

多参数雷达在估计雹暴降雨率中的应用¹⁾

刘 力 邓华秋

(华南理工大学电子与通信工程系, 广州 510641)

提 要

根据多参数雷达(双偏振、双波长、多普勒)在美国科罗拉多高原初夏对含冰雹的暴雨的观测数据,我们分别应用S波段的反射率 Z_h 比相差 K_{dp} ,以及X波段的比衰减 A_x 对降雨率 R 进行了估计,并将这些基于雷达参数的估计与地面雨量计的记录进行了比较。结果表明,分别基于 K_{dp} 和 A_x 的降雨率估计与雨量计的记载相当吻合,雨量累积差小于10%,而基于 Z_h 的降雨率估计只有当 Z_h 截断于55dBz时才能得到相似结果。研究结果肯定了 K_{dp} 在含有雨-冰雹混合结构的对流性暴雨中精确估计降雨率方面的作用。

关键词: 降雨率 双偏振 双波长 天气雷达

引 言

天气雷达在监测雨量的应用上与传统的雨量计相比,其最大的优越性在于雷达的覆盖面积广,在几秒钟内即可观测到大面积地区的降雨情况,而雨量计只能观测到局部的降雨强度。雷达气象学的一个重要问题是对可能导致突发性洪水的强风暴的降水率的估计。当降水成分同时含有雨和冰雹时, $R-Z_h$ 和 $R-(Z_h, Z_{dr})$ 的关系^[1,2]会导致严重的误差。这是因为 Z_h 正比于Rayleigh范围的粒子尺寸的六次方,它会显著地受到比一般雨滴尺寸大的冰雹的影响。另一方面,对于尺寸大的冰雹, $R-(Z_h, Z_{dr})$ 关系不仅会受到 Z_h 偏差的影响,还会受到 Z_{dr} 偏差的影响。由于 Z_{dr} 是反射率加权的平均轴比^[3],而冰雹的平均轴比非常接近于1(相对于大的雨点),因而 Z_{dr} 的值在有冰雹出现的情况下会大大减少。事实上, Z_h 和 Z_{dr} 的这些特性可被用来辨识冰雹的存在^[4,5]。

本文通过多参数天气雷达对一个含冰雹的暴雨结构的观测,讨论了分别用S波段双

偏振雷达CSU-CHILL^[6]的测量参数 K_{dp} (specific differential phase,比相差)和双波长、双偏振雷达NCAR-CP2^[7]的测量参数 A_x (specific attenuation,比衰减)估计降雨率 R ,并与雨量计的记录进行了比较。与 Z_h 和 Z_{dr} 这对反射(后向散射)参数相反, K_{dp} 和 A_x 都是前向散射参数。由于翻转滚落的冰雹平均轴比接近于1,几乎对 K_{dp} 没有影响^[8]。 K_{dp} 主要取决于有一定取向的呈扁球体的雨点集合,因此 K_{dp} 是在雨-冰雹混合结构中估计降雨率的重要参数,另一方面, A_x 正比于约为3.9—6mm的粒子尺寸的三次方^[9],因而它不会象S波段的 Z_h 那样明显地受到夹在雨中的冰雹的影响。 A_x 的主要限制在于要求雷达同时工作在双波长(S波段和X波段),而且X波段的反射率在大范围的强暴雨中衰减很快。

1 降雨率与雷达参数的关系

比相差 K_{dp} 早已被考虑用于估计降雨率 R ^[10,11],并且有多种估计算法^[12,13]。其中有所谓SZ关系式^[13]:

1) 国家自然科学基金(49575254)、国家教委优秀青年教师基金和广东省自然科学基金资助项目。

$$R(K_{dp}) = 37.1K_{dp}^{0.866} \quad [\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (1)$$

$$R(K_{dp}) = \begin{cases} 36.15K_{dp}^{0.81} & [\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}] & 0.01 \text{ 度/km} < K_{dp} < 1.5 \text{ 度/km} \\ 33.77K_{dp}^{0.97} & [\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}] & 1.50 \text{ 度/km} < K_{dp} < 7 \text{ 度/km} \end{cases} \quad (2)$$

