

# 雷射式剖風儀觀測策略與運用

吳啟雄 李昌運 林裕豐  
空軍氣象聯隊氣象中心

## 摘要

空軍氣象聯隊為提升風場觀測能量及增加危安天氣監測，規劃於今(2016)年完成臺灣北、中、南及東部等四地區車載雷射式剖風儀(WINDCUBE 100S型)觀測系統建置，該系統係根據光達原理(LIDAR, Light Detection And Ranging technique)透過雷射光束通過大氣中之粒子(砂塵、水滴及氣溶膠等)所產生都普勒位移(Doppler shift)測量大氣中的風場。本文將針對新建置之剖風儀進行系統介紹，並說明相關應用產品及未來觀測策略與運用，期能藉由其高密度及改良式DBS(Doppler Beam Swinging technique)觀測方式，反演建構大氣環境風場，以彌補大氣垂直風場觀測不足，增強對中低空層天氣系統風場演變特性之掌握。

關鍵字：DBS反演、雷射式剖風儀

## 一、前言

天氣預報、氣候變化、航空、航海、軍事戰(演)訓及防救災等眾多領域對於大氣環境風場訊息都有不同程度需求，而風場資訊的精度及密度除了在氣象上會直接影響數值天氣的預報結果，更在運輸安全、軍事戰(演)訓及防救災任務執行等行動的環境分析評估中佔有相當比重的重要關鍵之角色。因此，充份掌握垂直大氣風場的資料，提供精確可靠參數是任務成功絕對必要之條件。

臺灣為位於西太平洋及亞洲大陸東南隅之副熱帶島嶼，地形為陡峭且複雜的海島地形，因其四面環海且平均高度2,000公尺的中央山脈縱貫臺灣全島緣故，地形對大氣環境風場所造成之影響相當顯著；本聯隊雖有清泉崗、馬公及綠島雷達站進行例行性作業掃描，並有地面測站與高空探空站進行觀測，但由於雷達所執行之立體掃描解析度並不高，且只求徑向風場變化，另需利用兩雷達站資料進行反演，才可取得立體風場資訊，而傳統高空觀測工具其資料時間與空間解析度亦無法針對特殊天氣系統進行一詳盡觀測，且無法針對特定地區及方位進行風場資訊蒐集，因此對於天氣系統的結構及物理過程並無法提供完善的資訊；然自Yeh and Cummins(1964)<sup>1</sup>運用雷射光束的都卜勒效應測量流體速度後，風場觀測技術得到了長足的發展；光達利用光的都卜勒效應，測量雷射光束在大氣中返回光波信號的都卜勒位移，來反演空間的風場分佈，與傳統的測風手段相比，光達有著較高的時間與空間解析度，並能提供特定區域的立體風場資訊等優點，已經得到了越來越多的應用，因此若能運用此一技術，針對影響臺灣天氣系統，進行觀測，瞭解其立體結構與物理演變過程的前兆，便能提供數值模式在參數選擇上更真實的依據，進而改善對天氣

系統的掌握。因此如何監測大氣風場變化，特別是邊界層大氣的風場分布與變化，對天氣系統發展及演變之分析與解釋相當重要。本聯隊所建置之剖風儀能夠連續自動監測，直接觀測定點垂直方向之中低空層及高密度的風場資訊，進而分析天氣系統之發展前兆及風場特徵，特別是中低空層風場的垂直分布以及隨時間演變特性，有利於對天氣系統結構及演變行為掌握，提早發覺潛藏於中低空層大氣之飛安潛危因子（如低空風切、風切變等天氣現象），以確保飛航安全。

## 二、雷射式剖風儀介紹

### (一)雷射式剖風儀觀測原理

空軍氣象聯隊所建置之雷射式剖風儀是法商Leosphere公司WINDCUBE 100S型機，其觀測原理是以該光學儀器向大氣中之粒子(塵象、水象粒子及氣溶膠等)發射一脈衝波，並接收其所發散信號，轉換為電子信號後，傳送至電腦，再經過信號處理方程反演，獲得該信號的都卜勒偏移量，進而計算出光束路徑上之徑向風場，而光脈衝波傳送到目標物的來回時間，則用來演算至目標物的距離；而因大氣無論晴雨均有氣溶膠存在，故可於儀器限度內藉由空氣中氣溶膠的移動，獲得所需之風場資料。WINDCUBE100S型機資料蒐集及處理示意如圖1<sup>2</sup>。

