

文章编号: 2096-1618(2022)02-0159-06

基于模糊逻辑的双偏振天气雷达地物杂波识别算法

杜捷¹, 王海江¹, 孙召平²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 北京敏视达雷达有限公司, 北京 100094)

摘要:多普勒天气雷达探测到的雷达回波通常受到某些非气象因素的干扰,影响雷达资料的量化应用,故在雷达数据应用之前,应对其进行质量控制,地物杂波的识别与剔除是质量控制的关键内容之一。利用降水粒子与地物的相态差异,在模糊逻辑算法基础上,引入差分反射率因子垂直纹理参数进行地物杂波剔除。首先,根据雷达资料相关特征参数的概率分布情况,建立对应的梯形隶属函数;其次,选取合适的阈值,利用单参数法和改进的模糊逻辑法对双偏振天气雷达数据中的地杂波进行识别和剔除;最后,通过对比分析单参数剔除地物杂波方法与本文方法对地物杂波剔除的效果可得出结论,该偏振参量的引入能够有效地识别并剔除地物杂波。

关键词:双偏振天气雷达;质量控制;偏振参量;地物杂波;模糊逻辑

中图分类号:TN957.54

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2022.02.008

0 引言

随着气象事业的蓬勃发展,双线偏振雷达通过交替发射和接收水平和垂直偏振波,可获取云雨粒子的差分反射率 ZDR、差分传播相移 Φ_{DP} 、差分传播相移率 Kdp 以及协相关系数 CC 等偏振参量,较普通多普勒天气雷达具有更好的探测识别能力^[1-3]。但在探测降水的同时,雷达回波不可避免地受到包括地物杂波、海杂波和生物杂波(鸟类、昆虫等)等非气象回波的污染,这类非气象回波统称为地物杂波,会降低降水估计的准确度。因此,地物杂波的识别与剔除是双偏振天气雷达质量控制的一项重要工作之一^[4]。

当前,气象领域内对地物杂波的去除了主要从以下 3 方面进行:雷达的硬件设计和位置布局;雷达数据预处理与后处理;与其他数据源进行比较。Smith 等^[5]通过选择波长更短的雷达和调整雷达的地面位置以减少杂波及其强度;Steiner^[6]等提出一种以雷达反射因子和回波高度的空间变化作为判别非气象回波的决策树方法。Muller^[7]和 Riley^[8]提出以反射率因子水平和垂直梯度变化特征来识别地物。Zhang 等^[9]通过研究发现利用回波纹理并以雷达回波的垂直高度差代替上下两层仰角差可以有效识别地物回波。Lakshmanan 等^[10]利用前向反馈神经网络算法实现了自动识别和剔除非降水回波。Kessinger 等^[11]以从回波强度、径向速度和速度谱宽中提取 7 个物理量为特征参量,构建模糊逻辑分类算法,能有效识别非降水回波。此后刘黎平等^[12]、江源等^[13]、庄薇等^[14]、杜牧云等^[15]和宗蓉等^[16]对现有的雷达数据进行分析并改进模糊逻辑算

法的特征输入来识别剔除地物杂波。

本文在前人的研究基础上,选择反射率因子水平纹理(T_{dBZ})、反射率因子垂直梯度(G_{dBZ})、沿径向的库间变化程度(S_{PIN})、并引入差分反射率垂直纹理(V_{ZDR}) 4 个参数作为模糊逻辑的输入,对北京房山站 X 波段天气雷达数据进行试验分析。结果表明,算法有较好的地物识别与剔除效果。

1 地杂波识别算法

参考 1968 年 Zadeh^[17]提出的模糊逻辑算法,过程概括为:模糊化、规则推断、集成、退模糊。对从降雨天气和晴朗天气的回波强度和相关系数中提取的特征赋予相同的权重,设置相应的隶属函数并进行模糊化处理,得到每个库对应不同物理量的判据(范围在 0~1),其次进行加权平均,最后可得到每个点的最终判据值,并与设定的不同阈值进行比较,大于阈值的则判断为地物,反之则为降水回波。模糊逻辑算法流程图如图 1 所示。

