

# 基于优化的多机协同目标被动跟踪与控制方法

李飞飞<sup>1</sup>, 李超<sup>2</sup>, 周锐<sup>3</sup>

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009; 2. 中国人民解放军总参谋部陆航部驻洛阳地区军事代表, 河南 洛阳 471009; 3. 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** 为提高“战术隐身”和“静默攻击”环境下目标的可观测性和跟踪定位精度, 研究并完成了基于滚动时域优化(RHO)的纯方位角被动测量的 UAV 协同最优目标跟踪问题。对于双机协同最优跟踪的情况, 观测 UAV 的空间相对布局对于被动定位与跟踪的质量起着极为重要的作用, 采用最优控制的思想求取最优估计的控制量, 实时调整 UAV 的航向, 达到最优目标跟踪, 并进行了仿真验证, 结果证明了该方法的有效性。

**关键词:** 目标跟踪; 滚动时域优化; 无人机; 信息熵; 协同控制

中图分类号: V279 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2014)08-0033-04

## Optimized Passive Target Tracking and Coordinated Control by Multi-UAV Cooperation

LI Fei-fei<sup>1</sup>, LI Chao<sup>2</sup>, ZHOU Rui<sup>3</sup>

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China;  
2. Military Delegate Office of PLA GSD Army Aviation in Luoyang District, Luoyang 471009, China)  
3. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** To improve the observability and locating precision of targets under electronic silence and tactic invisibility, the optimal passive target tracking by multiple Unmanned Aerial Vehicles(UAVs) using Receding Horizon Optimization(RHO) was studied. With respect to optimal tracking by dual cooperative UAVs, the spacial layout of the UAVs has great effect on the quality of passive target locating and tracking. To realize the optimal target tracking, the RHO was used to obtain the optimal control solution, and the headings of UAVs were adjusted in real time. Simulation results demonstrate the effectiveness of this method.

**Key words:** target tracking; moving horizon optimization; UAV; information entropy; synergetic control

### 0 引言

随着信息化和网络化技术的快速发展, 传统的“以平台为中心”的单飞行器作战模式必将被“以网络为中心”的多飞行器协同作战模式所取代<sup>[1-3]</sup>。整个作战体系不再仅仅依靠各个作战武器平台自身的作战能力, 而是对分散配置的各种平台及资源的一体化整合和战术配合, 使之成为彼此关联、相互协作的有机整体, 进而实现战场联合侦察、识别、跟踪与打击。多机协同组网被动目标跟踪与定位技术, 可以实现对战场目标的态势感知, 提高对目标跟踪与定位精度, 并可以避免主动目标跟踪所造成的电磁辐射问题, 实现“战术

隐身”和“静默攻击”。在多机协同组网目标跟踪中, 传感器的空间观测位置优化配置或无人机平台跟踪航迹规划对协同目标跟踪的性能有重要影响。本文针对如何提高目标的可观测性和跟踪定位精度, 提出了基于滚动时域优化的纯方位被动测量协同最优目标跟踪方法<sup>[4-6]</sup>, 并进行了实时仿真。

### 1 系统模型建立

#### 1.1 无人机运动模型

假设 UAV 装备有自动驾驶仪, 在二维平面内的运动方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = v_0 \cos \psi + W_x \\ \dot{y} = v_0 \sin \psi + W_y \\ v_0 = u_1 \\ \dot{\psi} = u_2 \\ \dot{h} = u_3 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-09-27 修回日期: 2013-11-05

基金项目: 航空基金(2011ZC13001)

作者简介: 李飞飞(1983—), 女, 河南洛阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为辅助决策, 火控技术。

式中:  $[x, y, h]^T \in \mathbb{R}^3$ , 为 UAV 的位置, 由于本文中假设高度恒定, 故忽略高度信息;  $v_0$  为 UAV 空速;  $\psi \in (-\pi, \pi]$ , 为航向角;  $v_w = [W_x, W_y]^T \in \mathbb{R}^2$ , 为风速;  $u_1, u_2, u_3$  分别为指令速度、指令航向角速度、指令爬升率。

