

高雄林園C波段雙偏極化雷達系統性偏差與濕天線罩效應校正

許修維¹ 林品芳² 盧裕麗¹ 張保亮² 張偉裕¹

國立中央大學大氣物理所¹ 中央氣象局²

摘要

中央氣象局建置C波段雷達網能夠提供高時空間解析度的定量降水估計，但C波段降雨雷達資料易受到硬體端的系統性偏差、濕天線罩效應與回波衰減效應所影響。故本研究以2020年5月21-22梅雨個案為例設計一套針對高雄林園雷達(RCLY)的資料品管流程，流程中使用雷達波束徑向連續點上的相關係數、差異反射率、差異相位差的標準差之間的搭配做為門檻值，能夠比僅利用相關係數作為門檻值更能夠有效地濾除地形雜波。並以中央大學測站10年以上的撞擊式雨滴譜儀資料依月份分降雨型態並進行T-matrix散射模擬雷達參數，進一步求得各降雨型態的衰減校正係數以及系統性偏差係數進行修正。

結果顯示經由品質控管可以有效地修正經衰減效應和濕天線罩效應低估的雷達資料，並降低在濕天線罩效應影響期間的回波變異性。而藉由計算整體回波偏差與近雷達回波值回歸曲線具有估算濕天線罩效應低估的回波值(最大約7dB)以及雷達本身具有的系統性偏差(~2dB)的能力。此方法可以有效地修正雷達觀測參數，對於進一步分析天氣現象演變、定量降水估計或是資料同化有相當大的幫助。

關鍵字：衰減校正、濕天線罩效應

一、前言

雙偏極化雷達透過同時發射水平、垂直電磁波，具有掌握雨滴大小的能力，能夠更準確的估算降雨率(Bringi and Chandrasekar 2001)。並透過相位參數不受系統偏差特性的優勢，使雙偏極化雷達的資料品質，遠優於傳統的都卜勒(Doppler)氣象雷達。中央氣象局未來將具有四部S波段雙偏極化雷達，並搭配五座C波段雙偏極化雷達，將大大提升即時定量降雨估計、預報準確度，透過防災系統的資訊整合，以降低豪雨所引發的災害。

中央氣象局建置的精密C波段雙偏極化降雨雷達網，可提供高時間、空間解析度定量降雨估計產品。然而C波段降雨雷達資料的系統性特徵(system characteristic)，會受到前述因素影響，包含：(一)硬體端的系統性偏差(system bias)、(二)濕天線罩效應(wet-random effect)及(三)回波衰減效應(attenuation effect)。

中央氣象局現行的S波段天氣守視雷達和建置中的C波段降雨雷達，其電磁波波長、天線罩材質以及發射機功率等，均有所差異，導致在硬體端的系統性偏差、濕天線罩效應和衰減效應，在不同天氣系統影響下，各有不同程度的變

化。為確保雷達觀測的正確性和時空分佈上的連續性，以降低後續定量降雨產品的不確定性，本研究藉由透過系統性特徵分析與校正研究，了解各雷達資料於不同季節或是於不同天氣型態下的系統性特徵，包含：硬體端的系統性偏差、濕天線罩效應、以及回波衰減等，希望可運用至已作業化之雙偏極化雷達，進行觀測資料之調校。

本研究選取台灣C波段降雨雷達高雄林園(RCLY)雙偏極化雷達的降雨個案進行分析，研究目的主要分為：(一)利用差異相位差增量($\Delta\phi_{DP}$)，進行C波段的回波衰減修正，修正雙偏極化雷達觀測變數(Z_{HH} 與 Z_{DR})。利用 ϕ_{DP}^0 值的估算及 ϕ_{DP} 值的反摺疊(unfolding)，均針對氣象局作業用雙偏極化雷達資料特性調整、(二)利用多參數自約束法(self-consistency)建立自動化雷達資料系統性特徵校驗法(Z_{HH} 觀測值)。希望藉由分析台灣不同波段的雙偏極化雷達參數，來評估C波段雷達資料系統性特徵分析以助於未來提供最佳整合定量降雨估計產品。

