

无人集群组网系统相对定位技术研究

李晨辉^{1,2}, 闫朝星², 付林罡², 崔学荣¹

(1 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580;

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 针对大规模无人集群在卫星导航拒止环境下的相对定位需求, 研究一种基于无人集群自组网数据链测距的相对定位技术, 通过集群组网测距信息构建广义距离平方阵, 经过双中心处理化和特征值分解后即得到相对定位结果, 最后通过仿真评估了该方法在不同测距误差和不同集群规模下的定位精度。结果表明: 测距误差是影响定位性能的最主要误差来源, 当节点数大于 30 时定位误差受节点个数影响较小。

关键词: 无人集群; 自组网数据链; 机间测距; 相对定位

中图分类号: TN925; V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)04-0016-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230302001

引用格式: 李晨辉, 闫朝星, 付林罡, 等. 无人集群组网系统相对定位技术研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(4): 16–22.

Study on relative positioning method for UAV cluster system

LI Chenhui^{1,2}, YAN Chaoxing², FU Lingang², CUI Xuerong¹

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: In view of the relative positioning requirements of massive UAV cluster in the GNSS rejection environment, firstly, a relative positioning method is studied based on ranging in the UAV cluster Ad-hoc network. The generalized distance square matrix is constructed by the ranging information of the Ad-hoc network, and then the relative positioning results are obtained after the two-center processing and eigenvalue decomposition. Finally, the positioning accuracy of this proposed method under different ranging errors and UAVs quantity is evaluated by simulation. Results show that, the ranging error is the critical factor that affects the positioning performance. When the cluster is greater than 30 UAVs, the positioning error is relatively less affected by UAVs quantity.

Keywords: UAV cluster; Ad-hoc network; UAVs ranging; Relative positioning

Citation: LI Chenhui, YAN Chaoxing, FU Lingang, et al. Study on relative positioning method for UAV cluster system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(4): 16–22.

引 言

无人系统在民用与军用领域发挥着越来越重要的作用, 如执行大规模搜救行动、森林灭火, 以及军事协同侦察、协同作战、边界巡逻与领空防御等重要任务。但单架无人机执行任务的能力有限, 而集群无人机具有功能分布化、大范围态势感知、高任务完成率等优势^[1]。

无人机编队协同中导航定位技术一般包括集群系统内的相对定位和整个系统的绝对定位。相对定位是指无人机之间的相对位姿或相对位置关

系, 是集群系统能够正常运行的基础, 也是无人机间协同的关键元素; 绝对定位是指无人机在全球地理坐标系中的位置信息, 是无人机能够准确执行任务的重要条件^[2]。

针对复杂对抗环境下无人集群的相对定位需求, 本文研究一种基于无人集群组网系统机间测距的相对定位方法, 并采用粒子群算法提高坐标转换的精度, 最后仿真验证该方法的定位性能。

1 无人集群系统定位技术

无人集群导航、定位和授时主要通过全球导

航卫星系统(GNSS)实现,包括GPS、北斗、Glonass和Galileo等。美军在1997年首次提出“导航战”概念,随后又陆续启动定位、导航与授时微技术(Micro-PNT)、自适应导航系统(ANS)、对抗环境下的空间、时间和方位信息(STOIC)和拒止环境协同作战(CODE)等研究项目,旨在提升不依赖卫星的导航能力^[2]。

在GNSS信号被干扰受限甚至拒止的环境下,无人集群会失去定位信息,尤其是在复杂对抗作战环境中,因此无人集群相对定位和协同导航是有效发挥空基无人网络战斗力的关键。目前国内外主要研究的无人机相对和协同定位技术主要分为以下几种类型。

① 多传感器数据融合定位^[3]。通过在集群编队中每架无人机上搭载多个或多种传感器,如相机摄像头、测距测角传感器、气压传感器、里程计等,以实现多种类型的数据融合进行相对和协同定位,但此方式会降低无人机作战应用的灵活性。

② 卫星组合导航。通过GNSS和惯导、里程计等其他数据源进行组合导航^[4],正常环境下定位精度较高,但在对抗环境下,GNSS接收定位信号较差,导致组合导航效果不理想。

