

多参数雷达在气象观测中的应用*

刘 力 邓华秋

(华南理工大学电子与通信工程系, 广州 510641)

摘 要 根据双偏振(水平/垂直线性偏振)、双波长(S波段和X波段)、多普勒天气雷达分别在美国佛罗里达州中部亚热带地区和科罗拉多高原的观测数据时间序列, 对在两个不同地理环境、不同天气情况下雷达参数的气象特征及其统计特性进行了分析和比较, 为我国开发研制双偏振多普勒天气雷达及其气象应用提供了有意义的参考数据和资料。

关键词 双偏振 双波长 天气雷达 统计特性 气象特征

1 引言

双偏振多普勒天气雷达是下一代天气雷达的发展趋势^[1]。1991年夏美国在位于佛罗里达州中部的肯尼迪太空中心附近进行了一次筹备了三年之久、投资数百万美金、有八所高等院校及许多美国政府研究机构投入的规模空前的大型气象实验—对流、降水与电化(Convection Precipitation and Electrification, 简称为CaPE)实验。CaPE实验为双偏振、双波长、多普勒雷达提供了第一次在亚热带地区采集数据, 并研究其气象特征的机会。作为CaPE实验主要设备之一的NCAR-CP2雷达是一部双偏振(水平/垂直线性偏振, 脉冲式交替切换)、双波长(S波段: 10 cm; X波段: 3 cm), 具有多普勒测速功能的可移动天气雷达, 其主要系统特性及参数见表1。NCAR-CP2雷达的独特之处在于它是当今世界上唯一的具备同时测量多普勒速度和在S与X波段的反射率, 以及在S波段的反射比 Z_{dr} 和在X波段的线性去偏振比LDR等多参数能力的雷达。NCAR-CP2雷达的这种多参数能力使得它成为研究对流性风暴的重要工具。

根据NCAR-CP2雷达在佛罗里达州夏季微雨中的竖向观测以及在对流性暴雨中的观测数据, 对多参数雷达的气象特征及其统计特性进行了分析, 并且与NCAR-CP2雷达和CSU-CHILL雷达^[1](双偏振、S波段、多普勒天气雷达)分别在科罗拉多州高原夏季所采集的数据进行了比较, 得出了有参考价值的结果。采用的原始雷达数据存于美国科罗拉多州立大学电气工程系天气雷达研究室。NCAR-CP2雷达是美国大气研究中心的设备, CSU-CHILL雷达是美国国家科学基金会委托科罗拉多州立大学进行大气科学研究的设备。

2 雷达参数的定义及其估计算法

传统的线性双偏振雷达, 如NCAR-CP2雷达的S波段和CSU-CHILL雷达, 交

1996-04-04收到, 1997-01-12收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 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

表 1 NCAR-CP2 雷达的系统特性及参数^[2]

	S 波段	X 波段
天线		
类型	中心馈入, 抛物面	2 个卡赛格伦抛物面
尺寸	8.5 m	2.4 m
馈入	陶瓷喇叭	矩形波导管
3dB 主波束宽度	0.93°	0.94°
旁波瓣水平	≤ -21 dB	≤ -28 dB
线性交叉偏振波瓣	≤ -21 dB	≤ -32 dB
发射器		
类型	速调管, 现代化 FPS18	(不详)
波长	10.7 cm	3.2 cm
峰值功率	1200 kW	200 kW
脉冲宽度	0.15~1.2 μs	1.0 μs
脉冲重复频率	≤ 1700 s ⁻¹	≤ 1000 s ⁻¹
发射偏振	线性水平或线性垂直	线性水平
偏振控制开关	铁氧体开关	(不详)
偏振控制方式	脉冲式	(不详)
多普勒功能	有	无
接收器		
接收偏振	与发射偏振相同	线性水平和线性垂直
双偏振通道同时接收能力	无	有
数据采集		
距离门数	512	512
距离分辨率	> 30 m (通常为 200 m)	> 30 m (通常为 200 m)
通道隔离	> 20 dB	> 30 dB
可测参数		
反射率	$Z_{hh(S)}, Z_{vv(S)}$	$Z_{hh(X)}, Z_{vh(X)}$
差分反射率因子	Z_{dr}	无
线性退偏振比	无	LDR
平均多普勒速度	$\bar{V}$	无
功率谱宽度	σ_v	无
微分相位	$\bar{\psi}_{dp}$ (限于时间序列采样方式)	无
偏振互相关系数	$\rho_{hv(0)}$ (限于时间序列采样方式)	无