二、文獻回顧

不同波段的雙偏極化雷達參數，在QPE的應用上各有其優缺點(Bringi and Chandrasekar 2001; Lee 2006)，如X及C

波段雷達的相位參數對弱降水較為敏感，S 波段雷達的 ϕ_{DP} 對於弱降水時的增量較小，易受到 ϕ_{DP} 觀測雜訊(Noise)的影響，使計算所得的 K_{DP} 誤差值隨降雨率減小而增加。長波段雷達的能量參數則較不受衰減影響等。因此雷達降雨估計的應用多為組合型公式 (Hybrid)，如大雨區套用 $R(K_{DP})$ 公式，小雨時套用 $R(Z, Z_{DR})$ 、 $R(Z)$ 公式，以降低 K_{DP} 在小雨區低準確度的影響(Giangrande and Ryzhkov 2008; Cifelli et al. 2011)。

因此，即使是利用雙偏極化雷達進行 QPE，仍然需要使用傳統的 Z_{HH} 變數。Figueras i Ventura and Tabary (2013)比較三波段(S·C·X)雷達在不同地區、個案中的降雨估計表現，過程中使用傳統 $R(Z)$ 公式與 $R(K_{DP})/R(Z)$ 組合型公式，結果顯示長波段雷達的整體表現有優於短波段的趨勢。其差異可歸咎於短波段雷達 Z 衰減修正的不確定性，且其易受濕天線罩效應(wet-radome effect)影響，造成 Z 與降雨率的低估。在同時使用多個雙偏極化雷達參數進行 QPE 時，因 Z_{HH} 與 Z_{DR} 變數會受到不同因素影響觀測品質，需進行若干修正。

雙偏極化雷達變數 Z_{HH} 與 Z_{DR} 主要受到下列因素影響：

(一) 硬體端的系統性偏差(system bias)、(二) 濕天線罩效應(wet-radome effect)及(三)回波衰減效應(attenuation effect)。

Z_{HH} 與 Z_{DR} 的觀測變數可用下式表示：

$$Z_{HH}^{true} = Z_{HH}^{obs} + [Z_{HH}^{sys. bias}] + [Z_{HH}^{wet-radome effect}] + A_{HH} \quad (1)$$

$$Z_{DR}^{true} = Z_{DR}^{obs} + [Z_{DR}^{sys. bias}] + [Z_{DR}^{wet-radome effect}] + A_{DP} \quad (2)$$

Z_{HH}^{obs} 與 Z_{DR}^{obs} 均須經過系統性偏差(system bias)修正、濕天線罩(wet-radome effect)修正及回波衰減(attenuation)修正，方能得到 Z_{HH}^{true} 與 Z_{DR}^{true} ，確保後續雷達參數定量應用沒有偏差。

硬體端的系統性偏差主要來自於硬體校驗(calibration)的變化，可透過工程端硬體校驗，檢測發射機、接收機而得知(每年一次)，然而定期檢測間的變化則無法得知。此外，因不同介質對於電磁波有不同程度的吸收與反射，以致天線罩對於電磁波的影響不易追蹤評估。且外部影響無法透過工程端硬體校驗而得知，而天線罩表面亦會隨時受到周邊環境影響，如降雨在天線罩表面形成水膜(water coating)，導致濕天線罩效應造成的系統性偏差。此外，雷達訊號因電磁波穿透天氣系統時，受到降水粒子的吸收與散射，而有回波衰減效應，使弱降水區域後的訊號有低估的情況。傳統的都卜勒(Doppler)雷達因只發射單一水平極化的電磁波，其回波強度(Reflectivity, Z)觀測的系統性特徵無法客觀評估，導致提

升雷達資料後續定量應用的不確定性。

本研究目的為建立估算高雄林園雷達(RCLY)系統性偏差及濕天線罩效應流程，並利用多項式擬合方法計算出近雷達回波與系統偏差的關係式，有效修正因系統偏差以及濕天線罩效應所減少的回波值大小。

