

Ka 波段毫米波云雷达探测能力的分析研究

赵 静¹, 马尚昌¹, 代桃高², 史 朝¹, 郑 丹¹

(1. 成都信息工程大学大气探测重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 信息工程大学导航与空天目标工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:目前, 中国在云自动观测领域做出许多创新性工作, 自主研发一种 Ka 波段全固态、全相参的脉冲压缩多普勒毫米波云雷达。主要从雷达的系统参数及关键技术方面, 介绍该雷达的基本探测能力, 并提取雷达基数据, 从数据处理的角度结合实例进一步分析毫米波云雷达的探测能力的可靠性。得出: (1) 毫米波云雷达基本满足云观测业务的使用要求, 得到回波强度、垂直速度、速度谱宽、云等气象产品数据, 且探测范围可达10 km以上高空, 垂直分辨率可达30 m。(2) 毫米波雷达能够获取云的基本信息, 包括云高、云量、云厚及云类等参数, 为云在其他领域的研究提供可靠的资料和信息。(3) 毫米波云雷达对不同类型的天气状况适应性强, 能够在降雨天气状况下, 清晰获取云内粒子回波强度的变化, 为预测云的发展及研究云的宏观特性(不同云之间的相互演变)提供良好的支撑, 且其发射的电磁波受雾、霾等天气现象的影响较小, 可以穿透云层并获取云体结构的内部信息, 掌握云的垂直结构。最后概括总结毫米波云雷达的探测能力并展望国内毫米波雷达未来研究方向。

关键词:毫米波云雷达; 探测能力; 反射率因子; 回波强度; 云; 数据可靠性分析

中图分类号: TN958.2

文献标志码: A

0 引言

云在研究天气系统和气候变化中担当重要角色, 一方面, 云在地球的水汽输送中起着极为重要的作用; 另一方面, 云的辐射效应显著影响地气辐射收支平衡^[1]。因此, 对云物理参数的准确获取显得尤其重要, 云过程的观测和研究也一直是大气科学研究领域的难点和热点之一。

目前研究地基云自动观测设备多种多样, 但在获取云信息时受到各种条件或因素的影响导致准确性不高, 可靠性不够。激光云高仪发射的激光容易受雾、霾、气溶胶粒子衰减, 尤其在低能见度下, 大气中的气溶胶粒子较大, 对激光衰减强烈而致使其无法穿透近地雾霾层到达云层, 严重影响云数据获取^[2]。探空气球能够穿过云层获得整层高精度的大气廓线, 但受运动轨迹和探测气象要素的感应元件对周围环境变化存在滞后几秒的响应时间的影响, 对云高数据的获取存在一定误差^[3]。早在20世纪50年代, 国外已经展开了毫米波云雷达的研制, 美国、德国、英国、日本先后研制出不同平台(机载、地基、可移动式)和不同频段(95 GHz、35 GHz)的测云雷达, 并运用于大气探测中^[4]。中国较国外晚30年左右, 在1979年, 中科院大气所联合井冈山厂利用真空管成功研制 Ka 波段雷

达, 与天气雷达观测云和弱降水结构, 这是中国首次利用毫米波雷达进行云观测, 受技术限制, 定量分析不足^[5]。毫米波云雷达作为中国新兴起的研究云物理结构的工具, 需要对其探测能力进行综合性分析, 保证雷达获取的云观测资料具有极度高的测量精度与数据利用的可靠性。因此, 在处理雷达数据前对雷达自身工作参数进行分析标定是必要环节, 对雷达数据处理分析是雷达探测能力可靠性研究的重要内容。

文中重点介绍 Ka 波段毫米波云雷达系统参数及技术特点方面, 研究并检验其探测能力, 并结合毫米波云雷达实例进一步分析其性能的可靠性。

1 毫米波云雷达系统

1.1 系统组成与工作原理

研究的 Ka 波段(8.6 mm)毫米波云雷达是一种全固态、全相参、脉冲压缩多普勒雷达, 工作频率为35 GHz, 采用2.4 m口径圆形抛物面天线, 固态功率器件合成发射机, 高稳定度、低相噪频率源, 大动态接收机, 数字式信号处理机, 并具有发射机脉冲功率测量、接收机噪声系数测量、接收机特性的检测和标定等功能。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。系统由天馈线、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及附属设备组成^[6], 如图1所示。

