

孙晓光, 刘宪勋, 贺宏兵, 等. 毫米波测云雷达融化层自动识别技术[J]. 气象, 2011, 37(6): 720-743.

# 毫米波测云雷达融化层自动识别技术<sup>\* 1</sup>

孙晓光<sup>1,2,3</sup> 刘宪勋<sup>2</sup> 贺宏兵<sup>1</sup> 程周杰<sup>2</sup>

1 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

2 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

3 93544 部队, 河北定兴 072650

**提 要:** 为了充分利用雷达数据中的融化层信息, 通过分析融化层在反射率因子和线性退极化比(LDR)参量中的特性, 结合国内某型毫米波测云雷达的特点, 提出了一种融化层边界自动识别的技术。利用 2010 年 5—10 月国内某型毫米波测云雷达在杭州的探测资料及相应的探空资料, 对识别结果以及算法中参数的敏感性进行了对比和分析。对比结果表明, 该方法能有效识别亮带的存在, 得到的融化层上边界平均高度与实测零度层高度的误差小于 100 m。参数的敏感性分析表明, 融化层在反射率和 LDR 中的特性存在差异, 其厚度在 600~1500 m。毫米波测云雷达距离分辨率高、LDR 对融化层敏感以及使用反射率和 LDR 双重约束是识别出的融化层边界误差较小的原因。

**关键词:** 毫米波测云雷达, 融化层, 自动识别, 技术

## Automatic Identification Technology of Melting Layer in Millimeter Wave Cloud Radar Data

SUN Xiaoguang<sup>1,2,3</sup> LIU Xianxun<sup>2</sup> HE Hongbing<sup>1</sup> CHENG Zhoujie<sup>2</sup>

1 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

2 Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085

3 Unit No. 93544 of PLA, Dingxing of Hebei Province 072650

**Abstract:** In order to take advantage of the melting layer information in radar data, an automated identification technology has been developed by analyzing the signatures of melting layer in the reflectivity and linear depolarization ratio (LDR) parameters of millimeter wave cloud radar. Radar and radiosonde data during May to October 2010 in Hangzhou are used to compare and analyze the identification results and sensitivity of the parameters in the algorithm. Results show that this technology can identify the existence of melting layer. The difference between the top boundary average heights of melting layer obtained by this technology and the measured zero level height by radiosonde is less than 100 m. Parameter sensitivity analysis shows that melting layer signatures in reflectivity and LDR are different, and the thickness of melting layer is between 600 m and 1500 m. The causes of the little difference in this identification technology are the high range resolution of millimeter wave cloud radar, LDR sensitive to melting layer and the use of reflectivity and LDR dual constraints.

**Key words:** millimeter wave cloud radar, melting layer, automatic identification, technology

\* 国家高技术研究发展计划机载气象雷达云雨探测系统(2007AA0619)资助

2010 年 8 月 31 日收稿; 2011 年 1 月 28 日收修定稿

第一作者: 孙晓光, 主要从事现代气象雷达技术研究. Email: lovesun2000@sina.com

引 言

融化层边界的识别具有很多重要的作用<sup>[1-4]</sup>。融化层边界的确定,对雷达观测的降水类型(雪或雨)识别以及降水定量估计非常重要<sup>[2,5-6]</sup>。融化层边界还是 0℃等温线的标志,在确定航空活动的潜在积冰区和数值天气预报模式的数据同化、预报结果验证等方面作用很大<sup>[1-3]</sup>。融化层边界同样也是雷达水凝体分类、粒子等效半径反演、液水(冰水)含量反演算法的基础<sup>[7-8]</sup>。对融化层的研究,可以为降水发展的微物理过程提供信息<sup>[9-12]</sup>。

