

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.07.009

引用格式:杨翔,汪文浩.利用谱估计算法的雷达信号分选[J].电讯技术,2016,56(7):765-770.[YANG Xiang,WANG Wenhao.Radar signal sorting based on spectrum estimation[J].Telecommunication Engineering,2016,56(7):765-770.]

利用谱估计算法的雷达信号分选*

杨翔**1,汪文浩2

(1.中航工业北京青云航空仪表有限公司,北京 100017;2.上海交通大学密西根学院,上海 200240)

摘要:传统雷达信号分选过程中分别进行脉冲重复频率检测与初始到达时间估计时,脉冲搜索时间过长。为此,提出了一种新的基于谱估计的信号分选算法。该算法通过谐波滤除减小了脉冲初始到达时间估计的运算次数,并在进行脉冲重复频率检测的同时估计脉冲初始到达时间,从而避免了传统信号分选算法中对整个序列的遍历,节省了计算资源。仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词:雷达信号分选;谱估计;脉冲重复频率检测;脉冲初始时间检测;谐波滤除

中图分类号:TN971 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)07-0765-06

Radar Signal Sorting Based on Spectrum Estimation

YANG Xiang¹,WANG Wenhao²

(1. AVIC Beijing Keeven Aviation Instrument Co., Ltd., Beijing 100017, China;
2. University of Michigan, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract:Traditional radar signal sorting methods have expensive cost on computation in pulse repetition frequency (PRF) detection and initial arrival time (IAT) estimation respectively. To solve this problem, a novel sorting method based on spectrum estimation is proposed. The method cuts down the operational times for IAT estimation by removing the harmonics, and determines the IAT while detecting the periodicity of a pulse train, thus avoiding the conventional traverse of sequence and saving the computational resource. Simulation results demonstrate its feasibility and efficiency.

Key words:radar signal sorting; spectral estimation; pulse repetition frequency detection; initial arrival time estimation; harmonics removing

1 引言

雷达信号分选是电子侦察信号处理的核心技术,其目的是从侦察接收机侦测到的脉冲流中检测并分离出属于不同辐射源的脉冲序列,为辐射源跟踪、威胁判别与反辐射攻击提供信息。

信号分选由预分选与主分选两部分组成,预分选完成脉冲稀释,主分选完成脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI)或脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)检测和脉冲分离。信号主分选一直是信号分选领域的研究热点和难点^[1]。

从 20 世纪 80 年代开始,各种关于信号主分选的研究算法相继出现^[2-14],主要算法包括到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)直方图分析算法^[2-5]和变换域分析方法^[6-7]。TDOA 直方图分析算法利用脉冲 TDOA 统计信息估计各个独立脉冲序列的 PRI,变换域分析算法通过分析脉冲到达时间(Time of Arrival, TOA)序列的变换域特征估计各个独立脉冲序列的 PRI 或 PRF。

在完成 PRI 或 PRF 检测后,信号分选算法需要在脉冲序列中搜索每一个脉冲串的初始脉冲到达时

* 收稿日期:2016-03-17;修回日期:2016-07-01 Received date:2016-03-17;Revised date:2016-07-01

** 通信作者:yangxiangyx123@163.com Corresponding author:yangxiangyx123@163.com

• 765 •

刻(Initial Arrival Time, IAT),进而完成脉冲串的提取^[2-3,8]。IAT 搜索往往要耗费大量计算资源,使得信号分选实时性较低。文献[9-10]分别通过研究数据流网路聚类及基于样本的周期估计方法来提高 IAT 搜索的运算效率,以提高信号分选的实时性。

本文利用谱估计的方法解决 IAT 搜索耗费大量资源的问题。谱估计算法最早在美国空军专利^[11]中提出。此后,文献[7]提出圆周映射谱估计算法,对传统的谱估计进行了一定改进。文献[12]通过调整采样点间隔,实现了对谱估计算法估计精度和运算时间的控制,提高了谱估计算法的信号环境适应性。文献[13]提出首先利用谱估计算法进行粗分选,再利用小波包变换提取特征进行再分选的算法,保证了信号分选的实时性与可靠性。然而,已有的谱估计算法在进行 PRF 检测时,会检测到大量真实 PRF 整数倍的虚假 PRF;同时,已有的谱估计算法只利用了脉冲 TOA 序列幅度谱信息,在完成脉冲串 PRF 检测后,需要进行序列遍历搜索,以检测不同脉冲串的初始到达脉冲,耗费大量资源。

