

基于小波和 Hu 矩的飑线雷达回波识别

程凌舟¹, 何建新², 曾宪军³

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室 四川 成都 610225; 3. 浙江省衢州市气象局, 浙江 衢州 324000)

摘要:针对飑线中心强度较强且连接成线这一雷达回波特征,利用数字图像处理技术中的小波变换模极大边缘检测方法和 Hu 矩理论方法完成识别,小波边缘检测方法提取的边缘信息丰富且定位精度较高,能很好地获得雷达回波边缘。Hu 不变矩具有平移、旋转和尺度不变性,对形状的识别尤为有效。采用了两次飑线天气过程的雷达基数据进行试验,一次假设为模板,一次为匹配过程,最后以欧氏距离作为识别参量,结果表明该方法具有可行性和良好的识别性。

关键词:数字图像处理;回波识别;小波变换;Hu 矩;飑线

中图分类号:TN957.52

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.04.005

0 引言

多普勒天气雷达在监测雷雨、大风、冰雹、龙卷等强对流灾害性天气方面起着至关重要的作用,近些年,随着多普勒天气雷达在中国各地的普及,气象研究人员针对多普勒天气雷达的基数据所生成的基本产品(反射率因子、径向速度、速度谱宽)做了大量的工作,总结了各类强对流灾害性天气的雷达回波特征。李向红等^[1]对暴雨天气的弓形回波特征、冰雹龙卷天气的三体散射长钉回波特征进行了分析和总结。而随着人工智能的兴起,图像识别技术也成为当今的热点,越来越多的研究者将这一技术与气象相融合,尤其是雷达回波识别方面,张秉祥等^[2]通过模糊逻辑算法对冰雹天气雷达回波进行识别;邵楠等^[3]基于图像处理技术对雷达异常产品进行判别。将以飑线雷达回波识别作为切入点展开研究。

飑线是一种常发生在中纬度地区春夏之交的对流性天气,常伴有雷雨、大风、冰雹、龙卷等剧烈天气现象。针对飑线中心强度较强且连接成线这一雷达回波特征,利用数字图像处理技术中的小波变换模极大边缘检测方法和 Hu 矩理论的方法完成识别,从而达到对此类天气监测预警的目的。

1 小波变换和 Hu 矩理论

1.1 小波变换模极大边缘检测理论

设二维平滑函数 $\theta(x, y)$ 满足条件 $\iint \theta(x, y) dx dy \neq 0$,

定义其沿 x, y 两方向的一阶导数为小波函数:

$$\psi^1(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x}, \psi^2(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \quad (1)$$

令:

$$\psi_a^1(x, y) = \frac{1}{a^2} \psi^1\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right), \psi_a^2(x, y) = \frac{1}{a^2} \psi^2\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right) \quad (2)$$

其中 a 为尺度函数。二维图像 $f(x, y)$ 在尺度 $a = 2^j$ 上二维小波变换为

$$x \text{ 方向: } W^1 f(2^j, x, y) = f \times \psi_{2^j}^1(x, y) \quad (3)$$

$$y \text{ 方向: } W^2 f(2^j, x, y) = f \times \psi_{2^j}^2(x, y) \quad (4)$$

小波变换在 2^j 尺度下的模和幅角分别为

$$Mf(2^j, x, y) = \sqrt{|W^1 f(2^j, x, y)|^2 + |W^2 f(2^j, x, y)|^2} \quad (5)$$

$$Af(2^j, x, y) = \arctan\left(\frac{W^2 f(2^j, x, y)}{W^1 f(2^j, x, y)}\right) \quad (6)$$

由以上式可看出图像梯度向量的模与小波变换的模成正比。幅角为图像梯度方向与水平方向 x 的夹角。因此小波变换的模沿梯度方向最大值点为图像的边缘点,也称为小波变换模极大点。

