

## 基于包围盒约束光谱聚类的红外目标识别算法

郭文凤, 焦志刚

(沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 在红外成像过程中, 目标边缘模糊化是影响红外目标识别效果的关键因素, 也是红外目标识别算法的研究重点, 故在光谱图像中合理补偿目标几何特征信息成为研究热点之一。结合包含目标几何特征信息的包围盒作为约束条件, 对红外光谱图像进行分层限定滤波, 降低原有图像数据中目标几何外形数据的丢失, 提高目标可识别性。设计了在包围盒约束条件下的光谱聚类算法, 设置参数  $\eta$  表征待测军用车辆目标的几何信息, 设置参数  $m$  表征待测军用车辆目标的光谱特征信息。实验采用 TEL-1000-MW 型红外成像光谱仪获取多光谱图像, 通过改变  $m$  和  $\eta$  值调整光谱特征值个数与包围盒范围, 从而获得不同的目标识别图像。并与传统方法对同一幅红外目标图像的识别效果相比较, 结果发现采用包围盒约束的待测目标图像几何边界信息保留效果明显优于传统方法, 当  $m=10$ 、 $\eta=0.7$  时, 红外图像的目标识别效果最好, 同时算法收敛速度也最优。由此可见, 该算法在提高红外目标识别能力、避免误判伪目标和漏检目标方面具有很高的实用价值。

**关键词:** 红外目标识别; 光谱聚类; 包围盒约束; 军用车辆

**中图分类号:** TP750      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210085

## Infrared target recognition algorithm based on bounding box constrained spectral clustering

Guo Wenfeng, Jiao Zhigang

(School of Equipment and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** In the process of infrared imaging, target edge blurring is a key factor that affects the effect of infrared target recognition, and it is also the focus of infrared target recognition algorithms. Therefore, reasonable compensation of target geometric feature information in spectral images has become one of the research hotspots. The bounding box containing the geometric feature information of the target was used as a constraint condition, and the infrared spectrum image was hierarchically limited and filtered to reduce the loss of the target geometric shape data in the original image data and improve the recognizability of the target. A spectral clustering algorithm under bounding box constraints was designed. The parameter  $\eta$  was set to characterize the geometric information of the military vehicle target under test, and the parameter  $m$  was set to characterize the spectral feature information of the military vehicle target under test. In the experiment, a TEL-1 000-MW infrared imaging spectrometer was used to obtain multi-spectral images. By changing the  $m$  and  $\eta$  values, the number of spectral feature values and the bounding box range were adjusted to obtain different target recognition images. Compared with the traditional method for the recognition effect of the same infrared target image, it was found that the geometric boundary information retention effect of the target image under test using the bounding box constraint

收稿日期: 2021-02-02; 修订日期: 2021-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (61573323)

作者简介: 郭文凤, 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为武器系统动态测试技术。

was significantly better than that of the traditional method. When  $m=10$ ,  $\eta=0.7$ , the infrared image target recognition effect was the best, and the algorithm convergence speed was also the best. It can be seen that the algorithm has high practical value in improving the ability of infrared target recognition and avoiding false targets and missed targets.

**Key words:** infrared target recognition; spectral clustering; bounding box constraints; military vehicles

## 0 引言

对于远距离、复杂背景下的军用车辆目标识别是目标识别在军事应用中的一个重要支脉<sup>[1]</sup>,而红外图像识别算法又是目标识别中的一种常用技术手段。通常目标识别技术利用可见光或红外光成像实现,可见光目标识别采用可见光成像并通过图像处理识别目标,但其受环境影响明显、不能全天候监测,同时当目标与背景色相近时会大大降低系统识别能力;红外目标识别技术可以有效克服这些缺点,但也存在轮廓不清、容易受相似光谱目标影响的问题<sup>[2]</sup>。

提高红外目标识别能力<sup>[3]</sup>的方法大致可分为两类:从系统设计角度出发,选用更高灵敏度的红外面阵传感器、改进处理电路降低噪声、优化光学系统等,以提高系统硬件为主要手段<sup>[4]</sup>;从数据处理角度出发,主要体现在降噪、图像分割、目标提取等算法设计<sup>[5]</sup>。在目标提取过程中,核心问题是区分目标和复杂背景之间的不同,常见的分类方法有模板匹配法<sup>[6]</sup>和特征对比法<sup>[7]</sup>。通过模板匹配的方法获取目标,但该方法需要大量前期数据提供准确的模板信息,对未知目标难以识别,实际应用价值受限;特征提取法如常见目标以矩形为主可以通过形状特征分析,但该方法往往不考虑目标的整体性,从而容易造成伪目标的误判,并且其运算量大,对数据处理系统要求较高。综上所述,基于红外图像的军用车辆目标识别主要需要克服目标与背景的辐射相近时容易被背景淹没或造成伪目标出现的问题。

