文章编号: 1001-0920(2019)10-2178-07 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.0144

基于模糊函数三维特征的雷达辐射源信号分选方法

普运伟[1,2†], 侯文太[1], 郭媛蒲[1], 马蓝宇[1]

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

摘 要: 提取并补充新的特征参数,是解决当前复杂体制雷达辐射源信号分选难题的有效途径. 由于模糊函数能够很好地展现信号波形的内在信息,从主、侧视角分别提取模糊函数三维图的主岭重心、主峰分布半径作为雷达辐射源信号分选的特征向量. 核模糊C均值聚类实验表明,所提出方法在10 dB以上的固定信噪比环境下分选6类典型信号的成功率均为100 %,即使在0 dB环境下,分选成功率也保持在86.96 %以上;在0～20 dB动态信噪比环境下分选成功率达到91.97 %,说明所提特征能较好地反映信号间的脉内差异,具有类内聚敛性强和类间分离度大的优点. 理论分析与分选耗时比较实验表明,所提出方法分选单个信号的平均耗时仅需0.13 s,仅为现有基于模糊函数主脊切面特征分选方法的6.91 %,证实了所提出方法的时效性.

关键词: 电子对抗；雷达辐射源；信号分选；模糊函数；特征提取；聚类

中图分类号: TN974 **文献标志码:** A

A sorting method of radar emitter signal based on three dimensional feature of ambiguity function

PU Yun-wei[1,2†], *HOU Wen-tai*[1], *GUO Yuan-pu*[1], *MA Lan-yu*[1]

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

Abstract: Extracting and supplementing the new feature parameters is an effective way to solve the sorting problem of radar emitter signal in present complex systems. Because the ambiguity function can display the intrinsic information of signal waveform well, the main hill center and the main peak distribution radius of the three-dimensional graphs of ambiguity function are extracted from the main and side views as the feature vector of the signal sorting of radar emitter. The kernelized fuzzy C-means clustering experiment shows that the success rate of sorting six typical signals is 100% with the fixed signal to noise ratio (SNR) environment over 10 dB. The success rate of sorting is more than 86.96% even in 0 dB and the success rate is 91.97% in 0–20 dB dynamic SNR. These results show that the proposed feature vector can better reflect the intra-pulse differences between signals and it has strong compactness within clusters and large separation between clusters. Theoretic analysis and the comparative experiment of time consumption for signal sorting show that the average time consuming of sorting single signal by using the proposed method is only 0.13 s, which is 6.91% of the time required by using the sorting method based on the main ridge slice feature of the ambiguity function, which proves the timeliness of the proposed method.

Keywords: electronic countermeasure；radar emitter；signal sorting；ambiguity function；feature extraction；clustering

0 引 言

对未知雷达辐射源信号进行准确分选是当前电子对抗领域迫切需要解决的难题. 随着电子战中电磁环境的日新月异以及复杂体制雷达的迅速发展,要快速并可靠地从截获的敌方雷达辐射源信号中分离出不同雷达的脉冲序列,仅依靠传统的载波频率(RF)、到达时间(TOA)、脉冲宽度(PW)、脉冲幅度(PA)、到达角度(DOA)5个常规参数已经非常困难[1]. 为满足当前战场环境中分选雷达辐射源信号的快速性和准确性需求, 提取并补充新的特征参数是一种可行的方法.

文献[1]指出,模糊函数(Ambiguity function, AF)能较为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. 目前,以模糊函数主脊(Ambiguity function main ridge, AFMR)切面为研究对象,提取到了分选效果和抗噪性能较好的特征参数,如矩特征、图形轮廓特征、局域差分特征等. 然而,基于AFMR切面特征分选方法的时效性,却受限

收稿日期: 2018-01-29；**修回日期:** 2018-06-04.
基金项目: 国家自然科学基金项目(61561028).
†通讯作者. E-mail: puyunwei@126.com.

于利用分数自相关(Fractional autocorrelation, FA)计算并搜索AFMR切面所增加的问题规模和运算复杂度. 采用基于优势遗传的GA算法[2]、改进PSO算法[3]虽然能使AFMR切面的搜索速度得到明显提高,但获取每个信号AFMR切面特征的时间仍然保持在秒量级.

