

马宁堃,王飞,贾作,等,2025.云雷达功率谱去噪新方法研究及其云物理反演应用[J].气象,51(5):542-551. Ma N K, Wang F, Jia Z, et al, 2025. A new method of cloud radar Doppler spectrum denoising and its application in cloud physics retrievals[J]. Meteor Mon, 51(5):542-551(in Chinese).

云雷达功率谱去噪新方法研究及其云物理反演应用^{*}

马宁堃¹ 王 飞¹ 贾 作² 陈羿辰¹

1 北京市人工影响天气中心,北京 100089

2 中船航海科技有限责任公司,北京 100070

提 要:功率谱是垂直指向毫米波云雷达的原始数据,基于云降水信号和“鬼波”等噪声信号在不同模式功率谱中的一致性差异,首次采用长、短脉冲作差方法确定云信号边界,去除“鬼波”并运用云信号边界计算噪声电平,形成新的去噪方法。此外对云信号边界位置随着差值阈值 T 变动的敏感性进行分析。基于小粒子示踪法,用去噪后的云信号左端点计算大气垂直速度,对北京地区两次降雨(雪)过程进行反演,并与大气垂直速度的飞机原位观测结果进行对比。经验证,新去噪方法可有效去除“鬼波”,云雷达反演的和飞机观测获取的大气垂直速度平均值存在一定比例的偏差,但整体方向、量级对应较好,去噪方法和反演结果具备合理性。

关键词:云雷达,功率谱,数据质量控制,大气垂直速度,噪声电平

中图分类号: P412, P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.111801

A New Method of Cloud Radar Doppler Spectrum Denoising and Its Application in Cloud Physics Retrievals

MA Ningkun¹ WANG Fei¹ JIA Zuo² CHEN Yichen¹

1 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

2 CSSC Marine Technology Co. Ltd., Beijing 100070

Abstract: Doppler spectrum is the Ka-band cloud radar original data. Based on the consistency difference between cloud-precipitation signal and the “ghost echo” along with other noise signals in different Doppler spectral modes, this article uses the difference between short-pulse and long-pulse modes to determine the cloud signal boundary for the first time. The “ghost echo” is removed and the cloud signal boundary is adopted to calculate the noise level, forming a new denoising method. In addition, the sensitivity of cloud signal boundary changing with the difference threshold T is analyzed. Based on the small particle tracer method, the left cloud signal boundary after denoising is used to calculate the vertical air velocity. Two rainfall (snow) cases in Beijing are analyzed and compared with the in-situ aircraft observations of the vertical air velocity. It is verified that the new denoising method can effectively remove the “ghost echo”. Although a certain percentage deviation exists between the average vertical air velocity obtained by cloud radar and aircraft, the direction and magnitude correspond well in general. Thus, this method and the retrieved results are reasonable.

Key words: cloud radar, Doppler spectrum, data quality control, vertical air velocity, noise level

^{*} 北京市自然科学基金项目(8244064)和中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(2022KLAS01M)共同资助

2024 年 8 月 8 日收稿; 2024 年 12 月 23 日收修定稿

第一作者:马宁堃,主要从事雷达气象反演及云降水物理研究. E-mail:634748354@qq.com

通讯作者:陈羿辰,主要从事雷达资料分析及应用研究. E-mail:chenyichen@bj.cma.gov.cn

引言

毫米波云雷达的多普勒功率谱密度数据,是垂直指向云雷达的返回信号关于粒子径向速度变化的函数,是云雷达获取的原始数据,简称为功率谱。相比于雷达观测基数据(如反射率因子、径向速度、速度谱宽、退偏振比),功率谱包含着丰富的微观信息,可用于反演云降水的滴谱分布、液水路径、粒子相态等微物理特性及大气垂直速度等动力情况(Kollias et al, 2002; 吴亚昊等, 2016; Li et al, 2021; 张静怡等, 2022; Zhu et al, 2021; 孙啸申等, 2023; 王卫民等, 2024)。对功率谱进行数据质量控制是进一步云微物理反演和分析的基础。

云雷达功率谱数据质量控制主要包括去速度模糊、时空平滑、计算噪声电平并去除、过饱和处理、限定云信号等步骤(刘黎平等, 2014; Zhu et al, 2021; 郑佳锋等, 2016),以及脉冲压缩带来的距离旁瓣、晴空回波识别等问题的处理(Liu and Zheng, 2019; Liu et al, 2019; 陶法, 2021; 曾正茂等, 2022)。计算噪声电平并去除是获得可使用的功率谱的关键一步,直接决定了质量控制之后云降水信号的谱边界。比如在诸多云雷达功率谱计算云降水内部大气垂直速度的反演中,将功率谱云降水信号的最左端判定为大气垂直运动的示踪物,即小粒子示踪法(Kollias and Albrecht, 2000; Shupe et al, 2008; 彭亮等, 2012);准确的噪声电平对去噪后功率谱整体大小及后续计算雨滴谱等量级分布影响也较大(马宁堃等, 2019; Zheng et al, 2017)。噪声电平的计算基于噪声信号所在多普勒速度区域(非气象信号的速度区域)的信号特征提取,常用计算方法包括分段法(Petitdidier et al, 1997)、Hildebrand and Sekhon方法(Hildebrand and Sekhon, 1974)和最大值法(刘黎平等, 2014)。Petitdidier et al(1997)提出了分段法计算噪声电平:该方法将功率谱分成多段,统计各段的平均值,将最小的平均值作为噪声电平,该方法被较多用于风廓线雷达、云雷达的功率谱处理中;刘黎平等(2014)在国产行波管毫米波云雷达中,将功率谱速度大值区的噪声功率作为噪声电平,称其为最大值法;Hildebrand and Sekhon(1974)假设雷达噪声属于高斯白噪声,从高功率的气象信号开始逐渐将功率谱中的气象信号抽离,直至只剩下雷达噪声,计算过程中按抽离后的序列方差是否满足高斯

