

吴举秀,魏鸣,苏涛,等. W波段和Ka波段云雷达探测回波对比分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):57-64.  
Wu Juxiu, Wei Ming, Su Tao, et al. Comparison of the echoes detected by W-band and Ka-band cloud radars [J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(2): 57-64. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.007. (in Chinese)

## W波段和Ka波段云雷达探测回波对比分析

吴举秀<sup>1</sup>, 魏鸣<sup>2</sup>, 苏涛<sup>3</sup>, 王学荣<sup>3</sup>, 李勇<sup>3</sup>, 范亚驹<sup>3</sup>

(1. 山东省气象局大气探测技术保障中心, 山东 济南 250031; 2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 3. 四创电子有限公司, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 通过分析 W 波段和 Ka 波段云雷达同时探测回波的差异, 验证了 W 波段云雷达初样机的探测性能。结果表明: 1) W 波段云雷达初样机工作稳定, 两个波段雷达都可以探测云层、云的边界、云厚等宏观参数, 也可以反映出云的精细结构及云内微物理参数的变化, 回波强、速度小、谱宽大的冰晶云含有上升气流及较多过冷水。2) 增强模式的 W 波段云雷达在近地面探测雾、霾的能力比 Ka 波段云雷达强; 两部云雷达对云层较薄的云探测能力基本相当, 对多层云、云层较厚、含水量较多的云及降水的探测, 由于强衰减的作用, W 波段雷达所测云厚度小、云顶低、回波强度小, 并且非瑞利散射也会造成 W 波段雷达的回波强度降低。

**关键词:** W 波段云雷达; Ka 波段云雷达; 探测能力; 云回波; 云微物理参数

**中图分类号:** P412.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)02-0057-08

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.007

## Comparison of the echoes detected by W-band and Ka-band cloud radars

WU Juxiu<sup>1</sup>, WEI Ming<sup>2</sup>, SU Tao<sup>3</sup>, WANG Xuerong<sup>3</sup>, LI Yong<sup>3</sup>, FAN Yaju<sup>3</sup>

(1. Ensuring Center of Atmospheric Sounding Technology, Shandong Provincial Meteorological Bureau, Jinan 250031, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Anhui Sun-Create Electronics Corporation Ltd., Hefei 230088, China)

**Abstract** By analyzing the difference between the echoes detected by the W-band radar and the cloud echoes detected by Ka-band radar at the same time, the detection capabilities of the W-band radar prototype are verified. The results show that: 1) W-band radar prototype operates reliably. The macro-parameters of clouds including the layer, boundary and thicker, the fine structure of cloud and the change of the microphysics parameters of clouds can be obtained by both the two band radars. Strong echoes, small speed and broad spectrum of ice clouds reveal existence of updrafts and more supercooled water. 2) The capabilities to detect fog and haze of W-band radar with enhancement pattern in close to the ground is stronger than that of Ka-band radar. The two cloud radars have the same detection capabilities to thin clouds, but the less thicker, lower cloud top and less echo intensity for precipitation and thick clouds with more water content and multilayer clouds are measured by W-band radar because of the stronger attenuation to W-band radar, and the echo intensity of W-band radar is also reduced in the case of Rayleigh scattering.

**Key words** W-band cloud radar; Ka-band cloud radar; detection capabilities; cloud echoes;

收稿日期: 2017-04-20; 修订日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41305031); 山东省气象局课题(2015sdqxm13); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者: 吴举秀(1974—), 女, 博士, 主要从事雷达气象学研究, gurunmin@163.com。

microphysics parameters of clouds

## 引言

毫米波测云雷达对非降水云及弱降水云的探测具有很大的优势,20世纪60年代美国空军研制了AN/TPQ-11型Ka波段云雷达(波长8.5 mm),替代云幕测量仪监测机场的云<sup>[1]</sup>,80年代早期研制了W波段云雷达(波长约3.2 mm),后期主要用于云物理和降水物理研究项目中,用来研究小积云的湍流结构<sup>[2]</sup>。20世纪90年代美国研制了8 mm波合成孔径雷达及35 GHz/94 GHz双频云雷达,用于探测和识别冰云、过冷水和云滴谱,1996年美国在云辐射测试项目中使用了新型的无人操控式35 GHz云雷达,长期探测非降水云及弱降水云的回波特征<sup>[3]</sup>。黄毅梅和周毓荃<sup>[4]</sup>利用美国云辐射测试项目中使用的94 GHz云雷达分析了一次冷锋云系的云结构。Shupe等<sup>[5-7]</sup>利用35 GHz云雷达结合多种探测仪器的探测资料研究了混合相云的特性,Luke等<sup>[8]</sup>利用毫米波雷达的多普勒速度谱识别过冷水。英国在20世纪90年代发展了94 GHz多普勒云雷达Galileo和35 GHz多普勒云雷达Copernicus,Hogan等<sup>[9]</sup>联合两部雷达进行了冰水含量反演,吴举秀等<sup>[10]</sup>利用两部云雷达研究了不同类型云的回波特征。德国1999年研制了3 mm波长的极化雷达用于观测层状云,日本在2000年及2003年分别研制出95 GHz机载云廓线雷达和35 GHz的多普勒雷达,2006年发射的CloudSat搭载了94 GHz云雷达,为研究云辐射特性提供了云内液态水和冰水的垂直廓线<sup>[11]</sup>,仲凌志等<sup>[12]</sup>利用星载毫米波测云雷达研究了冻雨形成的云物理机制。

