

# Approach to Pulse Repetition Intervals Modulation Recognition of Advanced Radar

GUO Guohua<sup>1</sup>, HE Ming-hao<sup>2</sup>, HAN Jun<sup>1</sup>, XU Jing<sup>1</sup>

1. Department of Graduate Management, AFRA, Wuhan, China

2. Division of Training, AFRA, Wuhan, China

e-mail: guoguohua163@163.com, guoguohua163@163.com

**Abstract:** Aiming at the problem of pulse repetition intervals modulation recognition of advanced radar, a novel algorithm of recognition is proposed. According to the characteristic of every pulse repetition intervals modulation pattern, the algorithm extracts frequency and pattern character parameters and so on, and automatically identify FXPRI, STPRI, SLPRI and other patterns. The flowchart of this algorithm is introduced in this paper. The practical simulation results show that the extracted character parameters are effective; the recognition rate is comparatively high.

**Keywords:** pulse repetition intervals; character parameters; recognition; frequency and pattern character

## 复杂体制雷达重频模式识别方法

郭国华<sup>1</sup>, 何明浩<sup>2</sup>, 韩俊<sup>1</sup>, 徐璟<sup>1</sup>

1. 空军雷达学院研究生管理大队, 武汉, 中国, 430019

2. 空军雷达学院训练部, 武汉, 中国, 430019

e-mail: guoguohua163@163.com

**【摘要】**针对现代复杂体制雷达重频模式识别中存在的问题, 提出一种新的自动识别算法。该算法根据各种雷达重频模式的特点, 分别提取脉冲序列的频率和形状等特征参数, 自动识别出重频固定、重频参差和重频滑变等6种重频调制样式的脉冲序列。文章给出了识别算法的流程图, 并通过仿真实验证明, 本文提取的脉冲特征参数有效可行, 算法识别准确率较高。

**【关键词】**脉冲重复间隔; 特征参数; 识别; 频率和形状特征

### 1 引言

雷达重频模式是指雷达脉冲重复间隔(PRI)的调制样式, 它与雷达的用途、类型和工作状态紧密相关, 是电子对抗侦察情报分析的关键参数之一。通过提取分选后的脉冲到达时间序列的特征参数, 判别脉冲重复间隔的调制样式, 称之为雷达重频模式的识别<sup>[1]</sup>。当前雷达重频模式的识别方法主要是统计直方图法, 直方图法概念直观、实现简单, 有助于确定整个脉冲序列的统计特性, 但是此方法对脉冲个数的要求较多(至少几百个), 而且不能够实现各种模式的自动识别<sup>[2]</sup>。文献<sup>[3]</sup>和文献<sup>[4]</sup>提出了一种基于脉冲到达时间(TOA)差值矩阵的新的雷达重频模式识别方法, 此方法通过TOA差值矩阵逆矩阵的特殊结构实现了PRI调制样式识别, 对重

频固定, 重频参差的脉冲序列具有较高的识别率, 但是对于其它更加复杂调制样式的识别比较困难, 并且准确率低。文献<sup>[5]</sup>和文献<sup>[6]</sup>首先提取各种PRI序列不同的特征参数, 然后运用神经网络或贝叶斯网络等模式识别技术识别各种重频模式, 并取得了一定的成效, 能够识别各种复杂的重频模式, 但是提取的特征参数数量过多, 一方面增加了算法的运算量; 另一方面部分特征参数对于噪声和脉冲丢失率较为敏感。文献<sup>[7]</sup>提出了针对小数据样本的神经网络自动识别方法, 从脉冲到达时间序列提取一个N-2维的特征向量作为分类器的输入, 该方法解决了小样本数据的识别问题。但是, 此分类器结构复杂, 增加了训练时间, 系统稳定性不佳。文献<sup>[8]</sup>对文献<sup>[7]</sup>的方法提出了改进, 但是改进的方法对多参差重频信号的识别效果不佳。综合比较分析当前重频识别算法的优缺

基金项目: 武器装备预研基金 9140C1006090804

点, 本文提出一种新的重频模式识别算法, 通过对6种典型脉冲序列重频调制模式的仿真实验, 验证了该算法不仅能够自动识别各种重频模式, 而且算法实现简单, 识别准确率高。

## 2 典型雷达重频模式

在现代战场条件下, 大量复杂体制雷达被用于作战, 造成雷达信号环境日益复杂, 雷达重频的调制样式也更加复杂, 其中典型的重频模式有以下6种:

(1) 重频固定 (FXPRI): 重频固定的 PRI 值变化范围小于平均 PRI 的 1%。这种类型的信号通常用于搜索和跟踪雷达, 尤其是采用动目标显示技术和脉冲多普勒技术的雷达。

(2) 重频参差 (STPRI): 重频参差的 PRI 值在一个稳定的周期值左、右周期性地有规律转换。这种 PRI 参差可消除动目标盲速, PD 雷达也通过参差 PRI 解距离和速度模糊。

(3) 重频抖动 (JIPRI): 重频抖动雷达的 PRI 围绕一个平均值随机抖动, 抖动量为在某个区间 $[-T, +T]$ 内对称分布的随机序列, 最大相对抖动量通常在 $\pm 1\% \sim \pm 10\%$ , 有的雷达甚至能达到 30%左右。这种 PRI 抖动特征通常被用作一种电子反对抗手段, 对抗某些干扰。

(4) 重频滑变 (SLPRI): 重频滑变的 PRI 值单调地增加或减少, 然后在达到一个极值时快速返回到另一个极值。这可以用来消除遮盖(盲距), 并且出现的 PRI 变化是连续的。滑动的 PRI 还可以用来优化俯仰扫描。

(5) 重频分组 (DSPRI): 重频分组雷达脉冲序列由多个常规 PRI 波形构成, 一般每个 PRI 值持续一定的时间段然后切换到下一个 PRI 参数。高重频雷达和中等重频雷达通常采用 PRI 重频分组方式来解决距离和速度模糊问题。

(6) 正弦调制 (SIPRI): 正弦调制的 PRI 值在一个有限的范围内做几乎正弦的变化, 可用来消除遮盖或距离模糊, 但是更经常的是与圆锥扫描系统一起使用, 作为一项导弹制导技术。

## 3 新的重频模式识别算法

由于雷达信号的重频调制模式变化多样, 只采用单一的特征参数很难将其全部识别。本文首先根据重频固定和重频参差序列的固有特征, 提出两种特征参数以自动识别这两种重频模式, 然后基于文献<sup>[8]</sup>的方

法, 提取脉冲序列的频率特征和形状特征参数, 自动识别其它 4 种重频模式。

### 3.1 识别重频固定序列

设分选后的雷达信号的脉冲到达时间序列长度为  $N$ , 为滤除数据噪声产生的 PRI 野值, 定义 PRI 序列有效数值范围为  $\{PRI_{\min}, PRI_{\max}\}$ , 其中  $PRI_{\min}$  对应 PRI 序列最小值,  $PRI_{\max}$  对应 PRI 序列最大值, PRI 序列的总长度为  $N-1$ 。则 PRI 序列有效数值范围内的均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  分别为:

$$\mu = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} PRI_i \quad (1)$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^{N-1} PRI_i^2 - \mu^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

理想情况时, 重频固定序列的 PRI 值恒定不变, 其  $\sigma$  为零,  $\sigma/\mu$  也为零, 考虑测量误差时, 其  $\sigma/\mu$  趋向于零; 重频参差、重频滑变等其它重频调制序列的 PRI 值变化范围起伏不定, 其  $\sigma/\mu$  相对较大。设  $\varepsilon$  为重频模式区分门限, 对于重频固定模式,  $\sigma/\mu \leq \varepsilon$ , 对于其它的模式则  $\sigma/\mu > \varepsilon$ 。通过比较  $\sigma/\mu$  与门限  $\varepsilon$  的关系, 可以准确地识别出重频固定模式的脉冲序列,  $\varepsilon$  一般取 1%-3%<sup>[5,6,9]</sup>。

### 3.2 识别重频参差序列

设分选后的雷达信号的脉冲到达时间序列长度为  $N$ , 如果此脉冲序列不是重频固定序列, 则进一步判断是否为重频参差序列。

将脉冲到达时间序列作一级差直方图, 检测直方图过门限的 PRI 峰值的数目  $n$ 。

一级差直方图算法最佳检测门限为:

$$Y(\tau) = X(E-C)e^{\frac{-\tau}{KV}} \quad (3)$$

式中,  $E$  是脉冲总数,  $N$  为直方图上脉冲间隔的总刻度值,  $C$  是分选级数,  $\tau$  为时间间隔,  $K$  和  $X$  为正的常数, 其取值由实验确定。

