

文章编号: 2096-1618(2018)02-0129-08

地基 Ka 波段云雷达数据质量控制方法研究分析

肖佩¹, 霍娟², 毕永恒²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100000)

摘要:针对地基单发双收偏振工作模式的 Ka 波段毫米波云雷达 2014 年全年的观测资料, 统计分析北京地区非云回波的分布情况, 提出噪点-径向干扰杂波与悬浮物杂波的质量控制方法, 并对该方法效果进行了检验分析。统计结果表明, 杂波有明显的季节和高度分布特征; 同时, 质量控制的方法具有较好的成功率与稳定性。无云天空情况下, 杂波抑制成功率可达 99%, 对于有云天气情况, 能够较好滤除低空悬浮物杂波对云回波的影响, 消除突变点干扰, 同时保留云回波。

关键词: Ka 波段毫米波雷达; 噪点-径向干扰杂波; 悬浮物杂波; 质量控制

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.02.005

0 引言

云在地球的水汽输送中起着极为重要的作用, 同时云的辐射效应在大气辐射收支平衡中有着显著影响作用, 所以云是研究天气系统和气候变化时需要考虑的一个重要因素^[1-2]。模式研究表明, 云的净辐射决定了地气系统是加热还是冷却^[3]。但是云和天气以及气候变化之间的关系和相互作用还存在着许多有待研究的部分^[4]。IPCC(1995)评估报告指出, 云及云与天气系统之间的相互作用是进行气候变化预测时的不确定因素。所以, 想要进一步了解云与天气系统之间的相互作用, 需要知道更加细致的云宏观和微观等特征信息, 因此, 对云信息的准确连续的探测是非常重要的^[2]。

由于毫米波雷达的波长较短, 对云中的云滴粒子、降水粒子和冰晶粒子有较高的探测能力; 同时, 大气中的水汽对毫米波雷达发射的电磁波衰减很小, 因而毫米波长电磁波能够准确探测多层云的结构, 也能够完整探测发展深厚的云层, 毫米波雷达体积小, 可用于机载和星载探测^[5-10]。毫米波雷达可以长时间连续地对云进行观测。虽然中国已经有了自主研发的毫米波雷达, 但是相关研究和应用还在初期, 主要工作为利用毫米波雷达进行云的观测, 积累观测样本数, 并利用观测资料进行云的相关研究工作^[11]。

虽然所用雷达系统的稳定性和长时间连续观测的能力很好, 但是由于功率较低, 并且针对不同云观测条件设计了不同的观测模式, 在观测过程中受到杂波信号

的干扰, 其中主要包括雷达噪点-径向干扰杂波和非气象回波的干扰。云雷达观测到的非气象杂波主要是低空的悬浮物回波, 通常是大气中的雾霾、灰尘、花粉和昆虫等。Gorsdorf 对一部 36 GHz 雷达的退偏振因子做过统计, 不同回波的退偏振因子的值的分布范围不同^[12]。同时研究表明, 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^[13]。雷达噪点-径向干扰杂波主要是由雷达硬件引起, Clothiaux E 和 Geerts B 对其特征进行了统计分析, 可知其分布范围在低空, 且运动速度小, 大概在 0.5 ± 0.2 m/s, 对于雷达噪点-径向干扰杂波, 回波一般不连续, 呈孤点状, 此类杂波可直接用滤波的方式滤除^[14-16]。因此, 对雷达数据进行质量控制可将退偏振比和反射率因子作为参考量。

研究对象为位于北京市中国科学院大气物理研究所科(39.98 °N, 116.3 °E)的 Ka 波段毫米波雷达所提供的观测数据。由于雷达回波受到雷达旁瓣杂波污染及低空悬浮粒子污染, 对低空云回波的统计研究造成影响, 基于 2014 年累积雷达观测资料, 针对回波中的污染, 对非云回波的分布情况及其与云回波之间的分布差异进行统计分析, 并根据其特点提出去除噪声的质量控制方法并通过实验对方法滤除效果进行检验和分析, 为资料的后续应用及研究奠定基础。

1 仪器资料介绍

所用的雷达资料为中国科学院大气物理研究所与 14 所联合研制生产的 Ka 波段毫米波雷达, 发射机为磁控管脉冲发射机, 工作模式为单发双收, 发射水平脉

冲,接收通道分为垂直接收通道和水平通道;位于北京市朝阳区中国科学院大气物理研究所科研楼顶(39.98 °N,116.3 °E),于 2011 年开始进行观测工作。2012 年开始进行长时间的连续观测,2013 年 5 月-2013 年 8 月对信号处理器进行升级,校准后继续进行连续观测。至今仍然继续全天候的工作,已取得了长时间连续的观测数据。据统计,2014 年全年的平均观测时间可达88%。该雷达的基本参数如表 1 所示。