替地发射水平偏振和垂直偏振脉冲, 并交替地接收相应的同偏振回波。假设接收的回波信号时间序列为 $\{V_1, H_2, V_3, H_4, \cdots, V_{2i-1}, H_{2i}, \cdots, V_{2M-1}, H_{2M}\}$, 其中 V_{2i-1} 和 H_{2i} 分别是 S 波段的垂直偏振(V)和水平偏振(H)回波复数序列, 则雷达在 S 波段的平均回波功率可由下式估计:

$$\hat{P}_{hh(S)} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |H_{2i}|^2,$$

(1a)

$$\hat{P}_{vv(S)} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M |V_{2i+1}|^2.$$

(1b)

水平偏振反射率 Z_h 与水平偏振回波功率成正比, 与目标至雷达的距离 r 的平方成反比, 即

$$Z_h = C \frac{\hat{P}_{hh(S)}}{r^2}, \quad (2)$$

其中 C 是雷达常数, 与系统增益等有关。

差分反射率因子 Z_{dr} 定义为水平偏振反射率与垂直偏振反射率之比, 可由下式估计^[3]:

$$\hat{Z}_{dr} = 10 \log \left[\frac{\hat{P}_{hh(S)}}{\hat{P}_{vv(S)}} \right]. \quad (3)$$

$\rho_{hv(0)}$ 定义为水平偏振回波信号与垂直偏振回波信号的零滞后互相关系数的幅值。假设回波信号的功率谱呈高斯形状, 则 $\rho_{hv(0)}$ 可由下式估计^[4]:

$$\hat{\rho}_{hv(0)} = \frac{\hat{\rho}_{hv}(T_s)}{[\hat{\rho}(2T_s)]^{0.25}}, \quad (4)$$

其中 $\hat{\rho}(2T_s) = \hat{\rho}_{hh}(2T_s) = \hat{\rho}_{vv}(2T_s)$ 。假设采样间隔 $T_s = 1$, 则

$$\hat{\rho}_{hv}(1) = \frac{\left| \sum_{i=1}^{M-1} H_{2i} V_{2i+1}^* \right|}{\left[\sum_{i=1}^{M-1} |H_{2i}|^2 \sum_{i=1}^{M-1} |V_{2i+1}|^2 \right]^{0.5}}, \quad (4a)$$

$$\hat{\rho}(2) = \hat{\rho}_{hh}(2) = \frac{\left| \sum_{i=1}^{M-1} H_{2i} H_{2i+2}^* \right|}{\sum_{i=1}^{M-1} |H_{2i}|^2}. \quad (4b)$$

ψ_{dp} 定义为水平偏振回波信号与垂直偏振回波信号的相位差, 其估计算法为^[4~6]:

$$\psi_{dp} = \frac{1}{2} \arg(\hat{R}_a^* \hat{R}_b), \quad (5)$$

其中 $\arg(X)$ 代表复数 X 的幅角, 而

$$\hat{R}_a = \hat{R}_a(T_s) = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} H_{2i} V_{2i+1}^*, \quad (5a)$$

$$\hat{R}_b = \hat{R}_b(T_s) = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} V_{2i} H_{2i+1}^*. \quad (5b)$$

在冰雹和雨的混合介质中, ψ_{dp} 可分解为两个成分, 即

$$\psi_{dp} = \delta + \Phi_{dp}, \quad (6)$$

其中 δ 叫作反射体相位差, 可用于估计冰雹的大小; 而 Φ_{dp} 叫作双程传播相位差, 其半斜率称为特定微分相位 (specific differential phase) K_{dp} , 是估计雨量的重要参数 (见图 1)。

$$K_{dp}(r) = \frac{\Phi_{dp}(r) - \Phi_{dp}(r - \Delta r)}{2\Delta r}. \quad (7)$$