利用雷达探测数据对融化层进行自动识别的研究有很多。Fabry 等<sup>[13]</sup>使用高时空分辨率的垂直指向雷达研究了亮带的结构,提出了使用反射率垂直廓线(Vertical Profile of Radar Reflectivity, VPR)识别亮带顶高和底高的方法。Sanchez-Diezma 等<sup>[14]</sup>使用模拟数据研究了雷达体扫取样模式对亮带峰值强度和深度的影响,提出了一种亮带识别(Bright Band Identification Detection, BBID)算法。Gourley 等<sup>[15]</sup>提出了 WSR-88D 基本反射率数据的自动 BBID 程序,将 BBID 程序得到的亮带顶高和底高,与模拟的 0℃高度和垂直指向雷达的观测进行了对比。Zhang 等<sup>[1]</sup>通过区分对流云和层状云降水,利用体扫数据中反射率垂直廓线和背景场温度廓线,对亮带进行了自动识别。肖艳姣等<sup>[4]</sup>基于新一代天气雷达体扫资料,利用亮带 VPR 曲线在融化层高度的显著弯曲特征对亮带进行识别和抑制。张乐坚等<sup>[16]</sup>在 Zhang 等方法的基础上,提出了一种使用天气雷达回波三维特征和 VPR 自动识别亮度层亮带的方法。

随着极化技术的发展,极化雷达在亮带识别方面展现了独特的优势。极化参量包括差分反射率  $Z_{DR}$ 、正交相关系数  $\rho_{HV}$ 、差分传播相移  $K_{DP}$  和线性退极化比(Linear Depolarization Ratio, LDR),这些参量在层云和对流云中都具有明显的融化层特征(见 Zrnic 等<sup>[17]</sup>)。此外,在反射率  $Z$  中没有亮带的情况下,极化参量对融化的水凝体也是非常敏感的<sup>[2]</sup>。Brandes 等<sup>[18]</sup>利用实测的  $Z, LDR, \rho_{HV}$  廓线与概念模型廓线的匹配关系,对层状云降水中的零度层高度进行了识别,与探空数据对比结果表明,识别精度在 100~200 m 之间。Tabary 等<sup>[19]</sup>利用类似的技术,单独使用  $\rho_{HV}$  廓线进行了亮带的识别。Scott<sup>[2]</sup>根

据不同水凝体在  $Z, Z_{DR}$  和  $\rho_{HV}$  中的不同特征,提出了一种自动识别融化层的算法,得到了融化层的顶高和底高,探空数据验证结果表明,估计的融化层顶高在距雷达 60 km 内的均方根误差为 200 m。

毫米波测云雷达的工作波长在 1~10 mm 之间,与传统的厘米波天气雷达相比,具有对小粒子敏感性强、空间分辨率高、受地杂波影响小以及体积小、重量轻、可移动性好等特点,可以探测到云的构成、形态、结构和微物理过程等,是非降水云和弱降水云探测的理想工具<sup>[20-24]</sup>。

以往融化层自动识别研究大多基于厘米波雷达探测数据,很少利用毫米波测云雷达。文章利用毫米波测云雷达反射率因子  $Z$  和线性退极化比  $LDR$  的距离高度显示(Range Height Indicator, RHI)扫描数据,通过计算  $Z$  和  $LDR$  的垂直廓线,进行融化层边界的自动识别。

1 设备与数据

文中使用的雷达数据为国内某型毫米波测云雷达在杭州的探测资料。该雷达使用了压缩比可变的脉冲压缩技术,采用 45°斜线极化发射、45°和 135°斜线极化双通道同时接收方式。发射机为全相干放大链式,输出管为行波管放大器,接收机采用双通道放大、混频模块,中频接收机为高性能的大动态数字接收模块,具有完善的机内自检(Build In Test, BIT)设计和自动标校功能。

雷达可同时输出反射率因子( $Z$ )、线性退极化比( $LDR$ )、平均径向速度( $V$ )和速度谱宽( $W$ )等产品,具有平面位置显示(Plane Position Indicator, PPI)、RHI、固定指向和体扫等多种扫描方式。表 1 列出了该雷达的一些参数。

为了尽可能减小杂波的干扰,在进行融化层的

表 1 毫米波测云雷达性能参数  
Table 1 Parameters of the millimeter wave radar used in this paper

| 项目    | 参数                                | 项目     | 参数          |
|-------|-----------------------------------|--------|-------------|
| 工作频段  | Ka 波段                             | 天线直径   | 1.5 m       |
| 距离分辨率 | ≤75 m                             | 波束宽度   | ≤0.4°       |
| 探测范围  | 距离:0.15~30 km                     | 天线扫描方式 | PPI: 0~360° |
|       | $Z$ : -50~+30 dBz                 |        | RHI: 0~90°  |
|       | $V$ : -8.5~+8.5 m·s <sup>-1</sup> |        | 固定指向        |
|       | $W$ : 0~4 m·s <sup>-1</sup>       |        | 体扫:层数可设定    |
|       | $LDR$ : -30~-5 dB                 |        |             |

