

基于 Zernike 矩和双谱特征的新型干扰识别算法

杨兴宇, 阮怀林

(国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230037)

摘要 为了有效应对频谱弥散干扰(SMSP)和切片组合干扰(C&I),提出了一种利用 Zernike 矩和双谱分析的干扰识别方法。首先对雷达接收信号进行双谱分析,经过降维和归一化处理,将三维双谱信息转化为二维特征信息,然后将得到的二维特征谱变为灰度图,运用数字图像处理技术对灰度图进行一系列的预处理后,利用 Zernike 矩特征提取图像的形状特征进行识别。仿真实验证明该方法具有较好的识别率,特别是受信噪比影响较少,且在低信噪比下识别率仍能达到 90%。通过与文献[4~6]比较表明,该算法识别效果最好,进一步说明了采用该算法在雷达干扰信号识别领域中的可行性。

关键词 新型干扰;干扰识别;双谱分析;Zernike 矩特征;特征提取

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.02.010

中图分类号 TN974 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)02-0056-06

Jamming Identification Algorithms of Advanced Jamming Based on Bispectrum Feature and Zernike Moment

YANG Xingyu, RUAN Huailin

(College of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: A novel jamming identification method based on bi-spectrum and Zernike moment feature is proposed to effectively deal with two new kinds of jamming of smeared spectrum (SMSP) and chopping and interleaving (C&I). In this method, the bi-spectrum analysis of received radar signal under three cases is given firstly through a series of dimensionality reduction and normalization, and a three-dimensional feature information is turned into two-dimensional feature information. Then the two-dimensional feature spectrum is transformed into a gray image through a series of image processing, and Zernike moment feature is utilized for extracting image shape feature to constitute feature vector for signal recognition. The result shows that the proposed approach can achieve satisfying recognition. Particularly the method is less affected by SNR and the recognition rate can still reach 90% under low signal to noise ratio. In comparison with paper[4~6], this algorithm is the best in the recognition results, and this algorithm is also good in recognition rate under low signal-to-noise ratio. The method is feasible in the field of radar jamming signal recognition.

Key words: advanced jamming; jamming identification; bispectrum analysis; Zernike moment feature; feature extraction

收稿日期: 2017-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(61571446)

作者简介: 杨兴宇(1993—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士生,主要从事雷达对抗技术研究。E-mail:1067512407@qq.com

引用格式: 杨兴宇,阮怀林. 基于 Zernike 矩和双谱特征的新型干扰识别算法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(2): 56-61.
YANG Xingyu, RUAN Huailin. Jamming Identification Algorithms of Advanced Jamming based on Bispectrum Feature and Zernike Moment [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(2): 56-61.

现代电子干扰技术的不断发展使雷达面临的压力越来越大。其中基于数字射频存储器(DRFM)的干扰机产生的频谱弥散(Smeared Spectrum, SMSP)和切片组合(Chopping and Interleaving, C&I)在2006年由 Sparrow 和 Cikaló^[1]等人提出。作为针对线性调频信号脉冲压缩雷达而产生的距离假目标欺骗式干扰,这两种干扰均通过干扰机对雷达发射信号进行调制和转发,在雷达接收端形成密集假目标,导致雷达无法有效地检测出真实目标。近几年来,针对 SMSP 和 C&I 干扰的识别算法的研究已经成为国内外雷达对抗领域的热点。文献[2]针对组网雷达系统的 SMSP 干扰与目标真实回波有不同调频斜率的特点,提出了一种基于分数阶功率谱的识别方法。文献[3]同样根据 SMSP 在时间域解析形式上与目标回波的频率调节特性的差异,采用匹配信号变换求取信号的调制斜率的方法对 SMSP 干扰进行识别。文献[4]提出了一种基于时域的盒维数和频域指数熵的 SMSP 和 C&I 干扰识别算法。识别率受干扰分数段数量的影响较大,该方法有一定的局限性。文献[5]通过分析 SMSP 和 C&I 干扰的产生原理,将 2 种干扰与雷达发射信号的模糊函数进行比较,提取峰值数与峰值之间的间距进行识别。但该方法在计算模糊函数过程中运算量偏大并且识别效果不是很理想。文献[6]提出了一种基于双谱分析和分形维数的 SMSP 和 C&I 干扰识别算法。盒维数作为该算法所提取的其中一个特征对于 2 种干扰下的雷达接收信号区分度不大,会影响识别效果。针对以上问题,本文从双谱分析角度出发,提出了一种利用 Zernike 矩和双谱分析的干扰识别方法。

