

應用雙偏極化氣象雷達於水象粒子分類之個案分析

林育邦¹ 魏志憲² 林得恩¹
空軍氣象聯隊¹ 國防大學理工學院²

摘要

本研究使用空軍氣象聯隊新建置的 C 波段雙偏極化 (C-Pol) 氣象雷達, 針對 100 年 4 月 17 日受鋒面影響之台南降雹個案進行初步分析, 並與 98 年 3 月 6 日馬公冰雹個案相互比較, 應用模糊邏輯法 (fuzzy logic) 分析雙偏極化雷達參數, 針對水象粒子特性進行分類, 藉此找出適合台灣地區的隸屬函數 (membership function)。

首先藉台南機場觀測人員口述強對流影響經過, 以及媒體報導降雹的時間與地點, 初步分析結果發現冰雹降落的時間與位置均與實際觀測資料吻合, 因此雙偏極化雷達參數反演結果與實際均能相符, 再一次驗證了台灣地區模糊邏輯隸屬函數參數的適切性。而與 98 年 3 月馬公冰雹個案相互比較, 則發現此二個案的凝結層位置均位於 4km 高度, 冰水混相的最高的高度均在 5km 以下, 據探空資料顯示 5km 高度溫度約 -8°C。由於台灣地處亞熱帶, 考慮存在對流上升運動, 冰融化 (melting) 成水的溫度必須高於 -8°C 以上, 換言之過冷水存在環境必須高於 -8°C 以上, 過冷水存在為積冰的主要條件之一, 對此積冰研究今後將更進一步取得機載資料並分析研判。為此, 本產品對今後空軍飛行訓練能提供更高精確的高空觀測及預報資訊, 對維護飛行安全頗有助益。

關鍵字：雙偏極化雷達, 模糊邏輯, 冰雹, 積冰

一、前言

過去的傳統氣象雷達僅侷限於水平電場的電磁波輻射; 後期發展的雙偏極化氣象雷達以增加一垂直電場的電磁波輻射, 藉由估算水平與垂直電磁波經目標物後向散射(back scatter)之能量差異, 可以獲得水象粒子的大小、形狀、指向以及熱力相態等資訊, 用以反演雨滴數目及粒徑大小關係, 提高計算降雨量準確率, 若使用模糊邏輯方法, 可即時分類空間中降水分布型態, 如雨滴、冰晶、雪花、冰雹、過冷水等。

任何飛行危安因子, 均會使國力耗損, 據統計台灣地區常見的天氣危安因素為亂流及積冰, 其中又以積冰對機體性能的威脅最大, 列舉: 2002年12月的復興航空GE791 貨機在馬公西南27公里處墜海失事, 經調查失事原因就是飛行過程中遭遇到嚴重積冰(事故區域 18,000呎高度之溫度為-9°C)所肇致, 積冰形成與過冷水存在息息相關, 若能藉由各式天氣圖、儀器觀測、甚至模式預報及早發現過冷水可能分布區域, 必能達成及時預警之效。

空軍氣象聯隊基於提升危險天氣預警時效以及改善機場短時天氣預報, 於2008年9月完成清泉崗及馬公二座新一代氣象雷達提升案, 自德商Gematronik公司引進具有雙偏極化功能之C波段都卜勒氣象雷達, 為國內氣象作業用雷達開闢下一代氣象雷達應用新紀元, 目前與氣象學界、氣象局、水利單位合作, 針對劇烈降雨估算與預報、偵測冰雹、大氣中水象粒子之分辨及改善雷達資料的品質等功能發揮最大的貢獻。

2009年3月5日2212UTC (地方時3月6日晨0712時) 馬公冰雹個案, 林(2010)[1]使用馬公C波段雙偏極化資料反演對流系統內的水相粒子與冰相粒子的空間分布, 並與地面降雹區域進行比對, 除驗證結果相符, 並初步校正台灣地區的隸屬函數, 及探討雹暴對流發展雲物理過程; 本次2010年4月17日13時UTC (地方時4月17日21時) 台南地區受鋒面雲系影響的雹暴個案, 除使用馬公雷達資料再次驗證反演降雹區域是否與實際吻合, 更應用模糊邏輯, 反演雹暴發展過程中不可或缺的過冷水區域, 並進行分析。