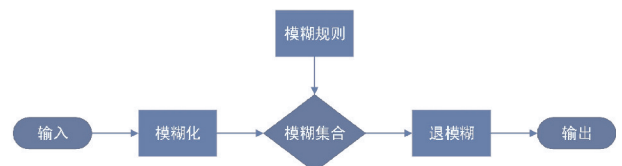


图 1 模糊逻辑算法流程图

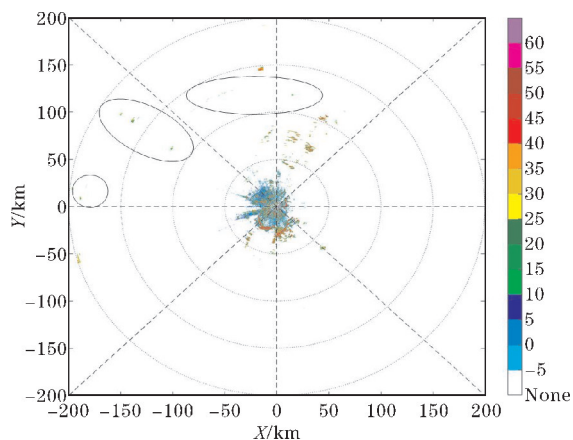
1.1 资料选取与预处理

选择 2020 年 8 月 12 日北京房山地区 X 波段偏振雷达的降雨数据与 2020 年 9 月 12 日的晴朗天气数据

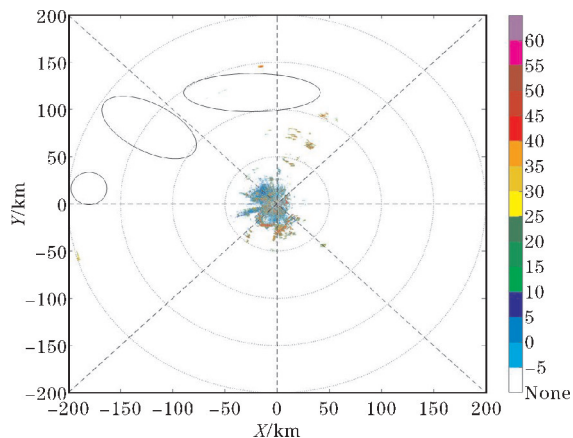
作为纯净降雨数据和地杂波数据。由于地杂波大多出现在地面附近高度,雷达天线会接收到的主瓣或旁瓣回波照射地物而返回的回波信号,为减少地杂波和生物回波对纯净降雨数据的污染,选择房山站天气雷达在降雨天气的高仰角层(2.5°)雷达数据作为纯净降雨数据,以晴好天气的低仰角层(0.5°)雷达数据作为地杂波数据。

由于雷达回波中常出现的一些零散、空间分布不连续的孤立回波,会对雷达资料的后续使用造成不可忽视的影响。故采用窗口滤波的方式逐径向、逐库予以剔除,即对处于第 i 条径向第 j 个距离库的回波值,以此为中心,选择径向和距离库范围分别为 N_A 、 N_R 的窗口,统计窗口内探测到的有效值总数 $T_{i,j}$,若其个数占窗口总数的比率超过一定的阈值(缺省值 65%),即视为有效值,否则视该库值为孤立点并设为无效值 nan。其公式如式(1)。图 2 为孤立回波剔除前后对比,由图 2(b)可知该方法能够有效消除孤立回波。

