

多頻段剖風儀雷達觀測結果之比對與分析

陳昭宇¹ 蘇清論¹ 陳孟遠² 朱延祥¹

國立中央大學太空科學研究所¹
國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心²

摘要

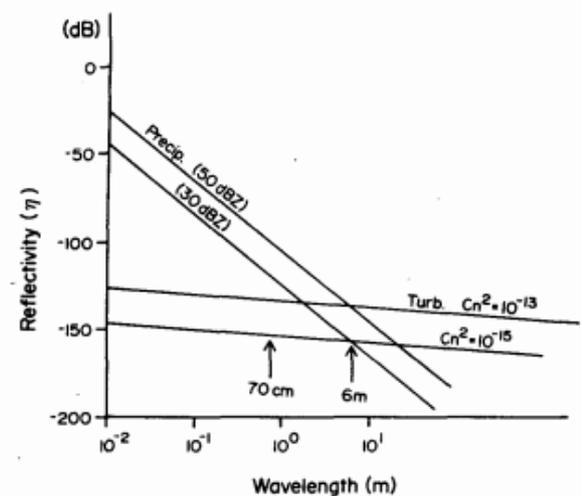
在過去幾十年間，剖風儀(Wind Profiler)與 MST 雷達(Mesosphere-Stratosphere-Troposphere Radar)被廣泛應用於觀測及研究大氣結構與動力。在本篇論文中比較了不同頻段剖風儀雷達觀測資料之特性，資料來源為 2017 年 9 月 12 日至 16 日間在中央大學進行的共同觀測實驗，使用的三台剖風儀雷達頻段分別為 VHF (52MHz)、UHF (449MHz)及 L band (1290MHz)。剖風儀利用 Velocity Azimuth Display (VAD)方法可得到風場，經過比較後結果顯示不同頻段剖風儀雷達所觀測到的水平風場相差不大，但當使用不同於雷達觀測方法的探空資料為參考時，結果顯示剖風儀雷達與探空儀(Radiosonde)資料觀測有些許誤差。

關鍵字：剖風儀雷達、風場、探空儀

一、前言

國外目前已經有部分文獻是將不同頻段之剖風儀雷達進行共同觀測 [Chilson et al., 1993]，或是剖風儀雷達結合氣象雷達針對降雨環境研究 [Fukao et al., 1985; Teshiba et al., 2009]，剖風儀雷達於晴天(Clear Air)時，回波主要由大氣折射指數(Atmospheric Refractive Index)貢獻，但在降雨的情況下，雨滴粒子的貢獻會隨著剖風儀之頻率有所不同，Larsen and Rottger [1987]提出亂流與降水功率譜隨波長之分佈圖，如圖(一)，可以看到頻率越高受水氣影響越強，本次實驗之剖風儀分別有 VHF (52MHz)、UHF (449MHz)及 L band (1290MHz)之波段，VHF 波段可同時觀測到雨滴粒子與大氣亂流回波，但有時無法將兩者回波完全區分，UHF 及 L band 則在降水情況下主要受雨滴粒子回波貢獻，除了觀測的目標物可能不同之外，在觀測的高度及高度解析度(Height Resolution)也都不太一樣，可觀測高度從高到低依序為 VHF、UHF、L band，但高度解析度

卻反之，所以將不同頻段之剖風儀雷達共同觀測，將可以得到更清楚的大氣資訊，本文將呈現共同觀測期間為晴天的結果比較，並將以探空氣球來比對，其中第二部分為觀測原理及測風方法，第三部分為實驗儀器及資料處理流程，第四部份為結果比較與討論，第五部分為結論。



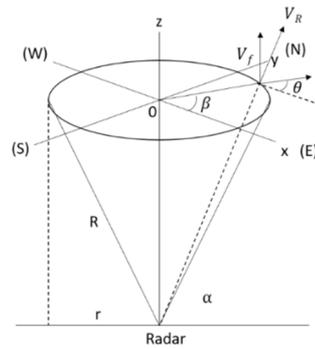
圖(一) 亂流與降水功率譜隨波長之分佈圖
[Larsen and Rottger, 1987]

