

# 基于时差多参的单脉冲信号实时配对分选

姜宏志<sup>1</sup>, 赵闯<sup>1</sup>, 胡德秀<sup>1</sup>, 赵拥军<sup>1</sup>, 赵勇胜<sup>1</sup>, 刘智鑫<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学, 河南郑州 450001; 2. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100141)

**摘要:** 现有的分选算法或多或少地存在对复杂调制信号难以分选、分选正确率低、对低重频信号分选效果差以及实时性差等问题。本文针对以上问题, 提出了一种基于多站时差和多参数信息联合的单脉冲信号实时分选方法。该方法首先引入时差窗, 对多站接收到的脉冲信号进行粗配对, 分别得到多个可能与主站单脉冲正确配对的“脉冲对”序列; 然后, 利用脉内多参数信息对“脉冲对”进行精确匹配, 获得真实配对的“脉冲对”, 进而计算“脉冲对”对应的时差并得到“时差对”序列; 最后, 在误差容限内, 依据时差的不变性, 实现对单脉冲信号的实时分选。仿真结果表明, 与现有算法相比, 该算法能够对复杂脉间和脉内调制信号、超低重频信号甚至单脉冲信号进行有效分选, 具有较高的分选正确率和较好的分选实时性。

**关键词:** 电子侦察; 复杂体制雷达; 单脉冲; 多参数信息; 时差对; 脉冲分选配对

**中图分类号:** TN971 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)03-0566-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20191316

## Real-Time Deinterleaving Algorithm for Single Pulse Signal Based on TDOAs and Multi-parameter Information

JIANG Hong-zhi<sup>1</sup>, ZHAO Chuang<sup>1</sup>, HU De-xiu<sup>1</sup>, ZHAO Yong-jun<sup>1</sup>, ZHAO Yong-sheng<sup>1</sup>, LIU Zhi-xin<sup>2</sup>

(1. PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Academy of System Engineering, Academic of Military Sciences, Beijing 100141, China)

**Abstract:** The existing deinterleaving algorithms have some problems such as difficulty in sorting complex modulation signals, high false alarm or false dismissal rate, poor performance on low repetition frequency signals, and poor real-time performance. In order to solve the above problems, this paper proposes a real-time single pulse signal sorting method based on multi-stations time difference of arrival (TDOA) and multi-parameters information. Firstly, the time difference window is introduced to make rough pairing of pulse signals received by multi-stations to obtain multiple "pulse pair" sequences which may be correctly paired. Then, the "pulse pair" is accurately matched by intra-pulse parameters to obtain the true "pulse pair". Then, the time difference corresponding to the "pulse pair" is calculated and the "time difference pair" sequences are obtained. Finally, within the error tolerance, according to the invariance of time difference, the single pulse signal is sorted in real time. The simulation results show that compared with the existing algorithms, the algorithm can effectively sort complex inter-pulse or intra-pulse modulated signals and low repetitive frequency signals, with extremely low false alarm, false dismissal rate and high correct sorting rate. At the same time, it is real-time.

**Key words:** electronic reconnaissance; complex system radar; single pulse; multi-parameters information; pairs of time difference of arrival; pulse sorting and pairing

## 1 引言

现代战场电磁环境高度复杂, 一方面, 脉冲信号在时域、空域、频域等中的参数发生不同程度的重叠, 信号漏批、增批现象越来越严重; 另一方面, 脉冲重复间隔 (Pulse Repetition Interval, PRI) 的统计规律呈现随机非平稳性, 给电子侦察中的第三方接收造成了极大的困

难; 此外, 信号环境高度密集, 造成分选处理的计算量变大, 难以实时地进行分选<sup>[1-3]</sup>。如何将各部雷达的脉冲信号从随机交叠的脉冲流中实时且正确地分离出来, 是实现雷达辐射源快速识别和无源定位的必要条件, 也是进行电子侦察的重要一环<sup>[4]</sup>。

传统的脉冲信号分选方法都是基于单站电子侦察系统的<sup>[5-8]</sup>, 这些方法基于脉冲到达时间 (Time Of Arrival,

TOA)和PRI,针对复杂脉间调制的脉冲信号,难以做到有效和实时地分选.近年来,结合多站无源定位系统,一些基于多站电子侦察系统的脉冲分选方法不断地被提出.但是这些方法存在虚警率、漏警率高<sup>[9-12]</sup>,或者需要依赖定位解算导致运算复杂度高等问题<sup>[13,14]</sup>.此外,以上各算法均需要获取足够时长的观测信号才可以进行分选操作,因而均存在实时性差的问题<sup>[5-15]</sup>.

针对现有分选算法存在的上述问题,本文提出了一种基于多站时差和多参数信息联合的单脉冲信号实时配对分选方法.该方法能够对复杂脉间和脉内调制信号、超低重频信号甚至单脉冲信号进行有效分选,具有较高的分选正确率和较好的分选实时性.

