

余弦加权抗抖动脉冲分选算法

聂玉明¹, 金 铭^{1,2}, 栾 超², 乔晓林^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 150001 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 信息工程研究所, 264209 山东 威海)

摘 要: 为了改善直方图算法在雷达信号分选时的抗抖动性能,提出了一种基于余弦加权的分选算法. 该方法采用可变长度的交叠箱,收集到的雷达脉冲重复间隔(PRI)落入数个连续的箱体,对这些箱体的直方图增量进行归一化余弦平滑加权,在超过门限的谱峰处得到估计的雷达脉冲重复间隔(PRI). 该方法得到的直方图比较平滑,谱峰清晰,且能有效地抑制二次谐波. 实验结果表明,该算法具有良好的抗抖动性能.

关键词: 雷达信号分选;脉冲重复间隔;余弦加权;序列差直方图

中图分类号: TN 95

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)07-0042-05

Anti-jitter pulse sorting method using cosine weighting

NIE Yuming¹, JIN Ming^{1,2}, LUAN Chao², QIAO Xiaolin^{1,2}

(1. Department of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. Institute of Information and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Shandong Weihai, China)

Abstract: This paper presents a sorting method based on cosine weighting to improve the anti-jitter ability of histogram algorithm in radar signal sorting. This method uses variable and superposed boxes, into which the collected radar pulses repetition interval (PRI) falls, and the histogram increment of these boxes are normalized weighted by cosine window smoothly. Each peak position of the histogram that exceeds threshold is the estimated PRI of radar. The histogram obtained by this method is smooth and the peak is clear. Furthermore, the sub-harmonic is well restrained. Experimental result shows that this method has good anti-jitter ability.

Key words: radar signal sorting; PRI; cosine weighting; SDIF

雷达辐射源信号分选是雷达对抗侦察系统中的关键处理技术,是雷达特征提取、识别、威胁等级评估的前提. 脉冲到达时间(TOA)、脉冲射频(RF)、脉冲到达角(AOA)等是雷达脉冲去交织的重要参数^[1-2]. 基于PRI(Pulse Repetition Interval)特征的信号分选是目前雷达对抗侦察系统中使用最广泛的方法^[3]. 20世纪80年代, Rogers等开始研究高密度复杂信号环境下的实时信号分选算法. 1989年Marida等提出了著名的累积差直方图(CDIF)分选方法^[4]. 1992年Milojevic等对CDIF进行了改进,提出了序列差直方图

(SDIF)算法^[5]. 2003年赵长虹等在小波变换理论的基础上提出了一种新的重频门限选择算法^[6],使得CDIF算法适用于脉冲分布不均匀的情况,进一步研究了基于CDIF的参差脉冲序列的改进算法. PRI直方图的优点在于算法简单,直观,且算法易于工程实现,主要适合于PRI固定且抖动较小的雷达辐射源信号. 但在抖动较大时,效果比较差.

2000年, Nishiguchi K等提出PRI变换的方法对雷达脉冲进行分选^[7]. 该方法具有良好的抗抖动性,但复杂度比较高^[8]. 近几年来,基于多参数的雷达信号预分选算法不断涌现^[9-14].

传统直方图的方法,箱体为长度不变的刚性箱体,当脉冲的PRI抖动比较大时,脉冲间隔就可能落入相邻箱体,因此其抗抖动性能较弱. 通过引入可变长度交叠箱体,当脉冲的PRI抖动比较

收稿日期: 2012-07-29.

作者简介: 聂玉明(1981—),男,讲师,博士研究生;

金 铭(1968—),男,教授,博士生导师;

乔晓林(1948—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 聂玉明, nieyuminghit@gmail.com.

大时,会落入到数个交叠箱体,对数个交叠箱进行余弦平滑加权,并对加权进行归一化.不妨称此方法为余弦加权的直方图(HWCW: Histogram Weighted by Cosine Window)算法.