由于直接绘制信号的AF三维图比较快捷,并且除主脊外一些模糊能量较高的分布区域也蕴含着丰富的脉内信息,本文提出一种提取雷达辐射源信号AF三维特征的有效方法. 首先从主、侧视角分别对AF三维图进行观察,选取“岭”和“峰”两种地貌作为进一步的研究对象;然后利用矩方法和阈值法提取能够表征信号模糊能量三维分布特性的参数. 核模糊C均值(Kernelized fuzzy C-means, KFCM)聚类实验[4]验证了本文方法能以现有的基于AFMR切面特征分选方法15倍以上的速度有效地完成分选,大大提高了基于信号模糊能量分选方法在实际工程中应用的可能性.

1　模糊函数三维图

对于任意窄带雷达信号$s(t)$,其模糊函数AF定义为[5]

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

其中: $s^*(t)$为$s(t)$的共轭,τ为时延,ξ为频移. 可见,信号的AF是信号在时延τ和频移ξ平面上的联合二维时频表示,能较好地展现信号的波形特性和结构信息.

以τ和ξ为X-O-Y平面,根据信号长度生成时频域网格采样点,并利用快速傅里叶变换(Fast fourier transform, FFT)计算采样点对应的AF值,通过Matlab自带的surf函数便可绘制出信号的AF三维图. 图1给出了6类典型信号的AF三维图,可以证明,AF三维图具有关于原点对称、在原点取得最大值、模糊体积不变性和唯一性等性质.

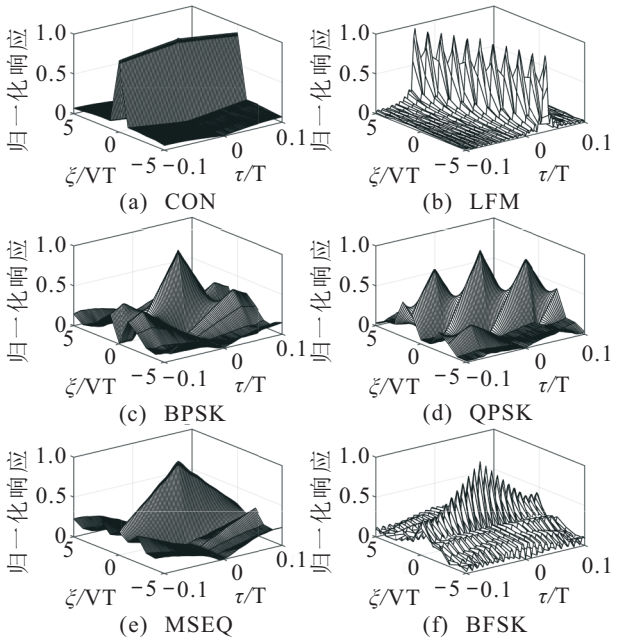


图1　6类典型信号的AF三维图

AF唯一性定理指出,信号模糊体积的分配完全取决于信号本身,这为从AF三维图的角度来获取信号的特征参数提供了理论基础. 此外, 由图1可以直观地看出,不同的信号其AF三维图的形状和分布有着显著差异,因此直接从AF三维图中提取有效分选特征参数具有可行性.

2　模糊函数三维特征提取方法

由于AF三维图有着与山峰群类似的结构特点,分别从主、侧视角对AF进行观察,能够较为全面地挖掘出AF的三维分布特性. 这里,定义AF三维图主视角中的地貌为“岭”,侧视角中的地貌为“峰”.

2.1　AF主视角特征提取方法

从主视角观察,能得到AF三维图中“岭”的走势. 岭的形状低缓而连绵, 拉远视角将得到一系列岭所构成的剪影图像. 由于构成剪影的岭都是相同时延条件下模糊能量最高的成员,不妨称之为“主岭”,如图2所示. 可以看出,主岭包含了大部分AFMR切面以及一些在相同时延条件下模糊能量大于主脊能量的岭. 因此, 主岭和AFMR切面一样具有独特的分布特性以及优秀的抗噪性能,可采用矩估计的方法对AF主岭的分布特性作进一步描述.

