

C 頻雙偏振雷達之面積雨量估計研究

鳳雷^{1,2} 周仲島¹ T. D. Keenan³

¹ 國立台灣大學大氣科學系

² 空軍航空技術學院

³ 澳洲氣象局研究中心

摘要

本文利用澳洲氣象局研究中心 (BMRC) 與美國大氣研究中心 (NCAR) 合作研發的線性雙偏振 C 頻氣象雷達 (C-Pol)，針對 1999 年夏天在澳洲達爾文地區所觀測的三個降水個案之雷達與地面雨量計資料，測試科羅拉多州立大學的面積雨量估計法 *Areal R_{CSU}(Φ_{DP})* 及美國國家劇烈風暴實驗室的面積雨量估計法 *Areal R_{NSSL}(Φ_{DP})* 兩者之準確度。分析結果顯示，上述兩種 *Areal R(Φ_{DP})* 雷達雨量估計法之準確性相當接近，與地面雨量網之三分鐘累積雨量及十分鐘累積雨量的相關性分析中，與大面積 (110 km²) 之相關係數均大於 0.95，與小面積 (25 km²) 之相關係數均大於 0.91。分析中亦表明，面積雨量估計法 *Areal R(Φ_{DP})* 在估計對流性降水時均有很好的表現。

關鍵詞：雙偏振雷達、雷達定量降水估計、面積雨量估計

一、前言

對水文學來說，如何精確的測量集水區 (面積) 內的降水量一直是個重要的問題。傳統量測降雨量的方法是使用地面雨量計，它所量的是單點雨量，而使用雷達測估降雨量 (radar estimated rainfall) 的主要目的正是為了改善大面積平均降水量的估

計。利用氣象雷達進行降水估計的最大優點，在於它能夠從單一地點測量到具有很好空間及時間解析度的大範圍即時降水資料，並且有能力解析天氣系統的三維降水回波結構。

雙偏振雷達的新觀測量差分反射率 (ZDR)、總傳播相位偏移差 (Φ_{DP} ，簡稱相差) 及導出量比相位偏移差 (KDP，簡稱比相差) 對雷達定量估計降水估計上的表現都較傳統 $R(Z)$ 估算法來的好 (Bringi et al. 1990, Sachidnanda and Zrnica 1987, Zrnica and Ryzhkov 1996, May et al. 1999, Ryzhkov et al. 2000, Bringi et al. 2001a, 鳳雷 2002)。其中 Ryzhkov et al. (2000) 及 Bringi et al. (2001a) 提出的相差式面積雨量估計法 *Areal R(Φ_{DP})*，便是為了直接估計面積平均降水強度而設計的雨量估計法，這個方法特別適合水庫集水區的降雨量估計。Zrnica and Ryzhkov (1996) 認為雷達雨量估計法中，以相差為基礎的方法相較於以能量為基礎的方法，在實用上有免於雷達系統增益變動、衰減效應及波束遮蔽等數個優點。Ryzhkov et al. (2000) 更指出 *Areal R(Φ_{DP})* 不需先求取 KDP，因此即使在雷達波束被山脈部份遮蔽的情況下仍可估計降雨量。

本文係利用澳洲氣象局的 C-pol 雷達觀測資料，並以 Bringi et al. 2001 所提出之方法訂正反射率的衰減，再對 *R_{CSU}(Φ_{DP})*,

$R_{NSSL}(\Phi_{DP})$ 二種雷達雨量估計方法評估熱帶降水估計之準確度研究。

二、資料來源

本研究係以 1999 年 1 月 15 日、3 月 1 日及 3 月 17 日三天的降水事件為分析樣本，地點為澳洲北部達爾文地區。雨量網在雷達站東南方約 40km 的地方，在 100km^2 的面積內共有 18 雨量計。雨量計為傾斗式，集水口的直徑為 203mm，雨量計在累積 0.2mm 雨量時就會記錄乙次。

雷達資料則為澳洲氣象局研究中心 (BMRC) 與美國大氣研究中心 (NCAR) 合作研發的 C 頻雙偏振氣象雷達 (C-Pol)，雷達系統特性可參考 Keenan et al. (1998)。雷達的觀測資料包含 ZH、ZDR、Vr、SW、 Φ_{DP} 及 $\rho_{hv}(0)$ ，雷達觀測的頻率為十分鐘。