1 HWCW 算法描述

1.1 HWCW 算法交叠箱体的确定

传统直方图第 k 个刚性箱体的中心值

$$\tau_k = \frac{k - 1/2}{K} \cdot (\tau_{\max} - \tau_{\min}) + \tau_{\min}. \quad (1)$$

式中: $(k = 1, 2, \dots, K)$, $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 为 PRI 估计的界限, K 为箱体总数目. K 的取值影响到估计的 PRI 精度, K 越大, 估计出的 PRI 精度越高, 但计算量会相应增加. 箱体的宽度为固定值

$$\Delta = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / K. \quad (2)$$

为了提高算法的抗抖动性, 采用可变长度的交叠箱体.

第 k 号箱体的下界

$$\text{binmin}_k = \tau_k \cdot (1 - \varepsilon). \quad (3)$$

第 k 号箱体的上界

$$\text{binmax}_k = \tau_k \cdot (1 + \varepsilon). \quad (4)$$

式中: ε 为经验参数, 表征箱体的交叠程度. ε 越大, 交叠箱交叠的部分越宽, 抗抖动性越好. 但 ε 过大, 同一脉冲间隔落入交叠箱的箱体数过多, 因而得到的直方图值偏大, 容易造成虚警, ε 的取值可参考 PRI 抖动的上限, 一般情况下 ε 的取值范围为 $0 < \varepsilon < 0.3$.

若箱体宽度 $\text{binmax}_k - \text{binmin}_k < \Delta$, 则

$$\text{binmin}_k = t_k - \Delta/2. \quad (5)$$

$$\text{binmax}_k = t_k + \Delta/2. \quad (6)$$

对时间间隔 $\tau = t_n - t_m$, 如果 τ 满足 $(1 - \varepsilon) \cdot \tau_{\min} < \tau < (1 + \varepsilon) \cdot \tau_{\max}$, 求得满足 $\text{binmin}_k < \tau < \text{binmax}_k$ ($k = 1, 2, \dots, K$) 的 k 的最小值 k_1 , 最大值 k_2 , 此时 τ 可能落入 k_1 到 k_2 的箱体中.

τ 落入 k_1 到 k_2 的箱体中的概率并非相等, 越靠近 k_1 到 k_2 的箱体中心, 概率越大. 选用平滑性能较好的余弦窗衡量其概率.

1.2 HWCW 算法中加权余弦窗方法

通过对第 k_1 到第 k_2 个箱体进行余弦平滑加权, 使得直方图变得比较平滑, 在超过门限的谱峰处得到雷达信号估计的 PRI 值.

1.2.1 余弦窗口平滑加权

如图1, 窗口宽度 $(-\pi/2, \pi/2]$ $k = k_1 - 1, k_1, k_1 + 1, \dots, k_2, k_2 + 1$, 窗口共有 $k_2 - k_1 + 2$ 间隔, 间隔大小

$$\Delta = \pi / (k_2 - k_1 + 2). \quad (7)$$

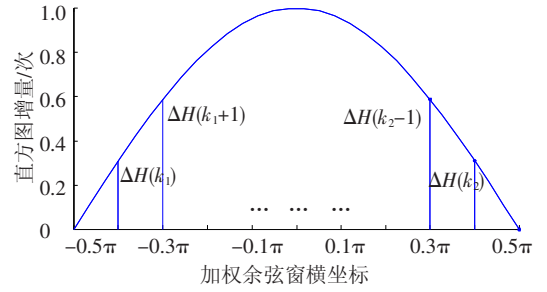


图1 直方图余弦加权方法

第 k 个箱体 ($k_1 - 1 \leq k \leq k_2 + 1$) 其直方图增量对应的窗口宽度为

$$-\frac{\pi}{2} + \Delta \cdot (k - k_1 + 1). \quad (8)$$

其直方图的增量 ΔH_k 为余弦窗的窗口值, 即

$$\Delta H_k = \cos \left(-\frac{\pi}{2} + \Delta \cdot (k - k_1 + 1) \right). \quad (9)$$

