

## 对抗反侦察欺骗干扰的雷达信号分选方法

谢敏<sup>①</sup> 黄洁<sup>\*①</sup> 赵闯<sup>①</sup> 胡德秀<sup>①</sup> 朱健东<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(中国人民解放军网络空间部队信息工程大学数据与目标工程学院 郑州 450001)

<sup>②</sup>(河南省高速铁路运营维护工程研究中心 郑州 451460)

**摘要:** 经典的直方图方法易受反侦察参数的欺骗干扰。针对此问题, 该文提出一种对抗反侦察欺骗干扰的分选方法。通过理论推导建立兼容0~50%脉冲丢失率的骨架周期检测机制; 进而联合自相关与交叠率实现骨架周期的精准识别, 有效区分伪装成固定脉冲重复间隔(PRI)的干扰项, 避免分选被误导; 同时引入相干鉴别机制以有效应对参数相似场景, 并且实现同一框架内兼容固定、参差、渐变及正弦4种PRI调制。实验表明, 面对反侦察参数, 直方图方法性能骤降, 最大降至0, 而所提方法性能最低为96.5%; 同时, 参数相似场景下该方法性能最低为95.31%。该方法无论反侦察参数存在与否, 均可有效应对4种调制, 显著提升了复杂电磁环境下的分选可靠性, 对电子战系统的发展具有重要意义。

**关键词:** 雷达信号分选; 反侦察欺骗干扰; 脉冲重复间隔; 骨架周期; 相干鉴别

**中图分类号:** TN957.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2026)x-0001-15

**DOI:** 10.12000/JR25170

**CSTR:** 32380.14.J25170

**引用格式:** 谢敏, 黄洁, 赵闯, 等. 对抗反侦察欺骗干扰的雷达信号分选方法[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR25170.

**Reference format:** XIE Min, HUANG Jie, ZHAO Chuang, et al. Radar signal deinterleaving method against counterreconnaissance deception jamming[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR25170.

## Radar Signal Deinterleaving Method Against Counterreconnaissance Deception Jamming

XIE Min<sup>①</sup> HUANG Jie<sup>\*①</sup> ZHAO Chuang<sup>①</sup> HU Dexiu<sup>①</sup> ZHU Jiandong<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Data and Target Engineering, PLA Cyberspace Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

<sup>②</sup>(Henan High-speed Railway Operation and Maintenance Engineering Research Center, Zhengzhou 451460, China)

**Abstract:** Radar signal deinterleaving is a critical technology in electronic intelligence and electronic support measures systems. The classical histogram-based method, although valued for its simplicity, is susceptible to deceptive jamming under counter-reconnaissance parameter design. This study proposes a deinterleaving method that is resistant to such deception. The main contributions are as follows: a frame period detection mechanism compatible with pulse missing rates from 0% to 50% is established through theoretical derivation; by integrating autocorrelation and the overlap rate, accurate frame period identification is achieved, which effectively distinguishes interference disguised as fixed Pulse Repetition Intervals (PRI) and prevents interference with the deinterleaving process; moreover, a coherent discrimination mechanism is introduced to

收稿日期: 2025-09-08; 改回日期: 2026-03-04; 网络出版: 2026-04-14

\*通信作者: 黄洁 [hj\\_xdmb@163.com](mailto:hj_xdmb@163.com) \*Corresponding Author: HUANG Jie, [hj\\_xdmb@163.com](mailto:hj_xdmb@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金(62071490), 河南省科技攻关项目(242102211108)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62071490), Henan Province Science and Technology Key Project (242102211108)

责任编辑: 周峰 Corresponding Editor: ZHOU Feng

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

handle scenarios with similar parameters and to accommodate fixed, staggered, sliding, and wobulated PRI modulation—within a unified framework. Experimental results show that the performance of histogram-based methods degrades severely in the presence of counterreconnaissance parameters, with maximum performance dropping to 0, while the proposed method maintains a minimum performance of 96.5%. Meanwhile, the proposed method reaches a minimum performance of 95.31% in parameter-similar scenarios. The proposed method remains effective against the four modulation types, whether counterreconnaissance parameters are present or not. It demonstrates antideception capability against counterreconnaissance design, strong generalization across modulation types, and reliable performance in parameter-similar scenarios, thereby greatly improving the deinterleaving reliability in complex electromagnetic environments and offering important implications for the development of electronic warfare systems.

**Key words:** Radar signal deinterleaving; Counterreconnaissance deception jamming; Pulse Repetition Interval (PRI); Frame period; Coherent discrimination

## 1 引言

电子情报(Electronic Intelligence, ELINT)系统分析辐射源特征,电子支援措施(Electronic Support Measures, ESM)系统提供实时威胁感知,电子对抗(Electronic Countermeasures, ECM)系统执行主动干扰,三者形成完整电子战链条<sup>[1]</sup>。雷达信号分选作为ELINT/ESM关键技术,旨在从交错脉冲流中分离不同辐射源信号。多参数联合分选依赖射频、到达方向、脉冲宽度等参数聚类<sup>[2,3]</sup>,但在雷达参数相似或参数捷变场景下失效<sup>[4]</sup>。脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI)分选,一般称为重频分选,利用到达时间(Time of Arrival, TOA)中的PRI调制信息突破此限制,常用作主分选手段<sup>[5]</sup>。

雷达系统兼具ECM干扰对象与电子反对抗(Electronic Counter-Countermeasures, ECCM)防护主体的双重属性。出于反侦察需要,针对先验未知场景下的重频分选,现有ECCM手段集中于两方面。一是通过加入PRI抖动或干扰脉冲来遮盖或破坏TOA序列的时序规则,使PRI调制信息难以提取。刘光霞等人<sup>[6]</sup>通过拼接真实脉冲与干扰脉冲破坏原有时序规则。关于侦察方的应对,累积差值直方图(Cumulant Difference Histogram, CDIF)<sup>[7]</sup>,序列差值直方图(Sequential Difference Histogram, SDIF)<sup>[8,9]</sup>,PRI变换法<sup>[10]</sup>难以应对PRI抖动。对此,改进SDIF<sup>[11,12]</sup>和修正PRI变换法<sup>[13,14]</sup>采用交叠PRI箱统计频数,Ge等人<sup>[15]</sup>对直方图进行均值滤波,Xie等人<sup>[16]</sup>设计TOA差值(Difference of TOA, DTOA)的一阶差分曲线替代直方图。二是采用复杂PRI调制,参差、滑变、组变、正弦调制等复杂规则可以增加信息挖掘难度。贾金伟等人<sup>[17]</sup>提出滑变调制可以对抗SDIF分选,甚至基于混沌序列来实现PRI调制<sup>[18]</sup>。关于侦察方的应对,针对参差PRI,相关匹配法<sup>[14,19]</sup>通过子空间分解解析骨架周

期与子周期,刘章孟和康仕乾等人<sup>[20,21]</sup>提出频繁项扩展算法,谢敏等人<sup>[22]</sup>结合DTOA一阶差分曲线与相关分析;针对滑变PRI,Zhang等人<sup>[23]</sup>首先获取中心值与波动范围,再经脉冲序列提取实现粗分选,最后通过完整调制解析实现精分选;针对组变序列,张春杰等人<sup>[24]</sup>和Xie等人<sup>[25]</sup>先提取组变子序列,再经组变鉴别合并重构完整序列。上述ECCM手段属压制干扰范畴,现有研究在应对上已取得一定成效。

在欺骗干扰层面,贾金伟等人<sup>[26]</sup>和张保群<sup>[27]</sup>指出针对直方图方法可通过在PRI调制中设计反侦察参数实现ECCM,最终达成欺骗效果。直方图方法因其计算简单,实现容易,至今仍被广泛应用。但是,面向反侦察参数所导致的欺骗干扰的防御机制尚未见报道,这一漏洞在实战中可能导致严重误判。

本文通过系统分析直方图方法及反侦察参数设计的机理,提出了一种对抗反侦察欺骗干扰的雷达信号分选方法。具体而言,通过推导DTOA频数与脉冲丢失率的理论关系,建立在0~50%丢失率范围内有效检测骨架周期的抗丢失机制;已有研究<sup>[22]</sup>表明,自相关与交叠率可以度量骨架周期与固定PRI的阶数差异,因此本文联合两个特征对检测结果进行骨架周期识别。不同于文献<sup>[22]</sup>设置经验值的方式,本文通过理论推导联合计算机仿真来明确骨架周期识别的阈值设置。通过约束脉冲序列提取仅处理识别为骨架周期的检测结果,使伪装成固定PRI的干扰项无法误导分选流程,从而实现抗欺骗干扰。此外,引入相干鉴别以应对参数相似场景,同时在侦察和对抗反侦察层面兼顾固定、参差、滑变及正弦4种调制。实验结果表明,所提方法既可以有效对抗反侦察参数的欺骗干扰,也可以有效应对参数相似场景,并且具有跨PRI调制的泛化能力,在提升复杂电磁环境下的分选可靠性方面具有广阔的应用前景。

## 2 直方图方法以及PRI调制中的反侦察参数

### 2.1 雷达信号分选问题的数学模型

PRI分选仅以TOA作为特征参数，其分选对象是交错TOA序列，其任务是来自不同辐射源的TOA序列从交错TOA序列中分离。

#### (1) 脉冲重复间隔(PRI)

PRI是相邻两次发射脉冲行为之间的时间间隔，PRI序列记作  $p\_seq = \{p_1, p_2, \dots\}$ 。理想情况下，侦察方所截获单个辐射源的脉冲序列表示为

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_L | t_{i+1} - t_i = p_i\} \quad (1)$$

其中， $t_i$ 表示脉冲的TOA参数， $L$ 表示发射脉冲总数。

根据雷达正向设计， $p\_seq$ 通常呈现周期性变化，即  $\exists n \in \mathbb{Z}^+, \forall i \in \mathbb{Z}, j \in \mathbb{Z}, p_i = p_{i+j \cdot n}$ ，周期性变化的最小周期记作  $N$ 。 $p\_seq$ 的周期性模式可以表征完整的PRI调制信息，记作：

$$p\_law = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \quad (2)$$

依据  $p\_law$  的不同，如表1所示，目前主要有5种典型的PRI调制类型，分别是固定、参差、滑变、组变和正弦调制。为便于表述，采用固定调制时，雷达辐射源称为固定辐射源，雷达脉冲流称为固定信号， $p\_law$ 称为固定PRI，符合固定PRI的TOA序列称为固定序列，其他调制以此类推。由于硬件因素的固有影响，PRI调制实际上叠加了一定的抖动成分，表示为  $t_{i+1} - t_i = p_i(1 + \rho_i)$ ， $\rho_i \in [-\rho, \rho]$ 。 $\rho$ 称为PRI抖动率，不含人为有意设计条件下通常  $\rho < 0.01$ ，本文设置  $\rho = 0.002$ 。

