

基于图形轮廓的雷达信号模糊函数主脊切面特征提取方法

田春瑾¹, 普运伟¹, 郭媛蒲², 时羽²

(1. 昆明理工大学 计算中心, 云南 昆明 650504; 2. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650504)

摘要: 从复杂体制雷达辐射源信号中提取有效的特征参数, 是解决复杂雷达信号分选问题的有效方法。鉴于模糊函数(AF)的主脊切面能很好地描述信号的模糊能量分布信息, 提出一种基于图形轮廓的AF主脊切面特征提取方法, 该方法提取了反映切面图形轮廓变化剧烈程度的累积角度和反映切面图形轮廓固有特征的单位累积长度作为信号分选的特征向量。模糊C均值聚类实验结果表明: 当信噪比不低于12 dB时, 常规信号、线性调频信号、二相编码、四相编码、M伪随机序列和二频编码6种典型雷达信号的分选成功率均为100%, 即使在信噪比为0 dB时, 平均分选成功率也能达到93.5%; 在0~20 dB动态信噪比环境中平均分选成功率达到98.9%。理论分析与分选耗时比较实验结果表明, 所提方法具有较低的算法复杂度, 证实了其有效性和时效性。

关键词: 雷达信号; 模糊函数主脊切面; 图形轮廓; 信号分选

中图分类号: TN974

文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2018)11-2280-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.023

A Novel Feature Extraction Method for the Slice of Ambiguity Function Main Ridge of Radar Signals Based on Graphic Contours

TIAN Chun-jin¹, PU Yun-wei¹, GUO Yuan-pu², SHI Yu²

(1. Computer Center, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, Yunnan, China;

2. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, Yunnan, China)

Abstract: Extracting effective characteristic parameters from the complex radar emitter signals is an effective method to solve the problem of complex radar signal sorting. Because the slice of ambiguity function main ridge of signal can be used to describe the ambiguity energy distribution information of signal, a feature extraction method of the ambiguity function main ridge slice based on graphics contours is proposed. The proposed method can extract two novel features, i. e., cumulated angle and unit cumulative length, which describe the intensity of change and the inherent characteristics of graphics contour, respectively. The experimental results of fuzzy C-means clustering show that the sorting success rate of six types of radar signals, such as normal signal, chirp signal, binary phase shift keying, quaternary phase shift keying, M pseudo-random series, and binary frequency shift keying, is 100% when signal-to-noise ratio (SNR) is no less than 12 dB; and the average success rate of signal sorting is up to 93.5% even if SNR is as low as 0 dB. When SNR changes from 0 dB to 20 dB, the average success rate of signal sorting can

收稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61561028)

作者简介: 田春瑾(1978—), 女, 讲师, 硕士。E-mail: jin_05@163.com

通信作者: 普运伟(1972—), 男, 教授, 博士。E-mail: puyunwei@126.com

reach to 98.9%. The theoretical analysis and the comparative experiment of time consumption for signal sorting show that the proposed method has lower complexity, effectiveness and timeliness.

Key words: radar signal; slice of ambiguity function main ridge; graphic contour; signal sorting

0 引言

雷达信号分选是从随机交错的脉冲信号流中分离出不同雷达的脉冲序列并分选出有用信号的过程。现代电磁信号环境的高度密集以及各种新型复杂体制雷达的广泛应用,使得基于载波频率(RF)、到达时间(TOA)、脉冲宽度(PW)、脉冲幅度(PA)、到达角度(DOA)5个常规参数的分选方法已经不能取得令人满意的效果^[1]。因此,从复杂多变的雷达信号中提取和补充新的特征参数,成为解决雷达信号分选问题亟需解决的问题。

近年来,国内外许多学者对雷达信号特征参数提取进行了深入研究与探索。其中,直接对波形信号提取复杂度特征的有信息维数^[2]、熵特征^[3]等。不同复杂度特征描述信号波形上的不同信息,如分形特征反映了信号的几何尺度信息;范数熵刻画了信号的能量分布情况等。另外,为反映不同信号瞬时相关函数特征的差异性,文献[4-5]提取了信号波形的瞬时自相关特征并取得了不错的识别效果。但由于信号波形容易受到噪声的影响,特征的抗噪性能还有待提高。通过时频变换将信号映射到二维时频空间来提取特征的方法有时频分析、小波变换、Wigner-Ville 分布等^[6-8]。文献[7]基于时频原子提取改进小波变换的特征提高了分选准确率,然而小波变换无法对信号的高频部分进一步分解,无法很好地表示信号的细节信息等。这些特征提取方法在一定程度上弥补了基于常规5参数分选方法的不足,但它们主要针对特定形式的信号,且易受噪声的干扰。

模糊函数(AF)能够较完整地反映信号的内部结构信息,可以挖掘出区别于其他信号的有效特征。文献[9]采用信号AF的二维最大双谱值特征与矩形脉冲和三角形脉冲分别求相像系数作为特征向量来分选雷达信号,这种方法运算简单但抗噪性能有待提高;文献[10]采用穷举法搜索AF的主脊切面,提取了切面的旋转角、1阶原点矩和2阶中心矩特征,这种方法的分选成功率很高但计算量大、耗时较长;文献[11]改进了文献[10]搜索AF主脊切面计算量大的缺点,提取了切面的差值和、差值最大值和差值分布熵3个特征,这种方法计算速度较快,但特