表 1 Ka 波段毫米波雷达基本参数

参数	参数值
工作频率/GHz	35.075
峰值功率/kW	28
脉冲宽度	0.2
天线直径/m	1.5
天线增益/dB	>50
波束宽度/°	0.4
最大探测距离/km	40
距离分辨率/m	30
时间分辨率/s	0.3
发射机型式	磁控管脉冲发射机
基本输出产品	Z、V、W、LDR

由表 1 可知,使用的 Ka 波段毫米波雷达的工作频率为35.075 GHz,最大探测距离为40 km,距离分辨率为30 m(一个距离库为30 m),时间分辨率为0.3 s(每0.3 s发射一个脉冲),基本输出产品有 4 个:雷达基本反射率因子(Z)、径向速度(V)、谱宽(W)、退偏振比(LDR),其中,由于雷达采用了偏振技术, LDR 为其特有的输出产品,也是进行粒子特征判断的主要依据。观测模式有 4 种,定点观测:主要针对某一个方位中经过的云,设定固定的仰角和方位角,只对固定方向的云进行观测;扇扫:主要针对某一片区域的云,设定一定的方位角区域,对该区域的云进行扫描;立体 RHI:针对某一方位云进行扫描,通过仰角的变化,观测该方位上云的高度云内信息(反射率因子、速度、谱宽、退偏振比)的变化;PPI:针对整个观测范围内的云,扫描观测范围内云的分布情况。利用的雷达资料为垂直探空资料,垂直探空模式(仰角 90°)为定点观测中的一种模式,固定仰角为 90°对雷达上空进行连续定点观测,资料连续性强。

2 数据处理

由于有云和无云的判断只能通过雷达观测结果进

行手动筛选,因此,在确定滤波方法之前的需要进行个例筛选,进行非云回波的分布特征统计。结合雷达回波情况和全天空成像仪的显示结果,对雷达回波资料进行了筛选,选择了不同季节的无云天气回波样本进行统计分析,选取的数据基本覆盖全年 4 个季节,能体现不同季节杂波的分布特征,根据非云回波的分布特征,提出质量控制的方法,并分析其可行性与准确性。

根据雷达公式:

$$P_r = \frac{\pi^5 C}{1024 \ln 2} \left(\frac{P_t \tau G}{\lambda^2} \right) \left(|K|^2 L \frac{Z}{R^2} \right) \tag{1}$$

其中, P_r 为雷达接收功率/kW; P_t 为雷达发射功率/kW; G 为天线增益, C 为传播速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; τ 为脉冲宽度; R 为目标距雷达的距离/km; Z 为有效反射率因子/dBZ; L 为系统损耗; $|K|^2$ 为复指数模的平方;

LDR 是由水平偏振波的偏振反射因子 Z_{HH} 和 Z_{HV} ,经过双极化处理后得到,用于衡量雷达观测到的粒子的退偏振程度,以揭示粒子的某些特性;如粒子的形状、粒子的不规则性、热力学相态/介电常数等。当云粒子的主轴与发射电磁波的电场方向不平行时,一小部分能量将会被退偏振而以与发射偏振波正交的偏振状态出现^[17]:

$$L_{dr} = 10 \times \lg \left(\frac{Z_{HV}}{Z_{HH}} \right) \tag{2}$$

其中, Z_{HH} 为发射和接收都为水平偏振波/dBZ; Z_{HV} 为发射波为水平偏振波,接收为垂直偏振波/dBZ。

根据公式(1),功率谱和反射率因子之间的关系式,同时结合 Luke E P 对昆虫等杂波功率谱的统计分析结果可知,杂波分布范围高度较低,高度范围变化不大,粒子的反射率因子值较小,悬浮物等杂波的普遍特征,反射率因子的一般较小^[18]。根据公式(2),杂波粒子形状多变,多不规则,偏振状态明显,因此 LDR 较高。

对所有无云的天气个例中的 LDR (退偏振比)和 Z 的分布情况进行了统计,统计样本选择的无云天气个例分别为 2014 年 01 月 01 日-2014 年 12 月 31 日观测且连续 1 h 无云的数据,每个小时的观测文件数为 12 个,每个文件所有廓线数为 1024,选取时间段囊括了 0 ~ 24 h 不同时间段不同天气状况下的无云数据。首先,由于杂波干扰主要来自雷达自身旁瓣污染和晴空湍流以及昆虫和霾等大气浮游粒子,发生的高度离地较近,对于一定高度以上的云回波不会造成影响,因此,在数据处理时需要进行高度限制。所以对无云天气情况下有效回波值出现的高度分布情况进行了统计,如图 1 所示。