二、資料來源與分析方法

本研究主要使用澎湖馬公C波段雙偏極化都卜勒氣象雷達於2011年4月17日13UTC (地方時4月17日21時) 之觀測資料, 針對鋒面系統造成台南機場降下冰雹個案進行研究分析, 同時驗證水象分類準確性, 觀察、分析雹暴的發展。在個案觀測期間, 雷達每一個波束上的距離單位(gate)為240公尺, 掃描半徑為160km, 掃描策略仰角分別為0.5°、1.4°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、19.5°、25°共10層仰角掃描, 一次體積掃描(volume scan)約需4分33秒完成, 掃描策略定為每七分半分鐘執行一次。

雙偏極化雷達主要發射出水平、垂直偏極化方向的電磁波, 觀測回波(Reflectivity- Z_{HH})、差異反射率(Differential reflectivity - Z_{DR})、差異相位差(Cross-correlation Coefficient- Φ_{DP})、比差異相位差(Specific differential propagation phase shift- K_{DP})和相關係數(Differential phase shift- ρ_{HV})等參數。這些對於

水象降水粒子之物理特性：種類、形狀、大小、相態、密度和降落的行為非常敏感。有助於水象降水粒子的判別。資料分析的流程如下（圖2.1）：

（一）驗證 K_{DP} 雷達相位參數，使用相同的 Φ_{DP} 資料，運用兩種不同的方法進行微分運算，一為中央大學作業用方法（紀，2005，[2]），以及RainbowDART套裝軟體內建運算，兩者計算的結果相仿。

（二）針對 Z_H 、 Z_{DR} 系統偏移進行修正，林(2010)[1]曾利用層狀區下小雨滴趨近於圓形的特性，找出 Z_{DR} bias約為0.7 dB以及 Z_H bias約為0.54，此研究結果協同合約廠商進行硬體調整，目前雷達bias值已趨近於0不需再行修正。

（三）C波段雷達由於波長較短（約5cm），電波經雨區時能量會受到衰減，Bringi et al.(1990)[3]曾提出電磁撥經純水時， Z_H 、 Z_{DR} 的衰減能量與 K_{DP} 參數具線性關係，Testud et al.(2000)[4]鑒於單係數修正法對於弱回波區域常出現過度修正情形，提出指數型修正方法，本個案即採用此方法進行衰減訂正。

（四）濾除非氣象回波資訊，Kessinger,et al. (1999) [5]應用經模糊邏輯（Fuzzy Logic）方法，將回波資料分成地面雜波（指建物或樹木，不移動的非氣象回波）、晴空回波（指鳥、昆蟲，會移動的非氣象回波）及氣象回波三類，使用Rainbow套裝軟體進一步將前兩類濾除，僅留下氣象回波資訊進行分析研究。

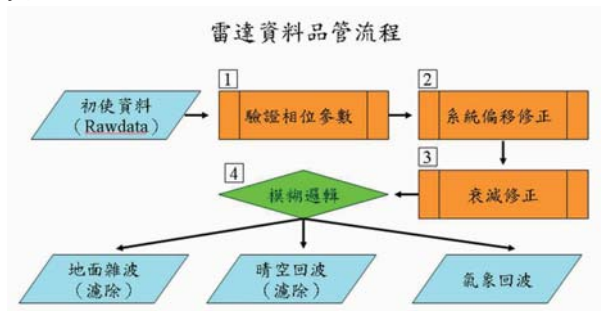


圖2.1 雷達資料品管流程圖。

三、個案天氣分析

3.1 地面高空天氣圖分析

圖3.1為4月17日12UTC（地方時4月17日20時）地面天氣圖，顯示低壓中心位於日本南方海域一帶，勢力向西南延伸至廣東省一帶；且位於海峽南部及東沙北部海域（紅色圓圈處，約北緯23°東經114°到118°）風場明顯幅合。