$$P_{i,j} = \frac{T_{i,j}}{N_A \times N_R} \quad (1)$$



(a) 剔除前



(b) 剔除后

图2 孤立点剔除前后回波图

1.2 特征参数

Steiner 等^[18]在研究一系列的反射率参数的基础

上,认为以下 3 个参数最有用,包括回波强度的水平纹理(T_{dBZ})、垂直梯度(G_{dBZ})、沿径向的库间变化程度(S_{PIN})。本文在 Kessinger 的模糊逻辑方法的基础上,引入差分反射率垂直纹理(V_{ZDR}),这些物理量的定义式为

$$T_{dBZ} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} (Z_{i,j} - Z_{i,j+1})^2}{N_A \times N_R} \quad (2)$$

$$G_{dBZ} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} (Z_{up,i,j} - Z_{low,i,j})^2}{N_A \times N_R} \quad (3)$$

$$S_{PIN} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} M_{SPIN}}{N_A \times N_R} \quad (4)$$

$$M_{SPIN} = \begin{cases} 1 & |Z_{i,j} - Z_{i,j+1}| \geq Z_{thresh} \\ 0 & |Z_{i,j} - Z_{i,j+1}| < Z_{thresh} \end{cases} \quad (5)$$

$$V_{ZDR} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} (ZDR_{UP,i,j} - ZDR_{LOW,i,j})^2}{N_A \times N_R} \quad (6)$$

其中: N_A 、 N_R 分别表示方位和径向方向限定的计算范围, i,j 分别为方位和径向上的索引; Z 、 ZDR 分别表示水平反射率因子和差分反射率因子; Z_{low} 和 Z_{up} 分别对应本层和上层的 PPI 的回波强度; ZDR_{UP} 表示当前库上一层仰角所对应的差分反射率值, ZDR_{LOW} 表示当前仰角层差分反射率值; Z_{thresh} 为径向上相邻距离库回波强度变化的阈值; T_{dBZ} 为回波强度的水平纹理,表征回波的局地变化大小; G_{dBZ} 反映了反射率因子垂直变化情况; S_{PIN} 反映了回波强度库间变号情况; V_{ZDR} 反映了每个库的差分反射率在垂直方向上的变化情况;文中设定: $N_A=5$ 、 $N_R=5$, $Z_{thresh}=2$ dBZ。

1.3 降水和地物回波统计分析

通过统计分析可知,对于降水回波,反应回波库间光滑程度的 T_{dBZ} 多为 $0 \sim 10$ dBZ²,而地杂波分布较离散,多分布在 $0 \sim 300$ dBZ²;降雨回波垂直梯度 G_{dBZ} 约在 $0 \sim 50$ dBZ²,而地杂波垂直梯度 G_{dBZ} 则在更广范围的 $0 \sim 1000$ dBZ²;降雨回波的 S_{PIN} 约在 $0 \sim 0.6$,而杂波的 S_{PIN} 则分布在 $0 \sim 1$ 。8 月 12 日房山地区有东风 2~3 级,风力较小,故降水粒子水平方向形变较小,而由于降水粒子在下落过程中受到空气阻力的影响,横轴较竖轴长,导致其形状呈现椭球形,其差分反射率为正值。但由于降水粒子在空间上变化较平缓,其差分反射率垂直纹理 V_{ZDR} 更靠近 0 dB²,而地物的差分反射率垂直纹理 V_{ZDR} 则分布范围更广,在 $0 \sim 80$ dB²。各特征参数的概率分布如图 3 所示,并基于梯形函数构建各特征参数的隶属函数模糊基,如图 4 所示。

