

武静雅,刘黎平,郑佳锋. 2016. 固态毫米波雷达探测模式的对比评估与分析. 气象, 42(7):790-798.

# 固态毫米波雷达探测模式的对比评估与分析<sup>\*</sup>

武静雅<sup>1</sup> 刘黎平<sup>1</sup> 郑佳锋<sup>1,2</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 南京信息工程大学,南京 210044

**提 要:** 利用 2014 年广东阳江和青藏高原外场观测中多种探测仪器的观测资料,对比了灾害天气国家重点实验室与航天科工 23 所联合研制的固态毫米波雷达三种探测模式最小可测回波强度、可测液态水(冰水)含量、观测同一目标时回波强度的差异以及与 K 波段微降水雷达回波强度的差异等。结果表明:(1) 毫米波雷达不同模式最小可测回波强度差异与理论差异一致,边界层模式和降水模式能观测近地面全部层云和积云,卷云能观测 5km 高度冰水含量在  $0.0007 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的卷云,随着高度上升探测能力有所下降;(2) 毫米波雷达使用不同模式观测同一目标时,不同观测模式宏观回波强度一致,大部分差异不超过 3.5 dB;(3) K 波段微降水雷达和 Pasivel2 激光雨滴谱仪的近地面回波强度一致,毫米波雷达与 K 波段微降水雷达存在系统差异。

**关键词:** 固态毫米波雷达, 探测模式, 最小可测回波强度, 对比分析

中图分类号: P414

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.07.002

## Contrast Assessment and Analysis of a Solid-State Millimeter Wave Radar Modes

WU Jingya<sup>1</sup> LIU Liping<sup>1</sup> ZHENG Jiafeng<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Based on the data of several instruments applied in the 2014 Yangjiang and Tibetan experiments, the sensitivity, liquid water content (LWC or ice water content, IWC) can be detected and difference between different mode echoes of a new solid-state millimeter wave radar (SMMR) constructed by State Key Laboratory of Severe Weather (LaSW) and 23th Institute of Aerospace Science and Technology are contrasted. Also, difference between this radar and micro-rain radar (MRR) echo is contrasted. The results show: (1) differences between different modes of SMMR are in reasonable agreement with theoretical results. All the status and cumulus in near-surface layer can be observed by boundary layer mode and precipitation mode. Cirrus mode can observe cirrus which ice water content is over  $0.0007 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Observation capability of all three modes decreased with the increase of height. (2) Differentials between three mode echoes are mostly less than 3.5 dB. (3) MRR echo and Pasivel2 laser optical disdrometer echo are almost same, system difference existed between MRR and SMMR echo.

**Key words:** solid-state millimeter wave radar, modes, sensitivity, contrast and analyze

## 引 言

由于短波长的毫米波雷达最小可测回波强度小

并具有极好的分辨率,因而尤其适合于观测云(Moran et al,1998)。1990 年的大气辐射测量计划(Atmospheric Radiation Measurement, ARM)和 2004 年的北美季风试验(North America Monsoon Ex-

\* 国家自然科学基金项目(91337103)资助

2015 年 10 月 14 日收稿; 2016 年 2 月 26 日收修定稿

第一作者:武静雅,主要从事雷达气象学方向研究. Email:18910630214@126.com

periment, NAME) 中, 均使用了毫米波雷达对云物理过程进行了观测, 结果表明毫米波雷达是获取大气和云垂直演变规律的有效探测系统, 是探测弱回波气象目标(如小云滴组成的暖云)理想的设备(Stokes et al, 1994; Lerach et al, 2010)。35 和 94 GHz 的云垂直指向雷达, 主要用于反演云参数和获取云中的动力过程(Kollias et al, 2007; Gossard et al, 1997)。刘黎平等(2009; 2015), Zhong 等(2011), 王德旺等(2012), 李思腾等(2015), 唐英杰等(2015)的研究表明, 毫米波测云雷达可以清楚地反映出云的内部结构, 对云参数的反演有重大作用。

毫米波发射系统的射频源大致可以分为三类: 第一类是电真空器件构成的源; 第二类是固态器件构成的源; 第三类是其他方式产生的源, 例如光导毫米波源等。行波管的主要优点是其大功率、高增益和宽频带(向敬成等, 2005)。从 20 世纪 70 年代开始, 随着大功率半导体器件的开发, 国外的一些生产厂家先后推出了 1 kW 等级的各类全固态发射机。全固态发射机具有体积小、质量小、噪声系数低、耗电少、可集成、工作电压低、冷却系统可靠、控制系统简单和易于维修等特点, 并且没有电子管的消耗费用, 但是其功率电平低, 特别是随着频率升高, 输出功率下降很快。所以, 常采用脉冲压缩来弥补发射功率的不足(刘军华等, 2010)。

随着 20 世纪 80 年代行波管放大器的进步, 国外毫米波雷达研究机构有较大突破, 制造了多部毫米波雷达。其中可能是世界上第一部真正用于气候研究的无人值守云雷达是由美国大气海洋局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) ETL 实验室(Environmental Technology Laboratory, ETL)设计的毫米波雷达(Millimeter Wave Cloud Radar, MMCR), 该雷达采用行波管放大器。为了对几乎所有云进行探测, 该雷达可测回波强度范围需要为  $-50 \sim +20$  dBz, 为满足不同需求, 该雷达共设计四种探测模式, 包括使用 32 位脉冲压缩技术垂直分辨率 45 m 的模式 1、使用 32 位脉冲压缩技术垂直分辨率 90 m 的模式 2、未使用脉冲压缩技术垂直分辨率 90 m 的模式 3 以及未使用脉冲压缩技术垂直分辨率 45 m 的模式 4(Moran et al, 1998)。Clothiaux 等指出原有四种模式存在的不足, 改进了模式参数(Eugene et al, 1999)。我国气象毫米波雷达始于 1979 年, 但受限于当时的毫米波器件水平, 脉冲宽度窄, 发射功率低, 最小可测回波