### 1.2 最优指标函数选取

无人机协同目标跟踪的任务是获得目标状态的最佳估计, 并降低目标状态估计的不确定性程度。本节采用费舍信息阵(FIM)作为性能指标对象。选取代价函数为

$$J = \det[Y(k+1|k) + \sum_{i=1}^n I_i(k+1)] \quad (2)$$

式中:  $n$  为 UAV 节点的个数;  $I_i(k)$  为信息矩阵;  $Y$  为费舍信息矩阵, 即目标信息融合估计方差的倒数。

引入信息熵<sup>[7]</sup>作为效能指标的标准, 用来评价信息量的大小, 即

$$J_e = \frac{1}{2} \lg[(2\pi e)^2 |Y(k|k)|] \quad (3)$$

UAV 的控制输入为速度和航向角, 故最优控制输入计算式为

$$\psi_{opt}, v_{opt} = \max_{\psi, v} J \quad (4)$$

式中,  $\psi = [\psi_1, \psi_2]^T$  和  $v = [v_1, v_2]^T$  分别为 UAV 的航向角和速度。将此指令航向角与当前航向角比较, 以确定航向角速率。另外, UAV 和目标之间要保持一定的安全距离  $r_d$ , 则有

$$r_i \geq r_d \quad (5)$$

同时, UAV 平台满足自身约束。于是, 建立了一个具有多个约束的优化问题, 采用滚动时域优化方法求解最优控制。

### 1.3 滚动时域优化

滚动时域优化(Receding Horizon Optimization, RHO)方法是在每一离散时刻, 利用系统的模型来预测系统未来的状态演化, 并利用预测得到的系统未来状态建立一个优化问题, 在线求解该优化问题, 得到最优控制序列。并在该时刻仅取最优控制序列中的前几个控制信号实际作用到系统中, 舍去后面各项。在下一时刻, 重复以上过程。这个过程随着时间的推移反复滚动进行。具体步骤如下所述。

1) 由  $k$  时刻 UAV 状态  $X[k]$ , 对目标进行  $t$  步预测, 得到目标估计的状态序列为

$$\hat{X}_T[k:k+t] = \{X_T[k], \hat{X}_T[k+1], \dots, \hat{X}_T[k+t]\} \quad (6)$$

以及  $t$  步控制序列

$$u[k:k+t] = \{u[k], u[k+1], \dots, u[k+t]\} \quad (7)$$

计算  $k+t$  时间段内的最优控制序列

$$u^*[k:k+t] = \arg \min J(u[k:k+t], X[k]) \quad (8)$$

2) 取此最优控制序列的前  $\tau$  段输入  $u^*[k:k+\tau]$ ,

$1 \leq \tau \leq t$ , 作为该  $\tau$  时间段内的控制输入。

3)  $k+\tau$  时刻, 重复 1)、2)。

### 1.4 仿真结果与分析

为了对比 UAV 不同起飞位置对目标观测的影响, 对静止目标分别用以下 3 种情形进行仿真研究: 1) 两架 UAV 从同一位置出发; 2) 两架 UAV 相对目标成垂直方向出发; 3) 两架 UAV 从目标的两侧位置出发。如图 1 所示, UAV1 从固定位置出发, UAV2 分别从 3 种不同位置出发。

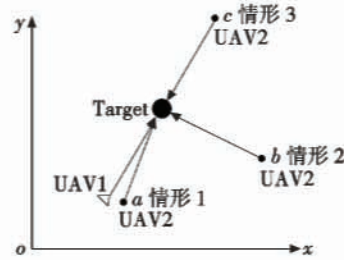
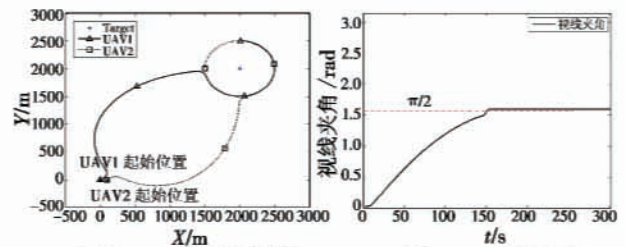


