

联合 DTOA 一阶差分曲线和相关分析的 参差信号分选方法

谢 敏, 赵 闯, 胡德秀, 刘成城

(中国人民解放军战略支援部队信息工程大学数据与目标工程学院, 河南郑州 450001)

摘 要: 针对直方图方法分选脉间参差雷达信号能力不佳且无法解析其调制模式的问题, 结合参差信号的交织特性, 提出联合到达时间差值(Difference of Time Of Arrival, DTOA)的一阶差分曲线和相关分析的分选方法. 该方法基于 DTOA 一阶差分曲线提取 DTOA 关注项, 然后基于关注项的自相关和交叠率识别参差调制模式、基于关注项的互相关分析参差调制模式, 最后结合参差分析结果进行序列检索. 实验结果表明, 所提方法所需计算量较少, 可以有效分选参差信号并解析其完整的调制模式, 对脉冲丢失表现出较强的适应性, 对子周期分布的均匀程度和干扰脉冲有较好的稳健性.

关键词: 参差雷达信号分选; 参差模式识别; 参差模式分析; DTOA 一阶差分曲线; 相关分析

基金项目: 国家自然科学基金(No.62071490); 河南省自然科学基金(No.212300410095)

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)11-3271-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220799

Signal Sorting Method for Jagger PRI Radar Based on First-Order Difference Curve of DTOA and Correlation Analysis

XIE Min, ZHAO Chuang, HU De-xiu, LIU Cheng-cheng

(School of Data and Target Engineering, PLA Strategic Support Force Information Engineering University,
Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: To sort the pulse stream with a jagged pulse repetition interval (PRI) and reconstruct its PRI pattern, combined with the characteristics of jagger PRI pattern, a method that combines the first-order difference curve of difference of time of arrival (DTOA) and correlation analysis was proposed. Firstly, concerned DTOA terms were extracted based on the first-order difference curve of DTOA. Then, stagger PRI pattern was identified based on the autocorrelation and overlap rate of the concerned term, and the complete pattern was analyzed based on the cross-correlation of the concerned term. Finally, sequence retrieval was performed based on the analysis result. Experimental results show that the proposed method requires less computational effort and has excellent performance on sorting jagger PRI signal and reconstructing its PRI pattern, showing strong adaptability to pulse missing and great robustness to spurious pulse and the uniformity of the distribution of sub-periods.

Key words: jagger PRI signal sorting; jagger PRI pattern recognition; jagged PRI pattern analysis; first-order difference curve of DTOA; correlation analysis

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62071490); Natural Science Outstanding Youth Fund of Henan Province (No.212300410095)

1 引言

参差脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI)主要应用于动目标检测(Moving Target Indicator, MTI)雷达以消除盲速. 参差 PRI 雷达信号在实际雷达侦察

信号中扮演着重要角色, 是电子侦察领域的重要研究内容, 本文主要研究参差雷达信号的分选问题.

雷达信号分选所依据的特征参数通常包括脉冲到达方向、脉冲宽度、脉冲幅度、载波频率和到达时间

(Time of Arrival, TOA). 前四个参数一般用于多参数联合分选方法^[1-3]进行预分选, TOA 则用于 PRI 分选方法对预分选后的脉冲流进行主分选. 在 PRI 分选方法中, PRIs 提取和序列检索交替进行, 提取出潜在 PRI 后由序列检索进行确认, 序列检索成功后继续提取潜在 PRI^[4]. 直方图方法因计算简单、实现容易, 是目前应用最为成熟的 PRI 分选方法. 面临脉冲丢失时, 常规的直方图方法^[4-6]容易提取出真实 PRI 的子谐波, 从而误导序列检索过程. PRI 变换法^[7-9]在计算 PRI 谱图时增加了复相位因子, 可以有效抑制子谐波. 刘严等人^[10]将滑动时间窗的思想引入 PRI 变换法, 可以实现 PRI 高精度估计和脉冲分选. 但是, 由于参差信号的交织特性, 复相位在抑制子谐波时, 对骨架周期有相似的抑制作用. 因此, PRI 变换法仅适用于处理固定 PRI, 不适用于处理参差 PRI. 需要注意, 前述方法并未考虑提取参差 PRI 的子周期, 因而无法在完成脉冲分选的同时分析其完整的调制模式.

PRI 调制模式是雷达工作模式的重要反映, PRI 分析是实现雷达调制模式识别与信号分选的重要途径. 从实际需求出发, 分选系统不仅需要分选出参差信号, 还需对其完整的调制模式进行分析. 目前已有不少学者对如何分析参差模式进行了研究. Liu^[11]提出一种频繁项拓展算法, 可以解析参差信号的调制模式, 但无法满足交错脉冲流的处理需求. 康仕乾等人^[12]在频繁项拓展算法的基础上, 引入关联模式的客观兴趣度度量以解析交错脉冲序列中各辐射源的参差模式, 但是其解析过程的终止条件过于复杂. 王俊岭等人^[13]提出一种基于脉冲间隔与单个脉冲关联的直方图算法, 该方法通过数值比较确认参差 PRI 的骨架周期和子周期, 但无法确定子周期的排定顺序. 柳征等人^[14]提出基于数据统计聚类 and 关联匹配的处理方法, 引入交叠率对参差模式识别, 通过对高频项目组关联匹配实现参差模式分析. 在有脉冲丢失条件下, 该方法对识别低阶参差 PRI 存在缺陷. 同时, 数值聚类有可能将不同的项目组聚成一类, 尤其是子周期分布比较均匀时, 数值聚类无法有效区分不同的子周期. Tao 等人^[15]提出了一种相关匹配算法来估计参差 PRI 的骨架周期及子周期, 该算法对脉冲丢失表现出较好的鲁棒性, 但计算成本较高.

针对上述问题, 本文联合 DTOA 一阶差分曲线 (First-order Difference Curve of DTOA, FDC-DTOA) 和相关分析实现参差信号分选. 该方法基于 FDC-DTOA 提取潜在 PRI, 既能避免子谐波的干扰, 又可强化对参差 PRI 子周期的提取性能. 基于骨架周期的自相关和交叠率识别参差调制模式, 可以适应不同的参差阶数. 在依据参差信号子周期之间的互相关分析参差调制模式时, 以末尾子周期与起始子周期的互相关作为终止判

决条件. 实验结果表明, 所提方法可以有效分选参差信号并解析其完整的调制模式.

2 参差信号建模及关注项提取

2.1 参差信号建模

参差雷达信号的脉冲重复间隔模式可以表示为 $PM = \{pri_1, pri_2, \dots, pri_k\}$, $\sum_{j=1}^k pri_j$ 称为骨架周期, 记为 PRI_j , pri_j 称为子周期, k 为子周期数量, 也称为参差阶数. k 参差 PRI 脉冲序列的 TOA 时序可以表示为

$$t_i = t_{i-1} + pri_{\text{mod}(i-2, k)+1}, \quad i = 2, 3, \dots \quad (1)$$

式中, t_i 表示脉冲到达时间, $\text{mod}(\cdot)$ 表示取模运算. 以 $PM = \{pri_1, pri_2, pri_3\}$ 为例, 其脉冲序列的 TOA 时序如图 1 所示, 该参差序列由起始时间分别为 t_1, t_2 和 t_3 的脉冲重复间隔为 $pri_1 + pri_2 + pri_3$ 的子序列交织而成. 参差序列所独具的交织特性, 是从交错脉冲流中识别是否存在参差模式的重要特征, 也是分析参差模式完整信息的重要依据.

