

基于数据关联处理的重频参差雷达信号分选方法

柳 征^① 高 超^{*①} 李 悦^②

^①(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) 长沙 410073)

^②(中国人民解放军 32032 部队 北京 100000)

摘 要: 该文针对电子侦察信号盲分选的技术难题, 结合重频参差调制模式的特点, 提出基于数据统计聚类 and 关联匹配的处理方法, 对序列中含有重频参差调制的脉冲进行调制模式识别、参差序列分析和脉冲提取。实验仿真表明在脉冲丢失和虚假脉冲干扰的情况下, 所提方法可以有效进行重频参差模式识别和参差排定次序分析, 实现脉冲信号的盲分选, 具有较强的鲁棒性。

关键词: 信号盲分选; 重频参差; 关联匹配; 统计聚类

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)05-1130-06

DOI: 10.11999/JEIT170793

Signal Sorting Algorithm for Stagger Pulse Repetition Interval Radar Based on Data Association Processing

LIU Zheng^① GAO Chao^① LI Yue^②

^①(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(No.32032 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100000, China)

Abstract: To solve the technical problem of blind sorting of electronic interception signal, combined with the characteristics of pulse repetition interval stagger mode, based on the statistical clustering and data association, the algorithm for stagger pulse repetition interval pattern recognition is proposed, sequence analysis and signal sorting is carried out. The simulation results show that the proposed method can effectively dispose the blind signal sorting process and has strong robustness in case of missing and spurious pulses.

Key words: Signal blind sorting; Stagger pulse repetition interval; Association matching; Statistical clustering

1 引言

雷达信号分选是电子侦察信号处理的难点问题。重频调制模式是雷达工作模式的重要反映, 脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI)分析是实现雷达调制模式识别与信号分选的重要途径。重频参差调制是典型的重频模式, 在各类 MTI 雷达中被广泛使用^[1,2], 对于重频参差脉冲序列的信号分选是本文研究的重点。

统计直方图是经典的信号分选方法, 可以对脉冲序列的 PRI 分布进行刻画。Mardia^[3]结合直方图分析方法和序列搜索算法的优势, 提出累积差值直方图(CDIF)算法。Milojevic 等人^[4]在 CDIF 的基础上, 提出序列直方图法(SDIF), 与 CDIF 相比, SDIF 不需要对直方图进行累积, 计算阶数较 CDIF 低, 有效地减少了计算量。Kenichi 等人^[5-7]提出了 PRI 变换算法, 该算法解决了自相关法存在的子谐波问

题, PRI 参数的估计精度也较高。李星雨等人^[8]提出了基于 PRI 熵和转移矩阵的雷达信号分选方法, 运用 PRI 状态转移矩阵进行雷达信号重频调制识别和分选。关一夫等人^[9]基于生物基因信息学中基因序列动态规划的思想, 对多功能雷达的 PRI 规律进行了分析。李英达等人^[10]基于 2 维特征向量提取并描述了脉冲序列中 PRI 的变化规律, 实现复杂环境下雷达信号分选的问题。魏可友等人^[11]提出了 PRI 变换及其改进方法相结合的综合分选方法, 可有效分析重频抖动的调制参数。周一鹏等人^[12]提出了基于极值序列特征集的雷达 PRI 调制模式识别, 构建调制参数特征集并完成对 PRI 的模式识别。郑惠文等人^[13]提出多站侦收脉冲信号方法, 基于辐射源到各接收站时间差相同的原理实现信号的分选。

当前在非单脉冲定位的侦察场合中, 对隐藏在混杂脉冲序列中且符合特定重频规律的脉冲序列盲分选, 具有迫切的需求。文献[14,15]结合多维雷达参数, 对复杂电磁环境下进行信号分选; 文献[16,17]

基于脉冲前沿包络特征,用 Hausdorff 距离函数进行脉冲配对,解决了信号的分选问题,这种方法对数据采集的质量要求较高。针对传统分选方法的不足,本文运用计算机数据挖掘的思想,基于数据聚类分析和关联匹配,对重频参差调制模式的脉冲序列进行研究,完成从冗余的侦收序列中对重频参差模式识别、调制参数分析以及参差脉冲序列提纯等工作。仿真结果表明本文算法在无先验的盲分选中,可以有效估计重频参差模式的调制参数,完成信号分选工作,具有较好的应用价值。