圖 1 為雨量網與雷達站相關位置分佈圖。為了估計面積雨量分別定義主扇形區及子扇形區，其中主扇形區域為方位角 $140.5 \sim 153.5^\circ$ ，距離雷達 $41.0 \sim 51.5 \text{ km}$ 之內，面積約為 110 km^2 。主扇形區域再細分成五個子扇形區 (group1 ~ group 5)，每個子扇形區的夾角為 3 度，長度為 10.5 公里，面積約為 25 平方公里。每個子扇形區內含二到五個雨量計。

三、雨量計及雷達估計雨量方法

地面平均雨量的計算方式，是以主扇形區域內所有地面雨量站降雨率的平均值，時間平均則分成三種，分別是以雷達觀測時間為中心的 3、5 及 10 分鐘平均。雷達平均雨量的計算則以該扇形區域內 0.5° 仰角的雷達估計雨量平均而得。

如果以流域降水估計而言，如何求取集水區內的平均降雨強度才是其目的。然而 K_{DP} 的求取必需經過平滑的程序，這會

降低其精確度及空間解析度，為了避免平滑程序，因而發展利用 Φ_{DP} 直接求取面積平均降雨強度的方案。本文比較 NSSL (Ryzhkov et al. 2000) 及 CSU (Bringi et al. 2001b) 兩種面積雨量估計方案。

首先定義面積降雨率 AR (areal rainrate) 為降雨率對面積之積分：

$$\begin{aligned} AR &= \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} R(x, y) dx dy \\ &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{r_1}^{r_2} c[K_{DP}(\theta, r)]^b r dr d\theta \end{aligned}$$

NSSL 方案中假設同一方位的 K_{DP} 為常數，則上式可改寫成

$$AR = \int_{\theta_1}^{\theta_2} c[K_{DP}(\theta)]^b \int_{r_1}^{r_2} r dr d\theta$$

CSU 方案假設在同一方位降雨估計區間的降雨率與 K_{DP} 為線性關係 (即 $R=cK_{DP}$)。CSU 方案如下

$$\begin{aligned} AR &= \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} R(x, y) dx dy \\ &= c \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{r_1}^{r_2} K_{DP}(\theta, r) r dr d\theta \end{aligned}$$

兩個方案主要的不同，在於 NSSL 方案中雖然維持 R 與 K_{DP} 的幕次關係 ($R=cK_{DP}^b$)，但假設不同徑向距離所代表的扇形面積具有相同的權重 (因波束會隨距離增加而擴大，故雷達波束所估計雨量的扇形面積會隨距離而增加)。而 CSU 方案則將 R 與 K_{DP} 的幕次關係以線性關係 ($R=cK_{DP}$) 表示，並以區段線性法 (piecewise linear fit) 來逼近幕次關係。採用線性關係的目的，在於保持扇形面積的權重會隨面積的增加而增加。依 Bringi et al. (2001a) 對兩種方案的簡單模擬可知，兩者的誤差約可保持在 10% 以下，NSSL Areal $R(\Phi_{DP})$

法的特性為當降雨強度在估計範圍內不均勻時誤差較大，例如雨量分佈愈集中在靠近雷達一側時所產生之誤差最大。

使用 $Areal R(\Phi_{DP})$ 法除了具有相差估計法的所有優點外，額外的優點有： $Areal R(\Phi_{DP})$ 法不需為求取 K_{DP} 而做一些平滑處理；其次是針對山區的降雨估計時，即使在降雨估計的區域內有部份 Φ_{DP} 資料品質不佳時，只要被估計面積兩個端點的 Φ_{DP} 值可以獲得就可以估計降雨率。這些特性使得 $Areal R(\Phi_{DP})$ 法特別適合山區水庫集水區的面積雨量估計。

四、雨量估計結果

雨量估計實驗共分成大面積及小面積兩類：大面積為主扇形區域之面積(~110 平方公里)，小面積為子扇形區域之面積(~25 平方公里)，雷達雨量估計的方法為 $R_{CSU}(\Phi_{DP})$, $R_{NSSL}(\Phi_{DP})$ 二種方法。

圖 2 為三個降水個案在主扇形區域內雷達估計雨量與地面雨量計平均雨量之時間序列圖。圖中可見，兩種雷達雨量估計法的結果與地面平均雨量有很好的一致性。兩種雷達雨量估計法對劇烈降水之估計均能掌握的很好，但略呈低估現象。