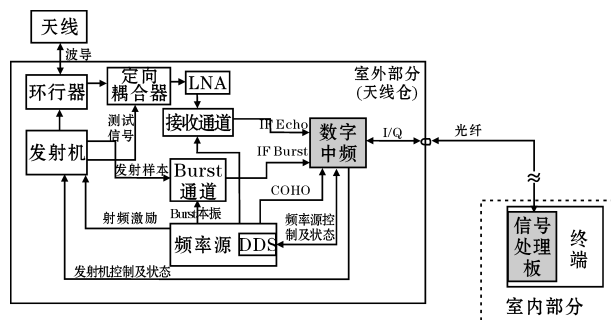


图1 Ka波段固态多普勒测云雷达系统组成框图

Ka波段固态多普勒测云雷达发射机将来自频率源的射频激励信号进行放大,输出大功率射频脉冲信号并馈送至天线,经天线集束向空间辐射。当目标进入波束内时,便产生目标反射回波被天线接收,经环行器馈送至接收机。回波信号进入接收机高频模块,经限幅器进入低噪声放大器。信号被放大后再经过镜像抑制滤波器,然后进入混频器与来自频率源系统的本振信号混频,形成30 MHz中频信号。中频信号又经过放大、滤波等处理后给数字中频接收机。接收机中另有一路为样本通道,该通道是将发射机输出的信号耦合后作为样本通道的射频信号,与频率源产生的本振信号进行混频后经过放大滤波等处理送至数字中频接收机。然后进入信号处理器,对来自接收机的中频回波信号,先进行A/D变换、中频采样,再经过数字混频、滤波、脉冲压缩后抽取等处理得到IQ信号,并将IQ信号经光纤通信方式传上传,最终通过网络数据包的方式将处理结果送往终端操控显示系统。

1.2 信号处理关键技术

信号处理采用中频采样数字下变频、FFT滤波、脉冲压缩、大点数相参积累加视频积累,由于天线扫描转速 $0^\circ/\text{s}$,并兼顾到云层的变化与测量的准确性,相参积累先采用1024/512点FFT滤波,再进行二次积累。毫米波测云雷达利用全相参技术使多个脉冲积累后有效地提高信噪比,从而改善雷达的检测能力。并通过采取大、小时宽发射信号相结合的方法,大时宽发射信号保证Ka波段固态多普勒测云雷达系统的 $R_{\max} \geq 10 \text{ km}$ 的探测能力,小时宽发射信号保证测云雷达系统近距离遮挡盲区 $R_{\min} \leq 0.1 \text{ km}$ 。大时宽发射信号通过脉冲压缩技术处理,可保证Ka波段固态多普勒测云雷达系统的距离分辨率和距离测量精度。

1.2.1 脉冲压缩技术

脉冲宽度是影响雷达探测能力的一个重要因素。增加脉冲宽度,能够提高返回信号的回波功率,降低噪声功率,从而有效提高雷达系统的探测能力,但返回信号的距离分辨率有所降低,不利于对云目标结构的精

细化探测^[7]。因此用脉冲压缩技术来保证距离分辨率。其工作原理是宽脉冲和窄脉冲交叉使用,发射时采用宽脉冲发射,提高发射机的平均发射功率,保证雷达的最远探测距离。接收时,通过脉冲压缩技术将宽脉冲变为窄脉冲,从而提高距离分辨率。测云雷达一般要求距离分辨率在75 m以下,即脉冲宽度为 $0.5 \mu\text{s}$ 以内为宜^[8]。Ka波段毫米波测云雷达结合大小时宽脉冲信号,解决远距离探测精度和分辨率的问题。大时宽信号脉冲宽度为 $20 \mu\text{s}$,脉冲压缩比为100,则小时宽信号压缩后脉冲宽度为 $0.2 \mu\text{s}$,使其返回信号的距离分辨率达到30 m,完全符合测云雷达系统距离测量精度和分辨率的需要。

1.2.2 全相参技术

在返回信号处理中,常用快速傅里叶变换谱分析法(FFT)或脉冲对处理技术(PPP)估算谱参数^[9]。也就是在包络检波完成前,将多个具有严格相位关系的信号脉冲叠加(即相参积累),使信号的幅度提高,相应的信号功率也提高。而噪声是随机的,对每一个距离单元来说,相邻重复周期的噪声满足统计独立条件,积累的效果是使平均功率叠加,从而使噪声的总功率提高,因此采用相参积累可以使信噪比(SNR)提高,从而改善雷达的检测能力。

