

时频图像二维 EMD 分解在 LPI 信号识别中的应用^{*}

张帆¹, 刁鸣¹, 杨承志^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 空军航空大学 信息对抗系, 吉林 长春 130022)

摘要:针对 LPI 信号分类识别问题中, 时频图像受噪声干扰严重的问题, 提出了一种基于二维快速经验模式分解(FBEMD)的图像降噪算法, 并利用该算法实现对 LPI 信号的分类。首先利用时频分析方法, 获得待分类信号的时频分布图像; 使用二维 EMD 分解算法对图像降噪; 截取包含时频信息的图像部分, 通过主分量分析法提取特征矢量; 最后采用 RBF 神经网络完成信号的分类识别任务。对常见的 LPI 雷达信号进行仿真, 结果表明较低信噪比情况下, 该方法仍能获得较好的分类结果。当信噪比为 -2 dB 时, 采用二维 EMD 降噪算法, 平均正确识别率能够达到 93%。

关键词:LPI 雷达信号; 时频分布; 二维 EMD 分解; 主分量分析

doi:10.3969/j.issn.1009-086x.2015.05.028

中图分类号: TN957.52; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-086X(2015)-05-0172-06

Radar Signal Classification Based on Two-Dimensional Empirical Mode Decomposition of Time-Frequency Images

ZHANG Fan¹, DIAO Ming¹, YANG Cheng-zhi^{1,2}

(1. Harbin Engineering University, College of Communication and Information Technology, Heilongjiang Harbin 150001, China

2. Aviation University of Air Force, Department of Communication Counter, Jilin Changchun 130022, China)

Abstract: To classify low probability of intercept (LPI) radar signals correctly, a novel method based on two-dimensional fast empirical mode decomposition (FBEMD) algorithm is proposed. The method is used to reduce the time-frequency image noise. Firstly, time-frequency images are obtained by using PWVD distribution. Intercept image part with signal information and extract feature vector by principal component analysis (PCA). Finally, the radial basis function (RBF) neural network is used to automatically classify LPI radar signals. Simulation results show that the method is effective at low signal noise ratio (SNR). By using FBEMD noise reduction algorithm, the average correct recognition rate can reach 93% when SNR is -2 dB.

Key words: low probability of intercept (LPI) radar signals; time-frequency distribution; two-dimensional empirical mode decomposition (EMD); principal component analysis

* 收稿日期: 2014-06-05; 修回日期: 2014-08-28

作者简介: 张帆(1989-), 男, 山东日照人。硕士生, 研究方向为雷达信号处理。

通信地址: 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区哈尔滨工程大学信息与通信工程系 E-mail: zhangfan8908@gmail.com

0 引言

近年来,雷达技术不断发展,信号频率范围更大,信号调制特征更复杂,传统雷达信号的五大参数难以有效描述雷达信号,信号识别要求难以满足。同时在复杂的战场电磁环境下,截获的信号必然存在大量噪声干扰,较低的信噪比使得雷达信号的识别更加困难。

近年来,利用时频分析技术与数字图像处理技术相结合,实现对 LPI 信号的识别和分类的方法,引起了大量学者的关注。文献[1-2]使用了一种将时频图像二值化,利用图像处理形态学中的腐蚀和膨胀降噪,完成分类的算法;文献[3]提出一种利用二维高斯低通滤波器处理时频图像,完成分类的算法;文献[4]利用自适应维纳滤波对图像处理,二值化后提取局部二值模式纹理特征完成分类。还有大量研究,重点关注对时频图像特征的提取,如利用伪 Zernik 矩阵^[2]、时频图像代数特征^[5]、二维主分量分析^[6]等。这些算法中,对 LPI(low probability of intercept)雷达信号时频图像的降噪处理研究不深,降噪同时无法有效保留图像的高频细节信息,对分类正确率有很大的影响。

2003 年 J. C. Nunes.^[7]将基于经验的模式分解算法(empirical mode decomposition, EMD)推广到二维领域,提出了二维 EMD 算法。近几年来,二维 EMD 分解被大量学者深入研究,广泛应用于图像去噪^[8]、图像融合^[9]等领域。

