

模糊函数主脊切面特征提取的局域差分方法

普运伟^{1,2} 马蓝宇² 侯文太² 张天飞²

(1. 昆明理工大学计算中心, 昆明, 650500; 2. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明, 650500)

摘要: 雷达信号分选是电子对抗的关键技术, 提取和补充新的特征参数是解决复杂体制雷达信号分选难题的有效手段。鉴于模糊函数是表征信号内在结构上的有效工具, 本文采用改进粒子群算法 (Particle swarm optimization, PSO) 快速搜索信号的模糊函数主脊切面, 并提出一种基于局域差分的模糊函数主脊切面特征提取方法, 提取出差值和、差值最大值和差值分布熵3个特征, 以表征不同信号波形结构上的局域差异; 然后通过模糊C均值算法对提取的特征参数进行聚类性能分析。最后使用LFM, BFSK, CON, QPSK, M-SEQ及BPSK共6种典型信号进行实验。实验结果表明, 在固定信噪比下, 当SNR不低于0 dB时, CON, LFM及BFSK信号的平均聚类准确率达到98.7%, 6类信号的平均准确率为93.2%。在0~20 dB动态信噪比环境下, 平均分选准确率仍保持在80.5%以上, 且算法具有较好的特征提取时效性, 证明了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 雷达辐射源信号; 模糊函数主脊切面; 改进粒子群算法; 局域差分

中图分类号: TN974 **文献标志码:** A

Local Difference Feature Extraction Method for Slice of Ambiguity Function Main Ridge

Pu Yunwei^{1,2}, Ma Lanyu², Hou Wentai², Zhang Tianfei²

(1. Computer Center, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500, China; 2. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500, China)

Abstract: Radar signal sorting is the key technology of electronic countermeasures. Extracting and supplementing other new feature parameters is the effective measures of solving the sorting problem of complex modulation radar signals. In view of the ambiguity function's unique effect on characterizing signal inherent structure, this paper adopts the improved particle swarm optimization (PSO) algorithm to search the slice of ambiguity function main ridge of the considered signals, and then proposes a feature extraction method which bases on the local difference to extract three local area characteristics, that is the sum of characteristic value, the maximum characteristic value, and the characteristic value distribution entropy. These features can well reflect the local difference of the signal waveform structure. To verify the feasibility and effectiveness of the proposed method, three simulation experiments are designed and the fuzzy C-means algorithm is used to test the clustering performance of the extracted three feature parameters. The experimental results show that, when SNR is not lower than 0 dB, the average clustering accuracy rate of six kinds of the considered signals, i.e., LFM, BFSK, CON, QPSK, M-SEQ and BPSK, is 93.2% and the

average accuracy of CON, LFM and BFSK signals achieves to 98.7%. When SNR changes from 0 dB to 20 dB, the average clustering accuracy rate keeps above 80.5%. Meanwhile, the time-effectiveness of the proposed model is better than those compared method. These results illustrate the good performance of the extracted local characteristics.

Key words: radar emitter signal; ambiguity function main ridge slice; improved PSO; local difference

引 言

雷达辐射源信号分选是电子侦察信号处理的关键技术。随着信息化的进程不断加快,越来越多雷达、通信设施及制导武器投入使用,战场电磁环境也愈发复杂。同时,随着新型复杂体制雷达逐渐应用并占据主导地位,雷达工作频率不断提高,调制方式也更为多样。在脉冲密度高、形式复杂多变的信号环境中,依据载频(Radio frequency, RF)、脉冲幅度(Pulse amplitude, PA)、脉冲宽度(Pulse width, PW)、脉冲到达时间(Time of arrival, TOA)和脉冲到达方向(Direction of arrival, DOA)5个常规参数分选和识别雷达信号已变得非常困难^[1],探索和补充新的有效分选特征参数已迫在眉睫。

近年来,随着计算机技术的发展,利用雷达信号脉内特征参数对信号进行分选成为可能。研究人员通过小波包特征^[2]、时频原子特征^[3]、复杂度特征^[4]等特征对信号内在调制方式进行分析,进而应用于分选,取得了一些成果。同时,基于雷达指纹的脉冲无意调制特征^[5]也取得了一些成果。鉴于模糊函数对信号内在结构信息具有较为完整的描述能力,从模糊函数角度提取新的特征参数有助于对信号进行分选和识别^[6-8]。但在分数域上,要想提取所需精度的模糊函数主脊(Ambiguity function main ridge, AFMR)切面,其计算量较大。由于粒子群优化算法具有良好的逐步启发寻优能力且搜索速度快,本文使用改进粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)对雷达信号 AFMR 切面进行快速提取,然后提取 AFMR 的局域差分特征,最后采用模糊 C 均值(Fuzzy C-means algorithm, FCM)算法对所提取的特征参数进行聚类性能研究,并对所提方法的算法复杂度进行对比分析。实验结果表明,相较于文献[8]中基于优势遗传的特征提取方法,本文方法算法复杂度降低了 67%,切面搜索速度提高了 26%,具有算法简便、搜索速度快、实时性高的优点,可以更好地应对复杂电磁环境。同时,所提取的特征参数差值和、差值最大值和差值分布熵分别较好地反映了模糊函数主脊切面的局域总体性、局域极端性和局域变化性,对雷达信号脉内调制方式具有良好的分辨能力且具有较好的抗噪性能。

