

一种基于多站测向和多参数信息的联合分选算法

孟祥豪, 罗景青, 马贤同

(合肥电子工程学院 电子对抗与信息处理重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 针对信号分选问题, 提出一种多站测向和多参数信息联合分选算法. 该算法基于多个观测站共同接收到辐射源脉冲的情况, 首先, 主站确定基准脉冲, 通过多参数信息搜索副站中的匹配脉冲; 然后, 通过位置和多参数信息联合搜索与主站可能是同一辐射源的脉冲, 并在副站脉冲序列中搜索与之匹配的脉冲; 最后提取匹配脉冲. 实验表明, 所提出的算法在观测站接收脉冲数量较少, 即利用脉冲重频统计规律的分选算法不适用时, 仍能准确分选出辐射源, 避免漏警的出现.

关键词: 多站测向; 多参数信息; 联合分选; 匹配脉冲

中图分类号: TP181; V234.2

文献标志码: A

Joint sorting algorithm based on direction finding of multiple observation platforms and multi-parameter information

MENG Xiang-hao, LUO Jing-qing, MA Xian-tong

(Key Lab of Electronic Counterstroke and Information Processing, Hefei Institute of Electronic Engineering, Hefei 230037, China. Correspondent: MENG Xiang-hao, E-mail: xiaoyaotan0508@163.com)

Abstract: Aiming at the signals sorting problem, a joint sorting algorithm based on direction finding of multiple observation and multi-parameter information is proposed based on the condition of multiple observers receiving the emitter pulse signals. Firstly, benchmark pulse is determined in the pulse stream of master observation platform, and matching pulse is searched by multi-parameter information in the pulse stream of slave observation platforms. Then the pulses maybe from the same emitters are searched through location and multi-parameter information in the master observation platform, and the pulses matching with the master observation platform in slave observation platforms are searched. Finally, matching pulses in the master observation platform are extracted. Experimental results show that, when the number of pulses observation platforms received is less and sorting algorithms based on the PRI statistical rule are no longer applicable, pulse sequences can still be sorted with high accuracy rate by using the proposed algorithm.

Keywords: direction finding of multiple observation platforms(DFMOP); multi-parameter information; joint sorting; matching pulse

0 引言

脉冲序列分选在雷达信号处理领域一直备受关注^[1]. 随着雷达技术的发展, 变化类型复杂的雷达脉冲信号日益增多, 同时信号环境日益密集和交叠, 使得雷达信号分选任务日趋艰巨和困难. 传统的分选方法主要有动态关联法^[2]、累计差直方图法(CDIF)^[2]、序列差直方图法(SDIF)^[3]、PRI变换法^[4-6]以及一些改进算法^[7-10]. 以上这些分选方法均是基于单站接收全脉冲数据, 在多站电子侦察系统^[11]中, 雷达脉冲信号大都由一个以上的接收站进行接收, 采用上述单站的

处理方式对数据的利用率较低. 利用时差信息进行分选^[12]是多站电子侦察系统中普遍采用的技术. 然而, 文献[12]利用时差分选存在以下问题: 1) 当某雷达辐射源在接收站工作时间内发射脉冲数较少时, 算法不能有效统计直方图信息, 该雷达脉冲会被当作干扰脉冲丢弃, 这种情况下即产生漏警; 2) 当接收站接收到的脉冲流密度较大时, 利用直方图算法计算时差信息的运算量较大, 分选的实时性较差.

针对多站电子侦察系统中的脉冲序列分选问题, 本文提出一种多站测向联合分选算法. 该算法利用多

收稿日期: 2014-09-05; 修回日期: 2014-12-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60801044); 国防预研基金项目(9140A21030209JB3901).

作者简介: 孟祥豪(1987-), 男, 博士生, 从事雷达与雷达对抗新理论、电子对抗信号处理的研究; 罗景青(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 从事雷达对抗信号处理、阵列信号处理等研究.

