

基于时差的同类辐射源信号分选定位方法

马贤同* 罗景青 孟祥豪
(电子工程学院 合肥 230037)

摘要: 多站电子侦察系统中, 多个观测站接收到的脉冲信号的时差信息可用于信号分选和定位。但当多个参数相近的同类辐射源信号在时域和频域都混叠在一起时, 会得到大量虚假时差信息。该文结合目标位置信息场定位法, 提出基于时差的同类辐射源信号分选定位方法。该方法首先利用时差窗先验信息, 将主站与副站的脉冲进行时差和参数匹配提取同类辐射源的时差信息, 然后对得到的所有时差利用目标位置信息场定位法确定目标数目和位置, 最后利用定位结果确定真实时差, 剔除虚假时差, 完成信号分选和目标精确定位。仿真实验验证了该方法的有效性和实用性。

关键词: 信号分选; 多目标定位; 到达时间差; 同类辐射源; 目标位置信息场

中图分类号: TN971

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)10-2363-06

DOI: 10.11999/JEIT141480

Signal Sorting and Positioning Method for Similar Radiation Sources Based on Time Difference of Arrival

Ma Xian-tong Luo Jing-qing Meng Xiang-hao
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In multiple platform electronic reconnaissance system, Time Difference Of Arrival (TDOA) of the pulse signal received by multiple stations can be used for signal sorting and positioning. However, when multiple emitter signals with similar parameters are mixed together in time and frequency domain, a lot of false TDOA information will be obtained by stations. Combined with Position Information Field (PIF) location method, a signal sorting and positioning method for similar radiation sources based on TDOA is proposed. TDOA information about similar radiation sources is firstly extracted from the pulses of all stations and TDOA window information by matching TDOA and multi-parameter in the proposed method. Then, multi-target's number and each target's position are obtained by position information field for target location method based on the TDOA information. Finally, positioning results are used to determine the real TDOA, eliminate the false TDOA, and complete signal sorting and target accurate positioning. Simulation results demonstrate the effectiveness and the practicality of this method.

Key words: Signal sorting; Multi-target location; Time difference of arrival; Similar radiation sources; Position information field for target

1 引言

在多站电子侦察系统^[1-3]中, 利用脉冲到达多个观测站的时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)信息^[4,5]进行信号分选的方法称为时差分选^[6]。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。

传统的时差分选方法采用统计直方图方法^[6]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, 会使超低重频辐射源直方峰难以被检测而出现漏警。文献[6]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。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。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^[9]。以上分选方法对时差分选都进行了一定的研究和改进, 但是, 目前对多个在时域频域都混叠在一起的同类辐射源时差分选方法的研究较少。同类辐射源是指辐射源间的载频(Radio Frequency, RF)、脉冲宽度(Pulse Width, PW)、脉冲幅度(Pulse Amplitude, PA)等^[10,11]参数都相似, 用这些参数无

收稿日期: 2014-11-24; 改回日期: 2015-07-13; 网络出版: 2015-07-27

*通信作者: 马贤同 mxtzhy@foxmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(60801044)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60801044)

法区分辐射源,例如真实目标与诱饵^[12]、执行相同任务的一组舰队等情况。

针对同类辐射源,虽然参数无法区分,但它们的位置一般相距一定的距离。基于这一前提,本文提出了基于时差的同类辐射源信号分选定位方法。利用观测站得到的关于辐射源的真实时差和虚假时差信息,先用目标位置信息场定位法^[13-15]对多个同类辐射源定位,再利用定位结果确定真实时差,剔除虚假时差,最终利用真实时差信息完成辐射源分选和定位。仿真实验验证了该方法的有效性。

2 脉冲列模型

假设多站电子侦察系统包括一个主站和 I 个副站,各个观测站接收到多个同类辐射源的脉冲信号,并测得各自脉冲列的脉冲描述字(Pulse Description Word, PDW),且已经经过了频率、脉宽等预处理。假设主站得到 N_0 个脉冲,参与分选和时差计算的 PDW 序列记为

