

文章编号: 0253-2239(2009)11-3036-07

基于分类的红外云层背景弱小目标检测方法

李 欣 赵亦工 陈 冰

(西安电子科技大学模式识别与智能控制研究所, 陕西 西安 710071)

摘要 提出了一种新的基于模糊分类的红外云层背景弱小目标检测方法。根据红外成像的特点,将红外云层背景弱小目标图像分为三类:边缘类、净空及云中类、弱小目标类;对不同类别图像进行分析,建立了分类模型,并定义了方向特征矢量,将其作为类别的特征矢量;根据模糊分类的理论,定义了类相似系数来判别图像中每一个像素的类别属性,保留弱小目标类的像素点完成检测。实验结果表明,该方法能够对红外弱小目标图像中不同类型的区域进行准确的分类,从而较好的实现了对低信杂比的复杂云层背景图像中的弱小目标检测。

关键词 图像处理;云层背景图像;模糊分类;类别特征;红外弱小目标;目标检测

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3036

A New Approach of Small and Dim Target Detection in Cloud Cluster Infrared Image Based on Classification

Li Xin Zhao Yigong Chen Bing

(Research Institute of Pattern Recognition and Intelligent Control, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract A new method is proposed to detect infrared small and dim targets in cloud cluster image based on fuzzy classification. Firstly, according to the infrared imaging principles, dim and small targets in cloud cluster image can be divided into three classes, which are the edge class, the inner cloud and clear sky class, the target class. By analyzing different classes, the classified models for each class are established. And then four-direction pixel feature vector is defined to describe different classes. Finally, based on the fuzzy classification theory, class correlation coefficient is defined to classify each pixel of the infrared image. Experimental results show that the proposed method can separate dim and small targets from the cluster in low signal-to-clutter ratio (SCR) infrared cloud images efficiently.

Key words image processing; cloud cluster image; fuzzy classification; class feature; infrared small and dim target; target detection

1 引 言

红外成像系统已经成为武器系统中必不可少的组成部分,而弱小目标检测技术是红外成像预警系统中的核心技术之一。目前在欧美国家的一些先进的武器系统,包括航空母舰的预警系统、各种飞机的红外搜索跟踪系统、红外成像制导导弹和一些地面军事设施的告警系统中,红外弱小目标检测技术的地位举

足轻重。近年来,随着弱小目标检测系统的不断发展,检测和识别的新算法不断涌现,其中具有代表性的方法有:时空域滤波法^[1,2]、高通滤波器及其各种组合方式^[3]、自适应门限法^[4~6]、背景抑制法^[7,8]、神经网络法等^[9~17],上述算法中,高通滤波器及其各种组合方式,计算量较小,对于变化缓慢的背景滤除作用明显,但对于快变化的背景检测效果较差;自适应门

收稿日期: 2009-04-13; 收到修改稿日期: 2009-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(60572151)和教育部科学技术研究重点项目(03154)资助项目。

作者简介: 李 欣(1982—),男,博士研究生,主要从事红外弱小目标检测、图像处理模式识别方面的研究。

E-mail: snow_sky0213@yahoo.com.cn

导师简介: 赵亦工(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事图像处理、模式识别、计算机视觉和信号处理等方面的研究。

E-mail: ygzhao@xidian.edu.cn

限法能够根据背景适应一定范围的背景变化,但对于复杂背景存在着虚警率高的问题;背景抑制法是从背景的自相似性出发,对背景进行抑制,但对于较为复杂的背景,很难找到一个合适的模板系数对整个图像进行背景抑制;时空域滤波法和神经网络法均有一定的效果,但计算量较大,工程实现较难。由于弱小目标其本身的灰度、形状、纹理和结构特征不明显,对它的检测依然为一个技术难题。

本文利用分类的思想,先对红外云层背景弱小目标图像中的不同类别区域进行分类,根据不同区域灰度分布特点建立不同类别的模型。通过对模型的分析,定义了方向特征矢量作为类别特征,再根据

