

基于FRFT的 α 域-包络曲线的雷达信号特征提取及自动分类

司锡才 柴娟芳

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 提取和补充新的特征参数是解决复杂体制雷达辐射源信号分选和雷达目标识别难题的有效手段,为此该文提出一种基于FRFT的 α 域-包络曲线特征向量的提取方法。该方法通过FRFT搜索得到旋转角域的包络曲线函数,提取出该曲线峰值所对应的 α 值、峰值大小及包络曲线峰度这3个特征,构造新的特征向量,并以此作为经典参数的补充。同时,采用动态聚类法对所提取的特征向量分选空间雷达辐射源信号。大量的仿真结果表明,提取的新特征具有较好的类内聚敛和类间分离能力,还具有较好的抗噪声性能,证实了新特征向量作为信号分选参数的有效性和可行性。

关键词: 雷达目标识别; 雷达信号分选; 分数阶傅里叶变换; 特征提取; 动态聚类

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1892-06

Feature Extraction and Auto-sorting to Envelope Function of Rotation Angle α Domain of Radar Signals Based on FRFT

Si Xi-cai Chai Juan-fang

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A feature vector extraction method to the envelope function in rotation angle α domain of radar signals based on FRFT is proposed in this paper, because extracting the novel radar signal parameters is an effective method to solve the complex radar emitter signals sorting and radar target recognition problem. This method searches the envelope function of α domain through FRFT firstly, extracts α value corresponding of the peak, peak value and kurtosis of the envelope function to construct a new feature vector as the complement to classical parameters. At the same time, a dynamic cluster sorting method is used to complete the sorting work to radar emitters. A large number of simulation results show that, the new feature vector not only has strong compactness within clusters and large separation between clusters, but also has good anti-noise performance. And the results verify the feasibility and effectiveness of this new feature vector as the complement to classical parameters.

Key words: Radar target recognition; Radar signal sorting; FRactional Fourier Transform (FRFT); Feature extraction; Dynamic cluster

1 引言

随着现代电子战的激烈对抗,电磁威胁环境的信号密度已高达百万量级,且在所部署的雷达中,信号形式复杂、调变规律灵活的新型复杂体制雷达已成为主流,仅仅依靠传统5参数,亦即脉冲幅度PA,脉冲宽度PW,载波频率CF,到达时间TOA(计算脉冲重复周期PRI),到达方向DOA,对所截获的敌方雷达辐射源信号进行可靠分选和属性判定已变得非常困难。其原因是现役的许多雷达已同时具备CF, PW, PRI等参数的滑变、跳变甚至随机捷变的能力,造成常规分选参数所表述的信号类边界严重重叠,最后导致传统分选方法性能急剧下降,甚至完全失效。为减小空间信号的交叠程度,一种可

行的办法是针对这些复杂雷达信号的特点,提取和补充新的雷达信号的分选特征参数。

近年来,针对雷达辐射源信号新特征参数的提取,已提出模糊函数^[1]、原子分解^[2,3]、经验模态分解^[4]、相位差分^[5]和无模糊相位重构^[6]等多种方法。由于分数阶傅里叶变换(FRFT)可以较为完整地描述信号的时频特性,本文借助FRFT和高阶矩的相关理论,提出了基于FRFT的 α 域-包络曲线雷达信号特征向量提取方法。该方法通过FRFT搜索得到旋转角域的包络函数,并提取包络曲线峰值处所对应的 α 值、峰值大小以及包络曲线的峰度构造新的特征向量,以此描述包络函数的分布特点,从而提取能够表征信号FRFT能量聚集角、能量大小以及能量分布情况等特性。同时,本文采用动态聚类法对所提取的特征向量分选空间雷达辐射源信号。最

后的仿真结果表明, 所提取的特征具有较好的类内收敛和类间分离能力, 还具有较好的抗噪声性能, 可以作为经典 5 参数的有效补充。

2 基本原理介绍

2.1 分数阶傅里叶变换

分数阶 Fourier 变换(FRFT)是近年来出现的一种新的时频工具, 它是经典 Fourier 变换的一种广义形式。信号的 FRFT 是信号在时频平面内坐标轴绕原点逆时针旋转任意角后的表示方法, 而当这个旋转角为 $\pi/2$ 时, 则为传统的 Fourier 变换。信号 $x(t)$ 的 FRFT 定义^[7]如下:

$$X_p(u) = F^p[x(t)](u) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)K_p(u, t)dt \quad (1)$$

