

## ——具有双偏振功能的多普勒雷达

刘 力

(华南理工大学无线电与自控所, 广州 510641)

## 提 要

阐述了双偏振多普勒雷达的理论基础,以 CSU-CHILL S 波段双偏振多普勒天气雷达为例,介绍了双偏振多普勒雷达的系统结构和工作原理。并以雷达测量的数据处理和分析实例说明了双偏振多普勒雷达在气象学中的应用。

**关键词:** 天气雷达 偏振 多普勒 系统结构 多参数变量

## 引 言

双偏振天气雷达是在传统的天气雷达的天线上安装一个偏振器、波导管和偏振状态切换开关,使之具有测量不同偏振反射率的功能。由于双偏振天气雷达能够提供比传统的天气雷达更多的关于降水现象的信息,它的出现使雷达在定量估计降水量的业务应用上有了突破性的进展。基于双偏振天气雷达测量数据的多参数变量估计和气象特征的分析,使雷达气象学家能够更深入地研究大气降水物理过程及其动态结构。

本文以美国的 CSU-CHILL 雷达为例,详细介绍双偏振天气雷达的系统结构和工作原理,及其改进方向,并以实例说明了双偏振天气雷达在雷达气象学中的应用。

## 1 系统结构及工作原理

CSU-CHILL S 波段双偏振多普勒雷达是由美国国家科学基金资助支持的,用于大气探测遥感的教学和科研的国家设备。经过几十年一系列的不断改进<sup>[1]</sup>,该雷达于 80 年代中被改造为具有双偏振功能的多普勒天气雷达。整套雷达系统及主要工程技术人员于 1990 年由美国的伊利诺依州(ILLinois)的芝

加哥(CHicago)迁移至科罗拉多州,并由在大气探测遥感和雷达气象学方面有较强实力的科罗拉多州立大学(CSU-Colorado State University)操作、管理、改进,开展有关教学科研活动。这就是 CSU-CHILL 雷达命名的来源。

CSU-CHILL 雷达的系统总体结构(图略)主要由发射器、接收器、和带有偏振开关及波导管的天线组成。偏振状态的发射是通过一个大功率的铁氧体环流器或“偏振开关”在水平和垂直偏振状态之间按脉冲重复时间(PRT—Pulse Repeat Time)交替地切换发射。脉冲发射之后,循环器反转以接收同偏振信号。偏振监测是用于实时测量前向和反向的隔离和插入损失。调整这个开关可使前向和反向的隔离平衡在 15—20dB,而总插入损失为 2dB 左右。插入损失比的记录还用于估计反射比  $Z_d$  的测量误差。

在系统的发射端,采用了一个频带较宽的中频功率放大器(IPA)。工作频率为 60MHz 的相位调制器以每 200ns 步进 90° 的速率来改变相位。目前正在对具有长度为 5 个编码(1 $\mu$ s 发射脉冲)的脉冲压缩技术进行

鉴定。其目标是通过距离平均(脉冲压缩后)使发射脉冲宽度等价于  $1\mu s$ , 从而增加偏振变量的独立样本数目。

在接收端,于1994年初安装了一个新的低噪声放大器,其噪声功率可达  $-114\text{dBm}$ , 并且在改进带宽和调整线性视频通道时间以及微调瞬时自动增益控制系统(IAGC)的定时等方面对接收器作了一系列改进。模拟的  $I, Q$  (分别为复数的实部和虚部)视频信号及对数信号由接收器输入到信号处理器 SP20 的模拟输入卡,通过 12 位  $10\text{MHz}$  的 A/D 转换器进行数字化处理。最近又对 SP20 模拟输入卡的视频放大器进行了升级以使视频带宽增加到  $50\text{MHz}$ 。输入卡还控制用于瞬时自动增益控制系统的可切换衰减器(0— $60\text{dB}$ , 步长为  $12\text{dB}$ ),并结合线性和对数通道为 SP20 计算模块提供浮点  $I, Q$  值。该输入卡由一个微编码控制程序控制,可灵活地选择采样速率和平均运算次数。该卡还对去直流偏压和平衡  $I, Q$  通道增益的问题提供了改进的解决办法。

