

# 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究<sup>\* 1</sup>

仲凌志<sup>1</sup> 刘黎平<sup>1</sup> 葛润生<sup>1</sup> 冯 胜<sup>2</sup>

ZHONG Lingzhi<sup>1</sup> LIU Liping<sup>1</sup> GE Runsheng<sup>1</sup> FENG Sheng<sup>2</sup>

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

2. 北京无线电测量研究院,北京,100081

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100081, China*

2009-03-30 收稿, 2009-06-03 改回。

**Zhong Lingzhi, Liu Liping, Ge Runsheng, Feng Sheng. 2011. A study of the calibration of the new generation of millimeter-wavelength cloud radar (HMBQ) and its detection capability. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(2):352-362**

**Abstract** An 8.6 mm wave-length cloud radar with Doppler and polarization capabilities in China is introduced, including its design, parameters, calibrations and applications in measuring clouds. This study is threefold: to expatiate on the method how to test hardware parameters of the transmitter and the receiver with external instruments, to test the calibration and results of the dynamic range about the radar echo power, and to research the capability of the millimeter-wavelength cloud radar in observations via both theoretical computation and comparative study of practical data with the other two SA weather radars (10 cm wave-length) in the field experiment. The main conclusions to be drawn from this paper are the following: (1) the precision of the radar parameters can generally satisfy observing and researching needs; (2) some technologies such as the coherence accumulation and the pulsating compression are applied to this radar, which enables its minimum detectable echo intensity at 10 km away from radar to arrive at about -40 dBz; (3) the echo intensity calibration of the millimeter-wavelength cloud radar is almost in agreement with that of the SA radar, though either one has its respective advantages and shortcomings. For example, the millimeter-wavelength cloud radar has higher sensitivity than SA radar does for the non-or-weak precipitating cloud, and the SA radar has less attenuation than the millimeter-wavelength cloud radar for the severe precipitating cloud or the cloud with high water content. Hence, in many cases, we need to first make decision whether we should use cloud radar only or should combine other equipments as well.

**Key words** Cloud radar, Calibration, Detection capability

**摘 要** 毫米波测云雷达是中国自主研发的一部双线偏振全相干 8.6 mm 波长的测云雷达。本文在介绍该雷达系统的参数和技术特点的同时;重点阐述了厂家用外接仪表对该雷达天线系统、发射机系统以及接收机系统等硬件参数进行测试的方法,检验了雷达回波功率动态范围的定标和测量参数的定标结果;并从理论计算、配合试验区域内另外两部 10 cm 波长的天气业务雷达实际探测的资料进行对比,这从另一个方面对毫米波测云雷达的探测能力进行了研究。得出以下结论:(1) 毫米波测云雷达的标定精度基本满足使用要求。(2) 该雷达在引入脉冲压缩技术的同时,使用了全相干积累方法,在距离雷达 10 km 处能探测到粒子的最小强度为 -40 dBz;此外,该雷达还具有多普勒功能和单发双收的偏振功能,可以获得多普勒谱和退偏振因子参量。(3) 毫米波测云雷达回波信号强度的定标与 SA 雷达回波强度的定标基本一致,但是在具体观测不同云和降水时各有千秋,主要表现在:对于非降水云以及弱降水云,毫米波测云雷达的探测能力高于业务雷达,尤其表现在对远距离的弱回波探测;而对于较强的降水天气系统,毫米波测云雷达受衰减影响相对于业务雷达较大。因此,毫米波测云雷达在研究

\* 资助课题:国家自然科学基金项目(40775021, 40975014)。

作者简介:仲凌志,主要从事雷达气象学研究。E-mail:zlingzhi007@gmail.com

云和降水的整体过程和变化时需要考虑和其他的雷达或者相关设备相互配合,根据需要从不同的角度各自发挥作用。

**关键词** 毫米波测云雷达, 定标, 探测能力

**中图法分类号** P415.2

## 1 引言

美国、日本、英国和德国等先后发展了不同平台(地基和空基)、不同频段(3和8 mm)的毫米波雷达系统,并广泛应用到大气探测中(Pasqualucci, et al, 1983, 1984; Hobbs, et al, 1985; Lhermitte, et al, 1987; Mead, et al, 1989; Hamazu et al, 2003; Moran, et al, 1998; Sekelsky, et al, 1999; Connor, et al, 2004; Danne, et al, 1999; 仲凌志等, 2010)。中国毫米波雷达发展较其他国家晚30年左右,初始于军用。1979年,中国科学院大气物理研究所与安徽井冈山机械厂合作研发了X波段和Ka波段(8.2 mm)双波长雷达,并进行了天气雷达和毫米波雷达观测云和降水结构的理论及观测对比分析(魏重等, 1985)。2006年起,中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室与中国航天二院电子第23研究所联合研发具有多普勒和偏振功能的毫米波测云雷达,并于2008年5—9月在广东进行了云过程的连续试验性观测(刘黎平等, 2009)。

从20世纪50年代开始,科学家们就致力于提高毫米波测云雷达探测能力的研究,早期的测云雷达采用的频率为24 GHz,雷达发射机采用的是速调管,其工作频带窄,受到当时技术的限制,探测能力与距离分辨力受到限制,只能探测到返回信号比较强的云如积雨云,对于含水(或冰晶)量少的薄云(淡积云、薄层积云、薄卷云)则完全探测不到(Paulsen, et al, 1970)。后来又发展了磁控管,其功率比速调管有所提高,探测能力仍然很有限,能探测到10 km处的回波最小强度约-5 dBz,而且得到的云结构比较粗,纹理不够清晰。新一代毫米波测云雷达针对早期毫米波雷达存在的缺陷,使用频带较宽的行波管作为发射源,应用脉冲压缩技术和相干积累技术提高探测能力,且在提高雷达探测能力的同时,不降低距离分辨力;同时还采用了双线偏振技术,能够获取粒子的相态信息。

Ulbrich等(1998)研究了雷达系统定标前后,雷达估测降水与地面雨量计观测数据的对比,提出:由于雷达的定标误差造成二者的测量结果有较大偏

差。王立轩等(2001)研究了中国新一代天气雷达的自动定标技术。研究结果表明:天气雷达的定标对定量估测降水强度精度以及测速精度的各个参数是提高雷达性能的关键。毫米波测云雷达作为中国新兴的研究云物理的工具,同样存在定标的问题。在应用观测资料进行云的宏微观特性研究之前,首先要保证雷达具有足够高的测量精度以及观测资料的可靠性。因此,对毫米波测云雷达自身的工作参数进行标定是分析处理雷达资料前必不可少的内容。

本文介绍了新一代毫米波测云雷达的系统组成、硬件参数以及技术特点;重点阐述了该雷达的定标方法和结果;研究且检验了其探测能力;同时初步分析了2008年5—9月东莞外场试验中观测不同类型云的回波强度。

