

L波段剖風儀雷達在台灣西南部觀測之初步結果

Preliminary Results of L-Band Wind Profiling Radar Observation in Southwest Taiwan

陳孟遠 黃紹欽 風雷

國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心

摘要

剖風儀雷達 (wind profiling radar) 的功能為量測大氣三維風場的垂直剖面, 其回波主要是來自於大氣折射指數不規則體對電磁波的散射或反射, 這種雷達系統的電波頻率大致從特高頻 (Very High Frequency, VHF) 到超高頻 (Ultra High Frequency, UHF), 依頻率高低在應用上也會有不同。使用較高的頻率可得到較好的空間解析度, 如需較高的觀測範圍則需較低的頻率與較大的天線。工作頻率在 1GHz 左右的剖風儀雷達主要用來觀測大氣最低幾公里的風場, 也稱之為邊界層剖風儀 (boundary layer profiler), 但在這個頻段如有降水粒子存在將會成為產生回波的主要來源。在此研究中呈現了 L 波段剖風儀雷達在台灣西南部觀測之初步結果, 包含了與探空資料的比對。

關鍵詞: 剖風儀雷達、無線電探空

一、前言

雷達為探測大氣非常有用的工具, 其中剖風儀雷達 (wind profiling radar) 是其中一種大氣觀測用的雷達, 其功能在量測大氣三維風場的垂直剖面, 主要接收來自大氣折射指數不規則體的回波, 但在降雨的情況下, 仍會接收到來自降水粒子的回波, 並且會依剖風儀雷達的頻率會有不同的影響程度。接近 50MHz 頻段特高頻 (Very High Frequency, VHF) 之剖風儀雷達對於大氣折射指數不規則體與降水粒子的敏感度差不多, 即使在降雨的情形下來自也可得到大氣的速度, VHF 雷達雖然觀測高度較高, 但相對於更高頻段的剖風儀雷達而言解析度較差, 且較低層之大氣無法觀測, 另外對於速度相近之大氣與降水粒子回波難以分辨。900MHz 以上之剖風儀雷達屬於大氣邊界層雷達, 用來觀測大氣最低幾公里的範圍, 可提供更好的空間解析度, 但對此頻段之剖風儀雷達而言, 降水幾乎主宰了回波的來源,

雖然有助於瞭解降水粒子的特性與降雨參數的反演 (Kanofsky and Chilson, 2008), 但難以得到大氣本身之資訊。國外已有一些文獻便是將不同頻段之剖風儀雷達進行共同觀測 (Chilson et al., 1993), 甚至也有剖風儀雷達與降雨氣象雷達的研究 (Fukao et al., 1985; Teshiba et al., 2009)。

由於剖風儀雷達可提供高時間解析度之高空風場量測, 觀測的資料也有相當高的可信度 (Strauch et al., 1987; Kudeki et al., 1993; Astin, 1997), 世界上已經設置了許多不同的剖風儀雷達, 持續進行相關的觀測與研究, 但目前國內剖風儀雷達數量仍相當稀少。國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心 (簡稱颱風洪中心) 於 2015 年建置一台 L 波段可移動式剖風儀雷達 (陳, 2015), 屬於邊界層剖風儀 (boundary layer profiler), 其頻率為 1290MHz, 並於 2016 年間架設於台灣西南部進行觀測, 期望能提供更多的觀測資料, 對於颱風與西南氣流所造成的劇烈天氣有能更

精確的掌握。本文將呈現了在西南部觀測期間的一些初步結果，其中第二部分為大氣雷達之發展與觀測原理，第三部分為剖風儀雷達測風方法與資料處理流程，第四部分為觀測結果與討論。

二、大氣雷達之發展與觀測原理

在第二次世界大戰期間雷達被大量使用，但在雷達偵搜的過程中，有時會發現在無目標物且萬里無雲的晴空 (clear air) 之中，也會有回波的產生，當時尚無人能解釋此奇怪的現象，因稱其為天使回波 (Angel Echo)，此現象在戰後引起部份專家的注意與興趣。隨後 Friend (1949) 首先提出晴空回波是由於大氣折射指數 (Atmosphere Refractive Index) 呈層狀結構的穩定分布時，對入射的電磁波產生部份反射之作用，所以雷達會收到此反射的回波。Booker and Gordon (1950) 由理論推導出，證明當大氣有亂流存在時，造成了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。至此，終於可用大氣折射指數層狀結構的反射回波，與不規則擾動的散射回波來解釋晴空回波，也大致建立了晴空雷達回波機制的理論。其示意圖如圖 1 所示。

