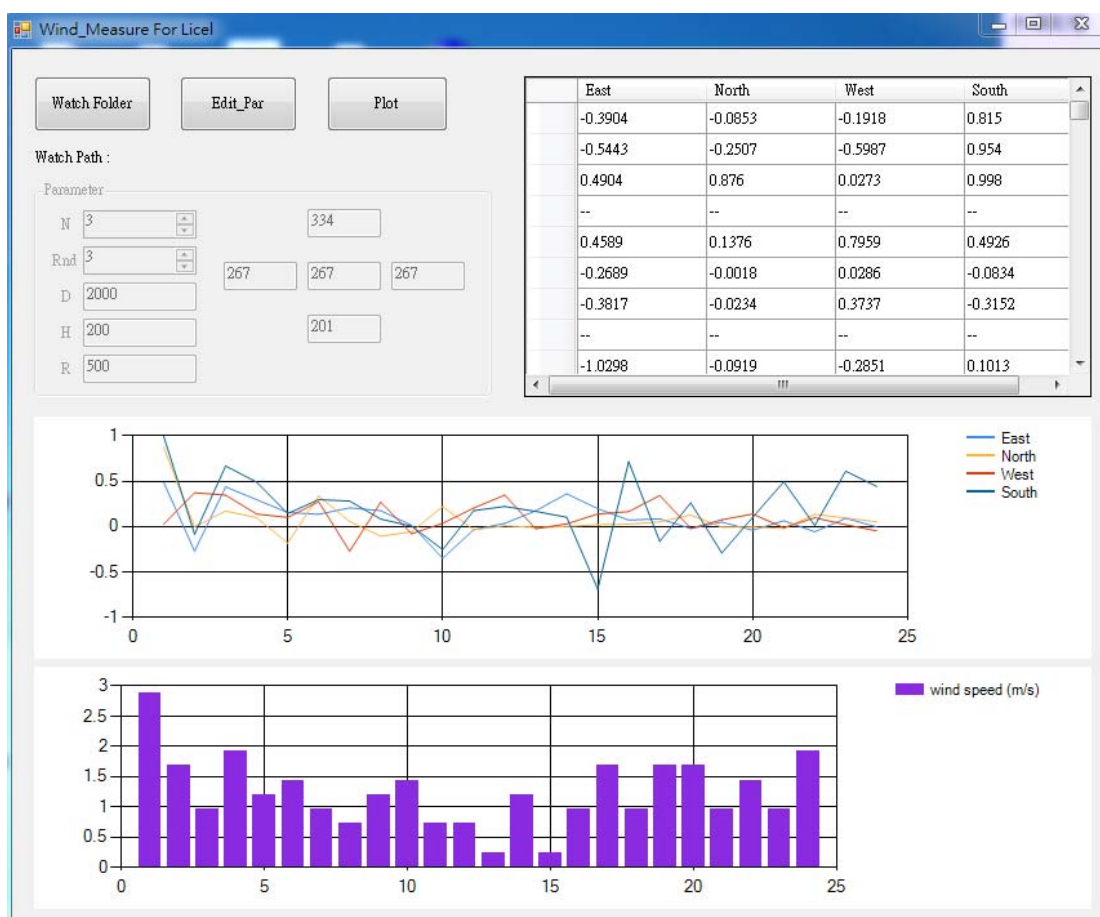


圖 7、光達量測風向&風速自動觀測程式與結果分析。

2.2 與初步結果分析

於計畫執行期間利用理論分析，進行相關程式整合與程式測試，並分析確認理論與實際量測之關連性。將光學雷達設置於中央大學進行風速量測，並與校園內十米塔自動觀測資料進行比對，而光達量測參數之設定為量測距地面 230 公尺高度之風速與風向值。

