

## Ka 波段毫米波云雷达数据质量控制方法

郑佳锋<sup>1,2,3</sup>, 刘黎平<sup>1</sup>, 曾正茂<sup>1,4</sup>, 谢晓林<sup>5</sup>, 武静雅<sup>1</sup>, 冯凯<sup>6</sup>

(1. 中国气象科学研究院 灾害性天气国家重点实验室,北京 100081;

2. 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶—云—降水重点开放实验室,江苏 南京 210044;

3. 成都信息工程大学 大气科学学院,四川 成都 610025;

4. 成都信息工程大学 电子工程学院,四川 成都 610025;

5. 四川省气象探测数据中心,四川 成都 610072;

6. 中国航天科工集团第二研究院第二十三所,北京 100854)

**摘要:**针对国内首部固态、多观测模式体制的 Ka 波段毫米波云雷达观测资料,提出速度模糊、噪点-径向干扰杂波和悬浮物杂波的质量控制方法,并对方法效果进行了检验和分析.结果表明,该方法具有很好的成功率和稳定性,15 个云过程检验的退模糊成功率都达到 100%;能准确判断出速度模糊和类型并纠正平均多普勒速度和谱宽;能较好地滤除噪点和径向干扰杂波,并对缺测进行补值;能较好地去除低空悬浮物杂波,同时保留小尺度的云.

**关键词:**Ka 波段毫米波云雷达;数据质量控制;速度退模糊

**中图分类号:**P41 **文献标识码:**A

## Ka-band millimeter wave cloud radar data quality control

ZHENG Jia-Feng<sup>1,2,3</sup>, LIU Li-Ping<sup>1</sup>, ZENG Zheng-Mao<sup>1,4</sup>, XIE Xiao-Lin<sup>5</sup>, WU Jing-Ya<sup>1</sup>, FENG Kai<sup>6</sup>

(1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

3. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025, China;

4. Department of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025, China;

5. Meteorological Observation Data Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;

6. The 23<sup>th</sup> Institute of Second Department of China Aerospace Science and Industry Group, Beijing 100854, China)

**Abstract:** To improve the data quality of Ka band millimeter wave cloud radar, a quality control method for solving problems related to velocity aliasing, noisy echo, data missing and plankton contamination is presented. The effectiveness of the method was verified by several cases. The results show that the velocity dealiasing algorithm based on radar Doppler spectra processing is effective with high success rate and stability. Success rates of 15 cases reach 100%. It can also find out the fuzzy type and correct radial velocity and spectrum width. With this method, noisy clutter are filtered validly and missing data can be filling well. The plankton echoes can almost be removed clearly while the small scale cloud can be remained.

**Key words:** Ka-band millimeter wave cloud radar, data quality control, velocity dealiasing

**PACS:** 92.60.Ta

收稿日期:2015-10-10,修回日期:2016-04-01

Received date: 2015-10-10, revised date: 2016-04-01

基金项目:国家自然科学基金(41175038, 91337103), 973 项目(2012CB417202), 第三次青藏高原大气科学试验项目(GYHY201406001), 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX\_0839)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41175038, 91337103), 973 Subproject of China (2012CB417202), the 3rd Tibetan Plateau Atmospheric Science Experiment Project (GYHY201406001), and Jiangsu Province Ordinary University Graduate Student Scientific Research Innovation Projects (KYLX\_0839)

作者简介(Biography): 郑佳锋(1988-), 男, 博士, 主要研究领域为气象雷达. E-mail: jiafeng\_zheng@163.com

## 引言

近 30 年来,毫米波云雷达以其灵敏度高、资料分辨率高和长时间连续观测等优势,逐渐成为云观测的主要仪器.目前,毫米波云雷达主要有波长 8 mm 的 Ka 波段和 3 mm 的 W 波段. Ka 波段主要以地基或车载为平台,特点是功率较大、硬件成熟,它不仅能够探测各种云类,同时对弱降水也有一定的探测能力.典型的如:美国大气辐射测量计划 (ARM) 的 MMCR 云雷达、英国雷丁大学的 Rabelais 云雷达、德国气象观测台的 MIRA36 云雷达和中国的 HMBQ 云雷达<sup>[1-3]</sup>. W 波段主要以机载、船载和星载为平台,特点是硬件体积小、灵敏度更高.在探测弱云方面更具优势,但功率较低,对厚云的穿透能力比 Ka 波段弱,另外衰减也较为严重.典型的如:美国 NASA 的 CRS 雷达和日本通信实验室的 SPIDER 云雷达、美国 NOAA 的船载云雷达和 NASA 的星载云雷达 CloudSat<sup>[4-7]</sup>.

在技术层面上,毫米波云雷达受电子器件和信号处理发展的影响很大.近年来,固态器件和多观测模式的云雷达成为一个发展方向.固态器件使整个雷达系统的稳定性和长时间观测能力有了很大提高.但由于功率较低,通常利用不同雷达参数和信号处理,设计出不同的观测模式来满足各种云类的探测.典型的如 ARM 计划的 MMCR 雷达,它采用边界层、卷云、降水、普通和极化五种模式来连续观测<sup>[8]</sup>.虽然多观测模式可以有效提高雷达的探测能力.但对于每个模式而言,雷达性能指标(灵敏度、探测范围、测速范围和分辨率等)仍是一个折衷问题.因此,面对自然界种类繁多、复杂多变的云类,每种模式的数据都难免存在着一些质量问题,其中最常见的是速度模糊、噪点-径向干扰杂波和非气象杂波.速度模糊是由于目标物速度过大而超出雷达测速范围引起,它可导致雷达计算的平均速度和谱宽产生偏差.在天气雷达中,很多学者通过算法对径向速度进行退模糊处理.而对于垂直观测的云雷达,更合理的方法应该从功率谱资料入手,如 Kollias 等从功率谱中识别出云信号,并将信号的谱峰移至功率谱中间,再将模糊信号进行移位恢复<sup>[8]</sup>.雷达噪点-径向干扰杂波是由鸟虫和雷达硬件引起,也与数据处理有关.噪点-径向干扰杂波可利用滤波的方法来滤除<sup>[9-11]</sup>.云雷达观测到的非气象杂波主要是低空的悬浮物回波,它们通常是大气中的雾霾、灰尘、花粉和昆虫等.研究表明,悬浮物回波的功率谱十分

复杂,单昆虫回波的功率谱就有 9 种不同的形态<sup>[12]</sup>.Görsdorf 等统计了无云条件下边界层内的悬浮物回波,结果表明,主观上以回波强度  $Z < -10\text{dB}$  和退偏振比  $LDR > -20\text{dB}$  为阈值基本可以滤除悬浮物回波<sup>[3]</sup>.

近年来,我国也逐步开展毫米波云雷达的研制和观测.2013 年,中国气象科学研究院联合中国航天科工集团第 23 所研制出了一部最新的 Ka 波段毫米波云雷达,它是国内第一部固态、多观测模式体制的云雷达.于 2014-2015 年,该雷达在我国华南地区(广东阳江)和青藏高原(西藏那曲)上进行了长时间的观测试验,积累了大量珍贵资料<sup>[13-14]</sup>.固态、多观测模式体制的毫米波云雷达数据质量控制在国内尚未开展研究,它又是资料后续应用和进一步研究的重要基础,因此具有重要的意义.本文针对雷达资料中的速度模糊、噪点-径向干扰杂波和悬浮物杂波提出质量控制方法,并利用实例对方法的效果进行检验和分析.