由于目标本身都是有三维结构的,而获取的二维图像是三维目标在二维像面上的投影,故必然存在因遮挡而导致信息不完整影响目标识别的问题<sup>[8]</sup>。实际上传统红外识别过程中的误检与漏检也多是因为位姿与模板不匹配或者特征点丢失导致,所以如果能够将目标不同位姿对应的几何区域预先作为目标识别的限定边界,将大幅提升目标识别的准确性。而该划分方式与包围盒<sup>[9]</sup>的设计思路不谋而合,包围盒是采用简单的几何形状将复杂目标进行包围识别的一种

方式<sup>[10]</sup>。

为了提高红外目标识别的能力与准确度,文中提出了一种基于数据融合的目标识别与分析方法,从几何特征和光谱特征两个角度出发,将包围盒约束作为目标识别的几何限定条件,再完成目标区域的光谱聚类分析。由此可以将目标具有的几何特征引入算法,从而提高目标识别率并抑制误检率。

## 1 红外目标识别机理

光谱聚类是将具有一定程度相同属性的光谱信息分为一类,按照类似规则进行分类,形成不同类别组的过程<sup>[11]</sup>。所以建立不同的相似度函数可以使数据分类更加准确。对于该系统而言就是要得到最佳的光谱分类,从而提高目标在复杂环境中的信噪比<sup>[12]</sup>。由于实际目标往往存在固定的几何外形,但目标的边界有可能被遮挡或与背景的辐射相近而造成无法区分,故文中算法融合了目标空间信息和目标光谱信息,将几何特征作为边界条件限制光谱聚类过程,从而实现目标区域的去伪滤波,提高系统对传统红外图像中目标的识别能力。

对于每个可分辨的光谱区间而言,任意两个像素点间的相似度函数<sup>[13]</sup>都利用谱聚类的形式进行分类。设像素点分别为  $x_i$  与  $x_j$ ,由此可以推导得到高斯径向基函数<sup>[14]</sup> $G$ 为:

$$G = \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{\sigma_p^2}\right) \quad (1)$$

式中:  $\sigma_p$  为参数标量;  $p_i$  和  $p_j$  为像素点  $x_i$  与  $x_j$  中对应的灰度值,  $i$  和  $j$  分别为像素点对应的序号。

由于系统需要将几何数据中的特征信息与光谱数据中的特征信息相融合,是不同物理量纲之间的数据的制约关系,故采用不受量纲影响的马氏距离可以有效解决由于数据属性不同造成的数据不匹配,并且采用马氏距离对数据分析还能排除变量间互扰的问题。故系统对应的马氏距离  $d_m$  为:

$$d_m = \exp\left(-(s_i - s_j)^T A (s_i - s_j)\right) \quad (2)$$

式中:  $A$  表示全矩阵;  $s_i$  与  $s_j$  为像素点  $i$  和  $j$  中的光谱特征值。

由此将公式 (1)、(2) 相乘获得相似度函数:

$$d(x_i, x_j) = G \cdot d_m \quad (3)$$

由此可见, 通过公式 (3) 可以对两个不同光谱段的两个空间点构造相似度函数, 从而实现通过空间关系与光谱特性关系的方式提高目标的识别能力。

## 2 包围盒约束条件下的光谱聚类

由于文中主要针对的是军用车辆作为目标, 故被测目标的外形、轮廓都是可以近似为多条线段构成的多边形, 可能含有少量弧线 (轮胎部分), 总之, 外形结构相对单一。将拟识别的所有军用车辆外形结构以模板的形式建立合适尺寸的包围盒, 再将该包围盒用于对目标区域的限定。

第一步: 包围盒的边界上限由目标外形尺寸决定, 通过三维视觉估计的方法对拟测试目标的特征位置进行特征提取。选定测试区域范围  $[(p_i, p_j), (p_{i+k}, p_{j+k})]$ , 其中,  $p_i$  和  $p_j$  分别表示红外图像中的横纵坐标值,  $k$  表示测试区域所占像素个数。由此可列出待分析区域  $m$  个光谱区间相应的响应矩阵  $A_m$ ;