识别之前,需对雷达资料进行预处理<sup>[25]</sup>,主要包括三个方面:(1)在整个探测范围内,反射率因子通过减去一个固定值来消除噪声的干扰;(2)对于周围无值的孤立回波像素点,认为其为噪声加以剔除;(3)对于反射率因子不存在的区域,从其他参量中剔除相应的区域,即认为  $Z$  不存在的区域为数据的误差区域。

2 垂直廓线计算

雷达探测的 RHI 数据中(图 1),计算距离雷达

$R$  个距离库处反射率垂直廓线(VPR)的步骤如下:

- (1) 对于仰角为  $\alpha$  的波束,计算其与  $R$  处垂线的交点,交点处的反射率即为距离  $R$  处垂直廓线中高度  $h$  处的反射率值。
- (2) 遍历所有波束,求出廓线中各个高度上的反射率值。
- (3) 对于没有反射率的高度,进行线性插值得到反射率。
- (4) 使用三点滑动平均对垂直廓线进行平滑,降低干扰,即可得到反射率的垂直廓线(图 2 中实曲线)。

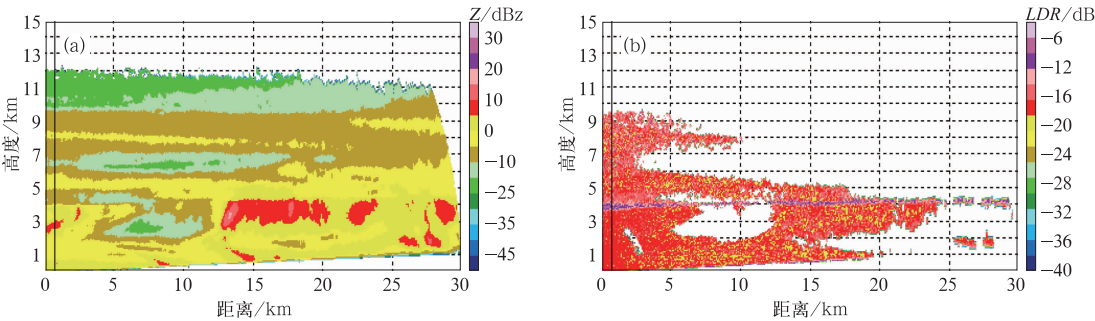


图 1 2010 年 5 月 13 日 17:13(北京时,下同)毫米波测云雷达在 杭州探测的 RHI 反射率(a)和  $LDR$ (b)

Fig. 1 The RHI reflectivity (a) and  $LDR$  (b) data of MM-wave radar in Hangzhou at 17:13 BT 13 May 2010

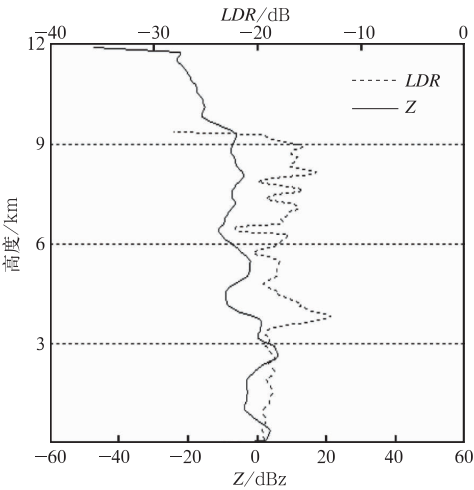


图 2 距离雷达 750 m 处(图 1 中黑色垂线)反射率  $Z$ (实线)和线性退极化比  $LDR$ (虚线)垂直廓线

Fig. 2 Vertical profiles of  $Z$  (solid) and  $LDR$  (dashed) at 750 m (vertical black lines in Fig. 1) from the radar