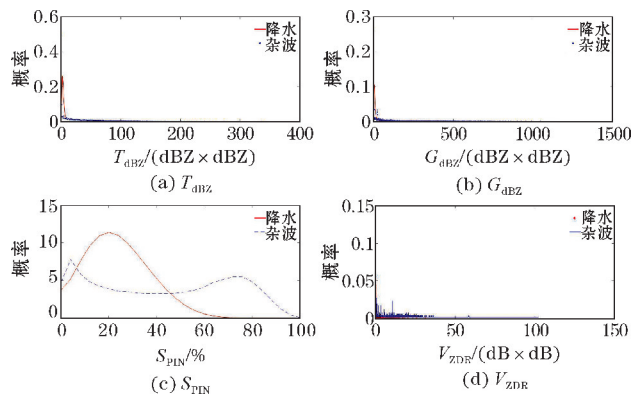


图3 降水和地物的各特征参数概率分布

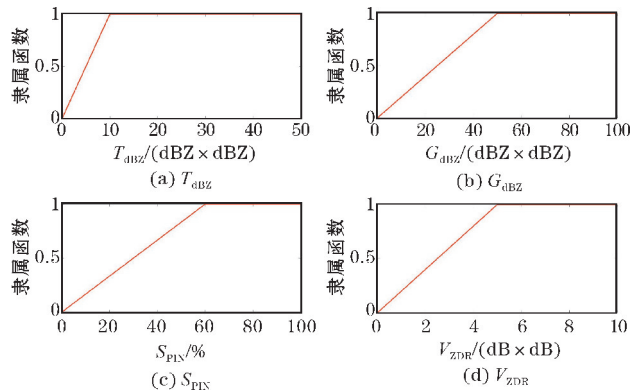


图4 地杂波识别各特征的隶属函数

2 地杂波识别效果

2.1 单参数去地物杂波

所选4个特征参数 T_{dBZ} 、 G_{dBZ} 、 S_{PIN} 、 V_{ZDR} 分别设置多组阈值,并对比进行地杂波滤除,其阈值选取情况及其对应的杂波识别准确率和降水回波误判率如表1。

