

引用格式:孙顺,熊伟,刘瑜,等.基于TDOA的多机协同闭环最优控制方法[J].电光与控制,2019,26(3):1-7. SUN S, XIONG W, LIU Y, et al. A TDOA based closed-loop optimal control method for multiple UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(3):1-7.

基于TDOA的多机协同闭环最优控制方法

孙顺, 熊伟, 刘瑜, 董凯

(海军航空大学信息融合研究所, 山东烟台 264001)

摘要: 为了提高多机协同跟踪时差无源定位的精度,在分析最优布站方式的基础上提出一种闭环最优控制方法。首先,推导几何精度因子表达式,然后在无人机性能、通信距离和安全距离的约束下,通过仿真分析不同布站方式对几何精度因子的影响,归纳总结3点结论,从而提出针对单目标的最优布站方式,最终结合扩展信息滤波算法和2维分配模型,利用闭环最优控制方法解决TDOA定位体制下多机协同跟踪问题。仿真结果表明,所提方法能够使各观测站按照最优布站位置对目标进行协同定位跟踪,有效提高目标定位精度,证明了方法的有效性。

关键词: 无源定位; 时差; 闭环控制; 布站

中图分类号: TN958.97 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.001

A TDOA Based Closed-Loop Optimal Control Method for Multiple UAVs

SUN Shun, XIONG Wei, LIU Yu, DONG Kai

(Institute of Information Fusion, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: To improve the accuracy of passive localization of multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in collaborative tracking, a closed-loop optimal control method is proposed based on analysis of the optimal station arrangement modes and Time Differences of Arrival (TDOA) measurements. First, the expression of Geometrical Dilution of Precision (GDOP) is derived. Then, simulation analysis is made to the influence of different observation station arrangement modes on GDOP under the constraints of UAV characteristics, communication range and safe distance. Three conclusions are summarized, and the optimal arrangement for single target is proposed. Finally, based on Extended Information Filter (EIF) and two-dimensional distribution model, the closed-loop optimal control method is used to solve the collaborative tracking of multiple UAVs with TDOA measurements. Simulation results indicate that, through the proposed method, the observation stations can implement target tracking collaboratively according to the optimal station location, and the accuracy of target localization is improved.

Key words: passive localization; TDOA; closed-loop control; station arrangement

0 引言

无源定位技术已经成为信号处理领域的重要研究课题,并广泛应用于雷达^[1]、声呐^[2]、无线传感器网络^[3]等领域。时差(Time Differences of Arrival, TDOA)定位体制是多站无源定位中最常见的体制,具有稳定、高精度等优点。影响时差无源定位体制定位精度的因

素有很多:文献[4]分析了量测误差、站址误差和系统误差对三星时差定位系统性能的影响,对系统的标校有指导意义;文献[5]讨论了布站方式、基线长度对四站时差定位系统的影响,说明了不同布站方式的利弊,但没有得到普遍结论,不易扩展到更多站的情况;文献[6]讨论了四站定位系统中Y形布站时基线长度和指向对定位精度的影响,得到两点普遍的结论,但对其他布站方式的指导意义不大。

文献[7-12]对无人机控制方法进行了深入的研究。文献[7]基于滚动时域优化(Receding Horizon Optimization, RHO)方法对单个无人机的轨迹进行了优化,但仅考虑控制其航向,没有讨论速度控制方法;文献[8]

收稿日期:2018-02-06

修回日期:2018-05-11

基金项目:国家自然科学基金(61471379,61102166,91538201);国家自然科学基金面上项目(61671463)

作者简介:孙顺(1992-),男,山东济南人,博士生,研究方向为无源定位、信息融合技术。

利用混合整形线性规划(Mixed-Integer Linear Programming, MILP)讨论了对速度的控制方法;文献[9]将该方法进一步扩展到双机协同轨迹优化问题;文献[10]在考虑信息成功传递概率的情况下,利用分布式优化策略对多无人机多目标情况进行了讨论,但对于时差定位体制,时差量测之间具有相关性,需要对多机控制问题整体考虑,导致耗时较多;文献[11]利用闭环最优控制方法设计弹药轨迹,显著减少了计算量,并使性能趋于已知最优解,提供了较好的思路;文献[12]基于双机视线夹角为 90° 时估计精度最优这个结论,针对趋近和盘旋阶段提出了闭环最优控制方法,具有较好的实时性和有效性。

本文通过分析典型布站方式对时差定位系统性能的影响,得到最优布站方式,并基于此提出多机闭环最优控制方法。

1 问题描述

考虑4架无人机(UAV)利用时差量测,对目标被动定位跟踪时,不考虑高度影响,在二维平面内,设目标的状态向量为

$$\mathbf{X}_0 = (x_0 \quad \dot{x}_0 \quad y_0 \quad \dot{y}_0)^T. \quad (1)$$

假设目标做匀速直线运动,则目标状态方程为

$$\mathbf{X}_0(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}_0(k) + \mathbf{V}_0(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{F}(k) = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}(k)$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{V}_0(k)$ 为零均值、高斯白噪声序列,其协方差为 $\mathbf{Q}(k)$; T 为采样时间间隔。