③ 中心锚节点定位、采用有中心的方式,如长僚机模式^[5]、Link-16相对定位^[6]和地面锚节点方式,此方法依赖中心节点,当中心锚节点被毁后无法执行作战任务。

④ 组网测距定位。利用组网数据链测距和惯导进行数据融合^[7],这种方式通过数据链测距、惯导解算数据融合实现定位,尚未工程应用于无人集群相对定位。

多维标度技术(Multi-dimensional Scaling, MDS)作为一种无线传感器网络定位算法,得到广泛研究。文献[8]的加权MDS算法突出最准确的测距值,但不能保证收敛速度和定位时间;文献[9]的扩展MDS算法能同时定位多个目标,但需要测量节点间相对角度;文献[10]研究已知节点间距离和目标点相对速度的定位网络MDS技术,需要传感器获取节点速度信息。多维标度技术可与不同的定位技术结合应用,本文研究无人集群中基于组网测距的多维标度方法定位技术。

2 集群空间MDS定位与坐标转换

2.1 相对定位MDS原理分析

MDS技术将多维数据的关系表示成几何图形,利用网络节点间的连通性或距离信息等约束性条件进行优化求解^[11],适于组网集群内较少锚节点时的节点间定位。

MDS方法中,对象之间的关系以相似性或相异性表示,算法输入为节点数据之间的关系,输出为对应节点在二维或三维空间的分布位置。节点间距离远近体现相似程度的高低^[12]。下面简述MDS算法原理:

① 首先构建无人集群系统的广义距离平方矩阵 D^2 。

设2维空间的第*i*个节点坐标 $X_i = (x_{i1}, x_{i2})$, $i = 1, \dots, N$,节点*i*、*j*间的欧氏距离为

$$d_{ij}^2 = (X_i - X_j)^T (X_i - X_j) = X_j^T X_j + X_i^T X_i - 2X_j^T X_i \quad (1)$$

矩阵 B 表示节点坐标的内积 $B = [b_{ij}]_{N \times N} = X_i^T X_j$ 。

为了避免坐标转换导致解的二义性,多维标度技术将集群中所有节点坐标的广义形心作为相对坐标矩阵的原点。

② 对距离平方阵 D^2 进行双中心化处理,得到内积矩阵 $B = -\frac{1}{2} H D^2 H$ 。

节点坐标内积的数学级数可表示为

$$b_{ij} = X_i^T X_j = -\frac{1}{2} \left(d_{ij}^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{ij}^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_{ij}^2 + \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij}^2 \right) \quad (2)$$

$$= a_{ij} - a_{i*} - a_{*j} + a_{**}$$

其中,定义

$$a_{i*} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_{ij}, a_{*j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{ij}, a_{**} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (3)$$

定义矩阵 $A = [a_{ij}]_{N \times N}$,则 B 可以表示为 $B = HAH$,式中 H 表示中心化矩阵, E 表示 N 阶单位矩阵,则

$$H = E - \frac{1}{N} H^T \quad (4)$$

③ 对内积矩阵 B 进行特征分解得到2个特征值和特征向量,对应二维坐标。

矩阵 B 可以表示为 $B = XX^T$,式中矩阵 $X = [X_1, \dots, X_N]^T$ 是 N 个二维坐标矩阵。此时 $r(B) = 2$ 。

因为矩阵 B 是对称、半正定、秩为2的矩阵,所以 B 存在2个非零特征值和 $N-2$ 个零特征值。对 B 做特征分解如下:

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \mathbf{V}\mathbf{A}\mathbf{V}^T \\ \mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2) \\ \mathbf{V} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2] \end{cases} \quad (5)$$

\mathbf{A} 是矩阵 \mathbf{B} 的特征值构成的对角矩阵。 \mathbf{V} 是特征值对应的特征向量构成的单位正交矩阵, \mathbf{e} 是特征值对应的特征向量。