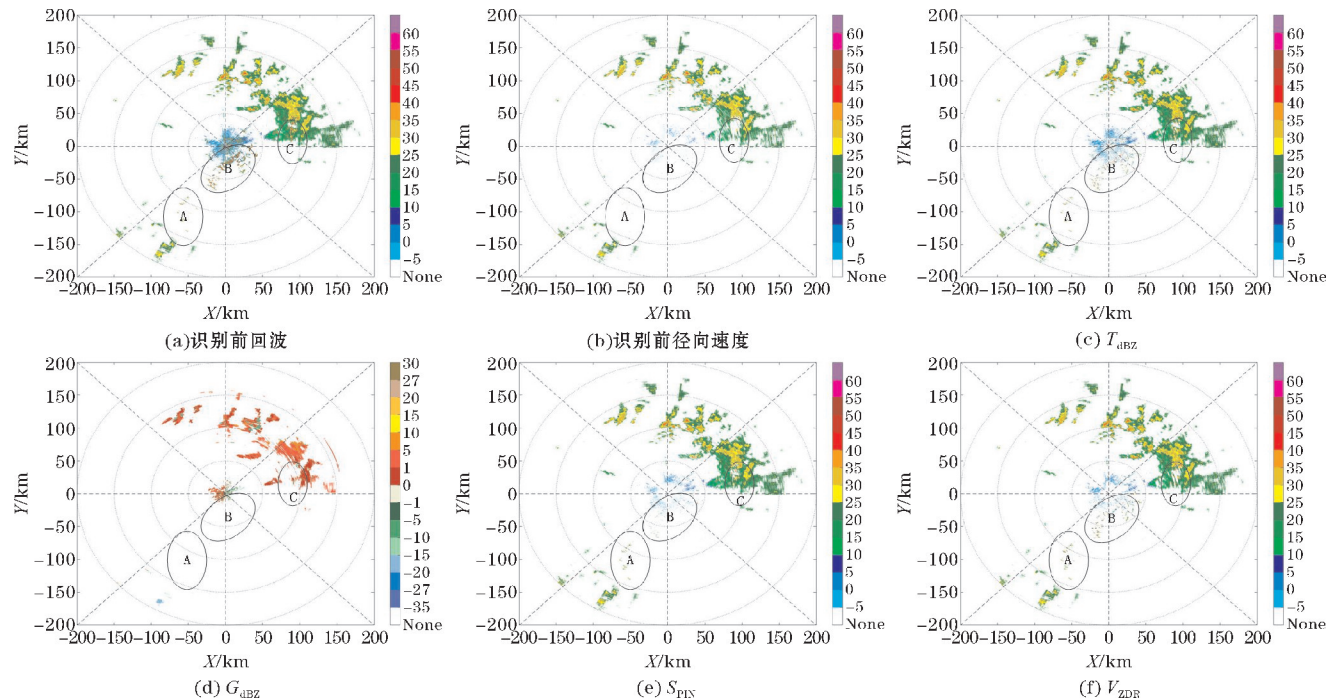


图5 单参数地物剔除PPI

表1 单参数识别地物杂波阈值选取及识别率与误判率			
参数	阈值	杂波识别准确率/%	降水回波误判率/%
T_{dBZ}	5	89	9
	10	85	4
	15	80	2
	20	77	1
	25	73	1
G_{dBZ}	50	83	3
	40	85	4
	30	88	6
	20	93	12
	10	98	25
S_{PIN}	0.4	90	16
	0.5	88	4
	0.6	85	2
V_{ZDR}	0.7	83	1
	1	91	10
	2	89	6
	4	87	3
	6	83	2

由表1可知,在运用单个参数进行地物滤波滤除时,在杂波识别准确率较高的情况下,降水回波的误判率较高;在低的降水回波误判率情况下,其杂波识别准确率却很低,难以找到一个合适的阈值进行地杂波滤除。分别对各参数选取其中效果稍好的阈值进行地杂波滤除,如图5所示。图5(a)为识别前的第一层PPI,图5(b)为识别前第一层径向速度PPI,图5(c)选取 T_{dBZ} 阈值为10 dBZ²时杂波滤除后PPI,图5(d)选取 G_{dBZ} 阈值为50 dBZ²时杂波滤除后PPI,图5(e)选取 S_{PIN} 阈值为0.6时杂波滤除后PPI,图5(f)选取 V_{ZDR} 阈值为2 dB²时杂波滤除后PPI。

2.2 基于模糊逻辑去地物杂波

首先根据降水回波和地杂波的各特征参数分布范围,构建隶属函数并分别设置对应的阈值,计算 PPI 数据上的每个库的各个参数的判据值 C_i 。其次对每个库的所有判据值进行加权平均,得到每个库的最终判据 R_i ,该判据值越大表示该库位地杂波的概率越大,相反则代表为降水回波的概率越大。最后通过将判据值 R 与预先设定的阈值相比,大于阈值则判断为地杂波,反之则视为降水回波。加权平均公式为

$$R_i = \frac{\sum_{i=1}^4 P_i R_i}{\sum_{i=1}^4 P_i} \tag{7}$$

其中, P_i 为各特征参数权重,本文采取等权重即各特征参数权值 P_i 为 1。算法对于不同阈值情况下的地杂波识别率与降水误判率情况见表 2,其中地杂波识别准确率采用无降雨晴朗天气下的雷达低仰角层 (0.5°) 数据验证,降水回波准确率采用降雨天气高仰

角层 (2.5°) 雷达数据验证。

表 2 地杂波识别准确率和降水回波识别误判率		
阈值	地杂波识别准确率/%	降水回波误判率/%
0.40	96	13
0.45	93	11
0.50	89	7
0.55	83	5
0.60	71	3

由表 2 可知,显然,在阈值设定为 0.4 时,地杂波的识别准确率高达 96%,但其降水回波误判率也高达 13%;当阈值选取为 0.6 时,即使降水回波误判率低至 3%,但其相应的地杂波识别准确率仅有 71%,效果不佳。在综合保持高的地物识别准确率和低的降水回波误判率情况下,最终设定滤波阈值为 0.5。现对北京房山地区 2020 年 8 月 12 日 17:24:00 的一次降水天气的雷达体扫数据的一层 (0.5°)、二层 (1.5°) 仰角进行杂波识别与剔除,结果如图 6 所示。