信号处理器 SP20 是一个模块阵列式处理器<sup>[1]</sup>。简略地说,SP20 由两部分组成,即 SP20IA 模拟输入模块和若干相同的计算模块。它还有 3 条总线组使内部模块以  $240\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1}$  的速率通讯。每个计算模块由其各自的微编码控制。SP20 最多可装备 20 个模块。与传统的硬件处理器相比,SP20 的可编程能力使修改算法变得容易。

CSU-CHILL 雷达的天线在 1994 年初作了较大的改进,更换了一个由辐射系统公司(Radiation System, Inc.)制造的旋转抛物面反射器天线。该反射器直径为  $8.5\text{m}$ , 与同一公司制造的用于航空集散站多普勒天气雷达(TDWR-Terminal Doppler Weather Radar)的直径为  $7.6\text{m}$  的反射器相同,只是其边缘扩展了  $0.9\text{m}$ 。反射器的表面精度达  $0.5\text{mm}$ (均方根值)。双偏振喇叭是个标量喇叭,其辐射图形具有极好的旋转对称性和非

常低的交叉偏振电平。图 1 给出了天线的远程测试在  $45^\circ$  平面(即含有馈入支撑杆的平面)的归一化同偏振和交叉偏振图形。从图 1 中可见两个同偏振的主波瓣重合一致,而且旁瓣电平很低。

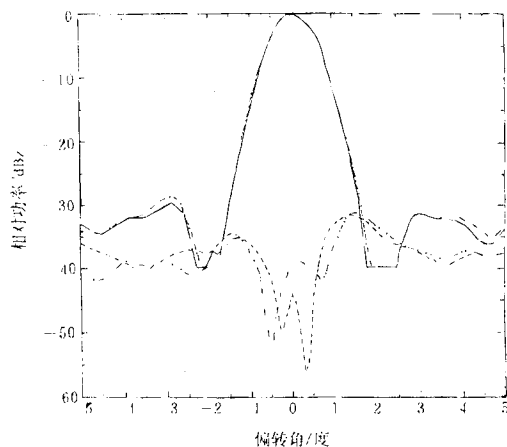


图 1 同偏振和交叉偏振在含有馈入支撑杆和波导管的  $45^\circ$  平面曲线  
实线:同偏振  $hh$ , 虚线:交叉偏振  $vh$ , 点划线:同偏振  $vv$ , 双点划线:交叉偏振  $hv$

表征天线性能的双程交叉偏振比积分  $ICPR_2$  (Integrated two-way Cross-Polar Ratio) 定义为

$$ICPR_2 = \int \frac{F_{hh} F_{vv} \sin^2 \theta d\theta}{F_{hh}^2 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

其中,  $F_{hh}$  是相对于峰值轴线功率的归一化的同偏振功率辐射曲线,而  $F_{vv}$  是相应的交叉偏振功率辐射曲线,在最坏的情况下(即  $45^\circ$  或  $135^\circ$  平面)  $ICPR_2$  优于  $-35\text{dB}$ 。而在主平面( $0^\circ$  或  $90^\circ$  平面)  $ICPR_2$  值更低,为  $-40$ — $-45\text{dB}$ 。因此这个新安装的天线可为云物理应用提供极好的线性去偏振比(LDR)数据。

为了更充分地利用由新天线提供的极好的隔离性能,CSU-CHILL 雷达将安装双发射器/双接收器系统,以便同时测量水平和垂直偏振的回波信号,使精确估计双偏振信号协方差矩阵的所有元素成为可能。这个方案是基于采用三环开关网络的单发射器/双接

