

文章编号: 1000-2022(2000) 03-0428-06

双线偏振雷达测雨公式的对比分析

殷秀良, 张培昌

(南京气象学院电子信息与应用物理系, 南京 210044)

摘要:以滴谱理论为基础,用模拟雨滴谱分布的方法,讨论了雨滴谱变化以及降水强度变化对双线偏振雷达测雨式的影响,分析了双线偏振雷达测雨式优于普通雷达的原因,进而对回归所得双线偏振雷达各测雨式的测雨精度进行了对比分析,提出了双线偏振雷达各测雨式中的最佳测雨式。

关键词:双线偏振雷达,滴谱分布,降水测量误差

中图分类号: P406 **文献标识码:** A

利用雷达估测区域降水一直受到人们的重视,国内外的研究者对此作了广泛的探讨。但由于影响其估测精度的因素很多,使我们难以得到一个具有广泛代表性的 $Z-R$ 关系式。随着国内外雷达技术的迅速发展以及国民经济各部门在气象、水文、海洋等领域对探测云雾降水要求的提高,双线偏振雷达用之于测雨测雹的研究和应用才得到进一步展开和推广,从而使得采用双线偏振雷达提高测量降水精度成为可能。

一种得到广泛应用的双线偏振雷达是交替发射在空间相互正交的两种线偏振波的雷达系统^[1]。它之所以优于普通雷达就在于从双线偏振雷达回波信号中能得到除回波强度以外的更多有关散射体性质的信息,不仅能改善雷达测雨的精度和提高暴雨监测的能力,而且具有确定降雨云体滴谱变化、识别冰雹区及研究冰晶、雪花和云中融化带的应用潜力。本文从目前国外双线偏振雷达的理论与技术水平着眼,采用模拟谱分布的方法用非线性回归拟合出双线偏振雷达分别在 X、C 和 S 波段的测雨式,分析了双线偏振雷达在 X 波段的各测雨式与谱参量的关系及其与降水率的关系,对双线偏振雷达各波段的所有测雨式进行了测雨效果及精度的比较与分析,并用实测的滴谱资料对其作验证。

1 双线偏振雷达的降水估计式

双线偏振雷达测雨的基本方法有两个:一是利用水平和垂直偏振的雷达反射率因子 Z_H 和 Z_V ;二是利用其路径传播相位移差 K_{DP} 。雨滴谱的分布与雨滴形状对确定雨区电磁散射特性有着重要的作用,滴谱分布参数变化的不确定性是雷达估测降水中引起测量误差的主要原因之一。这体现在雨滴谱分布与雨滴形状对雷达反射率因子 Z_H , 雷达反射率因子差 Z_{DR} 和特征相位移差 K_{DP} 的影响^[2]。Gamma 型谱分布能较好地描述实际降水中不同降雨类型、不同降雨

地点及不同降雨时间的谱变化。Gamma 型谱分布表达式为^[3]

$$N(D_e) = N_0 D_e e^{-(3.67+) D_e / D_0} \quad (1)$$

其中, $N(D_e)$ 是单位体积单位直径间隔(D_e 到 D_{e+} D_e) 内的雨滴个数; N_0 是滴谱的浓度(个 · m^{-3}); D_0 是滴谱的中值直径(mm); D_e 是椭球粒子的等效球体积直径(mm); 是谱的形状参数。

在降水粒子的下落过程中其形状随直径的增大会逐渐变为扁椭球。扁椭球的长短轴比率(c/a) 遵循下式的规律

$$\frac{c}{a} = \begin{cases} 1.0 & 0.000 \text{ cm} < D_e < 0.028 \text{ cm}, \\ [1 - (9/32) D_e V_t^2 /]^{0.5} & 0.028 \text{ cm} < D_e < 0.100 \text{ cm}, \\ 1.03 - 0.62 D_e & 0.100 \text{ cm} < D_e < 1.000 \text{ cm}. \end{cases} \quad (2)$$