1979年中国科学院大气物理研究所和安徽井冈山机械厂合作研发了X波段(3 cm)和Ka波段(8.2 mm)双波长雷达,目前已有多个公司生产出不同型号的Ka波段云雷达应用于云微物理研究及人工影响天气等方面,孙晓光<sup>[13]</sup>研究了毫米波雷达在航空气象保障中的应用,宗蓉等<sup>[14]</sup>利用中国第一部灵敏度较高的35 GHz多普勒双极化雷达研究了降水粒子反射率因子的阈值。中国W波段云雷达研究起步较晚,目前南京信息工程大学研制了应用磁控管的94 GHz云雷达,2013年安徽四创电子有限公司863项目组研制了一台机载W波段双极化云雷达,Wu等<sup>[15]</sup>利用该雷达首次成功探测的云回波,分析了含有毛毛雨的层积云回波特征,并进行

了云物理参数的初步反演。此后安徽四创电子有限公司继续开展地基W波段云雷达研究测试,并将研制35 GHz/94 GHz双频云雷达,2015年成功研制地基W波段多普勒双极化云雷达初样机,为了验证该雷达初样机测云的可靠性,与Ka波段云雷达进行了多次对比试验,Ka波段云雷达也是该公司研制成功的,其探测性能已经得到验证。本文利用2015年1月和3月W波段云雷达与Ka波段云雷达的静态比对试验,通过比较两个波段云雷达的探测回波的差异及原因,验证W波段云雷达测云工作稳定性及探测性能,并简单分析了所测云的宏观特性。

## 1 设备及定标

### 1.1 设备简介

试验时,将W波段雷达与Ka波段雷达放在同一地点(两设备相距2 m)进行开机探测,两部雷达都固定不动,采取天线垂直指向天顶的扫描方式。两部雷达工作时的基本参数见表1。

表1 雷达工作参数

Table 1 Radar working parameters

工作参数	W波段雷达	Ka波段雷达
频率	94.58 GHz	35 GHz
波长	3.17 mm	8.6 mm
脉冲重复频率	2 kHz	2 kHz
发射功率	1.5 kW	0.6 kW
脉宽	1.32 $\mu$ s	0.5 $\mu$ s / 20 $\mu$ s
脉冲压缩比	—	40
距离库长	200 m	75 m
最大不模糊速度	-1.63~1.63 m/s	-4.3~4.3 m/s
噪声系数	9 dB	4.5 dB
脉冲积累数	256	128
接收机灵敏度	-100 dBm	-106 dBm
噪声系数	<9 dB	<4.5 dB

两部雷达都采用“单发-双收”极化体制,发射固定的水平极化波,同时接收回波的水平极化(同极化)分量和垂直极化(正交极化)分量,即双路接收机同时接收后向散射回波的同极化和正交极化分量。Ka波段测云雷达采用组合脉冲的工作模式,在3.3 km以内采用0.5  $\mu$ s的窄脉冲,在3.3 km以外采用20  $\mu$ s的宽脉冲。Ka波段雷达采用宽脉冲发射可以提高发射机的平均功率,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。W波段雷达脉冲宽度也有两种,标准工作模式时采用0.33 μs的窄脉冲,增强工作模式时采用1.32 μs的宽脉冲。当W波段雷达采用0.33 μs脉冲工作时,3.3 km以内的探测能力与Ka波段雷达相当,3.3 km以外的探测能力远低于Ka波段雷达;当采用1.32 μs脉冲工作时,3.3 km以内的探测能力优于Ka波段雷达,3.3 km以外探测能力略低于Ka波段雷达。在静态试验中,W波段雷达均采用脉宽为1.32 μs的增强工作模式,探测灵敏度较高。