本文从研究脉冲 TOA 序列的幅度谱与相位谱入手,推导了谱图的理论表示,提出了谐波滤除来剔除虚假 PRF 以减少 IAT 估计的运算量,并在利用脉冲幅度谱检测序列 PRF 的同时,利用谱图的相位信息检测序列的 IAT。这种联合 PRF 检测与 IAT 估计的方法可有效降低信号分选算法的运算时间,从而提升信号分选的效率。

2 谱估计方法简介

给定 TOA 序列 $\{t_m | m = 0, 1, \cdots, M-1\}$, 令 $t_m = l_m \cdot \Delta T$ (l_m 为正整数, ΔT 为量化时间间隔), 则原 TOA 序列可以表示为

$$x(l) = \sum_{m=0}^{M-1} \delta(l-l_m) \tag{1}$$

对 $x(l)$ 做离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transformation, DFT), 可得

$$X(k) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j(\frac{2\pi}{L})kl_m} \tag{2}$$

式中: $L=l_M-1$ 。

本文称 $X(k)$ 为序列 $\{t_m | m = 0, 1, \cdots, M-1\}$ 的谱, $|X(k)|$ 为序列的幅度谱, $\angle X(k)$ 为序列的相位谱, k 为频率因子。易得, 在序列的谱图中, 谱值 $X(k)$ 对应的频率值为 k/L 。

3 单个稳定 PRI 脉冲序列的 PRF 检测与 IAT 估计

本节将给出利用谱估计算法对单个稳定 PRI 脉冲序列进行分选的过程。其中, 单个稳定脉冲序列是指一个序列中相邻两个脉冲的 TOA 为一个固定值。

假定一个稳定 PRI 脉冲序列由 M 个脉冲的 TOA 组成, 则该 TOA 序列可以表示为

$$x(l) = \sum_{m=0}^{M-1} \delta(l-s-mh) \tag{3}$$

式中: s 表示 IAT; h 表示相邻脉冲的 TDOA。

对 $x(l)$ 做 DFT, 可得

$$X(k) = e^{-j2\pi(\frac{k}{L})(s+\frac{M-1}{2}h)} \frac{\sin(\pi h M \frac{k}{L})}{\sin(\pi h \frac{k}{L})} \tag{4}$$

下面分别利用 $|X(k)|$ 和 $\angle X(k)$ 检测 PRF 和估计 IAT。

3.1 PRF 检测

传统的谱估计算法在生成幅度谱后直接检测峰值^[11]。本文对传统的谱估计方法进行改进, 在生成幅度谱后对峰值统计量进行谐波滤除。

图 1 给出了本文算法 PRF 检测的流程图, 其中阴影部分为谐波滤除, 为本算法区别于传统 PRF 检测算法的步骤。谐波滤除时, 遍历当前峰值所对应频率因子的整数倍, 将其统计量减去当前峰值。通过谐波滤除, 可以剔除虚假的检测值, 生成滤除谐波后的幅度谱图, 以减小后续 IAT 估计的次数。