## 1 仪器和资料

该雷达是一部脉冲多普勒体制的双极化 Ka 波段云雷达,采用固态发射机,具有长时间连续观测能力.雷达天线直径为 2 m,工作时朝向天顶,增益高达 54 dB,水平和垂直波宽均为  $0.31^\circ$  (5 km 的水平展宽仅为 13.5 m).雷达工作频率为 33.4 GHz(波长为 8.97 mm),峰值功率大于 110 W,脉冲重复频率为 8333 Hz,动态范围为 75 dB.设计了三种模式来满足不同云类的观测,包括边界层模式(BL)、卷云模式(CI)和降水模式(PR),主要参数如表 1 所示. BL 主要用于低空边界层云、雾等目标的探测,采用较多的相干积累来提高灵敏度,但测速范围较低. CI 主要用于中、高空云的探测,采用脉冲压缩处理技术,探测高度和灵敏度最高,但低空盲区较大. PR 主要用于降水探测,针对目标物回波强和垂直运动大的特点,采用窄脉冲和较多次的非相干积累,以增强对强回波的探测能力,另外,测速范围最大.雷达的观测资料包括反射率因子、径向速度、谱宽、退偏振比和功率谱,资料的空间分辨率为 30 m,距离库数为 510 个,时间分辨率为 8.8 s.功率谱资料通过快速傅里叶变换(FFT)得到,它反映了雷达探测体积内不同粒子的功率随多普勒速度分布情况. FFT 的采样点数为 256 点.当目标远离雷达移动时为负速度(上升),靠近雷达移动视为正速度(下沉).

表 1 云雷达三种观测模式主要参数  
Table 1 Major parameters of three modes

| 参数名称                              | 探测模式        |            |             |
|-----------------------------------|-------------|------------|-------------|
|                                   | 边界层模式 (BL)  | 卷云模式 (CI)  | 降水模式 (PR)   |
| 脉冲宽度/ $\mu\text{s}$               | 0.2         | 12         | 0.2         |
| 主波功率/dB                           | 66          | 76         | 66          |
| 相干积累数/个                           | 4           | 2          | 1           |
| 非相干积累数/个                          | 16          | 32         | 64          |
| FFT 点数/个                          | 256         | 256        | 256         |
| 高度探测范围/km                         | 0.12-7.5    | 2.04-15.3  | 0.12-12     |
| 最大可测速度/ $\text{m s}^{-1}$         | $\pm 4.635$ | $\pm 9.27$ | $\pm 18.54$ |
| 速度分辨率/ $\text{m s}^{-1}$          | 0.0364      | 0.0727     | 0.1454      |
| 脉冲压缩/ $(\mu\text{s}/\mu\text{s})$ | 12/0.2      | 无          | 无           |

## 2 质量控制方法

### 2.1 速度退模糊

对于毫米波云雷达,速度模糊与体扫天气雷达

的处理方式有所差别. 天气雷达速度模糊由环境风场引起(水平风为主), 粒子群的运动速度可视为一个目标物处理, 因此可通过一定算法直接对雷达径向速度进行退模糊. 而垂直探测的云雷达, 速度模糊由粒子落速和上升气流引起, 更多表现出的是部分信号模糊, 因此粒子群不能视为一个目标处理. 合理的方法应该从回波的功率谱进行处理. 该 Ka 波段毫米波雷达三种探测模式中, PR 的最大可测速度为  $\pm 18.54 \text{ m/s}$ , 不会发生速度模糊; CI 有可能出现速度模糊, 但仅表现为速度的部分折叠; 而 BL 最有可能出现速度模糊, 不仅表现为部分折叠, 甚至出现全部折叠的情况. 尽管雷达不同云类使用不同模式的数据, 但更多情况是三种模式数据联合使用, 因此对 CI 和 BL 数据进行速度退模糊十分必要. 本文速度退模糊的方法和步骤如图 1 所示.

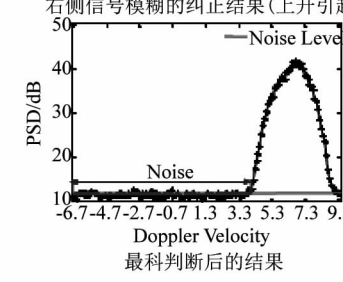
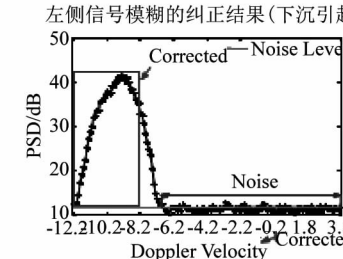
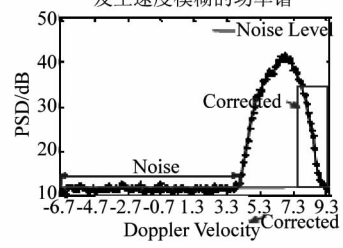
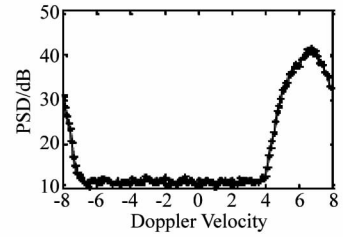
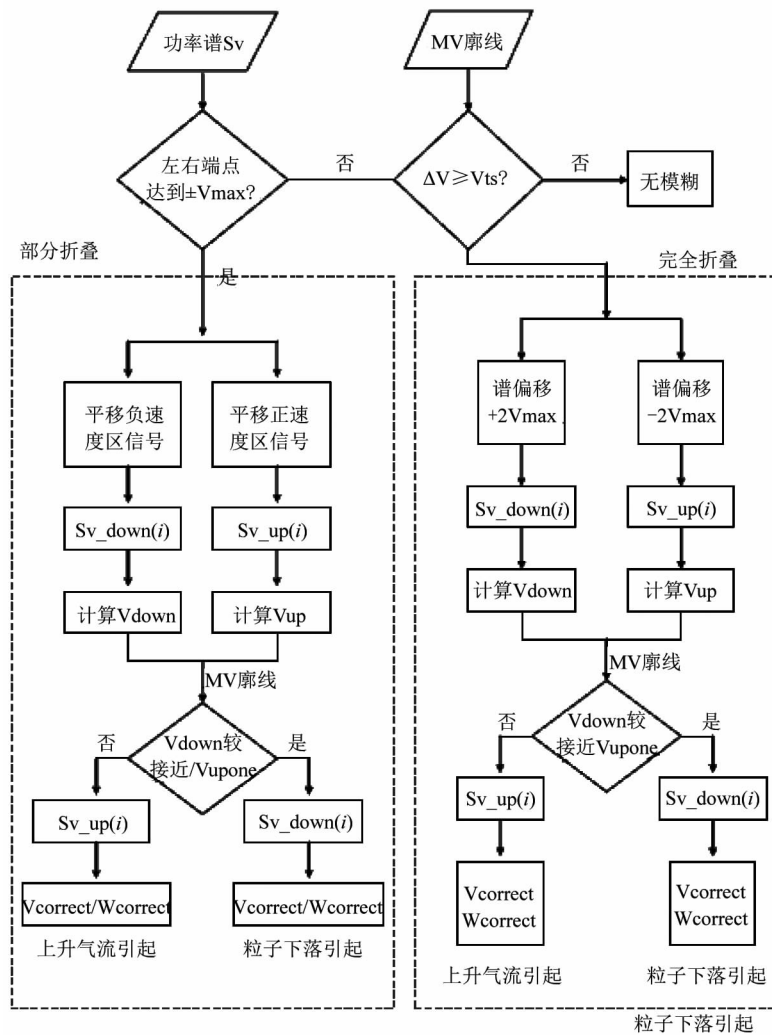