1.2 Hu 矩理论

Hu 矩理论是由 Ming-Kuei Hu^[4]提出,它给出连续函数矩的定义以及矩的基本性质,证明了有关矩的平移、旋转和尺度不变性^[5]。矩特征广泛应用于目标识别和匹配、形状分析识别、图像分析等方面,尤其是固定形状识别。

对于灰度分布为 $f(x, y)$ 的图像,其 $(p + q)$ 阶矩定义为

$$m_{pq} = \iint x^p y^q f(x, y) dx dy \quad p, q = 0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$
$$(p + q) \text{ 阶中心矩定义为}$$

$$\mu_{pq} = \iint (x - x_0)^p (y - y_0)^q f(x, y) dx dy \quad (8)$$
$$\text{其中矩心 } (x_0, y_0) \text{ 为}$$

$$x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}}, y_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (9)$$

而对于数字图像,在离散状态下, $f(x, y)$ 的 $(p+q)$ 阶普通矩和中心矩的公式如下:

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^p y^q f(x, y) \quad (10)$$

$$\mu_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (x - x_0)^p (y - y_0)^q f(x, y) \quad (11)$$

式中, $p, q = 0, 1, 2, \dots, n$

当图像发生变化时, m_{pq} 也发生变化,而 μ_{pq} 则具有平移不变性但对旋转依然敏感。

归一化中心矩:

$$y_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^r} \quad (12)$$

式中: $r = \frac{p+q+2}{2}, p+q=2, 3, \dots, n$

若直接用普通矩或中心矩进行特征表示,不能使特征同时具有平移旋转和尺度不变性^[6]。而利用归一化中心矩,则特征不仅具有平移不变性,而且还具有比例不变性^[7]。

Hu 利用二阶、三阶中心矩构造出了 7 个不变矩^[8],在连续图像条件下可以保持平移、旋转和尺度不变,具体的定义如下:

$$I_1 = y_{20} + y_{02} \quad (13)$$

$$I_2 = (y_{20} + y_{02})^2 + 4y_{11}^2 \quad (14)$$

$$I_3 = (y_{30} + 3y_{12})^2 + (3y_{21} - y_{03})^2 \quad (15)$$

$$I_4 = (y_{30} + y_{12})^2 + (y_{21} + y_{03})^2 \quad (16)$$

$$I_5 = (y_{30} - y_{12})(y_{30} + y_{12})[(y_{30} + y_{12})^2 - 3(y_{21} + y_{03})^2] + (3y_{21} - y_{03})(y_{21} + y_{03})[3(y_{30} + y_{12})^2 - (y_{21} + y_{03})^2] \quad (17)$$

$$I_6 = (y_{20} - y_{02})[(y_{30} + y_{12})^2 - (y_{21} + y_{03})^2] + 4y_{11}(y_{30} + y_{12})(y_{21} + y_{03}) \quad (18)$$

$$I_7 = (3y_{21} + y_{03})(y_{30} + y_{12})[(y_{30} + y_{12})^2 - 3(y_{21} + y_{03})^2] + (y_{30} - 3y_{12})(y_{21} + y_{03})[3(y_{30} + y_{12})^2 - (y_{21} + y_{03})^2] \quad (19)$$

2 算法设计与分析

2.1 算法设计流程

算法分为 4 步:

- (1)利用雷达基数据作出反射率因子图,根据需要提取45 dBz以上的图像区域,对其进行中值滤波。
- (2)对中值滤波后的图像利用小波变换模极大法对雷达回波轮廓进行提取并取出最大连通域。
- (3)计算模板过程不变矩特征向量的的平均值。
- (4)计算待匹配过程图像不变矩特征向量求出与模板过程不变矩特征向量的的平均值的欧氏距离,识别回波。

