

文章编号:1007-2780(2014)03-0429-06

SAR 图像目标识别新方法

王 丽¹, 魏 巍², 吴林钢³, 王灿进^{4*}

- (1. 吉林省送变电工程公司, 吉林 长春 130033;
2. 长春长光奥立红外技术有限公司, 吉林 长春 130031;
3. 国网福建龙岩市新罗区供电有限公司, 福建 龙岩 364000;
4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:提出一种 SAR 图像目标识别新方法。首次引入 BM3D 方法,用于滤除原始图像中的相干斑噪声,BM3D 结合了空间域和变换域去噪的优势,滤波性能优异。在特征提取步骤,将低阶 Hu 矩与高阶 Zernike 矩组合,Hu 矩描述目标的粗略信息,高阶 Zernike 矩描述目标的细节信息,因此组合矩能够更加全面而细致地表达目标特性。使用组合矩特征训练 SVM 分类器,对含噪的 SAR 图像进行识别实验。实验结果表明:本文方法的识别率高达 98.90%,优于已有的 SAR 目标识别方法。

关 键 词:SAR 图像;目标识别;BM3D 滤波;组合矩

中图分类号:TN957.52;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/JYXS20142903.0429

Novel target recognition method for SAR images

WANG Li¹, WEI Wei², WU Lin-gang³, WANG Can-jin^{4*}

- (1. Jilin Power Transmission and Substation Engineering Company, Changchun 130033, China;
2. Changchun Aoli Infrared Technology Co., Ltd, Changchun 130031, China;
3. Longyan Xinluo Power Supply Company of State Grid, Fujian Province, Longyan 364000, China;
4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: A new target recognition method for SAR images is proposed. An advanced denoising method named BM3D is introduced for the speckle noise suppression at the first time. BM3D filter combines advantages in space-domain denoising with those in transform-domain denoising, which leads to better performance. For the feature vector extraction step, Hu moments, which describe the target's cursory information, and Zernike moments, which describe target's fine information, are fused to construct the combination moments. In this way, the combination moments can express the target more comprehensively and precisely. In our experiment the moments are extracted from SAR images and used to train SVM classifier, and the experiment results indicate that the proposed method can obtain a recognition rate of 98.90%, which outperforms other SAR recognition methods.

Key words: SAR image; target recognition; BM3D filtering; combination moments

收稿日期:2013-12-20;修订日期:2014-01-04.

基金项目:院地合作(长吉图专项基金)(No. 2011CJT0006)

* 通信联系人, E-mail: wcjps@126.com

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种主动微波遥感探测器, 具有全天候全天时稳定工作、成像距离远、可实现多视角多分辨率的数据收集等优点, 因此广泛应用于军事、农业、地质监测等多个领域^[1-3]。SAR 图像目标识别自 20 世纪 70 年代以来便成为各国学者研究的热点。

SAR 图像目标识别的关键步骤包括滤波、特征提取和目标分类识别。SAR 图像容易受到相干斑噪声的影响, 导致图像特征提取不准确^[4]。在斑点噪声的抑制方面, 第一类方法包括经典的 Lee^[5], Frost^[6], Kuan^[7], Gamma MAP^[8] 等, 通过计算图像的局部统计特性进行像素均衡, 这类方法难以准确辨别边缘与其近邻的差异, 导致边缘模糊; 第二类滤波器包括增强型 Lee 滤波^[9]、各向异性相干斑抑制方法^[10-11] 和小波域去噪方法^[12], 这类方法较好地保留了边缘, 却难以保持纹理特性; 第三类基于模型的滤波器^[13] 改善了对纹理信息的保持性能, 但是模型本身不具有通用性。近年来, 非局部滤波方法^[14-15] 被提出并得到快速发展, 其中, BM3D 滤波是效果较为优异的滤波方法, 它结合了空间域和变换域、局部与非局部滤波的特点, 对图像进行分块分组处理, 能够在抑制噪声的同时有效地保留图像的结构信息。因为相干斑噪声是乘性噪声, 而 BM3D 适用于加性噪声。为此, 本文将同态变换与 BM3D 滤波器相结合, 用于 SAR 相干噪声抑制, 取得较好的实验效果。

对于特征的选择, 传统的 SAR 目标识别使用 Hu 矩^[16] 和一些目标区域的灰度特征^[17], 但是这些特征不足以描述目标的细节信息, 并且灰度特征容易受到噪声的干扰。相对于 Hu 矩, Zernike 矩^[18-20] 可以方便地构造任意形式的高阶矩, 高阶矩更容易描述图像的细节。为此本文将 Hu 矩与 Zernike 矩相结合构造组合矩, 从 SAR 去噪图像中提取该组合矩特征进行目标识别。