④ 根据 $\mathbf{X} = \mathbf{V}\mathbf{A}^{1/2}$ 得到每个目标的相对位置。

因为 $\mathbf{B} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$, 则坐标矩阵 \mathbf{X} 可以表示成 $\mathbf{X} = \mathbf{V}\mathbf{A}^{1/2}$, 式中 $\mathbf{A}^{1/2} = \text{diag}(\lambda_1^{1/2}, \lambda_2^{1/2})$ 。到此就得到了所有节点的相对坐标 \mathbf{X} 。

上述算法原理可扩展到三维或多维空间内。对 \mathbf{X} 进行正交变换, 结果仍然满足式 $\mathbf{X} = \mathbf{V}\mathbf{A}^{1/2}$ 的要求, 因此 \mathbf{X} 的解不唯一, 这是因为机间距离只反映集群的相对分布, 对 \mathbf{X} 进行坐标平移、旋转和镜像变换后, 相对分布不会变化。需要采用坐标转换算法将相对坐标转换为绝对坐标来分析 MDS 技术的无人集群定位性能。

2.2 基于锚节点的空间坐标转换

当集群内有可以获取绝对坐标的锚节点时, 且锚节点数量仅需满足二维空间内至少 3 个, 三维空间内至少 4 个时, 在求解空间内可利用锚节点信息进行坐标转换, 对相对分布进行求解空间内的旋转、镜像、平移, 即实现相对坐标与绝对坐标的配准。下面分析坐标转换方法。

设在二维空间内的节点相对位置坐标表示为 $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{2 \times N} = (\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N)$, $\mathbf{T} = [t_{ij}]_{2 \times N} = (\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_N)$ 表示绝对位置坐标, 并假设锚节点坐标为 \mathbf{T}_1 、 \mathbf{T}_2 、 \mathbf{T}_3 。

① 若坐标 \mathbf{R}_i 平移到坐标 \mathbf{R}_i^1 , 则 $\mathbf{R}_i^1 = \mathbf{R}_i + \mathbf{Y}$, 式中 \mathbf{Y} 表示平移变量。

② 若坐标 \mathbf{R}_i 逆时针旋转 α 角度旋转到坐标 \mathbf{R}_i^2 , 则 $\mathbf{R}_i^2 = \mathbf{Q}_1 \mathbf{R}_i$, \mathbf{Q}_1 表示旋转变量。

③ 若坐标 \mathbf{R}_i 镜像对称到坐标 \mathbf{R}_i^3 , 则 $\mathbf{R}_i^3 = \mathbf{Q}_2 \mathbf{R}_i$, 式中 \mathbf{Q}_2 表示镜像变量。

其中, 旋转变量、镜像变量表示为

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \sin(\beta) & -\cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

应用锚节点坐标 $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3$ 来计算未知节点坐标 $\mathbf{T}_4, \mathbf{T}_5, \dots, \mathbf{T}_N$ 。依据上述变换:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1, \mathbf{T}_3 - \mathbf{T}_1) = \\ & \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 (\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_3 - \mathbf{R}_1) \end{aligned} \quad (7)$$

利用已知的 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3$ 坐标信息, 可

计算出 \mathbf{Q} , 即

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 = \frac{(\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1, \mathbf{T}_3 - \mathbf{T}_1)}{(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_3 - \mathbf{R}_1)} \quad (8)$$

用最小二乘法求解可得到坐标转换变量 \mathbf{Q} 。

由 $(\mathbf{T}_4 - \mathbf{T}_1, \mathbf{T}_5 - \mathbf{T}_1, \dots, \mathbf{T}_N - \mathbf{T}_1) = \mathbf{Q}(\mathbf{R}_4 - \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_5 - \mathbf{R}_1, \dots, \mathbf{R}_N - \mathbf{R}_1)$ 可进一步得到其他未知节点的绝对坐标:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{T}_4, \mathbf{T}_5, \dots, \mathbf{T}_N) = \\ & \mathbf{Q}(\mathbf{R}_4 - \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_5 - \mathbf{R}_1, \dots, \mathbf{R}_N - \mathbf{R}_1) + (\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_1, \dots, \mathbf{T}_1) \end{aligned} \quad (9)$$

