

## 基于虚拟时差的运动阵列空间无源定位算法

周龙健\* 罗景青 孔辉  
(电子工程学院 合肥 230037)

**摘要:** 针对脉冲骨架周期固定的雷达脉冲信号辐射源无源定位问题, 该文提出一种基于虚拟时差的运动阵列空间无源定位算法, 采用运动单阵列接收目标辐射源信号, 通过多次测量侦察站不同位置的脉冲到达时间来估计目标辐射源位置。分别针对脉冲骨架周期已知和未知两种情况, 提出了一种基于高阶统计量的无源定位算法, 并推导了不同情况下定位精度的克拉美罗界。仿真实验表明, 不同情况下定位算法定位精度逼近克拉美罗界, 且脉冲骨架周期已知时虚拟时差无源定位算法定位精度优于同孔径实阵列 TDOA 无源定位算法定位精度, 脉冲骨架周期未知时虚拟时差无源定位算法定位精度低于同孔径实阵列 TDOA 无源定位算法定位精度。

**关键词:** 无源定位; 虚拟时差; 运动阵列; 克拉美罗界; 高阶统计量

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)07-1759-05

DOI: 10.11999/JEIT160860

## A Passive Location Algorithm Based on the Virtual TDOAs of Moving Array

ZHOU Longjian LUO Jingqing KONG Hui  
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** To solve the problem of passive location for the emitter with fixed Pulse Framework Cycle (PFC), a passive location algorithm based on virtual TDOAs of moving array is proposed. The signal is received by a moving single sensor. The position of emitter is estimated with the multiple measurements of pulse arrival time in different sensor locations. A passive location algorithm based on high-order statistics is proposed for pulse framework cycle known and unknown. The Cramer-Rao Lower Band (CRLB) is derived in the above two cases. The simulation results show that the location accuracy is close to CRLBs in different cases. When pulse framework cycle is known, the location accuracy of virtual TDOAs is better than the real aperture array. When pulse framework cycle is unknown, the location accuracy of virtual TDOAs is slightly lower than the real aperture array.

**Key words:** Passive location; Virtual TDOAs; Moving array; Cramer-Rao Lower band; High-order statistics

### 1 引言

无源定位具有探测距离远、电磁隐蔽性好等优点, 已成为各国研究的热点。无源定位系统可以分为单站和多站两种。单站无源定位方法<sup>[1-6]</sup>主要测量目标辐射源的到达方向(Direction Of Arrival, DOA)、多普勒变化率(Difference Frequency Rate of Change, DFRC)、相位差变化率等来实现对目标定位。多站无源定位方法<sup>[7-10]</sup>通过对目标的到达方向、到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)、到达频率差(Frequency Difference Of

Arrival, FDOA)等进行多次观测, 并对观测数据进行融合定位。

基于 DOA 的单站无源定位方法<sup>[1]</sup>, 需要大范围机动和长时间积累, 定位精度较差。基于相位差变化率<sup>[2-4]</sup>和多普勒变化率<sup>[4-6]</sup>的单站无源定位方法要求脉冲间信号高度相参, 对于频率捷变等复杂调制信号无能为力。多站无源定位体制中, TDOA 无源定位技术由于定位精度高, 已广泛应用于雷达、通信、传感器网络等领域。现有的 TDOA 定位体制都是采用多站模式, 即利用空间中分布的多个侦察站同时接收某一观测区域内信号, 通过测量不同侦察站接收到信号的时间差来实现对目标的高精度定位。常见的定位算法有 Taylor 展开法、两步最小二乘法、解伪线性方程组并求解二次方程法、以及一些改进的方法<sup>[7]</sup>。文献[8]在推导了传统两步最小二乘法在时差和角度联合定位偏差, 提出了一种基

收稿日期: 2016-08-26; 改回日期: 2016-11-24; 网络出版: 2017-01-22

\*通信作者: 周龙健 zhoulj007@126.com

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2013JQ8020)

Foundation Item: Natural Scientific Fundamental Research Project of Shanxi Province of China (2013JQ8020)