測試光達量測風向&風速，以 2012/11/02 日為例，如圖 8 所示為光達訊號隨時間之分佈資料，其中藍線為時間 t1 所量測，紅線為時間 t2 所量測，時間間格為 10 秒。而光學雷達不同方向(a:中心)、(b:東)、(c:北)、(d:南)和(e:西)之連續掃描訊號強度分佈如圖 9 所示。連續分析數據列於表 1。

初步光達結合理論與實際風速量測分析，並與十米塔自動觀測資料進行比對，在觀測期間風向之符合度約 92%，但風速有明顯之差異，可能受高度影響所致。

此初步結果與十米塔自動觀測資料比對已有初步成果，接下來可進行戶外測風塔相關比對校驗、光學雷達系統耐候性測試和利用定點校驗風速量測方法進行建置光學遙測技術之風能評估等工作。

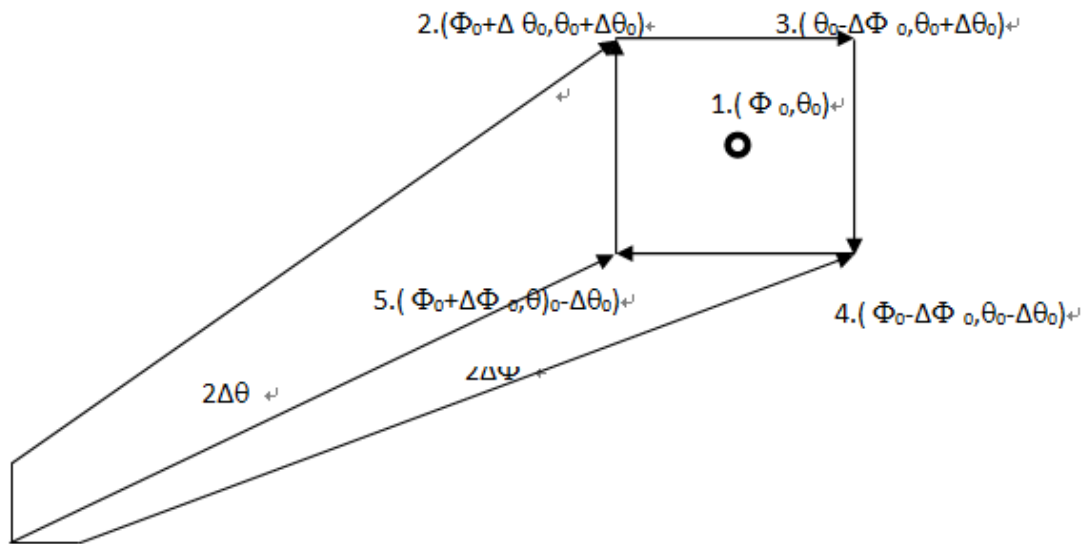


圖 8、光學雷達掃瞄角度設定幾何示意圖

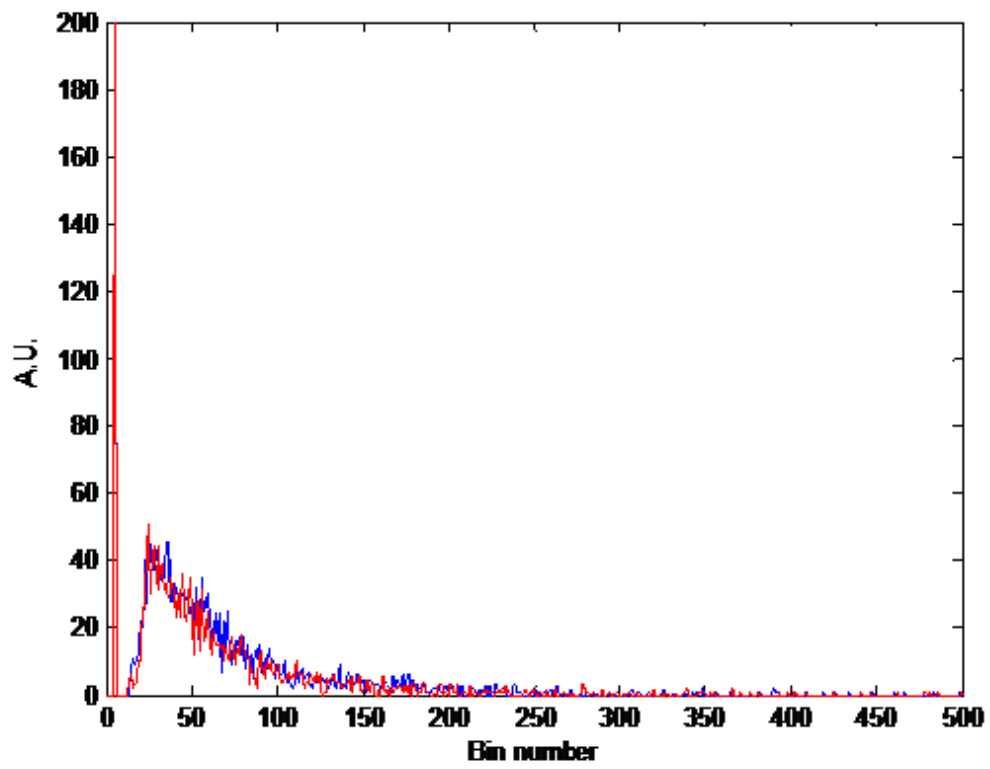
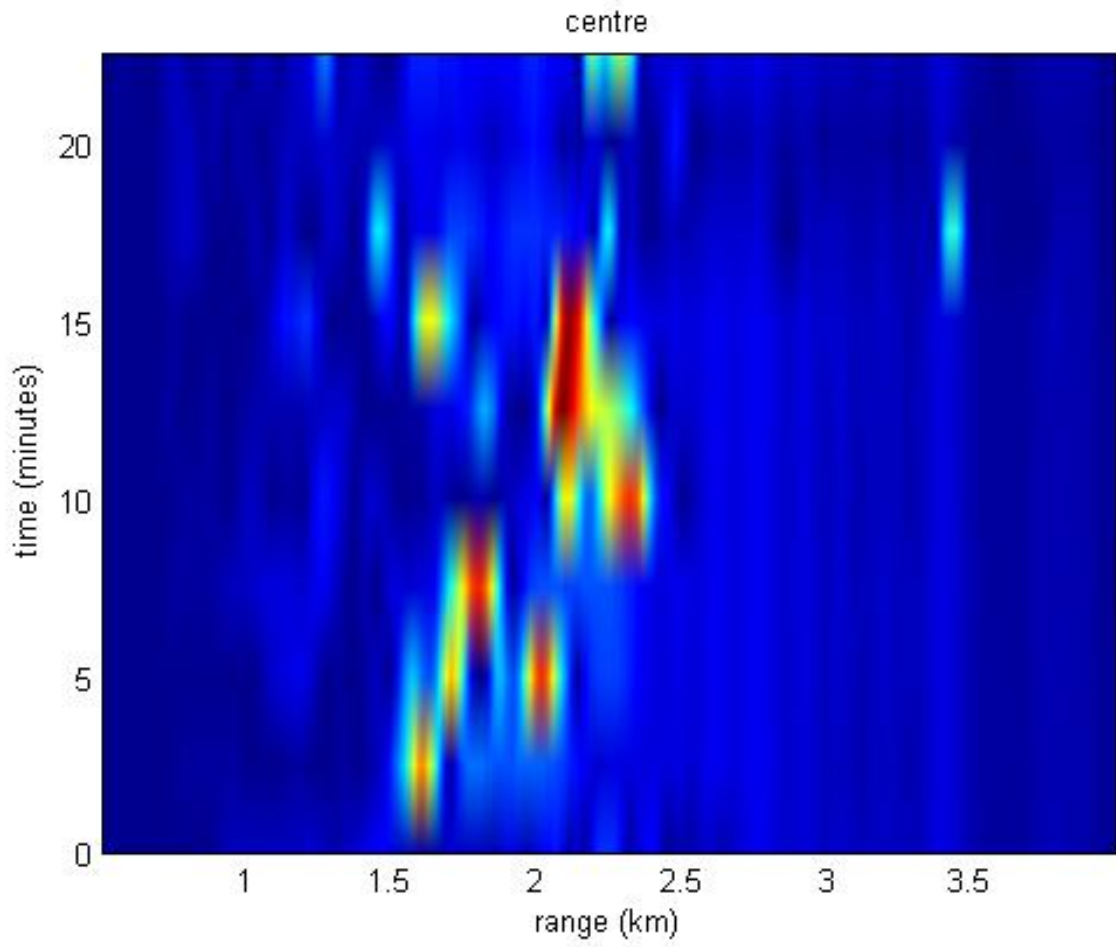


