

基于阵列自适应旋转的同频多电磁辐射源测向增强方法

高小芳¹, 林通¹, 冯宝², 陈泽², 李潘³, 李建峰³

(1. 国家电网有限公司信息通信中心, 北京 100761; 2. 南京南瑞信息通信科技有限公司, 南京 211100; 3. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 211106)

摘要: 提出了一种关于均匀线性阵列 (Uniform linear array, ULA) 的自适应旋转的同频多电磁辐射源测向增强方法。针对传统固定阵列在多信源场景下估计精度受限的问题, 通过引入动态旋转机制, 建立旋转角与克拉美-罗界 (Cramer-Rao bound, CRB) 的解析关系, 推导出最优旋转角的闭式解。采用 CRB 的迹作为损失函数, 其物理含义为均方误差的理论可达下界。通过降低 CRB, 可以提升系统的可观测性, 从而有效提升到达角 (Direction of arrival, DoA) 估计算法的估计精度。由于多信源情形下 CRB 是一个相关矩阵, 因此推导了在快拍数足够多的情形下 CRB 的简化对角形式。使用该简化的对角形式的 CRB 来替代原 CRB 实施优化, 进而降低优化难度。为实现高精度的波达方向估计, 首先通过快速算法获取信号入射角的先验信息。该先验由阵列在接收并采样多个辐射源信号后, 根据协方差矩阵的计算得到。然后, 确定能够最小化损失函数的旋转角, 并将其作为阵列的最优姿态。阵列调整到该角度后, 在相同位置再次利用算法执行方向估计, 从而获得最终的波达角结果。该方法能够在多源信号条件下保持较高的估计精度, 有效提升整体方向估计性能。仿真结果验证了所提方法能够有效降低 CRB, 并提升定位精度, 同时提升谱图搜索类算法的分辨率。

关键词: 波达方向估计; 克拉美-罗界; 姿态调整; 多信源定位; 均匀线性阵列

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A

引用格式: 高小芳, 林通, 冯宝, 等. 基于阵列自适应旋转的同频多电磁辐射源测向增强方法[J]. 数据采集与处理, 2026, 41(3): 701-709. GAO Xiaofang, LIN Tong, FENG Bao, et al. Multi-source direction-of-arrival estimation via adaptive antenna array rotation[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2026, 41(3): 701-709.

引言

电磁环境的复杂化以及干扰事件的多发, 使得人们对电磁辐射源的快速识别与处置能力提出了更高要求。当前对非法电磁辐射源的识别多采用地面固定监测站实施, 但这种方式仍存在一定局限: (1) 定位精度较差。地面监测站受限于固定位置和阻挡物的影响, 往往无法获得准确的非法辐射源位置信息; (2) 人力成本高。地面监测站需要人力驻守和操作, 工作效率较低并且成本较高; (3) 无法及时定位。由于移动性限制和监测范围受限, 地面监测站可能无法及时准确地定位辐射源, 从而导致干扰持续较长时间。相比之下, 使用无人机定位具有优势, 因此成为电磁辐射源定位研究的热点。相较于依赖地面监测站的传统定位方式, 采用无人机进行定位凸显出以下突出优势: (1) 无人机于空中作业,

基金项目: 国家自然科学基金(62531019, 62371227, 62427801); 江苏省重点研发计划(BE2023027); 江苏省前沿引领技术基础研究重大项目(BK20232030); 稳定支持国防特色学科基础研究项目(ILF240061A24)。

收稿日期: 2025-11-04; **修订日期:** 2026-03-11

受地面杂波的干扰程度显著降低,能采集到更纯净、分辨率更高的信号数据;(2)无人机飞行于空中,多路径效应对其定位的干扰微乎其微,从而确保了定位信息的精准无误;(3)无人机具备高度灵活性,能够根据实际需求自由调整飞行轨迹、监测范围及观测角度,展现出极强的操作适应性;(4)相较于地面监测站庞大的运维团队,无人机仅需少量操作人员即可完成复杂的非法辐射源监测任务,大幅削减了人力成本。正因如此,基于无人机的定位技术正日益成为科研领域的新秀^[1-7]。由于无人机往往很难获取同步信息,采用含波达方向(Direction of arrival, DoA)信息的测量值进行DoA估计,再利用三角几何关系实施定位已成为研究的重点。因此,确保DoA信息的准确性是高精度定位的先决条件。在空、天、地融合的通信系统中,卫星、无人机和地面基站间的波束对准高度依赖精确的DoA估计,以确保动态链路的可靠连接。大规模MIMO系统的波束成形技术需要通过实时DoA估计来优化阵列增益,从而提升毫米波通信的覆盖范围和频谱效率。因此,DoA估计在很多领域有着重大作用。