为保证较高的分类性能, 本文选用径向基支持向量机 (RBF-SVM) 作为分类器。支持向量机克服了神经网络局部极值问题, 同时对于小训练样本集具有更好的泛化能力, 因此只需要为数不多的训练图片集就可以保证准确的分类效果。

本文提出一种新的 SAR 图像目标识别方法: 使用同态 BM3D 滤波方法滤除相干斑噪声, 随后在去噪图像中提取目标的组合矩特征, 输入训练好的 SVM 进行分类识别。采用该方法对含有装甲车和坦克目标的 SAR 图像进行实验, 取得令人满意的识别效果。

2 同态 BM3D 滤波

Dabov 等提出的 BM3D 滤波方法, 将非局部平均方法应用到变换域中, 在抑制噪声的同时边缘细节保留能力也大大加强。BM3D 滤波方法是一个迭代的算法, 主要分为 2 个阶段: 基本估计和最终估计^[15]。

2.1 基本估计

2.1.1 分组

将输入图像分为若干互有重叠的块 Z_{x_R} , x_R 表示该块的左上角的坐标。将每个块 Z_{x_R} 作为参考块, 分别计算它与其他各块之间的距离 L (本文采用 l^2 距离进行度量), 若 $L < T_{\text{har}}$ (T_{har} 为事先定义的阈值), 表示这 2 个块之间足够相似, 将其归为一组。这样, 相似的块就被放在一组, 而不同的块则被区分开, 构成一个三维矩阵。

2.1.2 联合滤波

对于每个相似块构成的组, 进行联合滤波。联合滤波的步骤如下:

(1) 使用一个线性变换 (例如三维小波变换) 对该组进行稀疏表示

(2) 硬阈值收缩变换系数, 以去除噪声

(3) 反线性变换, 得到组中每个块的估计值

2.1.3 聚合

因为不同的组里可能有对相同的块的估计, 而这些估计由于采用不同的硬阈值收缩, 通常也是不相同的, 因此对于每块的估计需要加权平均。同时块与块之间重叠部分的像素, 也需要进行加权平均。假设 $N_{\text{blk}}^{\text{non}}$ 为硬阈值变换后非零个数, σ 是噪声标准差估计, 则加权系数 ω_i 为

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{1}{\sigma^2 N_{\text{blk}}^{\text{non}}} & N_{\text{blk}}^{\text{non}} \geq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 最终估计

最终估计的步骤和基本估计类似, 也分为分组、联合滤波和聚合 3 个步骤。区别在于: 在分组

阶段,首先对基本估计得到的粗滤波图像进行分组,构成三维矩阵 $\mathbf{D}_1$,并记下分组各块的标号。在原始图像上取出对应标号的图像块,构成另外一个三维矩阵 $\mathbf{D}_2$;在联合滤波阶段,以 $\mathbf{D}_1$ 的三维变换能量谱作为真实能量谱的估计,对 $\mathbf{D}_2$ 进行经验维纳滤波,最后进行三维逆变换得到去噪的图像块。

这样经过基本估计和最终估计后,就得到去噪后的图像。Dabov 等在文献[15]中对比了多种滤波算法,证明了 BM3D 在去噪方面的优异性能。

因为相干斑噪声是乘性噪声,而 BM3D 适用于滤除高斯噪声一类的加性噪声,因此首先使用同态变换,将相干斑噪声变成加性噪声,再进行滤除。

3 组合矩特征

3.1 Hu 矩

二维图像 $f(x, y)$ 的普通 $p+q$ 阶原点矩定义为

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y). \quad (2)$$

对应的中心矩为

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y). \quad (3)$$

其中: $\bar{x}, \bar{y}$ 表示图像的重心,可以由式(4)确定:

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}. \quad (4)$$

归一化中心矩定义为

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{(p+q)/2}}. \quad (5)$$

其中: $p+q=2, 3, \dots$

Hu 首次将低阶归一化中心距进行线性组合,提出一组具有平移、旋转和缩放不变性的 7 个不变矩:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \eta_{20} + \eta_{02} \\ \phi_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ \phi_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \\ \phi_4 &= (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \\ \phi_5 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ \phi_6 &= (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \\ \phi_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \phi_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]. \end{aligned} \quad (6)$$