## 1.2 定标

为了确保静态试验数据的准确性,在每次试验前需要对雷达进行系统定标,通过定标确定雷达当前的技术状态。首先根据雷达的工作参数,验算该雷达的探测能力,不考虑云、雨等的衰减,根据雷达气象方程可以推导出回波强度 $Z$ 的计算公式:

$$Z = 10 \log \left( \frac{1.024 \ln 2 \lambda^2 p_r}{|K|^2 \pi^3 p_t \tau \theta^2} \right) + 20 \log R - 2G_0 + L_s + R \times L_p + 150 \quad (1)$$

其中, $Z$ (dBZ)为回波强度, $p_r$ (kW)为发射脉冲峰值功率, $p_r$ 为接收机接收到的功率, $\lambda$ (mm)为波长, $\tau$ (μs)是脉冲宽度, $\theta$ 是波束宽度, $G_0$ (dB)为天线的增益, $L_s$ (dB)是雷达系统馈线总损耗, $R \times L_p$ (dB)为电磁波在大气中的传输衰减,公式右侧的150是将距离、功率、波长等参数从国际标准单位转化为雷达气象中常用单位而产生的值, $|K|^2$ 是粒子的介电因子。即 $|K|^2 = |m^2 - 1|^2 / |m^2 + 2|^2$ , $m$ 为气象目标复折射指数,不同频率雷达的 $|K|^2$ 取值见文献[3],厘米波雷达通常取 $|K|^2 = 0.93$ ,Ka波段雷达通常取0.87,文中的W波段雷达取 $|K|^2 = 0.668$ 。根据文献[3],两个波段雷达对应冰晶的介电因子基本一样,所测回波强度应该一致,但雷达气象方程中实际用水的介电因子,水的介电因子在W波段比在Ka波段小,所以会因为介电因子的取值造成W波段雷达探测的冰晶云的实际回波强度偏大一点。雷达常数 $C_0$ 定义为:

$$C_0 = 10 \log \left( \frac{1.024 \ln 2 \lambda^2}{|K|^2 \pi^3 p_t \tau \theta^2} \right) - 2G_0 + L_s + 150 \quad (2)$$

雷达发射机功率、接收机噪声系数变化都会对回波强度(反射率因子)探测精度有直接影响,因此在试验前需要对发射功率、噪声系数、脉冲宽度作定标检测,根据实测值对雷达常数 $C_0$ 进行修正。线性退极化比探测精度与双路接收机(同极化接收

机、正交极化接收机)的一致性直接相关,实验前,用外接信号源分别注入两路接收机,在强、中、弱3种输入功率下,分别检测两路接收机的输出强度,根据两通道差对退极化比测量值进行修正。将接收机可测到的最小功率及雷达相应的参数带入公式(1),可得到雷达探测能力。W波段云雷达脉冲宽度取1.32 μs;Ka波段云雷达脉冲宽度在3.3 km以内取0.5 μs,在3.3 km以外取20 μs;不同距离处雷达可测最小回波强度见表2。不考虑衰减,W、Ka波段云雷达在1 km处最小可测雷达回波强度分别为-43 dBZ、-35 dBZ,随高度增加变大,由于Ka波段云雷达脉冲宽度在3.3 km以外取20 μs,所以3.3 km以外可测最小回波强度要小于W波段云雷达。实际上,由于大气、云雨等的衰减,两部雷达可测最小回波强度都要比表中的值大,即测不到这么弱的回波。

表2 两部雷达不同距离处最小可测雷达回波强度

Table 2 The detectable minimum echo intensity of the two radars at different distance

	距离/km									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
W 雷达 回波强度/dBZ	-43	-37	-33	-31	-29	-27	-26	-25	-24	-23
Ka 雷达 回波强度/dBZ	-35	-29	-25	-39	-37	-35	-34	-33	-32	-31

## 2 回波对比分析

静态工作试验时间取2015年1月28、30日,3月23、26日,试验地点位于四创电子有限公司院内(31.821°N,117.19°E),两部雷达均为地面探测状态,波束垂直指向天顶。雷达主要探测4个参数:回波强度、多普勒速度、多普勒速度谱宽、线性退极化比LDR。线性退极化比是指雷达同时测到同极化信号的反射率因子( $Z_H$ )和正交极化信号的反射率因子( $Z_V$ )的比值,即 $LDR = 10 \log(Z_V/Z_H)$ 。回波强度主要受粒子相态、大小、数量的影响;多普勒速度在雷达垂直扫描模式下反映了粒子在垂直方向上的下落末速度,是粒子在静止空气中的下落速度与空气的垂直运动速度的矢量和;多普勒速度谱宽表征着有效照射体积内不同大小的多普勒速度偏离其(这一群粒子速度的)平均值的程度,4个因素决定了多普勒谱的宽度:粒子下落速度的不均匀分布、大气湍流运动、垂直风切变和因雷达波束宽度