个侦察站接收到的脉冲方位信息,通过主站和几个副站进行同时多站位置联合分选,不依赖雷达脉冲之间的时间信息,直接利用位置信息将某一位置的雷达脉冲列提取出来,因此不受脉冲数目的限制.在雷达发射脉冲数较少或者侦察机接收到的脉冲数较少(较少的标准为导致无法对脉冲信号时间参数规律进行统计)的情况下,该算法仍然有效,能够避免漏警的情况出现.在真实的信号环境中,由于电磁干扰、侦察机作用距离、雷达抗干扰措施等因素,会发生某一雷达辐射源在某一时间段或者某一区域仅能侦收到少量的脉冲,而这种雷达辐射源威胁度很大,此时,利用本文算法可以实现分选,具有一定的工程应用价值.

1 多站测向与多参数联合分选模型建立

1.1 多站接收脉冲序列的观测模型

在真实信号环境和电子对抗环境下,机载侦察机侦收地面威胁目标脉冲信号是一种典型的侦察手段.因此,本文以空中机载的3个观测站对地面3个雷达目标脉冲信号进行分选为依托背景进行阐述.观测站和目标分布示意图如图1所示.

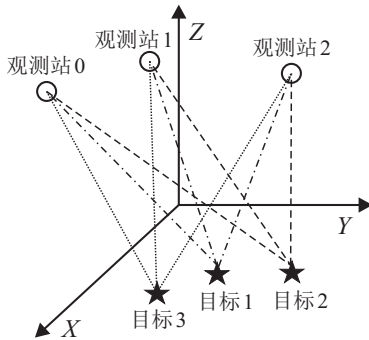


图1 观测站和目标分布示意图

各观测站通过侦察处理得到关于3个雷达目标信号的脉冲序列,由于多个目标的脉冲序列混叠在一起,会存在脉冲丢失和干扰脉冲现象.对于图1中的3个目标而言,观测站0(主站)接收到的3个目标信号的脉冲序列及其混叠后的脉冲序列示意如图2所示.

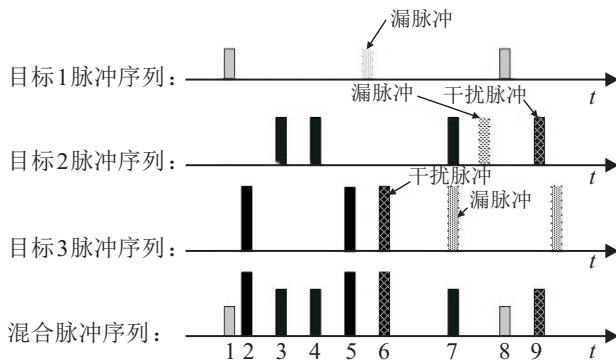


图2 观测站得到的脉冲序列示意图

同样地,对于观测站0以外的其他观测站而言,各站得到的脉冲序列在时间上也是混叠在一起的.对

于单目标而言,其他观测站得到的脉冲序列可以通过观测站0提前或延迟一定时差得到,但由于各站的脉冲丢失情况和所受干扰影响不同,接收到的脉冲序列不是简单的脉冲序列时间上的平移,当目标数量较多时情况更加复杂.对另外两个观测站接收到的脉冲进行随机漏脉冲处理,并在目标脉冲列中随机加入干扰脉冲,得到图3所示的全部3个观测站的脉冲序列示意图.需要说明的是,限于篇幅,这里对观测站1和观测站2中漏脉冲和干扰脉冲不再一一示出,其原理与图2相似.