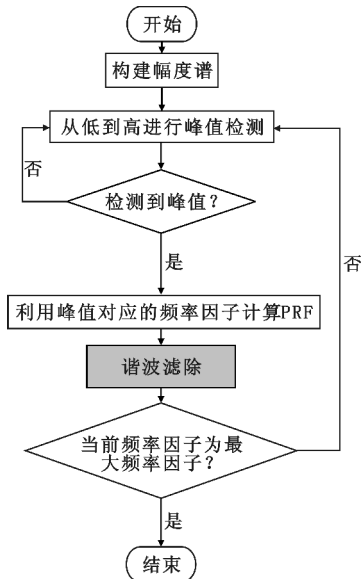


图 1 PRF 检测流程图
Fig. 1 Flowchart of PRF detection

3.2 IAT 估计

传统的谱估计算法在完成 PRF 检测后通过序列搜索的方法进行 IAT 估计^[2-3,8],本文通过相位谱直接进行 IAT 估计,避免了对整个序列的遍历。

利用 $\theta(k)$ 代表 $\angle X(k)$,由公式(4)可知,幅度谱峰值处的相位可以表示为

$$\theta(\frac{nL}{h})=-2\pi n(\frac{s}{h}+\frac{M-1}{2}).\tag{5}$$

式中: n 为正整数。

可以看到,频率因子 nL/h 处的相位与 IAT 成线性关系。利用频率因子 nL/h 及其对应的相位值 $(nL/h,\theta(nL/h)) (n=1,2,\cdots)$ 可以拟合出一条斜率为 $-2\pi(\frac{s}{L}+\frac{M-1}{2}\cdot\frac{h}{L})$ 的直线。该斜率与序列的 IAT 值 s 和序列的 PRI 值 h 有关。因此,在完成 PRF 检测后,可利用幅度谱峰值中频率因子所对应的相位值拟合出一条“频率因子-相位”直线,通过计算这条直线的斜率完成 IAT 的估计。

需要说明的是,完成 DFT 后的谱图相位信息存在缠绕的问题,需要采用相位解缠绕方法去除相位模糊。本文所有仿真实验均使用 Matlab 模拟完成,在傅里叶变换后,利用 Matlab 自带函数 angle 提取频域相位,此时相位值会被转换到区间 $[0,2\pi)$ 中,然后利用 Matlab 自带函数 unwrap 进行解缠绕。

4 复杂脉冲序列的谱估计检测

本节将介绍利用谱估计算法对多个稳定 PRI 脉冲序列和单个抖动 PRI 脉冲序列进行分选的过程。

4.1 多个稳定脉冲序列

假定一个脉冲串由 P 个稳定 PRI 脉冲序列组成,则这个脉冲串 TOA 序列可以表示为

$$x(l)=\sum_{p=0}^{P-1}\sum_{i=0}^{M_p-1}\delta(l-s_p-ih_p).\tag{6}$$

式中: M_p 、 s_p 和 h_p 分别代表第 p 个脉冲序列的脉冲个数、IAT 和 PRI; L 和 M 分别代表脉冲串的截止时间与脉冲总数。易得

$$\sum_{p=0}^{P-1}M_p=M.\tag{7}$$

考虑接收机具备一定的脉冲分辨能力,能区分出上升/下降沿未完全重叠的脉冲,容易推导出利用 3.1 节提出的方法进行谐波滤除后,有

$$|X(k_p)|\approx M_p.\tag{8}$$

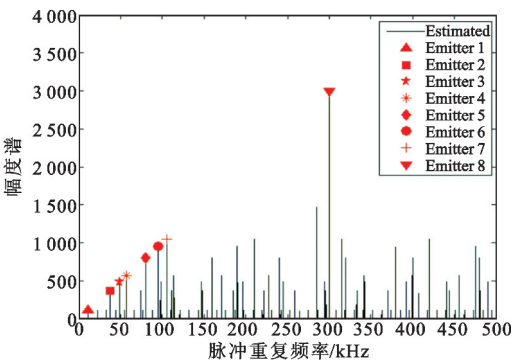
对于每个峰值所对应的频率因子 k_p ,其所检测出的 PRF 为 $k_p/L,0\leq p\leq P$ 。

在将干扰序列滤除后,可以得到改进后的幅度谱

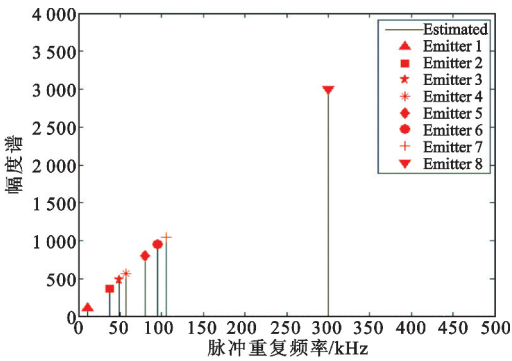
$$\theta(nk_p)\approx-2\pi(\frac{nk_p}{L})(s_p+\frac{M_p-1}{2}h_p),n\in\mathbb{Z}^+.\tag{9}$$