1.3 探测能力估算

根据Ka波段功率器件与近距离测云雷达系统信号形式的兼容性,在技术上与成本上降低对固态发射机的压力,在雷达系统保证对非雨云探测能力的条件下,反射率因子可探测到 -40 dBz 。在保证接收到的回波功率在接收灵敏度之上,对目标的有效探测距离进行估算。

探测距离估算借用普通雷达方程为

$$R_{\max} = \left[\frac{DP_t G^2 \lambda^2 \sigma n F_1^2 F_2^2}{(4\pi)^3 K T_s B_0 \left(\frac{S}{N} \right)_1 L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中, D :脉冲压缩比(大小时宽); P_t :发射机输出功率; G :天线增益; λ :雷达工作波长; σ :气象目标反射率因子; n :脉冲重复周期与相参积累; FN :噪声系数; B :接收带宽; T :绝对温度; K :波尔兹曼常数(取 $K = 1.38 \times 10^{-23}$); L :传输损耗。

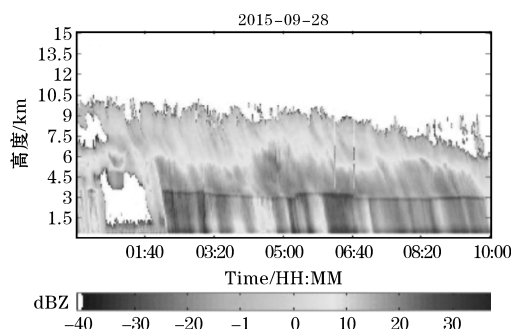
经计算,大时宽信号($20 \mu\text{s}$)最大探测能力达到12.5~14.8 km,小时宽信号($0.2 \mu\text{s}$)最大探测能力为3.94~4.68 km。大时宽发射信号近距离遮挡盲区3 km,小时宽发射信号最大探测距离 $\geq 3.9 \text{ km}$,可以解决远距离探测能力与近距离遮挡盲区的矛盾。小时宽发射信号时宽与脉冲压缩后子码宽度 $0.2 \mu\text{s}$,对应

距离30 m,完全符合测云雷达系统距离测量精度和分辨率的需要,这也正是毫米波雷达的优势所在。

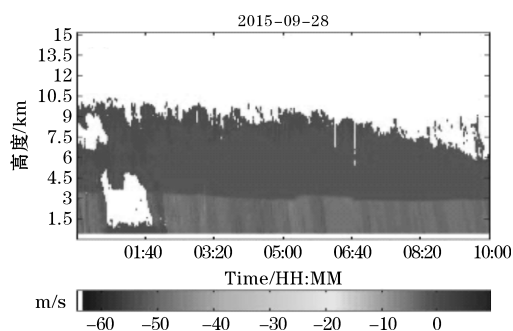
2 毫米波测云雷达实例分析

2.1 一次降水天气现象的分析

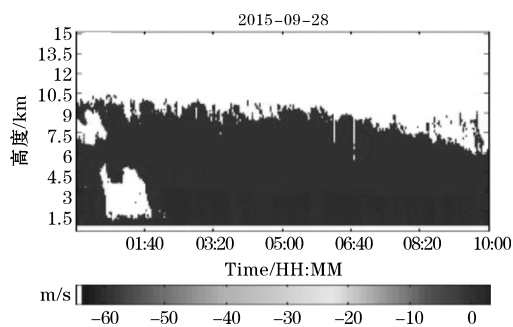
图2是毫米波云雷达在2015年9月28日进行连续10小时观测的一次降水天气现象过程,观测采用大小时宽结合的方式,垂直分辨率30 m,时间分辨率1 s。



(a) 反射率因子



(b) 速度



(c) 谱宽

图2 毫米波云雷达探测到的一次降水天气过程

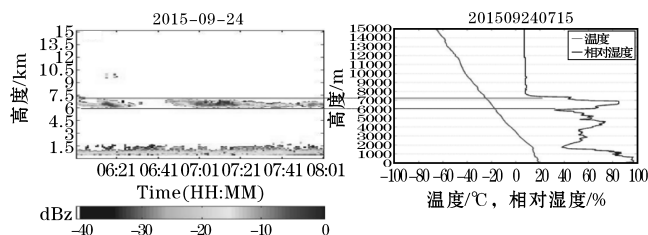
在微观云物理学中,云体是由云粒子(云滴、冰晶)和降水粒子(雨、雪、冰雹)组成。根据2005年Kogan et al^[10]提出非降雨云的标准,认为-17 dBZ是降水粒子出现的最低反射率值。从反射率图中可以看出,云内粒子的最小回波强度为-25 dBZ,最大值可达36 dBZ,是由两种粒子共同组成。从云体结构上看,云