针对上述问题,本文提出一种利用时频图像二维 EMD 分解和重构算法的 LPI 信号分类方法。

1 基于时频图像处理的 LPI 信号分类方法

本文首先通过二维 EMD 分解和重构对获取的 LPI 雷达信号的时频图像进行预处理;然后利用奇异值分解与主分量分析相结合的方法提取时频图像特征矢量,根据特征矢量完成对 LPI 雷达信号的调

制识别。具体流程如图 1 所示。

1.1 时频分析

时频分析能把时域信号映射到二维的时频平面上,能够同时从时域和频域描述信号,对信号描述更加精确。Wigner-Ville 分布(WVD)是一种具有边缘特性、时移频移不变性、实值性等特性的时频分析方法,而且对线性调频信号有着良好的能量集中性。因此,文中选择了加窗的伪 Wigner-Ville 分布(PWVD)进行分析,其定义为

$$PWVD_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s\left(\tau + \frac{t}{2}\right)s\left(\tau - \frac{t}{2}\right)h\left(\frac{\tau}{2}\right) \cdot h\left(-\frac{\tau}{2}\right)e^{-2\pi f\tau} d\tau, \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为受噪声干扰的信号; $h(t)$ 为窗函数。本文采用了 7 种 LPI 雷达信号,包括 BPSK 信号、COS-TAS 信号、FRANK 信号、FMCW 信号、P1 信号、P2 信号、PT1 信号,其 PWVD 时频图像如图 2 所示。从时频图像中,可以发现有明显的交叉项,但本文采用该种时频分析方法,主要用于完成对不同降噪算法的对比,故本文中不对交叉项的抑制进行详细研究。

1.2 基于二维快速 EMD 算法的时频图像预处理算法

根据对 LPI 雷达信号的 PWVD 结果的分析,可以发现时频图像中,不仅包含与信号有关的时域和频域特征,也包含大量的高频噪声、无信号区域等冗余信息。噪声干扰使分类能力降低;冗余信息使得时频图像数据尺寸过大,直接进行分类大大增加计算量。因此,降低噪声干扰、去除冗余信息是对 LPI 雷达信号正确、迅速分类必须完成的任务。

1.2.1 二维快速 EMD 算法

完成 EMD 分解算法,需要首先找到最佳的局部均值。传统 EMD 分解确定信号的极大极小值点,通过插值算法构成上下包络线,最后利用上下包络线求均值。快速二维经验模式分解算法,基于矩阵变换,减少了求极值的计算,提高了 EMD 算法效率。FBEMD(two-dimensional fast EMD)的核心思想是利用均值滤波矩阵组求矩阵邻域均值^[10]:



图 1 基于图像处理的 LPI 信号分类流程

Fig. 1 LPI signal classification process based on image processing

对于矩阵 $A \in R^{m \times n}$, 存在均值滤波矩阵组 $P \in R^{m \times m}, Q \in R^{n \times n}$, 使得 $B = PAQ$ 为 A 的 x 阶局部均值矩阵, 其中 $\sum_{l=i-x}^{i+x} p_{il} = 1, i = 1, 2, \dots, m, \sum_{l=j-x}^{j+x} q_{lj} = 1, j = 1, 2, \dots, n$.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ k & r & k & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & k & r & k \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & k & r & k \\ & & & & & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & k & & & \\ & r & \ddots & & \\ & k & \ddots & k & \\ & & \ddots & r & \ddots \\ & & & r & \ddots & k \\ & & & & \ddots & r \\ & & & & & k & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当 $x=1$ 时, P, Q 为式 (2) 所示的矩阵, 令 $k=r=1/3, P \nabla Q$ 可得矩阵每一点的三邻域均值。利用该三邻域均值表示传统二维 EMD 算法的均值包络曲面, 可以稳定迅速地实现二维 EMD 算法, 在速度上比传统算法快 2~3 个数量级。