## 2 毫米波测云雷达系统参数

### 2.1 系统组成

毫米波测云雷达波长为Ka波段(8.6 mm),采用全相干和双线偏振体制,以行波管作为发射机功率源,整机装配在机动平台上,对云、雾和沙尘暴进行三维探测。系统应用信号相干积累、脉冲压缩等近年来研发的技术,提高了雷达对云、雾、沙尘等弥散目标物的探测能力,具有较高的灵敏度与距离分辨率,有一定的机动性。雷达主要探测参数为云、雾、降水系统的回波强度、径向速度、速度谱宽和退偏振因子。根据不同科学研究的目的,雷达可采用不同的分辨率,该雷达在固定观测时,可进行定向、周扫、体扫等多种方式的扫描,并可在省级公路上进行行进中的垂直指向观测,运行稳定可靠。

系统由天馈、发射机、接收机与频率综合器、信号处理、天线控制、数据处理与显示控制以及载车及附属设备等7部分组成(图1)。

由频率综合器产生的8.6 mm波长射频信号经放大送入发射机,推动行波器放大,经极化选择开关选择极化方向,再由天馈系统向外发射。天线采用了高增益的抛物面天线,具有较一致的垂直与水平波瓣性能,发射机背附在天线上,减少了天馈系统的损耗。

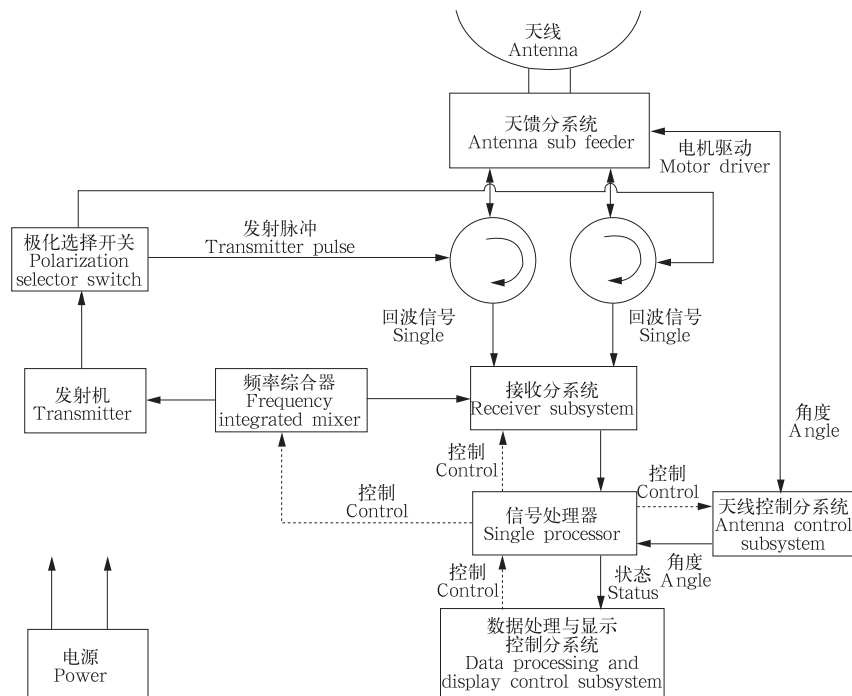


图1 毫米波测云雷达系统简化框图

Fig. 1 Simplified framework of the millimeter-wavelength cloud radar

返回信号由同一天线接收, 经由天馈系统送入双路接收机、分别接收垂直和水平偏振信号。接收信号经射频放大、变频成 60 MHz 中频信号, 送入信号处理器。信号进入信号处理器后, 进行 A/D 转换、解码, 信号积分(采用快速傅里叶变换(FFT)或脉冲对(PPP)方式)对信号的谱参数进行估算以及偏振参数的处理, 得到回波强度、径向速度、谱宽及偏振信息。最终, 数据处理与显示控制分机对信号处理器送来的气象目标回波的数据进行采集、处理, 并在终端显示器上显示各种气象产品。

## 2.2 硬件参数

表 1 是毫米波测云雷达的主要硬件参数: 雷达的工作频率为 3.4 GHz, 最大探测距离为 30 km, 峰值功率 600 W, 脉冲宽度有 0.3、1.5、20、40  $\mu\text{s}$ 。

## 2.3 主要技术特点

### (1) 全相参技术

毫米波测云雷达采用了频综行波管变频的全相参技术, 对返回信号的处理采用 FFT 谱分析方法或脉冲对处理方法来估算谱参数。采用 FFT 或 PPP 对信号处理, 主要是对信号进行相干积累, 提高了返回信号的信噪比, 从而提高了对信号的解析能力。FFT 处理的信号检测得益与信号的相关时间、雷达

表 1 毫米波测云雷达系统参数  
Table 1 The parameters for the Ka-band millimeter-wavelength cloud radar

名称	参数值
工作频率, 波长	33.44 GHz, $\lambda = 8.6 \text{ mm}$
最大探测距离	30 km
天线直径	1.3 m
天线增益	50 dB
波束宽度	$0.44^\circ \pm 0.01^\circ$
极化方式	线性水平、垂直极化
天线转动范围	方位: $0^\circ - 360^\circ$ 仰角: $0^\circ - 90^\circ$
脉冲重复频率	5000 Hz
峰值功率	600 W
脉冲宽度	0.3、1.5、20、40 $\mu\text{s}$
接收机噪声系数	水平通道: 小于 5.6 dB 垂直通道: 小于 4.9 dB
A/D 速度	80 MHz
A/D 位数	12 bit
信号处理方式	PPP, FFT
FFT 采样数	128、256、512

发射脉冲间隔时间有关, 毫米波测云雷达脉冲对间隔时间为 0.02 ms, 而降水返回信号的相关时间一般在 5 ms 左右, 实际返回信号相关时间可延长一些, 此技术可以提高雷达探测灵敏度约 13 dB。

### (2) 脉冲压缩技术

从雷达气象方程可以看到返回信号与功率以及雷达发射频率的脉冲宽度成正比, 较宽的脉冲宽度

提高了返回信号的功率,但降低了返回信号的距离分辨率,脉冲压缩则是用于宽脉冲发射时提高距离分辨率的技术。毫米波测云雷达发射脉冲宽度可达  $20 \mu\text{s}$  或者  $40 \mu\text{s}$ ,而脉冲压缩比为 200,对返回解压信号的距离分辨率达到了  $15 \text{ m}$ (相当于  $0.1 \mu\text{s}$ )。毫米波测云雷达采用脉冲压缩技术后,相对于  $0.1 \mu\text{s}$  窄脉冲发射时提高雷达探测能力约  $23 \text{ dB}$ 。脉冲压缩技术带来的问题是近距离盲区增加, $20 \mu\text{s}$  脉宽发射时近距离盲区约为  $3 \text{ km}$ ,对主要探测高云的毫米波雷达影响不大,在探测较低的云时,可以不用宽脉冲。