强度差(魏重等, 1985)。随着我国毫米波器件技术水平持续进步, 2008 年中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室(LaSW)与中国航天研究二院第 23 研究所合作研发了我国第一部基于行波管放大器且具备多普勒和极化功能的云雷达(HMBQ), 并进行了对我国不同区域的观测(刘黎平等, 2014; 仲凌志等, 2011), 但雷达连续观测时却受到行波管寿命的限制, 只能进行定时间断性观测。谢蕾等(2014)人联合雨滴谱仪分析了这部雷达观测弱降水的准确性, 发现两者变化趋势一致但差异较大。宗容(2011)分析了这部雷达观测反演云的宏观和微观物理特性的能力, 发现这部雷达对云的观测是可靠的。

为实现连续观测, 两家单位最新联合研发的毫米波雷达采用了低峰值功率的全固态发射机。为了降低最小可测回波强度观测弱云, 该雷达设计了采用脉冲压缩技术的卷云模式, 但脉冲压缩会在低空和强回波上方产生旁瓣回波。为了弥补脉冲压缩带来的损失, 还设计了窄脉冲的边界层模式和降水模式, 两种模式采用的相干积累次数不同, 最小可测回波强度不同。交替使用三种探测模式, 可以有效增大雷达的探测范围, 对多种云进行观测。三种模式参数不同可能会造成回波存在差异, 但尚未有人对这三种探测模式的探测能力和回波强度一致性进行过分析研究, 而这是分析雷达测云能力、探索新的数据融合模式以及为毫米波雷达的设计提供参考的重要内容。

2014 年该固态毫米波雷达与 K 波段微降水雷达和雨滴谱仪等仪器分别在广东阳江和西藏那曲地区气象局进行了观测试验。本文将利用这些试验数据, 首先统计雷达不同模式最小可测回波强度以及最小可测液态水(冰水)含量, 分析统计最小可测回波强度的差异与理论差异的一致性, 分析了不同模式的测云能力; 其次分析不同模式观测同一目标的回波强度差异; 最后采用联合激光雨滴谱和 K 波段微降水雷达的方式, 对比分析降水模式观测弱降水的准确性。

## 1 数据和分析方法

2014 年中国气象科学研究院在广东阳江和青藏高原那曲分别开展了华南前汛期暴雨云和青藏高原对流云的多种遥感手段的观测。2014 年 5 月 1 日到 6 月 10 日华南前汛期暴雨云观测试验期间, 在

阳江进行同步观测的仪器包括 Ka 波段固态发射机体制毫米波雷达、K 波段微降水雷达、PS32 型雨滴谱仪、微波辐射计。2014 年 7 月 1 日到 8 月 31 日“第三次青藏高原大气科学试验”期间,在那曲进行同步观测的仪器包括 Ka 波段固态发射机体制毫米波雷达、K 波段微降水雷达、PS32 型雨滴谱仪、微波辐射计、水汽和云测量激光雷达、激光云高仪。为了分析毫米波雷达的测云能力,本文将联合激光雨滴谱仪和 K 波段微降水雷达数据对毫米波雷达数据进行分析。

## 1.1 设备参数

### 1.1.1 Ka 波段固态发射机体制毫米波雷达说明

该雷达工作频率 33.44 GHz,线性动态范围 61 dB,采用固态发射机、全相干脉冲多普勒体制。体积小,可移动性好。工作时,每次探测分别以三种模式(边界层模式、降水模式和卷云模式)交替探测。

表 1 Ka 波段固态毫米波雷达主要性能参数

Table 1 Main parameters of Ka-band solid state millimeter-wave radar

序号	指标名称	指标规格
1	雷达体制	脉冲多普勒、全相参、固态
2	工作频率	33.44 GHz(Ka 波段)
3	波束宽度	0.31°
4	峰值功率	114.8 W
5	探测范围	高度:120 m~15 km
		回波强度: -50~+30 dBz
		径向速度: -20~+20 m·s <sup>-1</sup> 速度谱宽: 0~4 m·s <sup>-1</sup>
6	探测精度	时间分辨率: 8.7 s(可调)
		高度分辨率: 30 m
7	距离库数	510 个
8	数据产品	原始数据产品: 功率谱数据(选择性存储)
		基本数据产品: 回波强度、径向速度、速度谱宽、线性退极化比及其时间高度显示
9	信号处理方法	脉冲压缩、快速傅里叶变换(FFT)、相干积累、非相干积累等

表 2 中列出了该毫米波雷达三种探测模式的主要参数。卷云模式采用了相位编码脉冲压缩技术,以调制宽脉冲发射,最小可测回波强度小,弥补了发射功率不足的问题,接收时利用脉冲压缩技术,获得窄脉冲,从而提高距离分辨率,但是在近地面 2.040 km 内产生了旁瓣回波。为了探测近距离目标,又设计了边界层模式和降水模式,两种模式脉冲宽度均为 0.2 μs,探测距离均 120 m~7.5 km(或 120 m

