

# 基于序贯多目标匹配滤波器的雷达信号分选方法

吴昊, 柳征, 郑超凡

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 国防科技大学, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 面对日益复杂的电磁环境, 电子侦察关注的重点是未经掌握的电磁目标, 利用“先验信息”对密集脉冲流进行分选可以有效稀释脉冲流密度, 从而提高后续信号分选的效率。针对此应用背景, 在RFS理论对雷达模板状态集和量测集建模的基础上提出了一种基于序贯多目标匹配滤波器的信号分选方法。仿真实验表明该方法具备分选效率高、对丢失脉冲和干扰脉冲不敏感的优势。

**关键词:** 信号分选; RFS; 序贯多目标匹配滤波器

**中图分类号:** TN971

**文献标识码:** A

## Radar signal sorting method based on sequential multi-objective matched filter

Wu Hao, Liu Zheng, Zheng Chaofan

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

**Abstract:** In the face of increasingly complex electromagnetic environment, electronic reconnaissance focuses on unknown electromagnetic targets. Using “prior information” to separate dense pulse flow can effectively dilute the pulse flow density, thereby improving the efficiency of subsequent signal sorting. Aiming at this application background, a signal sorting method based on sequential multi-target matched filter is proposed on the basis of RFS theory modeling radar template state set and measurement set. The simulation results show that this method has the advantages of high sorting efficiency and insensitivity to missing and jamming pulses.

**Key words:** signal sorting; RFS; sequential multi-objective matched filter

## 0 引言

电子侦察是战场电磁态势感知的重要手段, 信号分选是电子侦察数据处理的重要环节, 面对复杂的电磁环境, 如何利用已掌握电磁目标的“先验信息”实现对密集脉冲流的有效“稀释”, 是提高信号分选效率的关键。本文的研究就是利用脉冲样本图<sup>[1]</sup>这一类“先验信息”实现对已掌握电磁目标的快速准确分选。

传统的信号分选算法主要是利用信号之间的相关性进行的, 由于没有利用任何“先验信息”, 所以这类信号分选可以看成是盲分选, 而本文所研究的信号分选可视为“有监督”信号分选。文献[2]提出利用内容可寻址存储器(CAM)实现交错脉冲序列的实时处理, 该方法可实现高度并行处理, 但是其对参数空间重叠的

辐射源需进一步处理。文献[3~5]利用同种雷达信号脉冲之间的匹配相关性, 通过搜索脉冲移位匹配后自相关函数极大峰值的方法, 可实现匹配脉冲的筛选, 该方法对小样本脉冲序列具有很好的适用性。文献[6]引入数据挖掘领域时间序列相似性快速匹配原理和滑动窗技术, 实现雷达信号的快速识别。文献[7]在信号处理过程中将雷达参数从测量域转换到概率域, 提出雷达参数概率关联算法, 对参数相近的雷达信号有很好的分选效果, 但其对复杂重频调制类型的信号处理能力不强。信号分选问题过程可以看作是按照某种规则(时序规律, 统计规律)在含有噪声的观测中关联正确的脉冲序列的过程, 而“有监督”的信号分选则可以视为匹配滤波的过程, 因此本文运用多目标跟踪领域的方法, 提出了一种基于序贯多目标匹配滤波器的雷达信号分选方法。

收稿日期: 2019-05-17; 2019-07-19 修回。

作者简介: 吴昊(1991-), 男, 硕士, 主要研究方向为综合电子战系统与技术。

## 1 信号分选与多目标跟踪对比分析

信号分选与多目标跟踪同样作为信息融合领域的重要研究内容,二者有很多相似之处。其相似性主要表现在以下3个方面:1)处理对象多个:雷达信号分选的处理对象是多部雷达交错脉冲序列,多目标跟踪的处理对象为多机动目标航迹;2)融合参数多维:前者融合的参数主要包括载频(RF)、脉宽(PW)、信号到达时间(TOA)、脉冲幅度(PA)、信号到达角(DOA)等脉冲描述字(PDW)等信息,后者融合的参数主要包括目标位置、角度、速度、角速度等信息;3)融合过程包含多种状态转换:前者融合过程中状态转换过程包括状态保持、跟踪、跳转,各个状态的定义在第2节中给出,后者融合过程中状态转换过程包括目标存活、消失、新生及衍生<sup>[8]</sup>,因此可以将多目标跟踪领域的方法运用到信号分选领域。