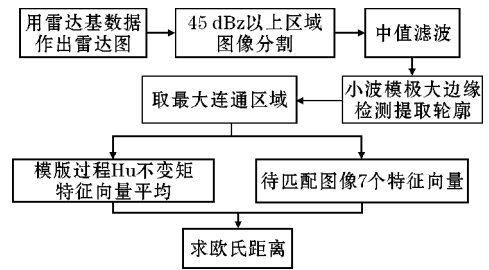


图 1 算法流程图

2.2 预处理算法

2.2.1 基数据作图

选取自浙江省衢州市雷达(CINRAD/SB 型)2015 年 4 月 5 日和 2014 年 3 月 19 日两次典型飑线过程的雷达基数据,基于 Matlab 平台作出雷达反射率因子图。(该雷达在仰角1.5°以下,方位在 0°~35°有阻挡。)

2.2.2 图像分割

对图像进行分割的目的就是将要研究的目标对象区域提取。由于作出的雷达反射率因子图是一副伪彩图,伪彩图由 R、G、B 三通道组成,可以根据所需要分别对 R、G、B 三通道取阈值提取出对应颜色,将反射率因子强度值在45 dBz以上的区域作为阈值分割的对象。

2.2.3 中值滤波

中值滤波技术是一种非线性平滑技术,将45 dBz以上的目标对象提取分割后,经过中值滤波不仅能够保护边缘信息,还能使边缘更加平滑。

2.3 小波变换模极大边缘检测算法

假设一副图像 D 有 $N \times N$ 个像素,即 $D = \{d_{n,m} | n, m = 0, 1, \dots, N - 1\}$ 。在尺度 2^j 尺度下,求出高斯函数沿 x, y 方向上的偏导 $\psi^1(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x}$ 和 $\psi^2(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y}$,这两个函数就等价于小波函数,尺度可以根据需要而确定。根据需要选择 2^1 尺度,在此尺度

下,边缘信息丰富且定位精度较高,能够很好地获得雷达回波边缘。再将 $\psi^1(x,y)$ 和 $\psi^2(x,y)$ 分别与图像卷积得到 W_1 和 W_2 ,依次求出每个像素点的梯度 $M(x,y) = \sqrt{W_1^2 + W_2^2}$,并求反正切 $\arctan(W_2/W_1)$ 即为幅角,幅角限制在 0° 到 180° 。将求得的幅角分为 0° (水平), 45° , 90° (垂直), 135° 4 个方向,并沿各方向检测小波变换系数模的局部极大值,这些值即为可能的图像边缘点。将这些值作归一化处理并选定高低阈值与其作比较,高于高阈值和低于低阈值的一定是边缘,若介于高低阈值之间则需要判断 8 领域是否有点高于高阈值,若有则是边缘点,否则不是边缘点。

2.4 提取最大联通区域

根据强度值在 45 dBz 以上提取的区域不仅有连接成线形的大片区域,还有分散的各个小区域,而研究关注的对象是线状的大区域,为避免分散的小区域对图像特征的影响,需要提取最大联通区域,即关注的对象。为得到最大连通域,首先将图像转换为二值图像,对各联通区域进行标记,求出各联通域的大小,然后将最大连通域的索引找出,最后获取最大连通域图像。

2.5 不变矩的特征匹配

实验基于 Matlab7.1 平台。实验中,先选择 5 张 2015 年 4 月 5 日具有典型飑线回波的雷达图进行处理作为模板,利用 Hu 的不变矩公式先计算出各模板图像的 7 个不变矩,然后取平均组成模板特征向量 ($H1$ 、 $H2$ 、 $H3$ 、 $H4$ 、 $H5$ 、 $H6$ 、 $H7$)。再计算待匹配图像(2014 年 3 月 19 日的雷达图经过处理的图像)的 7 个不变矩,组成另一组特征向量 ($I1$ 、 $I2$ 、 $I3$ 、 $I4$ 、 $I5$ 、 $I6$ 、 $I7$)。分别计算模板

特征向量和待匹配特征向量的欧几里得距离 D ,判断两者的相似程度。当 D 小于预先设定的阈值 T 时,说明待匹配图像与模板图像相似度很大,为识别目标物。预设阈值 T 可由大量实验获得。