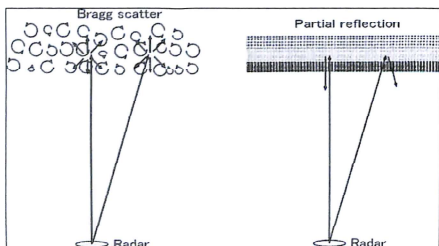


圖 1 剖風儀雷達回波機制示意圖，取自 Fukao and Hamazu (2014)。

西元 1962 年，秘魯 Jicamarca 雷達正式成立，加入了大氣觀測的行列，而由於雷達技術的引進，使得 Woodman and Guillen (1974) 成功的觀測到對流層、平流層及中

氣層的大氣風場和亂流。因此開啟了大氣雷達 (atmospheric radar) 觀測研究的領域。隨後，又有許多大氣雷達加入了研究的行列，如 1975 年美國的 SUNSET 雷達、1976 年德國的 SOUSY 雷達、1985 年日本的 MU 雷達以及台灣桃園的中壢特高頻雷達。而大氣雷達依觀測高度又可細分為幾類，與發射功率與天線大小的乘積有很大的關係，這些分類詳如圖 2 所示。這些大氣雷達所使用的電波波長大約在數十公分至數公尺間，比起降水粒子 (precipitation) 的粒徑大很多，因此這些大氣雷達也可接收到降水粒藉由雷萊散射 (Rayleigh scattering) 而產生的回波，更有許多利用大氣雷達來觀測降水的研究 (Fukao et al., 1985; Larsen and Röttger, 1987)。關於大氣雷達的相關應用可參考 Hocking et al. (2016) 中有詳細的介紹。

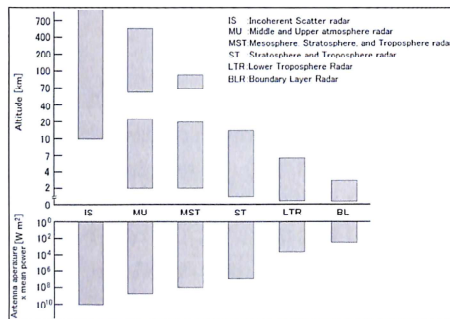


圖 2 大氣雷達之分類，取自 Fukao and Hamazu (2014)。

三、剖風儀雷達測風方法與資料處理流程

大氣雷達主要以大氣折射指數不規則體為目標物，將雷達系統的軟硬體做特殊的設計與修改後，使觀測之功能侷限在量測大氣的三維風場為主，這種雷達被稱為剖風儀雷達，其測量風場的方法有幾種，其中一種為都卜勒波束掃描法 (Doppler Beam Swinging, DBS)。這種方法是利用電磁波的

都卜勒效應 (Doppler effect)，即雷達目標物與天線之間的距離隨時間發生變化時，所產生的回波將有頻率偏移現象。在實際應用上須將雷達波束分別朝不同的方向及接收，經過訊號處理後算出目標物在各波束方向的平均逕向速度，綜合不同方向之逕向速度，根據簡單之幾何關係就可估算出大氣的風場，其示意圖如圖 3。颶洪中心 2015 年由美國 Radiometrics 公司採購之剖風儀雷達，便是採用這種測風方法，使用一個垂直波束和六個傾斜波束，傾斜波束之天頂角為 23 度，間隔 60 度之方位角，基本規格及訊號處理流程分別如如表 1 與圖 4 所示。

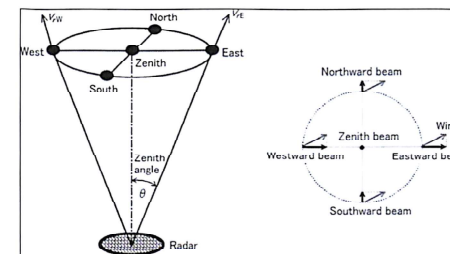


圖 3 都卜勒波束掃描法，取自 Fukao and Hamazu (2014)。

表 1 颶洪中心剖風儀雷達基本規格表

Radiometrics RAPTOR Hexagonal Beam Steering Boundary Layer (XBS-BL) Radar	
Specification	Value
Tx Frequency	1290 MHz
Antenna Type	Planar hexagonal phased array using micropath elements with molded radome and clutter fence
Antenna Pointing	7 directions (6 oblique and 1 vertical beams);
Antenna Gain	28 dBi
Antenna Beamwidth	≤ 8°
Peak Transmit Power	1400; up to 15% duty-cycle
Minimum Range	75 to 120 m (depends on clutter environment)
Mode	0 1 2
1. Pulse Width	0.46 μs 1.29 μs 1.55 μs
2. Phase Code	1 1 4
3. Oversampling	3 3 3