二、觀測原理及測風方法

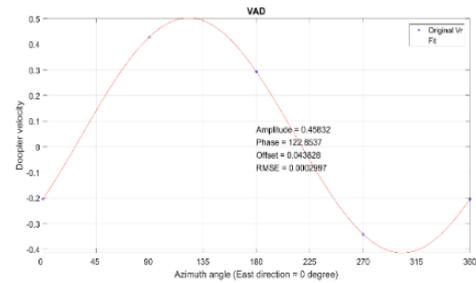
雷達被大量使用在二次世界大戰期間，但在雷達偵搜的過程中，常常發現在萬里無雲的晴空情況，仍然有回波的產生，當時沒有人能夠解釋這怪異的現象，故稱其為天使回波(Angle Echo)，此現象在戰後激起了部份專家的注意與興趣。隨後 Friend [1949])首先提出晴空回波(Clear Air Echo)是由於大氣折射指數呈層狀結構的穩定分佈時，對入射的電磁波產生部份反射之作用，所以雷達才會收到此反射的回波。隔年 Booker and Gordon [1950]由理論推導出，證明當大氣亂流存在時，將造成大氣折射指數不規則擾動，將會造成入射電磁波產生散射回波。因此，便可用大氣折射指數呈層狀結構造成的反射回波，與不規則擾動造成的散射回波來解釋晴空回波，並大致建立了晴空雷達回波機制的理論。

計算風場方法現今使用的有幾種，本次實驗中使用的方法為 Velocity Azimuth Display (VAD)，VAD 方法可以更深入地用來研究風場的變形項或風切項[Browning and Wexler, 1968]，在此簡化了 VAD 方法，如圖(二)，假設在固定仰角 α ，雷達波束隨著方位角 β 改變時，這段期間經過雷達體積(Radar Volume)的風場為均勻不變，可以將經訊號處理計算出的各方位之都普勒速度(Doppler Velocity)與方位角用正弦曲線擬和，如圖(三)，透過擬和後的正弦曲線之振幅、相位及偏差，就可以推算出當時雷達波束體積內風場的水平分量 V_h 、風的吹向與正東逆時針夾角 θ ，及風場垂直分量 V_f ，公式(1)如下：

$$\begin{aligned} V_R(\beta) &= V_h(\beta)\cos(\beta - \theta)\cos\alpha + V_f(\beta)\sin\alpha \\ &= V_x(\beta)\cos\beta\cos\alpha + V_y(\beta)\sin\beta\cos\alpha + V_f(\beta)\sin\alpha \\ &= b\cos(\beta - \theta) + a \end{aligned} \quad (1)$$



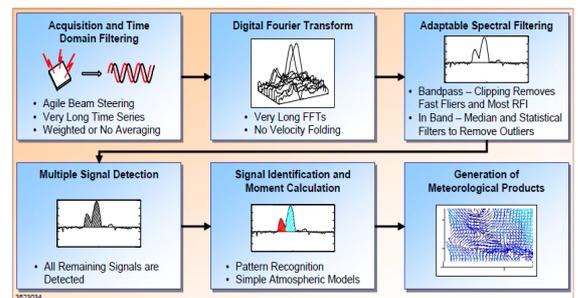
圖(二) VAD 觀測法示意圖



圖(三) 各方位都普勒速度與方位角擬和圖

三、實驗儀器及資料處理流程

本次實驗使用三個不同頻段之剖風儀雷達，分別為 VHF (52MHz)、UHF (449MHz) 及 L band (1290MHz)，其中 UHF 與 L band 頻段是從同一家美國公司 Radiometrics 採購之剖風儀雷達，故其資料處理流程方式大致相同，由圖(四)表示。



圖(四) UHF 與 L band 剖風儀雷達訊號處理流程示意圖，取自 Radiometrics User Manual

VHF 雷達資料處理流程較其餘兩雷達稍微不同，簡易敘述如下，因為時間域因無法有效區別不同頻率之訊號，在此將訊號轉至頻率域分析，從檔頭得知時間域資料點數為 585 點，在此採每 256 點做快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)，再做 2 次非同

