

# 利用雨滴尺寸分布数据确定雷达测雨参数

赵振维<sup>1,2</sup>, 吴振森<sup>2</sup>, 沈广德<sup>1</sup>

(1. 中国电波传播研究所青岛分所, 青岛 266071; 2. 西安电子科技大学, 西安 710071)

**摘 要:** 本文根据我国青岛、广州和新乡地区实测雨滴尺寸分布数据, 计算了球形雨滴雷达反射因子  $Z$ , 椭球形雨滴雷达反射因子  $Z_H$  和差分反射率  $Z_{DR}$ , 回归给出了这些地区的常规气象雷达测雨算式  $Z \sim R$  关系和多参数雷达测雨算式  $Z_H, Z_{DR} \sim R$  关系, 并对其测雨精度和地区差异进行了比较。

**关键词:** 常规气象雷达; 多参数雷达; 雨滴尺寸分布; 雷达测雨

**中图分类号:** TN959.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0109-03

## Determination of Radar Parameters for Measuring Rainfall Based on Raindrop Size Distribution Data

ZHAO Zhen-wei<sup>1,2</sup>, WU Zhen-sen<sup>2</sup>, SHEN Guang-de<sup>1</sup>

(1. Qingdao Branch of China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266071, China;

2. Physics Department of Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on raindrop size distribution (DSD) data measured in Qingdao, Guangzhou and Xinxiang, the radar reflectivity factor  $Z$  for spherical raindrops, the radar reflectivity factor  $Z_H$  and differential reflectivity  $Z_{DR}$  for oblate ellipsoid raindrops are calculated. The reflectivity-rainfall relation ( $Z \sim R$  relation) for conventional meteorological radar and reflectivity, differential reflectivity-rainfall relation for multiparameter radar ( $Z_H, Z_{DR} \sim R$  relation) are given by regression, and the performance difference of two kinds of radar for measuring rainfall and difference for measuring rainfall in different regions are also discussed in the paper.

**Key words:** conventional meteorological radar; multiparameter radar; raindrop size distribution; radar rainfall estimation

## 1 引言

通过雷达测量估算地面降雨率是四十多年来雷达气象学研究的重要课题,也是研究降雨对 10GHz 以上频段电波传播特性影响的重要手段<sup>[1~6]</sup>。常规气象雷达利用雷达反射因子和降雨率的关系来估算降雨率,而这一关系随地理位置、季节、气候区域和降雨类型有很大的变化<sup>[1]</sup>。Seliga 等引进了利用差分雷达反射率 ( $Z_{DR}$ ) 和差分传播相移 ( $K_{DP}$ ) 估算降雨率的多参数雷达测雨方法<sup>[2,3]</sup>。大量研究表明,多参数雷达测量降雨与地面雨量计和滴谱仪测量结果之间有很好的一致性<sup>[4~6]</sup>。本文利用我国温带海洋性气候区(青岛)、亚热带海洋性气候区(广州)和温带内陆性气候区(新乡)的雨滴尺寸分布测量数据,计算了球形雨滴的雷达反射因子  $Z$  和椭球形雨滴水平极化雷达反射因子  $Z_H$  及差分雷达反射率  $Z_{DR}$ , 并给出了雷达反射因子  $Z$  和降雨率  $R$  以及椭球形雨滴水平极化雷达反射因子  $Z_H$  和差分雷达反射率  $Z_{DR}$  与降雨率  $R$  之间的关系,比较了常规气象雷达和多参数雷达测雨精度和雷达测雨算式的地域差异。这些关系可用于我国不同气候区的雷达测雨估算。

## 2 理论基础

由于气象雷达一般工作在 C 波段和 S 波段,其工作波长比雨滴直径大的多,此时雨滴的散射截面计算可用 Rayleigh 近似,对于球形雨滴,在 Rayleigh 近似下,雷达反射因子  $Z$  可表示为<sup>[1]</sup>:

$$Z = \int_0^{D_{\max}} N(D) D^6 dD \quad (1)$$

上式中  $D$  为雨滴直径 (mm),  $N(D)$  为雨滴尺寸分布 ( $\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$ )。  $D_{\max}$  为降雨的最大雨滴直径,对于椭圆形雨滴,在 Rayleigh 近似下<sup>[7]</sup>,水平和垂直极化雷达反射因子  $Z_H$  和  $Z_V$  为:

$$Z_{H,V} = \frac{1}{9} \int_0^{D_{\max}} \left| \frac{m^2 + 2}{1 + L_{H,V}(m^2 - 1)} \right|^2 N(D) D^6 dD \quad (2)$$

式(2)  $L_{H,V}$  为椭球雨滴的极化因子<sup>[7]</sup>。椭球雨滴的短轴  $a$  和长轴  $b$  之间的关系取为<sup>[8]</sup>:

$$\frac{a}{b} = 1 - \frac{0.41}{4.5} \left( \frac{D}{2} \right) \quad (3)$$

$D$  为等体积球形雨滴的直径。雷达差分反射率定义为:

$$Z_{DR} = 10 \lg(Z_H / Z_V) \quad (4)$$

降雨率  $R$  (mm/h) 由下式给出:

$$R = 6 \times 10^{-4} \int_0^{D_{\max}} D^3 V_t(D) N(D) dD, \quad (\text{mm/h}) \quad (5)$$

式中  $V_t(D)$  (m/s) 为直径为  $D$  的雨滴末速度, 雨滴末速度数据由 Gunn 和 Kinzer 给出<sup>[9]</sup>.