其中 α 为旋转角, 亦即分数阶 Fourier 域与时域的夹角, 旋转角 $\alpha = p\pi/2$; p 为分数阶 Fourier 变换的阶次; $F_p[\]$ 为分数阶 Fourier 变换算子, $K_p(u, t)$ 为变换核, 其定义如下所示, 其中 n 为整数, $\delta(\cdot)$ 为冲激函数。

$$K_p(u, t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} \exp\left[j\left(\frac{t^2+u^2}{2}\right)\cot\alpha - jut\csc\alpha\right], & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t-u), & \alpha=2n\pi \\ \delta(t+u), & \alpha=2n\pi \pm \pi \end{cases} \quad (2)$$

FRFT 在统一的时频域上进行信号处理, 因此它相对于传统的 Fourier 变换灵活性更强, 适于进行非平稳信号的处理。FRFT 的许多性质在理论探讨上都有很大的意义, 当 $\alpha \neq n\pi$ 时, FRFT 的计算过程可以拆解为以下 4 个步骤^[8]:

(1) 原信号与一个线性调频函数相乘;

$$g(t) = x(t)e^{j\pi t^2 \cot\alpha} \quad (3)$$

(2) 作 Fourier 变换 (其变元乘以尺度系数 $\csc\alpha$);

$$g'_\alpha(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)e^{-j2\pi ut \csc\alpha} dt \quad (4)$$

(3) 再与一个线性调频函数相乘,

$$X'_p(u) = g'_\alpha(u)e^{j\pi u^2 \cot\alpha} \quad (5)$$

(4) 乘以一复幅度因子。

$$X_p(u) = \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} X'_p(u) \quad (6)$$

在上述定义中, 尽管 p 可以取任意实数, 但 FRFT 却是以 4 为周期的变换, 亦即 $F^{4k\pm p} = F^{\pm p}$ 。因此通常只需考虑 p 在 $[0, 4]$ 即可。当 $p=1$ 时, FRFT

退化经典 FT, 而 $p=3$ 时为 FT 倒逆变换。此外, FRFT 还具有很好的优良特性, 如阶数可加性 $F^{p_1}F^{p_2} = F^{p_1+p_2}$, 逆变换统一性 $(F^p)^{-1} = F^{-p}$, 这都是转动算子所特有的性质, 因此, FRFT 可看作时频平面上的旋转算子。其中 F^1 相当于将时间域表示的信号逆时针旋转 $\pi/2$ 到达频率域, $X_1(u)$ 即为信号在频域中的表示; 而 F^p 实现对信号任意角度 α 的旋转, 将信号从时域变换到 p 阶分数 Fourier 域。可见, FRFT 是 FT 的广义形式, 所谓“时间域 t ”和“频率域 u ”, 在 FRFT 看来都只是众分数域 u 中的两种特例。一般来说, 可以用 $X_p(u_p)$ 表示信号在 p 阶分数域 u_p 中的表达, 在这些一般的 u_p 域中, 信号的表示既包含时域信息又包含频域信息。因此, 通过 FRFT 可以在多个变换域中对信号进行分析处理, 大大拓宽了信号的表达方式和分析角度。

此外, 进一步的研究表明, FRFT 与 Wigner-Ville 分布、模糊函数、Radon-Wigner 变化等常用时频分析方法之间存在着非常紧密的联系, 可将其看作统一的时频表示方法, 其实质是角度为 α 的时频面旋转。随着变换角度从 0 变换到 π , 也就是阶数从 0 增长到 1, FRFT 展示出信号从时域逐步变化到频域的所有特征。因此 FRFT 可以看作信号在介于时域和频域之间的任一分数域上的表示。

2.2 动态聚类

为判断一个雷达脉冲信号是否属于某一个辐射源, 可以用脉冲信号多个参数的加权欧几里德距离来表征雷达脉冲信号参数之间的几何距离^[9]:

$$r = [(\mathbf{x} - \boldsymbol{\omega})^T \mathbf{W}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\omega})]^{1/2} \quad (7)$$