图 1 功率谱退速度模糊的步骤和示意图  
Fig. 1 Steps and schematic for spectra velocity dealiasing

在功率谱退模糊前,首先要计算噪声电平并识别云信号.噪声电平的计算方法采用 Monique 等提出的分段法<sup>[15-17]</sup>.云信号识别的方法是:首先标记出谱中所有高出噪声电平的连续数据段,再对每段的谱线数和信噪比进行判断.若谱线数不少于 3 根且信噪比高于  $SNR_{min}$ <sup>[18]</sup>,则认为是云信号并记录下左右端点和谱峰位置. $SNR_{min}$ 是最小可测信号的信噪比,BL 和 CI 模式分别为-13.7dB 和-15dB. MV 廓线为退模糊前计算的各个距离库平均多普勒速度.如式(1)所示, $S_i$ 为云信号(dBm), $P_N$ 为噪声电平(dBm), $V_l$ 和  $V_r$ 为信号左右端点的多普勒速度( $ms^{-1}$ ).

$$MV = \frac{\sum_{i=V_l}^{V_r} i * (S_i - P_N)}{\sum_{i=V_l}^{V_r} (S_i - P_N)} \quad (1)$$

模糊判断:大气中的垂直风场变化通常有一定的过渡性,尤其是对于垂直分辨率高达 30 m 的云雷达资料,即使粒子运动速度或大气运动速度有较大的正负转变,在雷达平均多普勒速度的廓线(MV)上,从上到下也会呈现连续性的变化.普查这部雷达观测资料发现,云顶位置不会出现速度模糊,因此从云顶往下,速度从一开始的不模糊,逐渐到出现部分折叠,最后到全部折叠.根据速度模糊前后的变化,算法从云顶往下逐渐检测每个距离库,首先判断是否发生部分折叠.发生部分折叠的特征是云信号被分为两部分,分别分隔在功率谱的两侧,因此,信号的左右端点位置可以作为判断部分折叠的标记.若检测到右段信号的右端点达到了  $+V_{max}$ 且有左段信号的左端点达到了  $-V_{max}$ ,则说明信号发生了部分折叠.反之,继续判断它和上方最近库的速度差异,若差异不太大( $<V_{is}$ , $V_{is}$ 为速度差异阈值,实际中设置为  $V_{max} \sim 1.5V_{max}$ ),则说明该距离库没有发生模糊;若速度差异较大( $\geq V_{is}$ ),则说明是发生了完全折叠.

部分折叠速度退模糊:若功率谱中模糊是部分折叠,则功率谱的云信号被分为两段,分别位于功率谱两侧.对于两段信号,由于模糊类型(指上升或者下沉引起的两类模糊)未知,因此算法尝试性地将左段信号平移至右段信号之后和将右段信号平移至左段之前,得到两组新的功率谱  $Sv\_down(i)$ 和  $Sv\_up(i)$ . $Sv\_down(i)$ 和  $Sv\_up(i)$ 分别代表模糊类型为落速过大和上升气流过强两种纠正情况,利用它们计算可得到平均多普勒速度  $V_{down}$ 和  $V_{up}$ . $V_{down}$ 和

$V_{up}$ 中有一个是正确纠正后的平均多普勒速度,因此将它们与径向上方第一个有效库的速度  $V_{upone}$ 进行对比(从云顶往下迭代保证了被参照的  $V_{upone}$ 不发生模糊或已被纠正),若  $V_{down}$ 与  $V_{upone}$ 较接近,则认为  $V_{down}$ 为纠正后的平均多普勒速度  $V_{correct}$ ,而  $Sv\_down(i)$ 为纠正后的功率谱,利用它进一步计算出纠正后的谱宽  $W_{correct}$ ,速度模糊应该由粒子落速引起的.若  $V_{up}$ 与  $V_{upone}$ 较接近,则认为  $V_{up}$ 为纠正后的平均多普勒速度  $V_{correct}$ ,而  $Sv\_up(i)$ 为纠正后的功率谱,继续计算出纠正后的谱宽  $W_{correct}$ ,速度模糊应该为强上升气流引起.

完全折叠速度退模糊:信号发生完全折叠时,功率谱中信号真实的速度和实际速度差两倍的最大可测速度,然而我们也不知道模糊是偏向正速度还是负速度,因此算法也尝试性地将功率谱分别偏移  $+2V_{max}$ 和  $-2V_{max}$ 得到新的功率谱  $Sv\_down(i)$ 和  $Sv\_up(i)$ ,两种纠正后的功率谱含义如上文所述.接下来处理方法与部分折叠一致,即利用它们计算得到的  $V_{down}$ 和  $V_{up}$ 与径向上方第一个有效库的速度  $V_{upone}$ 进行对比,若  $V_{down}$ 和  $V_{upone}$ 较接近,则认为  $V_{down}$ 为纠正后的平均多普勒速度  $V_{correct}$ ,利用  $Sv\_down(i)$ 进一步计算出纠正后的谱宽  $W_{correct}$ ,速度模糊由粒子落速过快引起.反之,若  $V_{up}$ 与  $V_{upone}$ 较接近,则类似处理,说明速度模糊由强上升气流引起.

整体而言,这种速度退模糊算法是利用云顶往下速度连续性变化的原则,通过迭代的方式进行模糊判断、模糊分类和模糊纠正.利用速度从不折叠到部分折叠,最后到完全折叠的变化过程来逐步实现.

