文章编号:1001 - 9014(2019)02 - 0245 - 09

DOI:10.11972/j.issn.1001 - 9014.2019.02.019

Ka 波段毫米波云雷达多普勒谱降雪微物理特征分析

李玉莲[1,2], 孙学金[1*], 赵世军[1], 姬文明[1]

(1. 国防科技大学 气象海洋学院,江苏 南京 211101;
2. 94923 部队)

摘要:构建了一种基于毫米波云雷达多普勒谱的过冷水滴、冰晶、雪花的识别算法,通过对全局谱的谱峰识别,分离出了不同类型粒子的局部谱,得出了不同类型粒子的反射率因子、多普勒速度、谱宽等谱矩参数及含水量.通过对一次降雪过程 Ka 波段测云雷达多普勒谱的分析,结果表明:(1)混合相云中,由于雪花对毫米波雷达总回波强度贡献较大,基于总雷达反射率因子直接反演液态水含量会忽略过冷水滴的贡献,造成云中含水量的低估;(2)多普勒谱反演得到过冷水的液态水路径(LWP)与微波辐射计反演结果一致性较好,说明毫米波雷达能够有效估量云中液态水路径;(3)冰雪晶粒子在过冷水层(SWL)中下落速度随反射率因子的变化梯度(dV/dZ)比在冰雪层(ISL)中大,这主要是因为冰雪晶粒子在 SWL 中通过凇附增长比在 ISL 中通过碰并增长要增长得更快.

关 键 词:毫米波雷达;多普勒速度谱;过冷水滴;微波辐射计;液态水路径

中图分类号:P407.7　　**文献标识码**: A

Analysis of snowfall′s microphysical process from Doppler spectrum using Ka-band millimeter-wave cloud radar

LI Yu-Lian[1,2], SUN Xue-Jin[1*], ZHAO Shi-Jun[1], JI Wen-Ming[1]

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;
2. Unit No. 94923 of PLA)

Abstract: The identification of supercooled water droplets in the cloud is of great significance for the physical process of cloud-precipitation and warning aircraft icing. In this paper, the spectral peak recognition algorithm is established by the U. S. ARM[1]-AMF2 spectral data of the 35 GHz cloud radar in Finland. The spectral separation of the total spectrum is obtained, and then the supercooled water droplets are identified. Next the supercooled water droplets are identified. Next, the reflectivity, doppler velocity and spectral width of different types of particles are calculated by spectral moment. Finally, the liquid water content in the cloud is retrieved from the empirical relationship and compared with the detection results of the microwave radiometer. The results are as follows (1) The radar reflectivity factor of mixed-phase clouds mainly depends on snow. Therefore, it is considered that the effective volume of radar is snow. The cloud liquid water content will be underestimated according to the total reflectivity. (2) The gradient of Doppler velocity (V) of ice and snow particles in the supercooled water layer (SWL) larger than that in the ice and snow layer (ISL). (3) The liquid path (LWP) obtained by the Doppler spectrum is good agreement with the microwave radiometer. It shows that the millimeter wave radar can effectively estimate the liquid water path in the cloud.

Key words: millimeter-wave radar, Doppler spectrum, supercooled water, microwave radiometer, liquid water path (LWP)

PACS: 84. 40. Xb

收稿日期:2018-07-02,**修回日期**:2018-12-20　　**Received date**: 2018-07-02, **revised date**:2018-12-20

基金项目:国家自然科学基金 (41575020)

Foundation items:Supported by National Natural Science Foundation of China (41575020)

作者简介(Biography):李玉莲(1994-),女,四川人,主要研究领域为基于气象雷达的云微物理研究. E-mail:yulianli1994@outlook.com

* **通讯作者(Corresponding author)**: E-mail: Xuejin.sun@outlook.com

引言

毫米波云雷达(MMCR)具有较高的灵敏度和时空分辨率,既能探测到云的微小粒子结构和微物理特征,又能用于弱降水、降雪系统的宏观结构探测和微物理参数反演[1]. 毫米波云雷达已成为研究云和降水微物理过程的有效工具之一,美国大气辐射测量计划(Atmospheric Radiation Measurement program, ARM)利用研发的35 GHz毫米波云雷达和双波长(Ka/W波段)云雷达长期探测云的宏微观特征、辐射特征及它们与气候变化间的关系[2-3];日本利用了Ka波段云雷达对海雾与大陆雾进行对比研究[4]. 我国毫米波雷达发展相对较晚,2008年中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室与航天科工集团第23所合作自主研制了Ka波段地基多普勒/偏振毫米波雷达并应用到云和降水观测中[5]. 常规雷达信号处理系统通常只提供反射率因子、速度和谱宽等谱矩参数,很少保存多普勒速度谱数据,因此以往反演云微物理参数大部分仅基于这三个量进行. 但若雷达有效照射体积中存在不同类型粒子,且其粒径分布和下落速度差异较大,从而造成多普勒谱表现出双峰谱、多峰谱现象(如图1),若此时仍用全局多普勒谱计算的谱矩参数进行分析,会"平滑"不同类型粒子的速度和强度差别,从而对后续云微物理参数反演产生一定影响. 由于雷达多普勒速度谱包含了丰富的云、和降水的微物理和动力信息,近些年越来越多的国外学者利用多普勒速度谱不仅对云、弱降水的微物理过程进行分析外,还对降雪过程进行了相关研究. 如Shupe等[6]通过寻找云雷达多普勒速度谱的谱峰,确定过冷水和冰晶的多普勒谱,并在假设粒子谱分布的基础上,利用反射率因子、平均多普勒速度反演了层状云的微物理参数. Luke等[7]利用连续小波变换提取出多普勒速度谱的特征,并结合地基激光雷达资料的后向散射系数和退偏比通过神经网络识别降雪系统中的过冷水滴. Oue等[8]结合云雷达的偏振参数和多普勒速度谱协同分析强降雪系统中粒子的发展演变过程. Kneifel等[9]利用了X波段、Ka波段以及W波段多普勒光谱对比分析降雪过程,结果表明在不同的冰晶增长过程中双光谱比率存在明显不同,可作为识别凇附过程的重要标志.

