

距离相关噪声AOA协同定位下无人机路径优化方法

左燕* 刘雪娇 彭冬亮

(杭州电子科技大学自动化学院 杭州 310018)

摘要: 该文研究到达角度(AOA)协同定位下无人机路径优化问题。考虑实际AOA量测噪声方差是目标-传感器距离的函数, 距离相关噪声特性使得AOA定位难度增加。为了更好地适应量测噪声随距离变化特性, 该文提出一种变增益无迹卡尔曼滤波算法。随后, 给出了距离相关噪声AOA定位下广义克劳美罗下界(GCRLB)。在此基础上理论分析了无约束最优传感器位置分布和约束条件下最优传感器位置分布。以GCRLB的迹最小化为目标函数建立AOA协同定位下多无人机路径规划问题, 采用罚函数和LM算法优化求解, 仿真验证了所提算法的有效性。

关键词: 辐射源定位; 到达角度; 距离相关噪声; 广义克劳美罗下界; 路径优化

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)04-1192-07

DOI: 10.11999/JEIT200078

UAV Path Planning for AOA-based Source Localization with Distance-Dependent Noises

ZUO Yan LIU Xuejiao PENG Dongliang

(School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: An optimal path planning problem is investigated for Angle-Of-Arrival (AOA) source localization using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) equipped with passive sensors. The more realistic model is considered where the variance of AOA measurement noises is a function of the source-to-sensor distances, which complicates AOA-based source localization. A modified Variable Gain Unscented Kalman Filter (VG-UKF) is developed to adapt to distance-dependent variance of AOA measurement noises. The Generalized Cramer-Rao Lower Bound (GCRLB) of AOA localization is calculated. Further, the unconstrained optimal sensor placement and constrained optimal sensor placement are theoretically analyzed. Then a path planning model for UAVs is constructed with minimizing the trace of GCRLB, which is solved optimally with penalty function and LM (Levenberg-Marquardt) algorithm. The effectiveness of the proposed algorithm is illustrated with simulation results.

Key words: Source localization; Angle of Arrival (AOA); Distance-dependent noises; Generalized Cramer-Rao Lower Bound (GCRLB); Path Planning

1 引言

随着隐身飞机、反辐射导弹和电子对抗等技术发展, 无源探测系统具有不主动发射电磁信号、隐蔽性好、覆盖范围广等优点^[1], 已广泛应用于目标跟踪、监视、导航和无线通信等领域。

在无源探测系统中, 角度信息(Angle Of Arrival, AOA)是基本的观测信息之一。基于AOA的定位跟

踪算法相继提出, 包括极大似然估计(ML)^[2]、最小二乘估计(LS)^[3]、伪线性估计(PL)^[4]、扩展卡尔曼滤波(EKF)^[5]等。大量研究表明: AOA定位性能不仅取决于传感器量测精度, 还与目标-传感器的几何位置有关^[6]。当测角传感器(如红外传感器、光电设备、无源雷达)部署在多个无人机上, 通过优化无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)位置可以进一步提高AOA协同定位性能^[7], AOA协同定位下无人机路径规划成为研究热点。

针对AOA协同定位问题, 基于最大化FIM行列式指标(D准则)的最优几何分析^[6]和UAV最优路径规划^[7,8]相继提出。由于D准则可能导致大的估计偏差^[8], 基于最小化CRLB的迹指标(A准则)下UAV路径规划随之提出^[9,10], 通过非线性规划优化算法^[11]在线计算满足各种状态约束和环境约束条件

收稿日期: 2020-01-19; 改回日期: 2020-06-01; 网络出版: 2020-12-11

*通信作者: 左燕 leftswallow@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61673146, 61771028, 61973102), 电子信息控制重点实验室基金(6142105200102)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61673146, 61771028, 61973102), Fund of Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory (6142105200102)

的UAV的轨迹, 使跟踪目标状态估计接近CRLB。为满足无人机实时在线计算, 参数化路径优化算法^[12]被提出, 该算法基于信息增益离线计算一组传感器-目标最优构型集合, 在线选择最优UAV航迹, 该方法只适合单个UAV。文献^[13]采用归一化梯度算法计算UAV最优航迹, 易陷入局部最优。

上述AOA协同定位问题假设量测噪声方差为常数, 而理论^[14]和实验^[15]研究显示AOA量测噪声方差是距离的函数。文献^[16]提出了一种联合最小二乘和非线性渐消滤波算法(LS-ISFEKF)。文献^[17]基于广义CRLB(Generalized CRLB, GCRLB)^[14]的迹最小化指标分析无约束下距离相关噪声AOA协同定位最优几何结构。文献^[18]提出了一种距离相关噪声AOA协同定位下基于演化神经网络的UAV路径规划。不同于上述研究工作, 本文主要创新工作如下: (1)提出了一种联合极大似然估计和变增益UKF滤波的定位跟踪算法, 适应量测噪声方差随距离的变化; (2)基于GCRLB的迹最小化指标, 分析了距离和角度约束下最优传感器几何构型; (3)考虑距离相关噪声特征, 以最小化GCRLB的迹为目标函数, 建立多约束UAV路径规划模型, 结合罚函数和LM算法优化求解, 兼顾性能和效率。

