



Reprint 1339

利用 S 波段遠程天氣雷達作快速掃描監測暴雨
及熱帶氣旋發展之初探

江 偉

第 32 屆粵港澳氣象科技研討會

暨

第 23 屆氣象業務合作會議

(澳門 2018 年 1 月 8 日 - 10 日)

利用 S 波段遠程天氣雷達作快速掃描 監測暴雨及熱帶氣旋發展之初探

江偉
香港天文台

摘要

香港天文台在 2017 年雨季嘗試以大帽山天氣雷達進行快速掃描實驗，以每分鐘一次的頻率作低仰角掃描，配合大老山天氣雷達現行每六分鐘一次的立體掃描來監測香港鄰近地區的暴雨及熱帶氣旋發展。大帽山雷達快速掃描較傳統每 6 分鐘一次的立體掃描提前 5 至 10 分鐘接收大氣低層雷達數據，圖像更新頻率亦大幅提升 6 倍，可以更及時和連貫地觀測雨區的形成及演變，有望提升天氣監測、臨近預報及數值預報的表現。

本文介紹實驗有關大帽山雷達快速掃描的設定、分析 2017 年多個暴雨個案及熱帶氣旋天鴿的初步觀測結果，並進一步探討遠程雷達快速掃描於業務運作上的潛在應用。分析結果顯示雷達快速掃描能更有效監測中小尺度且生命期較短的天氣系統，如微下擊暴流、中尺度氣旋、低層輻合的出現和消散等，有助了解暴雨的降雨機制。此外，快速掃描圖像能更清楚顯示天鴿的螺旋雨帶環繞其中心旋轉速度的變化，有助監測天鴿迅速增強的情況。

A preliminary study on using long-range S-band weather radar to perform rapid scan for monitoring the development of rainstorms and tropical cyclones

KONG Wai
Hong Kong Observatory

Abstract

The Hong Kong Observatory configured the Tai Mo Shan Weather Radar (TMSWR) to carry out rapid scan experiments in the rain season of 2017. 1-minute low-elevation scan by TMSWR and 6-minute volume scan by Tate's Cairn Weather Radar (TCWR) were performed for monitoring development of rainstorms and tropical cyclones in the vicinity of Hong Kong. TMSWR rapid scan enabled early reception of low-level radar data by 5 to 10 minutes and 6 times higher update frequency of radar imageries compared with the conventional 6-minute volume scan. Formation and evolution of rainstorms could thus be closely and continuously monitored which might enhance the capabilities of weather monitoring, nowcasting and numerical weather prediction.

This paper introduces the scanning strategy of TMSWR rapid scan experiments and summaries the preliminary observations made based on several rainstorm cases and Tropical Cyclone Hato in 2017. Potential applications of rapid scan operation will also be discussed. Initial analysis results showed that rapid scan could monitor more effectively the formation and dissipation of small-scale and short-lived weather systems such as downburst, mesocyclone and low-level convergence, etc., thereby enhancing the understanding of rainstorms' precipitation mechanisms. In addition, rapid scan imageries depicted more clearly variation of the rotation speed of Hato's spiral rain bands around its centre, facilitating diagnosis of Hato's rapid intensification.

1 引言

香港天文台於大帽山及大老山的山頂設置 S 波段遠程天氣雷達，以監測惡劣天氣包括暴雨及熱帶氣旋對香港的影響。兩台雷達均採用立體掃描方式，掃描週期皆為每 6 分鐘一次，由低仰角開始，逐層調高仰角向上掃描，以監測大氣的三維天氣狀況。在一般的業務運作上，類似的雷達掃描策略普遍應用於世界各地氣象機構的天氣雷達，只是掃描層數及角度或略有不同，通常完成一次立體掃描需時約 5 至 10 分鐘。

立體掃描的主要優點是能監測大氣的三維天氣狀況，有助分析雨區的垂直結構及發展；但缺點是需要較長時間才能完成整個立體掃描，不利監測生命期較短或變化急速的天氣系統及其特徵。此外，雷達掃描仰角越低，越能反映大氣底層的天氣情況，有助預報員監測接近地面的天氣變化。按業務需要，有些氣象機構會設計特別的雷達掃描策略，以增加低仰角掃描頻率，例如美國國家海洋暨大氣總署（NOAA）近年便為其 NEXRAD 系統採用新的掃描策略，於原來約每 5 分鐘一次立體掃描中，引入多一次 0.5° 低仰角掃描[文獻 1]。

天文台在 2017 年嘗試以大帽山 S 波段遠程天氣雷達（TMSWR）進行快速掃描實驗，以每分鐘一次的頻率作低仰角掃描，配合大老山雷達（TCWR）現行每 6 分鐘一次的立體掃描，監測雨區的形成和演變。由於兩台遠程雷達只相距約 12 公里，探測覆蓋範圍相約，兩台雷達以兩種不同掃描策略運作，為預報員同時提供立體雷達數據及快速更新的大氣低層雷達數據，有助提升應用雷達在監測惡劣天氣方面的能力。

本文探討大帽山雷達快速掃描模式的設定、快速掃描實驗於 2017 年數個暴雨個案及超強颱風天鴿的初步觀測結果，以及遠程雷達快速掃描於業務運作上的潛在用途。

2 快速掃描模式的設定

現時大帽山及大老山雷達在業務運作中均採用每六分鐘一次的立體掃描，由 0° 至 34° 合共 10 層 PPI 掃描(表 1)。大帽山是全香港最高山峰，TMSWR 的天線高度約 968 米，較 TCWR 天線高度 582 米為高，故進行 0° 仰角掃描幾乎不受阻擋，因此實驗採用了 TMSWR 進行低仰角快速掃描。實驗首先是設定最適合的掃描模式，主要考慮因素有數據更新頻率、數據質量及硬件損耗。在過程中共測試了 7 種不同快速掃描模式(表 2)，所有模式均採用與 TMSWR 立體掃描相同的雙 PRF 技術(576/432 Hz)，以比較快速掃描模式的數據質量。