2.2.2 基于二维快速 EMD 算法的时频图像降噪算法

高斯白噪声经过 EMD 获得的每个 IMF 仍高度

近似服从高斯分布; 对噪声图像进行二维 EMD 分解, 获得多个 IMF, 第 1 个 IMF 主要由噪声信号和非常少量的高频图像细节信息组成^[11]。利用这一特点, 可以对原始时频图像进行自适应的降噪重构。将待分解的时频图像表示为

$$X_{in} = \sum_{i=1}^l IMF_i + R_l, \quad (3)$$

式中: $IMF_i \in R^{m \times n}$ 是第 i 次分解的模式函数分量, $R_l \in R^{m \times n}$ 是 l 次分解后的剩余量。FBEMD 降噪算法可描述为:

- (1) 初始化: $i=1, IMF_i = A, R_1 = A$;
- (2) 计算均值图像 $H_i = P \times IMF_i \times Q^T$, 从而求得 $IMF_i = R_i - H_i, R_{i+1} = H_i$;
- (3) 重复步骤 (2) 操作, 直至获得合适的 IMF 分量;
- (4) 将最后一次的剩余量赋值给 R_l 。
- (5) 重构时频图像矩阵为

$$X_{out} = \sum_{i=2}^l IMF_i + R_l. \quad (4)$$

图 3 表示 $SNR = -6$ dB 情况下, FMCW 信号的时频图像, 其中图 3a) 为原始 PWVD 时频图像; 图 3b) 为降噪重构后的 PWVD 时频图; 图 3c) 为图像二维 EMD 分量 IMF1。经过二维 EMD 降噪算法, 时频图像噪声得到有效抑制, 时频集聚性更强, 有利于图像特征的提取。