利用同样的方法,可求出  $LDR$  的垂直廓线(图 2 中虚曲线)。

3 融化层边界识别算法

3.1 融化层反射率因子和  $LDR$  参量特征

对所使用的双线极化毫米波测云雷达而言,反射率因子和线性退极化比具有明显的融化层特征。当云粒子的主轴与发射电磁波的电场方向不平行时,一部分能量以与发射极化波相同的极化状态返回,称为同极化波;另一小部分能量将会被退极化而以与发射极化波正交的极化状态返回,称为正交极化波。由同极化回波得到的反射率比因子称为水平反射率因子  $Z_h$ ,文中所使用毫米波测云雷达输出的反射率即为水平反射率。

线性退极化比( $LDR$ )定义为正交极化与同极化信号比率的对数,即:

$$LDR = 10 \lg \frac{Z_{VH}}{Z_{HH}}$$

$Z_{VH}$  和  $Z_{HH}$  分别为发射水平极化波时在垂直极化(正交极化)和水平极化(同极化)方向接收的信号。显然,对于线极化波,球形粒子将返回相同极化的回波, $LDR$  的值为 $-\infty$ 。 $LDR$  与粒子的浓度无关。

冰晶、雪花下落过程中,通过  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层后,表面开始融化,水凝体的融化及其引起的介电常数、粒子落速、粒子形状和尺寸以及浓度的变化等,使得雷达反射率和  $LDR$  迅速增大,形成了明显的亮带。

融化层的上边界通常由反射率廓线曲率的变化得到(如:Fabry 等<sup>[13]</sup>)。然而,反射率的增加也可能是由粒子的增长和聚合引起的,在融化层上方其他极化量(如  $LDR$ )的融化层特征出现之前,反射率的增加是很正常的<sup>[7]</sup>。因此,通过反射率廓线曲率变化得到的融化层上边界并不一定是真实的边界。层状云降水中的大的冰粒子,能够降落到温度为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的地方(Willis 等<sup>[11]</sup>),融化最后阶段的水凝体与雨滴区很难用反射率区分出来,融化层的下边界可能是模糊的。

对于融化层下方的雨和融化层上方的干雪, $LDR$  很小,在 $-34\sim-25\text{ dB}$ (取决于天线隔离度),而对于融化层中的湿雪以及融化中的雪的  $LDR$  在 $-20\sim-15\text{ dB}$ <sup>[6]</sup>。可见, $LDR$  对融化层边界比较敏感。

对于毫米波测云雷达而言,受降水、云等的衰减,有时候在反射率因子中并没有亮带特征(图 1a),而在  $LDR$  中亮带特别明显(图 1b)。从图 2 的垂直廓线也可看出, $LDR$  廓线中融化层(极大值处)的边界(极大值上下两侧拐点)也非常明显,而在反射率廓线中并没有明显的融化层特征。这些说明, $LDR$  对融化层的敏感性比反射率因子要高。

3.2 融化层边界识别

如前所述,毫米波测云雷达中反射率因子和  $LDR$  都能反映融化层的特性,在有些情况下, $LDR$  要更敏感。显然,把反射率因子和  $LDR$  结合起来进行识别是一种有效的方法,因为利用两个参量中的融化层特性进行相互验证,可以提高边界识别的精度,而且在某一个参量融化层特性不明显的情況下,利用融化层特性明显的参量进行识别,可以提高融化层的识别率。

文中融化层边界自动识别技术,是在 Zhang

等<sup>[1]</sup>方法基础上,结合毫米波测云雷达的特点提出的。 $RHI$  数据中在水平轴上,从雷达最近的距离处,由近及远,以距离库长为单位,对每个有数据的距离库进行亮带识别。图 3 为单个距离库上亮带识别流程,主要包含以下几个步骤:

- (1) 求该距离库上  $Z$  和  $LDR$  的垂直廓线。
- (2) 判断  $Z$  和  $LDR$  垂直廓线中最大值点所在的高度  $H_{zm}$  和  $H_{lm}$ ,以及  $LDR$  廓线中  $H_{lm}$  上方和下方最近的两个曲率最大点所在的高度  $H_a$  和  $H_b$ 。
- (3) 利用约束条件对  $H_{z0}$  和  $H_{l0}$ , $H_a$  和  $H_b$  进行判断,得到  $H_a$  和  $H_b$ 。