1 基于改进 PSO 的 AFMR 切面快速提取

1.1 雷达辐射源信号 AFMR 切面

由文献[6]可知,分数自相关与模糊函数具有如下关系

$$[C^{\rho}(s, s)](\rho) = \chi_s(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha) \quad (1)$$

式中: C^{ρ} 为旋转角为 α 的分数域 u_{α} 上的分数自相关算子; ρ 为 u_{α} 域的径向距离; χ_s 为信号的模糊函数。由式(1)可知,分数自相关相当于对应分数域上模糊函数的径向切面。由此,根据分数傅里叶变换的快速离散方法,便可计算模糊函数任意过原点的径向切面。文献[6]利用上述分数自相关与模糊函数径向切面的关系,定义信号模糊函数过原点的能量主要分布带为 AFMR 并提出如下检测量

$$RS(\alpha) = \frac{\int [C^{\rho}(s, s)(\rho)] d\rho}{\int |s(t)| dt} \quad |\alpha| < \pi/2 \quad (2)$$

1.2 AFMR切面快速提取的改进PSO方法

PSO算法源于复杂适应系统,是一种通用的全局搜索算法。由于没有交叉和变异运算,PSO算法具有收敛速度快、需调整参数少、易于实现等优点^[9]。作为一种基于群智能的进化算法,其应用范围已从最初的函数优化扩展到神经网络训练及工程应用领域^[10-11]。为增强AFMR特征提取时效性,本文引入PSO启发式寻优策略以加快AFMR切面的搜索。

本文采用随机惯性权重与自然选择相结合的改进PSO算法进行AFMR切面的搜索,粒子的速度和位置更新公式如下^[12]

$$v_{id} = \omega * v_{id} + c_1 * \text{rand}_1() * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * \text{rand}_2() * (p_{gd} - x_{id}) \quad (3)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (4)$$

式中: ω 为惯性权重,其大小决定了粒子对当前速度继承的多少; c_1, c_2 为学习因子,决定粒子个体经验和群体经验对粒子运行轨迹的影响; p_{id}, p_{gd} 分别为个体最优和全局最优; $\text{rand}_1, \text{rand}_2$ 为在 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数。

通过随机初始化产生的粒子群可能会使粒子群位置集中在一定范围内而使最终结果陷入局部最优。为防止这种情况发生,在该方法中初始粒子群位置被设置为均匀分布。均匀分布的初始粒子群还可以让候选解平均分布在可行解周围,从而使得搜索速度有显著提高。在随机惯性权重参数设置中, ω 服从均值为 μ ,标准差 σ 为0.5的均匀分布,均值 μ 服从 $[0.2, 0.9]$ 的均匀分布。均匀分布的 ω 在算法后期可以避免让粒子被局部极值的吸引^[13]从而搜索到较大的AFMR切面值,以保证正确搜索到AFMR切面。同时,在算法过程中,对所有粒子的适应度进行排序,选择适应度高的前50%粒子替代后50%粒子,粒子竞争策略的加入有利于加快算法收敛速度。

根据文献^[12]中的对比实验结果可知,改进PSO方法搜索得到的AFMR切面精确度较高,并且较文献^[6]方法,改进PSO算法有效降低了搜索雷达信号AFMR切面的时间,平均搜索时间由42.4 s降低至9.8 s,同时在动态信噪比下拥有较好的稳定性。改进PSO算法增强了AFMR切面特征的实用性,也使得其成为信号分选经典五参数的有效补充。

2 AFMR切面特征提取的局域差分方法

文献^[6]提取出的雷达辐射源信号AFMR切面特征参数从模糊能量分布的整体角度描述了信号结构上的差异,其采用的矩方法表征了信号AFMR切面模糊能量分布的集中性信息。考虑到各信号模糊函数主脊切面局域方面展现出来的差异性,可对模糊函数主脊切面的局部特性和差异程度进行深入分析,从局部方面描述信号模糊能量分布的差异性信息,挖掘能够表征信号模糊能量分布局域差异性的特征参数。