式中: $\mathbb{Z}^+$ 为全体正整数集合。对点集 $(nk_p,\theta(nk_p)) (n=1,2,\cdots)$ 进行线性拟合,可以求得拟合直线的斜率为 $-j2\pi(\frac{1}{L})(s_p+\frac{M_p-1}{2}h_p)$ 。于是,便可以通过直线斜率以及序列的 PRF 对序列的 IAT 进行估计。

仿真实验选取一个由 8 个稳定脉冲序列组成的脉冲串,其 PRF 分别为 10 kHz、38 kHz、49 kHz、57 kHz、80 kHz、95 kHz、105 kHz 和 300 kHz。该脉冲串的原始幅度谱图和经过谐波滤除后的幅度谱图如图 2 所示。由图可知,在滤除谐波后,可清晰地检测出 8 个脉冲串的 PRF。



(a) 原始谱图



(a) 谐波滤除后的谱图

图 2 利用幅度谱进行多个稳定 PRI 脉冲序列的 PRF 检测
Fig. 2 PRF detection of multiple stable sequences by using magnitude spectrum

图 3 给出了利用相位谱拟合出的直线,可以看到分别对应于辐射源 1 和辐射源 2 的相位序列在拟合成直线时分别有一点出现了偏移,这是由于解缠绕时相位值在 $-\pi$ 和 π 处跃迁导致的,并不影响对直线斜率的计算。

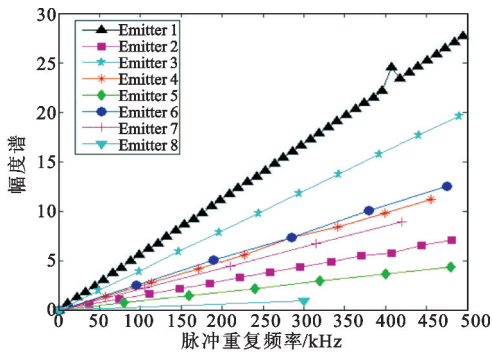


图3 利用相位谱进行多个稳定 PRI 脉冲序列的 IAT 估计
Fig. 3 IAT estimation of multiple stable sequences by using phase spectrum

表 1 给出了原始序列真实的 IAT 与利用相位谱检测出的 IAT。由表可知,利用谱估计法对多个稳定脉冲序列构成的复合脉冲串进行 IAT 估计的有效性极高。

表 1 对多个稳定脉冲序列的初始脉冲检测结果
Tab. 1 The estimated result for IAT of multiple stable sequences

编号	真值/ μs	检测值/ μs
1	8.895 80	8.940 40
2	2.342 90	2.317 80
3	6.379 30	6.379 30
4	3.906 70	3.923 40
5	1.441 70	1.441 60
6	4.191 90	4.182 30
7	3.373 20	3.373 60
8	0.480 49	0.480 66

4.2 单个抖动脉冲序列

一般地,用来表示抖动脉冲序列的模型被称为随机差分模型(Random Difference Model,RDM)^[15]。本节将以 RDM 模型为例,给出利用谱估计算法对单个抖动脉冲序列的分选步骤。

假定一个抖动脉冲序列的脉冲重复间隔的中心值为 P_j ,令 t_k 表示第 k 个和第 $k+1$ 个脉冲之间的间隔,则对于 RDM 模型,有

$$\epsilon_n = \sum_{i=1}^n t_i - nP_j \sim U(-\rho/2, \rho/2)。(10)$$

式中: U 代表均匀分布; ρ 代表抖动间隔。

根据 RDM 模型,容易求得抖动序列的谱为

$$X(k) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j2\pi \frac{k}{L} (s + \sum_{i=1}^m t_i)} = \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j2\pi \frac{k}{L} (s + \epsilon_m + mh)}。(11)$$