DoA估计作为基础性研究课题,其算法体系已发展出两大主流技术路线。第一类技术途径基于噪声子空间分解原理,其典型代表为多信号分类法(Multiple signal classification, MUSIC),该算法通过构造噪声子空间投影矩阵实现超分辨率估计^[8-10]。第二类方法则立足于信号子空间特性,其中ESPRIT算法通过发掘阵列的几何不变性特征,显著降低了计算复杂度^[11-12]。线性阵列相比非线性阵列具有显著优势:其结构更简单,校准幅度相位误差、通道不平衡和阵元位置失配的复杂度更低;在DoA估计时,线性阵列只需处理一维角度的优化问题,而平面阵列需解决二维角度估计,计算量更大;此外,线性阵列在5G及未来移动终端中更易部署,仅需软件升级和小型硬件改造即可实现三维空间定位功能,具有更好的实用性和兼容性^[13]。目前,DoA的测量精度都是从算法改善等层面入手^[14-19]。为了提升DoA的测量精度,研究人员正在不断探索新的方法和策略。一方面,尝试改进阵列结构,通过增加阵元数量、优化阵列形态等方式来提升定位精度。另一方面,在算法设计上进行改善,包括采用更复杂的信号处理算法、使用非线性优化技术等,以期增强DoA测量的精度与可靠性。克拉美-罗界(Cramer-Rao bound, CRB)作为DoA估计的理论最优下界,通常被用于衡量算法的优劣^[20-23]。然而,在现有技术中,CRB限制了算法的优化,定位性能很难进一步提升。因此,对CRB的优化受到了学术界越来越广泛的关注。在文献[24]中,通过阵列姿态调整技术显著提升了单信源场景下的DoA估计精度。然而,针对多信源场景的阵列姿态自适应调整算法目前仍属研究空白。CRB的优化问题在提升定位性能方面有着非常重要的作用,能够极大程度提升定位精度。因此,提出了一种自适应旋转调整的方法,通过优化CRB的迹来降低定位误差的理论下界,进而降低误差,为后续定位提供了高精度的DoA信息。

本文提出了一种面向多信源场景的线性阵列姿态优化算法,通过动态调整阵列姿态可显著改善DoA估计精度。该方法以CRB逆矩阵的迹值,即测量均方误差的理论最小值,作为优化目标,通过数值求根确定最优旋转角度,进而实现阵列DoA的精确估计。仿真实验验证表明,该算法能有效提升DoA估计性能。

1 信号模型

假设在自由空间中存在 K 个位置未知的辐射源,如图1所示,DoA真实值为 $\theta_k, k=1, 2, \dots, K$ 。考虑一个 M 阵元的均匀线阵,利用该阵列对辐射源的方向实施估计。阵列接收矢量的形式为

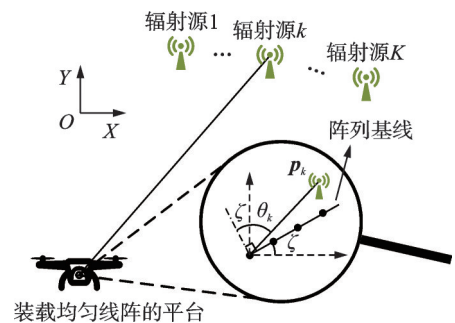


图1 场景图

Fig.1 Scenario illustration

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}, \zeta) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad t = 1, 2, \dots, J \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}, \zeta) = [\mathbf{a}(\theta_1, \zeta) \cdots \mathbf{a}(\theta_K, \zeta)]$ 为阵列响应; J 为快拍数; ζ 为旋转角, 表示线性阵列的方向。