白噪声的方差性质为准则进行判断,此方法还被称为客观法。

在北京海坨山地区闫家坪观测站的Ka波段毫米波云雷达的观测中发现,即使是一般强度的降水云过程,云雷达受到本振信号杂散影响,上下变频混频后,会收到频域上成对出现的、分布在主气象回波两侧的复制般的虚假回波信号,称其为“鬼波”,如图1所示,在雷达不同观测模式下都出现这种杂波现象。此类现象在国内外多部Ka波段云雷达的降水观测中都曾出现但未能得到重视,雷达硬件系统的改进可以尽量减弱杂波的强度,但无法将其彻底消除,“鬼波”为数据质量控制及进一步的微物理反演带来了困难。

传统噪声电平计算都是基于噪声信号所在多普勒速度区域(非气象信号的速度区域)的信号特征进行提取,而“鬼波”的出现将大大抬高噪声区域的信号能量,此时按照上述几种噪声电平计算方法进行去噪,不仅使得云信号边界阈值被大大抬高,云降水信号也被削弱过多,导致大气垂直速度、雨滴谱等微物理参量的获取出现很大误差。因此上述几种传统的去噪方法皆不适用。

一些研究基于不同算法(如云连续特性算法、贝叶斯算法和偏振测量的算法)滤除虚假回波或非气象信号(Kalapureddy et al, 2018; Hu et al, 2021; Martner and Moran, 2001)。运用功率谱数据进行气象信号与杂波信号的识别更加容易,比如速度为 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的静止地物杂波可以采用插值方法进行处理(Williams et al, 2018; 2021)。Ding et al(2022)运用不同观测模式下非气象信号的不连续性对杂波进行剔除,将不同模式功率谱之比按照设置的阈值进行筛选。

本文针对“鬼波”信号,基于非气象回波和气象回波在云雷达长、短脉冲探测模式中一致性的差异,确定云信号边界,滤除云信号之外的虚假“鬼波”信号。由于成功分离了云降水信号及噪声信号区域,这两者边界对应的功率谱数值即为噪声电平的大小,因此本方法确定了一种全新的云雷达功率谱噪声电平计算方法。依据处理结果,进一步针对去噪后的功率谱,对北京地区两次降雨(降雪)云降水个例的大气垂直速度进行反演,并与同一时空飞机探测大气垂直速度资料进行对比,验证此滤波方法的效果及反演结果的合理性。

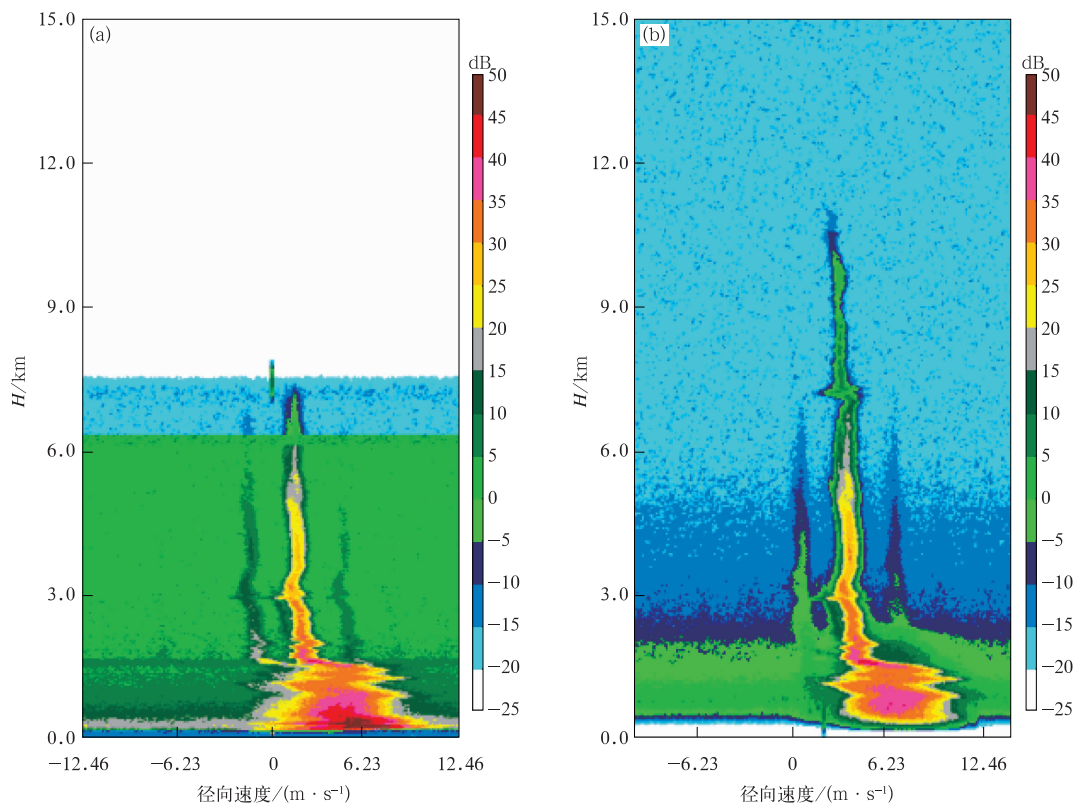


图 1 2021 年 9 月 19 日 16:45 闫家坪观测站 Ka 波段云雷达功率谱随高度的分布

(a)短脉冲模式,(b)长脉冲模式

Fig. 1 Distribution of Ka-band cloud radar Doppler spectrum with altitude

at Yanjiaping Station at 16:45 BT 19 September 2021

(a) short-pulse mode, (b) long-pulse mode

1 原理与方法

1.1 云雷达简介

海坨山位于北京市延庆区和河北省赤城县的交汇处,与延庆城区和北京市区的距离分别为 18 km 和 130 km。闫家坪观测站在海坨山 6 km 以外的西南方位,海拔为 1344 m,该站建于 2014 年,2018 年形成了集合各种观测设备的综合性观测站,包括自动气象观测站、Ka 波段云雷达、风廓线雷达、微雨雷达、微波辐射计、MPL 激光雷达、OTT、2DVD 等,观测站地理位置和设备布局如图 2 所示。2017 年架设 Ka 波段云雷达,已获取 7 年站点上空云降水信息,包括基数据和功率谱密度原始数据。

