

面向多类型目标的多无人机协同搜索

吴青坡, 周绍磊, 刘伟, 尹高扬
(海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001)

摘要: 搜索环境的复杂化使得多无人机(UAV)协同搜索需要面对各种类型的目标。针对各类型目标的运动特征, 采用目标存在概率密度相关的搜索图方法, 在考虑协同搜索问题特性基础上, 建立合理的目标收益函数。采用集中式与分布式相结合的集散式控制框架, 结合对搜索图的探测更新, 通过预测控制及改进匈牙利算法进行多 UAV 的协同搜索决策。所用决策方法可在提高搜索效率的同时, 有效避免多 UAV 间可能发生碰撞的问题。最后, 通过与传统搜索方法进行仿真对比分析, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 多无人机; 协同搜索; Z字形搜索; 时敏目标

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)04-0028-05

Multi-UAV Cooperative Search Strategy for Diverse Types of Targets

WU Qing-po, ZHOU Shao-lei, LIU Wei, YIN Gao-yang

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In the complicated search environment, multi-UAV cooperative search mission may confront with diverse types of targets. Considering the motion features of different types of target, we used a search map method related to probability density function of the targets, and established a reward function appropriate to the coordinated task in order to improve the efficiency of cooperative search. The control architecture combining centralized with distributed control was used, and multi-UAV cooperative search decision making was implemented through predictive control and improved Hungarian algorithm. The decision-making method could improve the search efficiency while avoiding the possible collision of the UAVs. Finally, contradistinctive simulation results demonstrate the validity of the proposed cooperative search strategy.

Key words: multi-UAV; cooperative search; zigzag pattern search; time-critical target

0 引言

随着无人系统的快速发展和广泛应用, 无人系统已经从传统的情报、监视与侦察任务扩大到通信中继、反地/水雷战、反潜战、电子战等军事领域, 但从各国无人系统发展思路来看, 无人系统执行情报、监视与侦察任务仍然是当前和近期无人系统的基本使命^[1]。随着战场环境的复杂化, 单靠一架 UAV 很难保证搜索任务完成的质量, 多 UAV 执行协同搜索任务已成为目前国内学者研究的热点。

文献[2-4]分别采用凸多边形分割、质心 Voronoi 图划分, 模糊 c 均值聚类等方法将目标区域分割为与

无人机等数量的子区域, 将多 UAV 协同搜索问题转换为单 UAV 搜索和监视问题, 降低了任务难度。文献[5-12]基于各类型搜索图, 对目标函数进行优化求解, 采用预测控制等方法引导 UAV 在目标区域内进行搜索; 文献[13]在考虑 UAV 动态约束情况下, 研究了目标区域连续监视问题, 并进行相关试验; 文献[14]基于传统扫描式搜索方法, 采用横队垂线搜索和横队斜线搜索算法对目标区域运动目标进行覆盖搜索。

从目前的研究成果来看, 对多 UAV 协同搜索问题的研究主要针对静止目标或运动目标, 协同搜索控制结构主要是集中式或分布式, 在避碰方面主要假定各 UAV 不在同一飞行平面或者利用威胁度系数结合人工势场等方法来完成避碰, 而且很少有分析 UAV 数量变化对协同搜索算法性能的影响。本文考虑搜索区域内目标的多样性以及先验情报信息误差等因素, 在集

散式控制结构下进行多 UAV 的在线协同搜索决策,既提高了多 UAV 协同搜索的效率,又可有效避免各 UAV 执行搜索任务期间碰撞情况的发生。

1 问题描述

假定对特定任务区域 $Q \subset \mathbf{R}^2$ 进行搜索,区域内既包含湖泊等目标存在的可能性较小的非重点区域,也包含道路等重点区域。目标类型有静止目标、运动目标及时间敏感目标,时敏目标主要指其大概位置已由先验信息得知,而何时出现却未知的目标,可能是静态(隐藏的雷达站等),也可能是动态(如躲在树林深处或山洞内的车辆,建筑物内的人员等)。

假定在任务区域内存在 N_s 个静止目标, N_m 个运动目标, N_t 个时间敏感目标,使用 N_u 架 UAV 利用机载传感器对区域进行协同搜索。无人机与地面指挥控制中心有一定的信息交互能力,多 UAV 协同搜索的主要任务就是要找寻一种方法,使多 UAV 编队在最短的时间内以最小的代价发现尽可能多的各类型目标。

