

基于递归扩展直方图的辐射源时差分选方法*

马爽¹, 吴海斌², 柳征¹, 姜文利¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 总参四部驻桂林地区军代室, 广西 桂林 541001)

摘要: 多站电子侦察系统中, 脉冲信号到达两个接收站的时间差信息可以用于信号分选。针对高重频辐射源引起的虚假聚类和超低重频辐射源累积脉冲数少给时差分选带来的困难, 提出一种基于递归扩展直方图的时差分选方法。该方法将时差数据转换成扩展直方图的结构, 采用递归的方式序贯地对每个辐射源进行检测和分选, 通过扩展运算, 同步消除虚假聚类, 逐步降低直方图噪声水平, 提高了分选正确率。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 时差; 信号分选; 直方图; 电子战

中图分类号: TN957.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)05-0083-07

Method for emitter TDOA sorting based on recursive extended histogram

MA Shuang¹, WU Haibin², LIU Zheng¹, JIANG Wenli¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Guilin Military Representative Bureau, The 4th Department of PLA General Staff Headquarters, Guilin 541001, China)

Abstract: In multiple platform electronic reconnaissance system, time difference of arrival (TDOA) can be used for pulse sorting. A method for TDOA sorting based on recursive extended histogram is proposed to deal with both the problem of misleading TDOA clusters caused by high pulse repetitive frequency (PRF) emitters and the problem of less pulse accumulation caused by ultra-low PRF emitters. TDOA data were formed into an extended histogram structure, which is processed recursively to detect and sort out the pulses of each emitter. By defining the extension operator, the misleading TDOA clusters could be removed, and the histogram noise level decreased step by step as well, so the method improved the performance of TDOA sorting effectively. Simulation results show that the method is applicable and effective.

Key words: TDOA; pulse sorting; histogram; electronic warfare

在电子侦察系统中, 当辐射源信号脉冲到达时间(TOA)参数可由一个以上接收站提供时, 能得到与该辐射源位置有关的脉冲到达时间差(TDOA)信息^[1]。利用脉冲到达时间差信息进行信号分选^[2-4], 称为时差分选。相对于具有复杂变化方式的信号参数, 辐射源的位置参数十分稳定, 因此在多站电子侦察系统^[5-8]中, 时差分选能得到更加可靠的结果, 是首选的信号分选方法。

时差分选一般采用数学统计中的直方图方法^[9]来实现, 但是, 两种特殊类型的辐射源会影响该方法的分选效果: (1) 高重频辐射源会在直方图中产生虚假直方峰, 导致分选结果中出现多余的虚假辐射源; (2) 超低重频辐射源累积脉冲数少, 形成的直方峰易被直方图噪声淹没, 难以检测。针对第一个问题, 文献^[9-10]分析了虚假

直方峰产生的原因和条件, 并提出在分选完成后, 通过比较脉冲列之间的相似性来约减虚假辐射源。该方法需要多次大量的序列比较与合并等处理, 运算量较大; 文献^[11-12]利用测向信息限定真实时差的范围, 从而消除虚假直方峰的影响, 但是实际应用中测向信息一般不容易获得; 针对第二个问题, 文献^[13]提出用参数相关脉冲配对法降低直方图噪声水平, 提高检测能力, 但当辐射源参数接近或测量精度不高时, 难以达到理想效果。

事实上, 在时差直方图中, 对于某个辐射源, 反映其真实聚类的真实直方峰、由高重频导致的虚假直方峰和与其有关的直方图噪声这三者之间具有一定的关联关系, 通过建立这种关系, 可以将它们作为一个整体从直方图中分离出来。这样,

* 收稿日期: 2012-03-29

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 马爽(1981—), 男, 辽宁锦州人, 博士研究生, E-mail: mashuang@nudt.edu.cn;

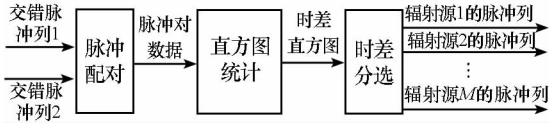
姜文利(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: jiangwl@nudt.edu.cn