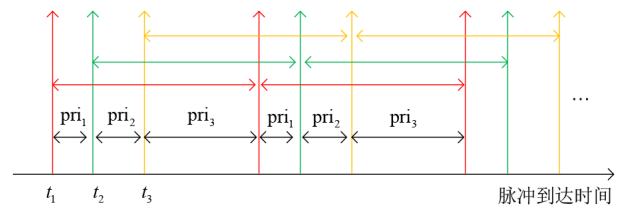


图 1 参差 PRI 的 TOA 时序图

2.2 关注项提取

固定、抖动和参差调制的脉冲序列在其 TOA 序列上所表现出的周期特征是 PRI 分选方法的基本依据. 同时, 该周期特征可以直接反映于其 DTOAs 的分布. 对于固定和抖动调制的脉冲序列, 其 DTOAs 密集分布于周期和子谐波附近; 对于参差调制而言, 除分布于骨架周期和子谐波外, 其 DTOAs 还密集分布于子周期和子周期组合 (非骨架周期, 2 个及 2 个以上相邻子周期的和) 附近. 因此, 基于所截获脉冲序列的 TOAs 计算 DTOAs 后, 可通过数据聚类、直方图统计或其他手段, 获取 DTOAs 的局部密度中心作为潜在 PRI, 称为 DTOA 关注项 (Concerned Item, CI).

2.2.1 直方图方法

直方图方法在提取关注项时通过 PRI 谱图度量 DTOA 分布密度. 如果只考虑 TOA 这一个参数, 则脉冲流可以表示为如下形式^[7]:

$$g(t) = \sum_{i=1}^L \delta(t - t_i) \quad (2)$$

式中, $\delta(\cdot)$ 表示单位冲激序列, L 是脉冲序列长度. 根据时间相关性原理, PRI 谱图表示为

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)g(t+\tau) dt = \sum_{u=2}^L \sum_{v=1}^{u-1} \delta(\tau - t_u + t_v) \quad (3)$$

式中, τ 在 DTOA 统计范围 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 内取值. 通过离散化处理, PRI 谱图的 PRI 范围被均分为多个区间, PRI 谱图的数值等于分布于各区间内的 DTOA 频数. 无脉冲丢失条件下, 真实 PRI 在 PRI 谱图上的数值等价于其脉冲数量. 在相同的观测时长内, PRI 数值越大, 对应的 PRI 谱图数值越小. 因此, 基于 PRI 谱图提取关注项时, 检测阈值一般采用递减形式. 然而, 真实 PRI 与其子谐波具有相近的 PRI 谱值. 在递减阈值的约束下, 当真实 PRI 低于阈值时, 其子谐波可能高于阈值, 最终导致序列检索受到子谐波的误导.

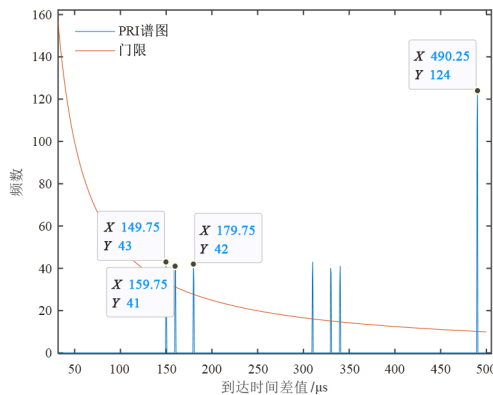
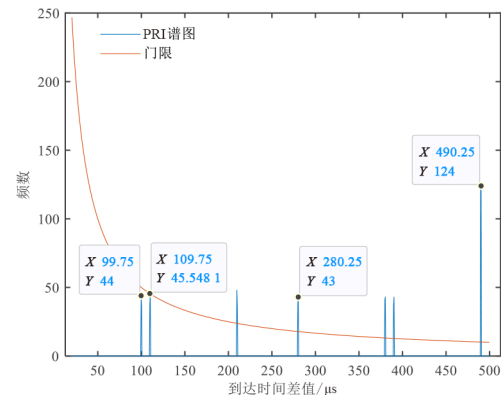
(a) $PM = \{150, 160, 180\} \mu s$ (b) $PM = \{100, 110, 280\} \mu s$

图2 PRI谱图(门限系数为0.1)

2.2.2 基于 FDC-DTOA 提取关注项

为了避免子谐波的干扰和加强提取子周期的性能, 本文以 DTOA 的分布间隔来度量所在位置的分布密度, 进而提出基于 FDC-DTOA 提取关注项的方法.

首先计算 DTOAs, 算法 1 以伪代码的形式介绍了 DTOAs 及其脉冲对的计算过程. 在算法 1 中, 输入 TOAs, 然后通过计算得到分布于统计范围 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 的 DTOAs, 同时记录其脉冲对索引, 所得结果记为 PP.

然后根据 DTOAs 构建 FDC-DTOA, 算法 2 以伪代码的形式介绍了其构建过程. 在算法 2 中, 输入 DTOAs 即 $PP(:, 3)$, 其数量为 M . 使用排序算子 $Sort(\cdot)$ 将 $PP(:, 3)$ 按照数值从小到大排序, 排序后的 DTOAs 记为 DT. 对 DT 作后向差分, $DDT(i) = DT(i) - DT(i+1)$, 结果记为 DDT. 对 DDT 进行平滑处理, 结果记为 SDDT, 输出 $\{(DT(i), SDDT(i)) | i = 1, \dots, M-1\}$.

该方法以 $DT(i)$ 对应的分布间隔负值 $DDT(i)$ 作为其所在位置 DTOA 分布密度的度量. $DT(i)$ 的分布间隔 $DT(i+1) - DT(i)$ 越小, 分布间隔的负值 $DDT(i)$ 值越大, 其所在位置 DTOA 分布密度越大.

如果交错脉冲流中存在某辐射源脉冲串, 其 PRI 数

根据参差序列的特点, 子周期的谱值小于骨架周期的谱值. 然而, 在递减阈值的约束下, 子周期对应的阈值却大于骨架周期. 因此, 基于 PRI 谱图提取关注项时, 子周期相比于骨架周期居于弱势地位.

如图 2(a) 所示, 尽管子周期高于门限, 其与门限的高度差却远小于骨架周期. 如图 2(b) 所示, 当 PRI 数值较小时, 存在子周期直接因低于阈值而无法作为关注项被提取出来.

在直方图方法中, DTOA 频数被用作所在位置 DTOA 分布密度的度量. 然而, 统计频数的方式使大 PRI 和子周期在进行密度度量时居于弱势地位, 最终导致序列检索容易受到子谐波干扰以及提取关注项时容易遗漏子周期.

