

线-圆偏振波天气雷达的改装及初步观测结果*

徐宝祥 吕应刚 张鸿发 叶宗秀 蔡启铭**

(中国科学院兰州高原大气物理研究所)

提 要

本文简要叙述了使用交替发射线-圆偏振波的天气雷达识别云中大粒子区的基本原理,介绍了采用传输型金属板圆偏振器方案改装雷达的试验及观测结果。资料表明在两种偏振状态下,强回波中心所处高度不同,回波分布特征存在差异。该雷达能够提供云中水成物粒子的新信息,但还需要改善雷达性能。

一、引 言

雷达在气象上的应用是建立在气象目标物对电磁波的散射特性的基础之上的。电磁波不仅有强度特性,而且有偏振特性,通常用电场矢量端点在与波传播方向相垂直的平面内所描绘的轨迹来表示电磁波的偏振状态,依其矢端轨迹为直线、圆和椭圆,偏振波可分为线、圆和椭圆偏振波。普通天气雷达发射线偏振波,只能得到目标物散射强度的信息,而丢失了散射波的偏振信息。实际上,在散射过程中,电磁波的偏振状态会发生变化,即产生退偏振现象。退偏振不仅与发射波的偏振状态以及频率有关,而且与散射粒子的性质,如介电常数、体积以及几何形状等有关。研究大气水成物粒子(如雨滴、冰雹、雪花、冰晶等)对线、圆偏振波的散射之退偏振和相位特性,可以提供关于粒子形状、尺度、热力状态和空间排列方式等方面的信息,并且进而可以研究各种类型风暴结构,这对于识别云中冰雹形成、生长区有一定价值^[1-5]。为此,我们将一部波长为三公分,发射水平线偏振波的常规天气雷达改装为交替发射线、圆偏振波的天气雷达,并于 1980 年夏季在甘肃省平凉地区进行了观测。

二、用线-圆偏振波天气雷达识别云中 大粒子区的基本原理

一般说来,当雷达发射某一偏振状态电磁波时,目标物的后向散射场可以看作由平行分量(主分量,即与发射波偏振状态相同)和正交分量两部份组成。水平线偏振发射时,散射波中正交分量是垂直线偏振波,主分量仍是水平线偏振波。右旋圆偏振发射时,散射波中正交分量是指右旋圆偏振波,主分量是左旋圆偏振波。通常,规定散射波中正交分量与主分量之比为退偏振比,球形粒子退偏振比为零,非球形粒子的退偏振比不为零。

从五十年代开始,雷达气象学家就试图利用散射波的退偏振现象来研究云雨粒子的非球形性质,并走过了曲折的道路。近十年来,由于高精度圆偏振雷达和多普勒-圆偏振

* 本文于 1982 年 11 月 15 日收到, 1983 年 6 月 27 日收到修改稿。

** 参加本工作的还有李银海、王致君等同志。

联合雷达试验的成功结果引起了越来越多的科学家的关注。已有的资料表明^[5-7]，可以用大气水成物粒子对圆偏振波散射的退偏振比值（CDR）来研究散射粒子的形状特征和热力相态，利用水成物粒子形状与其尺度间的关系，可得到粒子大小的信息，在获得或假设粒子谱分布后，则可得到降水量的资料，而无须进行绝对功率测量。

一般说来，退偏振比的测定须用具有双通道偏振分集天线系统，以同时测定粒子对圆偏振发射波后向散射的正交分量和主分量。对于没有偏振分集系统的天气雷达，则可以使其交替发射线、圆偏振波，然后在尽可能短的时间内分别接收粒子对线偏振波的后向散射主分量（相应接收功率记作 $P_{L||}$ ）和对圆偏振波的后向散射正交分量（ $P_{C\perp}$ ），用其比值（记作 $DR = 10 \lg \frac{P_{C\perp}}{P_{L||}}$ ）来给出退偏振信息。

Atlas 和 Barge 等人已详细讨论了小粒子情况下，入射波和散射波均为线偏振和均为圆偏振时的退偏振比（即 LDR 和 CDR）的计算方法^[1,8]，他们推得的表达式也可用于计算 DR 值，对波长为 3.2 厘米和不同椭度的旋转椭球体，我们计算了该值，其结果示于图 1。这里的椭度指的是旋转椭球体对称轴长度与旋转圆直径之比。优势取向对扁椭球指对称轴沿垂直方向时，对长椭球指对称轴在水平面上（随机取向）。