現時 TMSWR 進行第一層立體掃描(即 0° 仰角)的天線轉速為 8 deg/s，假設譜寬(Spectral Width)為 4 m/s 及 $\text{SNR} \geq 20$ dB，以雙 PRF 技術運算多普勒風場時出現嚴重誤差(Catastrophic Error)的機率約為 0.0007% [文獻 2]。從表 2 可見，由於測試模式 1 至 6 的天線轉動速度較立體掃描為快，在相同 PRF 下，掃描採樣數目減少，出現嚴重誤差的機率增加至最多約 0.5%。

大帽山雷達天線直徑達 8.5 米，體積和重量在天氣雷達中屬於較大和較重的類型，在制訂掃描策略時需要考慮硬件負荷。增加轉速會損耗天線硬

件，特別是短時間內作多仰角掃描，如測試模式 2 至 6 便要求天線在 1 至 2 分鐘內不繼向上或向下加速和減速，對摩打及齒輪箱的運作帶來損耗。在進行模式 3 的測試時，雷達機械師便發現天線在轉換仰角時發出雜音。

撇除數據質量和機件負荷兩個因素，在制訂快速掃描模式時曾考慮除 0° 低仰角掃描外，增加一個或數個較高仰角掃描（測試模式 2 至 6），以了解雨區的垂直結構。然而，實驗結果顯示增加少量較高仰角掃描，或會令預報員錯誤分析雨區的垂直結構。圖 1 及圖 2 比較 TCWR 立體掃描和 TMSWR 快速掃描（測試模式 2）的垂直剖面，當中顯示測試模式 2 的仰角數量太少而垂直分辨率有所不足，影響了垂直剖面的內插演算（圖 1），預報員未能準確判斷反射率核心（Reflectivity Core）位置。

綜合上述原因，測試模式 7 最後被採納為 TMSWR 快速掃描模式。模式 7 雖然沒有高仰角掃描（TCWR 仍可提供立體掃描以彌補單一低仰角快速掃描的不足），但天線轉動速度較立體掃描慢，出現嚴重誤差的機率較低（0.0002%），而且天線轉動不牽涉垂直運動，減少雷達硬件負荷。

3 雷達快速掃描的優點

3.1 提升數據及時性

雷達快速掃描（模式 7）的優點是可以縮短獲取最新雷達圖像的時間 5 至 10 分鐘，提升數據及時性。以天文台現時的雷達業務運作為例，在早上 9 時 11 分，每 6 分鐘一次的立體掃描雷達圖像時間仍在 9 時正，但快速掃描雷達圖像已更新至 9 時 10 分，兩者相差 10 分鐘。及至 9 時 12 分，立體

掃描雷達圖像才更新至9點06分，仍與快速掃描雷達圖像有5分鐘的差距。

3.2 提升數據連慣性

大帽山雷達快速掃描每1分鐘完成一次 0° 仰角掃描，較原有每6分鐘一次立體掃描提供頻密6倍的低層大氣雷達數據，可提升觀測雨區發展的連慣性。在2017年的數個暴雨個案中，雷達快速掃描成功觀測如微下擊暴流、中尺度氣旋、低層輻合等中小尺度且生命期較短的天氣系統及其特徵，有助了解暴雨的降雨機制及進行雷達定量降水的估算。較佳的雷達圖像連慣性亦有助監測熱帶氣旋的發展。在天鴿個案中，雷達快速掃描顯示天鴿的雨帶明顯加速旋轉，而且風眼逐漸收縮，這些現象在6分鐘立體掃描中是較難被察覺的。

4 初步觀測結果

4.1 低層輻合線

2017年4月21日，一道與冷鋒相關的飑線橫過香港（圖3），在每6分鐘一次的立體掃描多普勒雷達圖像中，可見在香港以北約40公里的雷暴區，出現兩道低層輻合線（圖4a），6分鐘後（圖4b）只餘下一道輻合線。根據此兩幅6分鐘多普勒圖像，很難確定是否出現以下情境：

- (i) 兩道輻合線合而為一；
- (ii) 較北的輻合線消散而較南的輻合線強度維持並緩慢移動；或
- (iii) 較南的輻合線消散而較北的輻合線強度維持並快速移動。

1分鐘快速掃描圖像（圖5a至5d）可清晰顯示較北的輻合線逐漸消散〔即情境(ii)〕，這有助預報員分析個別雨區的發展。

4.2 微下擊暴流

微下擊暴流生命期較短，一般雷達立體掃描難以捕捉。2017年8月22日，廣東沿岸受熱帶氣旋天鴿的外圍下沉氣流影響，炎熱天氣於內陸地區觸發強對流活動，相關雷雨區受背景北風影響移至珠江口一帶，TMSWR快速掃描圖像較6分鐘雷達圖像有較佳的連貫性，成功探測到於深圳寶安區附近出現的微下擊暴流。在圖6a至6l的1分鐘快速掃描圖像中，可見與微下擊暴流相關的弓形回波形成及逐漸向外擴散。

4.3 短生命期的回波強度變化

受立體掃描的觀測條件所限，雷達定量降水估計(QPE)一般假設兩次立體掃描期間的回波強度不變，以計算累積降雨量。在2017年8月22日，圖7a及7b顯示紅圈內的回波反射率於6分鐘內由黃色(約41至44 dB^{1#})略為增強至橙色(約47至50 dBZ[#])。由於缺乏12時54分至60分之間的觀測數據，計算QPE時便假設回波強度共有6分鐘時間維持在41至44 dBZ[#]。若回波強度變化不大，這種假設一般無明顯的系統性誤差。然而，大帽山雷達快速掃描圖像(圖8a至8g)發現部分回波可以在兩次立體掃描間急速發展然後減弱[#]，6分鐘雷達圖像難以觀測此短暫變化，相關QPE亦會被低估，以快速掃描數據有機會改善雷達QPE的表現。

4.4 熱帶氣旋兩帶旋轉速度的變化

2017年8月23日早上，熱帶氣旋天鴿靠近廣東沿岸並迅速增強，在1

[#] 相關的反射率查色表可參考圖9

分鐘雷達圖像動畫中，可見到環繞天鴿中心旋轉的雨帶有明顯加速情況，而且風眼逐漸收縮，這些現象較難在 6 分鐘立體掃描中被察覺，這可被應用來評估熱帶氣旋的強度變化，而評估可有以下兩種方法：