本文第2节提出特征统计量,对序列中是否含有重频参差调制模式进行识别;第3节进行重频调制模式分析和参数估计;第4节基于上节的估计参数对参差脉冲序列进行提纯;第5节通过仿真实验验证所提算法的性能;最后一节给出结论。

2 重频参差模式识别

本文主要对重频参差调制模式进行分析。定义在电子侦察环境中,重频参差脉冲信号的参差 PRI 序列为

$$\text{PRI} = \{\text{PRI}_1, \text{PRI}_2, \dots, \text{PRI}_k\} \quad (1)$$

其中, k 为参差的个数。定义 PRI_1 为首参差 PRI 值,重频参差脉冲循环的骨架周期 PRIO 为

$$\text{PRIO} = \sum_{v=1}^k \text{PRI}_v, \quad v = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

对重频参差调制的 TOA 进行多阶差分得 DTOA,并对所得的 DTOA 进行统计聚类,聚类峰值对应的时刻点为参差调制 TOA 的骨架周期 PRIO^[10,18],骨架周期由多个 PRI 值线性加和,构成骨架周期的脉冲序列相互交织,一个脉冲被多个骨架周期所共有,这是其他重频调制模式不具备的,如图1所示。本文基于这一特征,提出描述脉冲序列交错分布的统计量——脉冲交叠率(Overlap Rate, OR),对侦收序列中是否存在重频参差调制的脉冲进行识别。定义脉冲交叠率为脉冲占据时间(Occupy Time, OT)与脉冲跨越时间(Span Time, ST)的比值,即

$$\text{OR} = \text{OT}/\text{ST} \quad (3)$$

其中脉冲占据时间 OT 定义为骨架周期之和,即

$$\text{OT} = \sum_{i=1}^n (\text{PRIO}_i) \quad (4)$$

定义脉冲跨越时间 ST 为脉冲序列占据时间区间的长度。以三参差重频调制脉冲为例,各特征参量描述如图1所示。

对于重频参差调制的脉冲序列,骨架周期相互交叠,脉冲占据时间 OT 大于脉冲跨越时间 ST,其

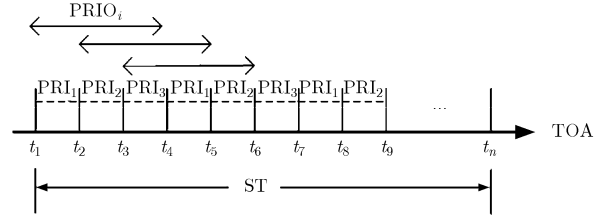


图1 重频参差 TOA 序列图

脉冲交叠率 OR 大于 1;而对于重频固定与重频组变的调制序列,脉冲排定序列单一,脉间交叠较少,脉冲占据时间 OT 近似等于脉冲跨越时间 ST。基于这一特征,可设定适当的门限 TH_1 ,当 $\text{OR} < \text{TH}_1$,则表明侦收的 TOA 序列中隐含有参差重频调制的脉冲,否则无此类型调制脉冲。

一般地,由于电子侦察脉冲信号密度大,对序列中重频模式识别是信号盲分选的基础。本节所提的特征量脉冲交叠是对脉冲交织情况的描述,对脉冲丢失和虚假脉冲的适应性较好,可以在复杂的电磁环境中,完成对重频参差调制脉冲序列的有效识别。

3 重频参差模式分析

本节基于数据处理的关联匹配,从参差 PRI 值在脉冲序列中周期性、有序性转换的角度进行分析,主要包括脉冲序列编号和参差 PRI 值的参数估计。

3.1 脉冲序列编号

冗余侦收序列中对重频调制脉冲提纯是信号盲分选的重点。为了有效对脉冲序列进行标识,参考生物学中对基因序列的提取,首先对侦收的序列进行脉冲编号,使每个脉冲在处理中有唯一的、稳定的身份识别码 ID。对于侦收长度为 N 的 TOA 脉冲序列 L ,其编号序列可表示为

$$L = \{L_1, L_2, \dots, L_o, \dots, L_N\}, \quad o = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

统计聚类是获取高频项目组的有效途径,也是进行数据关联的第1步。一般地,对于 k 参差的脉冲序列,由 k 个参差 PRI 值线性加和的 k 项集对应脉冲对数目是最多的。据关联分析准则,其所有的 $k-1$ 及阶数更低的项集也是频繁集。基于这一理念,对序列 L 一阶差分进行聚类统计。设定聚类门限值,提取聚类峰值超过门限的对应时间聚类值集合 T ,即

