

文章编号: 1001 - 9014(2008)02 - 0133 - 05

雷达辐射源信号模糊函数主脊切面特征提取方法

普运伟^{1,2,3}, 金炜东², 朱明^{2,3}, 胡来招³

(1. 昆明理工大学 计算中心, 云南 昆明 650093; 2. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 610031;

3. 中国电子科技集团第 29 所 电子对抗国防科技重点实验室, 四川 成都 610036)

摘要: 提取和补充新的信号参数是解决复杂体制雷达辐射源信号分选难题的有效手段. 基于模糊函数在表征信号内在结构上的独特作用, 本文提出一种模糊函数主脊切面特征提取的新方法, 构建出由主脊方向、切面重心和惯性半径组成的主脊切面特征向量. 理论分析和实验结果表明, 所提取的特征向量较好地反映了不同信号波形结构上的差异, 具有类内聚敛性强和类间分离度大的优点, 且具备较好的抗噪性能, 证实了所提方法的可行性和有效性.

关键词: 雷达辐射源; 特征提取; 分数自相关; 模糊函数切片

中图分类号: TN974 **文献标识码:** A

EXTRACTING THE MAIN RIDGE SLICE CHARACTERISTICS OF AMBIGUITY FUNCTION FOR RADAR EMITTER SIGNALS

PU Yun-Wei^{1,2,3}, JIN Wei-Dong², ZHU Ming^{2,3}, HU Lai-Zhao³

(1. Computer Center, Kunming Univ. of Science and Tech., Kunming 650093, China;

2. School of Information Science and Tech., Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China;

3. National EW Laboratory, CETC No. 29 Research Institute, Chengdu 610036, China)

Abstract: Extracting the novel signal parameters is an effective method to solve the sorting problem of complex radar emitter signals. Based on the specific effect of ambiguity function (AF) in characterizing the inherent structure of a signal, an effective approach was proposed to extract the features of main ridge slice of AF. And a characteristics vector which comprised the direction of the main ridge, the centroid of the slice and the inertia radius relative to the centroid, was constructed. The results of theoretical analysis and simulation experiments show that the extracted characteristics vector, clearly expresses the differences of waveform in different signals, and it has strong compactness within clusters and large separation between clusters, and it is also good to resist noise. Our results verify the feasibility and effectiveness of the proposed feature extraction method.

Key words: radar emitter; feature extraction; fractional autocorrelation; slice of ambiguity function

引言

在日益密集、复杂、多变的电磁环境下, 要对所截获的敌方雷达辐射源信号进行可靠分选和识别, 仅依靠传统的脉幅 (PA)、脉宽 (PW)、载频 (RF)、到达时间 (TOA) 和到达方向 (DOA) 五个参数已非常困难. 其原因是当今的各种新体制雷达凭借复杂的信号形式、灵活的调变规律使得这些参数所描述的信号类边界发生严重交叠. 为减小信号空间的交叠程度, 一种可行的办法是提取和补充新的信号参

数^[2,3].

近年来, 针对雷达辐射源信号新特征参数的提取, 已提出数字中频^[4]、相位差分^[5]和小波变换^[6]等多种方法. 但这些方法均主要针对特定的信号形式, 且易受噪声扰动, 难于提取分类性能好的有效特征参数. 鉴于模糊函数 (Ambiguity Function, AF) 提供了对信号结构信息较为完整的描述, 本文提出一种提取 AF 主脊 (定义为过原点的模糊能量的主要分布带) 切面特征的有效方法. 该方法利用分数自相关 (Fractional Autocorrelation, FA) 等价于相应分

收稿日期: 2007 - 02 - 09, 修回日期: 2007 - 10 - 08

基金项目: 国家自然科学基金 (60572143)、电子对抗技术预研基金 (NEWL51435QT220401) 和昆明理工大学青年基金 (KKZ2200816078) 资助项目

作者简介: 普运伟 (1972-), 男, 云南通海人, 博士, 主要研究方向为电子战信号处理、模式识别等.

Received date: 2007 - 02 - 09, revised date: 2007 - 10 - 08

数域上 AF 径向切面的关系^[7],通过 FA 搜索 AF 的主脊切面,并采用矩方法描述该主脊切面的特征分布信息,从而提取能够表征信号模糊能量分布特性的新参数.核模糊聚类实验验证了本文方法的有效性和所提取特征参数的良好性能.