## 2 基于RFS理论的雷达模板状态集和量测集建模

随机有限集(RFS)理论是从随机变量的基础上发展而来,RFS的取值为集合的随机元<sup>[8-9]</sup>,随机有限集 $X$ 可以定义为样本空间 $\Omega$ 到 $E$ 的有限子集空间 $P(E)$ 的映射<sup>[8]</sup>, $X:\Omega \rightarrow P(E)$ 。这使得RFS既能处理随机集值函数又能处理随机点值函数,该理论被广泛运用到多目标跟踪领域。

### 2.1 定义雷达信号状态转换

有2组雷达脉冲序列  $S_1 = \{\underbrace{\text{PRI}_1, \dots, \text{PRI}_1}_m, \underbrace{\text{PRI}_2, \dots, \text{PRI}_2}_m, \underbrace{\text{PRI}_3, \dots, \text{PRI}_3}_m\}$  为间隔组变信号,组参差数为3,组内脉冲个数 $m$ ;  $S_2 = \{\text{PRI}_1, \text{PRI}_2, \text{PRI}_3, \dots, \text{PRI}_1\}$  为间隔参差信号,参差数为3。考虑信号变化特点和不同丢失脉冲情况,定义间隔组变信号4种状态:保持、组内跟踪、组间跟踪、跳转,如图1所示;定义间隔参差信号3种状态:保持、跟踪、跳转,如图2所示。