对于同时工作在 S 波段和 X 波段的双波长雷达 NCAR-CP2, 可同时得到在 X 波段的水平同偏振回波功率 p_{hh} 和交叉偏振回波功率 p_{vh} (即发射信号为水平偏振, 回波

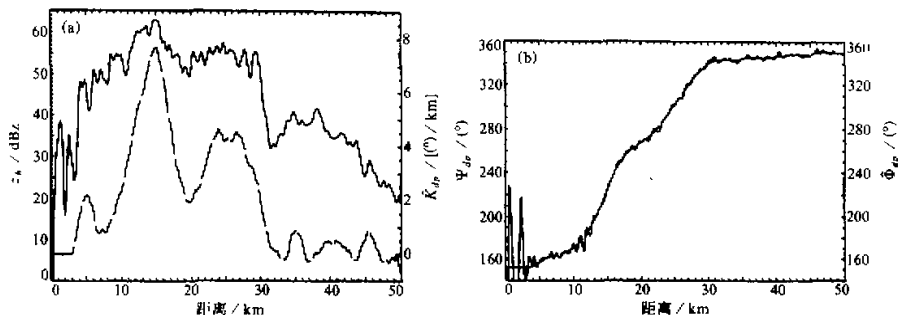


图1 CSU-CHILL 雷达对一个大雨带观测的参数-距离曲线, 其中 ψ_{dp} 和 ψ_{dp} (实线) 为经低通滤波的测量参数, $\hat{K}_{dp}$ 和 $\hat{\Phi}_{dp}$ (虚线) 为估计参数

信号为垂直偏振) 的采样信号 $\{p_{hh}(i), p_{vh}(i), i=1, 2, \dots, 2M\}$ 。对应于相同的采样时间, X波段的样本长度是S波段交替采样方式的样本长度的二倍($2M$)。对X波段的平均回波功率估计为

$$\hat{P}_{hh(X)} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^{2M} p_{hh}(i), \quad (8)$$

$$\hat{P}_{vh(X)} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^{2M} p_{vh}(i). \quad (9)$$

双频率比 (Dual-Frequency Ratio) r 定义为S波段的水平同偏振回波平均功率与X波段的水平同偏振回波平均功率之比, 即

$$\hat{r} = 10 \log \left[\frac{\hat{P}_{hh(S)}}{\hat{P}_{hh(X)}} \right]. \quad (10)$$

由于X波段 (高频) 的回波信号在雨介质中的衰减要比S波段快得多, 因而当介质为雨和冰雹的混合体时, r 可分解为冰雹信号 B 与X波段水平偏振的双程绝对衰减度 $\alpha_{h(X)}$ 之和, 即

$$r \approx B + \alpha_{h(X)}. \quad (11)$$

由 $\alpha_{h(X)}$ 的半斜率可得在距离雷达 r km处的衰减比 (specific attenuation) $\hat{A}_x(r)$, 这是与S波段的特定微分相位 K_{dp} 类同的另一个估计雨量的重要参数 (见图2), 即

$$\hat{A}_x(r) = \frac{\alpha_{h(X)}(r) - \alpha_{h(X)}(r - \Delta r)}{2\Delta r}. \quad (12)$$

3 NCAR-CP2 雷达在微雨中的竖向观测

根据雨点运动对于竖向入射的雷达波束的对称性, 雷达对雨点的竖向观测 (即雷达天线仰角为 90° , 指向天空) 可获得有利于测量雷达偏振特性及其统计分析的标准目标。此外, 如果天线以 360° 旋转, 则偏振平面也将随其旋转。应用这种观测方法的条