三、雷達資料品質控管

3.1 雷達資料來源

本研究依據個案資料完整性以及降雨是否集中等條件，選取 C 波段降雨雷達 RCLY 於 2020 年 5 月 21-22 日的個案，其資料為氣象局提供，並透過開源軟體 *lrose* 將資料格式轉為 UF 格式。之後透過中央大學雷達氣象實驗室團隊開發的雷達資料處理軟體，進行後續的資料分析。

3.2 非氣象回波濾除

在雷達氣象之中，常透過同時發射的水平、垂直極化電磁波所得的變數：相關係數 (correlation coefficient, ρ_{HV}) 來將非氣象回波濾除，其值在雷達解析體積裡均為同相的水相粒子時(純雨滴)，其值應相當接近於 1，若是非氣象資料則會低於 0.6。 ρ_{HV} 的門檻值依據雷達特性有所不同，其值約介於 0.8 至 0.95 之間。

圖 1 顯示 RCLY 周圍除了降雨的氣象訊號外，還具有相當多的非氣象訊號。因此本研究測試使用 ρ_{HV} 為 0.9 作為門檻值濾除資料(圖 1.c)，發現使用相關係數為 0.9 的門檻值濾除是不足的，並無去有效濾除地開雜波(Ground Clutter)。為了改善這個問題，進一步利用沿著雷達波束上的相關係數(ρ_{HV})、差異反射率(Z_{DR})、差異相位差(ϕ_{DP})、來計算每一點在連續五、五、九點的標準差，變數分別為相關係數的標準差(Standard deviation of cross_correlation_ratio_hv, SR)，差異反射率的標準差(Standard deviation of differential reflectivity, SD)，差異相位差的標準差(Standard deviation of differential phase, SP)，如圖 2 所示。利用此方法來找出三種雙偏極化參數標準差變化較大的區域，即可能代表非降雨訊號，並加以濾除。

圖 3.a 顯示利用 SP>17 的門檻值，能夠有效地非氣象訊號區域尋找出來並濾除，但是利用 SP 當作單一門檻值會將相位摺疊的區域也一併濾除，故本研究先使用 SP>17、SR>0.04 的門檻值，並兩者皆為無效值的區域濾除，再利用 SP>17，SD>1，也再將兩者皆為無效值的區域濾除，完成最終的非氣象濾除(圖 3.b)。為檢視非氣象回波濾除的效果，透過總和回波分析改善情形，圖 4 顯示回波值經過本研究發展

的非氣象回波濾除後，棕框內地形以及地表回波總量有明顯的減少，代表此方法可成功地保留氣象資料，並濾除受地形與建築物影響的非氣象回波，並再作進一步的資料處理。

3.3 ϕ_{DP} 再處理

當雷達電磁波的傳播路徑上有持續的高降雨量時， ϕ_{DP} 值會因為相位變化累積過多而發生折疊的現象，本研究先將 ϕ_{DP} 值做去折疊處理，之後在距離雷達 r 的觀測值($\phi_{DP}^{obs@r}$)是由 ϕ_{DP} 初始值(ϕ_{DP}^0)和雷達與距離 r 之間各觀測值($\Delta\phi_{DP}^r$)的積分所得，如下式。

$$\phi_{DP}^{obs@r} = \phi_{DP}^0 + \sum_0^r \Delta\phi_{DP}^r \quad (3)$$

並做為 ϕ_{DP} 的增量以計算回波衰減修正及系統偏差修正處理。

3.4 衰減效應修正

根據Bringi et al. (1990)研究顯示，衰減量 (attenuation, A_{HH} , dB) 及比差異衰減量 (differential attenuation, A_{DP} , dB) 可透過下式估算：

$$A_{HH} = \alpha \times \Delta\phi_{DP} \quad (4)$$

$$A_{DP} = \beta \times \Delta\phi_{DP} \quad (5)$$

其中係數 α 與 β 需透過雨滴譜儀資料的雨滴粒徑分佈 (drop size distribution, DSD) 觀測，搭配電磁波背向模擬計算，以線性擬合的方式求得。本研究與Chen et al. (2017)類似，藉由NCU JWD雨滴譜儀資料(2005-2015)，針對台灣梅雨事件的DSD的特性，經散射模擬與演算法回歸，得係數 α 與 β 於C波段雷達0.0577及0.0077。