1 SMSP 和 C&I 干扰模型

假设雷达的发射信号为线性调频信号。信号可以表示为:

$$S(t) = \exp(j\pi kt^2) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (1)$$

式中: $k=B/T$,其中 k 为调频斜率, B 为信号带宽, T 为脉宽。假设与雷达相距 R_0 的位置存在一个目标,则此时雷达接收端得到的目标回波为:

$$S_0(t) = K_T \exp[j\pi k(t-t_r)^2] \quad (2)$$

式中: $t_r=2R_0/c$, c 为光速,即 $c=3 \times 10^8$ m/s; K_T 为目标信号幅度。

作为针对 LFM 调频脉压雷达的新型干扰。根据产生过程,时钟频率变为原频率的 n 倍,重复 n 次操作后,SMSP 干扰信号由 n 个子脉冲组成。每一个子脉冲信号均能够表示为:

$$J^{(i)}(t) = A_J \exp\left[j\pi nk \left(t - i \frac{T}{n}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中: $i \frac{T}{n} \leq t \leq (i+1) \frac{T}{n}$; A_J 为干扰信号幅度。

SMSP 干扰可以表示为:

$$J_{\text{SMSP}}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} J^{(i)}(t) \quad (4)$$

C&I 干扰产生的过程如下:

此过程分为 Chopping 和 Interleaving 2 个阶段^[7]。在 Chopping 阶段,每一个雷达信号子脉冲串可以表示为:

$$P(t) = S_T(t)a(t) = S_T(t) \cdot \sum_{i=0}^{m-1} \left(u\left(t + \frac{T}{2} - i \frac{T}{m}\right) - u\left(t + \frac{T}{2} - \frac{T}{mn} - i \frac{T}{m}\right) \right) \quad (5)$$

式中: m 为矩形脉冲串个数; n 为每一个脉冲串拥有的时隙数; $a(t)$ 为矩形脉冲。则整个信号被分成 mn 个时隙,每个矩形脉冲的脉宽为 $\tau_a = T/mn$ 。

接下来在 Interleaving 阶段:

$$J_{\text{C&I}}(t) = \sum_{k=0}^{n-1} p\left(t - \frac{kT}{mn}\right) \quad (6)$$

可以看出 2 种干扰均是雷达发射信号的线性变换,经过匹配滤波器处理后都会产生大量虚假目标,严重影响雷达检测效率。

2 雷达接收信号的双谱分析

由于 DRFM 可以产生高保真的相干干扰,所以根据雷达是否受到 SMSP 和 C&I 干扰以及具体的某一干扰,雷达接收信号存在以下 3 种情况。

$$\begin{cases} S_1: S_T(t) = S_0 + n(t) \\ S_2: S_T(t) = S_0(t) + J_{\text{SMSP}}(t) + n(t) \\ S_3: S_T(t) = S_0(t) + J_{\text{C&I}}(t) + n(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $n(t)$ 代表高斯白噪声。这 3 种情况在时域、频域上均存在微小差异。传统的时域和频域分析方法只能获取信号在时域或频域的全局特性,获得的信息并不完整,高阶谱方法能够抑制高斯噪声干扰,同时能够保留信号的幅度和相位信息,在通信辐射源识别、雷达信号检测等多个领域有着广泛使用,尤其以双谱应用最为广泛。

2.1 双谱分析原理

对于雷达接收信号,双谱分析不仅能够抑制接收信号的高斯噪声干扰,而且可以很好地描述和检测接收信号的非线性特征。虽然欺骗式干扰不是平稳随机过程,但是对于拖引期的某一脉冲信号来说是平稳随机过程。考虑到这一特点,本文针对拖引期某一脉冲信号 $\{x(i)\}$ 进行分析研究,