重频参差序列的多个 PRI 值周期变化, 每个 PRI 值出现的次数较多,  $n$  值大于等于 1; 对于重频分组序列, 因每组 PRI 脉冲的个数不同, 有的脉冲序列  $n$  值为零, 有的脉冲序列  $n$  值为 1; 对于其它重频调制样式的脉冲序列,  $n$  均为 0。

由上述内容可知, 通过检测 PRI 峰值数目  $n$  的大小, 仍然不能识别出重频参差序列, 但是只要将  $n$  值

为 1 的重频分组序列滤除, 就能够准确识出重频参差序列。接下来通过定义新的序列 (DPRI 序列) 就能够实现这一目的。DPRI 的表达式为<sup>[7,8,10]</sup>:

$$DPRI_j = \{PRI_i - PRI_{i-1}\}_{i=2}^{N-1}, j = 1, 2, \dots, N-2 \quad (4)$$

然后利用符号函数  $S(j) = Sgn(DPRI_j)$  计算 DPRI 序列的符号, 得到 DPRI 符号序列, 计算公式为:

$$Sgn(DPRI_j) = \begin{cases} 1 & |DPRI_j| > \varepsilon \\ 0 & |DPRI_j| < \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon$  为 TOA 测量误差。

计算 DPRI 符号序列中数值 1 在整个序列中的比例值, 用  $\omega$  表示, 将比例值  $\omega$  作为识别重频参差序列的特征参数。由于重频参差序列相邻脉冲的 PRI 值变化范围较大, 数值 1 在 DPRI 符号序列占得比例也较大,  $\omega$  值也大; 而重频分组序列只有在 PRI 跳变时, 相邻 PRI 值变化范围才比较大, 因此数值 1 在 DPRI 符号序列占得比例较小,  $\omega$  值也小。考虑脉冲丢失等现象的影响, 一般情况下, 若  $\omega$  值大于等于 40%, 即  $\omega \in [0.4, 1]$ , 则判断脉冲序列为重频参差序列。

### 3.3 识别其它重频模式序列

通过提取脉冲序列的两个特征参数  $\sigma / \mu$  和  $\omega$ , 只能识别重频固定和重频参差序列, 而不能识别其它 4 种典型的重频调制序列。下面将分别提取脉冲序列的频率和形状特征参数用于识别其它 4 种重频调制样式。

再次定义 DPRI 序列(如公式 4 所示)。通过对脉冲 TOA 序列中 N 个元素的二次差分计算, 得到 N-2 维的向量  $DPRI = [DPRI_1, DPRI_2, \dots, DPRI_{N-2}]$ , 然后用符号函数  $S(i) = Sgn(DPRI_i)$  计算 DPRI 向量的符号, 得到 DPRI 符号向量  $S = [s_1, s_2, \dots, s_{N-2}]$  计算公式为:

$$Sgn(DPRI_i) = \begin{cases} 1 & |DPRI_i| > \varepsilon \\ 0 & |DPRI_i| < \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中参数  $\varepsilon$  由脉冲间隔的稳定情况决定, 一般取数十纳秒<sup>[7]</sup>。

最后通过下式所示的方法对 S 累加和归一化处理得到特征向量  $S_{cs}$ 。

$$S_{cs}(j) = \sum_{i=1}^j s_i / (N-2), \quad j = 1, 2, \dots, N-2 \quad (7)$$

图 2 给出了重频滑变和重频分组等其它的 4 种重频调制雷达信号的  $S_{cs}$  向量曲线。分析图中曲线的变化特征可知, 每种重频调制样式的  $S_{cs}$  向量存在明显的差异, 通过提取  $S_{cs}$  向量的频率特征和形状特征能够识别

这 4 种重频调制样式。

文献<sup>[7]</sup>直接将 N-2 维的  $S_{cs}$  向量和一个 2 维的标签向量作为神经网络分类器的输入向量, 识别重频组变、重频抖动、重频滑变和正弦调制等 4 种重频调制雷达信号。然而输入向量维数的增大导致分类器设计困难且结构复杂, 增加训练时间, 影响识别结果, 并且 PRI 调制参数的变化也会影响识别结果。对此, 文献<sup>[8]</sup>通过提取  $S_{cs}$  向量的频率特征和形状特征参数作为分类器的输入, 识别重频组变、重频抖动、重频滑变、正弦调制和重频参差等 5 种重频调制雷达信号。但是, 多参差重频调制序列的  $S_{cs}$  向量曲线没有固定的变化特征, 导致文献<sup>[8]</sup>提出的方法对多参差重频序列的识别效果不佳, 并且由于重频固定序列的  $S_{cs}$  向量的值全部为零, 提取它的频率特征后容易与重频分组序列混淆, 因此, 本文只用频率和形状特征参数分别识别其它 4 种重频调制雷达脉冲序列。