云雷达的主要技术参数如表 1 所示。在日常观测中,云雷达有长脉冲(宽度:6 μs)、短脉冲(宽度:0.2 μs)两种探测模式。短脉冲模式有 3 个库的盲

区,约 90 m;长脉冲模式的盲区为 30 个库,约 900 m,对于低云观测较为不利,因此短脉冲的近地面数据可用来补充长脉冲的盲区,本部雷达的基数据产品在 0.9 km 处由长、短脉冲数据进行拼接处理;而长脉冲由于脉冲宽度大、穿透力强,可以获取更加完整的高云数据,两种数据互相补充。

1.2 滤除“鬼波”及计算噪声电平方法

“鬼波”信号是雷达本振信号杂散影响产生的混频信号,并非真实的云降水气象信号,信号大小随着不同模式的功率差异而明显不同,如图 1 所示的成对“鬼波”,长、短脉冲模式下“鬼波”信号也存在量级差异;但云降水信号是稳定的气象信号,回波功率在不同观测模式下差异不大。因此,对长、短脉冲模式的功率谱(简称长、短脉冲信号)进行作差,若差值微小,说明功率谱不随着观测模式的能量变化而改变,此区域可大致判定为云降水信号,若差值较大则为非降水信号,即“鬼波”及其他噪声信号的区域。

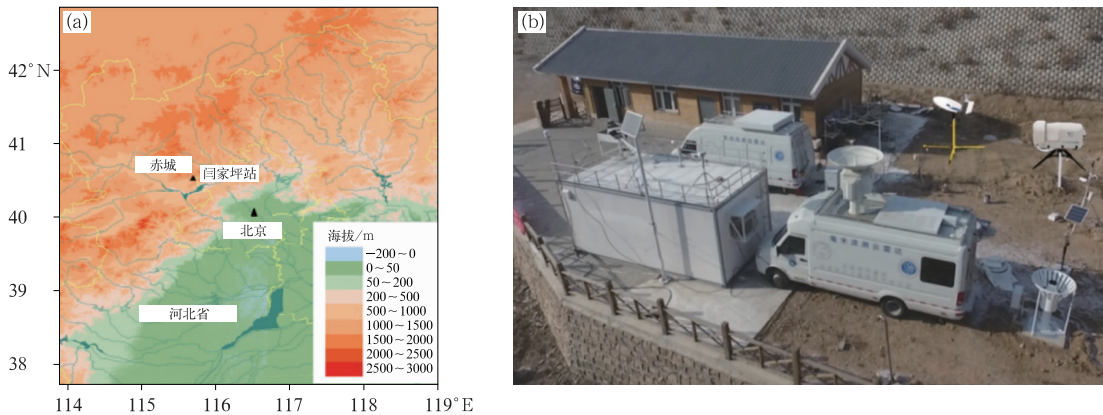


图 2 闫家坪观测站(a)地理位置和(b)设备布局

Fig. 2 (a) Geographical location and (b) equipment layout at Yanjiaping Station

表 1 闫家坪云雷达的主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of Yanjiaping Cloud Radar

指标	指标数值
型号	HMB-KST
工作频率	Ka 波段:频率 33.44 GHz、波长 8.5 mm
探测目标	非降水云、弱降水云、弱降水等
数据产品	回波强度、径向速度、速度谱宽、线性退偏振、功率谱密度
观测模式	垂直观测及其他观测模式
Nyquist 速度范围	$-12.46 \sim 12.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
时间分辨率	3 s
距离分辨率	30 m
3 dB 波束宽度	0.3°
探测高度	$0 \sim 15.3 \text{ km}$
FFT 脉冲数	256
长、短脉冲宽度	短脉冲: $0.2 \mu\text{s}$;长脉冲: $6 \mu\text{s}$
数据拼接高度	0.9 km

这样可以在忽略噪声区域电平被“鬼波”整体抬高的情况下直接确定云降水信号的边界,并将这个边界的功率谱数值确定为噪声电平。对长脉冲信号 $S_{z_long}(V_R)$ 和短脉冲信号 $S_{z_short}(V_R)$ 进行对数处理,分别得到 $L(V_R)$ 和 $S(V_R)$:

$$L(V_R) = 10\lg(S_{z_long}(V_R)) \quad (1)$$

$$S(V_R) = 10\lg(S_{z_short}(V_R)) \quad (2)$$

$$L(V_R) - S(V_R) > T \quad -0.5 < T < -5 \quad (3)$$

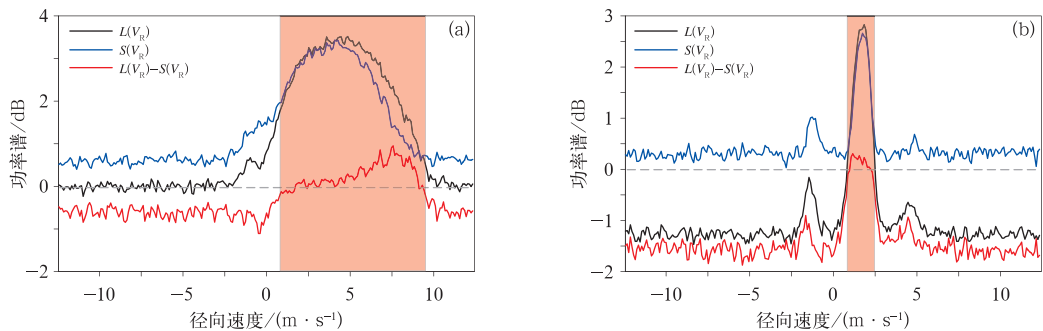
式中: V_R 为雷达径向速度, T 为长、短脉冲差值阈值。

图 3 显示了长、短脉冲信号差异及云信号区域的判定,数据取自 2021 年 9 月 19 日 16:45(北京时,下同)的径向数据。随着径向速度减小(从两侧到中间),长、短脉冲信号差值 $L(V_R) - S(V_R)$ (图 3 红色曲线)逐渐缩小并接近于零,此时噪声区的长、短脉冲信号相当,判定云降水信号的左右边界,边界内确定有效云降水信号区域(图 3 浅红色速度区

间);若长脉冲信号远远小于短脉冲信号,则此速度区间被判定为噪声区域,即非降水信号(浅红色以外的速度区间)。云降水信号边界点的具体位置由 T 确定,确定云降水信号边界后,将边界点的功率值确定为噪声电平值。