3 基于组网测距的集群定位方法

无人集群网络拓扑一般分为集中式和分布式两类。本文研究的无人机集群以分布式无中心拓扑实现全对等组网, 通过获取与集群内其他无人机节点的测距值, 并通过机间数据链协同分享。该集群中任一无人机被损毁后不会直接影响到整个集群的正常任务执行。集群机型为小型固定翼无人机, 在集群起飞、空中集结飞往任务区, 其中需要搭载 GNSS 接收机、光纤惯性导航系统和组网数据链终端, 在复杂对抗环境中进行协同相对定位时, 仅少部分无人机可依靠 GNSS 接收机接收绝对位置信息, 实现地球坐标系内的绝对定位; 其他大部分无人机仅依靠机间组网测距来实现相对定位, 再借助锚节点通过坐标转换进行绝对定位, 获取经纬度。

下面设计无人集群组网系统中基于 MDS 算法的相对定位方法。

如图 1 所示, 提出一种基于无人集群组网系统机间测距的相对定位方法, 可获取无人机绝对位置, 保障无人集群编队的正常任务队形。具体流程如下:

① 假设无人集群中共有 N 架无人机, 第 i 、 j 架无人机之间的欧式距离为 d_{ij} 。机载组网终端通过测距得到机间欧氏距离矩阵:

$$\mathbf{D} = [d_{ij}]_{N \times N} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \cdots & d_{NN} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $d_{ij} = d_{ji}$ 且 $d_{ij} = 0$, 故欧式距离矩阵 \mathbf{D} 为对称矩阵。

② 第 i 架无人机与第 j 架无人机之间的测距值

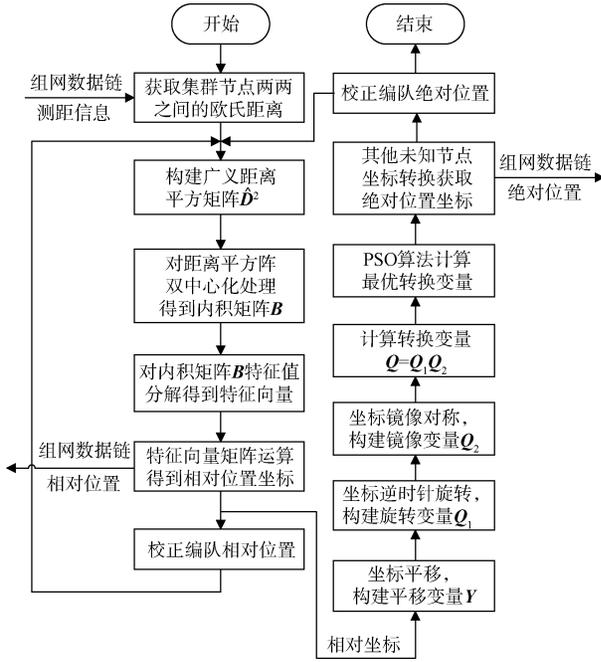


图1 无人集群系统相对定位工作方法

Fig. 1 Relative positioning method for UAV cluster system

\hat{d}_{ij} 表示为 $\hat{d}_{ij} = d_{ij} + \varepsilon_{ij}$, 测距误差 $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_d^2)$ 服从均值为0、方差为 σ_d^2 的高斯分布。集群完成测距并协同共享后, 由接收到的伪距构建距离矩阵 \hat{D} , 并得到广义距离平方矩阵 \hat{D}^2 , 为后续MDS算法做初始输入。

③ 计算中心化矩阵 H 与内积矩阵 \hat{B} , 并在二维空间取最大的两个特征值 λ_1 、 λ_2 和其对应的特征向量 e_1 、 e_2 , 最后得出所有无人机的相对位置坐标。

假设集群中共有 $L \leq N$ 架无人机有锚节点信息, 利用锚节点对相对坐标进行坐标转换。

在二维空间, $L \geq 3$; 三维空间, $L \geq 4$ 。由坐标转换可得到集群内所有无人机的绝对坐标。

在二维空间内, 构造坐标转换模型:

$$\begin{cases} (T_1 - T_1, T_2 - T_1, \dots, T_L - T_1) = Q_1 Q_2 (R_1 - R_1, \\ R_2 - R_1, \dots, R_L - R_1) \\ (T_{N-L+1}, T_{N-L+2}, \dots, T_N) = Q_1 Q_2 (R_{N-L+1} - R_1, \\ R_{N-L+2} - R_1, \dots, R_N - R_1) + (T_1, T_1, \dots, T_1) \end{cases} \quad (11)$$