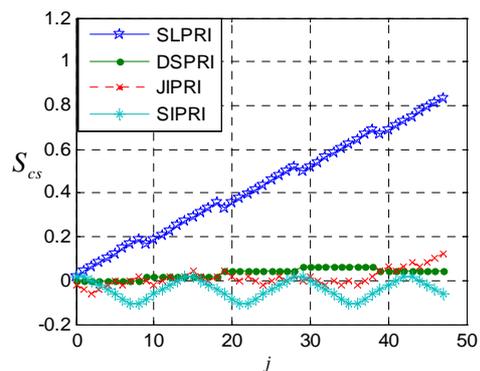


Figure 1. Curve:  $S_{cs}$  vectors of 4 PRI trains  
图 1. 其它 4 种重频调制序列的  $S_{cs}$  向量曲线

#### (1) 提取频率特征

为了提取  $S_{cs}$  向量的频率特征, 将  $S_{cs}$  向量进行离散序列快速傅里叶变换, 变换公式如下所示:

$$f(k) = \sum_{j=1}^{N-2} S_{cs}(j) w_N^{(j-1)(k-1)}, w_N = e^{(-2\pi i)/(N-2)} \quad (8)$$

然后通过下式求得平均和  $P_f$ 。

$$P_f = (\sum_{k=1}^{N-2} f(k)) / (N-2) \quad (9)$$

将  $P_f$  作为向量的频率特征。实验数据表明, 重频滑变脉冲序列的  $S_{cs}$  向量曲线的频率特征参数取值较大, 若特征参数  $P_f \in [1, 2]$ , 雷达脉冲序列为重频滑变调制序列。重频分组脉冲序列的  $S_{cs}$  向量只在 PRI 值跳变时出现阶跃现象, 其频率特征参数取值很小, 趋向于零, 若特征参数  $P_f \in [0, 0.1]$ , 雷达脉冲序列为重频

分组调制序列。正弦调制和重频抖动序列的频率特征参数取值变化不定,当特征参数  $P_f$  值在其它数值区间时,雷达脉冲序列可能为正弦调制或重频抖动序列。

(2) 提取形状特征

如果频率特征参数仍不能识别脉冲序列的调制样式,将继续提取脉冲序列的形状特征参数,判断脉冲序列是重频抖动序列还是正弦调制序列。重频抖动和正弦调制序列对应的  $S_{cs}$  向量曲线的形状变化是不同的,我们将曲线的转折点数量作为其形状的一个度量标准来提取向量的形状特征。首先计算向量元素间的变化量:

$$\det(k) = S_{cs}(k+1) - S_{cs}(k), k = 1, 2, \dots, N-3 \quad (10)$$

根据  $\det(k)$  值正负符号的变化情况,统计  $S_{cs}$  曲线的转折点。其具体步骤如下:

- ①、令常数  $k=1$ ,  $num=0$ 。
- ②、当  $1 \leq k \leq N-5$  时,若  $\det(k) * \det(k+1) < 0$  或  $\det(k+1) = 0$  且  $\det(k) * \det(k+2) < 0$ ,  $num=num+1$ 。
- ③、当  $k=N-4$  时,若  $\det(k) * \det(k+1) < 0$ ,  $num=num+1$ 。
- ④、若  $k < N-4$ ,  $k=k+1$ ,转到②,否则转到⑤。
- ⑤、 $P_s = num / (N-3)$ 。

$P_s$  值则是表征  $S_{cs}$  向量曲线的形状特征参数。实验数据表明,重频抖动序列和正弦调制序列的  $S_{cs}$  向量曲线的形状特征差异比较大,形状特征参数能够准确识别这两种重频样式。若特征参数  $P_s \in [0.03, 0.3]$ ,雷达脉冲序列为正弦调制序列。若特征参数  $P_s \in [0.5, 0.8]$ ,雷达脉冲序列为重频抖动调制序列。