1.3 云信号左边界的敏感性分析

云信号边界点位置将随着 T 的微小变动而发生左右漂移,从而影响噪声电平值的大小,因此对左端点位置随着 T 变动的敏感性进行分析, T 随着 -0.5 、 -1 、 -2 、 -3 、 -4 、 -5 逐渐步进,确定左端点对应脉冲速度的偏移情况。如表 2 所示,不同 T 对应不同长、短脉冲信号倍数关系,比如当差值阈值 T 取 -0.5 ,取长脉冲信号 $S_{z_long}(V_R)$ 大于 0.9 倍短脉冲信号 $S_{z_short}(V_R)$ 的功率谱速度区域。如图 4 所示,同样是 2021 年 9 月 19 日 16:45 同一时刻的径向数据,随着 T 步进,信号点的位置每次几乎只向左



注：浅红色区域为划定的云降水信号速度范围。

图 3 2021 年 9 月 19 日 16:45 闫家坪云雷达距地面(a)1.2 km,(b)3.6 km

长脉冲和短脉冲功率谱及云信号区域判定

Fig. 3 Long-pulse and short-pulse Doppler spectra and the cloud signal area determination of Yanjiaping Cloud Radar at 16:45 BT 19 September 2021

(a) 1.2 km, (b) 3.6 km

表 2 不同 T 对应的长脉冲和短脉冲信号倍数关系

Table 2 The multiples of short-pulse and long-pulse Doppler spectra corresponding to different T values	T	-0.5	-1	-2	-3	-4	-5
$\frac{S_{z_long}(V_R)}{S_{z_short}(V_R)}$ 大于		0.9	0.8	0.63	0.5	0.4	0.32

变动了 0~1 个脉冲点, T 从 -0.5 到 -5 左端点总偏移量不超过 4~6 个脉冲点, 偏移速度范围在 $-0.42 \sim 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右; 尤其是 0°C 层以上(从液态较宽信号经过 0°C 层变成冰相较窄信号), 约 3 km 高度以上, 左端点脉冲总偏移量基本在 1~2 个脉冲点, 偏移速度范围在 $-0.2 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内; 底层 10 个高度库内的偏差量略大, 偏移速度范围在 $-1 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内, 可能是由于脉冲压缩造成的整体能量抬升, 影响了底层云信号端点稳定性。取这几个偏移

量数值的中值, 即 T 为 -2 或者 -3, 可以大致将整体速度偏差控制在 $-0.2 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之内。 T 越大, 云信号端点变化越小, 总体来说, 云信号左端点对于 T 的变动较为不敏感, 寻找云信号的左端点较为集中。对“鬼波”进行去除、数据平滑等质量控制过程后得到可用于后续云物理量反演的数据图像(图 5), 由于长脉冲模式盲区的影响, 不考虑 900 m 以下的回波。

1.4 大气垂直速度计算

在毫米波雷达的功率谱数据中, 多普勒速度大小对应着粒子尺寸大小, 功率谱左侧的第一个谱点能够代表雷达所探测到的最小粒子的信号, 如果该粒子足够小, 其自身的下落末速度也非常小, 相对大气的垂直运动速度可以忽略, 可将其作为示踪物来反演大气的垂直运动速度, 称为小粒子示踪法。如 1.2 节描述, 确定了云信号的左端点后, 大气垂直速度可以被计算, 将功率谱左端点的脉冲点数定义为 N_s , 功率谱本身的 FFT 脉冲数 N_{FFT} 为固定值 256, V_c 用来表示云雷达的 Nyquist 速度, 为 $-12.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 因此大气垂直速度 V_a 可由式(4)计算而得:

$$V_a = -(N_s - N_{\text{FFT}}/2) \times V_c \times 2/N_{\text{FFT}} \quad (4)$$

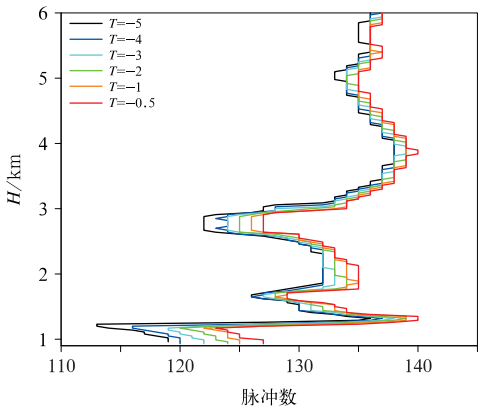


图 4 在不同 T 下功率谱云信号左端点漂移情况

Fig. 4 The left endpoint drift of cloud signal of Doppler spectrum at different T values

