

基于序列关联的参差信号分选算法

王俊岭* 黄琰璟

(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

摘要: 针对复杂环境下常规直方图信号分选算法对于参差信号分选能力不佳的问题, 该文提出一种基于脉冲间隔与单个脉冲关联的直方图算法。该算法根据脉冲间隔与单个脉冲的对应关系建立了脉冲间隔分布矩阵(PIDM), 然后通过对PIDM行列的累加计算, 得到一种新的直方图, 该直方图可避免传统脉冲重复间隔(PRI)变换算法在分选参差信号时对于参差信号帧周期过多抑制的缺陷, 且能够通过PIDM对辐射源脉冲串进行序列提取, 进而得到参差子序列的周期值。仿真分析结果表明, 在不增加计算复杂度的情况下, 该算法对存在多部参差辐射源和固定重频辐射源的混合场景仍可保持良好的分选效果。

关键词: 直方图信号分选; 参差PRI分选; 脉冲间隔分布矩阵

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)04-1145-09

DOI: 10.11999/JEIT191030

Stagger Pulse Repetition Interval Pulse Train Deinterleaving Algorithm Based on Sequence Association

WANG Junling HUANG Yanjing

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: For the conventional histogram signal deinterleaving algorithm's drawback of stagger signal, a histogram algorithm based on corresponding of pulse interval and single pulse is proposed. This algorithm utilizes the corresponding of pulse pair interval and single pulse to get a matrix named Pulse Interval Distribution Matrix (PIDM), and a novel histogram is obtained via cumulating row of the matrix. This histogram can avoid the suppressing of frame period of staggered pulse train caused by Pulse Repetition Intervals (PRI) transform algorithm when staggering signal deinterleaving, and can extract the subsequence of pulse train through PIDM. Simulation results show the algorithm has excellent performance on environment including multi staggered pulse trains with multi-fixed pulse trains under the circumstance of without adding the complexity of calculating.

Key words: Histogram signal deinterleaving; Staggered PRI pulse train deinterleaving; Pulse Interval Distribution Matrix(PIDM)

1 引言

雷达信号分选一直是雷达通信与电子战主要研究的重点问题之一, 目的是将接收到的脉冲串分离开, 得到环境中的雷达辐射源信息。信号分选主要包括基于脉冲调制参数脉宽(Pulse Width, PW)、脉冲到达角(Direction Of Arrival, DOA)、射频频率(Radio Frequency, RF)以及时域波形或频谱^[1-4]等脉内参数的预分选和基于脉冲串的各个脉冲到达

时间(Time Of Arrive, TOA)的主分选。

主分选算法的主要目的是通过对脉冲对间隔的处理以得到待处理脉冲串中的各个辐射源的脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI)与PRI的调制形式。对脉冲对间隔的处理方法中, 有许多经典算法如累计差值直方图算法^[5](Cumulative Differences Histogram, CDIF)和以CDIF为基础的序列差值直方图算法^[6](Sequential Differences Histogram, SDIF)。相比CDIF方法, SDIF实现简单, 提高了PRI分选效率, 在工程上有大量的应用, 但是SDIF直方图中过门限的峰值仅为可能的PRI值, 需额外进行谐波检查, 在电磁环境复杂时, 谐波检查会增加虚警率。Nishiguchi等人^[7]为解决上述两种算法存在的谐波抑制方面的不足, 基于时延

收稿日期: 2019-12-24; 改回日期: 2020-10-26; 网络出版: 2020-12-10

*通信作者: 王俊岭 mailwj1@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61701154, 61401024)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701154, 61401024)

自相关的原理,为直方图中加入了相位因子,提出了PRI变换算法。文献[8-10]通过改进PRI变换算法中相位因子和PRI箱的结构,提高了对抖动信号和部分脉冲丢失信号的分选能力。但是由于PRI算法及其改进算法在PRI变换中加入了相位因子,导致在分选参差信号时,参差信号的帧周期被抑制,以至于难以被分选。文献[11-13]针对参差信号帧周期的分选问题,对PRI变换算法和序列抽取算法进行了结合,减少环境复杂度,能在提取参差序列后对环境进行PRI判断。根据现有算法的原理可知,现有算法大都致力于找到一个脉冲串的特征,从而忽略了单个脉冲之间的关联,本文通过建立脉冲对间隔(ΔT)与单个脉冲的联系,在扩展关联法和特征向量法^[14-16]的基础上,给出了一种脉冲间隔分布矩阵的建立方法。通过对该矩阵的处理,可在抑制谐波和参差帧周期提取的同时,提取出辐射源对应的脉冲串,鉴别PRI调制特征以及提取参差信号子序列。由于计算次数为脉冲对的个数,该方法的计算复杂度与PRI变换算法保持一致。

本文的结构如下,在第2节对信号分选及参差信号模型进行介绍,对PRI变换和直方图算法的固有缺陷进行分析。在第3节介绍脉冲间隔分布矩阵的建立方式和性质,整体算法流程、门限确定和算法检测性能分析。第4节给出算法的仿真结果。第5节是对全文的总结。

