

# 雨区衰减及谱变化影响雷达测雨精度的数值模拟

刘黎平

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州, 730000)

**摘要** 用随机函数的方法, 并假定雨滴谱为 Gamma 分布, 模拟并讨论了雨滴谱变化及雨区衰减对普通雷达和双线偏振雷达测雨误差的影响。结果表明: 双线偏振雷达测雨精度受雨区衰减及滴谱变化的影响均小于普通雷达。雨区衰减使双线偏振雷达测雨产生小雨高估、大雨影响不大的现象, 其主要原因可能是差反射率因子  $Z_{DR}$  的测量误差。

**关键词** 双线偏振雷达, 测雨精度, 雨区衰减, 雨滴谱变化, 数值模拟

**分类号** P412.255

气象雷达作为探测云雾降水的工具, 在气象、水文、海洋等领域的应用已有很长的历史。随着计算技术的普及应用, 雷达在暴雨警戒及预报、水库的管理和城市水资源的利用上发挥着越来越大的作用, 这反过来要求雷达具有较高的探测降雨的精度。雨滴谱的时空变化和雨区衰减是影响雷达测雨精度的两大要素。为此人们利用大量的雨滴谱观测资料推导  $Z-R$  关系, 并用地面网进行订正<sup>[1,2]</sup>, 同时发展了具有多参数探测系统的双线偏振雷达, 用多参数遥测云体中滴谱的变化, 以提高探测精度。据国外报道, 双线偏振雷达测量降水的能力优于普通雷达<sup>[3~5]</sup>, 而我国 C 波段双线偏振雷达测雨工作刚刚开始, 所以在积极收集雷达资料、地面资料的同时, 从理论上研究 C 波段双线偏振雷达的测雨能力, 研究雨区衰减及滴谱变化对测量结果的影响是很有意义的。

## 1 计算模式

双线偏振雷达测量降水的反射率因子  $Z_{H,V}$  和差反射率因子  $Z_{DR}$  定义为

$$Z_{H,V} = \frac{10^3 \lambda^4}{\pi^3 |U|^2} \int_0^{\rho_{max}} \sigma_{H,V} N(D) dD$$

$$Z_{DR} = 10 \log(Z_H/Z_V)$$

雨区对水平、垂直偏振波的衰减系数为

$$K_{H,V} = 0.4343 \int_0^{\rho_{max}} Q_{H,V} N(D) dD$$

降雨强度与谱参量关系为

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\rho_{max}} D^3 V(D) N(D) dD$$

式中  $\sigma_{H,V}$ 、 $Q_{H,V}$  ( $\text{cm}^2$ ) 是雨区对水平(H)、垂直(V)偏振波产生的后向散射截面和衰减截面(由扩展边界条件法计算),它们与雨滴的形状、大小、温度有关。 $N(D)$  ( $\text{m}^{-3} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) 是雨滴的谱分布、 $V(D)$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 为雨滴下降速度<sup>[6]</sup>;  $D$  (cm) 表示雨滴的等效直径;  $D_{\max}$  (cm) 为最大雨滴等效直径;  $K_{H,V}$  ( $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ ) 是雨区对水平和垂直偏振波的衰减系数;  $R$  ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 是降雨强度;  $U = |\epsilon - 1| / |\epsilon + 2|$ ,  $\epsilon$  是雨滴的介电常数。

大量的滴谱资料证明,用 Gamma 分布可以很好地代表不同降雨类型、降雨地点和时间的谱变化,它可表示为  $N(D) = N_0 \cdot D^\mu \exp(-\Lambda D)$ 。

这样,就可以将  $R$  和  $K_{H,V}$  表示为  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  的函数关系。由多项式拟合得出

$$R = Z_H \cdot f(Z_{DR}) \quad (1)$$

$$R = F(Z_H) \quad (2)$$

$$K_{H,V} = Z_H \cdot \varphi_{H,V}(Z_{DR}) \quad (3)$$

(1)、(2)式分别是双线偏振雷达和普通雷达的测雨公式。其中函数  $f$ 、 $\varphi_{H,V}$  随  $\mu$ 、 $\Lambda$ 、 $D_{\max}$  和温度而变,而  $F$  函数除与上述因素有关外,还与  $N_0$  有关。

根据多年雨滴谱观测资料,假定滴谱参量在  $300 < N_0 < 300\,000$ 、 $4.5 < \Lambda < 10$ 、 $3.0 < D_{\max} < 6.0$ 、 $-2 < \mu < +2$  的范围内变化,则雨滴谱可随机取值,并以  $D_{\max} = 5.0\text{mm}$ 、 $\mu = 0$  时测雨公式为标准,研究雨滴谱变化引起的雷达测雨误差。