约束条件有:

$|H_{zm} - H_{lm}| < \Delta H_0$  (1)

$|H_a - H_{lm}| < \Delta H_1$  (2)

$|H_{lm} - H_b| < \Delta H_2$  (3)

其中, $\Delta H_0$  约束了反射率与  $LDR$  垂直廓线中极值所在高度的差值; $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  约束了融化层的对称性,二者的和表示融化层的厚度。Brandes 等<sup>[18]</sup>利用 WSR88D 雷达数据,得到了反射率和  $LDR$  垂直廓线中二者极值高度差计算公式:

$$d = 0.03221 + 0.000845Z_{\max} + 0.0000876Z_{\max}^2$$

$d$  的单位为  $\text{km}$ , $Z_{\max}$  为反射率因子的最大值,单位为  $\text{dBz}$ 。Zhang 等<sup>[1]</sup>认为,融化层的厚度一般不超过  $1.5\text{ km}$ 。利用 2009 年毫米波测云雷达在合肥以及 2010 年在杭州探测数据的分析表明, $LDR$  垂直

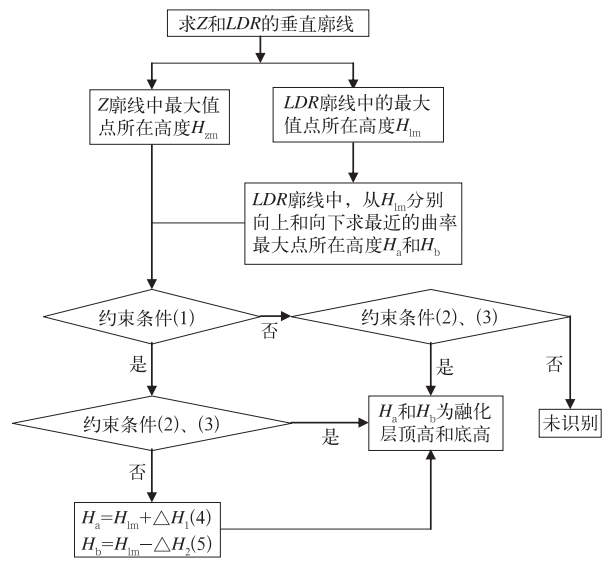


图 3 单距离库融化层识别流程图  
(约束条件见正文)

Fig. 3 Process chart of the melting layer identification in single range (constraints see the text)

廓线中,融化层上下边界关于  $LDR$  最大值所在高度上下对称,因此取  $\Delta H_1 = \Delta H_2$ 。

文中,  $\Delta H_0$ ,  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  分别设为 300 m, 750 m 和 750 m。

重复以上步骤,对所有距离库垂直廓线中的融化层边界进行识别,即可得到整个融化层的顶高和底高廓线。

4 结果分析

4.1 识别结果对比分析

利用 2010 年 5—10 月间的雷达探测数据,对文

中的融化层边界识别算法进行了验证。在层状云降水情况下,反射率或  $LDR$  有亮带特征时,算法均能有效识别出融化层边界;在卷云,低云、对流云等没有亮带特征的情况下,算法也未识别出。在中雨(含)以上层状云降水天气下,回波有明显的衰减,但是在近距离  $LDR$  中均具有亮带特征,算法也能正确识别。