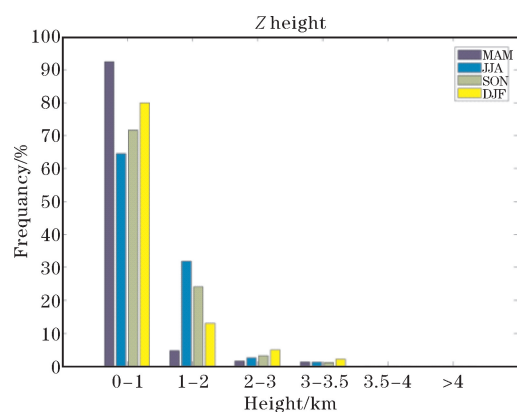
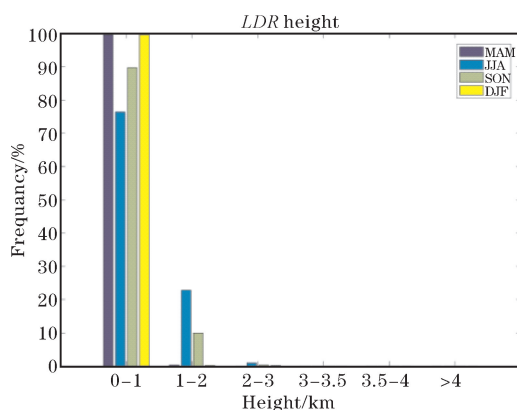
(a) 全天空无云的情况下, Z 值的高度分布情况(b) 全天空无云的情况下, LDR 值的高度分布情况图1 春(MAM)夏(JJA)秋(SON)冬(DJF)的
无云天气情况下, Z 和 LDR 的高度分布情况

图1分季节统计了无云天气情况下反射率因子随高度的分布情况,在无云的情况下反射率因子的分布随高度的增加不断减少,其中横坐标表示分布的高度,纵坐标表示回波的发生率。由图1(a)可知,春季(MAM),杂波来源基本为雷达本身硬件的旁瓣杂波干扰和噪点及雾霾,因此杂波分布高度较低,主要分布在1 km以下,0~1 km占比例达90%以上,只有不到10%的数据分布在1~3.5 km;夏季(JJA),雾霾天气较少,空气湿度较大,杂波来源还包含底层大气中部分水汽影响,因此杂波高度主要分布范围为0~2 km,其中0~1 km占比例大于60%,1~2 km占比例约30%,2~3.5 km占比例不到10%;秋季(SON),污染源主要为雾霾和昆虫和水汽影响,杂波主要分布范围为0~2 km,其中0~1 km占比例大于70%,1~2 km占比例大于20%,2~3.5 km占比例不到10%;冬季(DJF),主要受雾霾天气影响以及雷达本身硬件问题干扰,杂波主要分布在1 km以下,0~1 km占比例约80%,1~2 km占比例大于10%,只有不到10%的数据分布在2~3.5 km。图1(b)统计了不同季节退偏振比随高度分布情况,春季,杂波主要分布在1 km以下,由图1(a)可知,0~1 km占比例达99%以上,只有不到1%的数据

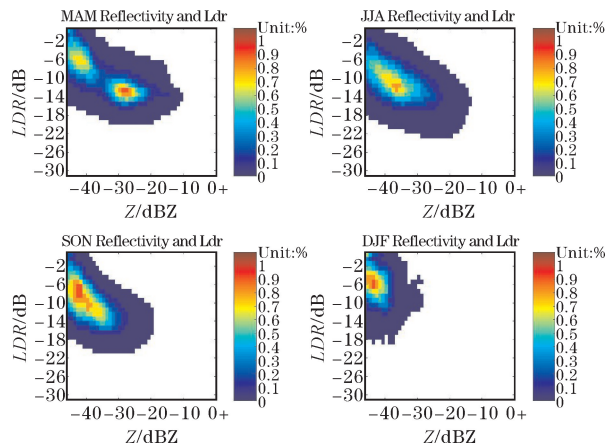
分布在1~2 km;夏季,主要分布范围为0~2 km,其中0~1 km占比例约79%,1~2 km占比例约20%,2~3 km占比例约1%;秋季,主要分布范围为0~2 km,其中0~1 km所占比例大于80%,1~2 km所占比例大于10%,2~3 km所占比例不到1%;冬季,杂波主要分布在1 km以下,0~1 km占比例约99%,1~2 km占比例不到1%。

根据统计结果可知,虽然不同季节的分布高度有所不同,但是杂波分布高度主要集中在2 km以下。 Z 的分布高度与 LDR 的分布高度并非相同,据统计, Z 和 LDR 同时存在的情况所占比例51.66%和只有 Z 有效的情况所占比例为48.34%,两者所占比例相差不大,这说明,在回波由 Z 值存在的时候可能出现无 LDR 值存在的情况,导致这种情况发生的原因因为 LDR 对回波强弱变化敏感,当回波过弱,垂直通道信噪比不够,探测不到 LDR 值,特别对于春秋冬3季而言,杂波污染来源多为雷达本身及雾霾,回波较弱,对于回波过弱的地方垂直通道信噪比不够,常常无法测到 LDR 数据,因此会出现 Z 和 LDR 并非一一对应的情况,使用云雷达观测数据滤波时需考虑这部分数据的干扰。