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

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 ($i = 1, 2, \dots, I$) 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, $t_{i,n_i}, \mathbf{P}_{i,n_i}, i = 1, 2, \dots, I; n_i = 1, 2, \dots, N_i$ 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。

作为示意,主站接收到 3 个同类辐射源信号脉冲列生成示意图如图 1 所示。脉冲的参数是不可区分的,用脉冲柱形的高度区别 3 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,干扰脉冲保留在混合脉冲中。由于是同类辐射源,且各辐射源的脉冲是混叠在一起的,只通过一个观测站接收的脉冲信号是无法将信号区分的。

3 同类辐射源时差参数提取

3.1 脉冲参数匹配规则

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。

主站与副站 i 的脉冲列间脉冲的参数匹配因子

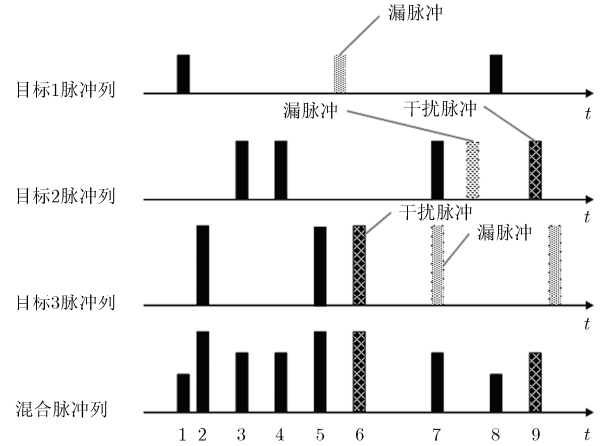


图1 主站脉冲列生成示意图

β_1 , 即 \mathbf{P}_{0,n_0} 和 \mathbf{P}_{i,n_i} 的参数匹配因子,其中 $n_0 = 1, 2, \dots, N_0, n_i = 1, 2, \dots, N_i$ 。 $\mathbf{P}_{0,n_0}, \mathbf{P}_{i,n_i}$ 的欧式距离为

$$r_1 = \left\| (\mathbf{P}_{0,n_0} - \mathbf{P}_{i,n_i})^T \mathbf{W} (\mathbf{P}_{0,n_0} - \mathbf{P}_{i,n_i}) \right\|^{1/2} \quad (3)$$

其中, \mathbf{W} 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, \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。脉冲列间脉冲参数匹配因子 β_1 可计算为

$$\beta_1 = \begin{cases} 1 - r_1 / r_0, & r_1 < r_0 \\ 0, & r_1 \geq r_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, r_0 为参考距离, r_0 表示脉冲列间两脉冲不匹配时的最小欧式距离。

设两脉冲列间的单个脉冲匹配门限 γ_1 , $\gamma_1 \in [0, 1]$, 作为判别同一个脉冲是否被两个接收机接收的。由于同一个脉冲被两个接收机接收到时,参数差异较小, γ_1 取值一般应当大于 0.5, 如 $\gamma_1 = 0.7$ 。若 $\beta_1 \geq \gamma_1$, 参数匹配成功; 否则, 参数匹配不成功。

3.2 时差提取数学模型

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

$$\Delta\tau_{0,i} = t_{0,n_0} - t_{i,n_i} \quad (5)$$

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

$$r_{i,n_i} = u(\beta_1 - \gamma_1) \int_{\tau_L^i}^{\tau_U^i} \delta(\tau - \Delta\tau_{0,i}) d\tau \quad (6)$$

其中, $u(\bullet)$ 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(6)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 $r_{i,n_i} = 0$ 。由于多个辐射源参数不可区分，则副站 i 中可能会得到多于一个脉冲与主站第 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

$$r_i = \sum_{n_i=1}^{N_i} r_{i,n_i} \quad (7)$$

通过式(7)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， $r_i \geq 1$ ，并记副站 i 与主站第 n_0 个脉冲相匹配的脉冲序号序列为 $[k_{i,1}, k_{i,2}, \dots, k_{i,r_i}]$ ；否则， $r_i = 0$ 。 I 个副站中满足相似度为 1 的副站个数为

$$I_m = \sum_{i=1}^I u(r_i - 1) \quad (8)$$

为了实现对地面目标定位，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(5)~式(8)；若满足 $I_m \geq 2$ ，则确定主站和副站相匹配脉冲所有可能的序号组合为

$$[n_0, r_1 k_{1,\chi_1}, \dots, r_i k_{i,\chi_i}, \dots, r_I k_{I,\chi_I}] \quad (9)$$

