

# 雷达 PRI 调制样式特性曲线的识别

吴振强, 张国毅, 常 硕

(空军航空大学, 长春 130022)

**摘要:**针对 PRI 调制样式特性曲线的特点提取了其最大值、等值比以及连续性参数作为特征参数,对 PRI 调制样式进行了分类,分析了非调制参数和调制参数对特性曲线和特征值的影响,利用支持向量机验证了存在脉冲丢失等噪声的情况下利用本研究提取的特征参数识别 PRI 调制样式的有效性。

**关键词:**PRI 调制样式;支持向量机;特性曲线

**本文引用格式:**吴振强,张国毅,常硕. 雷达 PRI 调制样式特性曲线的识别[J]. 四川兵工学报,2015(8):127-132.

**Citation format:**WU Zhen-qiang, ZHANG Guo-yi, CHANG Shuo. Identification of Radar PRI Modulation Style Characteristic Curve[J]. Journal of Sichuan Ordnance,2015(8):127-132.

**中图分类号:**TN957;TP18

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2015)08-0127-06

## Identification of Radar PRI Modulation Style Characteristic Curve

WU Zhen-qiang, ZHANG Guo-yi, CHANG Shuo

(Avation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** According to the characteristics of the PRI modulation style curve, we extracted its maximum, equivalence ratio and continuity parameter as the characteristic parameter, and classified the PRI modulation styles, and analyzed the influence of the modulation parameters and the modulation parameters on the characteristic value. Finally using support vector machine (SVM), we verified the effectiveness of the PRI modulation style using the characteristic parameters extracted in this paper under the condition of that there exists presence of loss of the pulse noise.

**Key words:** PRI modulation style; support vector machine; characteristic curve

雷达脉冲重复间隔(PRI)是雷达辐射源的重要参数之一,而不同的 PRI 调制样式将决定雷达具有不同的工作模式、用途以及威胁等级,因此,对 PRI 调制样式的识别是电子对抗侦察的重要内容之一<sup>[1]</sup>。传统的 PRI 调制样式识别主要有统计直方图法<sup>[2-4]</sup>和平面变换法<sup>[5-6]</sup>,前一种方法是根据 PRI 的统计分析实现调制样式的识别,其缺点在于需要对大量的脉冲数据进行人为分析,难以对小数据样本进行有效地识别;后一种方法虽然能处理小数据样本,但是需要不断地调整平面的宽度才能得到清晰的图像,难以实现自动处理。

针对上述问题,有人根据 PRI 序列提取出了分类特性较高的特征参数,实现了对 PRI 调制样式的自动识别,但是由于特征参数的个数较多,给分类器的设计带来了很大的困

难<sup>[7]</sup>;也有人针对 PRI 序列的特性曲线,实现了对其二维特征向量的自动识别,降低了特征参数的维数,也得到了较好的效果,但是并没有分析脉冲丢失等情况对特征参数变化的影响<sup>[8-10]</sup>。为此,针对在实际测量过程中存在的脉冲丢失的情况对 PRI 序列的特性曲线进行了新的特征提取及分析,并且利用支持向量机设计分类器<sup>[11-12]</sup>,实现了对 PRI 调制样式的自动识别,并且在一定的脉冲丢失的情况下仍有较高的识别率。

## 1 PRI 特性曲线

PRI 特性曲线是指对 TOA 序列做二阶差分即 PRI 序列的一阶差分,并利用符号函数表示 PRI 序列的变化方向,将

其结果进行累积和归一化处理得到的曲线,其具体的计算过程如下<sup>[13-14]</sup>。

设脉冲的 TOA 序列为  $\{t_n, n=1, 2, \dots, N\}$ , 然后对其做二阶差分, 如式(1), 即可得到 PRI 的一阶差分序列  $p(n)$ 。

$$p(n) = (t_{n+2} - t_{n+1}) - (t_{n+1} - t_n) \quad n = 1, 2, \dots, N-2 \quad (1)$$