在 $k = k_1 - 1$ 及 $k = k_2 + 1$ 处,

$$\Delta H_{k_1-1} = \cos(-\pi/2) = 0. \quad (10)$$

$$\Delta H_{k_2+1} = \cos(\pi/2) = 0. \quad (11)$$

1.2.2 直方图增量归一化

第 k_1 到第 k_2 个箱子窗口值增量总和

$$\text{sum} = \sum_{k=k_1}^{k_2} \cos \left(-\frac{\pi}{2} + \Delta \cdot (k - k_1 + 1) \right). \quad (12)$$

对窗口值进行归一化处理, 第 k 个箱体直方图增量:

$$\Delta H_k = \cos \left(-\frac{\pi}{2} + \Delta \cdot (k - k_1 + 1) \right) / \text{sum}. \quad (13)$$

更新其直方图, 则有

$$H_k = H_k + \cos \left(-\frac{\pi}{2} + \Delta \cdot (k - k_1 + 1) \right) / \text{sum}. \quad (14)$$

1.3 HWCW 统计 C 级直方图方法

如图2, HWCW 算法步骤:

1) $H_k = 0$, ($k = 1, 2, \dots, K$), $m = 1$.

2) $n = m + 1$.

3) $T = t_n - t_m$, 如果 $\tau \leq \tau_{\min}$, 跳到步骤(6), 如果 $\tau \geq \tau_{\max}$, 跳到步骤(5).

4) 对每一对满足条件的 (m, n)

① 求满足 $\text{binmin}_k < t < \text{binmax}_k$ ($k = 1, 2, \dots, K$) 的 k 的最小值 k_1 及最大值 k_2 , 并计算 Δ .

② 更新直方图

$$5) H_k = H_k + \cos \left(-\frac{\pi}{2} + \Delta \cdot (k - k_1 + 1) \right) / \text{sum},$$

$$\text{sum} = \sum_{k=k_1}^{k_2} \cos \left(-\frac{\pi}{2} + \Delta \cdot (k - k_1 + 1) \right).$$

6) 更新 n : $n = n + 1$. 如果, $n < m + C$ 跳到步骤2).

7) 更新 m : $m = m + 1$. 如果, $m < N - C$ 则跳

到步骤(3);否则,结束.

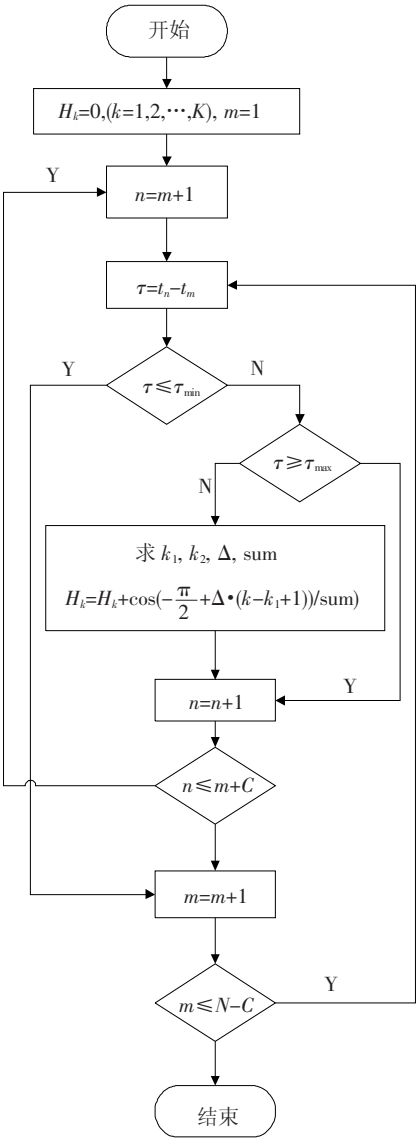


图 2 HWCW 算法计算第 C 级直方图流程

1.4 HWCW 算法的检测门限

检测门限直接影响到雷达信号分选算法的性能,采用文献[5]提出的指数型门限:

$$T_{\text{threshold}}(\tau) = x(N - C)e^{-\tau/kK}. \quad (15)$$

式中: N 是总脉冲数, K 是直方图箱体总数, C 是直方图级数, τ 是脉冲时间间隔, x,k 是由实验确定的经验参数,其取值范围为 $0 < x < 1, 0 < k < 1$. x 或 k 的值过大,则检测门限过高,会造成漏警概率升高; x 或 k 的值过小,则检测门限过低,虚警概率升高.我们通过实验仿真,给出的 x 值为0.15, k 值为0.3.

2 HWCW 算法仿真实验

为了详细比较 HWCW 与 SDIF 算法的抗抖动性能,对小于 20% 的抖动,以 0.5% 的抖动量作间隔,进行仿真实验.对不同的抖动,均进行 100 次

实验.

实验 1 3 部雷达, PRI 分别为 $6 \times 10^{-5} \text{ s}$, $1.85 \times 10^{-4} \text{ s}$, $2.25 \times 10^{-4} \text{ s}$, 混合脉冲总数 N 为 400 个,直方图所用箱体数 K 为 200 个. HWCW 算法有关检测门限的经验参数 $x = 0.15, k = 0.3, \varepsilon = 0.15$.

当抖动为 7% 时,采用 SDIF 算法,其一级直方图(图 3),二级直方图(图 4)均没有超过门限的 PRI,三级直方图(图 5)检测到的 PRI 在 $1.2 \times 10^{-4} \text{ s}$ 左右,是真实 PRI 值为 $6 \times 10^{-5} \text{ s}$ 的谐波,算法失效.

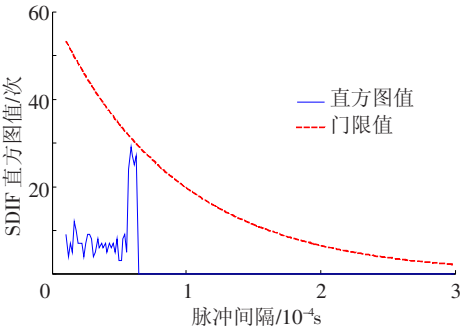


图 3 实验 1:SDIF 一级直方图

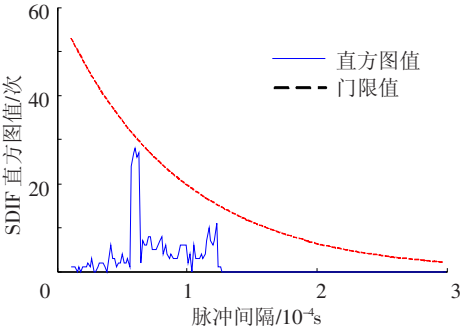


图 4 实验 1:SDIF 二级直方图

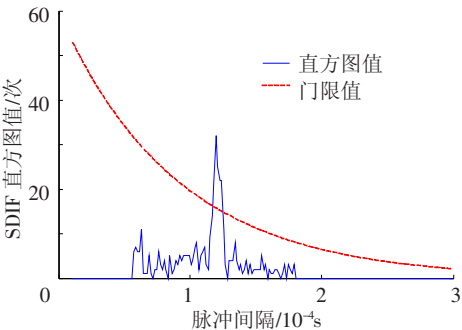


图 5 实验 1:SDIF 三级直方图

当抖动增大到 15% 时,采用 HWCW 算法,未进行序列搜索时,其一级直方图如图 6 所示,超过门限的谱峰值,可以检测出混合脉冲中最小的 PRI,即 $6.002 \times 10^{-5} \text{ s}$ (真实值为 $6 \times 10^{-5} \text{ s}$),在 $1.2 \times 10^{-4} \text{ s}$ 附近没有谐波被检测出,谐波得到了良好的抑制.进行一次序列搜索后的一级直方图如图 7 所示,超过门限的谱峰值,可以检测出混合脉冲中间的 PRI,即 $1.847 \times 10^{-4} \text{ s}$ (真实值为 $1.85 \times 10^{-4} \text{ s}$),两次序列搜