征的分选成功率有所降低。因此,本文从图形轮廓角度提出一种新的AF主脊切面特征提取方法。该方法首先采用基于优势遗传的智能优化算法搜索AF主脊切面来提高速度,然后提取能够描述主脊切面轮廓变化剧烈程度的累积角度与能够描述主脊切面固有特征的单位累积长度特征。仿真实验结果表明,在信噪比SNR不低于0 dB情况下,所提特征能以较高的准确率有效地分选出各种雷达信号,在动态信噪比条件下分选准确率达到98.9%。由此可见,本文所提特征不仅类内聚敛性好,而且抗干扰能力强,具有较好的稳定性和可靠性,可作为经典分选5参数的有效补充。

1 AF主脊切面提取方法

1.1 AF主脊切面

对于任意窄带雷达信号 $s(t)$,其AF^[10]定义为

$$\chi_s(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\xi t} dt, \quad (1)$$

式中: $\chi_s(\tau, \xi)$ 表示信号的AF; τ 为时延; ξ 为频移; t 为时间变量; $s(\cdot)$ 为信号 $s(t)$ 经时延后的表示; $s^*(\cdot)$ 为 $s(\cdot)$ 的共轭。可见,信号AF实质是信号在时延 τ 和频移 ξ 平面上的联合二维时频表示,提供了对信号较完整的描述。因此从信号AF提取特征来分选雷达信号是一种可行思路。

由文献[10]可知,分数自相关运算与AF具有如下关系:

$$[C^\alpha(s, s)](\rho) = \chi_s(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha), \quad (2)$$

式中: C^α 为旋转角 α 的分数域 u_α 上的分数自相关算子,表示对信号 $s(t)$ 作自相关运算;自变量 ρ 为 u_α 域的径向距离。(2)式表明,旋转角 α 的分数域自相关等价于该分数域上AF的径向切面。因此,利用分数傅里叶变换的快速离散方法,可通过(3)式计算AF任意过原点的径向切面:

$$RS(\alpha) = \frac{\int | [C^\alpha(s, s)](\rho) | d\rho}{\int | s(t) | dt}, \quad |\alpha| < \pi/2 \text{ rad}. \quad (3)$$

利用(3)式搜索AF的最大径向切面,便可得到AF主脊(AFMR)。本文采用文献[12]的优势

遗传算法(GA)快速搜索 AFMR 切面。GA 是一种智能优化算法^[12],主要通过自适应启发寻优的方式寻找最优解。该方法以 $RS(\alpha)$ 为目标函数,选择拥有最大 $RS(\alpha)$ 值的切面作为 AFMR 切面。搜索得到的 AFMR 切面是以采样点为横坐标、切面幅度为纵坐标构成的切面曲线。图 1 给出了常规信号(CON)、线性调频信号(LFM)、二相编码(BPSK)、四相编码(QPSK)、M 伪随机序列(M-SEQ)和二频编码(BFSK)6 种典型信号的主脊切面图。

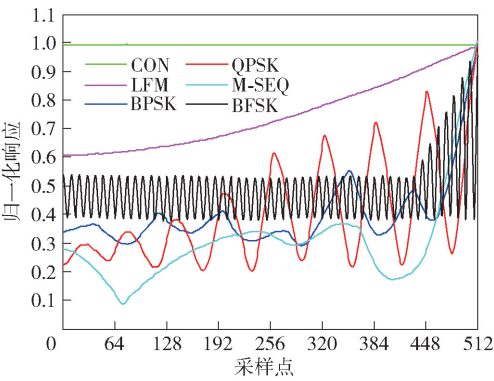


图 1 SNR = 20 条件下 6 种典型信号的主脊切面对比
Fig. 1 Comparison of the slices of main ridges of six typical signals for SNR = 20 dB

1.2 AFMR 去噪处理

由图 1 可知,当 SNR 较低时,噪声对 AFMR 切面影响较大,并表现为切面上出现大量毛刺和突起,给切面特征的提取带来了不便。为了尽可能去除毛刺和突起,从而突出反映切面本身的固有信息,本文采用插值去噪方法对切面进行处理。首先将采样点数为 N 的切面利用 MATLAB 软件自带的插值函数 Spline 扩充为 $21 \times N$ 点的切面,再将原切面的采样点与其左右各 10 个插值得到的采样点求和并做 21 点平均,得到用 N 个采样点表示的 AFMR 切面。该方法在一定程度上消除了随机噪声的部分影响,又不增加该方式的去噪复杂性。

2 AFMR 图形轮廓特征提取方法

由于雷达信号本身的复杂多变特性,信号模糊能量分布也具有复杂性。为了能够充分描述模糊能量的分布特性,本文将 AFMR 切面转换到新的变换域,并采用图像处理的最新方法和相关研究成果提取出信号 AFMR 切面的图形轮廓特征,来分选雷达辐射源信号。具体方法是将 AFMR 切面曲线进行坐标转换,得到一个闭合图形,通过对该闭合图形进行平滑去噪,描述所得图形的轮廓特征。