在低信噪比环境下,为了降低噪声对AFMR切面特征提取的影响,在特征提取之前,对采用点进行滑动平均处理

$$\bar{f}(n) = \frac{1}{2 * \text{step} + 1} \sum_{i=n-\text{step}}^{n+\text{step}} f(i) \quad (5)$$

式中:step为滑动平均步长; $\bar{f}(n)$ 为第 n 个采样点的平均模糊能量值; $f(i)$ 为第 i 个采样点的模糊能量值。图1给出了常规脉冲信号(Conventionality pulse, CON)、线性调频信号(Linear frequency modulation, LFM)、二频率编码信号(Binary frequency-shift keying, BFSK)、二相编码信号(Binary phase shift keying, BPSK)、M序列信号(M-Sequence, MSEQ)、四相编码信号(Quadrature phase shift keying, QPSK)6种信号AFMR切面在 $\text{SNR}=0 \text{ dB}$, $\text{step}=5$ 时滑动平均前后的对比情况。

对滑动平均处理后的AFMR切面,采用局域差分方法提取AFMR切面的局域差分特征。其中,局

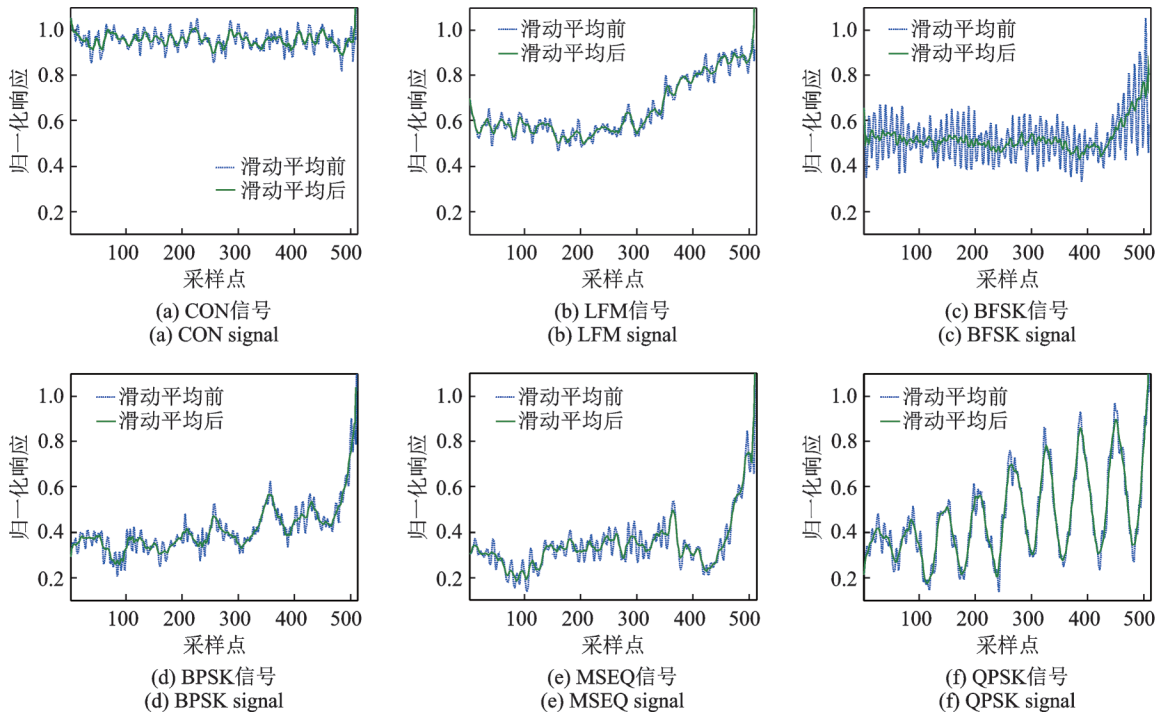


图1 SNR=0 dB, step=5时6种信号AFMR切面滑动平均处理前后对比

Fig.1 Comparison of different signal AFMR slides before and after treatment (SNR=0 dB, step=5)

域差分定义为

$$\text{diff} = f(i + m) - f(i) \quad i = 1, 2, \dots, 512 - m \quad (6)$$

式中diff为AFMR切面上相隔为m的两点模糊能量值之差。

由式(6)所示的局域差分可计算得到512-m个差值diff,之后便可提取3个局域特征参数:差值和(sum_diff)、差值最大值(max_diff)、差值分布熵(entr_diff)。其中,entr_diff的求取方法为:将512-m个差值平均分成t等份,记录每个区域内的差值个数记为x。由此可以统计出每个区域内差值分布概率P_i,进而得到差值分布熵。