式中 \mathbf{x} 为脉冲信号参数的测量值向量, $\boldsymbol{\omega}$ 为脉冲信号参数的中心值向量, \mathbf{W} 是雷达信号参数的加权矩阵。脉冲参数的中心值向量 $\boldsymbol{\omega}$ 是已聚类脉冲参数测量值向量的算术平均值, 如式(8)所示, 其中 m 为已聚类脉冲序列的脉冲个数。

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{x}_i \quad (8)$$

设雷达信号参数误差向量 $\boldsymbol{\Delta} = \mathbf{x} - \boldsymbol{\omega}$, 则 $r = [\boldsymbol{\Delta}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\Delta}]^{1/2}$ 。当一个脉冲由 N 个不同参数来描述时, 脉冲参数的误差向量 $\boldsymbol{\Delta}^T = [\Delta_1 \ \Delta_2 \ \dots \ \Delta_N]$, 脉冲参

数的加权矩阵: $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_N \end{bmatrix}$, 则脉冲参

数之间几何距离表示为归一化的几何距离:

$$S = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i^2 W_i \right]^{1/2}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式中 N 为参与计算相似性度量值的脉冲参数个数, W_i 是反映各参数重要程度的权系数。几何距离越小表示脉冲信号参数之间的相似程度越高, 如果几何距离小于某一门限值, 则该脉冲参数属于同一辐射源。如果几何距离大于某一门限值, 则该脉冲参数属于一个新的辐射源。

2.3 典型雷达信号

多数复杂体制雷达为避免被侦察方解调和分折, 波形设计复杂, 调制和编码规律灵活多变。但由于雷达信号多为短脉冲制式, 因此较少对幅度进行调制, 而主要采用频率和相位调制, 不同调制类型雷达辐射源信号的主要区别仅表现在不同的频率调制 $f(n)$ 和相位调制 $\varphi(n)$ 函数上。下面简单介绍几种典型的雷达信号^[10]。

常规脉冲信号(CON): 它无脉内频率调制和相位调制, 即 $f(n) = f_0$, $\varphi(n) = 0$, 其中 f_0 为信号载频。

线性调频信号(LFM)和非线性调频信号(NLFM): 这两种信号可以用多项式相位信号 PPS 来表示。PPS 是信号处理领域中一种具有重要意义的非平稳信号模型, 在雷达、声纳、语音和通信领域中有广泛应用。式(10)为连续形式的单分量 M 阶多项式相位信号。

$$s(t) = A \exp \left[j2\pi \sum_{i=0}^M a_i t^i \right] \quad (10)$$

其中 A , a_i 和 i 分别为信号幅度、多项式系数、阶数。当 $M = 2$ 时, $s(t) = A \exp \{ j2\pi(a_0 + a_1 t + (1/2) \cdot a_2 t^2) \}$, 此时即为线性调频信号, 离散化后为 $s(n) = A \exp \{ j2\pi[a_0 + a_1(n/f_s) + (1/2)a_2(n/f_s)^2] \}$ (11) 此时, 频率调制函数 $f(n) = a_1$, 相位调制函数 $\varphi(n) = \pi a_2(n/f_s)^2 + \varphi_0$, 其中 a_2 为调制频率; 当 $M = 3$ 时, $s(t) = A \exp \{ j2\pi(a_0 + a_1 t + (1/2)a_2 t^2 + (1/3)a_3 t^3) \}$, 即为一种最简单的非线性调频信号 NLFM, 离散化后为

$$s(n) = A \exp \{ j2\pi[a_0 + a_1(n/f_s) + (1/2)a_2(n/f_s)^2 + (1/3)a_3(n/f_s)^3] \} \quad (12)$$

它的频率调制函数 $f(n) = a_1$, 相位调制函数 $\varphi(n) = 2\pi[(1/2)a_2(n/f_s)^2 + (1/3)a_3(n/f_s)^3] + \varphi_0$ 。

相位编码信号(PSK): 相位编码信号的频率也为常数 f_0 , 相位调制函数 $\varphi(n)$ 一般具有如下形式 $\varphi(n) = \pi C_d(n)$, 其中, $C_d(n)$ 为相位编码函数。对于二相编码信号(BPSK), $C_d(n)$ 为二元函数, 取值为 0 或 1; 而对于四相编码(QPSK), $C_d(n)$ 为四元函数, 取值为 0, 1/2, 1, 3/2。相位编码信号最主要的特点是在相位改变点处存在频率跳变。