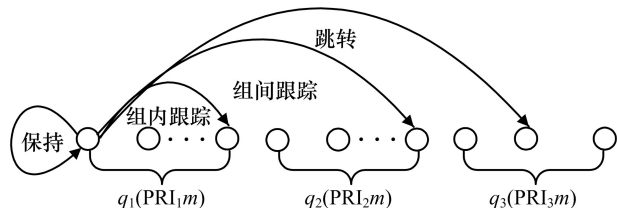


图1 组变信号状态转换图

### 2.2 雷达模板状态集和量测集建模

文献[10]引入数据压缩的思想,提出了用脉冲样

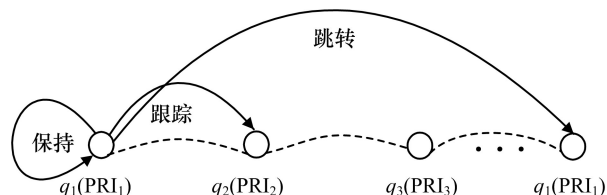


图2 参差信号状态转换图

本图表示信号特征的新方法,该表征方法能更好的体现脉冲序列的时序特征,有利于信号的分选与识别。参照该方法,建立雷达模板,具体不再赘述。

结合RFS理论做如下定义: $Q_k = \{q_{k,1}, q_{k,2}, q_{k,3}, \dots, q_{k,N(k)}\} \subset F(E)$  表示处理第 $k$ 个脉冲时各个雷达模板所处状态集合; $q_{k,N(k)}$  表示第 $N(k)$ 个雷达模板所处状态; $N(k)$  表示雷达模板数; $F(E)$  为状态有限集取值空间的有限子集; $E$  为目标状态有限集的取值空间; $F(E) = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_m\}$  其中,  $\Theta_m = \{q_1^m, q_2^m, \dots, q_n^m\}$ ;  $\Theta_m$  表示第 $m$ 个样本图对应雷达的状态有序集合,  $q_n^m$  表示第 $m$ 个雷达模板的第 $n$ 个状态。 $T_k = \{\text{DTOA}_1, \text{DTOA}_2, \dots, \text{DTOA}_{M(k)}\} \subset F(T)$ ; 其中  $\text{DTOA}_{M(k)} = \text{TOA}_k - \text{TOA}_{M(k)}$ ;  $M_k$  表示处理第 $k$ 个脉冲时未被匹配脉冲序号集合; $T_k$  表示处理第 $k$ 个脉冲时量测的有限集; $F(T)$  为量测有限集的取值空间的有限子集, $T$  为量测有限集的取值空间,  $F(T) = \{\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_m, \text{Nan}\}$ ,  $\Sigma_m = \text{span}\{x \in V_m\}$  表示由间隔值集合 $V_m$ 中元素张成的线性空间; $V_m = \{\text{PRI}_1^m, \text{PRI}_2^m, \dots, \text{PRI}_n^m\}$  表示第 $m$ 个雷达模板间隔值集合,  $\text{PRI}_n^m$  表示第 $m$ 个雷达模板的第 $n$ 个间隔值, Nan 表示由干扰脉冲的得到的量测数据。

## 3 序贯多目标匹配滤波器分选原理与方法

一个脉冲最多属于一部雷达,即一个量测只与一个测量相对应,因此信号分选问题可以转化为在 $T_k$ 中寻找 $Q_k$ 中唯一值的问题,可以视为在噪声中寻找确定性信号,因此可以用匹配滤波器处理,为了提高处理效率选用序贯多目标匹配滤波器。序贯多目标匹配滤波器进行脉冲匹配的过程可以用式(1)来表示。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N h_i \cdot T_k(M(k)) \leq 1 \\ h_i \cdot T_k(M(k)) = b \end{cases} \quad (1)$$

式中, $N$  表示匹配滤波器的个数,它等于脉冲样本图的个数; $h_i$  表示第 $i$ 个匹配滤波器的响应函数; $T_k(M(k))$  表示 $T_k$ 中第 $M(k)$ 个量测; $b$  为布尔型变量,  $b=0$  表示不存在与滤波器相匹配的 $T_k$ ,此时状态

集合  $Q_k$  保持不变,反之  $b=1$  表示存在与滤波器相匹配的  $T_k$ ,此时状态集合  $Q_k$  更新,更新过程在 3.3 节序贯多目标匹配滤波器分选流程中介绍,序贯多目标匹配滤波器脉冲匹配示意图如图 3 所示。

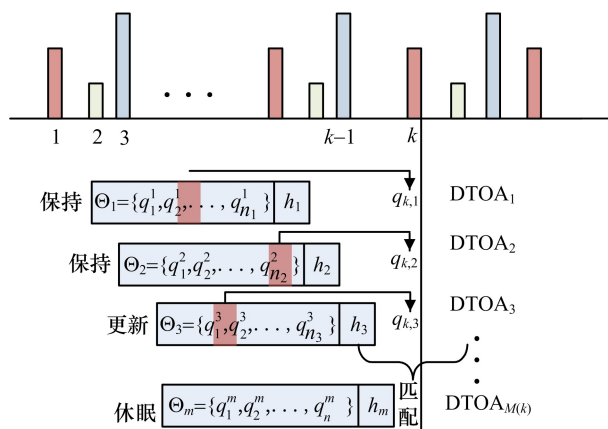


图 3 序贯多目标匹配滤波器脉冲匹配示意图

### 3.1 匹配滤波器响应函数设计

对  $DTOA_{M(k)}$  按照式(2)进行分解:

$$DTOA_{M(k)} = \alpha_1 \text{PRI}_{p_1}^m + \alpha_2 \text{PRI}_{p_2+1}^m + \cdots + \alpha_n \text{PRI}_{\text{mod}(p+n-1, n)}^m \quad (2)$$

$\text{PRI}_{p_i}^m$  的含义与 2.3 节中的定义相同,  $\alpha_n$  为对应间隔值的系数;  $\text{mod}(\cdot)$  为取模运算符;  $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}, \alpha_n \neq 0\}$  表示非零系数集合。