4.4.1 旋轉座標系

方法一是先變換雷達圖像座標系，以氣旋中心為源點定義一逆時針旋轉的座標系，並調校新座標系的角速度，直至風眼附近的雷達回波在旋轉座標系中呈接近靜止狀態。此角速度在慣性座標系中即代表回波在風眼附近的旋轉速度。第二步是在雷達圖像上量度風眼半徑，利用簡單幾何運算便可得出風眼附近回波的平移速度。在天鴿個案中（圖 10a 及 10b），由上午 5 時至上午 9 時 30 分這段期間，風眼附近回波平移速度由約 72 kt 增加至約 92 kt，增幅 27%，顯示天鴿迅速增強。這方法的不足之處是調校旋轉座標系角速度時須一定程度的主觀判斷，這可產生略為不同的計算結果。

4.4.2 模式識別

另一種方法評估熱帶氣旋的強度變化是利用模式識別，以電腦直接計算回波的平移速度，好處是計算結果會較為客觀，在臨近預報中，類似方法已被應用於預測暴雨的發展。由於快速掃描雷達圖像有更好的連貫性，以特徵追蹤計算出的風場會較 6 分鐘雷達數據為佳。圖 11a 及 12a 分別以天文台標誌（另加紋理以方便特徵追蹤）模擬熱帶氣旋在 6 分鐘及 1 分鐘雷達圖像的旋轉情況。從圖 12b 可見以 1 分鐘雷達圖像作模式識別，相關的特徵追蹤移動矢量場遠較 6 分鐘雷達圖像的（圖 11b）為佳。

在實際情況中，雷達回波在各次掃描中的變化遠為複雜，回波的變動會有起伏，因此估算風眼附近回波的平移速度時，須考慮連續數張雷達圖像的移動平均值。在天鴿個案中，以 1 分鐘雷達圖像作模式識別計算，得出由上午 5 時至上午 9 時 30 分這段期間，風眼附近回波平移速度由約 80 kt 增加至約 90 kt，增幅約 13%（圖 13a 及 13b）。

4.4.3 與天文台最佳路徑比較天鴿強度

利用旋轉座標系或模式識別分析快速掃描雷達圖像，可計算風眼附近回波的平移速度，此數值能否代表熱帶氣旋的最高持續風速，仍有待更多數據作進一步驗證。但若與天鴿最佳路徑資料的強度比較（表 3），這兩種方法不論在最高持續風速或強度轉變上，似乎均有一定參考價值，值得作進一步研究。

此外，風眼附近的譜寬一般較大，以雙 PRF 技術運算多普勒風場較易出現嚴重誤差。圖 14a 及 14b 為未經過濾的雷達反射率及多普勒圖像，可見風眼附近的風場出現不少嚴重誤差，而且有速度折疊，難以直接讀取其多普勒風速數值。相反，4.4.1 及 4.4.2 段所討論的兩種方法皆以反射率圖像計算回波移動速度，不涉及雙 PRF 技術，對雷達數據質量要求較低，而且不會出現多普勒風的速度折疊情況。

5 總結及展望

在 2017 年的數個暴雨及熱帶氣旋天鴿個案中，大帽山雷達快速掃描展示了更好的數據及時性和連貫性，並能捕捉到難於立體掃描中被觀測的小

尺度及短生命期的天氣系統，以及天鵝雨帶的旋轉速度變化。

在業務運作上，1 分鐘雷達快速掃描能縮短獲取最新雷達數據及圖像的時間 5 至 10 分鐘，有助預報員提前發出各種與暴雨及雷暴相關的警告。此外，快速掃描提供更頻密的低層大氣雷達數據量，可顯示每分鐘回波強度的波動變化，有助了解暴雨的降雨機制，以及提升臨近預報和計算雷達定量降水估算的表現。利用旋轉座標系和模式識別兩種方法，配合 1 分鐘雷達數據可分析天鵝迅速增強的情況，待未來有更多數據驗證後，可望用來評估熱帶氣旋的強度。

大帽山雷達快速掃描實驗將會在 2018 年繼續進行，以收集更多案例及雷達數據作分析及驗證之用。此外，如何將雷達快速掃描所獲得的觀測數據，融合各種臨近預報工具，亦會是未來的工作重點。

	掃描仰角
大帽山雷達	0°, 0.9°, 1.8°, 2.7°, 3.6°, 5.4°, 10°, 15°, 22°
大老山雷達	0.1°, 0.9°, 1.8°, 2.7°, 3.6°, 5.4°, 10°, 15°, 22°

表 1 大帽山及大老山雷達立體掃描仰角

測試模式	重複間隔 (分鐘)	掃描層數	仰角	天線轉動速度		嚴重誤差機率 (假設譜寬 $\omega = 4$ m/s, SNR ≥ 20 dB)
1	0.5	1	0°	15 deg/s	2.5 rpm	0.1%
2	1	2	0°, 3.6°	15 deg/s	2.5 rpm	0.1%
3	1	3	0°, 3.6°, 10°	21 deg/s	3.5 rpm	0.5%
4	1.5	3	0°, 3.6°, 10°	15 deg/s	2.5 rpm	0.1%
5	2	3	0°, 3.6°, 10°	11 deg/s	1.8 rpm	0.01%
6	2	4	0°, 3.6°, 10°, 15°	15 deg/s	2.5 rpm	0.1%
7	1	1	0°	7 deg/s	1.2 rpm	0.0002%

表 2 大帽山雷達快速掃描實驗的測試掃描模式

2017 年 8 月 23 日	天文台最佳路徑的強度資料	旋轉座標系	模式識別
上午 5 時 00 分	80 kt	72 kt	80 kt
上午 9 時 30 分	97.5 kt*	92 kt	90 kt
變化	+22%	+27%	13%

表 3 比較天鵝最佳路徑和以 1 分鐘雷達圖像計算之最高風速及變化

*天文台的天鵝最佳路徑資料中，當日上午 9 時及 10 時的最高風速分別為 95 及 100 kt，故取其平均值，假設 9 時 30 分的最高風速約為 97.5 kt