的回波顶高约为10 km,回波顶最大强度达-9 dBZ。上层云体密度较稀,云内部有明显的下沉运动^[11]。云体不断发展,在凌晨2点以后反射率因子增大,云内降水粒子回波强度增强,出现了明显的0℃层亮带,是产生连续性降水的显著特征之一^[12]。该亮带以上大部分为冰晶粒子,从速度谱中可以看出云层上部冰晶粒子的速度几乎为0,在下落过程中,粒子慢慢增大到-2 m/s,当穿过亮度带变成雨滴后,速度迅速增大到-6 m/s,其中部分时段最大可达-8 m/s。从谱宽信息中得知,0℃亮带以上冰晶粒子谱宽很小,几乎不超过1 m/s,往下谱宽迅速增大为2 m/s。

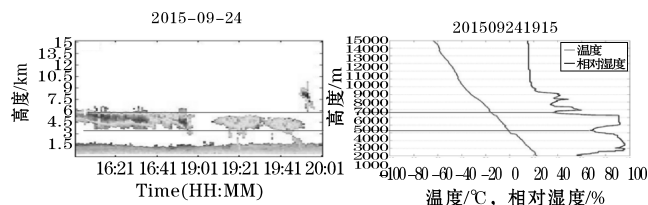
综上所述,从雷达回波图中可以清楚地得到云体内部结构信息,为预测云体的发展及研究云的宏观特性提供良好的基础,且采用大小时宽结合的方式,探测到盲区3 km以内的降水粒子,充分展现了毫米波测云雷达的效果和能力。

2.2 一次雾霾天气现象的分析

图3(a)是毫米波云雷达在2015年9月24日(6:00~8:00)有雾天气状况下连续2小时观测的反射率因子强度与探空07:15开始探测的温湿廓线图。图3(b)是毫米波云雷达在该天(18:00~20:00)有霾天气状况下连续2小时观测的反射率因子强度与探空19:15开始探测的温湿廓线图。



(a) 反射率因子与温湿廓线(雾)



(b) 反射率因子与温湿廓线(霾)

图3 一次雾霾天气过程

在2015年9月24日早上6:00~8:00有雾天气状况下,其能见度为2 km。从图3(a)反射率因子强度看出,雷达探测到6 km以上高空的稀薄云层,云底高度为6014 m,云层厚度约为642 m,云内粒子平均回波强度为-8 dBZ,最大值为0 dBZ,最小值为-21 dBZ。探空温湿廓线图中反映出高度在6~7 km确实检测到确

实存在有云的存在。即相对湿度阈值法^[13-14],相对湿度在6 km云底处有正的跳变,7 km云顶处有负的跳变,且云中相对湿度最小值不小于84%,当温度在0℃以下时采用冰面饱和水汽压计算相对湿度。在晚上18:00~20:00有霾天气状况下,能见度为4 km。图3(b)可见云的回波强度有两块,以时间点19:00为分界点,19:00以前左边一块为高层云,强度范围在-32~-20 dBz之间,19:00以后右边一块是高积云,强度在-21~5 dBz。尤其是在19:00以后,云体内部有向下发展的趋势,在1~3 km检测到不连续且非常稀少反射率因子,回波强度十分微弱。探空温湿廓线在19:15后,相对湿度在3~5500 m,检测到的3065~5742 m的云层,与雷达检测到的2978~5633 m云层相呼应。

可见毫米波雷达对不同天气的适应性强,在低能见度(10 km以内)雾霾天气状况下,毫米波发射的电磁波受其影响较小,对电磁波的衰减微乎其微,使其可以穿透云层,获得云体内部结构信息,且与探空基本保持一致,准确性得到保证,同时也充分展现毫米波雷达的可靠性。