3.5 多參數自約束法估算 Z_{HH} 系統偏差

使用自約束法估計 Z_{HH} 的系統偏差 (包含內部因雷達常數偏差產生系統偏差的與由天線罩產生的系統偏差)，而當有濕天線罩效應發生時，其所求之值將包含了 Z_{HH} 系統偏差量以及濕天線罩效應所致的能量衰減量 (Attenuation of Wet Radome Effect, WRE Att)，在此統稱為 Z_{HH} 差異量 (Z_{HH}^{Bias})。首先將經衰減修正過的 Z_{obs}^{Att} 利用(6)式計算出對應的 K_{DP}' 。

$$K_{DP}' = aZ^b \quad (6)$$

係數 a 、 b 的計算方式為透過雨滴譜儀資料模擬演算法回歸得 K_{DP} 與 Z 關係式。係數 a 與 b 在C波段雷分別為0.000094及0.9204， Z 的單位為線性的 $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 。而後將 Z_{obs}^{Att} 所計算的 K_{DP}' 對距離 (沿波束積分得 ϕ_{DP}' 增量($\Delta\phi_{DP}'$))，再與觀測的 ϕ_{DP} 增量($\Delta\phi_{DP}$)比較可求得 Z_{HH}^{bias} ，單位為dB (Lee et al. 2015)。推導與計算公式如下：

$$\Delta\phi_{DP}' = 2 \int K_{DP}' dx = 2 \int aZ_{obs}^{Att b} dx \quad (15)$$

$$Z_{HH}^{bias} = 10 \log_{10}(Z_{obs}^{Att}) - 10 \log_{10}(Z)$$

$$= 10 \times \frac{1}{b} \times \log_{10} \left(\frac{\Delta\phi_{DP}'}{\Delta\phi_{DP}} \right) \quad (16)$$

四、結果

圖5顯示 $\Delta\phi_{DP}$ 和 $\Delta\phi_{DP}'$ 的分佈偏離理想曲線甚多(1:1分佈線)，代表 $\Delta\phi_{DP}'$ 值在這個個案中都被低估了，並且具有兩個極值分布，代表資料除了雷達系統性偏差效應影響，亦有相當嚴重的濕天線罩效應，系統偏差修正估算需要足夠的觀測 $\Delta\phi_{DP}$ ，才能計算出正確的 Z_{HH} 偏差值。圖6(中)顯示出RCLY的 $\Delta\phi_{DP}$ 最高有效值高達99%，代表其有足夠的數量來計算 A_{HH} ，圖5為 Z_{HH} 偏差(紅色的實線)和5公里內平均雷達回波(藍色的實線)的時間序列，在5月21日0300、0730、2230UTC和5月22日0045、0245、0430、0800、1045、1500UTC附近皆有隨著5公里內雷達回波的增加(最大約40dBZ)， Z_{HH} 偏差值也逐漸增大，顯示出強降水系統靠近雷達時，RCLY具有明顯地濕天線罩衰減效應(Z_{HH} 偏差值突然地往下跌)，在非濕天線罩衰減效應影響期間， Z_{HH} 偏差值減小，5公里內雷達回波也減小。

圖7顯示出5公里內雷達回波與 Z_{HH} 偏差分布，方程式為近雷達回波與系統偏差和濕天線罩效應造成的回波偏差關係，隨著5公里內雷達回波的增加， Z_{HH} 偏差分布亦有上升的現象，亦代表相當明顯的濕天線罩效應發生。而在此個案中，RCLY的濕天線罩效應造成的最大回波偏差值約在7dB左右，本身的系統偏差約在-2.202dB左右，此系統偏差值需要更多的驗證才能做更進一步的定量分析。

而經由衰減校正以及多參數自約束法修正的回波，在濕天線罩效應影響期間的回波變化率，從0.44下降到0.37左右，代表其有效降低因濕天線罩效應造成的回波變化(圖8)，並與非濕天線罩影響期間的修正回波變化率相近(圖8左，橘)，顯示本方法能夠有效修正因濕天線罩效應造成的回波變化，對於進一步析天氣現象演變、定量降水估計或是資料同化有相當大的幫助。

五、參考文獻

- Bringi, V. N., and V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar*. Cambridge University Press.,
- Chen, J.-Y., W.-Y. Chang, and T.-C. Chen Wang, 2017: Comparison of Quantitative Precipitation Estimation in Northern Taiwan Using S- and C-band Dual-Polarimetric

Radars. 大氣科學, **45**, 57–81.