设第 i 架无人机的状态向量为

$$\mathbf{X}_i = (x_i \quad \dot{x}_i \quad y_i \quad \dot{y}_i)^T \quad i=1,2,3,4. \quad (4)$$

假设各无人机通过控制协同对目标跟踪,忽略风速干扰,可对其状态方程建模为

$$\mathbf{X}_i(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}_i(k) + \mathbf{G}(k)\mathbf{u}_i(k) + \mathbf{V}_i(k) \quad (5)$$

$$\mathbf{G}(k) = \begin{pmatrix} T^2/2 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 & T \end{pmatrix}^T \quad (6)$$

式中: $\mathbf{G}(k)$ 为输入控制项矩阵; $\mathbf{u}_i(k) = (\ddot{x}_i \quad \ddot{y}_i)^T$ 为加速度输入控制量; $\mathbf{V}_i(k)$ 定义与 $\mathbf{V}_0(k)$ 相似。考虑到无人机的性能,做如下约束,即

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{\min} \leq \mathbf{v}_i \leq \mathbf{v}_{\max} \\ |\mathbf{u}_i| \leq \mathbf{a}_{\max} \\ |\dot{\varphi}_i| \leq \omega_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{v}_i = |(\dot{x}_i \quad \dot{y}_i)|$ 表示第 i 个无人机的速度; \mathbf{v}_{\min} 和

\mathbf{v}_{\max} 分别为无人机的最小速度和最大速度; $|\mathbf{u}_i|$ 为第 i 个无人机的加速度; $\dot{\varphi}_i$ 为第 i 个无人机的转向角速度, \mathbf{a}_{\max} 和 ω_{\max} 分别为无人机的最大加速度和最大转向角速度。

对目标协同跟踪时,还应考虑无人机自身安全和持续通信中继保持,即无人机与目标的距离应不小于安全距离,各无人机与距其最邻近的无人机的距离应不大于无人机中继网络通信范围,上述约束可表示为

$$\begin{cases} r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} & i, j = 0, 1, \dots, 4, i \neq j \\ r_{i0} \geq R_m & i = 1, 2, 3, 4 \\ \min_{i, i \neq j} (r_{ij}) \leq R_c & j = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (8)$$

式中: R_m 为安全距离,本文取目标对空导弹的最大有效射程,设为20 km; R_c 为无人机中继网络通信距离,本文设为5 km。

2 基于时差的几何精度因子分析

通常使用定位误差的几何精度因子(Geometrical Dilution of Precision, GDOP)描述不同参数环境下时差体制对目标定位的影响。GDOP计算方法主要有两种,一种是对量测方程求全微分,通过求解目标状态误差协方差得到GDOP;另一种是根据量测方程,求解克拉美罗下界(Cramér-Rao Lower Bound, CRLB),对其开方得到GDOP。CRLB表示无偏目标定位方法的最优精度,用其计算GDOP更具数学统计意义。

设无人机1为参考观测站,并将时差量测转为距离差量测,可得距离差量测方程为

$$z_{i1} = h_{i1}(s_0, s_1, s_i) = r_{i0} - r_{10} \quad i=2,3,4 \quad (9)$$

式中: $s_i = (x_i \quad y_i)^T (i=0,1,\dots,4)$ 表示位置矢量。考虑站址误差的情况下,对式(9)求雅可比可得

$$\nabla h_{i1}(s_0, s_1, s_i) = (\mathbf{H}_{i1} \quad \mathbf{G}_1 \quad \mathbf{G}_i) \quad (10)$$

式中,

$$\mathbf{H}_{i1} = \begin{pmatrix} \frac{x_0 - x_i}{r_{i0}} - \frac{x_0 - x_1}{r_{10}} & \frac{y_0 - y_i}{r_{i0}} - \frac{y_0 - y_1}{r_{10}} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{G}_1 = \begin{pmatrix} \frac{x_0 - x_1}{r_{10}} & \frac{y_0 - y_1}{r_{10}} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{G}_i = \begin{pmatrix} \frac{x_i - x_0}{r_{i0}} & \frac{y_i - y_0}{r_{i0}} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

定义 k 时刻量测集合

$$\mathbf{z} = (z_{21} \quad z_{31} \quad z_{41})^T = \mathbf{h}(s) \quad (14)$$

式中, $s = (s_0^T \quad s_1^T \quad \dots \quad s_4^T)^T$ 。可得对数似然函数为

$$\ln(p(\mathbf{z}|s)) = K - \frac{1}{2}[\mathbf{z} - \mathbf{h}(s)]^T \mathbf{R}^{-1}[\mathbf{z} - \mathbf{h}(s)] \quad (15)$$