$\mathbf{a}(\theta_k, \zeta)$ 是一个矢量, 具体表达式为

$$\mathbf{a}(\theta_k, \zeta) = \left[e^{j2\pi d \sin(\theta_k + \zeta)/\lambda} \cdots e^{j2\pi d(M-1) \sin(\theta_k + \zeta)/\lambda} \right]^T \quad (2)$$

式中: λ 为信号波长, d 为相邻阵元间的距离, ζ 为线性阵列与水平轴间的夹角; $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \cdots s_K(t)]^T$ 表示来自辐射源的信号; $\mathbf{n}(t)$ 为高斯噪声, 均值为 0, 方差为 σ^2 。

2 所提算法

接收信号协方差矩阵可以估计为

$$\mathbf{R}_{ZZ} = E[\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)] \approx \frac{1}{J} \sum_{t=1}^J \mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t) \quad (3)$$

使用算法做 DoA 估计, 得到波达角的初始值(先验信息)。使用 ESPRIT 方法实施 DoA 估计, 来获取波达角的初始值。对 \mathbf{R}_{ZZ} 做特征值分解, 可以得出

$$\mathbf{R}_{ZZ} \mathbf{U} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{U} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$ 为对角矩阵, 符号 $\text{diag}\{\cdot\}$ 将括号内的元素转换为一个对角矩阵, 其对角线是这些元素, $\mathbf{U} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_M]$ 表示特征矩阵, \mathbf{e}_m 为 λ_m 的归一化的特征向量, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M$ 。

紧接着, 从特征值中选取数值相对较大的 K 个, 并将这些特征值所对应的特征向量提取出来, 进而构成信号子空间, $\mathbf{E}_s = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_K]$, 选择该矩阵前面 $M-1$ 行和后面 $M-1$ 行组成矩阵 \mathbf{E}_x 和 \mathbf{E}_y 。对

矩阵 $\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x^H \\ \mathbf{E}_y^H \end{bmatrix} [\mathbf{E}_x \quad \mathbf{E}_y]$ 实施特征分解, 便能得到特征矩阵 \mathbf{E} , 将该矩阵分块为 $K \times K$ 的子矩阵

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{11} & \mathbf{E}_{12} \\ \mathbf{E}_{21} & \mathbf{E}_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

定义 $\hat{\boldsymbol{\psi}} = \mathbf{E}_{12} \mathbf{E}_{22}^{-1}$ 的特征值为 λ_k 。对 $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ 实施特征值分解, 得到 DoA 的初始先验值如下

$$\hat{\theta}_k = \arcsin \left\{ \text{angle} \left(\lambda_k / \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \right) \right) \right\} - \zeta \quad (6)$$

根据文献[8], 可以知道在阵元数足够大时, DoA 估计的 CRB 具有以下形式

$$\text{CRB} = \frac{1}{2J\tau} \begin{bmatrix} \frac{1}{\text{SNR}_1 \cos^2(\theta_1 + \zeta)} & & & \\ & \ddots & & \\ & & & \frac{1}{\text{SNR}_K \cos^2(\theta_K + \zeta)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: SNR_k 为信噪比, $k = 1, 2, \dots, K$; $\tau = \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \right)^2 \frac{M(M-1)(M+1)}{12}$ 。

鉴于 CRB 为 DoA 估计理论上的下界, 因此, 采用与 CRB 相关的 A-最优法则, 以此构造如下的损失函数。MSEA(ζ) 的含义为均方误差的可达下界, 即 CRB

$$\begin{aligned} \text{CRB} = \text{MSEA}(\zeta) &= \frac{1}{2J\tau} \sum_{k=1}^K \frac{1}{\text{SNR}_k \cos^2(\zeta + \theta_k)} = \frac{1}{2J\tau} \sum_{k=1}^K \frac{1}{\text{SNR}_k} [\tan^2(\zeta + \theta_k) + 1] = \\ &= \frac{1}{2J\tau} \sum_{k=1}^K \frac{1}{\text{SNR}_k} \left[\left(\frac{\tan \zeta + \tan \theta_k}{1 - \tan \theta_k \tan \zeta} \right)^2 + 1 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