## 2 多站电子侦察系统实时接收脉冲模型

本文将三站电子侦察系统为例,进行算法模型的构建和分析.电子侦察系统截获到的雷达信号的所有信息均隐藏于雷达波形参数序列之中,因而可以用脉冲描述字(Pulse Description Word,PDW)对雷达信号脉冲进行描述.因而单个电子侦察站截获的雷达脉冲参数序列可以用脉冲描述字形成的脉冲流进行表示,如图1所示.

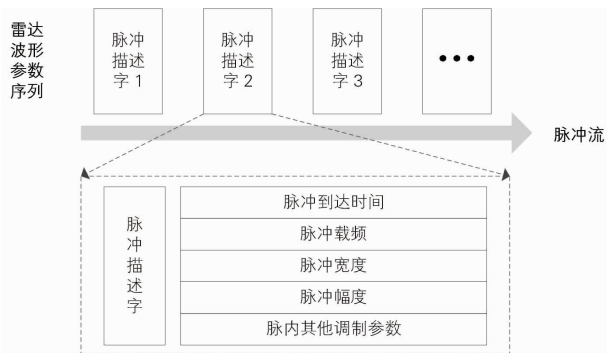


图1 雷达脉冲参数序列

三站电子侦察系统由主站和两副站构成,将主站记为A,两副站分别记为B和C.主站A接收到的脉冲流可以被表示为:

$$[t_{A1}, \mathbf{P}_{A1}], [t_{A2}, \mathbf{P}_{A2}], \dots \quad (1)$$

其中,  $t_{An}$ ,  $n_A = 1, 2, \dots$  为主站接收脉冲流的到达时间,并按到达时间先后顺序排列,  $n_A$  为主站接收的脉冲在脉冲流中的序号,  $\mathbf{P}_{An}$  为主站A截获到的第  $n_A$  个脉冲中除到达时间外的其它参数构成的矢量,如载频、脉冲宽度、脉冲幅度等.

副站B接收到的脉冲流可以表示为:

$$[t_{B1}, \mathbf{P}_{B1}], [t_{B2}, \mathbf{P}_{B2}], \dots \quad (2)$$

其中,  $t_{Bn}$ ,  $n_B = 1, 2, \dots$  为副站接收脉冲流的到达时间,并按到达时间先后顺序排列,  $\mathbf{P}_{Bn}$  为副站B接收到的第  $n_B$  个脉冲中除到达时间外的其它参数构成的矢

量,  $n_B$  为脉冲流中脉冲的序号.

副站C接收到的脉冲流可以表示为:

$$[t_{C1}, \mathbf{P}_{C1}], [t_{C2}, \mathbf{P}_{C2}], \dots \quad (3)$$

其中,  $t_{Cn}$ ,  $n_C = 1, 2, \dots$  为副站接收脉冲流的到达时间,并按到达时间先后顺序排列,  $\mathbf{P}_{Cn}$  为副站C接收到的第  $n_C$  个脉冲中除到达时间外的其它参数构成的矢量,  $n_C$  为脉冲流中脉冲的序号.

由于每个侦察设备距离辐射源远近不同,接收到同一雷达的同一脉冲的到达时间会发生偏移.此外,由于辐射源数量多以及高重频脉冲信号的存在,导致信号发生重叠.因为电子侦察系统相互的电磁干扰及多站接收机性能有所差别,主、副站接收到的脉冲信号,不仅仅接收的各个辐射源信号存在固定的时延,并且伴随脉冲干扰、脉冲丢失等,会导致各站截获的雷达脉冲流出现不小的变化.

## 3 单脉冲信号实时配对分选

### 3.1 主、副站接收同一单脉冲信号的时差范围

当侦察系统截获雷达脉冲信号时,接收机之间不使用同步脉冲保证接收信号的开始时间和终止时间完全相同,而是将副站的位置信息和雷达脉冲描述字放在一起发送给主站.主站利用获取的位置信息,能够获得与副站的时差范围.一旦主、副站之间的时差范围被确定,就可以缩小脉冲配对的时间范围,进而减少分选时长.三站电子侦察系统如图2所示.

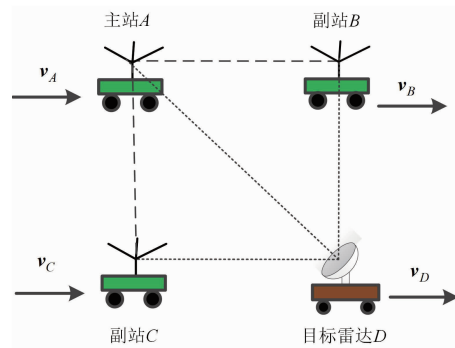


图2 三站电子侦察系统位置示意图

设单次侦察时长为  $T$ , 主、副站运动速度矢量分别为  $\mathbf{v}_A, \mathbf{v}_B, \mathbf{v}_C$ , 目标辐射源运动速度矢量为  $\mathbf{v}_D$ , 辐射源到主、副站距离分别是  $d_{DA}, d_{DB}, d_{DC}$ . 雷达脉冲以光速  $c$  传播到达主、副站,  $t_A, t_B, t_C$  分别是同一脉冲信号到达主、副站所需的时长,大小如式(4)所示.

