

多站时差与多参数联合分选定位方法*

马贤同, 罗景青, 吴世龙

(电子工程学院 雷达对抗系, 安徽合肥 230037)

摘要:多站电子侦察系统中,两个观测站接收到的脉冲信号到达时间差可以用于分选和定位。针对复杂信号脉间信息关联性弱,不能对脉冲数极少的信号进行分选的问题,提出一种多站时差与多参数联合分选定位新方法。该方法利用时差窗先验信息,将主站和所有副站脉冲同时进行多站时差和多参数联合预选,并将预选结果按位置进行融合,得到最终分选和定位结果,能对脉冲数极少的信号进行分选定位,甚至可实现单个脉冲的分选定位。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词:时差;多参数;信号分选;定位;多目标

中图分类号:TN957.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)06-078-06

Joint sorting and location method using TDOA and multi-parameter of multi-station

MA Xiantong, LUO Jingqing, WU Shilong

(Department of Radar Countermeasure, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In multi-station electronic reconnaissance system, TDOA (Time Difference Of Arrival) of the pulse signal received by two stations can be used for signal sorting and positioning. A novel method for joint sorting and location based on TDOA and multi-parameter of multi-station was proposed to deal with the problem of being unable to sort the signals with very few pulses caused by weak correlation between pulse information of complex signals in order to obtain final sorting and location results, the pulses of all stations were presorted by the presented method with TDOA window information and the presorting results were integrated according to targets' positions. Simulation results show that the proposed method is applicable and effective, which can implement the pulse signal sorting and positioning with very few pulses and even a single pulse sorting and positioning.

Key words: time difference of arrival; multi-parameter; signal sorting; positioning; multi-target

在多站电子侦察系统^[1-2]中,利用脉冲到达多个观测站的时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)信息^[3-4]进行信号分选的方法称为时差分选^[5]。辐射源信号参数变化方式复杂多样,而辐射源的位置参数较为稳定,所以时差分选可靠性高,是首选的信号分选方法^[6]。

传统的时差分选方法采用统计直方图方法^[5]实现,通过形成的超过一定门限的直方峰来判定分选的辐射源数目,但该方法会使高重频辐射源累积出虚假直方峰而产生虚警,从而使超低重频辐射源直方峰难以被检测而出现漏警。文献[5]将时差数据转换成直方图的结构,序贯地对各个辐射源进行检测和分选,可以同步解决高重频辐射源和超低重频辐射源给时差分选带来的问题,但该方法受直方图噪声影响较大,误选脉冲数和漏选脉冲数较

多。文献[7]利用测向信息消除高重频辐射源虚假直方峰的影响,但测向信息一般不容易获得。文献[8]利用时差相关性依据高重频信息的配对表现剔除虚假时差对,但并不能剔除所有虚假时差,且对低重频信号难以达到理想效果。

事实上,观测站除了得到脉冲的到达时间(Time of Arrival, TOA)信息外,一般还能得到载频(Radio Frequency, RF)、脉冲宽度(Pulse Width, PW)、脉冲幅度(Pulse Amplitude, PA)等^[9-10]其他信息。由于复杂信号脉间信息关联性弱,观测站接收的同一辐射源的不同脉冲参数变化差异往往较大,但多个观测站接收到某一辐射源同一脉冲的参数差异较小。因此,将主站和所有副站脉冲同时进行时差和多参数联合预选,并将预选结果按位置进行融合,最终得到精确的分选和定位结果。基

* 收稿日期:2014-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60801044)

作者简介:马贤同(1987—),男,安徽六安人,博士研究生,E-mail:mxtzhy@foxmail.com;