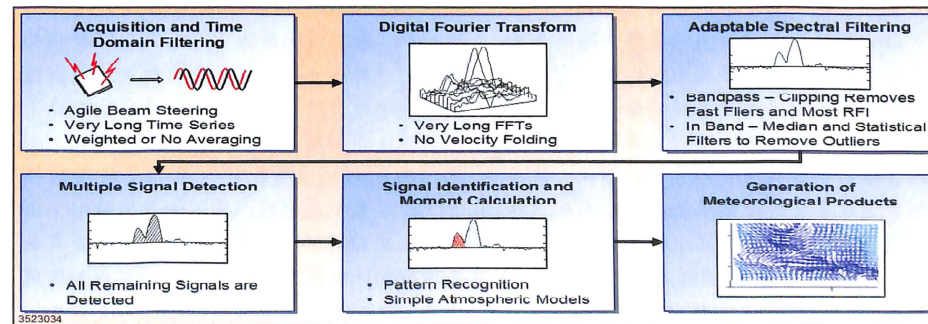


圖 4 剖風儀雷達訊號處理流程圖，取自 Radiometrics.com。

四、觀測結果與討論

本研究剖風儀雷達資料觀測時間為 2016 年 5 月至 9 月，雷達架設於高雄市前金區國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心，個案包含西南氣流與莫蘭蒂颱風之觀測，並與附近之測站與探空進行比對，各站之地理位置如圖 5。



圖 5 剖風儀雷達與其他測站位置圖。

(一) 剖風儀雷達風場與探空資料之比對

颶風中心於 2014 年起，因應地球暖化及氣候變遷環境下災害性天氣頻率增加趨勢，官學研單位均有收集災害性天氣密集觀測資訊之需求，故籌劃推動成立『劇烈天氣聯合觀測團隊』，希望能整合國內有限資源進行大型觀測實驗並期能培養及訓練參與學生之實際觀測能力。西南氣流暴雨觀測實驗之目的在於觀測臺灣西南部地區梅雨季大氣環境條件，藉由密集觀測與資料的收集，瞭解西南氣流之大尺度環境特徵及中尺度對流系統的發展特性。2016 年西南氣流聯合觀測實驗於 5 月 23 日至 6 月 14 日舉行，由颶風中心與國內官學研單位共同合作，實驗期間，使用多種氣象及水文觀測儀器於臺灣西南部地區進行長時間及空間解析度之觀測取樣，其中包含了剖風儀雷達與加密探空觀測。2016 年實驗期間共發布兩次加強觀測期 (Intensive Observation Period, IOP)，分別為 6 月 5 日 12 時至 6 日 12 時與 6 月 10 日 00 時至 14 日

00 時 (UTC)。剖風儀雷達與探空氣球都可觀測高空之風場，但兩者的觀測方式是完全不同的，剖風儀雷達是屬於遙測的方式，探空氣球是現場量測；剖風儀所得到的每筆資料是時間與空間平均後的結果，每次的取樣空間是固定的，而探空氣球比較接近是單點的量測結果，且每次施放後飛行得軌跡位置都不相同。為比較這兩種不同方式的觀測結果，我們將實驗期間剖風儀雷達水平風的觀測與附近屏東機場 (站碼 46750) 與小琉球 (站碼 99750) 施放探空的結果作比較，其中剖風儀雷達是取 30 分鐘的平均風進行資料比對。剖風儀雷達在此實驗中使用兩種觀測模式交錯觀測，low mode 使用較短脈波，可得到較佳之解析度，但可觀測高度較低，觀測範圍在 4 公里以下，high mode 則觀測高度較高，但解析度較差，觀測範圍在 1.5 至 6.7 公里間。此外在降雨的情況下，剖風儀仍會接收到來自降水粒子的回波，訊號將包含了大氣與降雨的部分，因此先將晴空與降雨的個案分開討論。首先為晴空的部分，圖 6 為 2016 年 6 月 1 日 12 時 (UTC) 剖風儀雷達風場資料與探空資料之比對，並顯示了剖風儀雷達回波的訊號雜訊比剖面 (Signal to Noise Ratio, SNR)。由此圖可發現，基本上小琉球上空的風向與屏東機場上空相當吻合，除了最接近地面的 400 公尺以下變化的趨勢有一點不一致，剖風儀之觀測結果與探空觀測也相當接近。在風速上 3.5 公里以下小琉球上空的風速都比屏東機場都要大，剖風儀觀測到的風速比較接近屏東機場的探空，但在最低層也有一些不一致的情形，由於各站之間地理位置不同，最底層的差異也是合理的。但須注意的是 2.5 公里以上剖風儀雷達觀測到的風速明顯比探空要大很多，且愈高誤差愈大，比對訊號雜訊比發現在 2.5 公里以上相當低，大致上在 -20dB 左右。在

