

西藏羊八井 Ka&W 双频毫米波云雷达 性能及观测分析

毕永恒¹, 霍娟^{1*}, 吕达仁¹, 苏涛², 王学荣², 刘博¹

(1. 中国科学院大气物理研究所 中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029;
2. 安徽四创电子有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要:介绍了西藏羊八井全大气层观象台最新架设的 Ka&W 双频毫米波云雷达(以下简称 YBJ-DFDR, W 波段 94 GHz, 波长 3.2 mm, Ka 波段 35 GHz, 波长 8.6 mm)的基本性能,并选择该地区不同类型云的观测数据,对其探测能力开展了分析和对比研究。分析结果显示,该双频云雷达系统具有较高的探测能力,其中 W 波段雷达和 Ka 波段雷达在 10 km 距离处的探测灵敏度分别达为 -39.2 dBZ 和 -33 dBZ。对比研究表明 Ka 和 W 波段雷达所测等效反射率因子值因云物理属性不同亦呈现不同的特征。发生降雨时,由于液态雨和云粒子对雷达信号的吸收和散射作用,造成回波信号出现衰减,此时 Ka 和 W 波段雷达二者之间的衰减程度明显不同,W 波段雷达信号衰减较严重,甚至出现衰减后低于探测灵敏度而无法获得回波的情况(严重时二者之差可达 30 dB)。而当云中粒子多为冰相时,回波信号的衰减程度显著减弱,W 波段雷达相比 Ka 波段雷达展示出更佳的探测能力,其所测反射率因子值普遍高于 Ka 波段雷达。研究亦发现 Ka 波段雷达对于云层边缘区域,如云顶、云底部分,容易出现漏测的情况,从而导致云顶高度的低估和云底高度的高估,其主要原因是这些区域的云粒子较小及数浓度相对较低,回波信号较弱,Ka 波段雷达无法探测到。

关键词:毫米波测云雷达;双频雷达;云;青藏高原;衰减
中图分类号:O43 **文献标识码:**A

Ka&W dual-frequency millimeter-wave cloud radar at Yangbajing ---Performance and comparison

BI Yong-Heng¹, HUO Juan^{1*}, LYU Da-Ren¹, SU Tao², WANG Xue-Rong², LIU Bo¹

(1. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, China Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Sun Create Electronics Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: This paper introduced a new dual-frequency millimeter-wave Doppler radar (YBJ-DFDR, W band 94 GHz, wavelength 3.2 mm, Ka-band 35 GHz, wavelength 8.6 mm) situated at Yangbajing in the Tibet Plateau and presented detailed analysis of the detection capability through calculations and comparisons. The analysis results show that the DFDR has a high sensitivity with -39.2 dBZ and -33 dBZ at 10 km for the W-band radar and Ka-band radar, respectively. It is shown that the radar equivalent reflectivity factor measured by Ka- and W-band radar illustrates various distribution characteristics for different cloud types. When rainfall occurs, W-band radar suffers much more attenuations by precipitation than the Ka-band radar (the difference between them reaches up to 30 dB in some cases), further, the attenuations may cause the loss of the reflectivity of W-band radar. On the other hand, when the cloud particles are mostly ice particles, the attenuation effect significantly decreased, and W-band radar shows stronger detection ability than the Ka-band radar with higher reflectivity values. In addition, it is also found that Ka-band radar is prone to miss more cloud edge areas than the W-band radar, such as the cloud top and cloud bottom area, resulting in underestimation of the cloud top height but overestimation of the cloud bottom height. The main reason is that the cloud particles in these areas are

收稿日期:2021-06-01,修回日期:2021-10-13

Received date:2021-06-01, Revised date:2021-10-13

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0604)

Foundation items: Supported by The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (2019QZKK0604)

作者简介(Biography):毕永恒(1985-),男,河南上蔡人,工程师,硕士学位。主要研究领域为气象雷达的定量化测量。E-mail: byh@mail.iap.ac.cn
*通讯作者(Corresponding author): E-mail: huojuan@mail.iap.ac.cn

small and number concentration is generally low, which has weak reflectivity lower than the sensitivity of the Ka-band radar.

Key words: millimeter-wave radar, dual-frequency radar, cloud, Tibet Plateau, attenuation

PACS:84. 40. Xb

引言

云会改变辐射路径上的吸收或散射,改变局地辐射收支并使陆气能量平衡产生变化。云也是全球水循环中的重要环节,地球表面水分接受太阳辐射,蒸发生成水汽进入大气,经对流、湍流或地面抬升等系统垂直运动带到中高空,由大气水平运动输送到各处,水汽达到饱和后在凝结核上生成云滴形成云,再在适宜条件下长大成为雨、雪等落回地面。云覆盖超过地球一半以上面积,成云致雨与地球上大部分天气现象,如降水、冰雹、降雪等过程密切相关。云和降水,特别是如台风、雷暴等强烈的天气过程,直接影响人类生产和生活,同样影响军事行动。同时云的时空分布仍是数值天气预报和气候模式的重要挑战之一^[1],需要高时空分辨率的云探测设备为数值模式提供云参数信息。

当前对云的探测手段和平台多样,如多波段辐射计、云雷达、成像仪、飞机原位探测、卫星探测等。探测方式又分为被动遥感和主动探测。被动遥感的是云场的整体特征,难以获得云内部微物理结构;飞机穿云观测能获得飞行路径上的云场微物理数据,但由于观测费用高且受天气条件和空管条件等限制,无法进行常规观测;相对比而言,不同波段的云雷达则是观测云场物理结构特征的最强有力手段。与天气雷达(如 X、C 和 S 波段雷达)相比,毫米波云雷达具有相对较短的波长,其多普勒效应明显,有较高的空间分辨率和更灵敏的探测精度,所以在观测云微物理属性方面具有更强的优势。

毫米波,为波长 1~10 mm 之间的电磁波,频率范围为 30~300 GHz。毫米波云雷达的研制始于上世纪 50 年代,随着科学技术的发展,雷达硬件和软件技术逐步改进,增加了极化和多普勒技术,毫米波雷达逐渐展示出探测云物理结构特征的优越性,并成为研究云微物理结构的主要遥感手段之一。典型地,如美国能源部支持的大气辐射测量计划(ARM 计划, The Atmospheric Radiation Measurement Program)中已运用多种波长雷达,包括毫米波雷达,开展对云与降水观测并连续至今^[2-5],美国 ARM 从 2010 年开始在其四个固定观测点和两个移动观测站部署 X-Ka 和 Ka-W 两种类型可扫描式双频段雷

达(SCARs),用于获得观测站点周围三维云和降水结构,用于研究 3D 辐射传输问题、云-对流系统和云-气溶胶相互作用的生命周期、云系统特性的卫星反演评估等科学问题。欧洲组织的联合观测行动(CloudNET),在该项目中,云雷达已经在欧洲不同的地点运行,以获取用于模型评估的云参数^[6-10]。卫星观测方面,2006 年 4 月美国 NASA 主导实施的 CloudSat 卫星和 CALIPSO 卫星成功发射,两颗卫星分别搭载一个 94 GHz 的毫米波雷达和激光雷达,自当年起至今已连续发布多年的全球云垂直结构探测数据,在大气科学研究领域被广泛使用并取得丰硕的研究成果。当前毫米波雷达常用的两个频段是 94 GHz(波长 3 mm/W 波段)和 35 GHz(波长 8 mm/Ka 波段),探测各有优势,波长越短,对小粒子越敏感,同时衰减也越显著;而波长越长,对小粒子越不敏感,但穿透性更好。Ka 和 W 波段双频雷达,弥补单 Ka 和 W 波段雷达的劣势,获得更多的物理参数信息,可以更加准确的定量反演云中的微物理参数。在国内 Ka 波段雷达已经有较多的应用^[11-22],相对而言,国内 W 波段的应用较少,双频雷达的应用更少。