模糊分类方法对图像中的像素进行分类,最后保留目标类区域完成检测。

2 分类模型及类别特征

2.1 分类模型

红外弱小目标的云层背景图像中,有三类区域:净空、云和目标。其中净空和云属于背景部分,将图像简单地分为这三种区域很难建立模型将其区分。为了得到准确的分类模型,对图像进一步分析,图 1(a)为一幅天空背景弱小目标图像,用 5×5 模板分别对不同区域的图像进行分析,分析区域的抽取位置如图中①~④。

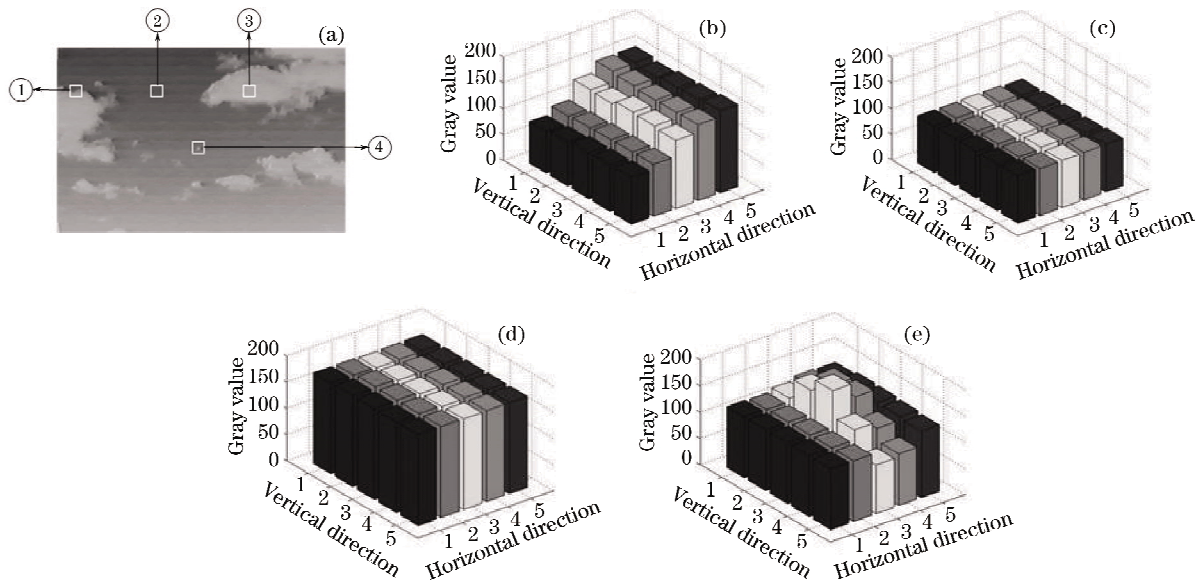


图 1 红外云层背景弱小目标图像抽取及灰度分布。(a)弱小目标图像及抽取位置;(b)位置 1, (c)位置 2,(d)位置 3 和(e)位置 4 的图像灰度分布

Fig. 1 Small targets in cloud cluster infrared image and gray distribution of different regions. (a)image and extraction locations of small targets gray distribution of (b) location 1, (c) location 2,(d) location 3 and (e) location 4

图 1 中(b)~(e)为抽取不同分析区域的灰度分布图, x, y 坐标为模板的水平坐标和垂直坐标, z 轴为灰度值。图 1(b)对应图 1(a)位置 1 处云边缘区域的灰度分布,其灰度值在单个方向上发生阶跃变化;图 1(c)对应图 1(a)位置 2 处净空背景区域灰度分布,其灰度值较低,且起伏较小;图 1(d)对应图 1(a)位置 3 处云中背景区域的灰度分布,其灰度值较高,且起伏较小;图 1(e)对应图 1(a)位置 4 处弱小目标区域的灰度分布,其灰度值出现灰度中间高而周围低的形态。