2.1 AFMR 坐标转换

考虑到信号 AFMR 切面曲线的变化特性和复杂性,可以对切面曲线进行深入研究和探索。为了凸显信号 AFMR 切面的差异性,本文对切面曲线上的各采样点进行如下转换:首先对切面曲线采样点的横坐标进行归一化,以横坐标与 2π 的乘积作为极坐标角度 θ ,将 AF 归一化响应作为极半径 r ,构建如下转换公式:

$$x = r \cos \theta, y = r \sin \theta, \tag{4}$$

式中: x 为转换后图形的横坐标; y 为转换后图形的纵坐标。利用(4)式,可将切面曲线转换为新坐标系下的图形轮廓。

由于低信噪比时信号的 AFMR 坐标转换图像仍有较多毛刺和突起,为了抑制噪声对坐标转换后图形带来的干扰,构建如下公式对转换图形的横坐标与纵坐标进行滑动平均降噪处理:

$$\tilde{f}(n) = \frac{1}{2 \times m + 1} \sum_{i=n-m}^{n+m} f(i), \tag{5}$$

式中: $\tilde{f}(n)$ 为平滑后图形轮廓上的第 n 个点; m 为滑动平均步长; $f(i)$ 为平滑前图形轮廓上的第 i 个点。图 2 给出了 SNR = 0 dB、 $m = 40$ 时实验所用 6 种典型雷达辐射源信号的 AFMR 切面经变换后得到的图形在平滑前和平滑后的比较。

从图 2 可知,AFMR 切面曲线经过坐标转换和去噪处理后,更加形象直观地表现出信号 AF 的变化特性,不仅放大了信号 AFMR 的差异性,而且便于提取新的特征。由此可见,各种信号的转换图形具有不同的图形形状特征,可根据其形状特征提取其独有的特征参数。同类信号的 AFMR 切面在不同信噪比下也具有相似的特性。图 3 进一步给出了各类信号在信噪比分别为 0 dB、6 dB、12 dB 和 20 dB 时去噪后的转换图形。

由图 3 可知,不同信噪比下同类信号的图形轮廓具有相似性,图形形状没有发生明显变化,大小存在简单的缩放,而不同信号的图形轮廓具有较大差异,由此可知这些图形可以反映信号的独有信息,在动态信噪比条件下同样具有稳定性^[13]。

2.2 图形轮廓特征提取方法

转换图形轮廓上的差异可以用于雷达信号的分选与识别。近年来,国内外学者对图形的特征提取做了大量研究,并取得了一些有意义的成果,如轮廓匹配法和特征识别法。用轮廓匹配法进行特征识别时,为实现轮廓匹配,通常先对轮廓点图进行矢量量化,然后进行轮廓矢量图匹配;用二维特征进行识

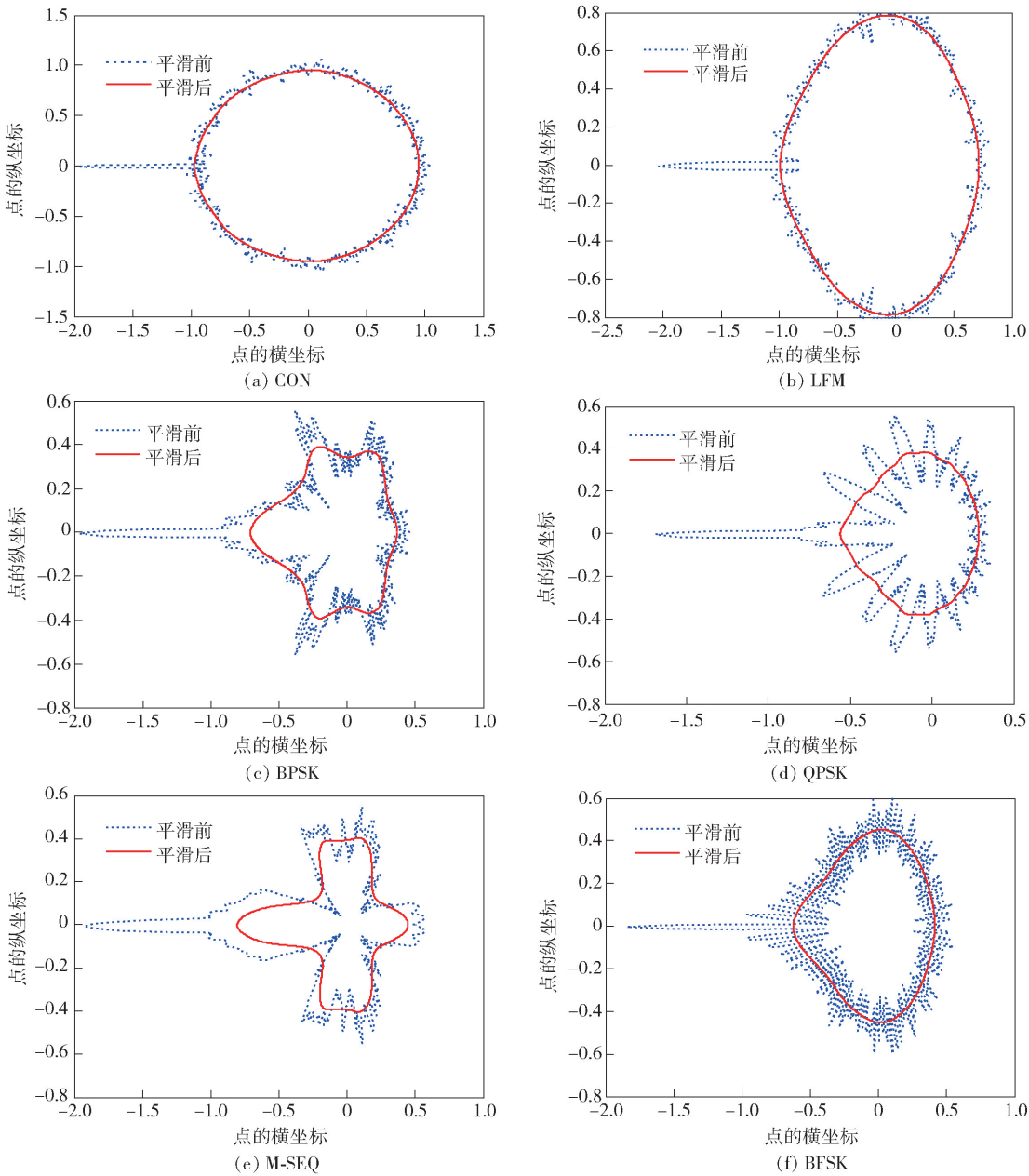


图2 SNR=0 dB 时 6 种典型雷达信号的主脊切面经平滑去噪前后对比

Fig.2 Comparison of the slices of main ridges of six typical signals before and after smoothly denoising for $SNR=0\text{ dB}$