式中 是饱和空气的水汽密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); 是水的表面张力系数($10^{-7} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$); V_t 是雨滴下落末速度($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); D_e 是椭球粒子的等效直径(cm)。降雨强度 R ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 与雷达可测的量 Z_H ($\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)、 Z_V ($\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)、 Z_{DR} (dB) 和 K_{DP} ($\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$) 表示为

$$R = 0.6 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} 10^{-3} D_e^3 N(D_e) V(D_e) dD_e, \quad (3)$$

$$Z_{H,V} = \frac{4}{5} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{D_e^5}{K^2} N(D_e) dD_e, \quad (4)$$

$$Z_{DR} = 10 \lg(Z_H/Z_V), \quad (5)$$

$$K_{DP} = \frac{180}{D_{\min}} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} [f_H(D_e) - f_V(D_e)] N(D_e) dD_e. \quad (6)$$

在(6)式中

$$f_{H,V} = \frac{k^2 a b^2}{3} \left[\frac{r - 1}{1 + (r - 1) A_{H,V}} \right],$$

$$A_H = \frac{1 - e^2}{2e} \left\{ (1 - e)^{-1/2} e^{-1} \text{tg}^{-1} \left[\frac{e}{(1 - e)^{1/2}} \right]^{-1} \right\},$$

$$A_V = 1 - 2A_H.$$

上式中, $V(D_e)$ 是等效直径为 D_e 的雨滴下落末速度, R_e 表示取复数的实部, a 和 b 、 c ($b = c$) 分别表示旋转椭球粒子的半长轴和半短轴, 是雷达波长, $k = 2/\lambda$ 是电磁波的波数, K^2 是与水滴折射指数有关的值, $Z_{H,V}$ 代表水平或垂直偏振的雷达后向散射截面, $f_{H,V}$ 是在雷达发射水平或垂直偏振波时雨滴的前向散射系数, r 是水的复相对介电常数, $e = \sqrt{1 - (c/a)^2}$ 是扁椭球粒子的椭率。

基于滴谱理论, 常规雷达的一般降雨估测式可表示为如

$$R_H = a_0 Z_H^{b_0}. \quad (7)$$

同样, 双线偏振雷达基于 Z_H 、 Z_V 和 K_{DP} 的一般降雨估测式可分别表示为^[4]

$$R_{DR} = a_1 Z_H^{b_1} Z_{DR}, \quad R_{DP} = a_2 K_{DP}^{b_2}, \quad R_{DK} = a_3 K_{DP}^{b_3} Z_{DR}. \quad (8)$$

为了确定上式中的系数和指数, 用 Gamma 谱型模拟了实际降水中的谱分布, 滴谱分布的各参数(N_0 , D_0 , D_m) 随机取值的范围为: $30 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3} < N_0 < 30\,000 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$, $-1 < \ln(D_0/0.5 \text{ mm}) < 4$, $0.5 \text{ mm} < D_0 < 2.5 \text{ mm}$, $2.0 \text{ mm} < D_m < 8.0 \text{ mm}$ 。式中 D_m 是粒子等效直径的最大值。我们利用(3) ~ (6) 式计算了 Z_H 、 Z_V 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和雨强 R , 对各个波段雷达分雨强范围做了回归分析(样本数为 1 000 个), 得到了降水估算式的系数及有关指标。

为了衡量各测雨式的测雨效果, 我们用相对标准差来表示其测雨精度, 计算式为

$$ERR = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (R_i - R_e)^2 \right]^{1/2}}{R_e} \times 100 \% \quad (9)$$

式中 ERR 是相对标准差, R_i 是降水理论值, R_e 是测雨式的降水估计值, N 为样本数。

2 各降水估算式的分析及结果

2.1 各测雨公式与谱参数的关系

我们研究了取不同谱参量 D_m 、 D_0 和 μ 值时, X 波段双线偏振雷测雨公式 R_{ZH} 与 Z_H 和 R_{DP} 与 K_{DP} 的变化情况(图 1)。