~12 km),边界层模式进行了 4 次相干积累,降水模式没有进行相干积累,边界层模式比降水模式最小可测回波强度小。

表 2 Ka 波段固态毫米波雷达三种探测模式的主要参数

Table 2 Main parameters of three modes of Ka-band solid state millimeter-wave radar

名称	边界层	卷云	降水
探测范围	120 m~7.5 km (可调)	2.040 km~ 15 km	120 m~7.5 km (可调)
距离分辨率/m	30(可调)	30(可调)	30(可调)
脉冲宽度/μs	0.2	12	0.2
脉冲周期/μs	120	120	120
相干积累数	4	2	1
FFT 点数	256	256	256
非相干积累数	16	32	64
探测能力(最小可测回波强度)	-24 dBz@ 5 km	-38 dBz@ 5 km	-18 dBz@ 5 km

### 1.1.2 K 波段微降水雷达说明

K 波段微降水雷达频率为 24.230 GHz,采用单点垂直探测,探测范围为 0~3100 m,时间分辨率为 1 min,提供 64 条功率谱密度谱线在 31 个距离库上的功率谱密度分布、粒子直径分布和粒子数浓度分布以及反演的反射率因子、降水强度、液态水含量和雨滴的下落速度(温龙等,2015)。

### 1.1.3 雨滴谱仪说明

Parsivel 激光雨滴谱仪利用光学原理,同时测量距地高度约 1.6 m 处采样空间内(采样空间为激光头之间的空间)下落粒子的直径和下落速度,时间分辨率为 1 min,提供粒子的速度和直径等级以及反演的雷达反射率、降水强度、总降水量、雨中能见度、分钟降水量、小时降水量。

## 1.2 数据分析方法

### 1.2.1 K 波段微降水雷达和雨滴谱仪时空一致性处理

K 波段微降水雷达探测范围 0~3100 m,库长 100 m,波束宽度 1.5°,在 100 m 高度处探测面积为 5.39 m<sup>2</sup>。而雨滴谱仪取样面积 54 cm<sup>2</sup>,探测近地面采样空间内的雨滴。两者时间分辨率均为 1 min,因此选取降水时每分钟 K 波段微降水雷达的第一个高度库的回波强度与雨滴谱仪的回波强度进行对比分析。

### 1.2.2 K 波段微降水雷达和毫米波雷达时空一致性处理

在空间上,毫米波雷达降水模式每 30 m 一个

库,K波段微降水雷达每100 m一个库,毫米波雷达三个库的空间代表性与K波段微降水雷达一个库的代表性相当。在时间上,K波段微降水雷达1 min完成一次探测,而毫米波雷达8.7 s完成一次探测,毫米波雷达每7个径向的时间代表性与K波段微降水雷达一个径向的时间代表性相当。另外,随着高度增加,毫米波雷达最大可测回波强度增大,为了尽量避免选取低层回波可能由于接收机过饱和而造成回波强度不准确,应尽量选取较高处的降水回波进行分析。但0℃层以上并非降水回波,因而选取的降水回波高度不能超过零度层高度。

阳江0℃层高度位于4200 m左右,选取毫米波雷达每7个径向的第98、99、100个库(2910~2940 m、2940~2970 m、2970~3000 m)的平均回波强度,与K波段微降水雷达的30个距离库(2900~3000 m)的回波强度进行对比。而高原0℃层高度在900 m左右,选取毫米波雷达每7个径向的第21、22、23个库(600~630 m、630~660 m、660~690 m)的平均回波强度,与K波段微降水雷达的第7个库(600~700 m)的数据进行对比。

## 2 三种探测模式回波强度探测范围和探测能力分析

为了解这部雷达的测云能力,统计对比分析了三种探测模式最小可测回波强度、边界层模式、降水模式最小可测液态水含量以及卷云模式最小可测冰水含量。

### 2.1 三种探测模式最小可测回波强度

雷达最小可测回波强度公式为:

$$dBZ = 20\lg\lambda - 10\lg P_t - 2G_{(dB)} - 10\lg\theta - 10\lg\phi - 10\log\tau c + 10\log P_r + 10\log R^2 - 10\lg\left(\frac{\pi^3}{1024\ln 2}\right) + 240 \quad (1)$$

式中, $\lambda$ 为工作波长, $P_t$ 为发射功率, $P_r$ 为接收功率, $G$ 为天线增益, $\theta$ 与 $\phi$ 为雷达波束宽度, $\tau$ 为脉冲宽度, $c$ 为光速, $R$ 为目标到雷达的距离, $10\lg\left(\frac{\pi^3}{1024\ln 2}\right) + 240$ 为常数。对于确定的雷达,其工作波长、发射功率、最小可接收功率、天线增益、波束宽度均为定值,最小可测回波强度与脉冲宽度以及目标到雷达的距离有关。

脉冲压缩技术以调制宽脉冲发射,发射脉冲宽度 $T$ 与脉冲宽度 $\tau$ 的比值定义为脉冲压缩比 $D = T/\tau$ ,经过脉冲压缩后,最小可测回波强度可以提高 $10\lg D(dB)$ 。雷达接收机输出的信号经过 $n$ 次相干积累后,最小可测回波强度可以提高 $10\lg n(dB)$ (邢孟道等,2012)。对于确定模式,最小可测回波强度与距离的关系与 $y = 20\lg R$ 一致。理论上边界层模式较降水模式最小可测回波强度小60 dB,卷云模式较降水模式最小可测回波强度小20.8 dB,卷云模式较边界层模式最小可测回波强度小14.8 dB。