不仅避免了虚假直方峰被误判为一个辐射源,而且能够不断降低直方图噪声水平,提高对超低重频辐射源的检测能力。

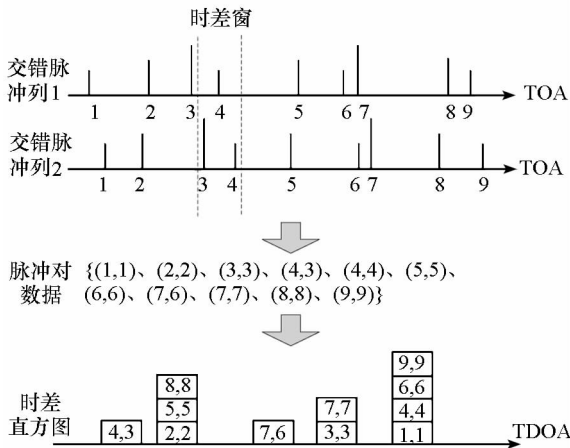
1 时差直方图

1.1 信号时差分选原理

时差分选的原理如图 1 所示。



(a) 时差分选流程图



(b) 脉冲配对与时差直方图

图 1 辐射源信号时差分选原理

Fig. 1 The diagram of TDOA sorting

M 个辐射源发射的脉冲被两接收站截获,形成两个交错脉冲列。脉冲配对模块将分别来自两个序列的,并且到达时间差在时差窗范围内的脉冲进行配对,得到脉冲对数据,并计算脉冲对的时差。直方图统计模块对所有脉冲对数据的时差分布情况进行统计,生成时差直方图。由于同一辐射源发射的脉冲到达两接收站的时间差保持不变,因此在直方图的对应位置会累积出较高的直方峰,时差分选模块通过对时差直方图进行处理,检测并分选出每个辐射源对应的脉冲列。

时差直方图是时差分选算法的主要研究对象,它反映了脉冲对数据的时差分布情况。脉冲对数据可以分为两类:真实脉冲对和交叉脉冲对。前者是两接收站中同一脉冲配对形成的,反映辐射源的真实时差;后者是两接收站中非同脉冲之间配对形成的交叉项,反映了不同脉冲之间的相互影响。交叉脉冲对中规律性较强的部分累积成虚假直方峰,其余部分成为直方图噪声。下面通过建立时差直方图的数学模型来定量地讨论真实直方峰、虚假直方峰和直方图噪声的分布情况以及它们之间的关系。

1.2 时差直方图的数学模型

1.2.1 单个辐射源的时差直方图

设侦察范围内存在 M 个辐射源,首先考虑单一辐射源的时差分布情况。接收站 1 和接收站 2 截获的辐射源 m 的脉冲列信号分别表示为

$$x^{1,m}(t) = \sum_{i=1}^{N_m} \delta(t - t_i^{1,m}) \quad (1)$$

$$x^{2,m}(t) = \sum_{i=1}^{N_m} \delta(t - t_i^{2,m}) \quad (2)$$

其中, $\delta(t)$ 为单位冲激函数; $t_i^{1,m}$ 和 $t_i^{2,m}$ 分别表示辐射源 m 的第 i 个脉冲到达接收站 1 和接收站 2 的时刻; N_m 表示在观测时间 $[0, T]$ 内截获的脉冲数。将两个脉冲列进行脉冲配对并做直方图统计的过程,数学上可以表示为 $x^{1,m}(t)$ 和 $x^{2,m}(t)$ 的互相关

$$\begin{aligned} r^m(\tau) &= \int_0^T x^{1,m}(t)x^{2,m}(t + \tau) dt \\ &= \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} \delta[\tau - (t_j^{2,m} - t_i^{1,m})], \quad \tau \in [w_L, w_U] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, τ 表示时差值; $[w_L, w_U]$ 为时差窗。时差窗由接收站的构型和侦察区域决定,与辐射源本身的性质无关^[9],一般情况下有 $w_L < 0, w_U > 0$ 。对于某个时差 $\tau_0 \in [w_L, w_U]$,若有 $t_j^{2,m} - t_i^{1,m} = \tau_0$,就表示脉冲对 (i, j) 累积到时差直方图中的 τ_0 处。 $r^m(\tau)$ 在 τ_0 处的能量为

$$h^m(\tau_0) = \int_{\tau_0}^{\tau_0^+} r^m(\tau) d\tau \quad (4)$$

$h^m(\tau_0)$ 表示在 τ_0 处累积的脉冲对的数量,即 τ_0 处的直方峰的高度。(3) 式可以进一步表示为两部分的和

$$\begin{aligned} r^m(\tau) &= \sum_{i=1}^{N_m} \delta[\tau - (t_i^{2,m} - t_i^{1,m})] \\ &+ \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_m} \delta[\tau - (t_j^{2,m} - t_i^{1,m})] \\ &= r_I^m(\tau) + r_C^m(\tau), \quad \tau \in [w_L, w_U] \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $r_I^m(\tau)$ 表示真实脉冲对的时差分布, $r_C^m(\tau)$ 表示交叉脉冲对的时差分布,下面分别对这两类脉冲对的时差分布情况进行讨论。

(1) 真实脉冲对的时差分布

由于所有真实脉冲对 (i, i) 的时差都等于辐射源的真实时差 Δ , 即

$$t_i^{2,m} - t_i^{1,m} = \Delta, \quad i = 1, 2, \dots, N_m$$

因此, $r_I^m(\tau)$ 只在 $\tau = \Delta$ 处能量不为零, 此时 Δ 处的直方峰的高度为

$$\int_{(\Delta)^-}^{(\Delta)^+} r_I^m(\tau) d\tau = \int_{(\Delta)^-}^{(\Delta)^+} \sum_{i=1}^{N_m} \delta(\tau - \Delta) d\tau$$

$$= N_m \quad (6)$$

(6) 式表明,在时差直方图中,所有真实脉冲对都聚类到真实时差处,形成一个直方峰,高度等于该辐射源的脉冲数。我们称该直方峰为真实直方峰。真实直方峰可以用于辐射源检测,并且其中包含的脉冲就对对应着需要分选出的该辐射源的脉冲。