别,是指对零件的边界轮廓测量得到的数据进行特征识别,识别内容包括线段类型、空间关系以及特征线段之间的连接关系等。这两种方法都能很好地提取出图形轮廓的固有特征,具有较好识别效果^[14-16]。

由上述两种方法可知,提取出图形的特征信息是识别图形的关键所在。根据文献[14-16],轮廓线段长度和线段之间的连接关系可以用来描述轮廓特征。因此,为了辨识如图3所示的AFMR切面图形轮廓,本文提取两个能够描述切面转换图形的轮廓特征。由于AF主脊切面是轴对称的,坐标转换而来的图形也是轴对称的,为了降低算法的复杂度,

取 $M=N/2$ 点进行研究, N 为信号长度。

2.2.1 累积角度

由图3可知,不同信号转换图形的轮廓有不同程度和不同大小的突起,为了描述这种切面图形轮廓的变化剧烈程度,本文提取了累积角度特征。其求法是将 M 点中相邻 2 点连接成的线段与横轴形成的夹角相加,求得累积角度特征,如(6)式所示:

$$\left\{\begin{aligned}\beta_i &= \arg \left| \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right|, i = 1, 2, \dots, M, \\ J &= \sum_{i=1}^M \beta_i,\end{aligned}\right. \tag{6}$$

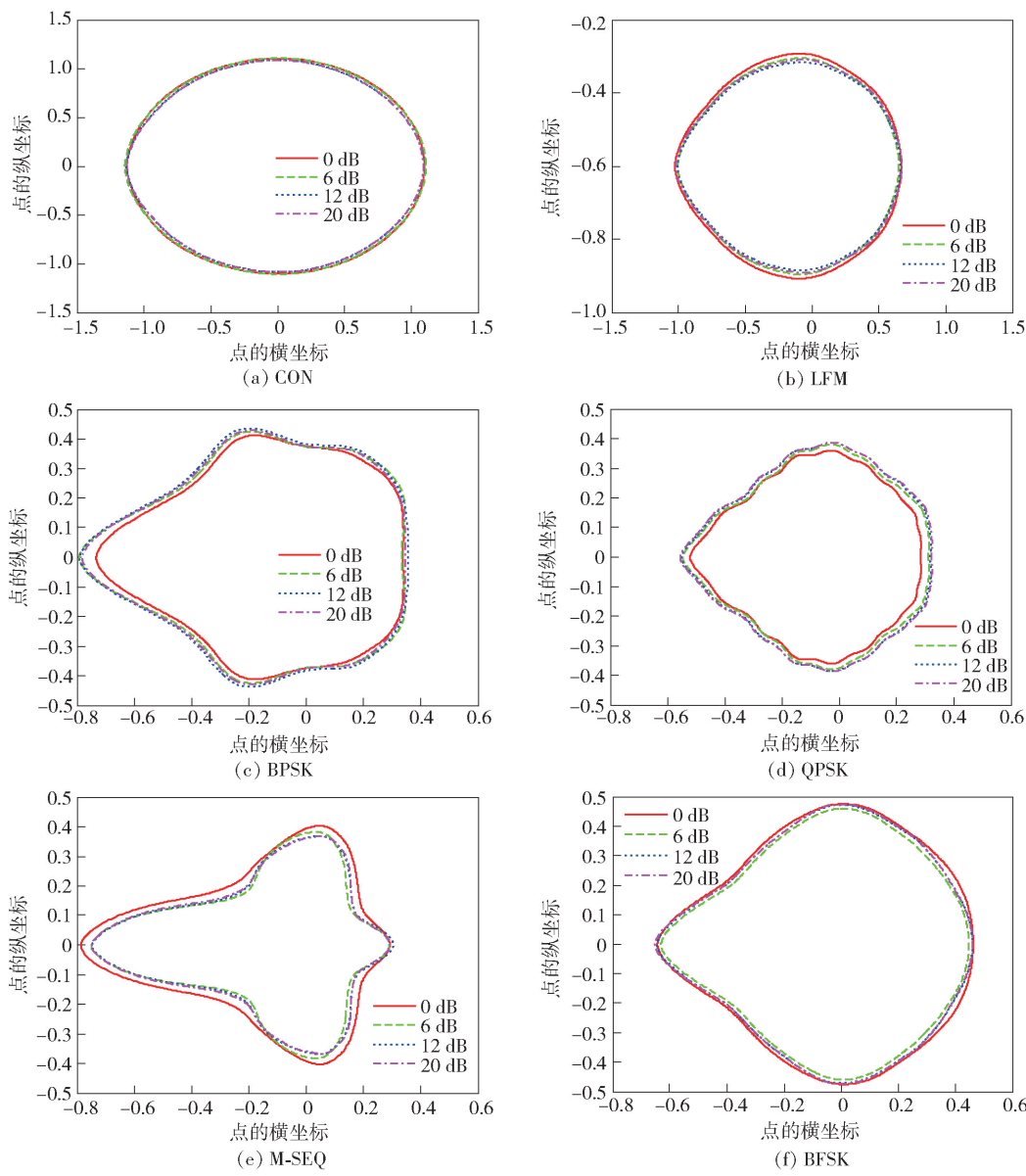


图 3 不同 SNR 下同类信号去噪后的 AF 切面图形轮廓

Fig. 3 Graphic contours of ambiguity function slices of same signal after denoising under different SNRs