在本文中我们采用Chandrasekar^[15]的算法:

$$R(K_{dp}) = 40.5K_{dp}^{0.85} \quad [\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (3)$$

其中 K_{dp} 的单位都是度/km。在 $R(K_{dp}) = aK_{dp}^b$ 的关系中,参数 a 和 b 是通过非线性回归得到的。SZ 关系式(1)是基于 $N_0 = 8000\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的 Marshall-Palmer^[16] 雨滴尺寸分布模型,AG 关系式(2)是基于雨滴测量器的雨滴尺寸分布测量数据,而式(3)是通过大范围变化 Γ -雨滴尺寸分布模型参数 (N_0, m, D_0) 拟合所得,本文采用关系式(3)是因为它综合了更为一般性的 Γ -分布。应用式(3)与式(1)及式(2)的差别,对于 $100\text{mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 200\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 是小于 6%,对于 $R < 100\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 小于 12%。注意,当 $R < 147\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 由式(3)估计的降雨率要比用式(1)或式(2)大。

在微波系统中,用 X 波段的比衰减 A_x 来估计降雨率也早有考虑^[17]。这里我们采用 Jameson^[18] 提出的算法:

$$R(A_x) = 54.6A_x^{0.845} \quad [\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (4)$$

其中 A_x 的单位是 $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 。 K_{dp} 和 A_x 的定义及估计算法见文献[7]和[19]。这两个参数都不依赖于雷达系统的绝对增益^[11]。

我们采用目前已在美国布网的下一代天气雷达(NEXRAD)WSR-88D 业务使用的 $R-Z_h$ 关系^[20] 作为比较,即

$$R(Z_h) = 0.017Z_h^{0.714} \quad [\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5)$$

这里 Z_h 采用其标准单位 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$, 在 $R-Z_h$ 关系中, Z_h 值被截断在操作员指定的反射率最大值,该值取决于应用的地理区域。

2 雷达对夹冰雹强风暴的观测

1992 年 6 月 24 日,一场发生在美国科

和 AG 关系式^[14]:

罗拉多州科林斯堡市的强风暴在短短的一个小时内(当地时间 15:15—16:15)降雨量达到 75mm。据当时在科罗拉多州立大学校园里的观察者报告,起初只有少量大颗雨点,接着便是强风骤雨,稍后还夹着直径约为 15—20mm 的冰雹。根据 CSU-CHILL、NCAR-CP2 和 MILE-HIGH 三部雷达的同时跟踪观测,整个暴雨群朝着东—东南方向移动。

图 1 给出 S 波段的 CSU-CHILL 雷达测量参数 Z_h 、 K_{dp} 、 Φ_{dp} (经低通滤波)、 Φ_{dr} (经自适应滤波)、 Z_{dr} 和 $R(K_{dp})$ 沿雷达扫描波束的距离曲线。注意, K_{dp} 在距离约为 21km 和 42km 处二个暴雨中心值分别高达 5 度/km 和 6.4 度/km。在 42km 附近, Z_{dr} 的值很小,并在 0dB 波动,而此处的 Z_h 值却很大,超过 60dBz,表明了冰雹的存在。基于 K_{dp} 估计的

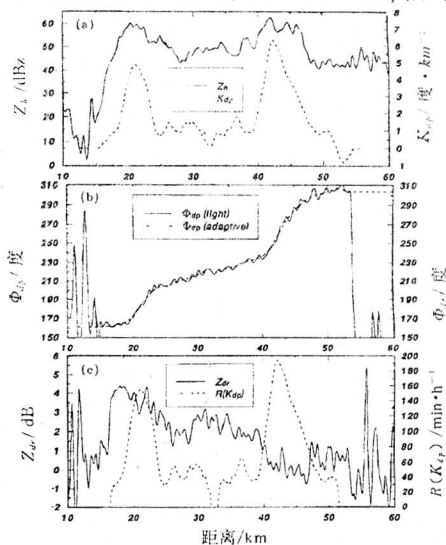


图 1 CSU-CHILL 雷达于 1992 年 6 月 24 日 15:38:38MDT 以仰角 1° 和方位角 292° 对暴雨群扫描的多参数距离曲线
a. Z_h 和 K_{dp} b. Φ_{dp} 和 Φ_{dr} c. Z_{dr} 和 $R(K_{dp})$

