

## 双线偏振雷达测雨效果的对比分析\*

刘黎平 钱永甫

王致君 楚荣忠

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

**摘 要** 本文根据1993、1994年15次层状云和12次对流云降雨过程的地面降雨资料和C波段双线偏振雷达资料,对双线偏振雷达和普通雷达测量不同强度降雨的效果进行了评估和比较。结果表明,从相对误差来看,双线偏振雷达使普通雷达的小雨高估、大雨低估的测量误差趋势减弱,它对小到中雨的测量结果优于普通雷达。双线偏振雷达大雨高估的现象可能与强对流性降雨中冰相粒子的存在有关。

**关键词** 双线偏振雷达 遥测降雨 测雨精度

### 1 引言

雷达是研究云及降水物理的重要手段,雷达气象的重要课题之一就是理论上寻求新的遥测云和降水的原理和方法,并在外场实验中加以验证,以获取关于云、雨和大气的独立的新信息。双线偏振雷达能获取比普通雷达更多的关于云和降雨的信息,外场实验观测结果表明:双线偏振雷达可为识别冰雹区、研究冰晶、雪花和云中融化带提供直接证据<sup>[1,2]</sup>,并能推测降雨的滴谱尺度的变化,这对于改善雷达测量降雨的精度和提高暴雨监测能力是很有帮助的。

本文研究了双线偏振雷达定量测量降雨的方法和精度,与普通雷达的测雨结果进行比较,并讨论冰相粒子(如软雹)的存在对双线偏振雷达测雨结果的影响。

### 2 双线偏振雷达测雨方法及外场实验简介

双线偏振雷达可以交替发射和接收水平和垂直偏振雷达波,从而可遥测到云中反射体内降水的反射率因子 $Z_H$ 和差反射率因子 $Z_{DR}$ , $Z_{DR}$ 只与降雨的滴谱分布有关,而与粒子密度无关,它反映了雨滴大小的变化<sup>[3]</sup>。

本文采用的普通雷达和双线偏振雷达定量测量降雨量的公式分别为

$$R_{Z_H} = a_1 Z_H^{b_1}, \quad (1)$$

$$R_{Z_{DR}} = a_2 Z_H (Z_{DR} + b_2)^{c_2}. \quad (2)$$

对于层状云降雨(1)、(2)式中的系数分别为 $a_1 = 0.0230$ ,  $b_1 = 0.691$ ,  $a_2 = 0.007301$ ,  $b_2 = 0.5430$ ,  $c_2 = -2.321$ ;对于对流性降雨(1)、(2)式中的系数分别为

1995-05-29收到,1995-09-25收到修改稿

\* 本文得到“八五”攻关项目85-906-01-03的支持

$a_1 = 0.0239$ ,  $b_1 = 0.682$ ,  $a_2 = 0.005821$ ,  $b_2 = 0.4423$ ,  $c_2 = -2.117$ 。

C 波段双线偏振雷达设于海拔 1658 m 高的甘肃省平凉市北源, 在测量降雨时, 我们采用相对雷达 1 km 高,  $2 \times 2 \text{ km}^2$  网格的 CAPPI 资料, 利用 17 个雨量计上方的  $Z_H$ ,  $Z_{DR}$  值, 根据 (1)、(2) 式分别计算对应的雷达测量值  $R_{Z_H}$ ,  $R_{Z_{DR}}$  (以后简称传统方法和  $Z_{DR}$  方法)。在 1993~1994 年实验期内, 我们共收集到较理想的 15 次层状云和 12 次对流性降雨过程的雷达资料和对应的地面雨量网资料。为了衡量这两种方法的测量效果, 我们以相对误差、绝对值相对误差和标准差来表示这两种方法的测雨精度, 它们的定义分别为

$$E_r = \frac{\sum_{i=1}^N R_{Z_H, Z_{DR}i} - R_{Gi}}{\sum_{i=1}^N R_{Gi}} 100\%, \quad (3)$$

$$E_a = \frac{\sum_{i=1}^N |R_{Z_H, Z_{DR}i} - R_{Gi}|}{\sum_{i=1}^N R_{Gi}} 100\%, \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{\left( \sum_{i=1}^N (R_{Z_H, Z_{DR}i} - R_{Gi})^2 \right)^{0.5}}{\sum_{i=1}^N R_{Gi}} 100\%, \quad (5)$$

