

微波降雨雷達觀測之初步分析與應用

蔡嘉倫 游政谷

中國文化大學大氣科學系

摘要

微波降雨雷達(Micro Rain Radar)為國內首座垂直觀測(vertical pointing)之氣象都卜勒雷達，目前架設於中國文化大學大氣科學系觀測坪，主要設計為觀測大氣中的降水強度、雨滴落速、液態水含量、降雨率及雨滴粒徑分佈。此雷達擁有相當高之空間與時間的解析度，提供降水粒子在大氣中的分佈及變化。由於此雷達首次用來觀測副熱帶的降水系統，我們對於資料的準確度進行初步的分析；利用中央氣象局五分山雷達、民航局中正雷達與此微波降雨雷達之雷達回波資料進行比對。除此此外，利用文化大學觀測坪之雨量筒與撞擊式雨滴譜儀進行降雨率與粒徑分佈資料的相互驗證，藉此來評估微波降雨雷達在臺灣地區觀測之實用性。

在科學研究方面，此雷達所觀測到的雷達回波及雨滴落速，在移除雨滴的終端速度之後，可以獲得空氣的垂直速度，來檢視臺灣降水系統內部的結構特徵與其可能的對流過程；另外，使用此雷達所觀測的雨滴落速與五分山雷達、中正雷達之徑向風場可進行三都卜勒雷達風場合成，來獲得高解析度較接近真實三維風場的垂直分佈，此資訊對於了解風場的變化與對流系統演化相當有助益。在作業及預報方面，此雷達除了可清楚辨別融解層高度及其隨時間的變化之外，並可以提供降水粒子在垂直方向的快速演變情況，這些氣象資訊對於極短時的劇烈天氣預警相當有幫助。

關鍵字：微波降雨雷達、雨滴粒徑分佈、三都卜勒雷達風場合成

一、前言

臺灣地區目前具有高密度的雷達觀測網；對於劇烈天氣能有效的掌握。由於臺灣地形崎嶇，雷達電磁波常受地形阻礙，加上雷達電磁波會隨著距離的增加而往上偏，因此對於天氣系統的低邊界觀測非常缺乏。此時若有由地表垂直向上觀測雷達(Vertical Pointing)，可以補足一般圓錐掃描式雷達在山區低層資料的不足。由德國METEK所研發之第二代微波降雨雷達(Micro Rain Radar-2)，為垂直觀測之氣象雷達，主要設計為觀測大氣中的降水，利用MRR-2可以觀測到垂直方向高空間與時間解析度的雨滴粒徑分佈資料。Martin et al (1999)，利用了第一代之MRR定量的觀測降水，發現所觀測到的降水受本身的電子干擾、物理過程及雷達常數的影響，其觀測值普遍高於地面的雨量計與雨滴譜儀的觀測。然而經過訂正後，與地面觀測之雨量其相關係數可高達0.94。MRR-2在訊號輸出前可將電子干擾訂正後將觀測值輸出，惟物理過程中的強風切及亂流等不易觀

測與計算，無法先自行訂正。

地形在臺灣地區的降水系統扮演很重要的角色，但有關地形降水的研究由於觀測資料的缺乏而有很大的限制。為了更進一步探討這個議題，增加在複雜地形上的觀測資料是必要的。中國文化大學大氣科學系為了研究相關的議題在2005年6月由德國引進了MRR-2。而文化大學位於大屯山系中，臺灣北部的降水時常受到大屯山的影響(鄭，2006)。隨著微波降雨雷達的增設，對於資料缺乏的山區提供了密集的觀測資料。微波降雨雷達造價相對於更長波段的雷達是比較低的，加上波長短，天線碟盤較小，其機動性非常強，可彈性移動觀測降水系統，非常適合在地形複雜的臺灣地區使用。

Wanger et al. (2004)，利用了MRR-2與地面撞擊式雨滴譜儀跟光學式雨滴譜儀在DSD(Drop Size Distribution，雨滴粒徑分佈)做了比對分析，發現在層狀降水的系統中，兩者粒徑分佈的情形是較一致的。

Diederich (2004)利用不同的觀測平臺與

MRR-2所觀測到的資料進行相互比對，發現了MRR-2的回波值有時會高估。

由於MRR-2為國內第一部垂直觀測之降雨雷達(圖1)，也是MRR-2全球第一次設置在副熱帶地區。為了評估此雷達在臺灣地區的實用性，在近地面層，我們將此雷達觀測與文化大學撞擊式雨滴譜儀與華崗測候站地面雨量觀測進行比對；在垂直空間上，利用中央氣象局五分山雷達與民航局中正機場雷達針對其雷達回波來進行比對，藉此用來評估MRR-2在臺灣地區之實用性與準確性。除此之外，本文也針對微波降雨雷達在科學研究及預報作業的應用上進行討論。