对于同一幅图像而言,以上 7 个不变矩值的变化范围很大,较高阶的矩更容易受到噪声的影响,滤波后的不变矩可能出现不可预知的变化。另一方面,矩值也可能出现负数。为此对以上不变矩进行修正:

$$H_k = \lg |\phi_k + 1|, k = 1, 2, \dots, 7. \quad (7)$$

3.2 Zernike 矩

Teague^[18]提出的 Zernike 矩是一组正交矩,能够方便地构造任意形式的矩。 n 阶 Zernike 矩定义为

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) [V_{nm}(x, y)]^* dx dy, \quad (8)$$

式中: $V_{nm}(x, y)$ 是一组在单位圆内正交的多项式的集合,即

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{nm}^*(x, y) V_{pq}(x, y) dx dy = \begin{cases} \frac{\pi}{n+1} & n=p, m=q \\ 1 & \text{others} \end{cases}. \quad (9)$$

其中:

$$V_{nm}(x, y) = R_{nm}(x, y) \exp[j \arctan(y/x)]. \quad (10)$$

$$\begin{aligned} R_{nm}(x, y) &= \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \times \\ &\frac{(n-s)!}{s! (\frac{n+|m|}{2} - s)! (\frac{n-|m|}{2} - s)!} \times (x^2 + y^2)^{n/2-s}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中: n 为大于等于 0 的正整数, m 为不为 0 的整数,且 $n-|m|$ 为偶数, $|m| \leq n$, $R_{nm}(x, y)$ 称为径向表达式。

从式(8)可以看出,图像的 Zernike 矩是该图像在正交多项式上的投影。为了计算一幅图像的 Zernike 矩,需要将图像的中心移到坐标原点,将图像像素点映射到单位圆内部。通过改变 m, n 的值,可以构造任意阶的矩,高阶矩包含更多图像的细节信息,能够提高识别性能。

3.3 组合矩特征

Hu 矩能够描述目标的粗略信息,对噪声不敏感,而高阶 Zernike 矩描述目标的细节信息,对

噪声较敏感。为此,本文将二者相结合,构成组合矩特征: $\Gamma = \{\alpha\Phi, \beta\Lambda\}$ 。其中 Φ 表示 Hu 矩, Λ 表示 Zernike 矩的高阶矩, α 和 β 是加权因子。因为高阶矩更容易受到噪声的影响,而低阶矩更加稳定,所以取 $\alpha > 1, \beta < 1$ 。组合矩同时具有 Hu 矩和 Zernike 矩的优势,对相干斑噪声不敏感,同时对目标的细节信息拥有较好的描述能力。

4 多类支持向量机

单个支持向量机是一个二分类器,只能解决两类样本之间的分类问题。而在 SAR 图像目标识别中目标种类可能有多类,因此需要将支持向量机推广到多类划分的情况。有 3 种常用的策略可以实现这种推广:一对多的最大影响策略;一对一的投票策略;一对一的淘汰策略。本文采用的是的一对一的投票策略,假设目标类型有 A、B、C、D 4 类,则分类过程如下:

(1)分别以 (A, B)、(A, C)、(A, D)、(B, C)、(B, D)、(C, D) 两两组成训练集,训练得到 6 个 SVM

(2)定义 $\text{Vote}(A) = \text{Vote}(B) = \text{Vote}(C) = \text{Vote}(D) = 0$

(3)测试阶段,将特征向量分别输入这 6 个 SVM,如果判定为 A 类,则 $\text{Vote}(A)++$,如果判定为 B 类,则 $\text{Vote}(B)++$,判定为 C 类则 $\text{Vote}(C)++$,判定为 D 类则 $\text{Vote}(D)++$

(4)选择 Vote 最大的那个类,为本次分类的结果

5 基于同态 BM3D 和组合矩的 SAR 目标识别方法

本文提出的 SAR 目标识别方法具体步骤如下:

(1)对获取的 SAR 含噪图像进行同态 BM3D 滤波

(2)对训练和测试图像,计算低阶的 Hu 矩和高阶的 Zernike 矩,构成组合矩特征向量

(3)使用训练图片提取的特征向量集训练 SVM 分类器

(4)将从测试图片提取的特征向量集输入训练好的 SVM 分类器,对 SAR 图像目标进行识别

6 实 验

实验用 SAR 图像来源于 MSTAR 数据库,包含 3 大类目标,分别为 BMP2 装甲车、BTR70 装甲车和 T72 主战坦克,其中 BMP2 装甲车有 3 种型号:SN-9563、SN-9566 和 SN-C21, BTR70 装甲车有一种型号:SN-C71, T72 主战坦克有 2 种型号:SN-132 和 SN-182。六类目标的 SAR 图像如图 1 所示。