可见,局域差分方法所提取的3个局域特征为

$$\text{sum_diff} = \sum_{i=1}^{512-m} \text{diff} \quad (7)$$

$$\text{max_diff} = \max(\text{diff}) \quad (8)$$

$$\text{entr_diff} = - \sum_{i=1}^t P_i \cdot \ln(P_i) \quad P_i = \frac{x}{512 - m} \quad (9)$$

由式(7-9)可知:sum_diff统计了AFMR切面差值总和,描述了模糊能量局部变化差异的总体特性;max_diff为AFMR切面局部差异的最大值,描述了模糊能量局部变化差异的极端特性;entr_diff表征了模糊能量主脊切面局部差异的分布特性。

综上所述,本文算法流程图如图2所示。

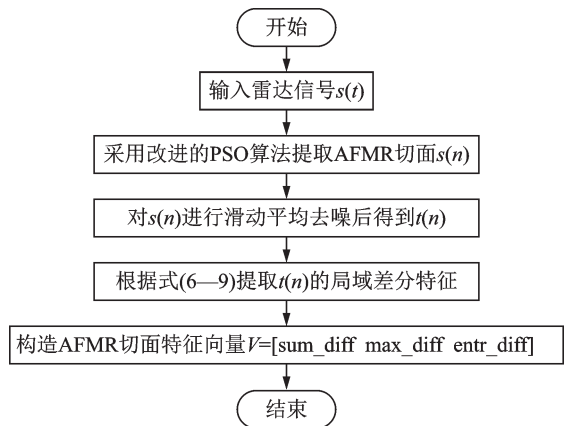


图2 局域差分算法流程图

Fig.2 Local difference algorithm flow chart

3 实验结果及分析

为验证本方法的有效性和所提取特征的性能。使用 LFM, BFSK, CON, QPSK, MSEQ 及 BPSK 共 6 种典型信号进行实验, 其中 LFM 的带宽为 10 MHz, BPSK 和 BFSK 均为 13 位 Barker 码。MSEQ 为 (1011100), QPSK 则采用 16 位 Frank 码。所有信号 PW 均为 10 μ s, f_s 均为 60 MHz。另外, 除 BFSK 的两个频点分别取 10 MHz 和 2 MHz 外, 其余信号 RF 均为 10 MHz。

在提取 AFMR 切面的改进 PSO 算法中, 种群规模为 20, 最大迭代次数为 100, ω 服从均值为 μ , $\sigma=0.5$ 的均匀分布, 其中 μ 又服从 [0.2, 0.9] 上的均匀分布, 学习因子 $c_1=c_2=1.8$ 。

在局域差分特征提取算法中, 为体现典型雷达辐射源信号的局部差异性并尽可能地避免噪声对所提取差值的影响, 差值步长 m 的取值不能太小也不能过大。考虑到信号重采样后数据点个数为 512, 步长 m 一般可取为 80 ~ 90。经过多次测试, 在 m 为 85 时所提取的特征分离性最好, 故在以下实验中, 差值步长 m 为 85, 差值平均分成 60 等份。

实验 1 在 0, 6, 12, 20 dB 4 种 SNR 下, 每类信号产生 100 个脉冲, 初始相位随机。使用改进的 PSO 算法对信号的 AFMR 切面进行快速搜索。为在抑制噪声的同时最大限度保留原始信号信息, 对各信噪比下提取出的 AFMR 切面进行滑动平均处理, step 分别设置为 2, 3, 4, 5。降噪完成后, 采用差值步长 $m=85$ 提取 AFMR 差值并将差值分成 60 等分, 依据式 (7—9) 算出局域差分的 3 个特征参数 sum_diff, max_diff, entr_diff, 分别组成固定 SNR 下的样本容量为 600 的测试信号集 1~4。

使用 FCM 算法^[14]对特征参数进行聚类, 对比文献[6]和文献[8]所提特征进行性能分析。图 3—6 给出了在不同 SNR 下测试信号集 1~4 进行 FCM 聚类后的特征分布情况, 每个信号集在相应信噪比下的聚类结果如表 1—4 所示, 与文献[6, 8]性能分析对比结果如表 5 所示。