圖1：架設於中國文化大學大氣科學系觀測坪微波降雨雷達。

二、微波降雨雷達

(一) 觀測原理

微波降雨雷達(Micro Rain Radar)電磁波在槍形的調波器裡振盪後發射(圖2)，傳輸的電磁波強度約為50mW；天線大小約為直徑60cm，雷達電磁波長為1.25cm，其相對應的頻率為24.1GHz。波束寬為2dB，在振盪器內將散射回來的電磁波在訊號處理器中比較其頻率的變化(Doppler Shift Frequency)，可以得知目標物的移動速度。其接收之波譜強度利用快速的富立葉轉換(FFT)計算後可以得到目標物的速度譜，此一速度譜可以得知雷達觀測體積中雨滴的終端速度。利用Gunn and Kintzer (1949)之研究得知其終端速度的變化與其粒徑大小有關係，藉此可以知道觀測範圍內之DSD。另外，MRR使用調頻連續

波段(FM-CW)去觀測大氣中水相粒子的落速，此技術的優點在於可以獲得高空間與高時

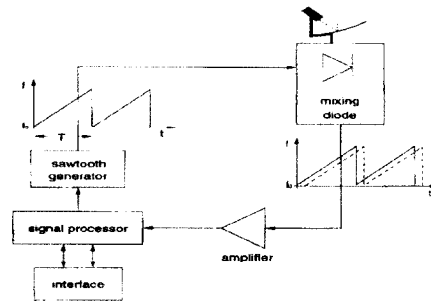


FIG. 1. Block diagram of the 24-GHz FM-CW Doppler radar (MRR).

圖2：微波降雨雷達之觀測架構方塊圖。(取自於Martin 1999)

間解析度的資料。本文使用德國METEK所生產之第二代微波降雨雷達(MRR-2)，有30個觀測區間(gate)，空間解析度可視需要由10調整至1000公尺，時間解析度則由10~3600秒，其詳細雷達特徵列於表1。

表1 文化大學微波降雨雷達特徵表

參數	數值
經度	121° 32' 23"
緯度	25° 08' 10"
海拔高度	416m
天線直徑	60cm
頻率	24.1GHz
波長	1.25cm
波束寬	2°
發射功率	50mW
空間解析度	10-1000m
時間解析度	10-3600s
觀測範圍	10m(Min)~30000m(Max)
重量	12kg

(二) 觀測參數之反演

在微波降雨雷達的訊號處理器中將其所得到之DSD可推得到雷達回波、降雨強度與液態水含量等資料，並在MRR-2中之訊號處理器中計算，其所得到的數值會直接以ASCII形式輸出；回波強度的大小主要由雨滴的大小之六次方所主宰，因此若雨滴的大小及數量已知，在雷式散射(Rayleigh scattering)假設下回波強度可表示：

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD \quad (1)$$

$N(D)$ 為其粒徑分佈， D 為其粒徑大小。而降雨強度的反演可由終端速度與粒徑大小之關係求得(Atlas et al. 1973)：

$$RR = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D) D^3 v(D) dD \quad (2)$$

其中 $v(D)$ 為終端速度，由(2)式可知降雨強度之反演主要也是由粒徑大小所主宰。另外，在雷達觀測體積內的雨滴也可利用粒徑大小求出其液態水含量：

$$LWC = \rho_w \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D) D^3 dD \quad (3)$$

因此我們可以知道微波降雨雷達是將觀測到之速度譜求出 DSD 後再利用以上的式子反演出一些觀測參數。由於這些計算都在處理器中完成，我們可以迅速的獲得觀測值，可有效的掌握即時的天氣現象。

三、資料來源與觀測比對

(一) 資料來源

1. 中國文化大學：微波降雨雷達(MRR-2)每分鐘之雷達回波、降雨強度與粒徑分佈。RD-80型撞擊式雨滴譜儀，可觀測到雨滴在地面的粒徑分佈(DSD)(蔣，2005)，藉此可反演出回波強度及降雨強度。華崗測候站之逐時雨量資料。
2. 中央氣象局：五分山雷達站(s-band)每六分鐘一筆體積掃描之雷達回波及徑向風場。板橋測站每十二小時一筆探空資料。
3. 民用航空局：中正機場氣象雷達(c-band)每五到三十分鐘一筆體積掃描之雷達回波及徑向風場。

(二) 觀測比對

1. 雷達回波

文化大學的微波降雨雷達位於五分山雷達站方位角 286.4° 處，距離約24.51公里；位於中正機場雷達方位角 78.71° 處，距離約33.51公里(圖3)。本文利用通過微波降雨雷達位置之五分山雷達與中正機場雷達回波，做時間序列之比對分析。如圖4所示，2月28日00到12時(UTC)，受冬季鋒面影響的降水時間序列

。比較明顯的降水為2到4時與9到12時(UTC)的降雨，其回波值可達25dBZ，分析圖4中的a、b與c可看出三個雷達在這兩段時間皆有25dBZ的回波值出現，說明了這三個雷達觀測降雨的時間是非常吻合的，且其回波強度與位置也相當一致；但是由於時間與空間解析度的不同，MRR觀測資料比WFS與CKS密集，微波降雨雷達對於低層的資料觀測及降雨發生的時間會優於其他兩個雷達，但在高層會出現回波低估的情形。