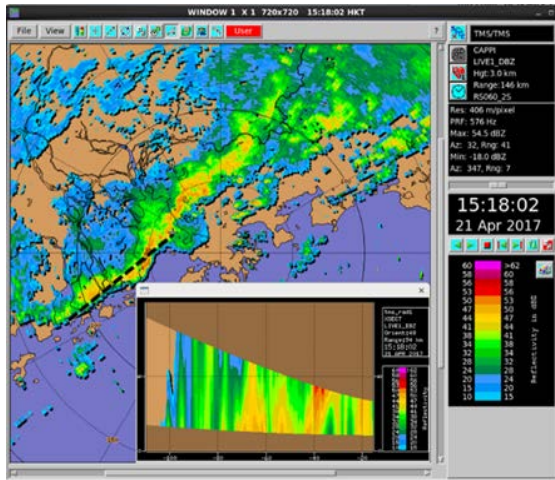


圖 1 TMSWR 快速掃描 (測試模式 2) 的垂直剖面 (0° 及 3.6° 仰角)

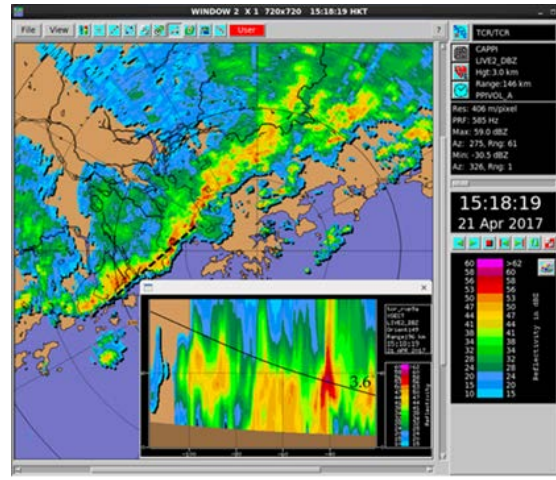


圖 2 TCWR 立體掃描的垂直剖面

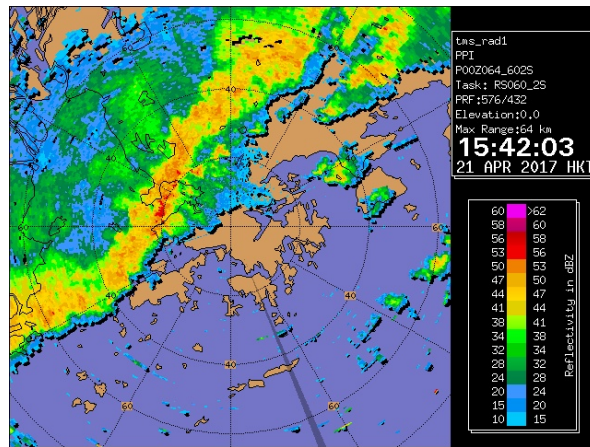
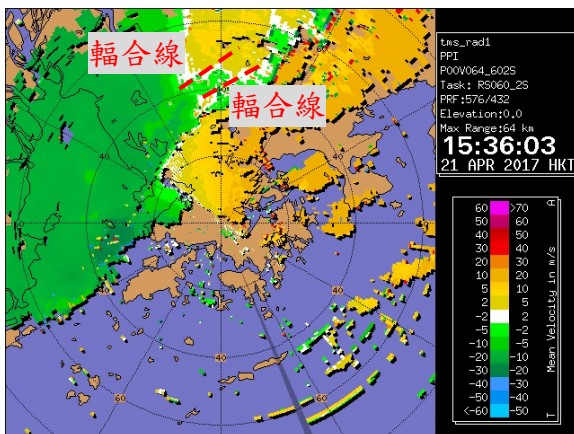
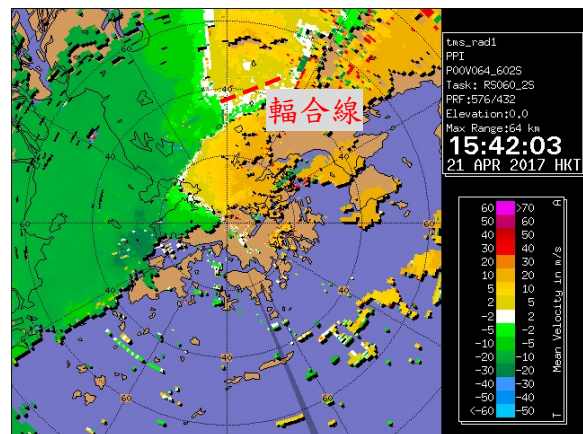


圖 3 2017 年 4 月 21 日下午一道與冷鋒相關的飆線橫過香港。

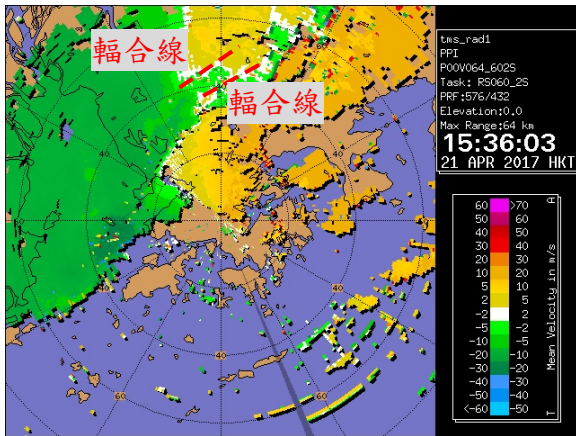


(a)

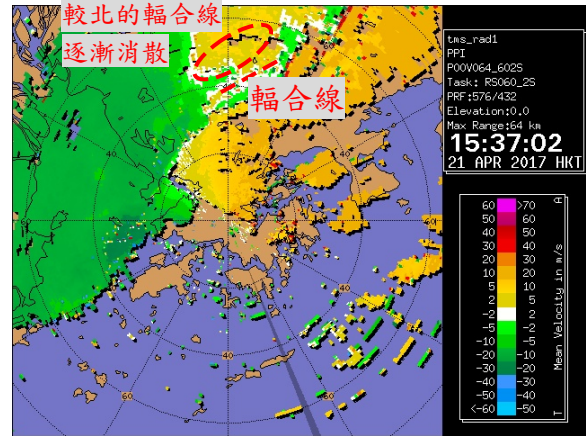


(b)