2010 年 5 月 13 日 17 时杭州天气为小雨,图 4 是 17:13 毫米波测云雷达探测数据(图 1)的融化层边界自动识别结果。

为了验证识别结果的准确性,在层状云降水情况下,把雷达自动识别的融化层上边界平均高度与探空数据中得到的零度层高度进行了对比。由于受

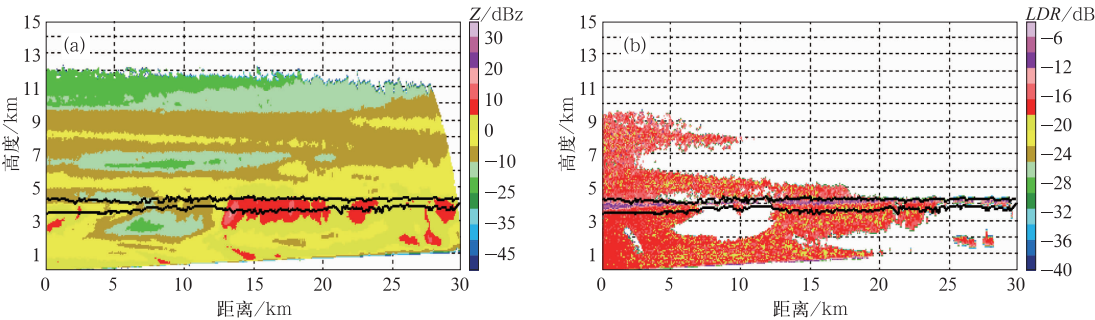


图 4 自动识别的融化层边界廓线(数据同图 1)  
Fig. 4 Auto identified profile of the melting layer boundary (the data same as Fig. 1)

到探空时次的限制,雷达探测的时间与探空的时间并不完全一致,只能利用距离雷达探测时间最近的一次探空数据来对比。选取了 2010 年 5—10 月毫米波测云雷达在杭州的 9 次探测数据与相应最近时次的探空数据进行分析和比较。为了保证数据的可比较性,雷达探测数据和探空数据得到的高度均为

海拔高度。表 2 为 9 次结果的对比,从表中可以看出,雷达自动识别结果与探空数据具有很好的一致性,二者误差小于 100 m,证明了识别技术的有效性。对比结果也说明,毫米波测云雷达自动识别的融化层上边界可以较好地代表零度层的高度。

表 2 毫米波测云雷达识别的融化层上边界平均高度与实测零度层高度对比(高度均为海拔)

Table 2 Comparison between the top boundary average height of melting layer designated by MM-wave radar and the measured freezing level (AGL)

| 雷达探测时间<br>(2010 年)/月/日/时 | 雷达识别的融化层上<br>边界平均高度/m | 探空资料时间<br>(2010 年)/月/日/时 | 探空零度层<br>高度/m | 绝对误差<br>/m |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------------|
| 5 月 12 日 23:52           | 4224                  | 5 月 13 日 02:04           | 4276          | 38         |
| 5 月 13 日 10:53           | 4215                  | 5 月 13 日 08:00           | 4226          | 11         |
| 5 月 13 日 17:13           | 4383                  | 5 月 13 日 20:00           | 4415          | 32         |
| 5 月 14 日 09:14           | 4141                  | 5 月 14 日 08:00           | 4181          | 40         |
| 5 月 20 日 10:30           | 4357                  | 5 月 20 日 08:00           | 4388          | 31         |
| 6 月 10 日 16:23           | 4889                  | 6 月 10 日 20:00           | 4879          | 10         |
| 8 月 26 日 19:56           | 4852                  | 8 月 26 日 20:00           | 4930          | 78         |
| 9 月 10 日 10:37           | 4953                  | 9 月 10 日 02:01           | 5023          | 70         |
| 10 月 12 日 10:36          | 4487                  | 10 月 12 日 08:00          | 4578          | 92         |



4.2 参数敏感性分析

在融化层边界自动识别算法中,设置了反射率与  $LDR$  垂直廓线极值高度差值( $\Delta H_0$ )和融化层厚度( $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$ )约束条件,下面通过调整各约束条件中参数的不同取值,分析毫米波测云雷达识别出的融化层上边界平均高度与实测零度层高度之间误差的变化情况。由于  $\Delta H_2$  对融化层上边界的识别结果没有影响,取  $\Delta H_2 = \Delta H_1$ 。

下面利用 2010 年 5 月 13 日 17:13 毫米波测云雷达在杭州探测的数据(图 1),对  $\Delta H_0$ ,  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  不同取值造成的误差进行了分析。首先,固定  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  值,分析  $\Delta H_0$  对误差的影响。分别取  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  为 450, 600, 750, 900 m,得到图 5 中的误差随  $\Delta H_0$  变化曲线。从图 5 中可以看出,对于不同的  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  值,误差随  $\Delta H_0$  变化的趋势相同,  $\Delta H_0$  在 225~525 m 之间时,误差最小,两端误差逐渐增大。显然,并不是  $\Delta H_0$  值越小误差越小,这说明了融化层在反射率因子和  $LDR$  中特性的不同,  $LDR$  的最大值在融化层的中间,而反射率因子的最大值并不在融化层中间。