$$t_A = \frac{d_{DA}}{c}, t_B = \frac{d_{DB}}{c}, t_C = \frac{d_{DC}}{c} \quad (4)$$

观察图2三站电子侦察系统位置示意图可知,主、副站与目标辐射源的位置之间构成一个三角形,由三角形三边关系可得:

$$\begin{cases} |d_{DA} - d_{DB}| < d_{AB} \\ |d_{DA} - d_{DC}| < d_{AC} \end{cases} \quad (5)$$

联合式(4)、(5)可得:

$$\begin{cases} |t_{AB}| = |t_A - t_B| = \frac{|d_{DA} - d_{DB}|}{c} < \frac{d_{AB}}{c} = \sigma \\ |t_{AC}| = |t_A - t_C| = \frac{|d_{DA} - d_{DC}|}{c} < \frac{d_{AC}}{c} = \rho \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\sigma$  表示电磁波从副站  $B$  传播到主站  $A$  所需要的时间,  $\rho$  表示电磁波从副站  $C$  传播到主站  $A$  所需要的时间,  $d_{AB}$  表示  $A$  和  $B$  之间的距离,  $d_{AC}$  表示  $A$  和  $C$  之间的距离,  $t_{AB}$  表示同一脉冲信号到达  $A$  和  $B$  的时间差,  $t_{AC}$  表示同一脉冲到达  $A$  和  $C$  的时间差. 由于主、副站可能运动, 位置信息会存在一定的误差, 误差大小取决于主、副站在侦收信号的时长内相对位置变化大小, 误差大小的上限可以通过式(7)得到:

$$\begin{cases} \mu_1 = v_1 \times T \\ \mu_2 = v_2 \times T \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $v_1 = \|\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B\|$  或者  $v_2 = \|\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_C\|$ ,  $\mu$  表示误差. 因而, 式(6)需改进为:

$$\begin{cases} |t_{AB}| < \sigma + \mu_1 \\ |t_{AC}| < \rho + \mu_2 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以分别确定主站和两副站之间的时差范围. 在不采用同步信号时, 可以通过主、副站侦测结束时的位置信息和两站的运动速度求出时差范围, 进而可以缩小主、副站间脉冲配对的时间范围, 提高分选的实时性.

### 3.2 利用时差窗对主、副站脉冲进行实时粗匹配

将主站  $A$  接收信号的脉冲流中第  $n_A$  个脉冲的到达时间记为  $t_{An_A}$ , 副站  $B$  接收信号的脉冲流中可能与  $t_{An_A}$  时刻主站  $A$  接收脉冲来自同一辐射源发射的同一个脉冲信号的到达时间范围为:

$$\Sigma(n_A) = [t_{An_A} - \sigma - \mu, t_{An_A} + \sigma + \mu] \quad (9)$$

$\Sigma(n_A)$  确定的时间范围即为主站  $A$  在  $t_{An_A}$  时刻接收的脉冲对应的时差窗. 对时差窗  $\Sigma(n_A)$  内副站  $B$  的脉冲进行脉冲检测, 检测得到的脉冲均可能与  $n_A$  来自同一辐射源的同一脉冲, 从而实现了主站  $A$  在  $t_{An_A}$  时刻接收的单脉冲与副站  $B$  接收脉冲流间的粗匹配. 假设在时差窗  $\Sigma(n_A)$  内副站  $B$  分别在  $t_{Bn_B}, \dots, t_{Bn_B+L}$  时刻存在  $(L+1)$  个脉冲, 则经过粗匹配可以得到  $(L+1)$  个“脉冲对” $[(t_{An_A}, t_{Bn_B}), \dots, (t_{An_A}, t_{Bn_B+L})]$ .

同理对时差窗  $\Sigma(n_A)$  内副站  $C$  的脉冲进行脉冲检测, 实现了主站  $A$  在  $t_{An_A}$  时刻接收的单脉冲与副站  $C$  接收脉冲流间的粗匹配, 得到  $(K+1)$  个“脉冲对” $[(t_{An_A}, t_{Cn_C}), \dots, (t_{An_A}, t_{Cn_C+K})]$ . 如图3所示为主站  $A$  在  $t_{An_A}$  时刻接收的单脉冲对应的时差窗  $\Sigma(n_A)$ , 以及利用时差窗  $\Sigma(n_A)$  分别实现了对主站  $A$  在  $t_{An_A}$  时刻接收的单脉冲与

副站  $B$  和副站  $C$  的脉冲流进行粗匹配.

利用时差窗进行粗匹配得到的副站脉冲有可能是干扰脉冲、其它辐射源发射的脉冲以及与主站  $A$  在  $t_{An_A}$  时刻接收的单脉冲来自同一辐射源的同一脉冲.