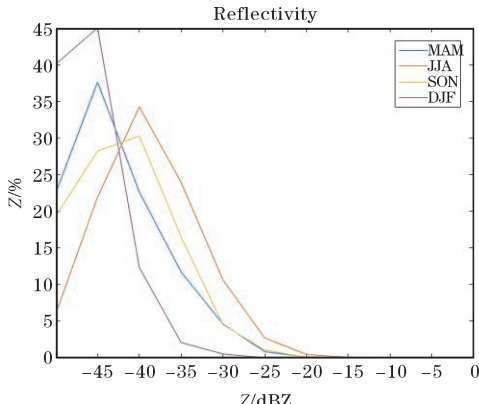
根据图1(a),为滤除杂波干扰,高度阈值的设定为3.5 km,即对3.5 km以下的数据进行滤波处理,这样既能保证底层杂波滤除,又能保证高空中回波较弱的云不受影响。

根据对杂波高度分布的统计结果,进一步对该范围内杂波的 Z 和 LDR 的分布情况进行统计,由于杂波的 Z 值和 LDR 无明显的高度变化特征,因此,统计时主要针对其分布范围进行统计。统计结果如图2所示。

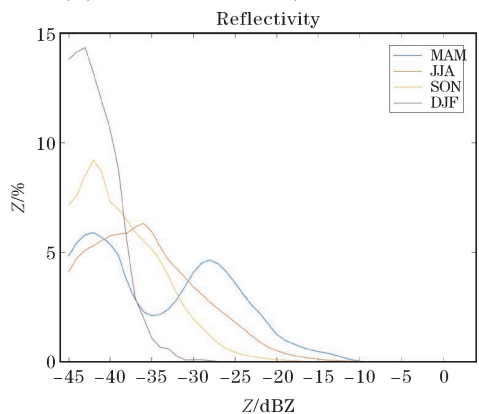
由图2(a)可知,春季,有2个分布集中的区域,一个为 LDR 分布在-2~-10 dB,同时, Z 值分布在-45~-35 dBZ;另外一个为 LDR 为-10~-16 dB,同时, Z 在-30~-20 dBZ。夏季,杂波值的主要分布范围为 LDR 在-4~-16 dB, Z 在-45~-25 dBZ。秋季,杂波值的主要分布范围为 LDR 在-4~16 dB, Z 在-45~-30 dBZ。冬季,杂波值的主要分布范围为 LDR 在0~-12 dB, Z 在-45~-35 dBZ。为得到更加明确的分布范围结果,分别单独统计了 Z 和 LDR 的分布情况。其中,图2(c)为 Z 的分布情况,由图可知,春季和夏季的 Z 值主要分布在-45~-15 dBZ,秋季, Z 值主要分布在-45~-25 dBZ,冬季, Z 值主要分布在-45~-30 dBZ。图2(d)为 LDR 的分布情况,由图可知,春夏秋冬四个季节的 LDR 的分布情况相似,基本大于-18 dB。图2(b)为只有 Z 值有效的情况下,其值的分布情况,由图可知,春夏秋3个季节的 Z 的分布情况相似,基本小于-25 dBZ,冬天, Z 值基本小于-30 dBZ。



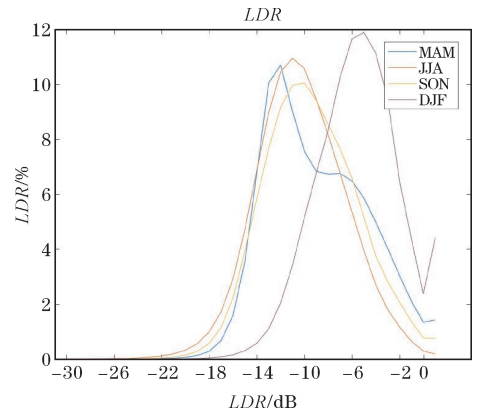
(a) Z 和 LDR 同时有效的分布情况



(b) 只有 Z 值有效情况下, Z 的分布情况



(c) Z 和 LDR 同时有效的情况下, Z 值的分布情况

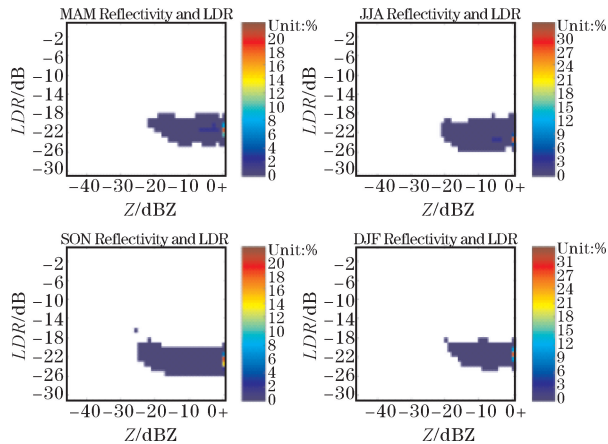


(d) Z 和 LDR 同时有效的情况下, LDR 值的分布情况

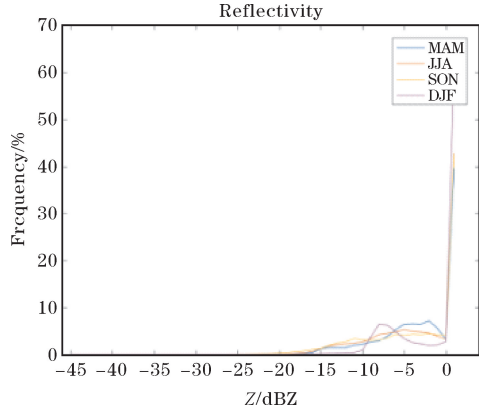
图2 全天空无云的情况下,春(MAM)夏(JJA)秋(SON)冬(DJF)4个季节 Z 和 LDR 分布情况

