

多运动站异步观测条件下的直接定位算法

冯 奇^① 曲长文^{*①} 周 强^②

^①(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

^②(海军航空工程学院科研部 烟台 264001)

摘 要: 针对多运动站无源融合定位系统中的异步观测问题, 该文提出一种基于空间谱分析的直接定位算法。首先利用子空间分析理论建立异步观测直接定位模型, 构造多站协同定位联合空间谱函数, 采用多级搜索方法实现定位解算。然后推导了该算法的定位误差协方差矩阵及克拉美罗下限。最后对该算法在异步观测条件下的定位性能进行蒙特卡洛仿真。仿真结果表明算法定位精度能够逼近克拉美罗下限, 定位性能优于基于定位参数的分步定位算法, 尤其在低信噪比情况下优势更明显。

关键词: 无源定位; 异步观测; 直接定位; 阵列信号处理; 脉冲到达角

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)02-0417-06

DOI: 10.11999/JEIT160314

Direct Position Determination Using Asynchronous Observations of Multiple Moving Sensors

FENG Qi^① QU Changwen^① ZHOU Qiang^②

^①(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

^②(Scientific Research Department, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: A Direct Position Determination (DPD) algorithm based on spatial spectrum analysis for the issue of asynchronous observation in the multiple moving sensors passive fusion location system is proposed. At first, a direct determination mathematical model of the asynchronous scene is constructed and a multiple sensors cooperative spatial spectrum function is composed. Furthermore, the position of the emitter can be got by a two or three dimensional search, and then the derivations of the estimators' variance and the Cramer-Rao Lower Bound (CRLB) are given. Finally, the Monte Carlo simulations over the asynchronous scene indicate that the accuracy of the proposed method is close to the Cramer-Rao lower bound and superior to the two-step location method based on the location parameters, especially in the low SNR.

Key words: Passive location; Asynchronous observation; Direct Position Determination (DPD); Array signal processing; Angle of arrival

1 引言

辐射源被动定位一直是战场信息获取的重要研究方向。从观测站的数量划分, 无源定位可分为单站无源定位和多站无源定位。单站无源定位系统战术使用灵活, 但面对日益复杂的空间电磁环境, 不易及时、准确地获取战场信息。而多站无源定位系统利用站间协同, 能够快速、准确地获取辐射源状态信息, 已经成为国内外研究的热点^[1,2]。

随着电子对抗技术的不断发展, 在对窄波束辐射源(如相控阵雷达等)无源定位应用中, 可能遇到多个观测站无法同时落入辐射源天线主瓣或者副瓣

照射波束的情况。此时各观测站接收到的信号发射时间不同, 此时时差(Time Difference Of Arrival, TDOA)、频差(Frequency Difference Of Arrival, FDOA)等定位参数无法估计, 相应的定位算法^[3-5]也失去作用。同一观测时间内辐射源信号总是不能被所有观测平台都接收到, 称为异步观测。

针对异步观测条件下的多站无源定位问题, 文献[6]提出一种相干定位系统。该系统从脉冲列信号的产生原理出发, 还原每个搜索网格点期望的信号到达时间(Time Of Arrival, TOA)序列, 通过迭代法逼近实际观测的 TOA 序列, 最终得到目标位置估计。该方法假设辐射源信号存在一个内在不变的脉冲重复间隔(Underlying Constant Pulse

收稿日期: 2016-04-01; 改回日期: 2016-09-01; 网络出版: 2016-10-17

*通信作者: 曲长文 qcwby@sohu.com

Repetition Interval, UCPRI),而这种重复间隔的存在性和估计方法都有待进一步验证和研究。辐射源的脉冲到达角(Angle Of Arrival, AOA)信息的估计不需要接收信号具有相同的发射时间,可用于实现异步观测条件下的辐射源定位。文献[7-9]提出基于异步 AOA 的运动目标定位跟踪算法,由于 AOA 观测测量中未包含辐射源速度信息,因此需要通过累积多次观测来估计运动辐射源的位置和速度。文献[10]中提出一种利用异步 AOA 估计辐射源位置和速度的滤波算法。