訊號雜訊比低的情形下，在頻譜上偵測目標物的訊號容易產生錯誤，將頻譜的隨機擾動誤判為真正訊號，造成最後風速有較大的誤差。另一個例子為 2016 年 6 月 13 日 00 時 (UTC) 之比對 (如圖 7)，觀測時間內也是無降雨的情形，7 公里以下幾乎都是西南風，剖風儀雷達之觀測結果與探空結果也都相當一致，與圖 6 之比較，圖 6 在 2.5-3.5 公里訊號雜訊比明顯比較好，在風場的觀測上就不像圖 7 中 2.5 公里以上就有很大的誤差。因此在訊號雜訊比夠高的情形下，剖風儀雷達能提供可信的觀測結果。圖 8 為 2016 年 6 月 10 日 06 時 (UTC) 剖風儀雷達風場資料與探空資料之比對，此時有很明顯的降雨發生，由圖中可發現 L 波段之剖風儀雷達在降雨發生時其回波會比晴空時要強許多，以這

個時間為例訊號雜訊比可比晴空時要大 20 dB 至 30dB，在這種情形下所接收到的訊號幾乎都是來自降水粒子的貢獻。根據探空資料溫度 0°C 之高度大約在 5.1 公里處，剖風儀雷達的訊號雜訊比也觀測到此高度降雨融解層所產生之亮帶結構，回波強度又高了 10 dB 左右。此外水平風場之比對顯示剖風儀雷達與探空之一致性可達到 6 公里以上，可觀測的高度比晴空時更高。因此在這種降雨環境下，雖然回波是來自於降水粒子，剖風儀雷達仍有可能產出具有代表性之水平風場觀測資料。由此結果可發現，剖風儀雷達不但可實現高空風場之連續觀測，更有助於對降水環境作進一步之研究。

在聯合觀測實驗中，剖風儀雷達架設於高雄市前金區的另一個目的為評估是否可觀

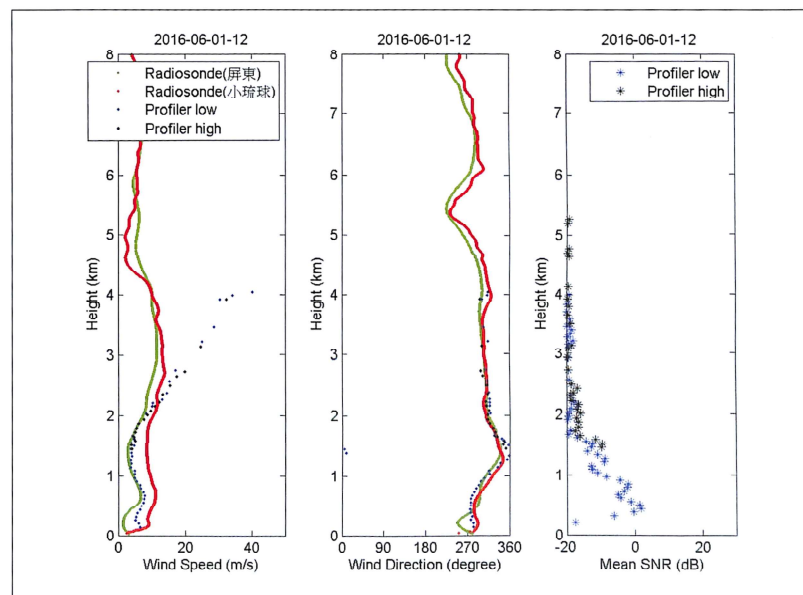


圖 6 2016 年 6 月 1 日 12 時 (UTC) 剖風儀雷達風場資料與探空資料之比對。左圖與中圖分別為風速與風向，綠線與紅線分別為屏東機場與小琉球探空資料，點為 30 分鐘剖風儀平均風，藍色與黑色分別為 low mode 與 high mode，右圖為剖風儀雷達訊號雜訊比。