目前,国内利用云雷达多普勒速度谱分析降雪过程的微物理特性的研究仍较少. 王柳柳等[10]利用Ka波段多普勒谱数据反演了空气垂直运动得到粒子下落速度,进而得到垂直方向上粒子半径、液态水含量和冰水含量,并结合探空数据及各参数分析了冬季冻雨和降雪过程中粒子下落过程的发展演变过程. 陈羿辰等[1]联合Ka波段云雷达、称重式雨量计和S波段天气雷达对降雪系统发展过程中的宏微观结构、毫米波雷达在探测中电磁波的衰减以及估测雪粒子含水量和地面降雪量估测等方面进行了分析研究.

本文主要利用多普勒谱的形态学特征,通过零点交叉法对高于噪声电平的有效信号进行处理确定出峰值位置,进而利用最小二乘法对局部谱峰进行多项式拟合,将全局谱上不同类型粒子对应的多普勒谱进行分离,最后识别和量化混合相云中不同水凝物粒子的微物理特性,并结合微波辐射计数据对云中液态水含量进行验证.

1 数据、谱处理及反演方法

1.1 数据

2014年2-9月,"the Biogenic Aerosols-Effects on Clouds and Climate"(BAECC)观测实验在芬兰中部的Hyytiälä观测站(61.8°N,24.3°E)进行,此观测活动是由美国能源部ARM计划和芬兰气象研究所FMI共同组织的[11]. 在此期间,许多观测仪器,如W波段、Ka波段以及X波段多普勒雷达、微脉冲激光雷达(MPL)、微波辐射计(MWR)等均被安置在Hyytiälä观测站,对大气环境进行全天时精细化探测,为研究云微物理特性提供了宝贵的资料[12]. 本文采用了Ka波段35GHz多普勒云雷达和微波辐射计数据进行研究. 其中Ka波段多普勒雷达采用垂直定向的探测工作方式,时间分辨率2 s,垂直分辨率30 m,垂直方向有600个数据库,最大探测高度18 km. 每个雷达样本库包含一个多普勒速度谱,谱点数为512个点,多普勒速度探测范围为-6.0579~6.0579 m/s,分辨率为0.0237 m/s. 在分析验证基于毫米波雷达多普勒谱反演云中液态水路径的结果时,需要选择一个准确度较高的其他探测结果作为"真值"进行对比. 本文采用了地基微波辐射计反演的液态水路径与其进行分析,此WMR反演液态水路径是通过统计回归法,该算法利用已有历史探空资料,通过辐射传输模式,计算出廓线对应的亮温集,然后通过回归的方法得到反演系数,结合探测得到的亮温反演出液态水路径. 根据前人研究表明,双通道微波辐射计的反演误差约为30 g/m^2[13-14],因此利用WMR的液态水路径定量评估MMCR的反演

结果是可行的. 而地基微波辐射计探测的时间分辨率约为 60 s,低于 MMCR 的时间分辨率,因此在对比过程中以 MWR 的观测时间为基准,挑选出与其最接近的毫米波云雷达反射率因子廓线进行分析.

1.2　谱处理方法

1.2.1　噪声电平的确定

云雷达在探测气象目标时,接收到的多普勒谱实际上叠加了许多的噪声信号,因此为了剔除噪声对有效信号的干扰,首先对多普勒谱进行了 7 点平滑(平滑范围 0.166 m/s),使谱峰特征更加清晰;然后利用 Hildebrand 和 Sekon[15] 提出的客观法计算噪声电平. 该方法假设噪声主要来自系统热噪声,具有高斯白噪声的特点,即多普勒谱的方差与均值的平方相等,根据这一特征,将平滑后的多普勒谱进行降序排列,得到一个新序列,从高到低逐一移除,直到"剩余"光谱点满足高斯白噪声特征,则计算出噪声的平均值作为噪声电平. 图 1 给出了一个具有双峰特性的雷达多普勒谱分布,其中黑色点线表示用客观法确定的噪声电平,红色实线表示有效云信号与噪声之间的分界值,可以看出除了一些少量的噪声谱峰以外,绝大部分噪声信号被有效的分离了.

1.2.2　谱分离

对有效信号求导,采用零点交叉法寻找峰值. 由于部分系统噪声残留的峰值以及大气扰动等因素的影响会导致零点交叉法寻找到的局部峰值不一定是有效信号的峰值. 因此,通过实验确定了以下识别主要谱峰的约束条件:

(1) 对于任何局部谱,至少有 0.237 m/s(即 10 个连续光谱点)的频谱宽度高于噪声水平之上;

(2) 所有局部谱的峰值强度至少比噪声电平大 2 个标准偏差;

(3) 连续两个谱峰之间的鞍点强度至少低于两个峰值中较小峰值强度的 60%,否则视为同一个谱;

(4) 连续两个谱峰对应的速度差值需大于 0.137 m/s,否则认为是同一个谱.

通过上述算法对本文研究个例的 451 829 个多普勒谱进行了验证,发现约 93% 多普勒谱具有明显的特征谱峰. 一旦确定了特征谱峰后,沿峰值的两个方向向下搜索,直到达到噪声水平或极小值点,确定局部谱的左右边界. 最后根据"使残差平方和最小"的原则对局部谱进行多项式拟合,这种方法称为最小二乘法[16]. 令回归曲线模型为:

$$I(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n (n < m) \quad ,(1)$$

是关于 x 的 n 此多项式. 假设局部谱分布点的数据为 $(x_i, y_i)(i = 1, 2, \cdots, m)$,根据最小二乘法的定义,通过上述数据确定系数 a_j 使得式(2)残差平方和最小:

$$E = \sum_{i=1}^{m} (I(x_i) - y_i)^2 \quad . \quad (2)$$

由求极值的必要条件可得:

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^{m} (a_0 + a_1 x_i + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n - y_i) \cdot x_i^k = 0 \quad (k = 0, 1, 2, \cdots, n) \quad . \quad (3)$$

求解上述正规方程组,求得回归系数,从而将不同类型粒子的多普勒谱进行了分离. 如图 1,点划线是指通过最小二乘法拟合的局部谱,然后经过谱矩计算可得到快峰谱和慢峰谱对应的反射率因子和平均多普勒速度. 其中平均下落速度大的称为快峰谱,反之平均下落速度小的称为慢峰谱. 图 1 显示,快峰谱的反射率因子和平均多普勒速度(Z_1, V_{r1})均与全局谱的谱矩参数(Z, V_r)十分接近,而慢峰谱的反射率因子(Z_2)明显小于快峰谱的反射率因子,相差约 26 dBZ.