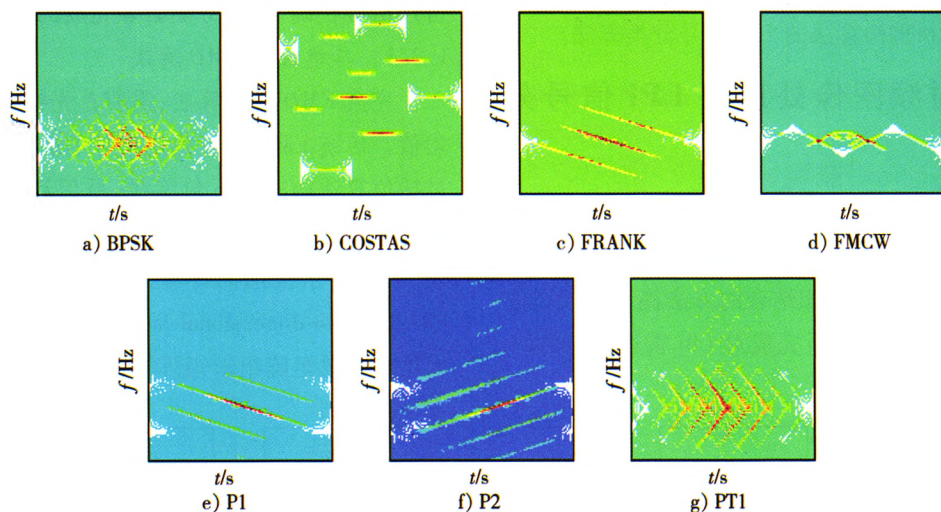


图 2 不同 LPI 雷达信号 PWVD 时频分布图像

Fig. 2 PWVD distribution images of different LPI radar signals

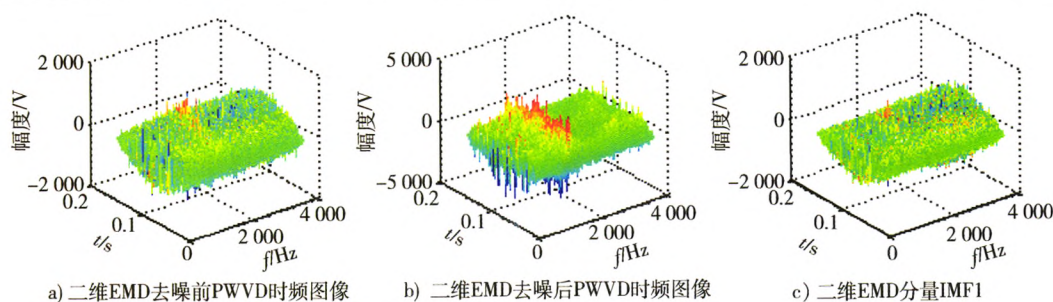


图3 SNR = -6 dB 时 FMCW 信号的时频图像

Fig. 3 PWVD distribution images of FMCW signals when SNR = -6 dB

1.3 时频图像特征提取

1.3.1 图像裁剪

时频图像在经过二维 EMD 分解与重构后,噪声得到有效抑制,但是仍然存在大量冗余信息,首先需要对图像进一步提取和裁剪。图像裁剪步骤如下:

(1) 计算边际频率分布,边际频率分布将信号的瞬时能量表示为频率的函数^[3]

$$PWVD_x(f) = \sum_t PWVD_x(t, f), \quad (5)$$

即对时频图像各频率的时间值相加,储存为列矢量。

(2) 归一化边际频率分布,利用直方图计算获得阈值,确定截取图像的起始和截止频率。

(3) 根据起始频率和截止频率,截取图像,然后将图像调整为固定大小 50 × 200,图 4 为 SNR = -6 dB 情况下,FMCW 信号截取后的灰度图像。

(4) 将图像转化为 10 000 × 1 的列矢量,用于后续的特征提取。



图4 SNR = -6 dB 时 FMCW 信号截取的灰度图像

Fig. 4 Grayscale image of FMCW signal when SNR = -6 dB

1.3.2 图像特征提取

图像裁剪后,时频图像的冗余信息已经得到很大程度的消除,但是 10 000 × 1 的列矢量仍属于高维数据矢量,不适用于实际工程。因此,进一步通过主分量分析(principal component analysis, PCA)和奇异值分解相结合的方式对数据降维^[12],具体过程如下:

(1) 利用一系列训练信号,经过图像预处理后

构建训练矩阵 X , X 的维度为 $N \times P$ 。

(2) 对训练矩阵 X 进行奇异值分解,得 $X = UWV^H$, 则 $U = XVW^{-1}$, 其中 U 为 $N \times N$ 酉矩阵, V 为 $P \times P$ 酉矩阵, W 为非负奇异值构成的 $N \times P$ 矩阵。

(3) 构建投影矩阵 A , 选取特征矩阵 U 中低于阈值的特征值置 0, 阈值选取最大特征值的 0.001 倍, 建立一个非零特征值降序排列的投影矩阵 A 。

(4) 最后利用公式 $Y = A^H X$, 获得训练矩阵和测试信号的低维空间投影, 完成图像特征的提取。

2 仿真实验与结果分析

径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络, 由于有着结构简单、收敛性好、速度快等优点, 目前得到了广泛的使用^[13]。本文中, RBF 神经网络的输入为测试信号经过图像预处理、特征提取后的低维数据, 输出为本实验采用的 7 种常用的 LPI 雷达信号。

所有信号载频由 900 Hz 至 1 400 Hz 均匀分布, 采样频率为 10 kHz。BPSK 信号采用 13 位 Barker 码; FMCW 调制带宽为 250 Hz 和 500 Hz, 调制周期为 20 ms; Frank 信号、P1 信号、P2 信号, 设置脉冲压缩比为 64, 编码周期为 1; COSTAS 跳频信号, 跳频序列设为 $\{3, 2, 6, 4, 5, 1\} \times 200$ Hz, $\{2, 4, 8, 5, 10, 9, 7, 3, 6, 1\} \times 200$ Hz; 多时编码信号 PT1, 相位状态数设为 2, 步进段数为 4。从 2 dB 到 10 dB, 每隔 2 dB 生成 10 个各种参数的信号, 最终生成共 280 个训练信号。利用本文提出的 LPI 雷达信号分类识别算法, 对这 280 个训练信号进行处理, 利用提取的特征参数训练并保存网络。