Cifelli, R., V.Chandrasekar, S.Lim, P. C.Kennedy, Y.Wang, and S. A.Rutledge, 2011: A New Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm: Application in Colorado Precipitation Events. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **28**, 352–364.

Figueras i Ventura, J., and P.Tabary, 2013: The New French Operational Polarimetric Radar Rainfall Rate Product. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **52**, 1817–1835.

Giangrande, S. E., and A.V.Ryzhkov, 2008: Estimation of Rainfall Based on the Results of Polarimetric Echo Classification. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **47**, 2445–2462.

Lee, J.-K., J.-H.Kim, and M.-K.Suk, 2015: Application of bias correction methods to improve the accuracy of quantitative radar rainfall in Korea. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, **8**, 4011–4047.

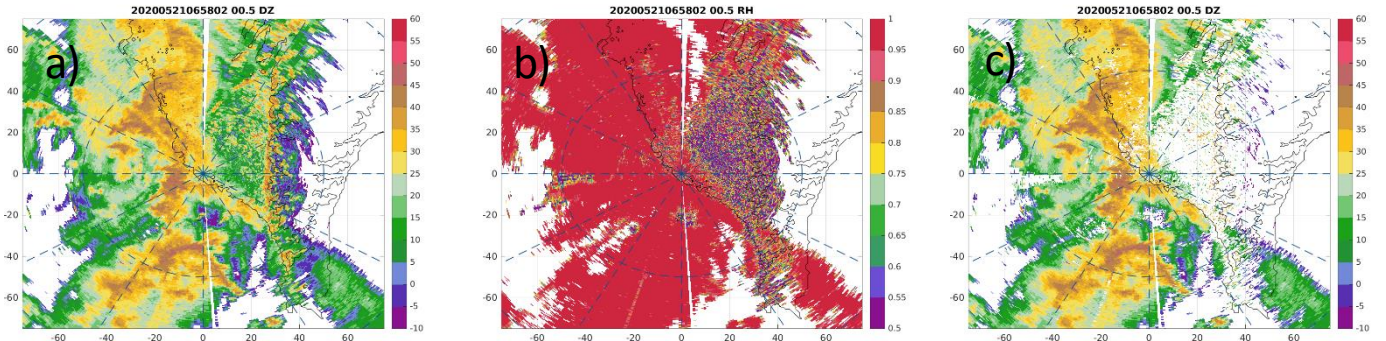


圖1. RCLY於20200521.0658UTC，0.5度仰角的(a)原始觀測回波、(b)原始觀測相關係數(b)與(c)利用相關係數<0.9作為門檻值濾除回波值。