响应函数非解析式,而是由一组特定约束条件构成,充分考虑丢失脉冲影响,同时雷达模板各间隔值之间有严格的时序关系,因此分别设置间隔变化类型为参差和组变雷达模板对应的匹配滤波器响应函数如下:

间隔参差:

$$\begin{cases} 1. A \neq \phi \\ 2. A \text{ 中元素下标序号连续} \\ \text{(例如: } A = \{\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_1\}) \\ 3. A \text{ 中元素差分,满足 } \forall \text{diff}(A) \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

间隔组变:

$$\begin{cases} 1. A \neq \phi \\ 2. A \text{ 中序号连续} \\ 3. A \text{ 中中间元素值 } (\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5) \\ \text{为 } m \text{ 的整数倍, } m \text{ 为组内脉冲数} \\ 4. A \text{ 中首尾元素值 } (\alpha_2, \alpha_1) \\ \text{与中间元素值之差小于 } m \end{cases} \quad (4)$$

### 3.2 序贯多目标匹配滤波器关联起始规则

本文采用序贯的方式对脉冲序列进行关联匹配,如果关联起始脉冲选取错误会导致后续的关联匹配连

锁式错误,将导致分选失败。本文引入 SPRT(序列概率比检测)方法来确定关联起始脉冲。

#### 3.2.1 SPRT 方法概述

定义二元假设:

$H_0$ : 真实目标不存在,回波来自于虚警或杂波;

$H_1$ : 真实目标存在;然后计算相对于每一种假设的似然函数  $P_{0k}$  和  $P_{1k}$ ,  $P_F$  为虚警概率,即把杂波判定为真实目标的概率,  $P_D$  为目标检测概率。  $H_0: P_{0k} = P_F^m (1 - P_F)^{k-m}$ ;  $H_1: P_{1k} = P_D^m (1 - P_D)^{k-m}$ ; 其中  $m$  为检测数,  $k$  为扫描次数。

定义相对应于两种假设的似然比函数为:  $U_k = P_{1k}/P_{0k}$ , 并设置两种门限  $C_1$  和  $C_2$ 。最后 SPRT 方法的决策逻辑如下:

$U_k \leq C_1$ , 接受假设  $H_0$ ;

$U_k \geq C_2$ , 接受假设  $H_1$ ;

$C_1 < U_k < C_2$ , 继续检验。

#### 3.2.2 脉冲丢失率分析

为了得到  $P_D$  和  $P_F$  必须进行脉冲丢失率分析,文献[11]总结出了复杂电磁环境下引起脉冲丢失的 5 点主要原因,其中最主要的一点是由同时到达信号引起的丢失。文献[12]指出同时辐射源的信号所构成的脉冲信号时具有平稳性和无后效性,其分布规律符合泊松分布,任一脉冲丢失的概率,就是这一脉冲的前沿时刻其它脉冲可能存在的概率。脉冲信号流密度为  $\lambda(t) = \lambda$  (脉冲/秒)。则在  $\Delta t$  的时间内出现  $n$  个脉冲的概率为:  $P_n(\Delta t) = (\lambda \Delta t)^n / (n!) e^{-\lambda \Delta t}$ , 设相邻脉冲前沿之间的间隔时间为  $\omega$ , 则  $\omega$  的概率密度函数为:  $f(\omega) = \lambda e^{-\lambda \omega}$ , 某一部雷达的脉冲存在的概率就是该雷达脉冲串的占空比:

$$\alpha = \text{PRF} \cdot \text{PW} \quad (5)$$

则脉冲丢失概率为:

$$p = 1 - \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \alpha_i) = 1 - e^{-\alpha^*} \quad (6)$$

式中,  $\alpha^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i$  为所有雷达辐射的脉冲信号流的总占空比。