由此可知,由于春季和夏季雾霾天相较于秋冬少,春季和夏季 Z 和 LDR 的分布情况相类似,大气底层悬浮物多为低空尘土、昆虫、杨絮和柳絮等,污染源种类较多,同时会受到底层水汽粒子干扰,所以 Z 值和 LDR 分布范围较大;秋冬大气底层悬浮物多为雾霾以及低空尘土,观测所得 Z 值相较于春夏季小,且值的分布范围小于春夏季。

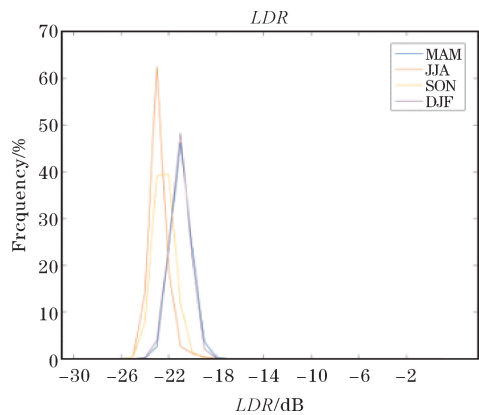
除此之外,低空有云天气情况下,对云回波的 Z 和 LDR 的分布情况进行了统计,统计结果如图3所示。



(a) Z 值和 LDR 的同时分布情况



(b) Z 值的分布情况



(c) LDR 的分布情况

图3 低空有云天气情况下,春(MAM)夏(JJA)秋(SON)冬(DJF)4个季节云回波的 Z 和 LDR 的分布情况

图 3 为低空有云的情况下,春(MAM)夏(JJA)秋(SON)冬(DJF)4 个季节低空云回波内部 Z 和 LDR 的分布情况。图 3(a)中,横坐标为 Z 的分布范围,纵坐标为 LDR 的分布范围,根据统计结果, Z 的分布范围大致大于 -20 dBZ, LDR 小于 -18 dB。图 3(b)可知,根据统计结果,春夏秋 3 个季节的分布情况相似, Z 值 $-20 \sim 0$ dBZ 占比例 50%, $Z > 0$ dBZ 占比例大于 40%,冬季, Z 值从 $-20 \sim 0$ dBZ 占比例 40%, $Z > 0$ dBZ 占比例约 60%。图 3(c)可知,根据统计结果,4 个季节云回波的 LDR 值分布范围都基本在 $-18 \sim -26$ dB。

根据图 2 和图 3 分别对杂波和低空云回波的统计,根据不同季节的分布特点进行阈值设定。其设定结果如表 2 所示。

表 2 不同季节滤波阈值设定

季节参量	Z / dBZ	LDR / dB
春(MAM)	-15	-18
夏(JJA)	-15	-18
秋(SON)	-25	-18
冬(DJF)	-30	-18

根据表 2,春季和夏季,回波 Z 和 LDR 同时有效时, Z 的阈值设定为 -15 dBZ, LDR 的阈值设定为 -18 dB,只有 Z 有效时, Z 的阈值设定为 -30 dBZ;秋季,回波 Z 和 LDR 同时有效时, Z 的阈值设定为 -25 dBZ, LDR 的阈值设定为 -18 dB,只有 Z 有效时, Z 的阈值设定为 -30 dBZ;冬季,回波 Z 和 LDR 同时有效时, Z 的阈值设定为 -30 dBZ, LDR 的阈值设定为 -18 dB;只有 Z 有效时, Z 的阈值设定为 -35 dBZ。

表 3 不同月份的个例质量控制效果显示

月份	杂波库数	阈值设定	成功率 /%	中值滤波	成功率 /%
1 月	9 797 879	9 796 433	99.985	9 797 868	99.999
2 月	5 304 570	5 303 912	99.988	5 304 570	100
3 月	12 170 068	12 163 784	99.948	12 170 032	99.999
4 月	8 768 288	8 728 264	99.544	8 764 485	99.957
5 月	8 153 563	7 952 562	97.535	8 063 836	98.900
6 月	6 878 030	6 817 736	99.123	6 876 699	99.981
7 月	6 407 129	6 373 978	99.483	6 406 427	99.989
8 月	11 962 680	11 904 033	99.510	11 961 469	99.990
9 月	7 106 462	7 081 579	99.650	7 106 139	99.995
10 月	5 535 093	5 523 686	99.794	5 535 023	99.999
11 月	6 375332	6 370 317	99.921	6 375 288	99.999
12 月	6 417 515	6 417 112	99.994	6 417 515	100