依据上面不同区域的灰度分布情况,可以将这些区域分为三类:灰度起伏不大的云中和净空中的背景区域归为第一类,边缘区域为第二类,弱小目标

区域为第三类。根据边缘方向的不同,边缘区域的灰度分布可能呈现出不同的情况,但其灰度起伏变化情况是一致的,均是一个阶跃变化过程。用 5×5 模板对图像中不同类别区域灰度分布进行分析,红外云层背景弱小目标图像中不同区域的灰度分布有以下六种情况(如图 2 所示)。

图 2 中,(a)~(d)为边缘类,每一个模型对应一种类型的边缘,(a)、(b)为两种斜方向的边缘,(c)为水平方向的边缘,(d)为垂直方向的边缘,(e)为云中及净空背景类,其灰度分布很均匀 (f)为弱小目标类,呈现出中间灰度高周边灰度低的态势。这样,三类就扩展为六种情况,为了方便后续的论述将这六种情况称为六类,图 2 为六类的模型,分别称(a)~(f)为 1~

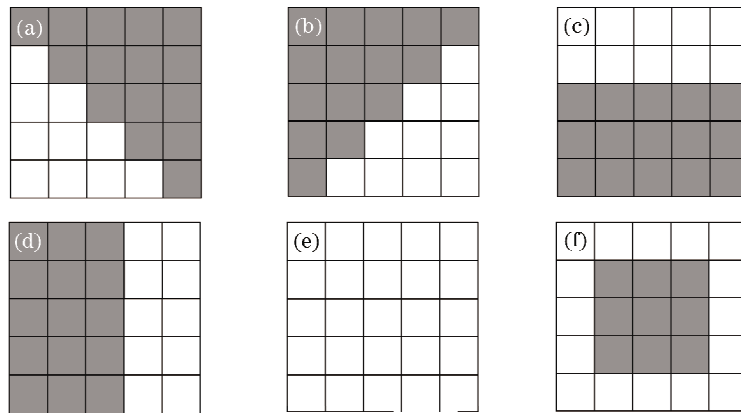


图 2 5×5 模板分类模型。(a)边缘模型 1;(b)边缘模型 2;(c)边缘模型 3;(d)边缘模型 4;
(e)净空及云中模型;(f)目标类模型

Fig. 2 5×5 module classification model. (a) edge model 1; (b) edge model 2; (c) edge model 3; (d) edge model 4;
(e) clear sky and inner cloud model; (f) target model

6 类,后面将以这六类为基础加以研究。

2.2 类别特征

为了建立类别特征,先将 5×5 的模板中每个像素的位置进行编号,编号的顺序如图 3(a)所示,再将模板定义为四个方向,分别为两个对角线和水平垂直方向,如图 3(b)所示。

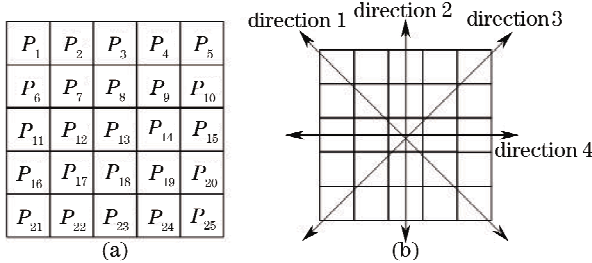


图 3 模板中像素序号及其模板四个方向。

(a)像素序号;(b)模板四个方向

Fig. 3 Pixel series and four directions in module.

(a) pixel series; (b) four directions of module

定义了模板的像素编号和方向后,下面给出模板方向特征值的定义。模板中某个方向的方向特征值为在这个方向上相邻像素两两绝对差值累加的结果。各方向的方向特征值定义如下:

Direction 1:

$$D_1 = |P_7 - P_1| + |P_{13} - P_7| + |P_{19} - P_{13}| + |P_{25} - P_{19}|, \quad (1)$$

Direction 2:

$$D_2 = |P_8 - P_3| + |P_{13} - P_8| + |P_{18} - P_{13}| + |P_{23} - P_{18}|, \quad (2)$$