#### (2) 骨架周期和子周期

对于  $p\_law = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ ， $p_1, p_2, \dots, p_N$ 称为子周期， $\sum_{i=1}^N p_i$ 称为骨架周期， $N$ 称为阶数，对应TOA序列称为  $N$ 阶序列。 $N=1$ 时，骨架周期退化为固定PRI， $N$ 阶序列退化为固定序列。固定PRI与骨架周期最直接的区别体现在阶数，反映到物理意义上就是骨架周期对应  $N$ 条相互交错的固定序列，然而固定PRI仅对应一条独立的固定序列。

#### (3) 交错TOA序列

实际上，所截获脉冲序列存在脉冲丢失，丢失

脉冲集合表示为  $T_m \subset T$ 。相应地，侦察方实际截获的单个辐射源的脉冲序列表示为

$$\bar{T} = \{t_i | t_i \notin T_m \& t_i \in T\} \quad (3)$$

丢失脉冲数量记为  $L_m$ ，脉冲丢失率表示为  $\varepsilon = L_m/L$ ，每个脉冲以独立且相同的概率被保留(或丢失)，即符合伯努利丢失。

侦察方所截获脉冲既包含各个辐射源的脉冲也包含杂散脉冲，构成一个交错TOA序列，如下所示：

$$\begin{aligned} \hat{T} &= T_s \cup \bigcup_{j=1}^C \bar{T}_j \\ &= \left\{ \hat{t}_i | \hat{t}_i \in \bigcup_{j=1}^C \bar{T}_j \text{ or } \hat{t}_i \in T_s, \hat{t}_i \leq \hat{t}_{i+1}, \right. \\ &\quad \left. i = 1, 2, \dots, M \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $\hat{t}_i$ 表示交错脉冲流中各脉冲的TOA参数， $M$ 表示交错TOA序列的长度， $\bar{T}_j$ 表示第  $j$ 个辐射源(记作  $RS_j$ )的实际脉冲序列， $C$ 表示辐射源总数， $T_s$ 表示杂散脉冲集合。

### 2.2 直方图方法

仅考虑固定信号分选时，直方图方法由PRI分析和脉冲序列提取两部分构成；兼顾参差、滑变及正弦信号分选时，直方图方法由PRI分析、脉冲序列提取、参差鉴别3部分构成。如图1所示，PRI分析目的是提供交错TOA序列内嵌的固定PRI/骨架周期的候选项，脉冲序列提取则根据候选项尝试从交错TOA序列中提取对应的固定序列；脉冲序列提取结果中存在多个固定序列时通过参差鉴别理清具体情况，参差鉴别得名于首先应用于参差信号分选。鉴于参差鉴别在理清序列提取结果中辐射源的情况上存在缺陷，难以应对参数相似场景，本文用更稳健的相干鉴别替换参差鉴别。

#### (1) PRI分析

直方图方法通过对TOA差值(Difference of TOA, DTOA)统计分析来发现固定PRI/骨架周期，以DTOAs的频繁项作为固定PRI/骨架周期的候选项。PRI分析过程由直方图构建和门限检测两部分组成。

定义同源的两个脉冲计算得到的DTOA为积极样本，异源的两个脉冲计算得到的DTOA为消极样本。对于  $RS_j$ ，其PRI调制信息记为  $p\_law_j = \{p_1^j, p_2^j, \dots, p_{N_j}^j\}$ 。如图2所示，受  $p\_law_j$  的约束，由  $RS_j$  产生的积极样本的数值取自如下所示的特定值集合：

$$\left\{ \sum_{i=u}^{u+v} p_i^j | u = 1, 2, \dots, N_j, v = 0, 1, \dots \right\} \quad (5)$$

表 1 PRI调制类型

Tab. 1 PRI modulation types

类型	$p\_law$
固定	$\{p_i = K\}, N = 1$
参差	$\{p_i = k_i   i = 1, 2, \dots, N\}$
滑变	$\{p_i = K_1 + (i-1)\Delta K   i = 1, 2, \dots, N\}$
正弦	$\{p_i = K_0 + K_a \cdot \sin(2\pi(i-1)/N + \phi)   i = 1, 2, \dots, N\}$
组变	$\{p_i   i = 1, 2, \dots, N\} = \{n_1 \uparrow s_1, n_2 \uparrow s_2, \dots, n_m \uparrow s_m\}$

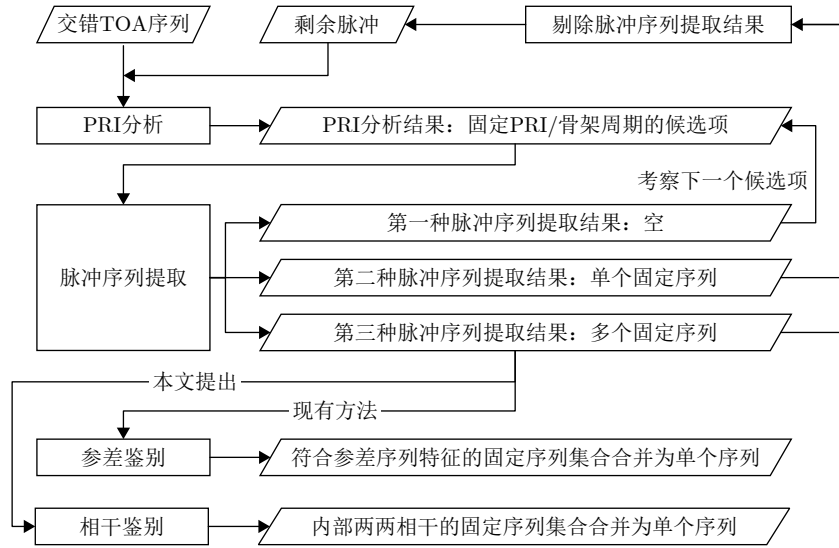
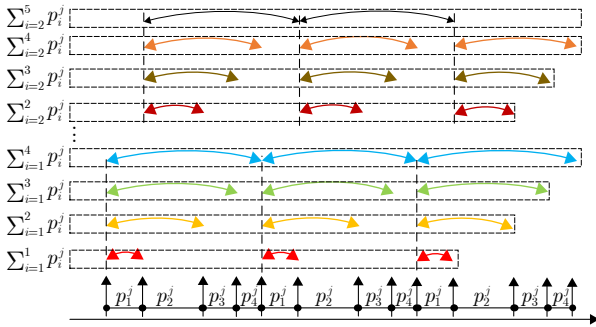


图1 直方图方法的处理流程

Fig. 1 The processing flow of the histogram method

图2 积极样本示意图( $N_j = 4$ )Fig. 2 Diagram of positive samples ( $N_j = 4$ )

定义DTOAs中频数上占优势的统计项为频繁项。消极样本的数值随机分布，并不与特定值对应。由于积极样本的作用， $v \leq N_j - 1$ 时， $\sum_{i=u}^{u+v} p_i^j$ 的频数往往远大于其他数值的频数，因此 $\sum_{i=u}^{u+v} p_i^j$ 是DTOAs的频繁项。注意，由于PRI抖动，频繁项的频数需要从 $\sum_{i=u}^{u+v} p_i^j$ 的频数延伸为区间 $[(1-\rho), (1+\rho)] \cdot \sum_{i=u}^{u+v} p_i^j$ 的频数。不难看出，固定PRI/骨架周期包含于DTOAs的频繁项，这是直方图方法通过统计DTOAs发现交错脉冲流中内嵌的PRI调制模式的基本依据。

直方图构建：统计范围为 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ ，统计单元称为PRI箱，各PRI箱的中心为 $\tau_i$ ，步长 $\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i$ 恒定，宽度为 $b_i$ ，然后对各PRI箱内的DTOAs进行频数统计建立直方图。现有直方图方法可以通过直方图构建方式来区分，差值直方图直接统计所有级数的DTOA，CDIF逐级累积所有级数的DTOA，SDIF按顺序仅统计当前级数的DTOA，PRI变换法在差值直方图的基础上引入了复相位。

门限检测：构建直方图后，需要设置合适门限用于检测频繁项，过门限PRI箱的中心作为估计值用于指示频繁项。门限越小越有利于检测，但也越容易虚警，同时估计误差也会变大。根据文献[7]，传统检测门限函数设置为

$$\text{thr}(\tau_i) = \beta \frac{ST}{\tau_i} \quad (6)$$

其中，ST是观测时长， $\beta \in (0, 1)$ 是由人工调试确定的可调系数，用于适应由脉冲丢失导致的积极样本数量变化。

### (2) 脉冲序列提取

PRI分析结束后，所得频繁项用作固定PRI/骨架周期候选项，记作FI。按照数值从小到大确定优先级，逐一考察。一旦从交错脉冲流中分离出周期为FI(i)的固定序列，FI(i)从候选项被确认为固定PRI/骨架周期；否则，考察FI(i+1)。脉冲序列提取成功则不再考察后续频繁项，记录FI(i)的脉冲序列提取结果后，对交错脉冲流的剩余部分继续进行PRI分析，然后重复脉冲序列提取过程。直方图方法交替进行PRI分析和脉冲序列提取，直至PRI分析结果为空或者遍历频繁项后脉冲序列提取全部失败。本文重点是PRI分析，脉冲序列提取的细节不再过多介绍。

### (3) 参差鉴别

候选项经脉冲序列提取过程确认，记为 $\tau_*$ ，其序列提取结果表示为 $\{\text{seq\_sub}_i | i = 1, 2, \dots, V\}$ ；其中，V表示脉冲序列数量。参差鉴别用于 $V > 1$ 的情况，其目的是理清 $\{\text{seq\_sub}_i | i = 1, 2, \dots, V\}$ 中辐射源的情况，具体步骤如下：

步骤1 基于 $\{\text{seq\_sub}_i | i = 1, 2, \dots, V\}$ 得到一个新的TOA序列，记为 $T_*$ 。

步骤2 对 $T_*$ 作一阶差分后,进行直方图统计。

步骤3 多峰且数值相似,进入下一步;否则,说明 $T_*$ 由多个异源固定序列构成,结束。

步骤4 如果各峰值之和与 $\tau_*$ 在误差容限内相等,则 $T_*$ 来自单个辐射源,各子周期对应各峰值;否则, $T_*$ 由多个异源固定序列构成。

通过分析发现,参差鉴别难以应对参数相似场景:不同辐射源之间骨架周期相同的交错场景。以两辐射源交错场景为例,其一,两个固定辐射源周期相同且完全交叠,参差鉴别将两个固定辐射源判定为一个二阶辐射源;其二,一个辐射源 $p_{\text{law}} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ ,另一个辐射源 $p_{\text{law}} = \sum_{i=1}^N p_i$ ,二者完全交叠时,参差鉴别将二者判定为一个 $(N+1)$ 阶辐射源,不完全交叠时,判定为来自多个固定辐射源。此外,正弦调制中某些子周期数值相近并非小概率事件,由于子周期之间的均匀性被破坏,参差鉴别会将正弦序列判定为来自多个固定辐射源。