实际应用中,参量模型法和非参量法是 2 种双

谱估计的方法。本文采用非参量法中的直接法进行双谱估计^[8]。

图1为在信噪比 $SNR=5$ dB下的3种情况的雷达接收信号的双谱分析结果,图中存在明显的差异,可以通过双谱估计提取特征。

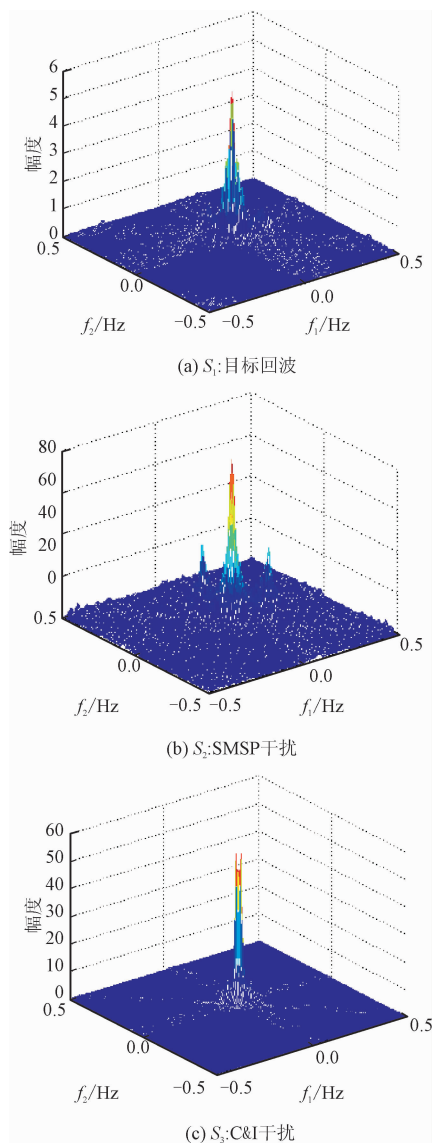


图1 雷达接收信号的双谱分析结果($SNR=5$ dB)

Fig. 1 The result of bispectral analysis of radar received signal ($SNR=5$ dB)

2.2 二维特征谱曲线的生成

如果利用图1结果直接作为特征进行干扰识别,特征维数的因素会导致计算量偏大,而且会增加识别的时间。因此,为了减少计算量和识别时间,更进一步地突出3种情况下双谱的特征差异,需要将得到的雷达接收信号双谱分析结果进行降维。本文将得到的三维双谱沿 Y 轴垂直投影到 XOZ 平面^[6]:

$$R_x = \max[\hat{B}_{YOZ}(\omega_1, \omega_2)] \quad (8)$$

由于3种情况下雷达接收信号双谱分析的幅度不同,因此进行归一化处理。图2分别为3种情况

下雷达接收信号的二维特征谱图。

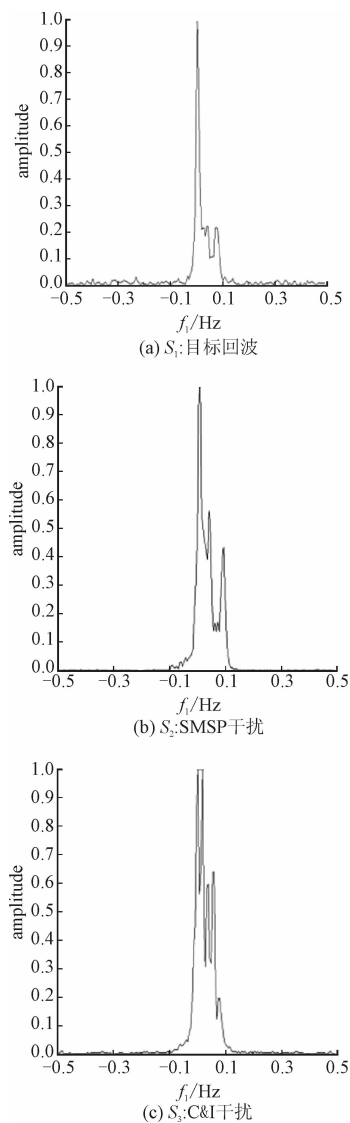


图2 雷达接收信号的二维特征谱图($SNR=5$ dB)