罗景青(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:luojingqing001@163.com

于这一思想,提出了多站时差与多参数联合分选定位方法。若某辐射源的一个脉冲被多个观测站同时接收到,可以实现单脉冲分选定位。

1 脉冲列模型

假定多站电子侦察系统包括一个主站和 I 个副站,各站分别测得各自脉冲列的脉冲描述字(Pulse Description Word, PDW),且经过了频率、脉冲类型等预处理。主站得到 N_0 个脉冲,参与分选和时差计算的 PDW 为:

$$\{t_{0,1}, \mathbf{P}_{0,1}\}, \{t_{0,2}, \mathbf{P}_{0,2}\}, \dots, \{t_{0,N_0}, \mathbf{P}_{0,N_0}\} \quad (1)$$

其中, t_{0,n_0} ($n_0 = 1, 2, \dots, N_0$) 为主站脉冲的到达时间,并按到达时间的先后顺序排列, n_0 为主站脉冲序号, \mathbf{P}_{0,n_0} 为主站第 n_0 个脉冲的 PDW 中除到达时间外的其他参数矢量,它一般包括载频、脉冲幅度和脉冲宽度等参数。

副站 i ($i = 1, \dots, I$) 共得到 N_i 个脉冲,参与分选和时差计算的 PDW 为:

$$\{t_{i,1}, \mathbf{P}_{i,1}\}, \{t_{i,2}, \mathbf{P}_{i,2}\}, \dots, \{t_{i,N_i}, \mathbf{P}_{i,N_i}\} \quad (2)$$

其中, t_{i,n_i} , \mathbf{P}_{i,n_i} ($i = 1, \dots, I; n_i = 1, 2, \dots, N_i$) 分别为副站 i 中第 n_i 个脉冲的 PDW 中的到达时间和除到达时间外的其他参数矢量, n_i 为副站 i 脉冲序号。

假设侦察区域内有三个目标,以主站为例,主站接收到三个目标信号的脉冲列及混合后的脉冲列示意图如图 1 所示。作为示意,每个脉冲是一个柱形,并用柱形的高度区别三个目标信号的脉冲,漏脉冲的柱形用虚点填充,干扰脉冲用斜网格填充,漏脉冲不出现在混合脉冲中,干扰脉冲则保留在混合脉冲中。

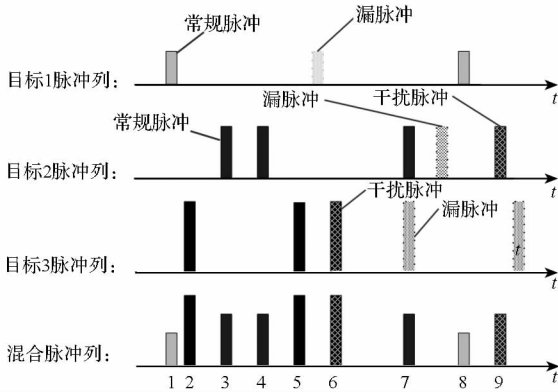


图 1 主站得到的脉冲列示意图

Fig. 1 Pulse train of the main station

2 多站时差与多参数联合预分选

2.1 脉冲参数匹配规则

当多个观测站接收到脉冲列后,需要判断不

同观测站接收到的两个脉冲是否属于同一个辐射源,也需要判断同一观测站接收到的不同脉冲是否属于同一个辐射源,判断的标准是脉冲内部参数(载频、脉冲幅度和脉冲宽度等)是否匹配,并用匹配因子衡量两脉冲的匹配程度。根据待匹配脉冲是否属于同一个观测站的脉冲列,可以将脉冲参数匹配分为脉冲列内部脉冲的参数匹配和脉冲列间脉冲的参数匹配,其匹配因子分别设为 β_0 和 β_1 。

