

發展 S 波段雙偏極化雷達在地化回波衰減 QPE 技術

唐玉霜¹、林品芳¹、張保亮²、盧可昕¹

¹中央氣象局氣象衛星中心、²中央氣象局氣象資訊中心

摘 要

應用回波衰減(A)估計降雨率(R)技術，可保留回波解析雨量強度的能力，並改善濕天線罩、回波衰減及部分遮蔽的問題，其中對於 S 波段雷達，計算衰減量所需之變數 α 值相當重要，可利用反射率(Z)和差異反射率(Z_{DR})間的斜率(K)，透過 $\alpha(K)$ 關係式可求得，即時反映天氣系統雨滴譜特性，進而改善定量降雨估計準確度。本研究利用 3 年(2016-2018)臺灣雨滴譜儀觀測網的資料進行統計分析，得到 R(A)、 $\alpha(K)$ 關係式，並應用臺北雨滴譜儀站資料，針對兩關係式進行最佳化測試，最後利用五分山雷達在梅雨期間之觀測資料，比較關係式間表現的差異。結果發現針對不同擬合方式的 $\alpha(K)$ 關係式，分段線性擬合結果較不穩定，而非線性擬合和混合擬合之關係式結果較佳。相較於改變 $\alpha(K)$ ，應用在地化後之 R(A)關係式，對於提升定量降雨估計準確度較有顯著助益。

關鍵字：雙偏極化雷達、雷達定量降雨估計、衰減

一、前言

雷達提供高時空解析度的資料，對於快速變化的對流尺度天氣，其移動速度和發展強度，雷達是一重要的監測工具，提供後續預報重要指引。因為雨量站建置會因成本、電力或傳輸考量，難以廣布至如山區等偏遠地區，而利用雷達估計降雨，可得到格點化的雨量資料，提供中央、地方防災單位預警參考資料，並且也可做為模式校驗之用。應用雙偏極化參數進行降雨估計，除有助於雷達資料品質，並可加入即時雨滴譜資訊，提升估計結果的準確性。

雨滴譜儀觀測雨滴個數和大小，可了解天氣系統的雨滴譜特徵，並計算得到降雨率(R)，另透過 T 矩陣(T-matrix)模擬，得到近地面雷達參數，例如：回波(Z)、差異反射率(Z_{DR})、比差異相位差(K_{DP})、衰減量(A)等。為了了解不同天氣系統、地域不同的雨滴譜特性，臺灣雨滴譜儀作業觀測網自 2015 年年底開始建置(唐，2017)，為一維雷射式雨滴譜儀(Parsivel，PARTicle Size and VELocity)，提供每 1 分鐘 1

筆的連續資料，對於瞭解臺灣地區不同降雨型態和地域特徵，提供重要參考資料。

不同雷達參數對於雨滴譜的敏感性不同，Ryzhkov et al. (2014)得到不同波段之降雨率與雷達參數的關係，並且發現對於 S 波段雷達，相較 Z 與 K_{DP} ，R 與 A 的關係較不受雨滴譜變異影響，結果最為線性；Wang et al. (2019)和 Cocks et al. (2019)將 R(A)應用於美國作業雷達網連系統，透過即時觀測的 Z 和 Z_{DR} ，反應不同時間的雨滴譜特徵，優化回波衰減估計降雨率技術。應用 A 估計降雨，除了保留回波觀測解析雨量強度的能力，並可改善濕天線罩、回波衰減及部分遮蔽的問題。但美國作業雷達網所用之關係式，均是利用美國奧克拉荷馬州的雨滴譜儀觀測統計之結果，本研究利用臺灣的雨滴譜儀作業網資料進行統計分析，得到雷達定量降雨關係式，針對北臺灣地區，第一部份先利用 2016-2018 年臺北站的資料進行理想化敏感度測試，第二部份選擇 2017 年 6 月 1 日至 6 月 4 日的梅雨個案，利用五分山雙偏極化雷達觀測進行個案分析，比較不同關係式之表