上述定位方法都将定位过程分为两步:第1步,通过接收的辐射源信号估计定位参数(如脉冲到达角);第2步,利用这些参数进行定位解算得到辐射源状态信息。两步定位法中定位观测在各观测站独立估计得到,忽略了定位参数与辐射源之间的约束关系,因此这类方法是次优的^[11]。新兴的基于信号层次的直接定位算法(Direct Position Determination, DPD),不需要估计定位参数,直接利用接收信号估计辐射源状态^[11-14]。

本文提出一种基于空间谱分析的直接定位算法,用以解决多运动站异步观测条件下的无源定位问题。建立异步观测条件下的直接定位算法模型,构造多站协同定位的空间谱函数,然后通过多级搜索方法实现辐射源位置估计。最后通过数字仿真对比了本文算法与文献[9]中基于异步 AOA 的分步定位算法的定位性能并分析各参数对定位精度的影响。

2 定位场景与信号模型

假设多运动站异步观测条件下定位场景如图1所示。 L ($L=3$)个运动观测平台对观测区域中 n ($n=2$)个静止或慢速运动目标进行无源定位。向量 $\mathbf{x}_i$, $\mathbf{s}_l$ 分别表示辐射源 i 和观测平台 l 的坐标。

图1中实心表示该观测站能够接收到辐射源信

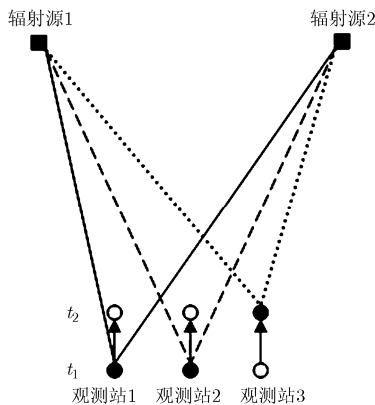


图1 多运动站异步观测定位场景示意图

号;空心表示该观测站不能接收到辐射源信号。在该假设场景中由于各观测站接收到信号的发射时间不同,文献[11-14]中提出的直接定位法也无法实现定位。若图中直线表示描述波达方向的空间谱,则谱线相交处即为目标估计位置。

观测平台天线为 m 个天线单元构成的传感器阵列,为方便计算,假设各个阵元等间距直线排列,这种阵列结构称为等距线阵^[15]。辐射源信号为窄带射频信号,信号波长 λ_i 。则 t 时刻第 l 个观测平台接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{y}_l(t) = \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_l(\omega_{l,i}) \xi_i(t) \delta_{l,i}(t) + \mathbf{n}_l(t), \quad l=1,2,\dots,L; i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

其中, $\delta_{l,i}(t)=1$ 或 0 为状态系数, $\delta_{l,i}(t)=1$ 表示观测站 l 能接收到辐射源 i 的信号, $\delta_{l,i}(t)=0$ 表示观测站 l 不能接收到辐射源 i 的信号; $\xi_i(t)$ 为辐射源信号;向量 $\mathbf{n}_l(t)$ 为加性观测噪声; $\mathbf{a}_l(\omega_{l,i})$ 为方向向量,是传感器阵列对观测信号的响应。在远距离定位场景中,电波到达各阵元的方向角相同,用 $\theta_{l,i}$ 表示,称为波达方向,定义为信号到达阵元的直线与阵列法线方向之间的夹角, $\theta_{l,i}$ 与阵元间相位差 $\omega_{l,i}$ 的关系式表示为

$$\omega_{l,i} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_{l,i} = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \frac{(x_i - s_{l,x})}{\sqrt{(x_i - s_{l,x})^2 + (y_i - s_{l,y})^2}} \quad (2)$$