按照求导规则,要找到让损失函数最小的旋转角,直接对函数求导后令导数为零。

当 $K=1$ 时,有

$$\frac{\partial \text{MSEA}(\zeta)}{\partial \tan \zeta} = h_1 \left[\frac{\tan \zeta + \tan \theta_1}{(1 - \tan \theta_1 \tan \zeta)^3} \right] \quad (9)$$

当 $\frac{\partial \text{MSEA}(\zeta)}{\partial \tan \zeta} = 0$ 时,有

$$\tan \zeta + \tan \theta_1 = 0 \quad (10)$$

此时, $\zeta = -\theta_1$ 。定义 ζ^{opt} 为最优的阵列旋转角。当 $k=1$ 时,易得 $\zeta^{\text{opt}} = -\theta_1$ 。同时, h_k 的定义为 $h_k = \frac{1 + \tan^2 \theta_k}{J\tau \text{SNR}_k}$, $k=1, 2, \dots, K$; 接下来,考虑 $K \geq 2$ 的情况,有

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{MSEA}(\zeta)}{\partial \tan \zeta} &= \sum_{k=1}^K h_k \left[\frac{\tan \zeta + \tan \theta_k}{(1 - \tan \theta_k \tan \zeta)^3} \right] = \frac{\sum_{k=1}^K \left[h_k (\tan \zeta + \tan \theta_k) \prod_{i \neq k} (1 - \tan \theta_i \tan \zeta)^3 \right]}{\prod_{k=1}^K (1 - \tan \theta_k \tan \zeta)^3} = \\ &= \frac{\sum_{k=1}^K \left[h_k (\tan \zeta + \tan \theta_k) \prod_{i \neq 3k-2, 3k-1, 3k} (1 - a_i \tan \zeta) \right]}{\prod_{k=1}^K (1 - \tan \theta_k \tan \zeta)^3} = \\ &= \frac{c_{3K-2} (\tan \zeta)^{3K-2} + c_{3K-3} (\tan \zeta)^{3K-3} + \dots + c_1 \tan \zeta + c_0}{\prod_{k=1}^K (1 - \tan \theta_k \tan \zeta)^3} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $a_i = \tan \theta_{\text{INT} \left[\frac{i-1}{3} \right] + 1}$, $i \in \{1, 2, \dots, 3K\}$; $\text{INT} \left[\frac{i-1}{3} \right]$ 表示取整,含义为小于等于 $\frac{i-1}{3}$ 的最大整数;

同时,分子上的系数为

$$c_0 = \sum_{k=1}^K h_k \tan \theta_k \quad (12)$$

$$c_{3K-2} = \sum_{k=1}^K h_k \left[\prod_{j=1, j \neq 3k-2, 3k-1, 3k}^{3K-3} (-a_j) \right] \quad (13)$$

$$c_1 = \sum_{k=1}^K h_k - \sum_{k=1}^K h_k \tan \theta_k \left[\prod_{j=1, j \neq 3k-2, 3k-1, 3k}^{3K-3} (-a_j) \right] \quad (14)$$

$$c_i = \sum_{k=1}^K \left\{ h_k \tan \theta_k \left(\sum_{j=1}^{C_{3K-3}^n} \Delta_{k,n}(j) \right) + h_k \left(\sum_{j=1}^{C_{3K-3}^{n-1}} \Delta_{k,n}(j) \right) \right\} \quad 2 \leq n \leq 3K-3 \quad (15)$$

式中: C_m^n 为组合数, $\mathbf{A}_{k,n}(j)$ 表示从 $\{-a_1, -a_2, \dots, -a_{3k-3}, -a_{3k+1}, \dots, -a_{3K}\}$ 中选取 n 个数乘积的 C_{3K-3}^n 种组合的第 j 组组合, $x = \tan \zeta$ 。