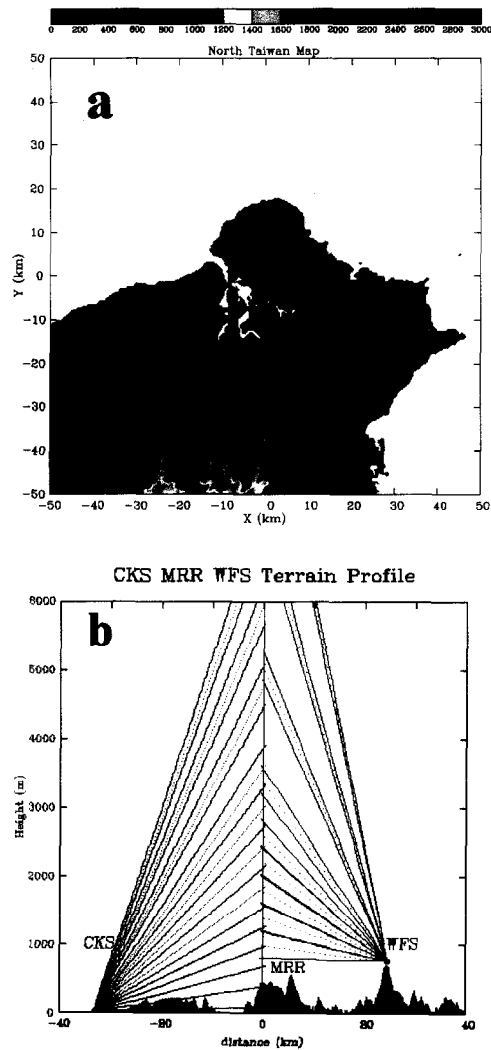


圖3：(a)中央氣象局五分山雷達站、民航局中正機場雷達與文化大學微波降雨雷達之相關位置圖，地形高度以色階表示，間距為200公尺。(b)為(a)中黑實線之垂直剖面，棕色為地形，紅線為五分山雷達每一仰角之電磁波在空間之傳遞路徑，藍線則為中正機場之電磁波仰角。

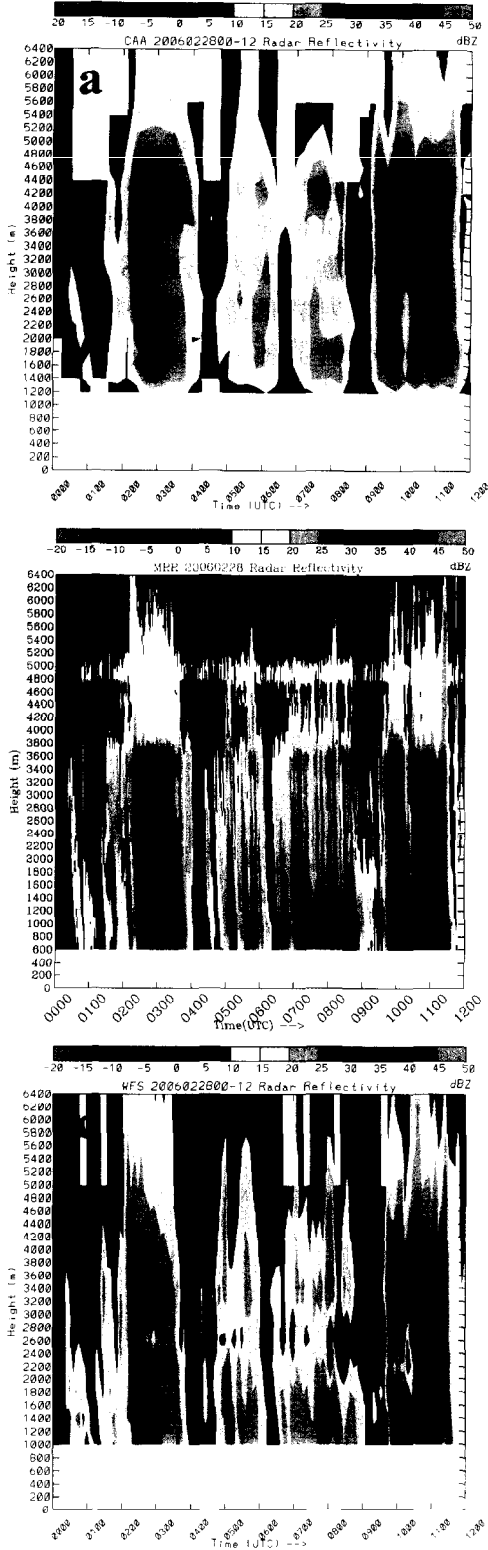


圖4：雷達回波時間序列圖，時間為2006年2月28日00到12時UTC，直軸方向代表海拔高度(MSL)，色階表示回波值，(a)中正機場雷達所觀測之回波。(b)文化大學雷達之觀測之回波。(c)五分山雷達站所觀測之回波。