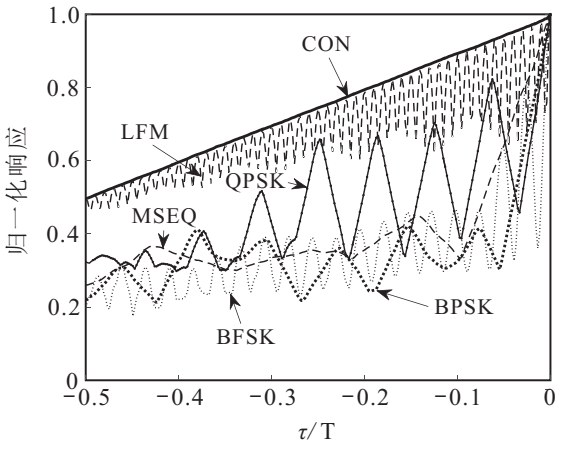


图2　6类典型信号的AF主岭

设AF主岭经过投影后位于的采样域为α,相对应的AF主岭为HIL(α),根据AF的对称性,取$(0,\alpha/2)$半边,定义AF主岭的一阶原点矩$\overline{M}_\alpha$为主岭重心,即

$$\overline{M}_\alpha=\frac{\int_0^{\frac{\alpha}{2}}\alpha|\mathrm{HIL}(\alpha)|^2\mathrm{d}\alpha}{\int_0^{\frac{\alpha}{2}}|\mathrm{HIL}(\alpha)|^2\mathrm{d}\alpha}. \quad (2)$$

2.2 AF侧视角特征提取方法

与AF主视图相比,AF侧视图刻画了AF中“峰”的地貌特点. 峰的形状高耸而孤立,由于海拔高的峰所对应的模糊能量较高,抗噪能力较强,适合作为提取特征的对象,称之为“主峰”. 图3给出了6类典型信号的AF主峰,可以看出,不同信号主峰的分布范围有较大的差异, 因此以主峰分布半径为特征参数来区分信号的频移特性是可行的.

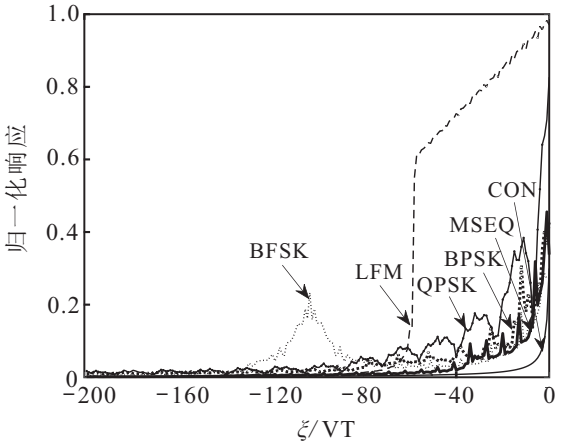


图 3 6类典型信号的AF主峰

目前运用较多的寻峰算法有阈值法、高斯拟合法、对称零面积法和小波变换法等[6-9]. 由于阈值法适合强单峰的识别,且运算复杂度较低,通过阈值法能够快捷而稳定地找出AF侧视图中主峰的位置.

由于本文探讨的是所提特征在完全未知信号先验信息情况下的分选能力,采用高斯随机信号来模拟战场环境中任意时间地点所截获的敌方雷达信号,并通过对其AF归一化响应值进行概率统计的方法来确定ξ是合理并且可行的. 在此利用Matlab统计了1 000个均值为0、方差为1的高斯随机信号的AF归一化响应,并认定显著程度为10 %的峰为主峰. 统计结果显示,显著性水平为0.1的情况下AF主峰高度的拒绝域为$(0, 0.120\,6)$,因此本文仿真实验中所用的主峰判定阈值为0.120 6. 需特别说明的是,阈值ξ的选取取决于分选场景的需求和对主峰显著性水平的认定,因此在实际应用中可以根据已掌握的信号先验信息对ξ进行适当调整,以达到最佳的分选效果.

设AF侧视图位于采样域β,相对应的AF归一化响应为$\mathrm{PEK}(\beta)$,根据AF的对称性及最大值原理,AF主峰距中心的最大距离r的计算式为

$$r = \mathrm{median}(\beta) - \min(\beta_{\mathrm{PEK}>\xi}). \tag{3}$$

r定义了AF的主峰分布半径,其值完全取决于信号的多普勒频移特性.