图 1 两架 UAV 从不同位置起飞

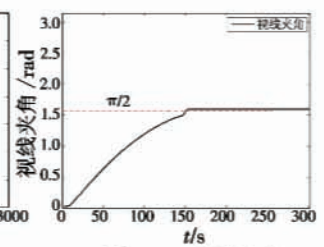
Fig. 1 The different initial positions of two UAVs

情形 1 UAV2 从  $a$  点出发。

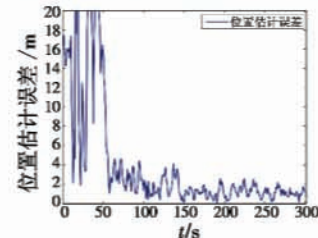
仿真结果发现, 在 0~150 s 时间内, 两架 UAV 试图分开一定的夹角, 分别从不同位置观测目标, 形成“三角测量”。如图 2b 所示, 视线夹角逐渐趋于  $\pi/2$ , 并维持该角度。双机协同可以明显加快滤波的收敛, 且在 70 s 附近即可获得 4 m 左右位置估计精度。UAV 距目标越近, 估计误差越小; 视线夹角越趋于  $\pi/2$ , 估计误差越小。



a 两架 UAV 目标跟踪轨迹



b 两架 UAV 视线夹角



c 位置估计误差

图 2 双机从同一地点出发跟踪静止目标(RHO)

Fig. 2 Target tracking for fixed object by two UAVs

from the same position using RHO

情形 2 UAV2 从  $b$  点出发。

由仿真结果可知, 当 UAV 的初始视线夹角接近  $\pi/2$  时, 两架 UAV 保持该角度并几乎径直接近目标。如图 3b 所示, 虽然在 120 s 左右, 视线夹角减小, 这是由于

UAV1 提前进入,位于盘旋半径上,而 UAV2 依然向目标靠近,此时对应的信息熵依然增加。滤波误差大大降低,在 50 s 之后即可获得 2 m 的目标位置估计精度。

由此说明,  $\pi/2$  的视线夹角为最优布局,故为了获取最小的误差,只需减小  $r_1, r_2$ , 即 UAV 靠近目标。在两架 UAV 相对目标的视线夹角一定的情况下, UAV 离目标距离越近,对目标估计越精确。

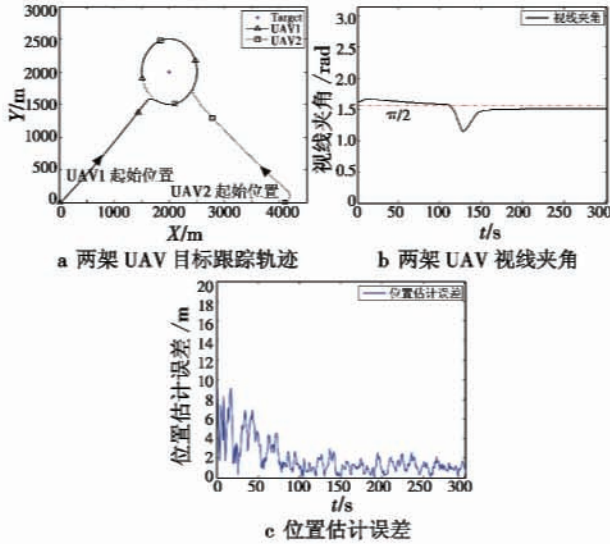


图 3 双机从垂直方向出发跟踪静止目标(RHO)  
Fig.3 Target tracking for fixed object by two UAVs from vertical directions using RHO

情形 3 UAV2 从 c 点出发。

由仿真结果可知,两架 UAV 初始视线夹角接近  $2\pi$ , 跟踪时 UAV 在接近目标的同时也在试图彼此靠近,使得视线夹角逐渐趋于  $\pi/2$ , 并保持恒定,如图 4b 所示。情形 3 的滤波误差收敛速度和估计精度远小于情形 2。