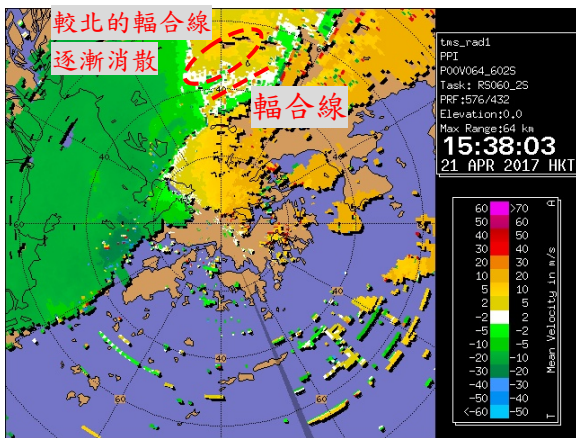
圖 4 雷達 6 分鐘立體掃描的多普勒圖像 [2017 年 4 月 21 日下午 3 時 36 分 (圖 a) 及 3 時 42 分 (圖 b)] 所觀測的輻合線演變。



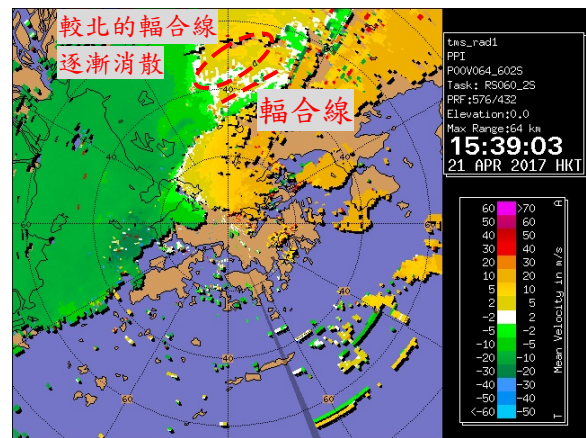
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 5 雷達 1 分鐘快速掃描的多普勒圖像 [2017 年 4 月 21 日下午 3 時 36 分至 3 時 39 分 (圖 a 至圖 d 每幅圖像相隔 1 分鐘)] 所觀測的輻合線演變。

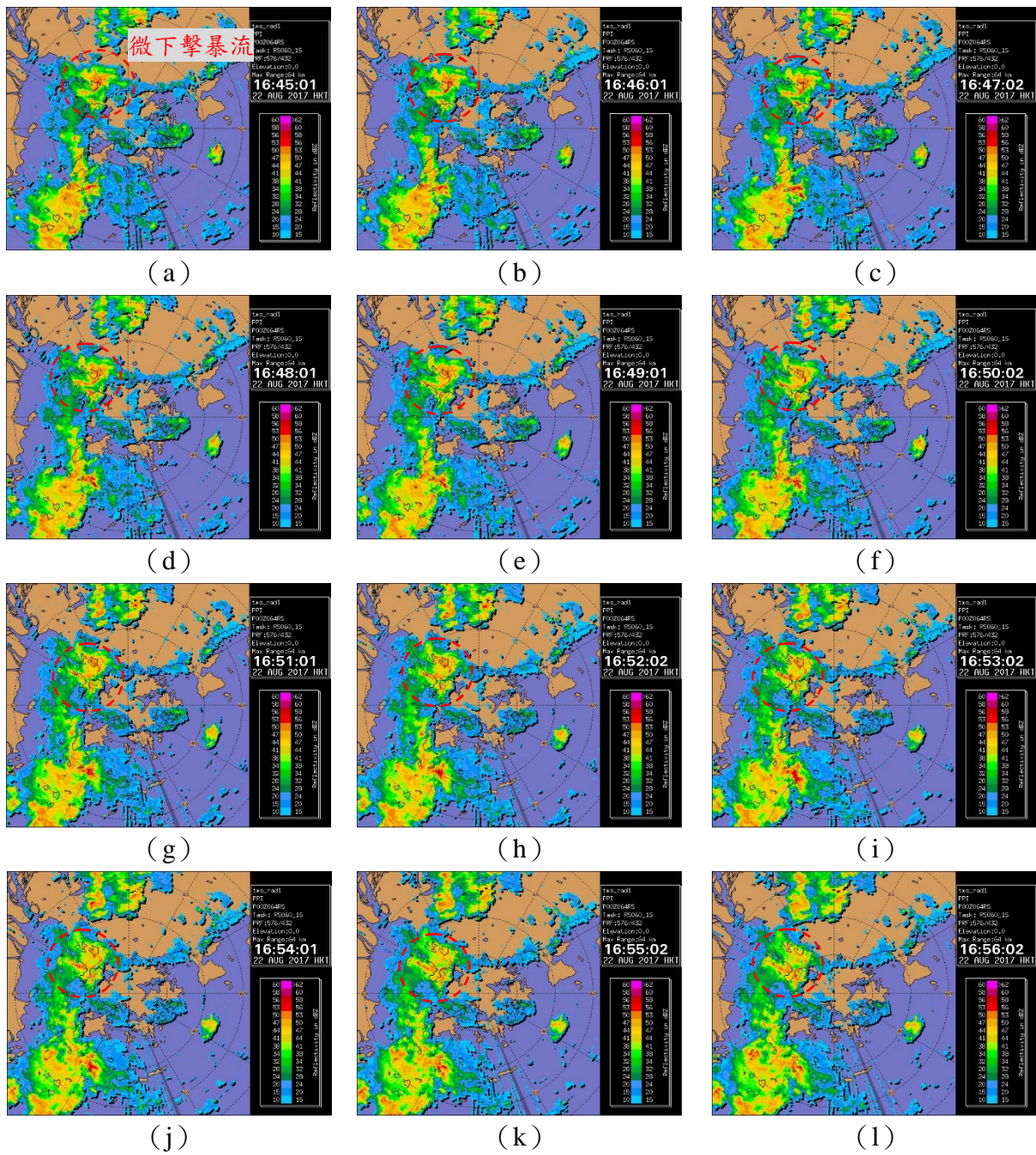


圖 6 大帽山雷達 1 分鐘快速掃描圖像 [2017 年 8 月 22 日下午 4 時 45 分至 4 時 56 分 (圖 a 至圖 l 每幅圖像相隔 1 分鐘)] 觀測到與微下擊暴流相關的弓形回波 (紅圈範圍) 形成及向外擴散。