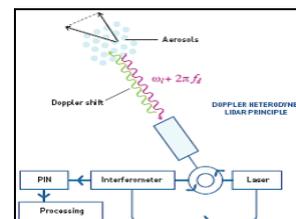


圖1.WINDCUBE100S型機風場資訊蒐集及處理示意圖。

一般雷射式剖風儀採用VAD (Velocity-Azimuth Display) 來進行風速量測，VAD掃描示意圖如圖2所示，意即該儀器每一次掃描均會以固定角度  $\varphi$  進行一次360°掃描，進而量測出掃描區域徑向風場。

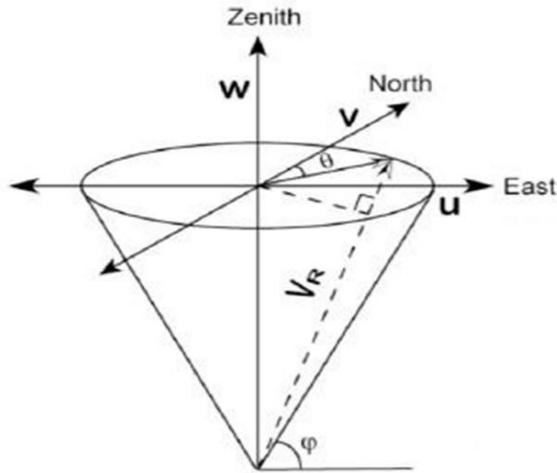


圖2. VAD掃描示意圖。

而定點風場  $V(u, v, w)$  可視為三個獨立的風場向量組成，理想情況下，量測空間某一點風場資訊，需同時計算出其三個方向的向量值，即至少需要三部量測系統，方能計算出此一風場資訊，因此多以DBS(Doppler Beam Swinging technique)觀測方式進行掃描，即分別朝垂直向、東向傾斜及北向傾斜方向發射三道雷射光束，並利用其三筆徑向風場資訊進行運算，以求得定點垂直大氣風場資訊；而在 WINDCUBE 100S型機所採用之方法為一改良DBS反演方法，即分別朝垂直向、北向、東向、南向和西向發射五道雷射光束，如圖3所示，求得該區域徑向風場，進行風場資料反演，以得出該區域風場資訊，其準確性亦較DBS反演方式為佳<sup>3</sup>，其演算方程式如下。

$$\begin{aligned}
 Vr\ 1 &= u \sin \theta_{las} + w \cos \theta_{las} \\
 Vr\ 2 &= v \sin \theta_{las} + w \cos \theta_{las} \\
 Vr\ 3 &= -u \sin \theta_{las} + w \cos \theta_{las} \\
 Vr\ 4 &= -v \sin \theta_{las} + w \cos \theta_{las} \\
 u &= \frac{Vr\ 1 - Vr\ 3}{2 \sin \theta_{las}} \\
 v &= \frac{Vr\ 2 - Vr\ 4}{2 \sin \theta_{las}} \\
 w &= \frac{Vr\ 1 + Vr\ 3 + Vr\ 2 + Vr\ 4}{4 \cos \theta_{las}}
 \end{aligned}$$

其中  $Vr\ 1$ 、 $Vr\ 2$ 、 $Vr\ 3$  及  $Vr\ 4$  分別代表北、東、南及西向之雷射光束上之風場向量； $u$ 、 $v$  及  $w$  分別表水平方向  $x$ 、 $y$  及  $z$  方向之風場向量； $\theta_{las}$  為垂直向與北、東、南及西方向雷射光束之夾角。

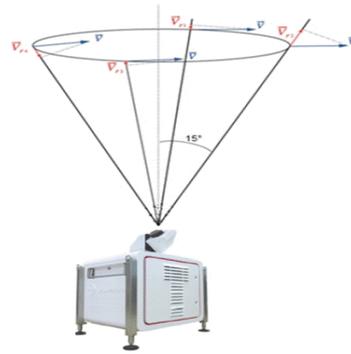


圖3. 雷射式剖風儀DBS模式示意圖。

## (二)規格及性能介紹

WINDCUBE100S型雷射式剖風儀為一輕量型雷射光達，便於攜帶，且可快速組裝使用，而其配備高強度外殼，具有防水、防塵、防鹽之防護能力，更可於戶外特定區域進行觀測，以利蒐整特定地區長期觀測數據，其外型如圖4及圖5。