只需求解 $c_{3K-2}(\tan \zeta)^{3K-2} + c_{3K-3}(\tan \zeta)^{3K-3} + \dots + c_1 \tan \zeta + c_0 = 0$, 这是一个一元 $3K-2$ 次方程, 可以在多项式时间内求解, 定义 K 个实数根为 $\tan \zeta_1, \tan \zeta_2, \dots, \tan \zeta_K$, 易得 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_K$, 接着找寻 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_K$ 中使得 $\text{MSEA}(\zeta)$ 最小的 ζ_k , 便是最优旋转角 ζ^{opt} , 即

$$\zeta^{\text{opt}} = \arg \min_{\zeta_k} \text{MSEA}(\zeta) \quad (16)$$

确定能够最小化损失函数的旋转角, 并将其作为阵列的最优姿态。阵列调整到该角度后, 在相同位置再次利用算法执行方向估计, 从而获得最终的波达角结果。

3 仿真结果

在仿真中, 均匀线阵由 $M=5$ 个阵元组成, 阵元的间距为 $\lambda/2$ 。考虑存在 3 个辐射源, DoA 分别为 10° 、 60° 和 80° , $J=200$, 且初始阵列与水平轴平行。3 个信源独立, 信号类型为窄带信号。阵列的阵元之间非互耦。图 2 和图 3 显示了阵列在调整旋转姿态前后的 MUSIC 谱图变化。可以观察到, 姿态调整后的谱图更加尖锐, 分辨能力提高, 从而验证了所提算法的有效性。注意到, 协方差矩阵可分解为

$$\mathbf{R}_{ZZ} = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}, \zeta) \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H(\boldsymbol{\theta}, \zeta) + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (17)$$

式中 $\mathbf{R}_s = \text{diag}\{P_1, P_2, \dots, P_K\}$ 为信号功率。对 \mathbf{R}_{ZZ} 实施特征值分解, 可以得到

$$\mathbf{R}_{ZZ} = \mathbf{U}_s \boldsymbol{\Sigma}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \boldsymbol{\Sigma}_n \mathbf{U}_n^H \quad (18)$$

式中: $\boldsymbol{\Sigma}_s = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K\}$ 为较大的 K 个特征值, \mathbf{U}_s 为较大的 K 个特征值对应的特征向量组成的信号子空间矩阵, $\boldsymbol{\Sigma}_n = \text{diag}\{\lambda_{K+1}, \lambda_{K+2}, \dots, \lambda_M\}$ 为较小的 $M-K$ 个特征值, 其理论值等于 σ^2 , \mathbf{U}_n 为较小的 $M-K$ 个特征值对应的特征向量组成的噪声子空间矩阵。因此噪声功率可以估计为

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{M-K} \sum_{i=1}^{M-K} \lambda_{i+K} \quad (19)$$

$\hat{\mathbf{R}}_s = \text{diag}\{\hat{P}_1, \hat{P}_2, \dots, \hat{P}_K\}$ 可通过对 $\mathbf{R}_{ZZ} - \hat{\sigma}^2 \mathbf{I}$ 左右分别乘以 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}, \zeta)$ 和 $\mathbf{A}^H(\boldsymbol{\theta}, \zeta)$ 的伪逆估计得出。第 k 个信源的信噪比因此可以估计为 $\hat{P}_k / \hat{\sigma}^2$ 。

图 4 展示了姿态调整前后的 DoA 估计的性能变化图 (SNR), 可以看出 DoA 估计的精度在姿态调整后显著提高。图 5 为在信噪比 10 dB 条件下 DoA 估计精度随快拍数的变化图, 同样地, 姿态调整之后的