收器结构的设计<sup>[2]</sup>。这种三环开关的隔离效果是单开关的两倍,但同时也使插入损失倍增。此外“微调”三环开关很难达到最佳性能,而采用双发射器/双接收器设计可避免单开关和三环开关的弊病。美国空军罗马(Rome)实验室的S波段双偏振雷达已采用这种结构。

CSU-CHILL 雷达的第二个发射器将采用 Norman 雷达发射器,并且采用高度隔离(约50dB)的双通道旋转联轴节。在接收端,将安装一个快动作开关使每个脉冲的同偏振( $hh$ 或 $vv$ )信号导通到同一接收器,从而保证 $z_{dr}$ 、 $\psi_{dp}$ 和 $\rho_{hv}$ 测量值的高精度。双发射器的设计还提供了发射任何偏振状态(如 $\pm 45^\circ$ 线性偏振)的灵活性;然而目前的设计只能测量水平( $hh$ )和垂直( $vv$ )偏振分量。

CSU-CHILL 雷达能够测量水平偏振反射率 $Z_h$ ,反射比 $Z_{dr}$ ,线性去偏振比 $LDR$ ,相位差 $\psi_{dp}$ ,双偏振互相关系数 $\rho_{hv}$ ,平均多普勒速度 $\bar{v}$ ,多普勒谱宽 $\sigma_v$ ,基于FFT变换的多普勒频谱,对应于每个脉冲的 $I$ 、 $Q$ 和 $\log P$ 的时间序列采样值。这些参数和数据由可编程的信号处理器 SP20 实时估计输出。CSU-CHILL 雷达系统性能如下:

#### ① 天线

类型:全方位可调,一次聚焦旋转抛物面反射器;

直径:8.5m;

馈入:梯形喇叭;

3dB 射线宽度:1.0°;

方向系数:45dB;

旁瓣电平(任一方位平面): $\leq -27$ dB;

交叉偏振电平(任一方位平面): $\leq -30$ dB;

辐射偏振:水平或垂直。

#### ② 发射器

类型:速调管,现代化的 FPS-18;

波长:10.7cm;

峰值功率:700—1000kW;

脉冲宽度:步长0.1 $\mu$ s,最大1 $\mu$ s;

脉冲重复时间:800—2500 $\mu$ s;

最大不模糊距离:375km;

最大不模糊速度: $\pm 34.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

#### ③ 接收器

噪声指数:0.7dB;

噪声功率:-114dBm;

典型带宽:750kHz;

传递函数:线性;

动态范围:90dB,0—60dB IAGC,步长12dB。

#### ④ 数据采集

信号处理器:SP20,由 Lassen Research 公司制造;

距离采样数:64—2048;

距离采样时间间隔:0.2 $\mu$ s 或 1 $\mu$ s;

采样速率/平均选择:微编码控制;

视频数字器:12位,置于 SP20 输入卡,用于  $I$ 、 $Q$  和

$\log P$ ;

时间序列采样能力:至多150个距离采样。

#### ⑤ 多参数变量

- 水平偏振反射率( $Z_h$ );

- 反射比( $Z_{dr}$ );

- 线性去偏振比( $LDR$ );

- 水平偏振与垂直偏振之间的相位差( $\psi_{dp}$ );

- 偏振之间互相关系数( $\rho_{hv}$ );

- 平均多普勒速度( $\bar{v}$ )和谱宽( $\sigma_v$ );

- 多普勒功率谱;

- $I$ 、 $Q$  和  $\log P$  对应于每个脉冲的采样时间序列(至多150个距离采样)。

## 2 基本参数及估算法

### 2.1 多参数变量

传播介质对偏振信号的影响主要表现在衰减差和相位移差。当雷达电磁波的传播路径中有中强雨发生时,传播影响就变得不可忽视了。对于工作频率较高的雷达,传播的衰减影响更为严重。通过协方差矩阵的元素可导出一系列双偏振天气雷达的多参数变量以及它们所受到的传播影响。