圖 3 為綜合三個降雨個案(共有 118 筆資料)的雷達估計降雨強度與地面雨量網 5 分鐘平均降雨強度的散佈圖，雷達估計降雨強度的方法為 $R_{CSU}(\Phi_{DP})$ 法。圖中可見雷達所估計的雨量有低估的現象，但散佈情況則表現的相當好。 $R_{NSSL}(\Phi_{DP})$ 法的估計結果與 $R_{CSU}(\Phi_{DP})$ 法相當。

雷達雨量的低估情形可借由提高 $R = a K_{DP}^b$ 中的係數 a 來達成。由電磁波散射模擬可知，採用較圓一點的雨滴軸長比關係式就可提高係數 a 的值。有關熱帶地

區強降水事件中，雨滴所呈現(或雷達觀測時所感受到)的軸長比關係式仍需進一步加以研究。

由上面的分析可知，使用 C-POL 雷達之偏振參數來估計大面積(~110 平方公里)平均降雨強度具有非常好的結果，這樣的面積雨量估計相信已可以滿足水文上的應用，特別是用來估計水庫集水區的雨量。為了瞭解更小面積狀態下雷達降雨估計的好壞，我們將主扇形區域再細分成五個子扇形區，每個子扇形區的夾角為 3 度，長度為 10.5 公里，面積約為 25 平方公里。每個子扇形區內含二到五個雨量計，扇形區的位置與雨量計的關係請參考圖 1。

使用較小的子扇形面積一共有 590 筆地面及雷達資料，雷達估計降水強度及地面平均降雨強度的算法與前述之主扇形面積之估計法相同。圖 4 為 $R_{CSU}(\Phi_{DP})$ 雷達雨量估計法與地面雨量計的散佈圖。使用較小面積(子扇形區域~25km²)所估計的雷達降雨強度對雨量計平均降雨強度之散佈情形比大面積(主扇形區域~110km²，圖 3)來的大些。造成散佈情形變大的原因是較小面積內的雨量站數較少，而且對流性降雨的空間變化大，使得雨量計所做的面積平均降雨強度易受不均勻的降雨空間分佈影響，特別是靠近強降雨邊界附近。對流性降雨的空間變化大，也會使得地面雨量計所計算的面積平均降雨強度代表性降低。

$R_{CSU}(\Phi_{DP})$ 及 $R_{NSSL}(\Phi_{DP})$ 雷達雨量估計法與地面雨量網之三分鐘及十分鐘累積雨量與大面積(110km²)及小面積(25km²)之的相關性分析中，其相關係數均大於 0.91，詳細數據列於表 1。

五、結論

本文利用 C-Pol 雷達在澳洲達爾文密集的(D-scale)地面雨量觀測網來驗證科羅拉多州立大學(CSU)及美國國家劇烈風暴實驗室(NSSL)的相差面積雨量估計法 $Areal R(\Phi_{DP})$ 演算法的精確度。雨量估計的面積分成主扇形區域($\sim 110 \text{ km}^2$)及子扇形區域($\sim 25 \text{ km}^2$)兩種，與地面雨量計平均降雨強度比較的結果表明，上述兩種雨量估計法的估計結果均很好。

比較 CSU 及 NSSL 這兩種 $Areal R(\Phi_{DP})$ 雨量估計法的目的，在於瞭解演算法中面積權重之影響程度。在澳洲達爾文雨量估計實驗中，對於距雷達 40~50km 及 $\sim 110 \text{ km}^2$ 面積的雨量估計結果，兩者的差異很小。在小雨 ($< 5 \text{ mmhr}^{-1}$) 的估計中 NSSL 法普遍高於 CSU 法，但累積三個雨量估計個案中大於 5 mmhr^{-1} 的樣本，CSU 法所累計的雨量為 432.2 mm ，NSSL 法為 425.7 mm ，對水文應用上應可忽略兩者之差異。

不論是 CSU 或 NSSL 的 $Areal R(\Phi_{DP})$ 雨量估計法在達爾文的實驗中均有低估之現象。以 $R_{CSU}(K_{DP})$ 相差雨量估計法為例，它的 R- K_{DP} 指數關係式是使用地面收集的粒徑譜資料，並採用 Beard and Chuang (1987) ($D < 1$ or $D > 4 \text{ mm}$) 及 Andsager et al.(1999) ($1 \leq D \leq 4 \text{ mm}$) 的雨滴軸長比關係式(簡稱之為 BCA 雨滴軸長比關係式)，代入散射模式所模擬出的 R- K_{DP} 指數關係式，用這個經驗式所推估出的雨量有低估的傾向。這個結果顯示，C 頻雙偏振雷達在觀測熱帶強降水時所“感受”到的平均雨滴軸長比關係式應採用較 BCA 雨滴軸長比關係式更圓一點的軸長比公式。