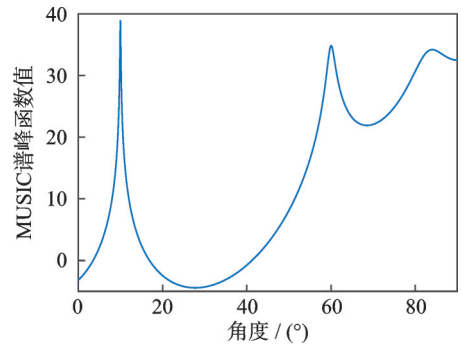


图 2 姿态调整前的 MUSIC 谱图

Fig.2 MUSIC spectrum before array attitude adjustment

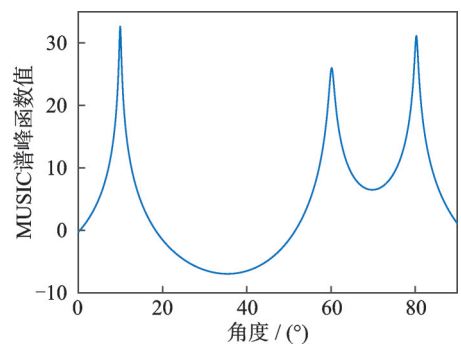


图 3 姿态调整后的 MUSIC 谱图

Fig.3 MUSIC spectrum after array attitude adjustment

性能提升了很多,验证了所提方法的有效性。图6为在信噪比 10 dB 条件下所提方法的 DoA 估计精度随阵元数的变化图,可以看出所提方法在阵元数较低时仍有作用。这是因为 CRB 的非对角线元素在阵元数较低时仍非常小,例如在 $M=4$ 时的仿真场景,主对角线元素和非对角线元素相差了 3 个数量级,因此影响较小。传统方法通常采用固定方向的线性阵列,然而,这种固定方向的线性阵列在估计精度上受信号来波方向的影响显著,其定位精度上限已然确定,难以突破。与之不同的是,通过姿态调整,能够为阵列寻找到更优的朝向,从而显著提升系统性能。

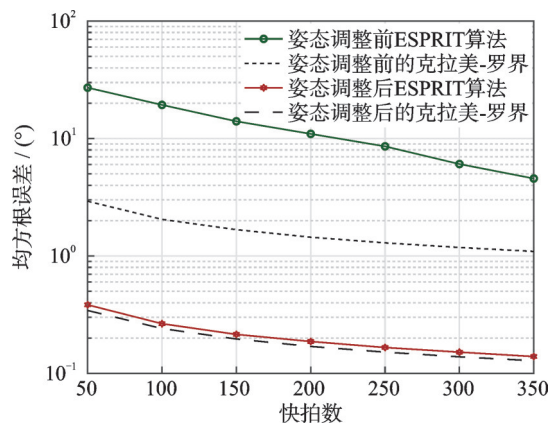


图5 所提方法的波达角估计精度随快拍数变化

Fig.5 DoA estimation accuracy versus number of snapshots using the proposed method

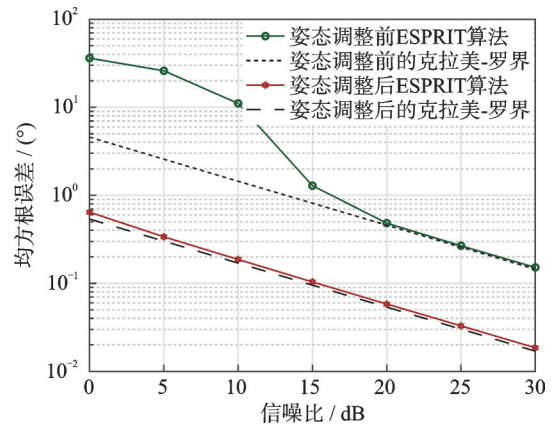


图4 所提方法的波达角估计精度随信噪比变化

Fig.4 DoA estimation accuracy versus SNR using the proposed method

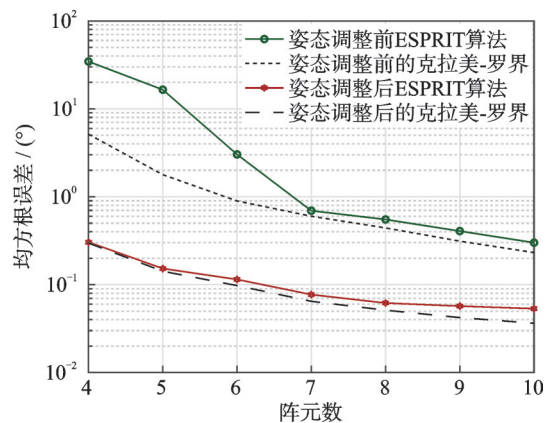


图6 所提方法的波达角估计精度随阵元数变化

Fig.6 DoA estimation accuracy versus number of array elements using the proposed method