表 3 中,分别统计了 1-12 月的杂波库数,通过阈值设定进行处理后所滤除掉的杂波库数和成功率及在此基础上进行中值滤波后滤除的杂波库数和成功率。由表 3 可知,通过设定阈值滤波的成功率至少可达 97.5%,该部分滤除的是悬浮物杂波和混合在悬浮物杂

根据雷达回波数据的连续变化性,对于雷达回波中的雷达噪点-径向干扰杂波、突变点和缺省数据,可再进行一次滤波。

$$\begin{array}{ccccccc} Z_{i-\frac{m-1}{2},j+\frac{n-1}{2}} & \cdots & Z_{i,j+\frac{n-1}{2}} & \cdots & Z_{i+\frac{m-1}{2},j+\frac{n-1}{2}} \\ \cdots & & \cdots & & \cdots \\ Z_{i-\frac{m-1}{2},j} & \cdots & Z_{i,j} & \cdots & Z_{i+\frac{m-1}{2},j} \\ \cdots & & \cdots & & \cdots \\ Z_{i-\frac{m-1}{2},j-\frac{n-1}{2}} & \cdots & Z_{i,j-\frac{n-1}{2}} & \cdots & Z_{i+\frac{m-1}{2},j-\frac{n-1}{2}} \end{array}$$

图 4 $m \times n$ 的去噪补值窗口示意图

即设定一个 $m \times n$ 的滑动窗口,比较当前点的回波值与周围邻域回波值之间的相近程度,如果相近则保留,否则将该点值由邻域中各点值的中值代替,让该点的回波值接近的真实值,从而消除滤波后遗留的孤立噪声点,同时能达到对滤除掉的云内部值进行补值保持云回波的完整性的效果。既可以消除突变点的干扰又能保证回波数据的完整性和合理性。文中值滤波的窗口选择的 3×3 ,既保证了孤点被滤除,又能保证云体的完整性。

3 结果分析

结合地基云雷达和全天空成像仪的显示结果,挑选出每个月中连续 1 h 无云的天气,根据确定滤波阈值进行滤波处理并应用于实例中,选取的个例天数超过 200 天,个例数超过 100 000 个,杂波抑制效果显示如表 3 所示。

波里的部分噪点-径向杂波;在此基础上进行中值滤波,目的是为了滤除剩余的小部分悬浮物杂波和独立存在的噪点-径向杂波,根据结果,不仅可以提高成功率,使成功率接近 100%,同时可以消除云回波中的突变点对云回波的整体影响;2 月和 12 月,最终的杂波抑制成功

率可达100%,其他月份的成功率都接近100%。结果表明,该方法效果良好且具有较高稳定性。

对于有云的天气情况,根据滤波后的结果,分别对4个季节的滤波后的回波进行了效果统计,统计结果如表4所示。

表4中,分别统计了有云天气情况下,春夏秋冬4个季节的杂波库数,通过阈值设定进行处理后所滤除掉的杂波库数和成功率。由表4可知,通过设定阈值滤波的成功率至少可达99%。结果表明,该方法效果良好且具有较高稳定性。

表 5 不同季节的降水天气情况下质量控制效果

季节	滤除杂波库数	总杂波库数	总回波波库数	降水回波发生率 / %	成功率 / %
春季	39533	39533	283522074	99.98	100
夏季	720544	720544	382846995	99.81	100
秋季	1235329	1235329	515703658	99.76	100
冬季	18173	18173	240618293	99.99	100

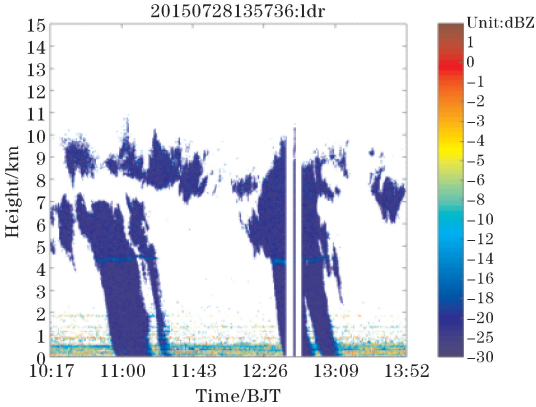
表5中,分别统计发生降水时非云回波对降水回波的影响程度,并统计了其滤除效果。由表5可知,发生降水时,杂波对降水回波基本不造成影响。由于北京地区降水多为层状云降水,发生降水时,云降水存在明显的冰水转换区(零度层亮带),该区域粒子的相态形状发生变化,粒子的相态形状分布情况复杂。不同季节零度层亮带出现的高度变化较大,夏季,气温较高,零度层亮带较高,可达4 km以上,冬天,北京地区气温低,零度层亮带出现高度较低,有时出现高度只有1 km左右,由于零度层亮带附近粒子的形状变化零度层亮带附近的LDR波动较大,偏振情况较降水回波明显,LDR较大;为避免其影响,对降水回波只进行中值滤波,同时,根据统计的滤除成功率可知,在发生降水时杂波的滤除成功率可达100%。