2.6 欧几里得距离度量法(欧氏距离)

图像识别领域中,常根据图像间的距离对图像进行分类识别,图像间的距离反映了图像之间的相似程度,距离越小,相似程度就越高^[9]。常用的图像距离度量方法有欧氏距离、Hausdorff 距离、Chebychev 距离。欧氏距离因其简单高效,常用于各种图像识别当中。

欧氏距离定义为

$$D(x,y) = \|X - Y\| = \sqrt{(\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2)} \quad (20)$$

式中 n 为特征空间的维数, X 为模板矩特征向量, Y 为待匹配图像矩特征向量。文中,当欧氏距离越小时,说明飑线回波的可能性越大。

3 实验结果与分析

3.1 2015 年 4 月 5 日实验结果

2015 年 4 月 5 日晚,浙江衢州地区出现了一次自西向东的强对流天气过程,伴有雷雨大风,冰雹等天气。强天气主要发生时段为 22:00-23:00,雷达图具有典型的飑线回波特征,选取 22:06-22:30 中 5 个时间的基数据。利用 Matlab 作出的反射率因子图及提取的模板飑线回波图如图 2、图 3 所示。

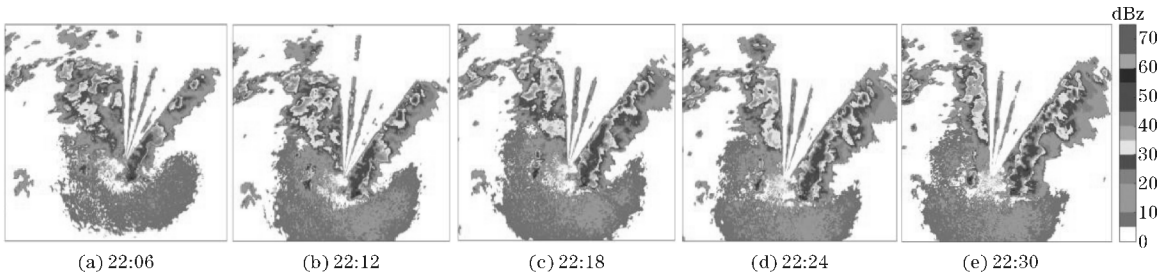


图 2 模板原始图(单位:dBz)