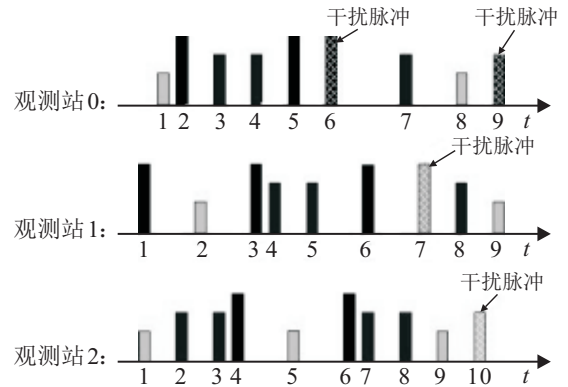


图3 观测站得到的混合脉冲序列示意图

传统的分选方法均是从单个观测站得到的混叠脉冲序列中将不同雷达目标脉冲序列分开,当多个目标的参数变化类型、参数范围相似或存在重叠时,分选目的有时难以达到;而基于多站的时差分选方法又依赖于大量的脉冲序列进行规律统计.为此,本文针对接收雷达脉冲数目较少且参数相似的情形,提出基于多站位置信息的测向和多参数联合分选方法.

1.2 多站测向与多参数联合分选的脉冲序列模型

假设主站共接收到的脉冲数为 N_0 ,脉冲序列已经经过频段、脉冲类型预处理,脉冲序列以参数的形式表现,则主站接收到的脉冲序列 Y_0 可表示为

$$Y_0 = [\{\Theta_{0,1}, P_{0,1}\}, \{\Theta_{0,2}, P_{0,2}\}, \dots, \{\Theta_{0,N_0}, P_{0,N_0}\}]. \quad (1)$$

同理,假定有 I 个副站,副站 $i (i = 1, 2, \dots, I)$ 接收到的脉冲数为 N_i ,则脉冲序列 Y_i 可表示为

$$Y_i = [\{\Theta_{i,1}, P_{i,1}\}, \{\Theta_{i,2}, P_{i,2}\}, \dots, \{\Theta_{i,N_i}, P_{i,N_i}\}]. \quad (2)$$

其中: $\Theta_{i,n} = (\theta_{i,n}, \beta_{i,n}) (i = 1, 2, \dots, I, n = 1, 2, \dots, N_i)$ 表示第 i 个观测站接收到的第 n 个脉冲的方位信息,包括方位角 $\theta_{i,n}$ 和俯仰角 $\beta_{i,n}$; $P_{i,n} (i = 1, 2, \dots, I, N = 1, 2, \dots, n_i)$ 表示脉冲序列中除位置信息以外的其他参数矢量信息,本文中为载频、脉宽、脉冲幅度和脉内调制类型标识码构成的四维矢量.

2 多站测向与多参数联合分选

利用多站接收到的脉冲方位信息进行分选的基

本思路是:以主站为基础站,选择主站的脉冲序列与第1副站进行联合分选;然后选择第2个副站,将主站和第1副站分选结果与第2副站进行位置和多参数联合分选,直至完成与所有副站的位置和多参数分选;最后提取分选脉冲序列.多站测向与多参数联合分选的具体实现步骤如下.

Step 1: 参数初始化,选取主站基准脉冲.将所有脉冲分选标识字置零,从主站接收的第1个脉冲开始,确定为基准脉冲,其位置信息和多参数信息表示为向量 $\mathbf{Y}_{0\text{beg}} = [\boldsymbol{\Theta}_{0,1}, \mathbf{P}_{0,1}]$.

Step 2: 通过多参数信息搜索第1副站中与基准脉冲匹配的脉冲.主站与副站在共视(均接收到某辐射源辐射的脉冲)的情况下接收信号,因此若副站与主站均接收到该基准脉冲,则副站必定存在某一脉冲多参数信息在容差范围内与 $\mathbf{Y}_{0\text{beg}}$ 多参数信息相同.假设副站第 j 个脉冲信息向量为 $\mathbf{Y}_{1,j} = [\boldsymbol{\Theta}_{1,j}, \mathbf{P}_{1,j}]$,定义函数 $f(\mathbf{P}_{0,n}, \mathbf{P}_{i,j})$ 表示主站第 n 个脉冲与第 i 个副站第 j 个脉冲的多参数信息相似度,则其计算方法如下:

$$f(\mathbf{P}_{0,n}, \mathbf{P}_{i,j}) = \begin{cases} 1 - r_1/r_0, & r_1 < r_0; \\ 0, & r_1 \geq r_0. \end{cases} \quad (3)$$