式中, d 表示天线阵列阵元间距, λ 表示辐射源信号载波波长。

第 k 次快拍,观测站 l 接收到的信号可以表示成矩阵形式。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{y}_l(k) &= \mathbf{A} \tilde{\boldsymbol{\xi}}(k) + \mathbf{n}_l(k), \quad k=1,2,\dots,N \\ \mathbf{A} &\triangleq [\mathbf{a}_l(\omega_{l,1}) \quad \mathbf{a}_l(\omega_{l,2}) \quad \dots \quad \mathbf{a}_l(\omega_{l,n})] \\ \boldsymbol{\xi}(k) &\triangleq [f_1(k) \quad f_2(k) \quad \dots \quad f_n(k)]^T \\ \boldsymbol{\delta}_l &\triangleq [\delta_{l,1}(k) \quad \delta_{l,2}(k) \quad \dots \quad \delta_{l,n}(k)]^T \\ \tilde{\boldsymbol{\xi}}(k) &\triangleq \boldsymbol{\xi}(k) \odot \boldsymbol{\delta}_l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{A} \odot \mathbf{B}$ 表示矩阵Hadamard积。为实现异步观测直接定位解算,式(3)信号模型需满足以下假设条件:

条件1: 对于不同的目标,向量 $\mathbf{a}_l(\omega_i)$ 相互线性独立。对于不同的观测平台,向量 $\mathbf{a}_l(\omega_i)$ 与 $\mathbf{a}_g(\omega_i)$ 相互线性独立;

条件2: 加性噪声向量 $\mathbf{n}_l(k)$ 的每个元素都是零均值的复白噪声,彼此不相关,具有相同的方差 σ^2 ,并且与辐射源信号不相关;

条件3: 为了便于表述,假设观测站只有两种

状态: 能接收到所有辐射源信号; 不能接收到任一辐射源信号。

条件 3 只是为了方便下文表述, 不影响本文算法的一般性。异步观测定位问题就是利用各观测平台接收到的异步观测信号 $\mathbf{y}_l(k)$ 和观测平台位置信息 $\mathbf{s}_l$ 估计各辐射源位置 $\mathbf{x}_i$ 。

3 算法描述及误差分析

3.1 基于空间谱分析的直接定位算法

对观测平台 l 一次快拍信号进行自相关处理得

$$\mathbf{R}_{yy} = \mathbf{E}\{\mathbf{y}(k)\mathbf{y}^H(k)\} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{P} \triangleq \mathbf{E}[\tilde{\mathbf{x}}(k)\tilde{\mathbf{x}}^H(k)] \neq \mathbf{0}$, 若 $\mathbf{P} \neq \mathbf{0}$ 则 $\mathbf{P}$ 非奇异, $\mathbf{R}_{yy}$ 是一个 Hermitian 矩阵。令其特征值分解为

$$\mathbf{R}_{yy} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{U}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sigma^2\mathbf{I}_{m-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}^H \\ \mathbf{G}^H \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{\Sigma}$ 包含了 n 个大特征值, 它们比 σ^2 明显大; 矩阵 $\mathbf{S}$ 表示信号子空间, 矩阵 $\mathbf{G}$ 表示噪声子空间。由子空间理论得

$$\mathbf{R}_{yy}\mathbf{G} = [\mathbf{S}, \mathbf{G}]\mathbf{\Sigma} \begin{bmatrix} \mathbf{S}^H \\ \mathbf{G}^H \end{bmatrix} \mathbf{G} = [\mathbf{S}, \mathbf{G}]\mathbf{\Sigma} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} = \sigma^2\mathbf{G} \quad (6)$$

结合式(4)可得

$$\mathbf{R}_{yy}\mathbf{G} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^H\mathbf{G} + \sigma^2\mathbf{G} \quad (7)$$

因此

$$\mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^H\mathbf{G} = \mathbf{0} \quad (8)$$

进而可得

$$\mathbf{G}^H\mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^H\mathbf{G} = \mathbf{0} \quad (9)$$