### 2.2 噪点—径向干扰杂波滤除

|                                       |     |                         |     |                                       |
|---------------------------------------|-----|-------------------------|-----|---------------------------------------|
| $V_{i-\frac{M-1}{2},j+\frac{N-1}{2}}$ | ... | $V_{i,j+\frac{N-1}{2}}$ | ... | $V_{i+\frac{M-1}{2},j+\frac{N-1}{2}}$ |
| ⋮                                     |     |                         |     | ⋮                                     |
| ⋮                                     |     | $V_{i,j}$               |     | ⋮                                     |
| ⋮                                     |     |                         |     | ⋮                                     |
| $V_{i-\frac{M-1}{2},j-\frac{N-1}{2}}$ | ... | $V_{i,j-\frac{N-1}{2}}$ | ... | $V_{i+\frac{M-1}{2},j-\frac{N-1}{2}}$ |

图2  $M * N$  去噪和补值小窗示意图

Fig. 2 Window of noisy data filtering and missing data filling

如图2所示,设定一个  $M * N$  滑动小窗.将雷达数据按大小分为  $P$  个等距区间,区间间隔为  $\Delta d$ ,窗口中心点为判断对象,其值设为  $V_{ij}$ ( $i$ 为径向, $j$ 为距离库),将  $V_{ij} \pm \Delta d * a$  作为第  $P + 1$  个区间, $a$ 为补值系

数. 统计窗口内所有点分布在不同区间的频数( $X_1, X_2, \dots, X_p$ )和 $X'$ , 令最大值为 $X_{\max}$ , 取 $X_{\max}$ 所对应的区间中间值为 $V_p$ . 根据式(2), 对当前点及周围点的回波进行频数统计和判断, 式中 $V'_{ij}$ 为窗口中心点的新值,  $V_{ij} \approx 0$ 时, 代表该点原本为无回波点,  $V_{ij} \neq 0$ 时, 代表原本为有回波点,  $k_1$ 和 $k_2$ 分别为去噪和补值的判断阈值. 当 $V_{ij} \neq 0$ 时, 若周围存在较多与之相近的回波时( $X' > k_1$ ), 则认为该点为有效回波, 保留; 反之, 则为噪声( $X' \leq k_1$ ), 滤除. 当 $V_{ij} \approx 0$ 时, 若周围回波在某个区间出现的频数较大时, 则认为周围存在较多有效回波点( $X_{\max} \geq k_2$ ), 该点为缺测点, 用 $V_p$ 补值; 反之, 则不是缺测点( $X_{\max} \leq k_2$ ), 不补值.

$$V'_{ij} = \begin{cases} 0 & V_{ij} \neq 0 & X' \leq k_1 \\ V_{ij} & V_{ij} \neq 0 & X' > k_1 \\ V_p & V_{ij} \approx 0 & X_{\max} \geq k_2 \\ V_{ij} & V_{ij} \approx 0 & X_{\max} < k_2 \end{cases}, \quad (2)$$

“K-领域频数法”利用回波变化的连续性, 具有较明确的物理意义, 但参数和阈值的选择十分关键, 如: 参数 $M$ 和 $N$ 考虑到云雷达的时间分辨率和云的变化快慢不宜过大, 参数 $P$ 、 $\Delta d$ 和 $a$ 应根据资料的探测范围设定, 阈值 $k_1$ 不宜过大或过小, 过大会导致云回波被误判为噪声, 过小会导致无法滤除噪声, 阈值 $k_2$ 也不易过大或过小, 过大会使得补值失效, 过小会使得过度补值产生虚假回波. 因此, 我们根据这部云雷达资料的特点, 对各个参数和阈值进行试验, 试验对象包括低空弱层云、中高空层积云和高空卷云等不同的云过程, 方法是动态改变一个参数且固定其他参数的方法来不断调整, 当数据的去噪和补值取得最优效果时, 这些参数的值如表2所示.

### 2.3 悬浮物杂波滤除

大量的观测事实表明, 在大陆暖季, 云雷达经常能够观测到悬浮在低空的悬浮物杂波. 悬浮物主要由低空大气污染物、粉尘和昆虫等组成, 这种杂波会影响低云的数据质量, 因此必须进行处理<sup>[21-22]</sup>. 悬浮物杂波的普遍特征是回波强度弱、运动速度小, 但退偏振比很高, 它们的功率谱并无明显的规律和特

征, 另外, 不同地域的悬浮物含量和成分有所区别, 使得功率谱更加复杂多变, 因此从功率谱资料识别是较为困难的. 本文考虑采用反射率因子 $Z$ 和退偏振比 $LDR$ 阈值的方法. 分别统计了2014年5~6月阳江试验期间和2015年6~8月那曲试验期间, 云—降水回波和悬浮物回波的 $Z$ - $LDR$ 分布. 统计时, 只选择低空2 km以下的数据; 悬浮物回波选择晴空条件下的数据(保证不是云—降水); 而云—降水回波选择雨后出现的数据(保证没有悬浮物). 统计结果如图3所示. 首先, 对于云—降水回波, 阳江地区99.9%的 $Z$ 和 $LDR$ 分布在-22~33 dBZ和-33~-21 dB, 由于该季节零度层高度在5 km左右, 因此低空云—降水内不会出现较大的 $LDR$ 值. 那曲地区99.8%的云—降水 $Z$ 和 $LDR$ 值分布在-12~34 dBZ和-33~-11 dB( $Z$ 和 $LDR$ 都有值的情况才统计, 当目标物回波较弱到一定程度后, 垂直通道信噪比往往不够, 因此探测不到 $LDR$ 数据), 低空云—降水的 $Z$ 值比阳江大, 是因为高原上对流云较多, 且离地高度较低.  $LDR$ 也比阳江大, 是因为高原零度层高度较低(0.8~1 km). 对于悬浮物回波, 两个地区的 $Z$ 值有一定的差距, 阳江和那曲地区分别分布在-43~-15 dBZ和-30~0 dBZ, 原因是两个地区悬浮物的成分不同, 阳江主要以雾霾、低空粉尘和昆虫为主, 而那曲则是县城道路施工引起的尘土. 两个地区悬浮物的 $LDR$ 值也有一定差距, 阳江地区分布在-20~-1 dB, 那曲地区分布在-23~0 dB. 对比两类回波的统计结果可以看出, 通过设定合理的回波强度 $Z_{is}$ 和退偏振比阈值 $LDR_{is}$ 是有能力滤除低空的悬浮物杂波, 阳江地区效果非常理想, 以 $Z_{is} = -10$  dBZ、 $LDR_{is} = -20$  dB为界( $Z$ 小于-10 dBZ且 $LDR$ 大于-20 dB判断为悬浮物杂波), 云—降水回波可以被100%保留, 而悬浮物杂波100%被滤除. 那曲地区效果稍差, 以 $Z_{is} = 0$  dBZ、 $LDR_{is} = -16$  dB为界( $Z$ 小于0 dBZ且 $LDR$ 大于-16 dB判断为悬浮物杂波), 云—降水回波可以被100%保留, 而悬浮物杂波有97.84%被滤除.  $Z_{is}$ 和 $LDR_{is}$ 选择时, 原则是尽量保证云—降水回波的完整性, 另外, 剩余的少量悬

表2 “K-领域频数法”参数和阈值的最优取值

Table 2 Optimal parameters and thresholds of K-area-frequency method

| 资料    | 参数或阈值       |         |                            |                    |            |            |            |
|-------|-------------|---------|----------------------------|--------------------|------------|------------|------------|
|       | 窗口大小 $M, N$ | 区间数 $P$ | 区间范围                       | 区间间隔 $\Delta d$    | 补值区间系数 $a$ | 去噪阈值 $K_1$ | 补值阈值 $K_2$ |
| 反射率因子 | 3, 3        | 10      | -50 ~ 40 dBZ               | 10 dBZ             | 1          | 3          | 3          |
| 速度    | 3, 3        | 11      | -20 ~ 20 m s <sup>-1</sup> | 4 ms <sup>-1</sup> | 1          | 3          | 3          |
| 谱宽    | 3, 3        | 9       | 0 ~ 8 ms <sup>-1</sup>     | 1 ms <sup>-1</sup> | 1          | 3          | 3          |
| 退偏振比  | 3, 3        | 11      | -50 ~ 0 dB                 | 5 dB               | 2          | 4          | 3          |

浮物也会被视为噪点杂波进一步滤除.