現。

二、研究方法

中央氣象局雨滴譜儀作業觀測網全臺共計 27 站(以下稱 TW)，本研究採用 2016-2018 年、1 分鐘 1 筆的一維雷射式雨滴譜儀觀測，並為了解不同地域之雨滴譜特性差異影響，分別選擇位於北臺灣和南臺灣地區的測站，根據盧等(2020)的方法處理各站雨滴譜儀資料後，進行分類統計應用。北臺灣(以下稱 NT)雨滴譜儀資料來自板橋、鞍部、臺北、竹子湖、基隆、彭佳嶼、宜蘭、蘇澳和新竹，共計 9 站。南臺灣(以下稱 ST)則來自嘉義、臺南、高雄和恆春 4 站。

利用電磁波通過降雨系統所產生的衰減進行降雨估計，稱為 $R(A)$ (Ryzhkov et al. , 2014)， $R(A)$ 可表示為：

$$R(A) = \gamma A^\Lambda \quad (2.1)$$

其中對於 S 波段而言，Wang et al (2019) 利用奧克拉荷馬州的雨滴譜儀觀測資料得到 γ 為 4120， Λ 為 1.03(以下稱 RAUS)，雷達徑向的總能量衰減量(A)則可以下式表示：

$$A(r) = \frac{[Z_a(r)^b]C(b,PIA)}{I(r_1,r_2)+C(b,PIA)I(r_1,r_2)} \quad (2.2)$$

其中，

$$I(r_1, r_2) = 0.46b \int_{r_1}^{r_2} [Z_a(s)]^b ds \quad (2.3)$$

$$I(r, r_2) = 0.46b \int_r^{r_2} [Z_a(s)]^b ds \quad (2.4)$$

$$C(b, PIA) = \exp(0.23 \times b \times PIA) - 1 \quad (2.5)$$

(2.3)及(2.4)式中， $Z_a(r)$ 為雷達觀測回波值， b 值為 0.72，根據 Bringi et al(1990)定義，經過降雨系統的衰減量(PIA)可由下式表示：

$$PIA(r_1, r_2) = \alpha[\Phi_{DP}(r_2) - \Phi_{DP}(r_1)] = \alpha\Delta\Phi_{DP} \quad (2.6)$$

α 值與雨滴粒徑分布有關，可由即時觀測

的 Z 和 Z_{DR} 的比值(K)決定(Wang et al. 2019)，以下將利用臺灣雨滴譜儀觀測資料，應用反演得到之雷達參數，分別擬合 $R(A)$ 、 $\alpha(K)$ 之關係式， $RATW$ 表示資料來自全臺 27 個測站， $RANT$ 來自北臺灣測站， $RAST$ 則來自南臺灣測站。

$$RATW: R(A) = 3211.84A^{1.01} \quad (2.7)$$

$$RANT: R(A) = 3390.49A^{1.02} \quad (2.8)$$

$$RAST: R(A) = 2967.91A^{0.98} \quad (2.9)$$

Z_{DR} 值與雨滴軸比有關，對雨滴譜變異敏感，所以可利用雷達即時觀測的 Z_{DR} 計算 α ，但 Z_{DR} 值除了在弱回波時，資料變異敏感，另有衰減、部分遮蔽、系統偏差、濕天線罩等問題，故使用回波和差異反射率得到斜率 K ，降低即時資料品質之不確定性。再透過統計得到的 $\alpha(K)$ 關係式，即可求得 α ，Wang et al (2019) 提到當 K 小於 0.045，則 $\alpha(K)=-0.75K+0.04875$ ；當 K 大於 0.045，則 $\alpha(K)=0.015$ (以下稱 LLUS)。圖 1 為利用臺灣的雨滴譜儀反演之 α - K 頻率圖。從頻率大於 0.1 的區域分布來看，因雨滴譜特性不同，相較於南臺灣的資料，北臺灣大部分其 K 值較小，且 α 值較大，顯示北臺灣的降水系統具有較大量的的小水滴，而南臺灣的降水系統具有較少量的的大雨滴。