2.3 不同云类的分析

图4是毫米波云雷达在不同云层探测到的不同云类的反射率因子。图4(a)检测到两层云的存在,第一层云为低云族中的层云,云底平坦基本为水平状,平均高度为931 m,云顶也发展均匀且平坦,平均高度为2351 m。第二层云为高云族中的卷积云,云体分离散乱,呈丝缕状结构,其平均云底高为7695 m,平均云顶为8624 m。图4(b)云层出现在2500~5000 m的中云族,云体结构均匀成层,云层厚度约为1500 m,云顶和云底均发展均匀,符合高层云的特征^[15]。图4(c)检测到8 km以上高空的卷云,其平均云底高为7821 m,云厚为3318 m,云顶高度达到11139 m的高空。云内分布有-5~3 dBz的强回波块,云体发展比较旺盛。

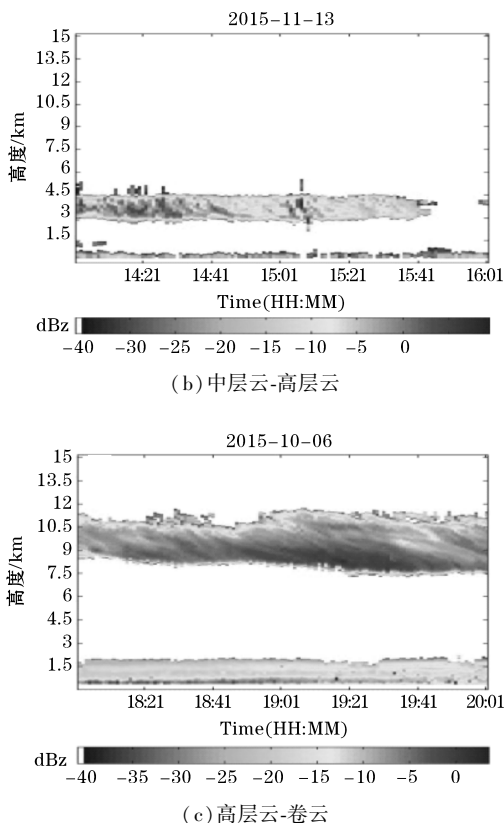
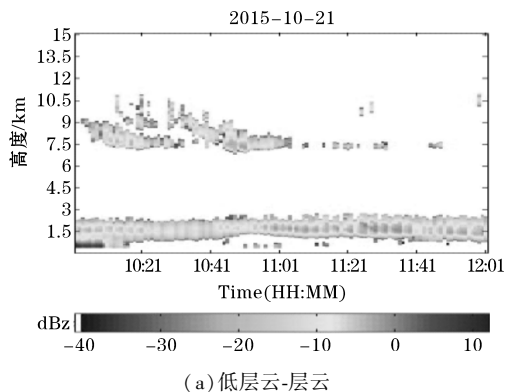


图4 毫米波云雷达探测到的不同云状的反射率因子

毫米波云雷达能够准确探测到不同云层不同类型的云,具有高精度的时间和空间分辨率,并且使用脉冲压缩和全相参技术,采用大小时宽结合的方式,使其探测能力提升到10 km以上的高空,与硬件系统对探测能力的估算得到充分的验证,保证了其性能的可靠性。

3 结论

毫米波云雷达是中国自主研发的用于大气探测业务的云自动观测设备,从硬件参数及关键技术方面分析得出:毫米波云雷达能够基本满足云观测的使用要求,得到回波强度、垂直速度、速度谱宽、云等气象产品数据,且在信号处理中引入脉冲压缩和全相参积累技术进一步提高了雷达的探测能力,使毫米波云雷达系统的垂直距离分辨率最大为30 m,探测到的最小粒子回波强度可为-40 dBz,且探测范围可达到10 km以上高空。

同时从理论分析和实际观测两方面对雷达探测能力进行研究,引入实例进行数据处理分析,得出:(1)毫米波雷达能够获取云的基本信息,包括云高、云量、云厚及云类等参数,为云在其他领域的研究提供可靠的资料和信息。(2)毫米波云雷达对不同类型的天气状况适应性强,能够在降雨天气状况下,清晰获取到云内粒子回波强度的变化,为预测云的发展及研究云的