通过统计三种模式观测到的最小回波强度得到三种模式各自的最小可测回波强度。首先统计每一个距离库的最小可测回波强度,为消除相邻距离库的误差,分别对三种探测模式的最小可测回波强度进行每千米平均。三种模式空间分辨率均为30 m,从下到上将每根径向上的数据每34个库分为一组,对每组的最小可测回波强度进行平均,将平均数据作为这1公里的最小可测回波强度。

利用阳江试验145 min晴空回波数据和高原试验169 min晴空回波数据分别统计了阳江和高原试验中三种探测模式每千米高度的最小可测回波强度,结果发现两次试验中4~6 km高度的最小可测回波强度与 $y = 20\lg R$ 趋势十分一致,将两次试验三种模式5 km高度最小可测回波强度平均值作为“真值”,得到不同模式最小可测回波强度随高度的变化关系并进而得到最大回波强度随高度的变化关系。结果如图1所示。

不同模式最小可测回波强度不同,卷云模式最小可测回波强度最小,降水模式最小可测回波强度最大。不同模式最小可测回波强度差异稳定,卷云模式最小可测回波强度较边界层模式小14.0 dB,较降水模式小20.1 dB,边界层模式最小可测回波强度较降水模式小6.1 dB,与理论差异基本一致。而降水模式最大可测回波强度最大,卷云模式最小。

虽然最小可测回波强度随着高度增加变差,但在15 km高度上卷云模式最小可测回波强度为-28.5 dB,降水模式也保持在-8.3 dB,雷达最小可测回波强度较小。2 km高度以上,结合使用三种模式数据,有效增大了该雷达的探测范围。在2 km以下,卷云模式由于使用了脉冲压缩技术导致了低空旁瓣回波,但是进行了4次相干积累的边界层模式仍有较小的最小可测回波强度,可以为低空弱回波的观测提供有效的补充。

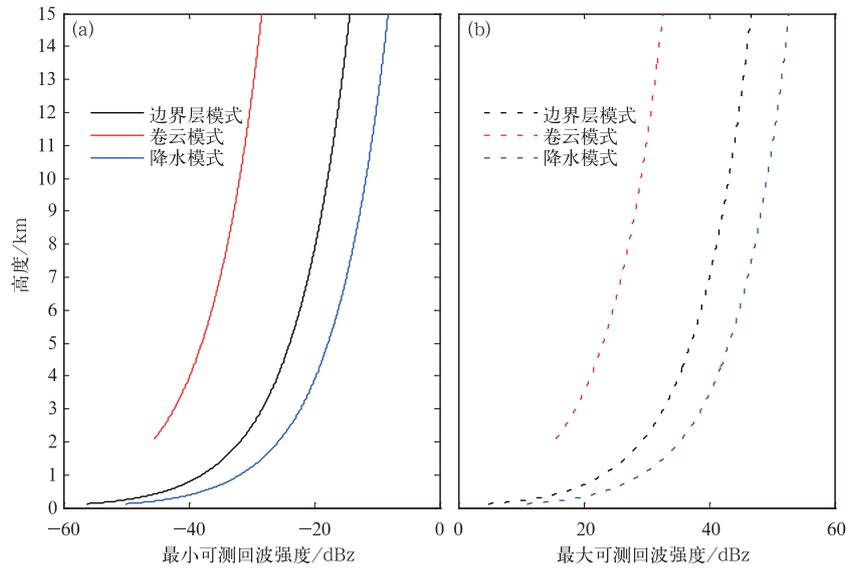


图 1 毫米波雷达三种模式最小可测回波强度(a)及最大回波强度(b)

Fig. 1 Minimum (a) and maximum (b) measurable reflectivity of millimeter-wave radar

## 2.2 三种探测模式可测的云液态水(或冰水)含量

云按高度分为高云、中云、低云和直展云 4 族,高云和中云以冰云为主,低云和直展云以水云为主。液态水含量(LWC)和冰水含量(IWC)是反映云体特征的重要物理量,表 3 列出了一些已有的  $Z-LWC/IWC$  关系(Atlas et al,1954;Sauvageot et al,1987;Fox et al,1997;Sassen,1987;1996;Schneide et al,1995;Matrosov et al,2001;Protat et al,2009)。为进一步了解该雷达的测云能力,认为 5 km 以上均为冰云,5 km 以下均为水云,利用表 3 中的关系,反演卷云模式最

小可测冰云冰水含量以及边界层模式和降水模式最小可测水云液态水含量。

表 3 中列出的三个  $Z-LWC$  关系均为增函数,回波强度  $Z$  越大则反演得到的液态水含量  $LWC$  越大。各高度回波强度最小可测回波强度反演得到的  $LWC$  即为该高度最小可测云液态水含量,各高度最大可测回波强度反演得到的  $LWC$  即为该高度最大可测液态水含量。边界层模式和降水模式 120 m 高度和 5 km 高度可测液态水含量范围在表 4 中列出,卷云模式 5 km 高度和 15 km 高度可测冰水含量范围在表 5 中列出。