将得到的 PRI 一阶差分序列  $p(n)$  按式(2)和式(3)进行符号化处理:

$$s(n) = \text{sgn}(p_n), \quad n = 1, 2, \dots, N-2 \quad (2)$$

$$\text{sgn}(n) = \begin{cases} -1 & p_n < -\varepsilon \\ 0 & |p_n| < \varepsilon \\ +1 & p_n > \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\varepsilon$  为可调参数, 表示 TOA 序列的测量精度, 但是认为的设定不能准确地反映实时的测量精度, 达不到实时处理的要求, 因此将门限设定为  $\varepsilon = \frac{\sum_{n=1}^{N-2} s(n)}{N-2}$ , 即 PRI 一阶差分序列

$p(n)$  的均值。

将符号化后的序列按式(4)进行累积和归一化处理, 得到最终的 PRI 调制样式特性曲线  $sp(n)$

$$sp(n) = \sum_{i=1}^n \frac{s(i)}{N-2} \quad n = 1, 2, \dots, N-2 \quad (4)$$

本研究主要研究的 PRI 调制样式为抖动 PRI、滑变 PRI、参差 PRI、组变 PRI 和正弦调制 PRI 5 种, 将 5 种 PRI 调制样式的典型序列按照上述的方法处理后得到的特性曲线如图 1 所示。

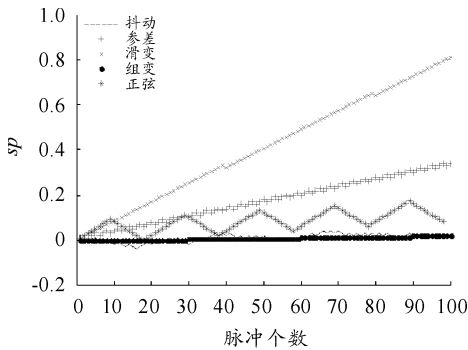


图 1 5 种 PRI 调制样式的特性曲线

从图 1 中可以看到, 5 种调制样式的特性曲线的形状及其变化趋势各不相同, 有各自的特点。因此, 可以通过提取特性曲线的特征参数完成对曲线的识别, 进而实现对调制样式的识别。

## 2 特征提取及分析

由于文献[8]中已经通过实验验证, 当各种 PRI 调制样式的调制参数发生改变时, 其特性曲线会发生不同程度的改变, 但是同种调制样式的特性曲线有类似的形状和变化趋势, 不同调制样式的特性曲线之间没有形状和变化趋势上的

相似之处。因此就能依靠对特性曲线的特征提取及识别完成对调制样式的识别。

### 2.1 曲线的特征提取

#### 1) $sp$ 曲线的最大值

从图 1 可以看到, 各个调制样式的  $sp$  曲线的最大值有所差别, 正常情况下区别最明显的是参差和滑变, 所以可以利用该特征将其识别出来。令该特征参数为  $T_1$ , 则有

$$T_1 = \max(sp(n)) \quad n = 1, 2, \dots, N-2 \quad (5)$$

#### 2) $sp$ 曲线的等值比

所谓等值比即  $sp$  曲线中其值连续相等的点的个数  $N_1$  与  $sp$  曲线总的长度的比值。从图一中可以看到只有组变样式中存在较多的连续相等的点, 因此正常情况下组变调制样式的该特征值应为最大。令该特征参数为  $T_2$ , 则有

$$T_2 = \frac{N_1}{N-2} \quad (6)$$

#### 3) $sp$ 曲线的连续性参数

对曲线的连续性参数作如下定义: 连续性参数等于曲线的尖角数  $N_2$  就与  $sp$  曲线总的长度的比值, 令该特征参数为  $T_3$ , 则有

$$T_3 = \frac{N_2}{N-2} \quad (7)$$

曲线的尖角数  $N_2$  的求法为: 从  $sp$  曲线的起点开始, 若存在某点满足  $\begin{cases} sp(n-1) > sp(n) \\ sp(n+1) > sp(n) \end{cases}$  或者  $\begin{cases} sp(n-1) < sp(n) \\ sp(n+1) < sp(n) \end{cases}$ , 则认为该点为  $sp$  曲线的尖角, 直至  $sp$  曲线最后一点, 统计满足该条件的所有点数就为尖角数。

从该特征参数的表达式可以看出, 尖角数越多,  $T_3$  的越大, 反而表明该曲线的连续性越差, 因此, 根据图 1 可以知道正常情况下正弦和滑变调制样式的  $T_3$  值应该小于其他调制样式。