索后的一级直方图如图 8 所示,超过门限的谱峰值,检测出混合脉冲中最大的 PRI,即 2.253×10^{-4} s(真实值为 2.25×10^{-4} s).

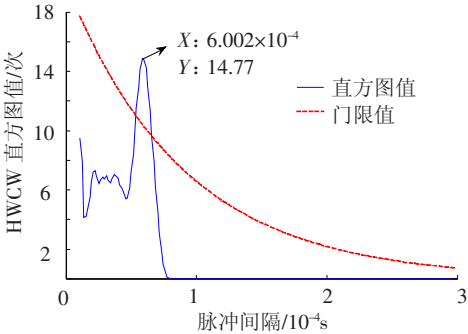


图 6 实验 1:未序列搜索一级 HWCW 直方图

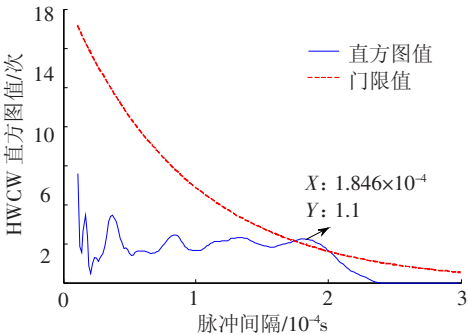


图 7 实验 1:一次序列搜索后一级 HWCW 直方图

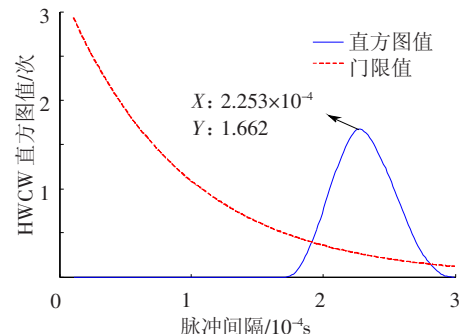


图 8 实验 1:两次序列搜索后一级 HWCW 直方图

图 9 表示未进行序列搜索时 HWCW 与 SDIF 算法一级直方图检测 PRI 成功的概率随抖动能量的变化.当抖动量超过 5% 时,SDIF 算法性能急剧下降.当抖动量增大到 15% 时,HWCW 算法依然有非常高的检测成功率.

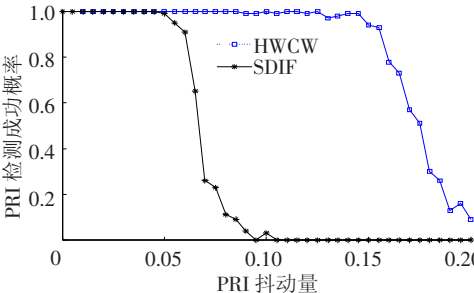


图 9 实验 1:HWCW 与 SDIF 抗抖动性能比较

实验 2 两部雷达,PRI 分别为 2.7×10^{-4} s, 3.8×10^{-4} s 的混合脉冲,总脉冲数 N 为 400,直方

图所用的箱体数 K 为 200. HWCW 算法有关检测门限的经验参数 $x = 0.15, k = 0.3, \varepsilon = 0.15$.

当抖动为 8% 时,采用 SDIF 算法,其一级到四级直方图(图 10 至图 13),均不能检测出雷达脉冲的真实 PRI,算法失效.