Direction 3:

$$D_3 = |P_9 - P_5| + |P_{13} - P_9| +$$

$$|P_{17} - P_{13}| + |P_{21} - P_{17}|, \quad (3)$$

Direction 4:

$$D_4 = |P_{12} - P_{11}| + |P_{13} - P_{12}| + |P_{14} - P_{13}| + |P_{15} - P_{14}|, \quad (4)$$

式中 $D_n (n = 1, 2, 3, 4)$ 为方向 n 上的方向特征值。若将图 3(b)中, P_{13} [图 3(a)] 作为直角坐标系的中心原点,水平方向记作直角坐标 x 轴(向右为正方向),垂直方向记作直角坐标 y 轴(向上为正方向)。则 D_1 表示与 x 轴夹角为 135° 方向上的方向特征值, D_2 表示与 y 的方向特征值, D_3 表示与 x 轴夹角为 45° 方向上的方向特征值, D_4 表示 x 轴方向上的方向特征值,中心原点 P_{13} 对应一个由四个方向特征值组成的特征矢量 \mathbf{D} 。由此,图像中的每一个象素都有不同特征矢量 \mathbf{D} 与其对应。

根据模糊规则定义^[18],取 5×5 模板中的任意两点 P_m 和 P_n ,其中 $1 \leq m, n \leq 25$,若 P_m 和 P_n 的灰度值相互接近,即图 2 中所对应位置的灰度同为白色,或同为灰色,其绝对差值较低,记为 L ;若 P_m 和 P_n 的灰度值相差较远,即图 2 中对应位置的灰度一个为白色而另一个为灰色,其绝对差值较高,记为 H 。

$$|P_m - P_n| = \begin{cases} L & P_m \text{ and } P_n \text{ are the same} \\ H & P_m \text{ and } P_n \text{ are opposite} \end{cases} \quad (5)$$

根据方向特征矢量和模糊规则定义,通过计算就可以得到各类别模型的特征矢量。如图 2(a),其方向特征矢量 $\mathbf{D} = \{D_1, D_2, D_3, D_4\}$,按(5)式的定义有 $D_1 = 4 \times L, D_2 = H + 3 \times L, D_3 = H + 3 \times L, D_4 = H + 3 \times L$ 。依次类推,这六类的特征矢量

如下：

第一类：

$$C_1 = [4 \times L, H + 3 \times L, H + 3 \times L, H + 3 \times L], \quad (6)$$

第二类：

$$C_2 = [H + 3 \times L, H + 3 \times L, 4 \times L, H + 3 \times L], \quad (7)$$

第三类：

$$C_3 = [H + 3 \times L, H + 3 \times L, H + 3 \times L, 4 \times L], \quad (8)$$

第四类：

$$C_4 = [H + 3 \times L, 4 \times L, H + 3 \times L, H + 3 \times L], \quad (9)$$

第五类：

$$C_5 = [4 \times L, 4 \times L, 4 \times L, 4 \times L], \quad (10)$$

第六类：

$$C_6 = [2 \times H + 2 \times L, 2 \times H + 2 \times L, 2 \times H + 2 \times L, 2 \times H + 2 \times L], \quad (11)$$

式中 $C_n (n = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 表示对应第 n 类的特征矢量，由不同类别的特征矢量可以看出，每个类别都有唯一的特征矢量与之相对应，我们将其作为类别特征矢量。

3 模糊分类

3.1 模糊分类器原理

如图 4 所示，模糊分类器中，从左至右依次为输入层、隐藏层和输出层。最左侧的 X_1, \dots, X_n 表示待判别模板，最右侧输出的 F_1, \dots, F_m 表示分类输出。将输入模板的特征矢量和每个结点（每一类）进行匹配，得到其与不同标准类别特征矢量的相关系