Fig. 2 Two dimensional characteristic spectrum of radar received signal ($SNR=5$ dB)

对图2进行观察可以发现,3种情况下的雷达接收信号均有自己独特的二维特征谱图并且差异比较大,可以直接判断出干扰的类型。但是为了实现自动分类识别,需要进一步提取特征参数作为特征向量进行识别。

3 基于二维特征谱的识别算法

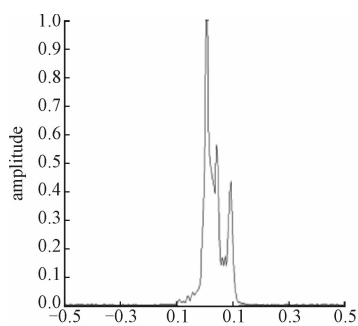
本文从图像特征提取的角度出发,将二维特征谱转化为灰度图,由于图像中大量的冗余信息以及维数问题严重影响运算时间和效率,因此运用数字图像处理的技术对灰度图进行预处理,从而达到降维的目的。然后对得到的图像进行特征提取。Zernike矩是一种连续正交矩,可以描述图像形状的全局特

征,提供丰富的图像几何特性的信息,是目前对图像非常有效的形状分析特征,具有很小的信息冗余、受噪声影响小、鲁棒性好等特性。本文通过提取图像的 Zernike 矩特征实现欺骗式干扰信号的分类识别。

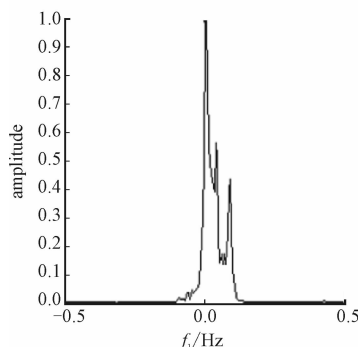
3.1 图像预处理

首先将二维特征谱图转化为灰度图像,为了减少后期的识别运算,将灰度图转化为二值图,见图 3。二值化作为基于区域的使用率最高的图像分割技术,其基本原理可以表示为:

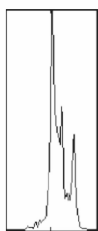
$$B(t, \omega) = \begin{cases} 1, & P(t, \omega) \geq \text{Thr} \\ 0, & P(t, \omega) < \text{Thr} \end{cases} \quad (9)$$



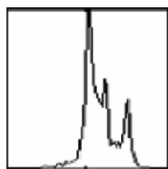
(a) 二维特征谱



(b) 二值化处理后的图像



(c) 剪切处理后的图像



(d) 缩小后的图像

图 3 图像预处理结果

Fig. 3 Image preprocessing results

设定特征阈值为 Thr,把图像像素点 $B(t, \omega)$ 分为 0 和 1。取 0 为黑,1 为白,将灰度值高于阈值 Thr 的点记为白点,即为“1”,灰度值低于 Thr 的点记为黑点,即为“0”,本文中采用一维最大熵法^[9]选取阈值。为了对数据进行降维,对图像自动剪切^[10]的办法加以修改和应用,即通过比较图像矩阵的列元素总和,搜索图像中包含有用信息的图像列,将第

1 列和最后 1 列记作 j_{\min} 和 j_{\max} ,则 $\mathbf{A}(i, j_{\min} : j_{\max})$ 即为剪裁后的结果。其中 \mathbf{A} 为图像矩阵, i 和 j 分别表示图像矩阵的行和列。图像的自动剪裁保持了图像中有效信息,同时达到数据降维的效果。最后采用双线性插值^[11]对图像进行缩小,对数据进一步降维,大幅度减少运算时间和运算量。