2.3 主、侧视图的降噪处理

尽管主岭、主峰所对应的模糊能量较高,噪声的影响依旧不可忽略. 噪声的存在不仅使原本的视图中增加了许多毛刺而且使它们的走势越加接近,导致提取的特征产生交叠,降低了信号分选的成功率.

考虑到均值滤波对加噪波形较好的平滑作用[10],构建5点均值滤波变换

$$\bar{f}(n) = \frac{1}{2\times 5+1}\sum_{i=n-5}^{n+5} f(i). \tag{4}$$

通过此变换对信号AF主、侧视图进行预处理,能在一定程度上减小噪声对信号特征参数的影响.

综上所述,基于模糊函数三维特征雷达辐射源信号分选方法的算法流程如图4所示.

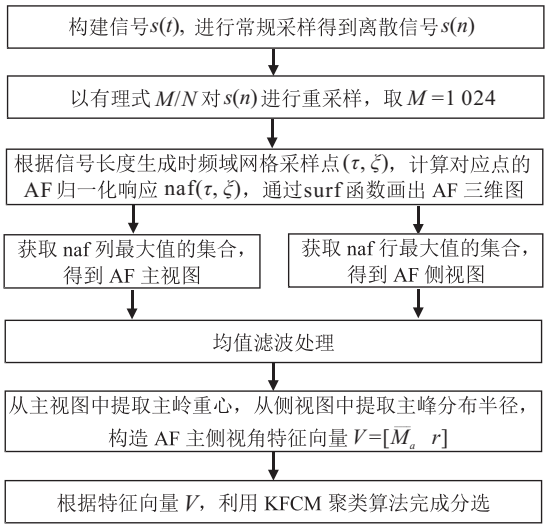


图 4 本文算法流程

上述算法中,将信号重采样为M点的目的是为了使信号保持相同的长度,以消除信号长度对特征参数的影响.

3 实验结果及分析

选取常规信号(CON)、线性调频信号(LFM)、二相编码(BPSK)、四相编码(QPSK)、M伪随机序列(MSEQ)和二频编码(BFSK)6类典型信号进行特征参数聚类实验. 其中,LFM的带宽为10 MHz, BPSK和BFSK均采用13位Barker码,QPSK采用16位Frank码,MSEQ所用伪随机序列为(1011100). 所有信号脉宽均为10 μs,除了BFSK信号的两个频点分别取10 MHz和2 MHz外,其余信号的载频均为10 MHz. 实验所用计算机为微星GE62,CPU为2.6 GHz,内存为8.0 G,仿真平台为MATLAB 2015b.

3.1 固定信噪比实验

SNR从-20 ~ 20 dB每隔2 dB,对每类信号产生100个不同初相的测试样本,分别组成SNR固定的21

表1　信号集1的平均分选成功率　　%

信噪比/dB	−20～−6	−4	−2	0	2	4	6	8	10～20
CON	—	70.52	90.53	100	100	100	100	100	100
LFM	—	75.33	89.32	100	100	100	100	100	100
BPSK	—	40.23	55.18	65.03	79.96	84.56	96.69	98.03	100
QPSK	—	38.44	60.23	69.75	80.66	87.03	97.06	98.22	100
MSEQ	—	41.55	61.44	80.57	85.23	92.35	96.42	99.01	100
BFSK	—	73.87	86.77	100	100	100	100	100	100
平均	—	56.65	74.45	86.96	90.97	93.99	98.52	99.04	100

个600样本的信号集1,利用本文方法提取各个信号的AF三维特征并采用KFCM聚类算法对特征参数进行聚类分选. 表1给出了各信噪比下所提特征对信号集1进行10次实验的平均分选成功率.

由表1可见,CON、LFM和BFSK三种信号在0～20 dB范围内的分选成功率均为100%. 结合图2和图3不难发现,这是因为CON、LFM信号主岭的形状和倾斜角度明显区别于其他非线性调制信号,并且仅有BFSK信号的主峰分布半径超过了100采样点,因此这3种信号在低信噪比下依然能保持自身的特性,易于区分. 另外,由于BPSK、QPSK、MSEQ三种信号同为非线性调制,其AF三维图存在一定的交叠,导致它们在8 dB以下时的分选产生了一定的误差. 从整体来看,采用所提特征分选6类信号的成功率随着信噪比的逐渐降低呈下降趋势,当信噪比在10 dB以上时6类信号分选成功率均为100%,即使在0 dB,平均分选成功率也保持在86.96%以上. 直到信噪比继续下降到−4 dB时,特征参数才产生了较为严重的交叠,平均分选成功率降到了60%以下.