(3) 双线偏振技术

雷达采用单路发射双路接收的体制,交替发射水平或垂直线性偏振波,分别同时接收返回信号的垂直和水平偏振的分量。由雷达接收的目标后向散射功率的垂直和水平分量计算返回信号的退偏振因子  $L_{\text{DR}}$ 。退偏振因子与目标粒子的形状、大小、取向和介电质有关,可以通过对  $L_{\text{DR}}$  的分析研究雷达获取粒子的相态和形状信息。

2.4 毫米波测云雷达探测冰云、水云的能力

根据雷达方程和参数,可以估算出毫米波雷达在不同脉冲宽度条件下探测能力。由表 2 计算结果可看到,毫米波测云雷达在距离雷达  $5 \text{ km}$  处能探测到的水云、冰云的最小强度理论值可达到  $-46.6$  和  $-37.3 \text{ dBz}$ 。

表 2 毫米波测云雷达探测冰云、水云的能力

Fig. 2 The capability of detecting water and ice cloud for the millimeter-wavelength cloud radar

距离	云型	脉冲宽度 ( $0.3 \mu\text{s}$ )	脉冲宽度 ( $1.5 \mu\text{s}$ )	脉冲宽度 ( $20 \mu\text{s}$ )
5 km	水云	-27.0 dBz	-33.6 dBz	-46.6 dBz
	冰云	-19.8 dBz	-24.3 dBz	-37.3 dBz
10 km	水云	-21.7 dBz	-26.6 dBz	-39.6 dBz
	冰云	-12.8 dBz	-19.4 dBz	-32.4 dBz

3 毫米波测云雷达的定标

3.1 天线系统

该雷达的天线极化方式是:线性水平极化或可调,体制是单发双收的偏振体制。天线采用  $1.4 \text{ m}$  直径的抛物面天线,水平和垂直两个通道的波段和两个支架的对称分布,保证了水平、垂直两个偏振方向的一致性,水平和垂直偏振方向增益差小于  $1 \text{ dB}$ 。

发射机和接收机放在天线后面,保证了雷达波从发射机到天线及其接收的雷达波从天线到接收机过程的损耗最小,毫米波气象雷达收、发支路馈线的总损耗(含连接波导处损耗)为:水平通道  $3.9 \text{ dB}$ ,垂直通道  $2.7 \text{ dB}$ 。同时,这种设计保证了水平和垂直两个通道的隔离度达到  $33 \text{ dB}$ ,基本满足退偏振因子的探测要求。

对于天线的检测采用了远场测试。在远场条件下,天线测试仪与被测天线的距离满足  $R \geq \frac{2d^2}{\lambda}$  ( $R$  为距离, $d$  是天线直径, $\lambda$  为波长),使用天线测试仪测量天线的参数,表 3 给出了检测结果。

表 3 天线分系统参数

Table 3 The parameters for the antenna

序号	项目名称	备注
1	工作频率	33.44 GHz
2	反射面口径	1.30 m
3	波束宽度	$0.44^\circ \pm 0.01^\circ$
4	增益	$\geq 51.60 \text{ dB}$
5	第一旁瓣电平	$\leq -30.00 \text{ dB}$
6	极化方式	水平极化、垂直极化
7	交叉极化隔离度	$\geq 33.00 \text{ dB}$
8	水平、垂直偏振一致性	$\leq 1.00 \text{ dB}$ (水平和垂直极化增益)
9	馈线损耗	$\leq 3.90 \text{ dB}$ (水平通道)
		$\leq 2.70 \text{ dB}$ (垂直通道)

3.2 发射机脉冲功率定标

雷达的脉冲功率是通过直接测量脉冲重复周期内的平均发射功率和占空比计算得到的,脉冲功率与平均功率的关系

$$P_t = \frac{\bar{P}_t}{\left(\frac{\tau}{T}\right)}$$

$\bar{P}_t$  为平均发射功率, $\tau$  为脉冲宽度, $T$  为脉冲间隔时间。图2为发射功率测试框图,发射机行波管输出

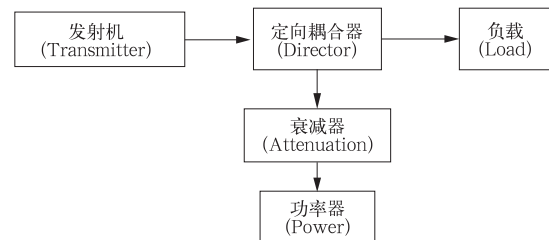


图 2 发射功率测试框图

Fig. 2 Diagram of how to test transmitter power

信号经过波导定向耦合器、固定衰减器送入功率计,由功率计测量的值经过定向耦合器的损耗和固定衰减的损耗订正,得出发射机的平均发射功率 $\bar{P}_t$ , $\tau$ 和 $T$ 则由测量示波器从测试的发射波形中得出。测量得到毫米波测云雷达的峰值发射功率为 600 W。

### 3.3 接收机系统(含信号处理器)

#### 3.3.1 噪声系数的测量

毫米波测云雷达有两路接收机,分别接收水平和垂直偏振雷达回波信号,用噪声系数测试仪分别测量水平和垂直极化接收通道的噪声系数(图 3),得到水平通道、垂直通道的噪声系数分别为 5.6 和 4.9 dB。根据接收机系统噪声系数 $F$ 、接收机中频输出带宽 $B$ 、环境温度 $T$ 、雷达系数 $K$ ,接收机的最小可测功率 $P_r = KTB F$ 。与之相对应,得到接收机垂直和水平通道的灵敏度达到 $-98.4$ 和 $-99.1$  dBm。

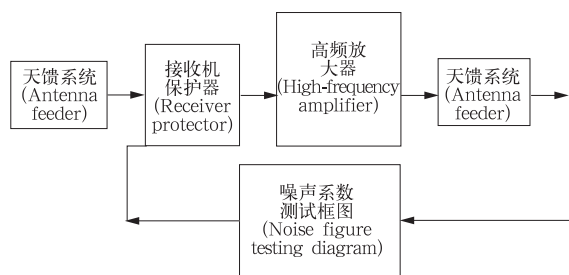


图 3 噪声系数测试框图

Fig. 3 Diagram of how to test noise figure

#### 3.3.2 测量动态范围及定标

进行定量估测返回信号强度的雷达系统要求接收机的动态范围大,在其测量范围内接收机输入功率和输出功率成线性关系,高端和低端的变差小于 1 dB,毫米波测云雷达的线性动态范围要求为 70 dB。