存在的横向风效应。毫米波雷达垂直指向天顶时,横向风效应及垂直风切变造成的影响可以忽略不计,因此谱宽主要由粒子下落速度的不均匀分布及大气湍流运动造成;LDR 反应了粒子形状偏离球形的程度,球形粒子 LDR 理论上不存在,越偏离球形 LDR 越大,LDR 的具体值和雷达系统的正交隔离度有关,两部雷达 LDR 探测范围都为 $-30\sim 5$  dB。探空资料来自离实验地点最近的安庆探空站( $117.05^{\circ}\text{E}, 30.53^{\circ}\text{N}$ )。

## 2.1 单层云及雾的探测

图1为1月30日14:30左右雷达探测的回波。上面的云为高层云,根据探空整层大气在零度以下,所以云粒子为冰晶,与10时相比(图略),云已经变低且慢慢变薄消散,云底高约为3.5 km,两部雷达的反射率因子、径向速度等基本相同,高层云反射率范围基本在 $-30\sim -10$  dBZ 之间,径向速度范围基本为 $-0.5\sim -0.1$  m/s。当电磁波通过大气和云

雨雾时,都会有衰减,波长越短,衰减越大,所以 W 波段雷达信号比 Ka 波段雷达衰减大<sup>[3,16-17]</sup>。由于衰减,14:27W 波段雷达所测云厚为400 m,远小于 Ka 波段雷达所测的700 m。通过分析英国94 GHz云雷达大量的探测回波及根据文献[10]的分析,只含有单一冰晶粒子的云速度谱宽不会超过0.4 m/s,此时 Ka 波段雷达所测高层云谱宽范围基本为 $0\sim 0.3$  m/s,比较合理,W 波段雷达的谱宽偏大一点,甚至超过0.6 m/s,可能和信噪比较低有关,信噪比低到了雷达灵敏度临界点,噪声信号被误判为了云回波信号。两部雷达也有同时探测到高层云 LDR 为 $-20\sim -18$  dB,这与中国气象研究院联合中国航天研究院第23所研发的8.6 mm 测云雷达的探测结果相符合<sup>[13]</sup>。

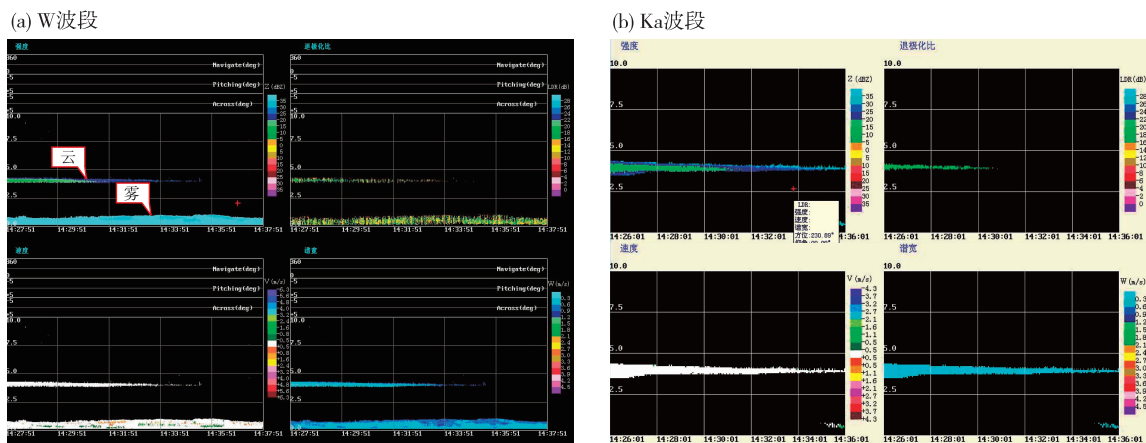


图1 2015年1月30日雷达回波(a. W波段雷达, b. Ka波段雷达)

Fig.1 The radar echoes on 30 January 2015 (a. W-band radar, b. Ka-band radar)

根据30日08时探空资料,逆温层高度1.5 km,其以下大气相对湿度大于91%,所以近地面是雾的回波,天气实况记录是轻雾。与10时相比(图略),W 波段雷达测到雾回波高度由500 m发展为1 km,低于逆温层高度,而 Ka 波段雷达几乎没看到,是因为在瑞利散射条件下,粒子的后向散射能力和波长的4次方成反比,所以在发射相同功率时,粒子对 W 波段雷达信号的后向散射能力是 Ka 波段雷达信号的54倍。文中 W 波段雷达发射功率较大,在3.3 km内脉宽较大,天线直径较小,在1 km处可测最小回波强度 $-43$  dBZ,比 Ka 波段雷达(1 km处可测最小回波强度 $-35$  dBZ)探测能力强。雾回波强度在 $-35$  dBZ左右,速度约在 $-0.8\sim 0.8$  m/s之间,