2 信号分选模型及PRI变换算法

本节主要介绍基于脉冲串TOA分选的信号主分选模型,并分析基于PRI变换的方法在参差信号分选中的局限性。

2.1 信号主分选及参差信号模型

对于一个由 N 个脉冲构成的脉冲串,在只考虑脉冲TOA时,可以定义为如式(1)的形式

$$PT(t) = \sum_{n=1}^N \delta(t - t_n) \quad (1)$$

其中, t_n 为第 n 个脉冲的TOA, $\delta(t)$ 为冲激响应函数。

信号分选的目的是分选脉冲串里的具有一定相关性的脉冲,获得脉冲串中的雷达PRI调制参数。

对参差信号,其PRI可以看作多个固定PRI脉冲序列的叠加,参差信号的帧周期定义为

$$T_{\text{frame}} = \sum_{i=1}^H T_{\text{PRI}_i} \quad (2)$$

每一个帧周期为一个参差子序列循环,其示意图如图1所示。

2.2 基于 ΔT 直方图的信号分选算法

ΔT 直方图算法是一种提取辐射源PRI统计特性的有效方法。CDIF算法为典型的基于 ΔT 直方图的方法,其中的累积差值是指:算法先计算两个相邻脉冲之间的差值,即1阶直方图,并对结果进行门限检测。之后对相隔1个脉冲的脉冲对进行统计,称为2阶直方图,并累积到原1阶直方图上,再次进行门限检查。SDIF是对CDIF的优化算法,在计算1阶以上的直方图时,不与1阶直方图合并,而是产生1个独立的直方图,并对所有直方图进行独立分析。然而,上述两种算法本质上均是基于信号序列的自相关函数进行分析,存在序列谐波干扰。对此,研究人员提出通过PRI变换算法,加入相位因子的方式来抑制谐波^[7]

$$D(\tau) = \sum_n^{N-1} \sum_m^{n-1} \delta(\tau - t_n + t_m) \exp \left[\frac{2\pi j t_n}{t_n - t_m} \right] \quad (3)$$

其中, t_n, t_m 为第 n 和第 m 个脉冲的脉冲到达时间,相位因子为 $\exp[2\pi j t_n / (t_n - t_m)]$ 。对于一个固定重复频率的脉冲串,脉冲到达时间可表示为

$$t_n = nT_{\text{main}} + t_0 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),则有

$$D(\tau) = (N-1)\delta(\tau - T_{\text{main}}) \exp[2\pi j(n + t_0)] + \sum_{l=2}^{N-1} \delta(\tau - T_{\text{main}}l) \frac{\sin(N\pi/l)}{\sin(\pi/l)} \cdot \exp \left(\frac{\pi j(N-1+2t_0)}{l} \right) \quad (5)$$

而对于不加入相位因子的PRI变换式为

$$C(\tau) = (N-1)\delta(\tau - T_{\text{main}}) + \sum_{l=2}^{N-1} (N-1)\delta(\tau - nT_{\text{main}}) \quad (6)$$

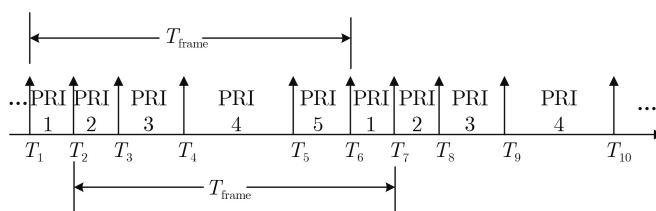


图1 参差PRI脉冲序列

对于 l 次谐波，幅度为 $\sum_{n=0}^{N-l-1} \exp(2\pi j n/l)$ ，当每一项相加后，会使对应直方图的 l 次谐波位置的幅度下降，此时通过设置合理的门限函数就能滤去谐波。比较式(5)和式(6)可得，加入了相位因子的 $D(\tau)$ 比 $C(\tau)$ 的 l 次谐波幅度从 $(N-1)$ 降低了 $\frac{\sin(N\pi/l)}{\sin(\pi/l)} \leq \frac{l}{2}$ 倍，达到抑制谐波的效果。

此外，PRI变换算法中还引入了PRI箱的概念，是指 ΔT 直方图PRI的量化点，参数包括PRI箱的中心和范围。之后的改进算法对PRI箱的设置方式进行了优化，增加了对抖动信号的检测能力。

同理，对于参差PRI信号，其PRI变换可由式(2)代入式(3)得到

$$D(\tau) = \delta(\tau - T_{\text{frame}}) \exp(2\pi j t_0) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(2\pi j t_n) + O_1(N^2) + O_2(N^2) \quad (7)$$

其中，式中第1项为参差帧周期的幅度表达式， $O_1(N^2)$ 是谐波余项， $O_2(N^2)$ 是 $\text{mod}(n-m, H) \neq 0$ 的余项，因为这些余项都不落在参差信号的帧周期内，所以可以不考虑。

对比式(5)的周期和式(7)帧周期的幅度项可知，对于固定重频信号的主值周期幅度

$$\sum_{n=0}^{N-1} \exp(2\pi j t_n) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp(2\pi j T_{\text{main}_n}) = N \quad (8)$$

对于参差信号

$$\sum_{n=0}^{N-1} \exp(2\pi j t_n) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp[2\pi j (T_{\text{frame}_n} + T_{\text{PRI}_n})] \leq N \quad (9)$$