第二步: 设计合适的包围盒。包围盒的边界为目标坐标的极值, 即  $Max(p_i, p_j)$ , 包围盒在三个方向的极值限定了目标的范围。通过包围盒对图像中符合光谱聚类特征的区域进行匹配筛选;

第三步: 对于待测目标军用车辆而言都是具有特殊光谱特征的。在  $m$  个光谱区间中选取特征吸收段作为参考段, 并在符合光谱特性的数据中应用包围盒选择符合几何逻辑关系的数据集合。包围盒的类型包含矩形数据集合  $\sum R(p_x, p_y)$ 、梯形数据集合  $\sum T(p_x, p_y)$ 、菱形数据集合  $\sum D(p_x, p_y)$ 、椭圆形数据集合  $\sum I(p_x, p_y)$  等。集合进行匹配计算, 如果某一区域内具有高连通性或者边界连续性, 则可认为其符合目标的特点, 予以保留;

第四步: 在符合基本包围盒基础上对数据进行组合分析, 将测试区域中的特征形状进行组合分析, 将符合预设军用车辆的数据进行相似度排序, 然后按照某一比例完成剔除。其中, 逻辑规则就是按照军用车辆几何特征关系设计的位置比例计算值, 例如若某个椭圆形被判定为轮胎点集, 则其空间位置不可能在车

身、车窗等点集的上面, 故  $\sum E(p_x, p_y)$  的中心坐标应小于其他点集, 如果大于则认为该点集为噪声或非同一属性集合, 从而剔除。这样就能有效地根据目标的整体性排除可能存在的具备某一种形状连通域的噪声区域, 提高真实目标的识别能力;

第五步: 当完成基于包围盒范围内的光谱聚类分析后, 可得到若干组包含目标形状及光谱特征的数据集合, 而这些数据集就是系统想要得到的待测目标, 将这些数据集对应的原始图像中相应位置的图像取出, 就完成了目标获取。

## 3 基于包围盒约束光谱聚类算法实现

在有了合适的空间边界条件的基础上就可以对符合边界条件的区间进行谱聚类分析, 光谱的分类规则也是依据相似度学习实现的。将传统光谱特征提取的方法转化成符合特定几何边界的光谱段最优化分割问题<sup>[15]</sup>, 由此可以对红外图像中同时具备几何特征和光谱特征的信息进行提取。其主要步骤为:

(1) 根据所需测试的目标类型, 设置调节参数  $\sigma_p$ , 并计算响应矩阵  $A_m$ ;

(2) 对训练集中全部像素点做相似度运算, 从而得到关联矩阵  $M$ ;

(3) 设光谱矩阵的对角矩阵为  $N$ , 则其特征值可表示为该行的和;

(4) 设  $L=N^{-0.5} \cdot M \cdot N^{-0.5}$ , 而  $L$  存在  $k$  个特征值, 这些特征值的物理意义就是目标种类与背景种类的总和;

(5) 计算特征值的最大值后, 由此定义特征向量对应的目标矩阵  $X$ ;

(6) 将预设军用车辆的几何外形数据以包围盒的方式给出三维坐标极值范围  $Max(p_i, p_j)$ , 用该值与目标尺寸极值的比值作为约束比例  $\eta$ ;

(7) 代入包围盒约束条件下的三维视觉估计算法, 从而得到包含所有特征结构信息的边界条件, 有  $E = \sum R_n \cup \sum T \cup \sum D_n \cup \sum I_n$ ;

(8) 计算特征光谱矩阵  $X = C^{-0.5} \cdot E (E^T C E)^{-0.5}$ , 对包含特征光谱数据区域进行包围盒滤波, 从而排除不具备军用车辆目标的伪目标, 所剩数据集合为最终目标测试数据集合。

将以上步骤遍历每个光谱区间, 可以获得红外图像中所有符合待识别目标几何特性与光谱特征的数据集合。

## 4 实验

### 4.1 红外图像数据采集

采用 TEL-1000-MW 型红外傅里叶变换成像光谱仪对被测区域进行图像采集,该成像光谱仪的测试波长范围为 3~5  $\mu\text{m}$ ,在该次测试过程中采用光谱分辨率为 2  $\text{cm}^{-1}$ ,由所选波长区间决定。