1) β_0 的计算方法。以主站脉冲为例,脉冲列内部脉冲的参数匹配因子 β_0 ,即为 \mathbf{P}_{0,n_0} 和 \mathbf{P}_{0,n'_0} 的参数匹配因子。其中, $n_0 = 1, 2, \dots, N_0; n'_0 = 1, 2, \dots, N_0$, 且 $n_0 \neq n'_0$ 。 $\mathbf{P}_{0,n_0}, \mathbf{P}_{0,n'_0}$ 的欧式距离为:

$$r_1 = \|(\mathbf{P}_{0,n_0} - \mathbf{P}_{0,n'_0})^T \mathbf{W}(\mathbf{P}_{0,n_0} - \mathbf{P}_{0,n'_0})\|^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中, \mathbf{W} 在此为加权矩阵, \mathbf{W} 一般为对称矩阵。若脉冲的 PDW 矢量 \mathbf{P}_{0,n_0} 中各参数相互独立,则 \mathbf{W} 为对角阵,对角元素取值的大小与测量误差的方差成反比。由于参数矢量 \mathbf{P}_{0,n_0} 包括载频、脉内调制描述代码、脉冲幅度和脉冲宽度等参量,则 \mathbf{W} 对角元素取值为对应参数测量误差方差量纲的倒数。脉冲列内部参数匹配因子 β_0 可计算为:

$$\beta_0 = \begin{cases} 1 - r_1/r_0, & r_1 < r_0 \\ 0, & r_1 \geq r_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, r_0 为参考距离, r_0 表示脉冲列内部两脉冲不匹配时的最小欧式距离,即认为 r_1 达到多大时脉冲列内部两脉冲不匹配,在实际应用中, r_0 可根据脉冲接收的可靠性进行设定。

2) β_1 的计算方法。主站与副站 i 的脉冲列间脉冲的参数匹配因子 β_1 ,即 \mathbf{P}_{0,n_0} 和 \mathbf{P}_{i,n_i} 的参数匹配因子,其中 $n_0 = 1, 2, \dots, N_0, n_i = 1, 2, \dots, N_i$ 。 β_1 的计算方法与 β_0 的计算方法类似,只是把脉冲对 $\mathbf{P}_{0,n_0}, \mathbf{P}_{0,n'_0}$ 换成脉冲对 $\mathbf{P}_{0,n_0}, \mathbf{P}_{i,n_i}$ 。

$$r_2 = \|(\mathbf{P}_{0,n_0} - \mathbf{P}_{i,n_i})^T \mathbf{W}(\mathbf{P}_{0,n_0} - \mathbf{P}_{i,n_i})\|^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\beta_1 = \begin{cases} 1 - r_2/r'_0, & r_2 < r'_0 \\ 0, & r_2 \geq r'_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, r'_0 为参考距离, r'_0 表示脉冲列间两脉冲不匹配时的最小欧式距离,同样, r'_0 反映了脉冲列间两脉冲的 r_2 达到多大时两脉冲不匹配并可提前设定。

3) 脉冲参数匹配规则设定。由于复杂信号参数可能出现捷变、跳变或随机变化,脉间信息关联性弱,观测站接收的同一辐射源的不同脉冲因参数变化差异较大,但多个观测站接收到某一辐射源同一脉冲的参数差异较小。因此,设置两个匹配门限,一个是脉冲列内不同脉冲的匹配门限

γ_0 , 用来判别脉冲是否是同一个辐射源在不同时间发射的; 另一个是两脉冲列间的单个脉冲匹配门限 γ_1 , 用来判别同一个脉冲是否被两个接收机接收。由于多个观测站接收到某一辐射源同一脉冲的参数差异较小, 考虑到频率捷变、脉冲内部编码变化等情况, 通常 $\gamma_0 < \gamma_1$, 如 $\gamma_0 = 0.3, \gamma_1 = 0.7$ 。对于脉冲列内部脉冲的参数匹配, 若 $\beta_0 \geq \gamma_0$, 参数匹配成功; 否则, 参数匹配不成功。对于脉冲列间脉冲的参数匹配, 若 $\beta_1 \geq \gamma_1$, 参数匹配成功; 否则, 参数匹配不成功。

