

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).

毫米波云雷达距离旁瓣回波质量控制及效果评估^{*}

曾正茂^{1,2,3} 郑佳锋⁴ 吕巧谊² 杨 晖¹ 蔡艺友⁵

1 福建省气象信息中心,福州 350001

2 厦门市气象局海峡气象开放实验室,厦门 362012

3 福建省灾害天气重点实验室,福州 350001

4 成都信息工程大学大气科学学院,高原大气与环境四川省重点实验室,成都 610225

5 平和县气象局,福建漳州 363700

提 要: 根据福建省平和县布点的毫米波云雷达实际性能特点,且针对业务运行出现的距离旁瓣回波问题,提出了改进的质量控制方法;并利用福建平和站 2018 年 9 月至 2020 年 8 月的观测资料,定量评估质量控制效果对云-降水探测的具体影响。结果表明:提出的质量控制方法能较好改善雷达探测结果,距离旁瓣回波被有效滤除。距离旁瓣回波显著影响雷达对空中云雨回波的探测,影响最大集中在两个宽脉冲模式的盲区以上起始高度附近,即 1.50~2.28 km 和 3.63~7.74 km,且距离旁瓣回波出现频次随高度上升而逐渐下降;距离旁瓣回波主要会干扰雷达对中空弱云的探测,会导致云底被低估、云顶和云厚被高估,三个云参数的平均误差分别可达-0.53、0.74 和 0.73 km。

关键词: 毫米波云雷达,距离旁瓣回波,质量控制,评估

中图分类号: P415.2

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032103

Quality Control and Effect Evaluation of Range Sidelobe Echo of Millimeter Wave Cloud Radar

ZENG Zhengmao^{1,2,3} ZHENG Jiafeng⁴ LYU Qiaoyi² YANG Hui¹ CAI Yiyu⁵

1 Fujian Meteorological Information Center, Fuzhou 350001

2 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 362012

3 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001

4 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

5 Pinghe Weather Station, Zhangzhou of Fujian 363700

Abstract: According to the actual performance characteristics of the millimeter wave cloud measuring radar in Pinghe Area of Fujian Province, and in response to the problem of range sidelobe artifacts in operation, an improved data quality control method is proposed. Using the observation data in Pinghe of Fujian Province from September 2018 to August 2020, the quality of the radar is quantitatively evaluated to study the actual impact of data quality control on cloud-precipitation detection. The results show that the proposed method can well improve the radar detection measurements, and the range sidelobe artifacts can be effectively

^{*} 福建省气象局开放式科研基金项目(2020KX05)、国家重点研发计划(2018YFC15057027)、成都信息工程大学人才引进项目(KYTZ201728)共同资助

2021 年 3 月 22 日收稿; 2022 年 4 月 28 日收修定稿

第一作者:曾正茂,主要从事雷达资料处理及应用方面研究. E-mail: zzhengmao6@163.com

通讯作者:郑佳锋,主要从事雷达气象学和云微物理机理研究. E-mail: zjf1988@cuit.edu.cn

filtered. The range sidelobe also significantly affect the radar's detection of airborne cloud and rain echoes. The impact is most concentrated near the starting height above the blind zone of the two wide pulse modes, namely 1.50–2.28 km and 3.63–7.74 km, and the frequency of range sidelobe artifact decreases as altitude increases. The range sidelobe artifact mainly interferes with radar detection of low and medium level weak clouds, thus leading to underestimation of cloud base and overestimation of cloud top and cloud thickness. The average errors of three cloud parameters can reach -0.53 , 0.74 and 0.73 km respectively.

Key words: millimeter wave cloud radar, range sidelobe echoe, quality control, evaluation

引言

云对大气辐射传输和能量平衡过程有重要影响,且是形成降水的前提,云的准确和精细化探测有利于天气的监测和预报,也有助于提高云-降水物理过程研究,并能帮助人工影响天气作业的开展(刘黎平等,2014;黄兴友等,2013;雷恒池等,2008;孙丽等,2019;程周杰等,2009)。

尽管目前已发展了多种观测设备对云进行探测,如卫星、激光雷达和云高仪等,但它们的时空分辨率仍然有限,相较而言,毫米波云雷达是一种更有效的定点测云设备(郑佳锋等,2016;朱怡杰等,2019;张佃国等,2020;刘黎平等,2021)。毫米波云雷达具有波长短、灵敏度高和时空分辨率高等优点,能够提供十分丰富的云回波信息和宏微观物理参数,已被广泛应用于许多科学观测试验和气象业务(葛俊祥等,2018;刘黎平等,2015;王洪等,2020;吴举秀等,2018;Görsdorf et al, 2015;丁虹鑫等,2018)。

目前,大多数毫米波云雷达都采用垂直指向的探测方式,以连续探测顶空各类非降水云和弱降水云的垂直廓线(黄兴友等,2020;陶法等,2020;仲凌志等,2009;Lhermitte, 1987;Kropfli and Kelly, 1996)。为了保持雷达运行稳定持久,国外大多采用高寿命的电子真空管(Pasqualucci et al, 1983;Paulsen et al, 1970),而国内主要采用稳定性较好的固态发射器件。固态发射机的优势是系统稳定性好、持续观测时间长,缺点是功率小、探测距离和灵敏度有限(仲凌志,2009;宗蓉,2013;郑佳锋,2016)。为了提高固态体制云雷达的探测能力,通常设计多种不同探测模式,通过多种模式组合的方式在一定程度上提高雷达系统的综合观测能力(Liu et al, 2019)。但对于每个模式而言,雷达灵敏度、探测范围和多普勒速度范围等核心指标无法同时达到最优

选择,如相干积累和脉冲压缩技术虽能有效提高灵敏度,但会使雷达多普勒速度探测范围缩小和盲区扩大(郑佳锋等,2016)。更重要的是,脉冲压缩技术还带来了“副作用”,即引起距离旁瓣回波。这种距离旁瓣不是天线波束旁瓣引起的回波,而是强云雨目标回波信号在脉冲压缩后,无法被加窗滤波等方法消除的旁瓣信号,这些旁瓣信号会叠加至邻近高度其他距离库,而形成的一种虚假气象回波(Moran et al, 1998;马书迪,2019)。距离旁瓣信号严重时污染正常的云雨回波。目前,通过改善脉冲压缩后的信号处理技术是一种消除距离旁瓣信号的途径。如Gray and Farley(1973)采用部分相关法来消除距离旁瓣,但因使用不同码长的伪随机码导致消除旁瓣的效果较差。Kobayashi(1982)使用修正后的伪随机码,提高了旁瓣回波消除成功率,但同时附带产生多余的信号。文必洋等(1998)利用伪随机码调相技术把距离旁瓣当作系统性干扰,通过扣除这种系统性干扰,达到消除旁瓣回波的目的。从实用性方面,一般通过比较不同距离库的信号或回波强弱对距离旁瓣进行判断。如Moran et al(1998)以30 dB为判断阈值,通过检测旁瓣影响范围内是否有回波信号差异超过该阈值进而做出判断。Clothiaux et al(2000)利用功率谱数据,采用不同观测模式的融合算法进行距离旁瓣回波的滤除。Liu et al(2019)从雷达功率谱密度资料出发,通过雷达实际参数设定判断范围和阈值进行旁瓣滤除。

尽管上述方法对距离旁瓣回波滤除有一定效果,但由于不同毫米波云雷达在性能上的实际差异,实际应用中仍需调整相关阈值等重要参数;另外,在过去研究中也很少开展距离旁瓣回波对雷达探测云参数影响的统计和评估。为了提高对云的自动化观测能力,福建省建设了3部毫米波云雷达,本文针对该雷达的实际性能,提出了改进的距离旁瓣回波质量控制方法;并利用福建平和站雷达2018年9月至2020年8月两年的观测资料,定量评估了距离旁瓣