#### (4) 相干鉴别

鉴于参差鉴别在理清 $\{\text{seq\_sub}_i | i = 1, 2, \dots, V\}$ 中辐射源的情况上存在缺陷,本文用更稳健的相干鉴别来替换参差鉴别。相干鉴别的基本原理来源于相干分解特性,“分解”意为 $M$ 阶序列可以拆分成 $N$ 个相互交错并且周期为骨架周期的固定序列,“相干”意为这些固定序列在时序上存在依赖关系。

分解:如图3所示, $M$ 阶原始序列可以拆分成 $N$ 个相互交错并且周期为骨架周期的固定序列,经分解得到的固定序列称为子序列。 $M$ 阶序列可以写作:

$$T = \bigcup_{i=1}^N T_i = \bigcup_{i=1}^N \{t_i, t_{i+N}, \dots\} \quad (7)$$

其中, $T_i$ 是一个起始时间为 $t_i$ 且周期是 $\sum_{i=1}^N p_i$ 的固定序列。令 $t_1$ 的相位设置为0,则 $T_1$ 的起始相位为0, $T_i (i > 1)$ 的起始相位是 $\sum_{u=1}^{i-1} p_u / \sum_{u=1}^N p_u$ 。

相干:同源子序列由同一个定时器控制,

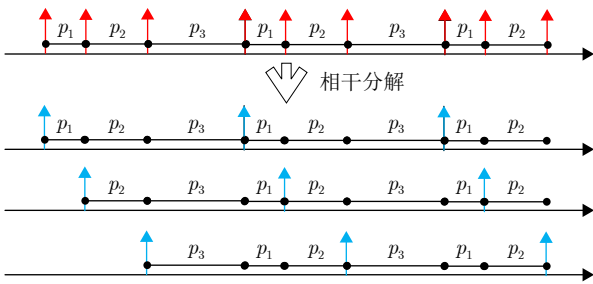


图 3 相干分解示意图( $p_{\text{law}} = \{p_1, p_2, p_3\}$ )

Fig. 3 Diagram of coherent decomposition ( $p_{\text{law}} = \{p_1, p_2, p_3\}$ )

由此而产生时序上的依赖关系称为相干。以 $p_{\text{law}} = \{p_1, p_2\}$ 为例,两个同源子序列写作 $T_1 = \{t_1, t_{1+2}, \dots\}$ 和 $T_2 = \{t_2, t_{2+2}, \dots\}$ ,其差值序列 $\Delta = \{t_2 - t_1, t_4 - t_3, \dots, t_{2+2i} - t_{1+2i}, \dots\}$ 。在同一定时器约束下, $\Delta = \{p_1(1+\rho_1), p_1(1+\rho_2), \dots, p_1(1+\rho_i), \dots\}$ 。此时, $\Delta$ 是一个独立同分布随机过程,其变异系数(标准差除以均值)记作CV,如下所示:

$$\begin{aligned} \text{CV}(\Delta) &= \frac{\sqrt{\text{Var}(\Delta)}}{\text{E}(\Delta)} = \frac{\sqrt{\text{Var}(p_1(1+\rho_i))}}{\text{E}(p_1(1+\rho_i))} \\ &= \frac{p_1 \sqrt{\text{Var}(\rho_i)}}{p_1} = \sigma_\rho \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\text{Var}(\cdot)$ 表示方差, $\text{E}(\cdot)$ 表示数学期望。本文中 $\rho_i$ 服从截断正态分布, $\text{E}(\rho_j) = 0$ ,标准差 $\sigma_\rho = \rho/3$ ,方差记为 $V_\rho$ 。

不相干:两个周期为 $p$ 的异源固定序列分别记作 $T_u = \{u_1, u_2, \dots\}$ 和 $T_v = \{v_1, v_2, \dots\}$ ,二者在时序上并无依赖关系。其中, $u_i = u_1 + \sum_{j=1}^{i-1} (1+\rho_j^u)p$ , $v_i = v_1 + \sum_{j=1}^{i-1} (1+\rho_j^v)p$ , $0 < v_1 - u_1 < p$ 。同时, $\rho_1^u, \rho_2^u, \dots, \rho_j^u, \dots$ 之间独立同分布, $\rho_1^v, \rho_2^v, \dots, \rho_j^v, \dots$ 之间独立同分布,并且 $\rho_j^u, \rho_j^v, \rho_i$ 服从同一分布。差值序列 $\Delta = \{v_1 - u_1, v_2 - u_2, \dots, v_i - u_i, \dots\}$ ,其中,

$$v_i - u_i = v_1 - u_1 + \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j p, \lambda_j = \rho_j^v - \rho_j^u \quad (9)$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j, \dots$ 之间独立同分布, $\text{E}(\lambda_j) = \text{E}(\rho_j^v) - \text{E}(\rho_j^u) = 0$ ,并且 $\text{Var}(\lambda_j) = \text{Var}(\rho_j^v) + \text{Var}(\rho_j^u) = 2V_\rho$ 。因此,得到:

$$\begin{aligned} \text{E}(v_i - u_i) &= v_1 - u_1 + \sum_{j=1}^{i-1} \text{E}(\lambda_j)p = v_1 - u_1, \\ \text{Var}(v_i - u_i) &= \sum_{j=1}^{i-1} \text{Var}(\lambda_j p) = 2(i-1)p^2 V_\rho \end{aligned} \quad (10)$$

不难发现, $v_i - u_i$ 的期望固定,但是方差随着索引线性增加。此时, $\Delta$ 是一个随机游走过程,得到:

$$\begin{aligned} \text{E}(\Delta) &= v_1 - u_1, \text{Var}(\Delta) = \frac{1}{U} \sum_{i=1}^U \text{Var}(v_i - u_i) \\ &= \frac{1}{U} \sum_{i=1}^U 2(i-1)p^2 V_\rho = (U-1)p^2 V_\rho \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $U$ 表示 $\Delta$ 的长度。相应地,变异系数如下所示:

$$\text{CV}(\Delta) = \frac{\sqrt{(U-1)p^2 V_\rho}}{v_1 - u_1} = \frac{p\sqrt{U-1}}{v_1 - u_1} \sigma_\rho \gg \sigma_\rho \quad (12)$$

周期相同且交错时,对于两个同源固定序列,由于同一定时器引入的相干性,其差值序列的CV等于标准差 $\sigma_\rho$ 。然而,对于两个异源固定序

列, 由于来自不同的定时器, 其差值序列的CV将显著大于 $\sigma_\rho$ , 并随着序列长度增加而增加。对于两个周期相同的固定序列, 是否相干将直接反映于差值序列的CV。相干则表明两个固定序列来自同一个发射器, 确定相干的过程称为相干鉴别。因此, 本文依据相干分解特性对任意两个序列提取结果进行相关鉴别以理清序列提取结果中的辐射源情况。事实上, 参差鉴别只使用了分解特性, 并未利用相干特性, 这也是其稳健性存在缺陷的根本原因。

对于 $\tau_*$ 的脉冲序列提取结果 $\{\text{seq\_sub}_i | i = 1, 2, \dots, V\}$ ,  $\text{seq\_sub}_i = \{t_j^i | j = 1, 2, \dots, \text{len}_i\}$ 表示第 $i$ 个序列,  $t_j^i$ 表示第 $j$ 个脉冲的TOA, 脉冲数量为 $\text{len}_i$ 。对于 $\text{seq\_sub}_i$ 和 $\text{seq\_sub}_j$ , 差值序列表示为

$$\begin{aligned} \Delta(\text{seq\_sub}_i, \text{seq\_sub}_j) &= \text{seq\_sub}_j - \text{seq\_sub}_i \\ &= \{t_v^j - t_u^i | 0 < t_v^j - t_u^i < \tau_*, \\ &u \in \{1, 2, \dots, \text{len}_i\}, v \in \{1, 2, \dots, \text{len}_j\}\} \end{aligned} \quad (13)$$

差值序列的长度是参与鉴别的两个序列的交叠长度。

相干直接反映于差值序列的CV, 因此本文以差值序列的CV作为相关鉴别的指标, 如下所示:

$$\text{DI}(\Delta) = 3 \cdot \text{STD}(\Delta) / \text{MEAN}(\Delta) \quad (14)$$

其中,  $\text{STD}(\cdot)$ 是标准差算子,  $\text{MEAN}(\cdot)$ 是均值算子。

通过相干鉴别指标判定序列提取结果之间是否相干后, 依据鉴别结果将 $\{\text{seq\_sub}_i | i = 1, 2, \dots, V\}$ 划分为多个子集(子集间无交集), 每个子集内部两两相干, 构成一个完整序列, 从属于单个辐射源。

### 2.3 反侦察参数设计

**无关项:** 频繁项中除了有固定PRI/骨架周期, 还有子周期 $p_1, p_2, \dots, p_N$ 以及子周期的和值 $\{\sum_{i=u}^{u+v} p_i | u = 1, 2, \dots, N, v = 0, 1, \dots, N-2\}$ , 本文称后者为无关项。一般情况下, 如图2所示, 无关项的DTOA脉冲对之间断开, 即不存在固定序列与无关项对应。因此, 即使无关项的DTOA频数超过门限, 侦察方也可以根据脉冲序列提取结果的反馈将其滤除。

**干扰项:** 一旦某些无关项具有固定PRI的特征, 即存在相应的固定序列与之对应, 侦察方视之为干扰项。以 $N=3$ 为例, 令 $p_1 + p_2 = p_3$ , 无关项 $p_3$ 变成干扰项,  $p_3$ 过门限时, 如图4所示, 脉冲序列提取会先得到1个周期为 $p_3$ 固定序列, 然后再得到一个周期为 $p_1 + p_2 + p_3$ 的固定序列, 而不是像图3那样得到3个周期为 $p_1 + p_2 + p_3$ 的固定序列。参差鉴别和相干鉴别适配于相干分解形式的脉冲序列提

取结果, 所涉及对象是周期相同的固定序列, 因此在干扰项的作用下, 原序列最终以两个独立的固定序列的形式存在于分选结果, 导致侦察方关注两个原本不存在的辐射源。

**反侦察参数:** 着眼于反分选, 雷达方通过设计PRI调制参数使其存在干扰项以实现反侦察, 本文称为反侦察参数。根据干扰项的作用机理, 反侦察参数设计的基本原则是令PRI调制满足“等和约束”, 即 $\exists k \in [1, N-1], \exists i \in [1, N]$ , 使得 $\sum_{u=i}^{i+k-1} p_u = \sum_{u=i+k}^{i+N-1} p_u$ 。一旦满足等和约束, 侦察方视角下的无关项呈现出固定PRI的特征成为干扰项, 从而使雷达方的脉冲序列在侦察方的序列提取结果中以非相干分解的形式存在。