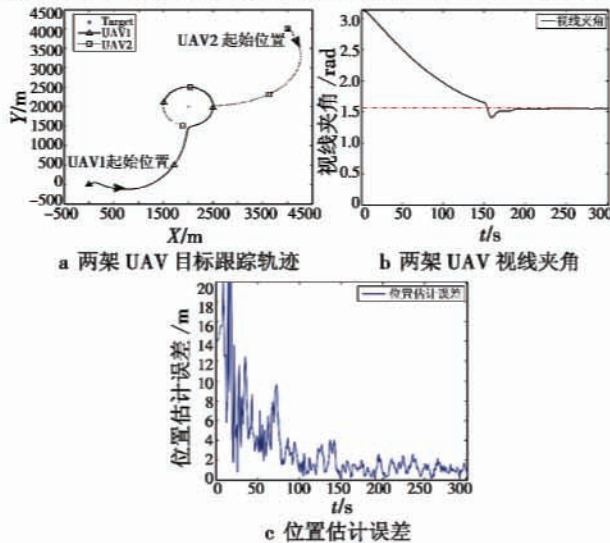


图 4 双机从相对方向出发跟踪静止目标(RHO)  
Fig.4 Target tracking for fixed object by two UAVs face-to-face using RHO

由情形 1~3 可归纳最优的双机协同目标跟踪轨迹有以下两种趋势:1) 两架 UAV 尽可能地尽快靠近目标;2) 两架 UAV 之间试图保持  $\pi/2$  的视线夹角。

## 2 协同被动跟踪分散化最优控制

### 2.1 协同被动跟踪分散化最优控制模型

考虑两个运动平台对一个静止目标的感知问题。两个平台通过数据链交换各自的信息  $i_i(k)$  和  $I_i(k)$  实现分散化信息融合,除了考虑平台自身  $i(k)$  和  $I(k)$ , 还要考虑临近平台集合  $N_i$  内通信拓扑  $g_{ij}(k)$  所确定的具有通信连接的其他平台的  $I(k)$  和  $i(k)$ ,

$$\hat{y}_i(k|k) = \hat{y}_i(k|k-1) + i_i(k) + \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij}(k) i_j(k), \quad (9)$$

$$Y_i(k|k) = Y_i(k|k-1) + I_i(k) + \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij}(k) I_j(k). \quad (10)$$

平台任务是获得目标状态最佳估计,平台以融合后的信息熵为效能指标,实现分散最优控制

$$J_i(u_i(k)) = \frac{1}{2} \lg[(2\pi e)^2 |Y_i(k)|], \quad (11)$$

$$u_i^{opt}(k) = \arg \max_{u_i} J(u_i(k)). \quad (12)$$

平台内部约束主要考虑平台偏航角速度约束以及平台与目标之间的安全距离  $d_1$  约束

$$u_{i,min} \leq u_i(k) \leq u_{i,max}, \quad (13)$$

$$\sqrt{(x_i(k) - \hat{x}_{j,t}(k))^2 + (y_i(k) - \hat{y}_{j,t}(k))^2} \geq d_1. \quad (14)$$

平台之间约束主要考虑平台间的防撞距离约束  $d_2$  和平台间通信保障距离约束  $d_3$ , 即

$$\sqrt{(x_i(k) - x_j(k))^2 + (y_i(k) - y_j(k))^2} \geq d_2, \forall i, j \in n, j \neq i, \quad (15)$$

$$\sqrt{(x_i(k) - x_j(k))^2 + (y_i(k) - y_j(k))^2} \leq d_3, \forall i \in n, j \in N_i. \quad (16)$$

### 2.2 仿真结果与分析

分别对有通信情况下的协同感知和无通信情况下的非协同感知结果进行仿真。仿真结果如图 5~图 8 所示。可以看出:平台对目标协同感知的效能函数要明显大于无协同下目标感知的效能函数,协同目标感知的估计精度更高,估计误差的收敛速度也更快。另外,协同需要通信,所以平台之间的距离较小。

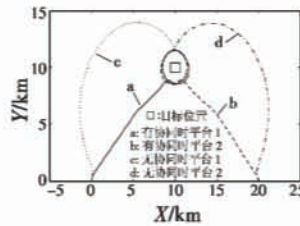


图 5 协同和非协同同时平台运动轨迹  
Fig.5 The motion tracks of cooperative and un-cooperative platforms