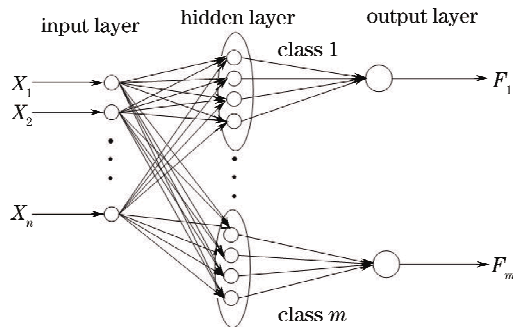


图 4 模糊分类器原理图

Fig. 4 Principles of fuzzy classifier

数，取与之相关系数最大的类作为输入模板的类。

如图 5 所示，给定一个图像区域及其二维特征矢量为 $D = \{D_1, D_2\}$ ，以及 4 个标准类别的特征矢量 $C_1 = \{L, L\}, C_2 = \{H, L\}, C_3 = \{L, H\}, C_4 = \{H, H\}$ 。那么如图 5 所示，分别以 $C_1 \sim C_4$ 为中心，形成了不同类别的概率密度分布曲面。因此，这里可以使用近邻法来判别一个图像区域归属于哪一类。

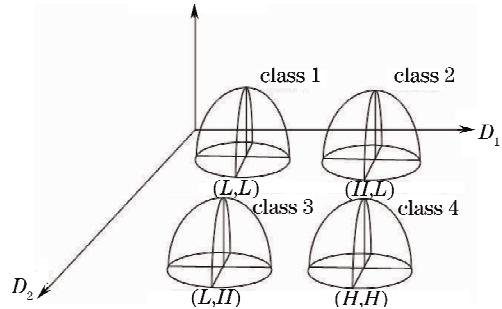


图 5 四种类别模型的模糊分类结果图

Fig. 5 Fuzzy classification result of four-class models

3.2 最近邻决策

定义一个类别相似系数来表示图像中像素模板的特征矢量与各个类别的接近程度，然后，利用最近邻决策规则完成对输入特征矢量的类属性判决。类别相似系数定义为

$$U_n(x) = \max \left\{ 0, 1 - \frac{\|x - C_n\|}{w} \right\}, \quad (12)$$

式中 x 为输入特征矢量， C_n 代表第 n 类的特征矢量， $\|x - C_n\|$ 为图像模板的特征矢量与第 n 类的特征矢量的范数， w 为归一化系数， $U_n(x)$ 即为当前输入的图像模板与第 n 类的距离， $U_n(x)$ 的取值范围为 $[0, 1]$ 。最近邻规则定义为

$$C(x) = \max_n [U_n(x)], \quad n = 1, \dots, N \quad (13)$$

根据上式， x 的类别归为取得 $C(x)$ 的类别 n ，对给定的图像区域，按(1)式~(4)式的定义计算其特征矢量 $D = \{D_1, D_2, D_3, D_4\}$ ，并按上述规则判决其类别归属。

3.3 弱小目标检测算法

输入图像经过特征提取和模糊分类后，就可以将图像中不同区域分成不同类别，实现目标检测。图 6 为本算法的实现框图。

根据图 2 中建立的 6 种不同类别区域由(1)式~(4)式特征矢量的定义及其模糊规则定义(5)式得到不同类别区域的类别特征矢量。用 5×5 模板对输入图像进行分析，得到不同区域的特征矢量。根据

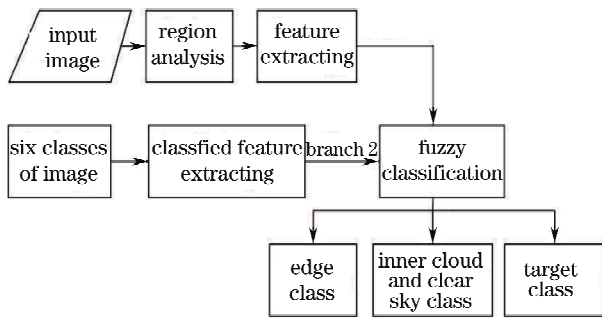


图 6 算法框图

Fig. 6 Block diagram of algorithm

模糊分类原理(12)式,(13)式对区域进行分类,保留目标类区域完成检测。根据上面的论述,本算法的目标检测结果图像可由下式来表达:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & C[D(x,y)] = 6 \\ 0 & C[D(x,y)] \neq 6 \end{cases}, \quad (14)$$