信噪比为0 dB时信号与噪声无论在时域还是频域上都已处于严重交叠的状态,已能基本满足当前复杂电磁环境的要求,因此,本实验验证了所提特征在较低信噪比条件下依然具有良好的类内聚敛性和类间分离能力.

3.2　动态信噪比实验

为验证本文所提特征在SNR变化时的性能,从0～20 dB中每隔2 dB对每类信号各取10个不同初相的测试样本,组成一个660样本的信号集2. 图5给出了信号集2的分选效果图,图中折线相连的同形状点代表分成一类的信号. 表2给出了本实验详细的分选统计数据. 由图5不难看出,在0～20 dB动态信噪比环境下,CON、LFM、BFSK信号的特征参数分布较为集中且与其他信号相隔较远,展现出了较好的抗噪性能. BPSK信号和QPSK信号的特征参数在SNR的动态变化下产生了部分交叠,这是由于BPSK信号和

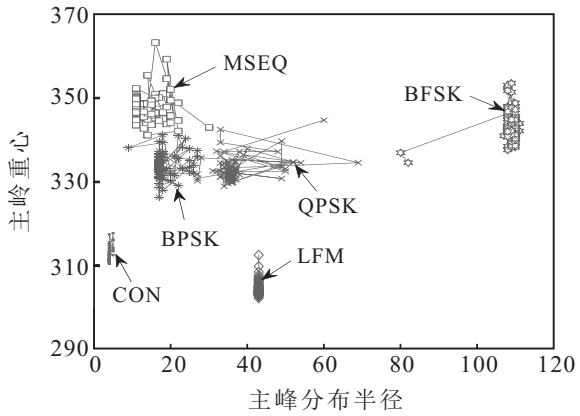


图5　信号集2的分选效果图

表2　信号集2的分选结果统计

	CON	LFM	BPSK	QPSK	MSEQ	BFSK	成功率/%
CON	110	0	0	0	0	0	100
LFM	0	110	0	0	0	0	100
BPSK	0	0	93	0	11	0	84.54
QPSK	0	0	14	107	0	0	97.27
MSEQ	0	0	3	1	99	0	90.00
BFSK	0	0	0	2	0	110	100
平均							91.97

QPSK信号的主要区别在于相位调制的阶数不同,而频域上的差异并不是十分显著,导致二者的主峰分布半径较为接近,抗噪性能略有下降. 由表2可以看出,有12.72%的BPSK信号错分到了QPSK信号、10%的MSEQ信号错分到了BPSK信号,而CON、LFM、BFSK信号的分选成功率均为100%,总体平均分选成功率达到了91.97%,说明所提特征参数能够适应较大动态信噪比情形.

3.3　调制参数实验

为探究所提特征对相同调制类型、不同调制参数的雷达信号的分选能力,保持信噪比在0～20 dB变化,每种信号在10 MHz、50 MHz、100 MHz三种载频(LFM信号为带宽,BFSK信号为第1频点载频)条件下各取110个样本,组成6个330样本的信号集3;在5μs、10μs、20μs三种脉宽条件下各取110个样本,组

成6个330样本的信号集4. 利用所提出方法对信号集3和信号集4进行分选,表3和表4分别给出了这两种信号集10次实验的平均分选成功率.