算法 1 DTOAs 及其脉冲对的计算

输入: TOAs t ;

DTOA 统计范围 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$;

输出: DTOAs 及其脉冲对 PP;

1. 变量初始化

脉冲序列长度为 L , $PP = []$;

2. 计算 DTOAs 并记录脉冲索引

FOR $i = 1:L-1$ DO

FOR $j = i+1:L$ DO

$\tau = t_j - t_i$;

IF $\tau > \tau_{\max}$, BREAK;

ELSEIF $\tau < \tau_{\min}$, CONTINUE;

ELSE $PP = [PP; i, j, \tau]$;

END

END

END

3. 输出 PP

值为 PRI_i , TOA 测量误差服从正态分布且上下限为 $\pm\sigma$, 则 PRI_i 所在位置的密度度量为

$$DDT(PRI_i) > -\frac{2 \cdot \sigma}{T} \cdot PRI_i \quad (4)$$

算法2 DTOA一阶差分曲线的构建

输入: DTOAs $PP(:, 3)$;

输出: DTOA一阶差分曲线 FDC-DTOA

1. 变量初始化

滤波点数 W , DTOAs 数量 M ;

2. 对 DTOAs 排序后作一阶差分

$DT = \text{Sort}(PP(:, 3))$;

$DDT(i) = DT(i) - DT(i+1), i = 1, \dots, M-1$;

3. 用均值滤波器平滑差分结果

$\text{Mean}(DDT) = 1/(M-1) \cdot \sum_{j=1}^{M-1} DDT(j)$;

FOR $i = 1:M-1$ DO

IF $i < (W+1)/2$ OR $i > (M-1) - (W+1)/2 + 1$

SDDT(i) = Mean(DDT);

ELSE SDDT(i) = $1/W \cdot \sum_{j=i-(W-1)/2}^{j=i+(W-1)/2} DDT(j)$;

END

END

4. 输出 $\{(DT(i), SDDT(i)) | i = 1, \dots, M-1\}$

式中, T 为截获时间, T/PRI_i 为截获该辐射源脉冲数量. 为了有效截获该辐射源, T/PRI_i 一般至少为 10 的量级. 从目前的工艺水平来看, TOA 测量误差在几十纳秒左右. 因此, 在有效截获的基础上, 无论 PRI_i 数值大小, $DDT(PRI_i)$ 均近乎为 0.

需要注意, 虚假 DTOAs 随机分布于 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 且数量有限, $[\tau_{\min}, \tau_{\max}] \gg \sigma$. 因此, 关注项以外位置的 DTOA 分布间隔远大于关注项所对应分布间隔. 如果 $DT(i)$ 对应骨架周期、子谐波、子周期或子周期组合, 则 $DT(i)$ 是其所在局部区域的密度中心, 并且 $DDT(i)$ 以峰值水平近乎为 0 的峰值凸显. 因此, 通过对 $DDT(i)$ 进行阈值检

测以提取对应的 $DT(i)$ 作为关注项切实可行.

在骨架周期、子谐波、子周期或子周期组合所对应区域, 脉冲丢失会使某些 DTOAs 对应的分布间隔增大, 虚假 DTOAs 会使某些 DTOAs 对应的分布间隔减小. 在脉冲丢失和干扰脉冲的影响下, 曲线 $\{(DT(i), DDT(i))\}$ 上会出现毛刺. 对此, 本文通过均值滤波对 DDT 进行平滑处理, 滤波点数 $W = \alpha \cdot L$, 滤波结果记为 $SDDT$. 最终, DTOA 一阶差分曲线如下所示:

$$\text{FDC-DTOA} = \{(DT(i), SDDT(i)) | i = 1, 2, \dots, M-1\} \quad (5)$$

根据 FDC-DTOA 的特点, 本文采用常数阈值提取关注项. 一方面, 可以防止出现真实 PRI 的峰值低于阈值而子谐波却高于阈值的情况, 从而有效避免子谐波的干扰. 另一方面, 参差 PRI 的子周期的峰值水平与骨架周期基本一致, 子周期可以伴随着骨架周期同时被提取出来, 方便后续分析参差调制模式.

在提取关注项时, 其阈值如下所示:

$$\text{Th} = \beta \cdot (\text{Max}(SDDT) - \text{Mean}(SDDT)) + \text{Mean}(SDDT) \quad (6)$$

式中, β 为可调参数, $\text{Max}(\cdot)$ 为最大值算子, $\text{Mean}(\cdot)$ 为均值算子.

令 $\text{PM} = \{100, 103, 106\} \mu\text{s}$, 观测时长为 $5 \times 10^4 \mu\text{s}$, TOA 测量误差为 $0.1 \mu\text{s}$, 干扰脉冲比例为 0.3. 不同脉冲丢失条件下的 FDC-DTOA 如图 3 所示.

参差 PRI 的骨架周期及其子周期的峰值基本处于同一水平, 且近似为 0. 在当前常数阈值条件下, 无论脉冲丢失如何变化, 子周期和骨架周期均同时超过阈值, 对脉冲丢失表现出较强的适应性. 同时, 即使子周期之间的间隔为 $3 \mu\text{s}$, 不同子周期的峰值也不会混叠, 所设阈值可以将所有子周期一一检测出来. 根据仿真分析, 相关参数设置为 $\alpha = 0.1, \beta = 0.9$.

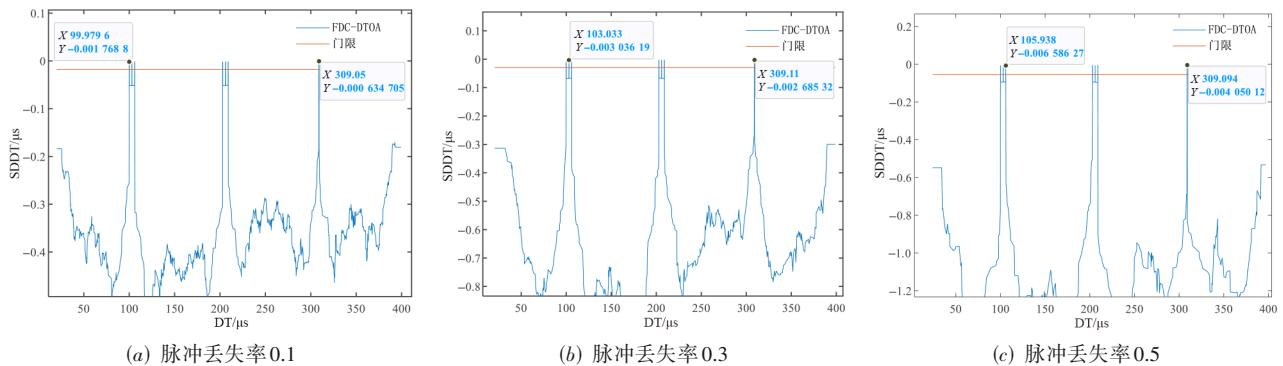


图3 不同脉冲丢失条件下的 FDC-DTOA

3 基于相关分析分选参差信号

如算法 1 所示, 在计算 DTOAs 的同时将每个差值对应的脉冲对记录下来, 从而在获取关注项的同时可以获取其对应的脉冲对集合. 通过分析来自同一辐射

源脉冲序列的脉冲对发现, 相邻脉冲对存在共用脉冲的特性, 即前一个脉冲对的尾脉冲是后一个脉冲对的首脉冲. 本文将脉冲对之间共用脉冲的特性称为相关性. 如图 1 所示, 在参差脉冲序列中, 相关性主要体现

在两个方面,一是骨架周期对应脉冲对内部的相关性;二是各子周期对应脉冲对之间的相关性.

3.1 基于自相关和交叠率实现参差模式识别

关注项集合记为 CI , $CI_i \leq CI_{i+1}$, CI_i 对应的脉冲对集合记为 PP_i , 如下所示:

$$PP_i = \left\{ [h_{i,j}, g_{i,j}] | [h_{i,j}, g_{i,j}, t_{g_{i,j}} - t_{h_{i,j}}] \in PP, |t_{g_{i,j}} - t_{h_{i,j}} - CI_i| < \varepsilon, j = 1, 2, \dots, N_i \right\} \quad (7)$$

式中,一般令 $\varepsilon = 1 \mu s$, $h_{i,j}$ 和 $g_{i,j}$ 分别为隶属于 CI_i 的第 j 脉冲对的头尾脉冲在原始脉冲序列中的索引, N_i 为隶属于 CI_i 的脉冲对数量. 计算某一关注项脉冲对的内部相关性, 所得结果称为自相关. 自相关记为 COR_1 , 如下所示:

$$COR_1(CI_i) = \frac{CI_i}{t_{g_{i,N_i}} - t_{h_{i,1}}} \sum_{u=1}^{N_i} \sum_{v=1}^{N_i} \delta(h_{i,u} - g_{i,v}) \quad (8)$$

在无脉冲丢失的情况下, 固定 PRI 的自相关为 1. 由于参差 PRI 脉冲序列等价于参差阶数个相互交织的固定 PRI 脉冲序列, 所以参差 PRI 的自相关等于其参差阶数. 由于子周期对应的脉冲对内部不存在共用脉冲的情况, 其自相关为 0.