1.1 搜索环境模型

将任务区域 Q 划为 $L_x \times L_y$ 的离散网格,每个离散网格坐标 $L(x, y)$, $x \in \{1, 2, \dots, L_x\}$, $y \in \{1, 2, \dots, L_y\}$, 针对搜索环境及任务的特点,采用概率模型来描述目标的位置状态。这里主要考虑目标存在概率和对目标区域信息确定度,对每个离散网格 $L(x, y)$ 赋予矢量信息 $\mathbf{P}_{xy}(t) = [p_{xy}(t), \chi_{xy}(t)]$ 来综合描述 t 时刻网格内目标和环境信息, $p_{xy}(t) \in [0, 1]$ 为目标存在概率, $\chi_{xy}(t) \in [0, 1]$ 为环境确定度。所有离散网格的信息 $\mathbf{P}_{xy}(t)$ 构成了 UAV 执行搜索任务的区域搜索图。

1.2 UAV 平台模型

假定所有 UAV 在同一高度 H 以固定速度飞行,这里研究重点是协同侦察与监视过程中的多 UAV 协作策略和优化算法,而非平台底层飞行控制,假定 UAV 均装有自主飞行控制系统,且可视为受一定运动约束的质点。其中,第 i 架 UAV 动态特性为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \varphi_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \varphi_i \\ \dot{\varphi}_i = u_i \eta_{\max}, \quad |u_i| \leq 1 \\ \dot{v}_i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $(x_i, y_i) \in \mathbf{R}^2$, 为 UAV _{i} 在搜索平面上的位置状态; $\varphi_i \in [0, 360)$, 为 UAV _{i} 的偏航角,按照东向为零,逆时针方向为正; u_i 为 UAV _{i} 的决策变量,这里简单取 $u_i \in \{1, 0, -1\}$, 分别表示左转、直行、右转; $v_i \in \mathbf{R}$, 为 UAV _{i} 的速度; $\eta_{\max} \in \mathbf{R}$, 为 UAV _{i} 的最大转弯角度约束,最小转弯半径 $R_{\min} = v_{\min} / \eta_{\max}$ 。与文献[9]所示 UAV 状态

模型不同,这里无人机模型并不按栅格移动,其探测位置区域也与无人机位置有所差别。

1.3 传感器探测模型

传感器探测范围由 UAV 的飞行状态、传感器安装及性能参数等因素共同决定。假定其以安装角 α , 固定安装,最远有效探测距离为 L_s , 水平角度正负 γ_s , 下视角角度正负 β_s , 无转台控制系统,传感器的探测范围模型如图 1 所示。

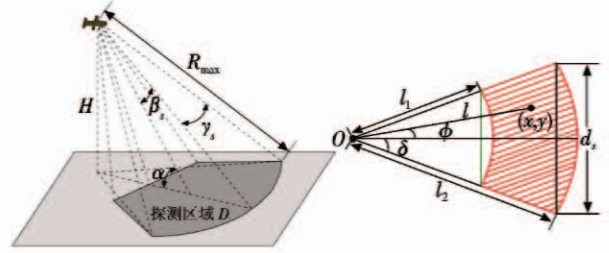


图1 UAV 机载传感器探测范围

Fig.1 Sensor measurements of UAV

UAV 以固定高度水平飞行,忽略滚转角影响,其机载传感器地面探测范围最大宽度可表示为

$$d_s = \sqrt{2}L_s \sqrt{1 - \cos(2\gamma_s)} \quad (2)$$

探测范围可表示为

$$S = \{(x, y) | l_1 < l < l_2 \text{ 且 } \phi \leq \delta\} \quad (3)$$

式中: l 为点 (x, y) 与无人机地面投影的距离; ϕ 为点 (x, y) 与投影连线和无人机航向投影的夹角; δ 与传感器的安装及飞行高度相关。这里不考虑传感器虚警的情况,认为目标进入探测范围即可 100% 被检测到。

2 搜索图建模

搜索图中 $p_{xy}(t)$ 主要依据预先获得的数据情报信息确定,公路等目标可能存在和活动的重点区域初始设置较高的目标存在概率,湖泊等非重点区域则赋值较小的目标存在概率。