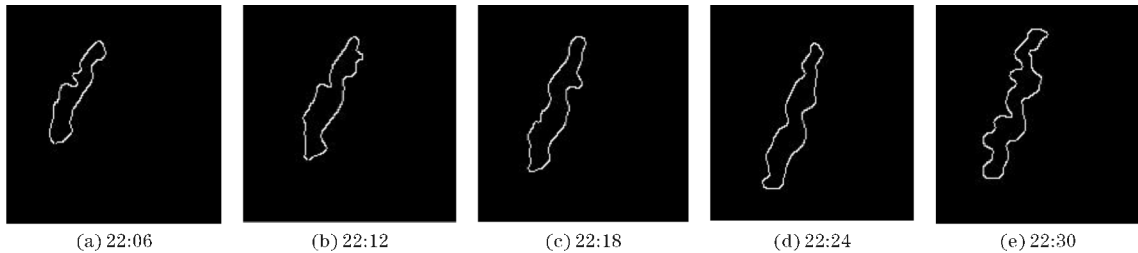


图 3 模板提取目标图

计算所得模板特征向量如表 1 所示。

表 1 模板特征向量表

	<i>H1</i>	<i>H2</i>	<i>H3</i>	<i>H4</i>	<i>H5</i>	<i>H6</i>	<i>H7</i>
22:06	0.01078	8.76680e-05	3.36939e-08	1.79241e-08	4.40409e-16	1.13603e-10	8.15735e-18
22:12	0.01308	1.27727e-04	3.36498e-08	7.34150e-09	1.01076e-16	1.83595e-11	5.56651-17
22:18	0.01472	1.69737e-04	2.88404e-10	4.94829e-09	5.47948e-18	6.44326e-11	-2.21782-18
22:24	0.01613	2.13497e-04	1.47387e-08	1.51255e-09	4.17551e-18	-8.37444e-12	-5.79377e-18
22:30	0.01371	1.50561e-04	8.79234e-09	8.06458e-09	6.58981e-17	8.88624e-11	1.64018e-17
平均	0.01369	1.49838e-04	1.82326e-08	7.95820e-09	1.23407e-16	5.53765e-11	1.44425e-17