#### 3.2.3 基于 SPRT 方法的关联起始规则

在理想无丢失脉冲条件下,  $P_D = \alpha$ , 当考虑到丢失脉冲存在时  $P_D = \alpha \cdot (1 - p)$ ;  $P_F = P' | \overline{P_D}$ ,  $P'$  表示干扰脉冲与滤波器匹配的概率,  $\overline{P_D}$  表示正确关联脉冲不存在的概率,二者是相互独立的,因此:

$$P_F = P' \cdot \overline{P_D} = \eta \cdot (1 - P_D) \quad (7)$$

式中,  $P' = \eta = (|\overline{\text{PRI}} - \overline{\text{PRI}}_i|) / \overline{\text{PRI}}_i$  为一与信号环境和雷达模板相关的常数,  $\overline{\text{PRI}}$  为总的间隔均值,  $\overline{\text{PRI}}_i$

为第  $i$  个雷达模板间隔值的均值,在信号分选场景定义  $k_i$  为:从分选出属于辐射源  $i$  的第 1 个脉冲起始到直至分选出  $m_i$  个脉冲为止共处理的脉冲数。

### 3.3 序贯多目标匹配滤波器分选流程

序贯多目标匹配滤波器分选流程如图 4 所示。

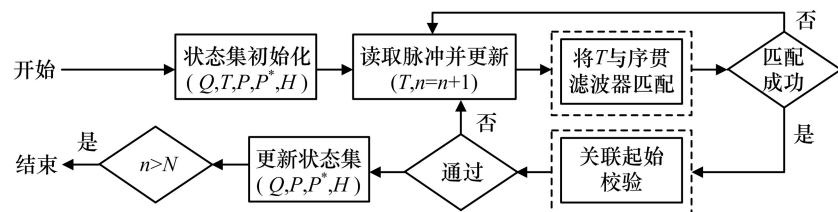


图 4 序贯多目标匹配滤波器分选流程图

详细步骤如下:

step1:初始化雷达模板状态向量集  $Q$ , 量测集  $T$ , 剩余脉冲集  $P$ , 匹配脉冲集  $P^* =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \text{其中第一列为序号; 滤波器状态}$$

向量集  $H = [\overbrace{0, 0, \cdots, 0}^N]$ ,  $N$  定义同上表示匹配滤波器的个数。

step2:依次读取待分选脉冲序列,更新量测集  $T$  (当读取两个脉冲后观测向量集才有数据),将量测集  $T$  与序贯多目标匹配滤波器进行匹配,若匹配成功则跳转至 step3, (为了便于说明,假设直至第  $k$  个脉冲读入时,第  $k-1$  个观测数据与匹配滤波器  $h_1$  匹配成功,此时目标的状态向量集和匹配脉冲集为空集,目标观测向量集为  $T_k = \{\text{DTOA}_1, \text{DTOA}_2, \cdots, \text{DTOA}_{k-1}\}$ , 剩余脉冲集  $P = [1, 2, \cdots, k-1]$ , 否则重复 step2。

step3:对匹配成功的脉冲进行关联起始校验,校验成功则跳转至 step4, 否则跳转至 step2。

step4:更新剩余脉冲集 ( $P = [1, 2, \cdots, k-2]$ ), 更

$$\text{新匹配脉冲集 } P^* = \begin{bmatrix} 1 & k-1 & k & \cdots & 0 \\ 2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \text{更新}$$

雷达模板状态向量集  $Q_k = \{q_{k,1}\}$ , 滤波器状态向量集  $H = [\overbrace{1, 0, \cdots, 0}^N]$ , 滤波器状态向量集合中“1”表示该匹配滤波器被激活,在后续的匹配过程中优先匹配,“0”表示对应的滤波器仍处于“休眠”状态(为了提高效率和减少计算量)。

step5:重复上述步骤 step2—step4,直到处理完最

后一个脉冲。

## 4 仿真分析

为验证本文提出算法对交叠脉冲序列的分选能力首先定义指标——脉冲分选正确率  $\gamma$ ,  $\gamma = M/N$ , 其中  $M$  为经算法分选出的辐射源正确脉冲个数,  $N$  为仿真生成的辐射源实际脉冲数。同时,为了对比提出算法的优劣,选取改进搜索算法的 CDIF 算法作为对比。选取优化 CDIF 算法作为对比算法的原因主要有两点:一是该算法作为信号分选领域的经典算法,在实际的工程中得到广泛运用;二是其搜索算法部分制约了该算法效率,通过优化其搜索算法后与本文提出算法进行对比更能突出本文算法在应对漏脉冲和干扰方面的优势。