表3 信号集3的平均分选成功率 %

载频	10 MHz	50 MHz	100 MHz	平均
CON	95.77	98.48	99.21	97.82
LFM	96.32	98.58	97.44	97.45
BPSK	94.21	88.87	92.42	91.83
QPSK	90.01	92.20	98.51	93.57
MSEQ	45.21	46.38	38.24	43.28
BFSK	95.66	94.57	96.71	95.65

表4 信号集4的平均分选成功率 %

脉宽	5μs	10μs	20μs	平均
CON	98.54	94.63	98.57	97.25
LFM	99.97	94.53	95.58	96.69
BPSK	90.46	87.46	99.54	92.49
QPSK	85.43	98.82	91.82	92.13
MSEQ	43.72	45.43	39.51	42.89
BFSK	45.87	49.62	44.38	46.62

由表3和表4可以看出,所提特征分选调制参数不同的CON、LFM、BPSK和QPSK信号的平均分选成功率均在90 %以上. 从AF的计算式来看,载频和脉宽会影响CON信号AF延展区域的大小及其频移方向上零点的位置,因此所提特征对CON信号具备较强的可分性. 对于LFM信号而言,改变频带带宽或者脉宽都会导致其调制斜率发生改变,使主岭重心发生偏移,易于区分. 此外,由于BPSK信号和QPSK信号相当于对LFM信号的相位进行采样, 可近似为阶梯LFM信号,因此也同样具备可分性.

利用所提特征较难区分调制参数不同的MSEQ信号和脉宽不同的BFSK信号,但对频点频率不同的BFSK信号有较好的分选效果. 这是因为MSEQ信号的AF很大程度取决于伪随机编码序列,对载频和脉宽的变化不太敏感,因此难以区分. 其次,对采用Barker编码的BFSK信号而言,码元个数和频点对应的载频才是其AF的主要影响因素. 由主峰分布半径的物理意义可知,BFSK信号的主峰分布半径取决于BFSK信号两频点的频率差,因此所提特征可以将频点频率差不同的BFSK信号区别开来.

从本实验可以看出,所提特征对信号的AF提供了较为细致的描述, 即便是相同调制类型的信号,只要其AF的分布不同,利用本文所提特征便能进行有效的分选. 但由于调制参数对信号AF的影响程度不尽相同,对MSEQ这类AF对调制参数的变化并不敏感的信号来说,分选效果不太理想. 可以预见的是,经典五参数分选特征会对本实验结果产生积极的作用. 进一步实验表明,利用特征向量$V = [\overline{M}_\alpha \quad r \quad \mathrm{RF} \quad \mathrm{PW}]$即可对信号集3和信号集4进行准确分选. 因此本文所提特征适合作为经典五参数分选特征的有效补充,但并不能完全取而代之. 在日益密集的电磁环境下,只有脉内特征参数和脉间特征参数的有机结合才能完成全方位和高质量的分选.

3.4 分选耗时比较实验

为了进一步考察所提方法的时效性,保持信号参数及仿真环境与文献[1-3]相同,利用Matlab自带的计时工具tic和toc统计分选6类信号的耗时. 表5给出了本文方法与文献[1-3]中所采用的AFMR切面特征分选方法分选10次单个6类信号的平均耗时对比.

表5 信号分选耗时比较 s

	文献[1]方法	文献[2]方法	文献[3]方法	本文方法
CON	9.58	1.34	1.73	0.13
LFM	9.59	4.28	1.93	0.14
BPSK	9.59	2.67	2.03	0.13
QPSK	9.55	2.68	2.02	0.13
MSEQ	9.55	2.12	1.82	0.13
BFSK	9.53	1.19	1.77	0.13
平均	9.56	2.38	1.88	0.13

由表5可以看出,本文方法能够大大缩短信号分选的时间,平均耗时仅为文献[1]方法的1.36 %. 与文献[2]、文献[3]所采用的智能优化方法相比,分选速度分别提高了18.31倍和14.49倍. 可见,本文方法在提取出分类性能优良的分选特征的同时,还具有非常明显的速度优势. 由于真实战场中会出现大量甚至海量的雷达信号,如果不能快速并有效地识别,则对作战构成巨大的潜在威胁,时效性是雷达辐射源信号分选方法的重要评价准则[11-14]. 下面从问题规模和算法复杂度两个方面对本文方法的时效性作进一步分析.

3.4.1 问题规模对比

根据AF的原点对称性定理,还原完整的AF时频域分布只需要计算右半平面的AF值即可. 穷举法提取AFMR切面需要利用旋转算子遍历$|\alpha| \leqslant \pi/2$的时频域进行1 800次分数自相关运算. 假设信号长度为M,其求解问题规模为$1\,800\times 0.5\,M$. 本文方法提取的是时延为$(0, 0.5M)$,频移为$(-0.5M, 0.5M)$部分的网格点模糊函数值,求解问题规模为$0.5M^2$. 当$M = 1\,024$时,AF三维图的问题规模为AFMR切面的56.89 %.