(2) 交叉脉冲对的时差分布

由冲击函数的性质可知,当存在 i_0 和 $j_0, i_0 \neq j_0$, 使得

$$t_{j_0}^{2,m} - t_{i_0}^{1,m} = \tau_0 \in [w_L, w_U] \quad (7)$$

时, $r_C^m(\tau)$ 在非真实时差 τ_0 处的能量不为零。下面分析一下满足(7)式的辐射源本身应具有的性质。

设两个脉冲之间的间隔为 λ , 真实时差为 Δ , 时差窗的宽度 $w = w_U - w_L$ 。按照 λ 与 w 之间的关系,并考虑到 $\lambda > 0, w_L \leq \Delta \leq w_U$, 有以下结论:

- ① 当 $\lambda > w$ 时,不会产生交叉配对,辐射源只在真实时差处累积出直方峰;
- ② 当 $0 < \lambda \leq w/2$ 时,必然会有交叉脉冲对出现在时差直方图的非真实时差处;
- ③ 当 $w/2 < \lambda \leq w$ 时,如果 $w_L + \lambda < \Delta < w_U$ 或者 $w_L < \Delta < w_U - \lambda$, 那么将产生交叉配对,否则,不会产生交叉配对。

脉冲间隔小等价于脉冲重复频率高,因此,我们将上述第二种或第三种情况,即 $0 < \lambda \leq w$, 统称为高重频条件,将满足高重频条件的辐射源称为高重频辐射源。不同重频类型的辐射源在满足高重频条件时具有不同的时差分布,下面对几种典型情况进行讨论。

① 重频固定

设辐射源具有固定脉冲重复周期 T_c , 并存在交叉脉冲对 (i_0, j_0) 满足条件(7)。不妨设 $j_0 > i_0, j_0 - i_0 = p$, 可得 $\tau_0 = pT_c + \Delta$ 。时差直方图在 τ_0 处直方峰的高度为

$$\int_{\tau_0}^{\tau_0^+} r_C^m(\tau) d\tau = \int_{\tau_0}^{\tau_0^+} \sum_{k=1}^{N_m-p} \delta[\tau - (t_{k+p}^{2,m} - t_k^{1,m})] d\tau = N_m - p \quad (8)$$

(8) 式表明,重频固定的辐射源在满足高重频条件时,在时差 $pT_c + \Delta \in [w_L, w_U]$ 处累积了高度为 $N_m - p$ 的直方峰。由于该直方峰累积在非真实时差处,我们称之为虚假直方峰,并且 T_c 越小,虚假时差峰的数量越多。

② 重频参差

设辐射源有 K 个重频,依次为 T_1, T_2, \dots, T_K , 并存在交叉脉冲对 (i_0, j_0) 满足条件(7)。不妨设 $j_0 > i_0, j_0 - i_0 = p$, 记 $i_1 = \text{rem}(i_0, K)$ 表示 i_0 除以 K 的余数。那么,时差直方图在 τ_0 处的直方峰的高度为

$$\int_{\tau_0}^{\tau_0^+} r_C^m(\tau) d\tau = \int_{\tau_0}^{\tau_0^+} \sum_{l=0}^{(N_m-p)/K-1} \delta[\tau - (t_{i_1+p+lK}^{2,m} - t_{i_1+lK}^{1,m})] d\tau = (N_m - p)/K \quad (9)$$

(9) 式表明,重频参差的辐射源在满足高重频条件时也会产生虚假直方峰,高度约为真实直方峰的 $1/K, K$ 为重频数量。

③ 重频随机变化

重频随机变化的信号,例如重频抖动信号,由于交叉配对的时差值具有较强的随机性,因此不会在某个固定的非真实时差处累积出虚假直方峰,而是表现为分布在一定时差范围内的直方图噪声。