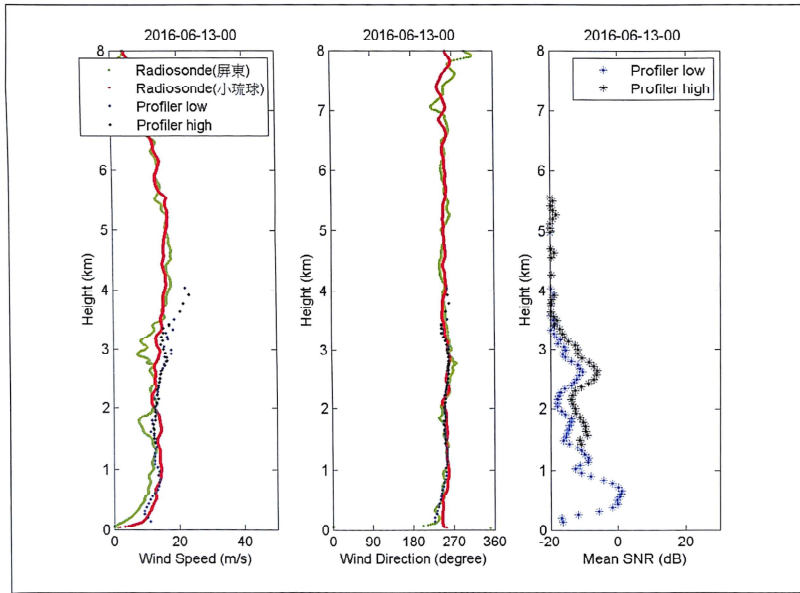


圖 7 2016 年 6 月 13 日 00 時 (UTC) 剖風儀雷達風場資料與探空資料之比較，如圖 6。

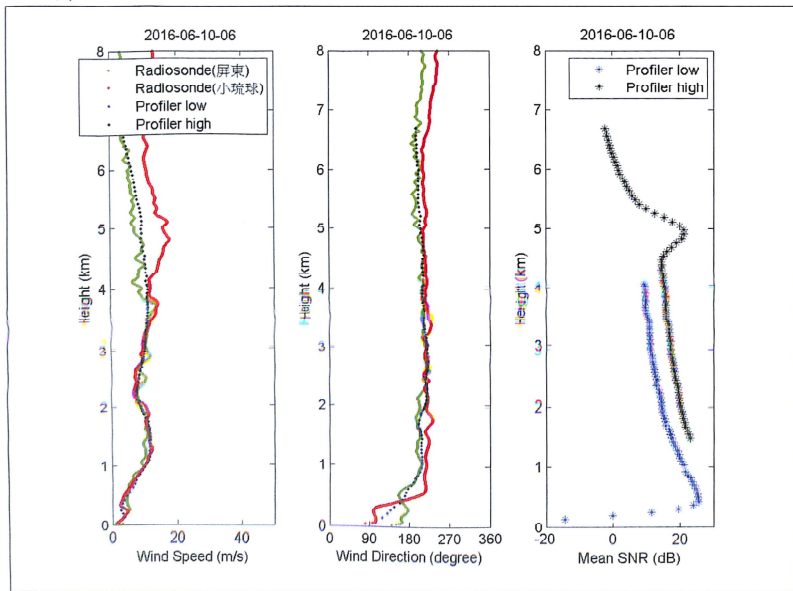


圖 8 2016 年 6 月 10 日 06 時 (UTC) 降雨時剖風儀雷達風場資料與探空資料之比較，如圖 6。

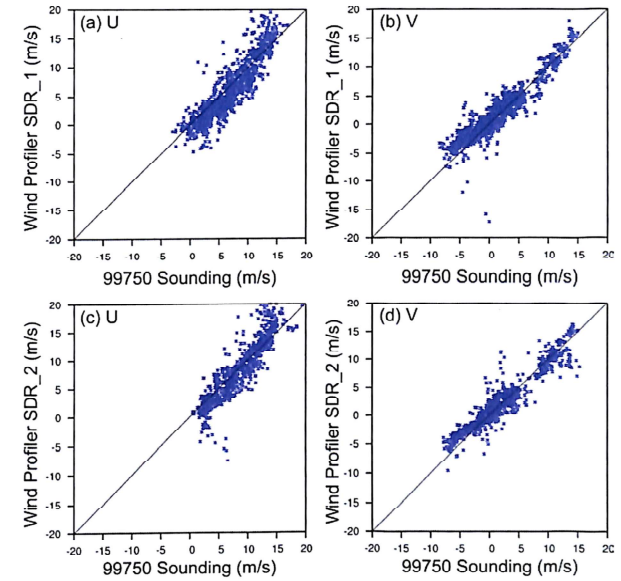


圖 9 晴空時剖風儀與小琉球探空風場散布圖。

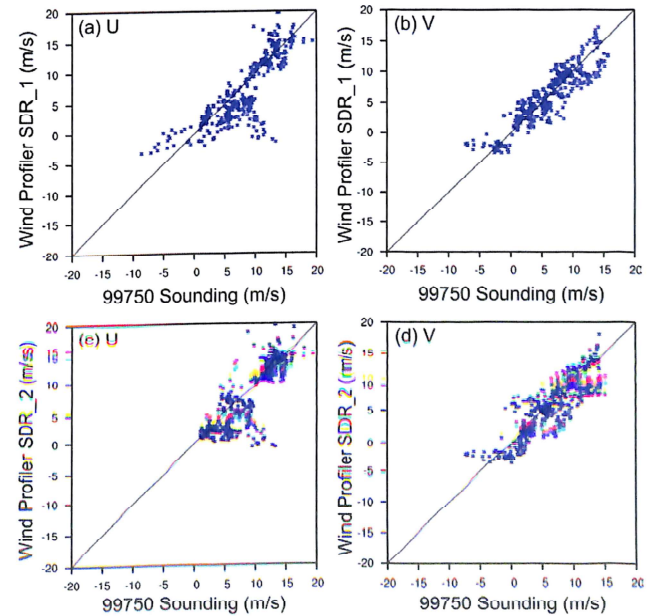


圖 10 降雨時剖風儀與小琉球探空風場散布圖。

測到西南氣流未受到地形影響之風場結構，因此進行小琉球探空及剖風儀風場統計分析。於實驗期間，共有 44 筆資料可供交互比對，其中，晴天 35 顆，雨天 9 顆。取得高時間解析度探空及剖風儀資料後，先將資料分別內差至每 100 公尺高度層，再依照剖風儀不同觀測模式而區分為 low mode (SDR_1) 及 high mode (SDR_2)，並區分晴空與降雨的環境來分析剖風儀風場與探空兩者間的相關性，其結果如圖 9 與圖 10。