为了研究雨区衰减对降雨测量的影响,设雨区在  $5 \sim 60\text{km}$  随机取值。在这一路径内,各距离库的雨滴谱参数也在上述范围内随机变化。这样,就可利用(3)式计算并累加各库的衰减系数,从而得到因雨区衰减造成的  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$  的变化  $\Delta Z_H$ 、 $\Delta Z_{DR}$ 。

$$\Delta Z_H = 2 \sum_{i=1}^M Z_{H_i} \varphi_{H_i}(Z_{DR_i}) \Delta l$$

$$\Delta Z_{DR} = 2 \sum_{i=1}^M Z_{H_i} (\varphi_{H_i}(Z_{DR_i}) - \varphi_{V_i}(Z_{DR_i})) \Delta l$$

因雨区衰减造成的测雨误差为

$$\Delta R = (Z_H - \Delta Z_H) \cdot f(Z_{DR} - \Delta Z_{DR}) - Z_H \cdot f(Z_{DR})$$

$Z_H$ 、 $Z_{DR}$  为各距离库的反射率因子和差反射率因子,  $\varphi_{H,V}$  为相应的归一化雨区衰减系数,  $\Delta l = 1\text{km}$  为库长,  $M$  为距离库个数。

## 2 计算结果的分析

图 1、2 为不同  $\mu$  和  $D_{\max}$  时, C 波段双线偏振雷达  $R/Z_H$  与  $Z_{DR}$  的关系曲线,从图中可以看出,  $\mu$  引起的  $R/Z_H$  变化主要发生在  $Z_{DR}$  较小时,相对变化在 10% 以内,在  $Z_{DR}$  较大时,  $R/Z_H$  对  $\mu$  不大敏感;  $D_{\max}$  引起的  $R/Z_H$  值的变化在  $Z_{DR}$  较大时最明显,最大变化为 40%。由此可见,  $D_{\max}$  和  $\mu$  的变化均可引起测雨公式的改变,而后者的作用更明显。

在给定的滴谱变化范围内,对雨滴谱随机取值 3 000 次,对于每一组雨滴谱,计算出实际降雨强度  $R_i$  和  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ , 并利用  $Z_H$  和  $Z_{DR}$ , 根据  $\mu = 0$ 、 $D_{\max} = 0.5\text{cm}$  时的公式(5)计算出降雨量值  $\bar{R}_{Z_{DR}}$ 、 $R_i$  和  $R_{Z_{DR}}$  的点阵分布(图 3)。

定义测雨平均和相对误差  $B$ 、标准差  $N$  分别为

$$B = \frac{\bar{R}_{Z_{DR}} - \bar{R}_i}{\bar{R}_i} \times 100\%$$

$$N_{\text{sed}} = \frac{1}{\bar{R}_i} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{Z_{DR}} - R_i - B \cdot (\bar{R}_{Z_{DR}} - R_i))^2 \right]^{1/2}$$

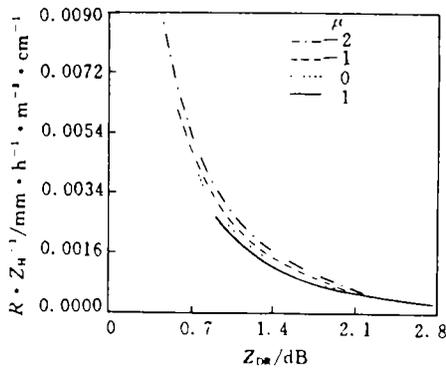


图 1 不同  $\mu$  时  $R/Z_H$  随  $Z_{DR}$  的变化曲线

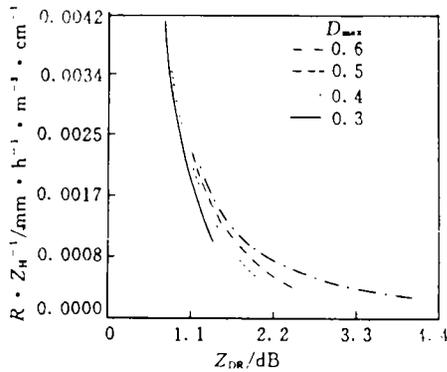


图 2 不同  $D_{max}$  时  $R/Z_H$  随  $Z_{DR}$  的变化曲线

对于双线偏振雷达来讲,测雨相对误差为正,即测量值大于实际值。雨强越大,相对误差也越大,当  $R_s=10\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时,  $B=1.0\%$ , 而  $R_s=50\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时,  $B=10\%$ 。标准差基本不随  $R_s$  变化,均为 11% 左右。由雨滴谱引起的测雨相对误差和标准差都比较小,说明  $Z_{DR}$  能较好地反映雨滴谱的变化。从模拟结果看,双线偏振雷达测雨效果很好。

对于普通雷达,雨区衰减使降雨强度低估。而对于双线偏振雷达,雨区衰减引起的测雨误差取决于  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$  的变化哪个起主导作用,因雨区衰减使  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$  变小,但降雨测量值与  $Z_H$  成正比,又随  $Z_{DR}$  减小而急剧增大,为此作了以下几种讨论