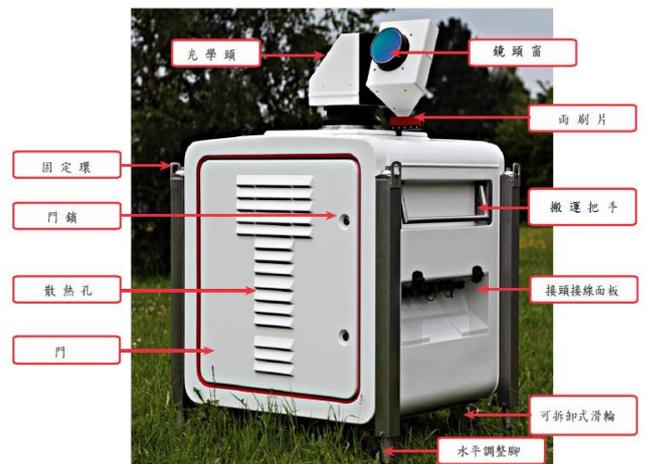


圖4. WINDCUBE 100S型機外型圖。



圖5. 機動式WINDCUBE 100S載具外型圖。

Liu(2008)<sup>4</sup>與王(2013)<sup>5</sup>提出驗證，將WINDCUBE系列光達與風杯風速計及測風塔進行比對分析，已

驗證其具有相當測量精度，而它具有能每秒鐘採集50公尺至3,500公尺之間為模式設定整數倍高度之徑向風場資料，若在8秒積分條件下，WINDCUBE 100S型機的探測距離最高可達到5,500公尺；而若以DBS反演重建大氣風場，在自由對流層以上為晴朗無雲的狀況下，資料最高可反演達12公里，並能運用內建資料庫軟體，記錄每秒鐘的任一組資料，硬體規格及性能概要詳如表1。

表1：WINDCUBE 100S型機硬體規格及性能概要

| 測量範圍         |   |
|--------------|---|
| PPI 及 RHI 模式 | 50m~5,500m (量測範圍與大氣環境狀況運算模式有關，並取決於不同積分時間、能見度、氣溶膠類型、湍流，以及LIDAR 掃描策略配置等)                              |
| DBS 模式       | 最高可達 14km，取決於大氣環境狀況   |
| 儀器性能         |   |
| 積分測量時間       | PPI、RHI 及 LOS 模式：0.5~8 秒<br>DBS 模式：0.5~10 秒   |
| 顯示距離解析度      | 25m, 50m, 75m, 100m 可選  |
| 速度測量精度       | 徑向風速精度 < 0.2m/s (2km 以下)  |
| 徑向風速範圍       | -30m/s~30m/s  |
| 物理距離解析度      | 25m   |
| 最小測量範圍       | 50m   |
| 運行/模式        |   |
| 掃描類型         | 連續掃描模式，全(半)球掃描  |
| 方位角範圍        | 0°~360°   |
| 定位精度         | 0.01°   |
| 仰角           | -10°~ 190°  |
| 最大旋轉速度       | 30°/s   |
| 可選模式         | -PPI (平面掃描模式)<br>-RHI (仰角掃描模式)<br>-LOS (連續固定角度量測模式)<br>-DBS (垂直風場反演)                                |
| 硬體和運行環境      |   |
| 尺寸           | 995×810×1291 mm (包括掃描頭)   |
| 重量           | 190kg + 30kg (兩部分可分離)   |
| 運行環境         | 溫度範圍：-25℃ ~ 45℃   |
|              | 運行濕度：10% ~ 100%   |
| 雷射源          | 脈波雷射(1.54μm)  |
| 功耗           | 500W ~ 1,600W   |
| 輸出資料         | -GPS 定位/時間<br>-掃描位置<br>-選定時間及範圍徑向風場<br>-DBS 模式風場重建資料<br>-接收散射電子訊號資料<br>-相對後向散射電子訊號資料<br>-原始電子訊號數據資料 |

### 三、觀測產品介紹

WINDCUBE 100S型光達其觀測模式產品主要分風場資訊及氣溶膠產品2類，可於其儀器限度內執行觀測，而氣溶膠產品雖硬體可支援掃描，但需經軟(韌)體升級後，方可獲取氣溶膠資料，產品資料如圖6；而其風場資訊產品主要以4種模式進行掃描，其4種模式產品如下：