其中， $\chi_i \in [k_{i,1}, k_{i,2}, \dots, k_{i,r_i}]$ ， $i = 1, 2, \dots, I$ ，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。称式(9)描述的一组脉冲为基准脉冲。由式(9)可知，在某一空间区域有多个同类辐射源时，包含主站第 n_0 号脉冲的基准脉冲可能有 $\prod_{i=1, r_i \neq 0}^I r_i$ 组，其中最多只有一组所确定的时差全是真实时差，其余组都存在虚假时差。以两个副站为例，找到其中两组基准脉冲示意图如图 2 所示。图中实线所选的基准脉冲所确定的时差全是真实时差，虚线所选的基准脉冲所确定的时差全是虚假时差。

任选一组基准脉冲，计算主站和副站相匹配脉冲间的时差：

$$\tau_{i,n_0} = t_{0,n_0} - t_{i,r_i k_{i,\chi_i}}, \quad r_i \neq 0 \quad (10)$$

对主站包含第 n_0 个脉冲的所有基准脉冲都做相同操作，得到关于主站第 n_0 个脉冲的所有时差。然后对主站其他脉冲重复式(5)~式(10)，得到关于目标的所有真实时差和虚假时差。

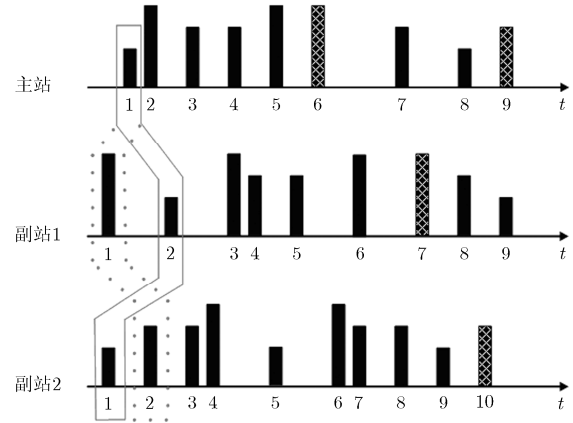


图 2 基准脉冲示意图

4 目标位置信息场定位法

4.1 定位时差确定

同类辐射源时差提取过程虽然得到了关于目标的所有时差，但对于多目标或复杂信号情况，得到的时差数目可能很多。其中很多时差在时差测量误差允许的范围内实际上可认为是同一个时差，所以要进行配对处理。

设同类辐射源时差提取后副站 i 和主站得到的时差个数为 Q_i ，各副站与主站得到的时差可表示为

$$\left. \begin{aligned} Z &= [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_I] \\ z_i &= [\tau_{i,1}, \tau_{i,2}, \dots, \tau_{i,Q_i}]^T, \quad i = 1, 2, \dots, I \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中， z_i 表示副站 i 和主站得到的时差序列。依次比较 z_i 中每一个时差，对两个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，聚组后副站 i 和主站的时差个数为 Q'_i ，记为

$$\left. \begin{aligned} Z' &= [z'_1 \quad z'_2 \quad \dots \quad z'_I] \\ z'_i &= [\tau'_{i,1}, \tau'_{i,2}, \dots, \tau'_{i,Q'_i}]^T, \quad i = 1, 2, \dots, I \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

聚组后的时差中仍然包含真实时差和虚假时差，且真实时差与虚假时差无法区分。

4.2 目标位置信息场定位算法

对可能存在目标的感兴趣区域 D_X 内一点 \mathbf{X} ，若其先验概率密度为 $p_0(\mathbf{X})$ ，则可定义目标位置信息场为

$$f_X(\mathbf{X} / Z') = \ln p_0(\mathbf{X}) - \sum_{i=1}^I \sum_{q_i=1}^{Q'_i} C[d(\tau'_{i,q_i}, h_i(\mathbf{X}))] \quad (13)$$