由于在圆偏振状态工作时，雷达发射并非理想圆偏振波，特别是在偏离雷达波束轴向处的电磁波偏振性能更差，因此，变形较小的粒子将不能被雷达所识别，这就限制了用圆偏振技术识别非球形粒子的应用范围。考虑到云中水成物粒子大小具有一定谱分布，显然，只有当众多非球形粒子（通常即较大尺度粒子）达到一定程度后才能够反映出来。假设粒子遵从 Marshall-Palmer 分布，通常较大雨滴在大气中多呈扁椭球形，其椭度与雨滴大小间的关系可用下式表示^[9]：

$$\rho = 1 - gD$$

其中： ρ 为粒子最小与最大尺度之比值， D （毫米）为粒子等体积球直径， g 为比例系数，于是可以计算雨滴集合体的有效椭度 $\rho_{\text{有效}}$ ，

$$\rho_{\text{有效}} = \frac{\int_0^{\infty} \rho D^6 N_D dD}{\int_0^{\infty} D^6 N_D dD} = 1 - \frac{7g}{A}$$

其中： A 为 $M-P$ 分布中与降雨强度 R （毫米/小时）有关的常数。依此计算不同雨强下的 $\rho_{\text{有效}}$ 值表明它随着雨强的增加而从 1 缓慢减小，比如， $R = 25$ 毫米/小时， $\rho_{\text{有效}} = 0.85$ ，其相应的退偏振比大约是一 20 分贝。这说明单纯由水滴组成的云体之退偏振量不会很大。不过如果在云体中出现冰雹，由于冰雹偏离球形可以很大，例如，根据[1]其极端椭度值可达 0.3，显然这种云的退偏振量要比雨云大得多。

根据甘肃平凉地区测得的资料，该地区雹谱有时扩展较宽，冰雹最大尺度可为最小尺度的六倍，最大冰雹直径可达 6 厘米。分析 1977 年 6 月 4 日和 25 日在平凉地区收集到的 139 个和 120 个雹块的形状后，发现直径 2 厘米以下的雹块多为圆球形，直径 2 厘米以上的较大雹块则多呈椭球形，圆球形的仅占 20% 左右，椭球形、圆锥形等非球形雹块占大多数，特别是其中还有相当数量的是远远偏离圆球形的十分不规则形状的雹块，有的长短轴比极端值可达 0.58。这说明平凉地区降雹在雹块形状方面的特征是显著的，有利于应

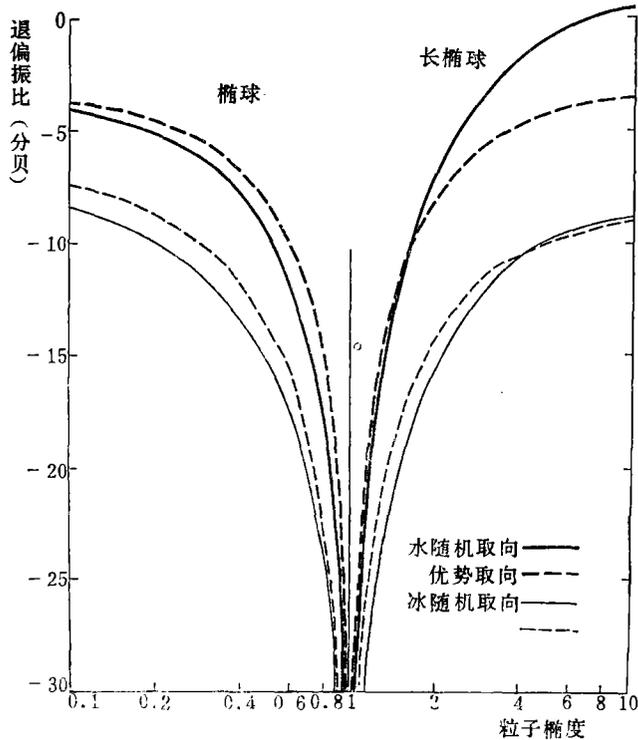


图 1 交替发射线、圆偏振波时,水和冰椭球的退偏振比计算曲线

用圆偏振技术来研究冰雹。

三、雷达的改装与标定

基于上述原理,我们在天线馈源喇叭口外面安装了一个可以旋转的偏振器,把一部三分水平线偏振雷达改装成线-圆偏振波雷达。

1. 圆偏振器的设计与测试

发射圆偏振波必须满足两个条件:(1) 电场矢量在与波传播方向相垂直平面内的两个直角分量振幅相等;(2) 该两分量变化角频率相同,且其间相位差为 $\frac{\pi}{2}$ 。