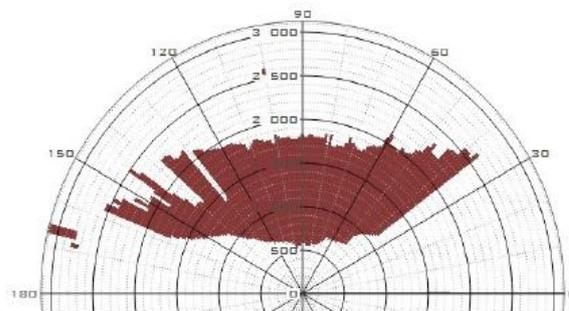


圖6.RHI掃描模式之氣溶膠產品資料圖，色階部分為氣溶膠分布情況。

(一)PPI模式：可以-10°至90°的固定高度角，於水平方位角執行0°至360°方向掃描，運轉模式示意如圖7，並藉由儀器求得其徑向風場資訊，產品資料如圖8。

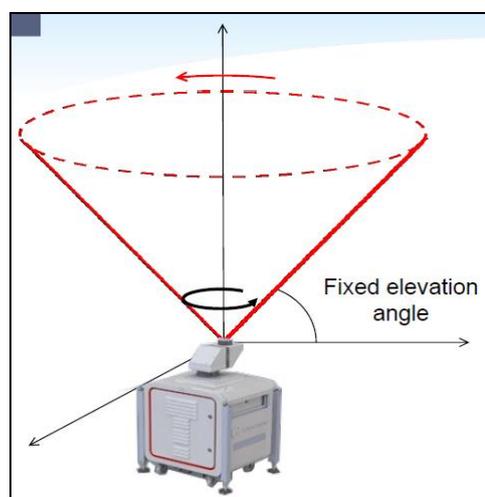


圖7.PPI掃描模式示意圖。

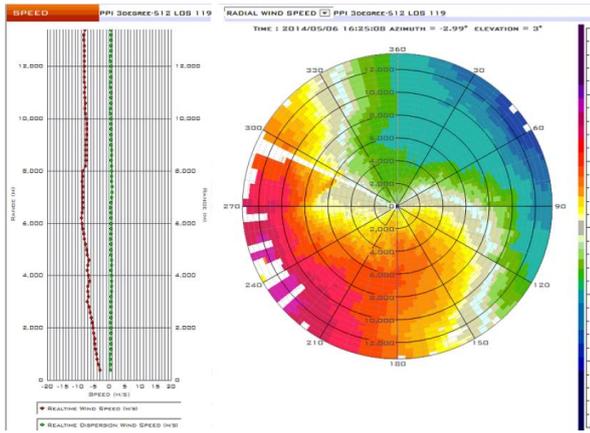


圖8. PPI掃描模式產品資料圖；暖色系色階表遠離測站徑向風速，冷色系色階表接近測站徑向風速。

(二)RHI模式：可於 $0^{\circ}$ 至 $360^{\circ}$ 之間任一固定水平方位角，做垂直方向掃描，運轉模式示意如圖9，並藉由儀器求得其徑向風場資訊，產品資料如圖10。

