

导数约束平滑条件下基于模糊函数特征的 雷达辐射源信号识别方法

许程成,周青松,张剑云,谌诗娃

(国防科技大学电子对抗学院,安徽合肥 230037)

摘 要: 针对低信噪比条件下,雷达辐射源信号识别效果差的问题,提出了一种导数约束平滑条件下提取信号模糊函数特征的辐射源信号识别方法.建立了基于取整函数和坐标转换的模糊函数最大能量角提取的数学模型,降低处理复杂度;提出了不依赖于信号及噪声具体模型的基于导数约束平滑的最大能量切片波形信息提取算法,转化为二阶锥规划(Second-order Cone Programming, SOCP)问题求解,较大程度地降低了噪声对模糊函数波形特征的影响;依据有效性指标,确定了本文算法中目标函数正则化系数与对称 Holder 系数的范数因子取值,最后通过模糊 c-means 方法实现对辐射源信号特征向量的聚类识别.仿真结果表明,在低信噪比条件下本文方法具有更高的识别正确率.

关键词: 雷达信号识别;模糊函数;导数约束;二阶锥规划;对称 Holder 系数

中图分类号: TN971 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)07-1663-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.018

Radar Emitter Recognition Based on Ambiguity Function Features with Derivative Constraint on Smoothing

XU Cheng-cheng, ZHOU Qing-song, ZHANG Jian-yun, CHEN Shi-wa

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

Abstract: To improve the performance of radar emitter recognition under low signal-to-noise ratio, a method that extracts features from ambiguity function with derivative constraint on smoothing is proposed. A mathematical model to obtain the max energy angle based on rounding function and coordinate transformation is set, greatly reducing processing complexity. An algorithm picking the waveform of max energy slice is also presented referring to derivative constraint on smoothing. It depends on none specific signal and noise models. The algorithm is transferred into Second-order Cone Programming (SOCP) for solving and it weakens the influence caused by noise upon ambiguity function waveform features to a great extent. According to the validity index, values of the regularization parameter in objective function and the norm parameter in symmetrical Holder coefficient are determined. Finally, fuzzy c-means clustering is implemented for classification and recognition of feature vectors extracted from emitter signals. Simulation results indicate that the method presented in the paper gains higher correct recognition rate.

Key words: radar signal recognition; ambiguity function; derivative constraint; second order cone programming (SOCP); symmetrical Holder coefficient

1 引言

战场电磁环境日益复杂,信号样式多,频谱分布广,宽带信号侦察中研究低信噪比下雷达辐射源信号识别方法具有重要的现实意义.而传统的脉冲描述字特征已无法满足战场识别要求,获取能够反映辐射源信号本质信

息的脉内特征^[1-14]已成为雷达信号识别的研究热点.

对雷达辐射信号脉内特征的研究主要聚焦于频谱特征提取,高阶统计量特征提取,小波特征提取,模糊函数特征提取等几个方面.其中频谱特征提取^[3-5]仅反映了信号频域能量特性,难以对多种类调制信号同时进行准确识别;高阶统计量特征^[6-8]方法,盲源分离^[6]可

以对不同辐射源信号进行分离,但分离后无法自动识别调制信息,双谱特征^[8]对不同辐射源的不同相位噪声特性进行提取,可以识别相同调制的不同辐射源个体,但对于不同调制的辐射源识别效果差;小波特征^[9-11]运用小波变换后的熵特征进行识别,处理复杂,需要较高的信噪比;模糊函数特征^[12-14]提取由于包含了信号的时频信息,其波形能够完全反映信号的样式,不同样式信号的波形差异较大,提取模糊图中的关键特征针对多种调制信号具有更好的识别效果.文献[14]提出模糊函数主脊切面特征提取方法,其模糊函数生成与搜索方法增加了处理复杂性,选取特征难以应对低信噪比环境.文献[12]使用奇异值分解(SVD)进行降噪,并计算对称 Holder 系数作为辐射源信号特征,但是 SVD 降噪效果在噪声功率与信号功率接近时较差,低信噪比时对于切片波形特征降噪效果不佳.

为解决现有方法在低信噪比条件下的欠缺,本文从信号的模糊函数中提取更有效的特征进行辐射源识别.本文基于高斯取整函数进行坐标转换,搜索最大能量角并提取切片,降低了处理复杂度;采用一种不依赖于具体模型的非线性滤波方式,利用导数约束条件对切片波形进行平滑去噪,提取波形特征.该方法较大程度去除了噪声的影响,在低信噪比条件下有更好的识别正确率.