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_s, \dots, T_q\}, \quad s = 1, 2, \dots, q \quad (6)$$

q 为聚类峰值超过门限的个数,每一个时间聚类值 T_s 对应的聚类脉冲对 P_s 为

$$P_s = \left\{ \begin{pmatrix} P_{1,1} \\ P_{1,2} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} P_{2,1} \\ P_{2,2} \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} P_{i,1} \\ P_{i,2} \end{pmatrix} \right\} \quad (7)$$

$P_{i,1}$ 与 $P_{i,2}$ 分别为脉冲对中的前后两级脉冲编号。聚类值集合 T 对应的脉冲序列集合 Q 为

$$Q = \{P_1, P_2, \dots, P_s, \dots, P_q\} \quad (8)$$

对于重频参差调制, 集合 T 的首元素 T_1 为重频参差的骨架周期 PRIO, 其他元素则是参差 PRI 值或参差 PRI 值的随机组合。虽然脉冲序列相互交织, 但是脉冲编号却是唯一的、固定的, 可以通过此编号信息准确找到对应的脉冲信号, 具备将其从冗杂观测序列中提取的数据支持, 为之后进行参差序列提纯奠定了基础。

3.2 参差 PRI 值的参数估计

参差 PRI 值估计是重频参差调制模式分析的重要内容。传统的信号分选对参数依赖较大, 若序列中含有多个辐射源信号, 在缺少先验信息前提下无法对其进行分离和参数估计。针对已有算法的不足, 本文基于数据挖掘中关联匹配思想, 对含有重频参差调制模式的脉冲序列进行分析并有序地提取参差 PRI 值。

3.2.1 首参差 PRI 值估计 在实际的电子侦察环境中, 相对于 PRI 的精确估计, 电子侦察更感兴趣的是 PRI 值前后级间的衔接, 这对于推测雷达系统盲速阈值具有重要的作用。为了数据处理的需要, 本文定义在 DTOA 统计聚类中, 聚类数目最多单项集对应的时刻点为首参差值 PRI_1 。

基于脉冲序列 DTOA 分布的分布规律, 提出数值比 NR (Numerical Rate, NR) 特征量进行单项集分析。定义数值比 NR 为 T_s 出现的频数 PN_s (Pulse Number, PN) 与对应的时刻值之比, 数值比集合 NR 可表示为

$$NR = \left\{ \frac{PN_1}{T_1}, \frac{PN_2}{T_2}, \dots, \frac{PN_s}{T_s}, \dots, \frac{PN_q}{T_q} \right\} \quad (9)$$

数值比集合 NR 是频数与对应时刻值之比。根据支撑集理论, 其集合序列中最大值对应的 T_s 为参差序列的首参差值 PRI_1 , 即

$$PRI_1 = T_{(\arg\max(NR))} \quad (10)$$

基于数据的统计聚类, 在脉冲序列集 Q 中, 相比于其他聚类集合, 单项集, 即各参差 PRI 值的频数较高, 其对应的数值比 NR 大于多项集。因此可以提取数值比最大的单项集作为首参差值 PRI_1 ; 另一方面, 序列通过聚类处理去除了虚假脉冲信号的影响, PRI_1 值直接从原始脉冲数据中得到, 其参数估计精度仅仅受到聚类窗宽的影响, 没有其他数学运算带来的误差近似, 相比于传统方法具有较高的精度。

3.2.2 参差序列衔接关系 对于参差序列衔接关系的研究是本文的重点。结合计算机数据处理中关联准则进行数据分析。数据关联和聚类分析都是数据挖掘中的重要方法, 对于冗杂序列, 聚类分析可以从全局对数据的分布进行刻画, 关联匹配可以有效地分析序列中数据的排定模式。

数据关联规则的挖掘过程主要包含两个阶段^[17]: 第 1 阶段从数据集合中找出高频项目组, 第 2 阶段由高频项目组中产生关联规则。对于重频参差调制的脉冲序列, 参差 PRI 周期性的出现, 具有较强的规律性和关联性, 因此参差 PRI 构成的数据集是高频项目组; 另一方面, 参差调制模式 PRI 前后级之间有序衔接, 关联性较强。在关联分析中, 定义时间最大跨度约束为参差序列的骨架周期 PRIO。一般地, 骨架周期 PRIO 在参差调制序列中时间跨度最长, 在 PRIO 序列统计聚类中聚类个数最多。提出时间最大跨度约束是为了在逐次提取参差 PRI 值时进行限定, 防止因为脉冲丢失和脉冲断裂等情况, 造成的估计的参差 PRI 值过大。