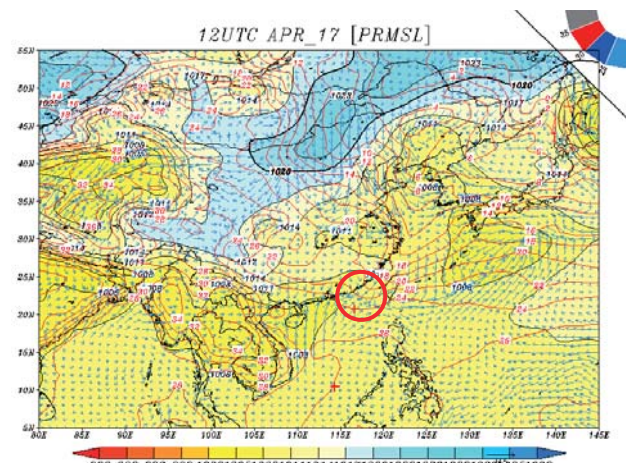


圖3.1 資料時間4月17日12UTC地面天氣圖。

850hPa高空分析圖（圖3.2）顯示17日12UTC（地方時17日20時）位於海峽南部存在風向不連續面（紅色圓圈處），且溫度梯度相差 6°C ，配合高相對濕度區域研判此為一低壓帶結構。

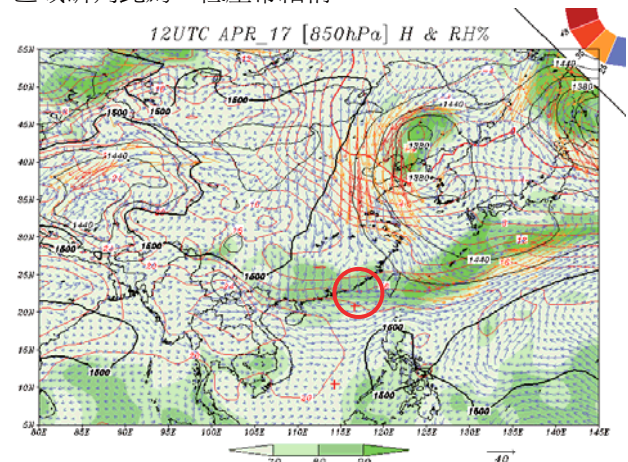


圖3.2 資料時間4月17日12UTC的850hPa分析圖。

700hPa高空圖（圖3.3）分析風向不連續面範圍為海峽中部至南部（紅色圓圈處），高相對濕度區分布海峽中部以北與850hPa位置相比較顯示斜壓性良好，且溫度梯度相差 4°C 並存在於高相對濕度區域，綜合底層至高層研判，此為鋒面結構造成海峽中部至南部地區劇烈天氣現象。

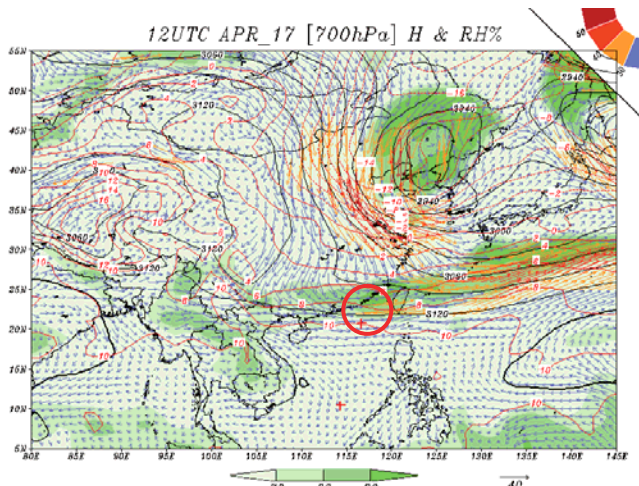


圖3.3 資料時間4月17日12UTC的700hPa分析圖。

3.2 探空資料分析

由於鋒面系統影響時間為晚上20時，最適合分析的東沙探空因作業因素並無施放，故使用屏東探空資料分析，探空圖(圖3.4)顯示 0°C 高度在4.2km, 450hPa至850hPa空層溫度露點相近表示溼度較高，正能區位於750hPa以下CAPE值為19，底層並無鋒面逆溫，顯示20時鋒面仍存在於海上僅高層雲系移入。