回波对空中云雨回波、云底高度、云顶高度和云厚度探测的影响。旨在为毫米波云雷达数据质量控制和云自动化观测提供参考。

1 设备与资料介绍

本文使用的毫米波云雷达是一部 Ka 波段、多普勒、固态体制雷达,由中国航空科工集团第 23 研究所研制。雷达垂直指向工作,频率为 35 GHz(对应波长为 8.57 mm),波束宽度为 0.4° ,探测高度范围为 0.12~20 km,空间和时间分辨率分别为 30 m 和 1 min,观测资料包括雷达反射率因子(Z)、径向速度(V)、谱宽(σ_V)、线性退偏振比(LDR)和功率谱(SP)等。为提高雷达对不同高度、不同强弱云层的综合探测能力,雷达设计了四种探测模式,包括边界

层模式(M_L)、降水模式(M_P)、中云模式(M_M)和高云模式(M_H)。四种模式采用不同的脉冲宽度、相干积累、非相干积累和脉冲压缩等技术。 M_L 通过相干积累来提高灵敏度,主要针对低空弱云的探测; M_P 则不采用相关积累,从而保持最大的速度测量范围和抗饱和能力,因此较适合于弱降水的探测。 M_H 采用远宽于其他模式的脉冲,可以获得比 M_P 高 20.79 dB 的灵敏度,适用于高空卷云等的探测; M_M 则介于窄脉冲模式和 M_H 之间,适用于中云的探测。此外, M_L 和 M_P 还具有更短的雷达盲区,而 M_M 和 M_H 盲区较大。雷达工作时,四个模式轮流运行,最终四个模式的探测结果被进一步融合形成融合数据(Liu et al, 2019)。雷达四种探测模式的主要参数如表 1 所示。

表 1 雷达四种探测模式主要参数

Table 1 Major parameters of four radar detection modes

参数名称	边界层模式(M_L)	中云模式(M_M)	高云模式(M_H)	降水模式(M_P)
脉冲宽度/ μs	0.2	8	24	0.2
脉冲重复频率/Hz	16 666	8 333	5 988	5 988
相干积累数	4	2	1	1
非相干积累数	16	32	32	32
FFT 点数	256	256	256	256
距离分辨率/m	30	30	30	30
有效探测高度/km	0.12~7.5	1.47~7.5	3.74~20	0.12~20
最大不模糊速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.93	8.93	12.83	12.83
速度分辨率/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	6.98	6.98	10.02	10.02

本文评估时采用 2018 年 9 月至 2020 年 8 月福建平和站毫米波云雷达 24 h 连续观测所获得的融合数据(每 1 小时的探测结果视为 1 个样本),样本总量为 16 808 个。

2 方法

2.1 距离旁瓣回波特征和形态特征

毫米波云雷达垂直探测时,若某个高度有很强的云雨信号,其脉冲压缩后的旁瓣信号会叠加到上下一定范围的距离库内,使得原来没有回波的库出现回波(或叠加),即出现距离旁瓣回波。距离旁瓣回波的强弱和体量与附近强回波的强度、面积以及雷达脉冲压缩比(PCR)有关。当存在大面积的强云雨回波时,形成的旁瓣回波也将越显著;而 PCR 越

大,旁瓣回波出现的范围也会越大。

普查实际观测资料中距离旁瓣回波的雷达回波特征和形态特征,发现有两类。如图 1 为 2019 年 5 月 28 日 21:00—22:00(北京时,下同)多层云条件下雷达四种模式探测的反射率因子回波及融合结果。从图 1e 可见,强回波附近在 1.47 km 和 3.74 km 左右出现一种特殊外观——“底部截面式”的弱回波(如箭头所示),这种弱回波即是因雷达采用脉冲压缩技术所引起的距离旁瓣,然而因设备厂家将盲区以下的区域设置为无效回波,因此最终出现底部为截面的特殊形态。另外一种距离旁瓣,则底部没有特殊形态,本文称为“普通式”旁瓣回波,如图 3a 中的 A。对于本文雷达的 M_M 和 M_H 模式,它们的 PCR 分别为 40 和 125,对应旁瓣影响的高度范围分别为 1.20 km 和 3.60 km,对应探测盲区分别为 1.47 km 和 3.74 km;而 M_L 和 M_P 盲区仅为

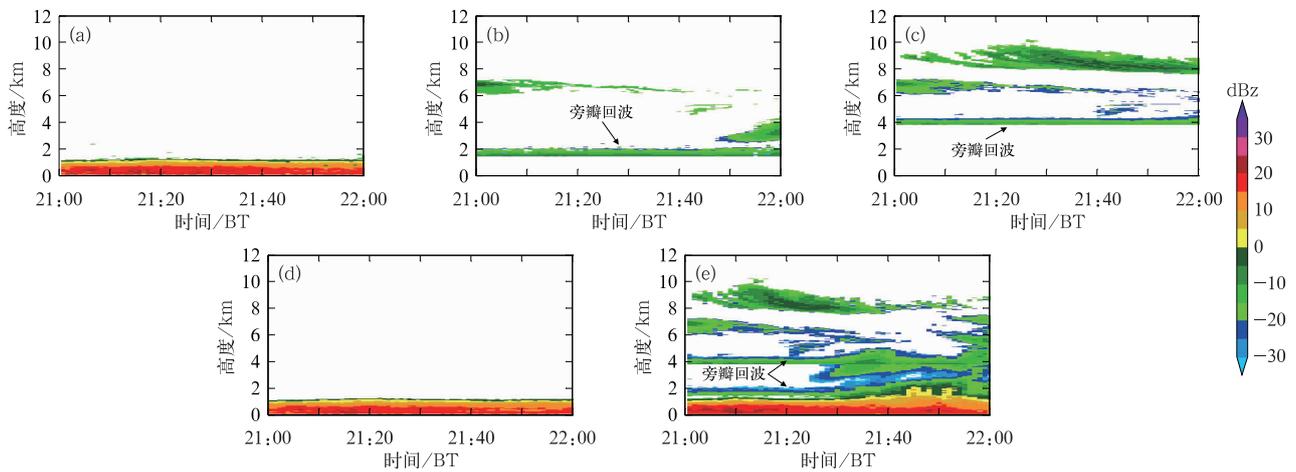


图 1 2019 年 5 月 28 日 21:00—22:00 福建平和多层云条件下雷达(a~d)四种模式探测及(e)融合结果的反射率因子回波
(a) M_L , (b) M_M , (c) M_H , (d) M_P

Fig. 1 Echo intensity graph of reflectivity factor by (a—d) four detection modes and (e) fusion products of radar under multi-cloud condition in Pinghe of Fujian Province from 21:00 BT to 22:00 BT 28 May 2019
(a) M_L , (b) M_M , (c) M_H , (d) M_P

0.12 km。从图 1b 和 1c 可见,由于采用脉冲压缩, M_M 和 M_H 模式分别在 1.47 km 和 3.74 km 左右发现“底部截面式”的距离旁瓣回波,而未采用脉冲压缩的 M_L 和 M_P 模式均未出现。

2.2 验证距离旁瓣回波的真实性

研究表明,雷达的脉冲宽度与主副瓣比是息息相关的,脉冲宽度增加,其相应的主副瓣比也提高,而雷达主副瓣比的值是衡量抑制副瓣效果好坏的重要指标(董彦达,2009;郑岩,2011;李红霞,2018)。因此为了更好地验证距离旁瓣回波的真实性,利用仿真的方式分析福建平和毫米波云雷达 M_M 和 M_H

模式不同脉冲宽度的主副瓣分布。如图 2 所示,采用 $8 \mu s$ 和 $24 \mu s$ 的脉冲宽度,其雷达的主副瓣比分布为 -32.31 dB 和 -41.67 dB ,表明随着脉冲宽度的增加,雷达的主副瓣比也相应的提高。根据丁留贯(2007),在雷达整体设计时,为了更好地抑制距离旁瓣,理论上雷达的主副瓣比需达到 45 dB 以上,才能将副瓣减少到最小,但实际往往是做不到的。一方面是由于雷达实际带宽是有限的,信号能量会从主瓣泄露出来,另一方面是受雷达本身的实际性能所限。因此本文在 M_M 和 M_H 模式中所使用的脉冲宽度是会引起距离旁瓣的。