雷達電磁波在傳遞的過程中，其能量會

會被大氣中的粒子吸收及散射。因此，雷達所接收到的電磁波能量會隨著距離增加而減少；而若電磁波波長接近所觀測的目標物時(Mie scattering)，電磁波的衰減更為顯著。MRR波長為1.25公分，其電磁波能量容易被粒徑較大的雨滴所吸收，若在接近雷達有粒徑較大的雨滴存在時，發射的電磁波會先被衰減，此種情形之下會造成高層回波的低估。台灣處於副熱帶地區，在夏季有颱風的侵襲，且降雨系統大多為對流性型態。因此，MRR在這種環境下觀測時常在高層會有電磁波的衰減，而颱風會長時間的帶來豪大雨，其衰減的情形更為明顯。我們分析2005年10月1日龍王颱風侵台的個案，圖5a為MRR

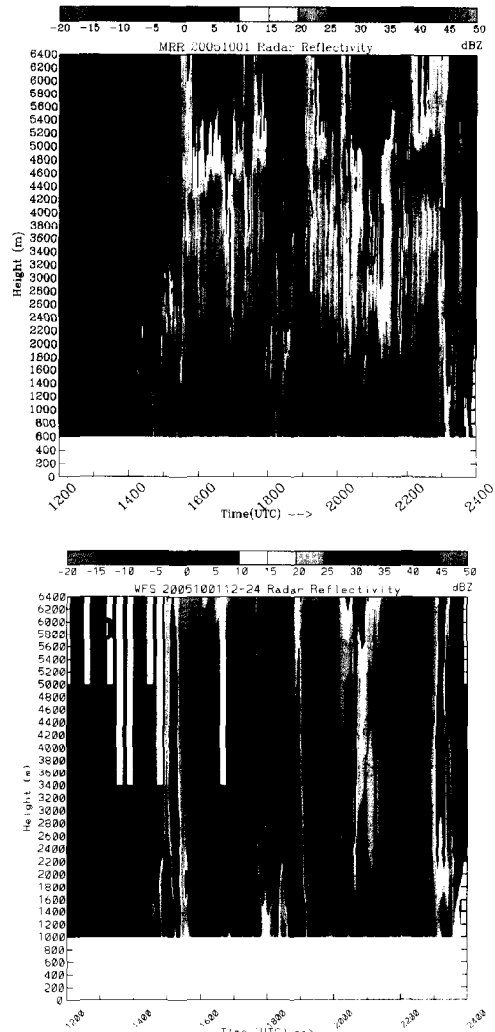


圖5：雷達回波時間序列圖，時間為2005年10月1日12到24時UTC，直軸方向代表海拔高度(MSL)，色階表示回波值，(a)文化大學雷達之觀測，(b)中央氣象局五分山雷達站所觀測之回波。

在12到24時(UTC)回波時間序列圖，可發現在低層600~800公尺的回波直高達50 dBZ，在高層的電磁波能量則明顯有較低值。圖5b為五分山雷達站在同一時間的回波時間序列圖，在主要降水的時間裡可以看到對流性的降水回波，大於45 dBZ的回波高達5000公尺。與圖5a相比較發現，MRR仍可以觀測到高層的降水，但由於其能量被衰減，回波值明顯低於WFS的觀測，短波長的MRR會低估高層的回波。

2. 地面觀測

與同樣位於文化大學觀測坪中之雨量計與撞擊式雨滴譜儀做地面雨量及粒徑分佈的比對。使用華崗測候站所設置之雨量計所觀測之時雨量與微波降雨雷達利用DSD所反演出之雨量比對，MRR所使用的資料為第一個觀測區間，距地面200公尺。由圖6可發現降雨量大致相符，其降雨時間非常一致。降雨強度在最後時間(約07UTC附近)，MRR的降雨量有高估的情形，此結果的發生可能與降水粒子在空中的蒸發有關，導致地面雨量偏低。一樣使用高度200公尺之微波降雨雷達DSD資料與滴譜儀做比對(圖7a)，發現MRR的值皆大於滴譜儀所觀測到之DSD。為了更進一步了解此差異是否由於DSD垂直變化所引起的，我們將MRR之解析度調高，使第一筆資料距滴譜儀10公尺，結果如圖7b所示，可清楚發現MRR之DSD與滴譜儀非常的接近。

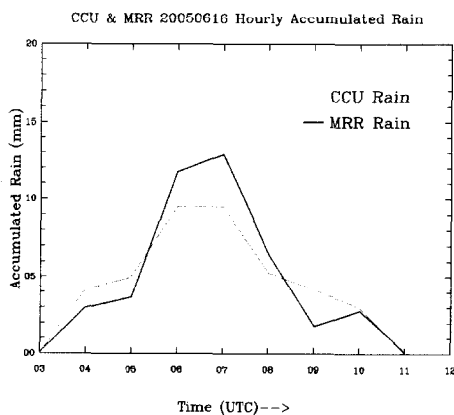


圖6：文化大學雷達與華崗測候站之逐時雨量圖，時間為2005年6月16日03到12時UTC，直軸方向代表累積雨量，圖中黃色線為MRR所觀測之雨量，紅色線為華崗測候站觀測之雨量