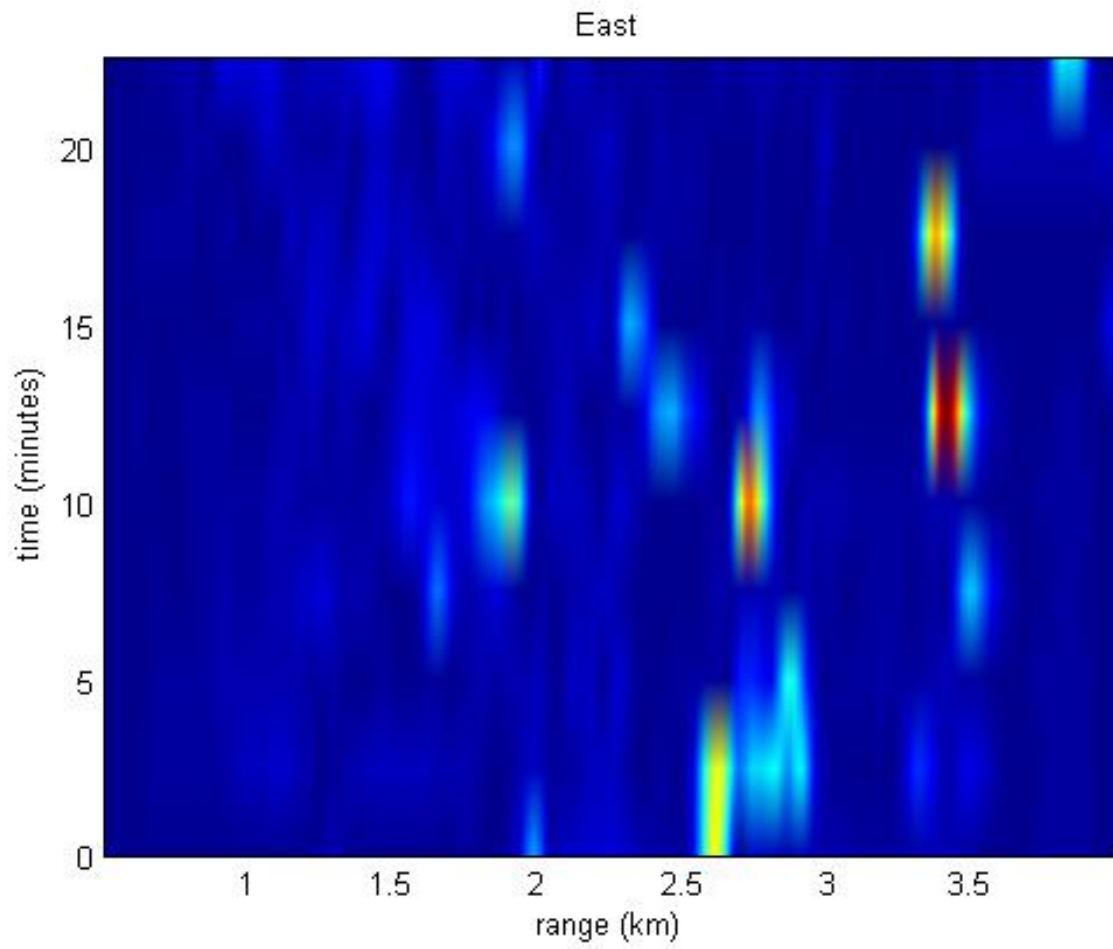
圖 9、光學雷達原始訊號其中藍線與紅線分別為不同時間所量測之資料，時間間格為 10 秒。