### 3 雷达测雨参数的导出

为了确定雷达测雨参数, 我们利用青岛、广州和新乡实测雨滴尺寸分布数据 (其中青岛的数据为 1986 年和 1988 年两年夏季测量的共 415 组数据, 广州数据为 1992 年夏季测量的 150 组数据, 新乡的数据为 1985 年夏季测量的 72 组数据, 所有数据都是利用 GBPP-100 激光滴谱仪测量的), 通过 (1) ~ (5) 计算的雷达反射因子、雷达差分反射率和降雨率作为雷达测量数据和实际降雨率来确定雷达测雨参数.

为了得到雷达测雨算式, 对于常规气象雷达, 我们假设降雨率与雷达反射因子为指数关系:

$$R = aZ^b \quad (6)$$

对于多参数雷达, 假设降雨率与雷达反射因子和差分反射率之间有以下关系:

$$R = kZ_H Z_{DR} \quad (7)$$

利用上述雨滴尺寸分布计算的雷达反射因子、差分雷达反射率和降雨率, 并利用最小二乘法回归的雷达测雨参数如表 1 所示. 青岛、广州和新乡地区雷达测雨参数可应用于我国温带海洋性气候区、亚热带海洋性气候区和温带大陆性气候区的雷达测雨.

表 1 气象雷达测雨参数

地区	$a$	$b$	$k$		
青岛	0.0588	0.5559	0.0143	0.8908	- 0.5090
广州	0.0868	0.5162	0.0205	0.8233	- 0.3940
新乡	0.0791	0.5621	0.0367	0.7330	- 0.2864

表 2 气象雷达测雨精度

地区	$bias$	$mse$	$coef$	$Fse$
青岛	3.6173	7.9823	0.8370	0.3821
广州	5.6919	10.599	0.8456	0.4307
新乡	4.9408	10.418	0.9558	0.2177

### 4 测雨精度比较

为了比较比较常规气象雷达和多参数雷达的测雨精度, 我们假设利用雨滴尺寸分布计算的降雨率为实测降雨率  $R_D(i)$ , 利用雨滴尺寸分布计算的雷达反射因子和差分反射因子为雷达实测数据, 利用式 (6) 和 (7) 计算的降雨率为雷达测量降雨率  $R_m(i)$ , 通过计算两者的平均误差 ( $bias$ )、均方根误差 ( $mse$ )、相关系数 ( $coef$ ) 和相对标准误差 ( $fse$ ), 结果如表 2 和表 3 所示. 从表 2 和表 3 可以看出多参数雷达比常规气象雷达测雨精度有了很大改进. 为了更直观的比较两者的测雨精度, 图 1 和图 2 给出了利用青岛地区雨滴尺寸分布计算的降雨率  $R_D$  和雷达参数反演的降雨率  $R_m$  结果, 从图 1 和图 2 的比较可以看出, 多参数雷达反演结果的离散性比常规气象雷达的反演结果的离散性要好得多.

表 3 多参数气象雷达测雨精度

地区	$bias$	$mse$	$coef$	$fse$
青岛	1.6994	4.6135	0.9480	0.1795
广州	2.7240	6.9182	0.9503	0.2061
新乡	3.0692	5.6934	0.9802	0.1352