其中: r_1 为两脉冲多参数信息的欧式距离,各个参数的测量误差根据人工经验值设定, r_0 为设定的参考距离. r_1 计算公式为

$$r_1 = \|(\mathbf{P}_{0,n} - \mathbf{P}_{i,j})^T \mathbf{M}(\mathbf{P}_{0,n} - \mathbf{P}_{i,j})\|^{1/2}. \quad (4)$$

其中 \mathbf{W} 为加权矩阵,一般为对称矩阵,若各参数测量独立,则为对角阵.对角元素取值的大小与参数测量误差的方差成反比,其量纲为测量误差方差量纲的倒数,具体表达式依赖参数维数以及测量误差方差.若多参数信息维数为3,即 RF、PW、PRI,相对应的测量误差方差分别为 σ_{RF} 、 σ_{PW} 、 σ_{PRI} ,则 \mathbf{W} 的表达式为

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{\text{RF}} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{\text{PW}} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_{\text{PRI}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

于是,若 $f(\mathbf{P}_{0,n}, \mathbf{P}_{i,j}) > \delta$,则判定为两脉冲匹配成功,式中 δ 为设置的脉冲匹配门限.需要说明的是,匹配门限的设定是至关重要的一个环节,而在当前的自动分选时,这些门限值的设定均是依靠人工经验和信号环境的实际情况进行设定,仍未能找到量化的门限设置原则.若匹配失败,则继续搜索副站脉冲.匹配成功后记录第1副站该脉冲信息 $\mathbf{Y}_{1,j} = [\boldsymbol{\Theta}_{1,j}, \mathbf{P}_{1,j}]$.若第1副站未搜索到与基准脉冲匹配的脉冲,则返回 Step 1,重新选取基准脉冲进行匹配.

Step 3: 利用测向位置信息和多参数信息联合提取对应脉冲.基准脉冲匹配成功后,便认为全脉冲序列中存在该雷达信号,且该信号相对于主站和第1副

站的位置分别为 $\boldsymbol{\Theta}_{0,1}$, $\boldsymbol{\Theta}_{1,j}$.在主站中继续搜索位置信息为 $[\boldsymbol{\Theta}_{0,1} - \sigma, \boldsymbol{\Theta}_{0,1} + \sigma]$ (σ 为测向容差值)的脉冲进行匹配,每找到一个匹配脉冲 $\mathbf{Y}_{0,l}$,则将该匹配脉冲与副站中接收到的对应脉冲进行提取.若副站中第 k 个脉冲满足下式:

$$\boldsymbol{\Theta}_{1,k} \in [\boldsymbol{\Theta}_{1,j} - \sigma, \boldsymbol{\Theta}_{1,j} + \sigma] \cap f(\mathbf{P}_{0,l}, \mathbf{P}_{1,k}) > \delta, \quad (6)$$

则将该脉冲分选标识字置为1.最终提取主站分选标识字为1的所有脉冲,形成脉冲序列,表示为 $\tilde{\mathbf{Y}}_0(0,1)$,即主站与第1副站分选脉冲序列.

Step 4: 将基准脉冲与第2副站进行匹配,重复 Step 2、Step 3,搜索与第2副站的匹配结果,表示为 $\tilde{\mathbf{Y}}_0(0,2)$

Step 5: 将两提取脉冲序列综合,分选出最终脉冲序列 $\tilde{\mathbf{Y}}_0(0,1,2)$.

3 脉冲序列联合分选实验

为了检验算法在复杂背景信号环境下的提取性能,仿真实验产生参数不同的雷达交迭脉冲,尽可能逼近真实信号环境.通过计算对辐射源对应脉冲分选的正确率和漏选率来研究不同的信号环境对本文算法分选性能的影响,以及本文算法的优势所在.相关性指标定义如下:

1) 正确率 ($S_R/S \times 100\%$).其中: S 是分选得到的属于同一辐射源的脉冲数目, S_R 为其中正确的脉冲数目.