在无脉冲丢失情况下, 通过关注项的自相关可以准确判定其类型. 在有脉冲丢失时, 参差 PRI 骨架周期的自相关不一定大于 1, 固定 PRI 的自相关小于 1. 因此, 当自相关小于 1 时, 仅依靠自相关无法判定其类型. 对此, 本文引入交叠率 (Overlap Rate, OR)^[14] 辅助判别参差 PRI.

$$OR(CI_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} t_{g_{i,j}} - t_{h_{i,j}}}{t_{g_{i,N_i}} - t_{h_{i,1}}} \quad (9)$$

不同脉冲丢失条件下, 固定 PRI 和二参差 PRI 的自相关和交叠率如图 4 所示. 固定 PRI 的自相关和交叠率均小于等于 1. 脉冲丢失较多时, 二参差 PRI 的自相关和交叠率均小于 1. 在当前脉冲丢失范围内, 固定 PRI 和二参差 PRI 的自相关始终大于 0.1.

不同脉冲丢失条件下, 固定 PRI 和二、三、四参差 PRI 的交叠率与自相关的差值如图 5 所示, 固定 PRI 的交叠率与自相关的差值始终小于 0.2, 参差 PRI 的交叠率小于 1 时, 其交叠率与自相关的差值却始终大于 0.2.

因此, 计算关注项的自相关, 自相关小于 0.1, 则判定为非参差 PRI 的骨架周期; 否则, 进一步计算交叠率. 如果交叠率大于 $1 + \beta$, 一般令 $\beta = 0.2$, 则判定为参差 PRI 的骨架周期. 否则, 计算交叠率与自相关的差值, 差值大于 0.2 则判定为参差 PRI 的骨架周期.

骨架周期的判定即可看作参差 PRI 信号的识别, 只有关注项判定为骨架周期, 才认为存在对应的参差 PRI

信号, 并以该骨架周期为基础进行参差模式分析.

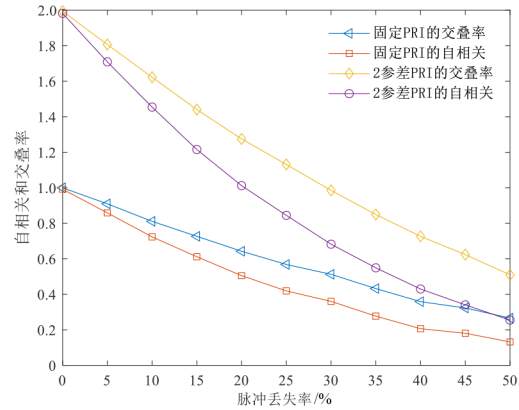


图 4 不同脉冲丢失下的自相关、交叠率

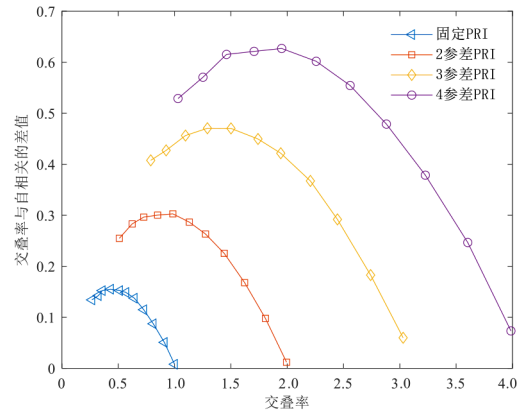


图 5 不同脉冲丢失下的交叠率与自相关的差值

3.2 基于互相关分析参差模式

当确定关注项 CI_e 为某个参差 PRI 的骨架周期后, 计算与该参差 PRI 相关的任意两个关注项之间的相关性, 所得结果称为互相关. 互相关记为 COR_2 , 如下所示:

$$COR_2(CI_i, CI_j, m) = \begin{cases} \frac{CI_e}{t_{g_{e,N_e}} - t_{h_{e,1}}} \cdot \sum_{u=1}^{N_i} \sum_{v=1}^{N_j} \delta(g_{i,u} - h_{j,v}), m = 1 \\ \frac{CI_e}{t_{g_{e,N_e}} - t_{h_{e,1}}} \cdot \sum_{u=1}^{N_i} \sum_{v=1}^{N_j} \delta(h_{i,u} - h_{j,v}), m = 2 \\ \frac{CI_e}{t_{g_{e,N_e}} - t_{h_{e,1}}} \cdot \sum_{u=1}^{N_i} \sum_{v=1}^{N_j} \delta(g_{i,u} - g_{j,v}), m = 3 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $m = 1$ 表示计算 CI_i 的尾脉冲和 CI_j 的首脉冲的共用程度, $m = 2$ 表示计算 CI_i 的首脉冲和 CI_j 的首脉冲的共用程度, $m = 3$ 表示计算 CI_i 的尾脉冲和 CI_j 的尾脉冲的共用程度. 如图 1 所示, 相邻子周期的脉冲对之间存在共用脉冲的情况, 并且符合 $m = 1$ 的情况. 各子周期的脉冲对与其骨架周期的脉冲对之间也存在共用脉冲的情况, 并且同时符合 $m = 2$ 和 $m = 3$ 的情况. 此外, 由

于参差 PRI 的周期性,末尾子周期的脉冲对和起始子周期的脉冲对之间也存在共用脉冲的情况,并且符合 $m=1$ 的情况.

令 $PM=\{145, 150, 160\} \mu s$, 不同脉冲丢失条件下,骨架周期与各子周期和与各子周期组合的互相关

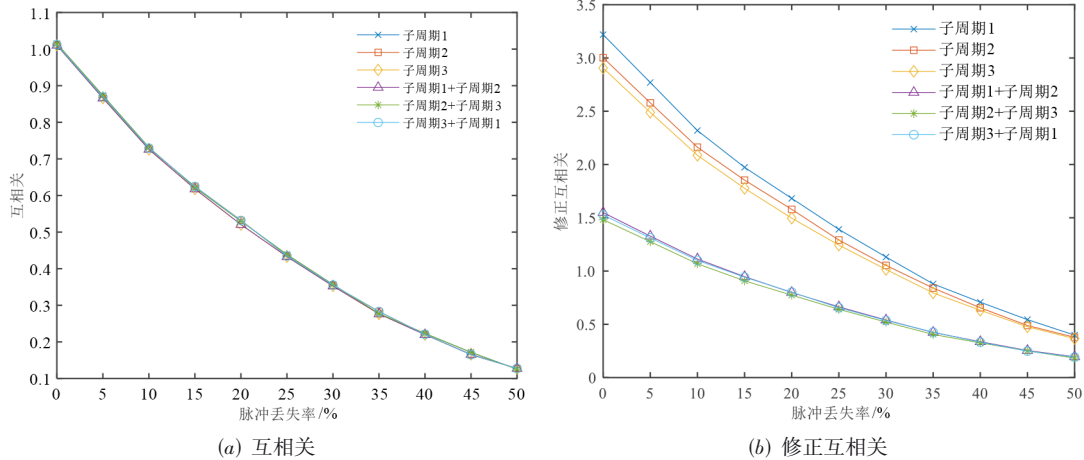


图6 骨架周期与子周期和与子周期组合的互相关和修正互相关

不难发现,骨架周期与各子周期的互相关和与各子周期组合的互相关数值完全一致.此外,各子周期除与其相邻子周期存在互相关外,还存在与子周期组合互相关的情况,并且二者互相关数值完全一致.因此,在依据互相关分析参差模式时,考虑到子周期排定顺序以及关注项中存在子周期组合,有必要对互相关进行修正.确定关注项 CI_e 为骨架周期后, CI_i 和 CI_j 之间的互相关的修正系数为 $\gamma=CI_e/CI_j$.