参考逐层产生关联规则的 Apriori 算法, 为了结合本文重频参差 PRI 值前后级间的衔接, 提出算法步骤如下:

(1) 记录已估计的首参差 PRI 值, 存入矩阵 $\{\mathbf{SP}\}$ 中, 对应的聚类脉冲对尾脉冲编号 $P_{l(,2)}$ ($l=1$) 存入矩阵 $\{\mathbf{PE}\}$;

(2) 输入时间值集合 T 中聚类时刻值 T_s 及对应聚类脉冲对首脉冲编号 $P_{s(,1)}$, 进行脉冲数据关联, 计算序列 $P_{s(,1)}$ 与 $P_{l(,2)}$ 的前后级关联脉冲的个数 m_s , 并记录在集合 $\{m\}$ 中;

(3) 返回步骤(2)中, 依次循环计算时间值集合 T 中对应的 m_s ;

(4) 计算数值比集合 NR, 即

$$NR = \left\{ \frac{m_1}{T_1}, \frac{m_2}{T_2}, \dots, \frac{m_s}{T_s}, \dots, \frac{m_q}{T_q} \right\} \quad (11)$$

(5) 查找集合 NR 中最大值, 并找出其对应的时刻值 T_s , 记录此时聚类脉冲对尾脉冲 $P_{l+1(,2)}$, 并更新矩阵 $\{\mathbf{PE}\}$, T_s 即为参差序列中下一级的 PRI 值, 即

$$PRI_l = T_{(\arg\max(NR))}, \quad l=2,3,\dots,k \quad (12)$$

(6) 将 PRI_l 计入矩阵 $\{\mathbf{SP}\}$ 中, 计算矩阵中所有因素之和是否大于骨架周期 PRIO。若矩阵 $\{\mathbf{SP}\}$ 元素之和大于 PRIO, 停止脉冲关联, 输出矩阵 $\{\mathbf{SP}\}$ 即为参差序列; 否则, 返回步骤(2)中, 寻找下级参差值。

基于脉冲序列交错特征,不断更新脉冲序号矩阵 $\{PE\}$,进行脉冲的查找与匹配,最终对参差序列中的PRI值进行估计和提取。较已有的信号分选算法,本文方法在缺少参差PRI值等先验信息的情况下,可以适应脉冲丢失、脉冲序列断裂和虚假脉冲掺杂的环境,弥补了已有算法的不足;另一方面通过研究参差PRI的衔接关系,对于分析辐射源工作模式和精确辐射源识别具有重要意义。

4 重频参差脉冲序列提取

结合上文对重频参差调制模式的识别、脉冲重复间隔值的有序提取。本节依据重频参差调制模式的特点,从冗杂的侦收序列中提取参差模式调制的脉冲。

在实际电磁环境中,不可避免地存在脉冲丢失和脉冲序列断裂的情况。脉冲丢失会导致其PRI成倍地增长,脉冲序列断裂则是指在某一时间区间内没有侦测到该辐射源的全脉冲信息,会影响PRI前后衔接的关系。脉冲丢失和断裂都会对辐射源的PRI分布规律造成破坏。在已获得重频调制参数的前提下,对于存在脉冲断裂的情况,采用参差序列“铰链”的方式,进行脉冲序列分选。其步骤如下:

(1)计算重频参差的骨架周期PRIO,考察原始脉冲序列TOA的一阶差分 $DTOA_z$,即

$$DTOA_z = TOA_{z+1} - TOA_z, z=1,3,4,\dots,M-1 \quad (13)$$

(2)设定门限 TH_2 判决脉冲断裂情况:若 $DTOA_z < TH_2$,则脉冲无断裂;记录当前脉冲序列为 D_f ,并进入步骤(4);否则存在脉冲断裂,无法继续关联,结束提取过程并输出当前脉冲序列;

(3)当 $z < M-1$ 时,返回步骤(2);否则,继续步骤(4);