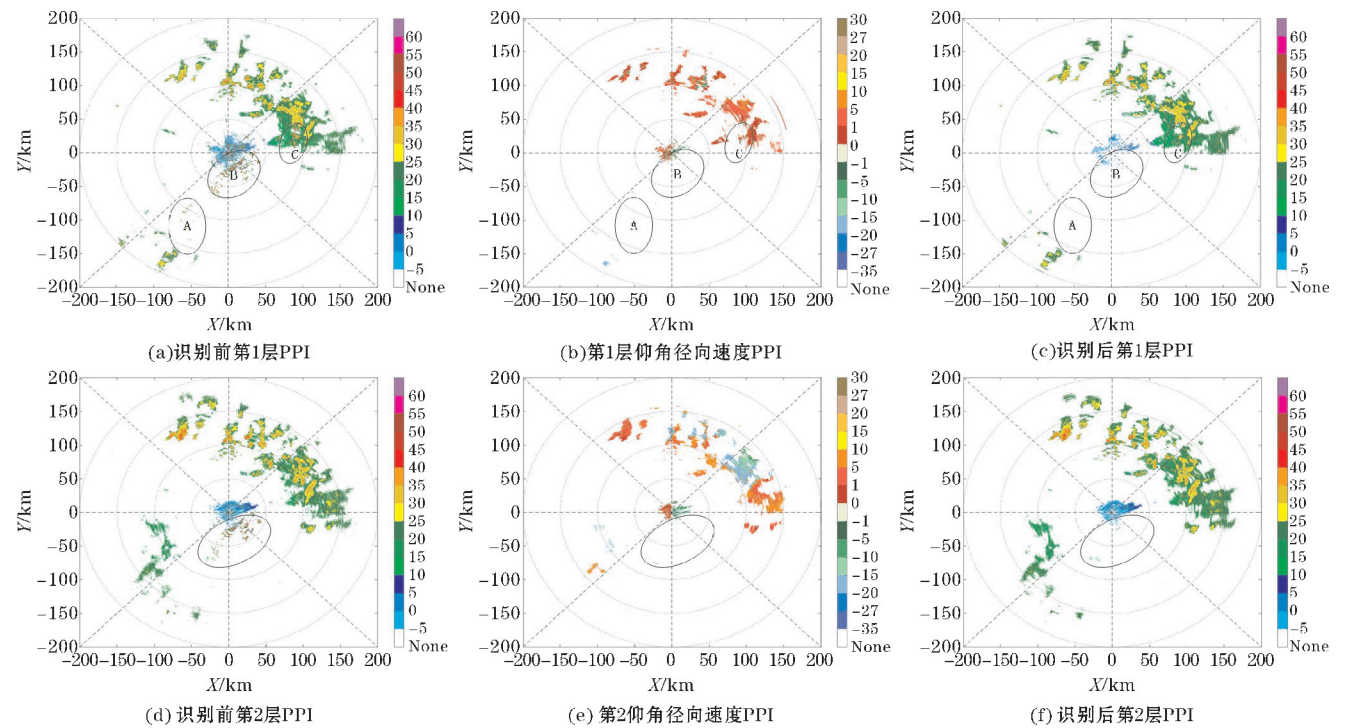


图 6 2020 年 8 月 12 日 17:24:00 北京房山站雷达回波 PPI 观测图

3 识别结果分析

对于运用单参数进行地物杂波识别与剔除的方法,由地物杂波的径向速度为 0 m/s,对比图 5(a)、(b) 可知图 5(a) 中 A、B、C 区域均存在地物杂波。图 5(c) 为仅用反射率因子水平纹理进行杂波识别滤除后的 PPI,其中,A 区域地杂波得到有效滤除,B、C