相積分後得到隨著高度變化的頻譜圖 (Spectrum)，假設大氣回波在頻譜上呈高斯分佈(Gaussian Distribution)，再找出大氣訊號後利用動差法(Moment Method)找出重要的三個參數，如回波功率、都普勒頻率(速度)及頻譜寬(Spectral Width)，因為 VAD 方法所使用為傾斜波束，需考慮旁波瓣(Side Lobe)在頻譜上造成的影響，完全用程式來判讀容易出錯，在此為人工判讀確保其訊號在空間及時間上的一致性，最後用這些參數去做進一步的分析，VHF 雷達資料與其餘兩雷達資料的差異主要為 VHF 為該時間點直接觀測到，但 UHF 與 L band 因為其為自動化程序，為了資料品質上的控管，在資料上有做品質管理及時間平均的動作。

三個不同頻段剖風儀雷達之雷達參數分別在表一、表二與表三呈現，

表(一)

VHF Radar	
Tx Frequency	52MHz
Antenna Pointing	North, East, South, West oblique beam with 17° zenith angle and Vertical beam
Interpulse Period	200 μs
Pulse Width	1 μs
Coherence Integration	256
Min Range	1.5km
Range Gate	140
Trails	585

VHF 雷達參數表(粗體為本次比較所使用)

表(二)

Radiometrics RAPTOR Full Beam Steering Troposphere (FBS-T) Radar	
Tx Frequency	449MHz
Antenna Pointing	52.6°, 112.6°, 172.6°, 232.6°, 292.6°, 352.6° (clockwise from true North) oblique beam with 14.1°

Mode	zenith angle			
	3	0	1	2
Interpulse Period	28 μs	32 μs	124 μs	248 μs
Pulse Width	0.752 μs	0.752 μs	1.503 μs	6.013 μs
No. of Time Integration	16	16	4	2
No. of Frequency Integration	15	15	15	16
Phase Code Bits	1	4	8	4
Range Gate	25	46	37	23
Averaging Time	1800s	1800s	1800s	1800s
QC Time	1080s	1080s	1080s	1080s

UHF 雷達參數表(粗體為本次比較所使用)

表(三)

Radiometrics RAPTOR Hexagonal Beam Steering Boundary Layer (XBS-BL) Radar				
Tx Frequency	1290MHz			
Antenna Pointing	37°, 97°, 157°, 217°, 277°, 337° (clockwise from true North) oblique beam with 14.1° zenith angle and Vertical beam			
Mode	1	2	3(ver.)	4(ver.)
Interpulse Period	57.69 μs	76.92 μs	38.46 μs	57.69 μs
Pulse Width	1.292 μs	1.546 μs	0.462 μs	1.292 μs
No. of Time Integration	16	16	48	64
No. of Frequency Integration	13	12	12	12
Phase Code Bits	1	4	1	1
Range Gate	67	75	128	116
Averaging Time	600s	600s	600s	600s
QC Time	600s	600s	600s	600s

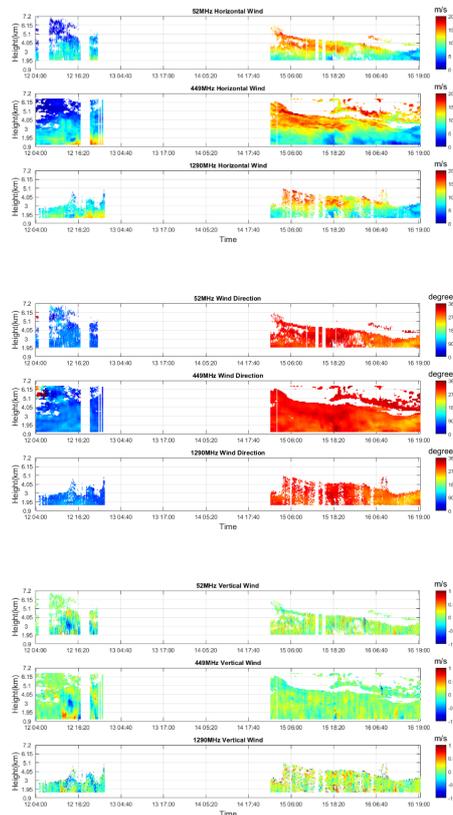
L band 雷達參數表(粗體為本次比較所使用)