為取得具代表性資料進行 $\alpha(K)$ 方程式的擬合，因 K_{DP} 在弱降雨時表現較差，故僅取回波大於 20dBZ、頻率大於 0.05 之資料區域得到之 α 平均(圖 2a 中三角形資料點)，然後進行非線性擬合(以下以 NN 表示)、分段線性擬合(以下以 LL 表示)以及混合擬合(以下以 NL 表示)。表 1 則為本研究所利用五分山雷達進行個案分析時，所使用的方程式組合。

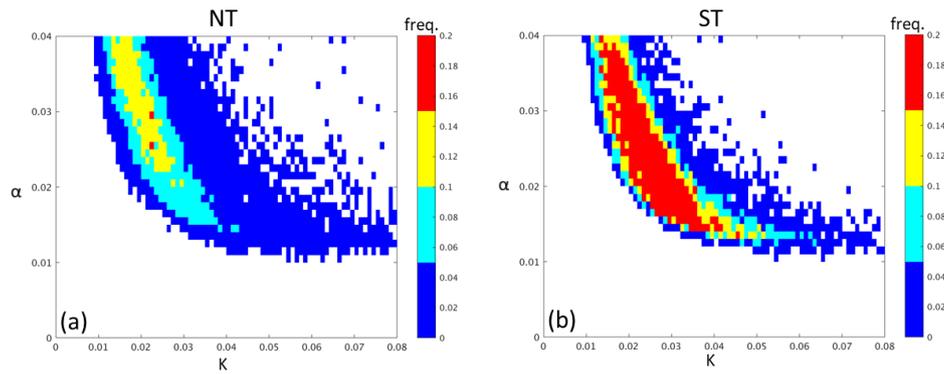


圖 1、利用 2016-2018 年雨滴譜儀反演之 α -K 頻率圖。(a)資料源來自北臺灣。(b)來自南臺灣。

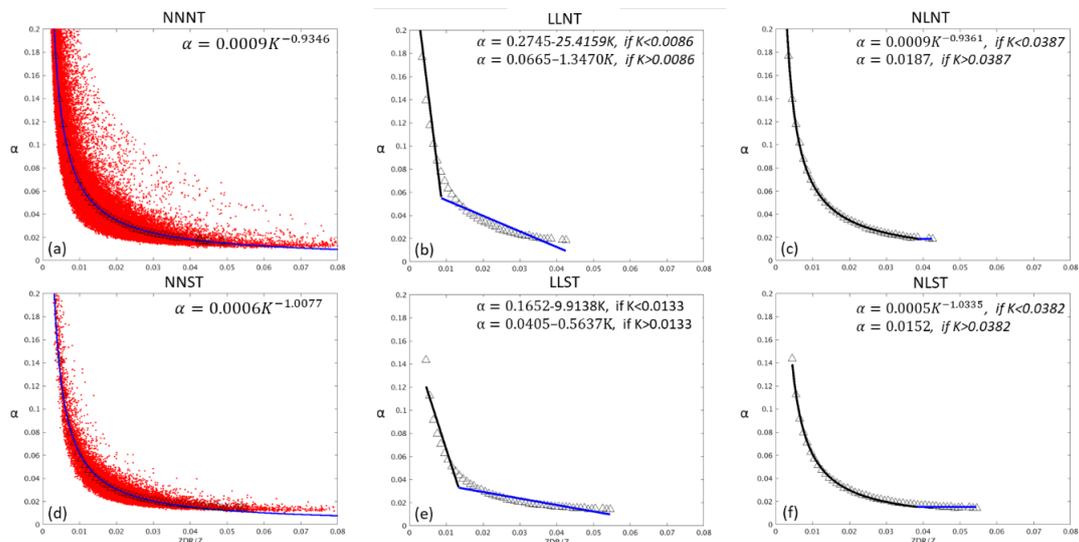


圖 2、2016-2018 年不同雨滴譜儀資料源和不同擬合方式所得之 α -K 關係式。(a)-(c)資料源為北臺灣、(d)-(e)為南臺灣。(a)(d)非線性擬合(NN)、(b)(e)分段線性擬合(LL)、(c)(f)混合擬合(NL)。圖中三角點為圖 4 中以 K 每間隔 0.001 進行分類，得到 α 平均值。