在测试接收机动态范围(图 4a)内,雷达采用 FFT 处理,发射脉冲宽度为  $20 \mu\text{s}$ ,信号采样数为 256。毫米波测云雷达采用相干积累技术提高探测能力,运用外接信号源方法满足外接信号和系统相干的条件,对其动态范围进行准确的测量。对此,毫米波测云雷达系统设有机内测量信号源,输出的信号与雷达接收系统是相干的,测量中先用外接信号源输入信号,在接收机中频端用频谱仪测量该点的中频输出功率;然后转换为机内相干信号源,用外接信号源的输入功率来对机内相干信号源进行定标。在对机内信号源定标后,用机内信号测量接收机系

统的动态范围。

图 4b 是水平通道和垂直通道的测量结果, $D$  为信号处理器输出值,它为信号谱零阶矩(信号功率)估算值( $P_{\text{out}}$ )的量化表示( $D = 10 \lg P_{\text{out}}$ )。从图中可以看出:(1)接收机系统输出值  $D$  与接收机系统等效输入值  $P_{\text{in}}$  (dBm) 的关系呈线性关系,斜率为 0.99,可表示: $P_{\text{in}} = 0.99D - 214.7$ ; (2)两通道的动态范围均为 72 dB; (3)经过相干积累后,系统的最小可测功率约为  $-128$  dBm,最小可测功率降低了近 30 dB,基本达到了系统设计的要求。

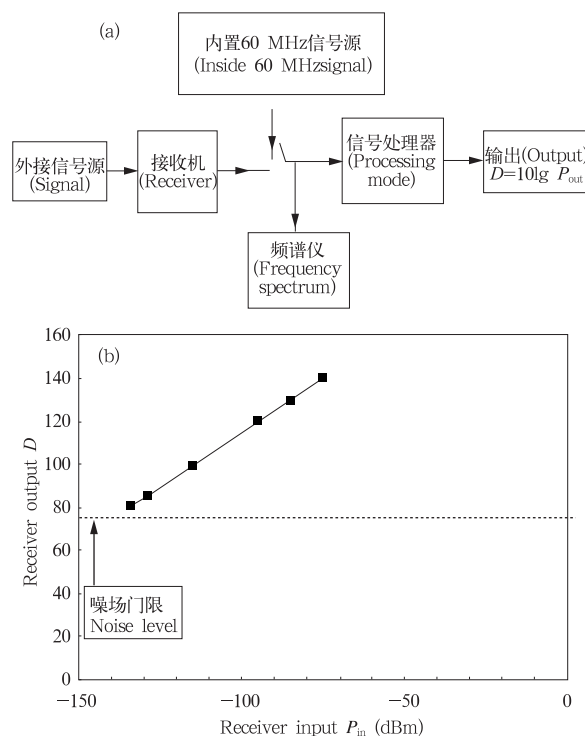


图 4 接收机线性动态范围测试框图(a)、基准接收系统输入输出关系图(b)(水平和垂直相同)

Fig. 4 Diagram of how to test the dynamic range of the receiver (a) and the relation graph of input vs. output (b)

(The same vertical and horizontal channels)

#### 3.3.3 几种发射-处理模式的定标

在 FFT 处理方式、脉冲宽度  $20 \mu\text{s}$ 、累计脉冲数为 256 对的基准条件下,给出接收机输入输出关系的定标结果(图 4b)。雷达的脉冲宽度采用 4 个选择:0.3、1.5、20 和  $40 \mu\text{s}$ ;信号处理采样数分为 128、256 和 512。其中前两个窄脉冲主要用于近距离云的垂直探测,最小不可探测距离满足对低层水云的探测要求,宽脉冲主要用于远距离云的 PPI 扫描观

测和高的冰云观测。

表 4 是其他发射-处理模式下,相对基准的偏移值( $P = P_{\text{standard}} + \Delta$ ,  $P_{\text{standard}}$  是基准条件下的输出功率,  $\Delta$  是其他模式相对于基准模式的偏移值)。从测

试结果可以看出:无论是 FFT 还是 PPP 处理方法,每增加 1 倍的脉冲对数,输出信号均增加 5—6 dB。另外,距离压缩可以明显增加信号的输出功能,20  $\mu\text{s}$  的脉冲宽度的输出功率比 1.5  $\mu\text{s}$  的脉冲宽度

表 4 相对基准,其他观测模式下相对偏移平均值  
Table 4 The mean offset of the other modes relative to the standard mode

处理方式	发射脉宽( $\mu\text{s}$ )	脉冲数	偏移值 $\Delta$ (dB)		偏移误差 (dB)
			理论值	实测值	
FFT	0.3	128	-24.2	-25.2	$\leq 1$
	0.3	256	-18.2	-19.1	$\leq 1$
	0.3	512	-12.2	-13.1	$\leq 1$
	1.5	128	-17.2	-25.2 *	$\leq 1$
	1.5	256	-11.2	-19.1 *	$\leq 1$
	1.5	512	-5.2	-13.0 *	$\leq 1$
	20.0	128	-6.0	-5.5	$\leq 1$
	20.0	512	6.0	6.5	$\leq 1$
PPP	0.3	128	-24.2	-25.6	$\leq 1$
	0.3	256	-18.2	-19.1	$\leq 1$
	0.3	512	-12.2	-13.1	$\leq 1$
	1.5	128	-17.2	-25.2 *	$\leq 1$
	1.5	256	-11.2	-19.1 *	$\leq 1$
	1.5	512	-5.2	-13.1 *	$\leq 1$
	20.0	128	-6.0	-5.8	$\leq 1$
	20.0	256	0.0	-0.5	$\leq 1$
20.0	512	6.0	6.5	$\leq 1$	

注: \* 表示 1.5  $\mu\text{s}$  与 0.3  $\mu\text{s}$  相同带宽

平均增加 18 dB。

### 3.3.4 双通道的检验

毫米波测云雷达有两路接收机,分别接收水平和垂直偏振雷达回波信号,图 5 给出了其水平、垂直通道的动态范围和两个通道输出功率的差。其中,右侧的纵坐标表示通道差。两路接收机的噪声系数都不超过 5.6 dB,两个通道的动态范围均达到了 70 dB,满足雷达对弱高云、强的中低云及其弱降水的探测要求。

## 3.4 雷达探测基本参量的定标

### 3.4.1 强度测量定标

根据雷达气象方程可知,雷达回波功率的大小取决于很多参数,而不同参数的测量都会有误差存在,从而影响回波功率的大小。因此,雷达反射率因子的强度也需要定标后才能用于研究。

采用机内测试信号,改变输入测试信号幅度,测试不同接收通道、不同信号处理方式、不同脉冲数时信号处理器输出结果,分析接收系统(含接收机分机与信号处理器)的输入输出特性,测试结果表明接收系统线性度好,并且得到该雷达系统信号幅度定标