依据预先获得的目标初始位置、速度、运动方向等情报数据信息的情况,可将运动目标的位置散布模型分为 4 种类型:1) 目标初始位置未知;2) 目标初始位置范围已知,速度未知;3) 目标大概初始位置和运动速度大小已知,运动方向未知;4) 目标初始位置、运动速度和运动方向均为已知,但有误差存在。具体目标概率分布赋值情况参见文献[8]。

对于时敏目标,认为由先验信息可获取其大概存在位置,但具体出现时间未知,如躲在建筑物内的恐怖分子,洞库里的车辆,隐藏未开机的雷达等。假定所得目标大概初始位置为 (x_s^0, y_s^0) , 这里认为目标存在位置服从以 (x_s^0, y_s^0) 为中心的 $N(0, \delta_s^2)$ 正态分布,运动时敏目标的 δ_s 与时间线性相关。

目标区域环境确定度 $\chi_{xy}(t)$ 的初始化可由目标存在概率通过以下关系式得出^[7]

$$\chi_{xy}(t) = F(p_{xy}(t)) = 1 + p_{xy}(t) \ln p_{xy}(t) + (1 - p_{xy}(t)) \ln(1 - p_{xy}(t)) \quad (4)$$

依据各类型目标的位置状态信息模型及环境确定度,完成对搜索图的初始化。目标存在概率和确定度的更新方程参阅文献[8],此处不再赘述。

3 协同搜索决策

3.1 目标收益函数

多 UAV 协同搜索的目的是在花费最小搜索代价的同时,尽可能探测那些目标价值高的区域,以便发现尽可能多的目标,并降低目标区域的信息不确定性。这里采用优化收益指标函数^[8-9] $J(X(t), U(t))$ 来描述在状态 $X(t)$ 下,采用控制输入 $U(t)$ 后,编队所获得的综合收益。它是一个综合考虑了多 UAV 在搜索过程中的目标发现收益 $J_1(t)$ 、环境搜索收益 $J_2(t)$ 和执行代价 $J_3(t)$ 等的多目标函数。各目标收益具体表示为

$$J_1(x, y, t + 1) = \sum_{(x, y) \in R_t^i} [(P_D - P_F) \cdot p_{xy}(t) + P_F] \quad (5)$$

$$J_2(x, y, t + 1) = \sum_{(x, y) \in R_t^i} [\chi(x, y, t + 1) - \chi(x, y, t)] \quad (6)$$

$$J_3(t) = \sum_{q=0}^{N-1} \|\varphi_v^i(k+q) - \varphi_v^i(k+q+1)\| \quad (7)$$

式中, R_t^i 为传感器在 $[t, t + N - 1)$ 时刻内所探测区域范围。由于各 UAV 速度恒定,这里执行代价 $J_3(t)$ 主要指 UAV 转弯代价。

3.2 UAV 搜索决策过程

UAV 依据搜索任务环境的变化,在线调整任务与航迹,建立如图 2 所示的 UAV 搜索决策过程模型。

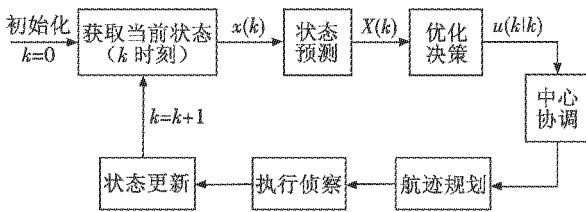


图 2 UAV 搜索决策过程

Fig. 2 Process of UAV search decision making

首先,在每个离散决策时刻 k , UAV 基于当前状态和系统模型,预测未来 N 个阶段的状态,通过使目标收益函数最优来寻出最优控制序列;然后各 UAV 将自身最优决策结果发送给控制中心(地面站或选取领队 UAV),控制中心进行协调规划后,将优化后结果返回;最后, UAV 依照接收到的决策结果,执行侦察任务,并进行状态更新。随着搜索任务的进行,整个决策过程

采用滚动时域的方式不断进行迭代决策,直至搜索任务结束。

3.3 协同决策体系结构

动态变化的环境使得多 UAV 协同搜索问题变为一个在线的动态优化问题,要求多 UAV 必须能够根据外部环境的变化,在线自主调整其任务和航迹,协同完成目标区域内的搜索任务。多 UAV 协同搜索过程结构如图 3 所示。每架 UAV 在执行任务过程中,从自身收益出发,依环境信息和自身状态对当前的状态进行预测,如果结合目标函数发现更有利于自身的决策,则把决策结果(最优收益及控制量)提交给控制中心,由控制中心对每架 UAV 的规划结果进行整体协调,从而获得更好的整体协同效能。各 UAV 按控制中心决策执行搜索任务,将探测结果发送至控制中心,控制中心依此对搜索图进行更新,各 UAV 从控制中心读取更新结果,并进入下一次决策过程。