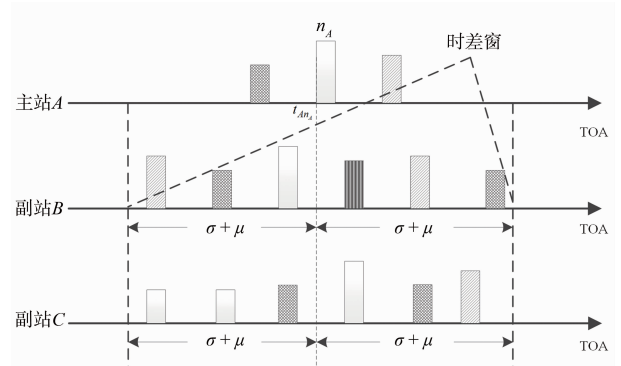


图3 利用主站第  $n_A$  个脉冲的时差窗进行粗匹配

### 3.3 联合多参数信息实现主、副站脉冲精确匹配

由于复杂调制信号的脉内与脉间参数均具有多变性和随机性, 各脉冲的参数之间相关性差, 因此主、副站接收不同辐射源发射的脉冲之间甚至同一辐射源发射的不同脉冲信号之间参数差异大. 但是主、副站接收到同一辐射源发射的同一脉冲信号的脉内参数差异很小, 因而可以利用单脉冲脉内的多参数信息对粗匹配得到的脉冲对序列进行精确匹配, 从而得到正确的“脉冲对”.

首先考虑主站  $A$  和副站  $B$  脉冲的精确匹配. 主站  $A$  在  $t_{An_A}$  时刻接收的脉冲与副站  $B$  在  $t_{Bn_B}$  时刻接收的脉冲除 TOA 以外多参数距离为:

$$r_{n_A, n_B} = \|(\mathbf{P}_{An_A} - \mathbf{P}_{Bn_B})^T \mathbf{W} (\mathbf{P}_{An_A} - \mathbf{P}_{Bn_B})\| \quad (10)$$

其中,  $\|\cdot\|$  表示求 2-范数,  $\mathbf{W}$  为加权矩阵, 一般为对称矩阵. 若脉冲描述字中的  $\mathbf{P}_{An_A}$  和  $\mathbf{P}_{Bn_B}$  各自参数互相独立, 则  $\mathbf{W}$  为对角矩阵, 对角元素取值的大小与测量误差的方差成反比. 由于  $\mathbf{P}_{An_A}$  和  $\mathbf{P}_{Bn_B}$  包括载频、脉幅、脉宽等脉内参数, 则  $\mathbf{W}$  对角元素大小为相关参量对应量纲下测量误差方差的倒数.

为了表示主站  $A$  和副站  $B$  脉冲之间的相关程度, 引入多参数相似度匹配因子:

$$\beta_{n_A, n_B} = \begin{cases} 1 - r_{n_A, n_B}/r_0, & r_{n_A, n_B} < r_0 \\ 0, & r_{n_A, n_B} \geq r_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $r_0$  是参考距离, 表示主站  $A$  和副站  $B$  脉冲之间不相关时的最小多参数距离.

设多参数匹配门限为  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon \in [0, 1]$ , 用作判别两脉冲是否来自同一辐射源发射的同一脉冲. 由于来自同一辐射源的同一脉冲被两站接收到时相同参数之间差异小,  $\varepsilon$  一般被设定大于 0.5, 比如  $\varepsilon = 0.7$ . 若  $\beta_{n_A, n_B} \geq \varepsilon$ , 参数匹配成功, 记配对成功的“脉冲对”为  $(t_{An_A}, t_{Bn_B})$ ; 否则, 参数匹配失败.

同理,对主站 A 在  $t_{An_i}$  时刻接收的脉冲与副站 B 在  $t_{Bn_b}$  时刻接收到的位于时差窗  $\Sigma(n_A)$  内的脉冲进行精确配对,若多参数匹配成功,记配对成功的“脉冲对”为  $(t_{An_i}, t_{Cn_c})$ .

### 3.4 基于“时差对”的单脉冲信号实时精确分选

对于  $t_{An_i}$  时刻主站 A 接收到的脉冲  $n_A$ ,经过粗配对和精确配对,得到“脉冲对”  $(t_{An_i}, t_{Bn_b})$  和  $(t_{An_i}, t_{Cn_c})$ ,记两“脉冲对”的时差分别为:

$$\begin{cases} t_{AB} = t_{An_i} - t_{Bn_b} \\ t_{AC} = t_{An_i} - t_{Cn_c} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12),可以得到两“脉冲对”  $(t_{An_i}, t_{Bn_b})$  和  $(t_{An_i}, t_{Cn_c})$  对应“时差对”  $(t_{AB}, t_{AC})$ . 在对单脉冲信号实时分选的过程中,记已分选好的不同辐射源对应脉冲序列分别为  $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_m$ , 对应的“时差对”分别为  $(t_{1AB}, t_{1AC}), \dots, (t_{mAB}, t_{mAC})$ . 其中,  $(t_{iAB}, t_{iAC}), i = 1, 2, \dots, m$  为已分选出的各辐射源各“脉冲对”对应“时差对”的算术平均值. 分别以脉冲到达主站 A 和副站 B 的时间差  $t_{AB}$  为横轴、脉冲到达主站 A 和副站 C 的时间差  $t_{AC}$  为纵轴建立二维平面直角坐标系,分选出的不同辐射源对应的脉冲序列分布可以表示为图 4 所示.