为具体分析滤波效果,进行了个例分析,选取2015年7月28日10:17–13:52的雷达数据,这段时间的雷达回波包含了降水回波和云回波、强回波和弱云回波等复杂的回波情况,处理结果如图5所示。

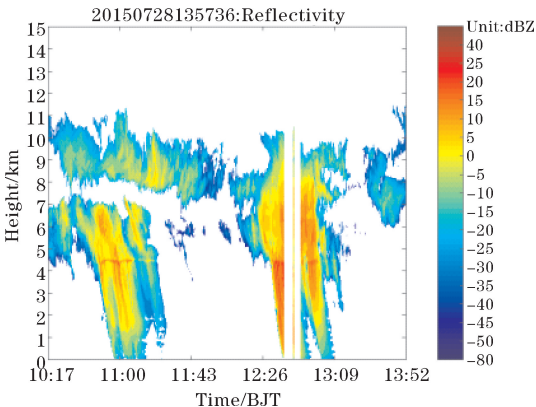
表 4 不同季节的有云天气情况下质量控制效果

季节	剩余杂波库数	总杂波库数	成功率 / %
春季	46066	70777686	99.93
夏季	77836	82095234	99.96
秋季	57784	51049279	99.89
冬季	6209	13933410	99.96

对于发生降水的天气情况,根据滤波后的结果,分别统计发生降水时杂波对降水回波的影响程度,并统计了其滤除效果,结果显示如表5所示。



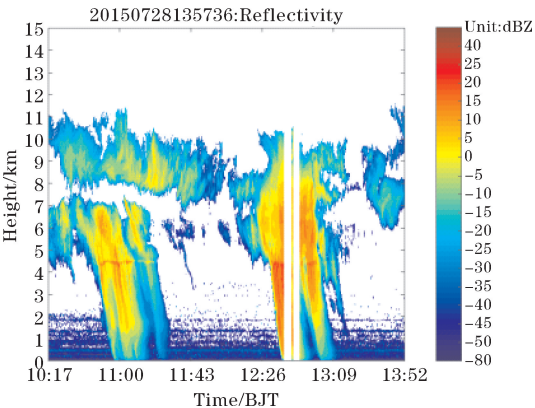
(b) 原始 LDR 回波图



(c) 处理后的 Z 回波图

图 5 回波图

图5中个例选择了2015年7月28日10:17–13:52的雷达数据,其中包括了无云、低空有云和降水3种不同情况天气个例。其中图5(a)中10:17–10:50、11:40–12:26为低空无云,高空存在云回波的情况,11:00–11:30、12:26–13:09,基本处于降水阶段,降水结束后出现了短时间的低云情况,根据图5(b)的LDR回波



(a) 处理前的原始 Z 回波图

图可知,底层回波中非云回波和降水回波的 LDR 差别明显,且能明显分辨出零度层亮带出现在4.5 km左右,由于高空部分云回波过弱或高度过高,垂直信号通道信噪比不够,没有 LDR 值,只有部分云回波有 LDR 值,处理结果如图5(c)所示,低空杂波完全滤除,同时完全保留高空的云回波,同时孤立点也被完全滤除,保证了云回波的完整性。

5 结论与讨论

利用雷达回波中云回波与干扰杂波之间的分布特征差异,对中国科学院大气物理研究所 Ka 波段毫米波雷达 2014 年观测资料进行质量控制。通过统计分析无云情况下的杂波分布特征,得到其高度分布范围在3.5 km以下及其 Z 和 LDR 的分布特征,再对地面到3.5 km内云回波的 Z 和 LDR 分布特征进行统计分析,从而确定滤波阈值,使杂波被滤除,同时保留云回波。结果表明:

(1) 杂波高度分布范围在3.5 km以下。春季,杂波主要分布在1 km以下,其所占比例达90%以上;夏季,杂波主要分布范围为0~2 km,其中0~1 km占比比例大于60%,1~2 km占比比例约30%;秋季,杂波主要分布范围为0~2 km,其中0~1 km占比比例大于70%,1~2 km占比比例大于20%;冬季,杂波主要分布在1 km以下,0~1 km占比比例约80%。

(2) 不同季节的杂波的 Z 、 LDR 分布集中的区域各不相同。春季,有2个分布集中的区域,其中一个区域的 LDR 分布在-2~-10 dB, Z 值分布在-45~-35 dBZ;另外一个区域的 LDR 值分布在-10~-16 dB, Z 在-30~-20 dBZ。夏季,杂波值的主要分布范围为 LDR 在-4~-16 dB, Z 在-45~-25 dBZ。秋季,杂波值的主要分布范围为 LDR 在-4~-16 dB, Z 在-45~-30 dBZ。冬季,杂波值的主要分布范围为 LDR 在0~-12 dB, Z 在-45~-35 dBZ。