1 模糊函数与分数自相关的内在联系

对于任意窄带雷达信号 $s(t)$,其模糊函数常定义为^[7]

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

式(1)表明,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.也就是说,AF 提供了一个信号及其自身经时延和频移后所得信号间的相似性度量,反映了信号内在结构特性,应该可以挖掘出区别于其它信号的有效特征.但由于直接计算式(1)并提取 AF 分布特征的代价较大,因此必须考虑其它变通办法.

文献[7]中,Akay 等基于算子方法定义了 FA 运算,并指出 FA 和 AF 具有如下关系

$$[C(s, s)](\alpha) = s(\mu \cos \alpha, \mu \sin \alpha), \quad (2)$$

式中, C 为旋转角为 α 的分数域 u 上的分数相关算子,自变量 μ 为 u 域的径向距离. C 的定义及其备择计算式为

$$[C(s, s)](\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(\mu) s^*(\mu \cdot \cos \alpha) e^{-j2\pi \mu \sin \alpha} d\mu = [F^{-(\alpha/2)} \{ [S^{(\alpha/2)+}(u)]^2 \}](\alpha), \quad (3)$$

这里, $F^{-(\alpha/2)}$ 为 Fourier 逆变换算子, $S^{(\alpha/2)+}$ 为旋转角为 $(\alpha/2) +$ 的分数 Fourier 变换 (Fractional Fourier Transform, FrFT).

从式(2)可见,旋转角为 α 的分数域上的自相关等价于该分数域上模糊函数的径向切片.因此,利用式(2),便可通过计算信号的 FA 而得到 AF 任一过原点的径向切面.且由式(3)不难发现,FA 的计算可由一个角度为 $(\alpha/2) +$ 的 FrFT 变换和一个经典 Fourier 逆变换实现.由于 FrFT 也具有较成熟的快速离散算法^[8],因此 FA 的计算效率相对较高.

2 模糊函数主脊切面特征提取

由 AF 唯一性定理和模糊体积不变特性可知,即使能量相同的两个信号,只要其信号形式不同,它们的 AF 主脊一般也会显示出不同的特征.式(2)为提取 AF 的径向切面提供了便捷方法,但为获取 AF 的主脊切面,仍需在一定的角度范围内搜索.考虑到

AF 的对称性,限制搜索范围为 $|\alpha| < \pi/2$ 区间内的 L 个均匀离散值,并对固定的 α 作径向积分,构建如下检测量

$$RS(\alpha) = \frac{\int |C(s, s)](\alpha)| d\mu}{\int |s(t)| dt}, \quad |\alpha| < \pi/2, \quad (4)$$

式中, $\int |s(t)| dt$ 为归一化系数,目的是减少噪声和信号能量对 $RS(\alpha)$ 取值范围的影响.于是,根据式(4),便可获取 AF 的主脊切面,同时给出相应的旋转角 $\hat{\alpha}$

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmax}_{\alpha} RS(\alpha). \quad (5)$$

$\hat{\alpha}$ 描述了模糊能量在二维时频面上的分布走向,可以作为信号结构的一个重要特征.但是,由于 FrFT 的基函数为 chip 的复指数函数,使得基于 FrFT 的各种信号处理方法包括 FA 运算主要只适于处理 chip 或者类 chip 信号^[8].对于现代复杂体制雷达广为使用的常规信号 (CON) 以及各种非 chip 类编码信号,如 Barker 码, M 伪随机序列 (M-SEQ) 等,它们对 $\hat{\alpha}$ 却并不敏感.为了说明此问题,图 1 对比性地给出了 13 位巴克码的 BPSK 和编码方式为 [1011100] 的 7 位 M-SEQ 的 AF 等高线以及主脊切面的分布情况.

由图 1(a, b) 可见,两种编码方式的 AF 主脊对应的 $\hat{\alpha}$ 十分接近,实际检测中将难于区分.因此,仅靠 $\hat{\alpha}$ 并不能完全表征典型辐射源信号 AF 能量分布