分别计算“时差对”与各分选好的脉冲序列对应“时差对”之间的距离:

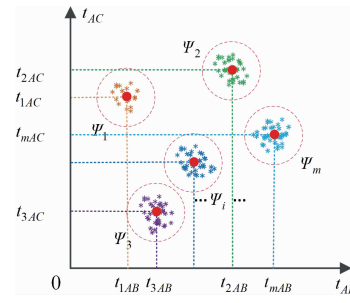


图4 基于时差对的分选示意图

$$d_i = \sqrt{(t_{AB} - t_{iAB})^2 + (t_{AC} - t_{iAC})^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

记  $\Delta = d_{imin}$ , 如果  $\Delta \leq \delta$ ,  $\delta$  为同一辐射源“时差对”的误差容限,则将脉冲对  $(t_{An_i}, t_{Bn_b}, t_{Cn_c})$  存入序列  $\Psi_i$ , 并通过将新序列里所有的“脉冲对”对应的“时差对”取平均值更新  $(t_{iAB}, t_{iAC})$ ; 否则,新建脉冲序列  $\Psi_{m+1}$ , 将脉冲对  $(t_{An_i}, t_{Bn_b}, t_{Cn_c})$  存入  $\Psi_{m+1}$ . 从而实现对于主站  $t_{An_i}$  时刻接收的单个脉冲进行实时配对分选.

## 4 仿真实验

仿真场景设置如下:设侦察系统有三个观测站,分别为主站 A 和两副站 B、C. 主站 A 与两副站 B、C 对应的时差窗均为  $[-400\mu s, 400\mu s]$ , 总观测时间 0.1s. 侦察范围内存在 8 个待分选辐射源 E1 ~ E8, 各辐射源脉冲信号参数如表 1 所示. 脉冲生成过程中对载频, 脉宽

表 1 各辐射源脉冲信号参数

辐射源	载频类型	载频/MHz	脉宽/ $\mu s$	PRI 类型	PRI/ $\mu s$	幅度	脉冲个数	AB 之间真实时差/ $\mu s$	AC 之间真实时差/ $\mu s$
E1	定频	2300	9	固定	473	1	366	-120	30
E2	跳频	2900 ~ 3050	11	参差	699, 709, 719, 729	2	318	170	-50
E3	定频	2400	16	参差	567, 587, 607	1	170	-50	80
E4	定频	2700	13	正弦	平均 900	1	111	-150	-45
E5	跳频	2100 ~ 2150	18	固定	1099	1.6	90	110	-60
E6	跳频	3200 ~ 3300	14	抖动	1300 $\pm$ 20%	1.9	76	-80	60
E7	定频	2500	17	固定	10033	1.3	9	190	-100
E8	定频	2600	15	固定	30277	1.4	3	10	-80

和幅度均加以均值为 0, 标准差分别为 1MHz, 0.1 $\mu s$  和 0.15 的高斯随机误差. 参考距离  $r_0$  设为 100, 单个脉冲匹配门限  $\varepsilon$  设为 0.7, 同统一辐射源对应“时差对”的误差容限  $\delta$  为 0.25 $\mu s$ . 考虑到外部环境的影响, 接收脉冲可能由于幅度较低, 或者两脉冲上升沿和下降沿较近, 导致脉冲丢失和交叠. 因此在仿真中, 若幅度小于 0.8, 则视其为脉冲丢失; 若两脉冲交叠, 则后一脉冲丢失.

### 4.1 算法有效性分析

图 5 给出了时差测量误差为 100ns 时, 本文所提算法对主、副站接收的脉冲信号进行精确匹配后得到的“脉冲对”对应的“到达时间 (TOA) 相对‘时差对’”的分布图. 从图 5 可以看出, 时差对分布在 8 个点附近, 即