从雷达方视角来看,  $N \leq 2$ 时无法设计反侦察参数。 $N > 2$ 时, 涉及参差调制时需要兼顾各子周期互质, 涉及滑变调制时需要兼顾子周期等间隔变化, 涉及正弦调制时需要兼顾子周期以正弦形状变化。对于正弦调制, 本文提出一种方便可行的反侦察参数设计思路:  $N$ 为偶数, 同时 $\sum_{i=1}^{N/2} p_i = \sum_{i=N/2+1}^N p_i$ , 即

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{N/2} \sin(\phi + 2\pi(i-1)/N) \\ &= \sum_{i=N/2+1}^N \sin(\phi + 2\pi(i-1)/N) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

等差数列正弦求和公式如下所示:

$$\sum_{k=0}^{n-1} \sin(a + kd) = \frac{\sin\left(\frac{nd}{2}\right) \sin\left(a + \frac{(n-1)d}{2}\right)}{\sin\left(\frac{d}{2}\right)} \quad (16)$$

代入 $a = \phi, d = 2\pi/N, n = N/2$ , 式(15)写作:

$$\frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\phi + \frac{(N-2)\pi}{2N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} = 0 \quad (17)$$

解得

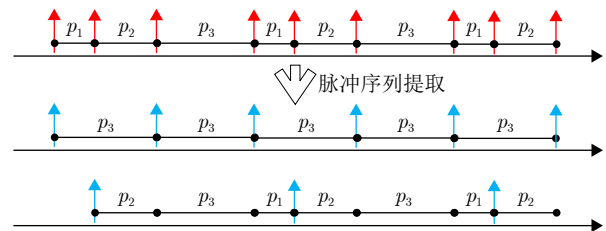


图4 干扰项作用下的脉冲序列提取结果(非相干分解)

Fig. 4 Sequence extraction results under the intervention of interference items (not coherent decomposition)

$$\begin{aligned}\phi + \frac{(N-2)\pi}{2N} &= d\pi, d \in \mathbb{Z} \\ \phi &= d\pi - \frac{(N-2)\pi}{2N} = \pi \left( d - \frac{N-2}{2N} \right) \\ &= \frac{\pi}{2N} (N(2d-1) + 2)\end{aligned}\quad (18)$$

取  $d=1$ , 得

$$\phi = \frac{\pi}{2N} (N(2-1) + 2) = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{N}\quad (19)$$

通解形式为

$$\phi = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{N} + k\pi, k \in \mathbb{Z}\quad (20)$$

如表2所示, 针对参差、滑变和正弦调制, 本文列举了一些反侦察参数设计实例, 除滑变由文献[27]给出外, 其余由本文提出。

雷达方的反侦察参数通过让无关的频繁项伪装成固定PRI, 促使其脉冲序列在侦察方的脉冲序列提取结果中不是以相干分解的形式存在, 从而使侦察方无法通过相关鉴别实现同源子序列的合并, 最终误导侦察方得到错误的侦察结果。雷达方通过反侦察参数设计实际上对侦察方实施了一种欺骗干扰。

### 3 基于骨架周期分析的分选方法

为了应对反侦察参数施加的欺骗干扰, 本文提出在PRI分析过程中进行骨架周期分析。在频繁项检测的基础上进行骨架周期识别, 从而区分开骨架周期和固定PRI; 此外, 约束脉冲序列提取仅处理识别为骨架周期的检测结果, 使得伪装成固定PRI的干扰项无法误导脉冲序列提取过程。同时, 由于真正的固定序列会被当作子周期相等的二阶序列处理, PRI参数解析完成后将子周期相等的二阶序列判定为固定序列即可, 因此骨架周期分析在滤除干扰项的同时并不会影响对真实的固定序列的处理。

骨架周期分析是一个两阶段过程。第一阶段, 基于DTOAs构建直方图, 通过推导骨架周期的频数与脉冲丢失率的关系建立稳健性检测阈值, 确保在0至50%脉冲丢失范围内检测出骨架周期; 第二阶段, 鉴于骨架周期和固定PRI在自相关性和交叠

率上的差异, 以此为基础建立骨架周期识别机制以区分骨架周期和固定PRI。两阶段方法协同工作为脉冲序列提取提供可靠的候选项。最后, 在骨架周期分析基础上, 本文给出了分选全过程的流程图。

#### 3.1 兼容脉冲丢失的骨架周期检测

本文要求检测门限兼容不同脉冲丢失率以及避免人工调试的参与, 下面推导固定序列的积极样本数量与脉冲丢失率的关系, 从而明确式(6)中 $\beta$ 的设置。进一步地, 阶数为 $N$ 的原始序列可以拆分成 $N$ 个周期为骨架周期的固定序列, 因此骨架周期的检测门限可以在式(6)的基础上根据对 $N$ 的最低要求进行调整。

构建直方图时, 各PRI箱的中心 $\tau_i \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ , 宽度 $b_i = [-\tau_i\rho, \tau_i\rho]$ , DTOA频数记为 $D(\tau_i)$ 。直接统计所有级数的DTOA, 并且滑动步长 $\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i$ 设置得很小, 以确保对任意骨架周期均存在PRI箱与其积极样本的分布范围基本匹配, 最终实现骨架周期在直方图上频数最大化。通过频数最大化实现唯一化, 便于后续建立DTOA频数与脉冲丢失的确切对应关系。

对于周期为 $\tau_i$ 并且持续时长为ST固定序列, 无脉冲丢失时其长度为 $\text{len} = \text{ST}/\tau_i + 1$ 。发生脉冲丢失后, 相邻脉冲构成的DTOA称为关键DTOA, 如图5所示, 构成关键DTOA的脉冲已用双向黑色虚线连接。

根据规则网格(lattice process)经伯努利稀释后的标准性质, 对于规则时间序列(固定间隔)应用伯努利丢失后, 观测点之间的时间间隔(以原始间隔的倍数计)服从几何分布, 且间隔相互独立。因此, 关键DTOA服从几何分布 $P(n\tau_i) = (1-\varepsilon)\varepsilon^{n-1}$ , 其中,  $\varepsilon$ 表示脉冲丢失率。

关键DTOA总数为 $\text{len} \cdot (1-\varepsilon) - 1$ , 近似为 $\text{ST}/\tau_i(1-\varepsilon)$ , 区间 $n[\tau_i(1-\rho), \tau_i(1+\rho)]$ 内的关键DTOA的数量近似为 $\text{ST}/\tau_i(1-\varepsilon)^2\varepsilon^{n-1}$ 。当 $n \geq 2$ 时, 关于 $n \cdot [\tau_i(1-\rho), \tau_i(1+\rho)]$ 内的每一个关键DTOA, 对应于 $[\tau_i(1-\rho), \tau_i(1+\rho)]$ 内的积极样本数

表 2 反侦察参数设计

Tab. 2 Design of anti-reconnaissance parameters

$N$	参差	滑变	正弦
3	$k_1 : k_2 : k_3 = 2 : 5 : 7$	/	/
4	$k_1 : k_2 : k_3 : k_4 = 5 : 7 : 9 : 11$	/	$\phi = 3\pi/4$
5	$k_1 : k_2 : k_3 : k_4 : k_5 = 5 : 7 : 18 : 11 : 19$	$\Delta K = K_1/4$	
6	/	$\Delta K = 2K_1/3$	$\phi = 2\pi/3$
7	/	$\Delta K = K_1/9, K_1/3, K_1, 3K_1$	/
8	/	/	$\phi = 5\pi/8$

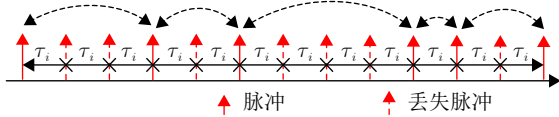


图5 关键DTOA示意图

Fig. 5 Diagram of key DTOAs

量减少 $n$ 。因此,  $[\tau_i(1-\rho), \tau_i(1+\rho)]$ 的积极样本共减少 $\sum_{n=2}^{\text{len}-1} \text{ST}/\tau_i(1-\varepsilon)^2 \varepsilon^{n-1} n$ 。

脉冲丢失前积极样本数量为 $\text{ST}/\tau_i$ , 脉冲丢失后剩余积极样本所占比例如下所示:

$$\begin{aligned} \psi &\approx 1 - 1/(\text{ST}/\tau_i) \cdot \sum_{n=2}^{\text{len}-1} \text{ST}/\tau_i(1-\varepsilon)^2 \varepsilon^{n-1} n \\ &\approx 1 - \sum_{n=2}^z (1-\varepsilon)^2 \varepsilon^{n-1} n \end{aligned} \quad (21)$$

其中,  $z$ 是一个数值不是很大且小于 $\text{len}$ 的整数。令 $z=10$ ,  $\varepsilon=0.1/0.2/0.3/0.4/0.5$ 时, 式(21)计算结果为 $\psi=0.8100/0.6400/0.4900/0.3607/0.2509$ 。计算机仿真结果如表3所示。

从均值来看, 计算机仿真结果与理论计算结果高度吻合, 验证了理论推导的正确性及其对设置 $\beta$ 的指导价值。为了确保 $[0, 50\%]$ 脉冲丢失率范围内的检测适应性, 参照 $\varepsilon=0.5$ 时的理论计算值0.2509设置 $\beta$ 。此外, 根据统计过程控制(Statistical Process Control, SPC)理论, 采用3倍标准差准则进行稳健性设计, 因此:

$$\beta = 0.2509 - 3 \times 0.0249 = 0.1762 \quad (22)$$

同时, 消极样本随机分布于 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ , 由其产生的频数可理解为底噪。根据文献[8], 对于脉冲长度为 $M$ 的交错脉冲流, 底噪水平如下所示:

$$\text{Noise}(\tau_i) < \frac{M^2 b_i}{\text{ST}} = 2\tau_i \rho \frac{M^2}{\text{ST}} \quad (23)$$

最终, 骨架周期的检测门限设置为

$$\text{thr}(\tau_i) = \max\left(0.1762 \cdot N_{\min} \cdot \frac{\text{ST}}{\tau_i}, 2\tau_i \rho \cdot \frac{M^2}{\text{ST}}\right) \quad (24)$$

表3 不同脉冲丢失率下积极样本剩余比例

Tab. 3 Remaining proportion of positive samples under various missing pulse rates

脉冲丢失率	均值	标准差
10%	0.8064	0.0246
20%	0.6381	0.0299
30%	0.4891	0.0308
40%	0.3595	0.0284
50%	0.2481	<b>0.0249</b>