实验中分别测试了两种情况:一种是一个目标军用车辆(车保存发动状态)与多台普通车辆并行停靠于停车位,存在一定的遮挡关系,背景是以树木为主

的绿化带;另一种是目标军用车辆(车保持熄火状态)与多辆汽车侧位停于广场中,存在一定的遮挡关系,背景为建筑物。图 1(a)对应的情况是军用车辆目标车头朝向测试系统,图 1(b)对应的情况是军用车辆目标车身朝向测试系统,正好对应两种具有明显差异的识别状态。同时, B 和 C 目标分别为存在一定遮蔽和不遮蔽的两种情况,这是测试过程中最典型的两种状态,所以采用以上两种情况完成测试可以有效验证算法的普适性。其中, A、B、C 分别为军用车辆、民用 SUV 和民用小轿车。测试所得伪彩色图像如图 1 所示。

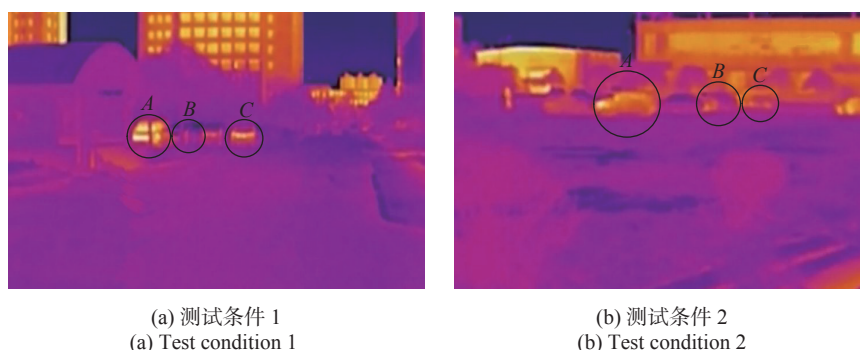


图 1 待测目标的红外图像

Fig.1 Infrared image of the target to be measured

### 4.2 传统算法对比测试

在目标原始红外图像数据的基础上,将采用传统方法和文中目标识别方法进行比较,分析其对目标识别的能力。通过光谱特征分析对原始红外图像进行目标提取的效果如图 2 所示。

针对图 2 中两种不同测试环境下的目标识别结果进行分析。如图 2(a)所示,在测试条件 1 中,由于目标军用车辆保持着发动状态,其红外影像十分清

晰,基本上不需要额外的滤波处理也能够看到目标。同时,在相近位置的 B 和 C 却有不同测试效果。B 由于有部分遮挡,并且车温与环境温度基本一致,故其在图像中几乎无法识别;而 C 没有遮挡,并且有比较完整的区域与测试方向垂直,故图像也相对清晰,虽然边缘轮廓存在缺失,但是仍可以判断其不属于背景,而是车辆的属性。由此可见,在测试条件 1 下,只有当目标光谱特征十分明显时,目标的识别概

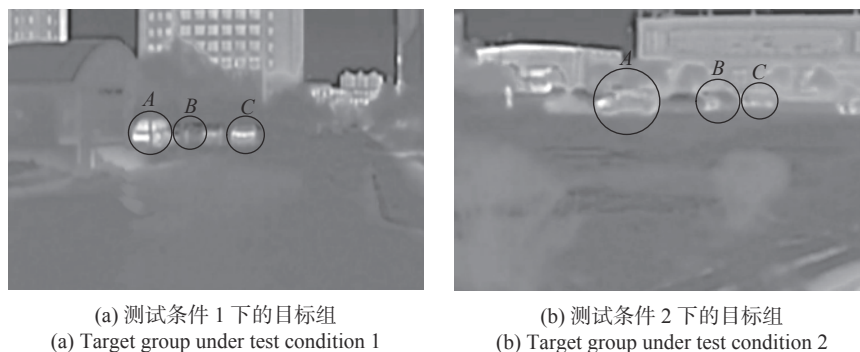


图 2 基于传统光谱特征分析的目标识别效果

Fig.2 Target recognition effect based on traditional spectral feature analysis

率才非常高,否则目标容易被背景淹没。如图 2(b) 所示,同一辆军用车辆待测目标,但是其识别效果大大受到影响,分析原因认为,目标军用车辆为熄火状态,故整个车身的温度与环境基本一致,热辐射特征降低,同时背景为建筑物,与树木不同,其反射面也是较为整齐的,回波特性与车辆表面相近,故此等背景条件下目标背景信噪比差异不大,目标可识别性变差。而在此条件下的 B 和 C 由于存在遮挡与背景更接近,所以很难识别,容易产生漏检或误检。