2.2 预选数学模型

取主站第 n_0 个脉冲, 计算该脉冲到达时间 t_{0,n_0} 与副站 i 第 n_i 个脉冲的到达时间 t_{i,n_i} 之差:

$$\Delta\tau_{0,i} = t_{0,n_0} - t_{i,n_i} \quad (7)$$

定义主站第 n_0 个脉冲与副站 i 第 n_i 个脉冲的相似度为:

$$r_{i,n_i} = u(\beta_1 - \gamma_1) \cdot \int_{\tau_L^i}^{\tau_U^i} \delta(\tau - \Delta\tau_{0,i}) d\tau \quad (8)$$

其中, $u(\cdot)$ 为修正后的阶跃函数, 记为 $u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$, τ 为时差值, $[\tau_L^i, \tau_U^i]$ 为时差窗, τ_L^i 和 τ_U^i 分别为主站与副站 i 可以测量得到侦察区域内所有可能时差的最小值和最大值, 它由侦察区域和观测站构型确定, 与辐射源自身的性质无关。由式(8)可知, 若主站第 n_0 个脉冲与副站 i 第 n_i 个脉冲的时差 $\Delta\tau_{0,i}$ 在时差窗范围内, 并且满足参数匹配条件 $\beta_1 \geq \gamma_1$, 则 $r_{i,n_i} = 1$; 若主站第 n_0 个脉冲与副站 i 第 n_i 个脉冲的时差不在时差窗范围内, 或者不满足参数匹配条件 $\beta_1 \geq \gamma_1$, 则 $r_{i,n_i} = 0$ 。不考虑多个辐射源参数不可区分的情况, 即认为副站 i 中最多只有一个脉冲与主站第 n_0 个脉冲相似度为 1, 则主站第 n_0 个脉冲与副站 i 脉冲的相似度之和为:

$$r_i = \sum_{n_i=1}^{N_i} r_{i,n_i} \quad (9)$$

通过式(9)可以看出, 若存在副站 i 某个脉冲与主站第 n_0 个脉冲相匹配, $r_i = 1$, 并记副站 i 与主站第 n_0 个脉冲相匹配的脉冲序号为 k_i ; 否则, $r_i = 0$ 。 I 个副站中满足相似度为 1 的副站个数为:

$$I_m = \sum_{i=1}^I r_i \quad (10)$$

为了实现地面目标定位, 一般需要两个时差值, 则 $I_m \geq 2$ 才能满足定位条件; 若对空中目标定位, 则需要 $I_m \geq 3$ 。不失一般性, 以对地面目标定位为例进行分析, 若 $I_m < 2$, 令 $n_0 = n_0 + 1$, 重复计算式(7)~(10); 若满足 $I_m \geq 2$, 则确定主站和

副站相匹配脉冲序号为: $[n_0, r_1 k_1, \dots, r_i k_i, \dots, r_I k_I]$, 其中序号为 0 的列表示该副站没有脉冲与主站第 n_0 个脉冲相匹配, 这是由于漏脉冲现象引起的。称该脉冲序号描述的一组脉冲为基准脉冲。找到的基准脉冲示意图如图 2 所示。图 2 中主站的 1 号脉冲与副站 1 的 2 号脉冲和副站 2 的 1 号脉冲是一组基准脉冲。

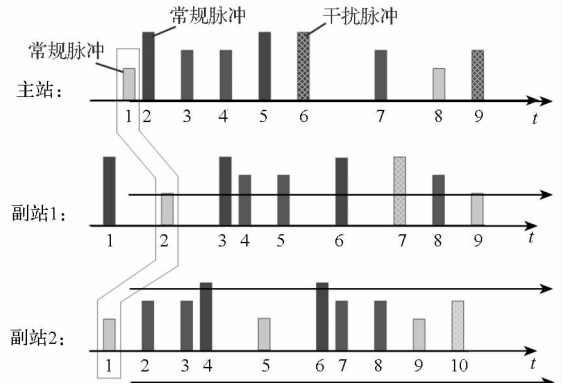


图 2 基准脉冲示意图

Fig. 2 Diagram of benchmark pulse

计算主站和副站相匹配脉冲间的时差:

$$\tau_i = t_{0,n_0} - t_{i,r_i k_i}, \quad r_i \neq 0 \quad (11)$$

称这一时差为基准脉冲预选时差。计算主站第 n'_0 个脉冲与第 n_0 个脉冲的脉冲列内部参数匹配因子 $\beta_0, n'_0 = 1, 2, \dots, N_0$, 且 $n'_0 \neq n_0$ 。若 $\beta_0 \geq \gamma_0$, I 个副站中存在与主站第 n'_0 个脉冲相匹配的副站个数为:

$$I'_m = \sum_{i=1}^I \sum_{n'_i=1}^{N_i} u(\beta_0 - \gamma_0) \cdot \int_{-\sigma_\tau}^{\sigma_\tau} \delta(\tau + \tau_i - \Delta\tau'_{0,i}) d\tau \quad (12)$$

其中, $\Delta\tau'_{0,i} = t_{0,n'_0} - t_{i,n'_i}$, σ_τ 为时差测量误差估计值。若 $I'_m < 2$, 令 $n'_0 = n'_0 + 1$, 重复式(12); 若 $I'_m \geq 2$, 则该主站第 n'_0 个脉冲与第 n_0 个脉冲属于同一个目标, 找到主站中其他与第 n_0 个脉冲属于同一个目标的脉冲, 并将属于同一目标的脉冲取走另存储, 完成第一次预选。然后对未分选的脉冲重复式(7)~(12), 直到主站所有脉冲都分选完为止。

2.3 预选步骤

在整个预选过程中, 需要多次重新确定基准脉冲以完成不同辐射源信号脉冲的分选, 同一辐射源可能脉间参数变化, 也可能需要多次重新确定基准脉冲。多站时差与多参数联合预选具体包括以下步骤:

步骤 1: 参数设定与初始化。按先验信息确定时差窗范围和时差测量误差 σ_τ , 并设定脉冲列内

部脉冲参数匹配门限 γ_0 , 脉冲列间脉冲参数匹配门限 γ_1 , 以及加权矩阵 \mathbf{W} 等参数。

步骤 2: 基准脉冲选择与匹配。根据初始化确定主站脉冲列的基准脉冲序号, 在第 i ($i = 1, \dots, I$) 个副站脉冲列中寻找匹配脉冲。对于匹配成功的副站, 计算预选时差; 若匹配成功的副站数少于 2 个, 则匹配失败, 重新找基准脉冲。

步骤 3: 完成第一次预分选。找到基准脉冲后, 先在主站脉冲列中找同列匹配脉冲作为新的参考脉冲, 再在副站脉冲列中找时差与基准脉冲预选时差匹配, 而且参数与新的参考脉冲也匹配的脉冲, 将所有成功匹配的脉冲分选出来, 完成第一次预分选。

步骤 4: 完成预分选。对未分选的脉冲重复第二步和第三步, 直到主站所有脉冲都分选完毕完成预分选。

3 预分选后处理技术

预分选完成了双路脉冲列时差和多参数联合分选, 对于多目标或复杂信号情况, 分选的结果可能很多。一是同一辐射源脉间参数可能发生变化, 只要脉冲参数发生了变化, 均产生新的分选结果。二是主站和每一个副站都要进行双路分选, 分选的结果更多, 要进行配对处理。设预分选后总共产生 Q 组时差, Q 组时差中包含真实时差。每组时差至少含有两个时差值, 表示至少有两个副站和主站接收到辐射源的某个“同一”脉冲, 最多含有与副站数 I 相同个数的时差。比较每一组时差(未获得时差的副站不参与比较), Q 组时差中任一时差与其他时差明显不同的均为不同的组, 对两组时差值