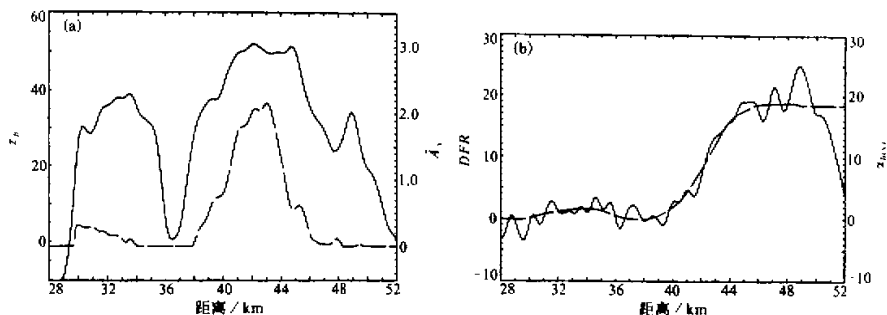


图2 NCAR-CP2 雷达对一个雨带观测的参数-距离曲线, 其中 Z_h (实线, 单位为 dBZ) 和双频率比 (实线) 为经低通滤波的测量参数, $\hat{A}_x$ (虚线) 和 $\alpha_{h(x)}$ (虚线) 为估计参数

件是, 高空中的冰粒的溶化层必须位于天线扫描的“远区”。在亚热带气候的佛罗里达州中部的夏季, 这相当于至少离地面 1.5 km 的高处。但对于科罗拉多高原等非亚热带地区来说, 则要另当别论。本节讨论所用的数据是由 NCAR-CP2 雷达于 1991 年 8 月 24 日在佛罗里达州的 CaPE 实验中采集的。

图 3 给出在微雨 (雨强约为 0.3 mm/h, 根据雨强 I 和反射率 Z_h 的关系 $I = 0.17Z_h^{0.714}$ 得到, 其中 Z_h 的单位为 mm^6/m^3) 中雷达天线竖向观测所得的 Z_b 、 $\rho_{bv(0)}$ 、 ψ_{dp} 和 r 的均值 (图中用点表示) 及其标准差 (垂直线段) 与距离 (即离地面的高度) 的关系。由图 3a 可见的“亮区”位于 3.5 km 高处; 而 $\rho_{bv(0)}$ 在 3.25 km 处的最低点 (≈ 0.92) 也很引人注目。 $\rho_{bv(0)}$ 在“亮区”以下的微雨介质中保持其值在 0.982 左右。理论上 $\rho_{bv(0)}$ 在微雨中的值应当很接近于 1。根据 Illingworth 和 Caylor^[17] 的实验观察, 即使雷达在水平扫描状态, $\rho_{bv(0)}$ 的值在微雨中也可达 0.997。因而对于垂直指向扫描, 其值如此之低, 其主要原因可能是由于天线的馈入喇叭或反射抛物面的精度欠缺所引起的主波束内水平偏振与垂直偏振的相位偏差。计算机模拟结果表明^[8], 这种影响可使 $\rho_{bv(0)}$ 降至 0.99。由图 3a 还可见, 随着高度的增加 (> 5.5 km), Z_b 和 $\rho_{bv(0)}$ 的标准差均明显增大, 这是由于信噪比降低的缘故。 $\rho_{bv(0)}$ 在其低谷处 (3.25 km) 的标准差尤为

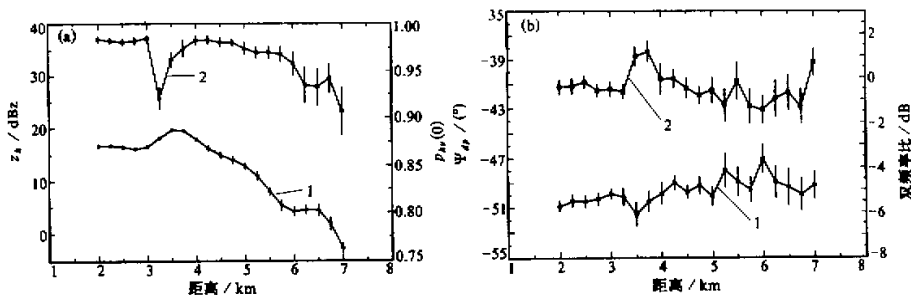


图3 NCAR-CP2 雷达于 1991 年 8 月 24 日在佛罗里达州对微雨的竖向观测中, (a) Z_h (曲线 1) 和 $\rho_{bv(0)}$ (曲线 2), (b) ψ_{dp} 和双频率比的均值及其标准差 (垂直线段) 沿距离 (即离地面的高度) 的关系曲线