3.4.2 算法复杂度分析

针对算法复杂度而言,AFMR切面的提取需利用分数自相关计算任意角度对应的AF值. 文献[1]指出,分数自相关的计算可由一个阶数为$1+P$的分数Fourier变换[15-18]和一个经典Fourier逆变换实现. 分数Fourier变换可以利用FFT进行快速离散计算[19],因此分数自相关的算法复杂度为

$$\left(\frac{19}{2}M\log_2 M+2M\right)C_a+\left(\frac{19}{4}M\log_2 M+\frac{17}{2}M\right)C_m+2MC_e. \quad (5)$$

AF三维图计算的是旋转角α为0和$\pi/2$时的AF值,因此可以直接利用FFT进行计算,其算法复杂度为

$$(M\log_2 M)C_a+\left(\frac{1}{2}M\log_2 M+M\right)C_m. \quad (6)$$

式(5)和(6)中C_a代表加法运算,C_m代表乘法运算,C_e代表复指数运算[20]. 可以看出,尽管分数相关可以利用FFT将其算法复杂度降至$O(M\log_2 M)$阶,但运算量依然是FFT的数十倍. 根据算法复杂度的推导以及问题规模的分析,取$M=1\,024$,可以估算出文献[1]中穷举法提取AFMR切面的耗时应为AF三维图计算耗时的60倍左右. 考虑到基于优势遗传的GA算法和改进PSO算法的收敛速度,文献[2-3]提取AFMR切面的耗时应为AF三维图计算耗时的15～20倍,这与分选耗时比较实验的结果基本一致.

综合上述4个实验的结果可知,所提特征在0 dB以上的固定信噪比环境和0～20 dB动态信噪比环境中都能达到令人满意的分选效果,可作为当前雷达辐射源信号分选特征参数集的有效补充. 此外,与现有基于AFMR切面特征的分选方法相比,本文方法还具有更小的求解问题规模以及更低的算法复杂度,能更好地贴近工程领域的时效性需求.

4 结　论

从新的角度或层面提取更为快捷、有效的特征参数是解决当前雷达辐射源信号分选难题的可行思路. AFMR切面特征的提取需要利用分数自相关计算多个角度对应的AF值,因此在分选大量甚至海量待处理雷达信号时计算量较大. 本文以运算量较低的AF三维图为基础,从主、侧视角提取到了主岭重心和主峰分布半径作为雷达辐射源信号分选的特征向量. 仿真实验和理论分析证实了本文方法能在保证较高分选成功率的前提下快速完成对雷达辐射源信号的分选, 能更好地满足战场时效性的需求.

为增强所提特征在更低信噪比环境下的分选能力, 利用小波变换、卡尔曼滤波等方法对主、侧视图进行进一步的降噪处理将是下一步值得研究的方向.

参考文献(References)

[1] 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]. J of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(2): 133-137.)

[2] 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 Y, Pu Y W, Zhang T F. Intelligenty searching the slice of ambiguity function main ridge based on superiority inheritance[J]. J of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(1): 80-85.)

[3] Pu Y W, Zhang T F, Shi Y. An improved PSO algorithm and its application in fast feature extraction of radar emitter signals[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Natural Computation. Chongqing, 2012: 1127-1130.

[4] Yi Ding, Xian Fu. Kernel-based fuzzy c-means clustering algorithm based on genetic algorithm[J]. Neurocomputing, 2015, 188: 233-238.

[5] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟. 基于OFDM的雷达通信一体化波形模糊函数分析[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(9): 2008-2018.
(Liu Y J, Liao G S, Yang Z W. Ambiguity function analysis of intergrated radar andcommunication waveform based on OFDM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(9): 2008-2018.)

[6] 李志斌, 黄启韬, 刘畅, 等. 基于小波变换的重叠光纤布拉格光栅信号峰值定位[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 120-125.
(Li Z B, Huang Q T, Liu C, et al. Wavelet transform based peak localization of overlapped fiber bragg grating signal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 120-125.)