降雨率 $R(K_{dp})$ 在 42km 处的暴雨中心接近 $200\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

图 2 给出 NCAR-CP2 雷达的测量参数 Z_h (S 波段)、 Z_x (X 波段)、 Z_{dr} (S 波段)、双波段反射比 $DFR = Z_h - Z_x$ [dB]、X 波段水平偏振双程绝对衰减率 α_x ，比衰减 $A_x = \frac{\alpha_x(r) - \alpha_x(r - \Delta r)}{2 \cdot \Delta r}$ [dB · km⁻¹]，以及 $R(A_x)$ 沿雷达扫描波束的距离曲线。这里对 Z_h 、 Z_x 和 Z_{dr} 的估计算法与对 CSU-CHILL 雷达的相应参数的估计算法完全相同。对 DFR 处理也与对 CSU-CHILL 雷达的 Φ_{dp} 的处理算法相同。注意由 Z_x 相应于 Z_h 的大幅度明显下降，可以得知 X 波段的最大衰减率发生在雷达波束穿过约在 71km 处的暴雨中心（相应于图 1 所示的位于 CSU-CHILL 雷达 42km 处的暴雨中心）。此处基于 A_x 估计的降雨率 $R(A_x)$ 超过 $200\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ，反射比 Z_{dr}

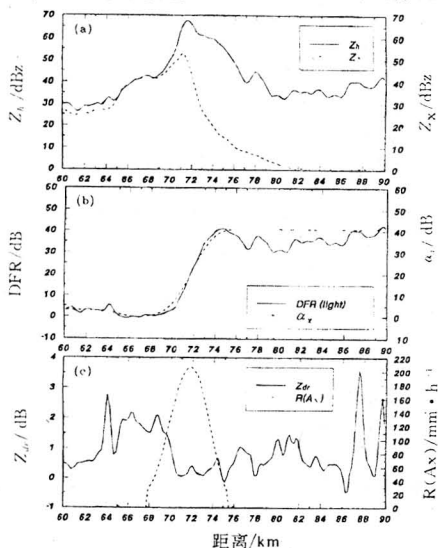


图 2 NCAR-CP2 雷达于 1992 年 6 月 24 日 15 : 35 : 54MDT 以仰角 0.6° 和方位角 6° 在位于 CSU-CHILL 雷达的西南处对其指向的同一暴雨群扫描的多参数距离曲线
a. Z_h (S 波段) 和 Z_x (X 波段), b. DFR 和 α_x , c. Z_{dr} 和 $R(A_x)$

$< 0.5\text{dB}$ ，而 $Z_h > 65\text{dBz}$ ，再次表明了冰雹的存在。在 74km 以外，X 波段的信号衰减至噪声水平以下。

3 雷达观测与雨量计的比较

本研究用到的雨量计位于科罗拉多州立大学主校园的气象站(对应于 NCAR-CP2 雷达方位角 8.2° /距离 71.4km 处,亦即偏离图 2 所示的雷达波束 71.4km 以东 2.5km 处)。我们根据每 5 分钟的雨量累积记录曲线的斜率来估计降雨率 $R(\text{raingage})$ 。当冰雹和暴雨同时存在时, $R(\text{raingage})$ 的估计值可能会出现 $\pm 15\%$ 的误差。然而这种误差对累积总量的读数影响很小(小于 1mm)。

图 3 给出 CSU-CHILL 雷达和 NCAR-CP2 雷达分别从不同的角度在很接近雨量计的上方以 PPI 方式扫描观测时估计的降雨率 $R(K_{dp})$ 和 $R(A_x)$ 与由雨量计记录所得的 $R(\text{raingage})$ 的比较结果,可见三者结果吻合得很好,变化趋势一致。