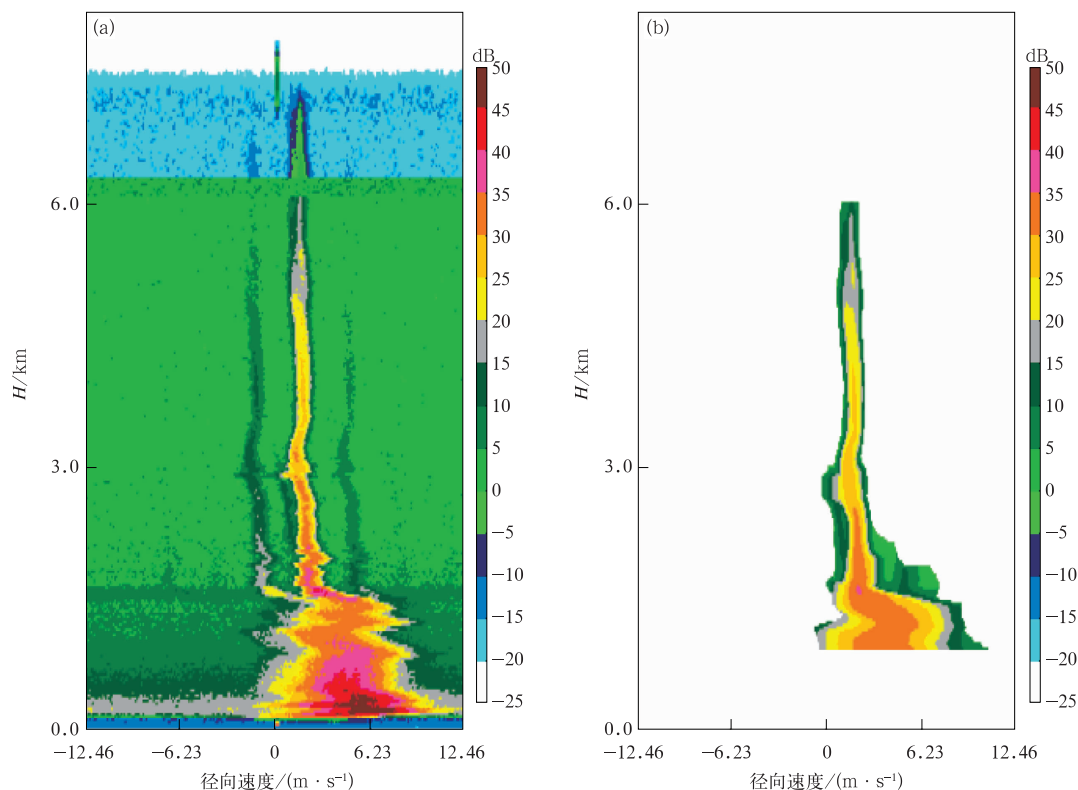


图5 2021年9月19日16:45闫家坪观测站包含“鬼波”的云雷达功率谱

(a)原始数据,(b)质量控制后数据

Fig. 5 Cloud radar Doppler spectrum with “ghost echo” at Yanjiaping Station at 16:45 BT 19 September 2021

(a) original data, (b) data after quality control

1.5 飞机观测介绍

在北京地区2021年2月28日的降雪过程和6月16日的降雨过程中,北京市人工影响天气中心空中国王3587飞机(以下简称3587)实施了和地面云雷达的联合探测,这两次过程均飞过海坨山上空,距离闫家坪观测站较近。使用机载AIMMS-20探头获取的大气垂直速度原位观测数据为闫家坪云雷达数据反演结果提供对比(范雯露等,2022)。考虑到转弯和飞机爬升落地对风速测量准确度的影响,本研究只采用平飞、直飞的数据进行分析;同时,雷达分析尺度较大,而飞机观测尺度较小,本研究忽略飞机观测到的局部强上升和下沉气流的影响,重点分析平均垂直风速变化。

2 个例分析及飞机资料对比

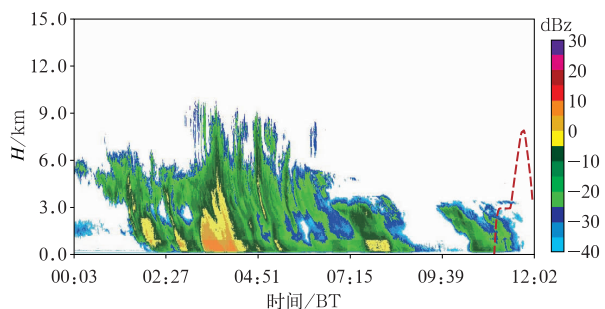
2.1 2021年2月28日降雪过程

2021年2月28日至3月1日为北京地区一次

稳定的层状云降雪过程,28日00:03—12:02为降雪过程的前半段,图6为云雷达垂直观测的降雪回波强度,整体回波强度不超过10 dBz,云顶最高发展到9 km,降雪较为深厚。3587于28日11:00左右起飞入云,处于此段降雪尾声,飞行高度的时间序列在图中用红色虚线标注。

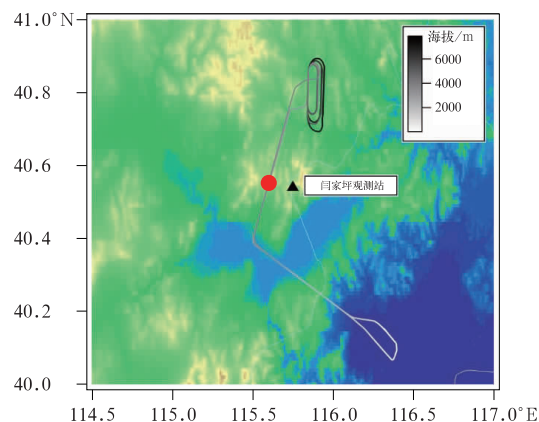
图7为3587的飞行轨迹,总飞行时段为10:41—12:28,11:14时3587(红色圆点)与闫家坪观测站(黑色三角形)的直线距离最短,为11.9 km。其中11:15:48—11:21:06,3587飞行海拔、温度、湿度时间序列如图8所示,紫色圆圈部分标注飞行时穿云时段,主要为11:17:46—11:18:04和11:18:45—11:19:18。11:17:46—11:18:04时段,飞机飞至闫家坪观测站附近,飞行海拔约3000 m,两者水平方向的直线距离约为23 km左右,考虑到这是个稳定的层状云降雪云团,认为这两个位置的大气垂直速度结果具有可比较性。

将地面云雷达的反演结果与飞机数据进行对比,2021年2月28日云雷达观测的功率谱数据中同样出现了“鬼波”现象。图9给出对云雷达功率谱



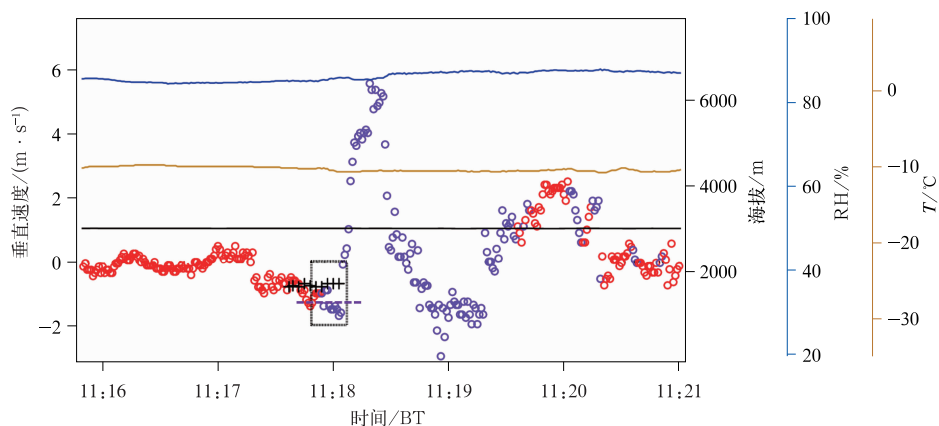
注:红色虚线为飞机飞行时间-高度轨迹。

图 6 2021 年 2 月 28 日 00:03—12:02 降雪过程闫家坪云雷达观测的回波强度
Fig. 6 Reflectivity factor of snowfall detected by Yanjiaping Cloud Radar during 00:03—12:02 BT 28 February 2021