文中进行了 2 组实验, 一组为固定信噪比情况

下,测试不同信号,研究不同信号测试的识别混淆问题;另一组为固定测试信号种类,改变信噪比,研究不同信噪比情况下信号的识别正确率。

第 1 组实验,在 0 dB 信噪比条件下,每种信号按以上信号参数产生 100 个测试信号,利用本文方法进行实验。实验结果如表 1 所示,当信号信噪比为 0 dB 情况下,识别效果良好,平均正确识别率在 99% 以上。

第 2 组实验,每种 LPI 雷达信号,信噪比从 -10 dB 到 10 dB 每隔 2 dB 产生 100 个测试信号,对测试信号进行分类识别实验。

图 5 为第 2 组实验的实验结果,在信噪比 $SNR > -2$ dB 时,对于本文采用的 7 种 LPI 雷达信号都能有效识别,平均正确识别率达到了 93% 以上,图像相似度较大的 Frank 多相码信号和 P1 多相码信号也可以有效区分;当 $SNR < -6$ dB 时,由于 PWVD 时频分析方法受交叉项影响严重,对于部分 LPI 雷达信号已经无法有效分析,正确识别率较低。

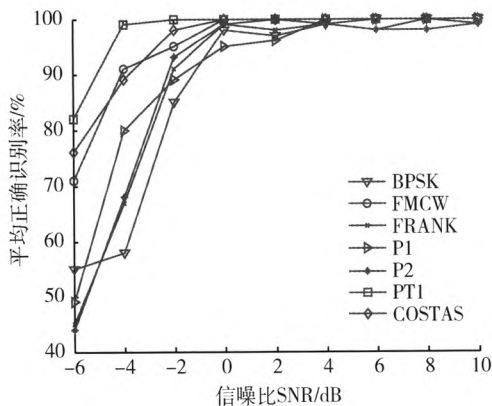


图 5 同一 LPI 信号不同信噪比情况下的识别率
Fig. 5 Average correct recognition rate of the same LPI radar signal in different SNR

本文对几种 LPI 雷达信号时频图像降噪方进行了对比。其中文献[1-2]采用二值化后腐蚀膨胀的算法降噪,文献[3]采用二维高斯低通滤波器降噪。实验过程中,3 种降噪算法采用相同的仿真条件,即使用本文采用的信号,时频分析方法和特征提取方法,所得实验结果的不同主要由降噪算法的不同所致。图 6 表示 3 种方法在这种实验条件下的平均正确识别率。

在信噪比低于 10 dB 的情况下,本文方法明显优于其他 2 种方法。文献[1-2]采用的二值化图像,利用图像腐蚀膨胀降噪,无法获取图像的一些细节信息,如图 2 中的 Frank 编码和 P1 编码的时频图像二值化后,为斜率近似的直线,难以辨识;另一方面二值化图像采用主分量分析法,无法获取最优主元,也是识别率较低的原因。文献[3]采用二维高斯低通滤波器,一方面频率矩阵值 ω_1, ω_2 设置凭经验设置,难以获得适应各种信噪比条件的最优值;另一方面,采用低通滤波器,在去除高频噪声的同时,也使图像丧失了相当一部分高频细节信息,降低信号辨识度。

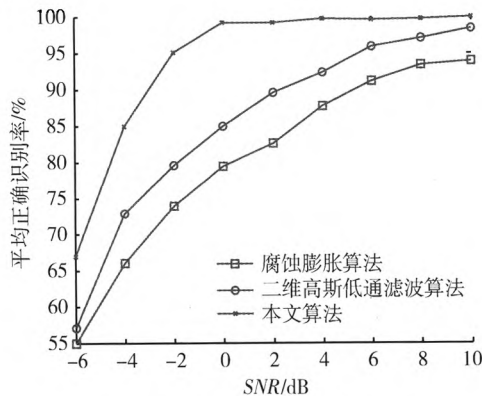


图 6 不同时频图像降噪方法对比
Fig. 6 Contrast of different time-frequency image de-noising methods