2) 漏选率 ($(S_M - S_R)/S_M \times 100\%$).其中: S_M 表示主站全脉冲数据收到的某一辐射源的真实脉冲数目.

仿真实验环境为 Windows XP, Intel 1.8 G, 1 G 内存,工具为 Matlab.

3.1 多站测向与多参数联合分选仿真实现

假定空间存在3个观测站,编号分别为0、1、2,0为主站,其余为副站,其位置坐标分别为 [139, 139, 200] km、[138, 140, 198] km 和 [139, 141, 200] km.两个辐射源目标编号为1、2,位置坐标分别为 [300, 400, 0] km 和 [350, 450, 0] km.观测站0、1、2测量的辐射源1的方位俯仰角分别为 [63.9°, 56.8°]、[63.6°, 57.1°]、[63.8°, 56.7°].辐射源2的方位俯仰角分别为 [60.3°, 62.0°]、[60.0°, 62.2°]、[60.2°, 61.9°].辐射源1发射100个脉冲,辐射源2发射300个脉冲,在辐射源开机工作时3个观测站均可以接收到2个辐射源发射的至少3个骨架周期数目的脉冲,并记录脉冲到达方位俯仰信息.两个辐射源发射的脉冲各参数变化类型及详细信息如表1所示.

考虑到测向误差为均值 $\sigma_\theta \in (0, 0.5^\circ)$ 的随机噪声,脉冲各参数均存在一定测量误差,同时每个观测

表 1 辐射源信号参数设置

辐射源编号	RF/MHz	PW/ μ s	PRI/ μ s	脉内调制描述代码	PA
1	3 000~3 100	7	403	1	1
	捷变	固定	固定	(线性调频)	
2	3 050	11~14	270/386/491	0	1
	固定	可选择	三参数	(常规调频)	

站接收到的脉冲流存在漏失脉冲. 进行 100 次实验, 每 10 次实验统计一次结果, 得到 10 组统计结果. 图 4、图 5 所示为实验得到的两个辐射源的平均分选正确率和平均分选漏选率曲线.

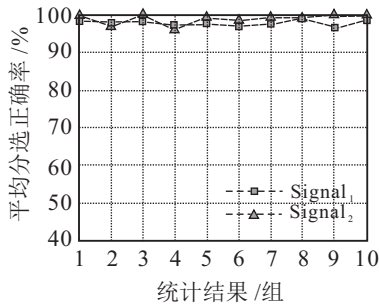


图 4 平均分选正确率曲线

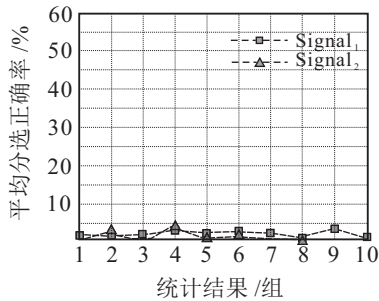


图 5 平均分选漏选率曲线

由图 4 和图 5 可以看出, 当观测站接收到的辐射源发射脉冲数量充足时, 本文算法能够以较高的正确率实现对该辐射源脉冲的分选, 至少达到 95%. 造成有漏失脉冲的原因主要有两点, 一是脉冲没有被观测站同时接收到, 导致综合脉冲序列时将其丢弃; 二是由于测量误差的原因, 导致多参数信息相似测度函数值较小或者位置参数误差太大, 匹配失败.

3.2 本文算法与其他分选算法性能比较

仿真环境同 3.1 节, 下面分析观测站共视情况下接收到的辐射源脉冲数量多少对单站 SDIF 分选算法、文献 [12] 的多站递归直方图分选算法和本文算法性能的影响.

实验 1 各观测站接收到的辐射源脉冲数量充足, 能够统计 PRI 信息时算法的性能.