BPSK 可以采用 11 位 Barker 编码方式, $C_d(n) =$

1,1,1,0,0,0,1,0,0,1,0]; QPSK 可以采用 16 位 Frank 码, $C_d(n) = [0,0,0,0,0,0,0.5,1,1.5,0,1,0,1,0,1.5,1,0.5]$ 。

频率编码信号(FSK): FSK 信号的主要特点是脉内各子码具有不同的频率, 且可随意配合采用相位调制。这里以 BFSK 为例, 且设 $\varphi(n) = 0$, BFSK 的两个频率为 f_1 和 f_2 所对应的码元分别为 0 和 1。码元可以采用 11 位 Barker 编码方式, 亦即 BFSK 的脉内两个频率编码方式为 $[f_1, f_1, f_1, f_2, f_2, f_2, f_1, f_2, f_2, f_1, f_2]$ 。

3 特征提取与自动分类

3.1 特征提取

既然 FRFT 可以看作信号在介于时域和频域之间的任一分数域上的表示, 那么它就能较好地体现信号的脉内特征。要是在分数域能够提取出信号的一些关键脉内特征, 就可以将其作为分选的新型特征补充传统 5 参数。

从 FRFT 原理及其试验仿真中可以发现, 不同调制类型的信号在整个分数域产生的分布图是不相同的。我们从旋转角 α 域观测分析不同调制类型雷达信号分数域的包络分布曲线特点, 并从中提取其相应特征作为分选参数的补充。如图 1 所示是常见的几种典型雷达单脉冲信号在信噪比为 20 dB 下的 α 域-包络曲线图。从图 1 可见, 不同类型的包络曲线的出现峰值的 p 值不同, 包络曲线的尖锐程度也不相同。此外, 在没有归一化以前, 各信号幅度相同的条件下, 它们的峰值大小也是不同的。

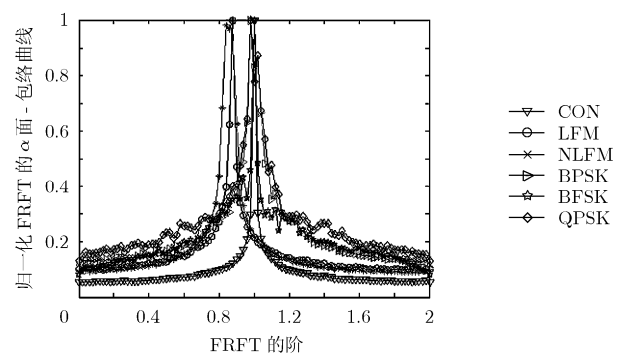


图1 典型雷达信号的归一化 α 域-包络曲线图(信噪比 20dB)

在概率与统计学中, 峰度是用来反映分布曲线顶端尖峭或扁平程度的指标。有时两组数据的算术平均数、标准差和偏态系数都相同, 但它们分布曲线的高耸程度却不同。统计上是用四阶中心矩来测定峰度的。这里就采用峰度来度量 α 域-包络曲线的高耸程度。

峰度的归一化定义为

$$k(s) = \frac{m_4(s)}{m_2^2(s)} - 3 \quad (13)$$

式中, $m_2(s)$ 和 $m_4(s)$ 为信号 s 的二阶矩, 四阶矩。

特征提取的步骤如下:

(1) 以采样频率 f_s 对信号 $s(t)$ 进行采样, 得到时域离散信号 $s(n)$;

(2) 预处理, 先去均值再白化处理。

(3) 对信号进行 p 在 $[0, 4]$ 范围内的快速分数阶傅里叶变换;

(4) 在分数域提取 α 域-包络曲线 y :

$$y = \max(\text{abs}(X_p(u)))$$

(5) 检测峰值 pv 以及所对应旋转角的 p 值;

(6) 对 α 域-包络曲线 y 对峰值作归一化处理并计算分布包络曲线的峰度 k ;