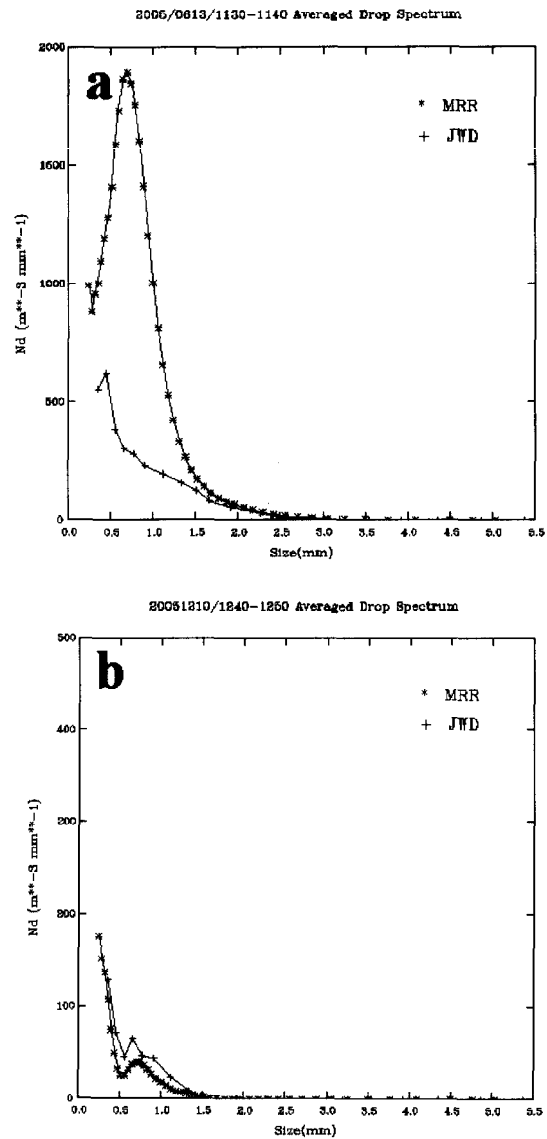


圖7：粒徑分佈比對圖，圖中綠色線為微波降雨雷達(MRR)所觀測到之粒徑分佈，藍色為撞擊式雨滴譜儀(JWD)所觀測之粒徑分佈，橫軸代表粒徑大小，直軸代表單位體積的水滴數目。(a)MRR資料距離JWD 200公尺，時間為2005年6月13日11時30分到40分(UTC)。(b)MRR資料距離JWD 10公尺，時間為2005年12月10日12時40分到50分(UTC)。

四、觀測資料之應用

(一)融解層高度

大氣中高層冰相粒子在經過0°C高度時會開始融解，而在這個高度溫度依舊很低，因此先融化的冰變成水包裹著還未融化的冰，冰水混合的粒子會加大其終端速度，而

純冰相粒子的終端速度是很小的，因此在0°C附近會有顯著垂直速度梯度存在。MRR利用都卜勒效應垂直觀測大氣中的降水粒子，因此可清楚辨別融解層高度。我們分析一冬季鋒面通過臺灣的個案，鋒面在2006年2月25日19-24時(UTC)MRR觀測到層狀降水回波(圖9a)。由同年2月26日00時(UTC)

之板橋探空資料(圖8)可知當時環境的0°C高度約677.8mb，距地面3355公尺處，圖9a為MRR之回波觀測可看到在3400公尺處有強回波(亮帶回波)持續存在。圖9b為MRR所觀測之雨滴落速，由雨滴落速隨時間的垂直觀測中，我們可以發現在0°C雨滴的落速有明顯的梯度。然而探空資料為12小時一筆，因此可藉MRR獲得即時的回波及雨滴落速的觀測，可以幫助我們觀測出融解層高度隨時間的快速變化。