(3) 进行统计分析过程中发现, Z 值与 LDR 值并非一一对应,回波无 LDR 时 Z 值也可能存在,对该部分回波进行了统计,不同季节其分布范围也有所不同,春夏秋3个季节的 Z 的分布情况相似,基本小于-30 dBZ,冬季, Z 值基本小于-35 dBZ。

(4) 据统计,对于边界层有云的情况,由于低层水汽粒子的影响,云回波的 Z 值与杂波 Z 值在-20~-15 dBZ和云回波 LDR 值与杂波 LDR 在-20~-18 dB部分发生重叠,不利于区分,但是该部分值的比例小,根据滤波成功率的统计结果可知,该部分对整体滤波造成影响的效果可忽略不计,滤波方法既能准确地滤除非云

回波的干扰,也能保存云回波,为后续云研究工作奠定了基础。

(5) 对于发生降水的情况,回波衰减严重, Z 值远远大于杂波,杂波对降水回波影响可忽略不计,根据处理结果,降水回波被完全保留。

从滤除效果看,滤波的成功率可达99%,虽然杂波基本滤除,但是极少数回波较弱的云回波同时被滤除,特别对于较弱云回波的边界部分有滤除的效果,但不影响云的整体效果。说明文中杂波滤除方法具有较好的稳定性和可利用性,能对杂波滤除起到良好效果。

参考文献:

- [1] Markus Quante. The role of clouds in the climate system[J]. Journal de Physique, EDP Sciences, 2004, 12.
- [2] 宗蓉. 毫米波雷达对云宏微观特性的探测和研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013.
- [3] Stephens, G L. Cloud Feedbacks in the Climate System: A Critical Review[J]. J. Climate, 2005, 18: 237-273.
- [4] Stephens, G L, S C Tsay, et al. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climate feedback[J]. J. Atmos. Sci., 1990, 47: 1742-1752.
- [5] Lhermitte, R. A 94-GHz Doppler radar for cloud observations[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 1987, 4: 36-48.
- [6] Kollias, P, E E Clothiaux. Millimeter wavelength radar: New frontier an atmospheric cloud and precipitation research[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc. 2007: 1608-1624.
- [7] Kropfli, R A, R D Kelly. Meteorological research applications of MM-Wave radar Meteorol[J]. Atmos. Phys. 1996, 59: 105-121.
- [8] Moran K P, B E Martner, M J Post. An Unattended Cloud-Profiling Radar for Use in Climate Research[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1998, 79: 443-455.
- [9] Racette, P E, G M Heymsfield, et al. The cloud radar system[J]. Preprints, 31st conf. on Radar Meteorology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., 2003: 237-240.
- [10] Fox, N I, A J Illingworth. The potential of spaceborne cloud radar for the detection of stratocumulus clouds[J]. J. Appl. Meteor., 1997, 36: 676-687.
- [11] Fox, N I, A J Illingworth. The retrieval of stratocu-

- mulus cloud properties by ground based cloud radar[J]. J. Appl. Meteor. ,1997 ,36:676–687.
- [12] Lhermitte,R. Attenuation and scattering of millimeter wavelength radiation by clouds and precipitation [J]. J. Atmos. Oceanic Technol,1990,7:464–479.
- [13] Luke E P,Kollias P,Johnson K L,et al. A technique for the automatic detection of insect clutter in cloud radar re-turns [J]. J. Atmos. Oceanic Technol. 2008 ,25:1498 –1513.
- [14] 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.
- [15] Geerts B,Miao Q. The use of millimeter Doppler radarechoes to estimate vertical air velocities in the fair-weather convective boundary layer[J]. J. Atmos. Oceanic Technol.,2005,22 : 225 –246.
- [16] Kropfli, R A, R D Kelly. Meteorological research applications of MM-Wave radar Meteorol[J]. Atmos, Phys. 1996,59:105–121.
- [17] 王永亮,陆建兵,严勇,等. 8mm 毫米波测云雷达系统设计[J]. 现代雷达. 2014,36(7).
- [18] Edward p luck,Pavlos kollias,Karen l,et al. A Technique for the Automatic Detection of Insect Clutter in Cloud Radar Returns[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology. 2008 ,25:498–1513.

Ground-based Ka Band Cloud Radar Data Quality Control

XIAO Pei¹, HUO Juan², BI Yong-heng²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. The Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: To improve the data quality of Ka band millimeter wave cloud radar with the concept of single-emission and double-receiving, a quality control method for solving problems related to noisy echo, data missing and plankton contamination is presented. The effectiveness of the method was verified by several cases. The results show that the data quality control algorithm is effective with high success rate and stability. Success rates under all weather circumstances reach 99%. 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.

Keywords: Ka band millimeter wave cloud radar; noise-radial interference clutter; suspended clutter clutter rejection; data quality control