式中 $D(x,y)$ 为坐标在 (x,y) 处输入图像区域的特征矢量, $g(x,y)$ 为结果图像在该坐标处的灰度值。

4 实验结果及分析

实验采用实地录取的长波红外复杂云层背景下的弱小目标图像序列进行仿真实验,并列出传统的背景预测算法的检测结果做比较。图像大小为 $250 \text{ pixel} \times 160 \text{ pixel}$,列出三幅原始图像的信噪比

分别为:0.95,1.02和2.68。图像为256个灰度级,所以实验时归一化系数 w 取为256,边缘类图像模板特征矢量的 L 取为4, H 取为48,弱小目标类特征矢量的 L,H 值分别选取为20和56。实验结果图像如图7所示,分别列出了原始图像、边缘分类结果图像、弱小目标检测结果图像和背景预测算法的检测结果。

图7中,(a1)~(a3)三帧实验图像的原始图像,长波红外图像中均呈现出由上到下的灰度渐变过程,这种渐变是一个图像整体缓变的过程,对于模板区域分类模型不构成影响。(b1)~(b3)为根据模糊分类准则得到的边缘类图像,其中包括了建立的四种不同的边缘类型,从图像中可以看出,本算法准确的分类得出了图像中云层边缘部分,同时,由于小目标与周边背景也存在着一定的边缘,在目标所在区域,出现了一个环形的边缘区域。(c1)~(c3)为分类得到的弱小目标分类图像,为本算法的目标检测结果图像,从图像中可以看出,该算法准确的检测出了云层背景图像的弱小目标。(d1)~(d3)为背景预测方法得到的检测结果,可以看出对于较为复杂的背景,背景预测方法很难对背景进行准确的预测,得到的目标检测结果包含了很多背景中较为复杂的区域。对比(c1)~(c3)和(d1)~(d3)的检测结果可知,本文的算法优于传统的背景预测算法。

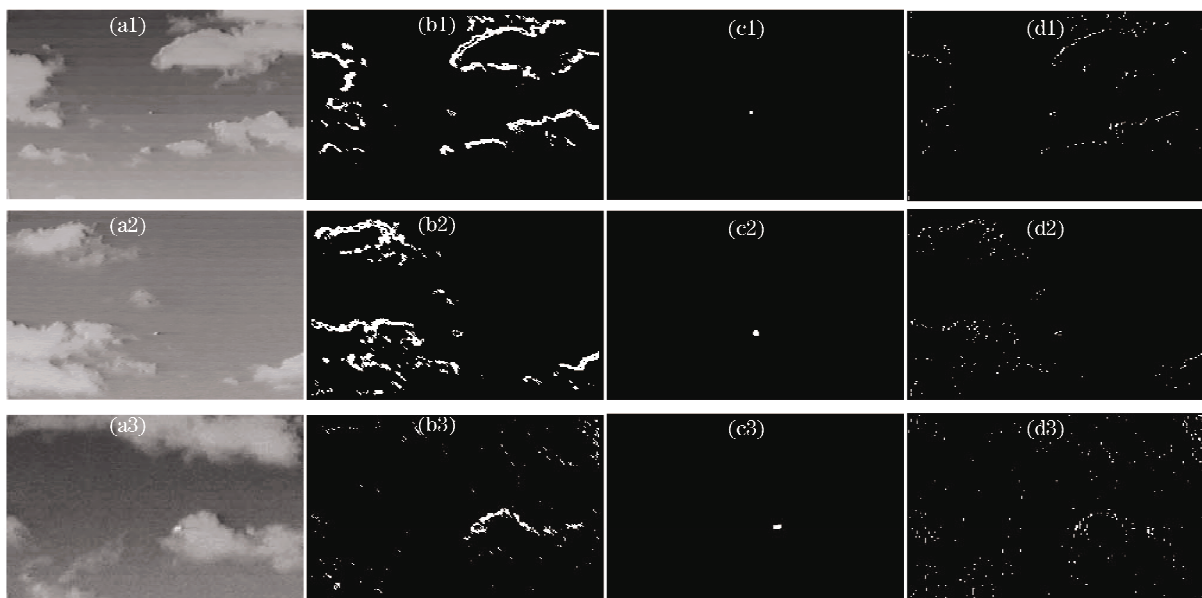


图 7 实验结果。(a1)~(a3)为原始图像;(b1)~(b3)为边缘图像;(c1)~(c3)为检测结果;
(d1)~(d3)为背景预测方法检测结果

Fig. 7 Experimental results, (a1)~(a3) are three original images; (b1)~(b3) are three edge images;
(c1)~(c3) are detection results; (d1)~(d3) are detection results based on background prediction