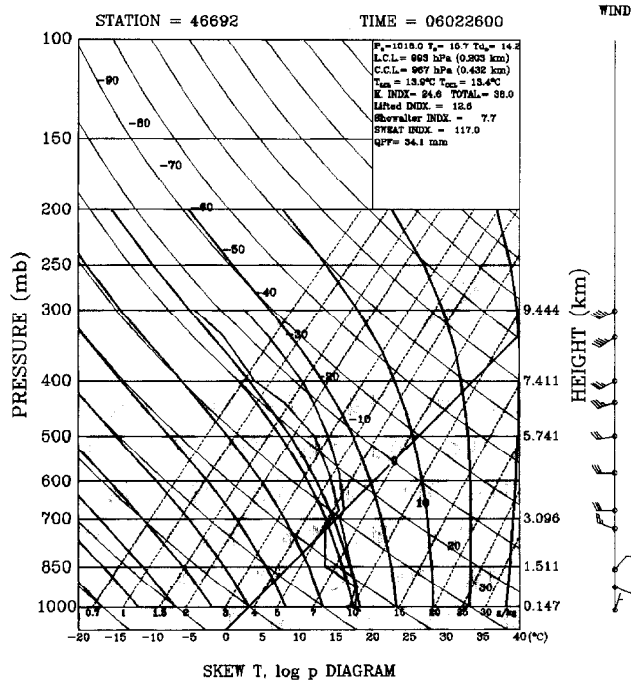


圖8：為2006年2月26日00時UTC板橋測站探空

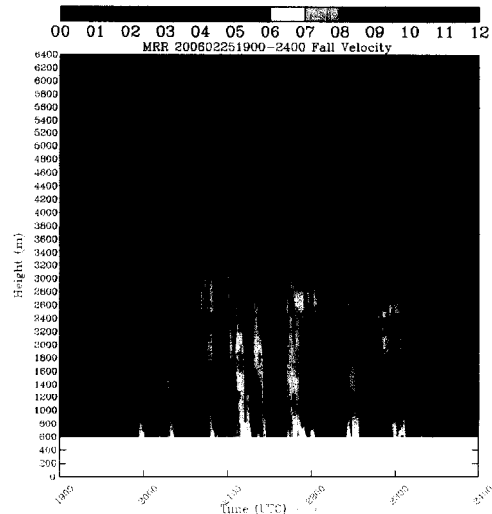
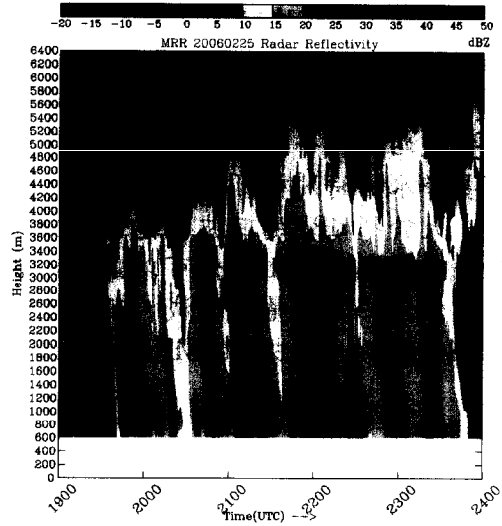


圖9：(a)為微波降雨雷達回波時間序列圖，由圖中可看出觀測到亮帶的位置在0°C附近，色階表示回波值。(b)為微波降雨雷達雨滴落速時間序列圖，時間為2006年2月25日19到24時UTC，色階表示雨滴落速，間距如圖上所標示。

(二)極短時預警

由於MRR擁有非常高的空間及時間解析度，可以觀測到大氣中降水系統內部的結構特徵與其可能的對流過程。若有系統在觀測範圍內發展，我們可以觀測到水滴在空中形成，隨著時間的經過而落下。MRR可以觀測到雨滴的落速，由此可知在高層發展的降水在經過多久後會落下。圖10為二個降水個案實例，我們可清楚看到約在3000公尺高的位置有雨滴開始發展，而其所觀測之雨滴落速為5至7 m s⁻¹，以此速度落下，估計約在10分鐘後會落至地面。

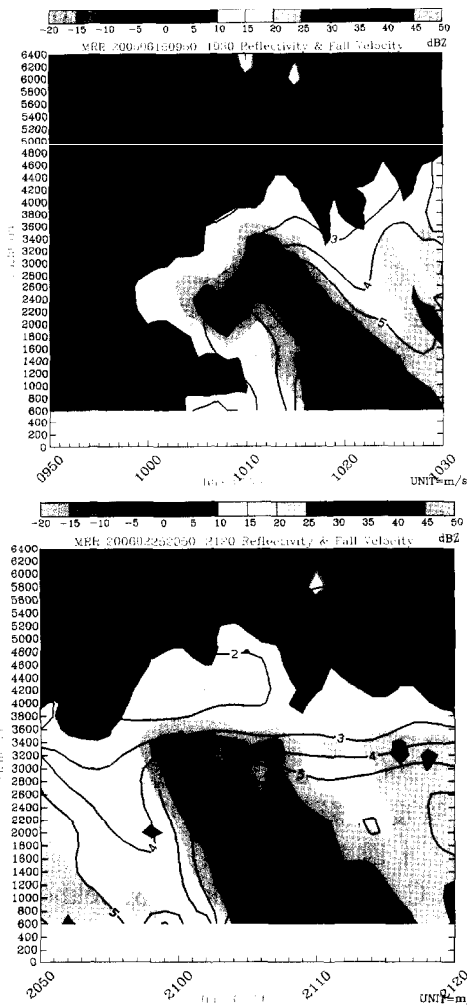


圖 10：微波降雨雷達回波與雨滴垂直之時間序列圖，(a)為2005年6月15日9時50分到10時30分(UTC)。(b)為2006年2月25日20時50分到21時20分(UTC)。