在  $\Delta H_0$  值不变的情况下,分析  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  值变化对误差的影响。分别取  $\Delta H_0$  为 150, 300, 450 m,得到了误差随  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  值变化的曲线(图 6)。从图 6 中可以看出,在不同  $\Delta H_0$  值下,误差随  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  值变化的趋势相同,  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  值在 300~750 m 之间时,误差最小,小于 150 m 时,识别不出融化层边界。这说明,融化层的厚度在 600~1500 m,与以往的研究结果一致。

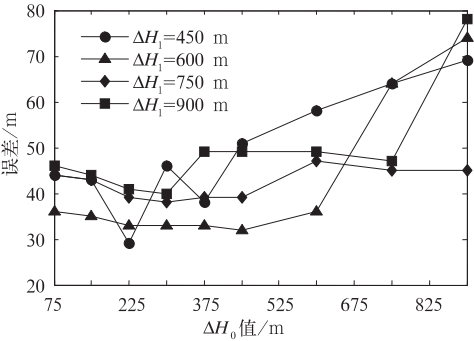


图 5  $\Delta H_1$  ( $\Delta H_2 = \Delta H_1$ ) 取不同值时,  $\Delta H_0$  变化对误差的影响

Fig. 5 The impact of  $\Delta H_0$  on the error while  $\Delta H_1$  ( $\Delta H_2 = \Delta H_1$ ) is constant

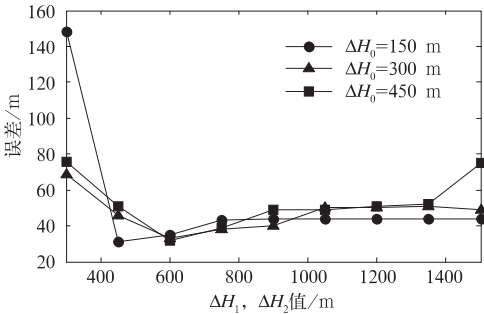


图 6  $\Delta H_0$  取不同值时,  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$  变化对误差的影响

Fig. 6 The impact of  $\Delta H_1$  on the error while  $\Delta H_0$  is constant

5 小 结

毫米波测云雷达可以有效弥补天气雷达对非降水云和弱降水云探测的不足,是研究云和降水发展的有效工具。文中利用毫米波测云雷达 RHI 的反射率和  $LDR$  数据,提出了一种适用于毫米波测云雷达的融化层边界自动识别技术。在反射率因子或线性退极化比数据中具有亮带特征时,该技术能有效识别。通过识别结果与实测数据的对比表明,使用反射率和  $LDR$  双重约束,一方面确保了亮带识别的有效性,即能够识别放射率中亮带不明显的融化层;另一方面确保了获得的亮带高度的精度。

与国内外其他的研究结果相比较,文中得到的零度层高度精度相对较高,误差较小的原因有三个:(1) 毫米波测云雷达精度高。文中所用毫米波测云雷达距离分辨率为 75 m,而 S 波段天气雷达 CINRAD-SA/SB 的分辨率为 1 km<sup>[16]</sup>;(2)  $LDR$  对融化层敏感。反射率因子中没有亮带特征时,  $LDR$  中也能看到明显的亮带特征;(3) 利用反射率因子和  $LDR$  进行双重约束,确保了识别的精度。

文中的算法虽然是在 RHI 扫描数据基础上提出的,对于 PPI 扫描、定向探测、体扫等也同样适用,不同之处在于垂直廓线的算法。因此,该方法可应用于毫米波测云雷达的所有探测方式,非常适合业务应用。

参考文献

[1] Zhang J, Langston C, Howard K. Bright band identification from vertical profile of reflectivity[C]. Preprints, the 33rd Conf on Radar Meteorology, Amer Meteor Soc, 2007, P8A.13.