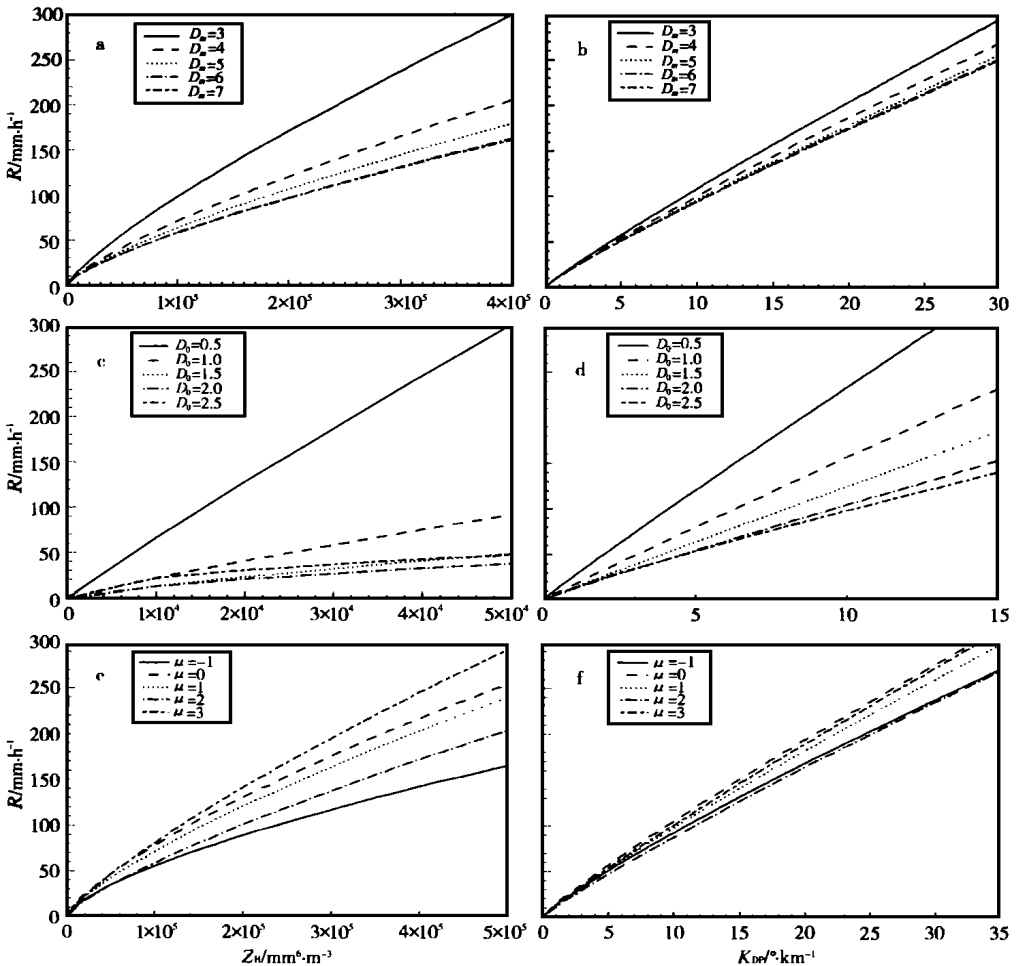


图 1 不同谱参数时降水强度 R 与 Z_H 、 K_{DP} 的变化曲线(a~f)

Fig. 1 Precipitation intensity changing with Z_H and K_{DP} in different spectrum parameters(a~f)

由图可知: (1) 对于相同的 Z_H 值, D_m 、 D_0 和 μ 值的不同均能引起 R_{ZH} 的大幅度变化(图 1a、c、e), 其相对变化最大可分别达到 100%、300% 和 100% 左右, 这说明测雨式 $R_{ZH}(Z_H)$ 对滴谱分布变化具有非常的敏感性, 同一测雨式用之于不同雨型会带来较大的误差。(2) K_{DP} 取相

同的值时, 和 D_m 变化对 R_{DP} 的影响不大, 只有 D_0 能引起 R_{DP} 的一定幅度的变化, 其相对变化最大达到 100 % (图 1b、d、f), 可见测雨式 $R_{DP}(K_{DP})$ 对雨滴谱分布变化的独立性较好, 可认为 R_{DP} 与 K_{DP} 具有较好的线性相关性。