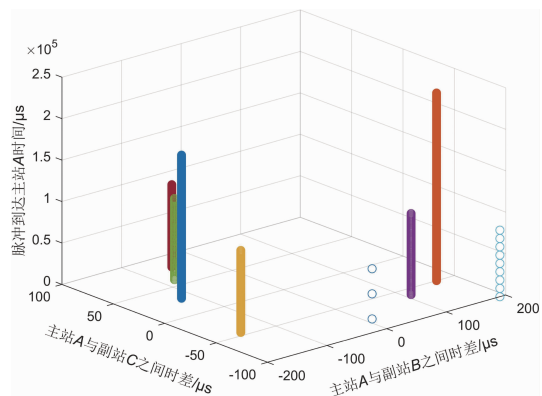


图5 匹配成功的脉冲对时差分布

分别对应于仿真中给定的 8 个辐射源  $E1 \sim E8$ , 精确配对结果中没有出现虚假的“脉冲对”, 从而没有分选出虚假的辐射源。

图 6 给出了本文所提算法的分选结果. 在图中标出了正确分选出的各个辐射源对应的脉冲数及时差情况。

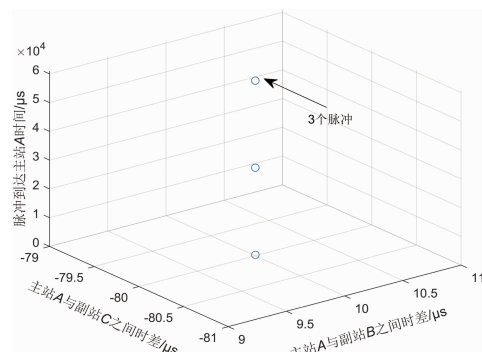
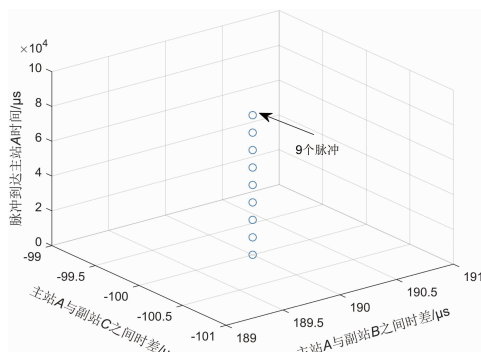
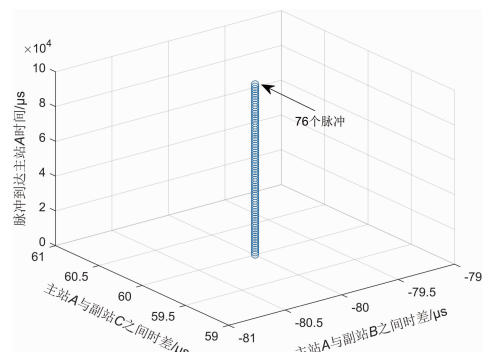
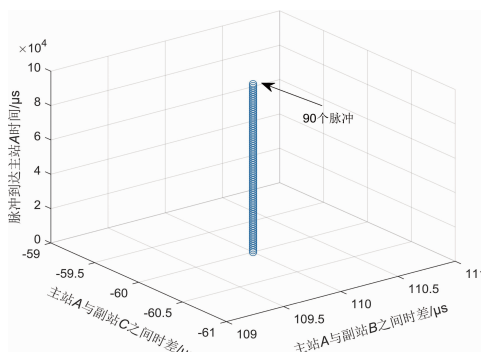
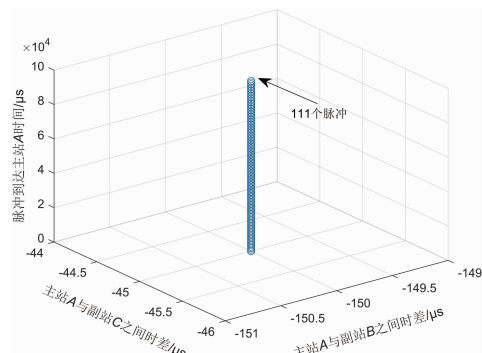
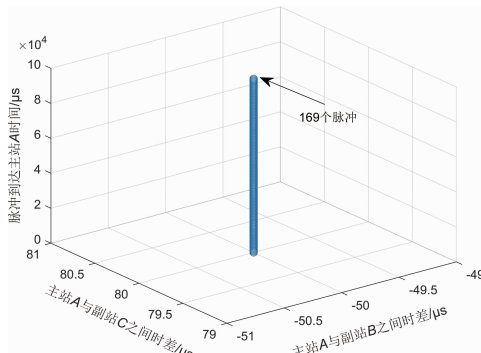
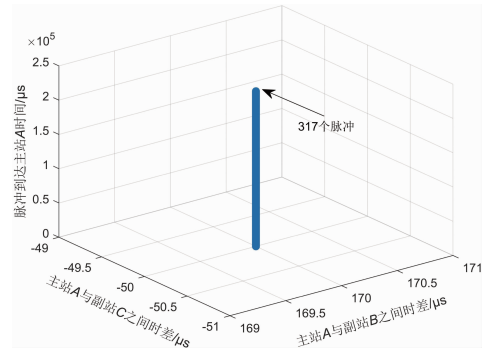
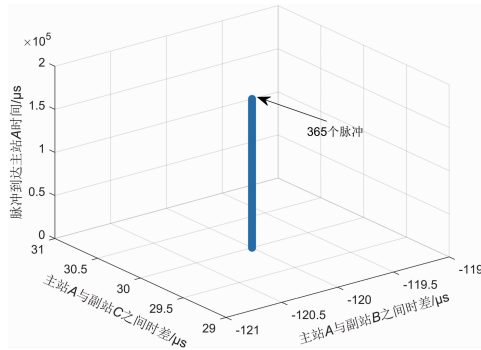