六、致謝

首先感謝澳洲氣象局研究中心 (BMRC) 提供的 C-Pol 雷達資料及地面雨

量網資料。感謝美國科羅拉多州立大學 Bringi 教授提供雙偏振雷達資料處理程式的使用及 $areal R(\Phi_{DP})$ 降水估計方法上的討論。本研究在國科會研究計畫編號 NSC 91-2111-M-002-023-AP4 支持下完成。

七、參考文獻

- 鳳 雷，2002：熱帶降水系統之雙偏振雷達觀測研究。台灣大學大氣科學博士論文，台北，台灣。
- Andsager, K., K. V. Beard, and N. F. Laird, 1999: Laboratory measurements of axis ratios for large rain drops. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 2673–2683.
- 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.
- Bringi, V.N., G.H. Huang, V. Chandrasekar and T. Keenan 2001a: An areal rainfall estimator using differential propagation phase: Evaluation using a C-band radar and a dense gauge network in tropics. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **18**, 1810-1818.
- Bringi, V.N., T. Keenan and V. Chandrasekar 2001b: Correcting C-Band Radar Reflectivity and Differential Reflectivity Data For Rain Attenuation: A Self Consistent Method with Constraints., *Trans IEEE Geoscience and Remote Sensing*.
- Keenan T.D., K. Glasson, and F. Cumming, 1998: The BMRC/NCAR C-band polarimetric (C-Pol) radar system. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 871-886.

May, P.M., T.D. Keenan, D.S. Zrnice, L.D. Carey, and S.A. Rutlege, 1999: Polarimetric radar measurements of tropical rain at a 5-cm wavelength. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 750-765.

Ryzhkov, A., D.S. Zrnice, and F. Richard, 2000: Areal rainfall estimates using differential phase. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 363-268.

Sachidananda M., and D.S. Zrnice, 1987: Rain rate estimates from differential polarization measurements. *J. Atmos.*

Oceanic Technol., **4**, 588-600.

Zrnice D.S., and A. Ryzhkov, 1996: Advantages of rain measurements using differential phase. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **13**, 454-464.

Zrnice D.S., T.D. Keenan, L.D. Carey, and P. May, 2000: Sensitivity analysis of polarimetric variables at a 5-cm wavelength in rain. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1514-1526.

表 1 $R_{CSU}(\Phi_{DP})$ 及 $R_{NSSL}(\Phi_{DP})$ 雷達雨量估計法與地面雨量網之相關係數

	大面積 (110km ²)		小面積 (25km ²)	
	三分鐘	十分鐘	三分鐘	十分鐘
$R_{CSU}(\Phi_{DP})$	0.9557	0.9708	0.9152	0.9384
$R_{NSSL}(\Phi_{DP})$	0.9548	0.9697	0.9127	0.9344

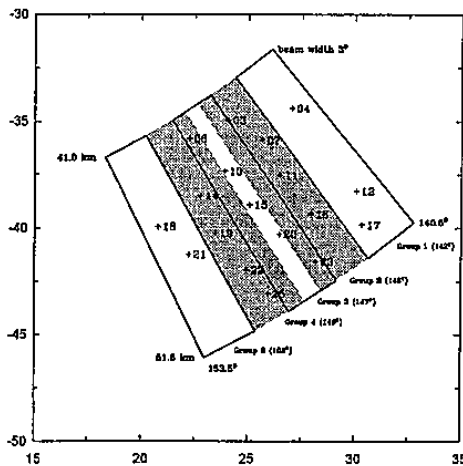


圖 1 達爾文雨量網與 C-Pol 雷達站相關位置圖，+ 表示雨量計之位置，旁邊的數字為測站編號。

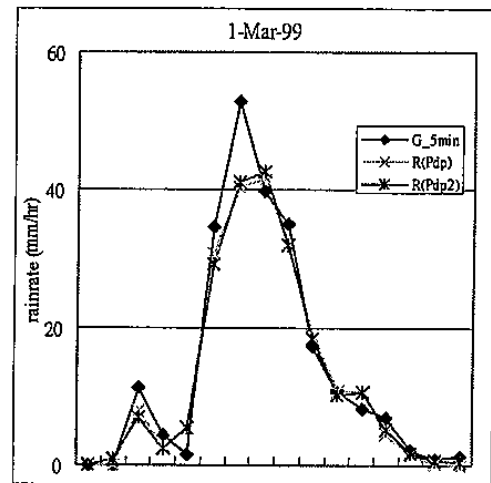


圖 2 達爾文地面雨量網 5 分鐘平均雨量及雷達雨量估計法，其中 R(Pdp) 表示 $R_{CSU}(\Phi_{DP})$ 、R(Pdp2) 表示 $R_{NSSL}(\Phi_{DP})$ ，個案時間為 (a) 1 Mar 1999，(b) 15 Jan 1999，(c) 17 Mar 1999。