众所周之, $\mathbf{t}^H\mathbf{Q}\mathbf{t} = \mathbf{0}$ 当且仅当 $\mathbf{t} = \mathbf{0}$, 故式(9)成立的充分必要条件是

$$\mathbf{A}^H\mathbf{G} = \mathbf{0} \quad (10)$$

将 $\mathbf{A} \triangleq [\mathbf{a}_l(\omega_{l,1}) \quad \mathbf{a}_l(\omega_{l,2}) \quad \cdots \quad \mathbf{a}_l(\omega_{l,n})]$ 代入式(10), 可得

$$\mathbf{a}^H(\omega)\mathbf{G} = \mathbf{0}^T, \quad \omega = \omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_r \quad (11)$$

显然, 当 $\omega \neq \omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_r$ 时, $\mathbf{a}^H(\omega)\mathbf{G} \neq \mathbf{0}^T$ 。为了构造谱函数, 将式(11)改写成标量形式, 则可以定义如下一种描述波达方向分布的空间谱:

$$f(\omega) = \mathbf{a}^H(\omega)\hat{\mathbf{G}}\hat{\mathbf{G}}^H\mathbf{a}(\omega), \quad \omega = \omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n \quad (12)$$

式中, $\hat{\mathbf{G}}$ 表示由样本数据求得的噪声子空间。可以构造多站协同作用的空间谱。

$$F(\omega) = \sum_{l=1}^L f_l(\omega) \quad (13)$$

易得空间谱函数是关于波达方向的函数, 为了实现目标定位可以利用式(2)将空间谱函数转化为目标位置的函数 $F(\omega) \equiv F(x, y)$, 则目标位置估计值

为

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \min_{(x,y) \in Z} F(x, y) \quad (14)$$

式中, Z 表示搜索区域, 通过多级搜索, 可得辐射源位置估计 $\hat{\mathbf{x}}$ 。

从算法实现原理来看本文算法也可以称为异步观测条件下测向交叉直接定位算法, 该算法具有自身的特点。

(1)与文献[9]中基于AOA的异步观测条件下定位算法相比, 本文算法不需要估计AOA参数, 属于一种直接定位算法。

(2)与文献[11-14]中直接定位法相比不要求观测信号具有相同的发射时间, 即对静止或慢速运动目标本文算法能实现异步观测条件下的无源定位。

3.2 定位误差分析

克拉美罗下限(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)是无偏估计器所能达到的估计误差下限。设观测站接收到的信号表示为 $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \cdots, \mathbf{y}_L]^T$, 辐射源位置矩阵 $\boldsymbol{\rho} = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \cdots, \mathbf{x}_n^T]^T$, 则关于辐射源位置的似然函数表示为

$$L(\mathbf{Y}|\boldsymbol{\rho}) = -LmN \ln(\pi\sigma^2) - \frac{1}{\sigma^2} \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^N [y_l(t) - \mathbf{A}_l \mathbf{x}_l(t)]^H \cdot [y_l(t) - \mathbf{A}_l \mathbf{x}_l(t)] \quad (15)$$

对辐射源 x 轴坐标估计的 Fisher 信息矩阵表示为

$$\mathbf{J} = -\mathbf{E} \left[\frac{\partial^2 L(\mathbf{Y}|\boldsymbol{\rho})}{\partial \mathbf{X} \partial \mathbf{X}^T} \right] \quad (16)$$