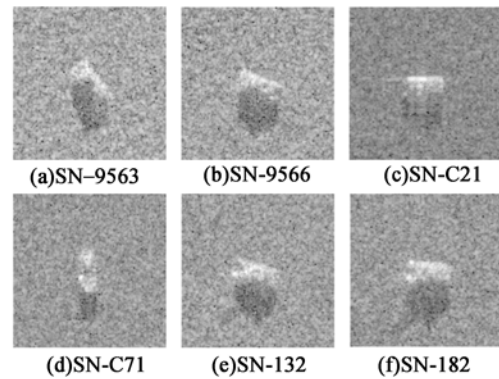


图 1 三类目标 SAR 图像

Fig. 1 SAR images of three types of targets

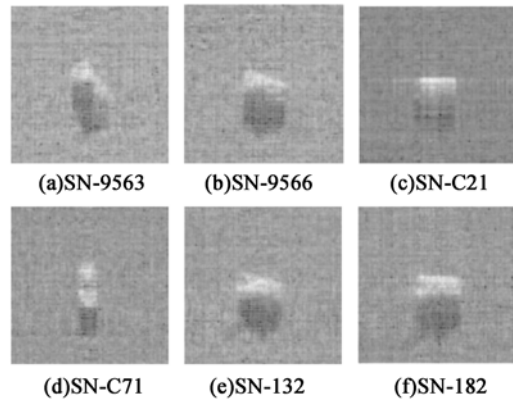


图 2 同态 BM3D 滤波后图像

Fig. 2 Images after homomorphic BM3D denoising

图 2 为经过同态 BM3D 滤波后的图像。可见经过滤波之后,背景中的相干斑噪声得到很好的抑制,同时目标的边缘也保留较完整。

为了比较本文相干斑抑制算法的有效性,使用经典的相干斑抑制方法 Lee、Kuan 和 Frost 进行对比实验, Lee 和 Kuan 的步长均选为 3×3 , 计算滤波后图像的 PSNR, 结果如表 1 所示。

表 1 不同相干斑抑制方法比较

Tab. 1 Comparison of different speckle noise suppression methods (dB)

目标型号	Lee	Frost	Kuan	本文方法
SN-9563	27.12	28.71	27.56	30.05
SN-9566	27.01	28.76	27.64	30.21
SN-C21	28.06	29.69	28.76	31.56
SN-C71	27.93	29.30	28.41	31.24
SN-132	27.62	29.05	28.10	30.78
SN-182	27.59	29.10	28.22	30.96

从表 1 可以看出,本文的相干斑抑制方法比经典的 Lee、Kuan 和 Frost 效果要好,这是因为 Lee、Kuan 和 Frost 使用像素点局部邻域的信息进行噪声强度估计,这种估计可能与真实值偏差很大。相比之下,同态 BM3D 在分组和聚合中使用了全局图像信息,估计较为准确。同态 BM3D 在联合滤波阶段,使用了变换域去噪,而在聚合阶段的加权使用了空间域去噪,二者相结合取得良好的相干斑抑制效果。

接着对去噪后的图像,提取出目标区域的 7 个 Hu 矩和 Zernike 矩的 6、7、8、9、10、11 阶矩(即 $[n, m] = \{[6, 0], [7, 1], [8, 0], [9, 1], [10, 0], [11, 1]\}$)构成组合矩,用于训练 SVM 和分类识别, SVM 采用径向基核函数。实验中 α 取 10, β 取 0.1。

为了证明本文方法的有效性,同时采用 Hu 矩+SVM 和 Zernike 矩+SVM 以及文献[12]提出的纹理特征+神经网络的方法进行识别实验,对比结果如表 2 所示。

表 2 四种方法的平均识别率对比

Tab. 2 Average recognition rate of four methods

识别方法	平均识别率/%
Hu 矩+SVM	92.65
Zernike 矩+SVM	94.26
纹理特征+神经网络	89.78
本文方法	98.90

由表 2 可知,纹理特征+神经网络方法的识别率最低,这是因为 SAR 图像中,纹理特征并不清晰,同时纹理特征易受到相干噪声的影响,在去噪之后有不可预知的变化,因此纹理特征的识别率低于其余 3 种矩特征的识别率。剩余 3 种算法中,本文方法的识别率最高,单独使用 Hu 矩的识别率最低。这是因为低阶 Hu 矩描述目标的粗略信息,无法进行很高精度的辨别,而高阶 Zernike 矩描述目标的细节信息,对噪声较敏感。本文方法将低阶矩与高阶矩相结合,同时具备两种矩的优势,故识别精度最高。