注: 加粗数值表示应用3倍标准差准则时标准差的参考基准。

其中,  $\max(\cdot)$ 是最大值算子,  $N_{\min}$ 是最低可检测阶数。式(24)意味着即使脉冲丢失率高至50%, 对阶数大于等于 $N_{\min}$ 的骨架周期均满足检测条件。对应于骨架周期识别, 设置 $N_{\min}=2$ 。

### 3.2 联合自相关和交叠率的骨架周期识别

伴随骨架周期被检测出来, 可能存在其他频繁项同时被检测出来, 其中可能有无关项, 也可能有干扰项。无关项通过脉冲序列提取的反馈可以滤除, 然而干扰项由于伪装成固定PRI会误导脉冲序列提取过程。鉴于骨架周期和固定PRI在自相关和交叠率上存在差异, 联合这两方面特性来实现骨架周期识别, 后续的脉冲序列提取只处理识别为骨架周期的检测结果, 如此既筛选了无关项也规避了伪装成固定PRI的干扰项。

#### (1) 自相关和交叠率

固定PRI与骨架周期最直接的区别体现在阶数, 其物理意义上是骨架周期对应两条以上相互交错的固定序列, 而固定PRI仅对应一条独立的固定序列。固定PRI与骨架周期在物理意义上的差异会间接反映于自相关和交叠率<sup>[22]</sup>, 或者说自相关和交叠率可看作阶数的度量算子。

如果DTOA样本 $\hat{t}_v - \hat{t}_u \in [1-\rho, 1+\rho] \cdot \tau_i$ , 则计入 $\tau_i$ 的频数。同时,  $(u, v)$ 记录为 $\tau_i$ 脉冲对,  $u$ 为头脉冲索引,  $v$ 为尾脉冲索引。对于 $\tau_i$ , 由其DTOA样本建立的脉冲对集合表示为

$$\begin{aligned} \text{PP}(\tau_i) &= \{(h_j^i, g_j^i) | j = 1, 2, \dots, D(\tau_i)\} \\ &= \{(u, v) | \hat{t}_v - \hat{t}_u \in [1-\rho, 1+\rho] \cdot \tau_i, \hat{t}_u, \hat{t}_v \in \hat{T}\} \end{aligned} \quad (25)$$

其中,  $h_j^i$ 表示第 $j$ 个脉冲对的头脉冲在交错脉冲中的索引,  $g_j^i$ 表示第 $j$ 个脉冲对的尾脉冲在交错脉冲中的索引。

固定序列产生的脉冲对之间存在共用脉冲的现象, 如图2的 $\sum_{i=1}^4 p_i$ , 无脉冲丢失时, 上一个脉冲对的尾脉冲是下一个脉冲对的头脉冲。 $N$ 阶序列意味着同一观测时域内共用脉冲数量是固定序列的 $N$ 倍。自相关用于表征 $\text{PP}(\tau_i)$ 所包含脉冲对之间共用脉冲的程度。同时, 无脉冲丢失时, 固定序列所产生的脉冲对完整覆盖整个观测时域,  $N$ 阶序列意味着交叠覆盖 $N$ 遍。交叠率用于表征 $\text{PP}(\tau_i)$ 所包含脉冲对对观测时域的覆盖程度。

过门限检测结果的自相关度量算子如下:

$$\text{cor}(\tau_i) = \frac{\tau_i}{\text{ST}} \sum_{u=1}^{D(\tau_i)} \sum_{v=1}^{D(\tau_i)} \delta(h_u^i - g_v^i) \quad (26)$$

其中,  $\delta(\cdot)$ 表示单位冲激函数。无脉冲丢失时, 单个固定序列的共用脉冲数量是 $ST/\tau_i$ , 因此共用脉冲数量共计 $N \cdot ST/\tau_i$ , 即 $\text{cor}(\tau_i) = N$ 。

过门限检测结果的交叠率度量算子如下:

$$\text{or}(\tau_i) = \frac{1}{ST} \sum_{j=1}^{D(\tau_i)} \hat{t}_{g_j^i} - \hat{t}_{h_j^i} \quad (27)$$

不难发现, 交叠率在数值上等于 $N$ 乘以积极样本剩余比例, 即 $\text{or}(\tau_i) = N\psi$ 。无脉冲丢失时,  $\psi = 1$ ,  $\text{or}(\tau_i) = N$ 。

(2) 骨架周期识别

脉冲丢失时,  $\text{cor}(\tau_i)$ 和 $\text{or}(\tau_i)$ 随着脉冲丢失的增多而降低, 尽管 $N=1$ 时 $\text{cor}(\tau_i)$ 和 $\text{or}(\tau_i)$ 恒小于1, 但是 $N \geq 2$ 时 $\text{cor}(\tau_i)$ 和 $\text{or}(\tau_i)$ 并非恒大于1, 因此 $\text{cor}(\tau_i)$ 或 $\text{or}(\tau_i)$ 无法直接用于识别骨架周期。

如图6所示,  $n \geq 2$ 时, 区间 $n \cdot [\tau_i(1 - \rho), \tau_i(1 + \rho)]$ 内每一个关键DTOA涉及 $n+1$ 个脉冲, 包括2个未丢失脉冲以及内部 $n-1$ 个丢失脉冲。单个丢失脉冲对共用脉冲数量减少的贡献是1。未丢失脉冲对共用脉冲数量减少的贡献视情况而定: 方框内脉冲未丢失, 贡献是1, 方框内脉冲丢失, 贡献是0.5(与其他关键DTOA平分)。因此, 单个未丢失脉冲的贡献的期望是 $1 - 0.5\varepsilon$ 。最终, 一个关键DTOA对共用脉冲数量减少的贡献合计是 $n + 1 - \varepsilon$ , 对自相关减少的贡献合计是 $(n + 1 - \varepsilon)\tau_i/ST$ 。

$\tau_i$ 的交叠率等于 $N\psi$ , 而 $\tau_i$ 的自相关性如式(28)所示。

$$\begin{aligned} \text{cor}(\tau_i) &\approx N \left( 1 - \sum_{n=2}^{\text{len}-1} ST/\tau_i(1 - \varepsilon)^2 \varepsilon^{n-1} \right. \\ &\quad \left. \cdot (n + 1 - \varepsilon) \frac{\tau_i}{ST} \right) \\ &\approx N \left( 1 - \sum_{n=2}^z (1 - \varepsilon)^2 \varepsilon^{n-1} (n + 1 - \varepsilon) \right) \quad (28) \end{aligned}$$

因此, 交叠率与自相关的差值如式(29)所示。

$$\Omega(\tau_i) = \text{or}(\tau_i) - \text{cor}(\tau_i) \approx N \left( \sum_{n=2}^z (1 - \varepsilon)^2 \varepsilon^{n-1} (1 - \varepsilon) \right) \quad (29)$$

经过验证, 计算机仿真结果与公式计算结果一

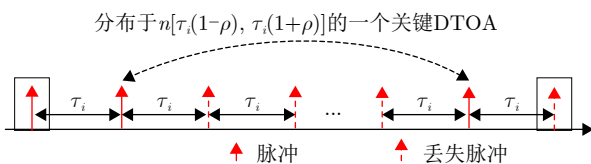


图 6 脉冲丢失对自相关的影响

Fig. 6 Impact of pulse loss on autocorrelation

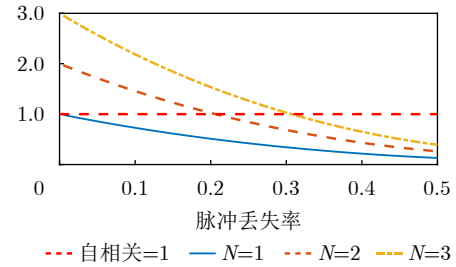
致。根据式(28)和式(29), 不同脉冲丢失率下的自相关和交叠率与自相关的差值如图7所示。

无论脉冲丢失率大小,  $N=1$ 的 $\text{cor}$ 始终小于1。脉冲丢失较少时,  $N \geq 2$ 的 $\text{cor}$ 大于1, 因此通过 $\text{cor}$ 可以识别骨架周期。脉冲丢失较多时,  $N \geq 2$ 的 $\text{cor}$ 小于1, 此时无法通过 $\text{cor}$ 识别骨架周期; 但是,  $\text{cor} < 1$ 时,  $N \geq 2$ 的 $\Omega$ 和 $N=1$ 的 $\Omega$ 在数值范围上没有交叠, 因此可以通过 $\Omega$ 来识别骨架周期。

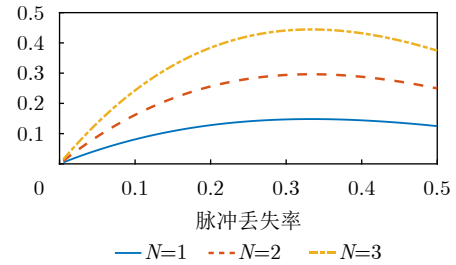
根据计算机仿真结果,  $N=1$ 和 $N=2$ 时, 不同脉冲丢失率下的 $\Omega$ 如表4所示。采用3倍标准差准则,  $\Omega$ 的阈值设置为

$$\text{thr}_\Omega = 0.1474 + 3 \times 0.01 = 0.1774 \quad (30)$$

显然,  $\varepsilon > 0.2$ 时,  $N=1$ 的 $\Omega$ 始终小于 $\text{thr}_\Omega$ , 而 $N \geq 2$ 的 $\Omega$ 始终大于 $\text{thr}_\Omega$ 。



(a) 自相关  
(a) Autocorrelation



(b) The difference between the overlap rate and autocorrelation

图 7 不同脉冲丢失率下的自相关及交叠率与自相关的差值(公式计算)

Fig. 7 Autocorrelation and the difference between overlap rate and autocorrelation under different missing pulse rates (formula calculation)

表 4 不同脉冲丢失率下的自相关及交叠率与自相关的差值(计算机仿真)

Tab. 4 Difference between overlap ratio and autocorrelation under different pulse missing rates in computer simulations (computer simulation)

脉冲丢失率	均值( $N=1$ )	标准差( $N=1$ )	均值( $N=2$ )	标准差( $N=2$ )
20%	0.1288	<b>0.0100</b>	0.2576	0.0201
30%	<b>0.1474</b>	0.0090	0.2948	0.0179
40%	0.1446	0.0086	0.2891	0.0171
50%	0.1258	0.0098	0.2516	0.0196

注: 加粗数值表示应用3倍标准差准则时均值与标准差的参考基准。

综上,基于DTOAs构建直方图后获取频数 $D(\tau_i)$ ,然后通过门限 $\text{thr}(\tau_i)$ 来检测骨架周期。当过门限检测结果的自相关 $\text{cor}(\tau_i)$ 大于1或者交叠率与自相关的差值 $\Omega(\tau_i)$ 大于 $\text{thr}_\Omega$ ,本文将其识别为骨架周期。此外,固定序列可看作子周期相等的二阶序列进行处理,后续将子周期相等的二阶序列判定为固定序列即可,因而骨架周期分析在滤除干扰项的同时并不会影响对真实的固定序列的处理。