表 3  $Z-LWC/IWC$  关系  
Table 3  $Z-LWC/IWC$  mathematical relation

	探测手段	云型	关系
Atlas(1954)	——	暖云	$LWC = (\frac{Z}{0.048})^{1/2.0}$
Sauvageot 等(1987)	8 mm 雷达	暖云	$LWC = (\frac{Z}{0.030})^{1/1.31}$
Fox 等(1997)	机载云雷达	暖云	$LWC = (\frac{Z}{0.012})^{1/1.16}$
Sassen(1987)	地基 8 mm 雷达	地面无降水的冰晶粒子	$IWC = 0.12Z^{0.696}$
Schneide 等(1995)	地基 8 mm 雷达	模式滴谱	$IWC = 0.097Z^{0.696}$
Sassen 等(1996)	地基 8 mm 雷达	地面产生降水的冰晶粒子	$IWC = 0.086Z^{0.83}$
Matrosov 等(2001)	众多反演结果的平均值	——	$IWC = 0.11Z^{0.63}$
Protat 等(2009)	8 mm 雷达统计结果	中高纬度地区冰云	$IWC = 0.082Z^{0.540}$

表 4 边界层和降水模式可测 LWC/IWC 范围

Table 4 LWC/IWC range of boundary layer mode and precipitation mode

高度	边界层模式		降水模式	
	120 m	5 km	120 m	5 km
Atlas(1954)	0.00~——	0.293~——	0.00~——	0.582~——
Sauvageot 等(1987)	0.00~——	0.221~——	0.00~——	0.623~——
Fox 等(1997)	0.00~——	0.391~——	0.00~——	1.31~——

注: 反演得到 LWC 远超云中可能液态水含量时, 以“——”表示, 单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

表 5 卷云模式可测 IWC 范围

Table 5 IWC range of cirrus mode

高度	Z-IWC 关系				
	Sassen(1987)	Schneide 等(1995)	Sassen 等(1996)	Matrosov(2001)	Protat 等(2009)
5 km	0.0003~——	0.0002~——	0.00001~——	0.0005~——	0.0007~——
15 km	0.0013~——	0.0010~——	0.0004~——	0.0018~——	0.0024~1.401

注: 反演得到 IWC 远超云中可能冰水含量时, 以“——”表示, 单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

层云中液态水含量变化范围是  $0.0002 \sim 0.520 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 总体平均值是  $0.140 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。积云液态水含量介于  $0.005 \sim 2.000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 总体平均值是  $0.875 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  (尹金方等, 2013)。卷云冰水含量 IWC 分布在  $10^{-4} \sim 1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  (David et al, 1990; 王敏, 2013)。

由表 4 保守估计可知, 边界层模式可以探测到 120 m 高度全部层云和积云以及 5 km 高度液态水含量在  $0.391 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的层云和积云。降水模式同样可以探测到 120 m 高度全部层云和积云, 但 5 km 高度上只能探测到液态水含量在  $1.31 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上

的积云。由表 5 保守估计可知, 卷云模式可以探测到 5 km 高度冰水含量在  $0.0007 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的卷云以及 15 km 高度上冰水含量在  $0.0024 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的卷云。

### 3 不同模式回波强度的偏差分析

为了解三种探测模式的差别, 需要对比三种探测模式观测同一目标的回波强度差异。选取回波强度在三种探测模式共同回波范围内的 3 个个例, 个例中包括层云、积云、高积云以及降水云等, 图 2 给

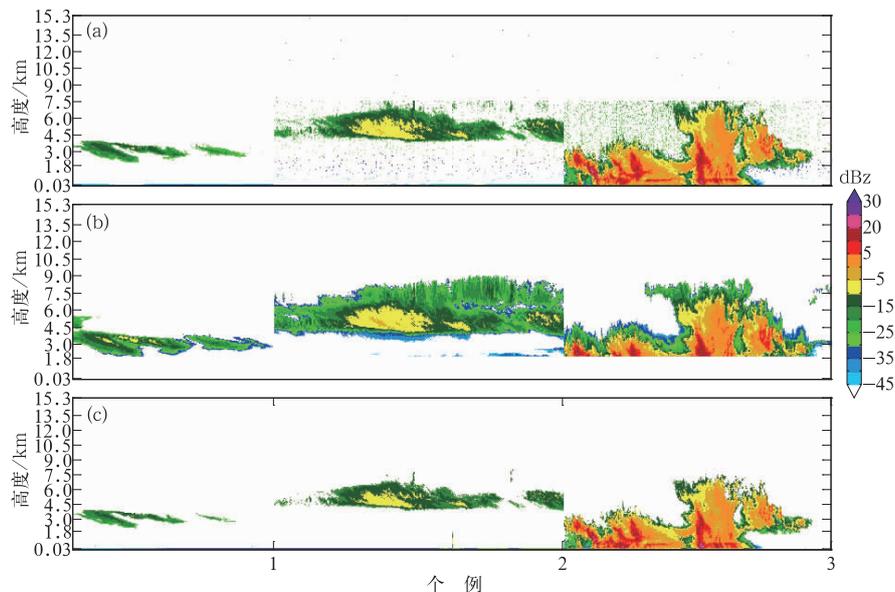


图 2 三种模式观测选取个例的回波强度

(a) 边界层模式回波强度, (b) 卷云模式回波强度, (c) 降水模式回波强度

Fig. 2 Reflectivity of three selected cases

(a) boundary layer mode, (b) cirrus mode, (c) precipitation mode

出了不同模式观测这些个例的回波强度。

从图 2 中可以看出,由于卷云模式最小可测回波强度最小,2.04 km 以上卷云模式回波最完整,对云体反映最清晰。边界层模式较降水模式最小可测回波强度高,回波较降水模式完整,可以探测到云体边缘较弱的回波。