于两步最小二乘定位<sup>[9]</sup>的偏差改进算法,在保有原有均方误差的前提下可显著降低估计偏差,提高定位精度。文献[10]将 TDOA 无源定位问题转化为带约束的凸优化问题,再采用迭代算法,可以得到较好的定位结果,避免了陷入局部最优解问题。

上述定位算法中单站无源定位算法对信号形式、侦察站运动方式等要求比较高,多站无源定位会存在时间同步校准、信号传输、多站位置配置等问题,且成本高昂。为了克服上述问题,文献[11]提出了仅测到达时间(Time Of Arrival, TOA)单站无源定位算法,利用脉冲 TOA 估计径向加速度进而得到目标辐射源位置,其主要存在两个问题:(1)由于引入中间变量径向加速度,导致定位精度较低;(2)该算法仅适用于脉冲重复周期(Pulse Repetition Interval, PRI)固定的脉冲信号,对于具有一定骨架周期的多参差脉冲无能为力,具有一定局限性。

本文针对脉冲骨架周期(Pulse Framework Cycle, PFC)固定雷达信号源,提出了一种基于虚拟时差的运动阵列单站空间无源定位算法,并给出了脉冲骨架周期已知和未知两种情况下定位算法,分析了不同情况下定位算法的克拉美罗下界,最后给出仿真分析验证算法性能。

## 2 虚拟时差定位模型

假定在3维空间内,采用一个运动侦察接收机接收目标辐射源信号。侦察接收机在0时刻的初始位置坐标为  $\mathbf{P}_R = [x_R, y_R, z_R]^T$ , 其运动速度为  $\mathbf{V}_R = [v_{Rx}, v_{Ry}, v_{Rz}]^T$ 。若目标辐射源为雷达辐射源,位置坐标为  $\mathbf{P}_T = [x_T, y_T, z_T]^T$ ,发射的信号是存在骨架周期的高精度相参信号,骨架周期为  $T_f$ ,一个骨架周期里有  $L_p$  个脉冲信号,各脉冲间隔分别为  $T_1, T_2, \dots, T_{L_p}$ ,  $T_f = \sum_{j=1}^{L_p} T_j$ 。需要说明的是,对于PRI固定脉冲信号,认为其脉冲重复周期就是一个骨架周期。

以存在骨架周期的高相参信号为例,设雷达辐射源在  $t_0$  时刻开始发射脉冲串信号,则雷达发射的第  $m$  个骨架周期的第  $k$  个脉冲的时间为:

$$t_{m,k} = t_0 + (m-1)T_f + \sum_{j=1}^{k-1} T_j, \quad (1)$$

$$m = 1, 2, \dots; k = 1, 2, \dots, L_p$$

由于雷达脉冲骨架周期持续时间比较短,一般在 ms 量级,因此认为在一个脉冲骨架周期内,侦察接收机相对辐射源的位置没有变化,即认为此时的时间压缩因子和相对距离为固定值。则接收机接收到的第  $m$  个骨架周期的第  $k$  个脉冲的到达时间为

$$t_{m,k}^R = t_0 + r_m / c + \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n T_f + \eta_m \sum_{j=1}^{k-1} T_j + w(m,k), \quad (2)$$

$$m = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, L_p$$

其中,  $c$  表示电磁波传播速度,  $w(m,k)$  表示测量误差,其方差为  $\sigma_w^2$ ,  $r_m$  表示接收机接收到第  $m$  个骨架周期信号时与雷达辐射源的距离,即:

$$r_m = \|\mathbf{P}_R + \mathbf{V}_R t_{m,1}^R - \mathbf{P}_T\| \quad (3)$$

$\eta_m$  表示接收机接收第  $m$  个骨架周期信号时的时间压缩因子,即:

$$\eta_m = 1 + \dot{r}_m / c \quad (4)$$

$$\dot{r}_m = \frac{\mathbf{V}_R^T (\mathbf{P}_R + t_{m,1}^R - \mathbf{P}_T)}{\|\mathbf{P}_R + \mathbf{V}_R t_{m,1}^R - \mathbf{P}_T\|} \quad (5)$$