(三)都卜勒風場反演

傳統雙都卜勒垂直速度場的獲得是利用非彈性連續方程做向下積分，再利用變分法調節垂直速度，因此在風場合成過程中使用了許多的假設(Doviak et al. 1976)。MRR可以提供垂直方向的觀測，可直接量測到降水粒子的落速，若再配合五分山雷達與中正機場雷達的徑向風場觀測資料，可進行三都卜勒風場合成，而無需做任何假設即可求得三維風場。若 ϕ_1 為五分山雷達距MRR的方位角， ϕ_2 為中正機場雷達距MRR的方位角， θ_1 為五分山雷達觀測的仰角， θ_2 為中正機場雷達觀測的仰角，雷達所觀測到的徑向風場與 (u, v, w_p) 的數學關係式如下：

$$\begin{cases} Vr1 = u \sin \phi_1 \cos \theta_1 + v \cos \phi_1 \cos \theta_1 + w_p \sin \theta_1 \\ Vr2 = u \sin \phi_2 \cos \theta_2 + v \cos \phi_2 \cos \theta_2 + w_p \sin \theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

若要求得 u 與 v 可將(4)式改寫成以下兩式：

$$u = \frac{(Vr1 - w_p \sin \theta_1 \cdot \cos \phi_2 \cos \theta_2) - (Vr2 - w_p \sin \theta_2 \cdot \cos \phi_1 \cos \theta_1)}{(\sin \phi_1 \cos \theta_1 \cdot \cos \phi_2 \cos \theta_2) - (\cos \phi_1 \cos \theta_1 \cdot \sin \phi_2 \cos \theta_2)}$$

$$v = \frac{(Vr1 - w_p \sin \theta_1 \cdot \sin \phi_2 \cos \theta_2) - (Vr2 - w_p \sin \theta_2 \cdot \sin \phi_1 \cos \theta_1)}{(\cos \phi_1 \cos \theta_1 \cdot \sin \phi_2 \cos \theta_2) - (\sin \phi_1 \cos \theta_1 \cdot \cos \phi_2 \cos \theta_2)}$$

式中 w_p 為粒子的落速，可由MRR觀測而得，將其代入上述兩式，可求得 u 與 v 。圖11為

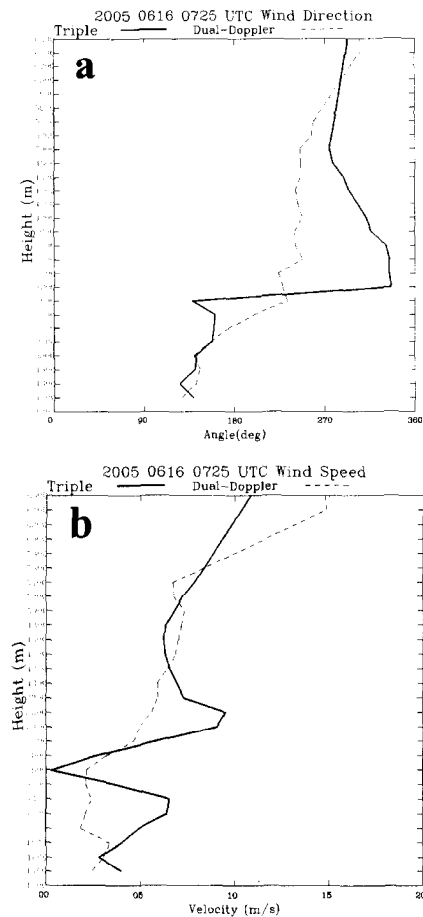


圖 11：三都卜勒與雙都卜勒風場之比較，時間為2005年6月16日07時25分UTC，實線為三都卜勒之合成，虛線為雙都卜勒之合成。(a)水平風風向之比較，橫軸為風向。(b)水平風風速比較，橫軸為風速，單位為 $m s^{-1}$ 。直軸皆為海拔高度(MSL)。

三都卜勒風場與雙都卜勒風場的差異比較，由於三都卜勒風場不用做非彈性連續方程的積分，因此我們可以相信其合成出之風場比雙都合更為接近真實風場。除此之外，可以利用MRR密集的觀測資料獲得垂直方向風場隨時間的演變，對於了解風場的變化與對流系統演化相當有助益(圖12)。

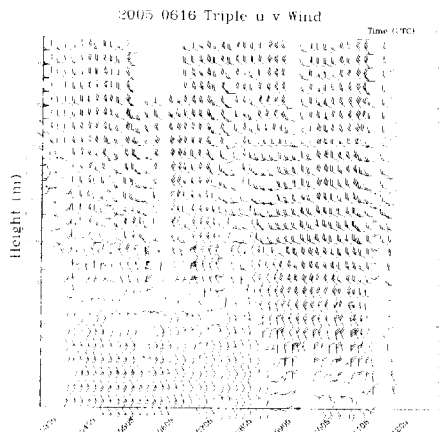


圖12 三都卜勒風場合成之水平風場隨時間之變化，時間為2005年6月16日03時到12時(UTC)，風標一半為 2.5 m s^{-1} ，橫軸為時間，直軸皆為海拔高度(MSL)。