- (1) 雨区  $Z_{DR}$  均匀(即  $Z_{DR}$  值基本不变),则雨区衰减使降雨测值变大,但误差不大。
- (2) 雨区  $Z_{DR}$  较小时,  $Z_H$  的衰减起主要作用,而  $Z_{DR}$  变化较小,这时雨区衰减使测雨值偏小。
- (3) 当雨区  $Z_{DR}$  值较大时,雨区衰减产生较大的  $Z_{DR}$  误差,雨区衰减反而使测雨值增大。

可见,与普通雷达不同,雨区衰减使双线偏振雷达测雨值有时偏小,有时偏大。

现同时考虑雨滴谱和雨区的变化,模拟实际雨区的衰减特征,给出不考虑衰减时的测雨值  $R_{M1}$  和考虑衰减后测雨值  $R_{M2}$  的点阵(见图 4)。雨区衰减使  $R_{M2}$  变散且有变大的趋势。对于双线偏振雷达来讲,测雨相对误差为正,且随  $R_{M1}$  的增大而变小。对于普通雷达,雷达衰减产生 30% 的测雨误差,标准差为 20% 左右。

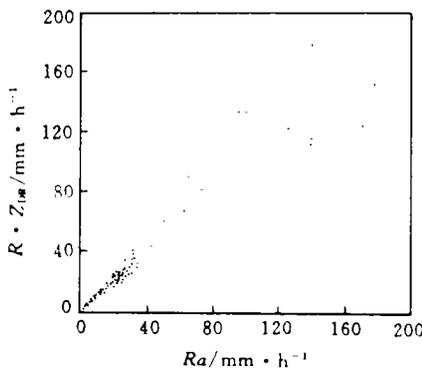


图 3 实际降雨强度  $R_s$  和双曲线偏振雷达测量值  $R_{ZDR}$  的模拟结果分析

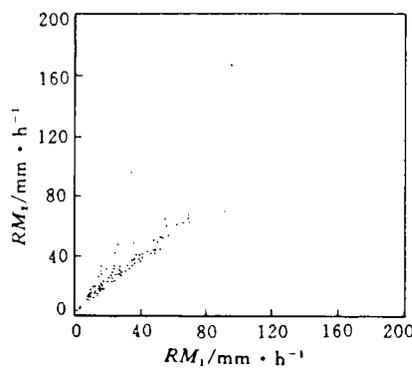


图 4 不考虑雨区衰减时双线偏振雷达测雨值  $R_{M1}$  和考虑雨区衰减的测雨值  $R_{M2}$  的模拟结果分析

### 3 结 语

用随机函数方法对雨滴谱变化和雨区衰减的模拟发现,双线偏振雷达的测雨精度高于普通雷达。雨区衰减使降雨测量值偏大,小雨时尤为明显。从相对误差和标准差来说,双线偏振雷达抗衰减性能高于普通雷达,即雨区衰减对双线偏振雷达的影响远小于普通雷达。

### 参 考 文 献

- 1 Ulbrich C W. The effects of drop size distribution truncation on rainfall integral parameters and empirical relations. *J Climate Appl Meteor.* 1985, 24, 580~520
- 2 Joss J, Gori E G. Shapes of raindrop size distribution. *J Appl Meteor.* 1978, 17, 1054~1061
- 3 Direskereli H, Aydin K, Selign T A. Radar estimation of rainfall rate using reflectivity factor and differential reflectivity measurements obtained during MAYPOLE'84, Comparison with ground-based raingages. Preprints of 23rd Conference on Radar Meteor. Snowmass, Colorado, American Meteorological Society, 1986. 116~120
- 4 Seliga T A, Bringi V N, Al-khaaib H H. A preliminary study of comparative measurements of rainfall rate using the differential reflectivity radar technique and a raingage network. *J Appl Meteor.* 1981, 20, 1362~1308
- 5 Sachidananda M, Zrnic D S. A comparison of rainrate estimates from differential propagation phase shift, differential reflectivity and Z-R relationships. Preprints of 23rd conference on radar met Snowmass, Colorado, American Meteorological Society, 1986. 129~132
- 6 Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R C. Doppler radar characteristics of precipitations at vertical incidence. *Rev Geophys. spacephys.* 1973, 2, 1~35

## NUMERICAL SIMULATION OF EFFECTS OF RAINFALL ATTENUATION AND VARIATION IN RAINDROP SIZE DISTRIBUTION ON ACCURACY OF RAINFALL MEASURED USING A BI-LINE POLARIZATION RADAR

Liu Liping

(Institute of plateau Atmospheric Physics, Academia Sinica, 730000, Lanzhou, PRC)

**Abstract** Under the assumption that the raindrop size has a Gamma distribution, random function is employed to model and investigate the effects of the variation in the size distribution and rainfall attenuation on the precipitation error measured by a common radar and bi-line polarization radar. Results show that the effects of the latter are smaller as opposed to the former, and the rainfall attenuation causes the polarization measurement to be overestimated for light rain and to show no big influence for heavy rainfall.

**Keywords** bi-line polarization radar, random function, raindrop size distribution, numerical simulation