青藏高原素有“世界屋脊”第三极之称,一直是科学家们关注的重点区域,由于地理位置和环境的特殊性,云的分布特征具有与平原地区不同的显著特征,而地面雷达观测资料也一直比较贫乏。2019 年 8 月,我们在西藏拉萨市当雄县羊八井全大气层观象台架设这部 Ka&W 双频毫米波云雷达(YBJ-DFDR),即包括 Ka 波段和 W 波段,开始地基云物理特征的探测,部分时间 24 小时不间断连续观测至今。本文详细介绍了该部雷达的探测性能,并利用在西藏羊八井(30.087 7 N, 90.524 4 E 海拔 4 300 m)观测数据,对该系统中的 Ka 波段雷达和 W 波段雷达的探测能力及异同进行了对比分析研究,目的是进一步了解两种波长雷达在云降水探测方面的特点及差异。

文章结构安排如下:第一节详细介绍了双频毫米波云雷达的性能参数,第二节选择不同云降水案例,对 Ka 波段雷达和 W 波段雷达的探测能力及差异开展对比分析,第三节是小结与讨论。

1 双频毫米波云雷达

1.1 雷达性能参数



图1 双频毫米波云雷达外观图及系统结构图

Fig. 1 The appearance and block diagram of dual-frequency millimeter cloud radar

双频毫米波云雷达由安徽四创电子股份有限公司研制成功后于2019年6月架设在安徽淮南,稳定运行2个月后,2019年8月初,运输并架设在西藏羊八井全大气层观象台(图1)。该部雷达有两个工作频段,分别是Ka和W波段,具备多种扫描方式,但日常观测采用垂直对天模式。表1给出了该雷达主要的性能参数。

双频毫米波云雷达的天线采用直径为1.5 m的

表1 双频毫米波云雷达系统参数

Table 1 Dual-wavelength millimeter-wave cloud radar specifications

参数符号	说明	单位	W波段	Ka波段
λ	雷达工作波长	cm	0.32	0.86
P_t	发射机峰值功率	kW	1.5	3
τ	发射脉冲宽度	us	0.5	0.5
Φ	水平波束宽度	(°)	0.16	0.39
θ	垂直波束宽度	(°)	0.16	0.42
G	天线增益	dB	59.11	52.89
L_Σ	馈线总损耗(双程)	dB	3.8	3
B	接收带宽	M	2	2
F_n	噪声系数	dB	6.8	4.7
C_0	雷达常数	dB	64.7	66.42
P_{min}	接收灵敏度	dBm	-104.19	-106.29

后馈式圆口径卡塞格伦共面天线,双频共面天线的采用可以确保探测回波目标的同一性,为了同时满足Ka波段和W波段对天线的精度要求,铸造工艺由普通低压铸造改进为真空低压铸造以改善孔隙水平,同时加工工艺由车削加工改进为铣削加工以消除震刀对面精度的影响,经测试600 mm以内面精度达到 $\sigma_{RMS} < 0.03$ mm,直径1 500 mm以内面精度 $\sigma_{RMS} < 0.064$ mm,最后经微波暗室实际测量,Ka和W波段的天线增益分别为52.89 dB、59.91 dB,Ka波段的水平和垂直波束宽度分别为0.39°和0.42°,W波段的水平和垂直波束宽度均为0.16°。

馈源采用一体化馈源,Ka波段采用大张角波纹喇叭结构,W波段采用多模喇叭结构,并将两频段正交模耦合器融合在一起,通过采用波导低通滤波器实现宽阻带抑制,形成双频双极化馈电结构。这种喇叭具有双极化特性,其E面和H面波瓣等化较好,副瓣也低,交叉极化分量小,E面和H面相位中心重合,是一种优良的照射馈源,经测试,Ka波段的第一副瓣 ≤ -23 dB,W波段的副瓣 ≤ -22 dB;Ka波段的双极化隔离度 ≤ -35 dB,W波段的双极化隔离度 ≤ -35 dB。同时为减少W波段馈线接收支路损耗,W波段发射机和接收机安装在Ka波段收发单元上部,使得W波段发射机和接收机分置于天线下的两侧,此设计最大程度的减小了W波段雷达的波导长度,最终双频毫米波云雷达的Ka波段和W波段的双程衰减分别为3 dB和3.8 dB。

为了满足在海拔4 000 m以上高原工作,Ka波段发射机和W波段发射机均由进口的航空级的扩展互作用速调管(EIK)和配套国产调制电源模组

成。Ka和W波段的发射峰值功率分别为3 kW和1.5 kW,两者的脉冲宽度均为0.5 μs。W波段接收机突破了国产W波段低相位噪声激励源、高功率高隔离开关和低噪声接收等关键技术,动态范围超过了80 dB;经测试Ka波段和W波段接收机噪声系数分别为4.7 dB和6.8 dB,在常温条件下可以达到的最小灵敏度分别为-106.29 dBm和-104.19 dBm。

为保证实现Ka和W波段雷达信号的相参性,两个频率源共用同一个晶振(120 MHz),频率源产生接收机和发射激励所需的本振信号、数字中频接收机所需的采样时钟信号、监控时钟以及DDS时钟信号等。为了保证Ka波段雷达和W波段雷达探测区域的一致性,两部雷达的脉冲宽度均为0.5 μs,对应的距离分辨率均为75 m。脉冲重复频率为5 000 Hz,脉冲积累数为256,多普勒径向速度采用脉冲对处理方式(PPP)。因Ka波段和W波段的波束宽度不一致,W波段雷达的探测空间是Ka波段雷达的中心的一部分,占比为40%;在高重复频率下,云内粒子的分布可视为准稳定态,回波是准连续的,且反射率最终都换算成标准单位,基于此,这种因波束宽度带来的不一致性可以降至最低。

Ka、W两频段的收发单元与俯仰机构呈对称分布设计,双频毫米波云雷达工作时该两路收发单元随天线体作同步运动。该结构设计方案最大限度地减少了单元间电磁波传输的长度,又避免了旋转铰链的使用,同时可以满足0°~180°的RHI扫描方式。

双频毫米波云雷达在出厂时,对天线增益、波束宽度、发射机功率、双程馈线衰减、脉冲宽度、噪声系数等关键参数进行了测试和标定,标定参数如表1所示。双频雷达架设安装完毕后,定期会利用接收机产生功率可控的测试信号,同时注入两个接收机的两路接收通道,根据两路通道的实际输出,自动检测两路接收机特性的差异情况,从而实现线性退极化的自动标校。

1.2 灵敏度分析

雷达反射率因子表述为式(1):

$$Z = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD \quad (1)$$

雷达反射率是单位体积中粒子后向散射截面之和。如果水凝物粒子是球状且直径比波长要小(即满足瑞利近似),单位体积内的雷达反射率 η 可以表述为式(2):

$$\eta = \int_0^{\infty} N(D)\sigma(D)dD = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 Z \quad (2)$$

毫米波频段,云和降水过程中粒子往往不满足瑞利近似,雷达气象学者将雷达反射率 η 写成下式,

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 Z_e \quad (3)$$

其中定义 Z_e 为等效雷达反射率因子。雷达反射率因子 Z 是云和降水粒子谱分布的特性,和雷达波长没有关系,等效反射率因子涉及到云和降水粒子的散射特征,不同频段的电磁波遇到云和降水粒子,因其可能不满足瑞利散射条件,所测量的等效反射率因子存在一定的差异。

根据气象雷达方程计算雷达等效反射率因子 Z_e 可以用下述式子表述^[23],

$$Z_e = CR^2 P_r \quad (4)$$

其中 R 代表天线与目标之间的距离(单位m), C 为利用雷达参数计算的雷达常数, P_r 天线接收到的目标反射率回来的功率值。

对雷达常数进一步的展开,可以得到如下的气象雷达方程。

$$Z_e = \frac{2^7 \lambda^2 r^2 k_B T_0 B F_n \text{SNR} L_s l_{MF}}{\pi^2 P_t G^2 c \tau |K_w|^2 I} \quad (5)$$

λ 为波长, k_B 是玻尔兹曼常数, T_0 为接收机的温度; B 是接收机的带宽; F_n 是接收机的噪声系数;SNR是信噪比; L_s 波导内的双程衰减; l_{MF} 匹配滤波器损耗; I 是天线辐射方向图积分; G 天线增益; P_t 发射机功率; K_w 负折射率指数; τ 是脉冲宽度。一般来说,雷达的灵敏度受到接收机噪声的限制,通常来自晴空大气和不下雨云层的噪声辐射可以忽略不计。根据式(5),可计算不同距离处雷达应能探测到的最小反射率因子 Z_{emin} ,该值通常被称之为雷达灵敏度。