其中  $R_{Z_H}$ 、 $R_{Z_{DR}i}$  分别为传统方法和  $Z_{DR}$  方法的降雨测量值,  $R_{Gi}$  为对应的地面降雨值,  $N$  为总的样本数。

### 3 传统方法和 $Z_{DR}$ 方法测雨结果及比较

为了分析在不同降雨强度情况下, 这两种测雨方法的精度, 我们以  $R_G$  为标准, 间隔为 1.0 mm/h, 分别统计得到了层状云和对流性降雨的  $E_r$ 、 $E_a$ ,  $\sigma$  随地面降雨强度  $R_G$  的变化曲线 (如图 1、2、3 所示), 大于 6.5 mm/h 的层状云降雨和小于 1.5 mm/h 的对流性降雨因个例较少未统计入内。在图 1 中, 传统方法的测雨相对误差在小雨时为正, 大雨为负, 这就是普通雷达测雨的小雨高估、大雨低估的现象, 这一方法对  $R_G = 2.0 \text{ mm/h}$  的层状云和对流性降雨平均高估 29%, 而对 9.0 mm/h 的对流性降雨平均低估 18%。与传统方法相比,  $Z_{DR}$  方法使小雨高估、大雨低估的误差趋势大为减小, 它对  $R_G = 2.0 \text{ mm/h}$  的降雨平均高估 8%, 对 9.0 mm/h 降雨平均高估 10%, 测雨效果优于传统方法。

在地面降雨较大时 ( $R_G > 7.0 \text{ mm/h}$ ),  $R_{Z_{DR}}$  值比  $R_G$  要大。为了研究  $Z_{DR}$  方法大雨高估的原因, 我们研究了  $R_H$ 、 $Z_{DR}$  的平均值与  $R_G$  的关系曲线 (如图 4 所示)。  $Z_H$  随  $R_G$  的增大而增大,  $Z_{DR}$  在  $R_G$  较小时 ( $R_G < 6.0 \text{ mm/h}$ ) 也随  $R_G$  的增大而增大, 但当  $R_G > 6.0 \text{ mm/h}$  时,  $Z_{DR}$  基本不变甚至有减小的趋势。强降雨大部分是对流性降雨, 通过研究对流云 1 km 高度 CAPPI 的  $R_H$ 、 $Z_{DR}$  分布规律, 我们发现, 在  $R_H > 35 \text{ dBz}$  或  $R_G > 7.0 \text{ mm/h}$  时, 部分回波的  $Z_{DR}$  随  $Z_H$  增大反而减小。据此我们推测在 1