骨架周期与各子周期和与各子周期组合的修正互相关如图6(b)所示,借助修正系数,子周期数值越小其互相关数值越大.此外,子周期组合的数值大于单个子周期,因此修正互相关可以增强相邻子周期之间的相关性,进而消除子周期组合的干扰.通过修正互相关,数值最小的子周期被确认为该参差模式的起始子周期.各子周期与子周期和与子周期组合的互相关如图7(d)~(f)所示,借助修正系数,子周期与其相邻子周期的互相关大于与子周期组合的互相关.

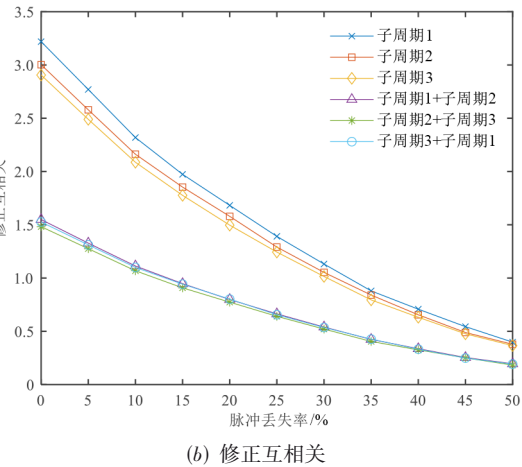
通过修正互相关,子周期的相邻子周期补充到该参差模式.由于参差 PRI 的周期性,末尾子周期和起始子周期之间的互相关可以作为参差模式分析终止的判定条件.

令 $PM=\{pri_1, pri_2, \dots, pri_k\}$, 其中 pri_1 数值最小. $\langle pri_i \rangle$ 表示 pri_i 对应的关注项在关注项集合 CI 中的索引,参差模式分析步骤如下所示:

(1)完成关注项提取后,基于自相关和交叠率识别参差模式,确认 CI_e 为参差 PRI 的骨架周期对应的关注

项,则子周期可能对应的关注项的集合记为 $\overline{CI}=\{CI_1, CI_2, \dots, CI_{e-1}\}$.

如图6(a)所示,各子周期与子周期和与子周期组合的互相关如图7(a)~(c)所示.根据图示结果,在当前脉冲丢失范围内,计算两个关注项的互相关时,应要求互相关数值至少大于0.1方可判定二者相关.



(3)计算 \overline{PM} 中的末尾子周期 CI_i 与其他关注项 CI_j 的互相关 $COR_2(CI_i, CI_j, 1)$, $CI_j \in \overline{CI}$, $CI_j \notin \overline{PM}$. 过滤不相关的关注项后,令 $\gamma=CI_e/CI_j$,对互相关进行修正,将修正互相关最大的关注项添加到 \overline{PM} .

(4)计算 \overline{PM} 中的末尾子周期 CI_i 与起始子周期 $CI_{\langle pri_i \rangle}$ 的互相关 $COR_2(CI_i, CI_{\langle pri_i \rangle}, 1)$, 如果大于阈值0.1,则说明完整的参差模式已解析完成,否则返回步骤(3).

(5)输出参差模式分析结果,即 $\overline{PM}=\{CI_{\langle pri_i \rangle}, CI_{\langle pri_2 \rangle}, \dots, CI_{\langle pri_k \rangle}\}$.

3.3 序列检索

经过参差模式分析,得到各子周期的数值及排定顺序,即 $\{pri_1, pri_2, \dots, pri_k\}$. 结合参差分析结果,本文采用直接序列检索方法提取参差序列,其序列检索示意图如图8所示.

首先,通过获取高价值脉冲片段确认检索起点.要求高价值脉冲片段长度为 m ,其段内脉冲索引集记为

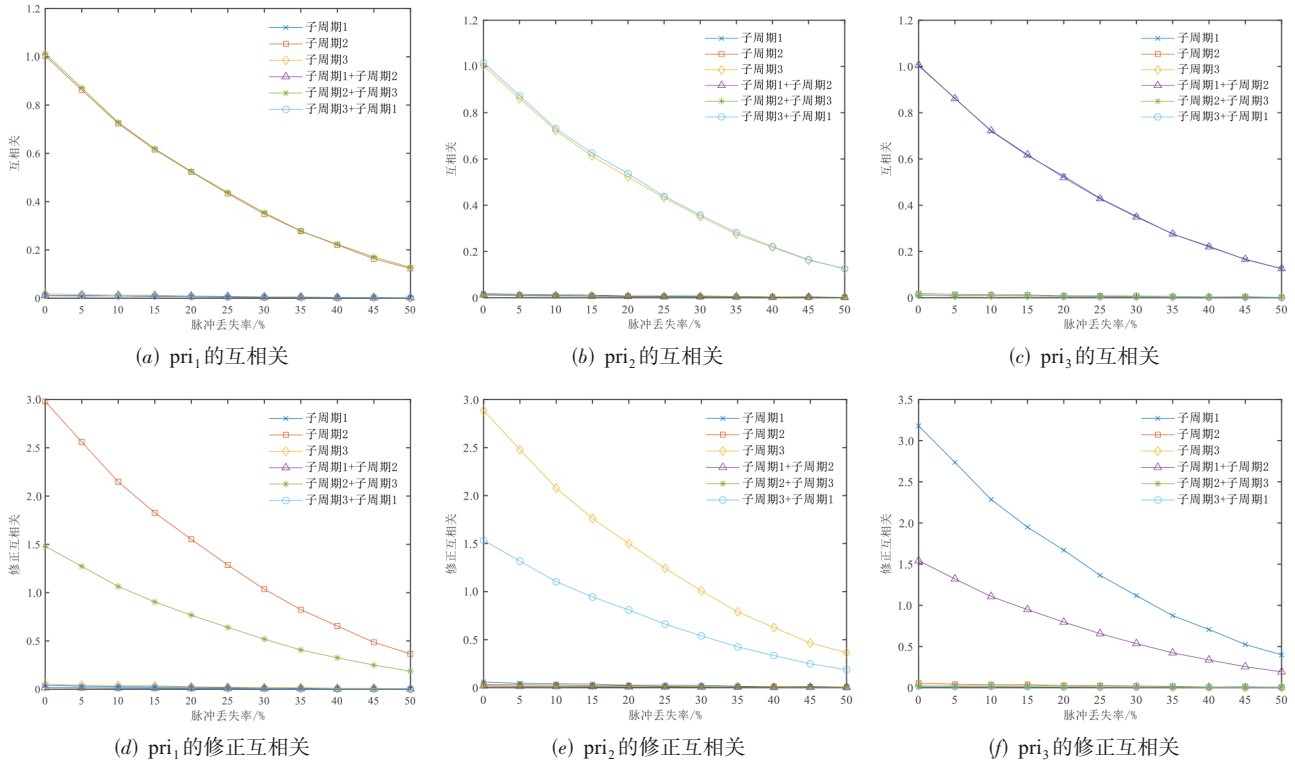


图 7 各子周期与子周期和与子周期组合的互相关和修正互相关

idx,段内脉冲规则如下:

$$t_{\text{idx}(i+1)} - t_{\text{idx}(i)} = \text{pri}_{\text{mod}(i-1, k)+1}, i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (11)$$

按上述规则获取高价值脉冲片段后,将其添加到当前已检索脉冲 I . 然后以其两端脉冲 $I(1)$ 和 $I(\text{end})$ 为检索起点分别向前检索和向后检索.