式中: x_i 为转换图形的横坐标; y_i 为转换图形的纵坐标; β_i 为相邻 2 点的线段与横轴所构成的夹角; J 为累计角度特征。当图形轮廓上出现突起时,可以用累积角度来区别转换图形突起的大小与数量。

2.2.2 单位累积长度

对比不同信号 AFMR 切面的转换图形可以发现,不同信号转换图形轮廓的大小也有很大差异,可以用图形的周长描述这种差异。但是同种信号不同信噪比下的图形大小会呈比例缩放,为了增加所提特征的抗噪性能,本文提取单位累积长度特征。具体方法是先求出相邻 2 点之间的线段长度,再除以所有线段中最长一段进行归一化处理,最后将所有归一化后的线段长度相加除以总线段数,得到单位

累积长度特征如(7)式所示:

$$\begin{cases} l_i = \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2}, i = 1, 2, \dots, M, \\ L = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{l_i}{\max l_i}, \end{cases}$$

(7)

式中: l_i 为相邻 2 点构成的线段长度; $\max l_i$ 表示这些线段中最长的一条线段长度; L 为单位累积长度特征。用 l_i 除以 $\max l_i$ 是为了将所有线段长度都缩放在(0,1]区间,降低噪声对信号图形轮廓的影响,提高特征的抗噪性能。

本文构建的提取信号 AF 主脊切面图形轮廓特征的算法流程图如图 4 所示。

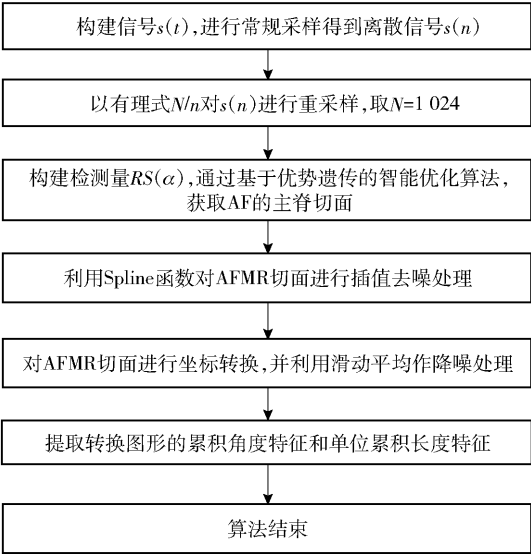


图 4 提取信号图形轮廓特征算法流程

Fig. 4 Flow chart of extracted signal graphic contour feature algorithm

3 仿真实验结果及分析

选取 CON、LFM、BPSK、QPSK、M-SEQ 和 BFSK 6 种典型雷达信号进行仿真实验。其中,LFM 的带宽为 10 MHz, BPSK 和 BFSK 均采用 13 位 Barker 码, M-SEQ 为 (1011100), QPSK 则采用 16 位 Frank 码。所有信号 PW 均为 10 μs、采样频率 f_s 为 60 MHz。另外,除 BFSK 的 2 个频点分别为 10 MHz 和 2 MHz 外,其余信号 RF 为 10 MHz。实验所用计算机 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7-7500U,主频为 2.9 GHz,内存为 8 GB,仿真平台为 MATLAB R2014a。

3.1 固定信噪比实验

使 SNR 从 0 dB 开始以步长 2 dB 变化到 20 dB, 每种信噪比下每种信号各产生 100 个不同初相的测试样本,分别组成 SNR 固定的样本容量为 600 的信号集 1,用本文方法提取信号的图形轮廓特征,采用模糊 C 均值(FCM)聚类算法对特征参数进行聚类分选,并与文献[10-11]所提特征的聚类结果进行对比分析。重复 10 次实验并选择其中某一次典型实验结果详细说明。图 5 给出了部分 SNR 下信号集 1 进行 FCM 聚类后的特征分布情况;表 1 给出了不同信噪比下各类信号的平均分选成功率;与文献[10-11]的实验对比结果列于表 2。

从图 5 中可以看出,当 SNR 分别取值为 6 dB、12 dB 和 20 dB 时,本文提取的图形轮廓特征能很好地分辨 6 种典型雷达信号;当 SNR 为 0 dB 时,特征