速度比较杂乱,应该是底层大气湍流造成的;湍流的存在也造成对应谱宽较大,最大超过0.9 m/s。可以看到,此处雾的 LDR 值较大( $-16\sim -12$  dB),理论上雾滴为圆形时, LDR 应非常小,雷达测不到。多次实验证明,地面下毛毛雨时, W 波段云雷达没有测到 LDR,因此认为由于是轻雾,气溶胶粒子虽然湿度大,但大量粒子仍保持非球形,造成 LDR 较大,在回波边界也存在信噪比较低造成的 LDR 值较大的点。

## 2.2 两层云及霾的探测

图2为2015年3月23日两部雷达探测回波,可以看到有两层云。10 km左右的高云为卷云,高云云底高为9.2 km以上,云厚约为1.6 km。因为

中云云层厚、含水量大,对 W 波段电磁波衰减大,所以与 Ka 波段雷达相比,W 波段雷达探测到的回波面积减小。由于衰减,相同区域的卷云回波强度,W 波段雷达探测到应该低于 Ka 波段雷达,可以看到 W 波段雷达反而稍高于 Ka 波段雷达,应该是因为将低信噪比的信号看作了云信号造成的。卷云两部雷达径向速度范围分别为 0~0.2 m/s 和 0~1.1 m/s,多普勒速度是正速度,说明云中有上升气流。

W 波段雷达探测到多普勒速度偏小,是由于衰减及 W 波段雷达脉冲宽度小于 Ka 波段雷达,卷云中具有较大上升速度的小冰晶回波功率微弱,低于雷达接收机灵敏度,多普勒谱密度不存在,因此 W 波段雷达探测到的平均多普勒速度小。W 波段雷达探测到的 LDR 值也是很大的,主要是由于衰减及信噪比较低造成的。W 波段雷达的谱宽范围也偏大,应该也与信噪比较低有关。

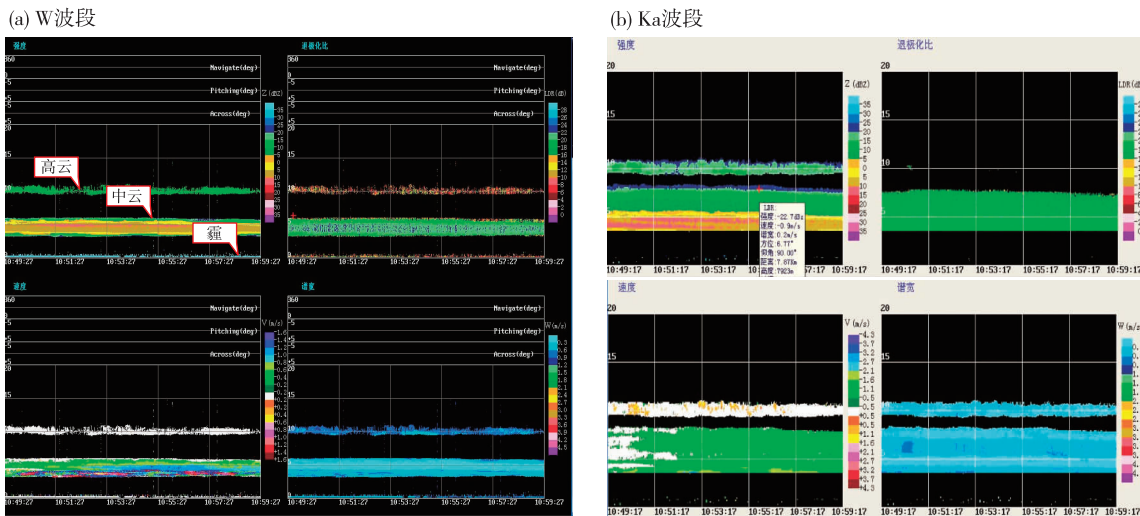


图 2 2015 年 3 月 23 日雷达回波 (a. W 波段雷达, b. Ka 波段雷达)  
Fig.2 The radar echoes on 23 March 2015 (a. W-band radar, b. Ka-band radar)