(7) 构造 α 域-包络曲线的特征向量

$$\mathbf{V} = [p, pv, k]$$

其中, 信号的白化处理有很多方法, 由于矩阵奇异值分解的数值算法比特征值分解数值算法具有更好的稳定性^[11], 所以本文用奇异值分解来求白化矩阵。

3.2 自动分类

参与分类的参数可以有很多, 本文重在研究所提取的特征向量对 5 参数的补充是否有效, 所以只针对前文所述的 α 域-包络曲线的特征向量进行聚类分析。

具体步骤如下: 取出一个脉冲的 α 面-包络曲线的特征向量 \mathbf{V} , 如果有已聚类的脉冲序列, 取出其参数中心值 x_{0i} 和容差范围 Δx_{0i} 。计算该脉冲的每一个参数同已聚类脉冲参数的误差 $\Delta_i = x_i - x_{0i}$, 只要 $\{\Delta_i\}$ 中任意一个值大于容差范围, 该脉冲就不属于已聚类的脉冲序列, 只有 $\{\Delta_i\} \leq \{\Delta x_{mi}\}$, 才能按照式(9)计算脉冲参数之间的几何距离 S 。如果 $S < S_T$ 则表示聚类成功, 如果某个脉冲的参数与多个脉冲序列的参数之间的几何距离小于门限, 则应当取距离 S 值最小的脉冲系列作为聚类结果。按照式(14)计算聚类结果脉冲参数中心值:

$$x_{0i} = \frac{(x_{0i} \times m + x_i)}{(m + 1)} \quad (14)$$

式中 m 为已聚类脉冲序列的脉冲个数, 表示已聚类脉冲个数越多, 在计算脉冲参数的中心值时权重就越大。

如果该脉冲不属于所有已聚类的脉冲序列, 则该脉冲作为一个新的聚类脉冲序列。其脉冲参数中心值 $x_{0i} = x_i$, 容差范围 Δx_{mi} 可以根据需要先设为某一个定值。

4 仿真实验

为了检验 α 域-包络曲线的特征向量的分类能力, 我们采用前文所述的动态聚类方法来测试。仿

真选取 6 种典型雷达单脉冲信号进行试验, 分别为前文所述的 CON、LFM、NLFM、BPSK、BFSK 及 QPSK。其中, LFM 和 NLFM 都采用多项式相位信号 PPS 形式, 起始频率为 8 MHz, 带宽均为 20 MHz, LFM 信号形式为 $s(t) = \cos[2\pi(a_0 + a_1t + (1/2)a_2t^2)]$, 其中 $a_0 = 0$, $a_1 = 8 \times 10^6$ Hz, $a_2 = (20/8.8) \times 10^{12}$ Hz/s; NLFM 信号形式为 $s(t) = \cos[2\pi \cdot (a_0 + a_1t + (1/2)a_2t^2 + (1/3)a_3t^3)]$, 其中 $a_0 = 0$, $a_1 = 8 \times 10^6$ Hz, $a_2 = 1.4 \times 10^{12}$ Hz/s, $a_3 = 0.1 \times 10^{18}$ Hz/s²; BPSK 和 BFSK 码元都采用 11 位 Barker 编码方式, QPSK 码元则采用 16 位的 Frank 码, 载频为 8 MHz, BFSK 的两个频点为 8 MHz 和 20 MHz。所有信号的 PW 均为 8.8 μ s, 采样率 100 MHz, 各信号幅度均取 1 V, 噪声选取高斯白噪声。

实验 1 提取不同信噪比下各类雷达单脉冲信号的 α 域-包络曲线的特征向量 $\mathbf{V} = [p, pv, k]$, 信噪比从 0 dB 开始每隔 3 dB 变化到 30 dB。表 1 给出了 6 种雷达单脉冲信号不同 SNR 下 α 域-包络曲线的特征向量在 100 次蒙特卡罗试验下的平均结果。

由表 1 可知, 在 0~30 dB 范围内, 所有信号的脉内特征向量均值都在一个小范围内变化, 其中 p 特征除了 NLFM 在小于 6 dB 范围内波动 0.02 外(这和旋转角 α 的离散步进有关), 其它信号均保持固定值, 显示出了最好的稳健性。但是仅靠这一特征是无法满足区分所有的信号, 实验数据表明, LFM 和 NLFM 的 p 特征为 0.86~0.88, CON 和 BFSK 都为 1, BPSK 和 QPSK 都为 0.98, 那么直观上, 我们就可以根据 p 特征将空间信号分成 3 大类。对于 p 特征都为 1 的 CON 和 BFSK 而言, 两者的峰值大小和曲线峰度都相差较多, 容限值比较好设置; 对于 p 特征为 0.86~0.88 的 LFM 和 NLFM, 峰值相差不多, 但是曲线峰度相差明显, LFM 的峰度较大体现了 LFM 具有的较陡峭的 α 面-包络曲线, 这与 FRFT 对 chirp 类信号敏感是统一的, 而 NLFM 的 α 域-包络曲线就稍微平坦一些, 两者的曲线峰度相差在 15 左右; 对于 p 特征都为 0.98 的 BPSK 和 QPSK 而言, 两者的峰值大小分布区间为 8.32~11.22 和 7.12~9.46, 曲线峰度分布区间 11.00~8.57 和 10.74~7.65, 参数都比较接近, 有部分混叠现象, 分类容限设置比较困难。在信噪比较低时两者会有比较严重的混叠, 这与两种信号的在分数阶的时频特性近似有关的, 所以要减少交叠程度, 只能在此基础上寻求新的特征。