通过上文分析,本文所提的雷达重频模式自动识别算法的流程图如图 2 所示。

4 实验仿真

为了测试提取的四个特征参数的有效性,我们用模拟的信号源产生侦察分选后的雷达脉冲序列 (TOA)。对每种调制类型,随即产生 1000 个样本数据,每个脉冲序列样本是一个长度为 100 的 TOA 序列。信号源产生的雷达脉冲重频调制样式以及调制参数的变化范围如表 1 所示。

按照本文提出的识别算法,分步骤提取样本数据的各个特征参数。为了验证特征参数的有效性,分别仿真不同调制类型的特征参数变化曲线,每种调制类型给出 50 个样本。图 3 至图 6 为每次判别时,对应的各种重频样式特征参数的变化曲线。

从图 3 可以看出,即使同一种调制模式的调制参

数不同,通过提取脉冲序列的特征参数  $\sigma/\mu$ ,也可以

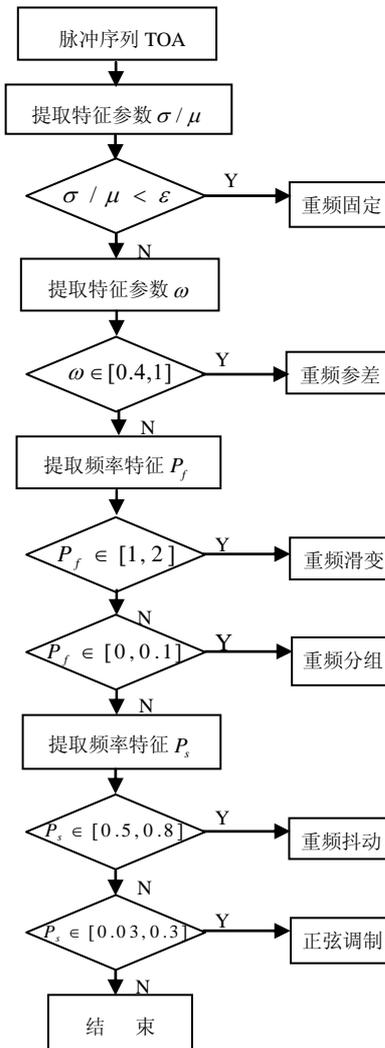


Figure 2. flow chart of the neural recognition algorithm  
图 2. 雷达重频模式识别算法的流程图

Table 1. Every PRI pattern and the range of every modulation parameter

表 1. 各种重频调制样式以及调制参数的变化范围

| 调制类型 | PRI 范围 (us) | 相邻 PRI 幅度变化量 (%) | 调制参数             |
|------|-------------|------------------|------------------|
| 重频固定 | 100~1000    | 0~1              | \                |
| 重频参差 | 50~100      | 10~30            | 二, 三, 四参差        |
| 重频渐变 | 100~1000    | 1~600            | 周期为 7/10/20 个脉冲  |
| 重频分组 | 50~500      | 0~20             | 每组 15/20/30 个脉冲  |
| 重频抖动 | 100~1000    | 6~30             | \                |
| 正弦调制 | 100~500     | 1~5              | 周期为 20/30/50 个脉冲 |

将重频固定模式从其它的调制样式中识别出来。将不

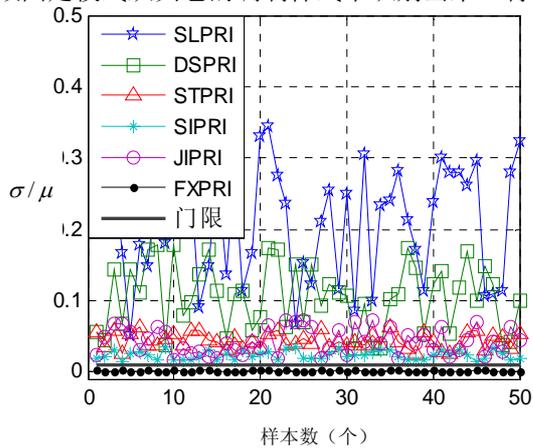


Figure 3. Curve:  $\sigma/\mu$  of PRI in the first recognition  
图 3. 第一次判别时重频模式的  $\sigma/\mu$  变化曲线