根据雷达参数,利用式(2)计算了双频毫米波雷达的理论灵敏度并与实测数据开展了对比分析。图2红线为估算的Ka和W波段可探测的理论灵敏度值,图上亦给出了2019年8月7日至2019年9月4日时段内观测的所有 Z_e 值的统计情况。由图可见,双频毫米波雷达具备较好的探测灵敏度,W波段雷达在5 km处探测灵敏度为-45 dBZ,在10 km处探测灵敏度为-39.2 dBZ;Ka波段测雷达在5 km的灵敏度为-39 dBZ,Ka波段雷达在10 km的灵敏度为-33 dBZ。相比之下,ARM计划部署架设的可扫描式双频毫米波云雷达(Ka/W-SACR),在未考虑信号积累增益和衰减情况下,Ka和W波段使用330 ns单脉冲

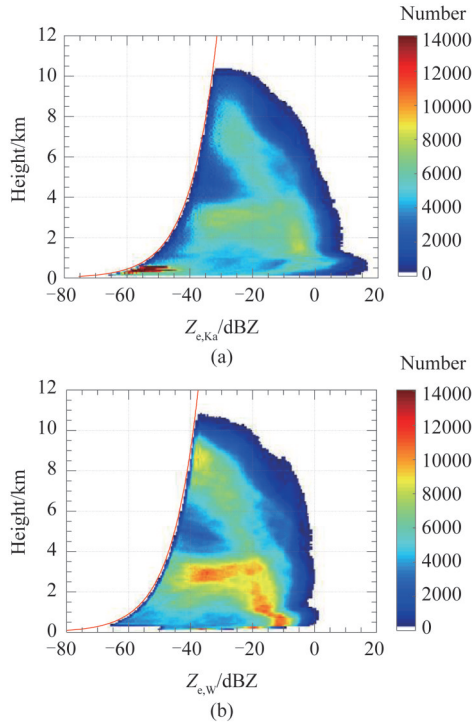


图2 双频毫米波云雷达Ka波段和W波段的反射率直方图和灵敏度曲线(a) Ka波段雷达,(b) W波段雷达("number"表示相应高度和反射率因子条件下统计的测量次数)

Fig. 2 Histogram of reflectivity and curve of sensitivity (a) Ka-band radar, (b) W-band radar ("Number" indicates the number of measurements under the conditions of the corresponding height and reflectivity factor)

时,在5 km处的灵敏度分别是 -20.9 dBZ和 -17.1 dBZ; CloudSat上的94 GHz云雷达(CPR)的灵敏度最初定义为最小检测反射率因子 -30 dBZ,当任务更改为将CloudSat送入更高轨道进行编队飞行时,最小探测反射率因子降低至 -26 dBZ。以往研究中对雷达反射率因子的计算或测量表明,中纬度地区冰云的反射率因子大多大于 -30 dBZ^[24-25]。

如上分析表明,与国内外同类型的雷达对比,羊八井站的Ka&W双频毫米波雷达具有出色的探测能力。

2 观测对比

如前所述,Ka和W波段雷达由于波长不同,在探测云和降水时各有优势。一般而言,波长越短,对小粒子越敏感,同时衰减也越显著,降雨时,W波段雷达的衰减比Ka波段雷达严重。我们选择了几个不同类型的云降水天气过程,对该雷达的探测能力开展了对比分析。

2.1 中云

2020年3月3日00:00-13:00,羊八井观测站上空为高层云,双频毫米波云雷达探测的等效反射率因子及等效反射率因子差值随时间的分布情况见图3。该时段内,云底高度平均约为2 km左右,云层厚度平均约为2 km,最大厚度约3 km。无论是云高、云厚及 Z_e 大小都表明,Ka波段和W波段存在较高的一致性。该个例中 Z_e 值小于 -10 dBZ,说明该云中粒子大小以及数浓度都偏低。图3c展示了两部雷达等效反射率因子的差值,我们用深蓝色表示出W波段雷达有探测信号而Ka波段雷达没有信号的部分,用深红色则表示Ka波段雷达有回波信号而W没有回波信号的部分。图3c中可以看到,Ka波段雷达相比W波段雷达,在云的边缘,如云顶部和云底部,由于云浓度和粒子偏低,反射率因子数值低于Ka的最小可探测值,存在一定漏测的情况,而W波段雷达在此个例中没有出现因云粒子强烈衰减导致无回波信号的情况。此外,地面气温低于 0°C ,两波长雷达都未探测到零度层亮带,表明云中都是冰相粒子,而冰相粒子对雷达信号的衰减相比液态粒子弱很多。我们定义等效反射率因子差 D_{ze} 为Ka波段雷达等效反射率因子减W波段雷达等效反射率因子,因为它是对数值,所以实际上是云对二个波长雷达波后向散射系数之比。如式(6)所示,并分析其等效反射率因子差 D_{ze} 的分布。

$$D_{ze} = Z_{e,Ka} - Z_{e,W} \quad (6)$$

图4中给出了Ka和W都有回波信号时,它们所测 Z_e 的散点概率图以及 D_{ze} 的直方图分布。 D_{ze} 的分布呈对数正态分布的特征。该例中W波段雷达所测反射率因子值与Ka波段雷达基本相当。统计结果表明,在该个例中 D_{ze} 的平均值为 -2.8 dBZ,统计平均而言 $Z_{e,W}$ 略高于 $Z_{e,Ka}$ 。

两波长雷达由于探测波长不同,对云中粒子的辐射特性也不同,波长短的对小粒子敏感,而波长较长的频段对大粒子敏感。该个例中W波段雷达的反射率因子值高于Ka波段雷达,当云粒子衰减作用可忽略时,进一步说明云中粒子尺寸一定普遍偏小,从而使得具有更高灵敏度的W波段雷达所测的反射率因子值高于Ka波段雷达,此外冰相粒子并非标准的球形,与瑞利散射模型的误差有关,Ka波段雷达与W波段雷达所呈现出的差异,跟云自身的物理特性相关,从而导致两波长雷达不同的探测结果。由此,也说明联合Ka和W波段雷达数据,有助

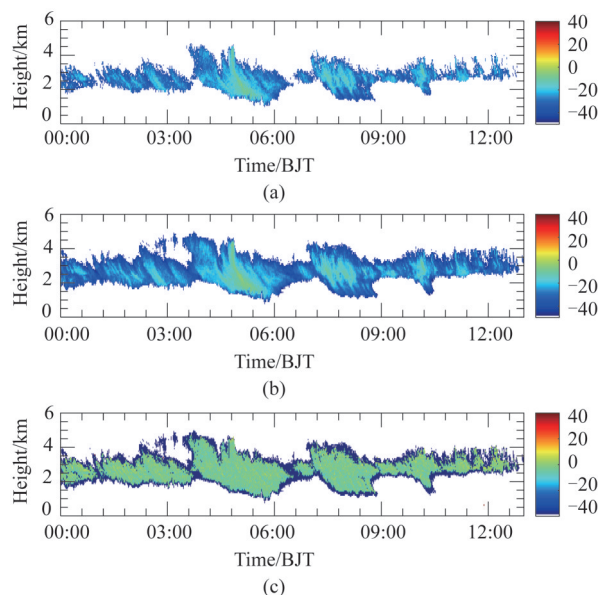


图3 2020年3月3日高层云:(a) Ka波段 $Z_{e,Ka}$, (b) W波段 $Z_{e,W}$, (c) 反射率差 D_{zc}

注:深蓝色表示Ka波段雷达无回波而W波段雷达有回波的情况,深红色表示W波段雷达没有回波而Ka波段雷达有回波的情况

Fig. 3 The altostratus cloud on March 3, 2020 (a) Ka-band radar $Z_{e,Ka}$, (b) W-band radar $Z_{e,W}$, (c) D_{zc}