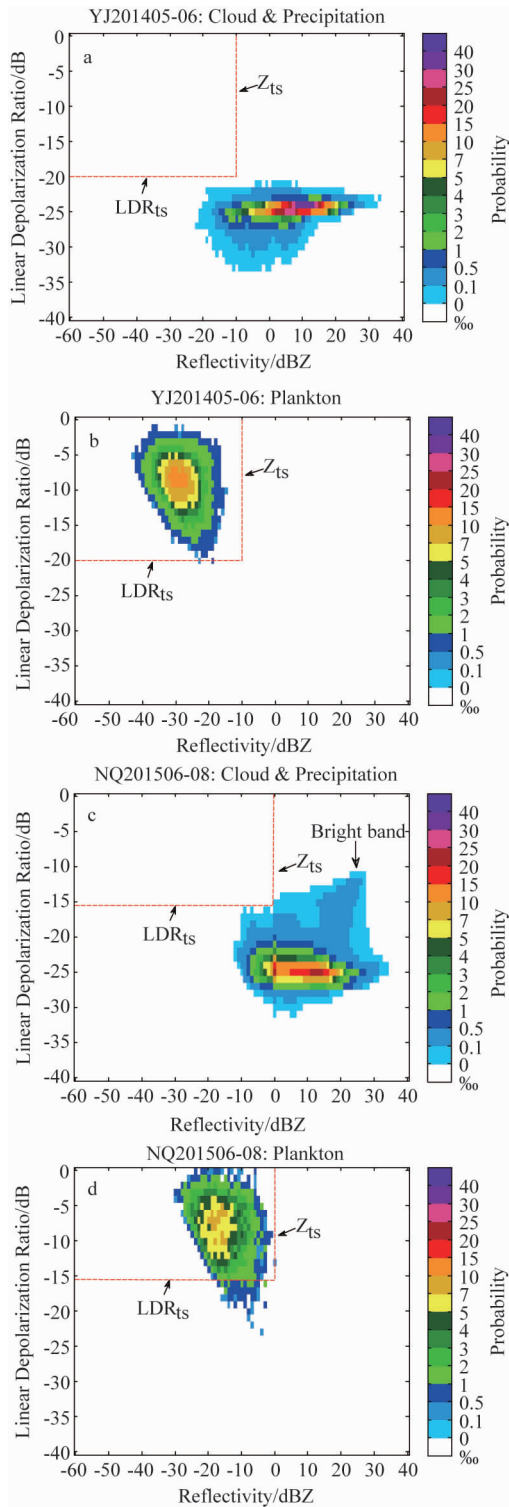


图3 阳江2014年5~6月和那曲2015年6~8月云—降水和悬浮物回波的 Z-LDR 概率分布, a 和 c 为云—降水, b 和 d 为悬浮物

Fig. 3 Z-LDR distribution of cloud-Precipitation and plankton on May to June in 2014 at Yangjiang and June to August in 2015 at Naqu, a and c are cloud-precipitation, c and d are plankton

### 3 效果分析和检验

#### 3.1 速度退模糊效果

利用两次试验观测的 15 个不同云个例对速度退模糊方法效果进行检验. 个例包含了积云、浓积云、层状云降水、毛毛雨、深对流云、雨层云、低空积云、高积云和混合云九种不同的云类. 速度退模糊成功的判断依据是: PR 模式拥有最大的速度探测范围 ( $\pm 18.54 \text{ m/s}$ ), 粒子落速和大气垂直速度不足以对它造成速度模糊, 因此对于发生速度模糊的 CI 和 BL 模式数据, 在成功退模糊后, 计算的平均多普勒速度和谱宽应该和 PR 模式一致. 所有个例的检验结果如表 3 所示, 15 个个例共有 309010 个距离库样本出现了速度模糊, 降水云和对流云内出现速度模糊的概率较大, 而非降水云和较稳定的降水云出现模糊的概率较小. 检验的结果表明, 15 个例的成功率都达到了 100%, 说明本文的速度退模糊算法效果良好, 且能适应不同的云类, 因此稳定性也很好.

以下利用两个典型个例来分析两种不同类型速度模糊的处理效果. 如图 4 为 2014 年 6 月 6 日 10:29-11:44 阳江观测的层状降水云 (CI 模式), 在 5 km 左右为融化层, 该高度上, 回波强度变现出明显的亮带特征, 而径向速度和谱宽上则均表现为突然增大 (图  $a_1$  和  $a_2$ ). 从 11:05 不同高度的功率谱 (图  $b_1$ ) 可见, 在零度层以上粒子以冰相为主, 因此功率谱很窄, 粒子尺度较为集中, 谱宽较小, 下落速度远未达到最大可测速度. 而到零度层以下, 冰相粒子开始逐渐融化为液相并开始增长, 功率谱变宽, 大粒子开始出现, 谱宽逐渐增大, 部分雨滴的下落速度超出了最大可测速度被折叠至负速度区. 图  $b_2$  为退模糊后的功率谱, 可见, 融化层以下的速度折叠被成功纠正, 最大下落速度从原来的  $9.27 \text{ ms}^{-1}$  被扩展到了  $14.58 \text{ ms}^{-1}$ . 图  $c_1$  和  $c_2$  为径向速度和谱宽的退模糊效果, 它们与退模糊前的偏差如图  $d_1$  和  $d_2$  所示 (退模糊前减退模糊后), 可见, 粒子下落速度过大会使得径向速度被低估, 低估程度最大甚至可超过  $4 \text{ ms}^{-1}$ , 而谱宽则会严重高估, 高估甚至超过了  $6 \text{ ms}^{-1}$ .