由于最小二乘法求解时坐标转换精度较低, 且转换速率较长, 为了快速得到精度较高的坐标转换参数, 设计采用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)迭代获取 α 和 β 两个坐标转换参数:

$$F(\alpha, \beta) = \sum_{j=1}^L [(\hat{t}_{1j} - t_{1j})^2 - (\hat{t}_{2j} - t_{2j})^2] \quad (12)$$

为了充分利用无人集群中的锚节点, 粒子群优化算法使用上式所示适应度函数 $F(\alpha, \beta)$ 来表示锚节点转换前后距离差的平方和, 以此来衡量坐标转换前后的匹配程度。式中 L 为锚节点个数, α 、 β 分别为 Q_1 、 Q_2 中的角度变量, 求解范围为 $[-\pi, \pi]$, $T = [t_{ij}]_{2 \times L}$ 为真实锚节点坐标, $\hat{T} = [\hat{t}_{ij}]_{2 \times L}$ 为由式(11)坐标转换解算出的锚节点坐标, 当 $F(\alpha, \beta)$ 为最小值时, 此时的 α 、 β 值即为所求最优转换参数, 解得 Q 后代入式(11)即可求得全部无人机节点的绝对坐标。下文将结合应用场景设置相应参数, 对上述设计方法进行仿真验证。

4 仿真验证与分析

下面基于自组网高精度测距方法^[13], 分析研究多维标度MDS相对定位算法在常见随机分布下的可靠性和准确性。

定位系统的评价指标可采用平均绝对误差和标准差的组合, 一般用被定位的 $k \leq N$ 个节点坐标的绝对距离误差的均值表示平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE), 表达整个集群的定位性能和离散程度:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^k \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}}{k} \quad (13)$$

还可使用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来衡量观测值与真实值之间的偏差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \left(\sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2} \right)^2}{k}} \quad (14)$$

4.1 基于MDS算法的相对定位仿真

仿真中设无人集群编队内128个节点有3个锚节点、125个卫星导航拒止节点, 通信分布范围为20 km×20 km, 节点在方形区域随机分布, 设测距误差 $D_{3\sigma} = 0.1$ m。下图中星号“*”节点表示锚节点, 圆形“o”节点表示普通节点, 设集群节点间相隔20 m以上。采用上文提出的无人集群系统相对定位方法进行仿真, 节点1、节点2为锚节点, 节点3、节点4、节点5为普通待定位节点。为了显示节点的关系分布, 仿真时邻居关系图为链路作用范围为6 km时的节点连接关系, 节点分布图为所有节点的真实分布, 相对分布图为真实节点

分布的相对位置; 绝对分布图为由相对位置分布经过坐标转换得到的绝对位置分布。

由图2和图3所示, 对于由节点1、节点2、节点3构成的集群网络拓扑, 相对定位结果和真实分布的拓扑结构非常相似。定量验证相对定位方法的平均定位误差 $MAE \approx 0.015 \text{ m}$, 可见所提出方法可利用机间测距值对集群进行相对定位, 且少量锚节点可实现精度较高的定位。