为了解三种模式回波强度一致性,对三种模式的回波强度的差值进行对比分析,结果如图 3 所示。由图 3a 可知边界层模式较降水模式回波强度大,在个例 1 和个例 2 以及个例 3 大部分回波中,二者差

异不超过 2.5 dB。但边界层模式观测个例 3 的 510 m 高度以下的回波强度较降水模式回波强度差小且差异在 3 dB 以上。可能是由于边界层模式相干积累得益比理论值偏小造成的。图 3b 和 3c 显示卷云模式回波强度大于边界层模式和降水模式回波强度且差异在 3.5 dB 以内。

对同一目标进行观测的回波强度卷云模式最大,降水模式最小,但差异一般不超过 3.5 dB。边界层模式出现速度模糊时较降水模式偏小 3 dB 以上,这是由于相干积累不能到达理想增益造成的。

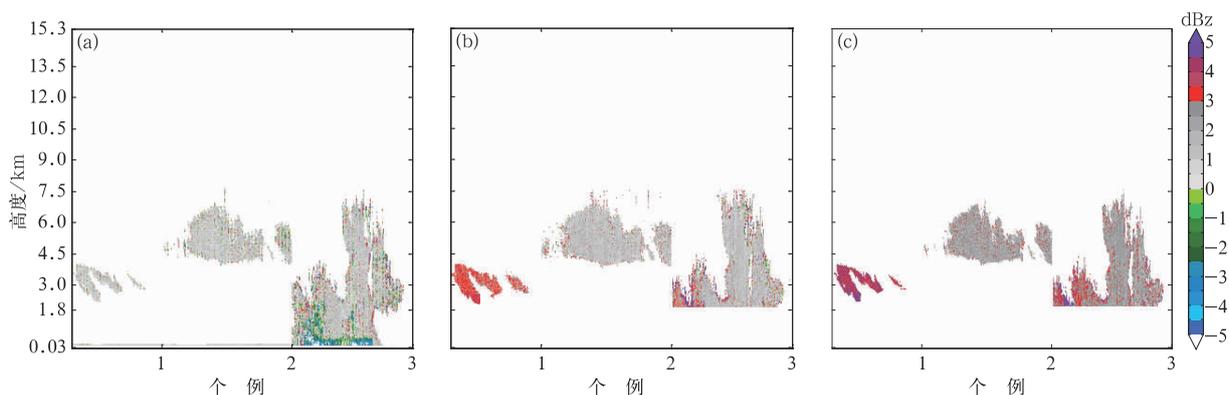


图 3 三种模式观测同一目标回波强度差异

(a) 边界层模式与降水模式回波强度差异, (b) 卷云模式与边界层模式回波强度差异, (c) 卷云模式与降水模式回波强度差异

Fig. 3 Reflectivity difference of three modes

(a) reflectivity difference between boundary layer mode and precipitation mode,  
(b) reflectivity difference between cirrus mode and boundary layer mode,  
(c) reflectivity difference between cirrus mode and precipitation mode

## 4 降水模式观测弱降水的准确性

通过分析毫米波雷达降水模式回波强度的准确度,可以了解毫米波雷达回波强度准确性,首先将两次试验中 K 波段微降水雷达底层回波强度与雨滴谱仪的回波强度进行对比,分析这两部仪器观测弱降水的准确度。进而利用 K 波段微降水雷达较高空回波强度与毫米波雷达回波强度进行对比,了解毫米波雷达回波强度的准确性。

### 4.1 K 波段微降水雷达和雨滴谱仪降水回波强度对比

从阳江试验中选取 11 d 675 min 的降水数据,那曲试验中选取 37 d 1295 min 的降水数据。首先对 K 波段微降水雷达和雨滴谱仪的数据进行时空一致性处理,进而对比了 K 波段微降水雷达的回波强度和雨滴谱仪的回波强度,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,在两次试验中,雨滴谱仪的回波强度和 K 波段微降水雷达第一个距离库的回波强度一致性很好,雨滴谱仪的回波强度比 K 波段微降水雷达回波强度大,阳江试验中两者的平均观测偏差为 1.81 dB,高原试验中两者平均观测偏差为 1.08 dB。这种差异可能是由两部仪器的采样体积不同造成的,可以认为 K 波段微降水雷达和雨滴谱仪对降水的观测是比较准确的。

### 4.2 K 波段微降水雷达和毫米波雷达降水回波强度对比

由于 K 波段微降水雷达观测降水比较准确,可以通过对比毫米波雷达降水模式和 K 波段微降水雷达回波强度差异了解毫米波雷达回波强度准确性。从阳江试验中选取 11 d 675 min 的降水数据,将 K 波段微降水雷达和毫米波雷达进行时空一致性处理后进行对比,结果如图 5a 所示,可以看出,阳江试验期间,毫米波雷达降水模式的回波强度与 K

波段微降水雷达的回波强度变化趋势比较一致, K 波段微降水雷达较毫米波雷达回波强度大, 平均观测偏差为 10.32 dB。从高原试验中选取 6 d 369 min 的降水数据, 进行时空一致性处理后的对比结果如图 5b 所示, 从高原试验开始到清除积水之前, K 波段微降水雷达和毫米波雷达降水模式的回波强度变化趋势比较一致, 差异比较稳定, 但是平均