其中， $C[\cdot]$ 为一代价函数， $d(\tau'_{i,q_i}, h_i(\mathbf{X}))$ 为时差 τ'_{i,q_i} 与在点 \mathbf{X} 处目标响应 $h_i(\mathbf{X})$ 的欧氏距离。

对测量得到的每一个时差，计算

$$d(\tau'_{i,q}, h_i(\mathbf{X})) = \left| \frac{\tau'_{i,q} - h_i(\mathbf{X})}{\sigma_\tau} \right|, \quad q_i = 1, 2, \dots, Q'_i; \\ i = 1, 2, \dots, I \quad (14)$$

其中, $|\cdot|$ 为取绝对值, σ_τ 为时差测量误差的估计值。

代价函数可定义为

$$C[d] = \begin{cases} d^2/2, & d^2 < \gamma^2 \\ \gamma^2/2, & d^2 \geq \gamma^2 \end{cases} \quad (15)$$

其中, γ 为一门限, 该门限反应出时差测量数据偏差达到多少倍 σ_τ 时认为数据不可靠。式(15)的代价函数, 在一定程度上突出了真实时差对定位结果的作用, 对虚假时差的作用进行了弱化。

4.3 虚假时差剔除

通过在区域 D_X 内对目标位置信息场 f_X 进行峰值搜索, 确定目标的数目 P 和位置。对每一个目标 $p, p = 1, 2, \dots, P$, 计算目标位置处相对于观测站的时差矢量 τ_p :

$$\tau_p = [\tau_{p,1}, \tau_{p,2}, \dots, \tau_{p,I}]^T \quad (16)$$

在聚组时差 \mathbf{Z}' 中选出与 τ_p 在时差测量误差范围近似相等的时差组, 即在 \mathbf{z}'_i 中选出与 $\tau_{p,i}$ 最接近的时差作为目标 p 关于副站 i 与主站的时差。总共可以选出 P 组时差, 分别对应 P 个目标。没有被选出的时差为虚假时差, 将其剔除。 P 组真实时差分别对应 P 个目标, 即将同类型多目标定位问题转化为了单目标定位问题, 可用牛顿迭代等方法对目标定位, 单目标定位方法前人已做过深入研究, 不再赘述。利用各个目标的时差信息, 对脉冲列进行分选, 得到属于各个目标的脉冲信息, 完成分选, 以便对各个目标信号进行识别等后续分析。

5 仿真实验

仿真场景设置: 设侦察系统包括 5 个观测站, 其中 1 个主站, 4 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 3 个同类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。3 个同类辐射源目标的参数设置如表 1 所示。其中 ID 为目标序号, RF 为频率, PW 为脉宽, A 为脉冲幅度, TOA 为到达时间, Tb 为脉冲起始时间, PRI 为脉冲重复间隔, Loc 为目标位置, PN 为辐射源的脉冲数。从表 1 可以看出 3 个辐射源除 Tb, PRI, Loc 和 PN 不同外, 其他参数均相同。

脉冲产生过程中, 对 RF, PW 和 A 分别加上均值为零均方根为 2 MHz, 0.2 μ s 和 0.2 dB 的高斯噪声并考虑脉冲存在一定丢失。丢失脉冲的情形有两种, 一是脉冲幅度小于一定的门限; 二是两脉冲在同一频段落入同一信道, 且同一信道的前一脉冲后沿与后一脉冲前沿到达时间小于一定门限, 则后一脉冲视为丢失, 若两脉冲交叠, 则后一脉冲丢失, 前一脉冲的脉宽相应展宽。以目标 E1 和 E2 为例说明同类辐射源虚假时差的产生过程。设 E1 和 E2 的脉冲起始时间分别为 b_1 和 b_2 , E1 的脉冲传输到主站所需时间为 t_1 , E2 的脉冲传输到副站 1 所需时间为 t_2 , 若满足

$$\tau_L^1 < t_2 + b_2 - t_1 - b_1 < \tau_U^1 \quad (17)$$

则 E1 和 E2 脉冲就能满足在时差窗范围内, 而产生虚假时差。仿真过程中, 观测站和辐射源设定后, t_1 和 t_2 也已确定, 只要合理控制脉冲起始时间就能产生虚假时差。