5 km 左右的中云是高层云,W、Ka 波段雷达探测到的云底高分别为 3.2 km、3.3 km,根据探空资料,零度等温线约在 3.0 km,所以此高层云主要是混合相云。W 波段雷达测得的云底比 Ka 波段雷达的稍低,是因为在 0.15~3.3 km 内 W 波段雷达探测能力比 Ka 波段雷达探测能力强。所测云厚分别为 2.8 km、4.8 km,W 波段雷达测得的云厚比 Ka 波段的小很多,是由于 W 波段雷达信号在云中的强衰减造成的。随着高度下降,冰晶增长,云的反射率强度随高度下降增大,最高都达 13 dBZ,中云底层冰晶粒子较大,由于非瑞利散射造成 W 波段回波强度降低,因此小于 Ka 波段。径向速度范围基本都为 -2.4~0 m/s,W 波段雷达向下的多普勒速度由于超过 1.6 m/s,出现了速度模糊,最大速度为 -2.4 m/s(对应 1.0 m/s)。两部雷达所测高层云谱宽范围基本一致,出现速度模糊的地方 W 波段雷达谱宽略偏大,速度模糊也会造成谱宽偏大<sup>[18]</sup>。LDR 基本在 -20~-18 dB 左右,W 波段雷达探测大冰晶的 LDR 偏小约 2 dB。

根据探空资料,182~835 m 为逆温层,835 m 以

内空气相对湿度都小于 60%,所以 W 波段雷达近地面探测到小于 -35 dBZ 的回波为霾,Ka 波段雷达没有测到,霾的多普勒速度很小,基本是朝向地面的。霾基本上是非球形的气溶胶粒子,其 LDR 值较大,与文献[18]是符合的。

### 2.3 厚层状云的探测

图 3 是 3 月 26 日探测到的厚层状云回波。根据 Ka 雷达探测回波,云发展较高较厚,云厚超过 5 km,云顶高达 8.5 km。Ka 雷达探测厚层状云约在 3.7 km 左右有一条反射率因子亮带,最高约 15 dBZ,根据探空资料,零度等温线为 3.1 km,速度是连续增大的,没有突然增大,LDR 也没有融化层亮带特征,所以此处不是零度层亮带,应该是冰晶在下落中凝华增长造成反射率因子增加,同高度对应 W 波段雷达谱宽的一条明显的亮带,Ka 波段雷达谱宽也有亮带,速度是一致向下的,没有上升气流,说明此处可能含有较多过冷水,冰晶和过冷水的混合造成谱宽增加,冰晶增长快,但是 W 波段雷达没有明显的反射率因子亮带,主要是因为冰晶较大,进入 W 波段的非瑞利散射区造成的。云底部离零

度等温线较近,冰晶没有明显的融化,并且由于蒸发,造成反射率因子的降低,因此回波没有融化层特征。在探测厚云时,由于Ka波段雷达比W波段雷达衰减小,所以Ka波段雷达的穿透能力强,可以穿透发展融合在一起的厚云,W波段雷达也测到两层云,但没有完整反映云的结构。两部雷达径向速

度基本一致,W波段雷达谱宽亮带明显,退极化比相差不大,大的冰晶粒子具有较小LDR值约-24 dB(W波段雷达)。根据探空资料,885 m以下为逆温层,空气相对湿度都小于80%,所以W波段雷达近地面探测回波为霾。

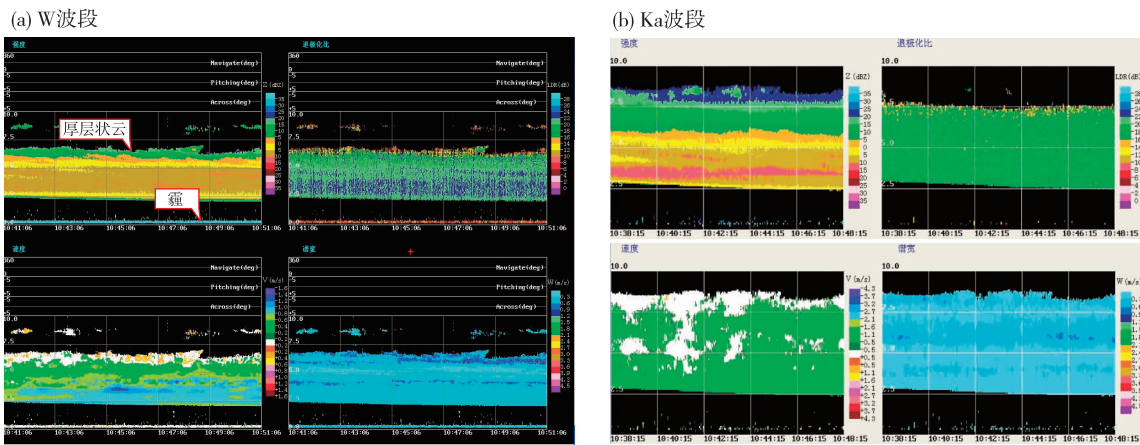


图3 2015年3月26日层状云回波(a. W波段雷达, b. Ka波段雷达)  
Fig.3 The echoes of stratiform clouds on 26 March 2015 (a. W-band radar, b. Ka-band radar)