### 3.3 相干鉴别

根据计算机仿真,相干时不同交叠长度下的鉴别指标如表5所示, $\Delta$ 的分位函数(Quantile Function)用QF表示。从平均值来看,相干时的鉴别指标和 $\rho$ 相等。根据QF(0.98),为确保不同交叠长度下保持对相干情况98%的检测率,判断相干的阈值设置为

$$\text{thr\_DI} = 0.0026 \quad (31)$$

小于阈值判断为相干,大于阈值判断为不相干。 $\text{thr\_DI} = 0.0026$ 仅适用于 $\rho = 0.002$ ,不同抖动率下的 $\text{thr\_DI}$ 可通过计算机仿真制成对照表。

不相干时不同交叠长度下的相干鉴别指标如表6所示。从平均值来看,不相干时的指标远大于 $\rho$ ,并且交叠长度等于20时,指标已经达到了有意抖动的程度。经验累积分布函数(Empirical Cumulative Distribution Function)用EC表示。根据EC(0.0026),当交叠长度为20,虚警率仅为0.5%,

表5 相干时不同交叠长度下的鉴别指标

Tab. 5 Discrimination indicator under different overlap lengths for the coherent case

交叠长度	均值	QF(0.98)
20	0.0020	<b>0.0026</b>
30	0.0020	0.0025
40	0.0020	0.0024
50	0.0020	0.0024
60	0.0020	0.0023

注:加粗数值表示相干鉴别阈值设置基准。

表6 不相干时不同交叠长度下的鉴别指标

Tab. 6 Discrimination indicator under different overlap lengths for the incoherent case

交叠长度	均值	EC(0.0026)
5	0.0069	0.1678
10	0.0096	0.0478
15	0.0116	0.0128
20	0.0133	0.0050
25	0.0150	0.0030

可忽略不计。同时,当交叠长度低至10,虚警率升至4.78%,当交叠长度低至5,虚警率飙升至16.78%。因此,相干鉴别必须以一定的交叠长度为前提,或者说必须具有一定的交叠长度才能充分体现相干特性。

本文直接将交叠长度小于20的情况判定为不相干,大于等于20的情况则通过指标判定是否相干。同源子序列之间交叠长度很大,因此该设定不会增加对相干的漏检,却能有效减少对不相干的虚警。最后,根据相干鉴别结果,提取内部两两相干的序列提取结果集合作为完整序列。

### 3.4 PRI调制信息解析

获得表征完整序列的序列提取结果集合 $\{\text{seq\_sub}_i | i = 1, 2, \dots, F\}$ 后, $F$ 表示参与合并的子序列数量,需要解析PRI调制信息。具体步骤如下:

步骤1 构建差值序列 $\Delta(\text{seq\_sub}_1, \text{seq\_sub}_i)$ ,  $i = 2, 3, \dots, F$ ;

步骤2 计算差值序列的均值,排序后得到 $\Delta_1 < \Delta_2 < \dots < \Delta_{F-1}$ ,同时记录 $\Delta_{F-1}$ 的原始索引idx;

步骤3 PRI调制信息为 $\{\Delta_1, \Delta_2 - \Delta_1, \dots, \Delta_{F-1} - \Delta_{F-2}, \text{MEAN}(\Delta(\text{seq\_sub}_{\text{idx}}, \text{seq\_sub}_1))\}$ 。

### 3.5 基于骨架周期分析的分选流程

本文所提基于骨架周期分析的分选流程如图8所示。输入交错脉冲流,计算DTOAs并构建直方图,在检测频繁项时以 $\max(0.1762 \cdot 2 \cdot \text{ST} / \tau_i, 2\tau_i \rho M^2 \text{ST})$ 为检测门限,确保骨架周期一定存在于检测结果中,检测结果记作FI。

然后,以 $\text{cor}(\text{FI}(i)) > 1$ 或者 $\Omega(\text{FI}(i)) > 0.1774$ 为条件识别检测结果中的骨架周期,根据识别为骨架周期的检测结果进行脉冲序列提取。一方面,对于交错脉冲流的剩余部分重复骨架周期分析的操作,另一方面,对当前脉冲序列提取结果进行相干鉴别。

对于脉冲序列提取结果,两两计算相干鉴别指标DI,根据鉴别阈值 $\text{thr\_DI} = 0.0026$ 判定提取结果之间是否相干,根据相干鉴别结果提取内部元素两两相干的提取结果集合,进而实现同源子序列合并。

最后,对于合并后的结果,根据各子序列的起始相位解析PRI调制信息 $p\_law$ ,将 $p\_law = \{p_1, p_2 | p_1 = p_2\}$ 的去交错结果输出为 $p\_law = \{p_1\}$ 的固定序列。同时,可以将 $p\_law$ 转换成对应的PRI调制类型和具体的调制参数。

骨架周期检测涉及DTOAs的计算以及直方图的构建,主要取决于直方图的构建,采用二分法做频数统计时其计算复杂度为 $O(GM \log_2 Z)$ ;其中, $G$ 表示统计范围约束下的等效统计级数, $Z$ 表示

PRI箱的数量。骨架周期识别涉及脉冲对集合的获取以及自相关和交叠率的计算，其计算复杂度为 $O(GMN^2)$ 。相干鉴别涉及差值序列的构建和差异系数的计算，其计算复杂度为 $O(MN)$ 。相比于CDIF和SDIF等经典方法，所提方法在骨架周期检测部分的计算复杂度因为全级数DTOA统计而有所增加。同时，因为引入骨架周期识别模块直接增加 $O(MN^2)$ 的计算复杂度，因为引入相干鉴别模块直接增加 $O(MN)$ 的计算复杂度，处理对象阶数越高，所提方法相比于经典方法的时间成本越大。

#### 4 实验结果与分析

本文中，Sd表示交错脉冲流中辐射源脉冲总数，Sf表示所有分选结果的脉冲总数，Sf中判别正

确的脉冲数量记为Nt。需要注意，对于某一分选结果，只有当其PRI调制信息解析结果与真实信息一致时，该结果中的真实脉冲才计入Nt。考虑到对精确率(Nt/Sf)和召回率(Nt/Sd)的综合评价，采用F1-score作为分选性能评估指标，如下所示：

$$\text{Per} = 2 \frac{Nt/Sf \cdot Nt/Sd}{Nt/Sf + Nt/Sd} \quad (32)$$

实验配置：交错脉冲流由雷达辐射源和杂散脉冲构成，杂散脉冲数量和单个子序列脉冲数量一致。本文中PRI抖动率 $\rho$ 设置为0.002，TOA测量误差通常在10 ns量级，设置为0.1  $\mu\text{s}$ 。PRI箱中心的步长设置为 $\Delta\tau = 0.2 \mu\text{s}$ ，并且 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}] = [20, 1000] \mu\text{s}$ 。在CDIF<sup>[7]</sup>和SDIF<sup>[9]</sup>中，PRI箱的宽度统一设置为0.2  $\mu\text{s}$ 。其中，CDIF门限系数设置为0.18，而SDIF采用双门限机制，第一级阈值的参数设置为(0.15, 0.20)，第二级阈值的衰减系数为0.5。文献<sup>[22]</sup>所用骨架周期检测方法记作FDC-DTOA，其门限系数设定为0.85。脉冲序列提取由文献<sup>[28]</sup>实现。每次蒙特卡罗实验下雷达辐射源的PRI调制参数按照表7随机选取，无脉冲丢失时单个子序列长度设置为150。

#### 4.1 一般场景

固定PRI不涉及反侦察参数，现比较所提方法和对比方法在固定信号分选方面的性能来考察对固定调制的分选能力以及检测门限对脉冲丢失的适应能力，每种脉冲丢失率下进行1000次蒙特卡罗实验。

如表8所示，CDIF在脉冲丢失率较高(特别是50%)时性能显著下降，而本文方法、SDIF和FDC-DTOA展现出优异的稳健性。究其原因，FDC-DTOA通过一阶差分曲线的特性实现了对脉冲丢失的低敏感性；SDIF利用双门限机制有效适应了脉冲丢失；本文则建立了DTOA频数与脉冲丢失率的理论对应关系，从机理上保证了门限对脉冲丢失的适应性，因此在50%脉冲丢失率下仍能保持98.5%以上的准确率。实验结果表明，本文基于DTOA频数与脉冲丢失率的对应关系所建立的检测门限切实有效，所提方法不仅完全具备固定序列的去交错能

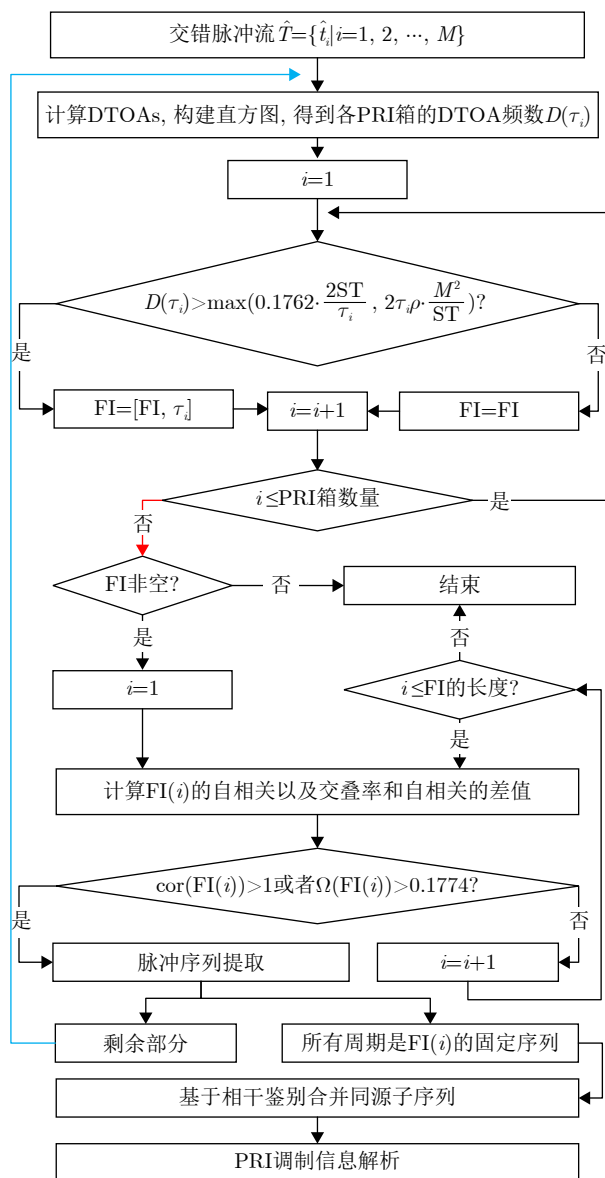


图 8 基于骨架周期分析的分选流程图

Fig. 8 Deinterleaving flow chart based on frame period analysis

表 7 PRI调制设置

Tab. 7 PRI modulation settings

类型	p_law
固定	$K \in [50, 100] \mu\text{s}$
参差	$k_i \in [2, 19] \times 10 \mu\text{s}, k_i/10$ 两两互质, $N \in \{3, 4, 5\}$
渐变	$K_1 \in [30, 50] \mu\text{s}, \Delta K \in [4, 8] \mu\text{s}, N \in \{5, 6, 7\}$
正弦	$K_0 \in [60, 80] \mu\text{s}, K_a \in [10, 30] \mu\text{s}, \phi \in [-\pi, \pi], N \in \{4, 6, 8\}$