实验 2 为了进一步测试所提取的特征在 SNR 变化时的性能, 在实验 1 的基础上, 从每种 SNR 下

表1 部分 SNR 下 α 面-包络曲线的特征向量均值

V	0dB	3dB	6dB	9dB	12dB	15dB	18dB	21dB	24dB	27dB	30dB
V_{CON}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	15.98	18.26	20.10	21.13	21.82	22.11	22.28	22.36	22.39	22.44	22.43
	70.10	68.82	67.05	65.30	64.40	63.19	62.48	61.79	61.87	61.74	61.70
V_{BFSK}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	11.29	13.03	14.57	15.17	15.68	15.90	16.01	16.06	16.11	16.11	16.12
	28.11	26.33	25.05	22.56	21.83	21.08	20.61	20.31	20.20	20.03	19.94
V_{BPSK}	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.980	0.98
	8.32	9.00	10.07	10.52	10.81	11.06	11.16	11.20	11.21	11.21	11.22
	11.00	10.96	10.47	9.72	9.22	9.15	8.91	8.79	8.65	8.60	8.57
V_{QPSK}	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
	7.12	7.81	8.59	9.05	9.23	9.33	9.38	9.41	9.42	9.45	9.46
	10.74	9.84	9.39	8.95	8.36	8.14	7.94	7.81	7.75	7.69	7.65
V_{LFM}	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
	9.12	10.41	11.31	11.90	12.21	12.37	12.42	12.49	12.52	12.51	12.53
	32.75	31.52	30.69	29.83	28.71	28.30	27.28	27.19	26.96	26.89	26.96
V_{NLFM}	0.86	0.87	0.86	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
	9.64	11.09	12.15	12.69	13.09	13.26	13.38	13.38	13.44	13.43	13.43
	15.84	15.39	14.82	13.99	13.42	13.32	13.14	12.98	12.91	12.92	12.87

的 100 个样本中随机抽取 10 个，组成 SNR 变化的样本集合，这样每种信号总共有 110 个样本。采用动态聚类方法对上述信号进行分类。图 2 给出了这一情况下三维特征分布。表 2 给出了动态聚类结果。

由图 2 整体来看，各种雷达信号在不同信噪比下的特征具有较好的类内聚敛性和类间分离性，各类之间存在较少的交叠。表 2 给出的动态聚类结果

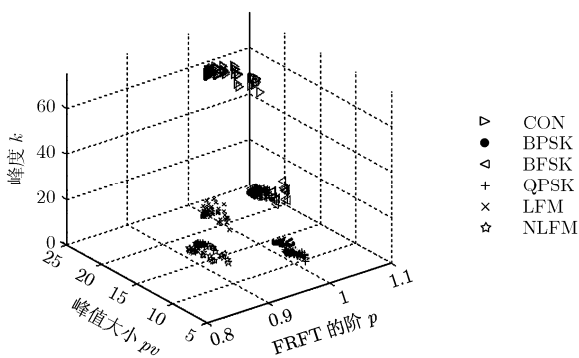


图2 实验2 三维特征分布，信噪比 0~30 dB(步进 3 dB)

表2 实验2 动态聚类结果

类型	CON	BFSK	BPSK	QPSK	LFM	NLFM
正确数	110	110	102	101	110	110
准确率 (%)	100	100	93	92	100	100