(4)考虑到脉冲丢失,定义脉冲重复间隔“铰链”序列 $\{SP_i\}$ 为参差PRI序列 $\{SP\}$ 元素的随机组合。设定误差容限 ε ,对 D_f 序列中的第 z 个脉冲 $D_{f,z}$ 进

行考察,设

$$\lambda = |D_{f,z} - SP_i| \quad (14)$$

若 $\lambda \leq \varepsilon$,则符合参差调制,判定此脉冲信号为重频参差调制的脉冲信号,并存入序列 $\{SP\}$ 中;否则视为干扰信号,继续步骤(4),直至考察完 D_f 序列中的所有脉冲。

基于上述研究分析,对重频参差脉冲调制模式分析及脉冲信号分选算法如图2所示。

5 算法性能分析

本文基于数据关联分析的角度,对含有重频参差的脉冲进行精细化提取和分析。对PRI测量和分选影响因素主要包括脉冲到达时间(TOA)测量误差、丢失脉冲和干扰脉冲等。在脉冲参数测量方面,随着电子器件工艺水平的提高,脉冲到达时间测量误差在几十ns左右,通常重频参差雷达主要用于远程搜索等场合,脉冲重复间隔在几百到几千 μs 量级,在短时期内TOA测量误差对PRI分选的影响可以忽略。为验证算法对于重频参差调制模式分析和脉冲信号盲分选的效能,设置场景测试脉冲丢失率和干扰脉冲对算法的影响。脉冲丢失定义为时序TOA序列中随机性的丢失脉冲信号,脉冲干扰定义为序列混杂有其他重频调制类型的干扰信号。

仿真场景设置为序列中含有重频参差调制模式的脉冲和重频抖动调制的干扰脉冲。对于四参差重频调制的辐射源,其参差PRI值分别为 $[100 \mu s, 150 \mu s, 230 \mu s, 290 \mu s]$;干扰脉冲信号为重频抖动调制(PRI均值为 $250 \mu s$,抖动区间为PRI均值的30%)的脉冲信号。脉冲参数TOA的测量误差服从均值为50ns,方差为1的高斯分布。并设定两类指标进行算法性能测试:

(1)指标1:为检验算法对重频参差调制模式识别和参差值排定次序的分析性能,定义模式检测值 μ 与模式检测正确率 γ ,即当算法对重频调制模式

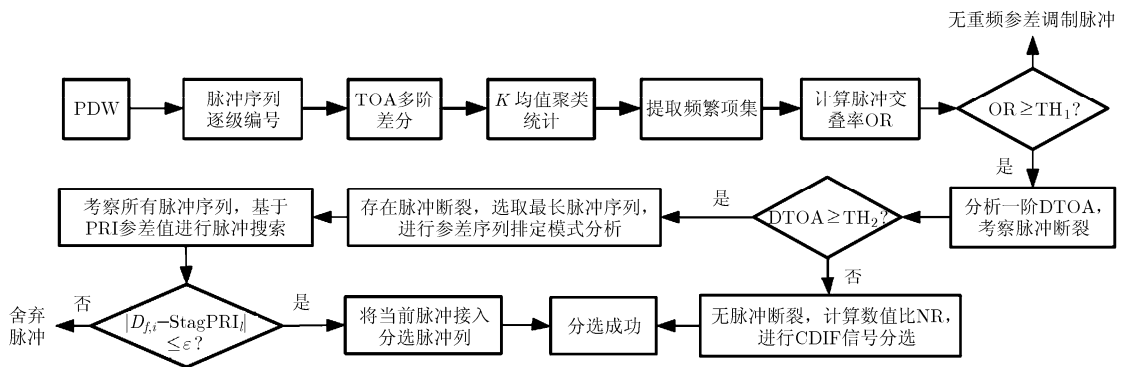


图2 本文处理流程图

识别正确,且可以正确分析出各参差 PRI 值的排定的关系时, μ 取值为 1; 否则 μ 为 0, 进行多次蒙特卡洛实验, 对 μ 进行平均获算法的模式检测正确率 γ ;