假定各观测站均接收到辐射源 1 发射的 100 个脉冲和辐射源 2 发射的 300 个脉冲, 用 SDIF 分选算法进行处理时, 只针对主站接收到的脉冲数据. 文献 [12] 算法选取主站与观测站 1 接收到的两组脉冲数

据. 每种算法进行 100 次实验, 每 10 次实验统计一次, 共得到 10 组统计结果. 表 2 所示分别为 3 种算法对辐射源 1 和辐射源 2 的平均分选正确率和平均分选漏选率结果.

表 2 分选性能比较 %

	平均分选正确率			平均分选漏选率		
	SDIF	文献 [12]	本文	SDIF	文献 [12]	本文
信号 1	95.3	96.4	96.6	4.7	3.6	3.4
信号 2	97.4	96.7	96.3	2.6	3.3	3.7

由表 2 的统计结果可以看出, 当观测站接收到的辐射源发射脉冲数量充足时, 无论是单站分选算法还是多站分选算法, 均能以较高的正确率实现辐射源脉冲的分选, 这也验证了本文算法的合理性.

实验 2 各观测站接收到的辐射源脉冲数量少, PRI 信息难以统计时算法的性能.

假定各观测站均接收到辐射源 1 发射的 100 个脉冲, 而由于辐射源 2 发射脉冲数较少, 观测站仅接收到其发射的 3 个脉冲, 无法统计 PRI 变化规律. 用 SDIF 算法对主站脉冲数据进行处理; 文献 [12] 算法对主站和观测站 1 接收到的脉冲数据进行处理; 本文算法对 3 个观测站脉冲数据进行处理. 辐射源 1 得到的结果与实验 1 大致相同, 3 种算法均能将其分选出来. 用分选成功率来表征 3 种算法对辐射源 2 的处理效果, 能够将辐射源 2 中至少两个脉冲提取出来并上报为信号, 则记为分选成功, 每种算法进行 10 000 次实验, 每 1 000 次实验统计一次, 共得到 10 组统计结果. 图 6 所示分别为 3 种算法对辐射源 2 的平均分选成功率曲线.

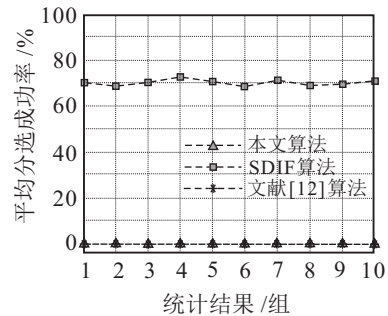


图 6 平均分选成功率比较曲线

由图 6 可以看出: 当观测站接收到的辐射源 2 发射脉冲数量较少时, 由于无法统计 PRI 变化规律, 利用单站分选算法和文献 [12] 算法未能提取出辐射源 2 的脉冲, 而是被当作干扰脉冲丢弃, 造成了漏警; 而且文献 [12] 实时性较差, 耗时较长; 本文算法基于多站接收的脉冲位置和多参数信息, 若 3 个接收站均接收到某辐射源脉冲, 即使数量很少, 依然具有 70% 左右的分选成功率, 对防止出现漏警的情况比较有效; 在极端情况下, 即便是每一个观测站均收到某一辐射源

的 1 个脉冲,理论上也可以实现对该辐射源信号的提取,体现了本文算法的优越性.

4 结 论

本文提出了一种多站测向和多参数信息联合分选算法. 该算法针对多个观测站共同接收到辐射源脉冲信号的情况,首先,主站确定基准脉冲,通过多参数信息搜索副站接收脉冲序列中的匹配脉冲;然后,通过位置信息搜索与本站可能是同一辐射源的脉冲信号,并在副站脉冲序列中搜索与之对应脉冲;最后,将所有匹配成功的脉冲提取出来,实现辐射源脉冲信号的分选. 实验结果表明:该算法在观测站接收到的脉冲数量充足时,分选正确率与经典的单站分选算法、多站递归直方图分选算法相当;在观测站接收到的脉冲数量较少或者极少时,基于脉冲信号 PRI 统计规律的分选算法不再适用,而本文算法仍能较准确地分选出辐射源信号,避免漏警的情况出现. 在实际的工程应用中,针对经典算法会产生漏警的问题,所提出的算法有一定的应用价值,可以实现对接收条件较差时某些辐射源的分选. 下一步将针对各观测站非共视的情况,即不能全部接收到辐射源脉冲的情形,如何实现高正确率的信号分选进行研究.