2 模糊函数最大能量角提取

2.1 模糊函数离散化数学模型

雷达窄带复信号表达式为:

$$s(t) = g(t) e^{j(2\pi f_0 t + \varphi_0)} \quad (1)$$

其中, f_0 代表载频, φ_0 代表初始相位.

雷达信号模糊函数表达式为:

$$\chi(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t + \frac{\tau}{2}) s^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi\xi t} dt \quad (2)$$

其中, ξ 为频移, τ 为时延.

在离散条件下,模糊函数表达式为:

$$\chi_s(2\tau_n, \xi_n) = \sum_n [s(n + \tau_n) \cdot s^*(n - \tau_n) e^{-j2\pi\xi_n n}] \quad (3)$$

对一个脉冲进行采样得到离散的信号 $\mathbf{S} = [s(1), s(2), \dots, s(N)]^T$. 时延为 $\tau_n = n_\tau \tau_0 / N$, 频移为 $\xi_n = n_\xi / \tau_0$, 其中 $n_\tau, n_\xi \in \mathbf{Z}$, τ_0 为脉宽. 使用信号自相关和快速傅里叶变换得到离散条件下模糊函数:

$$X_s(2n_\tau, n_\xi) = \text{FFT}[R(2n_\tau)] \quad (4)$$

2.2 坐标转换法提取最大能量角

雷达信号的调制信息完全保留在模糊函数图中,提取其中关键信息用于雷达信号识别.

最大能量角是过模糊图中心峰值点的能量分布最

集中的角度. 包含了模糊函数的关键信息,搜索该切片的角度,将式(4)表示为极坐标形式:

$$X_s(2n_\tau, n_\xi) = X_s(2\rho \cos\alpha, \rho \sin\alpha) \quad (5)$$

由于采样频率固定,使用高斯取整函数搜索最大能量角. 由模糊函数的对称性,选择角度搜索范围为 $|\alpha| \leq \pi/2$, 选取搜索精度 di , 则共搜索角度 $N_d = \pi/di$ 个, 为保证计算总能量时切片采样点长度一致,每个方向上,取 $\rho \in \mathbf{Z}, \rho \in [0, \max(n_\tau)]$, ρ 确定后,对每一组 ρ, α , 做极坐标与直角坐标转化:

$$x_n = \text{sgn}(\rho \cos\alpha) \cdot [\lfloor \rho \cos\alpha \rfloor] \quad (6)$$

$$y_n = \text{sgn}(\rho \sin\alpha) \cdot [\lfloor \rho \sin\alpha \rfloor]$$

其中, $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 高斯取整. 得到极坐标下的模糊函数值

$$C_s(\rho, \alpha) = X_s(2\rho \cos\alpha, \rho \sin\alpha) = X_s(2x_n, y_n) \quad (7)$$

则最大能量角为

$$\hat{\alpha} = \arg_{\alpha} \max_{\rho} \sum_{\rho} |C_s(\rho, \alpha)| \quad (8)$$

得到模糊函数最大能量角 $\hat{\alpha}$, 作为一个特征用于识别.

最大能量角方向上的模糊函数切片为:

$$\mathbf{G} = [G(0), G(1), \dots, G(M-1)]^T \quad (9)$$

$$M = \max(n_\tau) + 1$$

其中:

$$G(n) = |C_s(n, \hat{\alpha})|, n = 0, 1, 2, \dots, \max(n_\tau) \quad (10)$$

该切片包含了主要峰值和能量,其波形包含有重要的信号样式信息.

3 最大能量切片特征提取

最大能量切片波形受噪声扰动较大. 本文首先使用导数约束条件去除波形受噪声造成的扰动,然后将平滑后的波形与参考波形计算对称 Holder 系数,获取特征.

3.1 基于导数约束条件的波形提取

由于信号样式未知,无法获取模糊图波形先验信息,因此无法使用线性滤波去噪. 而采用基于功率的非线性滤波方法,在信噪比低时去噪效果很差. 本文方法基于:无噪声影响时,信号的模糊图最大能量切片波形是连续的,相邻值不会产生大幅跳变;低信噪比下除原点主峰增高外,模糊图叠加了小值的、快速变化的噪声. 因此,通过对最大能量切片波形的一阶导数进行约束,保证波形整体平滑,保留关键的波形信息.