通过建立不同的模型对不同的图像区域进行分类,实现对目标的检测,具有一定的抗噪声能力。类别特征矢量是由各个特征方向上的像素点参与计算得出的方向特征值组成的,而由噪声引起的像素灰度变化,对特征矢量产生的影响是有限的,因为,特征矢量由 4 个方向特征值构成,一个像素灰度变化只会影响到个别特征值,不会对整个特征矢量构成影响,同时,每个方向的特征值是由多个点差分累加得到,方向特征值对个别像素的变化不敏感。本文中仿真图像均使用长波红外探测器得到的真实图像,图像中均含有探测器噪声。为了进一步测试该方法的抗噪能力,在图 7(a3)仿真原始图像上叠加

了高斯噪声,(a3)为叠加噪声后的图像,而且目标位于云的边缘,其图像噪声情况比前两幅明显加强,(b3)为得到的边缘图像,(c3)为目标检测结果。从仿真结果可以看出,本方法能够适应复杂天空背景且具有一定的抗噪能力,能够准确的检测出了目标。

为了进一步对分类情况进行分析,表 1 列出了图 1 中不同位置区域计算得出的各类别相似系数值及分类结果,其中区域①~④对应的特征矢量分别为:[66,113,66,40],[4,3,4,2],[6,5,6,2],[94,65,94,75]。

表 1 不同区域的类别相似系数值及其分类结果

Table 1 Class similarity coefficient values of different region and classification results

Regions	class 1	class 2	class 3	class 4	class 5	class 6	classification results
①	0.748	0.748	0.826	0.748	0.568	0.709	class 3
②	0.643	0.643	0.643	0.643	0.902	0.212	class 5
③	0.656	0.656	0.656	0.656	0.914	0.227	class 5
④	0.734	0.734	0.734	0.734	0.476	0.836	class 6

表 1 给出了第一幅仿真图像中,不同区域的类别相似系数值,表中第一列为抽取图像区域的序号,其抽取位置参见图 1,第二到六列为抽取区域与六个类别之间的类别相似系数,最后一列为分类结果。由结果可知,区域①被判决为类别 3 属于边缘类,区域②和③被判决为类别 5 属于净空及云中类,区域④被判决为类别 6 属于目标类,本算法对这些区域均做出了准确的分类。

从实验结果图像和不同区域的类别相似系数及分类结果表可以看出,本文算法对红外云层背景的弱小目标图像中不同区域进行了准确的分类,能实现低信杂比情况下的弱小目标检测。

5 结 论

本文从红外云层背景弱小目标图像中不同区域成像的灰度分布特点出发,建立了不同的类别模型,定义了模板方向特征值,并由此构成了方向特征矢量。用该特征矢量对不同类别模型进行分析发现,不同类别模型对应的方向特征矢量均不相同,可将方向特征矢量作为类别特征矢量。根据模糊分类理论,定义了类相似系数来描述不同区域的特征矢量与各个类别的接近程度,利用最近邻决策规则对输入特征矢量的类属性进行判决,将判别为目标类的区域保留,完成检测。实验结果表明,该方法建立的

分类模型及其分类特征准确地表达出了红外云层背景弱小目标图像中的不同类别区域,用模糊分类方法得到的分类结果,准确地完成了对图像的分类,对低信噪比图像中的弱小目标检测具有良好的效果。