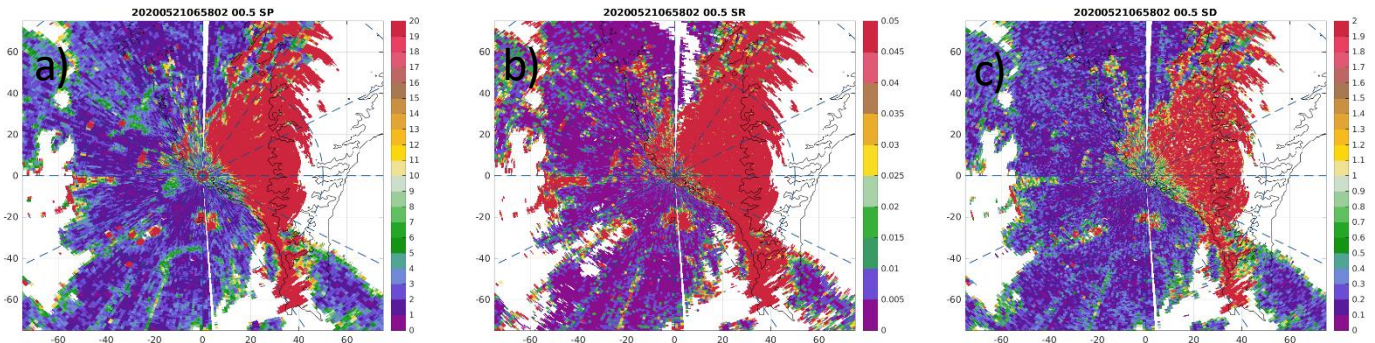


圖2. RCLY於20200521.0658UTC，0.5度仰角的(a)差異相位差、(b)相關係數與(c)差異反射率延徑向方向的標準差。

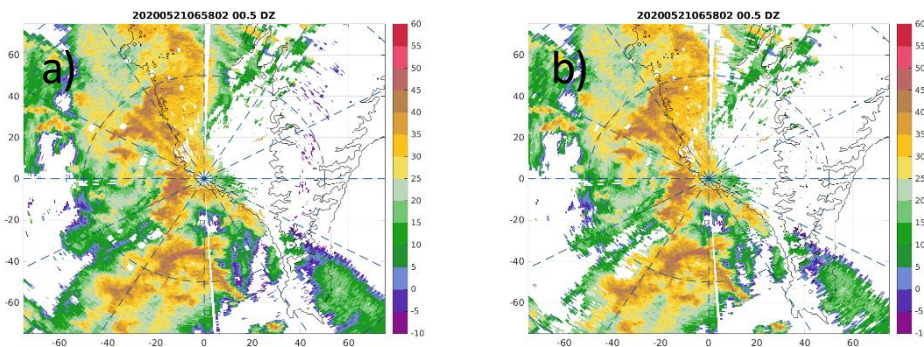


圖3. RCLY於20200521.0658UTC，利用SP作為門檻值(a)以及利用SP與SR加上SP與SD的門檻值(b)所濾除的雷達回波。

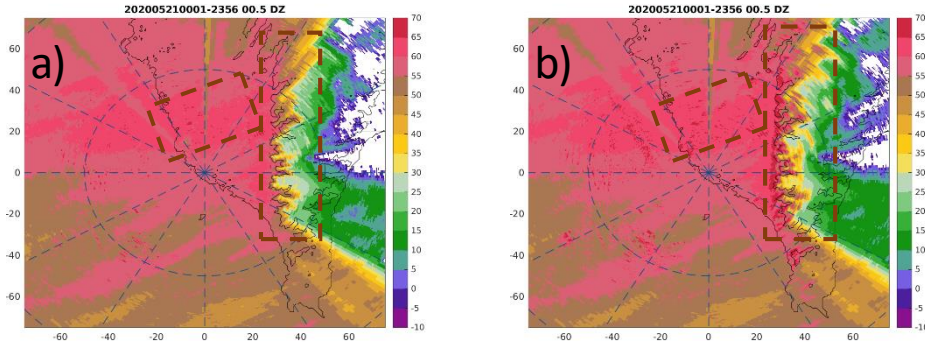


圖4. RCLY於20200521整天的回波值加總，(a)為原始觀測回波，(b)為經過上述濾除方法所計算出的回波。棕框代表經過濾除之後將地形以及地表雜波所濾除的區域。