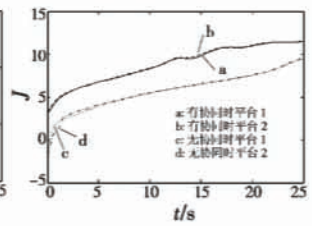


图 6 协同和非协同同时效能指标函数  
Fig.6 The efficiencies under cooperative and un-cooperative conditions

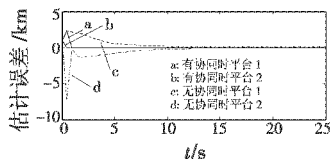


图 7 协同和非协同时 X 方向目标估计误差

Fig. 7 The estimation errors of X under cooperative and un-cooperative conditions

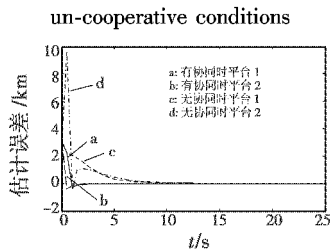


图 8 协同和非协同时 Y 方向目标估计误差

Fig. 8 The estimation errors of Y under cooperative and un-cooperative conditions

由此可见,由于平台之间信息的分布性以及通信拓扑的变化,以最小通信量为基础的分散协同控制具有可扩展性、异构性和动态可重构性等特点。以信息熵作为量测的效能指标实现对多平台协同目标感知分散化最优控制是可行的。

### 3 结论

本文使用滚动时域优化方法解决最优目标跟踪的问题。对于双机协同最优跟踪的情况,对比了不同位置起飞的 UAV 的目标跟踪情况,得到以下结论:1) 双机协同目标跟踪的 UAV,目标估计效果和 UAV 距目标的距离和 UAV 相对目标的视线夹角有关,当 UAV 与目标之间形成  $0^\circ$  或  $180^\circ$  视线夹角时,系统可观测性最低,  $90^\circ$  视线夹角时,可以获取最佳的系统可观测性。2) 最优的双机协同目标跟踪轨迹有以下两种趋势:两架 UAV 尽可能地尽快靠近目标;两架 UAV 之间试图追求  $\pi/2$  的视线夹角。

### 参考文献

- [1] 孙隆和. 网络瞄准及相关技术——瞄准和打击活动目标[J]. 电光与控制, 2005, 12(3): 1-5.  
SUN L H. Networked targeting and the relative technologies—targeting and striking of moving targets[J]. Electronics Optics & Control, 2005, 12(3): 1-5.
- [2] 孙隆和. 网络信息环境中的飞机武器火力指挥控制系统[J]. 电光与控制, 2010, 17(3): 1-8.  
SUN L H. Airborne weapon fire control and command control system in network information environment[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(3): 1-8.
- [3] 王建刚. 信息环境下航空武器系统一体化联合攻击技术探讨[J]. 电光与控制, 2006, 13(5): 1-5.  
WANG J G. Incorporated joint attacking technology of aviation weapon system under information environment[J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(5): 1-5.
- [4] PONDA S S, KOLACINSKIY R M, FRAZZOLI E. Trajectory optimization for target localization using small unmanned aerial vehicles[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, August 2009, Chicago, AIAA Paper 2009-6015.
- [5] CASBEER D W, ZHAN P C, SWINDLEHURST A L. A non-search optimal control solution for a team of MUAVS in a reconnaissance mission[C]//2006 IEEE International Conference, 2006, 4: 1169-1172.
- [6] COLLINS G E, RIEHL J R, VEGDAHL P S. A UAV routing and sensor control optimization algorithm for target search[J]. Proceedings of SPIE, 6561, 2007, doi:10.1117/12.718888.
- [7] 王勇, 李小偲, 潘泉. 基于信息熵的网络中心战信息共享建模及仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(12): 3637-3640.  
WANG Y, LI X W, PAN Q. Modeling and simulation of information sharing on network centric warfare using information entropy[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(12): 3637-3640.

## 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台 and 系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。