表 8 不同脉冲丢失率下对固定信号的分选性能(%)  
Tab. 8 Performance under different missing rate in deinterleaving fixed sequences (%)

脉冲丢失率	CDIF <sup>[7]</sup>	SDIF <sup>[9]</sup>	FDC-DTOA <sup>[22]</sup>	Ours
10%	99.38	99.24	99.60	99.27
20%	99.25	99.21	99.53	99.30
30%	99.13	99.16	99.46	99.18
40%	97.46	98.56	99.33	98.99
45%	87.71	98.89	99.22	98.86
50%	66.31	97.80	99.13	98.64

力, 更在0~50%的脉冲丢失范围内展现出卓越的稳健性。

### 4.2 反侦察场景

阶数大于2时按照表2在PRI调制中设计反侦察参数, 表7的设置作为无反侦察设计的对照组。区分参差、滑变、正弦调制分别进行考察, 通过比较引入反侦察参数前后的性能变化来考察不同方法对

抗反侦察参数的能力。同样地, 对比方法加入相干鉴别模块以兼容参差、滑变、正弦调制。实验中, 考察变量为调制阶数, 每种阶数下进行1000次蒙特卡罗实验。

图9、图10、图11分别是面对参差、滑变、正弦调制时的分选性能。不难发现, 所提方法面对反侦察设计前后性能并无变化, 然而对比方法出现了极其显著的变化。无论哪种调制, 无论哪种条件, FDC-DTOA和CDIF在面对反侦察设计时性能直接降为0。SDIF面对6阶滑变调制, 脉冲丢失5%时性能降为76.5%, 脉冲丢失20%时性能降为98.4%, 尚能维持正常工作; 然而, 面对滑变调制的其余条件性能最高仅为32.3%, 面对其余调制时性能最高仅为36.2%, 均已无法正常工作。正常固定序列的DTOAs集中于同一级数, 而干扰项的DTOAs往往分散在不同级数, 导致其在SDIF检测中先天处于劣势。即使干扰项DTOAs位于同一级数, 序列中其余脉冲也会抬高检测阈值, 进一步抑制干扰项的通

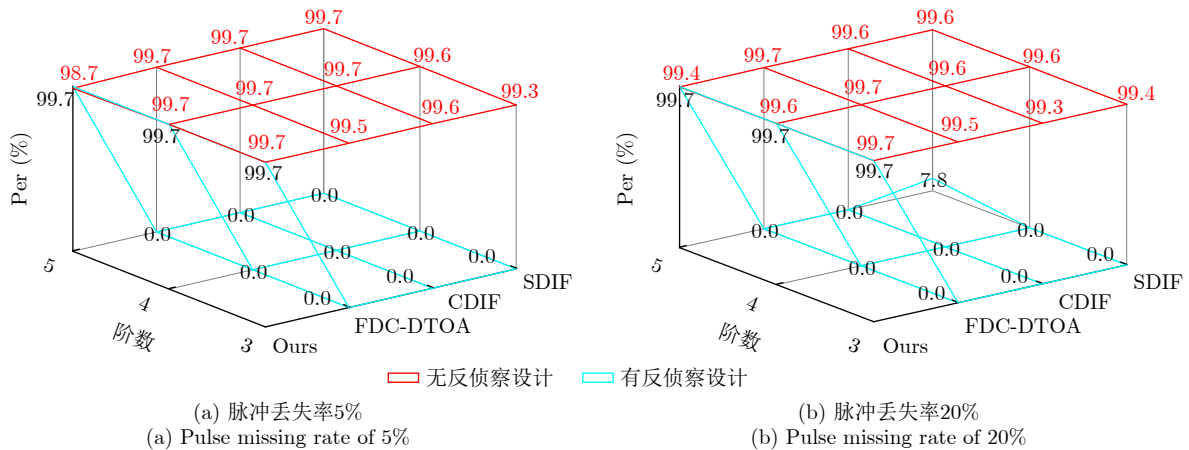


图 9 不同阶数条件下对参差信号的分选性能

Fig. 9 Performance under different orders in deinterleaving staggered sequences

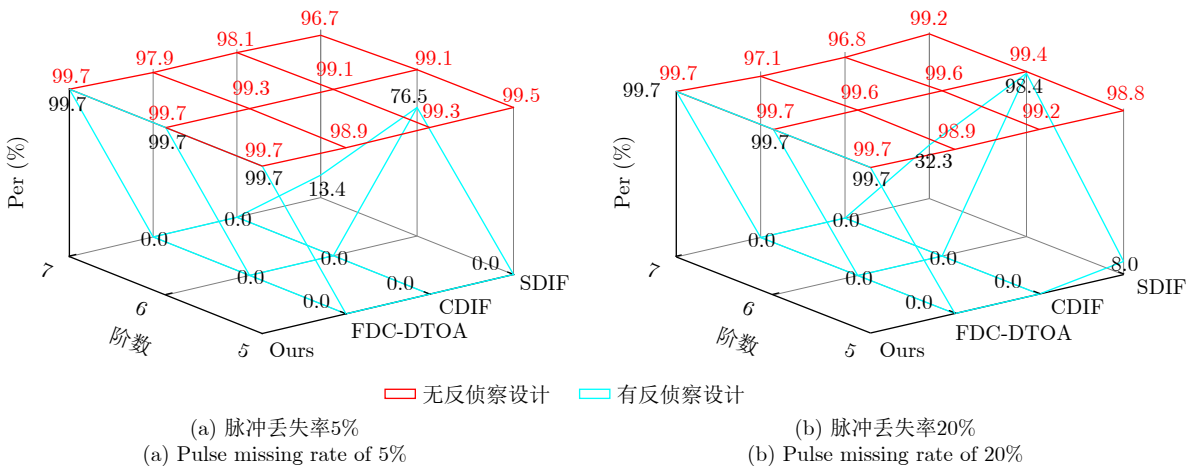


图 10 不同阶数条件下对滑变信号的分选性能

Fig. 10 Performance under different orders in deinterleaving sliding sequences

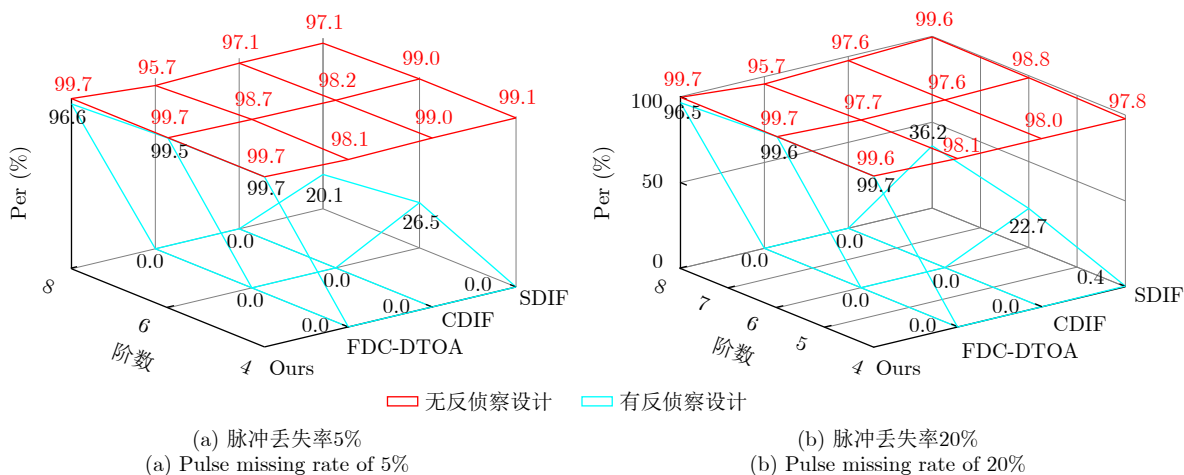


图 11 不同阶数条件下对正弦信号的分选性能

Fig. 11 Performance under different orders in deinterleaving wobulated sequences

过。降低SDIF门限为(0.05, 0.10)使其兼容干扰项，则其在反侦察参数下的性能降至零，所呈现结果与其他方法一致。因此，SDIF的逐级统计特性为干扰项发挥作用注入了不确定性，当前异常表现是检测门限、自身特性与干扰项结构共同作用的结果。

实验结果表明，所提方法联合自相关和交叠率识别骨架周期的机制切实有效，并且相干鉴别可以有效识别同源子序列；无论是否引入反侦察参数设计，所提方法都能有效分选参差、滑变、正弦调制，对抗反侦察参数设计的性能得到充分验证。

### 4.3 参数相似场景

相干鉴别在识别同源子序列方面的能力通过4.2节的实验结果得到验证，现通过考察所提方法在参数相似场景下的分选性能来考察相干鉴别在避免异源子序列虚警方面的能力。参数相似场景由两个辐射源构成，其中一个辐射源的PRI调制信息为  $p\_law = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ ，另一个辐射源是周期为  $\sum_{i=1}^N p_i$  的固定辐射源。每种脉冲丢失率下进行1000次蒙特卡罗实验，不同PRI调制类型下的实验结果如表9所示。所提方法面对固定调制性能最低为99.81%，面对参差调制最低为95.31%，面对滑变调制最低为97.66%，面对正弦调制最低为97.46%。实验结果表明，所提方法在参数相似场景