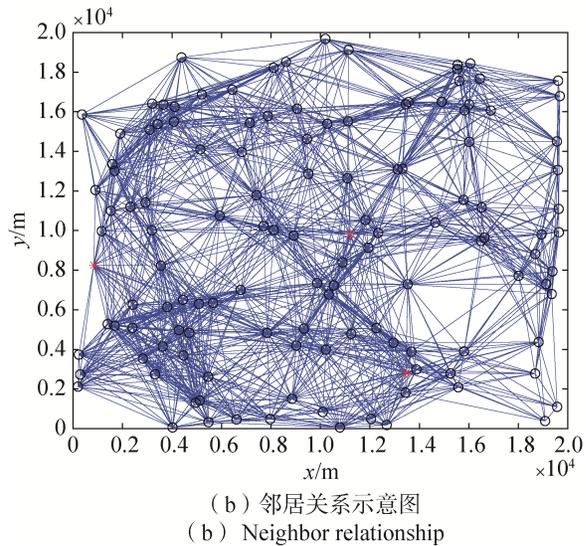
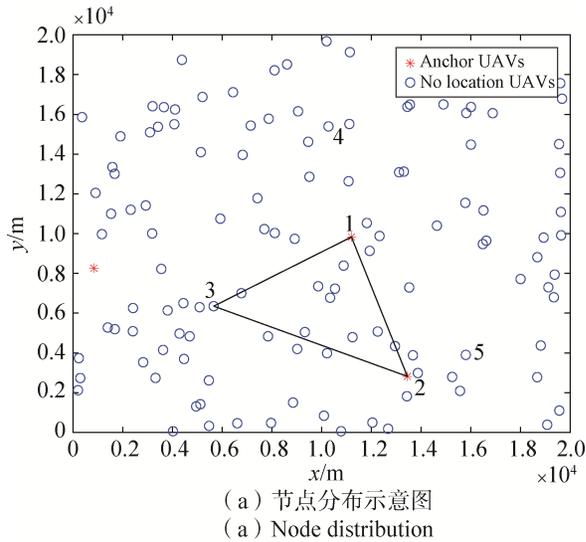


图2 仿真系统设置节点分布与邻居关系
Fig. 2 Node distribution and neighbor relationship diagram in simulation

4.2 测距误差对定位性能的影响

下面考察机间测距误差对定位算法性能的影响。无人集群内每个节点获得 $n-1$ 个测距值, 无人集群系统共有 $n(n-1)/2$ 个测距值, 设集群节点数

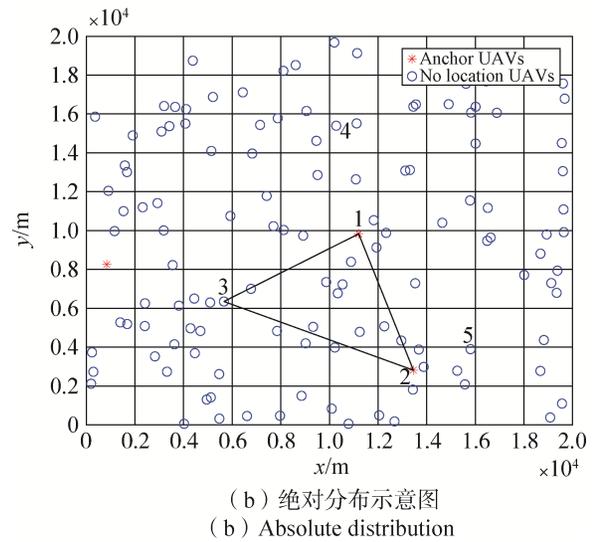
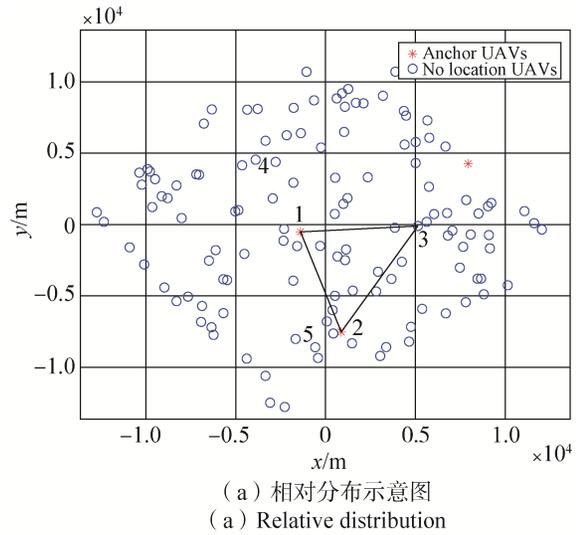
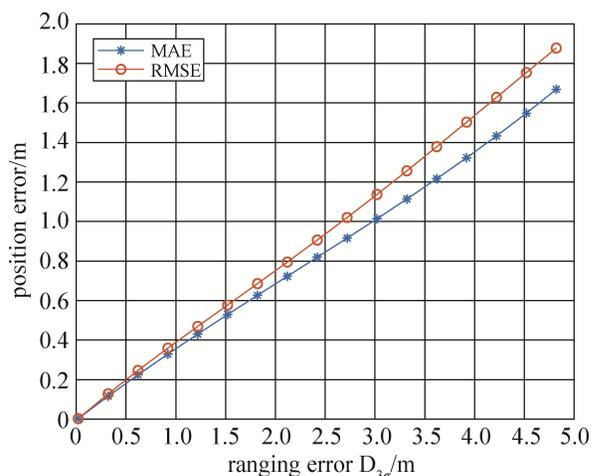