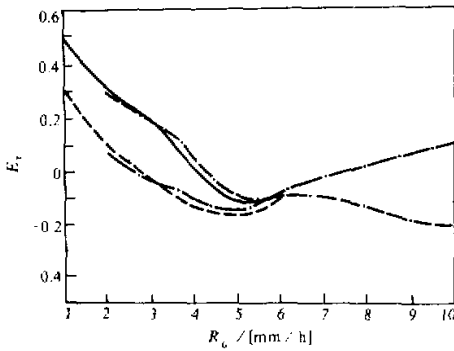


图1 不同降雨强度的相对误差

图1、2、3图例：  
 ———  $Z_H$  } 层状云；  
 - - -  $Z_{DR}$

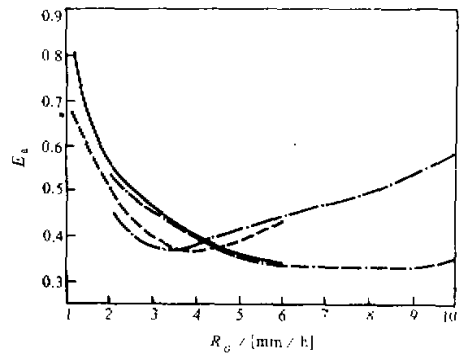


图2 不同降雨强度的绝对值相对误差

- - -  $Z_H$  } 对流云；  
 - · -  $Z_{DR}$

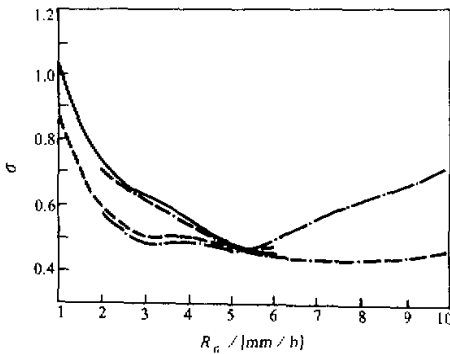


图3 不同降雨强度的标准差

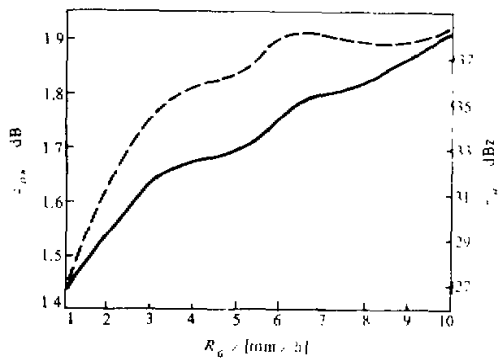


图4 不同降雨强度的 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$   
 —  $Z_H$ ， - -  $Z_{DR}$

km 高的强降雨回波区中，不同程度上存在有冰相粒子（如软雹或小冰雹），而这些冰相粒子的 $Z_{DR}$ 接近于零或为负，由于冰相粒子的存在，使降雨的双线偏振雷达测量值增大，在下面还要讨论这一问题。

从上面的分析结果来看，以相对误差来衡量， $Z_{DR}$ 方法测雨效果要优于传统方法，它使传统方法的小雨高估、大雨低估的趋势变小。

下面我们从 $E_a$ 和标准差 $\sigma$ 出发来分析这两种测雨方法的效果（图2、3）， $Z_{DR}$ 方法在小到中雨时（ $R_G < 5.0 \text{ mm/h}$ ），绝对值相对误差和标准差分别比传统方法小，对于 $R_G = 3.0 \text{ mm/h}$ 的对流性降雨， $Z_{DR}$ 方法的绝对值相对误差和标准差分别比传统方法小8%和15%，效果优于传统方法；但当 $R_G > 4.5 \text{ mm/h}$ 时，平均来讲绝对值相对误差和标准差分别比传统方法大，对于 $R_G = 8.0 \text{ mm/h}$ 的对流性降雨， $Z_{DR}$ 方法的绝对值相对误差和标准差分别比传统方法大16%和17%，效果反而不如传统方法。对于

层状云降雨也有类似的结果。我们认为,一方面,在强降雨区中,粒子之间的相对运动较快, $Z_{DR}$ 的取样误差大于小雨区的取样误差,这样就造成了 $Z_{DR}$ 测雨方法雨量测量值有大的上下波动;另一方面,由于冰相粒子的不同程度的存在,使 $Z_{DR}$ 值偏离雨区的正常值,从而造成 $E_a$ 和 $\sigma$ 值在强降雨时较大,影响了 $Z_{DR}$ 测雨方法的测量效果。

以 $E_a$ 和 $\sigma$ 这两个参量来衡量, $Z_{DR}$ 方法测量小到中雨的效果要优于传统方法,冰相粒子的存在可能影响了 $Z_{DR}$ 方法测量大雨的效果。这一问题需要在今后工作中进一步研究。

#### 4 $Z_{DR}$ 的取样误差和软雹的存在对雷达测雨的影响

现在我们来讨论冰相粒子的存在造成的降雨的测量误差,实际上,冰相粒子的形状各异,散射特性很复杂,且滴谱分布也是多种多样的。为了简单起见,我们做如下假定:

(1) 在 1 km 高度处,冰雹粒子充分融化,其散射特性与同体积的液态粒子相同,它对应的 $Z_{DR}$ 值为零。

(2) 冰雹的滴谱遵从指数分布,中值直径为 0.40 cm,且下落到地面前完全融化,产生的雨滴的体积和 1 km 高度时冰相粒子的体积相同。

这样,总降雨强度 $R$ 、反射率因子 $R_H$ 可分为两部分,一是有液态粒子所产生(用下标 $w$ 表示),另一部分为冰相粒子产生(用下标 $i$ 表示),而 $Z_{DR}$ 与液态粒子的 $Z_{DRw}$ 相同,即

$$R = R_w + R_i, \quad (6)$$

$$Z_H = Z_{Hw} + Z_{Hi}, \quad (7)$$

$$Z_{DR} = Z_{DRw}, \quad (8)$$

而 $R_i$ 与 $Z_{Hi}$ 的关系可用下式表示<sup>[4]</sup>:

$$R_i = \frac{a_2}{(b_2 + 5.5)^{-c_2}} Z_{Hi}. \quad (9)$$

$R_w$ 和 $Z_{Hw}$ 、 $Z_{DRw}$ 满足公式(2),而混合性降水强度的测量值 $R_M$ 可将 $R_i$ 、 $Z_{DR}$ 值代入(2)式得到,这样,因冰相粒子的存在而引起的降雨强度的测量误差为

$$B = \frac{R_M - R}{R}. \quad (10)$$

令 $Z_{DR} = 2.0$  dB,  $Z_{Hw} = 20.0$  dBz,  $Z_{Hi} = 15.0$  dBz,根据以上假设可得到此时的误差为 26%,即高估 26%,因冰相粒子的存在而引起的降雨强度的测量误差是不可忽视的。

另外, $Z_{Hi}$ 所占比例越大,冰雹谱的中值直径越大,即冰雹越大,测量误差也越大;而 $Z_{DRw}$ 越大,测量误差越小。由此可见,冰相粒子的存在,使 $Z_{DR}$ 方法的降雨估测值变大。

## 5 讨论与小结

(1) 双线偏振雷达在一定范围内可以改善小到中雨的测量效果, 它使传统雷达测雨的小雨高估, 大雨低估的趋势减弱。

(2) 双线偏振雷达对大雨测量不太理想, 可能与强对流性降雨区中冰相粒子的存在有关。

**致谢:** 本文是作者之一刘黎平在南京大学攻读中国科学院兰州大气物理研究所的定向在职博上期间完成的, 利用了该所双线偏振雷达资料, 并得到该所二室雷达组同志们的帮助; 贾伟、李小平同志为本文绘制了图表, 并做了部分资料处理工作, 在此一并表示衷心的感谢!

### 参 考 文 献

- 1 Bringi, V. N., Rasmussen, R. M. and Vivekanandan, J., 1986. Multiparameters radar measurements in Colorado convective storms. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2547~2577.
- 2 Hall, M. P. M., Goddard, J. W. F. and Cherry, S. M., 1984. Identification of hydrometers and other targets by dual linear polarization radar. *Radio Science*, **19**, 132~140.
- 3 Seliga, T. A. and Bringi, V. N., 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurement at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *J. Appl. Meteor.*, **15**, 69~76.
- 4 蔡启铭、徐宝祥、刘黎平, 1990. 降雨强度雨区衰减与双线偏振雷达观测量关系的研究. *高原气象*, **9** (5), 347~355.

## Comparitive Study on Dual Linear Polarization Radar Measuring Rainfall Rate

Liu Liping, Qian Yongfu

(Department of Atmospheric Physics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Wang Zhijun and Chu Rongzhong

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract** The database is the C-band dual linear polarization radar data and ground raingage network data for 15 stratus and 12 convective rain processes during summers of 1993 and 1994. In this paper, we estimate systematically the measurement accuracy of rainfall rate by the dual linear polarization radar and conventional radar. The result indicates that the underestimation of the rainfall rate during heavy rain and the overestimation during light rain become small by  $Z_{DR}$  method.  $Z_{DR}$  method can improve the measurement of light and moderate rainfall rate. The overestimation of the rainfall rate during heavy rain by  $Z_{DR}$  technique is possibly related with the existence of ice phase hydrometeors.

**Key word** dual linear polarization radar remote sensing of rain measurement accuracy