显著, 这正好与理论分析^[9]和大量数据处理结果^[17]一致, 即由式 (4) 估计所得的参数 $\rho_{\text{hv}(0)}$ 的标准差与其均值成反比, $\rho_{\text{hv}(0)}$ 均值越小, 其标准差越大。

由于在微雨中雷达波束的竖向入射几乎没有受到传播衰减差的影响, 可以从图 3b 看出雷达系统本身的 ψ_{dp} 值约为 -50.5° 。图 3b 还给出了 r 的统计特性。注意在约 3.75 km 处, r 的均值有一个约为 1.5 dB 的正向跳动, 这正与 Z_b 在 3.5 km 处达到峰值相吻合, 表明了最大直径为 10 mm 的大片湿润的雪花所引起的 Mie 散射效应。当时参加 CaPE 实验的飞机空中采样证实了这一点。

利用微雨中雷达竖向观测的数据, 还可衡量参数 $\hat{A}_x$ 和 K_{dp} 估计值的总体精度。由于 $\hat{A}_x$ 和 K_{dp} 在微雨中的均值几乎是零, 其误差可能是由于随机扰动、系统影响以及估计算法等因素所致。本文采用一种有效的估计 $\hat{A}_x$ 和 K_{dp} 的算法^[10]。对 $\hat{A}_x$ 和 K_{dp} 的均值的估计精度定义为偏差的绝对值与其 95% 的置信区间之和。在信噪比高 (> 20 dB)、功率谱宽度窄 ($\sigma_v \leq 1$ m/s) 以及 $\rho_{\text{hv}(0)}$ 值接近于 1 的条件下, 对 $\hat{A}_x$ (或 K_{dp}) 的估计精度为 0.25 dB/km (或 ($^\circ$)/km)。

4 对暴雨的雷达观测实验分析

图 4 给出 $\rho_{\text{hv}(0)}$ 的均值及其 95% 置信区间与 Z_{dr} 的关系。其中 NCAR-CP2 雷达于

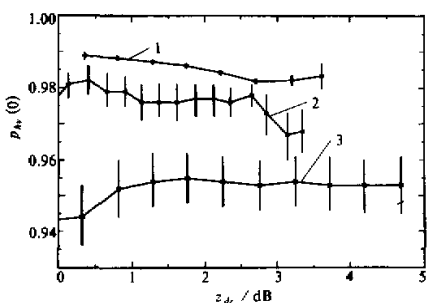


图 4 $\rho_{\text{hv}(0)}$ 的均值和 95% 置信区间与 Z_{dr} 的关系, 基于 NCAR-CP2 雷达于 1991 年 8 月 24 日在佛罗里达州 (曲线 2) 和 CSU-CHILL 雷达分别于 1992 年 6 月 24 日 (曲线 3) 和 1994 年 6 月 20 日 (曲线 1) 在科罗拉多州的观测数据

1991 年 8 月 24 日在佛罗里达州中部的观测数据 (曲线 2) 是当雷达仰角为 1.5° , 距离雷达 37~48 km 处的暴雨 (反射率 Z_h 达到 56 dBZ, 相应的雨强约为 169 mm/h) 中采集的。 $\rho_{\text{hv}(0)}$ 的均值随 Z_{dr} 的增加而减少, 这种趋势与理论值一致。但 $\rho_{\text{hv}(0)}$ 的测量值却比理论值以及 Illingworth 等人^[7]的观测值小得多。其主要原因是天线缺陷所致^[8]。再看基于 CSU-CHILL 雷达^[11]于 1992 年 6 月 24 日在科罗拉多州高原的观测数据所得的曲线 3, $\rho_{\text{hv}(0)}$ 的均值更低 (< 0.96), 表明 CSU-CHILL 雷达的天线问题更严重。而在 $Z_{\text{dr}} \approx 0$ 处 $\rho_{\text{hv}(0)}$