如果把一组金属片沿传播方向平行地排列在与喇叭口面相平行的平面上,两两之间距离相等,那么它们对电场矢量与之相垂直的电磁波基本没有影响,但将导致电场矢量与之相平行的电磁波以大于自由空间波长的波导波长向外传播,即金属片组将使得相应于两个相互垂直方向上偏振的电磁波之间出现相位差。这样,只要把金属片组放在与发射波电场矢量成 45° 角的位置上(保证两分量振幅相等),适当调节金属片沿传播方向的宽度和两两之间的距离(保证相位差为 $\frac{\pi}{2}$),就可以实现发射圆偏振波的目的。

按照微波天线理论,综合考虑金属片形成的波导区与自由空间区结合面的边缘效应^[10],经过测试比较,我们所用圆偏振器是在聚苯乙烯基座上平行插入三片彼此平行、表面镀银的薄铜片。铜片形状为半圆形,厚度为0.3毫米,宽度为32毫米,两两间距为

22.4 毫米。天线安装好后在天线测试场对圆偏振天线初级与次级 E 面、 H 面方向图和天线反射体张角内的偏振性能等进行了测量。

改装后,雷达可以分别在两种偏振状态下工作:(1) 发射水平线偏振波,雷达接收后向散射主分量($P_{L||}$);(2) 发射右旋圆偏振波,雷达接收右旋圆偏振波即后向散射的正交分量($R_{c\perp}$)。该两量之比值就是退偏振比。

2. 天线结构

原雷达天线是具有直径为 2 米的旋转抛物面反射体的前馈角锥喇叭式天线。经过次级测试确定了偏振器距离喇叭口面的数值。偏振器与角锥喇叭具有共同的轴线,且在微型电机带动下可依该轴旋转,通过雷达主控台上的控制系统可以调节偏振器随意停在 90° 和 45° 两个位置上,相对应地雷达分别发射水平线偏振波和右旋圆偏振波,线、圆转换时间大约 1 秒钟。为了能在恶劣天气条件下工作,圆偏振器及微电机外面装有聚苯乙烯防护罩。

3. 雷达标定

标定线-圆偏振波天气雷达,除了要进行普通雷达的常规项目外,还要有两项工作:(1) 两种偏振状态下的天线参数;(2) 雷达的圆偏振性能,包括对点目标的抑制值和对集体分布目标的积分抑制值。

测得的改装前后的天线参数见表 1。可以看出,由于增益和波瓣宽度变化,使得改装后线偏振状态下,雷达整机灵敏度下降 7.6 分贝,这相应于雷达探测距离要减少 58%,圆偏振发射时还要降低 1.1 分贝左右。

表 1 雷达天线参数对照表

偏 振 状 态		天线增益 (分贝)	水平波瓣 (度)	垂直波瓣 (度)	交叉偏振 (分贝)	发射椭圆轴比 (分贝)
改 装 前	线	41.5	1.5	1.5	-33	
偏振器位置	90°	37.5	1.65	1.5	-21	
	45°	36.5	1.75	1.6		0.92

为了得到圆偏振状态下雷达对点目标的抑制值,我们在距离雷达 3.5 公里处,用系留气球把标准反射体(直径约 26 厘米的空心铝球)升到高度 550 米的空中,由此测出在波束轴向相应抑制值是 -19 分贝。按照在雷达波束中各网格点实际测到的发射电磁波的偏振椭圆数据,计算积分抑制比为 -15 分贝。

改装后,雷达整机稳定,馈电喇叭与偏振器间未发生打火现象,连续工作运转正常,在理想情况下,偏振器位置偏差 0.5 度时,发射波偏振椭圆轴比将变坏 0.15 分贝,我们设计的偏振器在线、圆转换时的定位误差要求不超过 ± 0.2 度,实测偏振椭圆表明该项误差更小。

此外,根据标定数据计算线偏振发射时云体的雷达反射率因子 z_e 值与同时观测的另一部五公分雷达所得结果是相一致的。

四、观测结果和讨论

1980 年夏季,我们在甘肃平凉使用这部线-圆偏振波雷达对几次雷雨云过程进行了观测试验,这些云在地面都产生了中等降水,但均无降雹。图 2 是一次雷雨云过程中,用线和圆偏振发射状态下取得的雷达 PPI 照片素描图。最外面的等值线为 10 dbz,往里每条等值线增加 10 dbz,线偏振观测时,雷达站西南 30 公里处有一 M 回波,其最大强度不