### 2.2 各个因素对特征值的影响

#### 2.2.1 非调制参数的影响

##### 1) 脉冲个数

随着脉冲个数的增加,  $sp$  曲线的长度会不断增加, 虽然  $sp$  曲线的大致形状不会发生很大的变化, 但是曲线中所包含的各个调制样式所特有的变化趋势会增加。为了验证上述几个特征参数不会随着脉冲个数的增加而产生较大的变化, 对每种调制样式在调制参数不变时, 分别在无脉冲丢失的情况下随机产生 100 个样本数据, 其脉冲个数由 100 一直增加到 1 100, 按照上述方法对其进行特征提取, 得到各个特征参数分布如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 3 个特征参数随着脉冲个数的增加都能保持稳定的变化趋势, 并且各个特征参数能按照特征分析中的预期完成对调制样式的分类。

##### 2) 脉冲丢失率

当脉冲序列存在脉冲丢失时, 由 TOA 序列计算得到的 PRI 序列将会受到较大的影响, 从而会导致调制样式的特性曲线发生较大的变化, 进而可能引起特征参数发生变化, 以至于影响识别结果。为了验证所提出的特征参数在一定的

脉冲丢失率内仍具有较好的分类效果,在保证各个调制样式其他参数不变的情况下,将脉冲丢失率有 2% 依次增加到 40%,得到各个特征参数的分布如图 3 所示。

当脉冲丢失率较小时,各个特征参数具有较强的分类效果,随着脉冲丢失率增加到 35% 左右时,各个特征参数开始出现交叠,此时将难以利用上述几个特征参数完成识别。

### 2.2.2 调制参数的影响

上述分析了客观因素对特征参数的影响,但各个调制样式本身的调制参数也会对其  $sp$  曲线产生影响。因此,下面对影响各个调制样式的主要因素进行分析。

#### 1) 抖动 PRI

对于抖动调制样式,其最大的影响因素是 PRI 的抖动量,不同的抖动量对于 PRI 的变化产生不同的影响,从而影响各个特征参数。在保证其他参数相同的前提下,对抖动量分别为 5%、10%、15% 和 20% 的 PRI 序列进行特征提取,得到如图 4 所示。

从图 4 中可以看到,在抖动量不同的情况下,各个特征参数都能在一定的范围内进行变化,因此,这几个特征参数能满足对不同抖动量的抖动调制样式的识别。

#### 2) 参差 PRI

影响参差 PRI 特性曲线最大因素是参差个数,常见的有三参差、四参差和五参差,在其他条件相同时,分别对其特性曲线进行特征提取,得到如图 5 所示的结果。

就特征参数  $T_1$  和  $T_3$  的分布来看,参差调制样式的变化

范围分别为(0.3,0.5)和(0.4,0.7),但参差个数不同时,又有各自的变化范围,所以如果识别为参差调制样式,可以通过特征参数  $T_1$  和  $T_3$  进一步识别其参差个数。

#### 3) 正弦 PRI

正弦调制样式的主要调制参数有调制幅度、PRI 均值和调制速率,通过实验发现,其中对 PRI 序列特性曲线影响最大的是调制速率,图 6 是不同的调制速率对各个特征值的影响情况。

由图 6 可以看到,3 个特征参数在不同的调制速率下的参数值都能保持稳定的变化,并且各种情况下的各个特征值的变化范围相同,所以,调制速率对特征参数的影响不影响对调制样式的识别。

#### 4) 滑变 PRI

滑变 PRI 特性曲线受到的最主要的影响来自于滑变个数,通过实验发现,各个特征值随滑变个数的变化情况如图 7 所示。

虽然特性曲线的形状受滑变个数的变化影响较大,但是实验结果表明特性曲线的各个特征参数并没有发生较大的变化,而且具有稳定的变化范围。

#### 5) 组变 PRI

组变 PRI 与参差 PRI 类似,其最大的影响因素是组变组数,常见的有 3 组、4 组和 5 组的情形,在保持其他参数一样的情况下,分别对这 3 种情况进行特征提取,得到如图 8 所示的结果。