定义检索起点状态变量 $S, S=i$ 表示该脉冲在参差序列中与后一脉脉冲的间隔为 pri_i . 检索视距为 n , 检索半径为 r, S^f 和 S^b 分别表示前向和后向检索的状态.

前向检索规则如下:

$$\exists \delta \in \Omega^f, \exists i \in [1, I(1) - 1], |t_{I(1)} - t_i - \delta| < r \quad (12)$$

式中, $\Omega^f = \bigcup_{u=1}^n \sum_{v=1}^u \text{pri}_{\text{mod}(S^f-v-1, k)+1}$, 表示前向检索视

野集.

后向检索规则如下:

$$\exists \delta \in \Omega^b, \exists i \in [I(\text{end}) + 1, L], |t_i - t_{I(\text{end})} - \delta| < r \quad (13)$$

式中, $\Omega^b = \bigcup_{u=1}^n \sum_{v=1}^u \text{pri}_{\text{mod}(S^b+v-2, k)+1}$, 表示后向检索视野集.

由近及远逐一观察检索视野集中的视野,一旦发现脉冲,将其补充到 I 并作为新的检索起点,同时更新状态变量.

在视野 $\Omega^f(i)$ 和 $\Omega^b(j)$ 发现脉冲时,前、后向检索的状态分别更新为 $\text{mod}(S^f-i-1, k)+1$ 和 $\text{mod}(S^b+j-1, k)+1$. 当遍历检索视野集均未发现脉冲时,序列检索过程终止.

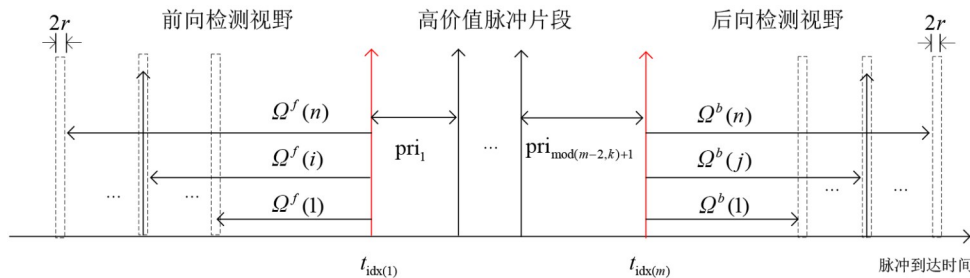


图 8 序列检索示意图

结合上述研究分析,联合FDC-DTOA和相关分析的参差信号分选方法处理流程如图9所示. 需要注意,为简化处理流程,本文方法在设计上只处理被判定为骨架

周期的关注项. 然而,当关注项自相关大于0.1,尽管不被判定为骨架周期,却可能是被误判的骨架周期或者固定PRI. 一般情况下,对其处理参照固定PRI即可.

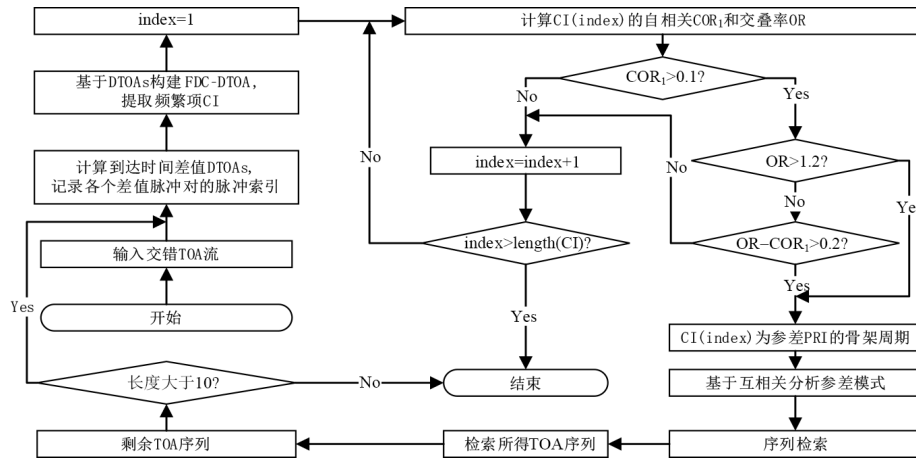


图9 本文处理流程图

3.4 算法复杂度分析

交错脉冲串中存在一个长度为 L 的参差脉冲序列, 其子周期数量为 k , 计算所得 DTOAs 数量为 M , 本文方法计算复杂度的分析结果如表 1 所示.

表 1 算法计算复杂度

算法步骤		计算复杂度	
计算 DTOAs		$O(M)$	
关注项提取	构建差分曲线	排序	$O(M \log_2 M)$
		一阶差分	$O(M)$
		均值滤波	$O(WM)$
	过门限检测	确定门限	$O(M)$
提取关注项		$O(M)$	
关注项识别	提取脉冲对	$O(k^2 M)$	
	计算自相关	$O(k^2 M)$	
	计算交叠率	$O(M)$	
参差模式分析	确定起始子周期	$O(k^2 M)$	
	解析完整模式	$O(k^3 M)$	
序列检索		$O(nL)$	

计算 DTOAs 的计算复杂度近似为 $O(M)$. 构建 DTOA 一阶差分曲线需要排序、一阶差分和均值滤波运算. 采用快速排序方法, 排序的计算复杂度为 $O(M \log_2 M)$; 一阶差分的计算复杂度为 $O(M)$; 采用直接计算线性卷积的方法, 均值滤波的计算复杂度为 $O(WM)$, W 为滤波器长度. 过门限检测时, 确定门限需要进行最值和均值运算, 其计算复杂度为 $O(M)$. 根据门限提取关注项时, 其计算复杂度为 $O(M)$.

对关注项是否为骨架周期进行判定. 采用顺序查找法获取关注项的脉冲对集合, 其计算复杂度等于 $O(k^2 M)$. 计算自相关的计算复杂度为 $O(k^2 M)$. 采用迭

代求和方法计算交叠率, 其计算复杂度近似为 $O(M)$.

基于骨架周期进行参差模式分析. 计算骨架周期与子周期和与子周期组合的互相关以确定起始子周期, 其计算复杂度等于 $O(k^2 M)$. 计算已重构参差模式末尾子周期与其他子周期和与子周期组合的互相关直至满足结束条件, 计算复杂度等于 $O(k^3 M)$.

结合参差分析结果, 采用直接序列检索提取参差序列, 检索视距为 n , 其计算复杂度近似为 $O(nL)$.

文献[14]在提取关注项时采用 K -means 聚类, 其计算复杂度简化为 $O(abk^2 M)$, a 为分类簇的数量, b 为迭代次数. 序列检索时, 其计算复杂度为 $O(k^2 L)$. 与之相比, 本文方法识别关注项需要计算自相关. 一般情况下, $L \ll M, abk^2 > k^2 + W + \log_2 M$, 因此本文方法的计算复杂度实际上低于该文献.