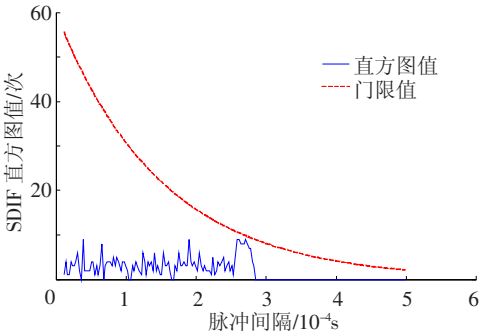


图 10 实验 2:一级 SDIF 直方图

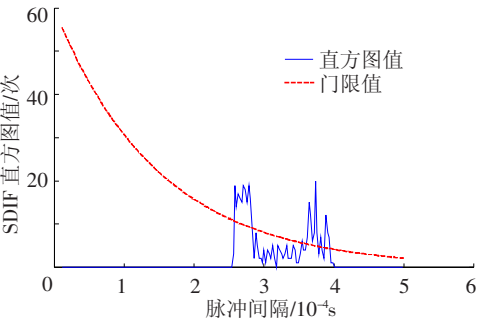


图 11 实验 2:二级 SDIF 直方图

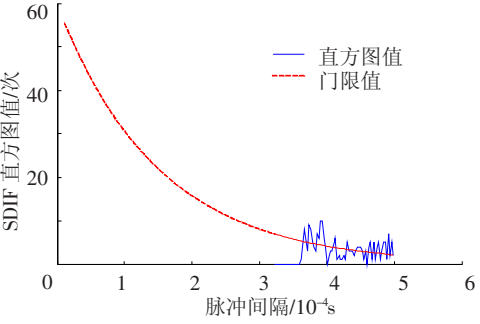


图 12 实验 2:三级 SDIF 直方图

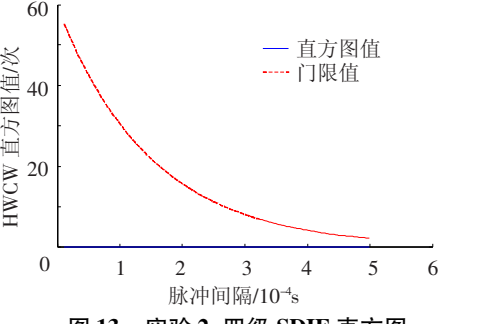


图 13 实验 2:四级 SDIF 直方图

当抖动增大至 16% 时,用 HWCW 算法,未进行序列搜索时,其一级直方图如图 14 所示,超过门限的谱峰值,可以检测出小的 PRI 值,即: 2.709×10^{-4} s(真实值为 2.7×10^{-4} s).在 5.4×10^{-4} s 附近没有谐波被检测出,谐波得到了良好的抑制.一次序列搜索后的一级直方图如图 15 所示,超过

门限的谱峰值,可以检测出大的 PRI 值,即:
 $3.812 \times 10^{-4} \text{ s}$ (真实值为 $3.8 \times 10^{-4} \text{ s}$).

与实验 1 相同条件下,HWCW 与 SDIF 算法的抗抖动能如图 16. 当抖动量小于 5% 时,SDIF 算法才有效. 对于 HWCW 算法,当抖动增大到 15% 时,仍然可以有近乎 100% 的 PRI 检测成功率.