表 1、不同 R(A)、 $\alpha(K)$ 關係式組合。

	R(A)	$\alpha(K)$
US_LLUS	$R(A) = 4120A^{1.03}$	$\alpha = 0.049-0.75K, \text{ if } K < 0.045$ $\alpha = 0.015, \text{ if } K > 0.045$
US_LLNT	$R(A) = 4120A^{1.03}$	$\alpha = 0.2745-25.4159K, \text{ if } K < 0.0086$ $\alpha = 0.0665-1.3470K, \text{ if } K > 0.0086$
US_NLNT	$R(A) = 4120A^{1.03}$	$\alpha = 0.0009K^{-0.9361}, \text{ if } K < 0.0387$ $\alpha = 0.0187, \text{ if } K > 0.0387$
US_NNNT	$R(A) = 4120A^{1.03}$	$\alpha = 0.0009K^{-0.9346}$
NT_LLUS	$R(A) = 3390.49A^{1.02}$	$\alpha = 0.049-0.75K, \text{ if } K < 0.045$ $\alpha = 0.015, \text{ if } K > 0.045$
NT_NLNT	$R(A) = 3390.49A^{1.02}$	$\alpha = 0.0009K^{-0.9361}, \text{ if } K < 0.0387$ $\alpha = 0.0187, \text{ if } K > 0.0387$
NT_NNNT	$R(A) = 3390.49A^{1.02}$	$\alpha = 0.0009K^{-0.9346}$

三、應用雨滴譜儀資料測試

1. R(A)關係式敏感度測試

利用臺北雨滴譜儀站 3 年的觀測資料，透過 T-matrix 反演得到的衰減量，代入不同地域的 R(A)關係式(如(2.7)-(2.9)式所示)，將計算

得到的小時降雨率與 T-matrix 反演得到之降雨率互相校驗，得到表 2。相較 4 種關係式的校驗成績，相關係數間差異不大，均大於 0.98。比較 RAUS 與使用臺灣兩滴譜儀資料擬合之關係式，不論是 RRMSE 或 NME，RAUS 均最大、表現最差，進一步以 NME 來看，利用北臺灣關係式(RANT)結果最佳，NME 為 0.0134，顯示偏差可降至約 1%，相較於 RAUS 的偏差約為 16%，表現有顯著的提升。

表 2、利用臺北兩滴譜儀反演之衰減量代入 R(A)，得到之降雨率再與兩滴譜儀反演之降雨率相校驗。

466920	RAUS	RATW	RANT	RAST
RRMSE	0.2297	0.1261	0.1288	0.1451
NME	0.1618	0.0172	0.0134	0.1195
CC	0.9892	0.9895	0.9893	0.9898

表 3、利用臺北兩滴譜儀資料代入不同 $\alpha(K)$ ，得到 α ，經計算得到衰減量，並與原 T-matrix 得到之 A 相校驗。

	α	RRMSE	CC	NME
LLUS	0.0159	0.3690	0.9310	-0.3760
LLNT	0.0075	0.6488	0.9307	-0.7053
NLNT	0.0187	0.3542	0.9311	-0.2663
NNNT	0.0168	0.3580	0.9311	-0.3407
LLST	0.0158	0.3706	0.9310	-0.3799
NLST	0.0152	0.3813	0.9310	-0.4034
NNST	0.0140	0.4090	0.9310	-0.4504

2. α 最佳化測試

此節將臺北兩滴譜儀站資料，假定組合成一筆具有 1096 個方位角、徑向觀測距離 144 公里的雷達仰角觀測資料，以此進行測試。首先利用臺北兩滴譜儀站反演之 Z 和 Z_{DR}，計算得到斜率 K 值，再將 K 代入 $\alpha(K)$ 關係式，得到 α 值。將 α 代入(2.2)式得到模擬雷達觀測仰角上的 A，並與兩滴譜儀觀測透過 T-matrix，直接計算得到的 A 相比較。