对 TOA 加上均方根 σ_t 为 50 ns 的随机误差, 得到的定位时差与理论时差如表 2 所示。表中 $\tau_i, i = 1, 2, 3, 4$ 表示主站与副站 i 测量得到的时差。

通过表 2 可以看出, 主站与各副站测量得到的时差数目远远多于理论时差, 其中包含着大量的虚假时差, 用测量时差画出时差定位双曲线如图 3 所示。

对上述时差测量数据运用位置信息定位法定位, 得到的定位效果图如图 4 所示。

通过图 4 可以确定目标的数目以及各个目标的位置, 目标 1 的位置为 (320, 381) km, 目标 2 的位置为 (281, 420) km, 目标 3 的位置为 (299, 399) km, 对应 3 个目标的真实时差如表 3 所示。

通过位置信息场定位实现了目标数目未知不可区分多目标定位, 将虚假时差剔除, 得到了各个目

表 1 辐射源参数表

ID	RF(MHz)	PW(μ s)	A	PRI 类型	TOA(μ s)	Loc(km)	PN
E1	3000	11	1	固定	Tb: 0, PRI: 403	(320,380)	20
E2	3000	11	1	参差	Tb: 61, PRI: [270, 386, 491]	(280,420)	30
E3	3000	11	1	参差	Tb: 63, PRI: [960, 1050, 1160, 1290]	(300,400)	40

表 2 时差信息(μs)

测量时差				理论时差			
τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
33.118	54.174	37.250	16.503	43.7484	64.8154	47.9320	27.1579
64.043	84.695	46.494	-0.457	53.3502	73.9667	35.7597	15.7680
43.613	64.695	20.160	43.427	48.7473	69.6501	41.8597	21.4277
53.379	73.914	63.467	26.995	*	*	*	*
48.712	69.729	47.811	15.697	*	*	*	*
*	*	35.705	21.426	*	*	*	*
*	*	41.905	*	*	*	*	*

注: * 表示没有数据。

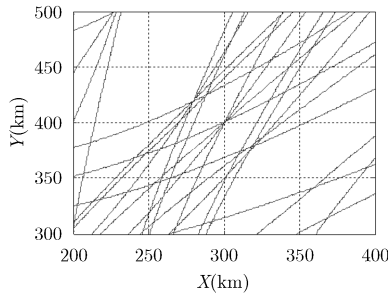


图 3 时差定位双曲线

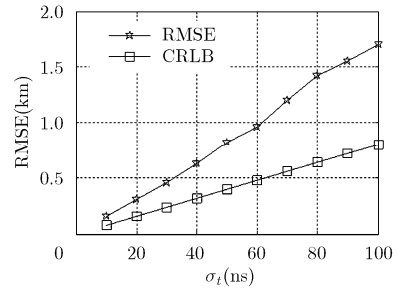


图 5 定位 RMSE

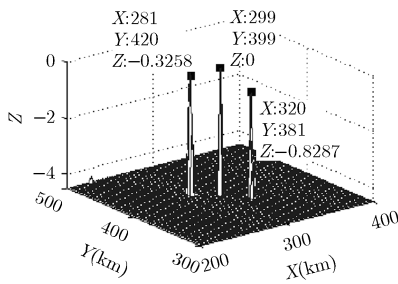


图 4 位置信息场定位图

表 3 真实测量时差(μs)

目标	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
1	43.613	64.695	47.811	26.995
2	53.379	73.914	35.705	15.697
3	48.712	69.729	41.905	21.426

标的真实时差。后续可以对各个目标运用牛顿迭代等方法得到目标更精确的位置。

利用 Monte-Carlo 实验的方法研究定位的性能, N 次 Monte-Carlo 实验的均方误差为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{PN} \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \left[(\hat{x}_{p,n} - x_p)^2 + (\hat{y}_{p,n} - y_p)^2 \right]} \quad (18)$$