建立数学模型,从含有噪声的波形 $\mathbf{G}_{cor} = \mathbf{G} + \mathbf{v}$ 中,构建出对 \mathbf{G} 的估计 $\hat{\mathbf{G}}$. 采用二次光滑函数来约束一阶导数,其值越小,越平滑:

$$\phi_{quad}(\mathbf{x}) = \sum_i [\mathbf{x}(i+1) - \mathbf{x}(i)]^2 = \|\mathbf{D}\mathbf{x}\|_2^2 \quad (11)$$

其中, $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{(n-1) \times n}$ 是双对角矩阵

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

则根据最小二乘与导数约束原则,建立优化问题,极小化

$$\|\hat{G} - G_{cor}\|_2 + \lambda \|D\hat{G}\|_2 \quad (13)$$

其中, λ 为 $\|\hat{G} - G_{cor}\|_2$ 和 $\|D\hat{G}\|_2$ 之间的优化权衡系数.

该优化问题是一个二阶锥规划问题,设

$$\begin{aligned} a_1 &= [\mathbf{0}_{1 \times M} \quad 0 \quad 1] \\ a_2 &= [\mathbf{0}_{1 \times M} \quad 1 \quad 0] \\ a_3 &= [\mathbf{0}_{1 \times M} \quad 1 \quad 1] \\ a_4 &= [I_{M \times M} \quad \mathbf{0}_{M \times 1} \quad \mathbf{0}_{M \times 1}] \end{aligned} \quad (14)$$

令优化变量为 $y = [\hat{G}, t_1, t_2]^T$, 则 $y \in \mathbf{R}^{M+2}$. 若将标准的 k 维二阶锥记为:

$$cone^k = \left\{ \begin{bmatrix} u \\ t \end{bmatrix} \mid t \in \mathbf{R}, u \in \mathbf{R}^{k-1}, \|u\| \leq t \right\} \quad (15)$$

优化问题(13)可转化成二阶锥规划的形式:

$$\begin{aligned} &\min \quad a_3 y \\ &\text{subject to} \\ &\begin{bmatrix} a_4 \\ a_2 \end{bmatrix} y - \begin{bmatrix} G_{cor} \\ 0 \end{bmatrix} \in cone^{M+1} \\ &\begin{bmatrix} \lambda D a_4 \\ \lambda a_1 \end{bmatrix} y \in cone^M \end{aligned} \quad (16)$$

至此已得到优化模型的二阶锥形式,采用 MATLAB 中的 SeDuMi 工具箱可以对上式进行快速高效的求解. 得到优化变量 \hat{y} , 则提取的最大能量波形为 $\hat{G} = a_4 \hat{y}$. λ 决定了波形提取时平滑程度,值越大,表示提取的波形越平滑. 关于 λ 的合适取值,在 5.2 中进行了比较确定.

3.2 最大能量切片 Holder 系数计算

获取最大能量切片波形后,通过对称 Holder 系数获取形状信息,得到特征 H_r, H_t . 文献[16]中给出了波形的对称 Holder 系数的计算方法.

$$H_r = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum U(i)G(i)}{(\sum U^p(i))^{1/p} (\sum G^q(i))^{1/q}} + \frac{\sum U(i)G(i)}{(\sum U^q(i))^{1/q} (\sum G^p(i))^{1/p}} \right] \quad (17)$$

$$H_t = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum T(i)G(i)}{(\sum T^p(i))^{1/p} (\sum G^q(i))^{1/q}} + \frac{\sum T(i)G(i)}{(\sum T^q(i))^{1/q} (\sum G^p(i))^{1/p}} \right] \quad (18)$$

其中:

$$U(k) = \begin{cases} 1, & 1 \leq k \leq M \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (19)$$

$$T(k) = \begin{cases} 2k/M, & 1 \leq k \leq M/2 \\ 2 - 2k/M, & M/2 \leq k \leq M \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (20)$$

即对每个最大能量切片波形,分别与方波信号和三角信号计算对称 Holder 系数,反映最大能量切片与方波、三角波信号的相像程度. 关于 p 取值的确定,在 5.2 中进行了比较确定.

4 特征向量形成及有效性度量

4.1 特征向量形成

由第二、三节内容,使用最大能量角和两个对称 Holder 系数作为特征向量 $F = [\hat{\alpha} \quad H_r \quad H_t]^T$.