式中: K 是与 s 无关的常数项; \mathbf{R} 为量测误差矩阵,假设各无人机观测站的量测误差相同,且服从零均值的高斯分布,则 $\mathbf{R} = \sigma^2(\mathbf{I}_3 + \mathbf{I}_3 \mathbf{I}_3^T)$, \mathbf{I}_3 为3阶单位矩阵, \mathbf{I}_3 表示

长度为3的全1列向量, σ^2 为量测噪声协方差。

待估参数 s 的 CRLB 为

$$C_{\text{CRLB}_s} = - \left(E \left(\left(\frac{\partial^2 \ln(z|s)}{\partial s \partial s^T} \right) \right) \right)^{-1} = \left((H G)^T R^{-1} (H G) + \text{diag}(\mathbf{0}_2, R_{st}^{-1}) \right)^{-1} \quad (16)$$

$$H = (H_{21}^T \ H_{31}^T \ H_{41}^T)^T \quad (17)$$

$$G = (G_1 I_3 \ \text{diag}(G_2, G_3, G_4)) \quad (18)$$

式中: $\text{diag}(\cdot)$ 表示分块对角矩阵; $\mathbf{0}_2$ 表示二阶全零矩阵; R_{st} 为站址误差协方差矩阵, 假设各无人机观测站误差独立同分布, 服从零均值的高斯分布, 则 $R_{st} = \sigma_{st}^2 I_8$, I_8 为 8 阶单位矩阵; σ_{st}^2 为在 x 或 y 轴方向上的站址误差协方差。

只关注其左上角 2×2 的与目标位置相关的部分, 可得关于目标位置 s_0 的 CRLB 为

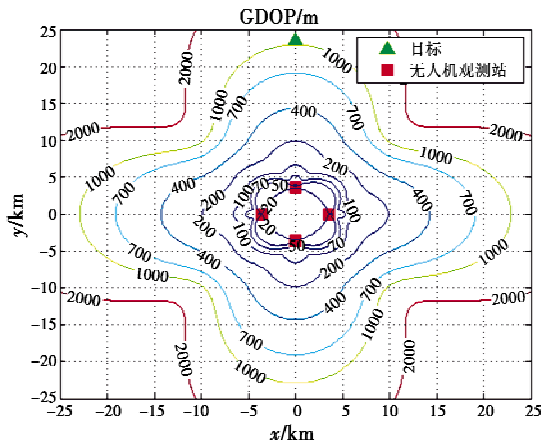
$$C_{\text{CRLB}_{s_0}} = C_{\text{CRLB}_s} (1:2, 1:2) \quad (19)$$

根据 GDOP 的定义, 可得

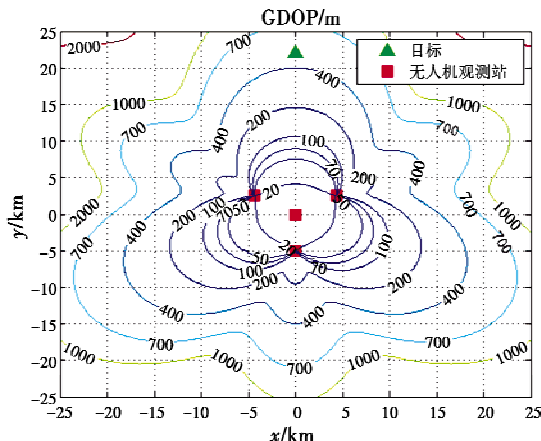
$$G_{\text{GDOP}} = \sqrt{\sigma_{x_0}^2 + \sigma_{y_0}^2} = \sqrt{\text{tr}(C_{\text{CRLB}_{s_0}})} \quad (20)$$

式中: $\text{tr}(C_{\text{CRLB}_{s_0}})$ 表示对矩阵 $C_{\text{CRLB}_{s_0}}$ 求迹。

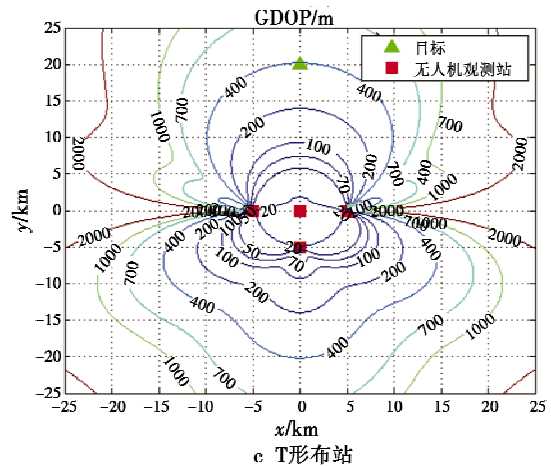
设 $\sigma_{st} = 10 \text{ m}$, $\sigma/c = 20 \text{ ns}$ ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) 表示电磁波传播速度。考虑 4 种布站情况: 方形、Y 形、T 形和一字形。站之间的基线距离相同, 设为最大中继通信距离 $R_c = 5 \text{ km}$, 仿真结果如图 1 所示。