式中: h 表示原序列的 PRI 中心值。

为了对序列的谱进行估计,首先推导出序列谱的期望

$$E(X(k)) = \text{sinc}(\pi \frac{k}{L} \rho) e^{-j2\pi (\frac{k}{L}) (s + \frac{M-1}{2} h)} \frac{\sin(\pi h M \frac{k}{L})}{\sin(\pi h \frac{k}{L})}。(12)$$

因篇幅所限,具体的推导过程不再给出,感兴趣的读者可与作者联系。

可以看到抖动序列的谱相比于稳定序列的谱会多出一个变量 $\text{sinc}(\pi \frac{k}{L} \rho)$ 。这表明对于一个稳定脉冲序列和抖动脉冲序列,若抖动脉冲序列的 PRI 中心值与稳定脉冲序列 PRI 相等,则相比于稳定序列,抖动序列幅度谱峰值的中心值会偏低,但两个序列的相位均值相等,因此,本文在 3.2 节中提出的 IAT 估计方法依然适用于抖动脉冲序列。

同时,可以通过对幅度谱方差的推导来估算幅度谱的抖动展宽。详细的推导过程可与作者联系索取。

在实际中,由于发射机和接收机的非线性效应,导致 TOA 的测量并不准确,使得发射机发射的稳定脉冲序列被接收机接收为抖动脉冲序列。这种测量误差不超过 100 ns^[16],所引起的序列抖动不超过脉冲序列 PRF 中心值的 1%。

仿真实验选取 PRF 中心值为 105 kHz、初始脉冲到达时间为 0.321 7 μs 的抖动序列,使抖动序列的抖动分别在 PRF 中心值(-0.1%,0.1%)、(-0.2%,0.2%)、(-0.5%,0.5%)、(-1%,1%)、(-2%,2%)、(-3%,3%)范围内,可分别对序列进行 PRF 检测与 IAT 估计。图 4 和图 5 分别给出了脉冲序列的抖动范围在区间(-0.1%,0.1%)和区间(-3%,3%)时,经过谐波滤除后的序列幅度谱。需要指出的是,图 5 中脉冲序列的幅度谱统计量在谐波对应的频率因子附近出现了负值,这是因为抖动脉冲序列谐波统计量小于基波统计量,在由谐波分量减去基波分量进行谐波滤除时,产生了负值。由图可知,在滤除谐波后,可以清晰地检测出抖动脉冲序列的 PRF 中心值。

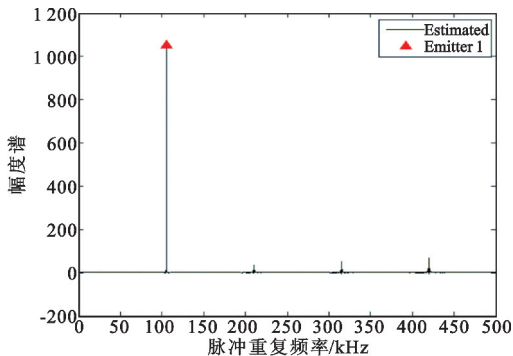


图 4 抖动范围在 PRF 中心值(-0.1%,0.1%)范围内序列滤除谐波后的幅度谱
Fig. 4 The magnitude spectrum of jittered sequence with (-0.1%,0.1%) jitter scale after harmonics removed

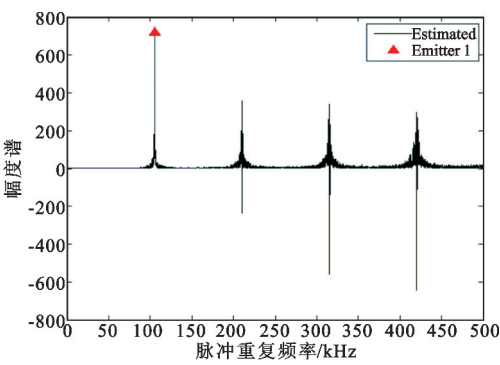


图 5 抖动范围在 PRF 中心值(−3% ,3%) 范围内序列滤除谐波后的幅度谱

Fig.5 The magnitude spectrum of jittered sequence with (−3% ,3%) jitter scale after harmonics removed