由此可以得到辐射源特征向量提取的步骤:

Step 1 对信号以采样频率 f_s 进行采样,得到离散信号 $s(n), n = 1, 2, \dots, N$.

Step 2 对自相关序列求快速傅里叶变换得到模糊函数取值.

Step 3 确定角度搜索范围 $|\alpha| \leq 90^\circ$ 与角度搜索精度,确定 ρ 取值范围.

Step 4 利用高斯取整函数进行极坐标与直角坐标的转换,求得确定角度 α 上总能量,搜索得到最大能量角度 $\hat{\alpha}$.

Step 5 提取最大能量切片,并采用导数约束平滑提取最大能量切片波形信息.

Step 6 计算最大能量切片的对称 Holder 系数 H_r, H_t .

Step 7 构造辐射源信号特征向量 $F = [\hat{\alpha} \quad H_r \quad H_t]^T$.

4.2 特征有效性指标度量

有效性指标 (validity index) 用来衡量辐射源特征的有效性. 不同类别特征簇“簇内相似度”高,且“簇间相似度”低,则该种特征具有较好的有效性指标. 本文采取文献[15]提出的 Davies-Bouldin Index (DBI) 指标作为有效性指标.

类别簇划分为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$, 定义

$$\text{avg}(C) = \frac{2 \sum_{1 \leq i < j \leq |C|} \text{dist}(x_i, x_j)}{|C| (|C| - 1)} \quad (21)$$

$$d_{cen}(C_i, C_j) = \text{dist}(\mu_i, \mu_j) \quad (22)$$

其中, μ_i 是 C_i 中心, $|C|$ 表示该类别 C 中的样本个数,其中距离函数采用欧式距离 $\text{dist}(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|_2$, 则可以得到度量特征有效性指标的 DBI 指数:

$$\text{DBI} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{j \neq i} \left(\frac{\text{avg}(C_i) + \text{avg}(C_j)}{d_{cen}(\mu_i, \mu_j)} \right) \quad (23)$$

DBI 的值越小则特征有效性越高.

5 仿真及结果分析

5.1 仿真参数设置

5.1.1 信号参数设置

本文针对六种常见调制雷达信号仿真:单载频脉冲信号(CFP)、线性调频信号(LFM)、二相编码信号(BPSK)、四相编码信号(QPSK)、M序列编码信号(MSEQ)、频移键控信号(BFSK).

具体参数设置为:信号脉宽设置为 $p_w = 10\mu\text{s}$;信号载频设置为 $f_c = 20\text{MHz}$;采样频率设置为 $f_s = 60\text{MHz}$;角度搜索精度选取 $di = 0.1^\circ$. BFSK 频率为 $f_1 = 5\text{MHz}$, $f_2 = 15\text{MHz}$; LFM 信号的带宽 10MHz , 中心频率 15MHz ; BFSK 和 BPSK 的编码是 13 位 Baker 码: $\{1111100110101\}$; M-SEQ 编码是 $\{1011100\}$; QPSK 是 16 位 Frank 码: $\{00000j1-j01010-j1j\}$.

5.1.2 可变参数 p, λ 确定

研究对称 Holder 系数中 p, λ 取值,使提取的波形特征具有类内高相似度和类间低相似度. 令信噪比 $\text{SNR} = 16\text{dB}$,对 p 取所有从 2 到 10 的整数, λ 取 0.5, 1, 3, 5, 7, 9. 每种 p, λ 组合内 6 种信号各产生 30 个脉冲,每个脉冲提取最大能量切片波形特征 $F' = [H_r, H_i]$,共得到 180 个波形特征向量,计算其有效性指标指数 DBI. 得到仿真结果图 1.

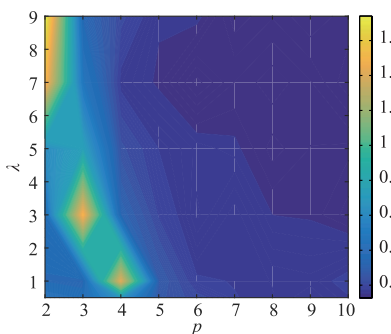


图1 不同 p, λ 取值时有效性指数等位图

从仿真结果可以看出,当 $p \geq 6$ 且 $\lambda \geq 2$ 时,有效性指数趋于稳定且较小,因此选定 $p = 8, \lambda = 5$.