$Z_h$  为水平偏振反射率,或简称反射率,是天气雷达的最基本变量,可推知降水强度。 $Z_h$  可由下式表示。

$$\begin{aligned} Z_h &= 10 \cdot \log \left[ \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |k_w|^2} \langle |S_{hh}|^2 \rangle \right] \\ &= 10 \cdot \log \left[ \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |k_w|^2} \langle |S_{hh}|^2 \rangle \right] \\ &\quad + 4k_h^i \cdot r \cdot 10 \cdot \log e \\ &= Z_h^{\text{int}} + \alpha_h(r) \quad [\text{dBz}] \quad (2) \end{aligned}$$

其中, $Z_h^{\text{int}} = 10 \cdot \log \left[ \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |k_w|^2} \langle |S_{hh}|^2 \rangle \right]$  称为反

射率本征值,即未受传播影响的反射率; $\alpha_h(r) = 4k_h^i \cdot r \cdot 10 \cdot \log_e$  称为双程水平偏振衰减绝对值,与目标至雷达天线的距离  $r$  及传播介质有关。

$Z_{dr}$  为反射比,即水平偏振反射率与垂直偏振反射率之比,表明空中水分凝结物的形状和取向。其表达式如下:

$$Z_{dr} = 10 \log \frac{\langle |\tilde{S}_{hh}|^2 \rangle}{\langle |\tilde{S}_{vv}|^2 \rangle} = 10 \log \frac{\langle |S_{hh}|^2 \rangle}{\langle |S_{vv}|^2 \rangle} - 4(k_h^i - k_v^i)r \cdot 10 \cdot \log_e \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

式中,第一项称作反射比本征值,记为  $Z_{dr}^{\text{int}}$ ; 第二项称作双程衰减差,记为  $\alpha_{dp}(r)$ 。

$LDR$  为线性去偏振比,即交叉偏振功率与同偏振功率之比,反映散射物的形状、大小、取向或倾斜角分布(均值与方差)、湿度和成分。然而在雨介质中对  $LDR$  的估计会受到衰减差的影响,即

$$LDR = 10 \log \frac{\langle |\tilde{S}_{vh}|^2 \rangle}{\langle |\tilde{S}_{hh}|^2 \rangle} = 10 \log \frac{\langle |S_{vh}|^2 \rangle}{\langle |S_{hh}|^2 \rangle} + 2(k_h^i - k_v^i)r \cdot 10 \cdot \log_e \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

式中,第一项称为线性去偏振比本征值,记作  $LDR^{\text{int}}$ ; 而第二项叫作单程衰减差,记为  $\alpha_{dp}(r)$ 。

$\varphi_{dp}$  为相位差,即水平偏振回波信号与垂直偏振回波信号的相位角之差,定义为:

$$\varphi_{dp} = \arg[\langle \tilde{S}_{vv} \tilde{S}_{hh}^* \rangle] = \arg[\langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle] + 2(k_h^r - k_v^r)r = \delta + \varphi_{dp}(r) \quad [\text{rad}] \quad (5)$$

其中,  $\delta$  称为反射相位差,可用于区别有特定取向的冰雹。但对于雨介质来说,  $\delta$  的值接近于零。上式中的  $\varphi_{dp}$  称为双程传播相位差,其变化率反映了传播介质颗粒的形状。由于雨点的形状为扁球形,电磁波在雨介质中传播时就会有附加的偏振相位移差。由于在雨介质中  $k_h^r \gg k_v^r$ ,  $\varphi_{dp}(r) = 2(k_h^r - k_v^r)r$  在理论上是单调不减的距离函数。由  $\varphi_{dp}(r)$  的斜率我们可导出一个重要的参数:比相差  $K_{dp}(r)$ , 即

$$K_{dp}(r) = \frac{\varphi_{dp}(r) - \varphi_{dp}(r - \Delta r)}{2 \cdot \Delta r} \quad [\text{rad/km}] \quad (6)$$