3.2 基于 Zernike 矩的特征提取

本文主要针对二维特征谱图的形状特征进行研究,矩函数不仅可以表达图像形状的全局特征,还能提供丰富的图像几何特性信息,在模式识别中应用十分广泛。The C H 和 CHIN R T^[12]发现 Zernike 矩在图像矩中有最好的综合性能,对于一个函数 $f(x, y)$,其 Zernike 矩定义为:

$$\mathbf{Z}_{mn} = \frac{n+1}{\pi} \iint V_{mn}^*(x, y) f(x, y) dx dy \quad (10)$$

式中: * 表示取共轭; n 为大于等于零的整数; m 为整数,且满足 $|m| \leq n$; $V_{mn}(x, y)$ 表示为:

$$\begin{aligned} V_{mn}(x, y) &= V_{mn}(r, \theta) = R_{mn}(r) e^{jm\theta} \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta &= \arctan \frac{y}{x} \end{aligned} \quad (11)$$

式中:实半径多项式 $R_{mn}(r)$ 表示为^[13]:

$$R_{mn}(r) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{(n+|m|)}{2} - s\right)! \left(\frac{(n-|m|)}{2} - s\right)!} r^{n-2s} \quad (12)$$

对于一副数字图像,使用求和来替代积分,表示为:

$$\mathbf{Z}_{mn} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y V_{mn}^*(x, y) I(x, y), x^2 + y^2 \leq 1 \quad (13)$$

式中: $I(x, y)$ 表示当前像素。为了减少 Zernike 矩的动态范围,对 \mathbf{Z}_{mn} 进行处理,取 $\hat{\mathbf{Z}}_{mn} = \ln |\mathbf{Z}_{mn}|$ ^[14]。

Zernike 矩具有很强地描述图像形状的能力,其中低阶矩侧重于表示一个图像的整体形状,而高阶矩侧重于表示图像的细节信息。观察图 3 后可以发现 3 种情况下的雷达接收信号的双谱二维特征谱的整体形状存在差异,并不是特别明显。本文考虑以提取低阶矩特征为主,以提取高阶矩特征为辅的方式提取特征向量。由于所有图像的 \mathbf{Z}_{00} , \mathbf{Z}_{11} 都相同^[15],所以这 2 个低阶矩不能区分不同图像的特征,不作考虑。经过反复实验和综合考虑,本文采用低阶矩 \mathbf{Z}_{10} , \mathbf{Z}_{20} , \mathbf{Z}_{21} , \mathbf{Z}_{31} , \mathbf{Z}_{32} 和高阶矩 \mathbf{Z}_{53} 组成特征向量输入到分类器中进行识别。由于支持向量机结构简单,同时对于高维模式识别和小样本的分类具有很大优势^[15],本文选用支持向量机,具体的识别算法流程见图 4。