区域虽能滤除绝大部分地物杂波,但对降水回波的误滤除十分明显,如 C 区域右侧部分,表明该参数不能准确识别杂波和降水回波重叠区域中的地物杂波。图 5(d) 为仅用反射率因子垂直梯度对地物杂波进行滤除后的 PPI,其中,C 区对杂波的滤除效果较好且降水信息能够得到更完整的保留,而 A 区域对杂波的识别率较低,B 区域对降水回波的误判较高,同样表明该参数不能够很好地识别杂波和降水回波重叠区域。

图5(e)为仅用回波库间变号进行杂波识别剔除后的PPI,C区域虽能识别重叠部分里的杂波,且B区域对降水的误判较低,但A、B区域表现出对杂波的识别率不够高,该参数存在低的杂波识别率问题。图5(f)为仅用差分反射率垂直纹理识别地物杂波的PPI,图中A、B区域对杂波的滤除不彻底且对B区域降水回波的保留程度不高,C区域能够滤除地物杂波且有轻微的降水误判。综上所述,单参数进行地杂波滤除效果不佳,且对降水信息的保留程度不高。

对于运用模糊逻辑算法识别地物杂波,对比分析图6(a)、(b)可知,在第一层仰角层下,位于雷达西南方向125 km远处A区域、雷达南方向近处B区域以及位于雷达东方向100 km左右C区域均存在地杂波。杂波识别剔除结果如图6(c),A、B、C区域内的地物杂波均得到有效剔除,且对B、C区域内的降水误判较低。在第二层仰角层下,对比分析图6(d)、(e)可知,雷达站东南近处画圈区域内存在地物杂波,经过模糊逻辑去地杂波后,圈内区域地物杂波基本得以去除且较高程度得保留了降水回波信息。

通过引入偏振参量,使改进的模糊逻辑算法在偏振天气雷达的地物杂波识别过程中有较好的表现,较大程度剔除地物回波并保留降水回波信息,说明偏振参量对地物识别的可行性。但仍会对少数降水回波产生误判,根据多次调整权值分析发现,不同的权重分配会不可避免地引起降水误判,因此对于如何分配权值以减少降水回波误判有待进一步研究。

4 结束语

在前人探究的基础上,利用地物和降水粒子的空间分布特性,对北京房山站X波段天气雷达观测资料进行地杂波识别分析。统计分析了从反射率因子得来的水平纹理、垂直纹理、径向变号以及引入从偏振参量ZDR演变而来的垂直纹理参数 V_{ZDR} ,最后运用基于模糊逻辑的地杂波识别算法对雷达观察资料进行地物杂波识别实验。可得到如下结论:

(1)地物杂波和降水回波的反射率因子水平纹理(T_{dBZ})、垂直纹理(G_{dBZ})、径向库间回波强度变化程度(S_{PIN})以及差分反射率垂直纹理(V_{ZDR})4个特征参数的分布有明显的区别,能够作为模糊逻辑输入用来识别地杂波与降水回波。

(2)在单独运用每个特征参数进行地物杂波识别的过程中,出现了地杂波与降水回波重叠区域杂波识别度不高以及降水回波误判较大的现象,故单参数进行杂波识别不能够有效剔除地物杂波并较完整地保留

降水回波信息。

(3)通过进行一、二层仰角PPI地物回波识别实验发现,对于低仰角层中的地物回波识别仍然存在少许漏判,对高仰角层中的地物回波识别效果较好。

本文模糊逻辑算法中对特征参数采取等权值分配方案,虽能有效识别重叠区域与非重叠区域内的地物回波,但仍会对部分降水回波信息产生误判。为得到更加准确的气象信息,如何合理分配各参数权值以减少对降水回波的误判是下一步研究的关键。

参考文献:

- [1] 刘黎平,王致君,徐宝祥,等.我国双线偏振雷达探测理论及应用研究[J].高原气象,1997(1):100-105.
- [2] 王致君.偏振气象雷达发展现状及其应用潜力[J].高原气象,2002(5):495-500.
- [3] Bringi V N, Thurai M, Hannedes R. Dual-polarization weather radar handbook [J]. AMS-Gematronik GmbH,2007(2).
- [4] Hogg W D. Quality control and analysis of an archive of digital radar data (from weather reporting) [C]. Conference on Radar meteorology, 18th, Atlanta, Ga,1978:150-154.
- [5] Smith P L, PL JR S. Siting Considerations for Weather Radars [C]. 15th Conference on Radar Meteorology,1972:99-100.
- [6] Steiner M, Smith J A. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitating echoes in radar data [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2002, 19(5):673-686.
- [7] Mueller E A. Statistics of high radar reflectivity gradients [J]. Journal of Applied Meteorology, 1977, 16(5):511-513.
- [8] Riley G F. Statistics of gradients of precipitation intensity derived from digitized radar data [D]. Massachusetts Institute of Technology, 1976.
- [9] Zhang J, Wang S, Clarke B. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure [C]. Proceedings of the 11th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. 2004, 1:5-6.
- [10] Lakshmanan V, Hondl K, Stumpf G, et al. Quality control of weather radar data using texture fea-

- tures and a neural network[J]. Advances in Pattern Recognition ICAPR2003, 2003: 54.
- [11] Kessinger C, Ellis S, VanAndel J. The radar echo classifier: A fuzzy logic algorithm for the WSR-88D[C]. 3rd Conference on Artificial Applications to the Environmental Science, 2003.
- [12] 刘黎平, 吴林林, 杨引明. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析[J]. 气象学报, 2007(2): 252-260.
- [13] 江源, 刘黎平, 庄薇. 多普勒天气雷达地物回波特征及其识别方法改进[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2): 203-213.
- [14] 庄薇, 刘黎平, 余燕群, 等. 雷达地物回波模糊逻辑识别法的改进及效果检验[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 576-584.
- [15] 杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等. 双线偏振多普勒雷达资料质量分析[J]. 气象学报, 2013, 71(1): 146-158.
- [16] 宗蓉, 陈超, 潘国盛. 基于模糊逻辑的双偏振多普勒雷达地物杂波抑制方法的初步应用[J]. 广东气象, 2017, 39(6): 56-59.
- [17] Lotfi A Zadeh. Fuzzy Algorithms[J]. Information and Control, 1968, 12(2).
- [18] Steiner M, Smith J A. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of non-precipitation echoes in radar data[J]. J. Atmos. Ocea. Tech., 2002, 19: 673-686.

Ground Clutter Recognition Algorithm of Dual Polarization Weather Radar based on Fuzzy Logic

DU Jie¹, WANG Haijiang¹, SUN Zaoping²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Beijing METSTAR Radar Co., Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract: The radar echo detected by Doppler weather radar is usually interfered by some non-meteorological factors, which affects the quantitative application of radar data, so the quality control of radar data should be carried out before the application of radar data. the identification and elimination of ground clutter is one of the key contents of quality control. In this paper, based on the phase difference between precipitation particles and ground objects, the differential reflectivity factor vertical texture parameter is introduced to eliminate ground clutter on the basis of fuzzy logic algorithm. First of all, according to the probability distribution of the relevant characteristic parameters of radar data, the corresponding trapezoidal membership function is established; secondly, select appropriate thresholds and then use the single parameter method and the improved fuzzy logic method to identify and eliminate the ground clutter in the polarization weather radar data. Finally, by comparing and analyzing the effect of single-parameter clutter elimination method and this method on ground clutter elimination, it can be concluded that the introduction of the polarization parameter can effectively identify and eliminate ground clutter.

Keywords: dual polarization weather radar; quality control; polarized parameter; ground clutter; fuzzy logic