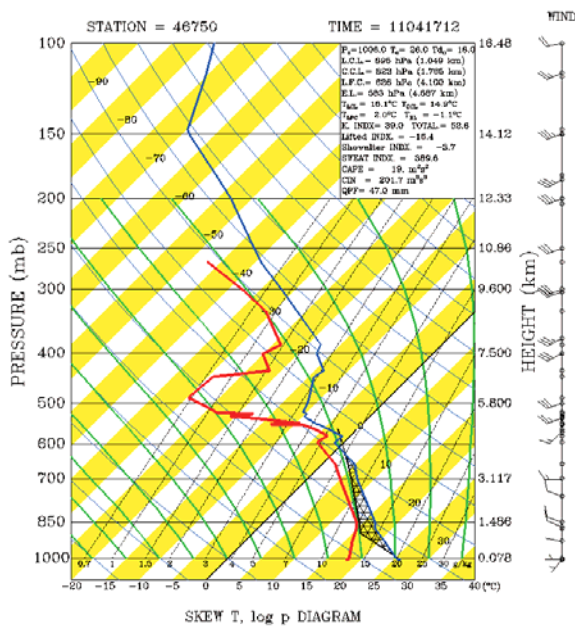


圖3.4 屏東探空資料時間4月17日12UTC。

3.3 衛星雲圖資料分析

4月17日11時至14時UTC(地方時19時至22時)每小時色調強化衛星雲圖(圖3.5)，藉由連續雲圖分析顯示大陸東南沿海一帶存在發展旺盛鋒面對流雲系，其水平尺度東西方向約達7個經距，南北則約4個緯距，並持續向東北移動，由地理位置研判對海峽南部一帶及台灣南部地區造成劇烈天氣影響。

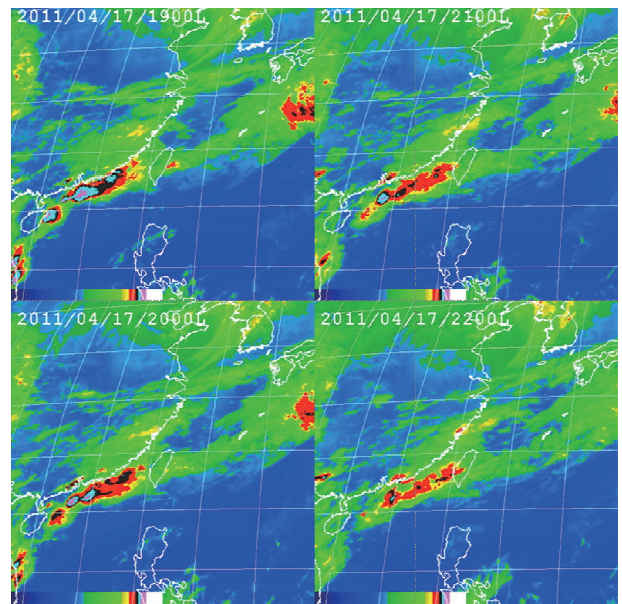


圖3.5 資料時間4月17日11時至14時UTC，色調強化彩色衛星雲圖。

3.4 雷達資料分析

馬公連續雷達回波圖資料顯示(如圖3.6)，世界時4月17日13時17分至32分(地方時4月17日21時17分至32分)強對流位於台南市區北面，並以8m/s的速度向東移動，最大回波達55dBZ以上。