表 3 結果顯示，北臺灣分段線性擬合之

α 值最小，為 0.0075，已低於 Wang et al. (2019) 提到的理論上 α 值下限(為 0.01)，將 α 值代入 (2.2)式得到的 A 值與 T-matrix 反演得到的 A 相比較，其 RRMSE 為 0.6488、NME 為 -0.7053，顯示結果最差。不論混合或非線性擬合法，相較南臺灣，應用北臺灣關係式其 RRMSE 較小，且 NME 顯示偏差也較小，其中不論從 RRMSE 或 NME 值來看，北臺灣混合擬合之 $\alpha(K)$ 結果均最佳。

四、應用雷達資料個案校驗

五分山雷達是氣象局所屬、目前臺灣唯一 S 波段雙偏極化雷達，本研究選用 2017 年 6 月 1 日至 6 月 4 日梅雨鋒面個案，比較不同 R(A)、 $\alpha(K)$ 關係式組合的表現。

因 R(A) 僅適用於融化層之下的區域，故首先選擇雷達波束高度 5 公里以下區域進行小時降雨量校驗(圖 3)。從散布圖來看，使用 RAUS，在大於 20mm/hr 以上的降雨，有略為高估的情形，而應用 RANT 在小於 20mm/hr 降雨，則有低估的情形。使用校驗分數進行比較，大部分方法的相關係數均為 0.88 以上，惟 US_LLNT 最低，為 0.8738。RRMSE 部分，US_LLUS 其值最大、表現最差，US_LLNT 次之。從 NME 來看，不論 $\alpha(K)$ 關係式為何，應用 RAUS，其偏差均小於 2%，但使用 RANT，偏差均大於 9%，這可能是此個案於臺北站之降雨大部分集中於中小雨(<20mm/hr)，致 RANT 常出現低估有關。

計算衰減量會需要使用到相位差觀測，而相位差的資料品質相當重要，除了需要去除本身相位差系統偏移量、背向散射效應等，當受到地形阻擋時，根據遮蔽嚴重程度不同，會需要做分段處理，特別是在複雜地形的臺灣，本研究主要討論 R(A)、 $\alpha(K)$ 方程式改變時的差異，未討論分段計算衰減量技術的影響，故以下僅選擇高度 2 公里以下之近地面資料進行定量降雨估計表現。相較使用 RANT，RAUS

有略為高估的情形。從 RRMSE 來看，使用 RAUS 之 RRMSE 均較大，其中尤以 US_LLUS 值最大，表現最差。不論使用哪一種 R(A)關係式，比較應用不同擬合方式的 $\alpha(K)$ ，線性擬合

(LL)之 RRMSE 均較大。結果較差。從 NME 來看，US_LLUS 偏差最大，為 0.1509，比較 RAUS 和 RANT，RAUS 值均較大，約有 8-10% 偏差，而使用 RANT，偏差量可降至 5% 以內。