比相差  $K_{dp}(r)$  对估计降雨速率非常有效。下式为一个估计降雨速率  $R$  的经验公式<sup>[3]</sup>:

$$R = 40.5 K_{dp}^{0.85} \quad [\text{mm/hr}] \quad (7)$$

$\rho_{hv}$  为水平偏振回波信号与垂直偏振回波信号的互相关系数幅值。 $\rho_{hv}$  对估计冰雹大小、提高降雨量的估计精确度,以及探测对流结构或层状结构的空中水分凝结物溶化层都有不可忽视的作用<sup>[4-7]</sup>。不难证明,若传播介质的主轴为水平和垂直方向,  $\rho_{hv}$  不受传播效应的影响,即

$$\rho_{hv} = \frac{|\langle \tilde{S}_{vv} \tilde{S}_{hh}^* \rangle|}{[\langle |\tilde{S}_{hh}|^2 \rangle \langle |\tilde{S}_{vv}|^2 \rangle]^{0.5}} = \frac{|\langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle|}{[\langle |S_{hh}|^2 \rangle \langle |S_{vv}|^2 \rangle]^{0.5}} \quad (8)$$

## 2.2 参数估计算法

目前大多数双偏振多普勒雷达结构为单发射器/单接收器,如 CSU-CHILL 雷达,其工作方式为交替地发射水平偏振和垂直偏振的电磁波,并接收其相应的同偏振回波信号。图 2 是回波采样信号时间序列示意图,其中  $H_i$  和  $V_j$  分别为水平( $H$ )和垂直( $V$ )偏振回波信号的复数采样值。根据雷达接收在距离  $r$  处的被测分辨体的回波信号采样数据  $\{H_i\}$  和  $\{V_j\}$ , 可估计如下各基本参数。

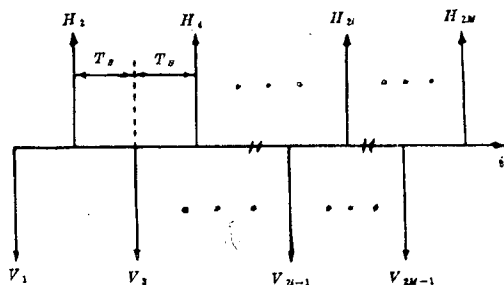


图 2 单发射/单接收双偏振雷达回波采样信号时间序列示意图

首先估计水平和垂直偏振平均功率  $P_{hh}$  和  $P_{vv}$ :

$$\hat{P}_{hh} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |H_{2i}|^2 \quad (9)$$

$$\hat{P}_{vv} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} |V_{2i+1}|^2 \quad (10)$$

根据雷达方程,可得水平偏振反射率  $Z_h$  的估计值:

$$\hat{Z}_h = 10\log(\hat{P}_{hh}) + 20\log(r) - R_c \quad (11)$$

其中  $r$  为雷达天线至被测分辨体的距离,  $R_c$  为雷达常数。

研究表明<sup>[8]</sup>,反射比  $Z_{dr}$  的平方律估计为最佳估算法,即

$$\hat{Z}_{dr} = 10\log\left[\frac{\hat{P}_{hh}}{\hat{P}_{vv}}\right] = 10\log\frac{\sum_{i=1}^M |H_{2i}|^2}{\sum_{i=0}^{M-1} |V_{2i+1}|^2} \quad (12)$$