如图 5 为 2014 年 7 月 5 日 17:26-18:41 那曲探测的深对流云, 从 A 区域的径向速度可见 (图  $a_1$ ), 对流中心存在很强的上升气流 (黄色和红色), 而其下方则为较快的下落速度 (绿色和蓝色), 从对应区域的谱宽来看 (图  $a_2$ ), C 区域和 D 区域的谱宽也很大. 从 18:04 不同高度的功率谱可见 (图  $b_1$ ), 在 6km

表 3 15 个云过程个例的退速度模糊效果

Table 3 The effects of velocity dealiasing of 15 different cloud processes

| 编号 | 地点 | 个例日期/时间                | 云类     | 模糊库数   | 成功库数   | 成功率/% |
|----|----|------------------------|--------|--------|--------|-------|
| 1  | 阳江 | 2014-06-06/03:09-04:22 | 积云     | 1 158  | 1 158  | 100   |
| 2  | 阳江 | 2014-06-06/06:49-08:02 | 浓积云    | 1 231  | 1 231  | 100   |
| 3  | 阳江 | 2014-06-06/10:29-11:42 | 层状降水云  | 87 308 | 87 308 | 100   |
| 4  | 阳江 | 2014-06-07/10:57-12:10 | 层状降水云  | 16 703 | 16 703 | 100   |
| 5  | 阳江 | 2014-06-07/15:51-17:04 | 毛毛雨    | 1 720  | 1 720  | 100   |
| 6  | 阳江 | 2014-06-09/16:46-18:00 | 对流性降水云 | 68 674 | 68 674 | 100   |
| 7  | 阳江 | 2014-06-10/03:46-05:00 | 混合性降水云 | 53 914 | 53 914 | 100   |
| 8  | 那曲 | 2014-07-05/17:26-18:39 | 深对流云   | 19 308 | 19 308 | 100   |
| 9  | 那曲 | 2014-07-06/08:06-09:19 | 雨层云    | 4 304  | 4 304  | 100   |
| 10 | 那曲 | 2014-07-07/18:12-19:25 | 低空积云   | 1 369  | 1 369  | 100   |
| 11 | 那曲 | 2014-07-08/17:26-18:39 | 高积云    | 5 111  | 5 111  | 100   |
| 12 | 那曲 | 2014-07-09/14:12-15:25 | 混合性降水云 | 35 740 | 35 740 | 100   |
| 13 | 那曲 | 2015-07-17/15:43-16:56 | 积云     | 2 665  | 2 665  | 100   |
| 14 | 那曲 | 2015-07-30/16:51-18:05 | 对流性降水云 | 5 486  | 5 486  | 100   |
| 15 | 那曲 | 2015-08-23/12:37-13:50 | 对流性降水云 | 4 319  | 4 319  | 100   |

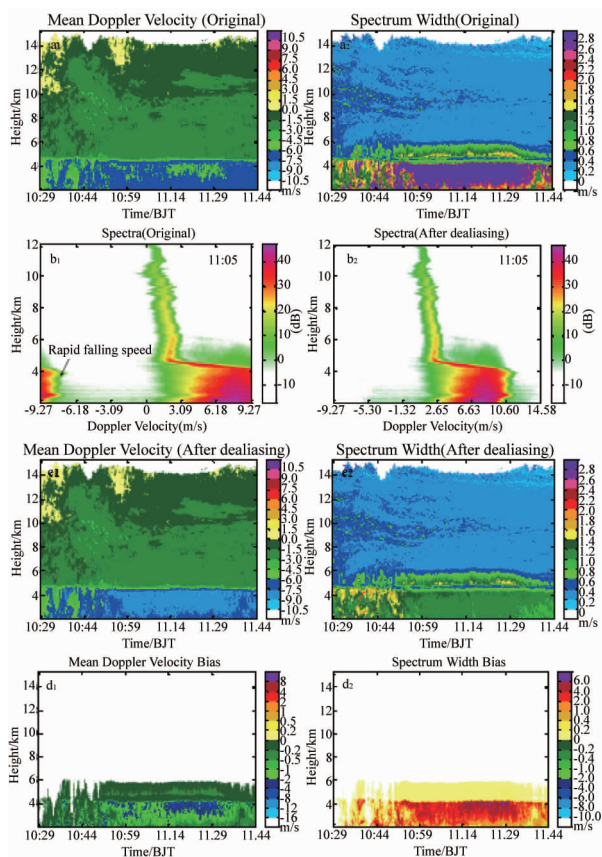


图 4 2014 年 6 月 6 日阳江 10:29-11:44 速度和谱宽的退模糊效果,  $a_1$  和  $a_2$  为退模糊前的径向速度和谱宽,  $b_1$  和  $b_2$  为 11:05 时次退模糊前后不同高度的功率谱,  $c_1$  和  $c_2$  为退模糊后的径向速度和谱宽,  $d_1$  和  $d_2$  为退模糊前后的偏差,  $e$  为算法判断的模糊标记

Fig. 4 Dealiasing effects at 10:29-11:44 on June 6 in 2014 at Yangjiang,  $a_1$  and  $a_2$  are mean Doppler velocity and spectrum width before dealiasing,  $b_1$  and  $b_2$  are spectra processing effects on different heights at 11:05,  $c_1$  and  $c_2$  are mean Doppler velocity and spectrum width after dealiasing,  $d_1$  and  $d_2$  are the deviations after quality control

左右,强上升气流使得部分信号被折叠至正速度区,而 4 km 以下,过快的下落速度也使得部分信号被折叠至负速度区. 图  $b_2$  为退模糊后的功率谱,可见,两种情况的速度模糊均被正确纠正,正负最大速度从原来的  $\pm 9.27 \text{ ms}^{-1}$  被扩展到了  $14.07 \text{ ms}^{-1}$  和  $-14.65 \text{ ms}^{-1}$ . 图  $c_1$  和  $c_2$  为退模糊后的径向和谱宽, A、B、C、D 区域为效果较为明显的区域,而从退模糊前后的偏差(图  $d_1$  和  $d_2$ )来看,上升气流引起的模糊可使径向速度和谱宽被高估,最大分别可达  $3 \text{ ms}^{-1}$  和超过  $4 \text{ ms}^{-1}$ ;而下落速度过大引起的模糊可使径向速度被低估而谱宽被高估,低估最大可超过  $4 \text{ ms}^{-1}$ ,高估最大可超过  $4 \text{ ms}^{-1}$ .

从以上两个典型个例的分析来看,由过强上升气流和过快下落速度引起的速度模糊对径向速度和谱宽的计算均有影响,有时偏差很大甚至可使资料不可用. 另外,对模糊类型的判断也十分关键,否则会出现错误的订正. 本文的退模糊方法能有效识别出模糊的位置和类型并做出正确的纠正.

### 3.2 噪点—径向干扰和悬浮物杂波的滤除效果

利用一个包含噪点杂波、径向干扰杂波、数据缺失并同时存在很小尺度碎云的个例进行检验. 如图 6 为 2014 年 6 月 8 日阳江 18:12-20:42 一次包含多块云回波的处理效果. 由质量控制前的反射率因子可见,回波的 A 和 C 区域存在着若干噪点和径向干扰杂波, A 区域的噪点是地面灰尘和悬浮物(表现出高的 LDR),而径向干扰可能是由雷达硬件引起, C 区域的少量散点是由于其高度较高,云边缘信噪比刚好达到了雷达灵敏度临界点而被误判为云回波的噪声信号. D 区域存在若干尺度非常小的碎积云, B