图 6 和图 7 分别给出了脉冲序列的抖动范围在区间(−0.1% ,0.1%) 和区间(−3% ,3%) 时,利用相位谱拟合出的直线。由图可知,这两条直线与单个稳定 PRI 脉冲序列相位谱拟合出的直线非常接近,这说明当脉冲序列存在抖动时,依然可以利用脉冲相位谱拟合出直线进行序列 IAT 估计。

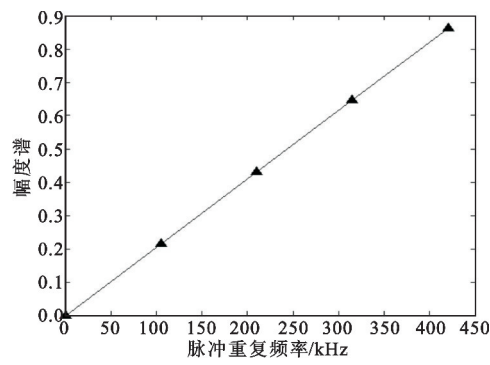


图 6 抖动范围在 PRF 中心值(−0.1% ,0.1%) 范围内,利用相位谱进行序列 IAT 估计

Fig.6 IAT estimation of jittered sequence with (−0.1% ,0.1%) jitter scale

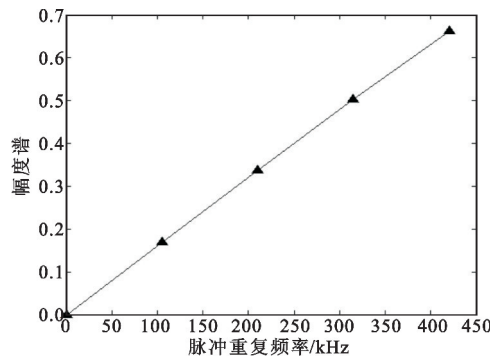


图 7 抖动范围在 PRF 中心值(−3% ,3%) 范围内, 利用相位谱进行序列 IAT 估计

Fig.7 IAT estimation of jittered sequence with (−3% ,3%) jitter scale

表 2 给出了当抖动序列的抖动分别在 PRF 中心值(−0.1% ,0.1%)、(−0.2% ,0.2%)、(−0.5% ,0.5%)、(−1% ,1%)、(−2% ,2%)和(−3% ,3%)范围内时,利用序列的相位谱估计出的 IAT。由表可知,利用谱估计法对单个抖动脉冲序列进行 IAT 估计的有效性较高。

表 2 不同抖动范围下估计出的序列 IAT		
Tab.2 IAT estimation of jittered sequences with different jitter scale		
抖动范围/%	真值/ μs	估计值/ μs
(−0.1,0.1)	0.321 7	0.307 1
(−0.2,0.2)	0.321 7	0.297 2
(−0.5,0.5)	0.321 7	0.303 1
(−1,1)	0.321 7	0.289 5
(−2,2)	0.321 7	0.330 6
(−3,3)	0.321 7	0.363 5

5 结束语

本文从理论上提出了一种新的利用谱估计进行脉冲去交错的算法,不仅可以高准确度地检测出脉冲序列的 PRF,还能同时检测出每一个脉冲序列的 IAT,从而完成序列提取。相比于传统信号分选算法需要遍历两次脉冲序列,这种并行检测的处理方法只需要遍历一次脉冲序列,运算效率提升了 1 倍。本文通过对不同类型的脉冲序列进行仿真实验,验证了该算法在信号分选中的有效性以及运算优势。下一步计划是将本文提出的算法推广到具体的工程应用中。

参考文献:

[1] WILKINSON D R, WATSON A W. Use of metric techniques in ESM data processing[J]. IEE Proceedings F: Communications, Radar of Signal Processing, 1985, 132 (4) :229–232.

[2] MARDIAH K. New techniques for de-interleaving repetition sequences[J]. IEE Proceedings F: Radar and Signal Processing, 1989, 136(4) :149–154.