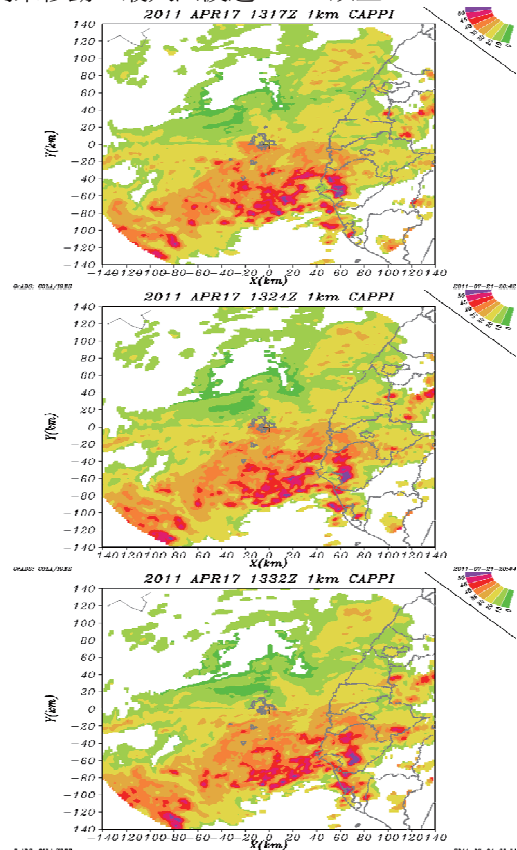


圖3.6 世界時4月17日13時17分至32分，高度1km連續回波圖。

據台南機場值班人員及媒體報導指出，4月17日

晚間9時由海面移入的強對流具放電現象，冰雹發生地點位於台南市南區安南區，配合馬公雷達掃描策略最接近的時間點是1317UTC（地方時21時17分），強對流位於台南市東北面（圖3.7），配合水象粒子分佈反演強對流區1km及3km高度具有「Rain-hail mixture（冰水混相）」訊號反應（圖3.7水象粒子分類第0項），藉由地面觀測到冰雹掉落再次驗證本研究使用的隸屬函數適合台灣地區使用，此強對流區的5km及7km高度則有「Hail（冰雹）」分佈（圖4.6水象粒子分類第8及第9項）。

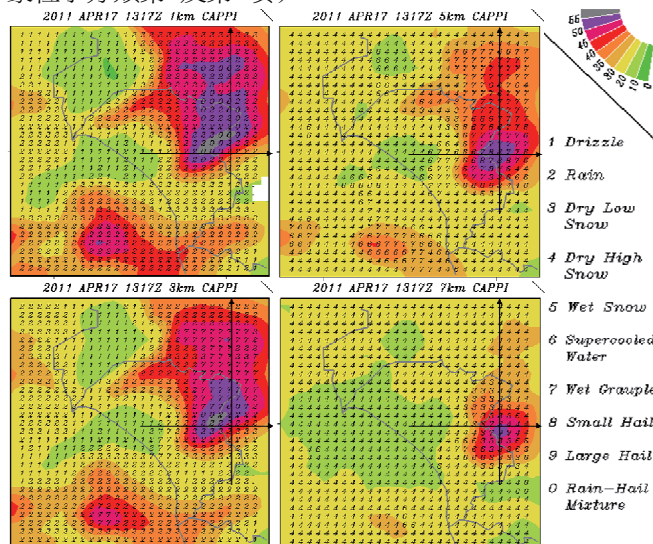


圖3.7 馬公雷達資料時間1317UTC（地方時2117時）1、3、5、7km高度CAPPI回波圖。

水象粒子分類第6項為過冷水，其成因為大氣中熱傳導效率低，當溫度低於 0°C 時水不會馬上凍結，依然可以液態水相態存在，參考Keenan.(2003)[5]及NCAR經水象粒子模擬散射實驗得到過冷水的隸屬函數數據，本個案中設定過冷水回波值（ Z_H ）介於 $-20\sim-20\text{dBZ}$ 、差異反射率（ Z_{DR} ）在 $-0.5\sim-1.5\text{dB}$ 之間、比差異相位差（ K_{DP} ）介在 $0\sim0.1\text{ deg/km}$ 、相關係數（ ρ_{HV} ）需大於 0.98 以上，而溫度設定存在於 $-20\sim0^{\circ}\text{C}$ 間，對於雹暴系統過冷水是不可或缺的元素，強上升運動造成的冰粒子提供良好凝結核，配合動力場再進入區域使得過冷水得以附著，經乾成長及濕成長過程得以形成冰雹，由5km到7km高度CAPPI水象分類圖（圖3.7）發現過冷水存在環繞雹暴主體周圍，且過冷水分布位置與低層（1km及3km高度）的冰水混相分布區域大致相符。

為更進一步了解本雹暴個案垂直結構，針對7km高度CAPPI回波圖（圖3.7）的最大回波區域進行南北向（圖3.8a）及東西向剖面（圖3.8b），強對流發展高度達 12.5km 最強回波達 58dBZ ，配合系統移動方向雹暴垂直結構均有高層前傾趨勢，且冰水混相分布位置與林(2010)[1]均存在於強回波主體之後，且距主體越遠地面呈現的水相粒子是以雨滴為主，本個案冰水混相高度可達 5km ，經探空圖（圖3.4）分析溫度約為 -8°C 與98年馬公個案相似，顯示台灣地區考慮動力場強上升氣流可以將水帶至 -8°C 的環境還不至於結

冰，另一方面本個案設定過冷水存在於 $-20\sim0^{\circ}\text{C}$ 之間，從圖4.8了解過冷水分布最多的高度在 $4\sim6\text{km}$ 約為 $0\sim-13^{\circ}\text{C}$ ，最高高度可達 7km 溫度約為 -15°C 。