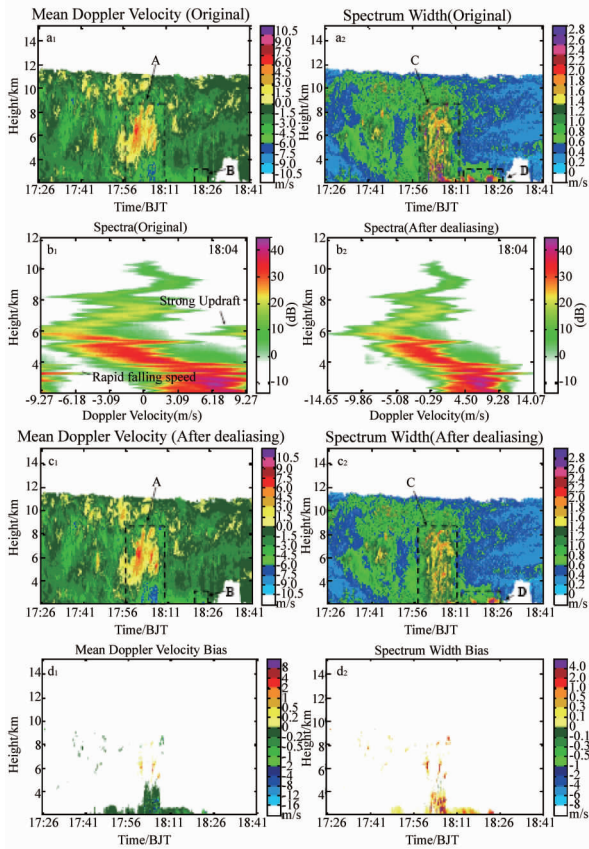


图5 2014年7月5日那曲17:26-18:41速度和谱宽的退模糊效果,  $a_1$  和  $a_2$  为退模糊前径向速度和谱宽,  $b_1$  和  $b_2$  为18:04时刻退模糊前后不同高度的功率谱,  $c_1$  和  $c_2$  为退模糊后的径向速度和谱宽,  $d_1$  和  $d_2$  为退模糊前后的偏差,  $e$  为算法判断的模糊标记

Fig. 5 Dealiasing effects at 17:26-18:41 on July 5 in 2014 at Naqu,  $a_1$  and  $a_2$  are mean Doppler velocity and spectrum width before dealiasing,  $b_1$  and  $b_2$  are spectra processing effects on different heights at 18:04,  $c_1$  and  $c_2$  are mean Doppler velocity and spectrum width after dealiasing,  $d_1$  and  $d_2$  are the deviations after quality control

区域有块高度达到11 km 的高层云,但由于其强度非常弱,因此也刚好达到雷达灵敏度的临界点,云体内部若干的回波点被误判为无回波而导致缺测.从质量控制后的反射率因子可见,A和C区域的孤立噪声点及径向干扰被有效滤除,而D区域尺度很小的碎积云则被完好的保留,B区域的弱高层云内缺测点也被合理地填补.这个例分析可见,扩展后的K-领域频数能够有效滤除噪声和径向干扰,填补云内部的缺测回波,并能够很好地保留回波细节和小尺度的云回波.

如图7为2014年7月7日那曲11:24-12:37观测的对流云回波,由质量控制前的回波强度和退偏振比( $a_1$ 和 $b_1$ )可见,低空存在一层明显的散点状的

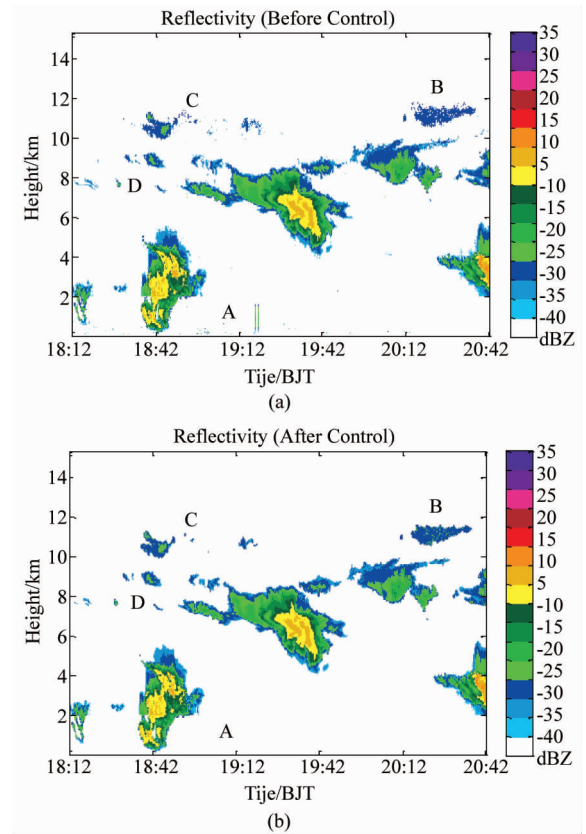


图6 2014年6月8日阳江18:12-20:42噪点—径向干扰杂波的滤除效果(a)质量控制前反射率因子,(b)为质量控制后反射率因子

Fig. 6 Filtering effects of noisy clutter and radial interference echo at 18:12-20:42 on June 8 in 2014 at Yangjiang. (a) Reflectivity before quality control. (b) Reflectivity after quality control

悬浮物杂波,它们的回波强度低于-25 dBZ,退偏振比高于-12 dB.从质量控制后的效果( $a_2$ 和 $b_2$ )可见,低空的悬浮物杂波被很有效的滤除,同时一块被悬浮物混杂的弱层云和积云被有效的保留.对于12:10后的积云和对流云回波也被完整保留,没有出现误识别的情况.

#### 4 结论

固态、多观测模式的毫米波云雷达具有长时间、稳定的观测能力,同时能较好满足不同云类的探测.2014~2015年,中国气象科学研究院利用国内首部固态、多观测模式Ka波段云雷达在我国华南地区和青藏高原地区进行了观测试验.文章针对这种体制雷达数据中的速度模糊、噪点-径向干扰杂波和悬浮物杂波问题,研究了质量控制方法,并进行了效果检验.得到了如下结论:1)本文提出的速度退模糊方法具有较好的成功率和稳定性,15次不同云过程