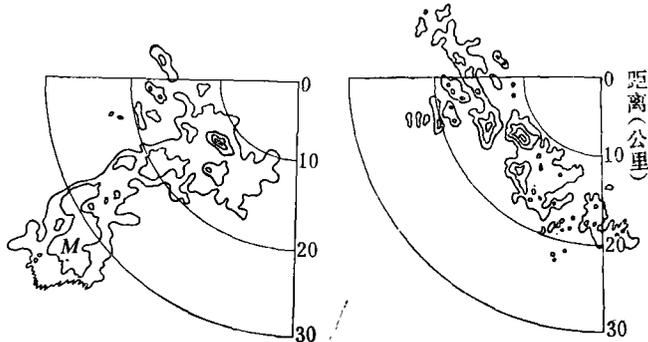


图 2 两种偏振状态下云区与地物回波的变化

(1980 年 7 月 18 日 15 时 45 分—47 分、PPI、仰角 2.5°。(左)线偏振,(右)圆偏振)

到 30 dbz,是较弱的雷雨云回波,圆偏振观测时看不到这块云。根据前面的叙述与分析,这块云对圆偏振发射产生的回波的积分抑制比小于-15 分贝。这一数值与国外的一些观测结果是一致的。在图 2 的 10—20 公里范围内有一大片地形回波,比较两张图形可以看出,地形对于圆偏振波可以产生很强的垂直分量反射波,虽然我们还不能明确指出其原因,但估计与地形形状十分不规则、覆盖情况复杂多样有关,于是对圆偏振波来说地形好象是一些对称性很差的反射体。至于圆偏振回波图片上出现了一些线偏振时没有的地形回波,估计是由于圆偏振发射时天线波瓣比线偏振时更宽造成的。

图 3 是 7 月 11 日取得的 RHI 图片,线偏振回波 A 离地高度约 1 公里,估计已是降雨回波,其强度达 40 dbz,但相应的圆偏振回波很弱,小于 20 dbz。因此可以认为,降雨主要由中等大小以下的粒子组成,它们的形状比较接近球形。回波 C 是雷雨云的前悬回波,通常由小粒子构成,在圆偏振的相应位置无此回波是很自然的。值得注意的是,圆偏振回波中心 B 离地高度 3.3 公里,强度达 30 dbz,而相应的线偏振回波仅 20 dbz。根据平凉雷达站的高度,这块回波已处于 0°C 层以上, B 区内已可能形成冰晶,甚至小冰雹,由于它们形状的不规则会造成较强的圆偏振反射。此外,回波 D 是一新生单体(或称为供给云),其圆偏振回波达 20 dbz,说明此处已包含一部分变形较大的雨滴。

图 4 是 7 月 26 日下午 16 点左右雷达站西南方向出现的一次雷暴回波带。在低仰角 PPI 上已形成一排东北-西南取向的五个线偏振回波中心,它们的强度都到达 30 dbz,然而相应的却仅有三个 10 dbz 的孤立圆偏振回波,可以推断此时的降雨均不会很强,只是在较高处已形成较大的粒子区,因为通过回波 F 的 RHI 剖面表明,其回波中心已达到 30 dbz。

以上是利用改装的圆偏振波雷达试验观测时取得的几次资料及所作的分析,由于发

射的圆偏振波的短轴与长轴之比只有 0.92, 其积分抑制比仅为 -15 db, 只有当云中出现较多的变形大粒子时, 圆偏振回波才能显示出与线偏振回波不同的特征来。而且, 由于我

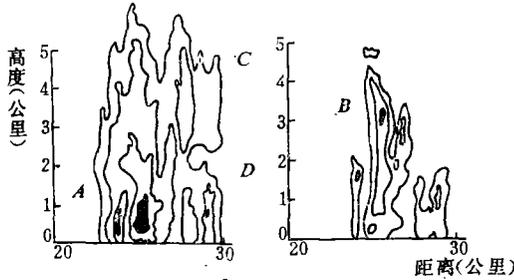


图 3 线-圆偏振强回波中心的变化

(1980年7月11日17时01分—03分, RHI, 方位 259° , 左: 线偏振, 右: 圆偏振。)