[3] MILOJEVIC D J, POPOVIC B M. Improved algorithm for deinterleaving of radar pulses [J]. IEE Proceedings F: Communications, Radar and Signal Processing, 1992, 139 (1) :98–104.

[4] NISHIGUCHI K, KOBAYASHI M. Improved algorithm for estimating pulse repetition[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2) :407–421.

[5] 杨翔,顾洪宇. 基于到达时间差直方图的信号分选算法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11) :2762–2768.

- YANG Xiang, GU Hongyu. A signal sorting algorithm based on time difference of arrival[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11): 2762–2768. (in Chinese)
- [6] PERKINS J, COAT I. Pulse train de-interleaving via the Hough transform[C]//Proceedings of 1994 IEEE Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Adelaide, Australia; IEEE, 1994: 197–200.
- [7] ORSI R J, MOORE J B, MAHONY R E. Spectrum estimation of interleaved pulse trains[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(6): 1646–1653.
- [8] WANG P C, ORR M, SPARROW M, et al. System and method for detecting and de-interleaving radar emitters; 7397415[P]. 2008-07-08.
- [9] 张国毅, 王晓峰, 张旭洲. 基于数据流聚类的动态信号分选框架[J]. 电讯技术, 2011, 51(9): 65–68.
ZHANG Guoyi, WANG Xiaofeng, ZHANG Xuzhou. A dynamic frame of signal sorting based on data stream clustering[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(9): 65–68. (in Chinese)
- [10] 关一夫, 张国毅, 刘志鹏. 一种基于脉冲样本序列的 PRI 周期信号分选算法[J]. 电讯技术, 2014, 54(7): 915–920.
GUAN Yifu, ZHANG Guoyi, LIU Zhipeng. A novel de-interleaving algorithm for PRI periodic signal based on pulse sample sequence[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7): 915–920. (in Chinese)
- [11] LAVIGNE J P. Wrench; 539625[P]. 1895-05-21.
- [12] 李杨寰, 初翠强, 徐晖, 等. 一种新的脉冲重复频率估计方法[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 22(2): 18–22.
LI Yanghuan, CHU Cuiqiang, XU Hui, et al. A novel algorithm for estimating pulse repetition frequency[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2007, 22(2): 18–22. (in Chinese)
- [13] 张春杰, 王大海. 基于脉内特征聚类的分选方法[J]. 应用科技, 2014, 41(4): 17–21.
- ZHANG Chunjie, WANG Dahai. A sorting method for unknown radar emitter signals based on pulse feature clustering[J]. Applied Science and Technology, 2014, 41(4): 17–21. (in Chinese)
- [14] 蒋锐, 朱岱寅, 朱兆达. 一种基于等效残差点 InSAR 相位解缠绕方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(2): 209–216.
JIANG Rui, ZHU Daiyin, ZHU Zhaoda. Phase unwrapping approach using equivalent residues for InSAR[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(2): 209–216. (in Chinese)
- [15] VERGARA-DOMINGUEZ L. Analysis of the digital MTI filter with random PRI[J]. IEE Proceedings F: Radar and Signal Processing, 1993, 140(2): 129–137.
- [16] TSUI J. 宽带数字接收机[M]. 2 版. 杨小牛, 陆安宁, 金飏, 译. 北京: 电子工业出版社, 2016.
TSUI J. Digital techniques for wideband receivers[M]. 2nd ed. Translated by YANG Xiaoniu, LU Anning, JIN Biao. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016. (in Chinese)

作者简介:



杨翔(1989—), 女, 甘肃定西人, 分别于 2011 年和 2014 年获北京大学理学学士学位与理学硕士学位, 目前主要从事雷达信号分选算法研究;

YANG Xiang was born in Dingxi, Gansu Province, in 1989. She received the B. S. degree and the M. S. degree from Peking University in 2011 and 2014, respectively. Her research concerns radar signal sorting algorithm.

Email: yangxiangyx123@163.com

汪文浩(1995—), 男, 四川绵阳人, 上海交通大学密西根学院学生, 主要专业为电子工程。

WANG Wenhao was born in Mianyang, Sichuan Province, in 1995. He is now a student. His major is electronic engineering.