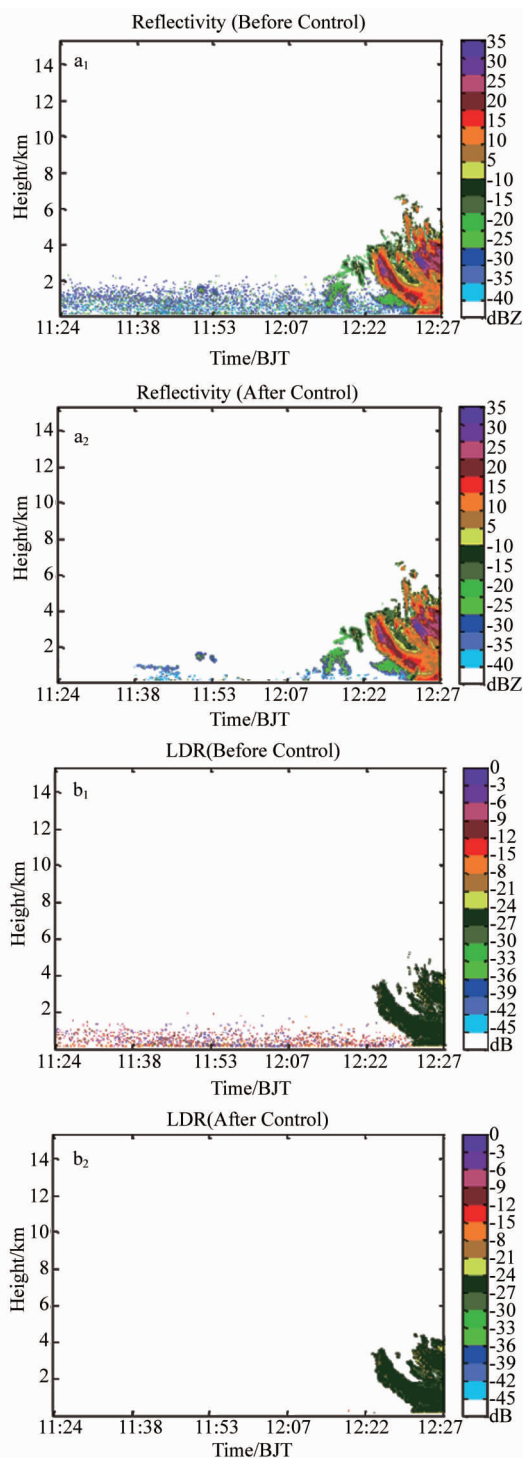


图7 2014年7月7日那曲11:24-12:37回波的悬浮物杂波滤除效果,左列为质量控制前,右列为质量控制后  
Fig.7 Effects of plankton echo removing at 11:24-12:37 on July 7 in 2014 at Naqu. ( $a_1$ ), ( $b_1$ ) are echoes before quality control, ( $a_2$ ), ( $b_2$ ) are echoes after quality control

的检验中,成功率都达到了100%。2)过快的下落速度和过强的上升气流均能引起速度模糊,速度模糊会使径向速度被低估而谱宽被高估,偏差大时可使雷达资料不可用,而提出的退模糊方法能准确地判

断出模糊类型,并正确纠正平均多普勒速度和谱宽。3)扩展和参数择优试验后的K领域频数法能较好地滤除云雷达回波中的噪声,并对缺测进行补值,另外较好地保留了回波细节和小尺度的碎云。Z-LDR阈值法能滤除悬浮物回波并保留气象回波,能使低云不受污染。

## References

- [1] Clothiaux E E, Miller M A, Albrecht B A, *et al.* An evaluation of a 94-GHz radar for remote sensing of cloud properties [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1995, **12**: 201 - 229.
- [2] O'Connor E J, Hogan R, Illingworth A J. Retrieving stratocumulus drizzle parameters using Doppler radar and Lidar [J]. *J. Appl. Meteor.*, 2005, **44**: 14 - 27.
- [3] Görsdorf 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]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2015, **32**: 675 - 690.
- [4] Kyosuke H, Hashiguchi H, Wakayama T, *et al.* A 35-ghz scanning doppler radar for fog observations [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2003, **20**: 972 - 986.
- [5] Stephen M S, Ecklund W L, Firda J M, *et al.* Particle size estimation in ice-phase clouds using multifrequency radar reflectivity measurements at 95, 33, and 2.8 GHz [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1999, **38**: 5 - 28.
- [6] Stephens G L, Vane D G, Boain R J, *et al.* The cloudsat mission and the a-train new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, **83**: 1771 - 1790.
- [7] Moran K, Sergio P, Chris F, *et al.* A motion-stabilized w-band radar for shipboard observations of marine boundary-layer clouds [J]. *Boundary Layer Meteorology.*, 2012, **143**: 3 - 24.
- [8] Kollias P, Miller M A, Luke E P, *et al.* The atmospheric radiation measurement program cloud profiling radars: second-generation sampling strategies, processing, and cloud data products [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2007, **24**: 1199 - 1214.
- [9] CUI Zhe-Hu, CHENG Ming-Hu, WU Qiu-Li, *et al.* A technology of fast median filtering and its application to data quality control of Doppler radar [J]. *Plateau Meteor.* (崔哲虎, 程明虎, 乌秋力, 等. 快速中值滤波方法及其在 Doppler 雷达资料处理中的应用. *高原气象*). 2005, **24** (5): 727 - 733.
- [10] MA Zhong-Yuan, ZHU Chun-Qiao, LIU Xi-Ming, *et al.* Study on CINRAD radar data quality control methods [J]. *Meteor. Monthly.* (马中元, 朱春巧, 刘熙明, 等. CINRAD 雷达数据质量控制方法初探. *气象*). 2010, **36** (8): 134 - 141.
- [11] Boren T A. An artificial intelligence approach to Doppler radar velocity dealiasing [C]. In 23<sup>rd</sup> Conference on Radar Meteorology, Boston: American Meteor. Soc., 1986: 107 - 110.
- [12] Luke E P, Kollias P, Johnson K L, *et al.* A technique for the automatic detection of insect clutter in cloud radar returns [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2008, **25**: 1498 - 1513.

- [13] LIU Li-Ping, XIE Lei, CUI Zhe-Hu. Examination and application of Doppler spectral density data in drop size distribution retrieval in weak precipitation by cloud radar[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (刘黎平, 谢蕾, 崔哲虎. 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. *大气科学*). 2014, **38** (2): 223 - 236.
- [14] Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, *et al.* Comprehensive radar observations of clouds and precipitation in the Tibetan Plateau and preliminary analysis of cloud properties[J]. *J. Meteor. Res.*, 2015, **29**(4): 546 - 561.
- [15] Monique P, Sy A, Garrouste A, *et al.* Statistical characteristics of the noise power spectral density in UHF and VHF wind profilers [J]. *Radio Scienc*, 1997, **32** (3): 1229 - 1247.
- [16] HU Ming-Bao. Research on data processing and application of wind profile radar [D]. 2012, Nanjing University of Information Science & Technology (胡明宝. 风廓线雷达数据处理及应用研究. 南京信息工程大学). 2012.
- [17] ZHOU Xu-Hui. Wind profiling radar power spectral density data processing algorithms [D]. Nanjing University of Information Science & Technology (周旭辉. 风廓线雷达功率谱密度数据处理算法研究. 南京信息工程大学). 2011.
- [18] Shupe M, Kollias P, Matrosov S Y, *et al.* Deriving mixed-phase cloud properties from Doppler radar spectra [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2004, **21**: 660 - 670.
- [19] LIANG Hai-He, ZHANG Pei-Yuan, GE Run-Sheng. Study of data processing of wind fields from Doppler radar [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (梁海河, 张沛源, 葛润生. 多普勒天气雷达风场退模糊方法的研究. *应用气象学报*). 2002, **13**(5): 591 - 601.
- [20] Zheng J F, Zhang J, Zhu K Y, *et al.* Gust front statistical characteristics and automatic identification algorithm for CINRAD [J]. *J. Meteor. Res.*, 2014, **28** (4): 607 - 623.
- [21] Clothiaux E E, Ackerman T P, Mace G G, *et al.* Objective determination of cloud heights and radar reflectivities using a combination of active remote sensors at the ARM CART sites [J]. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39**: 645 - 665.
- [22] Geerts B, Miao Q. The use of millimeter Doppler radar echoes to estimate vertical air velocities in the fair-weather convective boundary layer [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2005, **22**: 225 - 246.