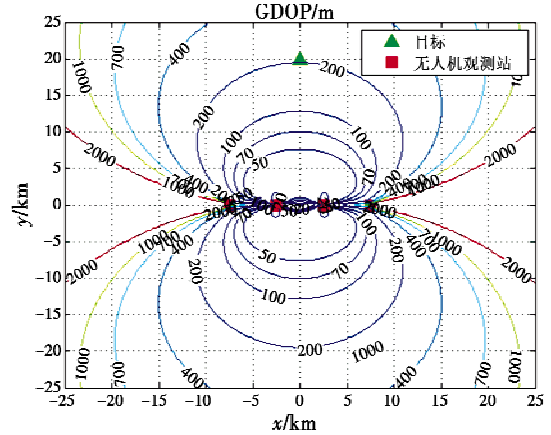
a 方形布站



b Y形布站



c T形布站



d 一字形布站

图 1 不同布站情况下的 GDOP 与目标最优位置

Fig. 1 GDOP diagram of different station distribution shapes and optimal target position

图中, “▲”表示满足安全距离约束时, 达到最小 GDOP 的最优目标位置。具体布站位置、目标位置及目标处的 GDOP 如表 1 所示。

表 1 不同布站情况下的目标最优 GDOP

Table 1 Optimal GDOP of target for different station distribution shapes

	布站类型			
	方形	Y形	T形	一字形
观测站 1/km	(0.0, 3.5)	(0.0, 0.0)	(0.0, 0.0)	(-7.5, 0.0)
观测站 2/km	(3.5, 0.0)	(0.0, -5.0)	(-5.0, 0.0)	(-2.5, 0.0)
观测站 3/km	(0.0, -3.5)	(-4.3, 2.5)	(5.0, 0.0)	(2.5, 0.0)
观测站 4/km	(-3.5, 0.0)	(4.3, 2.5)	(0.0, -5.0)	(7.5, 0.0)
目标最优位置/km	(0.0, 23.5)	(0.0, 22.0)	(0.0, 20.0)	(0.0, 19.8)
目标处 GDOP/m	1052.49	493.14	392.06	206.69

由图 1 可知, 方形和 Y 形布站对整个战场的 GDOP 分布较为均匀, 尤其是 Y 形布站基本没有 GDOP 高于 2000 m 的情况, 各方向目标都能得到较好的定位效果, 适用于在侦察初期、敌方目标位置未知时按照 Y 形布站队形对敌实施侦察。同时可发现在不考虑安全距离约束时, 方形和 Y 形布站对其形心处的定位精度最高。

T形和一字形布站对 y 轴上的目标定位精度较高,但在 x 轴上存在明显的定位模糊情况,导致定位性能大幅下降,其中,一字形对特定方向(y 轴)上的目标定位精度最高,适用于目标位置已知时,利用一字形布站提高对目标的定位性能。

通过以上仿真分析,可归纳总结出以下结论:

- 1) GDOP 在两站连线的中垂线上较小,越接近连线的中点越小,并在中点处达到极小值;
- 2) 两站的距离越远,该中垂线上的 GDOP 越小;
- 3) 多站定位时,以上结论通过叠加形成多站定位的 GDOP,由结论 2 可知距离较远的两站的中垂线易占据主导成分,形成 GDOP 图上的波谷。

方形布站时,距离较远的两站为对角站(站 1 和站 4,站 2 和站 3),其对应的中垂线类似于 X 形状, GDOP 图在该中垂线上形成波谷,并在这两条中垂线相交的地方形成极小值点。一字形布站时,距离最远的两站为站 1 和站 4,其中垂线位于 y 轴,且任意两站的中垂线均平行于 y 轴,并分布在其两侧,叠加后仍在 y 轴,于是该类型布站在上述 4 种布站类型中对 y 轴上的目标具有最好的定位精度。

基于以上分析和归纳的结论,在满足各个无人机观测站安全约束和中继通信约束的情况下,针对单目标的最优布站方式为弧形布站,具体参数如图 2 所示。其中虚线表示以目标为圆心、 R_m 为半径的圆弧。

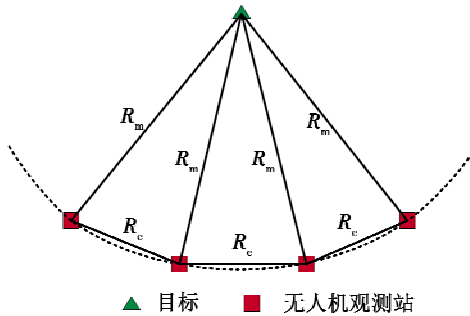


图 2 单目标最优布站示意图

Fig. 2 Optimal station distribution geometry schematic for a single target

按照图 2 所示方式进行布站时,在满足安全约束的条件下使各站离目标位置最近(结论 1),在满足中继通信约束的条件下各站相距最远(结论 2),并且巧妙地将任意两站连线的中垂线交于一点(结论 3)。按照图 1 的仿真条件,对该布站情况下的 GDOP 进行仿真,结果如图 3 和表 2 所示。