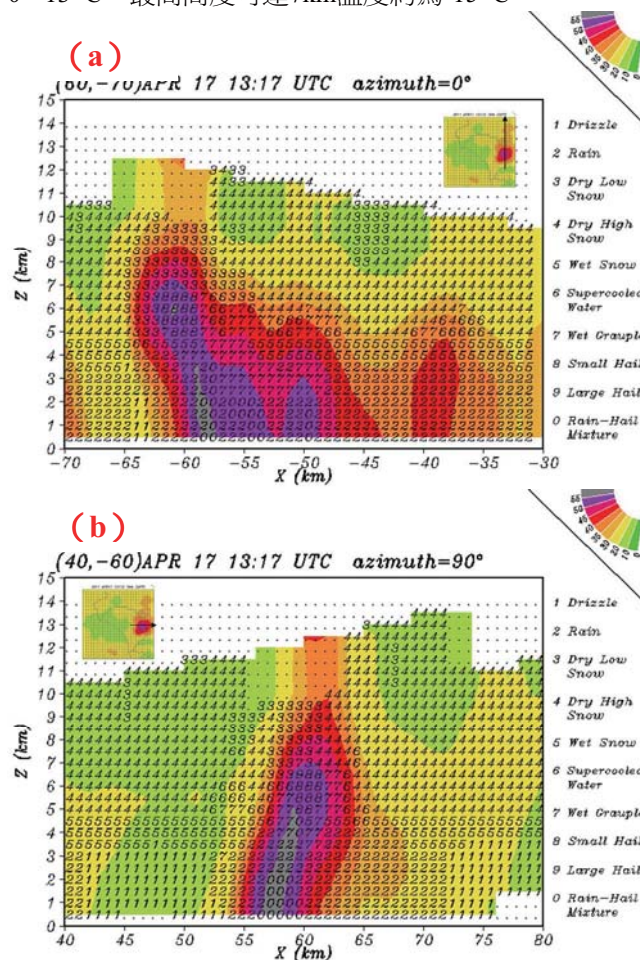


圖3.8 (a) 通過7km高度，最大回波處南北向剖面。
(b) 通過7km高度，最大回波處東西向剖面。

四、結論及未來展望

Zrníc and Ryzhkov(1999)[6] 認為雙偏極化雷達已經通過兩個重要測試，分別是：偏極化的資訊包含水象粒子特性，以及反演足夠精確度。

經兩次雹暴個案分析（本個案與2009年3月15日個案），冰水混相及降雨驗證均能與實際相符，可證明台灣地區水相粒子分類的隸屬函數已具雛型：

（一）由結構分析：雹暴由底至頂具有向移動方向傾趨勢，是傾斜的結構。

（二）比較強回波發展高度：兩次個案強對流發展大於 55dBZ 高度約介於 $4\sim5\text{km}$ 之間。

（三）水象例子反演結果分析：強回波處是由軟雹、冰雹及雨水構成其中又以冰雹含量較高。

（四）兩次個案冰雹均由台灣海峽中南部移入陸地，並非接觸陸地抬升後導致降雹，今後可由海面強烈對流系統著手監測雹暴發展的初始環境。

為建立可靠的觀測積冰方式，利用雹暴個案驗證過冷水存在，經反演過冷水分布後，分析南部地區過冷水可存在空層達 -15°C ，除了反演方法，更期望藉由機載觀測建立一套屬於台灣地區的隸屬函數參數。

五、參考文獻

- [1] 林育邦，雙偏極化雷達反演雹暴個案水象粒子分布之研究，國防大學理工學院環境及資訊工程學系大氣科學碩士班碩士學位論文，84頁，2010.
- [2] 紀博庭，紀利用中央大學雙偏極化雷達資料反求雨滴粒徑分佈及降雨率方法的研究，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，80頁，2005.
- [3] Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Balakrishnan, N., and Zrnic, D. S., "An Examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 7, pp.829-840, 1990.
- [4] Testud J., E. Le Bouar, E. Obligis, and M. Ali-Mehenni, 2000: The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17, 332–356.
- [5] Kessinger, C., S. Ellis, and J. VanAndel, 1999: A Fuzzy Logic Radar Echo Classification Scheme for the WSR-88D, Preprints, 29th International Conference on Radar Meteorology, AMS, Montreal, 12- 16 July 1999, 576-579
- [6] Zrnic, D.S., and A. V. Ryzhkov, 1999: Polarimetry for weather surveillance radars. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 389-406.