表 1 $SNR = 0$ dB 时 LPI 雷达信号识别结果

Table 1 Results of LPI radar signals classification when $SNR = 0$ dB

输入信号	BPSK	Frank	COSTAS	FMCW	P1	P2	PT1
BPSK	98	1			1		
Frank		99			4		
COSTAS			100				
FMCW				100			
P1					95		
P2						100	
PT1	2						100

3 结束语

本文针对 LPI 雷达信号时频图像受噪声干扰严重的问题,使用一种基于二维 EMD 快速分解的图像降噪方法,有效地降低噪声干扰,使不同 LPI 雷达信号的时频图像辨识度更佳。处理后的时频图像,经过图像裁剪、特征提取,利用神经网络完成了 LPI 雷达信号分类识别。在仿真条件相同的条件下,对比了几种 LPI 时频图像降噪的算法,证明本文方法能够更好地降低时频图像噪声,提高 LPI 雷达信号分类识别的正确率。但当信噪比低于 -4 dB 时,识别效果不佳,因为部分信号在较低信噪比下,PWVD 时频分析方法受交叉项影响严重,无法获得有效的时频图像,有必要进一步研究对交叉项的抑制。

参考文献:

- [1] 熊坤来,罗景青,吴世龙. 基于时频图像和神经网络的 LPI 雷达信号调制识别[J]. 火箭与制导学报, 2012, 31(5): 230-233.
XIONG Kun-lai, LUO Jing-qing, WU Shi-long. Modulation Identification of LPI Radar Signals Based on Time Frequency Image and Neural Network[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(5): 230-233.
- [2] 白航,赵拥军,胡德秀,等. 基于 Choi-Williams 时频图像特征的雷达辐射源识别[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(4): 480-485.
BAI Hang, ZHAO Yong-jun, HU De-xiu, et al. Radar Emitter Recognition Based on Image Feature of Choi-Williams Time-Frequency Distribution[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(4): 480-485.
- [3] ZILBERMAN E R. Autonomous Time-Frequency Cropping and Feature-Extraction Algorithms for Classification of LPI Radar Modulations [R]. Naval Postgraduate School Monterey CA, 2006.
- [4] 白航,赵拥军,胡德秀,等. 时频图像局部二值模式特征在雷达信号分类识别中的应用[J]. 宇航学报, 2013, 34(1): 139-146.
BAI Hang, ZHAO Yong-jun, HU De-xiu, et al. Radar Signal Recognition Based on the Local Binary Pattern Feature of Time-Frequency Image[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(1): 139-146.
- [5] 郝士琦,周建国,冷蛟峰,等. 基于时频图像代数特征的雷达信号脉内调制方式分类研究[J]. 电子对抗, 2012(4): 22-26.
HAO Shi-qi, ZHOU Jian-guo, LENG Jiao-feng, et al. Research on Classifications of Intra-Pulse Modulation Based on Algebra Characteristics of TFD Images [J]. Electronic Warfare, 2012(4): 22-26.
- [6] 冀贞海,朱伟强,赵力,等. 二维主分量分析的脉内调制识别算法研究[J]. 光电与控制, 2009, 16(11): 33-37.
JI Zhen-hai, ZHU Wei-qiang, ZHAO Li, et al. Intra-Pulse Modulation Recognition Method Based on Two-Dimensional Principal Component Analysis[J]. Electronics Optics and Control, 2009, 16(11): 33-37.
- [7] NUNES J C, BOUAOUNE Y, DELECHELLE E, et al. Image Analysis by Bidimensional Empirical Mode Decomposition [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(12): 1019-1026.
- [8] 戴桂平. 基于二维 EMD 和小波阈值的掌纹图像去噪[J]. 计量学报, 2011, 32(4): 368-372.
DAI Gui-ping. Palm Print Image De-noising Based on 2-D EMD and Wavelet Thresholding[J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(4): 368-372.
- [9] 赵春晖,任龙涛,万建. 一种基于二维 EMD 的图像融合方法[J]. 应用科技, 2009, 36(9): 15-19.
ZHAO Chun-hui, REN Long-tao, WAN Jian. A Method of Image Fusion Based on the Two-Dimensional Empirical Mode Decomposition[J]. Applied Science and Technology, 2009, 36(9): 15-19.
- [10] 郭珈,王孝通,徐晓刚,等. 基于均值滤波矩阵组的二维信号快速经验模式分解方法[J]. 电子学报, 2013, 40(10): 1980-1983.
GUO Jia, WANG Xiao-tong, XU Xiao-gang, et al. Fast 2D Empirical Mode Decomposition Based on Mean Value Matrix Filter Sets[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(10): 1980-1983.
- [11] 郭耸,顾国昌,李常有,等. 利用 EMD 的自适应图像去噪[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(8): 12-16.
GUO Song, GU Guo-chang, LI Chang-you, et al. Adaptive Image Denoising Based on EMD[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(8): 12-16.