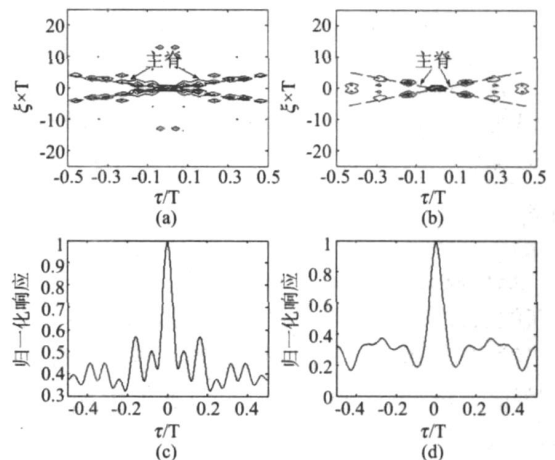


图 1 BPSK 和 MSEQ 的模糊能量分布比较 (a) BPSK 的 AF 等高线 (b) MSEQ 的 AF 等高线 (c) BPSK 的 AF 主脊切面 (d) MSEQ 的 AF 主脊切面
Fig 1 Comparison of ambiguity energy distribution of BPSK with that of M-SEQ (a) AF contour of BPSK (b) AF contour of MSEQ (c) main ridge slice of BPSK (d) main ridge slice of MSEQ

上的差异.但从图 1(c, d)不难看出,不同信号的主脊切面的分布差别很大,故可采用矩方法对 AF 主脊切面的分布特性作进一步描述.

设 AF 主脊所在的分频域为 u_{\wedge} , 相应的主脊切面为 $MRS(u_{\wedge})$. 考虑到 $MRS(u_{\wedge})$ 的对称性, 仅取 u_{\wedge} 0 的半边, 定义如下的主脊切面一、二阶原点矩 \bar{u}_{\wedge} 和 \bar{u}_{\wedge}^2

$$\bar{u}_{\wedge} = \frac{\int_0^0 u_{\wedge} / MRS(u_{\wedge}) / |MRS(u_{\wedge})|^2 du_{\wedge}}{\int_0^0 |MRS(u_{\wedge})|^2 du_{\wedge}}, \quad (6)$$

$$\bar{u}_{\wedge}^2 = \frac{\int_0^0 u_{\wedge}^2 / MRS(u_{\wedge}) / |MRS(u_{\wedge})|^2 du_{\wedge}}{\int_0^0 |MRS(u_{\wedge})|^2 du_{\wedge}}, \quad (7)$$

同时, 可定义主脊切面二阶中心矩为

$$U_{\wedge}^2 = \frac{\int_0^0 (u_{\wedge} - \bar{u}_{\wedge})^2 / MRS(u_{\wedge}) / |MRS(u_{\wedge})|^2 du_{\wedge}}{\int_0^0 |MRS(u_{\wedge})|^2 du_{\wedge}} = \bar{u}_{\wedge}^2 - (\bar{u}_{\wedge})^2. \quad (8)$$

这样, 便可用 \bar{u}_{\wedge} 描述 AF 主脊切面的模糊能量分布的重心, 同时用 U_{\wedge} 描述模糊能量分布相对于该重心的惯性半径. 至此, 提出如下的 AF 主脊切面特征提取算法:

Step1. 以采样频率 f_s 对信号 $s(t)$ 进行常规采样, 得到时域离散信号 $s(n)$, $n=1, 2, \dots, N$;

Step2. 以有理分式 M/N 对 $s(n)$ 进行重采样, 以使各信号保持相同长度 M . 为加快 FA 的计算, M 取为 2 的幂次方, 如 $M=1024$;

Step3. 设定搜索角数目 L , 在 $|\hat{\alpha}| < \pi/2$ 范围内根据式 (4) 和 (5) 搜索 $\hat{\alpha}$;

Step4. 按式 (6), 式 (7) 和式 (8) 计算 $\hat{\alpha}$ 所对应切面的 $\bar{u}_{|\hat{\alpha}|}$ 和 $U_{|\hat{\alpha}|}$;

Step5. 当 $\hat{\alpha} = 0$ 时, 转 Step6; 否则求 $|\hat{\alpha}|$ 所对应切面的 $\bar{u}_{|\hat{\alpha}|}$ 和 $U_{|\hat{\alpha}|}$, 并当 $|RS(\hat{\alpha}) - RS(|\hat{\alpha}|)| / RS(\hat{\alpha})$, $|\bar{u}_{\wedge} - \bar{u}_{|\hat{\alpha}|}| / \bar{u}_{\wedge}$, $|U_{\wedge} - U_{|\hat{\alpha}|}| / U_{\wedge}$ 三者均小于给定的正数 (如 0.02) 时, 令 $\hat{\alpha} = |\hat{\alpha}|$; 否则保持 $\hat{\alpha}$ 不变;

Step6. 构造 AF 主脊切面特征向量 $V = [\hat{\alpha}, \bar{u}_{\wedge}, U_{\wedge}]$, 算法结束.