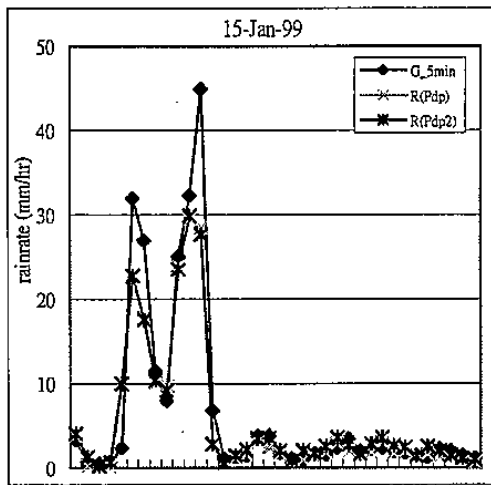


圖 2b 個案時間為 15 Jan 1999。

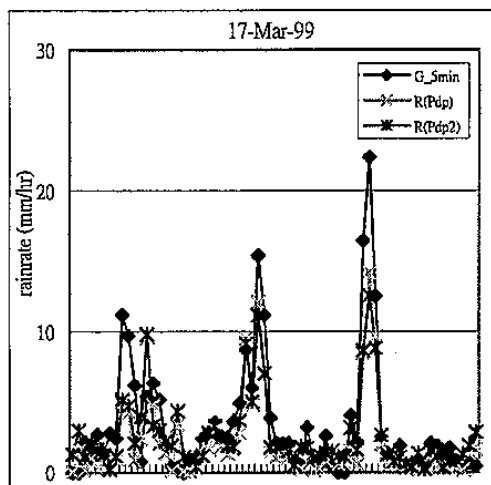


圖 2c 個案時間為 17 Mar 1999。

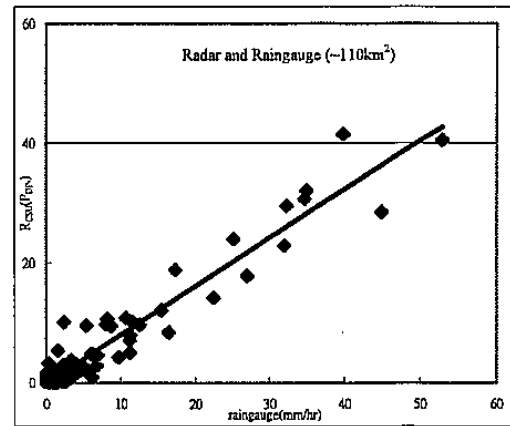


圖 3 主扇形區採用 CSU Areal $R(\Phi DP)$ 的雷達雨量估計法與地面 5 分鐘平均雨量的散佈圖。雨量資料為 1999 年 15 Jan, 1 Mar 及 17 Mar 三個案之綜合，樣本數共 118 筆，估計面積 110km²，相關係數為 0.974，斜率為 0.86。

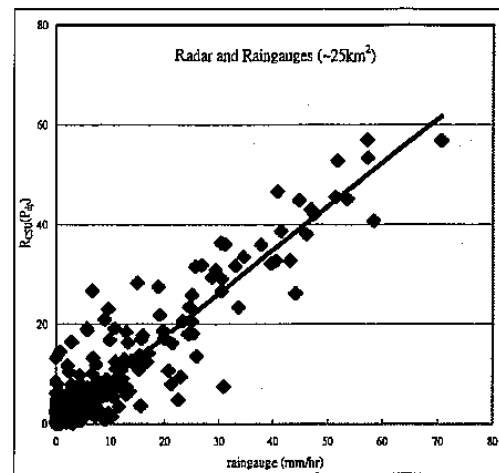


圖 4 子扇形區採用 $R_{CSU}(\Phi DP)$ 的雷達雨量估計法與地面十分鐘平均雨量的散佈圖。雨量資料為 1999 年 15 Jan, 1 Mar 及 17 Mar 三個案之綜合，樣本數共 590 筆，估計面積約 25km²，相關係數為 0.938。