Note: Where dark blue represents the case where Ka-band radar has no echo while W-band radar has echo, and dark red represents the case where W-band radar has no echo while Ka-band radar has echo

于反演和获得更准确的云内粒子的物理特征。

针对Ka&W双频段雷达所测量的多普勒径向速度进行分析,对不同云和降水过程测量速度的差异性进行解释和分析。

$$V_{\text{Diff}} = V_{\text{Ka}} - V_{\text{W}} \quad (7)$$

V_{Ka} 为Ka波段雷达的多普勒径向速度, V_{W} 为W波段雷达的多普勒径向速度,该系统中定义朝向雷达为负值, V_{Diff} 为两者的速度差。

从图5-6可以看到,对中云探测时,云中粒子的垂直运动速度比较小,速度范围在-2~2 m/s,粒子的主要运动方向是下落运动,Ka波段雷达和W波段雷达的探测速度一致性较高,45%的数据的偏差在0.05 m/s。偏差小于 ± 0.2 m/s可以达到91.6%,这说明在云中粒子运行相对稳定状态下,Ka和W波段测量速度是相同的。

2.2 中高云

当探测到高云时,如果云中粒子较小、且粒子浓度不高时,W波段体现其高灵敏度的优势,而Ka波段雷达因灵敏度不够,会出现漏测状况。图7中展示了2019年8月23日-24日观测到的中高云个

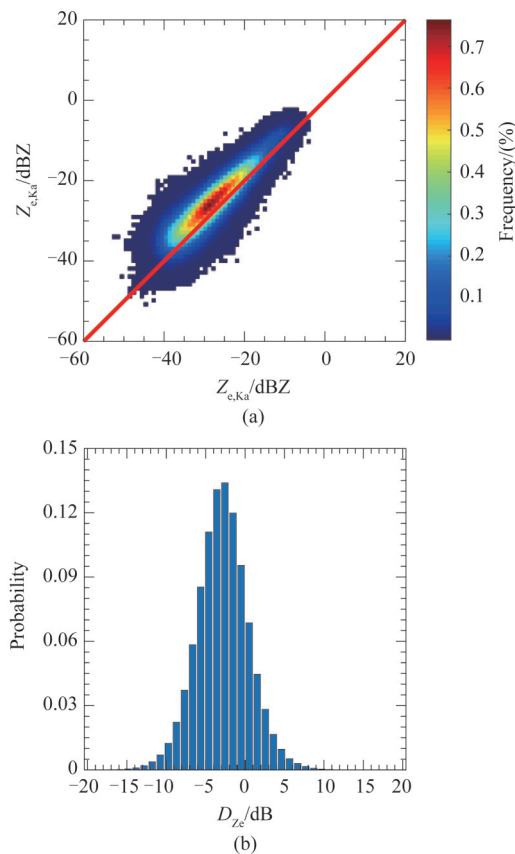


图4 2020年3月3日高层云(a)Ka波段雷达与W波段雷达反射率值分布散点概率图,(b) D_{zc} 直方图分布

Fig. 4 The altostratus cloud March 3, 2020 (a) Scatter histograms of reflectivity of Ka-band and W-band, (b) D_{zc} histogram distribution

例。从图中可以看到,17:00-19:00左右,云顶高度9 km以上,云层厚度达到了7~8 km,此时的 Z_e 较大,大于-32 dBZ,Ka波段雷达并不存在漏测的情况,在19:00-02:00这段时间,因粒子的浓度和粒子大小减弱, Z_e 变小,大部分小于-32 dBZ,因Ka波段雷达灵敏度不够,造成了Ka波段雷达漏测的状况。图7(c)中深蓝色部分表示出了W波段雷达有回波而Ka波段雷达没有回波的部分,可以看出,在反射率较弱的区域,Ka波段雷达因灵敏度不够均存在漏测的状况,在此个例中,Ka波段雷达所测的云顶高度相比W波段雷达低了1 km左右。

对双波长雷达都有回波信号的部分统计了二者之间的 D_{zc} ,结果见图8(a)。Ka波段雷达所测反射率值相比W波段雷达平均低。即使在Ka波段雷达有探测数据时,但其反射率值依然比W波段雷达低,且平均低约1.079 dB。一般来说,云粒子对W波段雷达信号的衰减作用要高于Ka波段雷达,即使如此,该例子中Ka波段雷达所获得的反射率值却

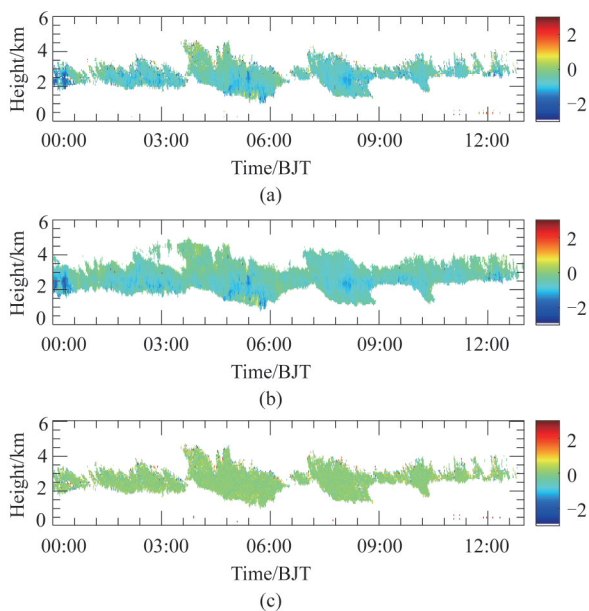


图5 2020年3月3日高层云(a)Ka波段径向速度 V_{Ka} , (b)W波段雷达径向速度 V_w , (c)双频速度差 V_{Diff}
 Fig. 5 The altostratus cloud on March 3, 2020 (a) Ka-band Radar V_{Ka} , (b) W-band Radar V_w , (c) the V_{Diff}

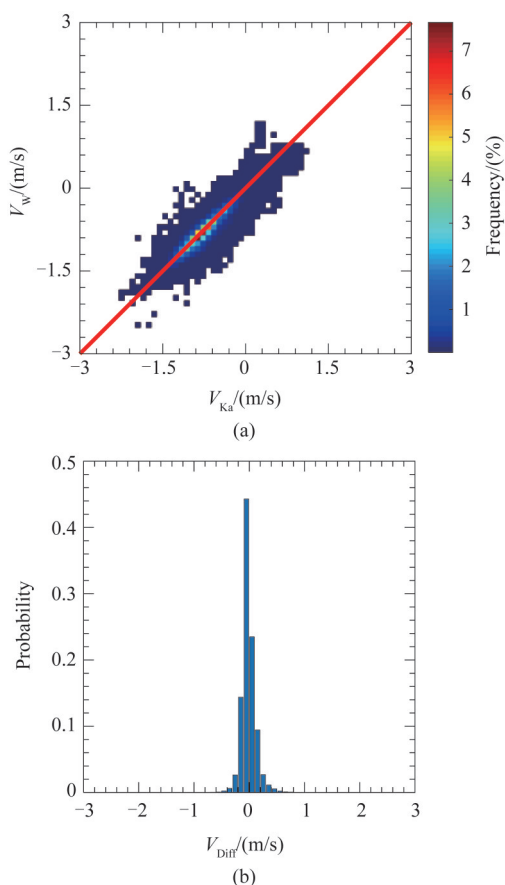


图6 2020年3月3日高层云(a)Ka波段雷达与W波段雷达径向速度分布散点概率图, (b) V_{Diff} 直方图分布
 Fig. 6 March 3, 2020 (a) Scatter histograms of V of Ka-band and W-band, (b) V_{Diff} histogram distribution