文献[15]采用 CMM 方法去提取 TOA 序列的周期成分, 生成 0-1 序列的量化尺度一般为 $1 \mu s$, 即使采用 2 范数且仅考虑匹配度的计算, 其计算复杂度为 $O(T \sum_{q=\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \Omega(q))$, q 为整数, $\Omega(\cdot)$ 为欧拉函数. 显然, 文献[15]的计算复杂度远远大于本文方法.

4 性能分析

对 PRI 分选系统而言, 影响其性能的因素包括 TOA 测量误差、脉冲丢失、干扰脉冲等. 就目前的 ESM (Electronic Support Measure) 系统来看, TOA 测量误差在几十纳秒左右, 其影响可以忽略不计. 在当前密集电磁环境背景下, 脉冲时域交叠愈发严重, ESM 系统很难截获到不存在脉冲丢失的脉冲序列. 同时, 在对交错脉冲流进行去交错处理时, 不同辐射源的脉冲串之间存在互扰作用, 即互为对方的干扰脉冲. 此外, 对参差信号进行

分选时,其子周期数量和子周期分布情况也是影响分选性能的重要因素。

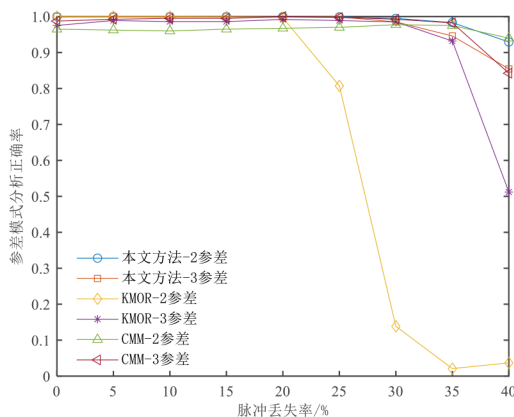
在设置仿真场景时,观测时长为 $5 \times 10^4 \mu\text{s}$, $[\tau_{\min}, \tau_{\max}] = [20, 1000] \mu\text{s}$, TOA 测量误差为 $0.1 \mu\text{s}$. 考虑到参差雷达的 PRI 是几百到几千微秒量级,参差 PRI 脉冲串的子周期数值从 $100 \sim 100 \times (1 + \lambda \cdot \Delta) \mu\text{s}$ 范围内随机选取, λ 是子周期个数, Δ 是子周期间隔比例,反映子周期分布的均匀程度. 同时,本实验要求不同子周期的差值不能低于 $3 \mu\text{s}$ (与 ε 适应). 脉冲丢失通过对原始脉冲序列随机丢失脉冲实现. 干扰脉冲通过对真实脉冲序列随机地插入脉冲实现.

为测试算法性能,本文采用以下性能指标:

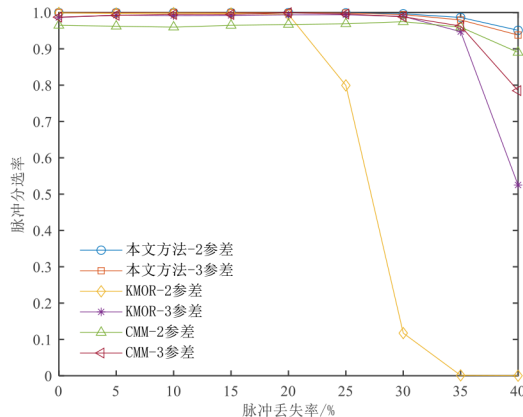
(1) 脉冲分选率:在单次蒙特卡洛仿真实验中,参差脉冲数量为 ϕ ,分选所得参差脉冲数量为 φ ,脉冲分选率为

$$P_1 = \varphi / \phi \quad (14)$$

实验中,子谐波的脉冲不计入 φ ,脉冲分选率的最终结果为多次蒙特卡洛实验的均值.



(a) 参差模式分析正确率



(b) 脉冲分选率

图 10 不同脉冲丢失率下的仿真结果

根据仿真结果,处理二参差 PRI 和三参差 PRI 时,相比于 KMOR,本文方法和 CMM 对脉冲丢失表现出更好的适应性.

当脉冲丢失率大于 20% 时, KMOR 对二参差 PRI 的参差模式分析正确率和脉冲分选率显著下降,当脉冲丢失率大于 35% 时, KMOR 对三参差 PRI 的参差模式分析正确率和脉冲分选率显著下降.

究其原因,处理低阶参差 PRI 时,随着脉冲丢失变多,交叠率逐渐不符合阈值条件,仅依靠交叠率识别参差模式存在缺陷. 本文方法综合交叠率和自相关识别参差模式,充分考虑了脉冲丢失条件下低阶参差 PRI 的识别问题,因此可以较好地适应于不同的参差阶数.

(2) 参差模式分析正确率:在单次蒙特卡洛仿真实验中,分选所得脉冲串数量为 ψ ,其中参差模式分析正确脉冲串数量为 ζ ,参差模式分析正确率为

$$P_2 = \zeta / \psi \quad (15)$$

参差模式分析正确指的是脉冲分选正确、参差模式识别正确、参差调制子周期估计正确和参差调制子周期排序正确,其最终结果为多次蒙特卡洛实验的均值.

为验证所提方法对参差信号分选和调制模式分析的性能,下面考察脉冲丢失、子周期分布均匀程度和干扰脉冲对算法性能的影响. 对比方法为 KMOR^[14] 和 CMM^[15],其中 KMOR 的交叠率阈值与本文方法一致. 由于 CMM 并不具备排定子周期顺序的能力,其子周期顺序作为已知信息直接给出. 每组实验 1000 次蒙特卡洛仿真.

4.1 不同脉冲丢失率下的分选性能分析

在本实验中,子周期间隔比例 $\Delta = 0.2$,干扰脉冲比例为 20%,不同脉冲丢失率下的仿真结果如图 10 所示.

4.2 不同子周期间隔比例下的分选性能分析

在本实验中,子周期个数 $\lambda = 3$,干扰脉冲比例为 20%,脉冲丢失率为 10%,不同子周期间隔比例下仿真结果如图 11 所示.

根据仿真结果,在不同子周期间隔比例条件下,本文方法和 CMM 的性能在稳健性上显著优于 KMOR. 当子周期间隔比例递减, KMOR 的性能有明显的下降. 本文方法则完全不受子周期间隔比例变化的影响,无论是参差模式分析正确率,还是脉冲分选率均具有很好的稳健性. 究其原因,在当前子周期间隔变化范围,本文方法始终能精确提取参差 PRI 的骨架周期及子周期,并且关注项的脉冲对匹配不会受到影响. KMOR 采用数值聚类来提取关注项,而聚类方法具有一定的随机