### 4.3 文中算法测试数据分析

测试目标的光谱区间被定义为 20 个子区间(该子区间的个数由系统光谱范围决定,为了适应光谱数据运算量的要求,每个子区间的波长采样点不能太大,故针对文中测试系统的波长区间设置为 20,目的是便于计算与分层),从而将具有不同光谱特征的测

试图像划分为 20 个子图像。设光谱特征共有  $m$  个主特征点,由这两个参数调节对图像光谱聚类的程度,设包围盒的范围极值与目标军用车辆的外形尺寸值的比值为  $\eta$ ,由这个比值控制几何特征范围。

实验测试过程中,重点对比当光谱特征值选择数量固定时包围盒比值对红外图像处理的影响效果,并分析其目标识别概率;同时,对比当包围盒比值固定时光谱特征值对红外图像处理的影响效果,并分析其目标识别概率。将不同参数设置条件下的处理结果与 4.2 节中的传统方法进行对比。实验数据量较大,文中选取具有较为典型的几种情况予以展示与分析,分别为:  $m=15, \eta=0.7$ ;  $m=10, \eta=0.7$ ;  $m=15, \eta=0.3$ , 如图 3 所示。

图 3(a) 和 3(b) 分别为测试条件 1 和 2 时,将光谱特征数设置为 15,包围盒比值设置为 0.7 时的处理结

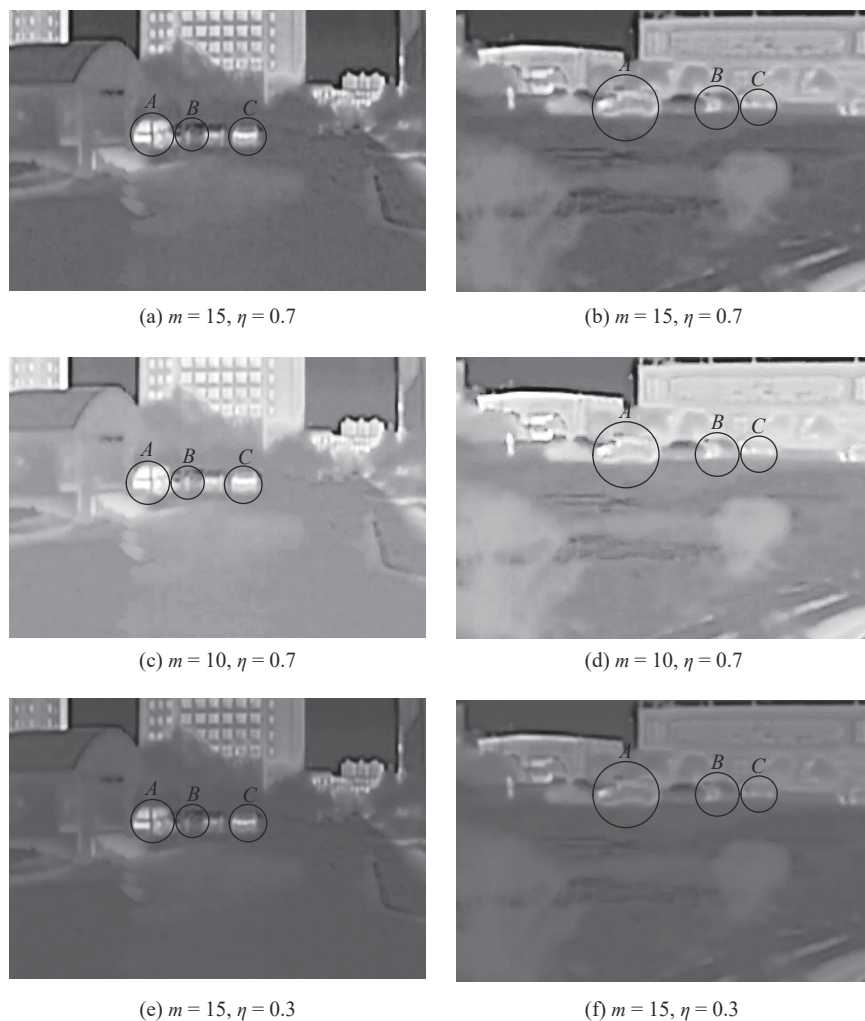


图 3 不同  $m$  与  $\eta$  时的红外图像

Fig.3 Infrared images at different  $m$  and  $\eta$

果。单从光谱灰度强度看,与传统处理效果基本一致,但观察细节部分可知,目标的轮廓信息更加清晰,只是由于符合包围盒范围的锐化信息被保留的结果相比传统识别方法可以更好地保留目标的几何特征,这样也为进一步采用目标识别算法分离目标提供了更多的分类依据。图 3(c) 和 3(d) 为测试条件 1 和 2 时,将光谱特征数设置为 10,包围盒比值设置为 0.7 时的处理结果。与图 3(a) 和 3(b) 相比,虽然光谱灰度略有下降,但几何边界依旧较清晰,由于采用更少的特征数,总体运算速度更快,从系统测试速度与精度的综合角度出发,采用该种参数分布更适合于实际应用。图 3(e) 和 3(f) 为测试条件 1 和 2 时,将光谱特征数设置为 15,包围盒比值设置为 0.3 时的处理结果,与图 3(a) 和 3(b) 相比,虽然光谱灰度基本没变,但几何边界信息明显模糊,并不利于目标的提取,可见包围盒比值设定对目标几何特征保留具有一定的贡献。

## 5 结 论

文中针对红外目标识别中几何特征模糊造成的误判和漏判问题,提出了一种基于包围盒约束的光谱聚类红外目标识别算法,并应用于军用车辆目标测试。实验对同一组红外图像进行分析,对比了不同测试条件下的目标识别效果。结果显示,该算法的目标轮廓更加清晰,目标对比度效果更好。由此可见,将该算法应用于红外目标识别可以有效地提高系统的检测能力。

### 参考文献:

- [1] Shu R, Zhou Y P, Lu C L. Best detection wavelength bands selection method based on multispectral radiation difference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2505-2512. (in Chinese)
- [2] Zhang P, Wang L, Huang W, et al. Multiple pedestrian localization based on couple-states Markov chain with semantic topic learning for video surveillance [J]. *Soft Computing*, 2015, 19(1): 85-97. (in Chinese)
- [3] Huang W, Yang W J, Zeng J, et al. A novel algorithm of moving object detection via spectral clustering and incremental learning [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2017, 35(1): 170-175. (in Chinese)
- [4] Wang C L, Wang H W, Hu B L, et al. A new spectral-spatial algorithm method for hyperspectral image target detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(4): 1163-1169. (in Chinese)