精度不超过  $\pm 3$  dB。

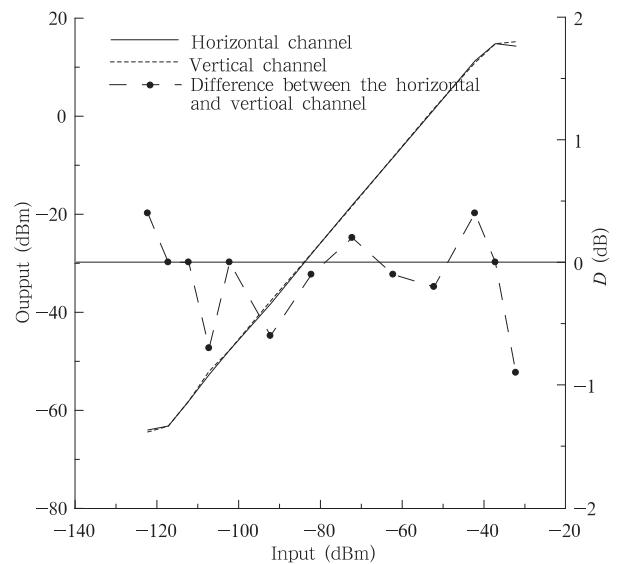


图 5 水平通道、垂直通道检验结果  
Fig. 5 Dynamic ranges of the vertical (dotted line) and horizontal (solid line) channels and their difference; the right y-axis stands for differential values

### 3.4.2 速度测量定标

采用机内测试信号变化注入信号频率的方法, 检验径向速度测量定标, 经过对不同速度测量值定标进行检查, 测量值和理论估算值的最大差值为 0.5 m/s, 按最大脉冲重复频率  $5000 \text{ s}^{-1}$  计算, 该雷达最大不模糊速度为 10.0 m/s。符合  $\leq \pm 1 \text{ m/s}$  的技术指标要求。

### 3.4.3 速度谱宽定标

雷达测得的速度谱宽和信号的质量有关, 利用机内信号源模拟不同信噪比条件下的各种谱宽的信号, 输入雷达接收机, 将雷达谱宽估算值与模拟设置的谱宽值比较。经过对 18 组不同信噪比条件下的谱宽进行比较, 估算值与设置值的最大差值为 0.8 m/s。因此, 毫米波测云雷达估算的精度是高的。

### 3.4.4 退偏振因子定标

雷达采用单发双收的偏振体制, 发射水平偏振波, 同时接收水平、垂直偏振信号, 分别测到返回信号的反射率因子为  $Z_{HH}$ 、 $Z_{HV}$ , 导出退偏振因子:  $L_{DR}$

$= 10 \lg(Z_{HV}/Z_{HH})$ 。因此, 对  $L_{DR}$  的定标实际上就是对接收机垂直和水平通道回波强度测量的定标。

## 4 毫米波测云雷达实际探测能力检验

该雷达于 2008 年 5—8 月安置在广东省东莞市气象局 ( $22.97^\circ \text{N}$ ,  $113.74^\circ \text{E}$ ; 海拔 50 m) 进行外场试验, 雷达附近布有地面观测气象站。我们结合地面观测站的资料, 将 5—8 月广州新一代多普勒天气雷达与毫米波测云雷达同时探测的结果进行对比, 从而进一步检验毫米波测云雷达的探测能力。

表 5 选择了 24 组毫米波雷达与天气雷达同时观测同区域的数据。表中除了两部雷达分别探测得到的最强、最弱回波, 还给出了回波在毫米波雷达上对应的高度。根据天气情况以及两部雷达观测相差结果, 可以分 3 种情况: (1) 地面无降水、云底高度较低时, 两部雷达探测得到的最大反射率因子强度  $Z_{\max}$  基本一致, 平均误差不到 1 dBz, 这进一步证明了毫米波测云雷达定标与业务应用的多普勒天气雷

表 5 广州天气雷达与毫米波测云雷达雷达观测对比

Table 5 The comparison of the SA with the millimeter-wavelength cloud radar in field experiments

序号	$Z_{\max}$ (dBz)		$Z_{\min}$ (dBz)		地面站资料	
	天气雷达	毫米波测云 雷达(高度)	天气雷达	毫米波测云 雷达(高度)	云状	地面降水
1	11	10(5.2 km)	0	-35 (1.4 km)	积雨云	毛毛雨
2	—	-17(6.1 km)	—	-40 (1.2 km)	高、低层云	无
3	-9	-9(7.0 km)	-15	-40 (1.5 km)	高层云 + 淡积云	无
4	—	-27(1.8 km)	—	-38 (0.8 km)	淡积云	无
5	—	-30(1.4 km)	—	-40 (1.2 km)	碎积云	无
6	—	-25(2.5 km)	—	-34 (2.7 km)	淡积云	无
7	-3	-3(2.8 km)	-10	-40 (0.6 km)	层积云	无
8	—	-35(1.4 km)	—	-40 (1.0 km)	低层云	无
9	—	-30(2.0 km)	—	-35 (2.3 km)	淡积云	无
10	-5	-7(5.8 km)	-10	-36 (1.4 km)	高积云	毛毛雨
11	-13	-15(1.2 km)	-15	-40 (0.8 km)	层积云	小雨
12	—	-29(2.6 km)	—	-40 (1.9 km)	低层云	无
13	11	9 (2.5 km)	-5	-35 (2.8 km)	雨层云	小雨
14	-10	-10(4.5 km)	-10	-38 (2.5 km)	层积云	无
15	-5	-6(8.8 km)	-10	-27 (3.2 km)	高层云	小雨
16	26	23(6.0 km)	-5	-21 (6.5 km)	积雨云	小雨(台风云系)
17	5	5(0.9 km)	0	-35 (1.6 km)	积雨云	无
18	0	-3(6.9 km)	-10	-24 (7.8 km)	高层云	雷阵雨前
19	—	-17(4.2 km)	—	-24 (4.5 km)	层云	无
20	—	-19(2.7 km)	—	-36 (2.3 km)	淡积云 + 层积云	无
21	-3	-3(1.2 km)	-5	-27 (4.4 km)	雨层云	无
22	—	-28(1.1 km)	—	-40 (1.2 km)	碎积云	无
23	-3	-3(2.0 km)	-5	-38 (1.5 km)	层积云	无
24	-13	-13(1.6 km)	-15	-34 (1.8 km)	雨层云	无

“—”表示雷达上未观测到有云。

达基本相同,测量的回波参数可用;而且毫米波测云雷达能够探测到更弱的回波;(2)地面有毛毛雨,云顶高度不超过 5 km,毫米波雷达测得的最强回波值比天气雷达测得的结果小约 1—2 dBz,这是因为毫米波经过近地面弱降水时衰减造成;(3)地面出现较大降水、云体内部发展较强的云体、云顶高度很高时,毫米电磁波同时受近地面降水和云内液态水两重衰减,使两部雷达测得的最强值相差达到 3—4 dBz。此外,毫米波测云雷达探测到的最弱回波的强度和所在的高度与表 2 中的计算结果吻合。