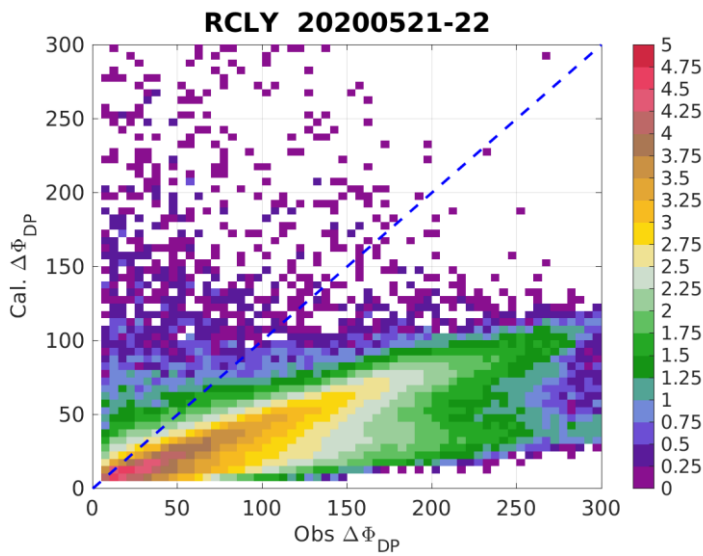


圖5. 2020年5月21-22日RCLY雷達資料於在遠端點 ϕ_{DP} 觀測值，濾除非氣象資料，後亦即是 $\Delta\phi_{DP}$ ，Obs. $\Delta\phi_{DP}$ 和Cal. $\Delta\phi_{DP}$ 分別代表觀測及計算($K_{DP} = aZ^b$, 6式)所得 ϕ_{DP} 。陰影代表觀測與計算 ϕ_{DP} 的數密度函數(number density function)以對數形式呈現。

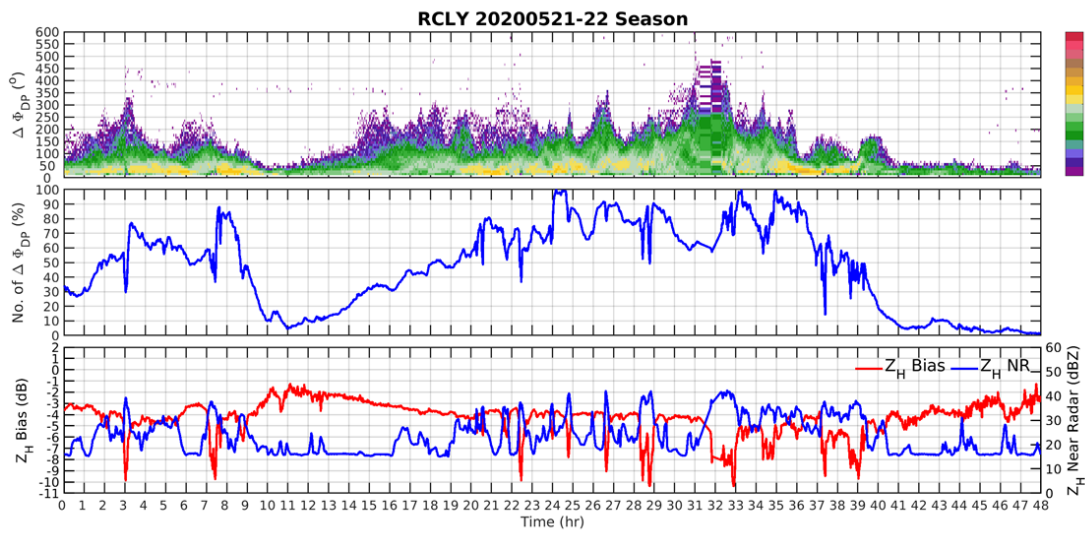


圖6. RCLY於2020年5月21-22日個案的時間序列中，(上)有效 $\Delta\phi_{DP}$ 值分佈時間序列，(中)有效 $\Delta\phi_{DP}$ 百分比時間序列以及(下) Z_{HH} 的偏差(左Y軸：紅色實線)與近雷達回波(右Y軸：藍色實線)。