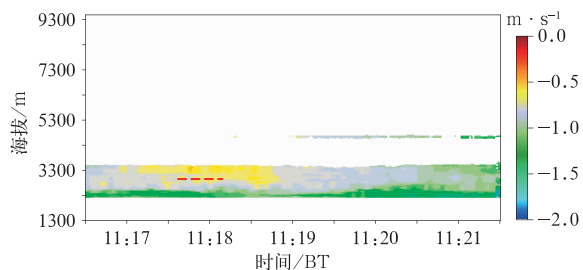
注:红色圆点为 3587 位置,黑色三角为闫家坪观测站,轨迹为飞机飞行海拔。

图 7 2021 年 2 月 28 日空中国王 3587 飞行轨迹
Fig. 7 Flight path of King Air 3587 on 28 February 2021



注:圆圈为飞机 AIMMS 探头观测的大气垂直速度,紫色圆圈为飞行穿云时段;虚线方框为云雷达和飞机对比时段,十为云雷达观测的大气垂直速度,紫色虚线为飞机大气垂直速度平均值。

图 8 2021 年 2 月 28 日 11:15:48—11:21:06 空中国王 3587 各参数时间序列
Fig. 8 Time series of aircraft parameters of King Air 3587 during 11:15:48—11:21:06 BT 28 February 2021



注:红色虚线为 11:17:46—11:18:04 飞机经过闫家坪附近时的飞行海拔。

图 9 2021 年 2 月 28 日 11:16—11:22 闫家坪云雷达反演的大气垂直速度
Fig. 9 Vertical air velocity retrieved by Yanjiaping Cloud Radar during 11:16—11:22 BT 28 February 2021

数据进行平滑、去速度模糊处理、“鬼波”滤波后,运用小粒子示踪法反演的大气垂直速度时间-海拔分布,11:16—11:22 约 2.2~3.5 km 处,闫家坪上空层状云的整层大气垂直速度分布在 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,基本小于 $-1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,为较微弱的下沉气流。云雷达与飞机对比时段,11:17:46—11:18:04,约 3000 m 海拔(图 9 中红色虚线标注)云雷达反演的大气垂直速度范围为 $-0.9 \sim -0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $-0.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8 黑色十字)。11:17—11:19 飞机穿云获得的大气垂直速度在 $-2.0 \sim -0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,以下沉运动为主,11:17:46—11:18:04(图 8 虚线方框)垂直速度平均值为 $-1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8 水平紫色虚线)。近 20 秒的对比时段内,云雷达和飞

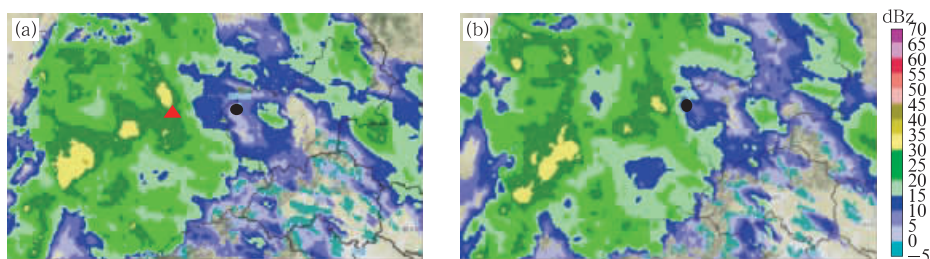
机测量的大气垂直速度总体平均值方向、量级相同,数值存在一定偏差。

2.2 2021年6月16日降雨过程

2021年6月16日北京地区出现一次较稳定的层积云降水过程,整体云系自西向东移动,移速较慢,图10为此次降水X波段组网雷达回波强度。图11为3587的飞行轨迹,11:27左右飞机(图10和图11红色三角)与闫家坪观测站(图10和图11黑色圆点)直线距离最短,约为23 km,此时飞机处在黄绿色回波的交界处,强度约为25~35 dBz,而云雷达则处于蓝色回波区域,约为5~15 dBz,飞机和云雷达分别处在层积云团的不同强度结构,无法直接进行比较。但由于云系随着时间变化较小且稳

定移动,飞机于11:27穿行的云团约在11:39到达闫家坪,将云雷达反演的11:39云团内的大气垂直速度与11:27飞机获取的云团大气垂直速度进行大致对比。

图12给出2021年6月16日11:34—11:40闫家坪云雷达在进行功率谱数据质量控制后,根据小粒子示踪法反演的大气垂直速度时间-海拔分布。整层大气垂直速度基本为下沉气流,气流速度最大不超过 $-4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高层出现一些微弱的上升气流。11:39,3654~3684 m云雷达反演的大气垂直速度在 $-2.3 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 波动,平均值为 $-0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图13为飞机在11:26:25—11:28:30平飞时段各参数随时间的变化。对比时段飞机所处海拔为3660 m,温度为 5°C 左右,相对湿度为100%,选取平