### 5 观测实例分析

下面给出几种不同云状的雷达回波强度分布,其观测方式主要为:中低云采用窄脉冲(1.5 μs)、高云采用宽脉冲(20 μs)和 FFT 平均对数为 256 的垂直向上观测模式,资料的垂直分辨率为 30 m,时间分辨率为 0.8 s。从图中可以看到雷达可以探测到

的弱云最小强度为 -40 dBz,这与前面理想估测的灵敏度很吻合。

表 6 给出了东莞市植物园观测站 2008 年 5—8 月抽取的 5 次云状资料以及相应的毫米波测云雷达观测得到的云顶高度、云厚等资料。其中云状代码分别为:Scug 层积云、Cuhum 卷积云、Actra 高积云、Fc 碎积云、Cidens 密卷云、Cbcap 积雨云。

由 2008 年 8 月 17 日 09 时 12—26 分雷达观测的反射率因子强度(图 6a)可以看到两块云体。左边一块是淡积云,强度范围在 -40—-30 dBz,右边是一块层积云,强度在 -40—-22 dBz。由于云底高度在雷达探测盲区以内,因此不能辨别出云底状态,但是可以看到云顶部发展不平整,此次雷达探测到的最大反射率因子强度为 -22 dBz。

图 6b 是 2008 年 6 月 4 日 09 时 40 分—10 时 15 分共 35 min 雷达观测的反射率因子强度。云底高度在 1.8 km 左右,云层厚度约 900 m,云内粒子

表 6 东莞市气象观测站(植物园点)和毫米波测云雷达探测资料

Fig. 6 Both the ground and millimeter-wavelength cloud radar data in Dongguan national meteorology observatory

日期 2008 年	地面站云状	新一代毫米波测云雷达观测结果			
		云顶高(km)	云厚(km)	Z <sub>max</sub> (dBz)	Z <sub>min</sub> (dBz)
6 月 4 日	Scug	4.0	0.9	-18	-40
6 月 5 日	Scug Cuhum Fc	7.8	1.8	-13	-20
8 月 17 日	Cuhum Cidens Fc	2.5	1.2	-22	-40
8 月 22 日	Cidens Scug	10.2	8.2	-23	-35
8 月 23 日	Scug	5.1	1.5	0	-35

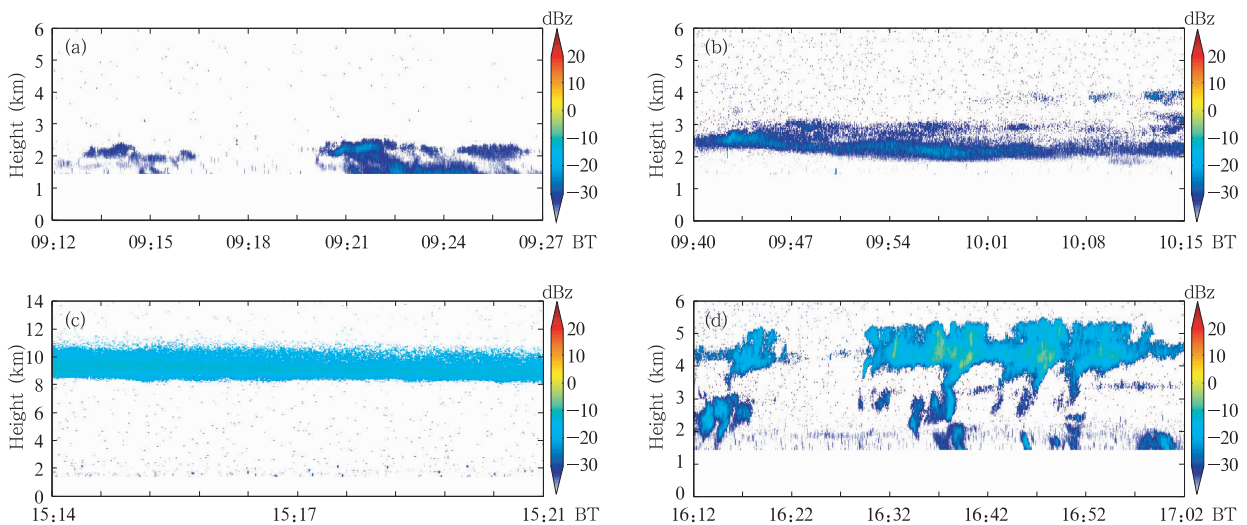


图 6 毫米波测云雷达测得的淡积云(a)、层云(b)、高层云(c)、层积云(d)反射率强度

Fig. 6 Millimeter-wavelength cloud radar echo intensity of (a) cumulus humilis, (b) stratus (c) altostratus, and (d) stratocumulus



的平均回波强度在  $-25$  dBz, 最大值为  $-18$  dBz, 最小值为  $-40$  dBz, 云的顶部和底部发展均匀, 符合层云的特征。10 时左右, 可以明显看到空中云层逐渐演变为 3 层, 云体的平均反射率强度仍然较弱, 为  $-35$  dBz 左右, 上层云体密度较稀。

图 6c 是 2008 年 6 月 5 日 15 时 14—21 分雷达观测的反射率因子强度。与先前的两幅图明显不同的是, 云底高度达到  $7.8$  km。云层厚度近  $2$  km, 粒子反射率强度分布均匀, 中间一条带相对边缘较强, 达到  $-13$  dBz。云内最小强度为  $-20$  dBz。这是一次高层云的天气过程, 云层顶、底部发展非常平整, 本次探测不久后, 便开始下雨。

图 6d 是 22 日台风影响结束后 16 时 12 分—17 时探测的层积云。当天上午有中雨, 午后渐停、转晴。由图中可以看到不均匀的云单体相连, 云底发展不平整, 另外有少许淡积云。云的回波强度最大为  $0$  dBz, 最小为  $-25$  dBz; 平均云层厚度约  $1.5$  km。

图 7 是 2008 年 8 月 22 日 08 时 20 分—09 时 56 分毫米波测云雷达探测的“0812 号”台风的外围云系(雷达位于台风中心的左前沿); 图 8 给出了相应的 4 个探测参数的垂直廓线。结合图 7 与图 8 可以看出  $0^{\circ}\text{C}$  层的基本特征, 以及  $0^{\circ}\text{C}$  层上下粒子碰并增长的特征。首先看图 7a, 这是台风外围南北取向近  $300$  km 长云带的西北部云区的雷达反射率强度