图2给出了满足高重频条件时,重频固定、重频参差和重频抖动信号的时差分布示意图。

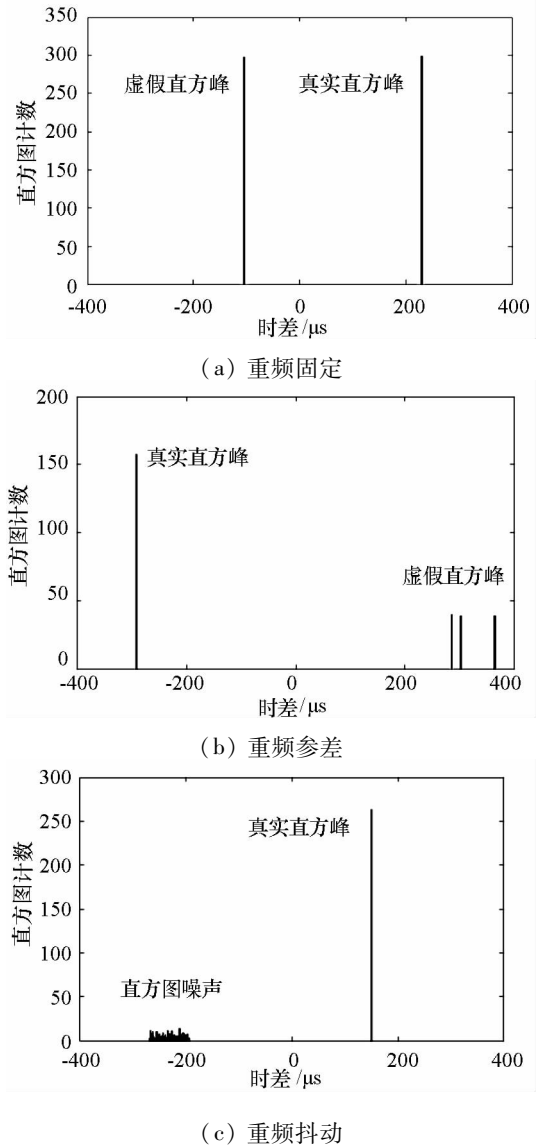


图2 高重频条件下不同重频类型的时差分布情况示意图
Fig. 2 The TDOPA distribution of different PRI types in HPRF condition

1.2.2 多个辐射源的时差直方图

M 个辐射源发射的脉冲分别被两接收站截获后形成的两个交错脉冲列可表示为

$$x^1(t) = \sum_{m=1}^M x^{1,m}(t) = \sum_{i=1}^L \delta(t - t_i^1) \quad (10)$$

$$x^2(t) = \sum_{m=1}^M x^{2,m}(t) = \sum_{i=1}^L \delta(t - t_i^2) \quad (11)$$

其中, L 为总脉冲数。 t_i^1 和 t_i^2 分别为两个交错脉冲列中第 i 个脉冲的到达时间。 $x^1(t)$ 和 $x^2(t)$ 的互相关函数 $r(\tau)$ 为

$$\begin{aligned} r(\tau) &= \int_0^T x^1(t)x^2(t+\tau)dt \\ &= \sum_{m=1}^M \int_0^T x^{1,m}(t)x^{2,m}(t+\tau)dt \\ &\quad + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^M \int_0^T x^{1,m}(t)x^{2,n}(t+\tau)dt \\ &= \sum_{m=1}^M r^m(\tau) + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^M r^{m,n}(\tau) \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $r^m(\tau)$ 的性质已经在 1.2.1 节进行了讨论。 $r^{m,n}(\tau)$ 表示辐射源 m 与辐射源 n 的脉冲之间的互相关。不同辐射源的重频之间存在差异, 脉冲列之间的相关性不强; 在实际环境中, 即使同类型的辐射源, 参数之间也或多或少存在差异, 一般很难达到时间同步, 因此, $r^{m,n}(\tau)$ 一般表现为直方图噪声。

(12) 式表明, 多个辐射源的时差分布可以看成是将其中每个辐射源单独产生的时差分布简单叠加后, 再加上直方图噪声的结果。因此, 每个辐射源产生的真实直方峰和虚假直方峰都可以一一对应到多个辐射源的时差分布中, 但是其检测和处理需要在较强的直方图噪声中进行, 并且辐射源的数量越多, 直方图噪声水平越高。

传统的直方图过门限检测法^[9,13] 在得到时差直方图后, 设置一个固定门限, 将每个高度超过该门限的直方峰都判定为一个辐射源。由上面的分析可以发现, 该方法存在以下两方面的不足: (1) 当高重频辐射源产生的虚假直方峰高度超过门限时, 会被误判为一个辐射源; (2) 当直方图噪声水平较高时, 需要设置较高的门限值, 这时, 超低重频辐射源由于累积脉冲数少, 容易造成漏检测。针对这些问题, 在以上分析的基础上, 本文提出了一种基于递归扩展直方图的时差分选方法。

2 递归扩展直方图分选方法

将(5) 式代入(12) 式并做简单的变形, 得到

$$r(\tau) = \sum_{m=1}^M [r_l^m(\tau) + r_c^m(\tau) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^M r^{m,n}(\tau)]$$

$$= \sum_{m=1}^M z^m \quad (13)$$

其中, z^m 表示辐射源 m 对直方图产生的所有影响的总和, 包括真实直方峰 $r_l^m(\tau)$ 、可能存在的虚假直方峰 $r_c^m(\tau)$ 以及与其有关的直方图噪声 $\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^M r^{m,n}(\tau)$ 。递归扩展直方图分选方法的基本思

想是: 通过建立 $r_l^m(\tau)$ 、 $r_c^m(\tau)$ 和 $\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^M r^{m,n}(\tau)$ 三者