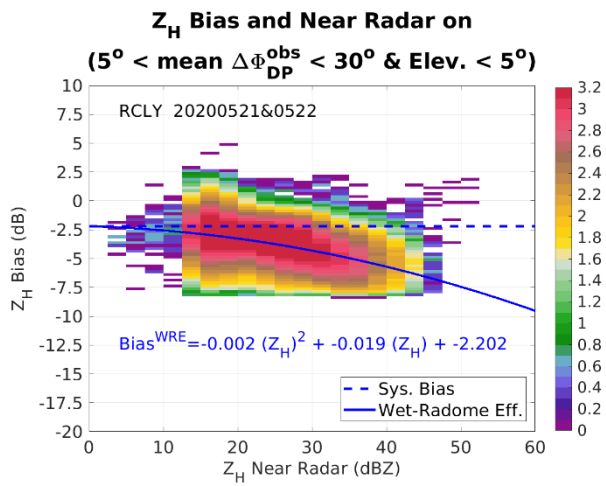


圖 7. RCLY 於 2020 年 5 月 21-22 日，濾除非氣象資料後，近雷達的回波和 Z_{HH} 偏差的總分佈，其中以 $\Delta\phi_{DP}$ 於 5 和 30 度之間與仰角小於 5 度的資料來計算。方程式為近雷達回波與系統偏差和濕天線罩效應造成的回波偏差關係。

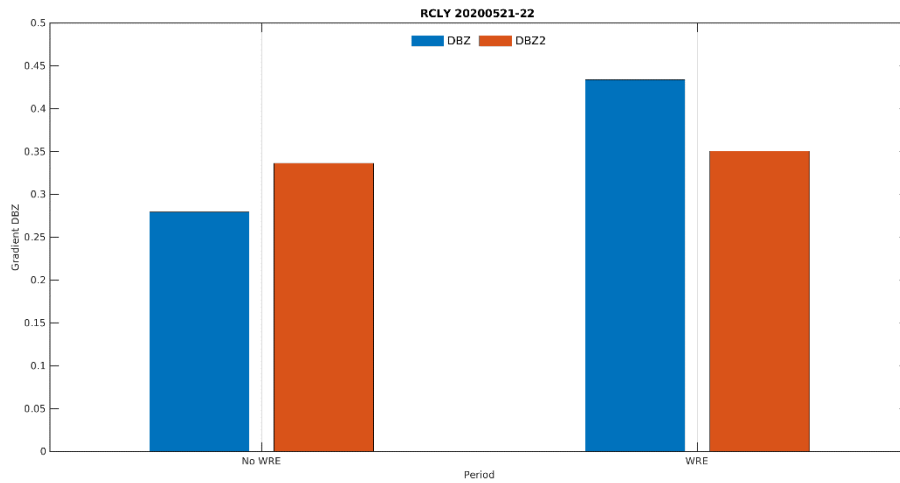


圖 8. RCLY 於 2020 年 5 月 21-22 日，在(非)濕天線罩效應影響期間，0.5 度仰角下雷達資料的平均原始觀測(藍)，經衰減校正、系統偏差校正、濕天線罩效應校正(橘)的回波平均變化率。

Correcting C-Band Dual-polarimetric Radar System Bias and Wet Radome Effect Using Differential Propagation Phase

Hsiu-Wei Hsu¹, Pin-Fang Lin², Jui Le Loh¹, Pao-Liang Chang², Wei-Yu Chang¹

¹Department of Atmospheric Sciences, National Central University

²Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan

Abstract

C-band dual-polarimetric radar from CWB can provide high spatial and temporal resolution of quantitative precipitation estimation(QPE), but the data quality is substantially affected by system bias, wet radome effect(WRE) and attenuation. Thus, this study design a series of quality control method to improve the observation data of C-band dual-polarimetric radar(RCLY) at Kaohsiung during 21-22 May 2020. The ground clutter filtered method was developed in this study. A combination of the standard deviation of correlation coefficient(ρ_{HV}), differential reflectivity(Z_{DR}) and differential phase(ϕ_{DP}) along the radial direction as threshold value is more effective. The coefficients of attenuation and system bias correction was calculated by T-matrix simulation with NCU Joss-Waldvogel disdrometer data from 2005-2015 with six different precipitation types.

The results show that the biases of the underestimated reflectivity(Z_{HH}) value is about 7dB and 2dB for WRE and system biases, respectively. After correction, the underestimated Z_{HH} which is affected by attenuation and WRE is corrected reasonably. The calibration method provide a more accurate products for further analysis, such as analyzing weather development, QPE and data assimilation.

Keyword : Attenuation Correction, Wet Radome effect