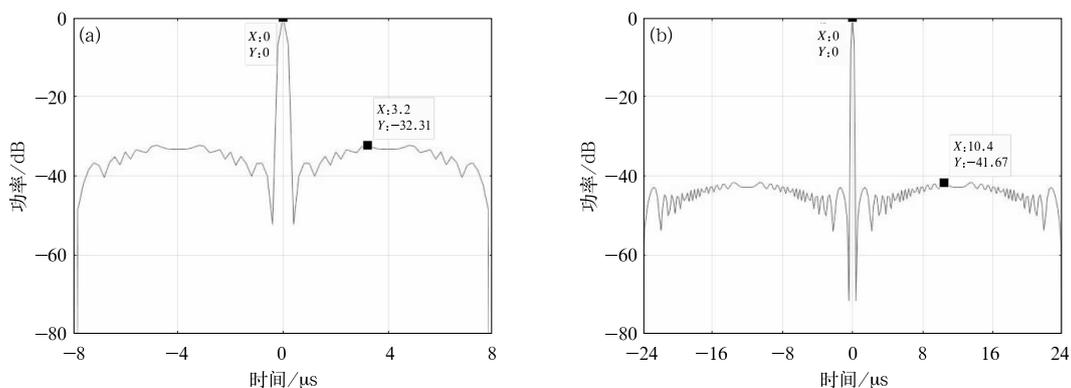


图 2 福建平和毫米波云雷达(a) M_M 和 (b) M_H 模式的主副瓣分布结果
Fig. 2 Distribution results of main and side lobes of (a) M_M and (b) M_H modes of millimeter wave cloud radar in Pinghe of Fujian Province

2.3 质量控制方法

以往研究主要从雷达的信号处理角度对脉冲压缩附带的旁瓣信号进行抑制,本文从雷达的基数据出发,根据毫米波雷达实际性能参数,并结合上述距离旁瓣的回波特征和形态特征,提出了改进的质量控制方法。详细描述如下:

以雷达融合数据作为质量控制数据对象。首先,根据“底部截面式”距离旁瓣回波的形态特征,检测 M_M 和 M_H 模式第一个有效距离库是否有前后时次连续 7 个以上的径向有效回波,且其下方是否都为无效回波;若两个条件都满足,则认为其上部存在“底部截面式”的旁瓣回波,从旁瓣底部一直将回波删除至顶部。其次,借鉴 Moran et al(1998)和 Liu et al(2019)的阈值法,对两个模式的“普通式”旁瓣回波进一步识别,如式(1)所示:

$$\begin{aligned} Z(i, x) &> Z(i, j) + T, \\ j - PCR &< x < j + PCR \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $Z(i, j)$ 为当前第 i 个径向第 j 距离库的反射率因子, $Z(i, x)$ 为前后第 i 个径向第 x 距离库的反射率因子。若检测到旁瓣影响范围上下 PCR 个距离库内存在高出阈值 T 的回波,则认为当前回波受距离旁瓣回波污染,则将其删除。关于 T 的取值,本文通过多次试验,将阈值 T 设置为 30 dB。图 3

为 2019 年 5 月 19 日 20:00 至 20 日 04:00 福建平和雷达上空观测的低空层云、积云和高空卷积云质量控制前后回波强度对比。图 3b,3c 和 3d 分别为把 T 阈值设置成 25、30 和 35 dB 的结果。对比可见,当 T 为 25 dB 有所偏高,云底和云顶的弱回波被过度滤除(A 和 B 箭头所指);而 T 为 30 dB 时,结果较合适,质量控制后云底和碎云都保留完好,且旁瓣回波也被滤除较好;当 T 增大为 35 dB 时,云底相连的旁瓣回波大部分未能被滤除。因此本文将阈值 T 设置为 30 dB 较为合理。

2.4 质量控制方法有效性验证

因福建平和站的毫米波云雷达在同址未布设相关的对比设备,因此,为了验证质量控制方法,利用广东阳江布设的 Ka 波段毫米波云雷达和一部同址观测的 C 波段连续波雷达进行对比分析。需要说明的是,该毫米波云雷达同由中国航空科工集团第 23 研究所研制,在体制和性能特点上相似;C 波段连续波雷达也采用垂直指向的观测方式,且不受距离旁瓣的影响;此外,C 波段连续波雷达实际在 2.04 km 以下的灵敏度比毫米波云雷达高 7 dB,2.04 km 以上则低 8 dB,因此也具备测云能力。以下给出 2 个不同典型云类个个例对毫米波云雷达质量控制方法的有效性进行验证。

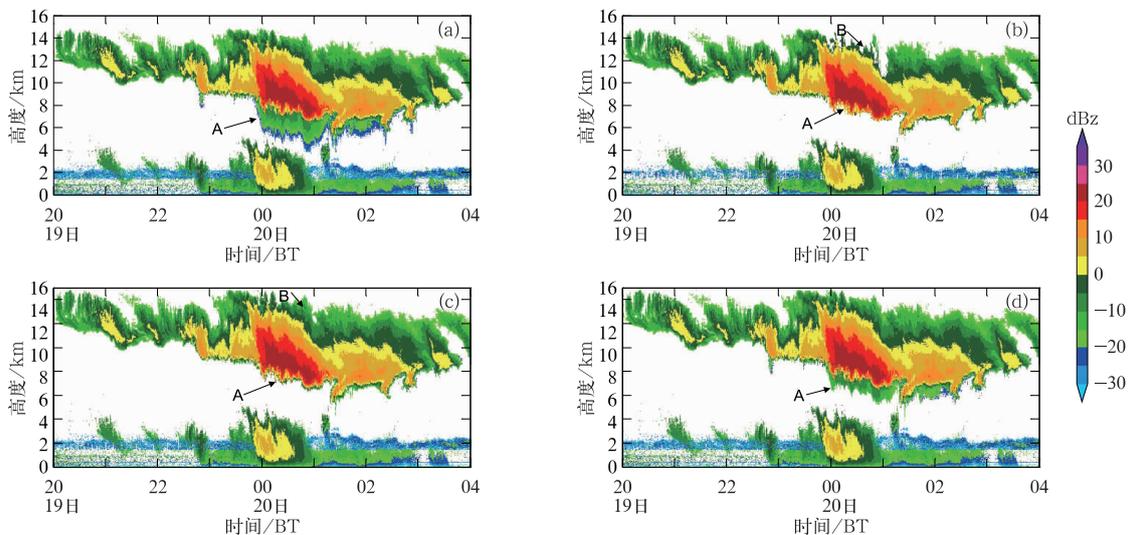


图 3 2019 年 5 月 19 日 20:00 至 20 日 04:00 福建平和雷达上空观测的低空层云、积云和高空卷积云质量控制前后回波强度对比

(a)质量控制前,(b)质量控制后 $T=25$ dB,(c)质量控制后 $T=30$ dB,(d)质量控制后 $T=35$ dB

Fig. 3 Echo intensity comparison before and after radar quality control of low altitude stratus clouds, cumulus and high altitude cirrocumulus observed in Pinghe of Fujian Province from 20:00 BT 19 to 04:00 BT 20 May 2019
(a) before quality control, (b, c, d) after quality control in $T=25$ dB, (c) $T=30$ dB, (d) $T=35$ dB

个例 1 (积云):图 4 为 2014 年 6 月 6 日 03:00—06:00 广东阳江 Ka 波段毫米波云雷达和同址 C 波段连续波雷达探测的反射率因子回波对比。C 波段连续波雷达对晴空湍流有更强的探测能力(阮征等, 2015),因此在低空存在湍流回波(图 4a 中箭头 A 所示)。由图 4b 可见,毫米波云雷达图像中,积云顶出现显著的旁瓣回波,在 2.04~3.2 km 存在“底部截面式”的旁瓣回波 A;积云顶还有厚度在 2 km 左右的“普通式”旁瓣回波 B,它们的形成主要由下方强回波信号导致。而从图 4c 可见,经过本文质量控制方法处理后,该个例两类距离旁瓣回波都被较有效滤除;质量控制后积云的云顶和整体形态显然与 C 波段连续波雷达探测结果更为吻合。