之间的关联关系, 将 z^m 作为一个整体进行处理, 并采用递归的方式, 按照累积脉冲数从多到少的顺序, 序贯地将每个辐射源对应的 $z^m (m = 1, 2, \dots, M)$ 从直方图中分离出来。这样不仅避免了将虚假直方峰误判为新的辐射源, 而且随着辐射源数量的减少, 能够不断降低直方图噪声水平, 提高对超低重频辐射源的检测能力, 同步解决了传统方法存在的两个问题。

2.1 扩展直方图的构建

为了建立真实直方峰、虚假直方峰和直方图噪声之间的关联关系, 在传统直方图的基础上, 定义扩展直方图 H 。 H 的构建过程如下:

(1) 将两交错脉冲列 $x^1(t)$ 和 $x^2(t)$ 之间的时差关系用一个 $L \times L$ 维的矩阵 Γ 来表示

$$\Gamma_{L \times L} = [\tau_{ij}]$$

其中, $\tau_{ij} = t_j^2 - t_i^1$, 表示 $x^1(t)$ 的第 i 个脉冲和 $x^2(t)$ 的第 j 个脉冲形成的脉冲对 (i, j) 的时差; L 为交错脉冲列包含的脉冲数。

(2) 将时差窗 $[w_L, w_U]$ 按一定的间隔 $\Delta\tau$ 划分为 K 个直方格, 将 Γ 中满足条件 $\tau_{ij} \in [w_L, w_U]$ 的元素按照

$$k = [(\tau_{ij} - w_L) / \Delta\tau] \quad (14)$$

投影到直方图的第 k 直方格中, $[\cdot]$ 表示取整运算, 得到直方图矢量 $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_K]$ 。其中, $h_k (k = 1, 2, \dots, K)$, 表示第 k 个直方格中累积的时差的数量, 即第 k 个直方峰的高度。

(3) 定义 K 个集合 u_k

$$\begin{aligned} u_k &= \{(i, j) \mid k \\ &= [(\tau_{ij} - w_L) / \Delta\tau], w_L \leq \tau_{ij} \leq w_U\}, \\ &k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (15)$$

u_k 中的元素 (i, j) 代表矩阵 Γ 中的元素 τ_{ij} 所在的位置, 同时也代表 $x^1(t)$ 的第 i 个脉冲和 $x^2(t)$ 的第 j 个脉冲形成的配对。不难看出, u_k 就是由投影到第 k 个直方格中的所有脉冲对 (i, j) 组成的集合。如果该直方格对应某个辐射源的真实时差, 那么 u_k 中的元素 (i, j) 就表示 $x^1(t)$ 的第 i 个脉冲和 $x^2(t)$ 的第 j 个脉冲属于该辐射源。

(4) 定义扩展算子 $(\cdot)^+$,对每个 u_k ,得到扩展集合

$$u_k^+ = \{(i, j) \mid \tau_{ij} \in [w_L, w_U], \exists j_1, \text{s.t. } (i_1, j_1) \in u_k \text{ 或者 } \exists i_1, \text{s.t. } (i_1, j) \in u_k\} \quad (16)$$

事实上,(16)式的含义是,如果 (i_1, j_1) 是 u_k 中的元素,那么在满足时差窗约束的前提下,矩阵 Γ 的第 i_1 行和第 j_1 列的位置都是 u_k^+ 中的元素。 u_k^+ 中元素的意义在于,如果 u_k 确定了属于某个辐射源的所有脉冲,这些脉冲在 $x^1(t)$ 中的序号为 i_1, i_2, \dots, i_{h_k} ,在 $x^2(t)$ 中的序号为 j_1, j_2, \dots, j_{h_k} ,那么 u_k^+ 就得到了与这些脉冲有关的所有脉冲对。由第1节的分析可知,正是这些脉冲对构成了该辐射源的真实直方峰、虚假直方峰以及与该辐射源有关直方图噪声。

综合以上部分,扩展时差直方图 H 可以表示为由上述元素组成的 $2K + 2$ 元组

$$H = \{\Gamma, h, \{u_k\}, \{u_k^+\}\}, k = 1, 2, \dots, K \quad (17)$$

在传统直方图 h 的基础上, H 用 u_k 记录了投影到直方格 k 中的脉冲对,用矩阵 Γ 保留了时差中隐含的脉冲对的二维结构,并通过这种二维结构,将 u_k 扩展为 u_k^+ 。

为方便接下来对分选步骤的描述,定义筛选算子 S 。令集合 c 为由 Γ 中的部分或全部位置 (i, j) 组成的集合, \hat{c} 为 c 的补集。 $S(\Gamma, c)$ 表示这样一个矩阵,该矩阵与 Γ 具有相同的维度,且在 c 中元素指定的位置上,该矩阵与 Γ 具有相同的值,即

$$S(\Gamma, c) = \begin{cases} \tau_{ij} & , (i, j) \in c \\ Nan & , (i, j) \in \hat{c} \end{cases} \quad (18)$$