图3 随机分布仿真的相对分布与绝对分布
Fig. 3 Relative and absolute results in random distribution simulation

量为 $N=16$, 无人机节点随机分布范围为 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$, 锚节点数目为 $L=3$ 个, 设测距误差 $D_{3\sigma}$ 为 $0.02 \text{ m} \sim 5 \text{ m}$, 仿真 1 000 次的统计结果如图 4 所示。当锚节点理论上数量最少为 3 个时, 随着测距误差 $D_{3\sigma}$ 增大, MDS 算法定位误差也逐渐增大; 当测距误差 $D_{3\sigma}=0.02 \text{ m}$ 时, 相对定位的均方根误差 $RMSE \approx 0.009 \text{ m}$, 平均绝对误差 $MAE \approx 0.008 \text{ m}$, 每个无人机节点定位误差的标准差较小。当测距误差 $D_{3\sigma}=5 \text{ m}$ 时, 均方根误差 $RMSE \approx 1.947 \text{ m}$, 同时平均绝对误差 $MAE \approx 1.743 \text{ m}$ 。可见, 测距误差是影响定位性能的最主要误差来源, 是 MDS 算法利用节点间距离还原无人集群整个拓扑结构的主要数据来源, 工程应用中应尽量减小测距误差。

图4 测距误差 $D_{3\sigma}$ 与定位误差关系图Fig. 4 Relationship between $D_{3\sigma}$ and positioning error

4.3 无人机节点个数对定位性能的影响

在上述仿真条件的基础上,研究集群节点数 N 对定位算法性能的影响,设置锚节点数目为 $L=3$ 个,无人机节点个数范围 N 为 16~128,测距误差 $D_{3\sigma}=0.1$ m,结果如图5所示,随着节点个数 N 的增大,MDS算法定位误差逐渐减小;当 $N \leq 30$ 时,定位误差受节点个数影响较大: $N=16$ 时的 $MAE \approx 0.061$ m, $RMSE \approx 0.066$ m;当 $N > 30$ 时,定位误差受节点个数影响较小,且定位性能较好: $N=128$ 时的 $MAE \approx 0.014$ m, $RMSE \approx 0.015$ m。因此应当适当保持集群节点数量以保证相对定位性能。