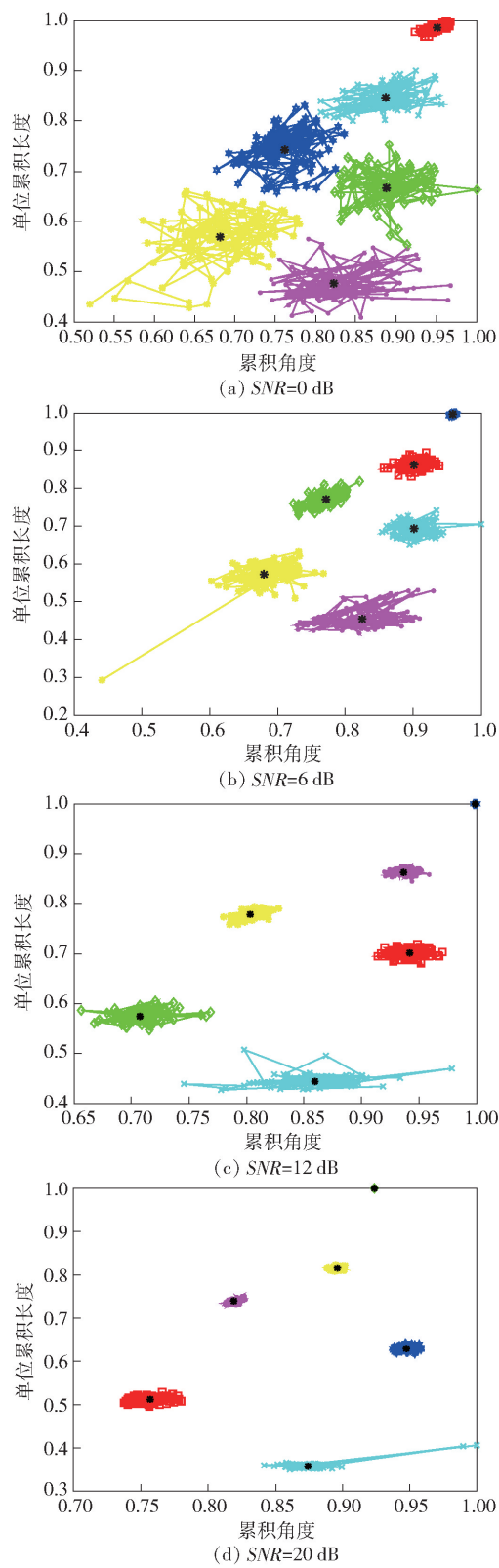


图 5 图形轮廓特征分布情况

Fig. 5 Distribution of graphic contour features

参数存在小的混叠,这是因为此时信号与噪声处于严重重叠状态,噪声对所提特征产生了一定影响,但其仍具有较好的类内聚敛性和类间分离能力。

表 1 固定 SNR 下信号分选成功率

Tab. 1 Success rate of signal sorting under fixed SNR

SNR/ dB	不同典型信号的分选成功率						平均 成功率
	CON	LFM	BPSK	QPSK	M-SEQ	BFSK	
0	100	100	93	86	89	93	93.5
2	100	99	97	95	92	100	97.2
4	100	98	98	100	97	100	98.8
6	100	99	100	100	99	100	99.7
8	100	100	100	99	100	100	99.8
10	100	100	100	99	100	100	99.8
12~20	100	100	100	100	100	100	100

表 2 固定 SNR 下实验结果对比

Tab. 2 Comparison of experimental results under fixed SNR

特征提取方法	不同 SNR 下 6 种典型信号的平均分选成功率			
	0 dB	6 dB	12 dB	20 dB
文献[10]方法	81.2	98.2	100	100
文献[11]方法	83.7	94.3	94.3	95
本文方法	93.5	99.7	100	100

由表 1 进一步可知:当 SNR 不低于 12 dB 时,所有信号的分选成功率均为 100%;当 SNR 为 6 dB 时,只有 1 个 LFM 和 M-SEQ 信号错分为 BPSK 信号,使得 LFM 和 M-SEQ 信号的分选成功率为 99%,其他信号的分选成功率均为 100%;即使在 SNR 为 0 dB 时,6 类信号的平均分选成功率也可达到 93.5%。由此可见,即使在较低信噪比条件下,所提取的两个图形轮廓特征依然可以获得较好的分类结果。

由表 2 可知,与文献[10]和文献[11]所提特征的实验结果相比,在同种条件下,本文方法具有最高的分选成功率。文献[10]的搜索速度较慢,但搜索到的 AFMR 精度较高,分选成功率也较高;文献[11]的搜索速度很快,但其代价是分选成功率有所下降。相比来看,本文以略低于文献[11]的搜

索速度和高于文献[10]的分选成功率来分选雷达信号,且在 0 dB 低信噪比环境下,本文方法的分选成功率比文献[10]高 12.3%,比文献[11]高 9.8%。由此可见,本文所提特征具有较快的搜索速度和较高的分选成功率,在低信噪比情况下表现出了更好的抗噪性能。

3.2 动态信噪比实验

为进一步考察所提特征在 SNR 变化时的性能,在 0~20 dB 范围内每隔 2 dB 对每类信号各取 10 个随机样本,组成 1 个 660 样本的信号集 2,重复产生 10 个信号集 2。图 6 给出了某个信号集 2 的聚类结果,表 3 给出了信号平均分选成功率,与文献[10~11]动态信噪比实验对比结果列于表 4。

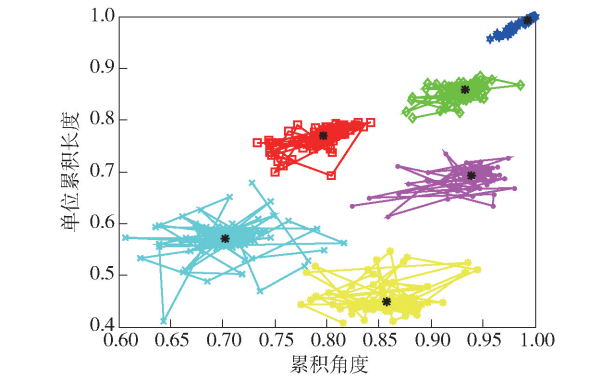


图 6 动态信噪比下的聚类效果

Fig. 6 Clustering results under dynamic SNR

表 3 动态信噪比下的分选成功率

Tab. 3 Sorting results under dynamic SNR

典型 信号	不同典型信号的分类个数						平均成 功率/%
	CON	LFM	BPSK	QPSK	M-SEQ	BFSK	
CON	110	0	0	0	0	0	100
LFM	0	109	0	0	0	0	99.09
BPSK	0	1	110	0	3	1	100
QPSK	0	0	0	108	0	0	98.18
M-SEQ	0	0	0	2	107	0	97.27
BFSK	0	0	0	0	0	109	99.09