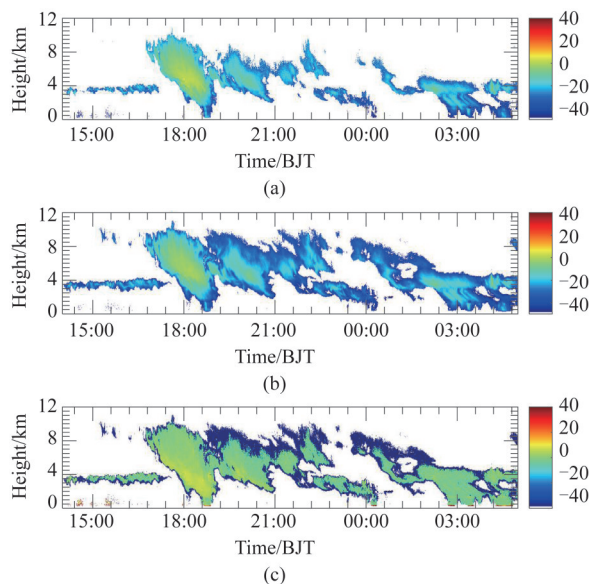


图7 2019年8月23-24日个例(a)Ka波段雷达 $Z_{e,Ka}$, (b)W波段雷达 $Z_{e,W}$, (c)反射率差 D_{zc}
 Fig. 7 The case on August 23-24, 2019 (a) Ka-band radar $Z_{e,Ka}$, (b) W-band radar $Z_{e,W}$, (c) D_{zc}

明显少于并低于W波段雷达。

瑞利散射条件下,根据气象雷达方程,等效雷达反射率因子可以表述为:

$$Z_{\lambda} = 10 \log_{10} \left(\int_{D_{min}}^{D_{max}} \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K_w|^2} N(D) \sigma_{b,\lambda}(D) dD \right), \quad (8)$$

$\sigma_{b,\lambda}$ 是后向散射截面, N 粒子浓度, λ 是波长, $|K_w|^2$ 是液态水的介电常数, $|K_w|^2$ 值与粒子相态有关。液态粒子时, Ka和W波段的 $|K_w|^2$ 的介电常数分别为 0.88 和 0.70。而当粒子相态为固态时, $|K_w|^2$ 值几乎不随波长变化。雷达实际观测和计算 Z_e 值时, 雷达方程中通常使用液态粒子的 $|K_{\lambda}|^2$ 值, 显然会因粒子相态的改变, 导致 $|K_{\lambda}|^2$ 值不适用而引起测量误差。特别是, 液态粒子的 $|K_w|^2$ 值随波长增加而增加, 而固态粒子的 $|K_{\lambda}|^2$ 值较小且几乎不随波长变化。所以, 当实际云粒子为冰相而非液态时, 因 $|K_w|^2$ 值变化随波长增加差距加大, 这也是W波段雷达所测得的 Z_e 值会高于Ka波段雷达所测的 Z_e 的原因之一; 其次当冰云粒子衰减作用可忽略时, 且云中的冰相粒子并非标准的球形, 与瑞利散射模型偏差而带来误差。图8(b)中给出了弱回波信号的云, Ka波段雷达没有观测到而W波段雷达探测的 Z_e 值分布情况,

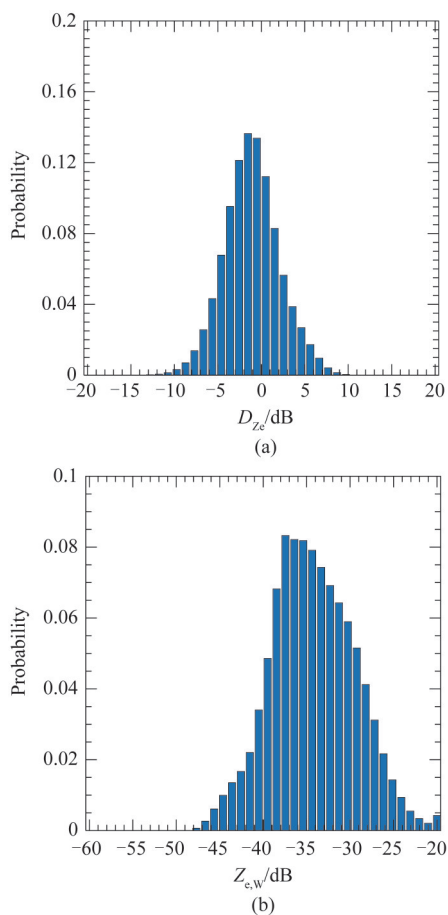


图8 2019年8月23~24日个例(a)Ka波段雷达与W波段雷达反射率差值 D_{ze} 直方图分布,(b)Ka未能探测到回波信号时,W波段雷达所测的反射率值分布情况

Fig. 8 The case on August 23-24, 2019 (a) D_{ze} histogram distribution, (b) The histogram distribution of $Z_{e,w}$ while the echo signal is not detected by Ka-band radar

统计后W波段雷达 Z_e 平均值为-34.23 dBZ。

2.3 降雨过程

2019年8月7日02:00~13:00(北京时间,UTC+8),羊八井观测站经历一次降雨过程,图9展示了Ka波段雷达和W波段雷达垂直向上观测到的 Z_e 随时间变化情况。此次降雨过程连续时长约7h,所测云层厚度最高达10km,云顶海拔高度14km,通过再分析资料ERA5计算该时间段的对流层顶高度16.21km。

从图9(a-b)的雷达 Z_e 分布图上可以看出,此次云降水过程,Ka和W波段雷达所探测的云的整体结构特征比较一致,例如云层厚度、云层高度、内嵌云层等的结构特征基本相似,说明两部雷达探测能力良好,均能够探测云层的基本和主要特征。尽管如此,在细节方面,两波长雷达所测的回波 Z_e 存在

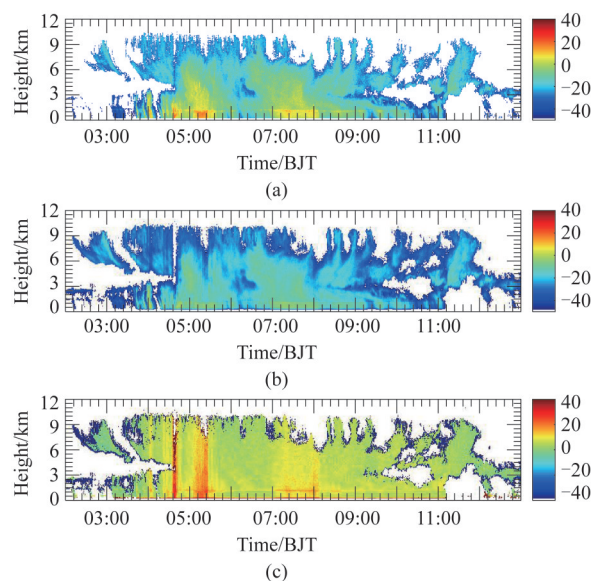


图9 2019年8月7日降雨个例(a)Ka波段雷达 $Z_{e,Ka}$, (b)W波段雷达 $Z_{e,W}$, (c)反射率差 D_{ze}

Fig. 9 The precipitation cloud on August 7, 2019 (a) Ka-band radar $Z_{e,Ka}$, (b) W-band radar $Z_{e,W}$, (c) D_{ze}

差异。图9(c)展示了两部雷达 D_{ze} 分布情况,我们还用深蓝色表示出W波段雷达有探测信号而Ka波段雷达没有信号的部分,用深红色则表示Ka波段雷达有回波信号而W没有回波信号的部分。

尽管云降水过程相同,但图9(c)说明W波段雷达和Ka波段雷达的回波等效反射率因子有明显差异。当两部雷达都有回波信号时,用式(6)计算二者之间等效反射率因子的差值 D_{ze} 来表述:

在未进行衰减订正的情况下, $Z_{e,Ka}$ 为Ka波段雷达所测的等效反射率因子, $Z_{e,W}$ 为W波段雷达所测的等效反射率因子。图10a给出了 D_{ze} 随高度的分布情况,图中点的颜色表示Ka波段雷达所测等效反射率因子,白色点圈则为各高度层的平均 D_{ze} 值;图10(b)则是统计的所有 D_{ze} 的概率分布情况,图形显示二者之间的差值呈现对数正态分布的特征。在该案例中,Ka波段雷达所探测的反射率值多数高于W波段雷达,甚至在某些时段(如强降水发生时),二者之间的差值可高达30dB;但亦存在少数W波段雷达反射率值高于Ka波段雷达的区域,这种情况总体比例很小。综合统计整个过程,Ka波段雷达所测的等效反射率因子平均高于W波段雷达值约5.8dB,造成出现Ka和W波段出现偏差原因主要是因为W波段相对Ka波段衰减更加严重,使用该双频雷达数据时,需对其进行衰减订正;其次,降水粒子偏大,W波段和Ka波段会进入米散射区,