(2)指标 2: 为检验算法对脉冲序列中重频参差调制脉冲的分选性能, 定义脉冲分选率为

$$p = fn/FN \quad (15)$$

其中, fn 为本文算法分选重频参差脉冲的个数, FN 为伪收序列含有重频参差脉冲总数。

5.1 测试场景 1: 测试算法对重频参差调制模式识别和参差值排定次序的分析性能

在测试场景 1 中, TOA 序列中含有重频参差调制模式的脉冲数 N 为 1000 个, 设置干扰脉冲信号数 M 与 N 的比例 ω 为 10% 和 30%, 在不同的脉冲丢失率下, 分别采用本文算法和 CDIF 序列搜索算法, 计算模式检测正确率 γ 。每组实验进行 200 次蒙特卡洛仿真。仿真结果如图 3 所示。

据仿真结果可知: 相比于 CDIF 算法, 本文算法对脉冲丢失和干扰脉冲具有较好的适应性, 在脉冲丢失率为 40% 的环境下, 若干扰脉冲比例为 10% 与 30%, 本文算法对序列中重频参差调制模式的检测率分别为 95% 与 80%, 而 CDIF 算法仅有 63% 与 58% 的模式检测正确率。仿真结果表明: 本文方法在重频参差调制模式识别和参差值排定次序的分析上具有良好的效能。

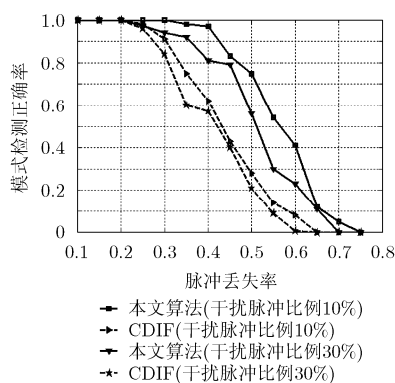


图3 不同环境下模式检测正确率分布图

5.2 测试场景 2: 测试算法对脉冲序列中重频参差调制脉冲的分选性能

在场景 2 中, 测试算法对脉冲序列中重频参差调制脉冲的分选性能。场景 2 中参数设置与场景 1 相同。分别采用本文算法和 CDIF 序列搜索算法, 在不同的脉冲丢失率下, 计算脉冲分选率 p 。每组实验进行 200 次蒙特卡洛仿真。其仿真结果如图 4 所示。

无先验参数信息脉冲信号的分选是本文算法的目标。由图 4 可知, 相比于 CDIF 已有的重频分选方法, 本文算法克服了 CDIF 算法对脉冲丢失和干扰脉冲敏感的特点, 可以有效地提高脉冲分选率, 从混有干扰的脉冲序列中较多地分选出重频参差调制脉冲序列, 比原有算法的脉冲分选率提高 30% 以上, 具有良好的性能优势, 可以较好地适应于实际的电子侦察环境。

6 结论

本文针对复杂电子侦察环境中重频参差调制信号的识别, 参差序列排定分析和脉冲盲分选进行了研究。基于数据关联分析, 在无任何先验信息的情况下, 算法实现了对于参差 PRI 序列排定的分析和脉冲序列的提取。通过仿真实验表明: 本文算法在雷达信号盲分选中, 对脉冲丢失和虚假脉冲掺杂具有较好的适应性, 相比于已有算法, 可以有效地将参差调制的脉冲信号从冗杂的序列中提出, 有力地支持了 ESM 系统, 具有较好的实际应用价值。

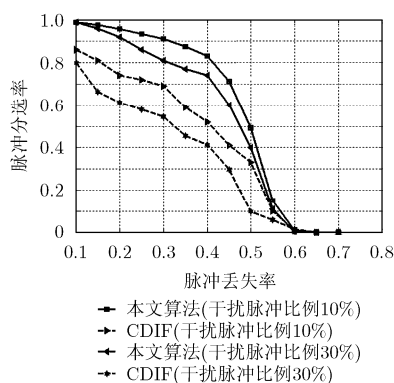


图4 不同环境下脉冲分选率分布图

参考文献

- [1] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 383-416.
DING Lufei and GENG Fulu. The Principles of Radar[M]. Xi'an: Publishing House of Electronic Industry, 2004: 383-416.
- [2] RICHARD G. ELIENT: The Interception and Analysis of

- Radar Signals[M]. New York: Artech House, 2006: 214-219.
- [3] MARDIA H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. *IEEE Proceedings F Radar and Signal Processing*, 1989, 136(4): 149-154.
- [4] MILOJEVIC D J and Popovic B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses[J]. *IEEE Proceedings F Radar and Signal Processing*, 1992, 139(1): 98-104.