相位差  $\hat{\psi}_{dp}$  和平均多普勒速度  $\bar{V}$  可由下式估计<sup>[9],[10]</sup>:

$$\hat{\psi}_{dp} = \frac{1}{2} \arg(\hat{R}_a \hat{R}_b^*) \quad (13)$$

$$\bar{V} = \frac{\lambda}{8\pi T_s} \arg(\hat{R}_a \hat{R}_b) \quad (14)$$

其中,  $\arg(\cdot)$  表示复数的幅角; \* 代表复数的共轭;  $\lambda$  是雷达电磁波波长;  $T_s$  是发射脉冲重复时间间隔;  $\hat{R}_a$  和  $\hat{R}_b$  为自相关函数,分别定义如下:

$$\hat{R}_a = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} H_{2i} V_{2i+1}^* \quad (15)$$

$$\hat{R}_b = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} V_{2i+1} H_{2i+2}^* \quad (16)$$

对同偏振互相关系数  $\rho_{hv}$  的估计有多种算法<sup>[11]</sup>。研究表明<sup>[12]</sup>,在所观察到的大气降水现象中,约有 75% 的被测信号的功率谱呈高斯形状。在假设高斯谱的前提下,  $\hat{\rho}_{hv}$  可由下式估计<sup>[13]</sup>:

$$\hat{\rho}_{hv} = \hat{\rho}_{hv}(0) = \frac{\hat{\rho}_{hv}(T_s)}{[\hat{\rho}(2T_s)]^{0.25}} \quad (17)$$

其中

$$\hat{\rho}_{hv}(T_s) = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} H_{2i} V_{2i+1}^*}{\left[ \sum_{i=1}^{M-1} |H_{2i}|^2 \sum_{i=1}^{M-1} |V_{2i+1}|^2 \right]^{0.25}}$$

$$= \frac{|\hat{R}_a|}{[\hat{P}_{hh} \hat{P}_{vv}]^{0.5}} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \hat{\rho}(2T_s) &= \hat{\rho}_{hh}(2T_s) = \hat{\rho}_{vv}(2T_s) \\ &= \frac{|\sum_{i=1}^{M-1} H_{2i} H_{2i+2}^*|}{\sum_{i=1}^{M-1} |H_{2i}|^2} = \frac{|\sum_{i=1}^{M-1} H_{2i} H_{2i+2}^*|}{MP_{hh}} \end{aligned} \quad (19)$$

若雷达系统采用双发射器/双接收器,即可以同时发射并接收双偏振信号(如图 3 所示),则对以上各参数的估计算法就简单直观

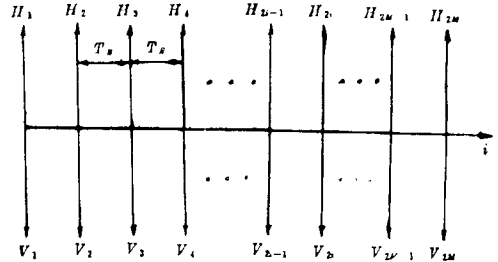


图 3 双发射/接收雷达回波采样信号时间序列示意图

了,可改进为下列各式:

$$\hat{P}_{hh} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_i|^2 \quad (20)$$

$$\hat{P}_{vv} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_i|^2 \quad (21)$$

$$\hat{Z}_{dr} = 10\log\frac{\sum_{i=1}^N |H_i|^2}{\sum_{i=1}^N |V_i|^2} \quad (22)$$

$$\hat{\psi}_{dp} = \arg\left(\sum_{i=1}^N H_i^* V_i\right) \quad (23)$$

$$\hat{V} = \arg\left(\sum_{i=1}^N H_i^* H_{i+1}\right) = \arg\left(\sum_{i=1}^N V_i^* V_{i+1}\right) \quad (24)$$

$$\hat{\rho}_{hv} = \frac{1}{N} \frac{|\sum_{i=1}^N H_i^* V_i|}{[\hat{\rho}_{hh} \hat{\rho}_{vv}]^{0.5}} \quad (25)$$