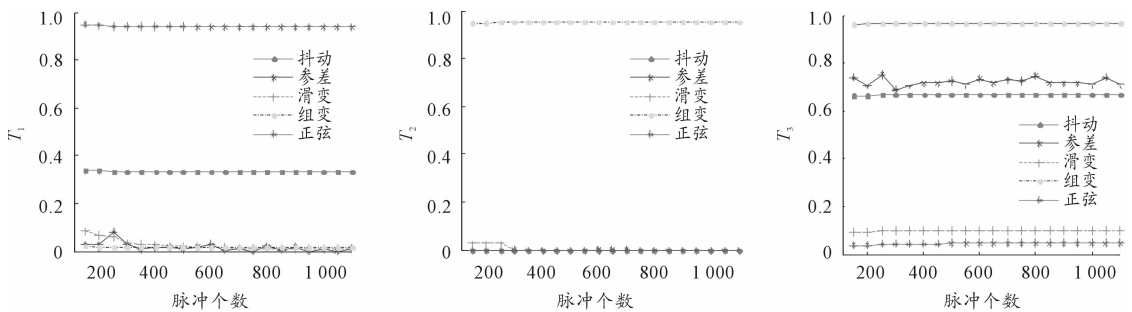


图 2 3 个特征参数随脉冲变化的分布情况

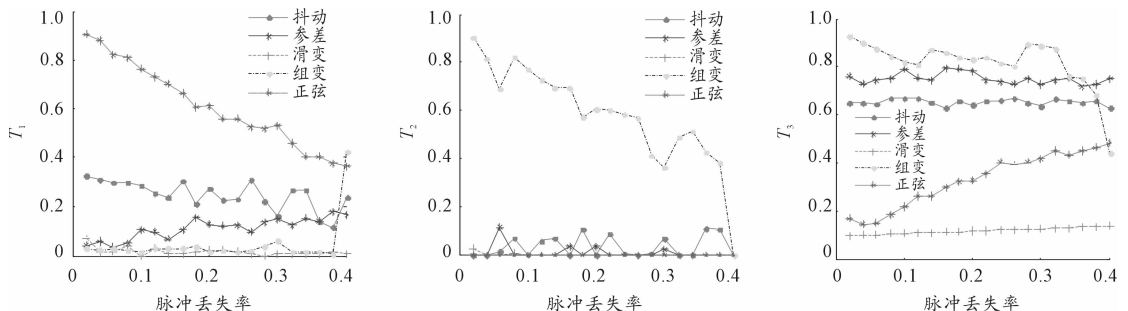


图 3 特性曲线及其特征参数随脉冲丢失率的变化情况

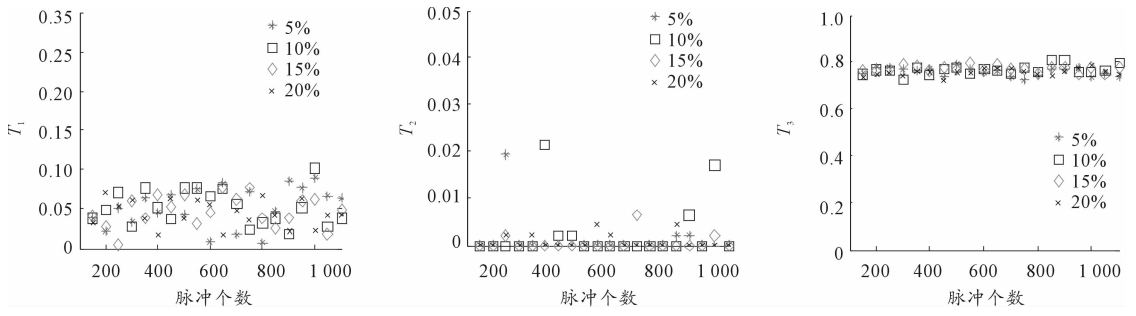


图4 抖动量对特征参数的影响

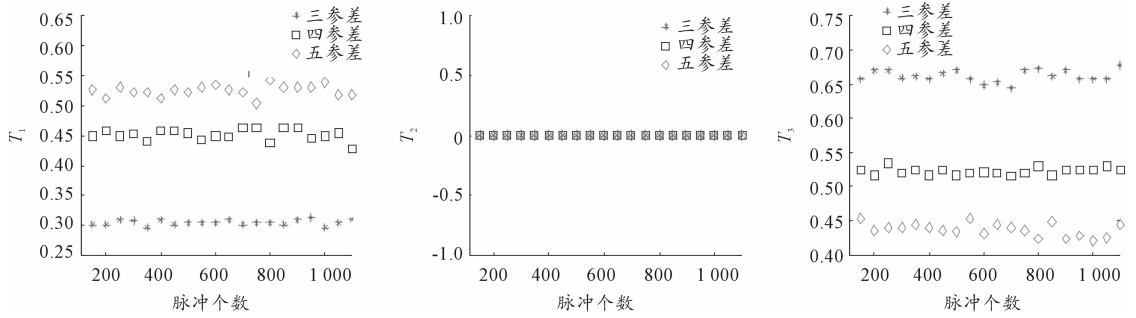


图5 参差个数对特征参数的影响

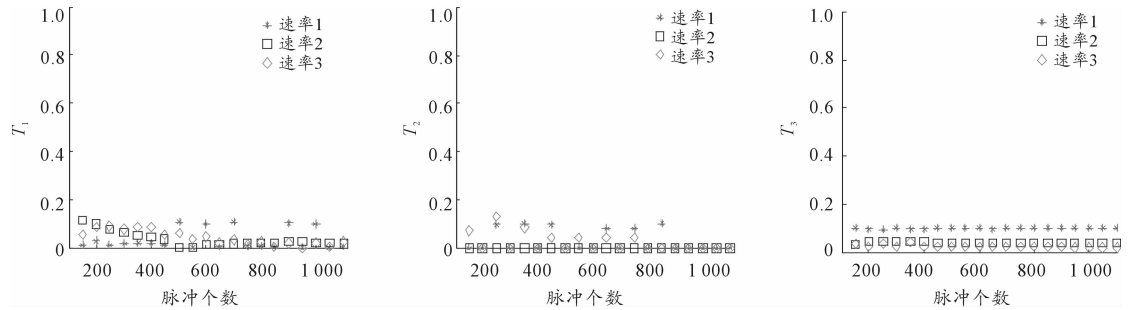


图6 调制速率对特征参数的影响

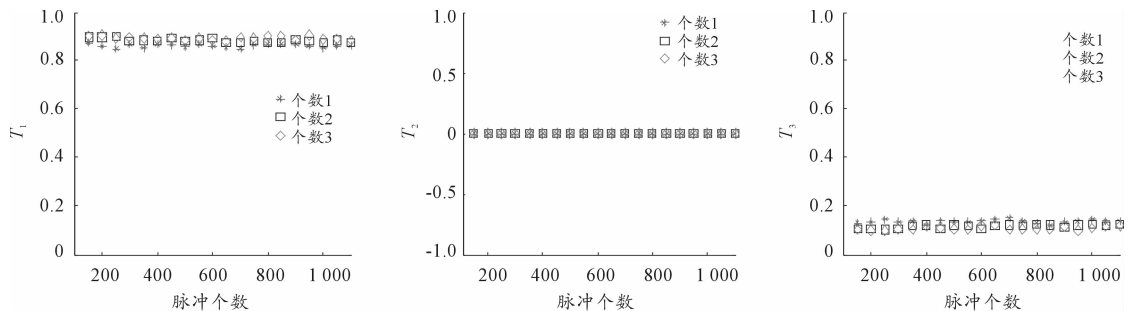


图7 滑变个数对特征参数的影响

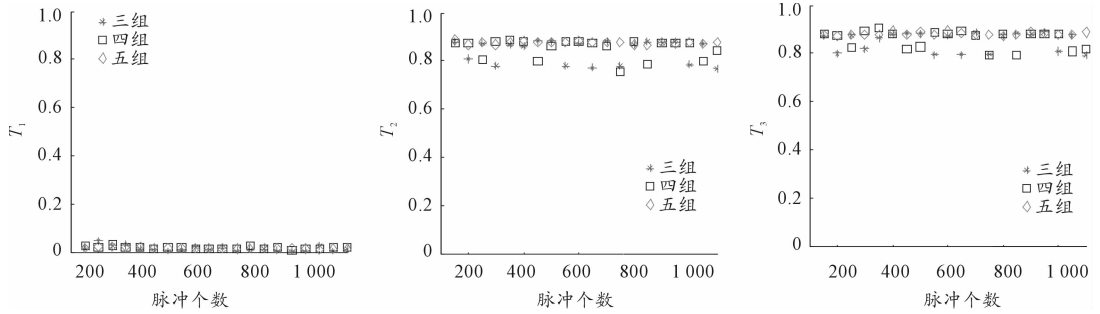


图8 组变个数对特征参数的影响

从实验结果来看,组变个数的变化并不会给特征参数带来较大的影响,所以,利用上述特征参数能完成对常见组变调制样式的识别。