4 结束语

本文提出了一种基于CRB优化的动态旋转机制,用于提升DoA估计精度;提出通过物理旋转均匀线性阵列来优化多信源场景下的DoA估计精度;同时,针对多信源场景下CRB矩阵的复杂性,推导了在快拍数足够多时的CRB对角简化形式,从而降低了优化计算难度。本文设计了由先验估计引导的阵列旋转闭环优化流程:初始估计→CRB优化→物理旋转→精估计,通过阵列旋转有效提升系统可观测性。

参考文献:

- [1] YIGIT H, YILMAZ G. Development of a GPU accelerated terrain referenced UAV localization and navigation algorithm[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013. DOI: 10.1007/s10846-012-9735-0.
- [2] 陈鹏, 陈洋, 王威. 无人机声学定位技术综述[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(12): 109-123.

- CHEN Peng, CHEN Yang, WANG Wei. Review of acoustic localization technologies for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(12): 109-123.
- [3] 孙超, 都基焱, 段连飞. 一种空间两点交会无人机定位方法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(6): 3.
SUN Chao, DU Jiyan, DUAN Lianfei. A technology of UAV positioning to target by two-point space rendezvous[J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(6): 3.
- [4] NIE W, HAN Z, LI Y, et al. UAV detection and localization based on multi-dimensional signal features[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 5150-5162.
- [5] SOHN S, LEE B, KIM J, et al. Vision-based real-time target localization for single-antenna GPS-guided UAV[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1391-1401.
- [6] 施云鹤, 张小飞, 吴启晖. 无人机多模态超宽谱认知仪研究[J]. 数据采集与处理, 2026, 41(1): 28-52.
SHI Yunhe, ZHANG Xiaofei, WU Qihui. Research on UAV multi-modal ultra-wide spectrum cognitive instrument[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2026, 41(1): 28-52.
- [7] 王耀南, 吴启晖. “低空智联网”专栏序言——构筑低空智联网, 赋能经济发展新格局[J]. 数据采集与处理, 2026, 41(1): 1.
WANG Yaonan, WU Qihui. Preface to the special column “Low-Altitude Intelligent Network”: Building a low-altitude intelligent network to empower a new pattern of economic development[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2026, 41(1): 1.
- [8] RAO B D, HARI K V S. Performance analysis of root-MUSIC[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1989, 37(12): 1939-1949.
- [9] KUNDU D. Modified MUSIC algorithm for estimating DOA of signal[J]. Signal Processing, 1996, 48(1): 85-90.
- [10] SCHMID R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1979, 34(3): 276-280.
- [11] ROY R, PAULRAJ A, KAILATH T. ESPRIT—A subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1986, 34(5): 1340-1342.
- [12] ROY R, KAILATH T. ESPRIT—estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(7): 984-995.
- [13] SUN Y, HO K, GAO L, et al. Three dimensional source localization using arrival angles from linear arrays: Analytical investigation and optimal solution[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2022, 70: 1864-1879.
- [14] CHEN X, WANG G, HO K C. Semidefinite relaxation method for unified near-field and far-field localization by AOA[J]. Signal Processing, 2021, 181(1): 107916.
- [15] WILSON A, KUMAR A, JHA A, et al. Multitarget angle of arrival estimation using rotating mmWave FMCW radar and yolov3[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(3): 3173-3182.
- [16] TOKY A, SINGH R P, DAS S. A localization scheme for underwater acoustic wireless sensor networks using AoA[J]. Recent Advances in Computer Science and Communications, 2021(3): 14.
- [17] YAN Q, CHEN J, ZHANG J, et al. Robust AOA-based source localization using outlier sparsity regularization[J]. Digital Signal Processing, 2021, 112(2): 103006.
- [18] 沈志博, 朱全江, 王浩丞, 等. 基于稀疏重构角度配对的二维 DOA 快速估计算法[J]. 电子信息对抗技术, 2022, 37(6): 28-32.
SHEN Zhibo, ZHU Quanjiang, WANG Haocheng, et al. Two dimensional DOA estimation algorithm based on angle pair matching by sparse reconstruction[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2022, 37(6): 28-32.
- [19] ABRAMOVICH Y, SPENCER N, GOROKHOV A. Positive-definite Toeplitz completion in DoA estimation for nonuniform linear antenna arrays. I. Fully augmentable arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 47(6): 1502-1521.
- [20] PANWAR K, FATIMA G, BABU P. Optimal sensor placement for hybrid source localization using fused TOA-RSS-AOA measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023(2): 1643-1657.
- [21] STOICA P, ARYE N. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech,

and Signal Processing, 1989, 38(5): 720-741.