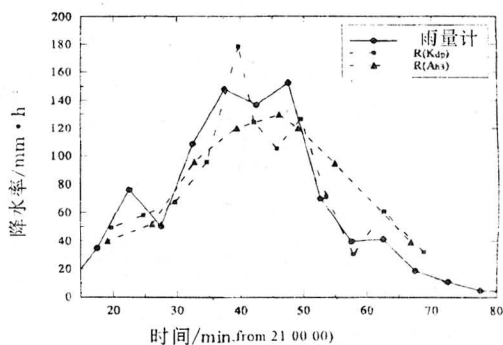


图 3 由雨量计测量的降雨率 $R(\text{raingage})$ 和根据雷达观测参数 K_{dp} 和 A_x 估计降雨率 $R(K_{dp})$, $R(A_x)$

时间轴的零点对应于 MDT15 : 00, 单位为分钟

图 4 给出根据反射率 Z_h 与降雨率的关系式(5)但分别将 Z_h 的峰值截断于 50、55 和 60dBz 所得的降雨率 R_{50} 、 R_{55} 和 R_{60} ，与由雨量计所得的降雨率 $R(\text{raingage})$ 相比，显而易见 Z_h 截断在 55dBz 时所产生的估计值 R_{55} 最接近雨量计的结果。据我们了解，设在

丹佛(Denver)的 WSR-88D 雷达正是采用这个关系式来估计降雨率。然而值得指出的是,这个关系式并不能推广到所有的暴雨结构。 Z_h 截断点的选择取决于不同的冰雹下降率和最大冰雹尺寸等^[8]。

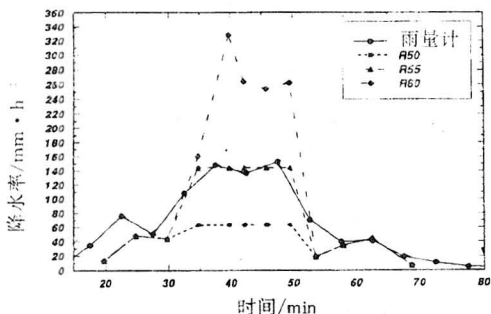


图4 由雨量计测量的降雨率 R (raingage)和根据雷达观测参数 Z_h 分别截断于 50、55 和 60dBZ 时估计的降雨率 R_{50} 、 R_{55} 和 R_{60} 时间轴的零点对应于 MDT15:00

降雨累积量 Σ 是对暴雨监测分析的一个重要参数。附表给出根据图 3 和图 4 对降雨率的不同估计所得的降雨累积量 Σ 及其与雨量计记录比较的百分比误差 Δ 。可见由 A_x 和 K_{dp} 所得的估计值误差最小,分别为 -1% 和 -4% ; 而由截断于 50dBZ 的 Z_h 所得的估计严重偏低(-49%); 由截断于 60dBZ 的 Z_h 所得的估计过高($+32\%$)。

附表 降雨累积量 Σ 及相对雨量计 Δ 的偏差

	Σ/mm	$\Delta/\%$
雨量计	73.3	0
K_{dp}	70.2	-4
A_x	72.4	-1
$Z_h(50)$	37.6	-49
$Z_h(55)$	63.5	-13
$Z_h(60)$	96.5	32

4 结 语

本文讨论了双偏振雷达参数比相差 K_{dp} 对于夹冰雹暴雨的降雨率的估计能力,不仅对 $R-K_{dp}$ 关系进行了分析检验,而且对 $R-A_x$ 和 $R-Z_h$ 关系也进行了测试,并与地面雨量计

记录进行了比较。结果表明,由 K_{dp} 和 A_x 估计的降雨率和降雨累积量都与雨量计记录相当吻合,其降雨累积量的估计误差小于雨量计测量值的 5%。对于 $R-Z_h$ 关系,当 Z_h 截断于 55dBZ 时, $R(Z_h)$ 达到最佳估计,而当 Z_h 分别截断于 50dBZ 和 60dBZ 时,则结果很差。值得注意的是, K_{dp} 和 A_x 都不依赖于雷达的系统增益,而 Z_h 很容易受到系统未知因素的影响而产生 1dB 以上的偏差,此外, K_{dp} 对具有高度取向性的椭球体雨点很敏感。这些因素使 K_{dp} 对含冰雹的暴雨结构估计降雨率更显出其优越性,并可能成为评价基于 $R-Z_h$ 技术的降水估计算法(如 NEXRAD 降水估计算法)的可靠依据。