式(9)中，当且仅当 T_{PRI_n} 全部为0或帧周期的整数倍时，取等号。而对于一般的情况，参差信号子序列在单位圆上分布得越均匀，该幅度值越小。当序列PRI变化过大时，每一个PRI箱均无法累积到高于检测门的幅度值。而对参差子序列相差很大的参差信号，不同的子序列会落在不同PRI箱内，导致参差子序列信号因单个PRI箱的累积幅度值不够而不能被检出。另外，相位因子对参差信号的帧周期有抑制作用，且抑制效果和谐波抑制效果相同，参差信号帧周期的幅度和谐波受到的抑制效果类似，若在这种情况下参差信号的幅度超过了门限函数，则谐波信号也会被检出，相位因子的谐波抑制作用就失去了意义。

由于无法直接通过PRI变换算法的结果来获取辐射源的调制信息，所以需要进行脉冲串序列提取。序列提取的传统解决办法是先选定头脉冲，然后根据

提取出的PRI帧周期序列之间的关系来确定整体脉冲序列。然而，对于参差PRI信号，通过单一头脉冲只能提取参差信号部分脉冲，而且在参差子序列周期未知的情况下，很难提取参差辐射源整体脉冲。这使得传统方法的脉冲序列提取方法变得极为复杂。

3 一种基于PIDM的PRI分选方法

为解决PRI变换算法存在的参差信号帧周期抑制和序列提取困难的问题，考虑使用脉冲间隔分布矩阵(Pulse Interval Distribution Matrix, PIDM)来克服上述缺点。

3.1 PIDM计算与PRI分选方法

PIDM是一个 $N \times K$ 的矩阵，矩阵中 (k, n) 元素的表达式为

$$\text{PIDM}(k, n) = \sum_{i=1}^N \delta(\tau_k - t_n + t_i) \quad (10)$$

其中， N 为一个分选帧的脉冲数， k 为PRI箱的编号， n 为脉冲编号。则 (k, n) 元素为第 n 个脉冲与其它脉冲的时间间隔为 τ_k 的次数统计值。

将式(4)定义的单一的固定重频脉冲串，代入式(10)可得

$$\text{PIDM}(k, n) = \begin{cases} 2, & \tau_k = lT_{\text{main}}, l = 1, 2, \dots \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)忽略了在脉冲串的边界处幅度值为1的元素。

图2(a)给出了固定重频脉冲串按式(10)的计算结果，其中白色幅度值为2，黑色代表幅度值为0。由式(11)可知，当 $l=1$ 时， $\tau_k = T_{\text{main}}$ ，为该脉冲串的PRI值，而 $\tau_k = lT_{\text{main}} (l \geq 2)$ 处存在谐波PRI值，需进一步进行谐波抑制处理。

根据2.2节对直方图阶数的介绍，可知高阶直方图比低阶直方图更远的两个脉冲的时间差，所以谐波总是出现在高阶直方图中。在计算低阶直方图中的脉冲间隔时，当 (k, n) 处的幅度值被累加到2时，给第 n 个脉冲增加抑制标记，不参与更高阶直方图的计算，该处理方式可以抑制简单环境下的谐波。不过，当环境存在干扰脉冲时，将会提前使某个脉冲在更小的PRI值处幅度值到达2，则会使得真实PRI处即更高阶直方图的时间间隔时的该脉冲被抑制。具体处理时可使用抑制谐波矩阵 \mathbf{M} 和不抑制谐波的矩阵 \mathbf{M}_t ，当计算 \mathbf{M}_t 的低阶直方图的时间间隔时，若幅度值超过了2，说明存在干扰脉冲，则取消该脉冲的抑制标记，使之可以继续参与高阶直方图的时间间隔的计算。由此所得结果如图2(b)所示，可以看到高次谐波已被抑制。对于参差信号(PRI为[0.9, 1.7, 1.9]，单位已归一化)，采用上述方法计算PIDM并进行谐波抑制后，所得结

果如图2(c)所示(其中,灰色的点幅度值为1)。由于该谐波抑制算法只使用了统计的方法,可避免参差信号的帧周期被错误抑制的问题。

对于图2(c),为提取脉冲串的主周期,算法统计矩阵 M 每一行的幅度值为2(以下称为主周期行)的个数。图3(a)给出了图2(c)在PRI箱的对应统计结果,可以看到该脉冲串过门限的周期为4.5,与设置PRI参数一致。

为获取脉冲串的调制形式,将 M_t (而不是 M ,可以保证提取的脉冲大于本应存在的脉冲数)矩阵中的 $\tau_k = 4.5$ 行中幅度值大于2的所有脉冲提取出来,易知,这些脉冲为构成周期为4.5的所有脉冲和干扰脉冲。然后,将 M_t 中未被提取出的脉冲的列置零后,再次统计每一行幅度值大于1的元素(以下称为子序列行)的个数,计算直方图结果如图3(b)所示。由参差子序列的排列方式可知,统计出的子序列行由参差子序列的值和相邻子序列相加产生。由图3(b)可知,参差信号会在比帧周期小的位置出现峰值,对这些峰值进行门限检测便可提取出参差信号的子序列。而对固定重频脉冲序列,比主周期行直方图中提取出的周期小的PRI箱中不会出现过门限峰值。由此可获得主周期行直方图中提取出周期的PRI调制形式。