参考文献(References)

- [1] 樊甫华,张万军,谭营. 基于累积变换的周期性对称调制模式的快速自动搜索算法[J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1266-1270.
(Fan F H, Zhang W J, Tan Y. A fast and automatic searching algorithm of periodic and symmetric patterns based on accumulative transformation technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1266-1270.)
- [2] 杨学永,宋国栋,钱轶,等. 现代雷达信号分选跟踪的几种方法[J]. 现代雷达, 2014, 36(3): 43-48.
(Yang X Y, Song G D, Qian Y, et al. Several methods of radar signal sorting and tracking[J]. Modern Radar, 2014, 36(3): 43-48.)
- [3] 易波,刘培国,薛国义. 一种基于顺序差值直方图算法的改进雷达信号分选方法[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(1): 6-10.
(Yi B, Liu P G, Xue G Y. An improved method for radar signal sorting based on SDIF histogram algorithm[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(1): 6-10.)
- [4] Mahdavi A, Pezeshk A M. A fast enhanced algorithm of PRI transform[C]. The 6th Int Symposium on Parallel Computing in Electrical Engineering. Qingdao, 2011: 179-184.
- [5] 李英达,肖立志,于洋,等. 一种新的 PRI 变换分选算法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(12): 209-213.
(Li Y D, Xiao L Z, Yu Y, et al. A new algorithm of PRI transform[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(12): 209-213.)
- [6] Bin Deng, Yu-Liang Qin, Hong-Qiang Wang, et al. SFM signal detection and parameter estimation based on pulse-repetition-internal transform[C]. Signal Processing Conf(EUSIPCO), 2012 Proc of the 20th European. Bucharest, 2012, 8: 1855-1859.
- [7] 黄宇,刘锋,王泽众,等. 基于 FRFT 的雷达信号 chirp 基稀疏特征提取及分选[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 393-400.
(Huang Y, Liu F, Wang Z Z, et al. Chirp function sparse feature extraction and sorting of radar signals based on FRFT[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 393-400.)
- [8] 李英达,肖立志. 一种脉冲重复间隔复杂调制雷达信号分选方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(10): 2494-2497.
(Li Y D, Xiao L Z. A method of signal sorting for radar signal of pulse repetition interval complex modulated[J]. J of Electronics & Information Technology, 2013, 35(10): 2494-2497.)
- [9] 梁华东,韩江洪. 采用双谱多类小波包特征的雷达信号聚类分选[J]. 光子学报, 2014, 43(3): 1-8.
(Liang H D, Han J H. Clustering and sorting radar signals based on multi-wavelet packets characteristics of bispectrum[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 1-8.)
- [10] Electr Eng Dept, Al-Baha Univ, Al-Baha. A novel and efficient approach for automatic classification of radar emitter signals[C]. Aerospace Conf, 2013 IEEE. Big Sky, MT. 2013, 3: 1-8.
- [11] 郭富成,樊昀,周一宇,等. 空间电子侦察定位原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 81-86.
(Guo F C, Fan Y, Zhou Y Y, et al. Localization principles in space electronic reconnaissance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 81-86.)
- [12] 马爽,吴海斌,柳征,等. 基于递归扩展直方图的辐射源时差分选方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(5): 83-89.
(Ma S, Wu H B, Liu Z, et al. Method for emitter TDOA sorting based on recursive extended histogram[J]. J of National University of Defense Technology, 2012, 34(5): 83-89.)

(责任编辑: 曹洪武)