个例 2 (浓积云):图 5 为 2014 年 6 月 6 日 03:50—04:40 广东阳江 Ka 波段毫米波云雷达和同址 C 波段连续波雷达探测的反射率因子回波对比。由图可

见,该浓积云回波较强,最强可接近 25 dBz,C 波段连续波雷达探测到的云顶高度和毫米波云雷达基本一致,但云底却存在差异;毫米波云雷达云底部分下伸的回波与上部强回波形态十分一致,因此可判断毫米波雷达测量的浓积云底部存在厚度约为 1 km 的“普通式”旁瓣回波 A。经过本文质量控制方法处理后,浓积云的云底及回波结构与 C 波段连续波观测结果更为吻合。

3 福建平和典型云类的质量控制效果分析

为进一步分析本文方法的普适性,挑选福建平和三个不同典型云类个例,对距离旁瓣回波的质量控制效果进行详细分析。

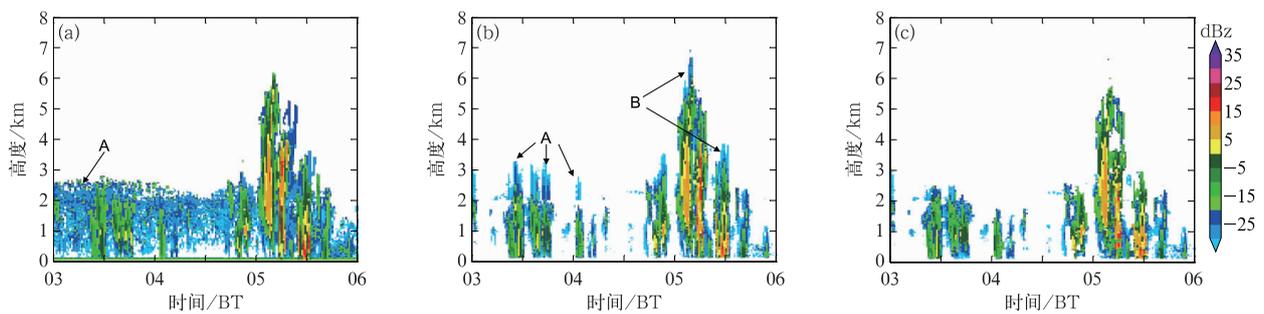


图 4 2014 年 6 月 6 日 03:00—06:00 广东阳江毫米波云雷达和同址一部 C 波段连续波雷达探测的反射率因子回波对比

(a)C 波段连续波雷达,(b)毫米波云雷达,(c)质量控制后的毫米波云雷达

Fig. 4 Comparison of reflectivity factor echoes detected by millimeter wave cloud radar and C-band continuous wave radar in Yangjiang of Guangdong Province from 03:00 BT to 06:00 BT 6 June 2014

(a) C-band continuous wave radar, (b) millimeter wave cloud radar,

(c) millimeter wave cloud radar image after quality control

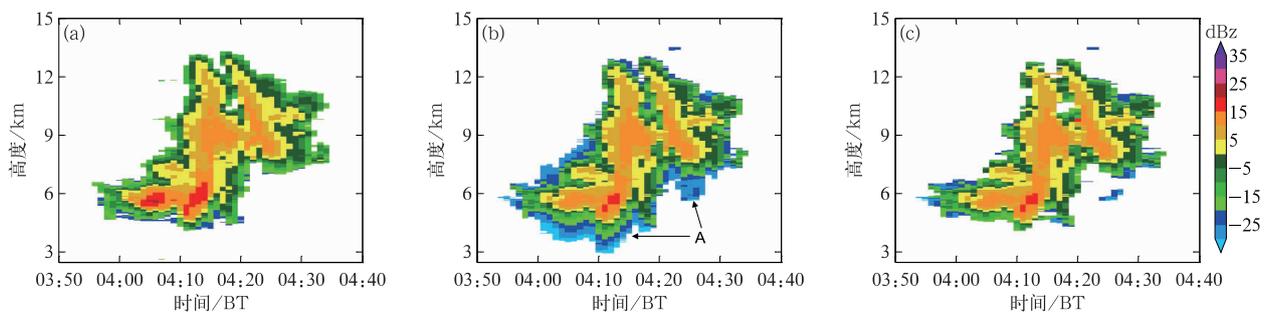


图 5 同图 4,但为 2014 年 6 月 6 日 03:50—04:40

Fig. 5 Same as Fig. 4, but from 03:50 BT to 04:40 BT 6 June 2014

3.1 弱对流性降水云个例

图 6 为 2019 年 5 月 29 日 02:00—04:00 福建平和雷达上空观测到的弱对流性降水云质量控制前后效果对比。由图 5a₁, 5b₁, 5c₁ 可见, 弱对流云在 3.87~7.2 km 存在“底部截面式”的距离旁瓣回波 A, 顶部则存在厚度约为 3 km 的“普通式”距离旁瓣回波 B, 这些旁瓣回波均出现在 Z、V 和 σ_v 的图像中。同时, 观察到弱对流降水云顶部的距离旁瓣还表现出较大的 σ_v , 这是因叠加了其下方 3.75 km 范围内的强回波旁瓣信号, 使得整体的信号谱较宽且分散。如图 6a₂, 6b₂, 6c₂ 所示, 经过质量控制后两类距离旁瓣回波均被有效滤除。

3.2 弱层状降水云个例

图 7 为 2019 年 4 月 11 日 00:00—02:00 福建平和雷达上空观测到的低空弱层状降水云质量控制

前后效果对比。由图 7a₁, 7b₁, 7c₁ 可见, 质量控制前层状云上空 1.47~2 km 存在“底部截面式”的距离旁瓣回波 A, 旁瓣回波均在 Z、V 和 σ_v 中出现。而图 7a₂, 7b₂, 7c₂ 表明, 经过质量控制后距离旁瓣回波在 Z、V 和 σ_v 回波中均被有效滤除。

3.3 高空卷积云个例

图 8 为 2019 年 5 月 20 日 00:00—02:00 福建平和雷达上空观测到的高空卷积云质量控制前后效果对比。由图 8a₁, 8b₁, 8c₁ 可见, 在高度约 6~14 km 的卷积云回波中, 观测到强回波底部存在厚度约为 2.5 km 的“普通式”旁瓣回波 A, 旁瓣回波同样在 Z、V 和 σ_v 的图像中都出现。且从图 8c₁ 发现卷积云底部的谱宽值较大, 主要也是因旁瓣信号的叠加造成。从图 8a₂, 8b₂, 8c₂ 的质量控制效果来看, 卷积云底部的距离旁瓣回波被有效滤除。