其中, Nan 表示“非数”,即不参与任何运算。

2.2 分选步骤

递归扩展直方图分选方法按照累积脉冲数从多到少的顺序,序贯地检测并分选出每个辐射源的脉冲列,具体包括以下步骤。

第一步:初始化。按2.1节的方法构建扩展直方图 H ,并设置最少脉冲数门限 Tr 。 Tr 是算法默认的辐射源最少需要包含的脉冲数;

第二步:辐射源检测。选取 h 中的最大元素 h_{max} ,并记录该元素所在的直方格序号 k_{max} 。若 $h_{max} < Tr$,认为辐射源提取完毕,退出递归过程,否则,认为检测到一个新的辐射源 E ;

第三步:辐射源脉冲提取。根据 k_{max} 得到 $u_{k_{max}}$ 。按照 $u_{k_{max}}$ 中的元素分选出辐射源 E 的脉冲列,即如果 $(i, j) \in u_{k_{max}}$,那么表示 $x^1(t)$ 中的第 i

个脉冲和 $x^2(t)$ 中的第 j 个脉冲属于辐射源 E ;

第四步:计算扩展集合。计算 $u_{k_{max}}$ 的扩展集合 $u_{k_{max}}^+$ 。

第五步:更新直方图,重复递归过程。令 $\Gamma = S(\Gamma, u_{k_{max}}^+)$,用更新后的 Γ 重新计算扩展直方图 H ,然后,重复步骤二到步骤五。

3 仿真结果与分析

仿真场景设置:设有两个接收站,时差窗为 $[-400\mu s, 400\mu s]$,侦察时间 $T = 0.1s$ 。侦察范围内有7个辐射源E1~E7,参数如表1所示。设置TOA测量误差为 $100ns$,按间隔 $\Delta\tau = 400ns$ 划分时差窗。

表1 辐射源参数表

Tab. 1 The parameters of emitters

辐射源	PRI 类型	PRI (μs)	脉冲数	真实时差 (μs)	重频属性
E1	固定	433	230	-300	高重频
E2	参差	477, 487, 555, 677	183	210	高重频
E3	固定	660	150	-200	高重频
E4	抖动	$1380 \pm 10\%$	73	-150	常规重频
E5	滑变	1344 ~ 1433	71	-100	常规重频
E6	固定	6977	16	-50	超低重频
E7	固定	7863	12	80	超低重频

仿真得到的由原始数据生成的直方图如图3所示。从图中可以看出,在E1~E5的真实时差位置都积累出了明显的直方峰;由于E6和E7的PRI较大,其累积的直方峰几乎淹没在直方图噪声中,难以检测。E1由于具有固定的重频,并且满足高重频条件,因此在时差值为 $133\mu s$ ($-300\mu s + 433\mu s$)处累积了与真实直方峰高度几乎相同的虚假直方峰;同样,E2在时差值为 $-267\mu s$ ($210\mu s - 477\mu s$)、 $-277\mu s$ ($210\mu s - 487\mu s$)和 $-345\mu s$ ($210\mu s - 555\mu s$)处也出现了虚假直方峰,高度约为真实直方峰的 $1/4$;E3虽然有较高的脉冲重复频率,但是由于其真实时差 $\Delta = -200\mu s$,不满足形成交叉配对的条件,未产生虚假直方峰。

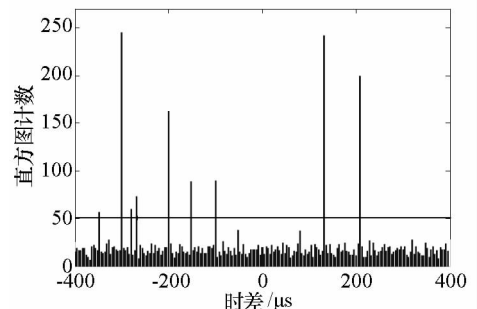


图3 时差直方图

Fig. 3 TDOA histogram of all emitters

若采用传统的直方图过门限检测法对图 3 所示的时差直方图进行直方峰检测和信号分选,会得到错误的分选结果。假设设置检测门限为 50,那么将检测到 9 个辐射源,其中 5 个为真实辐射源,分别对应 E1 ~ E5,4 个为由虚假直方峰造成的虚假辐射源,辐射源 E6 和 E7 未被检测到。另外,由于较高的时差噪声水平,从直方峰中提取出的脉冲列中会包含较多的错误脉冲。

采用递归扩展直方图分选方法对仿真数据进行处理,设置辐射源最小累积脉冲数门限 $Tr = 5$,得到 7 个分选结果,分选过程中得到的辐射源 E1 ~ E7 的直方图提取结果分别如图 4(a) ~ (g) 所示。