图6 本文算法对各辐射源分选结果

## 4.2 分选正确率对比

为了进一步突出本文提出算法的优势,本小节考察对比不同算法对各辐射源的分选正确率,包括文献[11~15]中的多站分选算法.分选正确率表示分选出各辐射源正确的脉冲数与总脉冲数的比值.在上述仿真条件下,采用1000次蒙特卡罗实验取平均分选正确率.分选结果如表2所示.根据实验结果,可以得出以下结论:

(1)对于高重频和常规重频脉冲信号( $E1 \sim E6$ ),所有算法均有较高的分选正确率;

(2)对于低重频脉冲序列( $E7$ ),有限观测时间内积累脉冲个数相比高重频脉冲信号少,整体分选正确率下降,但本文算法的分选正确率仍旧高于93%;

(3)对于超低重频脉冲序列( $E8$ ),本文所提算法仍然具有较高的分选正确率,但由于在有限的观测时间内积累的脉冲个数较少,其它算法分选正确率较低.

综上,相比于其它算法,本文所提算法拥有较高的平均分选正确率.对高重频和超低重频辐射源具有良好的分选特性,实现了对极少数量脉冲的辐射源信号的准确分选.

表2 不同分选算法分别对辐射源  $E1 \sim E8$  的平均分选正确率

	$E1$	$E2$	$E3$	$E4$	$E5$	$E6$	$E7$	$E8$
本文算法	98.5	98.4	98.2	97.4	97.1	96.9	93.2	84.6
文献[11]	97.2	94.9	96.1	95.3	96.9	93.2	84.6	15.6
文献[12]	96.8	94.6	95.6	95.1	96.3	91.3	83.5	15.4
文献[13]	95.2	94.1	94.8	94.2	95.4	90.8	55.7	15.2
文献[14]	98.3	98.1	98.0	96.7	97.0	96.9	89.2	80.8
文献[15]	98.4	98.1	97.7	94.2	92.8	88.3	83.5	77.4

## 4.3 算法实时性对比

实时性是衡量算法性能的又一重要指标.为此,本小节统计了所提算法的平均运行时长,并与文献中所提算法进行了比较.为了综合比较分选性能,且突出本文算法优势,我们加入了各算法对8个辐射源目标的平均分选正确率.假设总观测时长为1s,辐射源 $E1 \sim E8$ 在观测时间内持续发射脉冲,其余仿真条件同上.统计结果如图7所示.

可以看出,本文所提算法不仅平均分选正确率最高,而且平均运行时间最短.对于观测时长1s的脉冲序列,只有本文所提算法、文献[11]和文献[12]能够达到实时分选的要求.文献[11,12]虽然满足实时性要求,但是较高的时差直方峰噪声水平,导致虚警目标多,分选正确率不高.文献[13,14]由于要进行多次位置解算才能得到最终分选结果,算法复杂度较高,实时性较差.文献[15]引入多参数约束准则虽然提高了扩展时差直方图方法分选的正确率,但是却增加了算法的复杂性,算法实时性较差.上述实时性分析对应的时间均

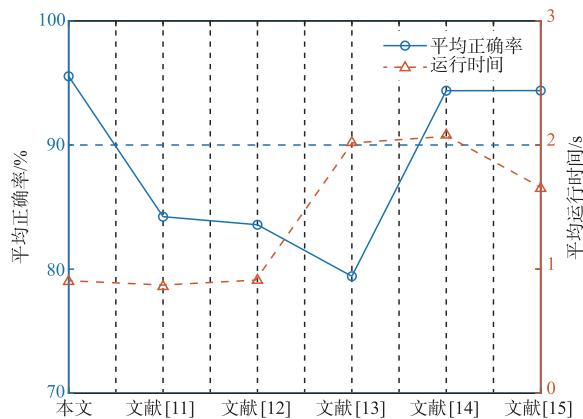


图7 平均运行时间及平均分选正确率

是各算法对相同长度待分选脉冲序列进行线下分选的用时.然而实时性要求能够对脉冲信号接收一个分选一个,因而文献[11~15]均不满足实时性的要求.而本文所提算法能够对超低重频甚至单脉冲信号进行分选,具备线上分选或者实时分选的要求.综上所述,本文所提算法相比其它算法,既具有较高的平均分选正确率,同时也具备实时性.

## 5 结论

本文针对于三站电子侦察系统,提出了一种基于时差和多参数信息联合的复杂调制单脉冲信号实时分选算法.该方法利用主、副站接收信号的时差范围,构造时差窗,实现对主、副站接收的脉冲之间的粗匹配,缩小了脉冲匹配的范围,降低了分选的计算量;联合多参数信息对“脉冲对”进行精确配对,改善了以往分选高重频脉冲信号的模糊问题和分选超低重频脉冲信号困难的问题;利用接收同一辐射源同一脉冲的时差不变性对匹配成功的“脉冲对”进行分选,进一步提高了分选的正确率.此外,该方法仅对主站实时接收的单个脉冲进行分选,克服了以往多站时差分选需要进行时差累积构建时差直方图而导致无法进行实时分选的缺点,为信号实时分选提供了有效的途径.仿真及对比实验证明了本文所提算法的有效性、实时性及其分选优势,具有较高工程应用价值.