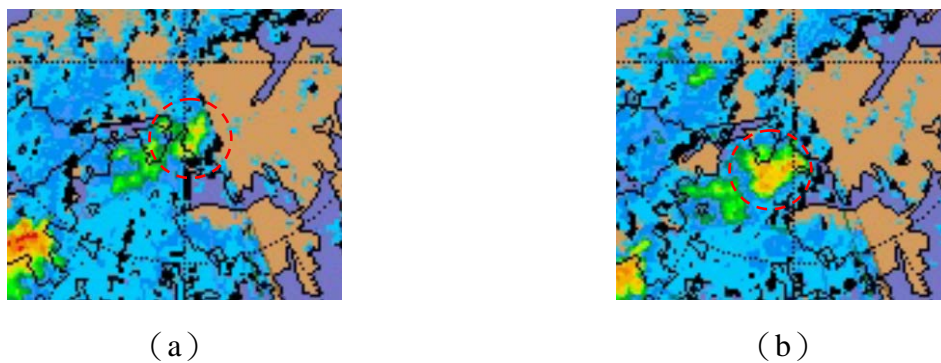


圖 7 雷達 6 分鐘立體掃描圖像 [2017 年 8 月 22 日下午 12 時 54 分 (圖 a) 及 1 時 00 分 (圖 b)] 觀測到紅圈範圍內的回波反射率略為增強[#]。

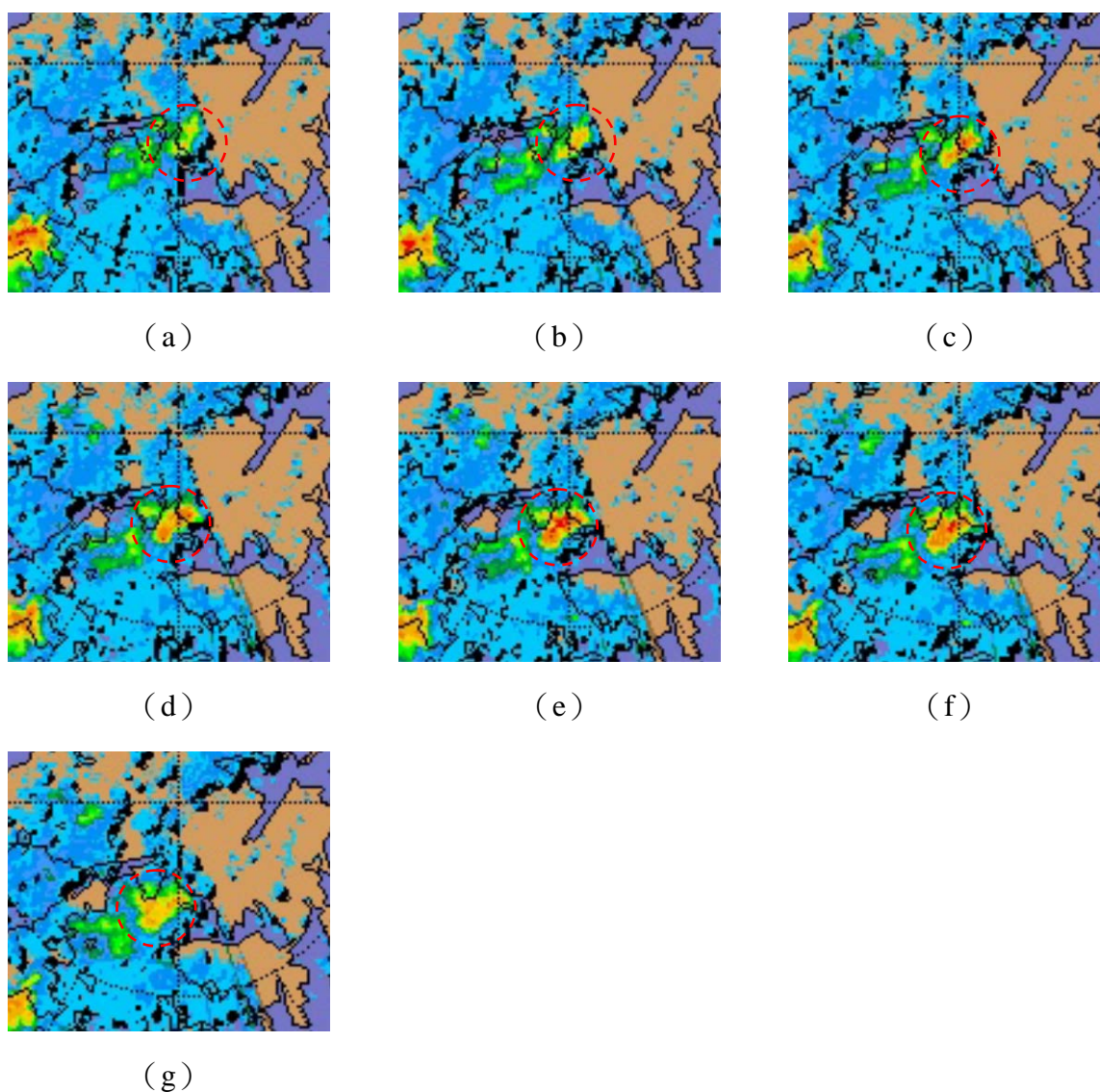


圖 8 雷達 1 分鐘快速掃描圖像 [2017 年 8 月 22 日下午 12 時 54 分至 1 時 00 分 (圖 a 至圖 g 每幅圖像相隔 1 分鐘)] 觀測到紅圈範圍內的回波反射率急速增強然後減弱[#]。