由图 3 可知,弧形布站下的 GDOP 与一字形基本类似,但对弧形内的部分区域定位精度更高,对弧形背面区域定位精度更低,满足对单目标布站的要求。对

比表 1 和表 2 可知,弧形布站情况下目标最优位置处的 GDOP 最小,为 189.26 m,进一步说明在该仿真条件下,所述弧形布站方式是针对单目标时差定位的最优布站方式,即

$$(s_1^*, s_2^*, s_3^*, s_4^*) = \arg \min_{s_1, s_2, s_3, s_4} G_{\text{GDOP}} = D_{\text{arc}}(s_0, R_m, R_c) \quad (21)$$

式中: $D_{\text{arc}}(s_0, R_m, R_c)$ 表示由 s_0, R_m 和 R_c 确定的弧形布站方式(如图 2 所示), $s_i^* (i = 1, 2, 3, 4)$ 表示最优布站位置。

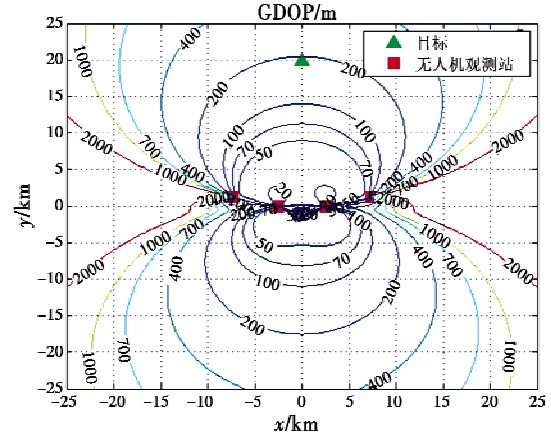


图 3 弧形布站情况下的 GDOP 与目标最优位置

Fig. 3 GDOP diagram using arc-shaped station distribution and optimal target position

表 2 弧形布站情况下的目标最优 GDOP
Table 2 Optimal GDOP of target for arc-shaped station distribution

观测站 1/km	观测站 2/km	观测站 3/km
(-7.34, 1.24)	(-2.50, 0.00)	(2.50, 0.00)
观测站 4/km	目标最优位置/km	目标处 GDOP/m
(7.34, 1.24)	(0.00, 19.84)	189.26

3 轨迹优化

3.1 基于扩展信息滤波的目标状态估计

扩展信息滤波器(Extended Information Filter, EIF)是扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)的一种代数等价形式,EKF 通过传递状态与估计协方差实现状态滤波,而 EIF 则通过传递信息向量 \mathbf{y} 与信息矩阵 \mathbf{Y} (估计协方差的逆)进行状态估计,其中, $\mathbf{y} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{X}$, $\mathbf{Y} = \mathbf{P}^{-1}$ 。该滤波方法具有易初始化、计算量小、实时性强等优点,更适用于多站实时轨迹优化。具体预测和估计步骤如下。

1) 信息向量和信息矩阵的预测方程为

$$\begin{cases} \mathbf{Y}(k+1|k) = (\mathbf{F}(k)\mathbf{P}(k|k)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{Q}(k))^{-1} \\ \hat{\mathbf{y}}(k+1|k) = \mathbf{Y}(k+1|k)\hat{\mathbf{X}}_0(k+1|k) \\ \hat{\mathbf{X}}_0(k+1|k) = \mathbf{F}(k)\hat{\mathbf{X}}_0(k|k) \end{cases} \quad (22)$$

2) 信息向量和信息矩阵的更新方程为

$$\begin{cases} Y(k+1|k+1) = Y(k+1|k) + I(k+1) \\ \hat{y}(k+1|k+1) = \hat{y}(k+1|k) + i(k+1) \\ \mathbf{H}(k+1) = \mathbf{H}^T(k+1)\mathbf{R}^{-1}(k+1)\mathbf{H}(k+1) \\ \mathbf{i}(k+1) = \mathbf{H}^T(k+1)\mathbf{R}^{-1}(k+1)[\mathbf{H}(k+1) \cdot \\ \hat{\mathbf{X}}_0(k+1|k) + z(k+1) - h(\hat{\mathbf{X}}_0(k+1|k))] \end{cases} \quad (23)$$

式中: $z(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻时差测量向量; $h(\hat{\mathbf{X}}_0(k+1|k))$ 为非线性量测方程, 定义与式(9)类似; $\mathbf{H}(k+1)$ 为 $h(\cdot)$ 关于 \mathbf{X}_0 的雅可比矩阵, 即

$$\mathbf{H}(k+1) = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{21}(1) & 0 & \mathbf{H}_{21}(2) & 0 \\ \mathbf{H}_{31}(1) & 0 & \mathbf{H}_{31}(2) & 0 \\ \mathbf{H}_{41}(1) & 0 & \mathbf{H}_{41}(2) & 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