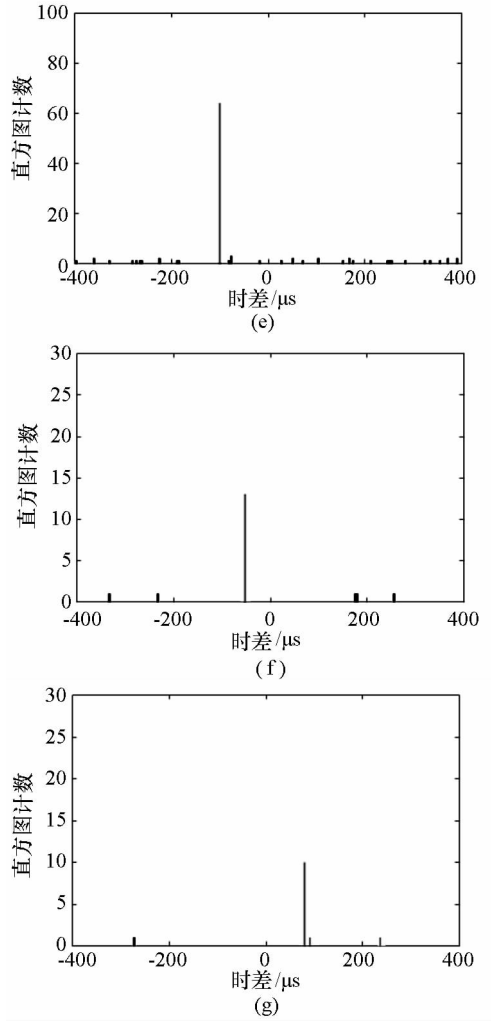
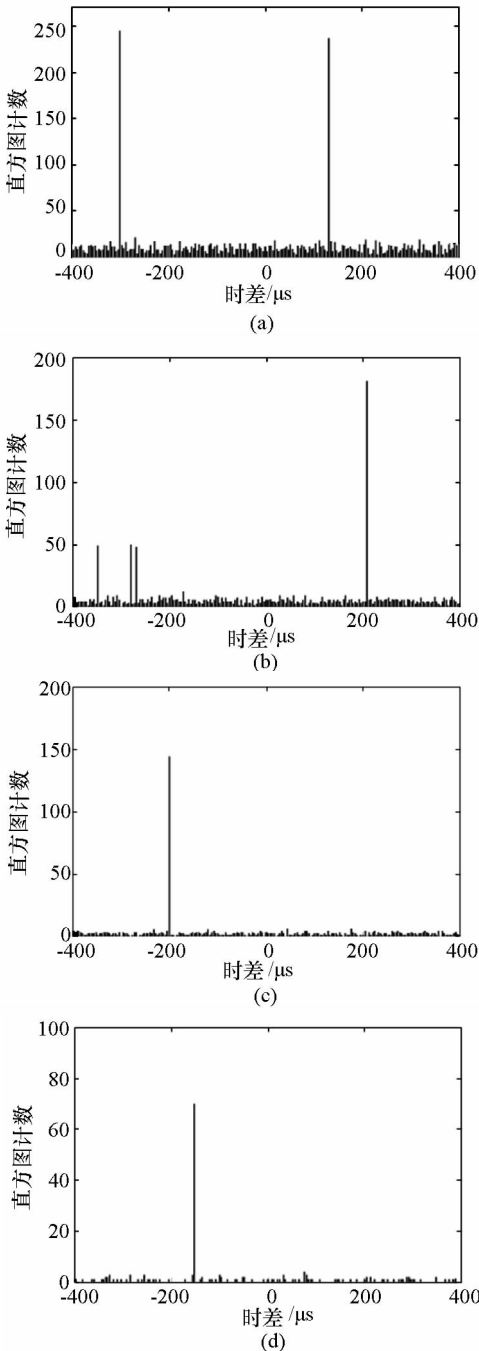


图 4 递归扩展直方图分选方法得到的分选结果

Fig. 4 Results of TDOA sorting utilizing recursive extended histogram algorithm

将每个辐射源分选出的脉冲序列与实际的脉冲序列进行比较,得到的结果如表 2 所示。

表 2 辐射源脉冲分选结果

Tab. 2 Statistical results of TDOA sorting

辐射源	正确分选脉冲数	误选脉冲数	漏选脉冲数
E1	230	13	0
E2	179	9	4
E3	143	5	7
E4	70	1	3
E5	67	1	4
E6	15	0	1
E7	11	0	1

从表 2 可以看出,递归扩展直方图分选方法能够正确地检测出所有 7 个辐射源,并以较高的正确率分选出每个辐射源的脉冲列。这是由于在每次递归过程中,扩展运算将与已分选出的辐射源有关的脉冲对从原始脉冲对数据中移除的结

果。如图4所示,辐射源E1和E2的虚假直方峰与真实直方峰被同步提取出来,有效避免了虚假直方峰对后续分选过程的影响;同时,在递归过程中,直方图噪声水平不断降低,使得辐射源E6和E7能够被正确地检测出来。