表 1、 光學雷達實際量測之參數設定

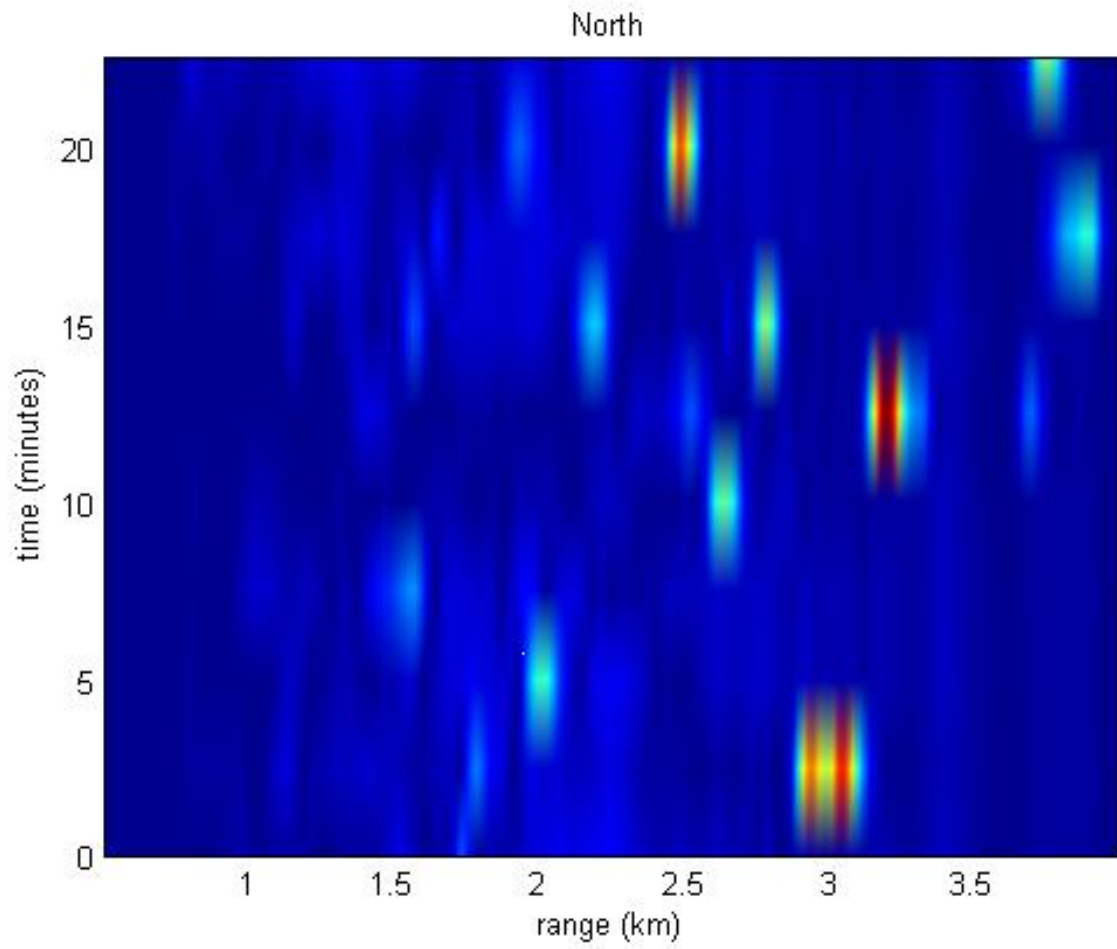
觀測日期	觀測時間	掃瞄檔案數	掃瞄時間間格(s)	角度參數
2012/11/02	20:37-22:27	250	10	$(\Phi_0, \theta_0) = (0, 5.71)$ $(\Phi_1, \theta_1) = (14, 5.71)$ $(\Phi_2, \theta_2) = (0, 4.57)$ $(\Phi_3, \theta_3) = (-14, 5.71)$ $(\Phi_4, \theta_4) = (0, 7.6)$
2012/11/05	19:34-21:22	160	10	$(\Phi_0, \theta_0) = (0, 5.71)$ $(\Phi_1, \theta_1) = (14, 5.71)$ $(\Phi_2, \theta_2) = (0, 4.57)$ $(\Phi_3, \theta_3) = (-14, 5.71)$ $(\Phi_4, \theta_4) = (0, 7.6)$
2012/11/10	20:20-22:46	150	10	$(\Phi_0, \theta_0) = (0, 5.71)$ $(\Phi_1, \theta_1) = (14, 5.71)$ $(\Phi_2, \theta_2) = (0, 4.57)$ $(\Phi_3, \theta_3) = (-14, 5.71)$ $(\Phi_4, \theta_4) = (0, 7.6)$