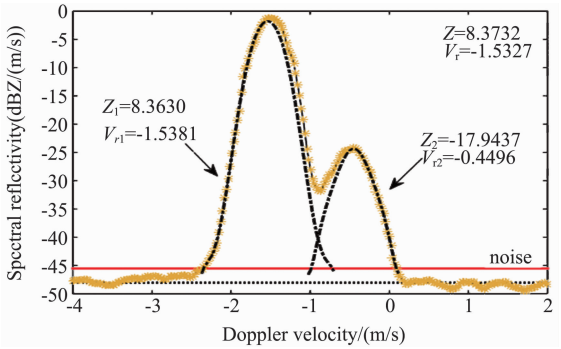


图 1　2014 年 2 月 21 日 22:45(UTC)2.235 km 的多普勒谱及拟合子谱

Fig. 1　Example of an MMCR Doppler spectrum. Maximum and mean noise floor are indicated by red and grey horizontal lines. The fitted subpeak spectra are represented by dot-dash lines

1.2.3　谱矩计算方法

多普勒谱是指在雷达样本库中所有粒子回波功率关于其速度的函数. 如果雷达有效照射体积中只有一种类型粒子,且粒子的粒径分布较均一,多普勒谱表现为单峰谱;如果存在两种不同类型粒子,具有各自的多普勒谱,且平均落速差异较大时,多普勒谱表现为双峰谱. 假设雷达照射体积内有 n 类不同类型粒子,则实际输出的多普勒谱的谱密度为:

$$S_v(V) = N(v) + \sum_{i=1}^{n} S_{D_i}(v) \quad , \quad (4)$$

其中 $S_D(v)$(单位:$mm^6/m^3/(m/s)$)表示某一类型粒子的多普勒谱密度,$N(v)$表示噪声谱. 本文利用客观法计算噪声电平进行了去噪处理后,然后分别计算每种类型粒子多普勒谱的零阶、一阶、二阶矩,得到对应的反射率因子 Z(单位:mm^6/m^3)、平均多普勒速度 V_d(单位:m/s)、谱宽 W_d(单位:m/s),定义如下[10]:

$$Z = \int_{-\infty}^{+\infty} S_D(v)\,\mathrm{d}v \quad , \quad (5)$$

$$V_d = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} vS_D(v)\,\mathrm{d}v}{\int_{-\infty}^{+\infty} S_D(v)\,\mathrm{d}v} \quad , \quad (6)$$

$$W_d^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (v - V_d)^2 S_D(v)\,\mathrm{d}v}{\int_{-\infty}^{+\infty} S_D(v)\,\mathrm{d}v} \quad . \quad (7)$$

1.3 过冷水滴识别方法

过冷水滴是指温度小于0℃情况下未冻结的液态水滴. 在混合相云中,通常过冷水滴直径小、浓度大,而冰雪晶粒子直径大、浓度小. 对毫米波雷达而言,混合相云中粒子的存在近似遵循后向散射截面与粒子直径的6次方近似成正比,因此当雷达样本体积中过冷水滴与冰雪晶共存时,毫米波雷达的反射率因子 Z 主要由冰雪晶决定,此时根据反射率因子是很难确定出过冷水滴的存在;但由于过冷水滴与冰雪晶下落速度相差较大,当多普勒谱表现为双峰谱特征,因此可以将慢峰谱识别为过冷水滴. 值得注意的是当雪花和冰晶共存时,也可能造成多普勒速度谱出现双峰谱特征. 本文首先通过小粒子示踪法[5,17]反演空气垂直速度,利用平均多普勒速度与其的差值得到粒子的下落速度 V,然后根据 Shupe 等[18]和盛裴轩等[19]总结得到液态云滴的特征参量,取反射率因子 $Z < -17$ dBZ,下落速度 $V > -0.7$ m/s 作为判断过冷水滴存在的条件. 若双峰谱中的慢峰谱不满足判定条件,则慢峰谱视为冰晶,对应的快峰谱视为雪花.

1.4 含水量反演

假设粒子尺度谱分布为对数正态分布[19],则液态水含量 LWC (g/m^3)用下列公式计算[4]:

$$\mathrm{LWC} = \rho(\pi/6)\exp(-4.5\sigma^2)N^{1/2}Z^{1/2} \quad , (8)$$

其中 Z(mm^6/m^3)表示反射率因子,ρ 是水的密度(g/m^3),σ 是粒子尺度谱分布的对数谱宽,N 是粒子浓度($1/cm^3$). 类似的冰水含量也可以基于雷达反射率因子反演出来,关系式表示如下:

$$\mathrm{IWC} = aZ^b \quad . \quad (9)$$

考虑到本次天气过程地面有降水,a 和 b 采用 Sassen 和 Liao[20] 统计给出的系数值,a 取 0.086,b 取 0.83.