取值最小, 表明被测对象是雨与冰雹的混合——一种在科罗拉多州初夏常见的天气现象, 这与理论分析结果也是符合的^[11]。曲线 1 是基于 CSU-CHILL 雷达在更换了新的天线^[1]之后于 1994 年 6 月 20 日在科罗拉多州的观测。可见 $\rho_{\text{hv}(0)}$ 的均值有明显提高, 而且其标准差大大减少, 这不仅符合 $\rho_{\text{hv}(0)}$ 的标准差与其均值呈正比关系的理论^[9], 而且表明新的天线质量好、精度高, 大大改善了雷达系统的性能。

图 5 分别给出基于 NCAR-CP2 雷达在佛罗里达州和科罗拉多州暴雨 (反射率 Z_b 分别达到 56 dBZ 和 58 dBZ, 相应的雨强分别约为 235 mm/h 和 169 mm/h) 中所采

集数据的 $\hat{A}_x$ 的均值及其 95% 置信区间与 K_{dp} 的关系比较, 其中曲线 1 是基于 1991 年 8 月 24 日在佛罗里达州的 CaPE 实验中, 天线仰角为 1.5° , 距离在 37~48 km 处, 和天线仰角为 $2^\circ \sim 4^\circ$, 距离在 14~26 km 处的数据集合; 而曲线 2 是基于 NCAR-CP2 雷达于 1987 年 8 月 7 日在科罗拉多州的暴雨中, 天线仰角为 1° , 距离在 82~93 km 处的数据集合。用同样的算法^[10]对这两组数据估计参数 $\hat{A}_x$ 和 K_{dp} 。比较这两组关系曲线, 可见对于每一固定的 K_{dp} 值, 佛罗里达州的 $\hat{A}_x$ 值都明显比在科罗拉多州对应的 $\hat{A}_x$ 值大。这个特征在统计意义上是显著的, 表明了两个不同地理环境的大气微物理上的差异, 其主要表现在雨点大小的概率分布不同, 其次是平均雨点形状与其大小的关系不同。由于 $\hat{A}_x$ 和 K_{dp} 的参数估计都不依赖于雷达系统增益, 因而这种比较结果是可信和有意义的。

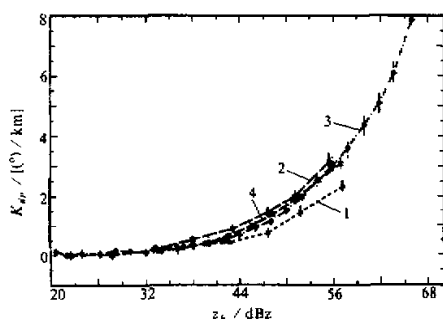


图 6 K_{dp} 的均值及其 95% 置信区间与 Z_h 的关系, 基于 NCAR-CP2 雷达分别于 1987 年 8 月 7 日在科罗拉多州 (曲线 1) 和 1991 年 8 月 24 日在佛罗里达州 (曲线 2), 以及 CSU-CHILL 雷达分别于 1992 年 6 月 24 日和 1994 年 6 月 20 日在科罗拉多州的观测数据

物理特性在两个不同区域的差异, 即雨滴大小的概率分布, 以及平均雨滴形状与其大小的关系在两个地理环境不同。

5 结论

对多参数雷达在微雨中的竖向观测数据分析表明, $\rho_{hv(0)}$ 的“谷点”出现在紧靠“亮区”的下方, 而弱的 Mie 散射效应出现在紧靠“亮区”的上方。根据微雨中的竖向观测数

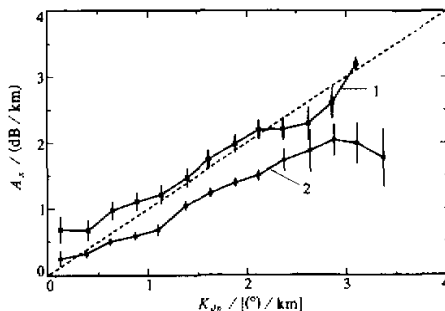


图 5 $\hat{A}_x$ 的均值及其 95% 置信区间与 K_{dp} 的关系, 基于 NCAR-CP2 雷达分别于 1987 年 8 月 7 日在科罗拉多州 (曲线 2) 和 1991 年 8 月 24 日在佛罗里达州 (曲线 1) 的观测数据