- [5] KENIHI N and Masacki K. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 407-421.
- [6] HASSAN H E. Joint deinterleaving/recognition of radar pulses[C]. The International Conference on Radar, Hilton Adelaide South Australia, 2003: 177-181.
- [7] WANG J and SHI X C. Research on an improved sorting method for radar signal[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(9): 1078-1083.
- [8] 李星雨, 杨承志, 张荣. 基于 PRI 熵和转移矩阵的雷达信号主分选算法[J]. 舰船电子工程, 2013, 23(9): 45-49. doi: 10.3969/JSSN1672-9730.2013.09.015.
- LI Xingyu, YANG Chengzhi, and ZHANG Rong. A radar signal main sorting algorithm based on PRI entropy and transfer matrix[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013, 23(9): 45-49. doi: 10.3969/j.issn1672-9730.2013.09.015.
- [9] 关一夫, 张国毅, 王晓峰, 等. 一种基于 PRI 变化规律的雷达辐射源识别方法[J]. 火力指挥控制, 2015, 40(3): 79-82. doi: 10.3969/j.issn.1002-0640.2015.03.019.
- GUAN Yifu, ZHANG Guoyi, WANG Xiaofeng, *et al.* A radar emitter recognition method based on the PRI switching rules[J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(3): 79-82. doi: 10.3969/j.issn.1002-0640.2015.03.019.
- [10] 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): 2493-2497. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00060.
- LI Yingda and XIAO Lizhi. A method of signal sorting for radar signal of pulse repetition interval complex modulated[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(10): 2493-2497. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00060.
- [11] 魏可友, 黄康, 梁广, 等. 基于 PRI 的雷达信号综合分选方法[J]. 电子设计工程, 2017, 25(1): 190-192.
- WEI Keyou, HUANG Kang, LIANG Guang, *et al.* A new integrated method of radar signal sorting based on PRI[J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(1): 190-192.
- [12] 周一鹏, 王星. 基于极值序列特征集的雷达 PRI 调制模式识别算法[J]. 现代雷达, 2016, 38(5): 37-41. doi: 10.16592/J.CNKI.1004-7859.2016.05.010.
- ZHOU Yipeng and WANG Xing. A recognition algorithm for radar PRI modulation mode based on extremum sequence features set[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(5): 37-41. doi: 10.16592/J. CNKI.1004-7859.2016.05.010.
- [13] 郑慧文, 黄建冲. 利用脉冲 TDOA 的雷达信号分选方法[J]. 现代防御技术, 2017, 45(2): 217-222. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2017.02.034.
- ZHENG Huiwen and HUANG Jianchong. Radar signal sorting method utilising pulse TDOA[J]. *Modern Defence Technology*, 2017, 45(2): 217-222. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2017.02.034..
- [14] 雍霄驹, 张登福, 王世强. 一种新的雷达辐射源分选算法[J]. 现代防御技术, 2011, 39(3): 148-151. doi: 10.3969/j.issn1009-086x.2011.03.031.
- YONG Xiaojun, ZHANG Dengfu, and WANG Shiqiang. A new method of sorting radar emitter signals[J]. *Modern Defence Technology*, 2011, 39(3): 148-151. doi: 10.3969/j.issn1009-086x.2011.03. 031.
- [15] 王世强, 张登福. 基于快速支持向量聚类 and 相似熵的多参雷达信号分选方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2735-2741. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00261.
- Wang Shiqiang and Zhang Dengfu. Multi-parameter radar signal sorting method based on fast support vector clustering and similitude entropy[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11): 2735-2741. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00261.
- [16] 吴惟诚, 潘继飞, 刘鑫, 等. 基于上升沿波形配对的信号分选方法研究[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(12): 88-100. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2016.12.021.
- WU Weicheng, PAN Jifei, LIU Xin, *et al.* Signal sorting method based on rising edge waveform matching[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(12): 88-100. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2016.12.021.
- [17] TAN Pangning, STEINBACH, KUMAR, *et al.* 范明, 范宏建, 等译. 数据挖掘导论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 202-250.
- 柳 征: 男, 1978 年生, 博士, 副研究员, 研究方向为综合电子战系统与技术.
- 高 超: 男, 1993 年生, 硕士生, 研究方向为综合电子战系统与技术.
- 李 悦: 男, 1979 年生, 硕士, 高级工程师, 研究方向为综合电子战系统与技术.