2 降雪过程个例分析

图2给出了2014年2月21日23:20(UTC)的无线电探空数据. 如图2(a)温度廓线所示存在两处逆温层,其中较明显的逆温层位于边界层内 0.3 km 到 0.7 km 之间,而另一逆温层大约在 2.3 ~ 2.5 km 高度范围内. 结合图3(a),上层云云顶(8 km)温度约 −54℃,下层云云顶(3.2 km)温度约 −17℃,而地表温度约为 −3℃,整层大气温度均低于0℃. 图2(b)虚线是指各层高度上相对于冰面的饱和水汽压与相对于水面的饱和水汽压之比,实线是指各层高度上的相对湿度. 当实线位于虚线的右侧,如 1 km 以下以及 2.6 ~ 4.4 km 高度之间,表明大气相对于冰面处于过饱和状态,若存在足够水汽时,易发生凝华现象;反之,大气相对于冰面处于未饱和状态,若该层存在冰晶,易发生升华现象,如 1 ~ 2.6 km 之间.

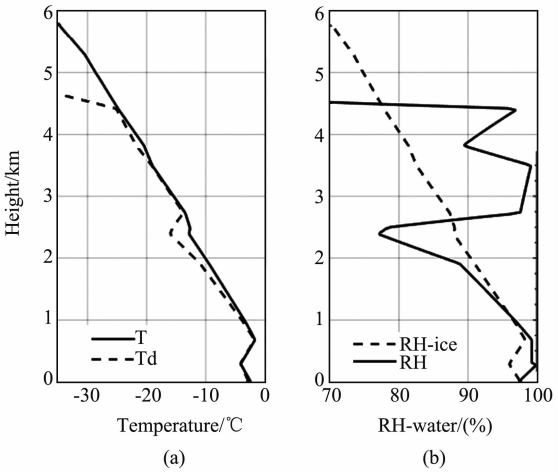


图2 (a)温度、露点温度垂直廓线图,(b)实线为相对湿度垂直廓线图,虚线为相对于冰面的饱和水汽压比上相对于水面的饱和水汽压

Fig. 2 (a) Vertical profiles of temperature and dew point temperature in the left panel, (b) the soild line in the right panel refer to the relative humidity and the dotted line refers to the humidity at which the air is saturated with respect to ice

2.1 双峰谱变化特征

图3(a,c,e)分别显示了去噪后的全局谱通过谱矩计算得到的2014年2月21日22:00 ~ 23:00时间段反射率因子、平均多普勒速度、谱宽随时间和空间变化的分布图. 如图3(a),云体随时间的演变

大致可分为三个阶段:两层云阶段、两层云融合阶段、单层云阶段.

在 22:24 之前,结合图 3(a,c,e)分析,上层云云中粒子下落速度和谱宽均较小且分布均匀,而反射率因子随时间变化逐渐增大,大致增大了 10 dBZ,说明了在此期间上层云的粒子尺度逐渐增大;在 2.4 ~3.2 km 的范围内,下层云的反射率因子分布较均匀且较小,大致在 -20 dBZ 上下浮动,表明粒子尺度小,同时平均多普勒速度表现为上升运动,说明此处存在向上的空气运动,有助于向上运输足够的水汽,促进云的发展和维持,此外粒子的谱宽较小,这些特征与过冷水滴特性相一致[8],此处可能存在过冷水滴;而在 0.4 km 到 2 km 的高度范围内,反射率因子、粒子下落速度、谱宽均随时间逐渐减弱,尤其是低层云中的反射率因子高值区顶部的高度在该时段从 1.7 km 降至近地面,说明低层云云内尺度较大的水凝物逐渐降落至地面. 在 22:24 ~22:36 时间段内,上下两层云逐渐融合,如图 3(a,c),上层云的反射率因子进一步增大,且粒子下落速度相比之前有所增强,较大的下落速度有助于两层云相结合. 在 22:36 之后,上层云中的冰雪晶粒子由于自身重力作用下落至低层云当中,图 3(a,c)显示反射率因子和粒子下落速度都明显增强,平均值分别高达 4 dBZ、1.5 m/s,并且在上层云与下层云合并之后的初始阶段,即 22:36 到 22:42 时间段,在 3 km 以下的高度范围内,谱宽从 0.1 m/s 陡然增加到 0.6 m/s,这可能是因为高层云的冰雪晶粒子下落至过冷水层,冰雪晶粒子与过冷水滴不同类型粒子下落速度相差较大,从而使谱宽增强,甚至出现双峰谱现象. 此外在 0.4 km 以下范围,速度谱宽相比于其他区域一直相对较高,这可能是因为粒子尺度较大相应谱宽也较大,也可能是近地面层湍流较强的原因.

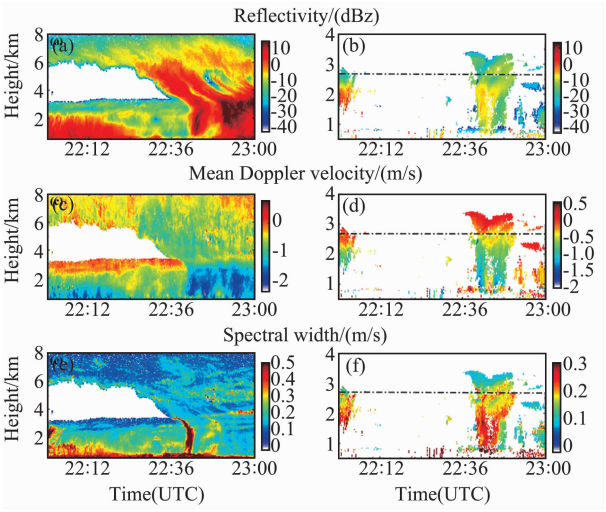


图 3　2014 年 2 月 21 日 22:00-23:00 云雷达参数分布图(a,c,e)对应全局谱谱矩参数,(b,d,f)对应慢峰谱谱矩参数

Fig. 3　Height *vs.* time cross sections of reflectivity, mean Doppler velocity and spectral width of the total Doppler spectra (a,c,e), and the slow-falling subpeaks spectra (b,d,f)