在上述算法中, 重采样的目的是消除信号长度对 AF 切面特征的影响. Step5 的作用则为对称主脊检验, 以考察信号是真正具有负角度主脊 (调频率为负的 LFM), 还是具有对称主脊 (如图 1 的编码信号), 甚或是因为 L 的非连续性和主脊的展宽性质而造成的虚假对称主脊 (如 CON). 另外要指出的是, 在 AF 主脊切面特征向量 V 中, 没有包括 $\hat{\alpha}$ 所对

应的检测统计量值 $RS(\hat{\alpha})$. 这是因为 $RS(\hat{\alpha})$ 一般随 SNR 的下降而减小, 不适于在 SNR 动态变化的情况下对信号进行分辨.

3 实验结果及分析

为验证本文方法的有效性, 选取 CON、LFM、BPSK、QPSK、M-SEQ 及 BFSK 共 6 种典型信号进行实验. 其中, LFM 的带宽为 10MHz, 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 $10\mu s$, f_c 为 60MHz 另外, 除 BFSK 的 2 个频点分别取 10MHz 和 2MHz 外, 其余信号 RF 为 10MHz 搜索角数目 L 取为 1800. 同时, 为检验 AF 主脊特征向量的分类能力, 采用有效性函数评价的核模糊聚类 (Kernelized Fuzzy Clustering, KFC) 算法^[9] 进行无监督聚类. KFC 中, 高斯核宽度取 1.0, 有效性函数选择 V_{PC} , V_K , V_{XB} , V_{CWB} 及 V_{BC} 的核化形式实现综合决策^[10].

实验 1: 使 SNR 从 0dB 每隔 2dB 变化到 20dB. 在每种 SNR 下, 每类信号各随机产生 100 个不同初相的样本, 分别组成 SNR 固定的 11 个测试信号集. 图 2 给出了 SNR 为 20dB 时 6 种信号的主脊切面对比情况, KFC 的平均聚类结果 (10 次) 则如表 1 所列.

表 1 信号集 1 的平均聚类准确率

信噪比 (dB)	0	2	4	6	8	10~20
CON (%)	100	100	100	100	100	100
LFM (%)	100	100	100	100	100	100
BPSK (%)	70	88	86	99	100	100
QPSK (%)	64	98	99	100	100	100
M-SEQ (%)	58	77	83	90	95	100
BFSK (%)	95	100	100	100	100	100
决策类数	4	6	6	6	6	6

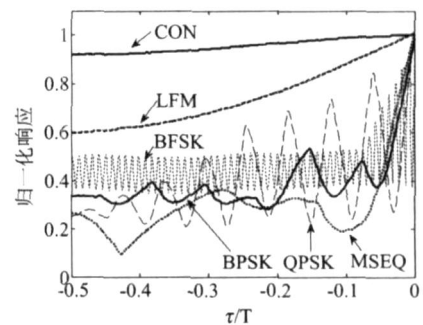


图 2 6 种典型信号的主脊切面对比, SNR = 20dB
Fig 2 Comparison of main ridge slices of six kinds of typical radar emitter signals at SNR of 20dB

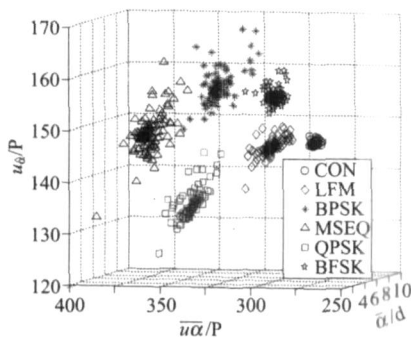


图 3 信号集 2 的特征分布, SNR 为 0 ~ 20dB
Fig 3 Distribution of main ridge characteristics of signal set2 when SNR varies from 0 to 20dB

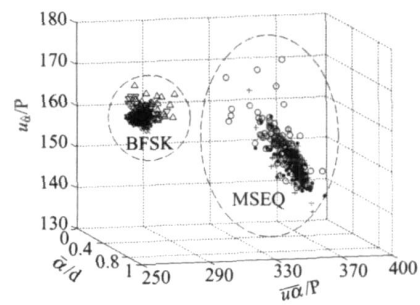


图 4 信号集 3 中 M-SEQ 和 BFSK 的特征分布
Fig. 4 Distribution of main ridge characteristics of M-SEQ and BFSK in signal set3