2 距离相关噪声AOA协同定位

在实际应用中测角传感器装载在多个UAV上, 通过控制UAV运动方向使得传感器到达最佳探测位置, 从而获得对目标更加精确的量测信息, 减小定位误差。在传统UAV路径规划框架^[7]的基础上, 设计了距离相关噪声AOA协同定位方法总体框架(见图1)。给定距离相关噪声AOA量测, 利用ML和变增益UKF获得目标状态的估计值, 计算距离相

关噪声AOA协同定位GCRLB指标。以GCRLB迹最小化为目标函数, 建立多约束路径规划模型, 结合罚函数和LM算法优化求解得到UAV的最优航向角, 控制UAV运动到最优航路点。

2.1 距离相关噪声量测模型

2维空间下 M 个测角传感器分别部署在 M 个UAV上对目标定位。令目标位置 $\mathbf{S}_{\text{tar}} = [x_{\text{tar}}, y_{\text{tar}}]^T$, 速度 $\dot{\mathbf{S}}_{\text{tar}} = [\dot{x}_{\text{tar}}, \dot{y}_{\text{tar}}]^T$; 传感器 i 的位置 $\mathbf{S}_i = [x_i, y_i]^T$, 速度 $\dot{\mathbf{S}}_i = [\dot{x}_i, \dot{y}_i]^T$, 则传感器 i 获得角度量测值

$$\theta_i = \arctan \frac{y_{\text{tar}} - y_i}{x_{\text{tar}} - x_i} + n_i \quad (1)$$

其中, θ_i 为传感器 i 测量的方位角, 且 $-\pi < \theta_i \leq \pi$ 。 n_i 为加性量测噪声, 服从零均值, 方差为 σ_i^2 高斯分布, 即 $n_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2)$ 。

在实际应用中, 传感器方位角量测噪声方差与信号的信噪比SNR有关^[14]。当传感器工作参数相同时, SNR仅取决于传感器和目标的距离, 传感器 i 的量测噪声方差可以描述为^[15]

$$\sigma_i^2 = \begin{cases} \sigma_{i0}^2 \frac{r_i^2}{r_0^2}, & r_i > r_0 \\ \sigma_{i0}^2, & r_i \leq r_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, σ_i^2 为传感器 i 量测噪声方差, 它与距离相关; $r_i = |\mathbf{S}_{\text{tar}} - \mathbf{S}_i|$ 为传感器 i 和目标的距离; r_0 为路径损失参考距离; σ_{i0}^2 表示参考距离 r_0 下传感器 i 测角量测噪声方差。

M 个传感器方位角量测方程可描述为

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}^0 + \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \arctan(y_{\text{tar}} - y_1/x_{\text{tar}} - x_1) \\ \vdots \\ \arctan(y_{\text{tar}} - y_M/x_{\text{tar}} - x_M) \end{bmatrix} + \mathbf{n} \quad (3)$$

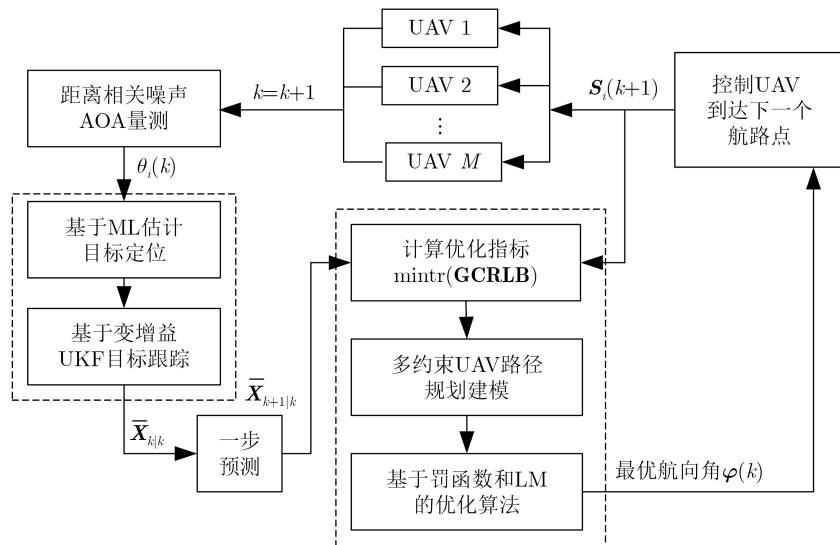


图1 距离相关噪声AOA协同定位框架

其中, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M]^T$, $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_M]^T$, 假设不同传感器的量测噪声相互独立, 对应的距离相关量测噪声方差为 $\mathbf{R}_r = [\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_M^2]^T$.