- [22] TZOREFF E, WEISS A. Single sensor path design for best emitter localization via convex optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(2): 939-951.
- [23] TZOREFF E, WEISS A. Path design for best emitter location using two mobile sensors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(19): 5249-5261.
- [24] LI P, LI J, YE C, et al. Optimal rotation of UAV for enhanced 2D direction of arrival estimation[J]. Electronics Letters, 2020, 56(20): 1086-1088.

作者简介:



高小芳(1993-),通信作者,女,工程师,研究方向:电力应急通信, E-mail: nitup@qq.com。



林通(1989-),男,高级工程师,研究方向:电力通信。



冯宝(1984-),男,正高级工程师,研究方向:电力系统通信、量子保密通信等。



陈泽(1986-),男,工程师,研究方向:电力通信。



李潘(1998-),男,博士研究生,研究方向:电力通信、信号处理。



李建峰(1988-),男,研究员,研究方向:电力通信、信号处理。

(编辑:夏道家)

Multi-source Direction-of-Arrival Estimation via Adaptive Antenna Array Rotation

GAO Xiaofang^{1*}, LIN Tong¹, FENG Bao², CHEN Ze², LI Pan³, LI Jianfeng³

(1. State Grid Information & Telecommunication Center, Beijing 100761, China; 2. Nanjing NARI Information and Communication Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper proposes an adaptive rotation-based enhancement method for direction-of-arrival (DoA) estimation of co-frequency multiple emitters using a uniform linear array (ULA). Addressing the limited estimation accuracy of traditional fixed arrays in multi-source scenarios, a dynamic rotation mechanism is introduced to establish an analytical relationship between the rotation angle and the Cramer-Rao bound (CRB), leading to the derivation of a closed-form solution for the optimal rotation angle. The trace of the CRB is employed as the loss function, representing the theoretically achievable lower bound of the mean squared error. By minimizing the CRB, the system observability is enhanced, thereby improving the estimation accuracy of DoA algorithms. Given that the CRB in multi-source scenarios is a correlated matrix, a simplified diagonal form of the CRB is derived under the condition of a sufficiently large number of snapshots. This simplified diagonal CRB is utilized for optimization, significantly reducing computational complexity. To achieve high-precision DoA estimation, prior information about the signal incident angles is first obtained using a fast algorithm. This prior is derived from covariance matrix computations after the array receives and samples signals from multiple radiation sources. Subsequently, the rotation angle that minimizes the loss function is determined and adopted as the optimal array orientation. After adjusting the array to this angle, the DoA estimation algorithm is reapplied at the same position to obtain the final DoA results. The proposed method maintains high estimation accuracy under multi-source conditions and effectively enhances overall direction estimation performance. Simulation results demonstrate that the method significantly reduces the CRB, improves localization accuracy, and enhances the resolution of spectral search-based algorithms.

Highlights:

1. An adaptive uniform linear array (ULA) rotation framework is proposed to enhance co-frequency multi-source direction-of-arrival (DoA) estimation performance.
2. A closed-form optimal rotation angle is derived by minimizing a simplified Cramer-Rao bound (CRB)-based metric.
3. The proposed method improves DoA estimation accuracy by reducing the CRB and refining array observability through a rotation-estimation loop.

Key words: direction of arrival estimation; Cramer-Rao bound; attitude adjustment; multi-source localization; uniform linear array

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos.62531019, 62371227, 62427801); Key R & D Plan of Jiangsu Province (No.BE2023027); Frontier Leads Major Basic Technology Research Projects of Jiangsu Province (No.BK20232030); Funding of Steady-Supported Guofang Characteristic Subject Fundamental Research Project (No.ILF240061A24).

Received: 2025-11-04; **Revised:** 2026-03-11

***Corresponding author, E-mail:** nitup@qq.com.