7 结 论

提出一种适用于 SAR 图像的目标识别算法:首次将同态变换和 BM3D 滤波方法结合,用于去除相干斑噪声,得到清晰的图像;将低阶 Hu 矩和高阶 Zernike 矩加权相结合,构成一种新的组合矩特征。将本文方法应用于 MSTAR 数据库中装甲车和坦克的识别,证明本文方法具有很高的识别率,优于目前的单独使用 Hu 矩或 Zernike 矩、纹理特征+神经网络等 SAR 目标识别方法。

参 考 文 献:

[1] 黄世奇,刘代志. 侦测目标的 SAR 图像处理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
Huang S Q, Liu D Z. SAR Image Processing and Application of Reconnaissance Measurement Target [M]. Beijing: Defense Industry Press,2009. (in Chinese)

[2] 薛笑荣. SAR 图像处理技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.
Xue X R. Research on SAR image processing technology [D]. Xian: Northwestern Polytechnical University,2004. (in Chinese)

[3] 刘向增,田铮,史振广,等. 基于 FKICA-SIFT 特征的合成孔径图像多尺度配准[J]. 光学精密工程,2011, 19(9): 2186-2196.

- Liu X Z, Tian Z, Shi Z G *et al.* SAR image multi-scale registration based on FKICA-SIFT features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2186-2196. (in Chinese)
- [4] 高珊, 马艳会. 基于边缘保持的 SAR 图像滤波算法研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(2): 290-294.
Gao S, Ma Y H. Algorithm research of filtering for sar images based on edges-preserving [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 290-294. (in Chinese)
- [5] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, 2(2): 165-168.
- [6] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, *et al.* A mode for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, 4(2): 157-165.
- [7] Kuan D T, Sawchuk A, Strand T *et al.* Adaptive restoration of images with speckle [J]. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process*, 1987, 35(3): 373-383.
- [8] Lopes A, Nezry E, Touzi R *et al.* Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images [C]// *Proceedings of the 10th Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, New York, USA, 1990: 2409-2412.
- [9] Lee J S. Refined filtering of image noise using local statistics [J]. *Computer Graphic and Image Processing*, 1981, 15(2): 380-389.
- [10] Yu Y, Acton S T. Speckle reducing anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(11): 1260-1270.
- [11] 孙海江, 王延杰, 陈小林. 基于自适应梯度阈值各向异性滤波抑制红外复杂背景[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 146-151.
Sun H J, Wang Y J, Chen X L. Suppression of infrared complex background based on adaptive gradient threshold anisotropic Filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 146-151. (in Chinese)
- [12] 于长淦, 方超. 基于小波变换的 ESPI 图像去噪及边缘提取[J]. 液晶与显示, 2011, 26(6): 818-822.
Yu C S, Fang C. ESPI image denoising and edge extraction based on wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(6): 818-822. (in Chinese)
- [13] Walessa M, Datcu M. Model-based despeckling and information extraction from SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(6): 2258-2269.
- [14] 李家德, 张叶, 贾平. 采用非局部均值的超分辨率重构[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1576-1585.
Li J D, Zhang Y, Jia P. Super-resolution reconstruction using nonlocal means [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1576-1585. (in Chinese)
- [15] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, *et al.* Image denoising by sparse 3D transform domain collaborative filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [16] 付燕, 詹新光. 一种有效的 SAR 图像目标识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(15): 156-158.
Fu Y, Zhan X G. Efficient method of SAR image target recognition [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(15): 156-158. (in Chinese)
- [17] 王义敏, 秦永元, 安锦文. 基于特征向量的 SAR 图像目标识别方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(30): 186-188.
Wang Y M, Q Y Y, An J W. Target Recognition in SAR images based on feature vector [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(30): 186-188. (in Chinese)
- [18] Teague M R. Image analysis via the general theory of moment [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1980, 70(8): 920-930.
- [19] 陶李, 王珏, 邹永宁, 等. 改进的 Zernike 矩工业 CT 图像边缘检测[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 48-56.
Tao L, Wang Y, Zou Y N, *et al.* Improved Zernike moment method for industrial CT image edge detection [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 48-56. (in Chinese)
- [20] 赵建川, 王弟男, 陈长青, 等. 红外激光主动成像和识别[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 795-802.
Zhao J C, Wang D N, Chen C Q, *et al.* Infrared laser active imaging and recognition technology [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 795-802. (in Chinese)

作者简介: 王丽(1979—), 女, 工程师, 主要从事电力行业信息管理工作。E-mail: wcjpsh@126.com