2.2 目标运动模型

假设目标在2维平面内机动, k 时刻目标状态为 $\mathbf{X}_k = [x_{\text{tar}}(k), \dot{x}_{\text{tar}}(k), y_{\text{tar}}(k), \dot{y}_{\text{tar}}(k)]^T$. 目标运动状态模型为

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{e}_k \quad (4)$$

其中, \mathbf{F}_k 为状态转移矩阵; \mathbf{e}_k 为目标运动噪声, 服从均值为零, 协方差为 \mathbf{Q} 的高斯分布.

2.3 ML-VUKF算法

考虑AOA量测噪声方差随目标-传感器距离变化特点, 设计一种联合ML估计和变增益UKF算法(记为ML-VUKF算法), 具体如下:

(1) 初始值: 采用ML估计算法^[2]确定目标初始状态 $\bar{\mathbf{X}}_{k|k}$.

(2) 生成Sigma点 ε_k^n 及其权重 w^n

$$\varepsilon_k^n = \begin{cases} \bar{\mathbf{X}}_{k|k}, & n = 0 \\ \varepsilon_k^0 + \left(\sqrt{(N + \lambda) \mathbf{P}(k|k)} \right)_n, & n = 1, 2, \dots, N \\ \varepsilon_k^0 - \left(\sqrt{(N + \lambda) \mathbf{P}(k|k)} \right)_{N+n}, & n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

$$w^n = \begin{cases} \frac{\lambda}{N + \lambda}, & n = 0 \\ \frac{\lambda}{2(N + \lambda)}, & n = 1, 2, \dots, 2N \end{cases} \quad (6)$$

其中, N 为Sigma点的维数; λ 为标度参数, 它确定围绕状态向量 \mathbf{X}_k 均值的Sigma点的分布.

(3) 预测: 计算Sigma点的一步预测, 及相应量测预测值.

$$\bar{\mathbf{X}}_{k+1|k} = \sum_{n=0}^{2N} w^n \varepsilon_{k+1|k}^n, \quad \varepsilon_{k+1|k}^n = \mathbf{F}_k \varepsilon_{k|k}^n \quad (7)$$

$$\bar{\mathbf{Z}}_{k+1|k} = \sum_{n=0}^{2N} w^n \mathbf{z}_{k+1|k}^n, \quad \mathbf{z}_{k+1|k}^n = h(\varepsilon_{k+1|k}^n) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \sum_{n=0}^{2N} w^n \left(\bar{\mathbf{X}}_{k+1|k} - \varepsilon_{k+1|k}^n \right) \cdot \left(\bar{\mathbf{X}}_{k+1|k} - \varepsilon_{k+1|k}^n \right)^T + \mathbf{Q} \quad (9)$$

(4) 计算增益: 根据目标一步预测值更新量测噪声方差, 以此更新滤波器增益.

$$\mathbf{P}_{k+1|k}^{zz} = \sum_{n=0}^{2N} w^n \left(\bar{\mathbf{Z}}_{k+1|k} - \mathbf{z}_{k+1|k}^n \right) \cdot \left(\bar{\mathbf{Z}}_{k+1|k} - \mathbf{z}_{k+1|k}^n \right)^T + \tilde{\mathbf{R}}_r \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k}^{xz} = \sum_{n=0}^{2N} w^n \left(\bar{\mathbf{X}}_{k+1|k} - \varepsilon_{k+1|k}^n \right) \cdot \left(\bar{\mathbf{Z}}_{k+1|k} - \mathbf{z}_{k+1|k}^n \right)^T + \tilde{\mathbf{R}}_r \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}^{xz} (\mathbf{P}_{k|k-1}^{zz})^{-1} \quad (12)$$

式(10)和式(11)中, $\tilde{\mathbf{R}}_r$ 为距离相关量测噪声方差. 由于目标非合作, 用目标一步预测值 $\bar{\mathbf{X}}_{k+1|k}$ 代替目标位置真实值, 计算 $\tilde{\mathbf{R}}_r$. 利用式(12)计算增益, 该值是目标-传感器距离的隐函数.

(4) 状态更新: 根据新的量测更新目标状态和状态协方差.

$$\bar{\mathbf{X}}_{k+1|k+1} = \bar{\mathbf{X}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \bar{\mathbf{Z}}_{k+1|k}) \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = \mathbf{P}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{P}_{k|k-1}^{zz} \mathbf{K}_{k+1}^T \quad (14)$$

3 GCRLB指标下最优传感器位置分析

3.1 GCRLB性能指标

考虑量测噪声与距离相关的特点, 采用广义CRLB指标(GCRLB)^[14], 以GCRLB的迹最小化为指标进行传感器和目标最优几何分布构型.