## 3 定位算法

### 3.1 脉冲骨架周期已知

在脉冲骨架周期  $T_f$  和参差脉冲间隔  $T_1, T_2, \dots, T_{L_p}$  已知情况下,令:

$$\tilde{t}_{m,k}^R(\mathbf{P}) = t_{m,k}^R - \left( r_m^{(P)} / c + \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n^{(P)} T_f + \eta_m^{(P)} \sum_{j=1}^{k-1} T_j \right) \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{P}$  表示观测区域内位置点,  $r_m^{(P)}, \eta_m^{(P)}$  分别表示接收机接收到第  $m$  个骨架周期信号时与位置点  $\mathbf{P}$  的距离以及位置点  $\mathbf{P}$  的时间压缩因子。

联立式(2)和式(6),当  $\mathbf{P} = \mathbf{P}_T$  时,得到

$$\tilde{t}_{m,k}^R(\mathbf{P}_T) = t_0 - w(m,k) \quad (7)$$

注意观察式(6)和式(7),当  $\mathbf{P} = \mathbf{P}_T$  时,  $\tilde{t}_{m,k}^R(\mathbf{P}_T)$  是一个仅与测量误差和  $t_0$  有关的随机变量,而  $t_0$  又是一个确定性未知量,根据遍历性原理,  $\tilde{t}_{m,k}^R(\mathbf{P}_T)$  也可以看作是测量误差同分布的随机变量;当  $\mathbf{P} \neq \mathbf{P}_T$  时,  $\tilde{t}_{m,k}^R(\mathbf{P})$  不满足遍历性条件,其分布不仅与测量误差和  $t_0$  有关,还与位置  $\mathbf{P}$  有关,因此可以采用高阶统计量方法估计目标位置。特别对于高斯噪声来说,其二阶统计量就是最优的,用方差就可以很好地描述高斯分布。假定测量误差为高斯分布,此时目标位置估计为

$$\hat{\mathbf{P}} = \min_{\mathbf{P} \in \Omega} \text{var} \{ \tilde{t}_{m,k}^R(\mathbf{P}) \} \quad (8)$$

其中,  $\Omega$  表示观测区域,  $\text{var} \{ \bullet \}$  表示统计方差。

注意观察式(8),当  $\mathbf{P} = \mathbf{P}_T$  时,  $\tilde{t}_{m,k}^R(\mathbf{P})$  的统计方差即为观测误差的方差;当  $\mathbf{P} \neq \mathbf{P}_T$  时,  $\tilde{t}_{m,k}^R(\mathbf{P})$  的统计方差不仅包含观测误差的方差,还包括由于位置偏差造成的时差不同产生的方差。

### 3.2 脉冲骨架周期未知

当参差脉冲间隔  $T_1, T_2, \dots, T_{L_p}$  未知时,同理根据遍历性原理,当  $\mathbf{P} = \mathbf{P}_T$  和参差脉冲间隔  $T_1, T_2, \dots,$

$T_{L_p}$  均满足真实条件时, 式(6)中  $\bar{t}_{m,k}^R(\mathbf{P}_T)$  也可以看作是呈高斯分布的随机变量。因此, 对于测量误差呈高斯分布的观测数据, 其目标位置估计同样可以用式(8)来表示。但是, 由于参差脉冲间隔  $T_1, T_2, \dots, T_{L_p}$  未知, 需要对其进行同时估计。在这里假定对于观测区域内一个位置点  $\mathbf{P}$ , 利用最小二乘方法, 估计当位置点  $\mathbf{P}$  已知时参差脉冲间隔  $T_1, T_2, \dots, T_{L_p}$ , 具体方法如下。令

$$\mathbf{Z} = [t_{1,1}^R, t_{1,2}^R, \dots, t_{1,L_p-1}^R, \dots, t_{M,L_p-1}^R]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{H}_m^{(P)} = \begin{bmatrix} 1 & \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n^{(P)} & \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n^{(P)} & \dots & \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n^{(P)} \\ 1 & \sum_{n=1}^m \eta_n^{(P)} & \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n^{(P)} & \dots & \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n^{(P)} \\ 1 & \sum_{n=1}^m \eta_n^{(P)} & \sum_{n=1}^m \eta_n^{(P)} & \dots & \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n^{(P)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \sum_{n=1}^m \eta_n^{(P)} & \sum_{n=1}^m \eta_n^{(P)} & \dots & \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n^{(P)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{H}^{(P)} = [\mathbf{H}_1^{(P)}, \mathbf{H}_2^{(P)}, \dots, \mathbf{H}_M^{(P)}]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{X} = [t_0, T_1, T_2, \dots, T_{L_p}]^T \quad (12)$$