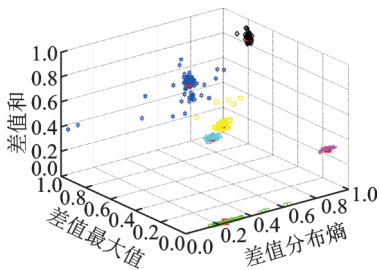


图 3 SNR=20 dB 时局域差分特征聚类结果

Fig.3 Local differential feature clustering results at SNR=20 dB

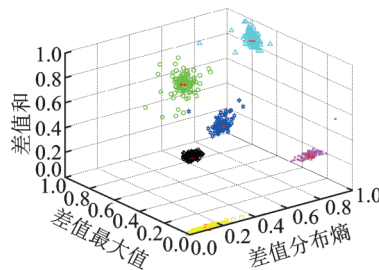


图 4 SNR=12 dB 时局域差分特征聚类结果

Fig.4 Local differential feature clustering results at SNR=12 dB

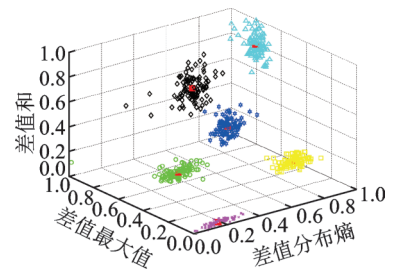


图 5 SNR=6 dB 时局域差分特征聚类结果

Fig.5 Local differential feature clustering results at SNR=6 dB

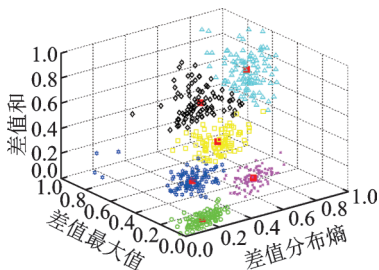


图 6 SNR=0 dB 时局域差分特征聚类结果

Fig.6 Local differential feature clustering results at SNR=0 dB

表 1 SNR=20 dB 时局域差分特征聚类结果

Tab. 1 Local differential feature clustering results at SNR=20 dB

信号类型	CON	LFM	BFSK	BPSK	MSEQ	QPSK	准确率/%
CON	100	0	0	0	0	0	100
LFM	0	100	0	0	0	0	100
BFSK	0	0	100	0	0	0	100
BPSK	0	0	0	93	7	0	93
MSEQ	0	0	0	1	96	3	96
QPSK	0	0	0	0	10	90	90

表 2 SNR=12 dB 时局域差分特征聚类结果

Tab. 2 Local differential feature clustering results at SNR=12 dB

信号类型	CON	LFM	BFSK	BPSK	MSEQ	QPSK	准确率/%
CON	98	1	0	0	0	1	98
LFM	0	100	0	0	0	0	100
BFSK	0	0	98	2	0	0	98
BPSK	0	0	0	96	4	0	96
MSEQ	0	0	0	1	94	5	94
QPSK	0	0	0	0	5	95	95

表 3 SNR=6 dB 时局域差分特征聚类结果

Tab. 3 Local differential feature clustering results at SNR=6 dB

信号类型	CON	LFM	BFSK	BPSK	MSEQ	QPSK	准确率/%
CON	98	1	0	0	1	0	98
LFM	0	98	1	0	1	0	98
BFSK	0	0	99	1	0	0	99
BPSK	0	0	0	97	3	0	97
MSEQ	0	0	0	0	88	12	88
QPSK	0	0	0	1	12	87	87

表 4 SNR=0 dB 时局域差分特征聚类结果

Tab. 4 Local differential feature clustering results at SNR=0 dB

信号类型	CON	LFM	BFSK	BPSK	MSEQ	QPSK	准确率/%
CON	100	0	0	0	0	0	100
LFM	1	96	3	0	0	0	96
BFSK	0	2	97	1	0	0	97
BPSK	0	0	6	82	12	0	82
MSEQ	0	0	0	9	59	32	59
QPSK	0	0	1	6	18	75	75

由图 3—6 可知,在不同信噪比下,通过局域差分方法所提取的 3 个特征均具有较好的类间分离能力和类内聚敛性。在信噪比大于 6 dB 时,通过 FCM 聚类图可以看出不同调制类型信号间间隔明显,几乎不存在交叠。

通过表 1—4 可以看出,在信噪比高于 6 dB 时,聚类准确率较为理想,最高为 100%,最低也达到 87%。在 6, 12, 20 dB 这 3 个信噪比下,平均聚类准确率为 95.3%, 96.8% 及 96.5%,显示了较好的聚类准确性。即使在信噪比为 0 dB 时,除了 M-SEQ,其余信号仍具有较为满意的聚类准确率,平