综上所述,可以分选参差信号的帧周期和具体

的子序列,克服了PRI变换的两个缺陷。

3.2 算法流程

算法整体分为3个部分,算法框图如图4所示,可分为以下3个关键步骤:

(1) 谐波抑制:计算PIDM,并由此进行主周期分选;

(2) 序列提取与门限检测:计算检测门限,并根据检测门限提取脉冲序列与子序列;

(3) 参差子序列检测:辐射源调制方式判断与参数提取。

具体步骤如下:

(1) 谐波抑制

本部分对应图4的步骤(1)部分,主循环和抑制谐波具体算法流程如下:

(a) 初始参数,脉冲抑制标志 $\text{Flag}(N)$,输入参数为 M 和 M_t ;

(b) 计算 $\Delta t = t_n - t_m$,找到 $\Delta t \in \tau_k$;

(c) 计算 M_t , $M_t(k, m) = M_t(k, m) + 1$, $M_t(k, n) = M_t(k, n) + 1$;

(d) 若 $\text{Flag}(m) = 0$ 且 $\text{Flag}(n) = 0$,则 $M(k, m) = M(k, m) + 1$, $M(k, n) = M(k, n) + 1$;

(e) 若 $M(k, m) = 2$ 且 $k > \text{PRI}_{\min}$,则该脉冲 n 的标志位 $\text{Flag}(m) = 1$;同理, $M(k, n) = 2$ 且 $k > \text{PRI}_{\min}$, $\text{Flag}(n) = 1$;