参 考 文 献

- 1 A. P. Tzannes, D. H. Brooks. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing [J]. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.*, 2002, **38**(2): 570~586
- 2 Biyin Zhang, Tianxu Zhang, Kun Zhang *et al.*. Adaptive rectification filter for detecting small IR targets [J]. *IEEE Aero. EL. Sys. Mag.*, 2007, **22**(8): 20~26
- 3 Xu Ying. Small moving target detection in infrared image sequences [J]. *Infrared Technology*, 2002, **24**(6): 27~30
徐 英. 红外图像序列中运动弱小目标检测的方法研究 [J]. *红外技术*, 2002, **24**(6): 27~30
- 4 B. S. Denney, R. J. P. de Figueiredo. Optimal point target detection using adaptive auto regressive background [C]. *SPIE*, 2000, **4048**: 46~57
- 5 Zhang Xiaoping, Mita D. D. Segmentation of bright targets using wavelets and adaptive shareholding [J]. *IEEE T. Image Processing*, 2001, **10**(7): 1020~1030
- 6 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. An adaptive background adjusting algorithm for dim target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2163~2168
管志强,陈 钱,钱惟贤等. 一种基于背景自适应调整的弱标探测算法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2163~2168
- 7 Cao Yuan, Liu Ruiming, Yang Jie. Small target detection using two-dimensional least mean square (TDLMS) filter based on neighborhood analysis [J]. *Int. J. Infrared. Milli.*, 2007, **29**(2): 188~200
- 8 Guo Yan, Zhang Ye, Gu Yanfeng *et al.*. Infrared image background suppression based on 2nd generation Curvelet transform and ProbShrink algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*,

- 2008, **16**(10): 1988~1994
- 郭 琰, 张 晔, 谷延锋等. 基于二代 Curvelet 变换和 ProbShrink 算法的红外图像背景抑制[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(10): 1988~1994
- 9 W. Zhang, M. Y. Cong, L. P. Wang. Algorithm for optical weak small targets detection and tracking: review [C]. IEEE Int. Conf. Neural Networks & Signal Process., 2003, 643~647
- 10 P. B. Chapple, D. C. Bertilone, R. S. Caprari *et al.*. Stochastic model-based processing for detection of small targets in non-gaussian natural imagery[J]. *IEEE T. Image Process.*, 2001, **10**(4): 554~564
- 11 Yu Nong, Wu Changyong, Li Fanming *et al.*. Morphological neural networks for automatic target detection by simulated annealing learning algorithm [J]. *Sci. China Ser. F.*, 2003, **46**(4): 262~288
- 12 S. Leonov. Nonparametric methods for clutter removal [J]. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.*, 2001, **37**(3): 832~847
- 13 Liu Delian, Zhang Jianqi, He Guojing. Target detection for remote sensing image based on Gaussian transformation of background[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 638~642
- 刘德连, 张建奇, 何国经. 背景高斯化的遥感图像目标检测[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 638~642
- 14 Guo Wei, Zhao Yigong, Xie Zhenhua *et al.*. New method for cloud description and dim small infrared target detection based on nonparametric [J]. *J. Infrared. Milli. W.*, 2008, **27**(5): 383~388
- 郭 伟, 赵亦工, 谢振华, 等. 基于非参数统计的云层背景描述与红外弱小目标检测[J]. 红外与毫米波学报, 2008, **27**(5): 383~388
- 15 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Gu Guohua *et al.*. Dim target detect on based on optical flow histogram in low frame frequency in clouds back round [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1496~1501
- 管志强, 陈 钱, 顾国华等. 基于光流直方图的云背景下低帧频小目标探测方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(8): 1496~1501
- 16 L. A. Johnston, V. Krishnamuthy. Performance anaysis of a dynamic programming track before detect algorithm [J]. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.*, 2002, **38**(1): 228~242
- 17 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. Infrared target tracking algorithm based on algorithm fusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 860~865
- 管志强, 陈 钱, 钱惟贤等. 一种基于算法融合的红外目标跟踪方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 860~865
- 18 L. R. Liang, C. G. Loonry. Competitive fuzzy edge detection [J]. *Applied Soft Computing*, 2003, (3): 23~137