- [2] Giangrande S E, Krause J M, Ryzhkov A V. Automatic designation of the melting layer with a polarimetric prototype of the WSR-88D radar[J]. J Appl Meteor, 2008, 47: 1354-1364.
- [3] 杨丹丹, 申双和, 邵玲玲, 等. 雷达资料和数值模式产品融合技术研究[J]. 气象, 2010, 36(8): 53-60.
- [4] 肖艳娇, 刘黎平, 李中华, 等. 雷达反射率因子数据中的亮带自动识别和抑制[J]. 高原气象, 2010, 29(1): 197-205.
- [5] Smith C J. The reduction of errors caused by bright bands in quantitative rainfall measurements made using radar[J]. J Atmos Oceanic Tech, 1986, 3: 129-141.
- [6] Huggel A, Schmid W, Waldvogel A. Raindrop size distributions and the radar bright band[J]. J Appl Meteor, 1996, 35: 1688-1701.
- [7] Vivekanandan J, Zrnic D S, Ellis S M, et al. Cloud microphysics retrieval using S-band dual-polarization measurements[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1999, 80: 381-388.
- [8] Giangrande S E, Ryzhkov A V. Polarimetric method for bright band detection[C]. Preprints, the 11th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Amer Meteor Soc, 2004, P5. 8.
- [9] Takeda T, Fujiyoshi Y. Microphysical processes around melting layer in precipitating clouds as observed by vertically pointing radars[J]. J Meteor Soc Japan, 1978, 56: 293-303.
- [10] Stewart R E, Marwitz J D, Pace J C, et al. Characteristics through the melting layer of stratiform clouds[J]. J Atmos Sci, 1984, 41: 3227-3237.
- [11] Willis P T, Heymsfield A J. Structure of the melting layer in mesoscale convective system stratiform precipitation[J]. J Atmos Sci, 1989, 46: 2008-2025.
- [12] 李铁林, 雷恒池, 刘艳华, 等. 河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析[J]. 气象, 2010, 36(9): 74-80.
- [13] Fabry F, Zawadzki I. Long-term radar observations of the melting layer of precipitation and their interpretation[J]. J Atmos Sci, 1995, 52: 838-851.
- [14] Sánchez-Diezma R, Zawadzki I, Sempere-Torres D. Identification of the bright band through the analysis of volumetric radar data[J]. J Geophys Res, 2000, 105: 2225-2236.
- [15] Gourley J J, Calvert C M. Automated detection of the bright band using WSR-88D data[J]. Wea Forecasting, 2003, 18: 585-599.
- [16] 张乐坚, 程明虎, 陶岚. CINRAD-SA/SB 零度层亮带识别方法[J]. 应用气象学报, 2010, 21(2): 171-178.
- [17] Zrnic D S, Balakrishnan N, Ziegler C L, et al. Polarimetric signatures in the stratiform region of a mesoscale convective system[J]. J Appl Meteor, 1993, 32: 678-693.
- [18] Brandes E A, Ikeda K. Freezing-level estimation with polarimetric radar[J]. J Appl Meteor, 2004, 43: 1541-1553.
- [19] Tabary P, Henaff A L, Vulpiani G, et al. Melting layer characterization and identification with a C-band dual-polarization radar: A long-term analysis[C]. Preprints, Fourth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2006), Barcelona, Spain, Servei Meteorologic de Catalunya, 2006: 17-20.
- [20] Peter V H, Nathan T F, Richard R W, et al. Evaluation of a 35 GHz radar for cloud physics research[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1985, 2: 35-48.
- [21] Mead J B, Pazmany A L, Sekelsky S M, et al. Millimeter-wave radar for remotely sensing clouds and precipitation[J]. Proceeding of the IEEE, 1994, 2: 1891-1906.
- [22] Krofli R A, Kelly R D. Meteorological research applications of MM-wave radar[J]. Meteorol Atmos Phys, 1996, 59: 105-121.
- [23] Kollas P, Clothiaux E E, Miller M A, et al. Millimeter-wavelength radar new frontier in atmospheric cloud and precipitation research[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2007, 88(10): 1608-1624.
- [24] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 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, 2009, 24(4): 383-391.
- [25] 马中元, 朱春巧, 刘照明, 等. CINRAD 雷达数据质量控制方法初探[J]. 气象, 2010, 36(8): 134-141.