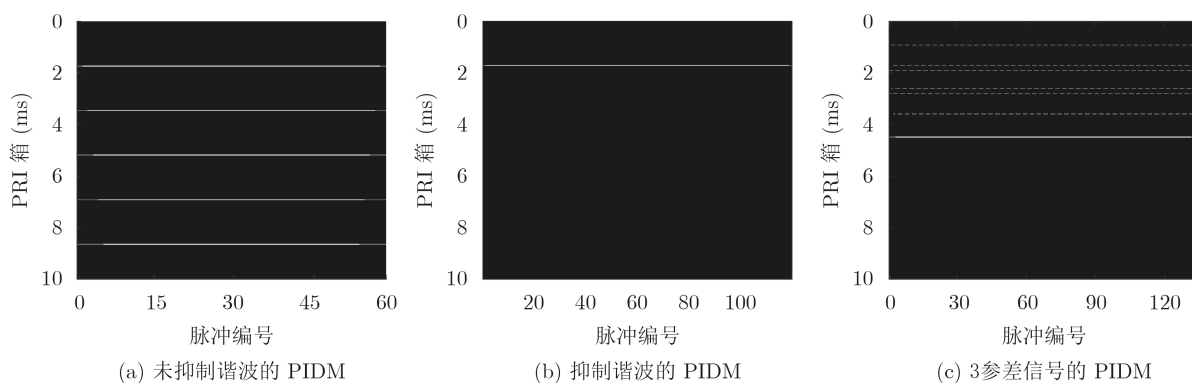


图2 不同信号环境下的PIDM

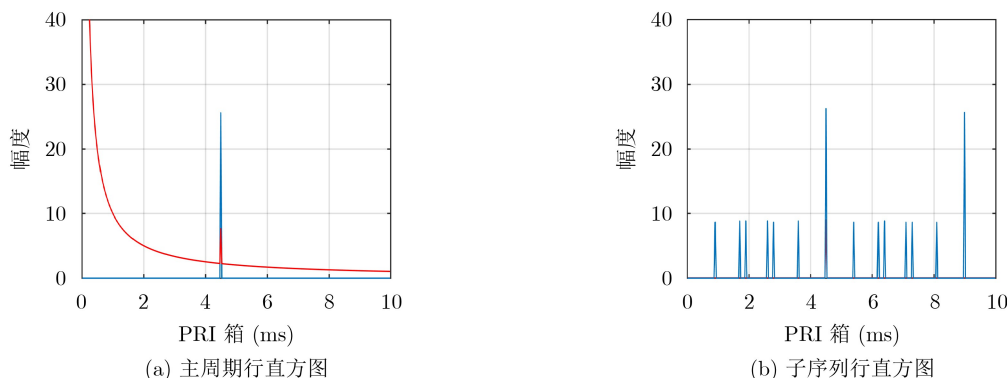


图3 参差序列直方图

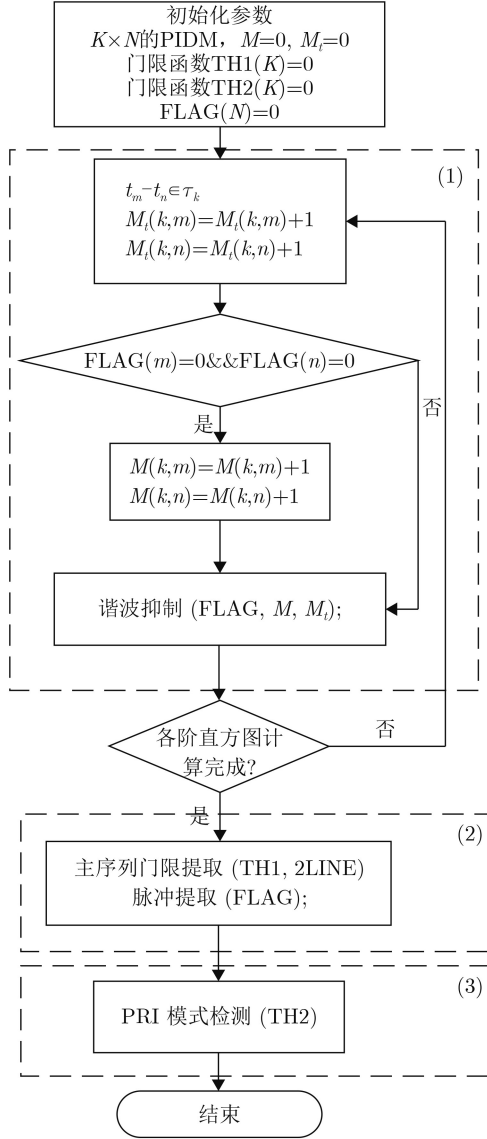


图4 算法整体框图

(f) 若 $M_t(k, m)$ 或 $M_t(k, n) > 2$, 则两个脉冲的标记 $Flag(n)=0, Flag(m)=0$ 。

(2) 序列提取与门限检测

本部分对应图4的(2)部分, 序列提取是根据主周期行直方图提取出的周期找到对应于该周期的脉冲。在脉冲间隔循环计算后, 此时进行门限检测和序列提取。具体流程为:

(a) 计算 M 矩阵中每个PRI箱的值 > 2 的脉冲数。

(b) 对(2)(a)的结果进行主周期行门限检测, 得到所有过门限的PRI值。

(c) 对矩阵 $M_t=1$ 的脉冲对应的PRI值进行序列提取, 认为这些脉冲周期值为(2)(b)检测出脉冲的周期值。

(d) 对(2)(c)的结果进行子序列行门限检测, 参差序列检测后得到分选结果。

直方图的门限检测函数是获取子序列行直方图

和主周期行直方图的前提。在PRI变换算法中, 使用了3个门限, 分别是噪声门限、谐波门限以及脉冲密度门限。根据PRI算法门限设置原理, 可相应设计主周期行直方图门限值。具体设置方法如下。

主周期行直方图门限设置: 本文所提算法中, 计算主周期行直方图的目的是分选出脉冲流中的信号主周期。在主周期行处理中脉冲密度门限和PRI变换相同, 由于谐波抑制方式的不同, 计算谐波门限通过 M_t 计算。而噪声门限与PRI变换中的稍有不同。

因此, 主周期行门限设置如式(12)所示

$$TH_{main} = \max \left\{ (\alpha[(S_T - \tau_k)bk\rho]^2, \beta \frac{S_T}{\tau_k}, \gamma M_t) \right\} \quad (12)$$

其中, 函数 $\max\{\cdot\}$ 表示求集合内最大值, 第1项为噪声门限, 第2项为脉冲密度门限, 第3项为谐波门限。 b_k (PRI箱的宽度) 和 S_T (脉冲串总时长) 均为常数 τ_k 为PRI箱的中心, ρ 为脉冲密度, α, β 和 γ 均为常量, 根据仿真测试, 分别设置为1.00, 0.42和0.07。

子序列行直方图门限设置: 根据前文分析, 子序列行直方图中的脉冲为构成辐射源脉冲串的脉冲加干扰脉冲, 门限函数需要包括噪声门限。此外, 由于干扰脉冲是其它辐射源的脉冲, 会在子序列行直方图中增加其他辐射源主周期的干扰, 所以门限函数还需加入谐波门限。

子序列行直方图和主周期行直方图的区别在于干扰脉冲数的不同, 干扰脉冲对的数目来源于被提取的脉冲 (C) 和整体脉冲串 (N) , 噪声脉冲对个数为 $N(N-C)$ 。在一个脉冲固定位置的情况下, 单个脉冲出现在任意一个PRI箱的概率为 $2b_k/T$ 。由此可得噪声均值和方差

$$\left. \begin{aligned} E(X) &= \frac{2b_k}{S_T} \times (N - C)C \\ D(X) &= \frac{2b_k}{S_T} \left(1 - \frac{2b_k}{S_T} \right) \times (N - C)C \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由于 b_k 和 T 为固定值, 经过序列提取后, $E(X)$ 与 $D(X)$ 为常数。噪声门限为

$$TH_{Sub_N} = E(X) + \alpha' D(X) \quad (14)$$

谐波门限与主周期行直方图的谐波门限一致。根据式(12)和式(14), 可得子序列行直方图的门限为

$$TH_{Sub} = \max \{ E(X) + \alpha' D(X), \gamma' M_t \} \quad (15)$$

(3) 参差子序列检测

本部分对应图4的(3)部分, 在子序列行提取后, 根据前文分析, 出现的门限为子序列周期、相邻子序列和的周期, 以及两个以上相邻子序列的周期之和。对参差数为 H 的参差序列, 在参差序列帧