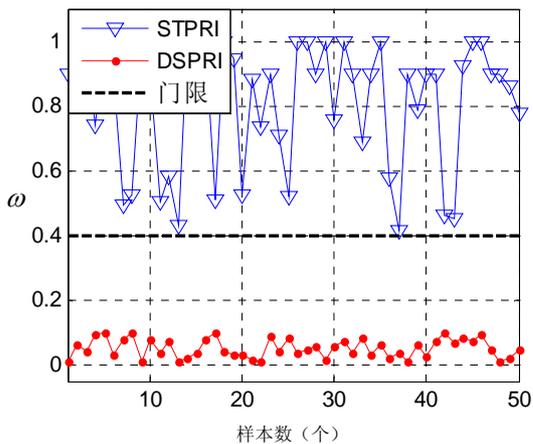


Figure 4. Curve:  $\omega$  of PRI in the second recognition  
图 4. 第二次判别时重频模式的  $\omega$  变化曲线

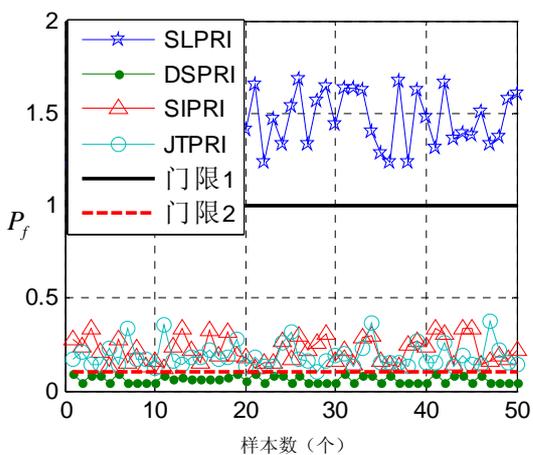


Figure 5. Curve:  $P_f$  of PRI in the third recognition  
图 5. 第三次判别时重频模式的  $P_f$  变化曲线

能够识别的脉冲序列作 PRI 直方图, 统计过门限的峰值数目  $n$ , 重频参差序列的  $n$  值大于等于 1, 部分重频分组序列的  $n$  值为 1。然后提取峰值  $n$  大于等于 1 的重频参差和重频分组序列的特征参数  $\omega$ , 从图 4 可以看出, 依据  $\omega$  值能够识别出重频参差序列。从图 5 和图 6 可以看出, 通过提取前两步不能够识别的脉冲序列的频率特征  $P_f$  和形状特征  $P_s$ , 能够依次识别重频渐变、重频分组, 重频抖动和正弦调制的脉冲序列。

为了研究该方法对恶劣电磁环境的适应能力, 在包含 100 个脉冲的脉冲 TOA 序列里随机加入 5%, 10% 的丢失脉冲, 或者加入 5%, 10% 的虚警脉冲, 分别研究脉冲丢失和虚警脉冲对识别率的影响。实验统计结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 本文提出的识别新算法, 在脉冲丢失率或脉冲虚警率为零时, 重频模式的识别率为 100%, 在脉冲丢失率或者脉冲虚警率为 10% 时, 重频模式的识别率仍在 95% 以上。由仿真实验可以看出, 该算法不仅保证了对重频模式的识别准确率, 而且算法实现简单, 能够自动识别各种重频调制样式。

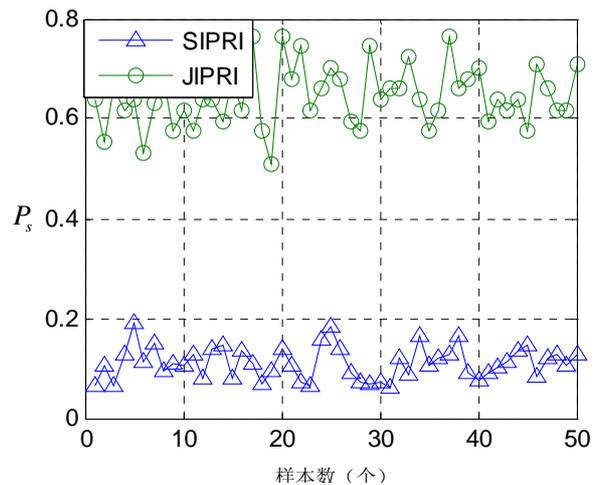


Figure 6. Curve:  $P_s$  of PRI in the fourth recognition  
图 6. 第四次判别时重频模式的  $P_s$  变化曲线

## 5 结束语

本文根据各种重频模式的特点, 首先利用 PRI 序列有效数值范围内的均值和标准差的关系, 实现重频固定序列的识别; 然后利用重频参差序列相邻脉冲 PRI 值变化较大的特征, 提取特征参数, 根据此参数的数值区间范围, 自动识别重频参差序列; 最后通过提取脉冲序列的频率特征和形状特征参数, 实现其它