在时差误差容差范围内近似相等的时差组采用统计平均的方法合并, 完成时差聚组, 聚组后的时差组数记为 Q' , 表示最终获得 Q' 组真实时差, 记为:

$$\mathbf{Z} = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_{Q'}]$$

$$z_q = [z_{q,1} \quad z_{q,2} \quad \dots \quad z_{q,I_q}]^T, \quad q = 1, 2, \dots, Q'$$

(13)

其中, I_q 表示第 q 组时差的时差个数, $I_q \leq I$, z_{q,i_q} ($i_q = 1, \dots, I_q$) 表示第 q 组时差中副站 i_q 和主站得到的时差值。

最终确定的时差组数为分选出目标的个数, 根据每组时差可以用牛顿迭代法对各个目标进行定位, 并根据定位结果将预分选结果进一步合并, 确定各个目标所对应的脉冲列, 完成分选。

4 仿真实验

仿真场景设置: 设侦察系统包括五个观测站, 其中一个主站, 四个副站, 主站位置为 $[130; 130; 200]$ km; 副站 1 的位置设置为 $[120; 150; 190]$ km; 副站 2 的位置设置为 $[130; 160; 200]$ km; 副站 3 的位置设置为 $[160; 130; 200]$ km; 副站 4 的位置设置为 $[150; 120; 190]$ km。对地面辐射源目标进行侦察定位, 辐射源可能存在的区域设置为 $[200, 400; 300, 500; 0, 0]$ km。根据观测站和辐射源所在区域范围可确定时差窗 $\tau_L = -4.68 \mu\text{s}$ 和 $\tau_U = 85.85 \mu\text{s}$ 。侦察范围内有 5 个辐射源 E1 ~ E5, 参数如表 1 所示。其中 ID 为目标序号, f 为频率, W 为脉宽, A 为脉冲幅度, t 为到达时间, b 为脉冲起始时间, Δt 为脉冲重复间隔, L 为目标位置, N 为辐射源的脉冲数。

表 1 辐射源参数表

Tab. 1 Parameters of emitters

ID	f/MHz	$W/\mu\text{s}$	A	Δt 类型	$t/\mu\text{s}$	L/km	N
E1	2900 ~ 2950	11	1	固定	$b: 2246, \Delta t: 403$	(300, 400)	1
E2	3050	11 ~ 14	1	参差	$b: 6, \Delta t: [270, 386, 491]$	(350, 450)	100
E3	3000 ~ 3100	12	2	参差	$b: 130, \Delta t: [960, 1050, 1160, 1290]$	(250, 350)	4
E4	3150	13	1	抖动	$b: 246, \Delta t: 415 \pm 10\%$	(220, 320)	3
E5	3050 ~ 3100	14	1	滑变	$b: 356, \Delta t: 1500 \sim 1700$	(230, 330)	6

脉冲产生过程中, 对 f , W 和 A 分别加上均方根为 2MHz, 0.2 μs 和 0.2 的随机误差, 对 t 加上均方根 σ_t 为 50ns 的随机误差。由于外部环境的影响, 观测站可能由于脉冲幅度较低或两脉冲的后沿与前沿靠得太近甚至存在交叠而丢失脉冲。仿真中, 丢失脉冲的幅度门限设为 0.8, 即认为脉冲

幅度小于 0.8 的视为丢失脉冲。两脉冲频率间隔小于 50MHz 即认为两脉冲落入同一信道, 若同一信道的前一脉冲后沿与后一脉冲前沿到达时间小于 2 μs , 则后一脉冲视为丢失; 若两脉冲交叠, 则后一脉冲丢失, 并改变前一脉冲的脉宽。丢失脉冲在分选处理时不参与处理。将每个辐射源预分