此外,在高动态速度飞行过程中,无人机节点在 t_1 时刻在位置 p_1 接收到机间所有测距值,经过

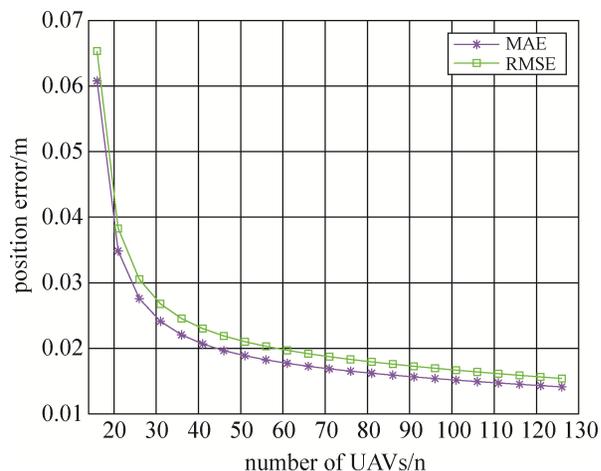


图5 无人机架数与定位误差关系图

Fig. 5 Relationship between UAVs number and positioning error

Δt 后获取最终的绝对定位结果,而此时无人机的位置到达 p_2 ,则 $t_1 + \Delta t$ 时刻的定位结果为 p_1 ;因此飞行速度对定位性能的影响作为系统误差可以通过惯导与测速等手段进一步补偿测距误差,从而降低对相对定位性能的影响。本文参考实际设备设置仿真参数来模拟实际飞行状态,验证相对定位方法的准确性、定位性能和影响因素,用于指导组网相对定位的工程实现,机载系统的定位还需要组合导航与多源数据融合导航来实现。

5 结束语

本文在研究无人集群定位系统里的多维标度技术和坐标转换原理的基础上,提出一种基于集群组网测距的MDS相对定位方法,并通过仿真验证了无人机在随机分布下MDS算法在测距误差和集群节点数量变化时的定位性能。结果表明,该方法能够在复杂干扰环境下,利用少量锚节点信息获得无人集群内较高精度的定位信息。

参考文献

- [1] 翟中英, 闫朝星. 无人机测控通信自组网技术综述[J]. 遥测遥控. 2018, 39(4): 66-74.
ZHAI Zhongying, YAN Chaoxing. A survey on UAV TT&C Ad Hoc networking techniques[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command. 2018, 39(4): 66-74.
- [2] 武成锋, 程进, 郭晓云, 等. 飞行器集群协同定位与导航对抗技术发展及展望[J]. 宇航学报, 2022, 43(2): 131-42.
WU Chengfeng, CHENG Jin, GUO Xiaoyun, et al. Development and prospect of aircraft clusters cooperative positioning and navigation countermeasures technology[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(2): 131-42.
- [3] 窦凌飞. 基于多传感器融合的无人机群作战协同导航算法研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.
- [4] 王慧哲. 基于多信息融合的无人机全源导航关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [5] 杜君南, 王融, 熊智, 等. 集群飞行器分层式结构协同导航方法研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(5): 6-10.
DU Junnan, WANG Rong, XIONG Zhi, et al. Research on cooperative navigation of aircraft swarm with hierarchical structure[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5): 6-10.
- [6] 周坤芳, 蒋云. JTIDS相对导航定位原理及其定位误差

- 研究[J]. 现代导航, 2013, 4(2): 94-97,93.
- ZHOU Kunfang, JIANG Yun. Research on principle and error of relative navigation positioning[J]. Modern Navigation, 2013, 4(2): 94-97,93.
- [7] 郝菁. 基于惯导/数据链协同的无人机集群导航定位算法研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2019.
- [8] COSTA J A, PATWARI N, HERO A O. Distributed weighted-multidimensional scaling for node localization in sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2006, 2(1): 39-64.
- [9] ABREU G D, DESTINO G. Super MDS: Source location from distance and angle information[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2007.
- [10] KUMAR S, KUMAR R, RAJAWAT K. Cooperative localization of mobile networks via velocity-assisted multidimensional scaling[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(7): 1744-58.
- [11] JAWORSKA N, CHUPETLOVSKA-ANASTASOVA A. A review of multidimensional scaling (MDS) and its utility in various psychological domains[J]. Tutorials in Quantitative Methods for Psychology, 2009, 5(1): 1-10.
- [12] BORG I, GROENEN P J F. Modern multidimensional scaling: Theory and applications[J]. Journal of Educational Measurement, 2010, 40(3): 277-280.
- [13] PAN Xi, YAN Chaoxing, ZHANG Jiankang. Joint range estimation using single carrier burst signals for networked UAVs[J]. IEEE Access, 2021,9:42533-42542.
- [作者简介]
- 李晨辉 1996年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无人集群定位技术。
- 闫朝星 1985年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为航天信息网络。
- 付林罡 1982年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为航天测控通信系统。
- 崔学荣 1979年生, 博士, 教授, 主要研究方向为水面/水下跨域通信及组网。
- (本文编辑: 杨秀丽)