[7] Guidorzi C. MEPSA: A flexible peak search algorithm designed for uniformly spaced time series[J]. Astronomy and Computing, 2015, 10: 54-60.

[8] Chun Yin, Shanshan Wu, Shiwei Zhou, et al. Peak searching for multimodal optimization through gradient-based stochastic extremum seeking technique[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2589-2594.

[9] Ryszard Jaworski. Observations from the analysis of searching peak of tension test (SPOT) charts[J]. European Polygraph, 2015, 9(1): 25-52 .

[10] Cengiz Kandemir, Cem Kalyoncu, Önsen Toygar. A weighted mean filter with spatial-bias elimination for impulse noise removal[J]. Digital Signal Processing, 2015, 46(C): 164-174.

[11] Dudczyk 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.

[12] 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 J H, Huang J C, Zhu Y C. Overview of radar signal fast recognition[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2017, 32(5): 5-10.)

[13] Janusz Dudczyk. Specific emitter identification based on fractal features: Fractional analysis-applications in physics, engineering and technology[M]. Rijeka: IntechOpen: 2017: 116-135.

[14] 路征, 龚燕. 雷达辐射源识别技术面临的主要挑战及对策[J]. 国防科技, 2017, 38(2): 24-27.
(Lu Z, Gong Y. Thoughts on the major challenge of radar emitter recognition technology and countermeasures[J]. National Defense Science & Technology, 2017, 38(2): 24-27.)

[15] Bhalke D G, Rao C B R, Bormane D S. Automatic musical instrument classification using fractional fourier transform based-MFCC features and counter propagation neural network[J]. J of Intelligent Information Systems, 2016, 46(3): 425-446.

[16] Jianmin Mei, JiDe Jia, Ruili Zeng, et al. A multi-order FRFT self-adaptive filter based on segmental frequency fitting and early fault diagnosis in gears[J]. Measurement, 2016, 91: 532-540.

[17] Haoran Zhao, Liyan Qiao, Ning Fu, et al. A generalized sampling model in shift-invariant spaces associated with fractional Fourier transform[J]. Signal Processing, 2018, 145: 1-11.

[18] Ankush Kansal, Kulbir Singh, Rajiv Saxena. Bit error rate analysis of FrFT appended OFDM system[J]. Int J for Light and Electron Optics, 2015, 126(7/8): 715-718.

[19] 向崇文, 王泽众, 黄宇, 等. 分数阶傅里叶变换的数值计算方法研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(5): 55-57.
(Xiang C W, Wang Z Z, Huang Y, et al. Research on the algorithms for digital computation of fractional fourier transform[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(5): 55-57.)

[20] 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 J, He M H, Chen C X, et al. Algorithm complexity analisis of radar emitter characteristic parameter extraction[J]. J of CAEIT, 2013, 8(1): 43-47.)

作者简介

普运伟 (1972−), 男, 教授, 博士, 从事智能信息处理、模式识别的研究, E-mail: puyunwei@126.com;

侯文太 (1995−), 男, 硕士生, 从事智能信息处理的研究, E-mail: vintage_hou@foxmail.com;

郭媛蒲 (1993−), 女, 硕士生, 从事智能信息处理的研究, E-mail: 572521253@qq.com;

马蓝宇 (1994−), 男, 硕士生, 从事智能信息处理的研究, E-mail: Raveler@foxmail.com.

(责任编辑: 孙艺红)

下 期 要 目

工业控制系统网络入侵检测方法综述 ······ 张文安, 等
多传感器系统的最优线性欺骗攻击设计 ······ 叶 丹, 等
DoS攻击下的信息物理系统事件触发预测控制设计 ······ 孙洪涛, 等
割点失效对复杂网络可控性的影响 ······ 王立夫, 等
拒绝服务攻击下领导-跟随多智能体系统的均方一致性研究 ······ 李 丽, 等
工业信息物理系统的攻击建模研究 ······ 孙子文, 等
基于自适应鲁棒性的入侵检测模型 ······ 吴亚丽, 等
基于因果逻辑关系的CPS分布式控因研究 ······ 杨洪玖, 等
基于非策略Q-学习的网络控制系统最优跟踪控制 ······ 李金娜, 等