其中, $(\hat{x}_{p,n}, \hat{y}_{p,n})$ 为目标 p 第 n 次的估计位置, (x_p, y_p) 为目标 p 的真实位置。图 5 为 100 次 Monte-Carlo 实验统计的均方误差。从图 5 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 CRLB, 随着 TOA 测量误差的增大, RMSE 曲线越偏离 CRLB; 验证了所提方法对多个同类辐射源定位的可行性。

6 结束语

本文针对目标数目未知的多个不可区分同类辐射源分选定位问题, 结合目标位置信息场定位法, 提出了基于时差的同类辐射源信号分选定位方法。该方法利用目标位置信息场定位法定位初步确定目标的数目和位置后, 利用定位结果确定真实时差, 剔除虚假时差, 完成脉冲分选和目标精确定位。仿真实验验证了该方法的可行性和有效性, 且便于结合工程实用。不可区分同类辐射源分选定位问题是一个难点和热点问题, 文中仿真仅对观测站间距和目标间距都较远的情况进行了实验, 当观测站间距或目标间距较近, 方法对多目标的分辨能力值得进一步探讨, 目标位置信息场定位法在丢脉冲条件下的确定目标初始数目和位置时的虚警和漏警问题也值得进一步研究, 这将是下一步重点研究的内容。

参考文献

[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 F C, Fan Y, Zhou Y Y, et al. Localization Principles in Space Electronic Reconnaissance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 81-86.

[2] Bindhu S K H and 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] 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 G and Chen J. A clustering detection algorithm of stationary target for passive time difference location system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 728-731.
- [4] Kay S and Vankayalapati N. Improvement of TDOA position fixing using the likelihood curvature[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(8): 1910-1914.
- [5] Xu B, Sun G D, Ran Y, *et al.* High-accuracy TDOA-based localization without time synchronization[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(8): 1567-1576.
- [6] 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 S, Wu H B, Liu Z, *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.
- [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): 3004-3007.
- Ren W J, Hu D H, Ding C B, *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.
- [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 W J, Hu D H, and Ding C B. New method for TDOA sorting and pairing using TDOAs' correlation[J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(6): 89-96.
- [9] Nosal E M. Methods for tracking multiple marine mammals with wide-baseline passive acoustic arrays[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 134(3): 2383-2392.
- [10] 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 Y D, Xiao L Z, Li J M, *et al.* A method of complex radar signal based on grid clustering[J]. *Modern Defence Technology*, 2013, 41(5): 124-128.
- [11] 李英达, 肖立志. 一种脉冲重复间隔复杂调制辐射源信号分选方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(10): 2493-2497.
- Li Y D and Xiao L Z. 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.
- [12] Fan Y H, Ji X L, Yan J, *et al.* Analyses of jam effect for radar decoy in endgame of air to air missile[J]. *Scientific Journal of Control Engineering*, 2014, 3(5): 320-324.
- [13] 罗景青. 目标位置信息场分析定位法[J]. 电子工程学院学报, 2012, 31(2): 1-4.
- Luo J Q. Targets localization by information field analysis[J]. *Journal of Electronic Engineering Institute*, 2012, 31(2): 1-4.
- [14] Luo J Q, Ma X T, Wang J G, *et al.* Location by position observing information tolerance synthesize[C]. 2012 IET International Conference on Information Science and Control Engineering, 2012, 1247-1250.
- [15] 马贤同, 罗景青, 张奎. 面向 DOA 测量的多目标位置信息场定位法[J]. 信号处理, 2013, 29(1): 121-126.
- Ma X T, Luo J Q, and Zhang K. A location method for multi-target by position information field based on DOA[J]. *Signal Processing*, 2013, 29(1): 121-126.
- 马贤同: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为空间信息处理理论与技术.
- 罗景青: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为空间信息处理、阵列信号处理、电子对抗信息处理.
- 孟祥豪: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为雷达与雷达对抗理论新技术.