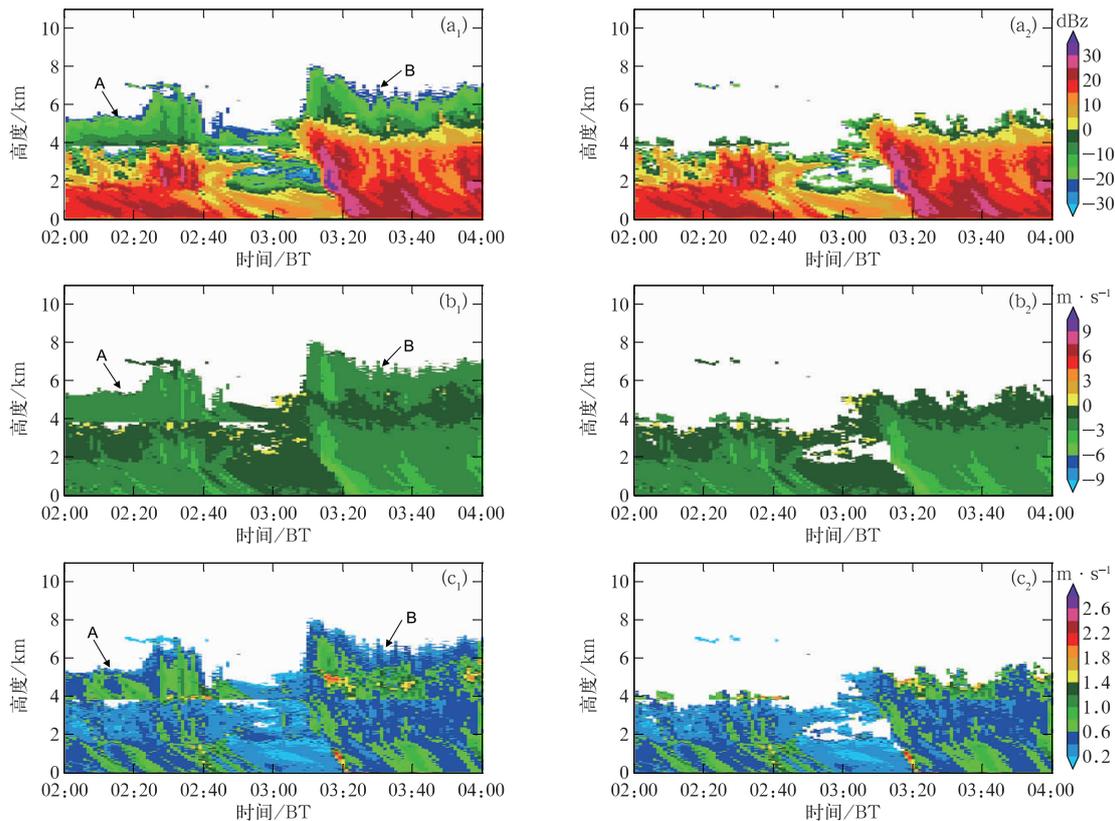


图 6 2019 年 5 月 29 日 02:00—04:00 福建平和雷达上空观测到的弱对流性降水云

(a₁, b₁, c₁) 质量控制前和 (a₂, b₂, c₂) 质量控制后效果对比

(a₁, a₂) Z, (b₁, b₂) V, (c₁, c₂) σ_v

Fig. 6 Comparison of effects (a₁, b₁, c₁) before and (a₂, b₂, c₂) after radar quality control of weak convective precipitation cloud observed in Pinghe of Fujian Province from 02:00 BT to 04:00 BT 29 May 2019

(a₁, a₂) Z, (b₁, b₂) V, (c₁, c₂) σ_v

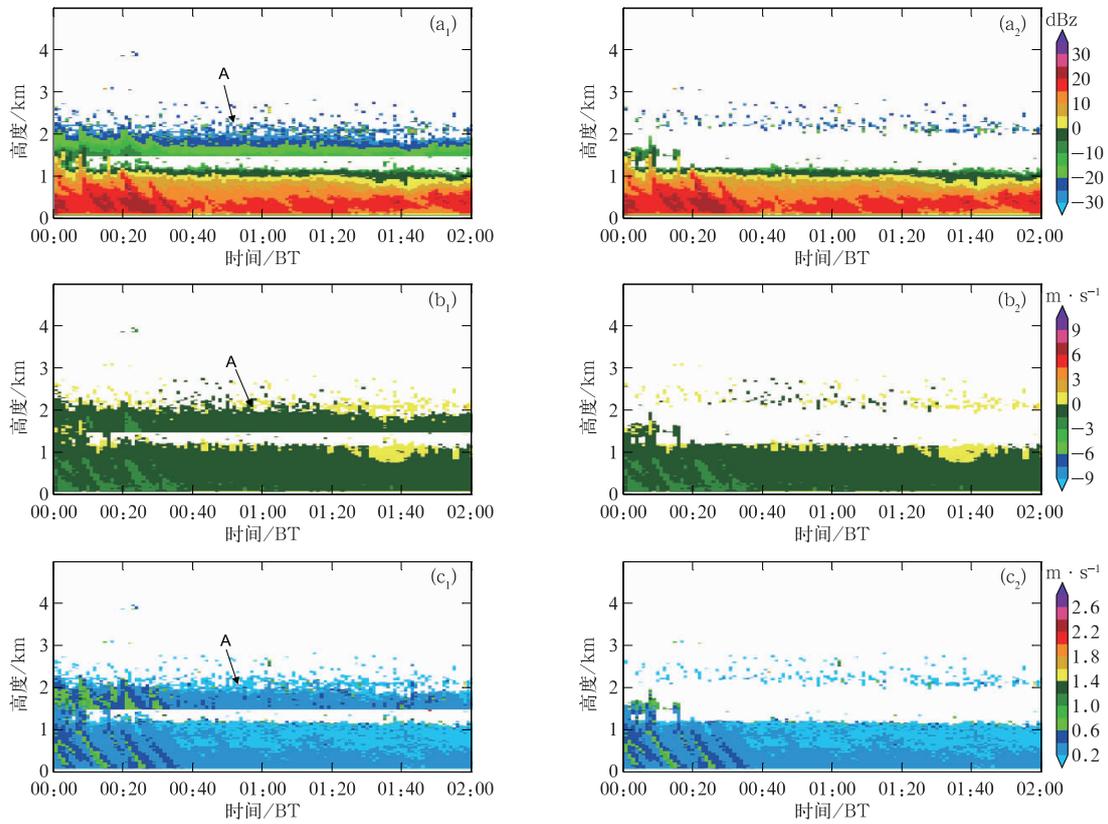


图 7 同图 6, 但为 2019 年 4 月 11 日 00:00—02:00 的弱层状降水云

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for weak stratiform precipitation cloud from 00:00 BT to 02:00 BT 11 April 2019

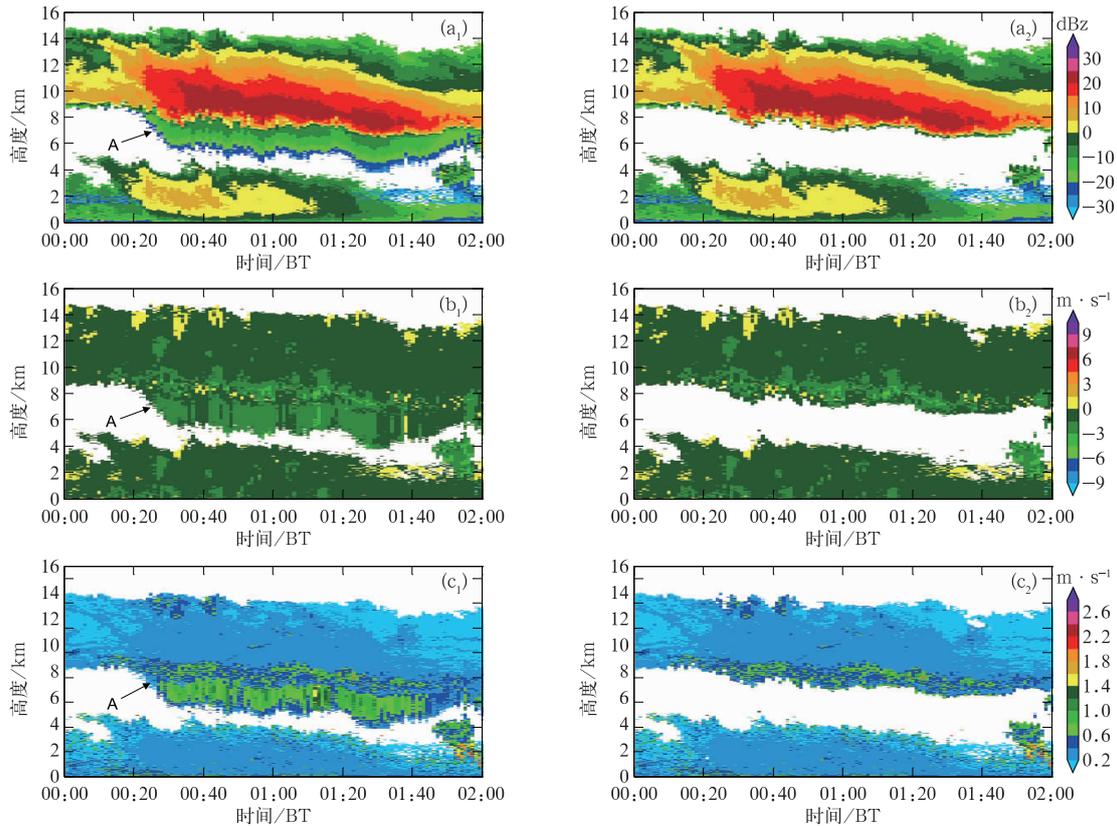


图 8 同图 6, 但为 2019 年 5 月 20 日 00:00—02:00 的高空卷积云

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for high altitude cirrocumulus from 00:00 BT to 02:00 BT 20 May 2019