表 2 KFC对信号集 2 的聚类结果

Table 2 Results of cluster of signal set2

类型	CON	LFM	BPSK	QPSK	M-SEQ	BFSK	准确率
CON	110	-	-	-	-	-	100%
LFM	-	110	-	-	-	-	100%
BPSK	-	-	105	1	-	4	95.5%
QPSK	-	-	-	110	-	-	100%
M-SEQ	-	-	5	1	104	-	94.6%
BFSK	-	-	-	-	-	110	100%

由该实验的结果可知,在 0 ~ 20dB 范围内,所有信号的 3 个特征的均值都只在小范围内变化,其方差随 SNR 增加而减小,具有较好的抗噪性能.尤其对于 $\hat{\alpha}$ 特征,显示出了较好的稳健性.但仅靠 $\hat{\alpha}$ 并不能区分所有信号,如 CON 和 BFSK 的 $\hat{\alpha}$ 均为 0.1, BPSK 和 M-SEQ 的 $\hat{\alpha}$ 也非常接近,分别为 0.5 和 0.6,这是由于非 chip 类信号对 $\hat{\alpha}$ 不敏感所致.但从图 2 可以发现,所考察信号的 AF 主脊切面的分布显示出了较大差异,通过矩描述这种分布上的差异可有效地对信号进行辨识.这和前面的理论分析完全一致.同时,由表 1 可知,当 SNR = 2dB 时, KFC 便能正确识别出所有 6 类信号并给出相对满意的聚类准确率.这说明本文方法所提取的特征不仅具有良好的类内聚集性和类间区分能力,且对信噪比的变化显示出了较好的稳定性.

实验 2: 为了进一步考察所提取特征在 SNR 变化时的性能,在实验 1 基础上,从每种信号的每种 SNR 下的 100 个样本中随机抽取 10 个,组成 SNR 变化的测试信号集 2.图 3 给出了该信号集的三维特征分布,表 2 则给出相应的 KFC 聚类结果.

由图 3 可见,在不同 SNR 下提取的特征仍具有较好的类内聚敛性和类间分离能力.表 2 的 KFC 实

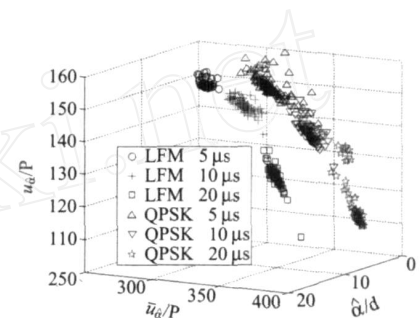


图 5 信号集 3 中 LFM 和 QPSK 的特征分布
Fig. 5 Distribution of main ridge characteristics of LFM and QPSK in signal set3

验结果进一步证实了所提取特征对于 SNR 变化的稳健性.在本实验中,所有有效性函数均指示最佳类别数为 6,除 BPSK 和 M-SEQ 的识别准确率分别为 95.5% 和 94.6% 外,其余各类信号均被完全正确分类.可见,本文特征提取方法能适应较大动态信噪比情形.

实验 3: 仍保持 SNR 在 0 ~ 20dB 范围内变化,同时每种信号取 5μs, 10μs 和 20μs 3 种脉宽,考察 PW 变化对所提取特征的影响.在每种 SNR 下,每种信号的每种脉宽各产生 10 个信号,最后组成总数为 1980 的测试信号集 3.图 4 和图 5 分别给出了 M-SEQ 和 BFSK, LFM 和 QPSK 的特征分布情况.

由图 4 和图 5 可知, PW 的改变对各信号类型的影响不尽相同.对于 M-SEQ 和 BFSK 来说, PW 的变化几乎不影响其特征的取值, 3 种 PW 时所提取的特征在信号空间中重叠而难于分开. CON 和 BPSK 也具有类似图 4 的分布形式,不再给出.而对于 LFM 和 QPSK, 各种 PW 的信号自然形成一类,具有可分性.实际上,这是因为当 LFM 带宽保持不变时(10MHz),改变 PW 相当于改变了调频斜率,从而改变了模糊能量在时频面上的分布,因此相应的 AF 主脊切面特征也不相同;同样, Frank 编码方式的

QPSK相当于对 LFM 的相位进行采样,常可近似为阶梯 LFM,因此 PW 改变也将导致其模糊能量分布的变化.而对于 CON,由其 AF 计算式可知, PW 仅影响 AF 延展区域的大小及频移方向上零点的位置,经本文特征提取算法中的重采样处理后,这种影响将被消除,故而不同 PW 时所提取的主脊切面特征基本相同.对于二相编码方式的 M-SEQ, BPSK 和 BFSK,其 AF 的形式很大程度上取决于编码序列和码元个数,因此受 PW 的影响较小.