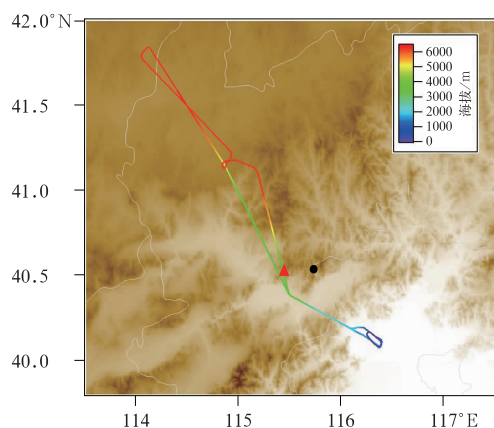


注:红色三角为飞机位置,黑色圆点为闫家坪观测站。

图10 2021年6月16日(a)11:27,(b)11:39降雨过程的雷达回波强度

Fig. 10 Radar reflectivity factor of the rainfall process at

(a) 11:27 BT and (b) 11:39 BT 16 June 2021

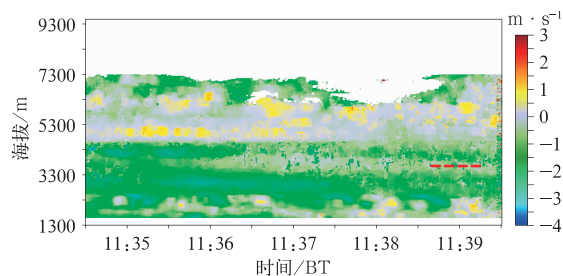


注:红色三角为11:27飞机位置,黑色圆点为闫家坪观测站,轨迹为飞机飞行海拔。

图11 2021年6月16日空中国王3587飞行轨迹

Fig. 11 Flight path of King Air 3587 on 16 June 2021

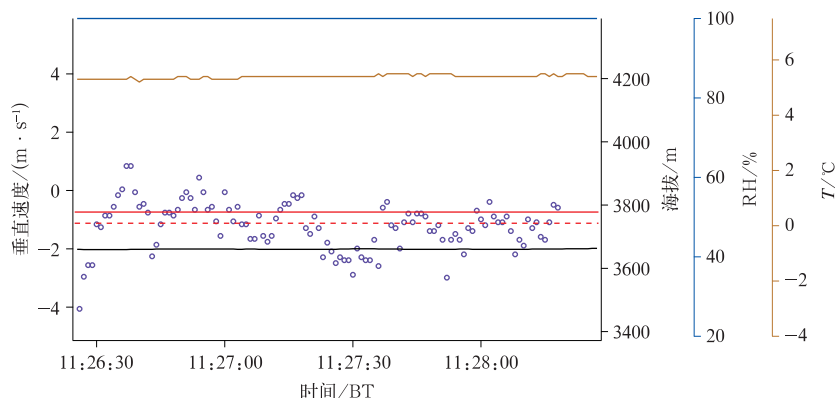
飞且无转向的稳定数据进行分析,获取的大气垂直速度在 $-3 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 波动,平均值为 $-1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图13红色水平虚线)。两者获取的大气垂直速度



注:红色虚线为对比时刻飞机飞行海拔。

图12 2021年6月16日11:34—11:40闫家坪云雷达反演的大气垂直速度

Fig. 12 Vertical air velocity retrieved by Yanjiaping Cloud Radar during 11:34—11:40 BT 16 June 2021



注:圆圈为飞机 AIMMS 探头观测的大气垂直速度,红色实线和虚线分别为云雷达和飞机观测的大气垂直速度平均值。

图 13 2021 年 6 月 16 日 11:26:25—11:28:30 空中国王 3587 各参数时间序列

Fig. 13 Time series of aircraft parameters of King Air 3587 during 11:26:25—11:28:30 BT 16 June 2021

方向、量级对应比较好,飞机获取大气下沉气流速度相较于云雷达的反演结果更大,存在一定偏差。

3 结论和讨论

综合两个个例采用长、短脉冲作差的滤波方法,可以有效去除“鬼波”并解决“鬼波”对云雷达探测反演的影响,获取的大气垂直速度与飞机测量大气垂直速度的方向、量级对应较好,两个个例空地对比选取的样本的大气垂直速度平均值存在 40% 左右的偏差。

目前北京海坨山闫家坪观测站布设的 Ka 波段云雷达探测微小云粒子(小于 $50\ \mu\text{m}$ 的小云滴)的灵敏度较差,所以运用云左端点边界作为小粒子进行示踪时容易产生一定误差;此外,空气湍流也会造成云降水功率谱的展宽,为云信号端点确定带来影响。考虑到雷达与飞机探头的取样体积、仪器分辨率等固有差异以及飞机飞行中受湍流影响等的不确定因素,因而认为云雷达探测大气垂直速度的落区基本是合理的。云边界信号的大致位置、大气垂直速度具有参考意义,基本验证了上述计算去除“鬼波”和噪声的方法具有可靠性。

由于时间和观测条件的限制,目前获取的两个空地观测对比个例中飞机和地面观测站的水平距离仍旧较远,缺乏飞机直接飞过观测站点上空、同一位置多高度垂直探测的数据,能够直接进行对比的数据量非常少,空地联合探测的反演效果的验证仍然

不够充分,后续将进一步获取更为良好的联合观测个例资料。

参考文献

- 范雯露,景晓琴,杨璟,等,2022. 基于飞机观测的美国落基山地区冬季混合相态层状云与夏季对流云的微物理特征[J]. 大气科学, 46(5): 1113-1131. Fan W L, Jing X Q, Yang J, et al, 2022. Microphysical characteristics of winter mixed-phase stratiform clouds and summer convective clouds in the Rocky Mountain Region based on airborne measurements[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5): 1113-1131(in Chinese).
- 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[J]. 大气科学, 38(2): 223-236. Liu L P, Xie L, Cui Z H, 2014. Examination and application of Doppler spectral density data in drop size distribution retrieval in weak precipitation by cloud radar[J]. Chin J Atmos Sci, 38(2): 223-236(in Chinese).
- 马宁堃,刘黎平,郑佳锋,2019. 利用 Ka 波段毫米波雷达功率谱反演云降水大气垂直速度和雨滴谱分布研究[J]. 高原气象, 38(2): 325-339. Ma N K, Liu L P, Zheng J F, 2019. Application of Doppler spectral density data in vertical air motions and drop size distribution retrieval in cloud and precipitation by Ka-band millimeter radar[J]. Plateau Meteor, 38(2): 325-339(in Chinese).
- 彭亮,陈洪滨,李柏,2012. 3 mm 多普勒云雷达测量反演云内空气垂直速度的研究[J]. 大气科学, 36(1): 1-10. Peng L, Chen H B, Li B, 2012. A case study of deriving vertical air velocity from 3 mm cloud radar[J]. Chin J Atmos Sci, 36(1): 1-10(in Chinese).
- 孙啸申,周学思,樊嵘,等,2023. 张家口 2019 年 11 月 29 日降雪天气的毫米波雷达和飞机观测分析[J]. 气象, 49(8): 958-971. Sun X S, Zhou X S, Fan R, et al, 2023. Analysis of a snowfall event at