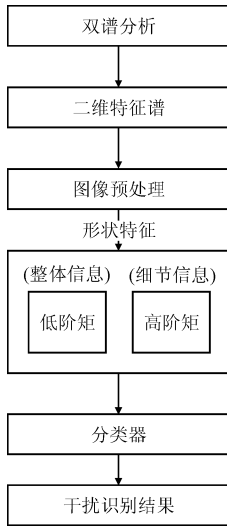


图4 基于 Zernike 矩特征的识别算法流程

Fig. 4 Process of recognition algorithm based on Zernike moment feature

4 仿真实验及结果分析

实验中采用 SMSP 和 C&I 干扰下和未受干扰的雷达接收信号,设置仿真参数如下:雷达发射波形为线性调频信号,信号带宽 $B=10$ MHz,脉宽 $T=20$ μ s,采样频率 100 MHz;SMSP 干扰参数设置中, $n=4$,即干扰由 4 个子脉冲组成,每个子脉冲的脉宽均为 5 μ s。C&I 干扰参数设置中,矩形脉冲串个数 $m=5$,每一个脉冲串所拥有的时隙数 $n=4$ 。接收信号的干信比 $JSR=5$ dB,信噪比从 0 dB 到 15 dB 递增,信噪比每隔 1 dB 产生 2 种干扰信号下和无干扰下的接收信号各 200 个,这样总的数据集就是 600 个,其中选取 210 个作为训练集,390 个作为测试集,每个信号按照图 4 方法依次进行处理。双谱参数设置如下:FFT 的计算长度为 192 个采样点,每段数据的重叠度为 50。Rao-Gabr 窗口长度为 2 个采样点。由于提取的特征向量往往存在交叠而线性不可分,所以要采用非线性分类,分类器选用 v-SVC。为了避免非线性分类问题转化为线性分类问题时出现维数爆炸的问题,采用核函数进行求解。本文采用径向基函数(RBF)作为核函数。图 5 为采用 Zernike 矩特征提取算法正确识别率的统计图像。

从图中可以看出,在低信噪比的条件下,这 2 种干扰的识别性能良好,且随着信噪比的提高,性能得到大幅提升,在 $SNR=2$ dB 时,3 种情况下的信号识别率均高于 90%,在 $SNR=5$ dB 时,3 种情况下的信号识别率均接近 100%,该算法对于 2 种干扰识别的效果都比较好。表 1 为信噪比 $SNR=3$ dB 时采用 Zernike 矩特征的识别结果。

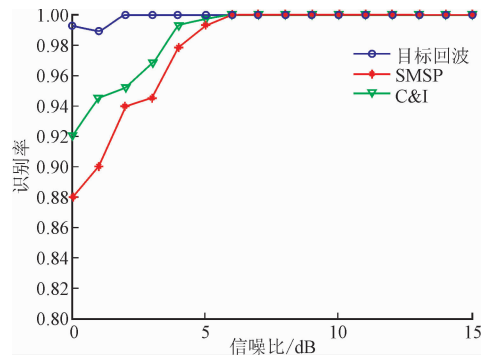


图5 基于 Zernike 矩特征提取算法的正确识别率

Fig. 5 Correct recognition rate based on Zernike moment feature extraction algorithm

表 1 信噪比 $SNR=3$ dB 时采用 Zernike 矩特征的识别结果Tab. 1 Recognition results using Zernike moment features when $SNR=3$ dB

信号类型	目标回波	SMSP	C&I	%
目标回波	100	0	0	
SMSP	5.38	94.62	0	
C&I	2.31	0.77	96.92	

从表中可以发现该方法能够很好地将 SMSP 和 C&I 区分开,但由于目标回波和 SMSP 干扰的双谱二维特征谱有一定的相似性,可能会导致误检。将本文算法效果分别与文献[4~6]的算法效果作比较,图 6 为 4 种算法的平均识别率曲线。

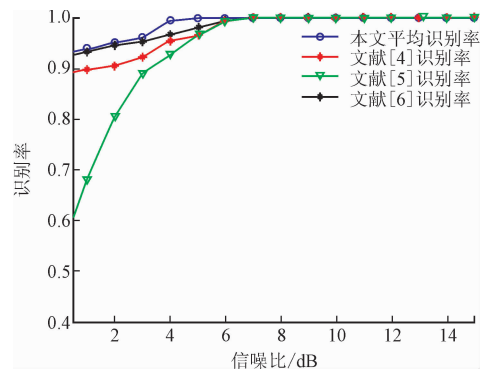


图6 4种算法的平均识别率曲线

Fig. 6 Average recognition rate curve of 4 algorithms

从图 6 中可以发现,4 种算法的识别率随着信噪比的增加而增加,在 $SNR=6$ dB 时,4 种算法的平均识别率均接近 100%。本文算法的识别率受信噪比的影响最小,并且在识别效果上表现最好,特别是在低信噪比条件下,识别率较另外 3 种算法有提高,文献[6]的识别效果要略好于文献[4],文献[5]受噪声影响最大,在低信噪比的条件下识别效果最差。实验证明了采用该别方法对这 2 种新型干扰信号进行分类识别的优越性。