5.2 仿真结果分析

5.2.1 最大能量切片及波形提取

通过本文所述的方法提取六种典型的调制样式信号的最大能量切片,得到切片如图 2 所示,横坐标为 τ/T ,表示归一化得时延,取值范围为 $|\tau/T| \leq 0.5$;纵坐标为归一化后得最大能量切片上得模糊函数值. 采用 3.1 方法提取出波形信息,在 $\text{SNR} = 20\text{dB}$ 时得到结果如图 3 所示.

可以看出,经本文方法平滑后,切片的波形样式得到了更为清晰的区分. 对变化剧烈的波形,本文方法提

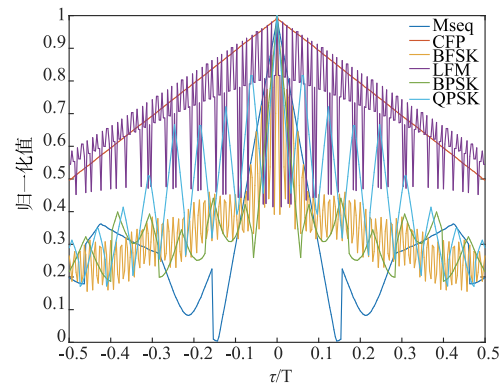


图2 SNR=20dB时6种信号最大能量切片

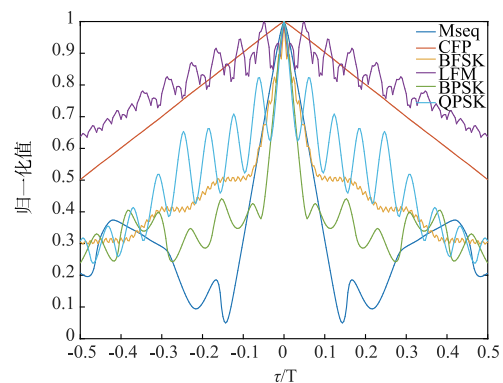


图3 SNR=20dB时本文方法提取后波形

取后波形与原波形差异较大,如 BFSK, LFM, 因为运用导数约束条件时,如果波形本身变化快而剧烈,则提取后与原波形差异较大.

而在低信噪比条件下,受噪声的影响,最大能量切片重叠严重,如图 4,波形已基本不可分辨.

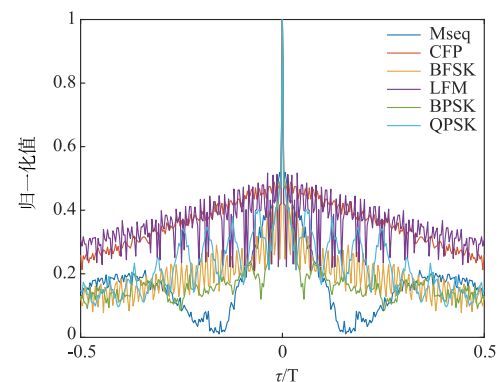


图4 SNR=0dB时6种信号最大能量切片

由本文方法波形提取结果如图 5 所示,可见在 0dB 噪声背景下,波形受噪声影响被极大减弱,平滑后的波形大致与 20dB 时波形类似,各调制之间的区分度很高,满足聚类识别要求.

5.2.2 聚类与识别

在低信噪比 $\text{SNR}(\text{dB}) = \{0, 2, 4, 6, 8\}$ 条件下按照

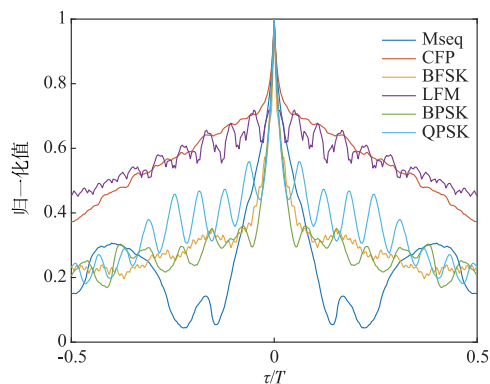


图5 SNR=0dB时本文方法提取后波形

5.1 参数设置产生脉冲,每个信噪比条件下,6种调制信号各产生100个脉冲,按照本文方法提取雷达特征向量,6dB时得到结果如图6所示.使用模糊c-means聚类方法进行聚类识别,得到低信噪比条件下的识别率准确率,本文方法(a)与两种代表性方法:传统的模糊函数法(b)^[14]、经SVD降噪的切片法(c)^[12]进行对比,结果如表1.