### 3 综合分类效果

前面已经完成了对影响各种调制样式特性曲线的主要因素的分析,为了进一步检验本研究提出的3个特征参数对5种调制样式的分类效果,分别对5种调制样式进行特征提取,每种调制样式表1按所列的调制参数随机取100个样本,分别在脉冲丢失率为0%、5%、10%和20%时的分类效果如图9所示。

表1 调制类型参数表

重频调制类型	参数设定	脉冲个数
PRI 抖动	中心值 50 抖动量 3%	300
PRI 抖动	中心值 70 抖动量 5%	300
PRI 抖动	中心值 50 抖动量 5%	300
PRI 参差	[80 100 150]三参差	300
PRI 参差	[80 100 120 150]四参差	300
PRI 参差	[50 80 100 120 150]五参差	300
PRI 滑变	50~150 滑变个数 20	400
PRI 滑变	50~150 滑变个数 30	400
PRI 滑变	50~150 滑变个数 40	400
PRI 正弦	中心值 50 调制速率 30	500
PRI 正弦	中心值 50 调制速率 50	500
PRI 正弦	中心值 70 调制速率 80	500
PRI 组变	[80 100 150]三组 20	400
PRI 组变	[80 100 120 150]四组 30	400
PRI 组变	[50 80 100 120 150]五组 30	400

从图9中可以看到,本研究提出的特征参数对5种调制样式有较好的分类效果,随着脉冲丢失率的增加,仍然能保持较好的类内聚集性和类间可分性,为后期的识别工作打下了良好的基础。

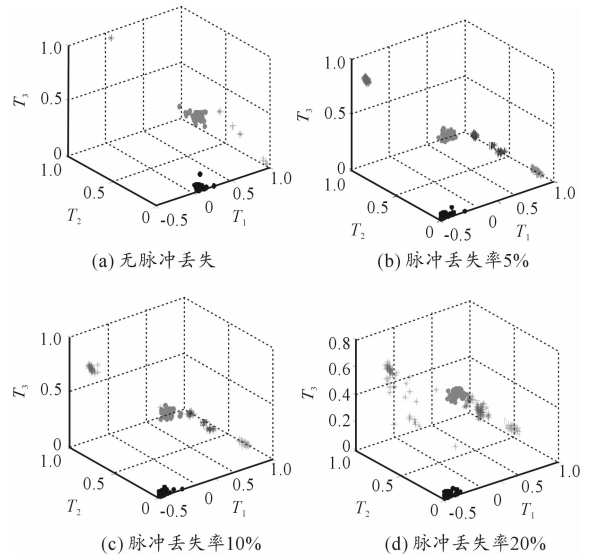


图9 5种调制样式分类效果图

### 4 利用支持向量机完成识别

#### 4.1 支持向量机原理

支持向量机理论最初来源于对数据的分类处理,它很好地解决了最优化决策分界线这一问题<sup>[15]</sup>。支持向量机分为线性和非线性2类,对于PRI调制样式识别这一问题,非线性支持向量机更为适合,因此下面对非线性支持向量机作简单介绍。

非线性支持向量机的原理是将输入向量映射到一个高维的特征向量空间,并且在该特征空间中构造最优分类面,它能避免在神经网络中所遇到的局部极小值和“维数灾难”等问题。支持向量机通过定义核函数,巧妙地解决了输入向量在由低维空间向高维空间的转化过程中,由于空间维数的增加,而导致的多数情况下难以直接在特征空间直接计算最佳分类面的这一问题。