5 结语

本文从双谱分析角度出发,经过降维和归一化处理后,将得到的二维特征谱变为灰度图,结合数字图像处理技术和伪 Zernike 矩特征进行图像预处理和图像特征提取的操作,最后通过分类器进行干扰的识别。通过仿真证明了该方法的可行性。通过与其他方法进行比较后发现,该方法的识别效果明显更优,特别是在低信噪比下仍具有很好的识别率、稳定性和优越性。

参考文献(References):

- [1] SPARROW M J, CAKILO J. ECM Techniques to Counter Pulse Compression Radar. 708184 6. [P]. 2006-07-25.
- [2] ZHAO Y, DU D P, AHMED A A, et al. Detection of SMSP Jamming Signal in Netted Radar System Based on Fractional Power Spectrum [C]//17th IEEE International Conference on Computational Science & Engineering. Chengdu, China: IEEE Computer Society, 2014: 989-993.
- [3] LI Y P, XIONG Y, TANG B. SMSP Jamming Identification Based on Matched Signal Transform [C]//ICCP. USA: IEEE Computer Society, 2011: 182-185.
- [4] 杨少奇,田波. 频谱弥散和切片组合欺骗式干扰的识别算法 [J]. 探测与控制学报, 2016, 38(6): 62-67.
YANG S Q, TIAN B. Identification Algorithms of SMSP and C&I [J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(6): 62-67. (in Chinese)
- [5] 李永平,卢刚,田晓,等. 基于模糊函数的 SMSP 和 C&I 干扰识别算法 [J]. 航空兵器, 2011, 4: 51-54.
LI Y P, LU G, TIAN X, et al. Jamming Identification Algorithms of SMSP and C&I Based on Ambiguity. [J]. Aero Weaponry, 2011, 4: 51-54. (in Chinese)
- [6] 杨少奇,田波,周瑞钊. 应用双谱分析和分形维数的雷达欺骗干扰识别 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 128-135.
YANG S Q, TIAN B, ZHOU R Z. A Jamming Identification Method Against Radar Deception Based on Bispectrum Analysis and Fractal Dimension [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 128-135. (in Chinese)
- [7] 李永平. SMSP 和 C&I 距离假目标欺骗干扰识别和抑制方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
LI Y P. SMSP and C&I Range False Target Deception Jamming Identification and Suppression Methods [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 278-280.
ZHANG X D. Modern Signal Processing [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 278-280. (in Chinese)
- [9] SHANBHAG A G. Utilization of Information Measure as a Means of Image Thresholding [J]. CVGIP-GMIP(S1077-3169), 1994, 56(6): 414-419.
- [10] 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]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(5): 230-233.
XIONG K L, LUO J Q, WU S L. 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. (in Chinese)
- [11] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital Image Processing [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall INC, 2002.
- [12] 王占领,张登福,王世强. 雷达辐射源信号的伪 Zernike 矩双谱二次特征提取 [J]. 现代雷达, 2013, 35(11): 39-43.
WANG Z L, ZHANG D F, WANG S Q. Radar Emitter Signal Bispectrum Cascade Extraction Based on Pseudo-Zernike Moment [J]. Modern Radar, 2013, 35(11): 39-43. (in Chinese)
- [13] THE C H, CHIN R T. On Image Analysis by The Methods of Moment [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(4): 496-513.
- [14] 王润民,钱盛友,宋平等. 基于小波包和 Zernike 矩特征提取的车牌字符识别 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(14): 210-212.
WANG R M, QIAN S Y, SONG P, et al. Vehicle License Plate Characters Recognition Using Wavelet Packet and Zernike Moments [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(14): 210-212. (in Chinese)
- [15] 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]. 数据采集及处理, 2012, 27(4): 480-485.
BAI H, ZHAO Y J, HU D X, et al. Radar Emitter Recognition Based on Image Feature of Choi-Williams Time-Frequency Distribution [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2012, 27(4): 480-485. (in Chinese)
- [16] SHI D, GAO Y G. A Method of Identifying Electromagnetic Radiation Sources by Using Support Vector Machines [J]. China Communications, 2013, 7(7): 36-43.