四、結果比較與討論

本次實驗在中央大學共同觀測時間為 2017 年 9 月 12 日 0400LT 至 16 日 1900LT，在此文中只討論晴天時的資料，其中於 13 日與 14 日有降雨的情況發生，故 13 日與 14 日暫不討論。

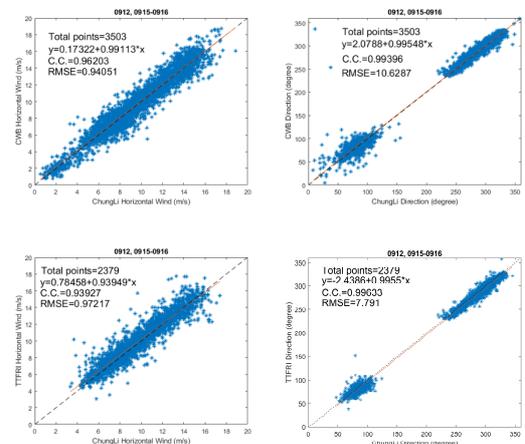
(一) 三個不同頻段剖風儀資料比較

因為要討論三個剖風儀間的共同觀測高度，但 UHF 及 L band 剖風儀在觀測上有不同 mode 的情況，於是本文中在 UHF 部分取 mode 0 及 mode 1 做合併，在重複觀測高度時是採用 mode 0 的資料，L band 則只取 mode 2 資料來使用，將 VHF、UHF 及 L band 中水平風速、水平風向和垂直速度在圖(五)依序畫出強度隨高度時間變化圖 (Height-Time Intensity, HTI)，水平風向上 9/12 日相較於 9/15 及 16 日在東西方向有明顯相反的現象，但可以看到三個雷達在水平風速與風向上的結果近乎一致，只有垂直速度的部分有部分差異，未來將利用不同測風法來討論。



圖(五) VHF、UHF 及 L band 剖風儀觀測出的水平風速、風向與垂直速度之強度隨高度時間變化圖 (Height-Time Intensity, HTI)

因為其資料在時間與空間解析度都不相同，為了驗證三個剖風儀觀測結果是否相當一致，在此以 VHF 雷達資料為參考，時間比較上為其餘兩個雷達資料時間找出與 VHF 雷達資料時間最接近值當作同一時間，高度比較上則是找出高度與 VHF 雷達資料最接近時再用比較資料中高度解析度最小的一半約為 25m 下去做判斷是否符合同一高度，圖(六)為以 VHF 雷達為參考所作的迴歸分析 (Regression Analysis)，是將三天內所有相同時間及高度的資料點放入討論，相較於 UHF 資料，因為 L band 觀測的高度較低，導致能用來比較的點數較少，左上為 VHF 與 UHF 在水平風速上的比較，右上為 VHF 與 UHF 在水平風向上的比較，左下為 VHF 與 L band 在水平風速上的比較，右上為 VHF 與 L band 在水平風向上的比較，黑線為斜率為 1 之直線，紅線為計算出之迴歸線，因為前面提到東西方向相反造成在水平風向上明顯分成兩團，在水平風速及水平方向上可以看到相關係數最高可到 0.99，結果顯示並無明顯之系統偏差 (Systematic Bias)，故可以得知三個剖風儀雷達在同個地點共同觀測出的水平風場是相當具有一致性的。