图 6 给出 K_{dp} 与 Z_h 的四组关系曲线。可见 CSU-CHILL 雷达分别于 1992 年 6 月 24 日和 1994 年 6 月 20 日在科罗拉多州采集的数据曲线 3 和曲线 4 吻合得相当好。虽然 CSU-CHILL 雷达在 1994 年初更换了天线, 但对其所测的 $K_{dp} - Z_h$ 关系并无影响。比较 NCAR-CP2 雷达分别于 1987 年 8 月 7 日在科罗拉多州和 1991 年 8 月 24 日在佛罗里达州采集的数据曲线 1 和曲线 2, 可看出对于每一个固定的 K_{dp} 值, 在科罗拉多州的 Z_h 值要比相应的佛罗里达州的 Z_h 值大。这再次表明了大气微

据可得对 $\hat{A}_x$ 和 K_{dp} 的估计精度分别为 0.2 dB/km 和 $0.2 (^{\circ})/\text{km}$ 。

对 NCAR-CP2 雷达和 CSU-CHILL 雷达在佛罗里达州亚热带和科罗拉多州高原对暴雨的观测分析比较表明, 雨滴大小的概率分布的变化和平均雨滴形状与其大小的关系的变化, 会引起气象特征的显著不同。

参 考 文 献

- 1 刘力, 1996, 天气雷达的发展趋向—具有双偏振功能的多普勒雷达, *气象*, **22**(8), 49~55.
- 2 Bringi, V. N. and Hendry, A., 1990, Technology of polarization diversity radar for meteorology, in: *Radar in Meteorology, D. Atlas*, American Meteorological Society, (Chapter 19a), 153~190.
- 3 Bringi, V. N., T. A. Seliga and S. M. Cherry, 1983, Statistical properties of the dual-polarization differential reflectivity (Z_{dr}) radar signal, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-21, 215~220.
- 4 Sachidananda, M. and D. S. Zrnic, 1989, Efficient processing of alternately polarized radar signals, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **6**, 235~247.
- 5 Mueller, E. A., 1984, Calculation procedures for differential propagation phase shift, in: *Preprints, 22nd Conf. on Radar Meteorology*, Amer. Meteor. Soc., Zurich, Switzerland, 397~399.
- 6 Jameson, A. R. and E. A. Mueller, 1985, Estimation of propagation-differential phase shift from sequential orthogonal linear polarization radar measurements, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **2**, 133~137.
- 7 Illingworth, J. A. and I. J. Caylor, 1991, Co-polar correlation measurements of precipitation, in: *Preprints, 25th Conf. on Radar Meteorology*, Amer. Meteor. Soc., Paris, France, 650~653.
- 8 Xiao, R., V. N. Bringi, D. Garbriek, E. A. Mueller and S. A. Rutledge, 1993, Copolar and cross-polar pattern measurements of the CSU-CHILL antenna, in: *Preprints, 26th International Conf. on Radar Meteorology*, Amer. Meteor. Soc., Norman, 363~365.
- 9 Liu, Li, V. N. Bringi, V. Chandrasekar, E. A. Mueller and A. Mudukutore, 1994, Analysis of the copolar correlation coefficient between horizontal and vertical polarizations, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 950~963.
- 10 刘力, 1997, 一种处理多参数雷达测量数据的有效方法, *华南理工大学学报*, **25**(2), 44~50.
- 11 Balakrishnan, N. and D. S. Zrnic, 1990, Use of polarization to characterize precipitation and discriminate large hail, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1525~1540.

Application of Multiparameter Radar in Meteorological Observation

Liu Li and Deng Huaqiu

(*Electronics and Communication Engineering Department, South China University of Technology, Guangzhou 510641*)

Abstract The meteorological features and statistical characteristics of multiparameter radar in different geographical environments and different weather situations are analyzed and compared based on the time series of measurements of dual-polarized (with horizontal and vertical linear polarizations), dual-wavelength (S band and X band), Doppler weather radar in the subtropical region of the central Florida and the Colorado Plateau. The meaningful results have been obtained, which can be used as reference for the development and applications of dual-polarized Doppler weather radar.

Key words dual-polarization dual-wavelength weather radar statistical characteristics meteorological features