在高斯噪声假设下, 距离相关量测噪声下AOA目标定位FIM为^[14]

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_1 + \mathbf{J}_2 \quad (15)$$

$$\mathbf{J}_1 = \left(\frac{\partial \boldsymbol{\theta}^0}{\partial \mathbf{S}^{\text{tar}}} \right)^T \mathbf{R}_r^{-1} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\theta}^0}{\partial \mathbf{S}^{\text{tar}}} \right) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{\beta_i r_i^4} \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^T \quad (16)$$

$$\mathbf{J}_2 = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\mathbf{R}_r^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}_r}{\partial \mathbf{S}^{\text{tar}}} \mathbf{R}_r^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}_r}{\partial \mathbf{S}^{\text{tar}}} \right) = \sum_{i=1}^M \frac{2}{r_i^2} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T \quad (17)$$

$$\text{其中, } \beta_i = \frac{\sigma_{i0}^2}{r_0^2}, \quad \mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} -\sin \theta_i \\ \cos \theta_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix}.$$

FIM具体形式展开如式(18)

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{11} & \mathbf{J}_{12} \\ \mathbf{J}_{21} & \mathbf{J}_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中,

$$\mathbf{J}_{11} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (c_i + d_i \cos 2\theta_i) = \frac{1}{2} (A + B_1) \quad (19)$$

$$\mathbf{J}_{22} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (c_i - d_i \cos 2\theta_i) = \frac{1}{2} (A - B_1) \quad (20)$$

$$\mathbf{J}_{12} = \mathbf{J}_{21} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M d_i \sin 2\theta_i = \frac{1}{2} B_2 \quad (21)$$

其中, $A = \sum_{i=1}^M c_i$, $B_1 = \sum_{i=1}^M d_i \cos 2\theta_i$, $B_2 = \sum_{i=1}^M d_i \sin 2\theta_i$, $a_i = 2/r_i^2$, $b_i = 1/\beta_i r_i^4$, $c_i = a_i + b_i$, $d_i = a_i - b_i$.

FIM的行列式为

$$\det(\mathbf{J}) = (A^2 - B_1^2 - B_2^2)/4 \quad (22)$$

GCRLB定义为FIM的逆^[14]

$$\mathbf{GCRLB} = \mathbf{J}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{J})} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{22} & -\mathbf{J}_{12} \\ -\mathbf{J}_{21} & \mathbf{J}_{11} \end{bmatrix} \quad (23)$$

GCRLB的迹为

$$\min f = \text{tr}(\mathbf{GCRLB}) = 4A/(A^2 - B_1^2 - B_2^2) \quad (24)$$

3.2 无约束最优传感器位置分析

以GCRLB的迹最小化为定位性能指标, 分析传感器-目标的最佳位置。将 A , B_1 和 B_2 具体形式代入式(24), 展开可得

$$f = \sum_{i=1}^M c_i / \left(\sum_{i=1}^M a_i b_i + \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M d_i d_j \sin^2 \phi_{ij} \right) \quad (25)$$

式中, $\phi_{ij} = \theta_j - \theta_i$ 为传感器 i 和传感器 j 的夹角。

(1) 给定任意距离 r_i , 分析传感器最佳角度 ϕ_{ij} 。最小化GCRLB的迹等价于优化问题

$$\max_{\phi_{ij}} f_1(\phi_{ij}) = \sum_{i=1}^M a_i b_i + \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M d_i d_j \sin^2 \phi_{ij} \quad (26)$$

(a) 当 $M = 2$ 时, 推导最优性条件为

$$df_1/d\phi_{12} = 2d_1 d_1 \sin 2\phi_{12} = 0 \quad (27)$$

最优交会角为: $\phi_{12} = \pm\pi/2$ 。

(b) 当 $M \geq 3$ 时, 推导最优性条件为

$$\sum_{j=1, j \neq i}^M d_i d_j \sin 2\phi_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, M \quad (28)$$

取 $\sin 2\phi_{ij} = 0, j \neq i, i = 1, 2, \dots, M$ 时, 最优角度与距离 r_i 无关, 最优交会角为 $\phi_{ij} = \pm\pi/2 (j \neq i)$ 。

(2) 给定任意角度 ϕ_{ij} , 分析传感器 i 最佳距离 r_i 。将 a_i, b_i, c_i, d_i 具体形式代入式(25)可得

$$f_2(r_i) = \frac{\sum_{i=1}^M (2/r_i^2 + 1/\beta_i r_i^4)}{\sum_{i=1}^M \frac{2}{\beta_i r_i^6} + \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \frac{(2\beta_i r_i^2 - 1)(2\beta_j r_j^2 - 1)}{\beta_i \beta_j r_i^4 r_j^4} \sin^2 \phi_{ij}} \quad (29)$$