仿真场景:设置一组交叠脉冲序列由 4 个辐射源和 1 个干扰源组成,它们在载频和脉宽两维参数不可分,故仅考虑 TOA 这一维参数。辐射源 1:间隔变化类型固定,  $\text{PRI}_1 = 453\mu\text{s}$ , 脉冲个数  $N_1 = 100$ ; 辐射源 2:间隔变化类型参差,参差数 3,  $\text{PRI}_2 = [230\mu\text{s}, 256\mu\text{s}, 351\mu\text{s}]$ , 脉冲个数  $N_2 = 80$ ; 辐射源 3:间隔变化类型参差,参差数 6,  $\text{PRI}_3 = [960\mu\text{s}, 1050\mu\text{s}, 1160\mu\text{s}, 1290\mu\text{s}, 1440\mu\text{s}, 1610\mu\text{s}]$ , 脉冲个数  $N_3 = 17$ ; 辐射源 4:间隔变化类型组变,组内脉冲数为 4,组间参差数为 3,  $\text{PRI}_4 = [683\mu\text{s}, 720\mu\text{s}, 950\mu\text{s}]$ , 脉冲个数  $N_4 = 26$ ; 干扰脉冲信号为重频抖动类型脉冲序列,其重复间隔均值  $\overline{\text{PRI}} = 720\mu\text{s}$ , 抖动区间  $|\Delta| = 0.3 \overline{\text{PRI}}$ ; 参数的测量误差服从均值为  $50\mu\text{s}$ , 方差为 1 的高斯分布。

测试场景 1:设置干扰信号比例  $\alpha$  为 10%,在不同的脉冲丢失率下,分别计算采用本文算法和优化 CDIF 算法下的脉冲分选率  $\gamma$ , 每组实验进行 100 次蒙特卡洛仿真,测试丢失脉冲对算法的影响。仿真结果如图 5 所示。

测试场景 2:设置脉冲丢失率为 10%,在不同的干扰信号比例  $\alpha$  下,分别计算采用本文算法和优化 CDIF 算法下的脉冲分选率  $\gamma$ , 每组实验进行 100 次蒙特卡洛仿真,测试干扰脉冲对算法的影响。仿真结果如图 6 所示。

由仿真结果可得出结论,本文算法相比于优化 CDIF 算法具有以下两方面优势,一是由于本文提出方法是在“先验信息”指导下的分选,故分选正确率较高;二是本文算法采用序贯多目标匹配滤波器,充分考虑了脉冲列之间的时序规律,从而不存在误差积累导