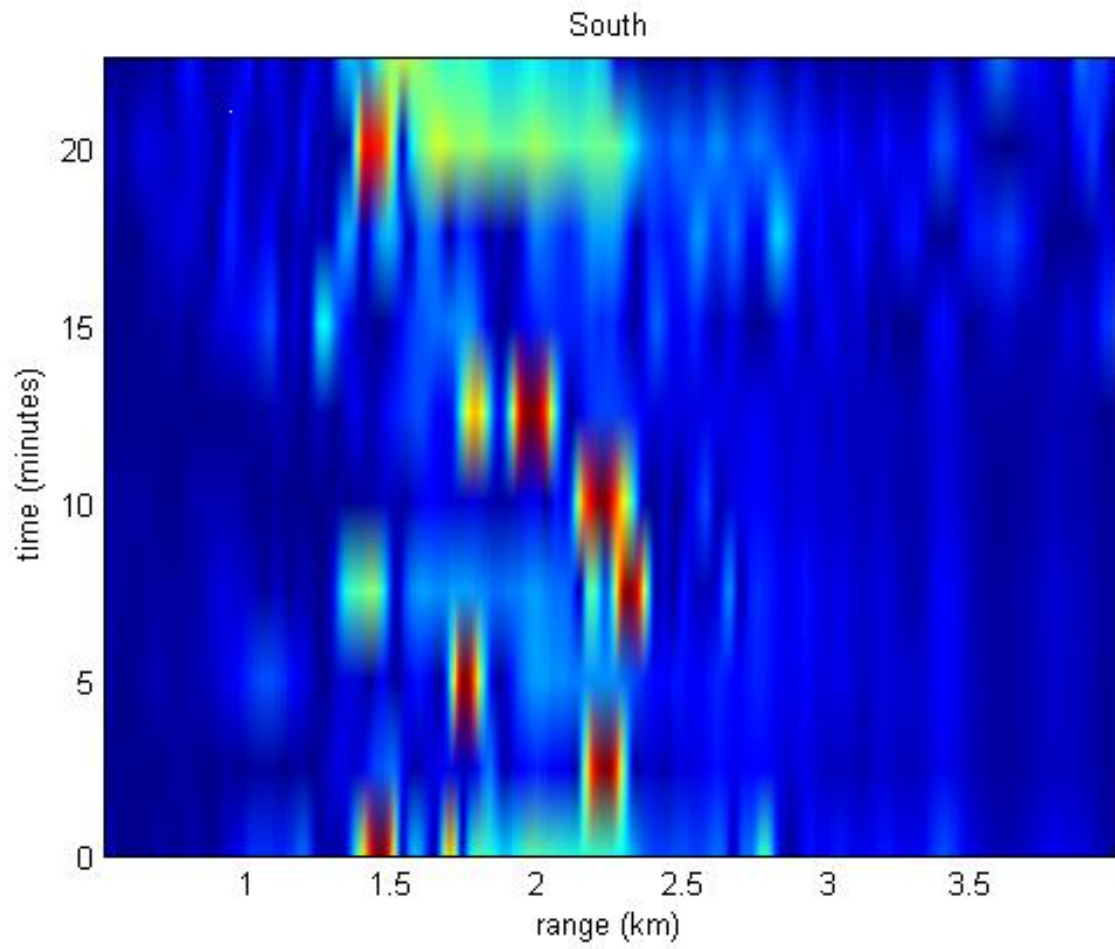
(a)、原點（中心）連續掃瞄訊號強度分佈



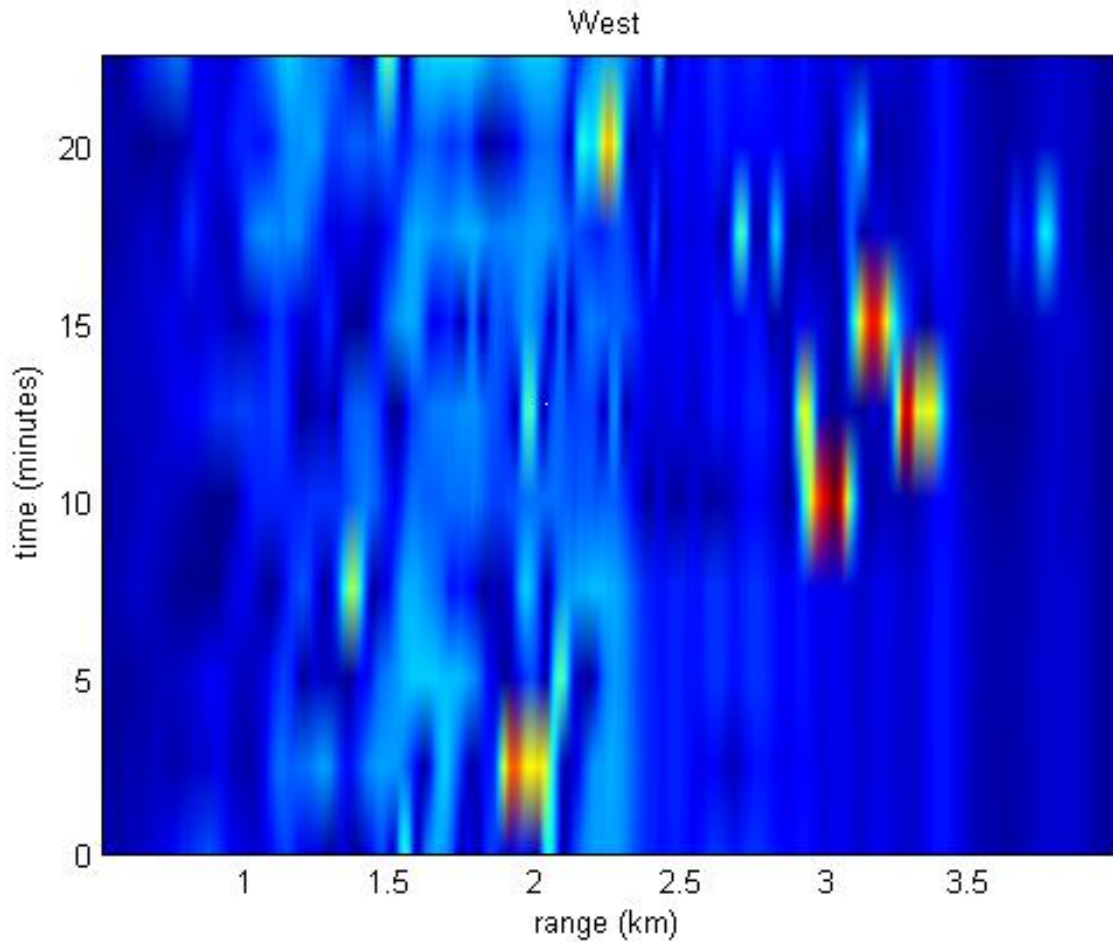
(b)、東方連續掃瞄訊號強度分佈



(c)、北方連續掃瞄訊號強度分佈



(d)、南方連續掃瞄訊號強度分佈



(e)、西方連續掃瞄訊號強度分佈

圖 Y、光學雷達不同方向(a:中心)、(b:東)、(c:北)、(d:南)和(e:西)之連續掃瞄訊號強度分佈

表 Z、. 風量測結果列表

日期	最大相關度之掃瞄方位	時間	高度 (m)	光達風速 (m/s)	地面測站風速(m/s)
2012/11/02	North 1	20:32	193	6.2	4.91
2012/11/02	North 1	20:46	180	6.4	5.08
2012/11/02	North 2	21:08	203	6.0	4.18
2012/11/02	North 2	21:10	175	6.6	4.25

2012/11/02	East3	21:36	205	6.0	4.57
2012/11/02	East 3	21:38	196	6.2	4.62
2012/11/02	North 3	21:44	210	5.8	5.05
2012/11/02	North 3	21:50	220	6.6	4.38
2012/11/02	East 3	21:59	158	6.0	4.96
2012/11/02	North 4	22:14	164	8.2	5.42
2012/11/05	North 1	19:36	212	8.0	5.48
2012/11/05	North 1	19:40	208	6.7	6.44
2012/11/05	North 1	19:48	225	7.5	5.85