对于模式识别分类的问题,常采用的核函数有多项式核函数、高斯核函数和径向基核函数,其中效果最好的是径向基核函数,其表达式如下

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{|x - x_i|^2}{\delta^2}\right) \quad (8)$$

## 4.2 分类识别实验

为了检验特征参数的识别效果,改变表 1 的参数设定,对每种调制样式随机产生 1000 个数据样本,每种调制样式选取其中 300 个样本作为训练样本,其余作为识别样本。为了更加真实地模拟实际识别过程,在识别过程中,利用脉冲丢失作为噪声对 PRI 调制样式进行干扰。在脉冲丢失率在 0% ~ 50% 时,支持向量机对各种调制样式的识别效果如表 2 所示。

表 2 识别结果

调制样式	0%	10%	20%	30%	40%	50%
抖动	100%	99.76%	95.37%	92.16%	75.17%	64.20%
参差	100%	99.88%	94.78%	90.47%	72.33%	61.25%
正弦	100%	100%	100%	100%	98.57%	95.20%
组变	100%	99.83%	96.23%	91.43%	79.58%	66.18%
滑变	100%	99.79%	97.50%	93.36%	81.45%	74.10%

由表 2 中可以看到,识别结果与第 3 节的分类效果保持一致,对于 PRI 正弦调制样式来说,在分类效果图中,它与其他调制样式之间有较大的类间距以及自身有很好的聚集性,因此尽管脉冲丢失率不断增大,但其仍有较高的识别率。

## 5 结论

本研究针对 5 种 PRI 调制样式的特性曲线进行了特征提取,有效地实现了 5 种调制样式的分类,并分析了各个调制参数以及非调制参数对特征参数的影响,得到了其变化规律,径向基核函数支持向量机对 5 种调制样式的识别结果也验证也所提取的特征参数的有效性和抗噪性。本研究所用方法与文献相比,虽然特征参数维数增大了一维,但对于分类器设计并没有带来很大的影响,反而提高了对 PRI 正弦调制样式的识别率,因此具有一定的现实意义。

## 参考文献:

[1] Richard G. The Interception and Analysis of Radar Signals

[M]. Artech House, USA, 2006: 276 - 277.

- [2] Marda H. New Techniques for the Deinterleaving of Repetitive Sequence[J]. IEEE Proceedings on Radar and Signal Process, 1989, 16(4): 149 - 154.
- [3] Milojevic D J, Propovic B M. Improved Algorithm for the Deinterleaving of Radar Pulses[J]. IEEE Proceedings F on Radar and Signal Process, 1992, 139(1): 98 - 104.
- [4] Ray P S. A Novel Pulse TOA Analysis Technique for Radar Identification[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronics Systems, 1998, 34(3): 712 - 720.
- [5] 刘鑫, 司锡才. 基于平面变换的雷达脉冲信号分选算法[J]. 应用科技, 2008, 35(10): 12 - 16.
- [6] 张西托, 饶伟, 杨泽刚, 等. 平面变换技术脉冲分选自动实现方法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(4): 495 - 500.
- [7] 陈晟, 姜秋喜, 潘继飞. 雷达 PRI 调制样式识别新方法[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(1): 31 - 34.
- [8] 荣海娜, 张葛祥, 金炜东. 基于频率和形状特征的脉冲重复间隔调制识别[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(2): 194 - 199.
- [9] 邹鹏, 莫翠琼, 张智, 等. 一种新的雷达重频模式识别方法[J]. 雷达与对抗, 2011, 31(2): 24 - 28.
- [10] 王春雷, 张磊. 一种新的雷达 PRI 调制特征提取方法[J]. 现代雷达, 2009, 31(5): 48 - 50.
- [11] 张葛祥, 荣海娜, 金炜东. 支持向量机在雷达辐射源信号识别中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(1): 25 - 30.
- [12] 关欣, 郭强, 张政超, 等. 基于核函数支持向量机的雷达辐射源识别[J]. 火箭与制导学报, 2011, 31(4): 188 - 191.
- [13] 李腾. 复杂重频样式雷达脉冲列的分析及识别算法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [14] 荣海娜. 复杂体制雷达辐射源信号脉冲重复间隔调制识别[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [15] 朱凯, 王正林. 精通 MATLAB 神经网络[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.

(责任编辑 杨继森)