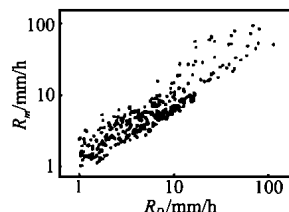


图 1 常规气象雷达参数反演降雨率与雨滴尺寸分布计算降雨率比较

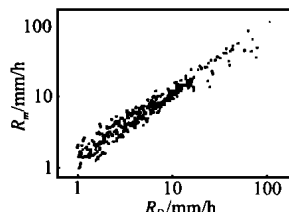


图 2 多参数雷达参数反演降雨率与雨滴尺寸分布计算降雨率比较

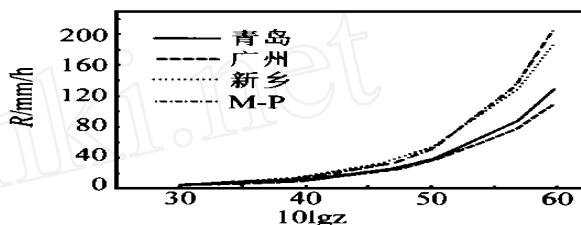


图 3 不同雨滴尺寸分布  $Z-R$  关系比较

### 5 不同地区雷达测雨算式的比较

雷达测雨误差不但与降雨类型有关, 而且与气候区域有关, 为了比较雷达测雨算式的地域差异, 图 3 给出了青岛、广州、新乡和国际上广泛使用的 Marshall-Palmer (M-P) 雨滴尺寸分布<sup>[10]</sup>的  $Z-R$  关系的比较, 其中 M-P 雨滴尺寸分布的  $Z-R$  关系为<sup>[11]</sup>:

$$R = 0.0365 Z^{0.625} \quad (8)$$

从图中可以看出, 新乡地区  $Z-R$  关系与 M-P 雨滴尺寸分布的  $Z-R$  关系接近, 而同属海洋性气候区的青岛和广州地区的  $Z-R$  关系接近, 但属不同雨气候区的新乡与青岛和广州的  $Z-R$  关系有较大差异. 雷达反射因子与雨滴直径的 6 次方成正比, 对于相同的雷达反射因子, 新乡地区估算的降雨率高于青岛和广州地区的降雨率表明了新乡地区雨滴尺寸分布中的大雨滴含量小于青岛和广州地区雨滴尺寸分布的大雨滴含量.

### 6 结束语

本文利用青岛、广州和新乡地区实测的雨滴尺寸分布, 得到了这些地区常规气象雷达和多参数气象雷达测雨算式, 这些算式可分别应用于我国温带、亚热带海洋性气候区和温带大陆性气候的雷达测雨. 研究结果表明在不同地区使用不同雷达测雨算式可提高雷达测雨性能, 同时使用多参数气象雷达可大大提高雷达测雨精度, 因此在我国不同雨气候区开展雷达测雨的研究和发展多参数气象雷达对提高雷达在水文气象中的应用性能, 大面积的降雨估算和防洪防涝的短期预报具有重要意义.

## 参考文献

- [ 1 ] 葛文忠,蒋培杰. 雷达探测大气和海洋. 北京:海洋出版社,1986
- [ 2 ] T. A. Seliga, V. N. Bringi. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarization for measuring precipitation. J. Appl. Meteor. 1976, 15: 69 ~ 76
- [ 3 ] T. A. Seliga, V. N. Bringi. Differential reflectivity and differential phase shift: Application in radar meteorology. Radio Sci. 1978, 13: 271 ~ 275
- [ 4 ] K. Aydin, Y. Lure, T. A. Seliga. Polarimetric radar measurements of rainfall compared with ground-based rain gauges during MAYPOLE 84. IEEE Trans. Geosci Remote Sensing, 1990, 28(4): 443 ~ 449
- [ 5 ] T. A. Seliga, V. N. Bringi, E. A. Muellet. First comparisons of rainfall rates derived from radar differential reflectivity and disdrometer measurements. IEEE Trans. Geosci Remote Sensing, 1982, 20: 201 ~ 204
- [ 6 ] J. W. F. Goddard, S. M. Cherry. The ability of dual polarization radar (copolar linear) to predict rainfall rate and microwave attenuation. Radio Sci. 1984, 19: 201 ~ 208
- [ 7 ] K. Ishimaru. Wave propagation and scattering in random media. New York, Academic press. 1978, Chapter 1
- [ 8 ] T. Oguchi. Attenuation and phase rotation of radio waves due to rain: calculations at 19.3 and 34.8 GHz, Radi Sci., 1973, 8(1): 31 ~ 38
- [ 9 ] R. Gunn, G. D. Kinzer. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. J. Meteorol. 1949, 6: 243 ~ 248
- [ 10 ] J. S. Marshall, W. M. Palmer. The distribution of raindrops with size. J. Meteor. 1947, 10: 25 ~ 29



赵振维 1965 年出生, 分别于 1983 年和 1989 年在西安电子科技大学和中国电波传播研究所获工学学士和硕士学位, 现为中国电子学会高级会员, 中国电波传播研究所青岛分所第一研究室主任, 高级工程师, 并在西安电子科技大学在职攻读博士学位, 曾获电子部科技进步二等奖一项, 主要研究兴趣为微波、毫米波传播和遥感。

吴振森 1946 年出生, 1981 年在武汉大学获理学硕士学位, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究兴趣为复杂系统电磁(光)波传播、散射及复杂散射体的几何建模。

沈广德 1965 年出生, 1991 年毕业于中国科技大学, 获硕士学位, 现为中国电波传播研究所高级工程师, 主要研究兴趣为微波、毫米波传播和遥感。