式中, \mathbf{H}_{i1} 的定义如式(11)所示, 括号中的数字表示 \mathbf{H}_{i1} 中元素的下标。

则 $k+1$ 时刻目标状态估计值为

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) = \mathbf{Y}^{-1}(k+1|k+1)\hat{\mathbf{y}}(k+1|k+1) \quad (25)$$

3.2 多机协同最优闭环控制方法

设计基于闭环最优反馈的控制方法, 并将整个过程分为两个阶段: 趋近阶段和保持阶段。保持阶段无人机和目标之间的最优几何布站关系如式(21)所示; 但在对辐射源目标跟踪的初始时刻, 无人机距离目标较远, 难以在短时间内达到最优布站位置, 定义该阶段为趋近阶段。可粗略地将两阶段进行如下划分

$$\begin{cases} d_{0m} > d_m & \text{趋近阶段} \\ d_{0m} \leq d_m & \text{保持阶段} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $d_{0m} = \max_i(r_{i0})$ ($i=1, 2, 3, 4$) 表示无人机与预测目标未来第 n 步的位置 \hat{s}_0 之间的最大距离, $d_m = n \cdot v_{\max}$ 表示 n 个时间周期内无人机的最大运动距离。根据第2章的结论, 可得趋近阶段的最优布站方式为

$$(s_1^*, s_2^*, s_3^*, s_4^*) = D_{\text{arc}}(\hat{s}_0, d_{0m} - d_m, R_c) \quad (27)$$

保持阶段的最优布站方式为

$$(s_1^*, s_2^*, s_3^*, s_4^*) = D_{\text{arc}}(\hat{s}_0, R_m, R_c) \quad (28)$$

由于针对多个观测站进行优化控制, 实际使用时还需要考虑不同的最优布站位置与受控无人机的对应关系, 用 $\alpha_{ij}(k)$ 表示 k 时刻第 i 个无人机当前位置 s_i 与第 j 个最优布站位置 s_j^* 间的距离, 以各无人机全部到达最优布站位置的时间最短为目标函数 $t(k)$, 假设各无人机为速度一致的质点, 该问题等价于如下2维分配模型

$$t(k) = \min_{\eta_i} \max_{i,j} [\eta_{ij} \alpha_{ij}(k)] \quad (29)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^4 \eta_{ij} = 1 \quad \forall i=1, 2, 3, 4; \quad \sum_{i=1}^4 \eta_{ij} = 1, \quad \forall j=1, 2, 3, 4$$

式中, η_{ij} 为二进制变量, 若第 i 个无人机当前位置与第 j 个最优布站位置是对应的, 则 $\eta_{ij} = 1$, 否则 $\eta_{ij} = 0$ 。若

得到的结果有多个 η_{ij}^* , 选取使所有无人机距离之和最小的 η_{ij} , 即

$$\eta_{ij} = \arg \min_{\eta_{ij}} \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 \eta_{ij} \alpha_{ij}(k) \quad (30)$$

得到对应关系后, 多机控制问题转变为对各无人机分别进行控制问题。设第 i 个无人机的当前航向为 θ_i , 指向与其对应的最优布站位置的方位角为 θ_i° , 其航向角控制^[11]为

$$\theta_i^c = \theta_i + 1.21 |\sin(\theta_i^\circ - \theta_i)| \sin(\theta_i^\circ - \theta_i) \quad (31)$$

其速度控制为

$$v_i^c = \frac{|s_i - s_i^\circ|}{n} \quad (32)$$

式中: s_i° 表示第 i 个无人机对应的最优布站位置。

可得对第 i 个无人机的控制量为

$$\mathbf{u}_i = \begin{pmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_i^c(k) \cos \theta_i^\circ(k) - v_i(k-1) \cos \theta_i(k-1) \\ v_i^c(k) \sin \theta_i^\circ(k) - v_i(k-1) \sin \theta_i(k-1) \end{pmatrix} \quad (33)$$

同时, 式(32)和式(33)还应满足式(7)飞机性能约束, 其具体控制步骤如下:

- 1) 由 k 时刻目标状态 $\hat{\mathbf{X}}_0(k|k)$ 预测目标未来 n 步的状态, 得到目标位置信息的预测值为 \hat{s}_0 ;
- 2) 根据 k 时刻无人机位置信息与目标位置预测 \hat{s}_0 , 计算 d_{0m} 和 d_m , 根据式(26)判断控制阶段, 并根据式(27)、式(28)计算最优布站位置;
- 3) 根据式(29)和式(30)得到无人机与最优位置的对应关系, 转化为对各无人机分别进行控制;
- 4) 根据式(31)~式(33)得到各无人机的控制输入 $\mathbf{u}_i(k)$;
- 5) 令 $k = k+1$, 重复步骤1)~步骤4)。