晴空環境下 (圖 9)，兩種不同觀測模式的資料都與探空觀測相近，U 及 V 分量的相關係數在 low mode (high mode) 時分別為 0.84 (0.84) 及 0.93 (0.94)，為高度線性相關，顯示剖風儀的風場觀測能力相當不錯。與晴天相比，降雨時 (圖 10)，剖風儀與探空間就有較大之差異，low mode (high mode) 的 U 及 V 分量之相關係數略降至 0.81 (0.76) 及 0.90 (0.85)，高解析度的風場觀測資料似乎較不容易受到降雨影響，但因本研究比對樣本數較少，仍需進一步收集更多資料來分析；雖然在雨天環境中，相關係數有些微下降，但仍可維持在 0.7 以上，這也代表剖風儀的風場仍具相當之代表性。

(二) 莫蘭蒂颱風剖風儀雷達之觀測結果

強烈颱風莫蘭蒂為 2016 年編號第 14 號颱風，9 月 13 日晚間起其暴風圈逐漸進入臺灣東南部陸地及恆春半島，對臺灣東部、中南部及澎湖、金門地區構成威脅。根據中央氣象局資料，9 月 14 日 13 時 (LST) 颱風中心位置於北緯 22.4 度，東經 120 度，七級風暴風半徑 220 公里，近中心最大風速每秒 53 公尺，瞬間最大風速每秒 65 公尺，颱風位置及暴風半徑如圖 11 所示。颱風影響期間中央氣象局高雄測站 (站碼 46744) 之觀測資料如圖 12，地面氣壓值最低時約為 14 日 1330 (LST)，此時雷達回波合成圖如圖 13。莫蘭蒂颱風影響期間，颱風中心剖風儀雷達仍在高雄市前金區進行高空風場之連續觀測，圖 14 為 9 月 14 日 1000 至 1800 (LST) 之觀測結果，這段時間為颱風中心最接近高雄的期