## 参考文献

- [1] 龚仕仙,魏玺章,黎湘.宽带数字信道化接收机综述[J].电子学报,2013,41(5):949-959.  
GONG Shi-xian, WEI Xi-zhang, LI Xiang. Review of wideband digital channelized receivers[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(5): 949-959. (in Chinese)
- [2] 欧健,付东.面向体系对抗的认知电子战发展趋势探析[J].军事运筹与系统工程,2019,33(1):75-80.  
OU Jian, FU Dong. Analysis on the development trend of

- cognitive electronic warfare facing systematic confrontation [J]. *Military Operations and Systems Engineering*, 2019, 33(1):75-80. (in Chinese)
- [3] 杨林, 孙仲康, 周一宇, 等. 信号互相关实现密集信号脉冲配对[J]. *电子学报*, 1999, 27(3):52-55.  
YANG Lin, SUN Zhong-kang, ZHOU Yi-yu, et al. Pulse pairing of dense signals by signal cross correlation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(3):52-55. (in Chinese)
- [4] 柳佳. 复杂电磁环境下的雷达信号分选算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.  
LIU Jia. Radar Signal Sorting Algorithm Under the Complex Electromagnetic Environment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015. (in Chinese)
- [5] Mardia H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. *IEE Proceedings F*, 1989, 136(4):149-154.
- [6] Milojevic' D J, Popovic' B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses [J]. *IEE Proceedings F*, 1992, 139(1):98-104.
- [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] 赵仁健, 龙德浩. 密集信号分选的平面变换技术[J]. *电子学报*, 1998, 26(1):77-82.  
ZHAO Ren-jian, LONG De-hao. Plane transformation for signal deinterleaving in dense signal environment[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(1):77-82. (in Chinese)
- [9] Salari S, Chan F, Chan Y T, et al. TDOA estimation with compressive sensing measurements and Hadamard matrix [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6):3137-3142.
- [10] Zou Y, Wan Q. Asynchronous time-of-arrival-based source localization with sensor position uncertainties [J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(9):1860-1863.
- [11] 马爽, 吴海斌, 柳征, 等. 基于递归扩展直方图的辐射源时差分选方法[J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(5):83-89.  
MA Shuang, WU Hai-bin, LIU Zheng, et al. Method for emitter TDOA sorting based on recursive extended histogram[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(5):83-89. (in Chinese)
- [12] 郑惠文, 黄建冲. 基于时差累积的雷达信号分选方法[J]. *电子信息对抗技术*, 2017, 32(1):1-7.  
ZHENG Hui-wen, HUANG Jian-chong. Radar signal sorting based on time difference accumulation[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2017, 32(1):1-7. (in Chinese)
- [13] 马贤同, 罗景青, 孟祥豪, 等. 基于时差的同类辐射源信号分选定位方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(10):2363-2368.  
MA Xian-tong, LUO Jing-qing, MENG Xiang-hao. Signal sorting and positioning method for similar radiation sources based on time difference of arrival[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2015, 37(10):2363-2368. (in Chinese)
- [14] 马贤同, 罗景青, 吴世龙. 多站时差与多参数联合分选定位方法[J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(6):78-83.  
MA Xian-tong, LUO Jing-qing, WU Shi-long. Joint sorting and location method using TDOA and multi-parameter of multi-station[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(6):78-83. (in Chinese)
- [15] 刘智鑫, 赵拥军. 约束准则下扩展时差直方图脉冲分选配对方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(6):102-111.  
LIU Zhi-xin, ZHAO Yong-jun. Extended time difference histogram pulse sorting pairing method under constraint criterion[J]. *Journal of Xidian University of Electronic Technology (Natural Science)*, 2019, 46(6):102-111. (in Chinese)

#### 作者简介



姜宏志 男, 1995 年出生, 河南信阳人. 现为中国人民解放军战略支援部队信息工程大学研究生, 主要研究方向为电子信号处理, 辐射源定位.  
E-mail: Radar\_2018@126.com

赵 闯 男, 1978 年出生, 河北辛集人. 博士, 现为战略支援部队信息工程大学数据与目标工程学院副教授. 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 年出生, 甘肃武威人. 博士, 现为战略支援部队信息工程大学数据与目标工程学院讲师. 主要研究方向为雷达信号处理, 无源定位, 电子对抗.

赵拥军 男, 1964 年出生, 河南新乡人. 博士, 现为战略支援部队信息工程大学数据与目标工程学院教授. 主要研究方向为雷达信号处理, 阵列信号处理.

赵勇胜 男, 1990 年出生, 江苏连云港人. 博士, 主要研究方向为电子信号处理, 外辐射源定位.

刘智鑫 男, 1991 年出生, 新疆乌鲁木齐人. 博士, 主要研究方向为辐射源定位, 电子侦察等.