3.2 2014 年 3 月 19 日实验结果

作为待匹配的天气过程,选取 2014 年 3 月 19 日

浙江省衢州市雷达 13:10-18:00 中 7 个时间的基数数据,所作的反射率因子图及提取的待匹配回波图如图 4、图 5 所示。

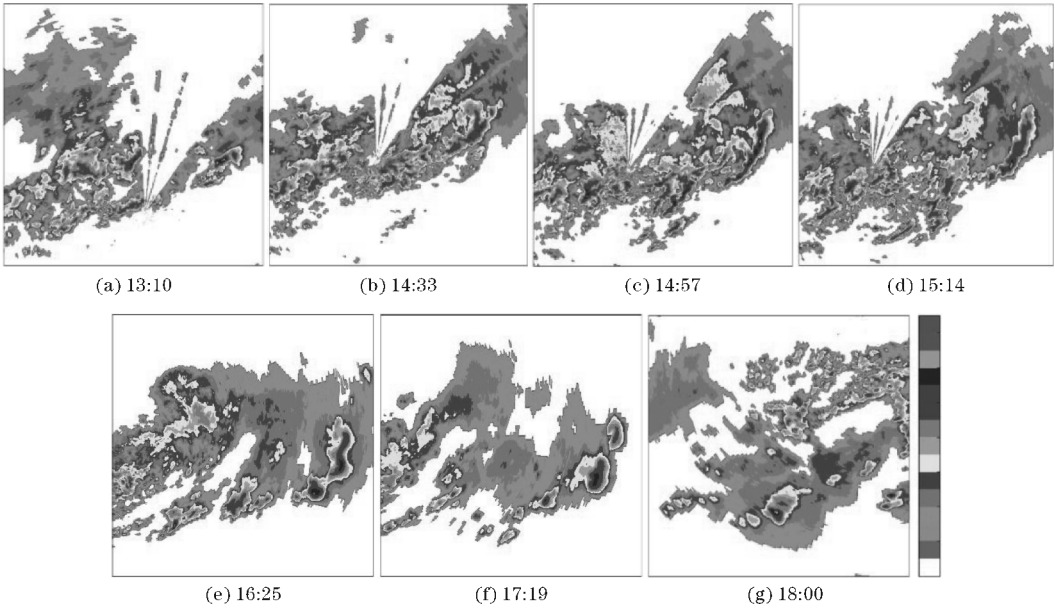


图 4 待匹配过程原始图

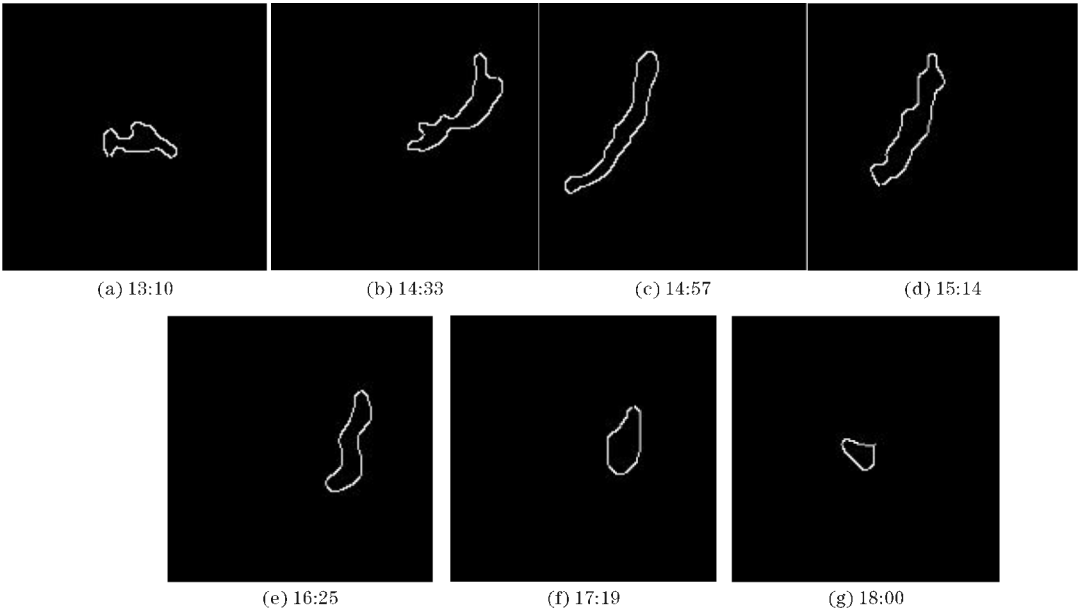


图 5 待匹配过程提取目标图

计算所得待匹配特征向量如表 2 所示。

表 2 待匹配特征向量表

	<i>I1</i>	<i>I2</i>	<i>I3</i>	<i>I4</i>	<i>I5</i>	<i>I6</i>	<i>I7</i>
13:10	0.00618	1.76826e-05	3.03092e-08	3.13184e-09	9.72479e-18	-1.03889e-12	-2.89219e-17
14:33	0.00962	5.35621e-05	1.53806e-07	1.28851e-08	-4.46923e-16	-9.35240e-11	3.59575e-16
14:57	0.01373	1.56670e-04	3.39729e-07	7.39086e-08	6.11588e-15	7.12955e-11	9.98764e-15
15:14	0.01238	1.19644e-04	7.35043e-08	1.16054e-08	1.13868e-16	-3.19110e-12	3.19262e-16
16:25	0.01013	7.17636e-05	2.51465e-08	3.64360e-09	2.99341e-17	2.28907e-11	1.78977e-17
17:19	0.00776	2.04388e-05	1.00498e-08	6.58004e-10	1.68791e-18	-1.60842e-13	-1.18710e-19
18:00	0.00433	2.61006e-06	5.94648e-09	6.74287e-11	4.06539-20	-6.80160e-14	-1.30498e-20

待匹配图像特征向量与模板图像平均特征向量的欧氏距离如表 3 所示。

表 3 欧氏距离表

	13:10	14:33	14:57	15:14	16:25	17:19	18:00
欧氏距离	0.0075	0.0041	0.000039	0.0013	0.0036	0.0059	0.0094

3.3 结果分析

由欧氏距离的值可以看出,2014 年 3 月 19 日的这次飇线过程中,在 14:57 欧氏距离值最小,说明该时刻的图像与模板图像相似程度最高,所以最具有飇线雷达回波特征。且从这一时刻往前和往后,欧氏距离都呈增大趋势,可判断出在此前是飇线的生成过程,从这一时刻后是飇线的消散过程。飇线雷达回波的识别是通过阈值判断,阈值的选取是根据大量实验统计获取,也可根据实际需要加以调节,当低于设定的阈值 *T* 时则判定为飇线。通过这种手段的识别,可以达到对飇线雷达回波的监测预警和回波跟踪的目的,对强对流天气的预警预报能力具有重要意义。