下完全可以正常工作，在避免异源子序列虚警方面的能力得到验证。

## 5 结语

本文针对雷达信号分选中直方图方法易受反侦察参数欺骗干扰的难题，提出了一种对抗反侦察欺骗干扰的分选方法。该方法通过建立脉冲丢失率与DTOA频数的理论模型，构建了0~50%丢失率范围内的稳健性骨架周期检测机制，通过联合自相关与交叠率实现骨架周期的精准识别，进而有效区分真实周期与干扰项。通过约束脉冲序列提取仅处理识别为骨架周期的检测结果，从根本上阻断了干扰项对分选流程的误导，实现了抗欺骗干扰能力。同时，为全面提升分选算法的适应性，引入相干鉴别机制使方法具备对固定、参差、滑变及正弦4种调制的泛化分选能力，并且可以有效应对参数相似场景。实验结果表明，所提方法无论反侦察参数存在与否均能保持稳定的分选性能，面对参数相似场景时性能同样稳健，显著提升了复杂电磁环境下信号分选的稳健性和适应性，对提升电子战装备实战能力具有重要价值。事实上，反侦察参数(个体层面的解体模糊)与参数相似场景(群体层面的融合模糊)分别从不同维度呈现了分选过程中的“辐射源模糊问题”。这是一个辐射面广、现实威胁突出的挑战，期望通过本研究推动领域内对该问题的深入关注，进而促进雷达信号分选技术的进步与发展。

表 9 参数相似场景下的分选性能(%)

Tab. 9 Performance in scenarios with similar parameters (%)				
脉冲丢失率	固定	参差	滑变	正弦
10%	99.84	98.21	99.61	97.46
20%	99.84	96.32	99.16	98.22
30%	99.82	97.77	98.23	98.42
40%	99.81	95.31	97.66	98.68

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

## 参考文献

[1] ADAMY D. EW 101: A First Course in Electronic

- Warfare[M]. Norwood, USA: Artech House, 2001: 2-5.
- [2] GUO Qiang, HUANG Shuai, QI Liangang, *et al.* A radar signal deinterleaving method based on complex network and laplacian graph clustering[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2024, 31: 2580-2584. doi: [10.1109/LSP.2024.3461656](https://doi.org/10.1109/LSP.2024.3461656).
- [3] PINSOLLE J, GOUDET O, ENDERLI C, *et al.* Deinterleaving of discrete renewal process mixtures with application to electronic support measures[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 4983-4991. doi: [10.1109/TSP.2024.3464753](https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3464753).
- [4] BAO Jiadi, ZHU Mengtao, LI Yunjie, *et al.* Interleaved hidden markov processes inference for deinterleaving radar pulse sequences[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2025, 73: 3448-3462. doi: [10.1109/TSP.2025.3597790](https://doi.org/10.1109/TSP.2025.3597790).
- [5] 隋金坪, 刘振, 刘丽, 等. 雷达辐射源信号分选研究进展[J]. 雷达学报, 2022, 11(3): 418-433. doi: [10.12000/JR21147](https://doi.org/10.12000/JR21147).  
SUI Jinping, LIU Zhen, LIU Li, *et al.* Progress in radar emitter signal deinterleaving[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(3): 418-433. doi: [10.12000/JR21147](https://doi.org/10.12000/JR21147).
- [6] 刘光霞, 李琦, 韩壮志, 等. 基于Arnold映射的抗分选混沌调制PRI设计方法[J]. 电讯技术, 2025, 65(3): 363-370. doi: [10.20079/j.issn.1001-893x.231227006](https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.231227006).  
LIU Guangxia, LI Qi, HAN Zhuangzhi, *et al.* A design method of anti-sorting chaotic modulation PRI based on arnold mapping[J]. *Telecommunication Engineering*, 2025, 65(3): 363-370. doi: [10.20079/j.issn.1001-893x.231227006](https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.231227006).
- [7] MARDIA H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. *IEE Proceedings F Radar and Signal Processing*, 1989, 136(4): 149-154. doi: [10.1049/ip-f-2.1989.0025](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1989.0025).
- [8] MILOJEVIĆ D J and POPOVIĆ B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses[J]. *IEE Proceedings F Radar and Signal Processing*, 1992, 139(1): 98-104. doi: [10.1049/ip-f-2.1992.0012](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1992.0012).
- [9] ZHANG Chunjie, LIU Yuchen, and SI Weijian. Synthetic algorithm for deinterleaving radar signals in a complex environment[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(12): 1918-1928. doi: [10.1049/iet-rsn.2020.0251](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2020.0251).
- [10] NELSON D. Special purpose correlation functions for improved signal detection and parameter estimation[C]. 1993 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Minneapolis, USA, 1993: 73-76. doi: [10.1109/ICASSP.1993.319597](https://doi.org/10.1109/ICASSP.1993.319597).
- [11] SANG Xin, HE Yonghua, and LI Yonggang. Radar signal binning based on improved SDIF algorithm[C]. IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, 2023: 203-207. doi: [10.1109/ITOEC57671.2023.10291843](https://doi.org/10.1109/ITOEC57671.2023.10291843).
- [12] LI Zhao-zhe, CUI Haihan, and XING Zhiqiang. An improved algorithm for staggered discrimination based on SDIF threshold failure[C]. IEEE 3rd International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA), Shenyang, China, 2025: 853-857. doi: [10.1109/ICIPCA65645.2025.11138531](https://doi.org/10.1109/ICIPCA65645.2025.11138531).
- [13] 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. doi: [10.11999/JEIT210982](https://doi.org/10.11999/JEIT210982).
- LIU Yan and GUO Fucheng. Deinterleaving radar pulse trains with sliding time windows[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(11): 3900-3909. doi: [10.11999/JEIT210982](https://doi.org/10.11999/JEIT210982).
- [14] CHENG Wenhai, ZHANG Quying, DONG Jiaming, *et al.* An enhanced algorithm for deinterleaving mixed radar signals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(6): 3927-3940. doi: [10.1109/TAES.2021.3087832](https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3087832).
- [15] GE Zhipeng, SUN Xian, REN Wenjuan, *et al.* Improved algorithm of radar pulse repetition interval deinterleaving based on pulse correlation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 30126-30134. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2901013](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2901013).
- [16] XIE Min, ZHAO Chuang, ZHAO Yongjun, *et al.* A novel method for deinterleaving radar signals: First - order difference curve based on sorted TOA difference sequence[J]. *IET Signal Processing*, 2023, 17(1): e12162. doi: [10.1049/sil2.12162](https://doi.org/10.1049/sil2.12162).
- [17] 贾金伟, 刘利民, 韩壮志, 等. 基于重频滑变的抗分选信号设计[J]. 电光与控制, 2023, 30(4): 111-115. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2023.04.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2023.04.021).  
JIA Jinwei, LIU Limin, HAN Zhuangzhi, *et al.* Anti-sorting signal design based on pulse repetition interval slide[J]. *Electronics Optics & Control*, 2023, 30(4): 111-115. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2023.04.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2023.04.021).
- [18] 贾金伟, 刘利民, 韩壮志, 等. 基于压缩感知的抗SDIF分选射频隐身信号设计及回波信号处理[J]. 航空学报, 2023, 44(13): 327934. doi: [10.7527/S1000-6893.2022.27934](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2022.27934).  
JIA Jinwei, LIU Limin, HAN Zhuangzhi, *et al.* Design of anti-SDIF radio frequency stealth signal and echo signal processing technology based on compressed sensing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(13): 327934. doi: [10.7527/S1000-6893.2022.27934](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2022.27934).
- [19] TAO Jianwu, YANG Chengzhi, and XU Chengwei. Estimation of PRI stagger in case of missing observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(11): 7982-8001. doi: [10.1109/TGRS.2020.2985768](https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2985768).
- [20] LIU Zhangmeng, KANG Shiqian, and CHAI Xianming. Automatic pulse repetition pattern reconstruction of conventional radars[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2021, 15(5): 500-509. doi: [10.1049/rsn2.12053](https://doi.org/10.1049/rsn2.12053).
- [21] 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. doi: [10.16798/j](https://doi.org/10.16798/j)

- issn.1003-0530.2021.11.007.
- KANG Shiqian and LIU Zhangmeng. Automatic reconstruction of regular radar pulse repetition patterns based on interleaved pluse train[J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(11): 2069–2076. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2021.11.007](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2021.11.007).
- [22] 谢敏, 赵闯, 胡德秀, 等. 联合DTOA一阶差分曲线和相关分析的参差信号分选方法[J]. 电子学报, 2023, 51(11): 3271–3281. doi: [10.12263/DZXB.20220799](https://doi.org/10.12263/DZXB.20220799).
- XIE Min, ZHAO Chuang, HU Dexiu, *et al.* Signal sorting method for jagger PRI radar based on first-order difference curve of DTOA and correlation analysis[J] *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(11): 3271–3281. doi: [10.12263/DZXB.20220799](https://doi.org/10.12263/DZXB.20220799).
- [23] ZHANG Chunjie, LIU Yuchen, and SI Weijian. Pri modulation recognition and sequence search under small sample prerequisite[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2023, 34(3): 706–713. doi: [10.23919/JSEE.2023.000007](https://doi.org/10.23919/JSEE.2023.000007).
- [24] 张春杰, 青松, 邓志安, 等. 一种针对驻留转换雷达的信号分选算法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(6): 1925–1934. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2024.06.10](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.06.10).
- ZHANG Chunjie, QING Song, DENG Zhian, *et al.* Signal deinterleaving algorithm for dwell and switch radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024, 46(6): 1925–1934. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2024.06.10](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.06.10).
- [25] XIE Min, ZHAO Chuang, HUANG Jie, *et al.* Deinterleaving method for radar signals with dwell and switch pulse repetition intervals in a prior unknown scenario[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(6): 9307–9323. doi: [10.1109/TAES.2024.3440277](https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3440277).
- [26] 贾金伟, 韩壮志, 刘利民, 等. 基于参差信号组合设计的交错掩护抗分选射频隐身信号设计原理[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(5): 102–110. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2024.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2024.05.014).
- JIA Jinwei, HAN Zhuangzhi, LIU Limin, *et al.* Design principle of staggered shielding and anti-sorting RF stealth signal based on staggered signal combination[J]. *Fire Control & Command Control*, 2024, 49(5): 102–110. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2024.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2024.05.014).
- [27] 张保群. 一种抗SDIF分选的脉冲重复间隔参差设计方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(9): 87–91, 114. doi: [10.11809/scbgxb2016.09.021](https://doi.org/10.11809/scbgxb2016.09.021).
- ZHANG Baoqun. A design method of PRI stagger countering the SDIF sorting algorithm[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(9): 87–91, 114. doi: [10.11809/scbgxb2016.09.021](https://doi.org/10.11809/scbgxb2016.09.021).
- [28] XIE Min, HUANG Jie, ZHAO Chuang, *et al.* Radar signal deinterleaving based on markov chains in scenarios known a priori[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 3509205. doi: [10.1109/LGRS.2024.3449086](https://doi.org/10.1109/LGRS.2024.3449086).

### 作者简介

谢 敏, 博士生, 主要研究方向为电子信号分析、雷达信号分选。

黄 洁, 教授, 主要研究方向为电子信号分析、目标识别与信息融合。

赵 闯, 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。

胡德秀, 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。

朱健东, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理、电子对抗和反无人机技术。

(责任编辑: 于青)