造成Ka波段雷达和W波段雷达反射率的不一致性。

图10(a)显示,随着高度的增加,两部雷达之间的差异有微小的缩小趋势,主要原因是,云层顶部的云粒子大小和数浓度一般相比云层内部低,且W波段雷达对弱回波信号的云的探测能力比Ka波段雷达的探测能力高。这部分接近云层顶部的云粒子的贡献导致统计结果随高度略微下降。总之,W波段雷达由于使用探测波长较短,受到云降水粒子对信号衰减作用相比Ka波段雷达更严重,因此所探测的反射率值总体比Ka波段雷达低。

图9(a)中可以看到,位置位于约1.5 km高度处,Ka波段雷达回波信号出现显著增强带,这就是零度层亮带,是冰相粒子融化为液相粒子的过渡带。由于温度增加,零度层带内的冰相粒子部分或全部融化为(表面包围的)液相粒子,粒子直径变大,且改变了粒子的复折射指数,使得Ka波段雷达回波信号增强。W波段雷达回波图在该高度处也出现回波增强的情况,但是增强程度远小于Ka波段

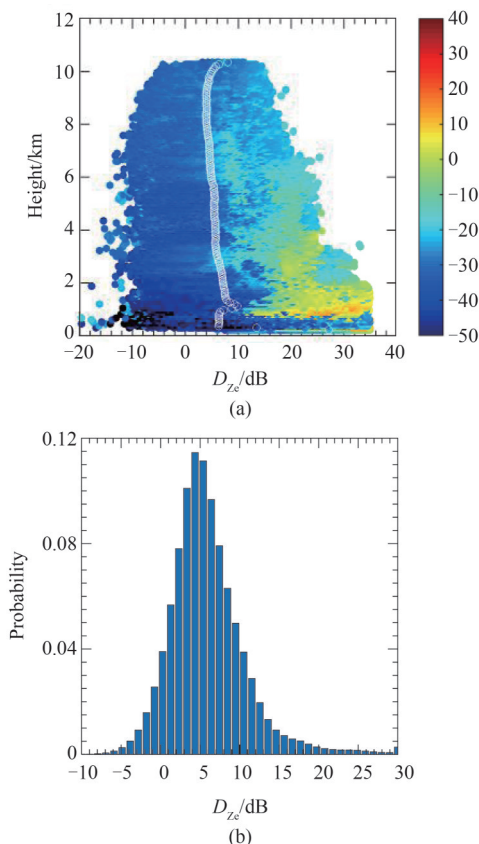


图10 2019年8月7日降水个例(a)Ka与W波段雷达反射率差值(D_{zc})随高度变化分布情况,(b) D_{zc} 直方图分布

Fig. 10 The precipitation cloud on August 7, 2019 (a) Altitude distribution of D_{zc} , (b) D_{zc} histogram distribution

雷达。可能的原因是,下层的液态粒子对W波段雷达回波信号衰减增强。在零度层亮带显著出现的时段,也出现了 D_{zc} 相应增加的情况,说明云层下部液态粒子增多增大,会导致Ka波段雷达回波信号的增强同时引起W波段雷达回波信号的强衰减,从而最终导致二者的 D_{zc} 值增加。

由于降水对信号的严重衰减,在4:40~4:50时段,云层下部降水导致W波段雷达信号严重衰减,以至于上层信息完全缺失。Ka波段雷达信号也受到了衰减,但程度相比W弱。该个例中,我们还发现,受探测灵敏度的限制,Ka波段雷达对具有相对较小粒子(或低浓度)云的边缘区域,如云顶,出现了“漏测”。

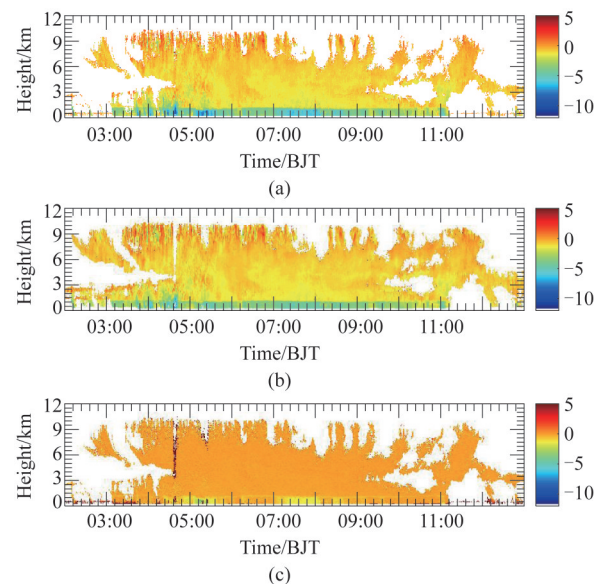


图11 2019年8月7日降水个例(a)Ka波段径向速度 V_{Ka} , (b)W波段雷达的径向速度 V_W , (c)双频速度差 V_{diff}

Fig. 11 The precipitation cloud on August 7, 2019 (a) Ka-band Radar V , (b) W-band Radar V , (c) The V_{diff}

从图11径向速度的分布图上来看,Ka波段雷达和W波段雷达的速度基本上一致,在零度层亮带以上,Ka和W波段的径向速度测量值范围在-3~1 m/s,总体云中粒子向下运动;在零度层亮带以下,降水粒子运动已经不完全随着空气块,其主要受重力影响产生的下落速度,Ka和W波段的径向速度变大,最高达到12 m/s。选择04:00~11:00此段降雨过程中,分析零度层亮带上下Ka和W波段的速度分布,零度层亮带以下,Ka波段雷达和W波段雷达测量速度相对偏差较大(如图12所示),Ka和W的径向速度偏差平均值为-0.62 m/s(定义朝向雷达为

负值,该数值表示为Ka测量下落速度比W波段高0.62 m/s,标准方差为0.59 m/s;在零度层亮带以上,两者之间的速度偏差平均值为-0.05 m/s,标准方差为0.13 m/s。式(8)是雷达测量多普勒径向速度的公式,可以看出,在零度层亮带以下,降雨粒子的后向散射系数 $\sigma_{b,\lambda}$ 不同,大粒子和小粒子的作用和贡献确实会影响综合的速度所测量的平均速度存在一定的差异,可以利用这种差异定量反演粒子谱大小和估测降水。

$$V_{\lambda} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} v(D)N(D)\sigma_{b,\lambda}(D)dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D)\sigma_{b,\lambda}(D)dD} \quad (9)$$

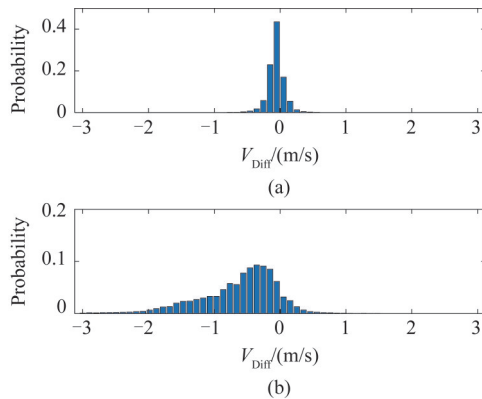


图12 Ka和W波段雷达的速度差直方图分布(a)零度层亮带以上,(b)零度层亮带以下

Fig. 12 V_{Diff} histogram distribution (a) above melting-layer, (b) below melting-layer