間，由圖 12 測站資料顯示高雄地區持續降雨中，圖 13 中高雄沿海一帶 1330 (LST) 的雷達回波值達到 40dBz，顯示此時剖風儀所接收到的回波幾乎都來自於降水的貢獻，因此觀測高度可達 6 公里以上。由圖 14 可發現隨著颱風中心的移動風向與風速之變化，其中 1330 (LST) 觀測到之最大風速達到每秒 55 公尺，發生的高度在 1 公里附近，但 1400 (LST) 左右仍有 30 分鐘的資料品質較為不好，儘管如此，這些觀測結果已顯示剖風儀雷達優異的觀測能力，為大氣相關研究不可獲缺之儀器，期待未來能有更進一步之發展與應用。

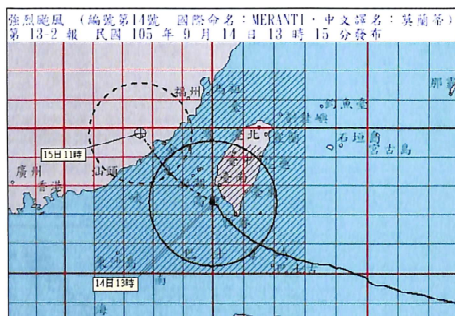


圖 11 莫蘭蒂颱風 9 月 14 日 13 時 (LST) 位置及暴風半徑圖，取自 cw.gov.tw。

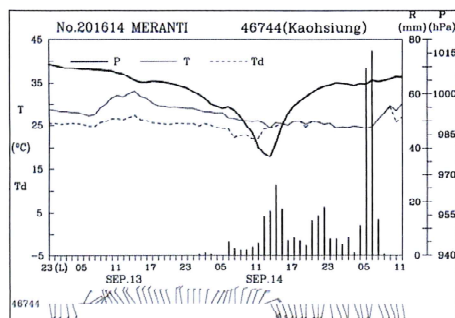


圖 12 莫蘭蒂颱風期間高雄測站觀測資料圖，取自 cw.gov.tw。

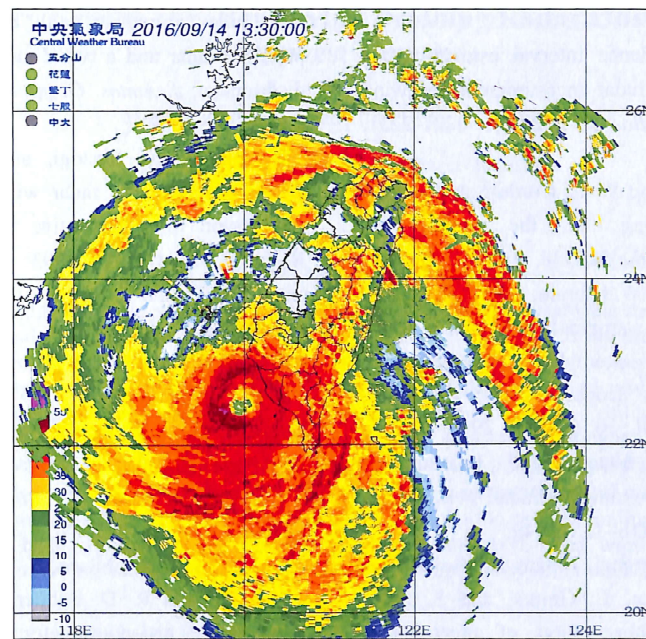


圖 13 2016 年 9 月 14 日 1330 (LST) 雷達回波合成圖，取自 cw.gov.tw。

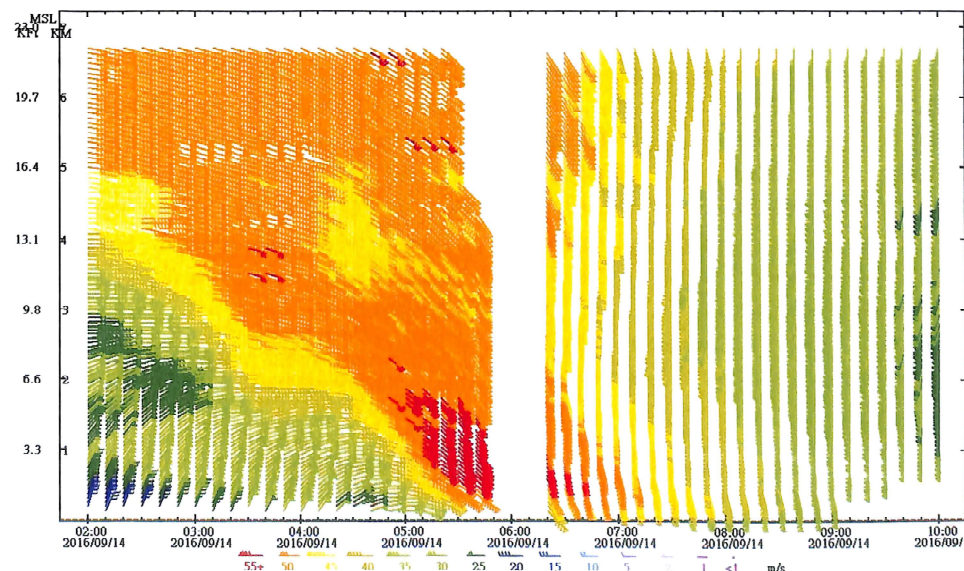


圖 14 2016 年 9 月 14 日剖風儀雷達觀測結果，圖中橫軸為世界時 (UTC)。

五、參考文獻

- Astin, I., Confidence interval estimation for VHF Doppler radar measurements of wind velocities, *Radio Sci.*, 32(6), 2221-2231, 1997.
- Booker, H. G., and W. E. Gordon, A theory of radio scattering in the troposphere, *Proceedings of the IRE*, 38, 401-412, 1950.
- Chilson, P. B., C. W. Ulbrich, and M. F. Larsen, Observation of a tropical thunderstorm using a vertically pointing, dual-frequency, collinear beam Doppler radar, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 10, 663-673, 1993.
- Friend, A.W., Theory and practice of tropospheric sounding by radar, *Proceedings of the IRE*, 37, 116-138, 1949.
- Fukao, S., K. Lakasugi, T. Sato, S. Morimoto, T. Tsuda, I. Hirota, I. Ximura, and S. Kato, Simultaneous observation of precipitation atmosphere by VHF and C/Ku band Radars, *Radio Sci.*, 20, 622-630, 1985.
- Fukao, S., and K. Hamazu, *Radar for meteorological and atmospheric observations*, Springer, Tokyo, 2014.
- Hocking, W. K., J. Röttger, R. D. Palmer, T. Sato, and P. B. Chilson, *Atmospheric radar: application and science of MST radars in the earth's mesosphere, stratosphere, troposphere, and weakly ionized regions*, Cambridge University Press, 2016.
- Kanofsky, L., and P. B. Chilson, An analysis of errors in drop size distribution retrievals and

rain bulk parameters with a UHF wind profiling radar and a two-dimensional video disdrometer, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 25(12), 2282-2292, 2008.

- Kudeki, E., P. K. Rastogi, and F. Surucu, Systematic errors in radar wind estimation: Implication for comparative measurements, *Radio Sci.*, 28, 169-179, 1993.