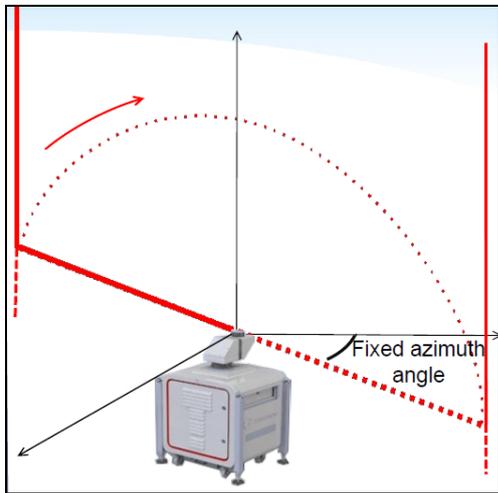


圖9. RHI掃描模式示意圖。

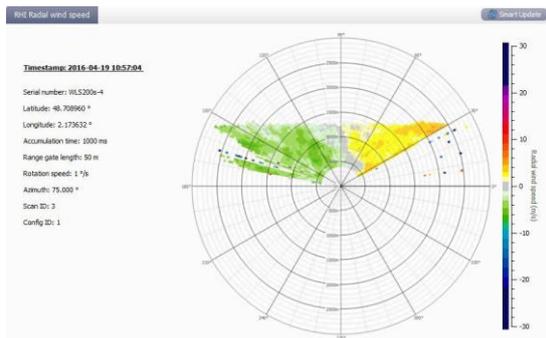


圖10.RHI掃描模式產品資料圖；暖色系色階表遠離測站徑向風速，冷色系色階表接近測站徑向風速。

(三)LOS模式：用來觀測固定方位之徑向風場資訊，運轉模式示意如圖11，並藉由儀器求得其徑向風

場資訊，且由軟體顯示一時序分布，產品資料如圖12。

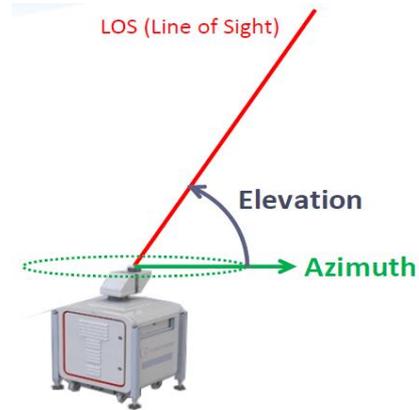


圖11.LOS掃描模式示意圖。

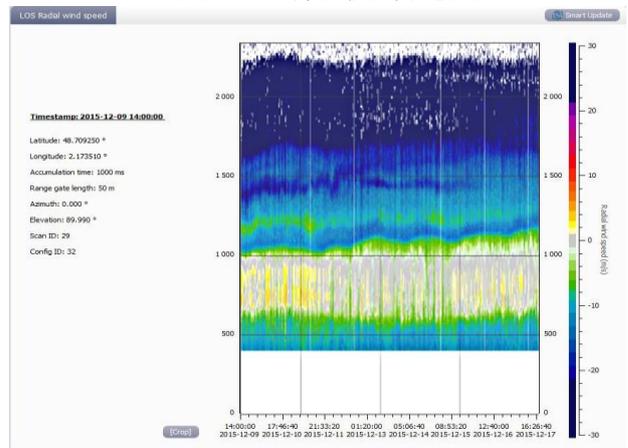


圖12.LOS掃描模式產品資料圖；暖色系色階表遠離測站徑向風速，冷色系色階表接近測站徑向風速，縱軸表高度，橫軸為時間序列。

(四)DBS模式：主要用於垂直風場反演，藉由儀器求得徑向風場資訊後，運用演算法反演出垂直向的風場資訊，且由軟體顯示一時序分布，運轉模式示意及產品資料如圖13及圖14。