2.4 降雪过程

选择降雪个例发生于羊八井2020年3月14日,云层厚度大于5 km,地面有降雪现象。该个例中双频云雷达所测的反射率值差异 D_{ze} 小,由于云层中多冰相粒子,尽管云层较厚,在云顶附近,由于粒子浓度较低,反射率强度低于Ka波段的最小可探测灵敏度,W波段雷达所测云顶高度比Ka波段雷达高了近1 km。针对此次降雪个例,我们分别将两个波段反射率差 D_{ze} 和Ka无回波但W有回波的反射率进行了统计分析,结果见图14,当降雪现象发生时,云中多冰相粒子,Ka和W波段较液态水粒子衰减较小,两者之间的反射率差很小,主要集中在-4~4 dB, D_{ze} 峰值出现在0 dB;就云层上部,当W波段反射率值小于-30 dBZ时,Ka因云顶的云中粒子的相态为冰相和粒子浓度较小等原因,反射率普遍小于Ka的灵敏度,Ka雷达出现漏测现象,为了更好的探测高层的冰云,需要提高Ka波段灵敏度。云层厚度较厚时,

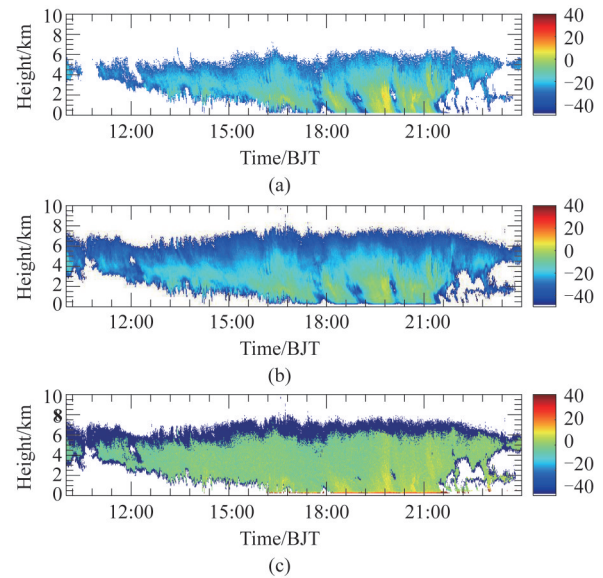


图13 2020年3月14日降雪个例(a)Ka波段雷达 $Z_{e,Ka}$, (b)W波段雷达 $Z_{e,W}$, (c)反射率差 D_{ze}

Fig. 13 The snowfall cloud on March 14, 2020 (a) Ka-band radar $Z_{e,Ka}$, (b) W-band radar $Z_{e,W}$, (c) D_{ze}

当云中液态粒子占优时,衰减作用明显,W波段雷达信号相比Ka波段雷达信号弱;当云中粒子多为冰相时,衰减作用减弱,当云粒子尺寸偏小时,W波段雷达相比Ka波段雷达显示出更佳的探测能力。

分析降雪过程Ka波段雷达和W波段雷达的径向速度(图15-16),Ka波段雷达测量与W波段雷达测量值是一致的,速度分布主要分布在-5~5 m/s范围内,整体回波以下沉气流为主;两者的速度差 V_{Diff} 以0 m/s为中心,主要变化范围在-1~1 m/s。降雪过程的速度分布和速度差异,与降雨过程零度层亮带以下存在明显不一致。

3 结论

Ka/W双频毫米波云雷达(YBJ-DFDR)在西藏羊八井全大气层观测站(海拔高度4 300 m)开展观测,日常均采用垂直对天模式。利用地基观测数据,选择典型的云降水、中云、高云等过程个例,本文对该系统中的Ka波段雷达和W波段雷达的探测能力及彼此差异开展了详细分析,小结如下:

(1)介绍的YBJ-DFDR具备较高的灵敏度,在10 km处探测的灵敏度分别是-39.2 dBZ和-33 dBZ,Ka波段雷达适合探测弱降水云和厚层云,W波段雷达适合探测高层的冰云,两者相互配合,优势互补。

(2)云降水物理分布特征不同时,Ka和W波段

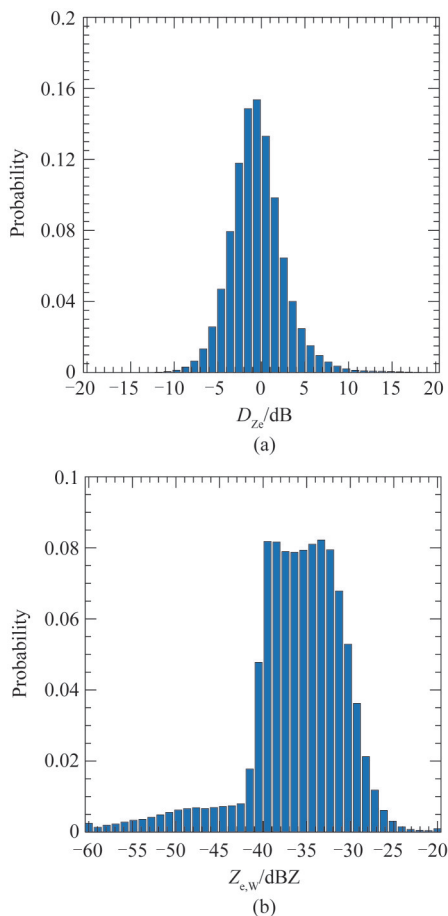


图 14 2020年3月14日降雪个例(a) D_{zz} 直方图分布,(b)Ka无回波但W有回波时,W波段雷达观测的反射率直方图分布
Fig. 14 The snowfall cloud on March 14, 2020 (a) D_{zz} histogram distribution, and (b) Z histogram distribution of W-band radar while the Ka-band radar no echo

雷达所测的反射率差值并不相同。发生降雨时,由于云滴和雨滴液态粒子散射吸收作用,Ka和W波段雷达回波信号的衰减程度明显不同,W波段雷达信号衰减较为严重,甚至出现衰减后低于探测灵敏度而无法获得回波的情况。通过个例分析发现,降水发生时二者的反射率差值差别极大,后期应用Ka&W波段雷达数据时,需对其反射率进行衰减订正工作。

(4)当云中粒子多为冰相时,由于冰相粒子的衰减作用远低于液水粒子,此时,W波段雷达相比Ka波段雷达有更佳探测能力。同时,当云中粒子较小时,W波段雷达也呈现更好的探测能力,因此,W波段雷达常能测到更多的云层边缘部分,如云底或云顶部分。

(5)当出现降雨过程时,Ka波段雷达和W波段雷达在零度层亮带上下测量的径向速度差异明显,

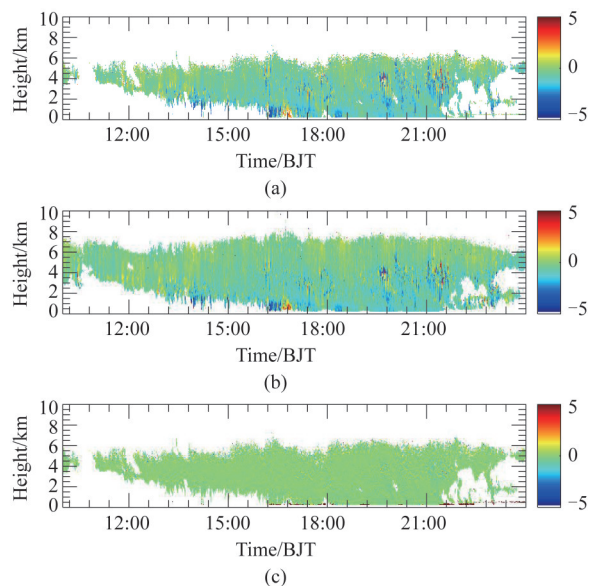


图 15 2020年3月14日降雪个例(a)Ka波段径向速度 V_{Ka} , (b)W波段雷达径向速度 V_W , (c)双频速度差 V_{Diff}
Fig. 15 The snowfall cloud on March 14, 2020 (a) Ka-band Radar V_{Ka} , (b) W-band Radar V_W , and (c) The V_{Diff}