其中, 当  $m=1$  时,  $\sum_{n=1}^{m-1} \eta_n = 0$ 。

则利用最小二乘方法估计得到在  $\mathbf{P} = \mathbf{P}_T$  时的  $\mathbf{X}$  为

$$\hat{\mathbf{X}}^{(P)} = \left( (\mathbf{H}_m^{(P)})^T \mathbf{H}_m^{(P)} \right)^{-1} (\mathbf{H}_m^{(P)})^T \mathbf{Z} \quad (13)$$

将估计得到的  $\hat{\mathbf{X}}^{(P)}$  代入式(6), 然后再利用式(8)估计目标位置。

#### 4 虚拟时差定位克拉美罗界

克拉美罗下界是参数估计精度所能达到的一个理论下界, 也是衡量参数估计方法好坏的一个指标, 主要通过对费舍尔信息矩阵(Fisher Information Matrix, FIM)求逆得到。令观测量为

$$\mathbf{T}^R = [t_{1,1}^R, t_{1,2}^R, \dots, t_{1,L_p}^R, t_{2,1}^R, \dots, t_{M,L_p}^R]^T \quad (14)$$

则观测量均值为

$$\boldsymbol{\mu}_T = [\bar{t}_{1,1}^R, \bar{t}_{1,2}^R, \dots, \bar{t}_{1,L_p}^R, \bar{t}_{2,1}^R, \dots, \bar{t}_{M,L_p}^R]^T \quad (15)$$

其中,

$$\bar{t}_{m,k}^R = t_0 + r_m / c + \sum_{n=1}^{m-1} \eta_n T_f + \eta_m \sum_{j=1}^{k-1} T_j \quad (16)$$

在高斯白噪声条件下, FIM 矩阵可以表示为

$$\mathbf{J}_\theta = \frac{2}{\sigma^2} \left( \frac{\partial \boldsymbol{\mu}_T}{\partial \boldsymbol{\theta}^T} \right)^T \left( \frac{\partial \boldsymbol{\mu}_T}{\partial \boldsymbol{\theta}^T} \right) \quad (17)$$

#### 4.1 脉冲骨架周期已知

在脉冲骨架周期已知的情况下, 未知参数为

$$\boldsymbol{\theta} = [t_0, x_T, y_T]^T \quad (18)$$

根据式(17), 计算均值  $\boldsymbol{\mu}_T$  关于未知参数的偏导数, 可以表示为

$$\frac{\partial \boldsymbol{\mu}_T}{\partial \boldsymbol{\theta}^T} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\partial \bar{t}_{1,1}^R}{\partial x_T} & \frac{\partial \bar{t}_{1,1}^R}{\partial y_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{\partial \bar{t}_{M,L_p}^R}{\partial x_T} & \frac{\partial \bar{t}_{M,L_p}^R}{\partial y_T} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{t}_{m,k}^R}{\partial x_T} &= \frac{\partial r_m}{\partial x_T} / c + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{\partial \eta_i}{\partial x_T} T_f + \frac{\partial \eta_m}{\partial x_T} \sum_{j=1}^{k-1} T_j \\ \frac{\partial \bar{t}_{m,k}^R}{\partial y_T} &= \frac{\partial r_m}{\partial y_T} / c + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{\partial \eta_i}{\partial y_T} T_f + \frac{\partial \eta_m}{\partial y_T} \sum_{j=1}^{k-1} T_j \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial r_m}{\partial x_T} &= \frac{(x^{(m)} - x_T)}{\|\mathbf{P}_T - \mathbf{P}_R^{(m)}\|} \\ \frac{\partial r_m}{\partial y_T} &= \frac{(y^{(m)} - y_T)}{\|\mathbf{P}_T - \mathbf{P}_R^{(m)}\|} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta_m}{\partial x_T} &= -\ddot{r}_A / c = \frac{(x^{(m)} - x_T)^2}{c \|\mathbf{P}_T - \mathbf{P}_R^{(m)}\|^3} - \frac{1}{c \|\mathbf{P}_T - \mathbf{P}_R^{(m)}\|} \\ \frac{\partial \eta_m}{\partial y_T} &= -\ddot{r}_A / c = \frac{(y^{(m)} - y_T)^2}{c \|\mathbf{P}_T - \mathbf{P}_R^{(m)}\|^3} - \frac{1}{c \|\mathbf{P}_T - \mathbf{P}_R^{(m)}\|} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