表 5 不同特征平均分选成功率对比

Tab. 5 Comparison of average scores of different features

信噪比/dB	成功率/%		
	本文特征	文献[6]特征	文献[8]特征
20	96.50	100.00	100.00
12	96.80	100.00	100.00
6	94.50	98.10	99.00
0	84.83	81.17	94.30
平均	93.16	94.81	98.32

均聚类准确率达到90.0%。表5对本文方法所提取特征与文献[6,8]方法所提取特征的聚类准确性进行了对比。由表5可知,本文方法所提取的特征聚类准确性略低于文献[6]和文献[8],但差距很小,依然保持了93%以上的平均准确性。这说明本文特征提取方法是可行和有效的,所提取的特征参数由于反映了各类信号局域差异,不仅具有良好的类内聚集性和类间辨识能力,且在信噪比发生改变时依然能保持较好的稳定性。

实验2 为验证局域差分特征在信噪比变化时的性能,设置SNR为0,2,4,⋯,20 dB,每种信噪比下各随机产生10个样本。使用改进的PSO算法对信号模糊函数主脊切面进行搜索,提取出sum_diff, max_diff, entr_diff三个特征参数,组成SNR变化的样本容量为660的测试信号集5。图7给出了信号集5的FCM聚类情况,聚类结果则如表6所示。

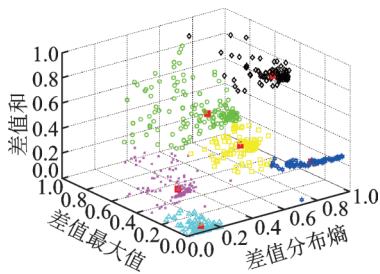


图7 SNR为0~20 dB时局域差分特征聚类结果

Fig.7 Local differential feature clustering results at SNR=0—20 dB

表6 信噪比0~20 dB下局域差分特征聚类结果

Tab. 6 Local differential feature clustering results at SNR=0—20 dB

信号类型	CON	LFM	BFSK	BPSK	MSEQ	QPSK	准确率/%
CON	87	1	21	0	0	1	79
LFM	0	75	6	26	3	0	68
BFSK	0	0	108	0	2	0	98
BPSK	0	0	1	79	30	0	72
MSEQ	0	0	0	1	100	9	91
QPSK	0	0	1	4	23	82	75

如图7所示,在动态信噪比下6类信号局域差分特征仍然具有较为满意的分离能力,各信号间交叠较小具有明显分隔。通过表6进一步可知,局域差分特征可以适应较大动态型信噪比情形。平均来看,6类信噪聚类准确率为80.5%,其中,LFM信号的聚类准确率最低,为68%,其余各类信号均具有较为满意的聚类准确率,特别是对于BFSK和MSEQ信号,聚类准确率分别为98%和91%。上述实验结果进一步证实了局域差分特征对于SNR变化的稳健性。

由表6可以看出,不同类型信号聚类效果存在差异,其主要原因是噪声对不同信号AFMR切面影响不同。为了说明这一问题,图8给出了LFM信号和BFSK信号分别在信噪比为0 dB和20 dB下模糊函数主脊切面对比图。可见,在两种信噪比下,LFM信号AFMR变化较为明显而BFSK信号AFMR变

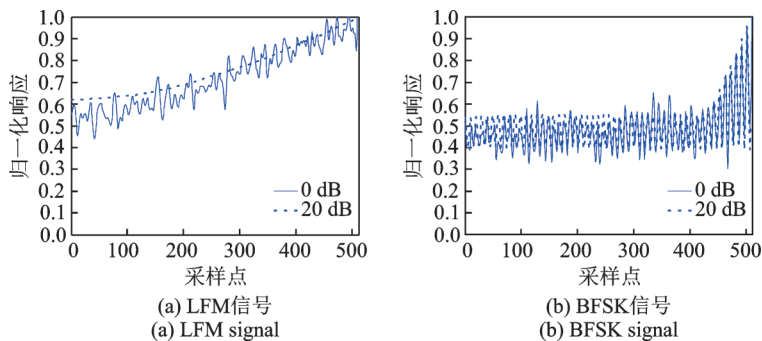


图8 LFM, BFSK信号在SNR为0 dB和20 dB时AFMR切面对比

Fig.8 AFMR comparison of BFSK and LFM signals at 20 dB and 0 dB

化较小。由此在动态信噪比实验中,所提取的LFM信号特征值分布较为离散,不同信噪比下特征值差距相对较大,进而在一定程度上影响了聚类效果,而BFSK信号特征值分布较为集中,不同信噪比下特征值差距较小,聚类性能较好。