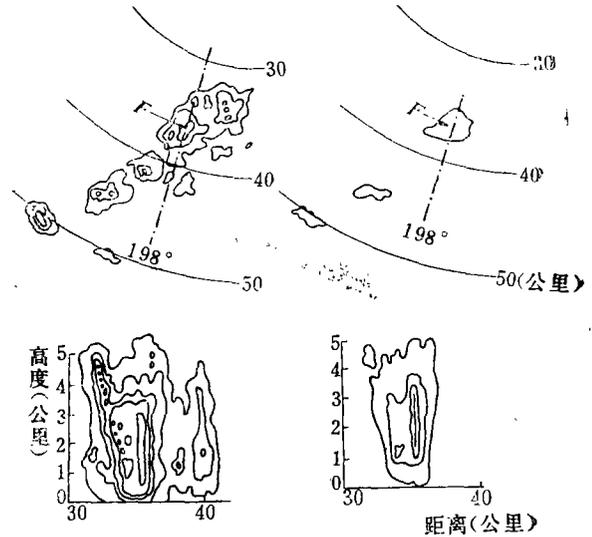


图 4 两种偏振回波的对比

(1980年7月26日, PPI 16时00分—01分, 仰角 2.5° , 方位 198° ; RHI 16时02分—04分, 方位 198° ; 左: 线偏振, 右: 圆偏振。)

们缺乏其它云物理观测手段的配合, 结果的分析只能是一些推断。不过无论如何, 圆偏振雷达技术在我国气象上的试验与使用是十分必要的。近十年来, 国外的一些雷达气象学家已开始重视发展这一技术, 并已取得令人鼓舞的结果^[6,7]。本工作可为我们进一步发展完善的圆偏振雷达提供一些参考资料。

致谢: 本工作得到了长风机器厂程盛昌同志的热情帮助, 西北电讯工程学院黄立伟同志、安昌机械厂周奇石同志提出了许多有益的建议, 北京大学地球物理系赵柏林教授给予了热情的指导, 在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Barge, B. L., Hail Detection with a Polarization Diversity Radar, ph. D. Thesis, Dept. of Meteor., McGill University, Montreal, 1—81, 1972.
- [2] Hendry, A. and G. C. McCormick, Radar Observation of the Alignment of precipitations by Electrostatic Fields in Thunderstorm. *J. Geophysical Research*, 81, No.30, 5353—5357, 1976.
- [3] Metcalf, J. I. and J. D. Echard, Coherent Polarization-Diversity Techniques in Meteorology, *J. Atmos.* 35, No.10, 2010—2019, 1978.
- [4] С. П. Моргунов, А. Б. Шуляцкий, Оценка эффективности искусственных возмущений по поляризационным характеристикам эхо-сигнала, *Труды ЦАО*, вып. 57, 49—54, 1964.
- [5] Barge, B. L. and R. G. Humphries, Identification of Rain and Hail with Polarization and dual-Wavelength Radar. 19th conf. on Radar Meteor., Amer. Meteor. Soc. 507—516, 1980.
- [6] Metcalf, J. I., Coherent Polarization-Diversity Radar Concepts and Applications, *Atmospheric Technology* No.13, 22—32, 1981.
- [7] Bringi, V. N. et al., Dual-Polarization Radar: Techniques and Applications, *Atmospheric Technology*, No.13, 33—45, 1981.
- [8] D. Atlas, M. Kerker and W. Hitschfeld, Scattering and Attenuation by Non-spherical Atmospheric

Particles, *J. Atmos. and Terres. Phys.*, 3, 108—119, 1953.

[9] Boston, P. C., Power law relations for Polarization Diversity Fadar, *J. Appl. Meteor.*, 10, No. 5, 1043, 1971.

[10] 周奇石, 袁蔚初, 一种宽频带传输型圆极化器的试制, 安昌科技, 1976年, 第二期。

THE SETTING AND PRELIMINARY OBSERVATION OF A WEATHER RADAR WITH LINEAR-CIRCULAR POLARIZATION RADIATIONS

Xu Baoxiang, Lü Yinggang, Zhang Hongfa,
Ye Zongxiu, Cai Qiming

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper the fundamental principles for detecting the larger particles in clouds, using a weather radar with linear-circular polarization radiations, have been briefly described. The experiments of developing the polarized radiation by adopting a transmission-plate-polarizer and primary results of observation have been described. The data obtained in Pingliang area show that there are differences in heights of intensive echo centers and features of echo between the two transmitted radiations.