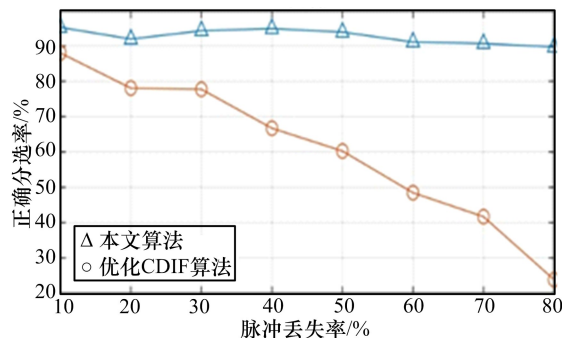


图5 不同脉冲丢失率下分选正确率分布图

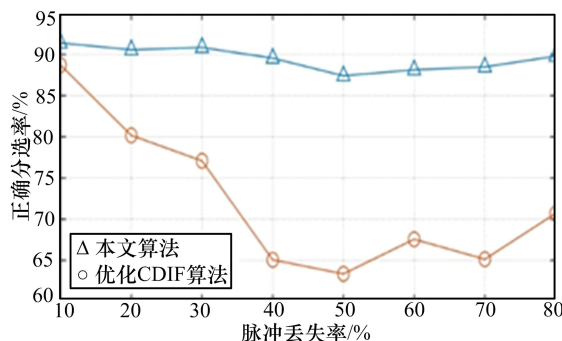


图6 不同干扰脉冲率下分选正确率分布图

致的信号分选正确率降低的问题,且对漏脉冲和干扰脉冲不敏感。

## 5 结束语

本文针对复杂电磁环境,对密集信号流“稀释”问题进行了研究,在RFS理论对雷达模板状态集和量测集建模的基础上,利用序贯多目标匹配滤波器对交叠脉冲序列进行分选,仿真实验结果充分展现了本文算

法的优势。■

## 参考文献:

- [1] 龚亮亮,罗景青.一种基于脉冲样本图的雷达信号特征表述方式[J].舰船电子工程,2008,28(2):83-85.
- [2] 徐欣,冯道旺,周一宇,等.基于CAM的实时脉冲去交错方法研究[J].电路与系统学报,2001,6(3).
- [3] 龚亮亮,罗景青,吴世龙.一种基于模板脉冲序列的雷达辐射源识别方法[J].现代防御技术,2008,36(5):130-134.
- [4] 孟祥豪,罗景青.基于自提取脉冲样本图的雷达信号快速提取法[J].航天电子对抗,2014,30(4):53-57.
- [5] 孟祥豪,罗景青,吴世龙.一种小样本数脉冲信号的样本子图分选算法[J].火力与指挥控制,2015,40(5):34-39.
- [6] 孙亚伟,黄建冲,徐英.基于时间序列相似性原理的雷达信号识别[J].航天电子对抗,2012(4):25-28.
- [7] 邵丽鹏,纪凤有.基于联合概率关联的雷达信号分选方法[J].应用科技,2019,46(01):73-79.
- [8] 张其全.基于序贯贝叶斯滤波器的多目标跟踪方法研究[D].深圳:深圳大学,2017.
- [9] Molchanov IS. Theory of random sets [M]. Springer,2005.
- [10] Mahler RPS. Representing rules as random sets, II: Iterated rules[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2015, 11(8):583-610.
- [11] 杨萃,肖昌达.雷达脉冲丢失原因分析与计算[J].信息化研究,2010,36(4).
- [12] 魏娟.密集信号环境下的分选技术研究[D].成都:电子科技大学,2005.

(上接第42页)

- [2] 刘闯,陈松辉.基于指数-兰彻斯特方程的岛礁作战效能评估[J].舰船电子工程,2014(8):111-114.
- [3] 唐少华,马廷明,朱强.登岛作战中海洋环境辅助决策问题研究[C]//体系作战与军事运筹学研究2014年学术年会论文集,2014:656-660.
- [4] 刘冲,郭金翰,吴江.联合抗登陆作战中实现各种火力优势互补的途径和方法[C]//军事力量体系与军事系统工程2013年会议论文集,2013:655-657.
- [5] 张磊,陈敏,田千华.基于云理论两栖编队岛礁攻防作战

能力评估[C]//加快推进国防和军队现代化与军事系统工程2014年会议论文集,2014:326-330.

- [6] 徐圣良,等.夺取岛礁警戒兵力编成的效能分析[J].舰船电子工程,2015(7):145-146.
- [7] 杨瑞平,闫海港,徐林.信息系统装备作战建模与仿真研究[J].军事力量体系与军事系统工程2013年会议论文集,2013:518-520.
- [8] 孙向军,李海燕,冯伟强.基于可拓学的指挥决策模型研究[C]//军事力量体系与军事系统工程2013年会议论文集,2013:508-511.