### 3 应用实例

图 4 所示的多参数变量距离曲线是根据 CSU-CHILL 雷达于 1994 年 6 月 20 日的部分采样数据的处理结果,当时雷达的仰角为

5°,其波束穿过位于科罗拉多州立大学大气系附近的冰雹阵的中心(距雷达约46km)。图4a中的 $Z_h$ 和 $Z_{ds}$ (虚线)分别称为水平偏振反射率和反射比;图4b中的 $\psi_{dp}$ 叫作相位差;图4c中的 $\rho_{hv}$ 是双偏振互相关系数。这些是双偏振雷达的基本参数,其定义、物理意义及估计算法已给出,这些基本参数的距离曲线是根据式(9)~(19)分别对每个距离波门(间隔为250m)的采样数据时间序列直接估算、并经IIR(Infinite Impulse Response,无限脉冲响应)低通滤波以衰减高频空间(径向)波动分量。双程传播相位差 $\varphi_{dp}$ (图4b中的虚线)、比相差 $K_{dp}$ (图4a中的点划线)和反射体相位差 $\delta$ (图4c中的虚线)都是相位差 $\varphi_{dp}$ 的派生参数,其表达式及其相互关系由式(5)和(6)给出。 $\varphi_{dp}$ 是通过 $\psi_{dp}$ 的距离曲线作自适应滤波<sup>[14]</sup>而得,而 $K_{dp}$ 是 $\varphi_{dp}$ 的半斜率, $\delta$ 则是 $\psi_{dp}$ 和 $\varphi_{dp}$ 之差。综合分析图4所示的各参数曲线,可见主要的气象特征中心位于距离45.5km处: $\rho_{hv}$ 低达0.75, $\delta$ 低达-13°, $Z_{ds}$ 约为3~5dB。 $\delta$ 在离地面3.9km高处(此例中雷达波束在距离45km处的高度是3.9km)恒呈负值。由于雷达的工作波长为10cm(S波段),计算结果表明<sup>[15]、[16]</sup>,直径为8~

16mm的水衣扁球颗粒可使 $\delta$ 取值范围为-10~-15°。 $\rho_{hv}$ 取极小值是因为 $\delta$ 的分布为降水颗粒大小的函数。事实上,计算表明,当降水颗粒直径 $\geq 16$ mm时, $\delta$ 值改变符号而取正值。 $Z_{ds}$ 在约46km处突然由4dB降至0dB,表明在46km以外有冰雹出现。 $K_{dp}$ 在46.5km处达到其峰值3.5°/km,表明了主要的降水成分为雨点夹冰雹。

#### 4 结 语

已有10年发展历史的双偏振技术在天气雷达中的应用在进入90年代以来日趋成熟完善。美国、加拿大、英、法、德等发达国家的气象部门对这项新技术都非常重视,并投资研制、改进具有双偏振功能的多普勒天气雷达。尤其是美国,开展对双偏振技术的研究最早,所拥有的双偏振雷达也最多,在其下一代天气雷达(NEXRAD)的设计中,曾考虑过增加双偏振功能,但由于在80年代未定型时,双偏振技术尚不成熟,因此用于天气雷达观测网的WSR-88D雷达并不具备双偏振功能。

总之,可测量降水物相态的双偏振技术是一个值得关注的天气雷达的发展趋向。随着我国国民经济的高速发展和科学技术的进步,有必要也将有能力对我国的天气雷达更新换代,赶上国际先进水平,提高对突发性、灾害性天气监测、警报和预报的准确率和及时性,以避免或减少自然灾害对国家经济和人民生命财产的损失。

#### 参 考 文 献

- 1 Brunkow, D. A. and R. Lee. CHILL data system. Preprints, 23rd Radar Meteorology Conference, 1986. AMS, JP354-DP356.
- 2 Metcalf, J. I., A. W. Bishop, R. C. Chanley, T. C. Hiett and P. J. Petrocchi. An 11cm coherent polarimetric radar for meteorological research. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993, 10: 249-261.
- 3 Chandrasekar, V., V. N. Bringi, N. Balakrishnan and D. S. Zrnice. Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall, Part III: Specific difference