4 仿真分析

设目标起始位置为(5 km, 50 km), 以 200 m/s 的速度向正东方向匀速直线飞行, 500 s 时发现被我方无人机机群跟踪, 在 500~700 s 期间做角速度为 8 mrad/s 的匀速左转弯机动, 然后 700 s 时以 250 m/s 速度向正北方向匀速直线逃逸, 仿真时间 1000 s, 采样时间 $T=1$ s。设我方有 4 架无人机按照时差无源定位体制以 Y 形布站方式巡航搜索目标, 其初始位置与飞行状态如表 3 所示。在第 0 时刻发现目标辐射源, 开始利用本文方法对目标进行定位跟踪。飞机的最小速度 $v_{\min} = 100$ m/s、最大速度 $v_{\max} = 300$ m/s、最大加速度 $a_{\max} = 15$ m/s²、最大转向角速度 $\omega_{\max} = 0.1$ rad/s, 测量误差、站址误差、距离约束条件与第 2 章相同。控制方法中设 $n=8$, 仿真结果如图 4~图 8 所示。

图 4 展示了目标和无人机的运动轨迹, 并每隔 100 s

用黑实线标记了目标与无人机间的拓扑关系。由图4可知,经过100 s左右的时间,无人机机群完成了由Y形布站到弧形布站的转换,并随着时间推进,以弧形布站方式逐渐接近目标,各站对目标实现了有效跟踪。

表3 无人机的初始状态

Table 3 Initial state of UAVs

无人机 i	x_i/m	y_i/m	$\dot{x}_i/(m \cdot s^{-1})$	$\dot{y}_i/(m \cdot s^{-1})$
1	0	0	-100	100
2	0	-2500	-100	100
3	-2165	1250	-100	100
4	2165	1250	-100	100

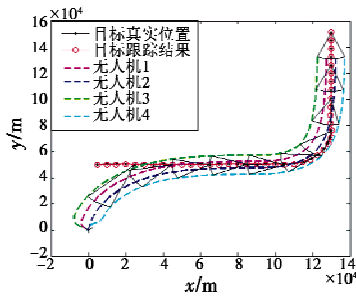


图4 目标与无人机运动轨迹

Fig. 4 Tracks of target and UAVs

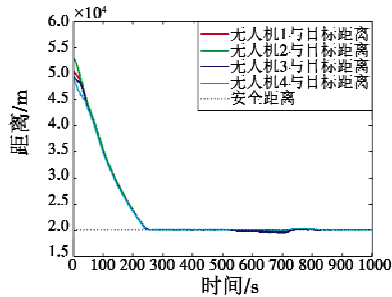


图5 无人机与目标之间的距离随时间变化情况

Fig. 5 Distance between UAV and target as time changes

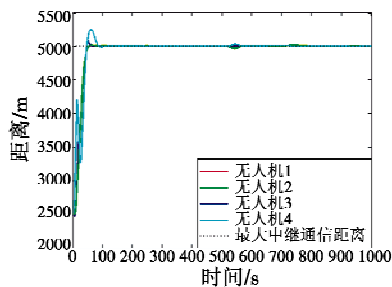


图6 无人机间中继通信距离随时间变化情况

Fig. 6 Communication distance between UAVs as time changes

图5和图6分别展示了定位跟踪过程中各无人机与目标的距离以及相邻无人机之间距离的变化情况,其中,黑色虚线分别表示安全距离和中继通信距离约束。由图5可知,在50 s附近,各无人机与目标的距离

趋于一致,满足本文所述结论3的要求,即将目标位置置于任意两个观测站连线的中垂线上,使得四站时差定位精度达到最高。同时,各无人机快速接近目标,在250 s附近达到安全距离约束条件,并保持此距离持续对目标定位跟踪,从而满足本文所述结论1的要求,即距离目标越近,精度越高。在500~750 s附近各无人机到目标的距离产生波动,这主要是因为目标跟踪模型为匀速直线运动模型,当目标做转弯机动时,对目标位置进行预测时产生较大误差,从而影响了无人机的控制,700 s后目标恢复匀速直线运动,距离波动也快速恢复到正常水平,说明所提算法对机动有一定的适应能力。由图6可知,100 s前各无人机正在进行布站转换,相邻的距离波动较大,其中,在50~100 s期间,除了无人机4在最大中继通信距离上有较小波动外,其余无人机均满足约束条件,并在100 s后,各无人机以保持最大通信距离的布站方式对目标持续定位跟踪,满足本文所述结论2的要求,即基线越大,精度越高。图5和图6共同表明了通过所提控制方法,4架无人机能够以最优布站方式对目标持续定位跟踪。综上所述,各无人机在250 s附近应基本到达最优观测位置,此时对目标定位精度应当接近理论值189.26 m。