- Zhangjiakou on 29 November 2019 based on Ka-band millimeter-wavelength radar and aircraft observations[J]. Meteor Mon, 49(8):958-971(in Chinese).
- 陶法, 2021. 基于毫米波云雷达粒子谱反演及应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Tao F, 2021. Research on particle spectrum retrieval and application based on millimeter wave cloud radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 王卫民, 徐八林, 雷勇, 等, 2024. Ka波段毫米波云雷达对青藏高原东南缘降水回波的分析[J]. 气象, 50(3):291-302. Wang W M, Xu B L, Lei Y, et al, 2024. Analysis of precipitation echoes from Ka-band millimeter wave cloud radar on the southeast margin of the Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 50(3):291-302(in Chinese).
- 吴亚昊, 刘黎平, 周筠琚, 等, 2016. 雨滴谱的变化对降水估测的影响研究[J]. 高原气象, 35(1):220-230. Wu Y H, Liu L P, Zhou Y J, et al, 2016. Study of raindrop influence of spectrum change on precipitation estimation[J]. Plateau Meteor, 35(1):220-230(in Chinese).
- 曾正茂, 郑佳锋, 吕巧谊, 等, 2022. 毫米波云雷达距离旁瓣回波质量控制及效果评估[J]. 气象, 48(6):760-772. Zeng Z M, Zheng J F, Lyu Q Y, et al, 2022. Quality control and effect evaluation of range sidelobe echo of millimeter wave cloud radar[J]. Meteor Mon, 48(6):760-772(in Chinese).
- 张静怡, 王改利, 郑佳锋, 等, 2022. 青藏高原东南部墨脱地区弱降水微物理特征的Ka波段云雷达观测研究[J]. 大气科学, 46(5):1239-1252. Zhang J Y, Wang G L, Zheng J F, et al, 2022. Study of the microphysical characteristics of weak precipitation in Mêdog, southeastern Tibetan Plateau using Ka-band cloud radar[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5):1239-1252(in Chinese).
- 郑佳锋, 刘黎平, 曾正茂, 等, 2016. 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, 35(6):748-757. Zheng J F, Liu L P, Zeng Z M, et al, 2016. Ka-band millimeter wave cloud radar data quality control[J]. J Infrared Millim Wav, 35(6):748-757(in Chinese).
- Ding H, Li H R, Liu L P, 2022. Improved spectral processing for a multi-mode pulse compression Ka-Ku-band cloud radar system[J]. Atmos Meas Tech, 15(20):6181-6200.
- Hildebrand P H, Sekhon R S, 1974. Objective determination of the noise level in Doppler spectra[J]. J Appl Meteor, 13(7):808-811.
- Hu X Y, Ge J M, Du J J, et al, 2021. A robust low-level cloud and clutter discrimination method for ground-based millimeter-wavelength cloud radar[J]. Atmos Meas Tech, 14(2):1743-1759.
- Kalapureddy M C R, Sukanya P, Das S K, et al, 2018. A simple biota removal algorithm for 35 GHz cloud radar measurements[J]. Atmos Meas Tech, 11(3):1417-1436.
- Kollias P, Albrecht B A, 2000. The turbulence structure in a continental stratocumulus cloud from millimeter-wavelength radar observations[J]. J Atmos Sci, 57(57):2417-2434.
- Kollias P, Albrecht B A, Marks Jr F, 2002. Why Mie?: Accurate observations of vertical air velocities and raindrops using a cloud radar[J]. Bull Amer Meteor Soc, 83(10):1471-1484.
- Li H R, Korolev A, Moisseev D, 2021. Supercooled liquid water and secondary ice production in Kelvin-Helmholtz instability as revealed by radar Doppler spectra observations[J]. Atmos Chem Phys, 21(17):13593-13608.
- Liu L P, Zheng J F, 2019. Algorithms for Doppler spectral density data quality control and merging for the Ka-band solid-state transmitter cloud radar[J]. Remote Sens, 11(2). <https://doi.org/10.3390/rs11020209>.
- Liu X C, He B S, Zhao S J, et al, 2019. Comparative measurement of rainfall with a precipitation micro-physical characteristics sensor, a 2D video disdrometer, an OTT PARSIVEL disdrometer, and a rain gauge[J]. Atmos Res, 229:100-114.
- Martner B E, Moran K P, 2001. Using cloud radar polarization measurements to evaluate stratus cloud and insect echoes[J]. J Geophys Res: Atmos, 106(D5):4891-4897.
- Petitdidier M, Sy A, Garrouste A, et al, 1997. Statistical characteristics of the noise power spectral density in UHF and VHF wind profilers[J]. Radio Sci, 32(3):1229-1247.
- Shupe M D, Kollias P, Poellot M, et al, 2008. On deriving vertical air motions from cloud radar Doppler spectra[J]. J Atmos Ocean Tech, 25(4):547-557.
- Williams C R, Maahn M, Hardin J C, et al, 2018. Clutter mitigation, multiple peaks, and high-order spectral moments in 35 GHz vertically pointing radar velocity spectra[J]. Atmos Meas Tech, 11(9):4963-4980.
- Williams C R, Johnson K L, Giangrande S E, et al, 2021. Identifying insects, clouds, and precipitation using vertically pointing polarimetric radar Doppler velocity spectra[J]. Atmos Meas Tech, 14(6):4425-4444.
- Zheng J F, Liu L P, Zhu K Y, et al, 2017. A method for retrieving vertical air velocities in convective clouds over the Tibetan Plateau from TIPEX-III cloud radar Doppler spectra[J]. Remote Sens, 9(9):964.
- Zhu Z E, Kollias P, Yang F, et al, 2021. On the estimation of in-cloud vertical air motion using radar Doppler spectra[J]. Geophys Res Lett, 48(1):e2020GL090682.

(本文责编:何晓欢)