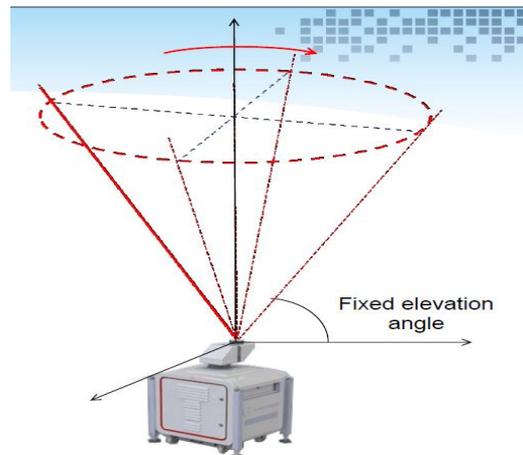


圖13. DBS掃描模式示意圖。

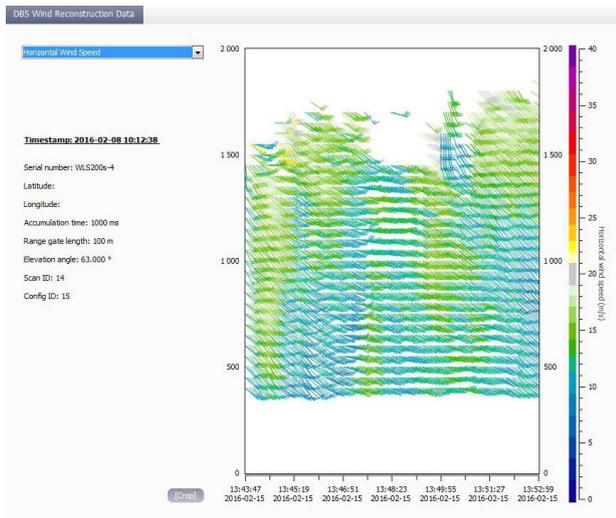


圖14. DBS掃描模式產品資料圖；風標為各高度之風場資訊，縱軸表高度，橫軸為時間序列。

#### 四、觀測策略及運用構想

空軍氣象聯隊規劃於2016年完成臺灣北、中、南及東部等四地區車載雷射式剖風儀建置，分別於各地區針對當地大氣背景與環境狀況長期蒐集定點風場資訊，以提供資訊，做為大氣環境風場及天氣系統發展前兆及演變等參考依據；藉由剖風儀密集風場觀測執行國軍戰演訓及防救災任務及相關研究議題，以精進本聯隊氣象作業能量。針對本次購置之車載式剖風儀觀測系統，本聯隊在運用上將以下列項目為主要執行方向。

- (一) 依地理位置區分北、中、南、東四區域執行例行性觀測作業，另於國軍執行戰演訓或於防救災任務啟動時，由最近任務目標區之配置單位負責該區域剖風儀觀測任務，以適時、適切並有效支援國軍各類戰演訓任務。
- (二) 與高空探空及雷達資料做一比對分析；本次所建置之剖風儀為先進的風場遙測系統，相較於高空探空設備的建置，不僅資料時間與空間解析度高，而在國外亦有David(2006)<sup>6</sup>等將光達與位於Høvsøre的測風塔資料做比對，指出光達雖然容易受到降雨、低雲等影響其量測精確度，但整體上與風杯式風速計所量測風速資料有極佳的相關性，顯示光達已具備相當精度，但因各地大氣環境與地形仍有所差異，故須進行風場資訊驗證。
- (三) 除驗證風場資訊精度外，另需蒐集長期觀測資料，建置完整之風場背景資料。因臺灣地區四面環海，地形複雜，可利用其機動性與資料高密度性，進行特定區域風場資訊蒐集分析，如觀測在海岸線一帶之風場，於定點進行短時間連續觀測，蒐整歸納海陸風的日週期變化，更可增進對

固定區域在空間上及時間上中、長期變化，進而建構大氣環境風場背景資訊。

- (四) 運用其所蒐整之大氣環境風場資料，分析歸納其資料特性，更可利用風場資料高密度特性，進行數值資料同化，進而增進數值模式正確性，進而增進對風速、風向以及大氣邊界層特性在時間與空間上的變化的預報能力。
- (五) 針對特定天氣系統或配合大型實驗計畫，由任務目標區所配置儀器，負責該地區風場資訊蒐整任務，有效取得風場資料，增進對臺灣地區天氣系統之結構與變化的瞭解。

#### 五、結語與展望

空軍氣象聯隊所建置之機動式雷射式剖風儀，具有高時間與空間解析度資料的特性，且資料精確度獲國外學者驗證，亦顯示出其可靠性及實用價值，後續除設置在固定區域進行例行性觀測，並將其應用於即時風場觀測，增益飛航安全預警能量外，進而蒐整固定區域之大氣風場，建立區域性大氣環境風場資訊，並與雷達、探空資料做一比對，分析其偏差，更可將觀測資料進行數值模式資料同化，優化數值預報產品，期能進一步增進數值模式預報能力且；且利用機動性與高解析度資料特性，配合國內產、經、學界及實驗計畫實施觀測，針對劇烈天氣系統等功能發揮最大的貢獻，進而維護飛行安全與降低因劇烈天氣造成國家人民生命財產的危害。

#### 參考文獻

- [1]Yeh Y,Cummins H. 1964. Localized fluid flow measurements with He-Ne laser spectrometer, Appl. Phys. Lett.,4:176-178
- [2]胡明寶, 張鵬,風廓線雷達測量性能分析.氣象科技,2011,39(3):315-319
- [3]夏俊榮,王普才, 閔敏, 新型多普勒測風激光雷達Windcube 的風參數觀測與驗證, 氣候與環境研究,2011,16(6):733-741
- [4]Liu Bingyi. 2008 Performance optimization and wind field retrieval for mobile wind ,Ph.D. dissertation,Ocean University of China 110pp.
- [5]王喬喬, 張秀芝,王尚昆.Windcube 激光雷達與測風塔結果對比.氣象科技,2013,41(1):20-26
- [6]D.A. Smith, M.H.and A.S. Coffey, Wind Lidar Evaluation at the Danish Wind Test Site in Høvsøre, Wind Energ. 2006; 9:87-93