上述函数 $f_2(r_i)$ 随着距离 r_i 的减小而减小, 因此固定传感器之间夹角, 传感器距目标越近越好。

3.3 约束最优传感器位置分析

考虑传感器最小探测安全距离约束以及UAV运动平台运动角度约束, 分析角度约束和距离约束条件下传感器最优几何位置。

设传感器 i 距离和角度满足范围 $r_{\min} \leq r_i \leq r_{\max}$

和 $\theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max}$ 。根据无约束条件下传感器最优几何位置分析可知, 传感器距目标越近越好。因此, 选择 $r_i = r_{\min}$ 作为最优距离。约束条件下传感器最优几何位置分析可转化为在半径为 r_{\min} , 角度范围为 $\theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max}$ 扇形区域内的传感器最优角度。

将 $r_i = r_{\min}$ 代入式(26)可得

$$\max f_3(\phi_{ij}) = M a_0 + b_0 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \sin^2 \phi_{ij} \quad (30)$$

其中, $a_0 = 2/\beta r_{\min}^6, b_0 = (2\beta r_{\min}^2 - 1)^2/\beta^2 r_{\min}^8$ 。

求导得到最优性条件

$$\sum_{j=1, j \neq i}^M \sin 2\phi_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, M-1 \quad (31)$$

最优交会角为 $\phi_{ij} = \pi/M$, GCRLB的迹最优值为 $f^*(\phi_{ij}) = 4\beta r_{\max}^4/M(2\beta r_{\max}^2 + 1)$ 。

(1) 当 $\pi/2 \leq \theta_{\max} - \theta_{\min} \leq 2\pi$ 时, 最优性条件

$$\theta_j = \theta_i + \pi/M, \theta_{\min} \leq \theta_i, \theta_j \leq \theta_{\max} \quad (32)$$

(2) 当 $\pi/M \leq \theta_{\max} - \theta_{\min} \leq \pi/2$ 时, M 个传感器最优分布满足式(33)的条件

$$\theta_j = \theta_i + \pi/M, \theta_{\min} \leq \theta_i, \theta_j \leq \theta_{\max} \quad (33)$$

(3) 当 $0 \leq \theta_{\max} - \theta_{\min} \leq \pi/M$ 时, 对非线性目标函数(式(31))在区间 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 进行梯度下降搜索^[17]可得最优传感器位置数值解。

4 AOA协同定位下UAV路径优化

在文献[7]的基础上, 针对距离相关噪声特性, 以GCRLB的迹最小化^[14,18]为目标函数, 考虑UAV运行过程中运动约束、通信和避碰约束、探测约束等, 建立多约束AOA协同定位UAV路径规划模型。

$$\min f(\boldsymbol{\varphi}(k)) = \text{tr}(\mathbf{GCRLB}) \quad (34)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{S}_i(k+1) = \mathbf{S}_i(k) + \begin{bmatrix} v \cos \varphi_i(k) T \\ v \sin \varphi_i(k) T \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$|\varphi_i(k+1) - \varphi_i(k)| \leq \varphi_{\max} \quad (36)$$

$$\|\mathbf{S}_{\text{tar}}(k) - \mathbf{S}_i(k)\| \leq r_{\text{dmax}} \quad (37)$$

$$\|\mathbf{S}_j(k) - \mathbf{S}_i(k)\| \leq r_{\text{smax}} \quad (38)$$

$$\|\mathbf{S}_j(k) - \mathbf{S}_i(k)\| \geq r_{\text{smin}} \quad (39)$$

其中, v 为UAV飞行速度, $\varphi_i(k)$ 为第 i 个UAV的航向角, $\boldsymbol{\varphi}(k) = [\varphi_1(k), \varphi_2(k), \dots, \varphi_M(k)]^T$; φ_{\max} 为最大允许转弯率, r_{dmax} 为UAV对目标的最大安全探测距离, r_{smax} 和 r_{smin} 分别为UAV之间最大安全避碰距离和最小通信距离; 式(34)为目标函数; 式(35)为UAV运动模型; 式(36)为UAV转弯率限制; 式(37)为UAV对目标最大安全探测距离约束; 式(38)和

式(39)分别为UAV之间最小通信约束和最大安全避碰约束。

该问题是带约束的非线性优化问题,通过构造罚函数将上述问题转化为如下无约束优化问题

$$\min_{\varphi(k), \mu_l} f(\varphi(k)) + \sum_{l=1}^4 \mu_l g_l(\varphi(k)) \quad (40)$$

其中, μ_l 为非常大的数,表示约束 $g_l(\varphi(k))$ 惩罚因子。

$$g_1(\varphi(k)) = \sum_{i=1}^M \max \{ \varphi_i(k+1) - \varphi_i(k) - \varphi_{\max}, 0 \} + \sum_{i=1}^M \max \{ \varphi_{\max} - \varphi_i(k+1) + \varphi_i(k), 0 \} \quad (41)$$

$$g_2(\varphi(k)) = \sum_{i=1}^M \max \{ \| \mathbf{S}_{\text{tar}}(k) - \mathbf{S}_i(k) \| - r_{\text{dmax}}, 0 \} \quad (42)$$

$$g_3(\varphi(k)) = \sum_{i=1}^M \max \{ \| \mathbf{S}_{\text{tar}}(k) - \mathbf{S}_i(k) \| - r_{\text{smax}}, 0 \} \quad (43)$$

$$g_4(\varphi(k)) = \sum_{i=1}^M \max \{ r_{\text{smin}} - \| \mathbf{S}_{\text{tar}}(k) - \mathbf{S}_i(k) \|, 0 \} \quad (44)$$