2012/11/05	East 2	20:10	198	8.5	5.61
2012/11/05	North 3	21:05	189	7.4	5.15
2012/11/10	North 1	20:23	200	5.2	4.18
2012/11/10	North 1	20:38	148	5.3	3.66
2012/11/10	North1	20:40	170	5.4	2.00
2012/11/10	North 1	20:44	125	5.5	3.97
2012/11/10	North 1	20:50	118	5.4	2.95
2012/11/10	North 2	21:06	136	7.0	2.51
2012/11/10	North3	21:26	142	7.3	2.25
2012/11/10	North 3	21:42	196	6.8	2.50

參考文獻

- [1]. Beneditti-Michelangeli, G., F. Congeduti and G. Fiocco, Measurement of aerosol motion and wind velocity in the lower troposphere by Doppler optical radar. *J. Atmos. Sci.*,29, 906-910. 1972.
- [2]. Lhermitte R.M., Atlas D., Precipitation motion by pulse Doppler, Preprints Ninth Weather Radar Conf Amer Meteor, 218-223, 1961.
- [3]. Caton, P.G., The measurement of wind and convergence by Doppler radar, Preprints Ninth Weather Radar Conf Amer Meteor,290-296, 1963.
- [4]. Browning K.A., Wexler R., The determination of kinematics properties of a wind field using Doppler Radar, *J. Applied Meteor*, 105-113, 1968.
- [5]. Balsley B.B., Gage K.S., On the use of radars for operational wind profiling, *Bull Amer Meteor Soc.*, 1009-1018, 1982.
- [6]. Ecklund W.L., Carter D.A., Balsley, B.B., AUHF wind profiler for the boundary layer: brief description and initial results, *J. Atmos Oceanic Technol.*, 432-441, 1988.
- [7]. Eloranta, E.W., King J.M., and Weinman, J.A.,The determination of wind speed in the boundary layer by monstatic lidar, *Journal of applied meteorology*,14, 1485-1489, 1975.
- [8]. Matsui, I., Sugimoto, N., Sasano, Y., and Shimizu, H., *Japanese Journal of Applied Physics*, 29, 441-444, 1990.