2.4 雪的探测

图4是2015年1月28日两部雷达探测的雪回波。可以看出,由于雪含水量较高,衰减较大,W波段雷达探测回波强度远小于Ka波段雷达的,最大相差约10 dBZ,同时造成探测不到10 km的高云。

W波段雷达仅穿透约5 km的高度,Ka波段雷达可穿透约7.5 km高度。Ka波段雷达测到雪的退极化比基本在-20~-18 dB,W波段雷达测到雪的退极化比基本在-20~-14 dB,径向速度范围基本一致,为-1.8~0 m/s,W波段雷达多普勒速度出现模糊。

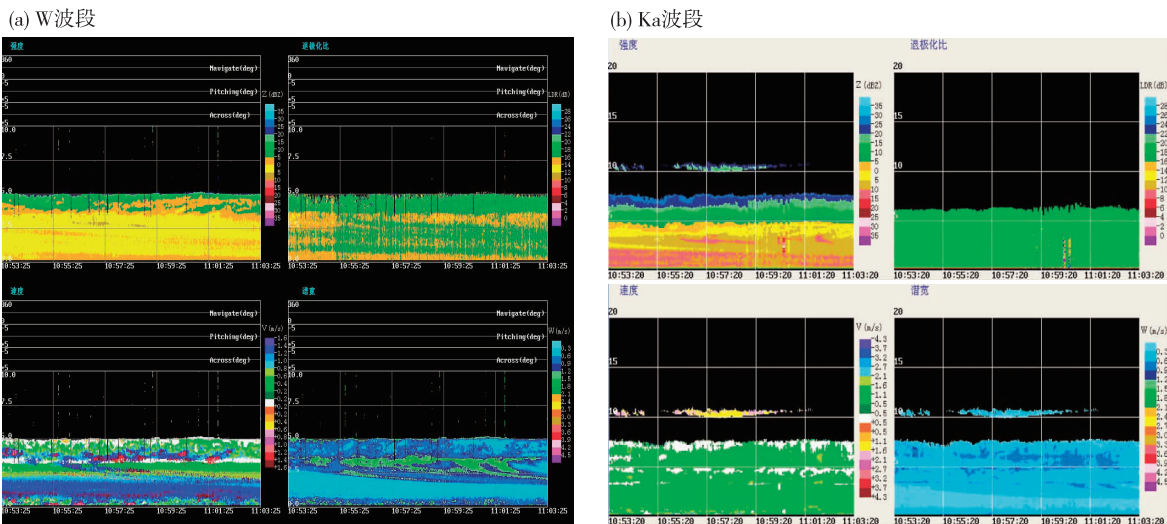


图4 2015年1月28日云回波(a. W波段雷达, b. Ka波段雷达)  
Fig.4 The echoes of clouds on 28 January 2015 (a. W-band radar, b. Ka-band radar)

根据探空资料,整层大气处于0℃以下。在Ka波段雷达回波强度图中,可以看到:随高度下降,回

波强度基本是增强的,说明冰晶在下落中增大,约5 km及3.75 km下面,对应多普勒速度反而变小。结

合 W 波段雷达速度图,约在 $-0.2\sim 0.2$  m/s 之间,对应谱宽增大,说明有较多过冷水及上升气流存在,较大的冰晶克服空气阻力朝向地面雷达运动,过冷水的速度反映了上升气流的速度,所以两种粒子平均多普勒速度变小,谱宽变大。3.75 km 以下,W 波段雷达 LDR 存在约 $-14\sim -16$  dB 的较大值,可能与过冷水及上升气流导致雪花凝华增长从而造成非球形程度增大有关。W 波段雷达回波强度基本是随高度降低增加的,但 2.5 km 下面及近地面的回波强度变小,与雪花增大,出现非瑞利散射有关。约 0.8~2.5 km 之间,两部雷达都对应较小的谱宽及较大的速度,说明雪花在下落中碰并增长。0.8 km 以下的近地面,速度随时间变化剧烈,有时大有时小,谱宽也较大,主要是因为近地面存在乱流引起的。W 波段雷达谱宽总体比 Ka 波段雷达的大,可能与衰减及低信噪比有关。

### 3 结论

通过将 W 波段雷达探测回波与可靠性较高的 Ka 波段雷达探测回波相比较,分析了不同种类云探测结果差异的原因,验证了 W 波段雷达对非降水云及弱降水云的探测能力。结论如下:

1) 在静态试验期间,W 波段雷达初样机工作稳定,两个波段雷达都可以穿透几层云,探测云底高、云顶高、云厚等宏观参数,能清晰看到云内结构,也可以通过回波分析出云内微物理过程。联合回波强度、速度、谱宽及 LDR 的变化可以大体分析云内过冷水及湍流情况,谱宽较大的地方说明过冷水含量多或者存在湍流。

2) 在增强模式下,W 波段雷达探测雾、霾、低云的能力优于 Ka 波段雷达,可以更细微反映云的精细结构、湍流情况。对云层较薄、含水量较少的云(3.3 km 以上)的探测,W 波段雷达与 Ka 波段雷达探测能力基本相当;对云层较厚、含水量较多的云及降水的探测,由于强衰减的作用,W 波段雷达比 Ka 波段雷达探测能力弱,所测云厚度小、云顶低,回波强度小。随冰晶增大到一定程度,非瑞利散射造成 W 波段雷达的回波强度出现随冰晶增大而降低的现象。

3) 薄高云由于 W 波段雷达信噪比低、衰减等原因造成 LDR 值非常大外,W 波段雷达探测冰晶云及雪花的 LDR 值基本在 $-22\sim -16$  dB 左右,与 Ka 波段雷达相差不大;W 波段雷达探测冰晶粒子 LDR 偏小一点,探测雪花 LDR 稍大一点,应该和粒子在两

个波段的散射特性的差异有关。霾的 LDR 较大,雾的 LDR 较小。通过分析大量的回波发现,W 波段的谱宽范围总体上要大于 Ka 波段雷达探测谱宽,除了速度模糊及信噪比较低的原因外,W 波段的谱宽可能存在系统偏差,因为文中主要从云粒子散射特性、云物理、云的结构等方面定性分析 W 雷达的探测能力,没有进行定量分析,所以不能确定是否存在系统偏差,以后将针对这个方面进行进一步探讨。

### 参考文献:

- [1] Kollias P, Clothiaux E E, Miller M A, et al. Millimeter-wavelength radars: new frontier in atmospheric cloud and precipitation research[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2007, 88:1608-1624.
- [2] Lhermitte R M. Small cumuli observed with a 3 mm wavelength Doppler radar[J]. Geophys Res Lett, 1987, 14(7): 707-710.
- [3] Lhermitte R M. Centimeter & millimeter Wavelength Radars in Meteorology[M]. Miami, Florida: Lhermitte Publications, 2002: 215-546.
- [4] 黄毅梅,周毓荃. 95GHz 云雷达对一次冷锋云系结构的观测分析[J].高原气象,2012,31(4):1129-1138.
- [5] Shupe M D, Matrosov S Y, Uttal T. Arctic mixed-phase cloud properties derived from surface-based sensors at SHEBA[J]. J Atmos Sci, 2006,63(2): 697-711.
- [6] Shupe M D. A ground-based multiple remote-sensor cloud phase classifier [J]. Geophys Res Lett, 2007, 34:L22809.
- [7] Shupe M D, Daniel J S, De Boer G, et al. A focus on mixed-phase clouds[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2008, 89: 1549-1562.
- [8] Luke E P, Kollias P, Shupe M D. Detection of supercooled liquid in mixed-phase clouds using radar Doppler spectra[J]. J Geophys Res, 2010,115:D19.
- [9] Hogan R J, Illingworth A J, Sauvageot H. Measuring crystal size in cirrus using 35 and 94 GHz radars[J]. J Atmos Oceanic Technol, 2000, 17(1): 27-37.
- [10] 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): 402-426.
- [11] 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.
- [12] 仲凌志,刘黎平,陈琳,等.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[J].气象学报,2010,68(5): 705-716.
- [13] 孙晓光.毫米波测云雷达数据处理及航空气象保障应用研究[D].南京:解放军理工大学,2011:1-90.

- [14] 宗蓉,刘黎平,银燕.基于飞机观测资料的降水粒子反射率因子阈值分析[J].大气科学学报, 2014, 37(4): 469-475.
- [15] Wu J X, Wei M, Hang X, et al. The first observed cloud echoes and microphysical parameter retrievals by China's 94-GHz cloud radar[J]. J Meteor Res, 2014, 28(3): 430-443.
- [16] Hogan R J, Field P R, Illingworth A J, et al. Properties of embedded convection in warm-frontal mixed-phase cloud from aircraft and polarimetric radar [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2002, 128(580): 451-476
- [17] Wu J X, Wei M, Zhou J. Relationship between the extinction coefficient and radar reflectivity factor of non-spherical ice crystals [J]. J Remote Sens, 2013, 17(6): 1377-1394.
- [18] 郑佳锋,刘黎平,曾正茂,等. Ka 波段毫米波云雷达数据质量控制方法[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(6):748-757.