参考文献

- 1 Battan, L. J. Radar Observations of the Atmosphere. University of Chicago Press, 1973; 84-113.
- 2 Seliga, T. A. and V. N. Bringi. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. J. Appl. Meteor., 1976, 15; 69-76.
- 3 Jameson, A. R. Microphysical interpretation of multiparameter radar measurements in rain. Part I: Interpretation of polarization measurements and estimation of raindrop shapes. J. Atmos. Sci., 1983, 40; 1792-1802.
- 4 Bringi, V. N., T. A. Seliga and K. Aydin. Hail detection using a differential reflectivity radar. Science., 1984, 225; 1145-1147.
- 5 Aydin, K. T. A. Seliga and V. Balaji. Remote sensing of hail with a dual linear polarization radar. J. Climate Appl. Meteor., 1986, 25; 1475-1484.
- 6 刘力. 天气雷达的发展趋向——具有双偏振功能的多普勒雷达. 气象, 1996, 22(8); 49-55.
- 7 刘力, 邓华秋. 多参数雷达在气象观测中的应用. 大气科学, 待发表.
- 8 Balakrishnan, N. and D. S. Zrnice. Estimation of rain and hail rates in mixed-phase precipitation. J. Atmos. Sci., 1990, 47; 565-583.
- 9 Jameson, A. R. A comparison of microwave techniques for measuring rainfall. J. Appl. Meteor., 1991, 30; 32-54.

- 10 Seliga, T. A. and V. N. Bringi. Differential reflectivity and differential phase shift; Applications in radar meteorology. *Radio Sci.*, 1978, 13: 271—275.
- 11 Doviak, R. J. and D. S. Zrnic. *Doppler Radar and Weather Observations*, 2nd edition. Academic Press, 1993: 254—255.
- 12 Jameson, A. R. and E. A. Mueller. Estimation of propagation differential phase shift from sequential orthogonal linear polarization radar measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1985, 2: 133—137.
- 13 Sachidananda, M. and D. S. Zrnic. Differential propagation phase shift and rainfall rate estimation. *Radar Sci.*, 1986, 21: 235—247.
- 14 Aydin, K. and V. Giridhar. C-band dual-polarization radar observables in rain. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1992, 9: 383—390.
- 15 Chandrasekar, V., V. N. Bringi, N. Balaskrishnan and D. S. Zrnic. Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III: Specific differential phase. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1990, 7: 621—629.
- 16 Marshall, J. S. and W. Mck. Palmer. The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 1984, 5: 165—166.
- 17 Atlas, D. and C. W. Ulbrich. Path- and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1—3 cm band. *J. Appl. Meteor.*, 1997, 16: 1322—1331.
- 18 Jameson, A. R. The effect of temperature on attenuation correction schemes in rain using polarization propagation differential phase shift. *J. Appl. Meteor.*, 1992, 30: 1106—1118.
- 19 Liu, Li. An Efficient Technique for Estimating Dual-Polarized Radar Parameters. *华南理工大学学报*, 1997, 25 (2).
- 20 Kelsh, M. An evaluation of the NEXRAD hydrology sequence for different type of convective storms in north-eastern Colorado. Preprints, 24th Conf. on Radar Meteorology, Tallahassee, FL, Amer. Meteor. Soc., 1989: 207—210.

Multiparameter Radar Application in Rainfall Rate Estimation in the Presence of Hail

Liu Li Deng Huaqiu

(Department of Electronic & Communication Engineering,
South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract

Based on multiparameter radar (dual-polarization, dual-wavelength, and Doppler) observations of early Summer severe storm accompanied by hail, reflectivity Z_h , specific differential phase K_{dp} at S-band and X-band specific attenuation A_x were applied to estimate rainfall rates. The estimates from radar parameters were compared with groundbased raingage measurements. The results show that both $R-K_{dp}$ and $R-A_x$ relations were in good agreement with the raingage data, that is, less than 10% difference in the rainfall accumulations. The $R-Z_h$ relation produced similar results only when Z_h was truncated at 55dBz. This study demonstrates the potential of K_{dp} for estimating rainfall rates in convective rainstorms with rain-hail mixtures.

Key Words: rainfall rate dual-polarization dual-wavelength weather radar