其中, $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T$ 为辐射源位置 x 轴坐标向量。

x 轴坐标估计的CRLB可以表示为

$$\text{CRLB}(\mathbf{X}) = \frac{\sigma^2}{2} \left\{ \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N \text{Re}[\mathbf{X}_l^H(k) \mathbf{H}_l \mathbf{X}_l(k)] \right\}^{-1} \quad (17)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{H}_l &\triangleq \mathbf{D}_{lx}^H \mathbf{Q}_l \mathbf{D}_{lx} \\ \mathbf{d}_{lx}(x_i, y_i) &\triangleq \frac{\partial \mathbf{a}_l(x_i, y_i)}{\partial x} \\ \mathbf{D}_{lx} &\triangleq [\mathbf{d}_{lx}(x_1, y_1), \cdots, \mathbf{d}_{lx}(x_n, y_n)] \\ \mathbf{Q}_l &\triangleq \mathbf{I} - \mathbf{A}_l [\mathbf{A}_l^H \mathbf{A}_l]^{-1} \mathbf{A}_l^H \\ \mathbf{X}_l(k) &\triangleq \text{diag}[\mathbf{x}_{l1}(k), \cdots, \mathbf{x}_{ln}(k)] \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

当样本数据足够多时, 式(17)可以简化为

$$\text{CRLB}(\mathbf{X}, N \rightarrow \infty) = \left\{ \frac{2N}{\sigma^2} \sum_{l=1}^L \text{Re}[\mathbf{H} \odot \mathbf{P}_l^T] \right\}^{-1} \quad (19)$$

同理可得辐射源 y 轴坐标估计的克拉美罗下限。

下面推导定位误差方差, 需要用到文献[16]中的结论: 当 $N \rightarrow \infty$, 噪声向量 $\{\hat{\mathbf{g}}_i\}$ 在信号空间上的正交投影 $\mathbf{S}\mathbf{S}^H\hat{\mathbf{g}}_i$ 服从均值为零, 协方差矩阵如下的渐近高斯分布。

$$\left. \begin{aligned} & \mathbf{E}\left\{\left(\mathbf{S}\mathbf{S}^H\hat{\mathbf{g}}_i\right)\left(\mathbf{S}\mathbf{S}^H\hat{\mathbf{g}}_j\right)^H\right\} \\ &= \frac{\sigma^2}{N} \left[\sum_{k=1}^N \frac{\lambda_k}{(\sigma - \lambda_k)^2} \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H \right] \delta_{i,j} \triangleq \frac{1}{N} \mathbf{U} \delta_{i,j} \\ & \mathbf{E}\left\{\left(\mathbf{S}\mathbf{S}^H\hat{\mathbf{g}}_i\right)\left(\mathbf{S}\mathbf{S}^H\hat{\mathbf{g}}_j\right)^T\right\} = \mathbf{0}, i, j = 1, 2, \dots, m-n \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

利用式(14)多站协同定位空间谱函数作为代价函数估计辐射源位置坐标, 推导定位协方差矩阵过程中会出现不同观测站噪声向量在信号空间的正交投影之间的互相关。利用条件 1 和条件 2 可得不同观测站正交投影互相关为 $\mathbf{0}$, 即

$$\left. \begin{aligned} & \mathbf{E}\left\{\left(\mathbf{S}\mathbf{S}^H\hat{\mathbf{g}}_{l,i}\right)\left(\mathbf{S}\mathbf{S}^H\hat{\mathbf{g}}_{k,j}\right)^H\right\} = \mathbf{0} \\ & \mathbf{E}\left\{\left(\mathbf{S}\mathbf{S}^H\hat{\mathbf{g}}_{l,i}\right)\left(\mathbf{S}\mathbf{S}^H\hat{\mathbf{g}}_{k,j}\right)^T\right\} = \mathbf{0}, l \neq k \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

同时, x 轴方向定位误差 $(\hat{x}_i - x_i)$ 服从均值为零, 协方差如下的渐近高斯分布。

$$\begin{aligned} & \mathbf{E}\left\{(\hat{x}_i - x_i)(\hat{x}_j - x_j)\right\} \\ &= \frac{\text{Re}\left[\sum_{l=1}^L (\mathbf{d}_{l,j}^H \mathbf{G} \mathbf{G}^H \mathbf{d}_{l,i}) (\mathbf{a}_{l,i}^H \mathbf{U} \mathbf{a}_{l,j})\right]}{2N \text{Re}\left[\sum_{l=1}^L h_{li}\right] \text{Re}\left[\sum_{g=1}^L h_{gj}\right]} \end{aligned} \quad (22)$$