无约束优化问题(式(40))可以采用梯度下降法^[13]或牛顿法^[7]迭代求解。牛顿法收敛快,但黑塞矩阵的逆求解时间复杂度高。梯度下降法时间复杂度低,但收敛速度慢,易陷入局部极小。本文采用LM算法^[19],它是梯度下降法和高斯牛顿法的自适应结合,当解远离最优值时梯度下降,在最优解邻域时快速收敛,满足动态场景的实时性。

5 仿真实验

仿真场景设置如下^[7]:3个可移动传感器对1个目标进行定位。目标位置[10000, 3000] m,采样间隔 $T = 1$ s。3个传感器分别装载在3个UAV平台。UAV1的初始位置为[1000, 1000] m, UAV2的初始位置为[2000, 0] m, UAV3的初始位置为[1000, -1000] m。3个UAV的运动速度均为40 m/s。UAV最大允许转弯率 $\varphi_{\max} = 4^\circ$, UAV对目标的最大安全探测距离 r_{dmax} 为20 km, UAV之间最大安全避碰距离 r_{smax} 为7500 m,最小通信距离 r_{smin} 为200 m。所有UAV上部署精度相同测角传感器。考虑传感器测角量测噪声服从零均值高斯分布,且量测方差距离相关。3个传感器参考距离 r_0 为1500 m,参考距离对应的信噪比 SNR_0 为30 dB,路径损耗系数 α 为0.01。

首先,比较不同AOA定位跟踪算法。将本文

所提ML-VUKF与ML-MEKF^[5]和LS-ISFEKF^[16]算法进行比较,蒙特卡洛次数为1000,图2给出不同定位跟踪算法下目标状态估计误差MSE比较曲线。

由图2可知,本文所提ML-VUKF算法性能优于ML-MEKF^[5]和LS-ISFEKF^[16]算法。传感器与目标的距离越近,量测噪声方差 σ_i^2 接近常数,3种AOA算法定位跟踪性能接近。

其次,研究相同精度测角传感器AOA协同定位下路径优化性能。将本文所提基于GCRLB的路径优化算法(记为本文算法)与基于CRLB的路径优化算法^[7](记为优化算法^[7])和常规直线轨迹飞行策略(记为直线轨迹)进行比较,图3至图5分别给出3种UAV路径优化算法下UAV飞行航迹,图6给出3种UAV路径优化算法下定位误差MSE比较曲线。