#### 4.2 脉冲骨架周期未知

当脉冲骨架周期未知时, 未知参数为

$$\boldsymbol{\theta} = [t_0, x_T, y_T, T_1, T_2, \dots, T_{L_p}]^T \quad (23)$$

均值  $\boldsymbol{\mu}_T$  关于未知参数的偏导数, 可以表示为

$$\frac{\partial \boldsymbol{\mu}_T}{\partial \boldsymbol{\theta}^T} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\partial \bar{t}_{1,1}^R}{\partial x_T} & \frac{\partial \bar{t}_{1,1}^R}{\partial y_T} & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \frac{\partial \bar{t}_{1,2}^R}{\partial x_T} & \frac{\partial \bar{t}_{1,2}^R}{\partial y_T} & \eta_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \frac{\partial \bar{t}_{2,1}^R}{\partial x_T} & \frac{\partial \bar{t}_{2,1}^R}{\partial y_T} & \eta_0 & \dots & \eta_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \frac{\partial \bar{t}_{M,L_p}^R}{\partial x_T} & \frac{\partial \bar{t}_{M,L_p}^R}{\partial y_T} & \sum_{i=1}^{M-1} \eta_i & \dots & \sum_{i=1}^{M-2} \eta_i \end{bmatrix} \quad (24)$$

通过计算 FIM 矩阵, 并对矩阵  $J_{\theta}$  求逆即可得到定位的 CRLB。

### 5 仿真分析

仿真过程中, 以具有骨架周期的脉冲信号为例进行说明。

假定侦察接收机位于 1000 km 的高空, 其位置坐标为  $\mathbf{X}_T = [0, 0, 1000 \text{ km}]^T$ , 沿 Y 轴以 10 km/s 的速度飞行。地面上有具有一定脉冲骨架周期信号的雷达辐射源, 其坐标为  $\mathbf{X}_p = [500 \text{ km}, 500 \text{ km}, 0]^T$ , 一个骨架周期里有 7 个脉冲信号, 各周期间隔分别为 3.5 ms, 14.0 ms, 14.0 ms, 10.5 ms, 17.5 ms, 7.0 ms, 3.5 ms,  $T_f$  为 70 ms。图 1、图 2 分别给出了在观测时间为 30 s, TOA 测量误差均方根为 5 ns 时的脉冲骨架周期已知和未知两种情况下的定位结果图(为了便于观测, 对式(8)取倒数, 此时可以通过寻找峰值点得到目标辐射源位置)。图 1 中脉冲骨架周期已知情况下仿真的搜索区域大小为 10 km  $\times$  10 km, 搜索网格大小为 10 m  $\times$  10 m。图 2 中脉冲骨架周期未知情况下仿真的搜索区域大小为 100 km  $\times$  100 km, 搜索网格大小为 100 m  $\times$  100 m。