(下转第 241 页)

- 业出版社,2006.
- ZHANG Yong-shun, TONG Ning-ning. The Principle of Radar Electronic Warfare [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [2] 王雪松. 现代雷达电子战系统建模与仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- WANG Xue-song. Modeling and Simulation of Modern Radar and Electronic Warfare System [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [3] 汪连栋,胡明明,高磊,等. 电子信息系统复杂电磁环境效应研究初探[J]. 航天电子对抗,2013,29(5):23-25.
- WANG Lian-dong, HU Ming-ming, GAO Lei, et al. Preliminary Research of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2013, 29(5):23-25.
- [4] 李田,彭世蕤,王广学. 机载 SAR 有源干扰分析与比较[J]. 雷达科学与技术, 2013,10(5):14-19.
- LI Tian, PENG Shi-rui, WANG Guang-xue. Comparative Analysis of Active Jamming to Airborne SAR [J]. Radar Science and Technology, 2013,10(5):14-19.
- [5] 杨作宾,龚锐,刘光明. 基于 BP 神经网络的火控雷达抗干扰效能评估[J]. 现代防御技术, 2010,38(1):9-12.
- YANG Zuo-bin, GONG Rui, LIU Guang-ming. Jamming Effectiveness Evaluation Based on BP Neural Network of Fire Control Radar [J]. Modern Defence Technology, 2010,38(1):9-12.
- [6] 潘超. 雷达抗干扰效能评估准则与方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2006.
- PAN Chao. Rules and Methods of Radar Anti-Jamming Effectiveness Evaluation [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.
- [7] 张伟. 火控雷达距离跟踪系统的干扰技术研究[D]. 太原:中北大学,2008.
- ZHANG Wei. Analysis of the Jamming Technology Against Range Tracking System in Fire Control Radar [D]. Taiyuan: Zhongbei University, 2008.
- [8] 林象平. 电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社,1982.
- LIN Xiang-ping. The Principle of Electronic Science [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.
- [9] 葛青林,王莹莹,李静. 一种产生雷达多假目标的卷积调制法[J]. 现代防御技术,2012,40(1):137-139.
- GE Qing-lin, WANG Ying-ying, LI Jing. A Kind of Convolution Modulation Method that Generate Radar Multi-False Target [J]. Modern Defence Technology, 2012,40(1):137-139.
- [10] 张延彬,高梅国,袁起. 距离波门拖引干扰中的关键参数设计[J]. 现代防御技术,2009,37(4):114-117.
- ZHANG Yan-bin, GAO Mei-guo, YUAN Qi. The Design of Critical Parameters by RGPO [J]. Modern Defence Technology, 2009,37(4):114-117.
- [11] 李田,彭世蕤,王广学. 机载 SAR 有源干扰分析与比较[J]. 雷达科学与技术,2013,10(5):14-19.
- LI Tian, PENG Shi-rui, WANG Guang-xue. Comparative Analysis of Active Jamming to Airborne SAR [J]. Radar Science and Technology, 2013,10(5):14-19.
- [12] BARTON D K, LEONOV S A. Radar Technology Encyclopedia [M]. Boston: Artech House, 1998.
- [13] 孙志强,葛哲学. 神经网络理论与 MATLAB 7 实现 [M]. 北京:电子工业出版社,2005:79-81.
- SUN Zhi-qiang, GE Zhe-xue. Neural Network Theory and the Realization of MATLAB7 [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005:79-81.