图, 其值在  $-25$  至  $23$  dBz。从垂直结构看, 云的回波顶高约为  $10$  km, 回波顶最大强度达到  $10$  dBz; 另外, 该云区距离地面  $5.9$  km 高度上存在一条强度突增的亮带, 根据其上下方回波强度的变化, 可以初步判断此为  $0^{\circ}\text{C}$  层亮带, 因为  $0^{\circ}\text{C}$  层以上几乎全部为冰晶粒子, 它们在下落过程中经过融化层, 在冰球外部形成一层水膜, 由于水粒子的散射能力大约是单纯冰晶粒子散射能力的 5 倍, 因此在融化层出现回波强度突增的情况。同样, 图 7b 是雷达垂直向上探测得到的速度, 云层上部冰晶粒子的速度值几乎为零; 在下落过程中, 粒子速度慢慢增大至  $2$  m/s; 当经过融化层变成水后, 速度值突增至  $8$  m/s。图 7c 为粒子的谱宽信息, 在  $5.9$  km 高度以上, 冰晶粒子的谱宽很小, 不超过  $0.5$  m/s; 从该高度往下谱宽迅速增大, 最大值达到  $4$  m/s。图 7d 为粒子的退偏振因子图, 从整体上看可以非常清楚地看到位于  $5.9$ — $6.1$  km 处也对应前 3 幅图存在一条亮带, 结合当日 08 时的探空风速资料, 初步分析该“亮带”形成原因可能是云层顶部是很小的冰晶粒子, 基本不成针状, 可以近似视为球形, 所以  $L_{\text{DR}}$  的值很小, 平均不超过  $-23$  dB; 在这些冰晶下落过程中, 粒子慢慢长大而形成各种各样的形状, 但是粒子依然很小, 其非球形特征不明显导致  $L_{\text{DR}}$  仍然很小; 随后粒子继续下落并且增长成针状等明显的非球形粒子, 且在  $6.1$ — $5.9$  km 高度处的风速约  $39$  m/s, 此时风取向的作用

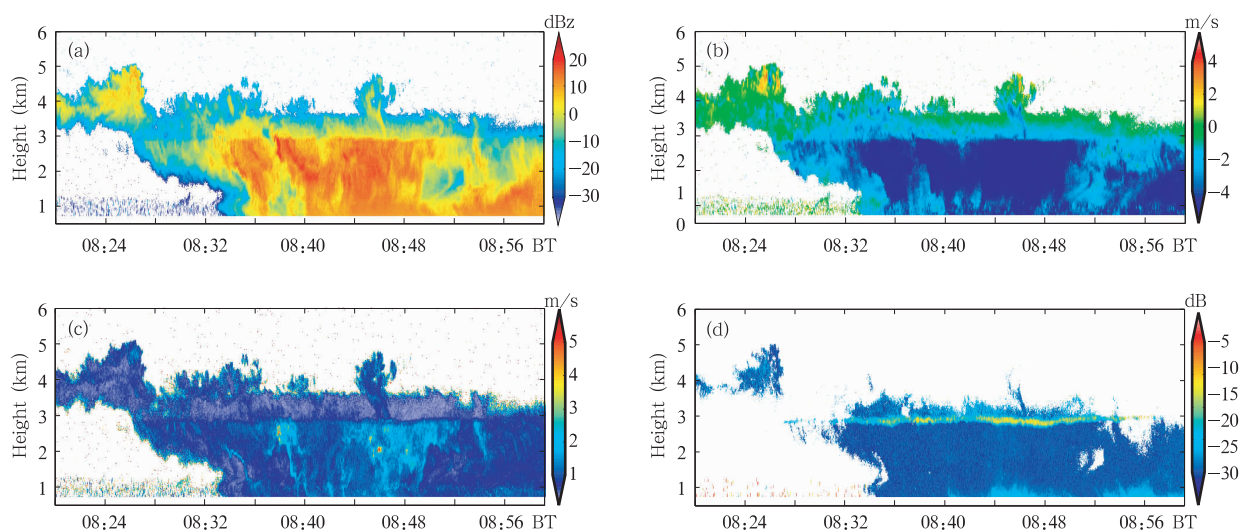


图 7 台风外围云系的毫米波测云雷达回波强度(a)、速度(b)、谱宽(c)和退偏振因子分布(d)

Fig. 7 Radar reflectivity (a), radial velocity (b), Doppler spectrum width (c) and the linear depolarization factor (d) from the millimeter-wavelength cloud radar on 22 August 2008 (the BT time in each panel means the Beijing local time)

很大,使得非球形例子排列较一致,从而使 $L_{DR}$ 值明显增大至 $-10$  dB左右;在 $5.9$  km以下,粒子融化成水后,又变成球形,所以 $L_{DR}$ 值又迅速减小至 $-25$  dB左右。另外,在这次探测过程中,08时38—40分地面有降水,根据上述讨论,认为此次降水具有层状云性质。这里只对本次个例简单介绍,目的是给

出毫米波测云雷达探测的效果和能力。

综上所述:从雷达回波图上可以清楚地看到各种云的垂直和水平结构。这对于我们统计各种类型云的宏观特性提供了数据基础。另一方面,虽然脉冲压缩技术使雷达的探测能力大大提高,但同时也带来探测盲区增大的问题,使得观测低云云底受到限制。