重频调制模式的识别。实验仿真结果表明，该算法仅

**Table 2. Recognition rate of 6 PRI patterns(%)**  
**表 2. 6 种重频模式的识别准确率(%)**

| 重频模式 | 理想情况 | 脉冲丢失率为 5% | 脉冲丢失率为 10% | 脉冲虚警率为 5% | 脉冲虚警率为 10% |
|------|------|-----------|------------|-----------|------------|
| 重频固定 | 100  | 99.8      | 97.5       | 99.6      | 96.8       |
| 重频参差 | 100  | 99.7      | 98.8       | 99.8      | 98.9       |
| 重频滑变 | 100  | 99.8      | 99.3       | 99.9      | 99.6       |
| 重频分组 | 100  | 99.5      | 98.3       | 99.9      | 99.4       |
| 重频抖动 | 100  | 99.3      | 98.6       | 99.1      | 98.3       |
| 正弦调制 | 100  | 99.2      | 98.5       | 99.0      | 98.2       |

仅需要少量的脉冲序列就能够实现对各种重频模式的自动识别，并且在一定的脉冲丢失率和虚警率的影响下识别率仍然较高。

## 6 致谢

感谢武器装备预研基金（9140C1006090804）的资助，感谢审稿专家和编辑老师对本文的指导和帮助。

## References (参考文献)

[1] ZHAO Guoqing. Radar countermeasure Principle[M]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China Press.1999.  
 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 1999.

[2] PoosalaV,IoannidisYE. Improved Histograms for Selectivity

Estimation of Range Predicates [C]. Proceedings of ACMSIG-MOD Conference, 1996: 294 - 305.

[3] ZHANG Xituo, RAO Wei, LI Changwen. PRI recognition methods of radar pulse sequences based on TOA difference matrix[J]. Command Control & Simulation, 2009, 31(1):33-37.  
 张西托, 饶伟, 李长文. 基于 TOA 差值矩阵的雷达脉冲序列 PRI 识别方法[J]. 指挥控制与仿真, 2009 年, 31(1):33-37.

[4] WANG Wei, YANG Xiaoling. Radar emitter recognition based on TOA difference matrix[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2004 (1) :48-51.  
 王伟, 杨晓玲. 一种基于 TOA 差值矩阵的辐射源识别方法[J]. 航天电子对抗, 2004(1):48-51.

[5] ZHOU Changshu, Wang Jianpeng, LIU Zheng, CHENG Hongwei. A Neural approach for PRI character identification[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2007,23(5):43-45.  
 周昌术, 王建鹏, 柳征, 程洪玮. 一种新的重频识别方法[J]. 航天电子对抗, 2007 年, 23(5): 43-45.

[6] WANG Jianpeng, CHU Cuiqiang, WU Jing, LIU Zheng. Approach to Radar Pulse Repetition Intervals Modulation Recognition Basedon Bayesian Networks[J],Electronical Information Ccountermeasure Technology, 2007,22(2):14-17.  
 王建鹏, 初翠强, 吴京, 柳征. 一种基于贝叶斯网络的雷达重频模式识别方法[J]. 电子信息对抗技术, 2007 年, 22(2):14-17.

[7] Gregory P.Noone. A neural approach to automatic pulse repetition interval modulation recognition[C], Proceeding of International Conference on Information, Decision and Control. 1999, 213-218.

[8] RONG Haina, ZHANG Gexiang, JIN Weidong. Pulse repetition interval modulation recognition based on frequencies and patterns[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007,42(2):194-199.  
 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 年, 42(2): 194-199.

[9] KONG Hui, WANG Jiegui, SONG Xiaomei. Approach to radar pulse repetition interval model identification based on minimal spanning tree-verdict field[J]. Electronical Information Ccountermeasure Technology, 2008, 26(3):12-16.  
 孔辉, 王杰贵, 宋小梅. 基于最小张数判决域法的雷达重频模式识别[J]. 电子信息对抗技术, 2008 年, 23(6): 12-16.

[10] SHENG Jiuzhao, SHU Kun. A approach to pulse repetition intervals modulation recognition[J]. Shipboard electronic countermeasure, 2003, 26(3):4-6.  
 盛九朝, 束坤. 一种雷达脉冲序列重频类型识别方法[J]. 舰船电子对抗, 2003 年, 26(3): 4-6.