以上三个不同典型云类的个例分析说明本文的距离旁瓣回波质量控制方法对雷达资料有明显改善,同时普适性也较好。

4 距离旁瓣回波对云探测影响的评估

利用本文方法对 2018 年 9 月至 2020 年 8 月福建平和站两年的雷达观测资料进行质量控制,并将质量控制前后的结果进行统计对比,进而评估距离旁瓣回波对空中云雨回波、云底高度、云顶高度和云厚度探测的具体影响。

4.1 距离旁瓣回波对空中云雨回波的影响

距离旁瓣回波会污染正常的云雨回波,一种是它们会叠加到正常的云雨回波信号上,从而引起测量误差;另一种是出现在正常云层的底部和顶部,导致回波体量增多且显著影响云的宏观参数,如云底高度、云顶高度和云厚度等。对于第一种,试图将旁瓣信号从正常云雨信号中分离是十分困难的,因此本文主要讨论第二种情况对云雨探测的影响。

统计观测期间雷达回波频次在滤除旁瓣回波前后的高度变化,结果如图 9 所示。质量控制前后雷达回波频次的差异可反映出旁瓣对云雨回波体量的影响,旁瓣回波占总回波频次 10% 以上的影响高度分布在 1.5~2.28 km 和 3.63~7.74 km,这两个高度区间正好靠近 M_M 和 M_H 两个宽脉冲模式的盲区以上起始高度,且随着高度增高旁瓣回波的比例逐渐下降。在这两个高度区间,旁瓣回波占雷达总回波频次的比例分别为 10.06%~27.12% 和 10.00%~34.75%,最大比例高度分别在 1.53 km 和 3.96 km,因此距离旁瓣回波对中低云的探测有较显著的影响。

为了进一步分析距离旁瓣对空中云雨回波空间分布的影响,统计雷达探测到的 Z 、 V 和 σ_v 的高度-频次分布(图 10)。由图 10 可见,距离旁瓣影响云雨回波空间分布明显,滤除旁瓣回波后 Z 、 V 和 σ_v 样本量整体减少,距离旁瓣的回波强度 Z 分布在 $-42 \sim 18$ dBz,占总样本量的 9.91%,在 $Z = -20$ dBz 时达到最大值(2.35×10^5),占 Z 总样本量的 3.98%;径向速度 V 分布在 $-5.3 \sim 0.48$ $m \cdot s^{-1}$,占总样本量的 9.64%,在 $V = -0.8$ $m \cdot s^{-1}$ 时达到最大值(4.66×10^5),占 V 总样本量的 8.70%;谱宽 σ_v 分布在 $0 \sim 2.0$ $m \cdot s^{-1}$,占总样本量的 10.72%,在 $\sigma_v = 0.2$ $m \cdot s^{-1}$

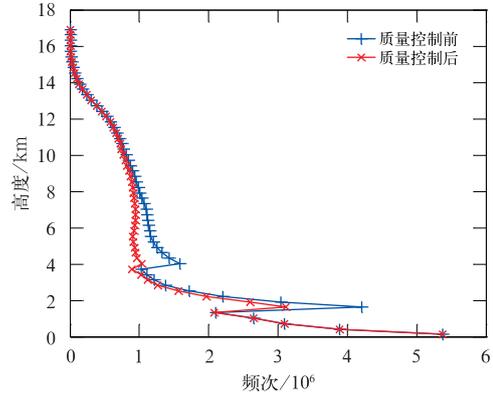


图 9 2018 年 9 月至 2020 年 8 月福建平和距离质量控制前后雷达有效回波频次随高度的变化
Fig. 9 Frequency distribution of valid radar echoes at different heights before and after quality control in Pinghe of Fujian Province from September 2018 to August 2020

时达到最大值(8.03×10^5),占 σ_v 总样本量的 14.77%。距离旁瓣的 Z 、 V 和 σ_v 分布特征说明,其主要影响对弱云的探测。

4.2 距离旁瓣回波对云底高度、云顶高度和云厚度的影响

为了进一步评估距离旁瓣对云宏观参数探测的影响,首先分别利用质量控制前后的反射率因子资料反演出云层的云底高度(CBH)、云顶高度(CTH)和云厚度(CTK),随后再对比两种反演结果的差异。CBH、CTH 和 CTK 的反演方法借鉴王喆等(2016)的云边界检测法:即根据雷达探测的反射率因子回波检测每根径向上连续回波的底部和顶部边界(以 -40 dBz 作为入云和出云判断条件),并将边界视为云底和云顶,而将两者的差视为云厚度;考虑到实际中松散云系可能带来的误判,将 $CTK < 210$ m 做进一步判断,如果该薄云与上下云层间隔小于 720 m,则认为它不是可靠的独立云层,否则将其与相邻云层合并。

质量控制前(OR)和质量控制后(QC)的 CBH、CTH 和 CTK 误差如图 11 和表 2 所示。旁瓣回波使得 CBH 被低估,CTH 和 CTK 被高估。90% 的 CBH 误差分布于 $-1.8 \sim -0.15$ km,平均误差为 -0.53 km;90% 的 CTH 和 CTK 误差均分布于 $0.15 \sim 2.7$ km,平均误差分别则为 0.74 km 和 0.73 km。误差整体说明,距离旁瓣对云宏观参数的影响是非常显著的。