2.2 各测雨公式与降水率的关系

为了研究双线偏振雷达测雨公式受雨强范围变化的影响, 分别对 X 波段各测雨式在不同的雨强段做了回归分析, 雨强段分成 $0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R < 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R < 120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R < 200 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 3 个范围。图 2 是雨强范围为 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R < 120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时所得测雨式用在各个降水范围的点阵分布(其他雨强段的分布未列出)。

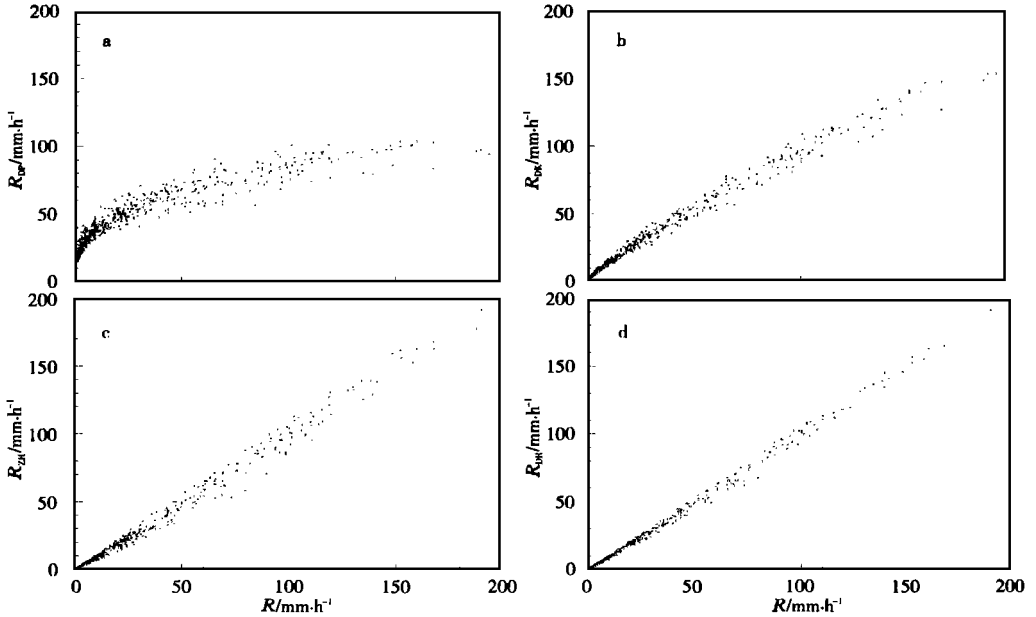


图 2 X 波段雷达降水估测值 R ($50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R < 120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 对理论值 R 的点阵分布

a. $R_{ZH}-R$; b. $R_{DP}-R$; c. $R_{DR}-R$; d. $R_{DK}-R$

Fig. 2 Scatter plot for precipitation which is observed with X-band radar and theoretically calculated

a. $R_{ZH}-R$; b. $R_{DP}-R$; c. $R_{DR}-R$; d. $R_{DK}-R$

结果表明: (1) 对于一般式 $R_{ZH}(Z_H)$, 只有用在与之相对应的降水范围时好一些, 当将其推广到其他雨强范围使用时其测雨误差不是出现高估, 就是出现低估(图 2a), 其估测效果不好, 说明测雨式 $R_{ZH}(Z_H)$ 对雨强的变化非常敏感。(2) 测雨式 $R_{DP}(K_{DP})$ 的测雨精度在各相同雨强范围内远好于 $R_{ZH}(Z_H)$, 只不过在雨强较大时略有低估(图 2b)。说明双线偏振雷达的特征相位移差 K_{DP} 与降水率有较好的线性相关性。(3) 对于一般式 $R_{DR}(Z_H, Z_{DR})$, 它在 3 个雨强段的系数和指数变化不大, 但其测雨效果都较好, 只是在雨强较大时稍有高估(图 2c)。说明该测雨公式对雨强变化的稳定性较好。(4) 测雨式 $R_{DK}(K_{DP}, Z_{DR})$ 在 3 个雨强段的系数和指数变化不大(图 2d)。说明该测雨式不受雨强的影响, 可适用于任意类型的降雨, 其测雨效果几乎臻于完善。