从图 1、图 2 可以看出, 观测区域内仅在目标辐射源位置存在一个峰值点, 因此并不存在局部最优解和发散问题, 搜索网格大小仅会影响定位的精

度。因此, 可以采用大小网格相结合的方式进行搜索定位, 首先采用大网格进行搜索, 确定目标初始位置; 然后再采用小网格进行搜索, 精确确定目标辐射源位置。

图 3 是不同情况下的定位误差曲线。其中, 图 3(a)为 TOA 测量误差固定, 观测时间不同情况下的定位误差曲线。图 3(b)是在观测时间固定, TOA 测量误差不同情况下的定位误差曲线。在定位仿真过程中采用大小网格相结合方式进行搜索, 对目标辐射源周围 100 km 区域进行侦察, 即侦察区域内 X 轴的变化范围为 [450~550 km], Y 轴的变化范围为 [450~550 km]。大网格步长为 1 km  $\times$  1 km, 小网格步长为 10 m  $\times$  10 m。

结果分析: 由图 3(a)可以看出, 在 TOA 测量误差一定条件下, 随着观测时间的增加, 定位精度逐渐提高。当观测时间为 30 s 时, 脉冲骨架周期未知时的虚拟时差运动阵列的定位误差方差可以达到  $10^4$  量级, 脉冲骨架周期已知时的虚拟时差运动阵列的定位误差方差可以达到  $10^2$  量级, 同分布实阵列定位精度在  $10^3$  量级, 且随着观测时间的延长, 脉冲骨架周期未知时的定位精度逐渐优于同分布实阵列定位精度。从图 3(b)可以看出, 在观测时间一定条件下, 随着 TOA 测量误差的增大, 定位精度逐渐降

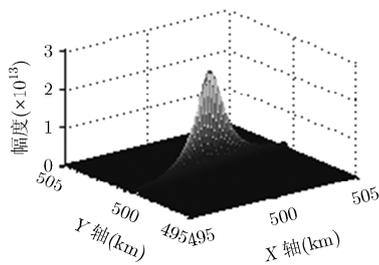


图 1 脉冲骨架周期已知情况下的定位结果

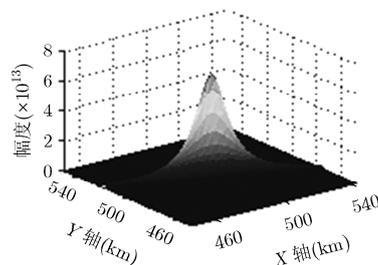
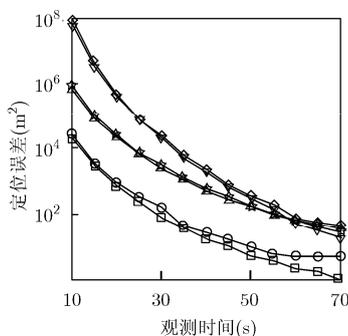
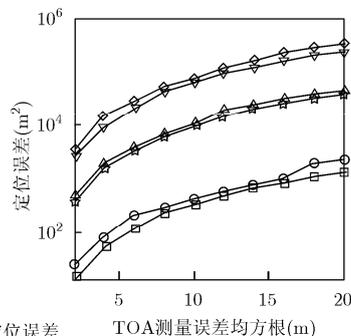


图 2 脉冲骨架周期未知情况下定位结果



(a) TOA 测量误差为 5 ns



(b) TOA 观测时间为 30 s

- 脉冲骨架周期已知定位误差
- 脉冲骨架周期已知克拉美罗界
- ◇ 脉冲骨架周期未知定位误差
- ▽ 脉冲骨架周期未知克拉美罗界
- △ 均匀实阵列定位误差
- ▲ 均匀实阵列克拉美罗界

图 3 不同情况下的定位误差曲线

低。当 TOA 测量误差均方根为 10 ns 时，脉冲骨架周期未知时的虚拟时差运动阵列误差方差在  $10^5$  量级，脉冲骨架周期已知时的虚拟时差运动阵列误差方差在  $10^2$  量级，同分布实阵列定位误差方差在  $10^4$  量级。说明，在脉冲骨架周期已知时虚拟时差运动阵列定位精度优于同孔径实阵列的定位精度，在脉冲骨架周期未知时虚拟时差运动阵列定位精度低于同孔径实阵列的定位精度。由于同孔径实阵列需要大范围布阵，特别是对于空基侦察站而言很难实现，因此本文所提虚拟时差运动阵列更具有实际意义。