圖(六) 不同剖風儀雷達在水平風速與風向之迴歸分析圖

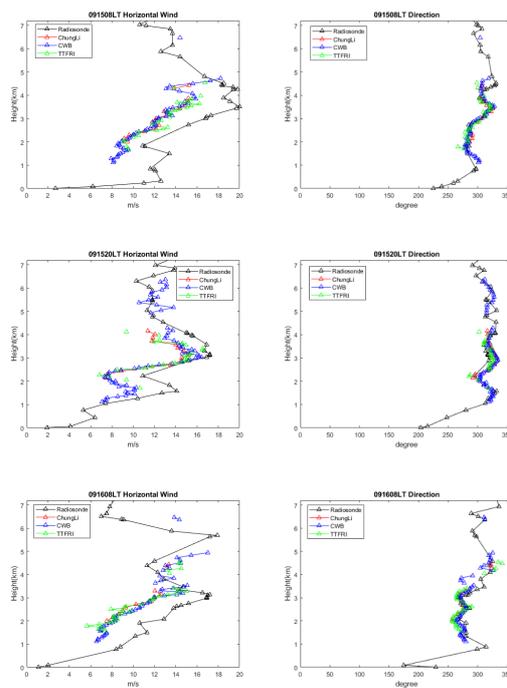
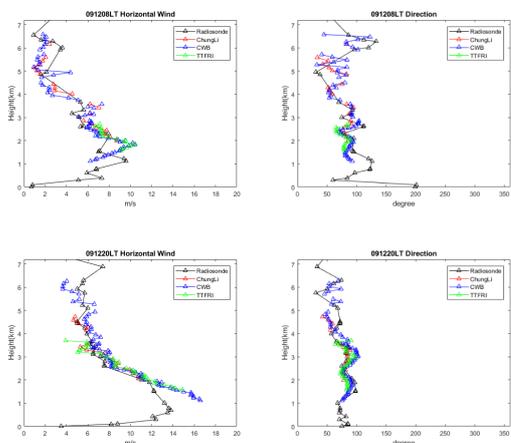
(二) 三個不同頻段剖風儀資料與探空資料比較

探空氣球資料為板橋探空站取得，與中壢特高頻雷達在地理位置有一定差異，如圖(七)表示，兩地點約差 26 公里。



圖(七)剖風儀共同觀測位置與測站位置圖

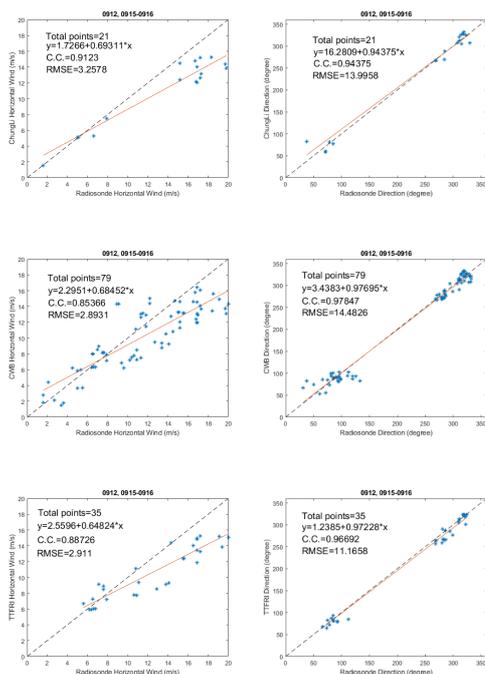
探空氣球每次施放時其飛行軌跡皆不相同，且其觀測方式為現地觀測(In-situ Measurement)相較遙測(Remote Sensing)的剖風儀雷達有所差別，在此將以探空氣球資料為參考來比較其與剖風儀雷達資料之差異，圖(八)由上至下時間分別為 091208LT、091220LT、091508LT、091520LT、091608LT，左邊為水平風速，右邊為水平風向，圖例黑色代表探空氣球、紅色代表 VHF、藍色代表 UHF 及綠色代表 L band 之資料點，首先從左側水平風速來比較，可以看到三個雷達資料曲線分布很一致，但跟探空氣球相比可能因地理及地形因素等造成 2km 以下水平風速是不太一致的，除了 091208LT 及 091220LT 在高度 2km 至 5km 風速四者相比較一致外，之後三個時間點探空資料在速度上都有明顯的高估，至於右側水平風向可以看出來四者的結果都相當一致。