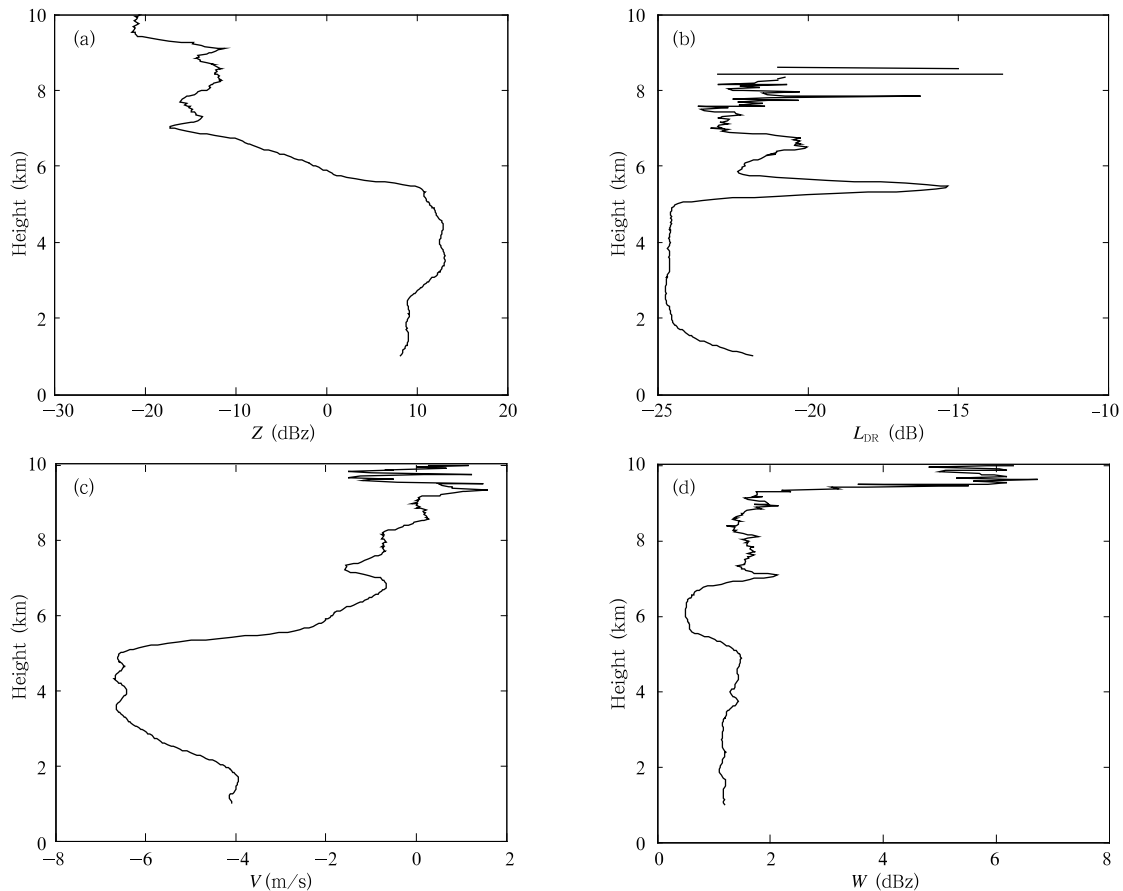


图8 反射率回波强度(a)和退偏振因子(b)垂直廓线、速度(c)和速度谱宽(d)垂直廓线分布

Fig. 8 Vertical profiles of the radar reflectivity (a) and the linear depolarization factor (b), as well as vertical profiles of the radius velocity (c) and the velocity spectrum width (d)

## 6 结论

(1) 毫米波测云雷达是中国自主生产的第一部集多普勒与双偏振功能于一体、波长为 $8$  mm的测云雷达。本文主要介绍了该雷达的定标方法和结果,用外仪表对内部参数进行检验,结果表明:雷达的标定精度基本满足使用要求。

(2) 毫米波测云雷达在引入脉冲压缩技术的基础上,使用了全相干积累方法,进一步提高了探测能力,使得雷达在 $10$  km范围内能探测到的粒子最小

强度为 $-40$  dBz;此外,加入多普勒功能和单发双收的偏振功能,可以获得多普勒谱和退偏振因子,为我们研究粒子的形状和相态提供更充分的参量。

(3) 文中同时从理论计算、实际观测检验两个方面对雷达的探测能力进行了研究,利用2008年5—8月广州、深圳天气雷达和毫米波测云雷达共同观测的不同类型云的资料对比,得出结论:在观测非降水及弱降水云时,毫米波测云雷达的探测能力远高于天气雷达,尤其表现在远距离的弱回波探测;而对于较强的降水天气,毫米波测云雷达受衰减影响

很大,需要考虑衰减订正。

(4) 通过毫米波测云雷达观测得到的不同类型云的回波强度个例图分析得到:毫米波测云雷达具有较高的时空分辨率,能够穿透云粒子获得清晰的云水平和垂直结构,探测云的内部特征;能够观测到碎积云、淡积云、浓积云、层积云、雨层云等多类云以及这些云之间的相互演变过程。

(5) 发展毫米波测云雷达将能获取云量、云类等云参数,这些基本参数的获得将有助于研究云内液态水含量、云粒子的谱分布等征,特别是云中液态水含量的三维分布的定量测量,在云—辐射相互作用、人工影响天气研究等方面有重要意义。

**致谢:**感谢所有参加测云雷达外场试验的全体人员。

### 参考文献

- 刘黎平,仲凌志,江源等. 2009. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析. 气象科技,37(5): 567-571
- 王立轩,葛润生,秦勇. 2001. 新一代天气雷达的自动标校技术. 气象科技,3:26-29
- 魏重,林海,折妙新. 1985. 毫米波气象雷达的测云能力. 气象学报,43(3):378-383
- 仲凌志,刘黎平,陈林等. 2010. 星载毫米波测云雷达在研究冰雪天气形成的云物理机制方面的应用潜力. 气象学报,68(5):705-716
- Danne O, Quante M, Milferstädt D, et al. 1999. Relationships between Doppler Spectral Moments within large-scale cirro-altostratus cloud fields observed by a ground-based 95-GHz CLOUD RAdar. J Appl Meteor, 38:175-189
- Hamazu K, Hashiguchi H, Wakayama T, et al. 2003. A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations. J Atmos Ocean Tech,20:972-986
- Hobbs P V, Funk N T, Weiss R R, et al. 1985. Evaluation of a 35-GHz radar for cloud physics research. J Atmos Oceanic Tech, 2: 35-48
- Lhermitte R A. 1987. 94 GHz Doppler Radar for cloud observations. J Atmos Oceanic Tech, 4:36-48
- Mead J B, McIntosh R E, Vandemark D, et al. 1989. Remote sensing of clouds and fog with a 1.4 mm radar. J Atmos Oceanic Tech, 6: 1090-1097
- Moran K P, Martner B E, Post M J, et al. 1998. An unattended cloud-profiling radar for use in climate research. Bull Amer Meteor Soc, 79:443-455
- O'Connor E J, Illingworth A J, Hogan R J. 2004. Retrieving stratocumulus drizzle parameters using Doppler Radar and Lidar. J Appl Meteor, 44:14-27
- Paulsen W H, Petrocchi P J, McLean G. 1970. Operational utilization of the AN/TPQ-11 cloud-detection radar. Air Force Cambridge Research Laboratories, Instrumentation Pap. No. 166, 37pp. [ Available from Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, 01731. ]
- Pasqualucci F. 1984. Drop size distribution measurements in convective storms with a vertically pointing Doppler radar. Radio Sci, 19:177-183
- Pasqualucci F, Bartram B W, Kropfli R A, et al. 1983. A millimeter-wavelength dual-polarization Doppler radar for cloud and precipitation studies. J Climate Appl Meteor, 22:758-765
- Sekelsky S M, Ecklund W L, Firda J M, et al. 1999. Particle size estimation in ice-phase clouds using multifrequency radar reflectivity measurements at 95, 33, and 2.8 GHz. J Appl Meteor, 38:5-28
- Ulbrich C W, Lee L G. 1998. Rainfall measurement error by WSR-88D radars due to variations in Z-R law parameters and the radar constant. J Atmos Ocean Tech,16:1017-1024