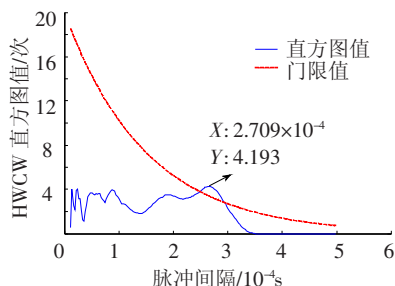


图 14 实验 2:未序列搜索 HWCW 一级直方图

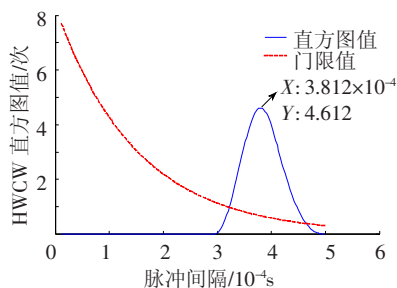


图 15 实验 2:一次序列搜索后 HWCW 一级直方图

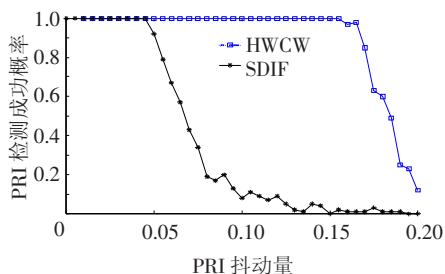


图 16 实验 2:HWCW 与 SDIF 抗抖动性能比较

以上实验验证,HWCW 算法得到的直方图比较平滑,谱峰清晰,对谐波的抑制效果明显,抗抖动性能良好.

3 结 论

针对直方图算法在雷达信号分选时抗抖动性能的不足,本文提出了一种基于余弦加权的 HWCW 算法.通过引入可变长度的交叠箱,并对交叠箱进行余弦平滑加权.在 PRI 抖动比较大时,该方法得到的直方图谱峰清晰,而且对谐波有良好的抑制.仿真结果表明,该算法具有良好的抗抖动能力.增加箱体数目,可以进一步提高 PRI 估计的精度,但计算量会有所增加.

参考文献

[1] MAIER M W. Processing throughout estimation for radar intercept receives[J]. IEEE Transaction on Aerospace

and Electronic System, 1998, 34(1): 84-92.

- [2] Richard G. Wiley. ELINT: The interception and analysis of radar signals[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008:2-8.
- [3] 何明浩, 雷达对抗信息处理[M]. 北京:清华大学出版社,2010,5: 5-11.
- [4] MARDIA H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences [J]. IEE proceedings, 1989, 136(4): 149-154.
- [5] MILOJEVIC D J, POPOVIC B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses [J]. IEE Proceedings, 1992, 139(1): 98-104.
- [6] 赵长虹, 赵国庆. 一种基于随机动态线性模型的重频分选的改进算法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(9): 1049-1051.
- [7] NISHIGUCHI K, KOBAYASHI M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 407-421.
- [8] 安振,李运祯. PRI 变换对脉冲雷达信号 PRI 检测的性能分析[J]. 现代雷达,2007,29(2):35-37.
- [9] KAWALEC A, WCZAREK R. Radar emitter recognition using intrapulse data [C]//Proceedings of 15th International conference on Microwaves. Radar and wireless Communications Warsaw, Poland: [s. n.], 2004:435-438.
- [10] LIU Jun, JIM P Y Lee. Online clustering algorithms for radar emitter classification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(8):1185-1196.
- [11] YU Zhifu, YE Fei, LUO Jingqing. A multi-parameters synthetic signal sorting algorithm based on clustering [C]//The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Xi'an: [s. n.], 2007: 363-366.
- [12] ANJANEYULU L, MURTHY N S, SARMA N V S N. Radar emitter classification using self-organising neural network modles [C]//Proceedings of International Conference on Microwave-08, Beijing: [s. n.], 2008: 431-433.
- [13] Nguyen Xuan Vinh, Julien Epps. A novel approach for automatic number of clusters detection in microarray data based on consensus clustering [C]//2009 Ninth IEEE International Conference on Bioinformatics and Bioengineering, TaiChung: [s. n.], 2009: 84-91.
- [14] FAN Fuhua, YIN Xuezhong. Improved method for deinterleaving radar pulse trains with stagger PRI from dense pulse series [C]//2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems, Dalian: [s. n.], 2010: 250-253. (编辑 苗秀芝)