2.3 雷达测雨式的测雨精度比较

对于 X 段的各测雨式, 我们分雨强段计算了它们的测雨标准差(表 1)。在计算中为了使其具有可比性, 对各个波段均使用了相同的谱分布。

表 1 X 波段各测雨式的系数及统计指标

Table 1 Coefficients in rainfall estimation expressions of X-band radar with the statistical parameters

测雨式	雨强范围($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	a	b	相关系数	相对标准差(%)
$R_H = a_0 Z_H^b$	$0 < R < 50$	0.011 03	0.805	0.977	26.1
	$50 < R < 120$	3.334 7	0.286	0.585	36.8
	$120 < R < 200$	25.152	0.150	0.444	68.2
$R_{DR} = a_1 Z_H^b Z_{DR}$	$0 < R < 50$	0.002 07	-1.349	0.976	9.0
	$50 < R < 120$	0.001 93	-1.664	0.959	8.0
	$120 < R < 200$	0.001 97	-1.696	0.943	11.9
$R_{DP} = a_2 K_{DP}$	$0 < R < 50$	14.972	0.904	0.998	11.8
	$50 < R < 120$	19.889	0.753	0.903	15.6
	$120 < R < 200$	35.973	0.567	0.794	20.3
$R_{DK} = a_3 Z_H^b K_{DP} Z_{DR}$	$0 < R < 50$	15.344	-0.614	0.984	6.0
	$50 < R < 120$	14.461	-0.462	0.872	4.8
	$120 < R < 200$	14.684	-0.491	0.850	5.0

从中我们看到,对于某一种测雨式来讲,不同雨强段的测雨式其系数不同,但其精度范围已见分晓,测雨式 $R_{ZH}(Z_H)$ 的相对标准差在 26.1% ~ 68.2% 之间;测雨式 $R_{DP}(K_{DP})$ 的相对标准差在 11.8% ~ 20.3% 之间;测雨式 $R_{DR}(Z_H, Z_{DR})$ 的相对标准差在 9.0% ~ 11.9% 之间;测雨式 $R_{DK}(K_{DP}, Z_{DR})$ 的相对标准差仅在 4.8% ~ 6.0% 之间。4 种测雨公式的测雨精度总是测雨式 $R_{DK}(K_{DP}, Z_{DR})$ 优于测雨式 $R_{DR}(Z_H, Z_{DR})$, 测雨式 $R_{DR}(Z_H, Z_{DR})$ 优于测雨式 $R_{DP}(K_{DP})$, 而测雨式 $R_{DP}(K_{DP})$ 又优于测雨式 $R_{ZH}(Z_H)$ (图 3)。当然这里所做的研究抛开了实际雷达观测会遇到的影响观测量值的很多因素,只考虑了谱分布变化这一种情况。

2.4 实测滴谱资料对各测雨式的验证

为了证明上述由模拟谱拟合而得的各测雨式测雨效果分析的正确性,本文利用 1982-06-22 的一次降水过程的实测滴谱资料对其做了进一步的测雨效果验证。结果与上述分析基本一致,公式 $R_{ZH}(Z_H)$ 的测雨效果最差,其标准差为 30% ~ 80%;公式 $R_{DP}(K_{DP})$ 和 $R_{DR}(Z_H, Z_{DR})$ 表现一般,其标准差为 10% ~ 40%;公式 $R_{DK}(K_{DP}, Z_{DR})$ 效果最好,标准差均在 10% 以下(图 4)。这一例证不仅说明 Gamma 型谱分布确实能代表自然界中实际降水的大部分谱型,而且说明用模拟滴谱分布拟合而得的测雨式能被应用于雷达的实际测雨。

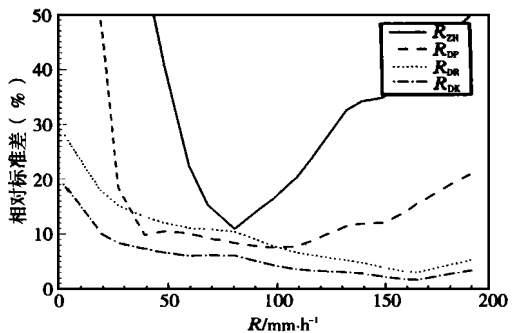


图 3 X 波段雷达各测雨式随雨强变化的相对标准差

Fig. 3 Relative standard deviation in rainfall estimation expressions of X-band radar as a function of rainfall intensity