观测偏差为 20.93 dB, 比阳江试验中增大了 10 dB 左右。清除天线罩内积水之后, K 波段微降水雷达和毫米波雷达回波强度的差异减小, 平均观测偏差降低至 8.18 dB。

毫米波雷达降水模式的回波强度比 K 波段微降水雷达的回波强度系统性偏小 8~10 dB 左右, 这可能是由毫米波雷达天线罩上的小水珠引起的系统

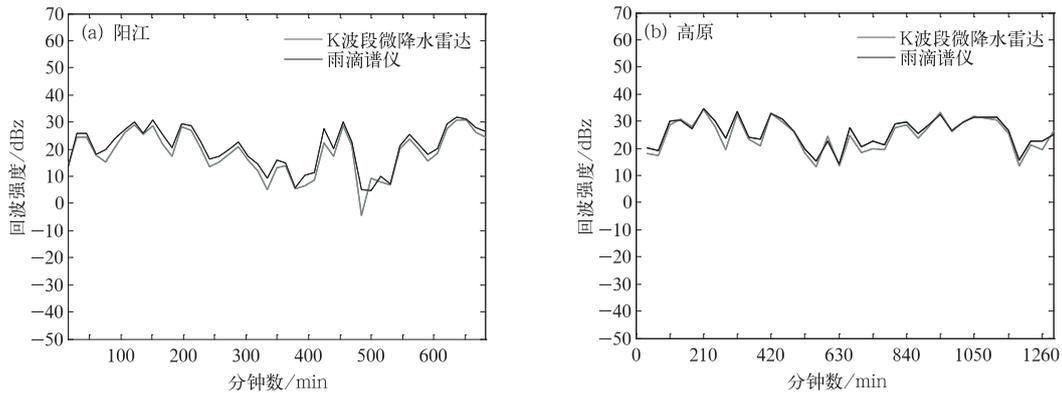


图 4 K 波段微降水雷达和雨滴谱仪的回波强度对比  
(a) 阳江试验, (b) 高原试验

Fig. 4 Reflectivity difference between K-band micro rain radar and laser optical disdrometer  
(a) difference in Yangjiang experiment, (b) difference in Tibetan experiment

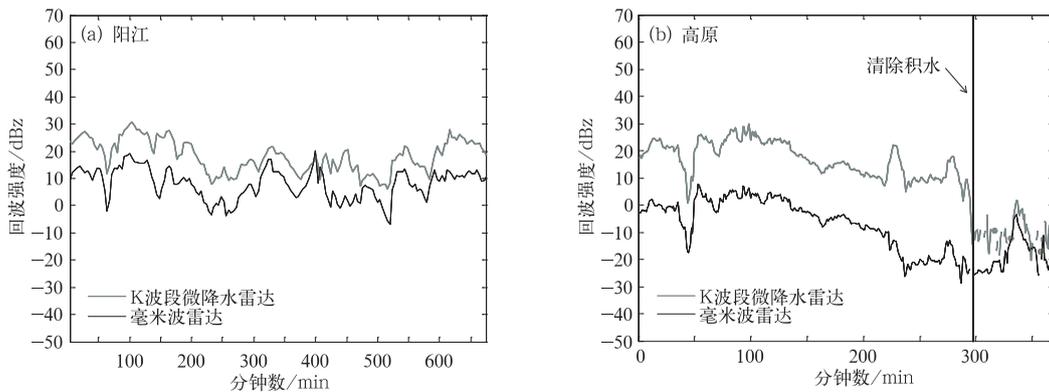


图 5 K 波段微降水雷达和毫米波雷达降水模式的回波强度对比  
(a) 阳江试验, (b) 高原试验

Fig. 5 Reflectivity difference between K-band micro rain radar and millimeter wave radar precipitation mode  
(a) difference in Yangjiang experiment, (b) difference in Tibetan experiment

性衰减(Moran et al,1998)。另外,清除天线罩内积水后,毫米波雷达与 K 波段微降水雷达的回波强度差异迅速减小,可见积水也是引起回波强度偏小的重要因素。

### 5 结 论

由中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验

室和中国航天研究二院第 23 研究所合作研发的多模式固态毫米波雷达 2014 年投入使用。本文利用其在 2014 年阳江试验和高原试验期间的数据,分析了该毫米波雷达不同探测模式最小可测回波强度、测云能力以及观测同一目标回波强度的差异,并联合同步观测的 K 波段微降水雷达和雨滴谱仪分析了该雷达回波强度的准确性,得到以下结论:

(1) 三种探测模式脉冲宽度和相干积累次数不

同,因而最小可测回波强度存在系统性差异,雷达实际工作中最小可测回波强度差异与设计指标相符。

(2) 边界层模式可以探测到 120 m 高度全部层云和积云以及 5 km 高度液态水含量在  $0.391 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的层云和积云。降水模式同样可以探测到 120 m 高度全部层云和积云,但 5 km 高度上只能探测到液态水含量在  $1.31 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的积云。而卷云模式可以探测到 5 km 高度冰水含量在  $0.0007 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的卷云以及 15 km 高度上冰水含量在  $0.0024 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的卷云。