实验3 为考察本文方法提取特征的速度,验证方法的时效性,在SNR=20 dB情况下,6类信号各产生10个随机样本,分别使用局域差分方法、矩方法^[6]及图形轮廓方法^[8]提取相应特征,并记录特征提取耗时。实验所用计算机配置为:CPU: Intel i5-3230M,内存:8 GB,硬盘:128 GB。实验结果如表7所示。

表7 信号特征提取耗时比较
Tab. 7 Time-consuming comparison of signal feature extraction

提取方法	特征提取耗时						平均耗时
	CON	LFM	BFSK	BPSK	MSEQ	QPSK	
本文方法	1.64	1.78	1.56	1.89	1.63	1.89	1.73
文献[6]方法	8.81	8.20	8.18	8.25	8.16	8.20	8.30
文献[8]方法	1.30	4.23	1.16	2.61	2.11	2.63	2.34

由表7可见,对比矩方法和图形轮廓方法,本文特征提取方法平均耗时分别减少6.57 s和0.6 s,缩短了79%和26%,显示出了较好的时效性。为进一步说明本文方法在时效性方面的性能,下面引入算法复杂度概念对本文方法、矩方法及图形轮廓方法进行对比分析。

算法复杂度是指将算法在编写成计算机语言后,执行算法所需要的时间和消耗的计算机资源。算法复杂度主要有两种计算方法,一种是统计该算法所有语句的频度之和,另一种是统计算法中所使用的加减乘除次数。本文采用文献[15]所述方法对各算法复杂度进行分析。

矩方法使用穷举法搜索预处理后信号的AFMR切面,并计算该切面的均值、方差以及标准差,其特征算法复杂度为

$$7NC_a + 11NC_m + 3C_n \tag{10}$$

图形轮廓方法采用坐标变换的方法将AFMR切面曲线变为一个闭合图形,然后对该闭合图形进行平滑去噪,最后描述所得图形轮廓的特征,其特征算法复杂度为

$$\frac{11}{2}NC_a + \frac{1}{2}NC_b + \frac{5}{2}NC_m + \frac{3}{2}NC_n \tag{11}$$

本文特征提取算法的复杂度为

$$\frac{3}{2}NC_a + \frac{1}{2}NC_b + NC_m + \frac{1}{2}NC_n \tag{12}$$

式(10—12)中: C_a 为加法运算; C_b 为比较运算; C_m 为乘法运算; C_n 为除法运算。根据文献[15],在大多数情况下,乘法运算与加法、减法运算所需时间和占用计算机资源相差无几,而除法运算耗时和占用资源是上述几种运算的2~10倍。因此上文分析的运算复杂度可转换为乘法数和除法数,如表8所示。

由表8可以看出,本文方法速度较快的主要原因是算法复杂度较低,计算简便。综合来看,本文方法算法复杂度仅约为其他两种方法的1/3和1/6。

显然,算法复杂度降低,提高了切面特征提取效率,增强了AFMR特征的时效性,进一步提高了AFMR特征实际工程应用的可能性。

总结上述3个实验的结果可知,基于局域差

表8 3种算法复杂度比较

Tab. 8 Comparisons of complexity of three algorithms

复杂度	本文方法	矩方法	图形轮廓方法
乘法数	3.0N	18.0N	8.5N
除法数	0.5N	3.0N	1.5N

分方法的模糊函数主脊切面特征提取方法是可行和有效的。所提取的特征差值和、差值最大值、差值分布熵分别描述了信号 AF 主脊的局域总体性、局域极端性和局域变化性,较好地反映了信号的变化特性。因此,只要信号的 AF 变化特性不同,该方法均具有较好的信号分辨能力。而且,由于改进 PSO 算法和局域差分方法具有算法复杂度低、运算量小的优点,因此所提方法具有计算速度快的显著优势,可以保证特征提取的时效性。

4 结束语

围绕复杂体制雷达辐射源信号新特征参数的提取,本文以信号模糊函数主脊切面为研究对象,借助局域差分工具提出了一种新的模糊函数能量主脊切面特征提取新方法。所提方法使用改进 PSO 算法快速搜索得到模糊函数能量主脊切面,通过局域差分方法提取出差值和、差值最大值和差值分布熵 3 个特征参数,从而提取出能够表征信号 AF 主脊能量局域总体性、局域极端性和局域变化性的 3 个新特征。实验结果表明,所提取的特征参数在信噪比不低于 0 dB 时均具有较强的信号区分能力,同时还具有较好的抗噪声性能和特征提取时效性。因此,这些特征可以作为雷达辐射源信号分选经典五参数的有效补充。为了进一步改善所提取局域特征在信噪比较低时的性能,后期可以考虑采用基于小波变换、多重分形^[16]的信号毛刺去除和基于分数阶 Fourier 变换^[17]等方法对信号进行处理。