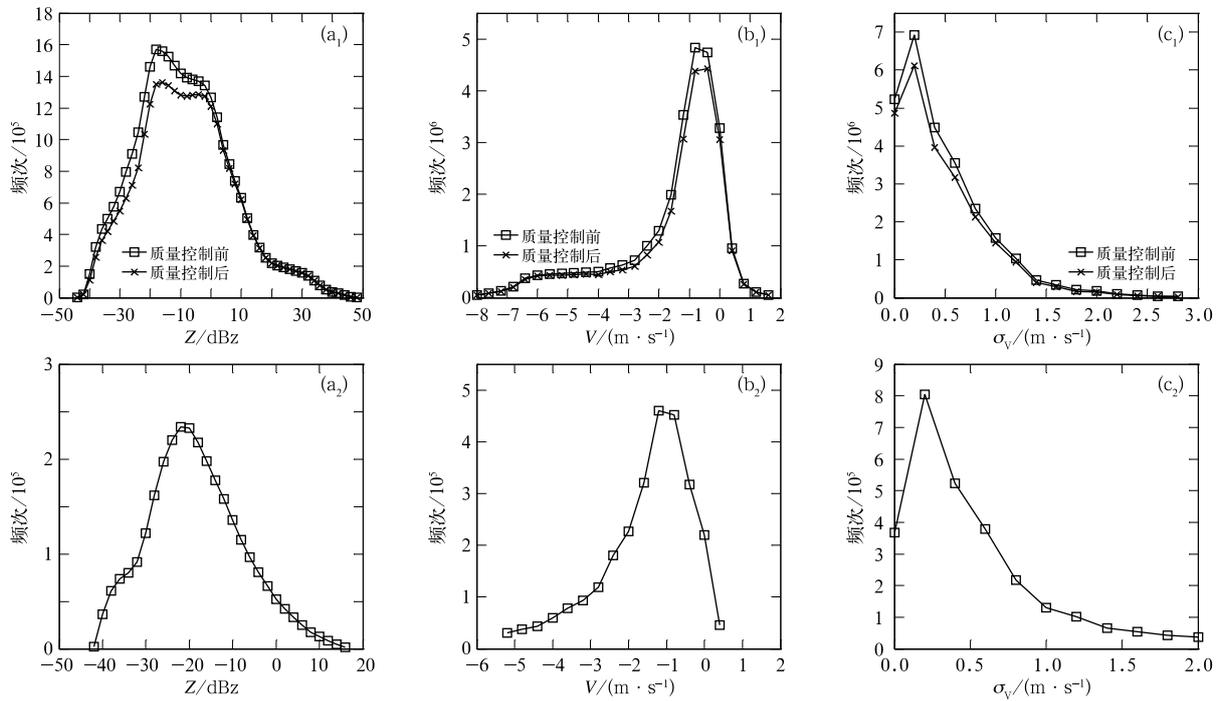


图 10 2018 年 9 月至 2020 年 8 月福建平和雷达探测到的(a₁, a₂)Z, (b₁, b₂)V 和 (c₁, c₂)σ_v 的频次-高度分布 (a₁, b₁, c₁) 质量控制前后, (a₂, b₂, c₂) 距离旁瓣

Fig. 10 Frequency-height distributions of radar measured (a₁, a₂) Z, (b₁, b₂) V and (c₁, c₂) σ_v in Pinghe of Fujian Province from September 2018 to August 2020, (a₁, b₁, c₁) before and after quality control, (a₂, b₂, c₂) Z, V and σ_v of range sidelobes

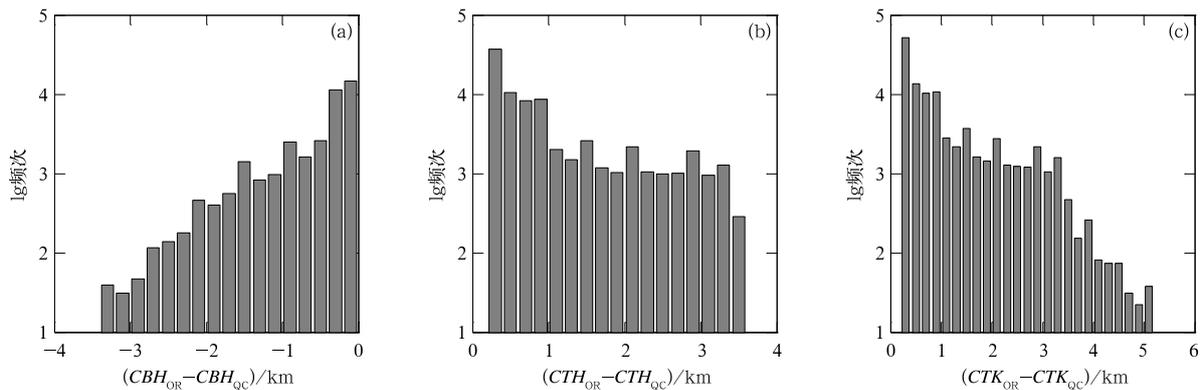


图 11 2018 年 9 月至 2020 年 8 月福建平和距离旁瓣回波引起的(a)云底高度(CBH), (b)云顶高度(CTH)和(c)云厚度(CTK)的误差分布

Fig. 11 Error distributions of (a) cloud base height (CBH), (b) cloud top height (CTH), and (c) cloud thickness (CTK) caused by radar range sidelobes in Pinghe of Fujian Province from September 2018 to August 2020

表 2 2018 年 9 月至 2020 年 8 月福建平和距离旁瓣引起的云宏观参数探测误差(单位: km)

Table 2 Detection errors of cloud macrophysical parameters caused by radar range sidelobes in Pinghe of Fujian Province from September 2018 to August 2020 (unit: km)

云宏观参数	第 5%分位	第 25%分位	中位数	平均值	第 75%分位	第 95%分位
云底高度	-1.80	-0.60	-0.30	-0.53	-0.15	-0.15
云顶高度	0.15	0.15	0.45	0.74	0.90	2.70
云厚度	0.15	0.15	0.45	0.73	0.90	2.70

5 结 论

采用福建省平和县获取的 2018 年 9 月至 2020 年 8 月连续观测的毫米波云雷达数据,针对毫米波云雷达在业务观测中出现的距离旁瓣回波质量问题,结合雷达回波特征,提出改进的质量控制方法,并详细评估它们对云探测的具体影响。主要结论如下:

(1) 针对福建平和站出现的两种不同形态(即“底部截面式”和“普通式”)的距离旁瓣回波,提出了改进的质量控制方法,该方法可以有效滤除两类距离旁瓣,且具有较好的普适性。

(2) 距离旁瓣回波会显著影响雷达对空中云雨回波的探测,但影响高度主要集中在宽脉冲模式的盲区附近,即 1.5~2.28 km 和 3.63~7.74 km 的两个高度区间,距离旁瓣回波分别可占总回波量的 10.06%~27.12% 和 10.00%~34.75%。距离旁瓣出现频次还会随高度升高而逐渐下降,因此距离旁瓣回波主要影响对中低云的探测。

(3) 距离旁瓣回波的 Z 主要分布在 $-42 \sim 18$ dBz, 占总样本量的 9.91%; V 主要分布在 $-5.3 \sim 0.48$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 占总样本量的 9.64%; σ_V 分布在 $0 \sim 2.0$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 占总样本量的 10.72%, 其主要污染对弱云的探测。

(4) 距离旁瓣回波对云底高度、云顶高度和云厚度的探测也有重要影响,它使得云底高度被低估,云顶高度和云厚度被高估。引起三种云参数探测的平均误差分别可达 -0.53 、 0.74 和 0.73 km。

参 考 文 献

程周杰,刘宪勋,朱亚平,2009. 双偏振雷达对一次水凝物相态演变过程的分析[J]. 应用气象学报,20(5):594-601. Cheng Z J, Liu X X, Zhu Y P, 2009. A process of hydrometeor phase change with dual-polarimetric radar[J]. J Appl Meteor Sci, 20(5):594-601 (in Chinese).

丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等,2018. 云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J]. 气象,44(12):1604-1611. Ding H X, Ma S Q, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12):1604-1611(in Chinese).

丁留贯,2007. 气象雷达脉冲压缩技术研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Ding L G, 2007. The research on pulse compression for

weather radars[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).

董彦达,2009. 基于 LFM 的气象雷达脉冲压缩技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学. Dong Y D, 2009. Pulse compression techniques of meteorological radar based on LFM[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(in Chinese).

葛俊祥,汪洁,王金虎,等,2018. 毫米波气象雷达发展与应用[J]. 南京航空航天大学学报,50(5):577-585. Ge J X, Wang J, Wang J H, et al, 2018. Development and application of millimeter wave weather radar[J]. J Nanjing Univ Aeronaut Astronaut, 50(5):577-585(in Chinese).

黄兴友,樊雅文,李峰,等,2013. 地基 35 GHz 测云雷达回波强度的衰减订正研究[J]. 红外与毫米波学报,32(4):325-330. Huang X Y, Fan Y W, Li F, et al, 2013. The attenuation correction for a 35 GHz ground-based cloud radar[J]. J Infrared Millim Waves, 32(4):325-330(in Chinese).

黄兴友,陆琳,洪滔,等,2020. 利用毫米波云雷达数据反演层云微物理参数和云内湍流耗散率[J]. 大气科学学报,43(5):908-916. Huang X Y, Lu L, Hong T, et al, 2020. A case study on the retrieval of microphysical parameters and in-cloud stratus turbulent dissipation rate by millimeter-wave cloud radar measurement[J]. Trans Atmos Sci, 43(5):908-916(in Chinese).

雷恒池,洪延超,赵霞,等,2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. 大气科学,32(4):967-974. Lei H C, Hong Y C, Zhao X, et al, 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4):967-974(in Chinese).