式中, $h_{li} \equiv \mathbf{H}_{l,ii}$ 。由式(23)

$$\left. \begin{aligned} & \mathbf{G} \mathbf{G}^H = \mathbf{I} - \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \\ & \mathbf{a}^H \mathbf{U} \mathbf{a} = \sigma^2 \left\{ [\mathbf{P}^{-1}]_{ii} + \sigma^2 [\mathbf{P}^{-1} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{P}^{-1}]_{ii} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

x 轴方向定位误差方差可化简为

$$\begin{aligned} & \mathbf{E}\left[(\hat{x}_i - x_i)^2\right] \\ &= \frac{\sigma^2}{2N} \frac{\sum_{l=1}^L \text{Re}\left\{h_{li} \left[[\mathbf{P}^{-1}]_{ii} + \sigma^2 [\mathbf{P}^{-1} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{P}^{-1}]_{ii} \right]\right\}}{\left(\sum_{l=1}^L \text{Re}[h_{li}]\right)^2} \end{aligned} \quad (24)$$

由式(24)可得, 整理后定位误差方差求解不再需要特征分解运算。同理可得 y 轴方向定位误差方差。

4 仿真分析

本节通过数字仿真对比本文算法与文献[9]中基于 AOA 的分步定位算法性能并分析各参数对定位精度的影响。仿真定位场景如图 1, 观测站初始位

置坐标为 $[-5 \text{ km}, 0 \text{ km}]$, $[0 \text{ km}, 0 \text{ km}]$ 和 $[5 \text{ km}, 0 \text{ km}]$, 观测站速度为 $[0 \text{ m/s}, 300 \text{ m/s}]$, 且观测时间内不变。两个辐射源真实位置坐标分别为 $[-10 \text{ km}, 100 \text{ km}]$ 和 $[10 \text{ km}, 100 \text{ km}]$, 辐射源均静止, 假设辐射源信号为固定重频的脉冲列信号, 脉冲重频分别为 100 Hz 和 200 Hz , 脉冲幅度为单位 1, 脉冲占空比为 1%, 载波频率可测且分别为 1 GHz 和 3 GHz 。如图 1 所示, t_1 时刻观测站 1 和观测站 2 能接收到辐射源信号, t_2 时刻只有观测站 3 能够接收到辐射源信号, 时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1 = 2 \text{ s}$ 。传感器天线阵列阵元个数 $m = 20$, 阵元间距 $d = 0.5 \min\{\lambda_1, \lambda_2\} = 0.05 \text{ m}$, 数据样本个数 $N = 1000$ 。为方便分析假设辐射源信号能量相等, 信号之间互不相关(仿真中只给出了对辐射源 1 的定位性能分析, 辐射源 2 具有相同的性质)。

(1) 算法定位性能对比分析: 仿真对比本文提出的基于空间谱分析的直接定位算法与基于定位参数的分步定位算法定位性能, 如图 2 所示。图 2 中“DPD_RMSE”表示本文算法均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE), “Two-Steps”表示分步定位算法均方根误差。蒙特卡洛仿真次数为 1000 次。

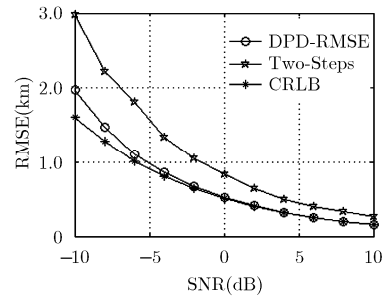


图2 算法定位性能随信噪比的变化

由图 2 得, 直接定位算法定位性能优于基于定位参数的分步定位算法, 尤其在低信噪比情况下优势更明显。当信噪比为 4 dB 时, 直接定位算法的定位精度能够达到 CRLB, 与分步定位算法相比, 定位精度提高了约 0.2 km ; 当信噪比为 -10 dB 时, 与分步定位算法相比, 直接定位算法定位精度提高了约 1 km 。