3 结 论

(1) 雷达反射率因子 Z_H 不仅对雨强变化很敏感, 而且对降雨谱各谱参量的变化也非常敏感, 因此用该观测测量测雨时只能分雨型而确定其系数, 不能得到一个具有广泛代表性的公式。

(2) 双线偏振雷达的特征相位移差 K_{DP} 对谱的变化不敏感, 而与降水率有较好的线性相关性, 它是双线偏振雷达用于测雨的观测测量中效果最好的。

(3) 双线偏振雷达测雨式的测雨精度普遍高于普通雷达, 测雨式 $R_{DR}(Z_H, Z_{DR})$ 对谱变化和雨强变化有较好的稳定性, 测雨式 $R_{DK}(K_{DP}, Z_{DR})$ 几乎不依赖于任何谱参量, 且适用于任意的雨强范围, 其测雨精度比公式 $R_{DP}(K_{DP})$ 和 $R_{DR}(Z_H, Z_{DR})$ 要高得多, 是计算式 $R_{DP}(K_{DP})$ 和 $R_{DR}(Z_H, Z_{DR})$ 在一定程度上的改进。

当然, 在实际应用中难以得到如本文这样的高精度关系式。因为本文主要侧重于探讨谱分布变化对各测雨式测雨效果的影响, 而在实际的雷达测雨中影响测雨精度的原因除了谱变化外还有测量误差和雨区衰减等多种因素。如果对 K_{DP} 、 Z_{DR} 作适当的空间平滑和雨区衰减订正处理, 相信能够得到令人满意的精度。

参考文献

- [1] Seliga T A, Bringi V N. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation[J]. J Appl Meteor, 1976, 15(1): 69 ~ 76
- [2] Seliga T A, Bringi V N. Differential reflectivity and differential phase shift: Applications in radar meteorology[J]. Radio Sci, 1978, 13(2): 271 ~ 275
- [3] Chandrasekar V, Seliga T A. Rainfall estimation using polarimetric techniques at C-band frequencies[J]. J Appl Meteor, 1993, 32(6): 1150 ~ 1160
- [4] Ryzhkov A V, Zrnic D S. Comparison of dual-polarization radar estimators of rain[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1995, 12: 249 ~ 256
- [5] 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础[M]. 北京: 气象出版社, 1995. 137 ~ 138

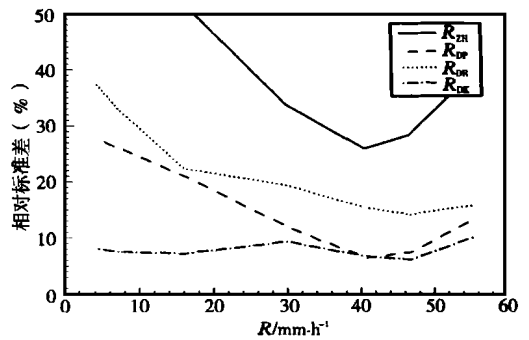


图4 X波段雷达各测雨式实测资料时随雨强变化的相对标准差

Fig. 4 Relative standard deviation in rainfall observation expressions of X-band radar as a function of rainfall intensity

Comparison of rainfall estimation using dual linear polarization meteorological radar

YIN Xiu-liang, ZHANG Pei-chang

(Department of Electronic Information and Applied Physics, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: On the basis of DSD theory, the method of simulating DSD with a Gamma distribution function is employed to investigate the effects of the variation in DSD and rain rate on rainfall estimators of dual-polarization radar to study why the rainfall estimators from dual polarization radar are better than that from a conventional radar and to compare the rainfall estimating error of estimating formulate at each radar working band(X, C and S). Then we have got the best rainfall estimator of dual polarization radar with a verification by the DSD observed data.

Key words: dual linear polarization radar, raindrop size distribution, rainfall estimating error