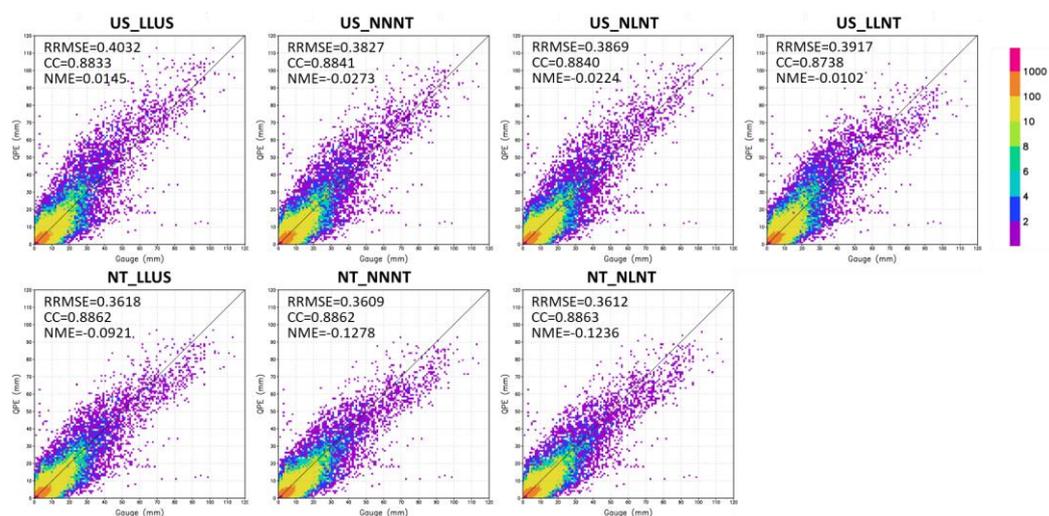


圖 3、2017 年 6 月 1 日至 6 月 4 日時，取雷達波束高度 5 公里以下區域，應用不同 R(A)、 $\alpha(K)$ 關係式組合之估計雨量與觀測雨量之散佈圖，縱軸為雷達定量降雨估計時雨量，橫軸為雨量站觀測值，色階為資料點數。

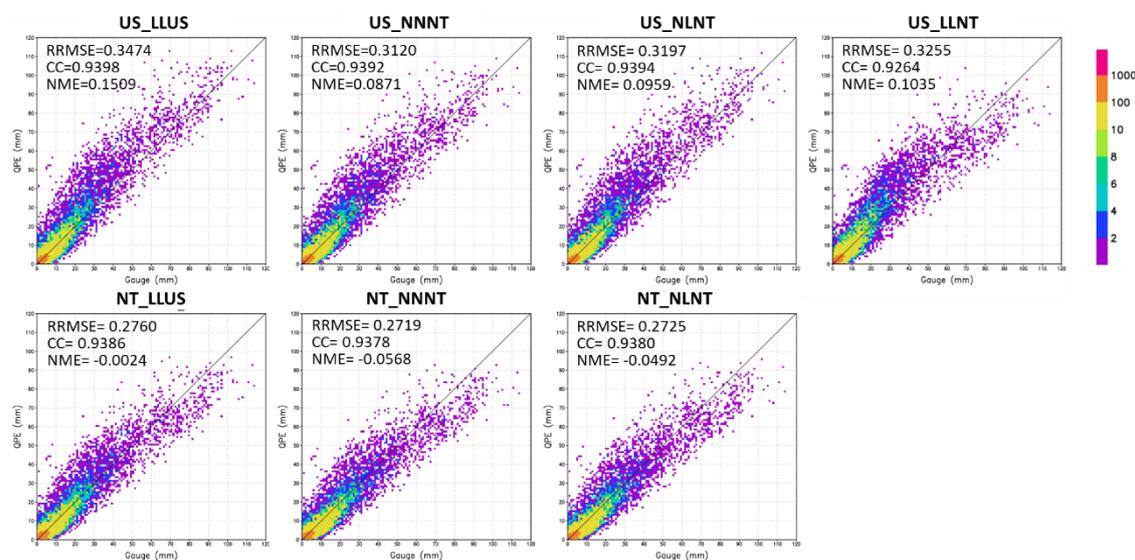


圖 4、同圖 8，但資料為雷達波束高度 2 公里以下區域。

五、 結論與未來展望

應用回波衰減量估計降雨率技術，除了保留回波解析雨量強度的能力，並改善濕天線罩、回波衰減及部分遮蔽的問題，透過即時回波及差異反射率的觀測得到斜率(K)值，經過

$\alpha(K)$ 計算，導入雨滴譜的資訊，希望可以有效利用偏極化參數觀測，優化雷達定量降雨估計品質。臺灣作業雨滴譜儀觀測網共 27 站，提供 24 小時、每 1 分鐘 1 筆的連續觀測，本研究利用 3 年(2016-2018)雨滴譜儀觀測網的資料進行統計分析，為了解區域特性差異，選擇