宏观特性(不同云之间的相互演变)提供良好的支撑,且其发射的电磁波受雾、霾等天气现象的影响较小,可以穿透云层并获取云体结构的内部信息,掌握云的垂直结构。

毫米波云雷达作为地基主动式云自动观测设备,从各方面都充分展现了其探测能力的可靠性,为大气探测云的发展提供了丰富的研究信息。联合毫米波雷达与其他遥感手段(如微波辐射计、探空仪、FY-2静止卫星等)共同研究云的特征,充分发挥毫米波雷达探测小粒子的优势作用,这将是今后发展的重要方向之一。国内毫米波的研制和应用与国外相比还存在一定的差距,随着毫米波技术的不断成熟,毫米波测云雷达各方面探测能力的完善,将会是今后最适合云观测业务的地基云观测设备,并有可能在不久的将来达到世界的先进水平。

参考文献:

- [1] 陆雅君,陈刚毅,龚克坚,等. 测云方法研究进展[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 689-697.
- [2] 唐英杰,马舒庆,杨玲,等. 云底高度的地基毫米波云雷达观测及其对比[J]. 应用气象学报, 2015, 26(5): 1-9.
- [3] 杨湘婧,徐祥德,陈宏尧,等. L波段高空分辨率廓线中近地层信息分析及相关模型[J]. 气象, 2011, 37(12): 1504-1510.
- [4] 仲凌志,刘黎平,葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(4): 383-391.
- [5] 刘黎平,仲凌志,江源,等. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析[J]. 气象科技, 2009, 37(5): 567-571.
- [6] 仲凌志. 毫米波测云雷达系统的定标和探测能力分析及其在反演云微物理参数中的初步研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2009.
- [7] 仲凌志,刘黎平,葛润生,等. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究[J]. 气象学报, 2011, 69(2): 352-362.
- [8] 高磊,范亚驹. W波段测云雷达探测能力分析[J]. 电子世界, 2013, (8): 103-104.
- [9] 宗蓉. 毫米波雷达对云宏微观特性的探测和研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2014.
- [10] Kogan, Z N, D B Mechem, Y L Kogan. Assessment of variability in continental low stratiform clouds based on observations of radar reflectivity[J]. Geophys. Res., 2005, 110.
- [11] 吴举秀,魏鸣,周杰. 94GHz云雷达回波及测云能力分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 402-416.
- [12] 葛润生. 云的雷达探测[J]. 气象, 1981, (6): 42-44.
- [13] 周毓荃,欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象, 2010, 36(11): 50-58.
- [14] Zhang J, H Chen, Z Li, et al. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar[J]. Geophys. Res., 2010, 115.
- [15] 范辉,黄兴玉,苏涛,等. 毫米波测云雷达气象探测应用初探[J]. 气象与减灾研究, 2011, (专刊).

Analysis and Research on the Detection Capability of Ka-band Millimeter Wave Cloud Radar

ZHAO Jing¹, MA Shang-chang¹, DAI Tao-gao², SHI Zhao¹, ZHENG Dan¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Detection, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Department of Navigation and Aerospace Engineering, The PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: At present, China has made a lot of creative works in the field of automatic cloud observation, independently developed a full solid state and coherent dual liner polarization of millimeter wave cloud radar. This paper introduces the detection capability of the radar mainly from the parameters of radar system and the key technology, and extracts the radar base data to further analysis the reliability of the detection ability of the millimeter wave cloud radar, by combining with instances from the perspective of data processing. The main conclusion to be draw from this paper are the following: (1) the millimeter wave radar basically meets the requirement of the cloud observation service, and gets the meteorologi-

cal data products such as echo intensity, vertical velocity, velocity spectrum width, cloud and so on. Also, it can reach more than 10 km altitude in detection range and reach 30m in vertical resolution. (2) Millimeter wave radar is capable of obtaining the cloud of basic information, including the cloud height, cloud cover and cloud thickness and cloud variety, which can provide reliable data and information in other areas of research. (3) The adaptability of millimeter wave radar for different types of weather conditions is strong. In rainfall weather conditions, the cloud particles within the echo intensity change can be obtained, providing good support for the development of cloud prediction and cloud research of macroscopic properties (to the mutual evolution between different clouds). Also, the emission of electromagnetic waves by millimeter wave radar is less affected by fog, haze and other weather phenomena. It can penetrate clouds and obtain information about the internal cloud structure to grasp the cloud vertical structure. Finally, the detection ability of the millimeter wave radar is summarized and the future research direction of millimeter wave radar in China is prospected.

Key words: the millimeter wave radar; detection capability; reflectivity factor; echo intensity; clouds; data reliability analysis