参考文献:

- [1] 李伟, 刘海起, 魏方圆, 等. 雷达信号分选关键技术探究[J]. 通讯世界, 2017(10): 243-244.
Li Wei, Liu Haiqi, Wei Fangyuan, et al. Research on key technologies of radar signal sorting[J]. Communication World, 2017 (10): 243-244.
- [2] 柳征, 姜文利, 周一宇. 基于小波包变换的辐射源信号识别[J]. 信号处理, 2005, 21(5): 460-464.
Liu Zheng, Jiang Wenli, Zhou Yiyu. Emitter signals recognition based on wavelet packet transform[J]. Signal Processing, 2005, 21(5): 460-464.
- [3] 朱明, 普运伟, 金炜东, 等. 基于时频原子方法的雷达辐射源信号特征提取[J]. 电波科学学报, 2007, 22(3): 458-462.
Zhu Ming, Pu Yunwei, Jin Weidong, et al. Feature extraction of radar emitter signals based on time-frequency atoms[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(3): 458-462.
- [4] 王世强, 张登福, 毕笃彦, 等. 一种低复杂度的雷达信号分选方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(4): 148-153.
Wang Shiqiang, Zhang Dengfu, Bi Duyan, et al. Novel radar signal sorting method with low complexity[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(4): 148-153.
- [5] 王磊. 雷达辐射源个体识别的方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
Wang Lei. On methods for Specific Radar Emitter Identification[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [6] 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, 2008, 27(2): 133-137.
Pu Yunwei, Jin Weidong, Zhu Ming, et al. Extracting the main ridge slice characteristics of ambiguity function for radar emitter signals[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(2): 133-137.
- [7] 李林, 姬红兵. 基于模糊函数的雷达辐射源个体识别[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2546-2551.
Li Lin, Ji Hongbing. Specific emitter identification based on ambiguity function[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(11): 2546-2551.
- [8] 时羽. 雷达辐射源信号 AFMR 切面智能搜索与分选特征提取[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
Shi Yu. Intelligent search method and selection feature extraction of AFMR of radar emitter signal[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [9] 谢晓峰, 张文俊, 杨之廉. 微粒群算法综述[J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 129-134.
Xie Xiaofeng, Zhang Wenjun, Yang Zhilian. Overview of particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 129-134.
- [10] Shi Y H, Eberhart R C. Parameter selection in particle swarm optimization[C]//Proceedings of the 7th Annual Conference on

- Evolutionary Programming. Washington DC, USA: [s.n.], 1998: 591-560.
- [11] Babae H, Khosravi A. An improve PSO based hybrid algorithms[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Management and Service Science. Wuhan, China: IEEE, 2011: 1-5.
- [12] Pu Yunwei, Zhang Tianfei, Shi Yu. An improved PSO algorithm and its application in fast feature extraction of radar emitter signals[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Natural Computation. Chongqing, China: IEEE, 2012: 1127-1130.
- [13] 张天飞, 普运伟, 时羽. 模糊函数主脊切面特征提取的粒子群优化方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(34): 158-161, 165.
Zhang Tianfei, Pu Yunwei, Shi Yu. Extracting slice of ambiguity function main ridge using improved particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(34): 158-161, 165.
- [14] 普运伟. 复杂体制雷达辐射源信号分选模型与算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
Pu Yunwei. Deinterleaving models and algorithms for advanced radar emitter signals[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [15] 徐璟, 何明浩, 陈昌孝, 等. 雷达辐射源特征参数提取算法复杂度分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(1): 43-47.
Xu Jing, He Minghao, Chen Changxiao, et al. Algorithm complexity analysis of radar emitter characteristic parameter extraction[J]. Journal of CAEIT, 2013, 8(1): 43-47.
- [16] 卢一相, 高清维. 基于 WTMM 与多重分形的信号毛刺去除方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(11): 1142-1147.
Lu Yixiang, Gao Qingwei. An outlier removal method based on WTMM and multifractal[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, 40(11): 1142-1147.
- [17] 田慧. 基于分数阶 Fourier 变换的雷达目标检测算法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
Tian Hui. Research of radar target detection algorithm based on FRFT[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.

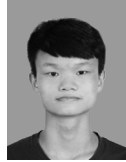
作者简介:



普运伟(1972-), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向: 电子战信号处理、模式识别、计算机应用等, E-mail: puyunwei@126.com。



马蓝宇(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 智能信息处理, E-mail: raveler@foxmail.com。



侯文太(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 智能信息处理。



张天飞(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 智能信号处理。

(编辑: 张黄群)