北臺灣 9 站及南臺灣 4 站分別得到 $R(A)$ 、 $\alpha(K)$ 關係式。

首先應用臺北雨滴譜儀站資料，進行 $R(A)$ 關係式敏感度，以及 α 最佳化測試。在 $R(A)$ 關係式部分，RAUS 之 RRMSE 和 NME 都顯示結果較差，而利用 RANT 之 NME 則可降至 1%，顯示利用雨滴譜儀在地化定量降雨關係式，可有效提升降雨估計準確度。 α 最佳化測試部分，應用北臺灣資料回歸之 $\alpha(K)$ 關係式之 RRMSE 較小，NME 顯示偏差也較小，其中以 NLNT 結果最佳，顯示在地化後之 $\alpha(K)$ 結果較佳，且混合擬合的方式較能反應雨滴譜的特性，得到較佳衰減量和降雨率。

利用五分山雷達資料，比較不同 $R(A)$ 、 $\alpha(K)$ 在 2017 年 6 月 1 日至 6 月 4 日的表現。結果發現在高度 5 公里以下區域，從 RRMSE 來看，整體應用 RANT 表現較佳，但從散布圖發現在大雨時，RANT 易有低估的情形，造成整體 NME 反而有低估的情形。在高度 2 公里以下區域，US_LLUS 結果均是最差，不論 $\alpha(K)$ 的擬合方式，應用北臺灣雨滴譜儀資料得到之 $\alpha(K)$ 關係式，從 NME 值來看，其偏差可由 US_LLUS 的高估 15% 降至 10% 以內。若僅從 RAUS 更改為 RANT，則可由 US_LLUS 的高估 15% 降至 5% 以內，顯示更改 $R(A)$ 較 $\alpha(K)$ 敏感，若使用經過在地化修正關係式，可有效的提升降雨估計的準確度。

本研究中透過雨滴譜儀的長時間資料統計回歸，進行雷達降雨估計式的在地化工作。其中僅使用 3 年的資料，來自不同季節、不同天氣系統，進行 α 最佳化測試時，係以臺北雨滴譜儀站的資料模擬即時雷達觀測的情形，理

論上單一仰角觀測上，可視為同一天氣系統，但雨滴譜儀資料為單點、長時間的觀測，故可能難以反映劇烈天氣系統的雨滴譜特性，未來需要更長時間的觀測資料，經過如季節、對流程度特性等條件分類，能進行更詳細的分析評估。

六、 參考文獻

- 唐玉霜與張保亮，2017：中央氣象局雨滴譜儀網作業現況與展望。106 年天氣分析與預報討論會，臺北。
- 盧可昕、唐玉霜、林品芳、陳姿瑾與張保亮，2020：中央氣象局雨滴譜儀觀測網資料品管與分析。大氣科學期刊，**48**，44-92。
- Bringi, V. N., V.Chandrasekar, N. Balakrishnan, and D.S. Zrnice, 1990: An Examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 829-840.
- Cocks, S., L. Tang, P. Zhang, A. Ryzhkov, B. Kaney, K. L. Elmore, Y. Wang, J. Zhang, and K. Howard, 2019: A prototype quantitative precipitation estimation algorithm for operational S-band polarimetric radar utilizing specific attenuation and specific differential phase. Part II: Performance verification and case study analysis. *J. Hydrometeor.*, **20**, 999-1014.
- Ryzhkov, A. V., M. Diederich, P. Zhang, and C. Simmer, 2014: Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **31**, 599-619.
- Wang, Y., S. Cocks, P. Zhang, A. Ryzhkov, J. Zhang, and K. Howard, 2019: A prototype quantitative precipitation estimation algorithm for operational S-band polarimetric radar utilizing specific attenuation and specific differential phase. Part I: Algorithm description. *J. Hydrometeor.*, **20**, 985-997.