由图3可知,直线策略下每个UAV都朝着目

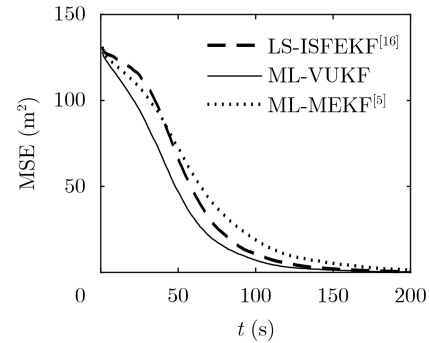


图2 不同AOA跟踪算法下估计误差MSE

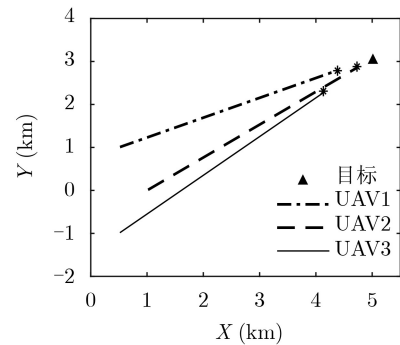


图3 直线飞行策略下UAV飞行航迹

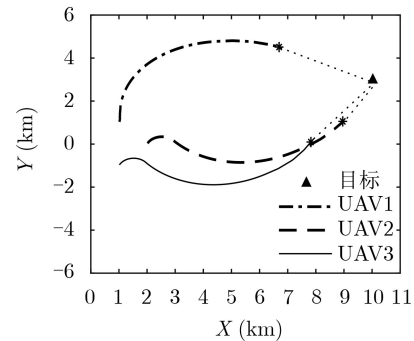


图4 优化算法^[7]下UAV飞行航迹

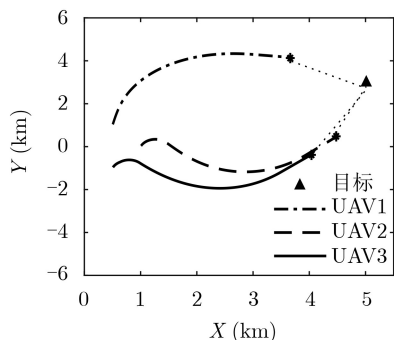


图5 本文算法下UAV飞行航迹

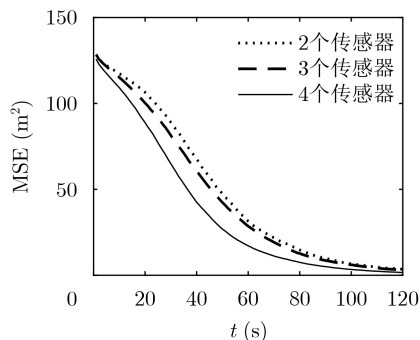


图7 不同传感器个数下定位误差MSE

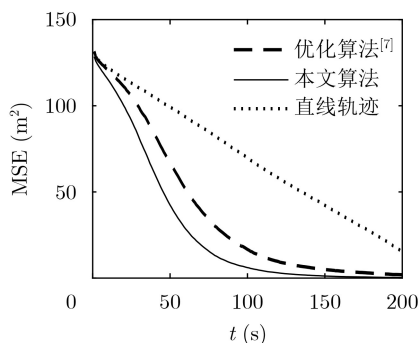


图6 不同算法下定位误差MSE

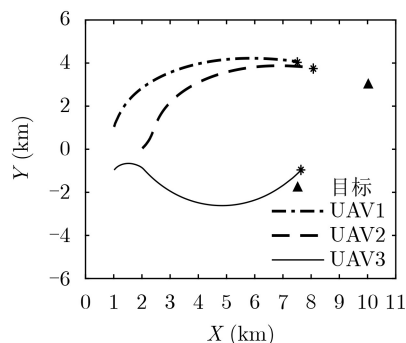


图8 不同测角精度传感器协同定位下UAV飞行航迹

标位置飞行, 未考虑传感器-目标的几何关系对目标定位性能的影响。本文算法和优化算法^[7]的路径优化策略下, 图4和图5中点线给出3个UAV与目标的几何分布构型, UAV之间夹角近似为 60° 和 0° , 通过优化自动实现角度分离以获得最佳传感器分布。

由图6可知, 本文算法性能最优, 优化算法^[7]次之, 两者均明显优于常规直线飞行轨迹策略。随着传感器与目标的距离接近, 量测噪声方差 σ_i^2 接近固定 σ_{i0}^2 , 本文算法和优化算法^[7]定位性能接近。

图7给出不同传感器个数下定位误差MSE比较曲线, 随着传感器个数的增加目标定位误差MSE减小。对多个同类传感器组网, 增加传感器个数有望提升目标定位精度。

最后, 研究不同精度测角传感器AOA协同定位下路径优化性能。考虑不同精度的测角传感器, UAV1, UAV2和UAV3上部署的测角传感器在参考距离下的量测方差 σ_{i0}^2 分别为 1° , 0.8° 和 0.1° 。图8给出不同量测精度下AOA协同定位UAV下飞行航迹。将其余相同精度(σ_{i0}^2 均为 1°)测角传感器AOA协同定位下UAV飞行轨迹(见图5)比较, 传感器测角精度影响最佳传感器位置分布。

6 结束语

本文研究距离相关噪声AOA协同定位下UAV路径优化问题。首先针对AOA量测噪声方差随距

离变化的特性, 设计了一种ML-VUKF估计算法对目标定位。其次, 基于GCRLB的迹最小指标分别分析了无约束和距离/角度约束条件下无人机和目标最优几何分布构型。最后, 考虑UAV运行中实际约束建立UAV路径规划模型, 并采用基于罚函数和LM算法优化求解。通过定位算法的改进和UAV路径优化, 提高距离相关噪声AOA协同定位性能。理论分析和仿真结果显示:

(1) 给出了角度和距离约束下最优传感器位置分布: 传感器和目标的最优距离为允许的最短距离 r_{\min} ; 当角度约束 $\theta_{\max} - \theta_{\min} \geq \pi/M$ 时, M 个传感器的最优交会角为 $\pi/2$; 若 $\theta_{\max} - \theta_{\min} < \pi/M$, 则采用迭代下降搜索算法在区间 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 进行梯度下降搜索找到传感器最优位置数值解。

(2) 基于GCRLB迹最小化指标UAV路径优化策略下AOA定位性能优于基于CRLB迹最小化指标下路径优化算法^[7]。传感器与目标的距离越近, 量测噪声方差接近固定值, 两者算法定位性能接近。传感器的个数增加可以提高AOA定位精度。