(上接第 177 页)

- [12] FARGUES M P. Investigation of Feature Dimension Reduction Schemes for Classification Applications [R]. Naval Postgraduate School Monterey CA Dept of Electrical and Computer Engineering, 2001.

作者：张帆, 刁鸣, 杨承志, ZHANG Fan, DIAO Ming, YANG Cheng-zhi
作者单位：张帆, 刁鸣, ZHANG Fan, DIAO Ming(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江哈尔滨, 150001), 杨承志, YANG Cheng-zhi(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江哈尔滨150001;空军航空大学信息对抗系, 吉林长春130022)
刊名：现代防御技术  
英文刊名：Modern Defense Technology
年, 卷(期)：2015, 43(5)

参考文献(13条)

1. 熊坤来, 罗景青, 吴世龙 基于时频图像和神经网络的LPI雷达信号调制识别[期刊论文]-导弹与制导学报 2011(05)
2. 白航, 赵拥军, 胡德秀, 徐永刚 基于Choi-Williams时频图像特征的雷达辐射源识别[期刊论文]-数据采集与处理 2012(04)
3. ZILBERMAN E R. Autonomous Time-Frequency Cropping and Feature-Extraction Algorithms for Classification of LPI Radar Modulations[R]. Naval Postgraduate School Monterey CA, 2006. 2006
4. 白航, 赵拥军, 胡德秀 时频图像局部二值模式特征在雷达信号分类识别中的应用[期刊论文]-宇航学报 2013(01)
5. 郝士琦, 周建国, 冷蛟锋, 等. 基于时频图像代数特征的雷达信号脉内调制方式分类研究[J]. 电子对抗, 2012(4):22-26. HAO Shi-qi, ZHOU Jian-guo, LENG Jiao-feng, et al. Research on Classifications of Intra-Pulse Modulation Based on Algebra Characteristics of TFD Images[J]. Electronic Warfare, 2012 (4):22-26. 2012
6. 冀贞海, 朱伟强, 赵力, 邹采荣 二维主分量分析的脉内调制识别算法研究[期刊论文]-电光与控制 2009(11)
7. NUNES J C, BOUAOUNE Y, DELECHELLE E, et al. Image Analysis by Bidimensional Empirical Mode Decomposition[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(12):1019-1026. 2003
8. 戴桂平 基于二维EMD和小波阈值的掌纹图像去噪[期刊论文]-计量学报 2011(04)
9. 赵春晖, 任龙涛, 万建 一种基于二维EMD的图像融合方法[期刊论文]-应用科技 2009(09)
10. 郭珈, 王孝通, 徐晓刚, 张成堡 基于均值滤波矩阵组的二维信号快速经验模式分解方法[期刊论文]-电子学报 2012(10)
11. 郭耸, 顾国昌, 李常有, 栾方军, 宋晓宇 利用EMD的自适应图像去噪[期刊论文]-计算机工程与应用 2013(08)
12. FARGUES M P. Investigation of Feature Dimension Reduction Schemes for Classification Applications[R]. Naval Postgraduate School Monterey CA Dept of Electrical and Computer Engineering, 2001. 2001
13. 孙志强, 葛哲学. 神经网络理论与MATLAB 7实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2005:79-81. SUN Zhi-qiang, GE Zhe-xue. Neural Network Theory and the Realization of MATLAB7[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2005:79-81. 2005

引用本文格式：张帆, 刁鸣, 杨承志. ZHANG Fan, DIAO Ming, YANG Cheng-zhi 时频图像二维EMD分解在LPI信号识别中的应用[期刊论文]-现代防御技术 2015(5)