- [5] Yu C Y, Xie J L, Fei B, et al. The effect of ambient temperature on human head's surface skin temperature [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(1): 172-176. (in Chinese)
- [6] Sun Y F, Chang X G, Li D X, et al. Infrared image edge detection algorithm based on adaptive Canny [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 31(6): 18-21. (in Chinese)
- [7] Lang Y, Yuan B. Algorithm application based on the infrared image in unmanned ship target image recognition [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, 80: 103554.
- [8] Singh S, Rao D V. Recognition and identification of target images using feature based retrieval in UAV missions [C]//Computer Vision, Pattern Recognition, Image Processing & Graphics, IEEE, 2014.
- [9] Xiao Y S, Huang L Z, Zhou J J. RATR of adaptive angular-sector segmentation based on grey incidence analysis model [J]. *Grey Systems: Theory and Application*, 2017, 7(1): 71-79.
- [10] Cao W, Zhou H, Zhou Z M, et al. An approach for high resolution radar target recognition based on BP neural network [C]//International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2011: Advanced Intelligent Computing, 2011: 33-39.
- [11] Zhou D Y. Radar target HRRP recognition based on reconstructive and discriminative dictionary learning [J]. *Signal Processing*, 2016, 126(11): 52-64.
- [12] Huang X Y, Nie X L, Hong W W, et al. SAR target configuration recognition based on the biologically inspired model [J]. *Neurocomputing*, 2017, 234(4): 185-191.
- [13] Yuan P, Mao J L, Xiang F H, et al. Improved network fault diagnosis based on genetic optimization BP neural network [J]. *Power System and Automation Journal*, 2017, 29(1): 118-122. (in Chinese)
- [14] Wu Zh J, Niu M, Xu B, et al. Research on recognition method based on spectral regression feature reduction and backward propagation neural network [J]. *Journal of Electronic and Information*, 2016, 38(4): 978-984. (in Chinese)
- [15] Xu B, Chen B H, Liu H W, et al. Based on the recurrent neural network model, radar high resolution distance image target recognition [J]. *Journal of Electronics and Information*, 2016, 38(12): 2988-2995. (in Chinese)