圖(八)探空氣球與不同頻段剖風儀雷達資料高度與大小比對圖

為了更清楚的了解探空氣球的數據與剖風儀雷達的差異，將進行迴歸分析，因為四個資料間的高度解析度皆有差異，在此跟前述一樣，高度比較上找出高度與探空氣球資料最接近時再用比較資料中高度解析度最小的一半約為 25m 下去做判斷是否符合同一高度，如圖(九) 左邊為水平風速，右邊為水平風向，由上至下分別為 VHF、UHF 及 L band 雷達以探空資料為參考之比較，因為日期數不多，造成資料點其實不多，但仍可以看到左側水平風速在三個不同頻段雷達與探空資料比較上相關係數明顯降低到 0.85 左右，剖風儀雷達與探空氣球都有約 3m/s 之均方根誤差，該數據與 Weber and Wurtz [1990]提出剖風儀與探空氣球在水平風速的差異是相當接近的，且相較於斜率為 1 之黑線，資料所求出之迴歸線皆往右下偏移，可以得知在固定剖風儀水平風速時，探空氣球所量測到的水平風速明顯高估，至於水平風向相關係數仍然維持 0.94 以上，剖風儀雷達與探空氣球都有約 13° 之均方根誤差，可以看出在水平風向上的量測，兩種不同觀測系

統之結果是相當一致的。



圖(九) 探空氣球與不同頻段剖風儀雷達在水平風速與風向之迴歸分析圖

五、 結論

本次實驗為三個不同頻段之剖風儀共同觀測，文中探討在晴天情況下，剖風儀之間風場及剖風儀與探空氣球之間水平風場比較，剖風儀風場計算方法均為VAD法，三個雷達在水平風速及方向上結果很有一致性，水平風速之均方根誤差均在1 m/s以內，以VHF頻段為參考時相關係數有約0.97為高正相關且彼此間沒有系統性偏差存在，但在垂直速度上就有些許差異，未來將可利用不同測風法來討論VAD垂直速度資料之可信度。但剖風儀的水平風速結果與探空資料有顯著差異，不論剖風儀頻段高低，二者均方根誤差都在3 m/s左右，同時水平風速超過10 m/s以上時，探空儀量得的水平風速明顯比剖風儀要高，當水平風速為20 m/s時，前者比後者系統性地高了約4 m/s，造成此結果的原因有可能是因為探空氣球現地觀測的地點與剖風儀遙測地點風速不同，或是二者觀測方式的差別所致，原因仍有待釐清，但水平風向則是相當一致，未來將會把共同觀測時間內降雨情況的風場做進一步討論。

六、 參考文獻

- [1] Booker, H. G. and Gordon, W. E., 1950: "A theory of radio scattering in the troposphere", Proc. IRE 38:401-12.
- [2] Browning, K. A. and Wexler, R., 1968: "The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar", J. Appl. Meteorol., 7, 105-113.
- [3] Chilson, P. B., C. W. Ulbrich, and M. F. Larsen, 1993: "Observation of a tropical thunderstorm using a vertically pointing, dual-frequency, collinear beam Doppler radar", J. Atmos. Oceanic Technol., 10, 663-673.
- [4] Friend, A. W., 1949: "Theory and practice of tropospheric sounding by radar", Proc. IRE, 37, 116-138.
- [5] Fukao, S., K. Lakasugi, T. Sato, S. Morimoto, T. Tsuda, I. Hirota, I. Ximura, and S. Kato, 1985: "Simultaneous observation of precipitation atmosphere by VHF and C/Ku band Radars", Radio Sci., 20, 622-630.
- [6] Larsen, M.F., and J. Rottger, 1987: "Observation of thunderstorm reflectivities and doppler velocities measured at VHF and UHF", J. Atmos. Oceanic Technol., 4, 151-159.
- [7] Teshiba, M. S., P. B. Chilson, A. V. Ryzhkov, T. J. Schuur, and R. D. Palmer, 2009: "A combined wind profiler and polarimetric weather radar method for the investigation of precipitation and vertical velocities", J. Atmos. Oceanic Technol., 26, 1940-1955.
- [8] Weber, B. L., and D. B. Wuertz, 1990: "Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements", J. Atmos. Oceanic Technol., 7, 157-174.