(2) 阵元个数和样本数对算法精度的影响: 定义算法有效性参数 e 为均方根误差与克拉美-罗下限的比值。

$$e = \text{RMSE}/\text{CRLB} \quad (25)$$

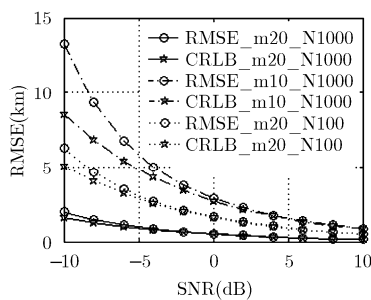
图 3(a)分别给出了 $m = 20, N = 1000$, $m = 20, N = 100$ 和 $m = 10, N = 1000$ 情况下辐射源位置估

计的均方根误差与 CRLB 的对比图。图 3(b)给出了阵元个数和样本数对算法有效性参数的影响。

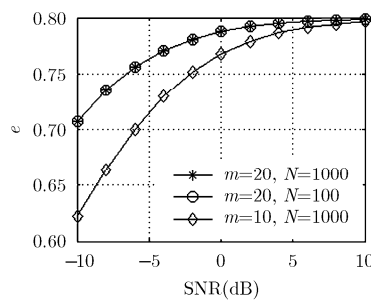
由图 3(a)得到: 阵元越多, 样本数越大, 定位性能越好; 由图 3(b)得到: 与样本数相比, 阵元个数对有效性参数的影响比较强。即样本数相同情况下阵元个数越多, RMSE 越逼近 CRLB, 反之, 阵元个数相同情况下, 增加样本数对有效性参数影响不大。

(3)阵元间距对定位性能的影响: 利用空间谱估计测向时, 要求阵元间距应满足“半波长”条件 $d \leq \lambda/2$, 否则相位差 ω_i 可能大于 π , 而产生方向模糊, 即 θ_i 和 $\pi + \theta_i$ 都可以是信号的波达方向。如果能够确定目标是位于天线阵列的“前面”还是“后面”, 则可以取消“半波长”条件的限制。当阵元间距 d 分别取 0.02 m, 0.05 m 和 0.08 m 时, 辐射源位置估计的 RMSE 和 CRLB 对比图如图 4 所示。

由图 4 得, 不考虑“半波长”条件限制情况下,



(a)不同阵元个数和样本数时定位性能对比图



(b)阵元个数和样本数对有效性参数的影响

图3 阵元个数和样本数对定位性能的影响

阵元间距越大辐射源位置估计精度越高, 且定位精度的提升速率随着阵元间距的增加而减小。

5 结论

本文提出一种基于空间谱分析的直接定位算法, 用以解决多运动站异步观测情况下的无源定位问题。建立异步观测条件下的直接定位算法模型, 推导了该算法的定位误差协方差矩阵和 Cramer-Rao 下限。通过数字仿真对比分析了本文算法与分步定位算法的定位性能, 分析了不同参数对定位精度的影响。仿真结果表明异步观测条件下对静止或慢速运动目标, 直接定位算法性能优于基于 AOA 的分步定位算法, 尤其在低信噪比情况下优势更明显; 阵元个数越多、样本数越大定位精度越高; 在不产生方向模糊情况下, 阵元间距越大, 定位精度越高。