选出的脉冲列与实际脉冲列相比较,得到的预选分选结果如表 2 所示。

表 2 $\sigma_t = 50\text{ns}$ 时辐射源脉冲预选分选结果

Tab.2 Results of TDOA presorting with $\sigma_t = 50\text{ns}$

ID	正确分选脉冲数	误选脉冲数	漏选脉冲数
E1	1	0	0
E2	97	0	3
E3	4	0	0
E4	3	0	0
E5	6	0	0

从表 2 可以看出,在 TOA 均方根误差为 50ns 时,分选正确率可以达到 100%,以上是一次实验的结果,进行多次 Monte-Carlo 实验均可得到相同的分选结果。需要说明的是:辐射源 E2 漏选脉冲数为 3 是在脉冲产生时就已经丢失,参与分选的脉冲数为 97。增加 TOA 均方根误差到 100ns,得到的辐射源预选分选结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,辐射源 E2 漏选了一个脉冲,这个脉冲被判为一个辐射源 E6,产生虚警现象,经过预选分选后处理技术中的时差聚组后可将辐射源 E6 并入 E2,消除虚警。

表 3 $\sigma_t = 100\text{ns}$ 时辐射源脉冲预选分选结果

Tab.3 Results of TDOA presorting with $\sigma_t = 100\text{ns}$

ID	正确分选脉冲数	误选脉冲数	漏选脉冲数
E1	1	0	0
E2	96	0	4
E3	4	0	0
E4	3	0	0
E5	6	0	0
E6	0	1	0

利用时差信息运用牛顿迭代法定位,迭代初始点选为侦察区域的中心点, k 次 Monte-Carlo 实验的均方根误差为:

$$\sigma_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{Q'k} \sum_{k=1}^k \sum_{q=1}^{Q'} [(\hat{x}_{q,k} - x_q)^2 + (\hat{y}_{q,k} - y_q)^2]} \quad (14)$$

其中, $(\hat{x}_{q,k}, \hat{y}_{q,k})$ 为目标 q 第 k 次实验得到的估计位置, (x_q, y_q) 为目标 q 的真实位置。图 3 为 500 次 Monte-Carlo 实验统计的均方根误差。从图中可以看出,随着 TOA 测量误差的增大,定位误差也随之增大;当 TOA 测量误差较小时, RMSE

曲线接近克拉美罗下界 (Cramer Rao Lower Bound, CRLB);随着 TOA 测量误差的增大, RMSE 曲线越偏离 CRLB。通过辐射源的脉冲数目可以看出,本文方法实现了对极少数数量脉冲的分选,甚至可以对单脉冲分选定位。

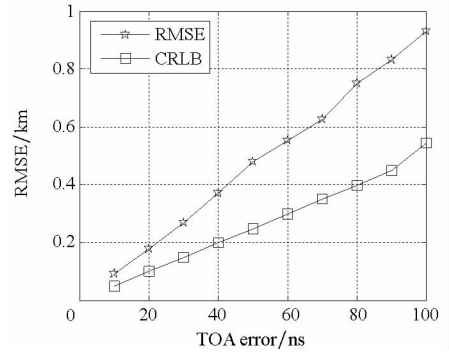


图 3 定位 RMSE

Fig.3 Location of RMSE

5 结论

针对传统分选方法不能对脉冲数极少的信号进行分选的问题,提出了多站时差与多参数联合分选定位新方法。该方法综合利用了脉冲到达多个观测站的时差信息和其自身参数信息,首先进行预选分选;然后对预选分选结果按位置进行融合,实现定位辅助分选;最终得到精确的分选和定位结果。仿真实验表明,该方法是有效的,且能对脉冲数极少的信号进行分选定位,甚至可实现单个脉冲的分选定位。该方法的适用条件是多个待分选辐射源参数信息在一定程度上是可以区分的,当多个辐射源参数非常相似以致不可区分时,参数信息则失去作用。全部依靠时差信息进行分选定位的方法是下一步研究的重点。

参考文献 (References)