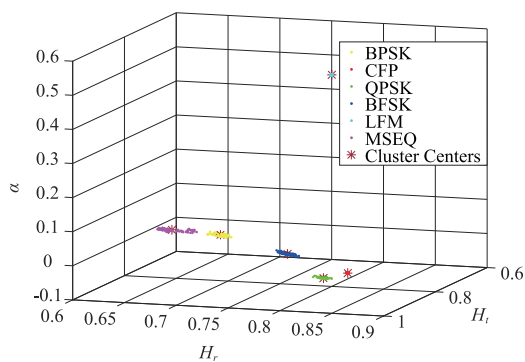


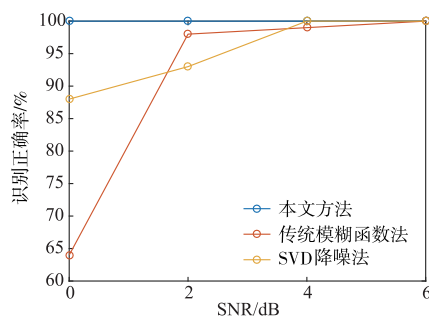
图6 SNR=6dB时特征向量分布

表1 本文方法与已有方法识别正确率比较

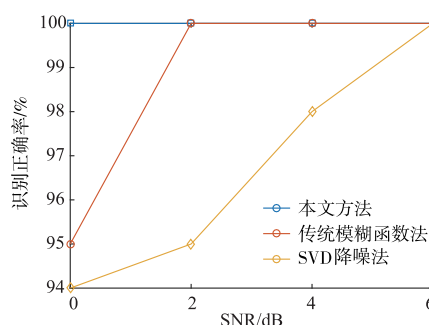
信号类型	信噪比 (dB)				信号类型	信噪比 (dB)					
	0	2	4	6		0	2	4	6		
BPSK	a	100%	100%	100%	100%	FSK	a	96%	100%	100%	100%
	b	70%	88%	86%	99%		b	95%	100%	100%	100%
	c	100%	100%	100%	100%		c	94%	95%	98%	100%
CFP	a	100%	100%	100%	100%	LFM	a	100%	100%	100%	100%
	b	100%	100%	100%	100%		b	100%	100%	100%	100%
	c	98%	100%	100%	100%		c	98%	100%	100%	100%
QPSK	a	100%	100%	100%	100%	MSEQ	a	99%	100%	100%	100%
	b	64%	98%	99%	100%		b	58%	77%	83%	90%
	c	88%	93%	100%	100%		c	100%	100%	100%	100%

结果分析可知,如图7,三种方法中,本文提出的方法在低信噪比条件下,较传统模糊函数法和经SVD降噪的模糊函数法有更良好的表现,尤其对于低信噪比下提取波形相似的FSK信号和QPSK信号,本文方法识别正确率大幅提高.本文提出的方法在低信噪比下有

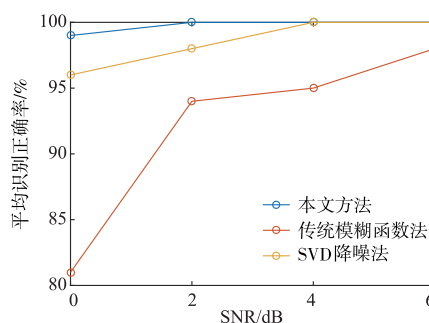
更高的识别正确率,在信噪比0dB以上时基本做到完全识别.



(a)三种方法低信噪比条件下QPSK信号识别正确率



(b)三种方法低信噪比条件下FSK信号识别正确率



(c)三种方法平均识别正确率比较

图7 低信噪比条件下三种方法识别正确率比较

6 结论

本文提出的模糊函数最大能量角搜索获取方法,直接面向常规采样的离散信号,实现复杂度低;提出的基于导数约束条件的波形特征提取方法能够在低信噪比条件下有效保留信号最大能量切片的波形,还原信号样式特性;在有效性评估指标下,确定了算法中正则因子和对称Holder系数中范数因子的更有效取值;仿真表明,在低信噪比条件下,本文算法较其他两种现有算法,较大提高了识别正确率,且在0dB以上基本做到完全识别,验证了本文数学模型和算法的可行性和有效性.本文方法仍然存在局限性,采样频率为同一固定值,容易造成低频信号的过采样,浪费系统资源.同时,本文提出的辐射源识别方法不仅可以用于雷达信号识

别,对于通信辐射源信号识别同样有可借鉴之处.