五、結論

微波降雨雷達觀測的回波結構與中正雷達和五分山雷達相當一致，由於MRR波長為1.25公分，在高層有明顯之衰減而導致回波的低估，但由於其高解析度的垂直觀測，在一般雷達無法觀測的近地面及山區，MRR可提供一組觀測數據讓我們增加對低邊界層及地形上降雨系統的了解。微波降雨雷達觀測的降雨率與雨滴粒徑分佈，基本上與地面雨量筒與雨滴譜儀的觀測一致。這顯示出MRR所觀測到的DSD可信度相當高，MRR為垂直觀測也可以看出降水粒子在垂直方向的快速演變，並了解降水系統的內部結構與其可能的對流過程。利用密集觀測可以長時檢視融解層高度隨時間的快速變化，對於 0°C 高度能更有效的掌握，對於積冰預報應有所助益。MRR觀測之回波(每一分鐘一筆)，對於局部發展的對流系統可在雨滴落下前觀測到，若配合雨滴落速資料，我們可以知道高空雨滴落至地面所需的時間，因此針對局部發展之強降水可作極短時(~10分鐘)預警。利用三都卜勒風場合成，可反演更接近真實的三維風場(單點)，有效提供風切變存在的高度與時間。

由於MRR波長較短，高層回波易低估；台灣多對流性降水，因此對於高層回波值低估之訂正是需要的，未來將會利用其DSD來訂正高層的衰減效應。而MRR為單點觀測，往後計畫以陣列多點觀測的概念，以對

降雨系統的演變更有效的監控。MRR在空間與時間解析度非常高，若能將資料應用於模式或預警之中，相信可以減少豪大雨所帶來的災害與損失。

六、誌謝

本研究由國科會 NSC 95-2111-M-034-001 支助進行，感謝交通部民航局飛航服務總台提供中正機場都卜勒雷達資料，交通部中央氣象局提供五分山雷達資料，感謝文化大學大氣科學系劉清煌教授提供地面雨滴譜儀資料，感謝台大大氣系研究資料庫楊明錚先生在資料收集上的協助。

七、參考文獻

- 蔣孟良，2005：利用雨滴譜儀分析不同降雨系統之雨滴粒徑分佈，中國文化大學碩士論文。
- 鄭凌文，2006：北臺灣地形對颱風降水分佈及強度之影響：象神颱風雷達觀測研究，中國文化大學碩士論文。
- Atlas, R. C. Srivastava, and R. S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **11**, 1-35.
- Diederich, M., Crewell, S., Simmer, C., and Uijlenhoet, R., 2004: Investigation of rainfall microstructure and variability using vertically pointing radar and disdrometer. *ERAD*, 2004, 1-7.
- Doviak, R. J., Peter S. R., Richard G. Strauch and Miller, L., 1976: Error Estimation in Wind Fields Derived from Dual-Doppler Radar Measurement. *J. Applied Meteor.*, **15**, 868-878.
- Gunn, R., and G. D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Meteor.*, **6**, 243-248.
- Martin L. Michael K. and Willi S. 1999: On the Performance of a Low-Cost K-Band Doppler Radar for Quantitative Rain Measurements. *J. Atmos. and Oceanic Tech.*, **16**, 379-387.
- Wanger, A., Clemens, M., and Seltmann, J. 2004: Vertical Profile of drop size. *ERAD*, 2004, 402-406.

Preliminary Analysis and Application of the Micro Rain Radar Observations

Chia-Lun Tsai Cheng-Ku Yu

Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan

ABSTRACT

Micro Rain Radar (MRR) deployed at the campus of Chinese Culture University is the first vertical-pointing Doppler radar in Taiwan. It is designed to measure the precipitation intensity, rainfall velocity, liquid water content, rainfall rate and drop size distribution (DSD). This radar having high spatial and temporal resolution in the vertical provides detailed observations of precipitation distribution and variability in the atmosphere. Because this radar is the first time to be used to observe the precipitation systems occurring in subtropical regions, we carry on preliminary analysis and evaluation of the accuracy of the data. Comparisons between the MRR data and other independent radar measurements from the WFS and CKS radars are described in this paper. In addition, rain rate and DSD data obtained from the surface rain gauge and JWD disdrometer are also used to compare with those of the MRR, in an attempt to understand the feasibility of the MRR to study the subtropical precipitation systems.

In scientific perspective, vertical air motions can be estimated from the MRR observed reflectivity and fall velocity as long as the contribution of terminal velocity of rain drops can be appropriately removed, which provide an opportunity to investigate the structures and convective processes of precipitation systems in Taiwan. With the reflectivities and radial velocities measured from the MRR and WFS and CKS radars, triple Doppler wind synthesis can be applied to retrieve the three-dimensional wind field, allowing to examine the variability of wind fields and evolution of convection systems. In operational and forecast application, the MRR can be used to observe not only the melting level and its variability but also the rapid evolution of elevated rain drops. Therefore, the information provided by the MRR is helpful to predict the occurrence of surface heavy rain and to give an early warning of these severe weather events.

Key word: Micro Rain Radar, drop size distribution, triple Doppler wind synthesis