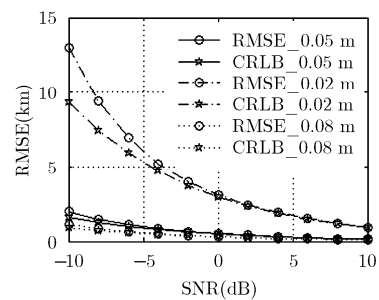


图4 阵元间距对定位性能的影响

参考文献

- [1] 徐征. 机载多平台无源定位跟踪算法研究[D]. [博士论文], 海军航空工程学院, 2014.
XU Zheng. Research on algorithms for airborne multi-platform passive localization and tracking[D]. [Ph.D. dissertation], Naval Aeronautical and Astronautical University, 2014.
- [2] 雷文英, 陈伯孝, 杨明磊, 等. 基于 TOA 和 TDOA 的三维无源目标定位方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 816-823. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.02.
LEI Wenying, CHEN Boxiao, YANG Minglei, et al. Passive 3D target location method based on TOA and TDOA[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(5): 816-823. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.02.
- [3] CAO Yalu, PENG Li, LI Jinzhou, et al. A new iterative algorithm for geolocating a known altitude target using TDOA and FODA measurements in the presence of satellite location uncertainty[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(5): 1510-1518. doi: 10.1016/j.cja.2015.08.015.
- [4] LI Jing, ZHAO Yongjun, LI Donghai, et al. Accurate single-observer passive coherent location estimation based on TDOA and DOA[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(4): 913-923. doi: 10.1016/j.cja.2014.06.004.
- [5] LI Jinzhou, GUO Fucheng, and JIANG Wenli. Source localization and calibration using TDOA and FDOA measurements in the presence of sensor location uncertainty[J]. *Science China Information Science*, 2014, 57: 042315(1)-042315(12). doi: 10.1007/s11432-013-4800-2.
- [6] SCHIFFMILIER R, ADLER H, and CARROLL M. Multi-ship coherent geolocation system[P]. USA Patent, 124385, 2005-12-29.
- [7] MUSICKI D. Multi-target tracking using multiple passive bearings-only asynchronous sensors[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(3): 1151-1160. doi: 10.1109/TAES.2008.4655370.
- [8] MUSICKI D. Bearings only multi-sensor maneuvering target tracking[J]. *Systems & Control Letters*, 2008, 57(3): 216-221. doi: 10.1016/j.sysconle.2007.08.008.

- [9] SATHYAN T and SINHA A. A two-stage assignment-based algorithm for asynchronous multisensor bearings-only tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3): 2153–2167. doi: 10.1109/TAES.2011.5937289.
- [10] HANSELMANN T and MORELANDE M. Multiple target tracking with asynchronous bearings only measurements[C]. *Proceeding of the International Conference on Information Fusion*, Quebec, Canada, 2007. doi: 10.1109/ICIF.2007.4408056.
- [11] AMAR A and WEISS A I. Localization of narrowband radio emitters based on doppler frequency shifts[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(11): 5500–5508. doi: 10.1109/TSP.2008.929655.
- [12] AMAR A and WEISS A I. Direct geolocation of stationary wideband radio signal based on time delays and Doppler shifts[C]. *IEEE/SP Workshop on Statistical Signal Processing*, Cardiff, UK, 2009: 101–104. doi: 10.1109/SSP.2009.5278630.
- [13] OISPUU M. Direct detection and position determination of multiple sources with intermittent emission[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(12): 3056–3064. doi: 10.1016/j.sigpro.2010.05.010.
- [14] 王云龙, 吴瑛. 联合时延与多普勒频率的直接定位改进算法[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(4): 123–129. doi: 10.7652/xjtuxb201504020.
- WANG Yunlong and WU Ying. An improved direct determination algorithm with combined time delay and doppler[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(4): 123–129. doi: 10.7652/xjtuxb201504020.
- [15] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 126–135.
- ZHANG Xianda. *Modern Signal Processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 126–135.
- [16] STOICA P and NEHORAI A. Music, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound: Further results and comparisons[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990, 38(12): 2140–2150. doi: 10.1109/29.61541.
- 冯 奇: 男, 1990 年生, 博士生, 研究方向为无源定位跟踪技术.
- 曲长文: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无源定位跟踪技术、信号与信息处理、SAR 目标检测与识别技术.
- 周 强: 男, 1984 年生, 助理研究员, 研究方向为 SAR 目标检测与识别技术、无源定位跟踪技术.