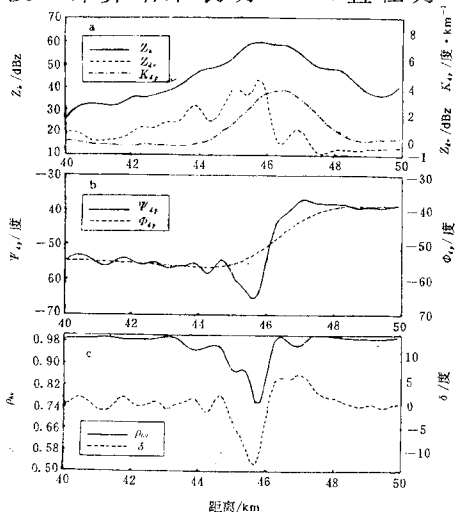


图4 1994年6月20日由CSU-CHILL雷达观测到的一个冰雹阵的多参数距离曲线

- phase. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7: 621—629.
- 4 Balakrishnan, N and D. S. Zrnic. Use of polarization to characterize precipitation and discriminate large hail, *Journal of Atmospheric Science*, 1990, 47: 1525—1540.
  - 5 Jameson, A. R. . The interpretation and meteorological application of radar backscatter amplitude ratios at linear polarizations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, 6: 908—919.
  - 6 Zrnic, D. S. , V. N. Bringi, N. Balakrishnan, K. Aydin, V. Chandrasekor and J. Hubbert. Polarimetric measurements in a severe hailstorm. *Monthly Weather Review*, 1993.
  - 7 Illingworth, J. A. and I. J. Caylor. Co-polar correlation measurements of precipitation. Preprints, 25th Conference on Radar Meteorology, America Meteorology Society, Paris, France, 1991; 650—653.
  - 8 Bringi, V. N. , T. A. Seliga and S. M. Cherry. Statistical properties of the dual-polarization differential reflectivity ( $Z_{dr}$ ) radar signal. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, GE—21; 215—220.
  - 9 Mueller, E. A. . Calculation procedures for differential propagation phase shift. Preprints, 22nd Conference on Radar Meteorology, America Meteorology Society, 1984, Zurich, Switzerland, 397—399.
  - 10 Doviak, R. J. and D. S. Zrnic. Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press, 1993.
  - Liu, Li, V. N. Bringi, V. Chandrasekar, E. A. Mueller and A. Mudukutore. Analysis of the Dopolar Correlation Coefficient between Horizontal and Vertical Polarizations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11: 950—963.
  - 12 Janssen, L. H. and Van der Spek. The shape of Doppler spectra from precipitation. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic System*, 1985, AES—21; 208—219.
  - 13 Sachidanda, M. and D. S. Zrnic. Efficient processing of alternately polarized radar signals. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, 6: 235—247.
  - 14 Hubbert, J. , V. Chandrasekar, V. N. Bringi and P. Meischner. Processing and interpretation of coherent dual-polarized measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993, 10: 155—164.
  - 15 Aydin, K. and Y. Zhao. A computational study of polarimetric radar observables in hail. *Transaction IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28: 412—421.
  - 16 Zrnic, D. S. , V. N. Bringi, N. Balakrishnan, K. Aydin, V. Chandrasekar and J. Hubbert. Polarimetric measurements in a severe hailstorm. *Monthly Weather Review*, 1993, 121: 2223—2238.

## The Developing Trend of Weather Radar ——Dual-Polarized Doppler Weather Radar

Liu Li

(South China University of Technology, Guangzhou, 510641)

### Abstract

The system structure of dual-polarized Doppler weather radar and its working principle are introduced. Some examples of data processing based on CSU-CHILL S-band dual-polarized Doppler weather radar measurements are illustrated, and the application to meteorology is interpreted.

**Key Words:** weather radar dual-polarized system structure data process multi parameter variable