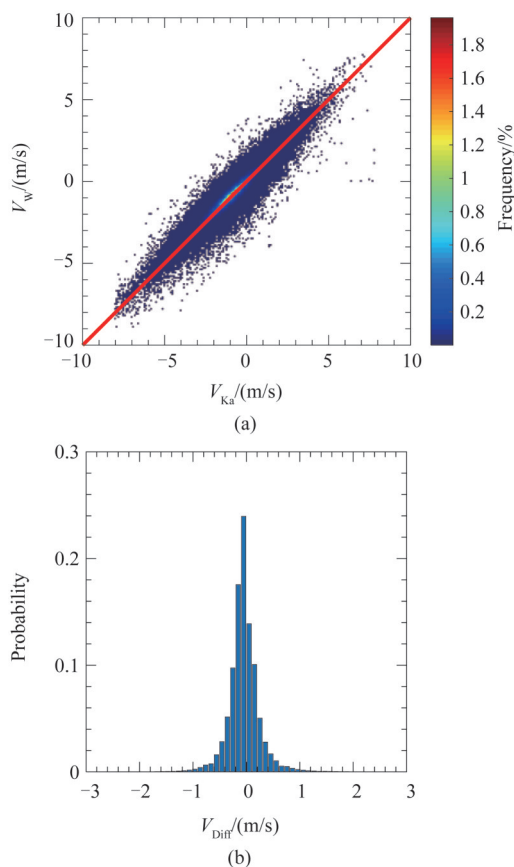


图 16 2020年3月14日降雪个例(a)Ka波段雷达与W波段雷达径向速度分布散点图,(b) V_{Diff} 直方图分布
Fig. 16 The snowfall cloud on March 14, 2020 (a) scatter plot of V of Ka-band and W-band, and (b) V_{Diff} histogram distribution

零度层亮带以下,由于降雨粒子谱大小不同造成后向散射系数不同,Ka测量速度较W波段大;而在非降水云和降雪过程中,Ka波段雷达和W波段雷达的径向速度一致性较高。

本文工作对YBJ-DFDR的探测能力开展了细致分析,研究结果进一步证实不同波长雷达对云降水的探测性能各有优势与不足。已有工作亦表明,现有的雷达工作机制所获得的反射率因子值,需结合云粒子相态等进行调整以获得更贴近实际的信息情况,从而有助于提高进一步的云降水微物理特征的反演精度。双频雷达的同时测量,提供了更多信息,为云粒子相态识别提供新的思路,在未来,我们将结合两波长雷达工作特点及差异,开展云相态、微物理属性反演的研究工作。

致谢:本文所开展的Ka&W双频毫米波雷达是由安徽四创电子股份有限公司研制,对四创公司陈晓辉正研级高工及其他工程师提供的技术支持深表感谢;观测是在西藏羊八井的中科院大气物理研究所全大气层观象台开展的,对观象台站长王一楠博士和宣越健正研级高工对本工作的支持深表感谢。

References

- [1] Stephens G L, Cloud feedbacks in the climate system: A critical review[J]. *Journal of Climate*, 2005, **18**:237-273.
- [2] Kollias P, Clothiaux E E, Miller M A, et al. Millimeter-wavelength radars: New frontier in atmospheric cloud and precipitation research[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, **88**(10):1608-1624.
- [3] Borque P, Kollias P, Giangrande S. First observations of tracking clouds using scanning ARM cloud radars[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, **53**(12):2732-2746.
- [4] Kollias P, Clothiaux E E, Ackerman T P, et al. Development and applications of ARM millimeter-wavelength cloud radars[J]. *Meteorological Monographs*, 2016, **57**: 17.1-17.19.
- [5] Kollias P, Bharadwaj N, Clothiaux E E, et al. The ARM Radar Network: At the Leading Edge of Cloud and Precipitation Observations[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, **101**(5):508-607.
- [6] Illingworth A J, Hogan R J, O'Connor E J, et al. Cloudnet [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, **88**(6):883-898.
- [7] Gösrdorf U, Lehmann V, Bauer-Pfundstein M, et al. A 35-GHz polarimetric Doppler radar for long-term observations of cloud parameters—Description of system and data processing[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, **32**(4):675-690.
- [8] Delanoë J, Protat A, Vinson J, et al. BASTA: A 95-GHz FMCW Doppler radar for cloud and fog studies[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, **33**(5): 1023-1038.
- [9] Kuchler N, Kneifel S, Löhnert U, et al. A W-band radar - radiometer system for accurate and continuous monitoring of clouds and precipitation [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, **34**(11):2375-2392.
- [10] ZHONG Ling-Zhi, LIU Li-Ping, GE Run-Sheng. Characteristics about the Millimeter-Wavelength Radar and Its Status and Prospect in and Abroad [J]. *Advances in Earth Science*(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. *地球科学进展*), 2009, **24**(4):383-391.
- [11] ZHONG Ling-Zhi, LIU Li-Ping, GE Run-Sheng, et al. (A study of the calibration of the new generation of millimeter-wave-length cloud radar(HMBQ) and its detection capability [J]. *Acta Meteorologica Sinica*(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. *气象学报*), 2011, **69**(2):352-362.
- [12] HAO Yi-Tian, CHEN Hong-Bin, BI Yong-Heng, et al. Comparative analysis of cloud boundary observed by millimeter wave cloud radar and radiosonde [J]. *Remote Sensing Technology and Application*(郝倚天,陈洪滨,毕永恒,等.8毫米云雷达与探空观测确定云底和云顶高度的对比分析. *遥感技术与应用*) 2018, **33**(6): 1063-1072.
- [13] HUO Juan, LYU Da-Ren, DUAN Shu, et al. Cloud macro-physical characteristic in Beijing based on Ka radar data during 2014-2017 [J]. *Climatic and Environmental Research*(霍娟,吕达仁,段树,等.基于2014~2017年Ka毫米波雷达数据分析北京地区云宏观分布特征. *气候与环境研究*), 2020, **25**(1):45-54.
- [14] Huo J, Bi Y H, Lyu D R, et al. Cloud classification and distribution of cloud types in Beijing using Ka-band radar data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, **36**: 793-803
- [15] Huo J, Lyu D R, Duan S, et al. Comparison of the cloud top heights retrieved from MODIS and AHI satellite data with ground-based ka-band radar [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2020, **13**(1):1-11,
- [16] Huo J, Li J, Duan M, et al. Measurement of cloud top height: Comparison of MODIS and ground-based millimeter radar [J]. *Remote Sensing*. 2020; **12**(10):1616.
- [17] Huo J, Tian Y F, Wu X, et al. Properties of ice cloud over Beijing from surface Ka-band radar observations during 2014 - 2017 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2020, **20**: 14377-14392.
- [18] Huo J, Han C Z, Duan M Z, et al. Particle reflectivity and movements in cirrus clouds over Beijing from four years of ka radar measurements [J]. *Atmospheric Research.*, 2020, **248**(15):105211.
- [19] ZHANG Tao, ZHENG Jia-Feng, LIU Yan-Xia. A study on the vertical structure and microphysical characteristic of convective cloud and precipitation over Tibetan Plateau by using Ka-band cloud radar [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*(张涛,郑佳锋,刘艳霞.利用Ka波段云雷达研究青藏高原对流云和降水的垂直结构及微观物理特征. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(6):777-789.
- [20] LI Yu-Lian, SUN Xue-Jin, ZHAO Shi-Jun, et al. Analysis of snow microphysical process from Doppler spectra of

- the Ka-band millimeter-wave cloud radar[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave* (李玉莲, 孙学金, 赵世军, 等。Ka波段毫米波云雷达多普勒谱降雪微物理特征分析。《红外与毫米波学报》, 2019, **38**(2):245-253.
- [21] LIU LI. Reviews on retrieval methods for microphysical and dynamic parameters with cloud radar [J]. *Torrential Rain and Disasters* (刘黎平。毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展。《暴雨灾害》, 2021, **40**(3):231-242.
- [22] ZHENG Jia-Feng, LIU Li-Peng, ZENG Zheng-Mao, *et al.* Ka-band millimeter wave cloud radar data quality control[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave* (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。《红外与毫米波学报》, 2016, **35**(6):748-757.
- [23] Doviak R J, Zrnicek D S. Doppler radar and weather observations[M]. Academic Press, 1993, 562 pp.
- [24] Pokharel B, Vali G. Evaluation of collocated measurements of radar reflectivity and particle sizes in ice clouds [J], *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, **50**(10):2104-2119.
- [25] Matrosov S Y, Heymsfield A J. Empirical relations between size parameters of ice hydrometeor populations and radar reflectivity [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, **56**(9):2479-2488.