本文提出基于GCRLB的UAV路径优化问题为单步决策。考虑当前决策对长期定位性能的影响, 开展基于GCRLB的多步决策下路径优化问题是下一步需要研究的工作。

参考文献

- [1] LOIZOU S G and KUMAR V. Biologically inspired bearing-

- only navigation and tracking[C]. The 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, USA, 2007: 1386–1391. doi: [10.1109/CDC.2007.4435005](https://doi.org/10.1109/CDC.2007.4435005).
- [2] GAVISH M and WEISS A J. Performance analysis of bearing-only target location algorithms[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(3): 817–828. doi: [10.1109/7.256302](https://doi.org/10.1109/7.256302).
- [3] WANG Yue and HO K C. An asymptotically efficient estimator in closed-form for 3-D AOA localization using a sensor network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(12): 6524–6535. doi: [10.1109/TWC.2015.2456057](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2456057).
- [4] NGUYEN N H and DOĞANÇAY K. Improved pseudolinear Kalman filter algorithms for bearings-only target tracking[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(23): 6119–6134. doi: [10.1109/TSP.2017.2749207](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2749207).
- [5] JAWAHAR A and RAO S K. Modified polar extended Kalman filter (MP-EKF) for bearings-only target tracking[J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, 9(26): 1–5. doi: [10.17485/ijst/2016/v9i26/90307](https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i26/90307).
- [6] BISHOP A N, FIDAN B, ANDERSON B D O, *et al.* Optimality analysis of sensor-target localization geometries[J]. *Automatica*, 2010, 46(3): 479–492. doi: [10.1016/j.automatica.2009.12.003](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.12.003).
- [7] DOGANÇAY K. UAV Path planning for passive emitter localization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 1150–1166. doi: [10.1109/taes.2012.6178054](https://doi.org/10.1109/taes.2012.6178054).
- [8] MORENO-SALINAS D, PASCOAL A, and ARANDA J. Sensor networks for optimal target localization with bearings-only measurements in constrained three-dimensional scenarios[J]. *Sensors*, 2013, 13(8): 10386–10417. doi: [10.3390/s130810386](https://doi.org/10.3390/s130810386).
- [9] HERNANDEZ M. Optimal sensor trajectories in bearings-only tracking[C]. The 7th International Conference on Information Fusion (FUSION 2004), Stockholm, Sweden, 2004: 893–900.
- [10] XU Sheng and DOĞANÇAY K. Optimal sensor placement for 3-D angle-of-arrival target localization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1196–1211. doi: [10.1109/TAES.2017.2667999](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2667999).
- [11] RAO S S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*[M]. 4th ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2009. doi: [10.1002/9780470549124](https://doi.org/10.1002/9780470549124).
- [12] CORBETS J B and LANGELAAN J W. Parameterized trajectories for target localization using small and micro unmanned aerial vehicles[C]. 2008 American Control Conference, Seattle, USA, 2008: 672–677.
- [13] DOGANÇAY K. Online optimization of receiver trajectories for scan-based emitter localization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 1117–1125. doi: [10.1109/TAES.2007.4383601](https://doi.org/10.1109/TAES.2007.4383601).
- [14] VAN TREES H L. *Detection, Estimation, and Modulation Theory: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory*[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2001. doi: [10.1002/0471221082](https://doi.org/10.1002/0471221082).
- [15] CASSIOLI D, WIN M Z, and MOLISCH A F. The ultra-wide bandwidth indoor channel: From statistical model to simulations[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(6): 1247–1257. doi: [10.1109/jsac.2002.801228](https://doi.org/10.1109/jsac.2002.801228).
- [16] 朱子尧, 韩树平, 郭正东, 等. 乘性噪声背景下基于非线性渐消滤波的单信标测距定位算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(1): 165–171. doi: [10.11999/JEIT180239](https://doi.org/10.11999/JEIT180239).
ZHU Ziyao, HAN Shuping, GUO Zhengdong, *et al.* Single beacon location algorithm based on nonlinear fading filter under multiplicative noise background[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 165–171. doi: [10.11999/JEIT180239](https://doi.org/10.11999/JEIT180239).
- [17] HAMDOLLAHZADEH M, AMIRI R, and BEHNIA F. Optimal sensor placement for multi-source AOA localisation with distance-dependent noise model[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(6): 881–891. doi: [10.1049/iet-rsn.2018.5426](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5426).
- [18] WANG Weijia, BAI Peng, ZHOU Yu, *et al.* Optimal configuration analysis of AOA localization and optimal heading angles generation method for UAV swarms[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 70117–70129. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2918299](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2918299).
- [19] CHEN Liang. A modified Levenberg–Marquardt method with line search for nonlinear equations[J]. *Computational Optimization and Applications*, 2016, 65(5): 753–779. doi: [10.1007/s10589-016-9852-y](https://doi.org/10.1007/s10589-016-9852-y).
- 左 燕: 女, 1980年生, 副教授, 研究方向为无源定位、目标跟踪、传感器管理。
刘雪娇: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为无源定位、目标跟踪、传感器管理。
彭冬亮: 男, 1977年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为目标跟踪、智能信息处理和信息融合。

责任编辑: 陈 倩