参考文献

- [1] SHIEH C S, LIN C T. A vector neural network for emitter identification[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2002, 50(8): 1120 - 1127.
- [2] LIU J, LEE J P Y, LI L, et al. Online clustering algorithms for radar emitter classification[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2005, 27(8): 1185 - 1196.
- [3] 王海华, 沈晓峰. 一种新的雷达辐射源信号脉内特征提取方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(4): 809 - 811.
WANG H H, SHEN X F. New intra-pulse feature extraction approach of radar emitter signals[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(4): 809 - 811. (in Chinese)
- [4] 张葛祥, 胡来招, 金炜东. 雷达辐射源信号脉内特征分析[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(6): 477 - 480.
ZHANG G X, HU L Z, JIN W D. Intra-pulse feature analysis of radar emitter signals[J]. Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2004, 23(6): 477 - 480. (in Chinese)
- [5] ZHANG G X, HU L Z. Radar emitter signal recognition based on entropy features[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(4): 440 - 445.
- [6] Fan X, Wang H, Yang Y. Radar emitter recognition based on second order degree of cyclostationarity separation criterion[A]. Asia-Pacific Microwave Conference[C]. IEEE, 2015. 1 - 3.
- [7] LUNDEN J, KOIVUNEN V. Automatic radar waveform recognition[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 124 - 136.
- [8] CHEN T W, JIN W D, LI J. Feature extraction using surrounding-line integral bispectrum for radar emitter signal[A]. IEEE International Joint Conference on Neural Networks[C]. IEEE, 2008. 294 - 298.
- [9] LI L, JI H, WANG L. Specific radar emitter recognition based on wavelet packet transform and probabilistic SVM[A]. International Conference on Information and Automation[C]. IEEE, 2009. 1308 - 1313.
- [10] SHULL, RAY D. Modulation classification by wavelet decomposition entropy analysis[D]. University of Missouri - Rolla. 1999.
- [11] 张国柱, 黄可生, 姜文利, 等. 基于信号包络的辐射源细微特征提取方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6): 795 - 797.
ZHANG G Z, HUANG K S, JIANG W L, et al. Emitter feature extract method based on signal envelope[J]. Systems Engineering & Electronics, 2006, 28(6): 795 - 797. (in Chinese)
- [12] GUO Q, NAN P, ZHANG X, et al. Recognition of radar emitter signals based on SVD and AF main ridge slice[J]. IEEE Journals & Magazines, Journal of Communications & Networks, 2015, 17(5): 491 - 498.
- [13] YANG L B, ZHANG S S, XIAO B. Radar emitter signal recognition based on time-frequency analysis[A]. IET International Radar Conference[C]. IET, 2013. 1 - 4.
- [14] 普运伟, 金炜东, 朱明, 等. 雷达辐射源信号模糊函数主脊切面特征提取方法[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(2): 133 - 137.
PU Y W, JIN W D, ZHU M, et al. Extracting the main ridge slice characteristics of ambiguity function for radar emitter signals[J]. Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2008, 27(2): 133 - 137. (in Chinese)
- [15] DAVIES D L, BOULDIN D W. A cluster separation measure[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1979, 1(2): 224 - 227.
- [16] 王海华, 沈晓峰. 基于对称 Holder 系数的雷达辐射源信号特征分析[J]. 空间电子技术, 2010, 07(3): 55 - 59.
WANG H H, SHEN X F. Feature analysis of radar emitter signals based on symmetrical holder coefficient[J]. Space Electronic Technology, 2010, 07(3): 55 - 59. (in Chinese)
- [17] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. World Book Inc, 2013. 310 - 317.

作者简介



许程成 男, 1992 年 10 月出生, 江苏无锡人. 现为国防科技大学硕士研究生, 研究方向为频谱感知、一体化侦察识别.
E-mail: xcc_eei@163.com



周青松 男, 1982 年出生于安徽巢湖, 现为国防科技大学讲师, 主要研究方向是高速数字信号处理和凸优化理论.
E-mail: Zhouqingsong1207@gmail.com