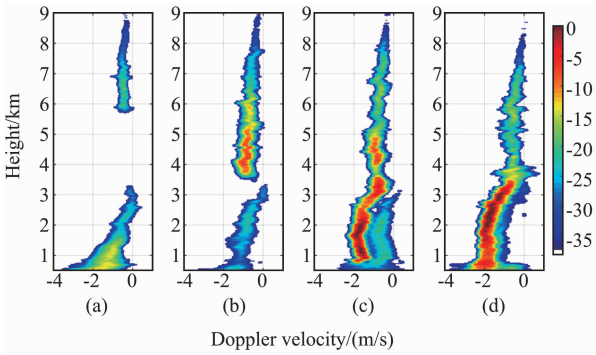


图 4　多普勒谱垂直廓线图(a)22:20,(b)22:35,(c)22:43,(d)22:55

Fig. 4　Vertical profile of Doppler spectra at (a) 22:20, (b) 22:34, (c) 22:42, and (d) 22:54 UTC

图 4 显示了不同时刻多普勒谱在垂直廓线上的分布. 如图 4(a)表示,在 22:20,下层云的谱峰强度明显大于上层云的谱峰强度;随时间增长,上层云的谱峰强度相比之前明显增强,且上层云云体向下延伸,而下层云谱峰强度有所减弱(如图 4(b)),这与图 3(a)相符;图 4(c)表示上下两层云完全融合的初始阶段,上层云的水凝物下落至下层云当中,多普勒谱在 3 km 以下表现出双峰谱特征,且快峰谱的谱峰强度明显强于慢峰谱;随着时间演变,慢峰谱消失表现为单峰谱(如图 4(d)),说明存在粒子相态的演变.

图 3(b,d,e)分别表示多普勒速度谱经过谱峰识别、分离以后,双峰谱中慢峰谱对应的反射率因子、平均多普勒速度、谱宽随时间和空间的变化图. 图 3(a-b)对比分析,出现双峰谱特征的区域较少,而大部分双峰谱比较集中出现在 22:36-22:50 时间段,即上层云与下层云合并之后的初始阶段;全局谱的反射率因子明显大于慢峰谱的反射率因子,平均相差 15 dBZ;值得注意的是,如图 3(b,d,e)所示在 2.6 km 以上区域的反射率因子、粒子下落速度和速度谱宽与其以下区域相比均相对较低(如虚线所示),平均相差约 4.76 dBZ、0.306 m/s、0.105 m/s,

产生明显差别的原因可能是因为慢峰谱所代表的粒子类型不同,表现出不同的特征.

2.2 过冷水滴分布变化特征

图5给出了2014年2月21日降水云中过冷水滴对应反射率因子、下落速度以及谱宽随时间演变的分布图. 如图5(a),在2.5 km到3.4 km的区域内存在一个比较连续的过冷水层,其他高度范围也有存在过冷水滴的区域,但并不连续. 结合图3(a),在两层云合并之前,低层云云顶区域存在一个过冷水层,之后随着高层云的冰雪晶粒子下落至过冷水层中,由于不同类型粒子且下落速度差异较大,从而造成22:39~22:49时间段出现双峰谱特征(如图3(b)),但并不是出现双峰谱特征的区域就一定存在过冷水滴,这些区域出现双峰谱特征也可能是因为雪花和冰晶粒子共存造成的. 如图4所示,过冷水滴的反射率因子较小,平均约为-20 dBZ,说明粒子尺度小,此外其粒子下落速度和谱宽均较小,这与云滴特性是相一致的,说明识别结果是合理的. 值得注意的是在22:48之后,在2.5~3.4 km的高度范围内存在过冷水的区域减小,结合图8,微波辐射计反演的液态水路径在22:42到22:46期间从419 g/m^{2}下降至262.8 g/m^2,这是因为前期冰雪晶粒子在下落过程中遇到过冷水滴时,与过冷水滴产生淞附增长,或者通过贝吉龙效应产生凝华增长,造成过冷水滴的减少.

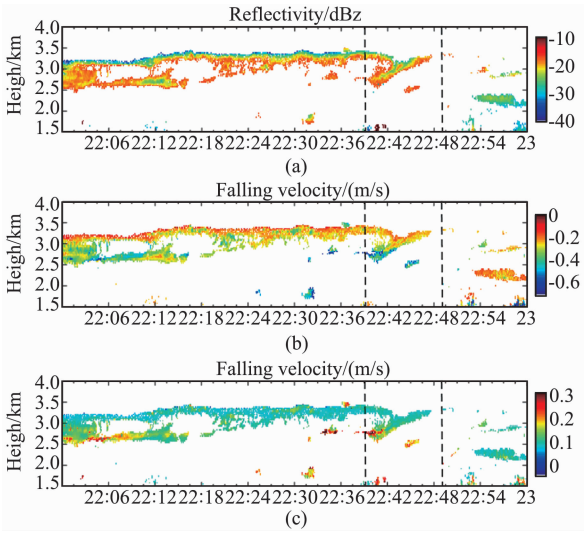


图5 2014年2月21日22:00~23:00过冷水滴的分布图(a)反射率因子,(b)下落速度,(c)谱宽

Fig. 5 Height *vs.* time cross sections of moments of the supercooled liquid peak: (a) reflectivity, (b) falling velocity, and (c) spectral width