对于信号集 3,同样进行了 KFC 聚类验证,结果进一步证实了上述分析.在所采用的 5 个有效性函数中,除 V_{BC} 选择 8 为信号类数外,其余 4 个指标均指示最佳信号类数目为 10. KFC 将不同 PW 的 LFM 和 QPSK 各分为一类,而将其余信号按类型分为 4 类,平均分类正确率达 95.8%.

总结上述 3 个实验的结果可知,本文特征提取方法是可行和有效的.所提取的 AF 主脊切面特征较好地反映了信号模糊能量主脊的分布情况,反映了信号内在结构上的特性.因此,即使对于同类型信号,只要它们的模糊主脊分布上存在差异,也可对其较好地区分.同时,由于 AF 匹配滤波频移响应的本质,所提取特征显示出了较好的抗噪性能和类内聚敛性.

4 结语

复杂体制雷达辐射源信号的分选识别已成为当前电子侦察信号处理的难题之一,提取和补充新的特征参数是一种可行的思路.为此,本文提出一种模糊函数能量主脊切面特征提取的新方法.所提方法通过分数自相关运算搜索模糊能量主脊,并引入矩描述主脊切面的分布特性,从而提取能够表征信号 AF 主脊能量分布走向、分布重心及其惯性半径的三个新特征参数.实验结果表明,所提取的特征具有较好的类内聚敛性和类间分离能力,同时还具有较强的抗噪声性能.但为了增强所提方法的实用性,通过

智能优化方法快速搜索模糊主脊或利用信号先验信息以减少模糊主脊搜索范围将是下一步值得深入研究的工作.

REFERENCES

- [1] LI He-Sheng, HAN Yu, CAI Yin-Wu, *et al* Overview of the crucial technology research for radar signal sorting[J]. *Systems Engineering and Electronics* (李合生, 韩宇, 蔡英武, 等. 雷达信号分选关键技术研究综述. 系统工程与电子技术), 2005, 27(12): 2035—2040.
- [2] ZHANG Ge-Xiang, HU Lai-Zhao, JIN Wei-Dong Intra-pulse feature analysis of radar emitter signals[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张葛祥, 胡来招, 金炜东. 雷达辐射源信号脉内特征分析. 红外与毫米波学报), 2004, 23(6): 476—480.
- [3] ZHU Ming, JIN Wei-Dong, PU Yun-Wei, *et al* Feature extraction of radar emitter signals based on gaussian chiplet atoms[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (朱明, 金炜东, 普运伟, 等. 基于 Chiplet 原子的雷达辐射源信号特征提取. 红外与毫米波学报), 2007, 26(4): 302—306.
- [4] Boualem B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal-Part II: algorithms and application [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1992, 80(4): 540—568.
- [5] HUANG Zhi-Tao, ZHOU Yi-Yu, JIANG Wen-Li The automatic analysis of intrapulse modulation characteristics based on the relatively non-ambiguity phase restoration[J]. *J. of China Institute of Communication* (黄知涛, 周一宇, 姜文利. 基于相对无模糊相位重构的自动脉内调制特性分析. 通信学报), 2003, 24(4): 153—160.
- [6] Depert N. Asymptotic wavelet and Gabor analysis: extraction of instantaneous frequencies[J]. *IEEE Trans Information Theory*, 1992, 38(3): 644—664.
- [7] Akay O, Boudreaux-Bartels G F. Fractional convolution and correlation via operator methods and an application to detection of linear FM signals[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2001, 49(5): 979—993.
- [8] Tao R, Deng B and Wang Y. Research progress of the fractional Fourier transform in signal processing[J]. *Science in China: Series F Information Sciences*, 2006, 49(1): 1—25.
- [9] Kim D-W, Lee K Y, Lee D. Evaluation of the performance of clustering algorithms in kernel induced feature space[J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(4): 607—611.
- [10] PU Yun-Wei, JIN Wei-Dong, ZHU Ming, *et al* On cluster validity for kernelized fuzzy c-means algorithm [J]. *Computer Science* (普运伟, 金炜东, 朱明, 等. 核模糊 C 均值算法的聚类有效性研究. 计算机科学), 2007, 34(2): 207—210.