表 4 动态信噪比下的实验结果对比

Tab. 4 Comparison of experimental results under dynamic SNR

特征提取方法	不同典型信号的分选成功率						平均分选成功率
	CON	LFM	BPSK	QPSK	M-SEQ	BFSK	
文献[10]方法	100	100	95.5	100	94.6	100	98.35
文献[11]方法	82	73	100	77	86	87	84.20
本文方法	100	99.1	100	98.2	97.3	99.1	98.90

由图 6 可以看出,6 种信号的 AFMR 切面图形轮廓特征仍然具有较好分辨能力,各类信号间的混叠较小。表 3 进一步表明:在动态信噪比条件下,CON 信号和 BPSK 信号的分选成功率均为 100%;LFM、BFSK 有且只有 1 个信号错分为其他信号,使得它们的分选成功率为 99.09%;各类信号的平均分选成功率达到 98.94%。由此可见,SNR 在 0 ~ 20 dB 动态变化范围内,本文方法所提取的 AFMR 切面图形轮廓特征依然具有较好的聚类特性和较高的可靠性,而且对信噪比的变化显示出了较好稳定性。

从表 4 可以看出,在动态信噪比环境下,本文方法的平均分选成功率为 98.9%,比文献[11]高 14.74%,其中 LFM 信号比文献[11]高 26.1%。由此可见本文方法比文献[11]具有更好的稳健性。文献[10]的平均分选成功率为 98.35%,本文方法略高于文献[10],表明了本文方法同样具有较好的类内聚敛性。

3.3 特征提取耗时对比实验

为了考察本文方法提取特征的时效性,在 SNR=0 dB 时每种信号随机产生 100 个测试样本,分别使用本文方法、文献[10-11]方法提取特征,并记录特征提取耗时。表 5 给出了提取一个信号特征耗时的实验对比结果。

表 5 特征提取耗时实验结果对比
Tab.5 Comparison of feature extraction time-consuming experimental results

特征提取 方法	不同典型信号的特征提取耗时						平均 耗时
	CON	LFM	BPSK	QPSK	M-SEQ	BFSK	
文献[10]方法	4.69	4.47	4.34	4.57	4.62	4.42	4.52
文献[11]方法	0.96	1.09	1.12	1.12	0.99	0.95	1.04
本文方法	0.78	2.51	1.62	1.73	1.69	0.83	1.53

由表 5 可知,文献[10]的特征提取耗时最久,平均搜索时长为 4.52 s,这是因为文献[10]搜索 AFMR 切面采用穷举法,这种方法的计算量较大,搜索速度远远落后于智能优化算法。文献[11]的平均特征提取耗时为 1.04 s,本文方法耗时为 1.53 s。对于文献[11]采用的粒子群优化(PSO)算法而言,每种信号的耗时比较平均,大约在 1 s 左右;对于本文的 GA 而言,搜索时的收敛代数与信号形式有关,因此相对简单的 CON 和 BFSK 信号用时较短。本文方法耗时虽然略高于文献[11],但差距很小,平均耗时保持在 1 ~ 2 s 左右。表明本文方法同样具有较好的时效性,在保持较高分选成功率的基础上

尽可能提高了搜索速度,与固定信噪比实验的结论一致。

下面从算法复杂度方面作进一步对比分析。算法复杂度是指执行该算法所需计算机资源的多少,主要考虑算法的时间复杂度。衡量算法的时间复杂度主要通过计算算法执行加减乘除等运算的时间^[17]。本文提取图形轮廓特征的算法复杂度为

$$(43.5N+2\ 147)C_a+(4N+858)C_m+(2N+19)C_d+\\ \left(\frac{5N}{2}-1\right)C_s+\left(\frac{N}{2}-1\right)C_e+840C_b,$$
 (8)

文献[10]提取矩特征的算法复杂度为

$$(3\ 602N+3\ 601)C_a+\left(\frac{7N}{2}+1\ 801\right)C_m+\\ (N+1\ 800)C_d+C_e,$$
 (9)

文献[11]提取局域差分特征的算法复杂度为

$$(41N+3\ 330)C_a+3\ 540C_m+80C_d+60C_{\log}+\\ \left(\frac{N}{2}-85\right)C_b,$$
 (10)

(8)式~(10)式中:信号长度 N 取 1 024; C_a 指加减法运算; C_m 、 C_d 分别为乘法和除法运算; C_s 为三角函数运算; C_e 为开方运算; C_b 为比较运算; C_{\log} 为对数运算。从文献[17]可知,在不同数据条件下,乘法与加法、减法以及比较运算的时间基本相同,除法运算、三角函数运算和开方运算的时间相对较长,因此可以将(8)式~(10)式化简如表 6 所示。