周期内 $H(H-1)$ 个超过门限的子序列行。若要逐个对累加出的周期进行排除,需要 $O(H^4)$ 的时间。所以需利用参差序列的性质减少计算时间。

需要排除的周期一定是由真实的相邻序列累加得到,因此可从序列的最小值开始检索,找到互不能靠相加得到的子序列,这些子序列一定是所有子序列中的一部分。接着,删除由这些被提取序列相加得到的序列。然后在对下一个未被删除的子序列行值进行判断,若与之前的序列相加刚好为帧周期,则输出。否则在进行序列删除操作后,继续对下一个未被删除的进行同样的判断,直到序列相加等于帧周期。通过这种方法,时间代价可降为 $O(H^2 \lg H)$ 。

3.3 算法性能分析

算法的主体部分需对每一个脉冲对分配PRI箱,需要使用 $O(N^2)$ 的时间,脉冲抑制操作时间代价为 $O(1)$,把PIDM转化成主周期行直方图是用 $O(KN)$ 的时间,脉冲提取使用了 $O(N)$ 的时间,PIDM转化成子序列行直方图也使用了 $O(KN)$ 的时间,参差信号参数提取使用了 $O(H^2 \lg H)$ 。所以,由于参差数 $H \ll N$,所以算法整体的时间代价为 $O[(K+N)N]$,在通常情况下, K 与 N 的数量级相同,所以,可以认为该算法运算时间与常规PRI变换一致。

算法所需存储空间为: $K \times N$ 的矩阵2个用于存储PIDM, $1 \times N$ 的矩阵辐射源个数用于脉冲谐波标记, $1 \times K$ 的矩阵辐射源个数用于存储主周期行直方图。

4 仿真结果

为验证本文提出方法的有效性,表1对比了在不同信号环境下采用常规PRI变换^[7]和变换时间点的改进PRI变换^[8]与本文算法的对比分析结果。采用本文提出的方法可以解决参差信号的帧周期提取问题以及实现参差子序列的提取。

图5,图6则给出了以场景编号5的信号环境为例,各个算法的仿真结果,4个辐射源的参数为:(1)PRI为 $\sqrt{2}$ 的固定重频信号;(2)PRI为 $\sqrt{3}$ 的固定重频信号;(3)子序列为[0.9, 1.65, 1.95]的3参差PRI信号;(4)子序列为[0.6, 0.7, 1, 1.1, 1.4]的5参差PRI信号。以下为3种分选算法的分选结果分析。

图5为文献^[7]和文献^[8]中的PRI分选算法所得结果,可以看到,两个固定重频的信号能够过门限,而对于参差信号,由于相位因子对参差帧周期的抑制作用,检测能力有限。

图5(c)给出了采用本文算法所得的主周期行直方图,部分序列提取的结果则如图6所示,由图6可知,本文所用算法可以同时检测固定重复频率信号和参差信号。具体的分析过程如下:

由于图6(a)的主周期内没有过门限的PRI箱值,可知图6(a)为固定重复频率信号。对于图6(b),过门限的PRI值有6个,分别为:{0.90, 1.65, 1.95, 2.55, 2.85, 3.60},根据对子序列行可能出现的数目分析,可得到参差信号数为3个。根据参差序列提取算法,0.90, 1.65, 1.95不能靠其他可能的子序列相加得到,为子序列的一部分,而2.55,

表1 不同信号环境下对比结果

场景编号	信号环境	文献 ^[7]	文献 ^[8]	本文算法
1	2个固定重频信号	2/2	2/2	2/2
2	1个7参差信号	0/1	0/1	1/1, 并得到参差子序列
3	2个固定重频和一个3参差信号	2/3	3/3	3/3, 并得到参差子序列
4	3个固定重频和一个4参差信号	3/4	3/4	4/4, 并得到参差子序列
5	2个固定重频、1个3参差信号和1个5参差信号	2/4	2/4	4/4, 并得到参差子序列

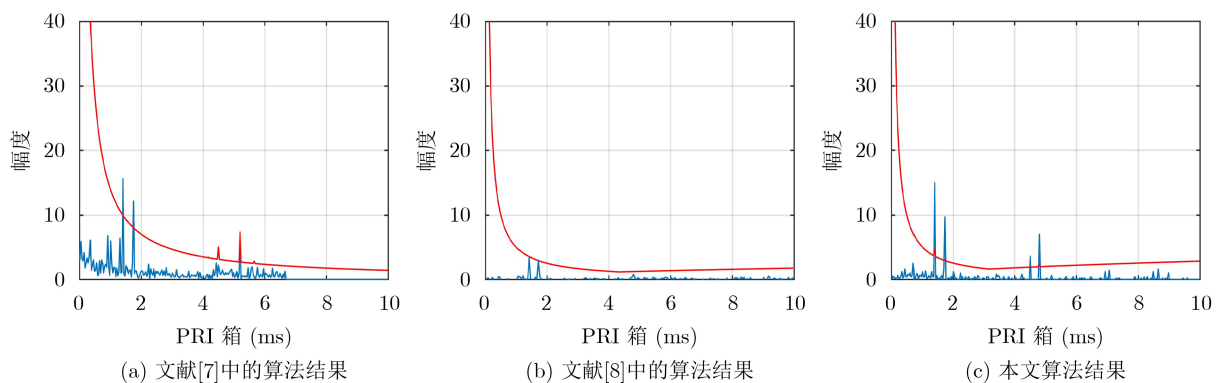


图5 对比算法处理结果

2.85, 3.60可由0.90, 0.165, 1.95相加得到。可推知2.55, 2.85, 3.60应为被排除的PRI值, 并且由 $0.90+1.65+1.95=4.50$, 所以, 该序列为帧周期为4.5, 子序列为0.90, 1.65, 1.95的3参差序列。