[#] 相關的反射率查色表可參考圖 9

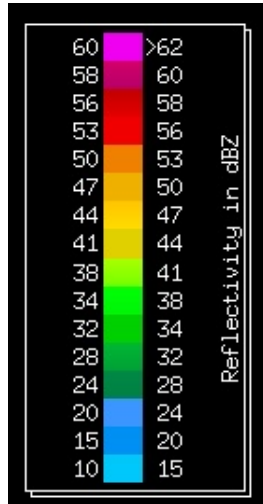
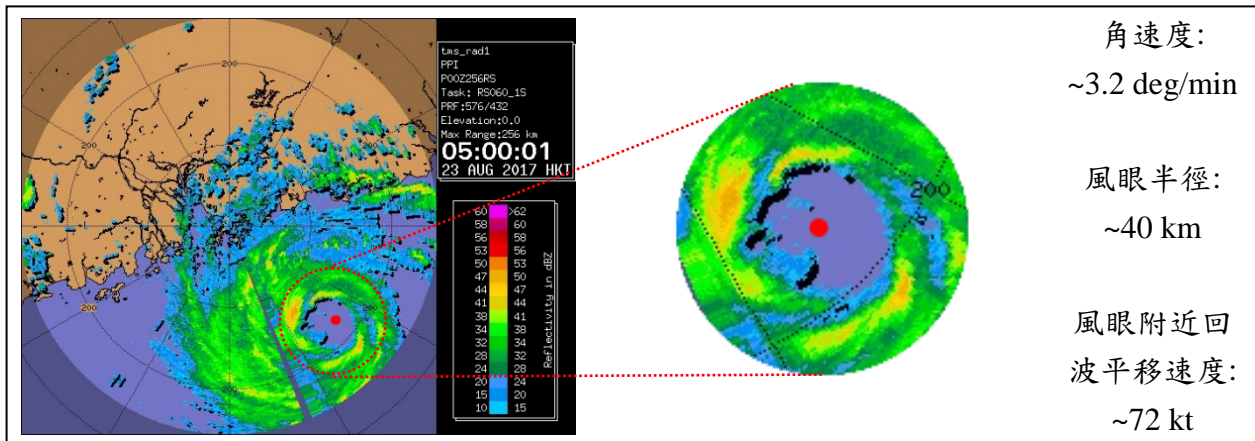
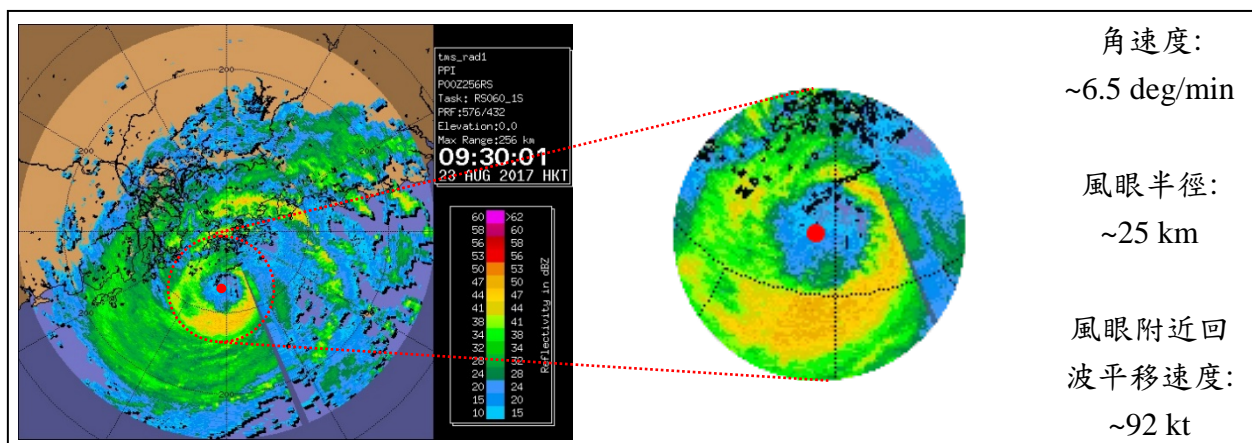


圖 9 大帽山雷達的反射率查色表

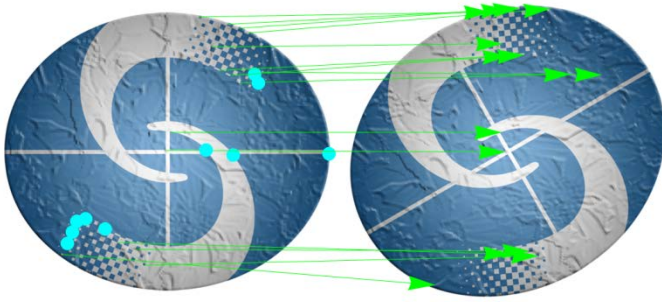


(a)

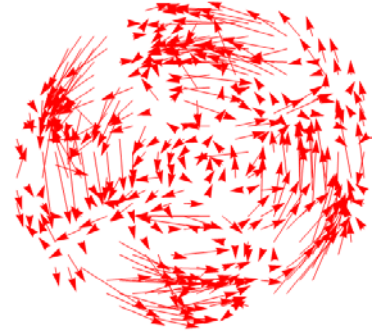


(b)

圖 10 利用旋轉座標系估算在不同時間〔2017年8月23日約上午5時(圖a)及約上午9時30分(圖b)] 熱帶氣旋天鴿風眼附近回波的移動速度。

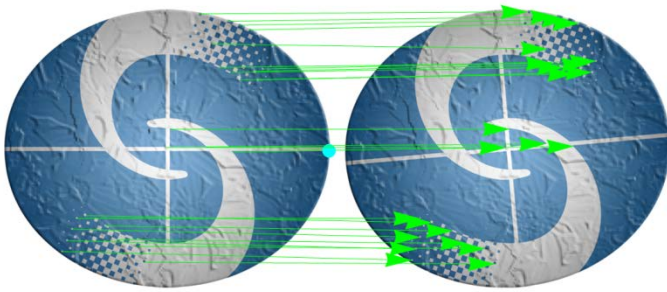


(a)