表 6 特征提取的算法复杂度
Tab.6 Complexities of feature extraction algorithms

特征提取方法	算法复杂度
文献[10]方法	$3\ 611NC_m+3NC_d$
文献[11]方法	$48NC_m$
本文方法	$51NC_m+5NC_d$

由表 6 可知:文献[10]的算法复杂度最高、时效性较差,特征提取耗时对比实验验证特征提取所用时间也最长;文献[11]的算法复杂度最低,特征提取耗时也最短,这是因为文献[11]的智能优化算法过程简单、易于实现,且所提特征算法复杂度较低。本文方法在适当牺牲搜索效率的前提下提高了分选成功率,因此本文算法的复杂度虽然略低于文献[11],但保证了实验结果的高准确性。

综上所述,本文所提特征在较低信噪比下具有很好的分选效果,在混合信噪比中同样具有较高的稳定性。虽然算法复杂度相对偏高,但也取得了令人满意的时效性,增加了所提方法的实用性。

4 结论

本文在构建 AF 图形轮廓基础上,提取累积角度和单位累积长度两个图形轮廓特征,以表征信号图形轮廓方面的差异性。仿真实验结果表明,本文所提取的特征较细致和充分地反映了信号模糊能量的分布特性,具有较好的稳定性和类内聚敛性,且在 SNR 不低于 0 dB 情况下,具有较高的分选成功率,从而证实了本文所提取的特征具有一定工程可行性。

参考文献 (References)

- [1] 沈家煌,黄建冲,朱永成. 雷达辐射源信号快速识别综述[J]. 电子信息对抗技术,2017,32(5):5-10.
SHEN Jia-huang, HUANG Jian-chong, ZHU Yong-cheng. Overview of radar signal fast recognition[J]. Electronic Information Warfare Technology,2017,32(5):5-10. (in Chinese)
- [2] 曲志昱,毛校洁,侯长波. 基于奇异值熵和分形维数的雷达信号识别[J]. 系统工程与电子技术,2018,40(2):303-307.
QU Zhi-yi, MAO Xiao-jie, HOU Chang-bo. Radar signal recognition based on singular value entropy and fractal dimension[J]. Systems Engineering and Electronics,2018,40(2):303-307. (in Chinese)
- [3] Pu J F, Chen H, Zhang X Z, et al. A radar signal sorting algorithm based on entropy features set pair analysis[C]//Proceedings of the 2nd Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications. Dalian, China:IEEE,2016:1168-1173.
- [4] 王茂汶,李涛,周涛. 基于瞬时自相关和 FRFT 的 LFM 信号检测性能研究[J]. 电子信息对抗技术,2013,28(5):1-5,77.
WANG Mao-wen, LI Tao, ZHOU Tao. Detection performance of LFM signal based on instantaneous autocorrelation and FRFT[J]. Electronic Information Warfare Technology,2013,28(5):1-5,77. (in Chinese)
- [5] Baccigalupi A, Liccardo A. The Huang Hilbert transform for evaluating the instantaneous frequency evolution of transient signals in non-linear systems[J]. Measurement,2016,86:1-13.
- [6] Dudezyk J. A method of feature selection in the aspect of specific identification of radar signals[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences,2017,65(1):113-119.
- [7] 贾亚飞,朱永利,王刘旺. 基于 VMD 和 Wigner-Ville 分布的局放信号时频分析[J]. 系统仿真学报,2018,30(2):569-578.
JIA Ya-fei, ZHU Yong-li, WANG Liu-wang. Time-frequency analysis of partial discharge signal based on VMD and Wigner-Ville distribution[J]. Journal of System Simulation,2018,30(2):569-578. (in Chinese)
- [8] Zhang W X, Sun Fu L, Wang B. Radar signal intra-pulse feature extraction based on improved wavelet transform algorithm[J]. International Journal of Communications, Network and System Sciences,2017,10(8):118-127.
- [9] 陈昌孝,何明浩,徐璟,等. 基于模糊函数相像系数的雷达辐射源信号分选[J]. 电波科学学报,2014,29(2):260-264.
CHEN Chang-xiao, HE Ming-hao, XU Jing, et al. Radar emitter signal sorting based on resemblance coefficient of ambiguity function[J]. Chinese Journal of Radio Science,2014,29(2):260-264. (in Chinese)
- [10] 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 Yun-wei, JIN Wei-dong, 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. (in Chinese)
- [11] 张天飞. 模糊函数主脊切面 PSO 搜索方法及分选特征研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2013:35-49.
ZHANG Tian-fei. Research on the PSO search method and separation characteristics of the slice of ambiguity function main ridge[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2013:35-49. (in Chinese)
- [12] 时羽,普运伟,张天飞. 基于优势遗传的模糊函数主脊切面智能搜索方法[J]. 红外与毫米波学报,2013,32(1):80-85.
SHI Yu, PU Yun-wei, ZHANG Tian-fei. Intelligently searching the slice of ambiguity function main ridge based on superiority inheritance[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves,2013,32(1):80-85. (in Chinese)
- [13] 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 and sorting feature extraction of AFMR slice of radar emitter signals[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2013. (in Chinese)
- [14] Gruen A, Akca D. Least squares 3D surface and curve matching[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2005,59(8):151-174.
- [15] Chang H, Tsai F. Reconstructing three-dimensional specific curve building models from a signal perspective view image[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2012,XXXIX-B6(1):101-106.
- [16] Marcin Woźniak, Dawid Połap, Christian Napoli, et al. Graphic object feature extraction system based on Cuckoo Search Algorithm[J]. Expert Systems With Applications,2016,66:20-31.
- [17] 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 Ming-hao, CHEN Chang-xiao, et al. Algorithm complexity analysis of radar emitter characteristic parameter extraction[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology,2013,8(1):43-47. (in Chinese)