递归扩展直方图分选方法同时避免了检测门限的选取问题。由于不同场景下辐射源的时差分布情况有较大差异,传统的直方图过门限检测法很难找到一个普适的门限。递归关联直方图分选方法只需要指定辐射源需要包含的最小脉冲数,完全避免了门限选取问题对分选结果的影响。

表2中的误选脉冲数和漏选脉冲数表明,分选结果仍有少量误差存在,说明直方图噪声会对分选结果产生一定影响。在时差直方图中,辐射源的真实直方峰内混有少量的直方图噪声,在提取该直方峰所包含的脉冲的过程中,不可避免地将这些噪声项所对应的脉冲一起归入该辐射源。对于最先提取的几个辐射源,分选出的脉冲数比实际的脉冲数略多;对于后面提取的辐射源,由于扩展运算的影响,少量的真实脉冲被当成噪声项移除了,所以导致分选出的脉冲数比实际的脉冲数略少。直方图噪声水平越高,这种影响就越大。在实际应用中,除了脉冲的到达时间信息,一般还能得到载频、脉宽等其他信息,进一步利用这些信息可以有效降低直方图噪声的影响,得到更加精确的分选结果。

4 结 论

在多站电子侦察系统中,时差分选是首选的信号分选方法。多个辐射源的时差分布具有近似的线性叠加性,即总的时差分布可以看成是其中每个辐射源单独产生的时差分布简单叠加后,再加上直方图噪声的结果。本文提出的递归扩展直方图的时差分选方法将每个辐射源产生的所有时差项看做一个整体,通过递归处理,同步解决了高重频辐射源和超低重频辐射源给时差分选带来的问题,有效地提高了辐射源检测和分选的正确率,适合于工程应用。

参考文献 (References)

[1] Ionel R, Ionel S. The majority principle in TDOA estimation [C] // Proceedings of 2010 8th International Conference on Communications, 2010, 7: 21 - 24.
 [2] 国强. 雷达信号分选理论研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 3 - 4.

GUO Qiang. The research of radar signal sorting theory [M]. Beijing: Science Press, 2010: 3 - 4. (in Chinese)
 [3] Quan W, Li P, Xu F K. An algorithm of signal sorting and recognition of phased array radar [C] // Proceedings of Signal processing (ICSP), 2010 IEEE 10th International Conference on, 2010, 10: 1877 - 1880.
 [4] Wiley R G. ELINT: The interception and analysis of radar signals [M]. Norwood, MA: Artech House, 2006, 317 - 318.
 [5] 郭福成, 樊昉, 周一宇, 等. 空间电子侦察定位原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 81 - 86.
 GUO Fucheng, FAN Yun, ZHOU Yiyu, et al. Localization principles in space electronic reconnaissance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 81 - 86. (in Chinese)
 [6] Antonyuk V, Prudyus I, Lobur M. 3D passive TDOA system with short baseline [C] // Proceedings of 2008 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2008, 2: 265 - 268.
 [7] Musicki D, Koch W. Geolocation using TDOA and FDOA measurements [C] // Proceedings of 2008 11th International Conference on Information Fusion, 2008, 6: 1 - 8.
 [8] 袁罡, 陈鲸. 无源时差定位系统的静止目标聚类检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 728 - 731.
 YUAN Gang, CHEN Jing. A clustering detection algorithm of stationary target for passive time difference location system [J]. Journal of Electronics Information Technology, 2010, 32(3): 728 - 731. (in Chinese)
 [9] 杨林. 无源时差定位及其信号处理研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 1998.
 YANG Lin. On study of passive TDOA location method and its signal processing [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1998. (in Chinese)
 [10] 李涛, 姜文利, 周一宇. 高重频三星星座时差定位研究 [J]. 电子对抗技术, 2004, 19(4): 7 - 11.
 LI Tao, JIANG Wenli, ZHOU Yiyu. TDOA location with high PRF signals based on three satellites [J]. Electronic Warfare Technology, 2004, 19(4): 7 - 11.
 [11] 钟铨, 陈守稳. 时差与测向结合解高重频信号定位模糊的方法 [J]. 现代防御技术, 2008, 36(5): 108 - 112.
 ZHONG Hui, CHEN Shouwen. Approach combining with Radar direction finding of solving ambiguous location with high PRF signal [J]. Modern Defence Technology, 2008, 36(5): 108 - 112. (in Chinese)
 [12] 任文娟, 胡东辉, 丁赤飏, 等. 利用测向信息消除高重复频率信号的时差定位模糊 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 3004 - 3007.
 REN Wenjuan, HU Donghui, DING Chibiao, et al. Eliminating TDOA location ambiguity of high PRF signal based on direction information acquired [J]. Journal of Electronics Information Technology, 2010, 32(12): 3004 - 3007. (in Chinese)
 [13] 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): 53 - 55.
 YANG Lin, SUN Zhongkang, ZHOU Yiyu, et al. Pulse pairing of dense signals by signal cross correlation [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(3): 53 - 55. (in Chinese)