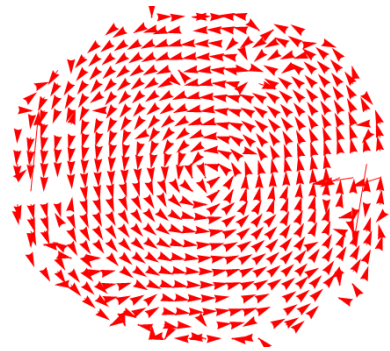


(b)

圖 11 模擬熱帶氣旋於 6 分鐘雷達圖像逆時針旋轉 30° 的情況 (圖 a)，以及從特徵追蹤所得出的移動矢量場 (圖 b)。

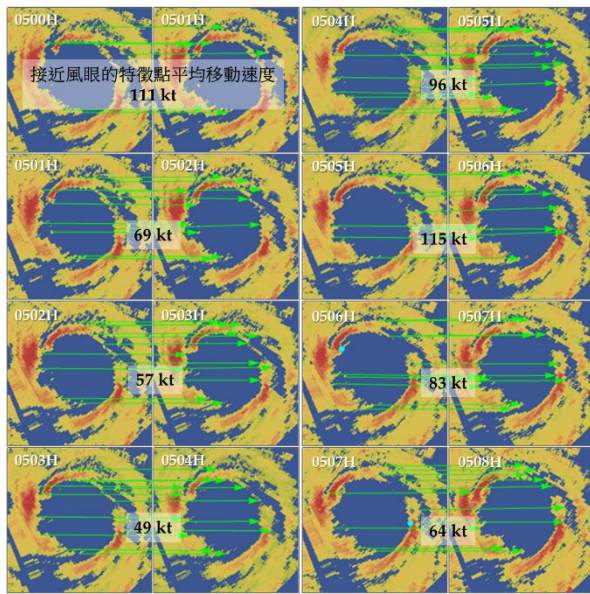


(a)

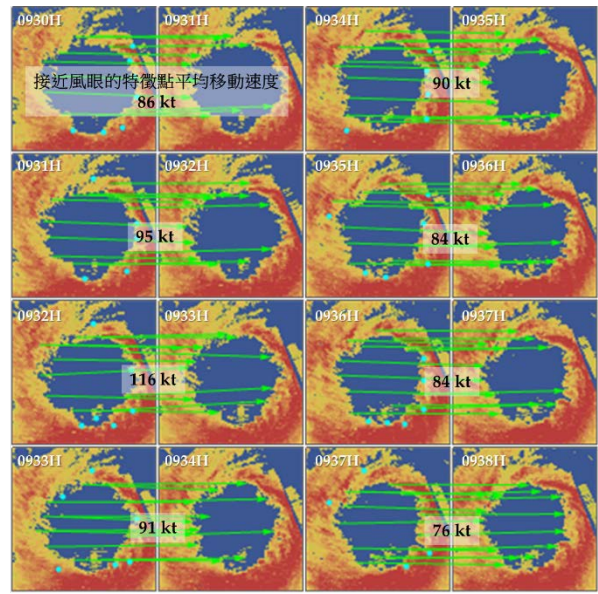


(b)

圖 12 模擬熱帶氣旋於 1 分鐘雷達圖像逆時針旋轉 5° 的情況 (圖 a)，以及從特徵追蹤所得出的移動矢量場 (圖 b)。

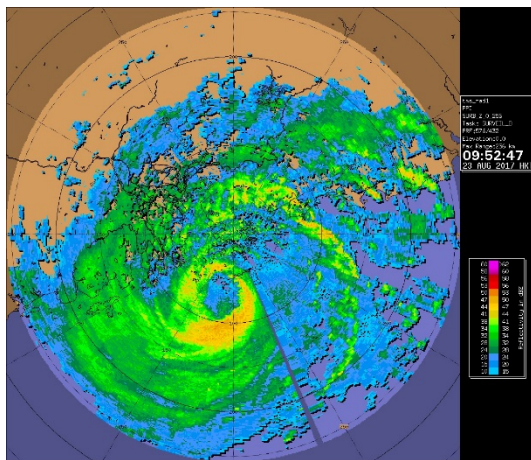


(a)

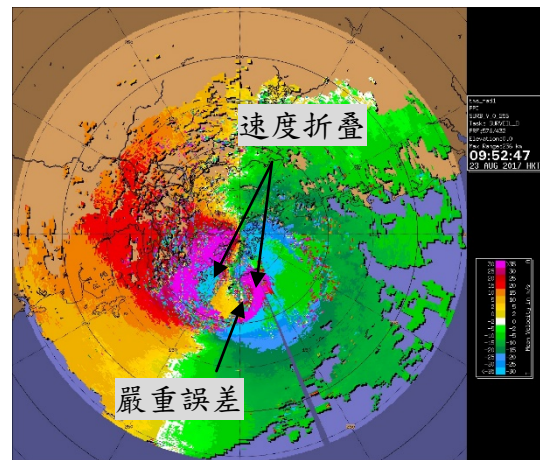


(b)

圖 13 利用模式識別計算在不同時間〔2017 年 8 月 23 日約上午 5 時（圖 a）及上午約 9 時 30 分（圖 b）〕熱帶氣旋天鴿風眼附近回波特徵點的平均移動速度。



(a)



(b)

圖 14 未經過濾的雷達反射率（圖 a）及多普勒圖像（圖 b），風眼附近風場的計算出現嚴重誤差和速度折疊。

參考文獻

1. Daniel, A. E., J. N. Chrisman, C. A. Ray, S. D. Smith, and M. W. Miller, 2014: New WSR-88D operational techniques: Responding to recent weather events. *Proc. 30th Conf. on Environmental Information Processing Technologies*, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., 5.2.
2. Doviak, R.J., Zrnicek, D.S. Doppler Radar and Weather Observations, 2nd ed. New York: Dover Publications, 2006: 103-119.