依据式(5-6)从多普勒速度谱中计算不同类型水凝物(过冷水滴、冰晶、雪花)的反射率因子、下落速度,其时间平均的垂直廓线如图6所示. 本文中平均垂直廓线图均是基于22:39~22:49该时间段的垂直廓线计算所得,即如图5中两虚线之间的区域. 为后期分析方便,将存在过冷水滴的高度层称为过冷水层(SWL),而仅存在雪花和冰晶的高度层称为冰雪晶层(ISL). 从图6(a)可以看出过冷水滴的反射率因子较低,其主要分布在-26~-17 dBZ之间. 在SWL中,冰晶粒子反射率因子增长较缓慢,从3 km到2.5 km仅增加了约1.5 dBZ,但其多普勒速度增长幅度较大,下落速度从0.31 m/s增长至0.76 m/s. 此处冰晶粒子的形成可能是因水汽直接凝华成小冰晶,也可能是因为雪花在淞附过冷水滴过程中,水滴冻结释放的潜热经过缓慢的传导过程,使体积膨胀,致使冰壳破裂,产生大量次生冰晶粒子,此称为Hallett-Mossop冰晶增长机制[23]. 而在2.4 km到2.1 km的高度范围,冰晶粒子主要依靠相互之间碰并增长,相应的反射率因子从-13 dBZ增长到-8.4 dBZ;而在2.1 km以下,冰晶粒子的反射率因子缓慢减小. 由于雪花的粒子尺度较大,因此其回波功率较大,从6 km到过冷水层的顶部,雪花的反射率因子和下落速度的增长均相对缓慢,分别增加了4.2 dBZ和0.5 m/s,雪花在此阶段主要是依靠水汽的凝华增长. 而在SWL中,雪花的反射率因子在1 km的范围内增加了5 dBZ,同时下落速度也从0.98 m/s增加到了1.69 m/s,增长幅度大,而在2.1 km以下,雪花反射率因子缓慢减小,这与冰晶变化相似,可能是因为在1~2.6 km之间,大气相对于冰面处于未饱和状态,如图2(b)所示,冰雪晶粒子发生升华现象.

2.3 含水量时空演变特征

假设粒子浓度及对数谱宽不随高度变化,σ取0.31,过冷水滴的浓度N取35 cm^{-3},根据式(5-6)反演云中过冷水滴的水含量(LWC)、冰雪晶的水含量(IWC)的平均垂直廓线,见图7. 由图7可以看出,过冷水的液态水含量随高度降低而增加,最大可达到0.25 g/m^3,与雪花的液态水含量相差不大,结合图6(a),虽然雪花的反射率因子远大于过冷水滴的反射率因子,但过冷水滴的密度相比雪花的大,因此过冷水滴的含水量不一定很小;冰晶的液态水含量相对较小,大致在0.01~0.03 g/m^{3}范围内变化,而雪花的液态水含量在3.4 km以下相对较大,均在0.1 g/m^{3}以上. 值得注意的是,基于总雷达反射率

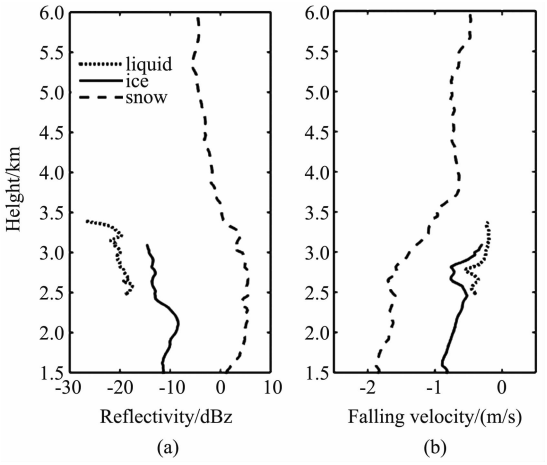


图 6　冷水滴、冰晶以及雪花对应谱矩参数的时间平均垂直廓线图(a)反射率因子,(b)下落速度

Fig. 6　Time average vertical profiles of the spectral moment parameters of supercooled liquid, ice crystals and snowflakes:(a) reflectivity,and (b) falling velocity

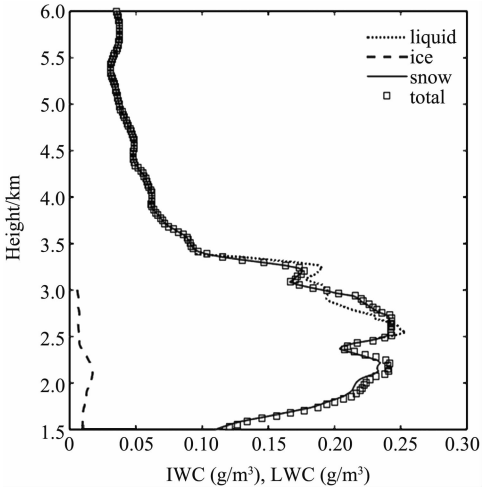


图 7　2014 年 2 月 21 日在 22:39 ~ 22:49 时间段过冷水滴、冰晶以及雪花的液态水含量、冰水含量的平均垂直廓线图

Fig. 7　Profiles of MMCR Doppler spectra-derived supercooled liquid, ice crystals, and snowflake water content

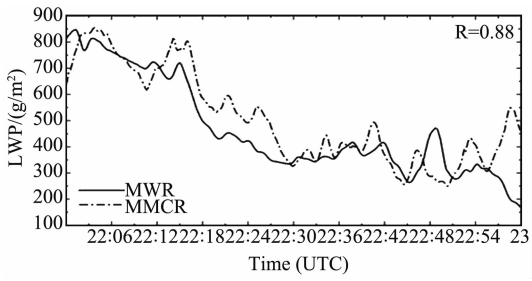


图 8　2014 年 2 月 21 日 22:00 ~ 23:00 毫米波云雷达反演的 LWP 与微波辐射计反演结果之间的对比

Fig. 8　Time series of the microwave-radiometer-derived LWP (solid line) and LWP derived from the MMCR Doppler spectra (dotted line)

反演得到的液态含水量与雪花的水含量基本一致,这是因为当有效照射体积中雪花与过冷水滴共存时,由于过冷水滴的粒子尺度远小于雪花的尺度,谱矩参数主要反映雪花的特征,会漏掉过冷水滴的存在,从而反演云中的液态含水量时会造成低估.