- Larsen, M. F., and J. Röttger, Observation of thunderstorm reflectivities and Doppler velocities measured at VHF and UHF, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4, 151-159, 1987.
- Strauch, R. G., B. L. Weber, A. S. Frisch, The precision and relative accuracy of profiler wind measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4, 563-572, 1987.
- Teshiba, M. S., P. B. Chilson, A. V. Ryzhkov, T. J. Schuur, and R. D. Palmer, A combined wind profiler and polarimetric weather radar method for the investigation of precipitation and vertical velocities, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 1940-1955, 2009.
- Woodman, R.F., and A. Guillén, Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, 31, 493-505, 1974.
- 陳孟遠, Wind profiler system in Taiwan Typhoon and Flood Research Institute of NARL, 大氣垂直耦合研討會, 桃園市, 台灣, 2015。

Preliminary Results of L-Band Wind Profiling Radar Observation in Southwest Taiwan

Meng-Yuan Chen, Shao-Chin Hung, Lei Feng

Taiwan Typhoon and Flood Research Institute,
National Applied Research Laboratories

ABSTRACT

Wind profiling radars (or wind profilers) are typically used to measure the vertical profiler of three-dimensional wind of the atmosphere. The major echoes come from the backscatter of reflection caused by the atmosphere refractive index irregularity. The radar systems generally use either VHF (Very High Frequency) or UHF (Ultra High Frequency), the applications are dissimilar for different frequency bands. Increasing the operational frequency of wind profiling radar provides a higher degree of measurement range resolution. The radar with lower frequency has larger range coverage where large antenna apertures are used. As such, wind profilers operating at 1 GHz are typically regarded as boundary layer profilers, capable of measuring the wind profile in only the lowest few kilometers of the atmosphere. However the precipitation echoes dominate the signals in this frequency band. In this study, some preliminary results of L-band wind profiling radar observation in southwest Taiwan are presented, including comparisons with radiosonde data.

Key Words: wind profiling radar, radiosonde.