为验证算法在复杂场景下的稳定性, 在包含参差信号的5种不同信号组合模式的随机信号环境下进行了1000次蒙特卡罗仿真实验, 在每次蒙特卡罗仿真实验中, 每个组合模式中参差信号参数及固定重复频率信号参数均随机生成。表2给出了在3种不同指标要求下, 本文提出算法与参照算法的分选成功概率对比情况。其中, 3种指标要求分别为: 能正确分选目标信号并且无任何重频提取错误 P_{resolv} 、在允许存在若干错误重频的基础上能够全部分选出目标信号 P_{distc} 、能分选出目标信号并且参差子序列的计算结果正确 P_{distcSTG} 。此外, 由于文献[7]和文献[8]中的算法无参差信号检测功能, 所以当辐射源设置中有固定重频信号时, 若算法能够分选出所有固定重频的信号就会标记为该方法分选成功。

由表2可见, 对不同参差重频信号和固定重频混合场景, 本文算法均能有效地分选出参差信号, 且在环境中辐射源增加时, 本方法相比传统方法仍能够保持较高的分选概率。同样由表2可知, 在信号环境中的辐射源个数增加时, 所提出方法和参照算法的性能均存在一定下降, 但本文算法受辐射源间脉冲干扰的影响相对较小, P_{distc} 仍能保持在90%以上, 参差子序列的高提取概率也验证了本文

算法在子序列提取方面的有效性。必须指出的是, 在计算表2的分选概率时, 本文算法所统计的是所有信号分选均无错误的分选概率, 而其他算法则不考虑参差信号是否能正确分选, 而只考虑了信号环境中固定重复频率信号的分选概率, 因此表2中本文算法所得分选概率的实际指标要求相对更为严格。

为验证3个算法在相同信号环境和指标要求下的信号分选性能, 在脉冲丢失概率为5%的场景下, 图7给出了1000次蒙特卡罗仿真对比验证试验的试验结果。由图7(a)和图7(b)可知, 随着辐射源个数的增加, 所有算法的检测概率均有一定降低。不过, 由于本文算法是基于脉冲对的关联方法, 脉冲丢失对算法结果影响较小, 因此本文算法在辐射源递增时仍能保持较高的固定重复频率信号检测概率, 相比要优于参照算法。

综上所述, 仿真结果表明, 本文算法在有参差信号存在的情况下相对传统算法具有更好的检测性能与稳定性, 同时还具备检测参差信号具体子序列的优势。

5 结束语

本文针对复杂环境下的PRI分选问题, 提出了一种基于PIDM的直方图算法。该方法不仅可避免在参差信号存在时传统PRI分选方法抑制参差信号帧周期的缺陷, 而且通过脉冲序列信息的利用, 还可提取参差信号子序列, 解决了传统算法难以检测

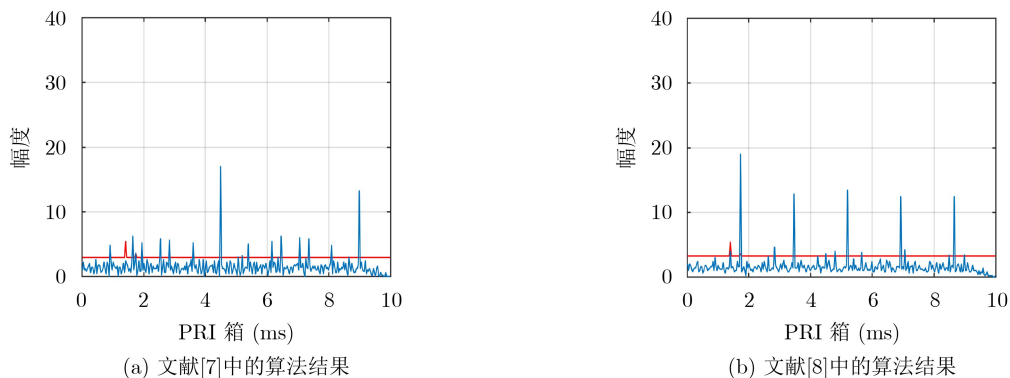


图6 被分选出的部分辐射源的子序列行直方图

表2 在随机信号环境中本文算法/文献[7]/文献[8]分选成功概率(%)

信号环境	P_{resolv}	P_{distc}	P_{distcSTG}
1参差信号	90.1/-/-	100/-/-	99.7/-/-
1参差1固定	89.5/93.4/85.7	100/93.4/85.7	98.2/-/-
1参差2固定	90.9/48.1/73.0	100/49.8/96.0	94.2/-/-
2参差2固定	82.7/18.4/70.8	98.6/20.2/94.8	91.3/-/-
2参差3固定	48.6/2.7/54.9	97.5/4.9/96.4	80.7/-/-