## 6 结束语

针对脉冲骨架周期固定的目标辐射源无源定位问题，本文提出了一种基于高阶统计量的虚拟时差运动单阵列无源定位算法，并推导了不同情况下定位精度的克拉美罗界。与同孔径实阵列 TDOA 无源定位算法相比，在脉冲骨架周期或者 PRI 已知时定位精度优于同孔径实阵列 TDOA 无源定位算法定位精度，在脉冲骨架周期或者 PRI 未知时定位精度略低于同孔径实阵列 TDOA 无源定位算法定位精度。此外，所提算法定位精度逼近克拉美罗界，且随着观测时间延长，所提算法的定位精度显著提高，当观测时间为 60 s 时，其定位误差均方根可以达到 m 量级。该方法避免了传统实阵列无源定位算法的大范围布阵问题，具有一定的实践意义。

## 参考文献

- [1] 罗景青, 刘文山. 固定单站对运动辐射源无源定位的最小二乘估计算法[J]. 信号处理, 2000, 16(B12): 53-58.  
LUO Jingqing and LIU Wenshan. Passive location and tracking for moving emitters by single observer[J]. *Signal Processing*, 2000, 16(B12): 53-58.
- [2] 郭福成, 贾兴江, 皇甫堪. 仅用相位差变化率的机载单站无源定位方法及其误差分析[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1090-1095.  
GUO Fucheng, JIA Xingjiang, and HUANGFU Kan. A single observer passive localization method using phase difference changing rate only and its error analysis[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(6): 1090-1095.
- [3] 李望西, 黄长强, 王勇, 等. 利用相位差变化率的机载无源定位跟踪改进算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 68-73. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00345.  
LI Wangxi, HUANG Changqiang, WANG Yong, et al. An improved airborne passive location & tracking algorithm using the rate-of-change of phase difference[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 68-73. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00345.
- [4] 韩彦明, 郁春来, 万方, 等. 雷达对抗侦察系统对运动目标的单站无源定位[J]. 现代雷达, 2013, 35(7): 67-71.  
HAN Yanming, YU Chunlai, WAN Fang, et al. Single observer passive location of radar counterintelligence system for moving targets[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(7): 67-71.
- [5] 周亚强, 曹延伟, 冯道旺, 等. 基于视在加速度与角速度信息的单站无源定位原理与目标跟踪算法研究[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2120-2124.  
ZHOU Yaqiang, CAO Yanwei, FENG Daowang, et al. Single observer passive location and tracking arithmetic using look-acceleration and angle rate of changing information[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12): 2120-2124.
- [6] 王鼎, 张莉, 吴瑛. 一种速度矢量和位置矢量分离估计的固定单站无源定位改进算法[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1342-1347.  
WANG Ding, ZHANG Li, and WU Ying. An improved algorithm for moving emitter passive location and tracking by estimating its velocity vector and position vector separately based on single non-moving observer[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(5): 1342-1347.
- [7] HUANG Z and LU J. Total least squares and equilibration algorithm for range difference location[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(5): 121-122.
- [8] 张杰, 蒋建中, 郭军礼. 基于两步最小二乘定位的偏差改进算法[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 695-705. doi: 10.7527/S1000-6893.2015.0182.  
ZHANG Jie, JIANG Jianzhong, and GUO Junli. Improved bias algorithm for localization using two step least square[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(2): 695-705. doi: 10.7527/S1000-6893.2015.0182.
- [9] Ho K C and Chan Y T. Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(3): 33-36.
- [10] QU Xiaomei and XIE Lihua. An efficient convex constrained weighted least squares source localization algorithm based on TDOA measurements[J]. *Signal Processing*, 2016, 119: 142-152.
- [11] 徐义, 郭福成, 冯道旺. 一种单星仅测 TOA 无源定位方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 502-508. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.02.031.  
XU Yi, GUO Fucheng, and FENG Daowang. A new satellite passive localization method using TOA measurement only[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(2): 502-508. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.02.031.

周龙健：男，1989 年生，博士生，研究方向为无源定位。

罗景青：男，1957 年生，教授，博士生导师，研究方向为雷达信号处理、无源定位、阵列信号处理。