4 结论与展望

通过试验表明利用小波和 Hu 矩这种方法对于回波的识别具有可行性,但考虑到衢州雷达站的实际情况(建站时间较短,2012 年 6 月 1 日起正式运行),对飇线这种极端天气过程的雷达回波识别研究,典型数据极其有限,所以文中只是对方法可行性进行探究,利用已有数据,假设将一次天气过程中不同时刻的飇线作为模板,另一次过程作为匹配以验证方法的可行性,识别可靠性还有待验证。在今后研究过程中,可以联合其他站点的数据完善模板和匹配数据库,使该方法更具有说服力。

在气象探测领域,雷达探测到的每一个过程都会有其对应的雷达回波特征,目前根据雷达回波特征判

断天气现象大多由观测员完成。未来,可以根据大量的实验将各类天气现象的雷达回波的特征模板建立数据库,然后利用深度学习模型进行训练分类,在识别过程中,将提取的雷达回波图像的特征数据与数据库中的特征模板进行搜索和匹配,通过设定一阈值,当两者相似度超过这一阈值,则把匹配得到的结果(天气现象)输出。

参考文献:

[1] 李向红,唐熠,郑传新,等. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析[J]. 气象,2010,36(8):61-71.

[2] 张秉祥,李国翠,刘黎平,等. 基于模糊逻辑的冰雹天气雷达识别算法[J]. 应用气象学报,2014,(4):415-426.

[3] 邵楠,裴肿,刘传才,等. 基于图像处理技术自动判别雷达异常产品[J]. 气象科技,2013,41(6):993-997.

[4] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. IEEE Transactions on Information Theory,1962,8(2):179-187.

[5] 王海霞,徐欣锋,徐抒岩. 一种基于不变矩的目标识别方法[J]. 光学精密工程,2004,12(Z2):131-136.

[6] 杨慧军. 基于特征融合的自动目标识别技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.

[7] 余静,游志胜. 自动目标识别与跟踪技术研究综

- 述[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(1): 12-15.
- [8] 柳林霞, 陈杰, 窦丽华. 不变矩理论及其在目标识别中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(2): 13-15.
- [9] 陈惠明. 图像欧氏距离在人脸识别中的应用研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(14): 3735-3737.
- [10] 孙延奎. 小波变换与图像、图形处理技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [11] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [12] 姚玉荣, 章毓晋. 利用小波和矩进行基于形状的图象检索[J]. 中国图象图形学报(A辑), 2000, 5(3): 206-210.
- [13] 华斌, 夏利娜. 基于中值滤波和HU矩向量的手写识别[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(2): 615-618.
- [14] 裴翀, 刘传才, 周薇, 等. 基于图像处理技术自动判别雷达异常产品[J]. 气象科技, 2013, 41(6): 993-997.
- [15] 王发牛, 梁栋, 唐俊, 等. 小波变换模极大值多尺度边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 2147-2149.
- [16] 王宏, 马凤莲, 王万筠. 一次飑线过程的多普勒雷达资料分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, (3): 60-65.

Radar Echo Recognition of Squall Line based on Wavelet and Hu Moment

CHENG Ling-zhou¹, HE Jian-xin², ZENG Xian-jun²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Quzhou Meteorological Bureau, Quzhou, 324000, China)

Abstract: The radar echo characteristics are that the central intensity of squall line is strong and connects a line. The method of edge detection algorithm based on wavelet modulus maxima and the theory of Hu moment are used to finish the recognition, which is contained by digital image processing technology. The algorithm of edge detection based on wavelet can detect the edge of rich information and high accuracy of position, furthermore, it can obtain the edge of radar echo well. Hu invariant moments have the characteristics of translation invariance, rotation invariance and scale invariance. Especially, it is an effective method to the recognition of shape. The experiment uses the radar data of two squall line processes, and one process assumes it as the template, while the other is matching. At last, the Euclidean distance is used as the identification parameter. The result shows that this method is feasible and has a perfect recognition performance.

Keywords: wavelet transform; Hu moment; squall line; echo recognition; digital image processing