- [1] 郭福成,樊昀,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)
- [2] Bindhu S K H, Murali Krishna P P. Geolocation using TDOA and FDOA measurements in sensor networks using non-linear elements [J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2014, 14(1): 35-39.
- [3] Kay S, Vankayalapati N. Improvement of TDOA position fixing using the likelihood curvature [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(8): 1910-1914.
- [4] Xu B, Sun G D, Yu R, et al. High-accuracy TDOA-based localization without time synchronization [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(8): 1567-1576.
- [5] 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 Haibin, 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)
- [6] 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)
- [7] 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): 3003 - 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): 3003 - 3007. (in Chinese)
- [8] 任文娟,胡东辉,丁赤飏. 一种新的利用时差相关性的时差分选配对方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 89 - 96.
- REN Wenjuan, HU Donghui, DING Chibiao. New method for TDOA sorting and pairing using TDOAs' correlation [J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2011, 38(6): 89 - 96. (in Chinese)
- [9] 李英达,肖立志,李吉民,等. 基于网格聚类的复杂雷达信号分选[J]. 现代防御技术, 2013, 41(5): 124 - 128.
- LI Yingda, XIAO Lizhi, LI Jimin, et al. A method of complex radar signal based on grid clustering [J]. Modern Defence Technology, 2013, 41(5): 124 - 128. (in Chinese)
- [10] 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.
- LI Yingda, 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. (in Chinese)
- [2] Seco-Granados G, Fernandez-Rubio J A, Fernandez-Prades C. ML estimator and hybrid beamformer for multipath and interference mitigation in GNSS receivers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(3): 1194 - 1208.
- [3] O'Brien A J. Adaptive antenna arrays for precision GNSS receivers [D]. Columbus, USA: the Ohio State University, 2009.
- [4] Arribas J, Fernandez-Prades C, Closas P. Antenna array based GNSS signal acquisition for interference mitigation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 223 - 243.
- [5] LI M, Dempster A G, Balaei A T, et al. Switchable beam steering/null steering algorithm for CW interference mitigation in GPS C/A code receivers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1564 - 1579.
- [6] Zhang Y D, Amin M G. Anti-jamming GPS receiver with reduced phase distortions [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(10): 635 - 638.
- [7] Frost O L III. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing [J]. Proceeding of IEEE, 1962, 60(8): 926 - 935.
- [8] Applebaum S P. Adaptive arrays [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1976, 24(5): 585 - 598.
- [9] 桑怀胜,李峥嵘,王飞雪,等. 采用RLS算法的功率倒置阵列的性能 [J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(3): 36 - 40.
- SANG Huai sheng, LI Zhengrong, WANG Feixue, et al. The performance of power inversion array using RLS algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(3): 36 - 40. (in Chinese)
- [10] Compton R T, Jr. The power-inversion adaptive array: concept and performance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, AES - 15(6): 803 - 813.
- [11] Chen Y H, Juang J C, Seo J, et al. Design and implementation of real-time software radio for anti-interference GPS/WAAS sensors [J]. Sensors, 2012, 12(10): 13417 - 13440.
- [12] Chen Y H, Juang J C, De Lorenzo D S, et al. Real-time software receiver for GPS controlled reception pattern antenna array processing [C]// Proceedings of the 23th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Portland, OR, USA, 2010: 1932 - 1941.
- [13] Daneshmand S, Sokhandan N, Zaeri-Amirani M, et al. Precise calibration of a GNSS antenna array for adaptive beamforming applications [J]. Sensors, 2014, 14(6): 9669 - 9691.
- [14] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2006.
- [15] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- XIE Gang. Principles of GPS and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [16] 王永良,吴仁彪. 通道不一致性、互耦对最优阵列处理器的影响 [J]. 系统工程与电子技术, 1993, 15(2): 49 - 55.
- WANG Yongliang, WU Renbiao. Effect of channel-to-channel mismatch and mutual-coupling on the performance of optimum array processors [J]. Systems Engineering and Electronics, 1993, 15(2): 49 - 55. (in Chinese)

(上接第73页)