注: -表示所使用算法无该功能。

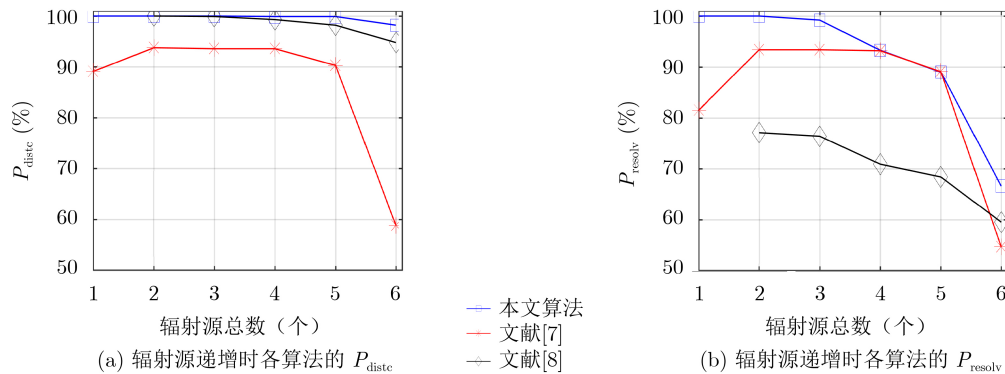


图7 不同辐射源个数下固定重频信号检测概率

信号参数的问题。分析表明, 仿真结果验证了本文算法的有效性和稳定性。

参考文献

- [1] WILEY R G, 吕跃广, 全寿文, 王胜开, 等译. 电子情报(ELINT)——雷达信号截获与分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 246–252.
WILEY R G, LÜ Yueguang, QUAN Shouwen, WANG Shengkai, *et al.* translation. ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 246–252.
- [2] 李合生, 韩宇, 蔡英武, 等. 雷达信号分选关键技术研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(12): 2035–2040. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2005.12.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2005.12.018).
LI Hesheng, HAN Yu, CAI Yingwu, *et al.* Overview of the crucial technology research for radar signal sorting[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(12): 2035–2040. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2005.12.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2005.12.018).
- [3] 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): 88–94, 100. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2016.12.021](https://doi.org/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): 88–94, 100. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2016.12.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2016.12.021).
- [4] 张天骐, 张华伟, 刘董华, 等. 基于区域增长校正的频域盲源分离排序算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 580–587. doi: [10.11999/JEIT180386](https://doi.org/10.11999/JEIT180386).
ZHANG Tianqi, ZHANG Huawei, LIU Donghua, *et al.* Frequency domain blind source separation permutation algorithm based on regional growth correction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 580–587. doi: [10.11999/JEIT180386](https://doi.org/10.11999/JEIT180386).
- [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. doi: [10.1049/ip-f-2.1989.0025](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1989.0025).
- [6] MILOJEVIC D J and POPOVIC 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).
- [7] NISHIGUCHI K and KOBAYASHI M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 407–421. doi: [10.1109/7.845217](https://doi.org/10.1109/7.845217).
- [8] MAHDAVI A and PEZESHK A M. A fast enhanced algorithm of PRI transform[C]. The 6th International Symposium on Parallel Computing in Electrical Engineering, Luton, UK, 2011: 179–184. doi: [10.1109/PARELEC.2011.20](https://doi.org/10.1109/PARELEC.2011.20).
- [9] LIU Yanchao and ZHANG Qunying. Improved method for deinterleaving radar signals and estimating PRI values[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(5): 506–514. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0516](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0516).
- [10] KOCAMIŞ M B, TORUN O, ABACI H, *et al.* Deinterleaving for radars with jitter and agile pulse repetition interval[C]. The 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Antalya, Turkey, 2017: 1–4. doi: [10.1109/SIU.2017.7960412](https://doi.org/10.1109/SIU.2017.7960412).
- [11] 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).
- [12] 关欣, 朱杭平. 基于序列时延相关性的PRI变换改进算法[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(1): 49–54. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2018.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2018.01.008).
GUAN Xin and ZHU Hangping. An improved algorithm for PRI transform based on coherence of time delay sequence[J]. *Radar Science and Technology*, 2018, 16(1): 49–54. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2018.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2018.01.008).
- [13] 陈涛, 王天航, 郭立民. 基于PRI变换的雷达脉冲序列搜索方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(6): 1261–1267. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.06.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.06.12).
CHEN Tao, WANG Tianhang, and GUO Limin. Sequence searching methods of radar signal pulses based on PRI

- transform algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(6): 1261–1267. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.06.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.06.12).
- [14] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00060).
- [15] 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. doi: [10.11999/JEIT170793](https://doi.org/10.11999/JEIT170793).
- LIU Zheng, GAO Chao, and LI Yue. 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. doi: [10.11999/JEIT170793](https://doi.org/10.11999/JEIT170793).
- [16] SHAHHOSEINI H S, NASERI A, and NADERI M. A new matrix method for pulse train identification: Implementing by systolic array[C]. The 11th European Signal Processing Conference, Toulouse, France, 2002: 1–4.
- 王俊岭: 男, 1982年生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、雷达探测与成像、双基地雷达探测.
- 黄琰璟: 男, 1995年生, 硕士, 主要研究方向为雷达信号处理、无线电侦察.

责任编辑: 陈 倩