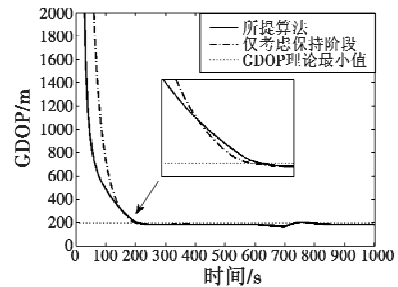


图7 无人机定位 GDOP 随时间变化情况

Fig. 7 GDOP of UAV locating as time changes

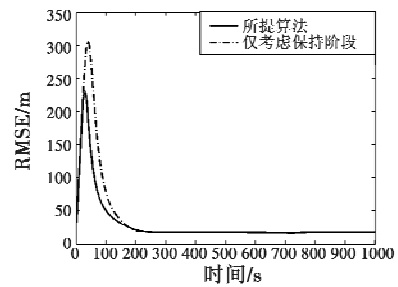


图8 定位误差随时间变化情况

Fig. 8 Localization RMSE as time changes

为进一步说明区分趋近阶段和保持阶段对算法性能的影响,图7和图8分别给出了仅考虑保持阶段与所提算法对GDOP和目标位置估计误差的影响。图7为无人机定位GDOP随时间变化情况,由图可知,240 s前,各无人机定位GDOP不断减少,240 s后稳定在理

论最小值附近。其中在 700 s 附近有较大波动,这是由此时无人机与目标的距离波动较大导致的。相对于仅考虑保持阶段的方法,所提方法考虑的趋近阶段控制策略能使各个无人机之间的距离迅速拉开,形成较大弧形,有效提高了对目标的观测效果,同时使机群逐渐靠近目标,从而有效改善了闭环控制方法在机群与目标距离较远时的定位性能。相对于仅考虑保持阶段的控制方法,虽然所提算法到达最优观测位置所用时间较多(20 s 左右),但该方法利用较小的时间代价换取了机群与目标距离较远时的系统定位性能,有效兼顾了控制方法的定位精度和到达最优位置的时间,具有一定优越性。图 8 给出了所提方法和仅考虑保持阶段时 EIF 算法的定位误差随时间变化情况。由图可知,50 s 后以上两种控制方法的目标定位误差变化趋势与图 7 基本一致,所提控制方法明显优于仅考虑保持阶段的控制方法,说明所提闭环最优控制方法能够优化机群的运动轨迹,有效改进目标定位精度,降低目标定位误差,其中趋近阶段控制策略的提出,能够有效兼顾控制过程中各个时段的目标定位精度,从而保证对目标持续有效的定位跟踪。

5 结束语

基于时差多机无源定位体制,将多无人机对单个运动辐射源目标持续定位跟踪的问题,划分为趋近阶段和保持阶段,并提出相应最优布站方法,然后利用闭环控制方法实现对多机的轨迹优化。仿真结果表明,所提控制方法能够使多个无人机按照最优布站方式对目标进行观测,并能够有效减少目标定位误差,提高时差定位系统性能。但所提方法不易严格满足距离约束,是下一步讨论研究的重点。

参考文献

- [1] 王木才,王国宏,何友. 多站纯方位无源定位算法研究进展[J]. 电光与控制,2012,19(5):56-62.
- [2] FLUCKIGER M, NEILD A, NELSON B J. Optimization of receiver arrangements for passive emitter localization methods[J]. Ultrasonics, 2012, 52(3):447-455.
- [3] GHOLAMI M, CAI N, BRENNAN R W. Evaluating alternative approaches to mobile object localization in wireless sensor networks with passive architecture[J]. Computers in Industry, 2012, 63(9):941-947.
- [4] 王莹桂,陈振林,李腾,等. 三星时差定位系统的主要系统误差分析[J]. 飞行器测控学报,2010,29(1):85-89.
- [5] 杨丽丽,孙晓闻. 无人机载多站无源定位系统精度分析[J]. 中国电子科学研究院学报,2014,9(4):348-352.
- [6] 王瀚,钟丹星,周一宇. 不规则布站时差定位系统定位精度分析[J]. 现代电子技术,2007,30(7):19-21.
- [7] FREW E W. Receding horizon control using random search for UAV navigation with passive, non-cooperative sensing [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2005; AIAA2005-5864.
- [8] 张胜祥,裴海龙,刘保罗,等. 基于滚动时域优化的无人飞行器轨迹规划[J]. 计算机工程与应用,2008,44(35):237-239.
- [9] 冉华明,周锐,吴江,等. 双机协同无源目标跟踪轨迹优化[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(1):160-166.
- [10] 邱斌,周锐,董卓宁. 考虑信息成功传递概率的多无人机协同目标最优观测与跟踪[J]. 控制与决策,2016,31(4):616-622.
- [11] ANDREW J S, RICHARD J P, DAVID E J. Optimal and feedback path planning for cooperative attack[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(6):1708-1715.
- [12] 钟春梅,赵振宇,孙海波,等. 多无人机协同目标跟踪闭环最优控制方法[J]. 探测与控制学报,2012,34(3):13-18.



请扫描二维码关注我刊