图 8 显示了微波辐射计、毫米波云雷达反演的液态水路径(LWP)随时间的演变. 总体而言,微波辐射计反演的 LWP 与云雷达的反演结果相比,具有较好的相关性,相关系数为 0. 88,说明云中过冷水滴的总水含量的变化趋势一致性较好. 图 8 所示,液态水路径随时间变化整体是呈减少趋势,尤其是在 22:15 ~ 22:30 时间段,从 730 g/m^2 减少至 350 g/m^2,结合图 3(a),低层云反射率因子高值区顶部在该时段从 1. 7 km 降至近地面,说明云中部分过冷水滴可能降落至地面. 此外大部分时间段云雷达反演的 LWP 高于微波辐射计反演的 LWP,这主要是因为有些小冰晶尺寸很小,与云滴的尺寸相似,在这种情况下,可能将冰晶谱误判为云滴谱,从而导致反演液态水含量的高估,此外也可能是因为假设谱参数不随高度发生变化,从而影响了反演结果的精度. 虽然利用云雷达多普勒谱反演的云中液态水含量精度仍有待提高,但对人工影响天气和飞机积冰的预报和分析有一定的帮助. 值得注意的是本次个例,整层大气的温度都小于 0℃,因此不考虑低层暖云液态水含量的影响.

2.4　水凝物增长过程分析

由图 6 可知,冰雪晶粒子分别在 SWL 和 ISL 中,其反射率因子和下落速度的增长速率是有所不同的,这可能是因为在 SWL 层中,冰雪晶粒子主要是依靠凇附增长,而在 ISL 层中,冰雪晶粒子主要是依靠丛集碰并增长. 根据 Straka 等[21] 和 Kalesse 等[22]研究发现粒子下落速度随反射率因子的变化梯度,即 dV/dZ,可以作为识别不同生长过程的重要参数,如凇附过程、碰并过程和凝华过程. 图 9 显示了多普勒频谱中快峰、慢峰对应的反射率因子随下落速度变化的概率密度分布图. 其中线性拟合判定系数 R^2 是表征自变量对因变量的影响程度,该值越接近 1,说明自变量对因变量的影响程度越高. 如图所示,R^2 均偏低,这主要是因为粒子速度的变化还可能与空气垂直运动,以及粒子密度、形状以及取向等粒子特性有关. 虽然粒子下降速度受这些因素影响,但是每个子峰反射率因子-平均多普勒速度的概

率分布图显示出了 dV/dZ 值存在一定差异,这可能是因为不同的粒子类型或不同生长过程造成的. ISL 和 SWL 之间存在明显的差别,在 SWL 中,慢峰谱和快峰谱的下落速度随反射率因子的变化梯度分别比 ISL 中的变化梯度大约 0.5 cm s^{-1}dBZ^{-1},较大的变化梯度表明在给定增长相同的反射率因子情况下,粒子下落速度变化更快,这说明冰雪晶粒子在 SWL 中通过凇附过程更容易生长,这与 Oue 等[8]研究结果一致. 值得注意的是在 ISL 和 SWL 层中均显示出了慢峰谱对应的 dV/dZ 明显比快峰谱的 dV/dZ 大,结合图 6,图 9(c-d)主要表示冰晶粒子的 dV/dZ,而图 9(a-b)主要表示雪花粒子的 dV/dZ,由此说明冰晶粒子的密度相对较高,不易受空气阻力的影响,增长相同的粒子尺度,速度变化更快.

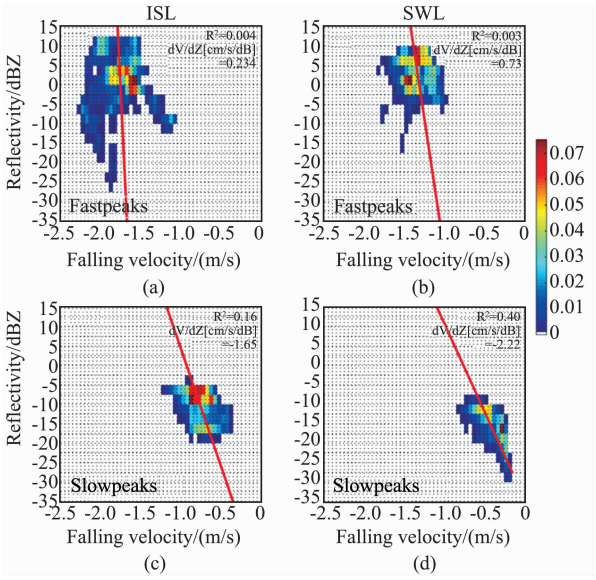


图 9 反射率因子 Z-多普勒速度 V 的概率分布图,(a-b)对应慢峰谱的 Z,(c-d)对应快峰谱的 Z;(a,c)对应过冷水层,(b,d)对应冰雪晶层

Fig. 9 Probability density distribution of reflectivity *vs.* mean Doppler velocity for the fast-falling subpeaks (a,b) and slow-falling subpeaks (c,d), for the snow and ice crystal layer (a, c) and the supercooled water layer (b,d)

3 结论

基于毫米波云雷达多普勒速度谱,本文首先设计了谱峰识别算法,随后通过非线性最小二乘法,多项式拟合局部谱,将全局谱进行分解,得到不同类别粒子的谱分布,对每个子谱求取各自的 Z、V_d、W_d,最后根据反射率因子反演云中液态水含量,并将结果与微波辐射计的观测结果进行了对比分析. 主要得出以下结论:

(1)在混合相云中,由于雪花粒子尺度较大,因此全局谱的谱矩参数主要反映了雪花粒子的特性,当雪花与过冷水滴共存时,直接根据总雷达反射率因子反演云中含水量,会忽略过冷水滴的水含量,从而导致低估的现象.

(2)在过冷水层中,慢峰谱和快峰谱的下落速度随反射率因子的变化梯度均比冰雪层中的变化梯度大,这说明冰雪晶粒子在过冷水层中的凇附增长与在冰雪层中的碰并增长相比,增长更快.

(3)基于多普勒速度谱反演得到过冷水滴的 LWP 与微波辐射计反演结果有较好的相关性,明显比基于雷达反射率的反演结果可靠性更强,但其反演结果存在一定高估,这主要是因为将某些小冰晶粒子误判为过冷水滴.