(3) 三种模式观测同一目标的回波强度卷云模式最大,降水模式最小,但差异一般不超过 3.5 dB。边界层模式部分回波较降水模式偏小 3 dB 以上,可能是由于相干积累较理论值偏小造成的。

(4) 雨滴谱仪和 K 波段微降水雷达观测降水的回波强度非常接近,差异很小。毫米波雷达降水模式的回波强度比 K 波段微降水雷达的回波强度系统性偏小 8 到 10dB 左右,这可能是由毫米波雷达天线罩上的小水珠引起的系统性衰减。另外,积水是引起回波强度偏小的重要因素。

## 参考文献

- 李思腾,马舒庆,高玉春,等. 2015. 毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析. *气象*, 41(2):212-218.
- 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):567-572.
- 刘黎平,谢蕾,崔哲虎. 2014. 毫米波云雷达功率谱密度数据的检验和在弱降水滴谱反演中的应用研究. *大气科学*, 38(2):223-236.
- 刘黎平,郑佳峰,阮征,等. 2015. 2014 年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果. *气象学报*, 73(4):635-647.
- 刘军华. 2010. 不断发展中的行波管技术. *真空电子技术*, 4:83-86.
- 唐英杰,马舒庆,杨玲,等. 2015. 云底高度的地基毫米波云雷达观测及其对比. *应用气象学报*, 26(6):680-687.
- 王德旺,刘黎平,仲凌志,等. 2012. 毫米波雷达资料融化层亮带特征的分析及识别. *气象*, 38(6):712-721.
- 王敏. 2013. 卷云的分布及物理特性研究. 南京:南京信息工程大学.
- 温龙,刘溯,赵坤,等. 2015. 两次降水过程的微降雨雷达探测精度分析. *气象*, 41(5):577-587.
- 魏重,林海,忻妙新. 1985. 毫米波气象雷达的测云能力. *气象学报*, 43(3):378-383.
- 向敬成,张明友. 2005. 毫米波雷达及其应用. 北京:国防工业出版社, 386.
- 邢孟道,王彤,李真芳(译)Mark A Richards(著). 2012. 雷达信号处理基础. 北京:电子工业出版社, 374.
- 谢蕾,刘黎平,刘雯. 2014. 毫米波雷达与雨滴谱仪观测弱降水数据对比分析. *成都信息工程学院学报*, 29(1):39-45.
- 尹金方. 2013. 东亚区域云和降水微物理特征及云微物理参数化方案构建. 杭州:浙江大学.
- 仲凌志,刘黎平,葛润生,等. 2011. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究. *气象学报*, 69(2):352-362.
- 宗容. 2011. 毫米波雷达对云宏观特性的观测和研究. 南京:南京信息工程大学.
- Atlas D. 1954. The estimation of cloud parameters by radar. *Meteor*, 11:309-317.
- David R D, Lawrence F R. 1990. A summer of physical properties of cirrus clouds. *Appl Meteor*, 29:970-978.
- Eugene E C, Kenneth P M, Brooks E M, et al. 1999. The atmospheric radiation measurement program cloud Radars: operational modes. *Amer Meteor Soc*, 16:819-826.
- Fox N I, Illingworth A J. 1997. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar. *J Appl Meteor*, 36(5):485-492.
- Gossard E E, Snider J B, Clothiaux E E, et al. 1997. The potential of 8 mm radars for remotely sensing cloud drop size distributions. *J Atmos Oceanic Tech*, 14(1):364-372.
- Matrosov S Y. 2001. Attenuation-based estimates of rainfall rates aloft with vertically pointing ka-band radars. *J Atmos Oceanic Technol*, 22(1):43-54.
- Moran K P, Brooks E M, et al. 1998. An unattended cloud-profiling radar for use in climate research. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(3):496-515.
- Kollias P, Clothiaux E E, Miller M A, et al. 2007. Millimeter-wavelength radars: New frontier in atmospheric cloud and precipitation research. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(10):1608-1624.
- Lerach D G, Rutledge S A, Williams C R, et al. 2010. Vertical structure of convective systems during NAME 2004. *Mon Wea Rev*, 138(5):1695-1714.
- Protat A, Bouniol D, Delanoe J, et al. 2009. Assessment of cloud-sat reflectivity measurements and ice cloud properties using ground-based and airborne cloud radar observations. *J Atmos Oceanic Tech*, 26(9):1717-1741.
- Sassen K. 1987. Ice cloud content from radar reflectivity. *J Cli Appl Meteor*, 26(8):1050-1053.
- Sassen K, Liao L. 1996. Estimation of cloud content by W2 band radar. *J Appl Meteor*, 35:932-938.
- Sauvageot H, Omar J. 1987. Radar reflectivity of cumulus clouds. *J Atmos Oceanic Technol*, 4(2):264-272.
- Schneider T L, Stephens G L. 1995. Theoretical aspects of modeling backscattering by cirrus ice particles at millimeter wavelengths. *J Atmos Sci*, 52(23):4367-4385.
- Stokes G M, Schwartz S E. 1994. The Atmospheric radiation measurement (ARM) program: programmatic background and design of the cloud and radiation test bed. *Bull Amer Meteor Soc*, 75:1201-1221.
- Zhong Lingzhi, Liu Liping, Ge Runsheng, et al. 2011. A 35-GHz polarimetric Doppler radar and its application for observing clouds associated with Typhoon Nuri. *Adv Atmos Sci*, 28(4):945-956.