进一步证实了所提取特征对于信噪比变化的稳健性。可见， α 域-包络曲线的特征向量能适应较大动态信噪比的情况。但是，正如实验 1 分析的一样，由于 BPSK 和 QPSK 属于相位编码方式的，它们在分数阶域的时频特性近似，同时这与 FRFT 对非 chirp 信号不敏感也有很大关系，所以在信噪比较低时两者会有比较严重的混叠，表 2 中它们的聚类正确率已经下降到 92%，这也说明本文提出的特征向量还存在一定的局限，它在低信噪比下聚类结果不完全正确，所以要在低信噪比下减少这两种信号的交错性，只能在此基础上寻求新的特征。当然，总体而言，本文所提出的雷达信号基于 α 域-包络曲线的特征向量在不同信噪比下的特征还是具有较好的类内聚敛性和类间分离性，可以作为传统 5 参数的一个有效补充。

5 结论

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，本文借助FRFT和高阶矩的相关理论，提出了基于FRFT的 α 域-包络曲线特征向量提取方法。该方法通过FRFT搜索得到旋转角域的包络函数，并提取曲线峰值处所对应的 α 值、峰值大小以及包络曲线峰度来构造新的

特征向量,以此描述包络函数的分布特点,从而提取能够表征信号FRFT能量聚集角、能量大小以及能量分布情况等特性。同时,本文采用动态聚类分选法来验证所提取的特征向量的有效性。最后的仿真结果表明,所提取的特征具有较好的类内收敛和类间分离能力,还具有较好的抗噪声性能,因此可作为经典参数的有效补充。但为了增强所提方法的实用性,如何在工程上加以应用还需要深入研究。

参考文献

- [1] 普运伟等. 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, *et al.*. Extracting the main ridge slice characteristics of ambiguity function for radar emitter signals[J]. *J. Infrared Millim Waves*, 2008, 27(2): 133-137.
- [2] Lopez-risueno G, Grajal J, and Yeste-Ojeda O, *et al.*. Atomic decomposition-based radar complex signal interception[J]. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(4): 323-331.
- [3] 朱明, 金炜东, 胡来招等. 基于原子分解的雷达辐射源信号二次特征提取[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(6): 659-664.
Zhu Ming, Jin Wei-dong, and Hu Lai-zhao, *et al.*. Cascade Feature extraction for radar emitter signals based on atomic decomposition[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2007, 42(6): 659-664.
- [4] Hu Hong-ying, Kang Jing, and Guan Li-na, *et al.*. Instantaneous frequency estimation based on empirical mode decomposition. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, June 25-27, 2008.
- [5] 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[J]. 通信学报, 2003, 24(4): 153-160.
Huang Zhi-tao, Zhou Yi-yu, and Jiang Wen-li. The automatic analysis of intra-pulse modulation characteristics based on the relatively nonambiguity phase restoral[J]. *J. of China Institute of Communication*, 2003, 24(4): 153-160.
- [6] 魏跃敏, 黄知涛, 王丰华等. 基于单脉冲相关积累的 PSK 信号相位编码调制规律分析[J]. 信号处理, 2006, 22(2): 281-284.
Wei Yue-min, Huang Zhi-tao, and Wang Feng-hua, *et al.*. The analysis of PSK modulation rules based on the coherent integration of single pulse[J]. *Signal Processing*, 2006, 22(2): 281-284.
- [7] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 186-198.
Zhang Xian-da, and Bao Zheng. *Non-stationary Signal Analysis and Processing* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 186-198.
- [8] 陶然, 齐林, 王越. 分数阶 Fourier 变换的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 55-57.
Tao Ran, Qi Lin, and Wang Yue. *Fractional Fourier Transformation and Application of the Principle* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 55-57.
- [9] 祝正威. 雷达信号的聚类分选方法[J]. 电子对抗, 2005, 6: 6-10.
Zhu Zheng-wei. Clustering sorting method of radar signals[J]. *Electronic Warfare*, 2005, 6: 6-10.
- [10] 张明友, 汪学刚编著. 雷达系统(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006, 1: 247-286.
Zhang Ming-you and Wang Xue-gang. *Radar System (second edition)*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006, 1: 247-286.
- [11] 张发启等编著. 盲信号处理及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006, 10: 36-39.
Zhang Qi-fa, *et al.*. *Blind Signal Processing and Application*[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2006, 10: 36-39.

司锡才: 男, 1940年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽频带系统的信号检测、处理与识别。

柴娟芳: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为雷达信号的分选识别与跟踪。