从分析结果来看,毫米波云雷达能够精细化探测到降雪结构,也能利用多普勒谱识别和量化云中的过冷水滴和冰雪晶粒子,并通过各种参数初步判断云中粒子演变过程,这不仅有助于更好理解降雪的微物理演变过程,也对云模式的发展、人工影响天气以及飞机积冰的预报和分析都有重要意义. 值得注意的是在本文当中构建的谱峰识别算法主要基于主观经验所得,缺乏一定客观性,在今后的研究中有必要改进谱峰识别算法,如利用连续小波变换、希尔伯特变换来提取谱形特征进行分析;其次在基于雷达多普勒谱识别过冷水滴,本文的研究还不够最优化过冷水滴识别的特征阈值,在今后的研究中有必要通过更多的更多观测资料以及其他探测仪器资料联合分析,来提高特征阈值准确性和精确性的研究.

致谢

感谢 ARM 提供的 BAECC 数据.

References

[1] CHEN Yi-Chen, JIN Yong-Li, DING De-Ping, *et al*. Preliminary analysis on the application of millimeter wave cloud radar in snow observation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*(陈羿辰, 金永利, 丁德平,等. 毫米波测云雷达在降雪观测中的应用初步分析. **大气科学**), 2018, **42**(1):134-149.

[2] Kollias P, Clothiaux E E, Albrecht B A, *et al*. The atmospheric radiation measurement program cloud profiling radars: An evaluation of signal processing and sampling strategies[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2005, **22**(7):930-948.

[3] Moran K P, Martner B E, Post M J, *et al*. An unattended cloud-profiling radar for use in climate research.[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(3): 443-455.

[4] Hamazu K, Hashiguchi H, Wakayama T, *et al*. A 35 GHz

scanning Doppler radar for fog observations[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2003, **20**(7):972 - 986.
[5]郑佳锋. 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]. 中国气象科学研究院, 2016.
[6]Shupe M D, Kollias P, Matrosov S Y, *et al*. Deriving mixed-phase cloud properties from Doppler radar spectra [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2004, **21**(21):660 - 670.
[7]Luke E P, Pavlos K, Shupe M D. Detection of supercooled liquid in mixed - phase clouds using radar Doppler spectra [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, **115**(D19):201.
[8]Oue M, Kollias P, Ryzhkov A, *et al*. Toward exploring the synergy between cloud radar polarimetry and Doppler spectral analysis in deep cold precipitating systems in the Arctic [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2018, **123**(5): 2797-2815.
[9]Kneifel S, Kollias P, Battaglia A, *et al*. First observations of triple - frequency radar Doppler spectra in snowfall: Interpretation and applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(5):2225-2233.
[10]WANG Liu-Liu, LIU Li-Ping, YU Ji-Zhou, *et al*. Microphysics and Dynamic characteristic analysis of freezing rain and snow observed by millimeter wave radar[J]. *Meteorological Monthly*(王柳柳, 刘黎平, 余继周, 等. 毫米波云雷达冻雨-降雪微物理和动力特征分析. **气象**), 2017,**43**(12):1473 - 1486.
[11] Petäˆ ä? T, O′Connor E J, Moisseev D, *et al*. BAECC: A field campaign to elucidate the impact of biogenic aerosols on clouds and climate[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, **97**(10):1909 - 1928.
[12]Kneifel S, Lerber A, Tiira J, *et al*. Observed relations between snowfall microphysics and triple - frequency radar measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, **120**(12):6034 - 6055.
[13]Löhnert U, Crewell S. Accuracy of cloud liquid water path from ground - based microwave radiometry 1. Dependency on cloud model statistics[J]. *Radio Science*, 2003, **38**(3):8041-8051.
[14]Marchand R, Ackerman T, Westwater E R, et al. An assessment of microwave absorption models and retrievals of cloud liquid water using clear ： ky data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, **108**(D24): 4773-4783.
[15]Hildebrand P H. Objective determination of the noise level in Doppler spectra[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1974, **13**(7):808 - 811.
[16]ZHANG Yong-Tao, JIA Yan-Ming. Analysis and program implementation ofleast squares polynomial curve fitting [J]. *Computer & Digital Engineering*(张永涛, 贾延明. 最小二乘法中代数多项式曲线拟合的分析及实现. 计算机与数字工程), 2017, **45**(4):637 - 639.
[17]Kollias P, Albrecht B A, Lhermitte R, *et al*. Radar observations of updrafts, downdrafts, and turbulence in fair-weather cumuli.[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, **58**(13):1750 - 1766.
[18]Shupe M D. A ground-based multisensor cloud phase classifier[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(22):48 - 55.
[19]盛裴轩. 大气物理学[M]. 北京大学出版社, 2013.
[20]Sassen K, Liao L. Estimation of cloud content by W-band radar.[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, **35**(6): 932 - 938.
[21]Straka J M, Zrni D S, Ryzhkov A V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations.[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, **39**(8):1341 - 1372.
[22]Kalesse H, Kollias P, Szyrmer W. On using the relationship between Doppler velocity and radar reflectivity to identify microphysical processes in midlatitudinal ice clouds [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, **118**(21):12 - 12,179.
[23]Griggs D J, Choularton T W. The effect of rimer surface temperature on ice splinter production by the Hallett-Mossop process[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, **112**(474):1254 - 1256.

(上接第 244 页)

References

[18]MIAO Yu, SONG Li-Ping, JI Hong-Bing. Target tracking method with box-particle generalized lable muli-Bernoulli filtering [J]. *Journal of Xi′an Jiaotong University*, (苗雨, 宋骊平, 姬红兵. 箱粒子广义标签多伯努利滤波的目标跟踪算法. **西安交通大学学报**) 2017, **51**(10): 107 - 112.
[19] WEI Shuai, FENG Xin-Xi, WANG Quan, *et al*. Robust labeled multi-Bernoulli tracking algorithm based on box particle filtering [J]. *Acta Armamentarii*, (魏帅, 冯新喜, 王泉, 等. 基于箱粒子滤波的鲁棒标签多伯努利跟踪算法. **兵工学报**) 2017, **38**(10):2062 - 2068.