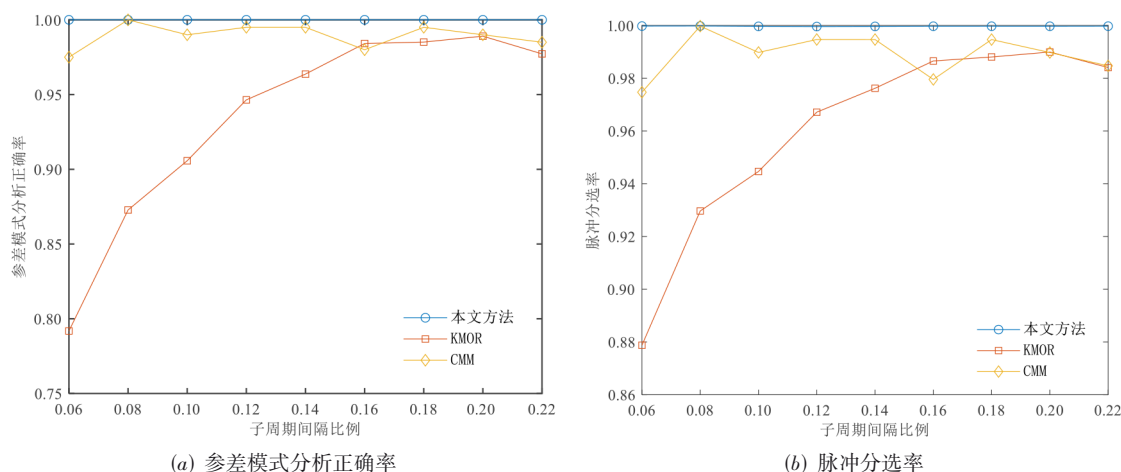


图 11 不同子周期间隔比例下的仿真结果

性,容易将数值接近的关注项聚成一类,无论是参差模式识别过程,还是参差模式分析过程都极易受到影响。

4.3 不同干扰脉冲比例下的分选性能分析

在本实验中,子周期个数 $\lambda=3$,脉冲丢失率为10%,子周期间隔比例 $\Delta=0.2$,不同干扰脉冲比例下的仿真结果如表2所示。

表 2 不同干扰脉冲比例下的仿真结果

干扰脉冲比例	参差模式分析正确率			脉冲分选率		
	Ours	KMOR	CMM	Ours	KMOR	CMM
0.2	1.000	0.994	0.995	1.000	0.996	0.995
0.3	1.000	0.962	0.995	1.000	0.969	1.000
0.4	1.000	0.927	1.000	0.999	0.923	0.999
0.5	0.998	0.687	0.885	0.997	0.796	0.884

4.4 不同方法分选时间对比

在本实验中,子周期个数 $\lambda=3$,干扰脉冲比例为20%,脉冲丢失率为10%,子周期间隔比例 $\Delta=0.2$ 。实验环境为 Windows10+Matlab R2020b+Intel (R) Xeon (R) Gold 6230 CPU @ 2.10 GHz,不同观测时长下的仿真结果如表3所示。

表 3 不同方法的 CPU 时间 单位:s

观测时长/ $10^4 \mu\text{s}$	Ours	KMOR	CMM
1	0.009 0	0.024 4	6.506 8
2	0.009 2	0.026 5	12.554 5
3	0.012 6	0.032 4	18.561 5

该结果与第3.4节中的分析一致,本文方法的分选时间略低于KMOR,并且远远低于CMM的分选时间。该结果表明,本文方法除分选性能优异以外,在时间效率上也更有优势。

随着干扰脉冲增加,KMOR的性能逐渐降低,CMM的性能在干扰脉冲比例为0.5时有明显降低,本文方法的性能则对干扰脉冲变化不敏感。

究其原因,本文方法所采用的FDC-DTOA对干扰脉冲不敏感。KMOR和CMM均通过计算TOA序列的一阶差分来提取序列中的子周期,该过程容易受到干扰脉冲的影响并导致提取子周期失败。

5 结论

针对脉间参差调制雷达信号的分选问题,本文提出联合DTOA一阶差分曲线和相关分析的分选方法。该方法基于FDC-DTOA提取关注项,基于关注项的自相关和交叠率识别参差调制模式,基于关注项的互相关分析参差调制模式,基于参差分析结果实现参差信号的序列检索。仿真结果表明,所提方法可以有效分选参差信号并解析其完整的调制模式,对脉冲丢失和干扰脉冲表现出较强的适应性。相比于对比算法,所提方法在性能上有显著提升,适用于不同的参差阶数,对子周期分布均匀程度具有较强的稳健性,时间效率较高,具有较好的实际应用价值。

参考文献

- [1] AMINI A, SABOOHI H, HERAWAN T, et al. MuDistream: A multi density clustering algorithm for evolving

- data stream[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 59: 370-385.
- [2] LANG P, FU X J, CUI Z D, et al. Subspace decomposition based adaptive density peak clustering for radar signals sorting[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2022, 29: 424-428.
- [3] JIANG W, FU X J, CHANG J Y. Improved de-interleaving algorithm of radar pulses based on dual fuzzy vigilance ART[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(2): 303-311.
- [4] MILOJEVIC D J, POPOVIC B M. Improved algorithm for deinterleaving of radar pulses[J]. IEE Proceedings F Radar and Signal Processing, 1992, 139(1): 98-104.
- [5] MARDIA H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. IEE Proceedings F Radar and Signal Processing, 1989, 136(4): 149-154.
- [6] BAGHERI M, SEDAAGHI M H. A new method for detecting jittered PRI in histogram-based methods[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2018, 26(3): 1214-1224.
- [7] NISHIGUCHI K, KOBAYASHI M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals[J]. IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 407-421.
- [8] LIU Y C, ZHANG Q Y. Improved method for deinterleaving radar signals and estimating PRI values[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2018, 12(5): 506-514.
- [9] KANG K, ZHANG Y X, GUO W P, et al. Key radar signal sorting and recognition method based on clustering combined with PRI transform algorithm[J]. Journal of Artificial Intelligence and Technology, 2022, 2(2): 62-68.
- [10] 刘严, 郭福成. 基于滑动时间窗的雷达脉冲列分选方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(11): 3900-3909.
LIU Y, GUO F C. Deinterleaving radar pulse trains with sliding time windows[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(11): 3900-3909. (in Chinese)
- [11] LIU Z M, KANG S Q, CHAI X M. Automatic pulse repetition pattern reconstruction of conventional radars[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2021, 15(5): 500-509.
- [12] 康仕乾, 刘章孟. 常规体制雷达交错脉冲列中的重频模式自动解析[J]. 信号处理, 2021, 37(11): 2069-2076.
KANG S Q, LIU Z M. Automatic reconstruction of regular radar pulse repetition patterns based on interleaved pulse train[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(11): 2069-2076. (in Chinese)
- [13] 王俊岭, 黄琰璟. 基于序列关联的参差信号分选算法

[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(4): 1145-1153.

WANG J L, HUANG Y J. Stagger pulse repetition interval pulse train deinterleaving algorithm based on sequence association[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2021, 43(4): 1145-1153. (in Chinese)

- [14] 柳征, 高超, 李悦. 基于数据关联处理的重频参差雷达信号分选方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(5): 1130-1135.

LIU Z, GAO C, LI Y. Signal sorting algorithm for stagger pulse repetition interval radar based on data association processing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(5): 1130-1135. (in Chinese)

- [15] TAO J W, YANG C Z, XU C W. Estimation of PRI stagger in case of missing observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(11): 7982-8001.

作者简介



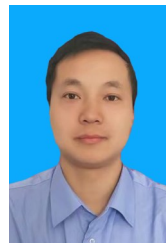
谢 敏 男, 1998 年生, 江西吉安人. 硕士研究生. 主要研究方向为电子信号分析与处理.
E-mail: xm980426@163.com



赵 闯(通讯作者) 男, 1978 年生, 河北辛集人. 博士, 副教授. 主要研究方向为电子对抗、雷达信号处理、辐射源特征提取与识别、阵列信号处理等.
E-mail: rushzhao@163.com



胡德秀 男, 1983 年生, 甘肃武威人. 博士, 副教授. 主要研究方向为雷达信号处理、无源定位、电子对抗等.
E-mail: paper_hdx@126.com



刘成城 男, 1986 年生, 江苏盐城人. 博士, 副教授. 主要研究方向为无人智能作战、无源定位、电子对抗等. 中国电子学会会员编号: E190068968M.
E-mail: luckylcc079@126.com