李红霞,2018. 雷达信号数字脉冲压缩技术分析及其 MATLAB 仿真[J]. 信息化研究,44(1):69-73. Li H X, 2018. Digital pulse compression technology analysis and MATLAB simulation of radar signal[J]. Inform Res, 44(1):69-73(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).

刘黎平,郑佳锋,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[J]. 气象学报,73(4):635-647. Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, et al, 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):635-647(in Chinese).

刘黎平,张扬,丁哈,2021. Ka/Ku 双波段云雷达反演空气垂直运动速度和雨滴谱方法研究及初步应用[J]. 大气科学,45(5):1099-1113. Liu L P, Zhang Y, Ding H, 2021. Vertical air motion and raindrop size distribution retrieval using a Ka/Ku dual-wavelength cloud radar and its preliminary application[J]. Chin J Atmos Sci, 45(5):1099-1113(in Chinese).

- 马书迪,2019. 雷达回波信号 MTI 与脉冲压缩研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学. Ma S D,2019. Research on radar return signal MTI and pulse compression[D]. Harbin: Harbin Engineering University(in Chinese).
- 阮征,金龙,葛润生,等,2015. C 波段调频连续波天气雷达探测系统及观测试验[J]. 气象学报,73(3):577-592. Ruan Z, Jin L, Ge R S, et al,2015. The C-band FMCW pointing weather radar system and its observation experiment[J]. Acta Meteor Sin,73(3):577-592(in Chinese).
- 孙丽,马嘉理,赵妹慧,等,2019. 基于 CloudSat 卫星观测资料的辽宁省不同天气系统影响下云系垂直结构特征[J]. 气象,45(7):958-967. Sun L, Ma J L, Zhao S H, et al,2019. Characteristics of cloud vertical structure under different synoptic systems in Liaoning Province based on CloudSat observation[J]. Meteor Mon,45(7):958-967(in Chinese).
- 陶法,官莉,张雪芬,等,2020. Ka 波段云雷达晴空回波垂直结构及变化特征[J]. 应用气象学报,31(6):719-728. Tao F, Guan L, Zhang X F, et al,2020. Variation and vertical structure of clear-air echo by Ka-band cloud radar[J]. J Appl Meteor Sci,31(6):719-728(in Chinese).
- 王洪,雷恒池,杨洁帆,等,2020. 山东不同云系降水微物理参数特征[J]. 大气科学,44(2):315-326. Wang H, Lei H C, Yang J F, et al,2020. Characteristics of rain microphysical parameters for different cloud systems in Shandong Province[J]. Chin J Atmos Sci,44(2):315-326(in Chinese).
- 王喆,王振会,曹晓钟,2016. 毫米波雷达与无线电探空对云垂直结构探测的一致性分析[J]. 气象学报,74(5):815-826. Wang Z, Wang Z H, Cao X Z,2016. Consistency analysis for cloud vertical structure derived from millimeter cloud radar and radiosonde profiles[J]. Acta Meteor Sin,74(5):815-826(in Chinese).
- 文必洋,侯杰昌,吴世才,等,1998. 脉冲压缩雷达距离旁瓣的消除[J]. 电波科学学报,13(4):423-427. Wen B Y, Hou J C, Wu S C, et al,1998. The distance sidelobe elimination for pulses compressed radar[J]. Chin J Radio Sci,13(4):423-427(in Chinese).
- 吴举秀,马传成,陈庆亮,等,2018. 合肥地区一次小雨过程的 W 波段云雷达的云物理特征分析[J]. 气象,44(3):416-424. Wu J X, Ma C C, Chen Q L, et al,2018. Analysis on cloud physical characteristics of a light rain process in Hefei detected by W-band cloud radar[J]. Meteor Mon,44(3):416-424(in Chinese).
- 张佃国,王烁,郭学良,等,2020. 基于机载 Ka 波段云雷达和粒子测量系统同步观测的积层混合云对流泡特征[J]. 大气科学,44(5):1023-1038. Zhang D G, Wang S, Guo X L, et al,2020. The properties of convective generating cells embedded in the stratiform cloud on basis of airborne Ka-Band precipitation cloud radar and droplet measurement technologies[J]. Chin J Atmos Sci,44(5):1023-1038(in Chinese).
- 郑佳锋,2016. Ka 波段-多模式毫米波雷达功率谱数据处理方法及云内大气垂直速度反演研究[D]. 北京:中国气象科学研究院,南京:南京信息工程大学. Zheng J F,2016. Doppler spectral data processing methods of Ka-band multi-mode Mm-wave radar and air vertical speed retrieval in clouds[D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences, Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(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]. 毫米波与红外学报,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 Waves,35(6):748-757(in Chinese).
- 郑岩,2011. 高频雷达的脉冲压缩和旁瓣抑制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学. Zheng Y,2011. The pulse compression and sidelobe suppression for high frequency wave radar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(in Chinese).
- 仲凌志,2009. 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]. 北京:中国气象科学研究院,南京:南京信息工程大学. Zhong L Z,2009. Calibration and capability analysis of China new generation of cloud radar-HM-BQ and its preliminary application in retrieving cloud microphysics parameters[D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences, Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 仲凌志,刘黎平,葛润生,2009. 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,24(4):383-391. Zhong L Z, Liu L P, Ge R S,2009. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad[J]. Adv Earth Sci,24(4):383-391(in Chinese).
- 朱怡杰,邱玉琚,陆春松,2019. 青藏高原那曲夏季云中水成分分布特征的毫米波雷达观测[J]. 气象,45(7):945-957. Zhu Y J, Qiu Y J, Lu C S,2019. Millimeter wave radar observation of hydrometeor distribution characteristics of cloud in summer in Nagqu, Qinghai Tibet Plateau[J]. Meteor Mon,45(7):945-957(in Chinese).
- 宗蓉,2013. 毫米波雷达对云宏观特性的探测和研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Zong R,2013. Studies of cloud macro- and microphysical properties using China new generation millimeter-wavelength radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- Clothiaux E E, Ackerman T P, Mace G G, et al,2000. Objective determination of cloud heights and radar reflectivities using a combination of active remote sensors at the ARM CART sites[J]. J Appl Meteor Climatol,39(5):645-665.
- Görsdorf U, Lehmann V, Bauer-Pfundstein M, et al,2015. A 35-GHz polarimetric Doppler radar for long-term observations of cloud parameters-description of system and data processing[J]. J Atmos Oceanic Technol,32(4):675-690.
- Gray R W, Farley D T,1973. Theory of incoherent-scatter measurements using compressed pulses[J]. Radio Sci,8(2):123-131.
- Kobayashi Y,1982. A repeater fault locator using a correlation technique for a submarine coaxial cable system[J]. IEEE Trans

- Commun,30(5):1117-1124.
- Kropfli R A, Kelly R D, 1996. Meteorological research applications of mm-wave radar[J]. Meteor Atmos Phys, 59(1):105-121.
- Lhermitte R, 1987. A 94-GHz Doppler radar for cloud observations [J]. J Atmos Oceanic Technol, 4(1):36-48.
- Liu L P, Ding H, Dong X B, et al, 2019. Applications of QC and merged Doppler spectral density data from Ka-band cloud radar to microphysics retrieval and comparison with airplane in situ observation[J]. Remote Sens, 11(13):1595.
- 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):209.
- Moran K P, Martner B E, Post M J, et al, 1998. An unattended cloud-profiling radar for use in climate research[J]. Bull Amer Meteor Soc, 79(3):443-456.
- Pasqualucci F, Bartram B W, Kropfli R A, et al, 1983. A millimeter-wavelength dual-polarization Doppler radar for cloud and precipitation studies[J]. J Climate Appl Meteor, 22(5):758-765.
- Paulsen W H, Petrocchi P J, McLean G, 1970. Operational utilization of the AN/TPQ-11 cloud detection radar[C]// AIE Force Cambridge Research Laboratories Instrumentation, 166(59).

(本文责编:何晓欢)