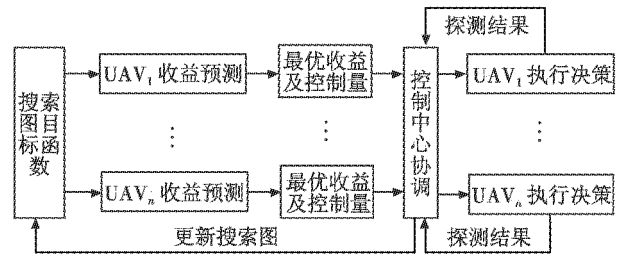


图 3 多 UAV 搜索过程结构

Fig. 3 Diagram of multi-UAV searching process

此外,控制中心可以随时对各 UAV 发布指令,进行操控,在无控制中心指令的情况下,各 UAV 也可在分布式体系结构下工作。该结构采用自治和协作的方法来解决全局控制问题,将复杂问题分解为能够由系统中各个节点解决的子问题,最后由中央节点进行协调决策。

3.4 控制中心搜索协调

各 UAV 依自身状态预测未来 N 个决策周期内可能达到的位置及探测范围,将一步预测位置及各相应最大收益发送给控制中心,控制中心对其进行任务协调分配。由于 UAV_i 的决策变量 $u_i \in \{1, 0, -1\}$, 仅有 3 种方案可选,故一步预测位置仅有 3 个,预测 N 个决策周期后可以有 3^N 种收益结果供选择,假定发送给指挥控制中心的仅为 P_{3i-2}, P_{3i-1} 和 P_{3i} , 3 个一步预测位置和基于每一位置下后续 $N-1$ 步预测中最优收益为 $J_{P_{3i-2}}, J_{P_{3i-1}}, J_{P_{3i}}$ 。在 N_v 架 UAV 组成的编队中,指挥控制中心共接收 $3N_v$ 个预测位置和 $3N_v$ 个最优收益,则协同搜索决策实现过程如下。

1) 将各位置及最优值按 UAV 编号进行排序,位置集合 $P = [P_1, \dots, P_{3N_v}]$, 得最优值集合 $J_p = [J_{P_1}, \dots,$

$J_{p_{\min}}$], 并建立 $N_u \times 3N_p$ 的任务分配矩阵 Z , 其中

$$z_{ij} = \begin{cases} J_{p_j} & j \in \{3i-2, 3i-1, 3i\} \\ 0 & j \notin \{3i-2, 3i-1, 3i\} \end{cases} \quad (8)$$

2) 整合 UAV 预测位置, 若两位置间距离小于最小距离 R_{\min} , 则认为 $P_i = P_j, i < j$ 时, 删除矩阵 Z 中第 P_j 列, 并将收益 J_{p_j} 赋值给 z_{ij} 。

3) 定义任务分配模型为

$$C = \max \sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{3N_p} z_{ij} X_{ij} \quad (9)$$

满足如下约束

$$\sum_{i=1}^{3N_p} X_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, 3N_p \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{3N_p} X_{ij} \leq 1 \quad i = 1, \dots, N_u \quad (11)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{UAV}_i \text{ 对第 } j \text{ 个位置} \\ 0 & \text{UAV}_i \text{ 不对第 } j \text{ 个位置} \end{cases} \quad (12)$$

式中: Z 为收益矩阵, 其中的 z_{ij} 表示第 i 架 UAV 对第 j 个预测位置的收益值; C 为总体收益值; X_{ij} 表示是否把第 i 个 UAV 分配到第 j 个位置, 其值为 0 或 1, “1” 表示已分配, “0” 表示未分配; $X = (X_{ij})_{N_u \times 3N_p}$ 为目标分配解矩阵; 决策目标为寻找一个合理的分配解 X , 使得总的收益值 C 最大。约束公式中解的每一列之和不大于 1, 表示每一个位置最多只分配给一架 UAV, 这可以保证各 UAV 之间不会发生碰撞问题; 解的每一行最多只有一个 1, 表示 UAV _{i} 最多对一个位置执行搜索任务。

4) 将求解所得 X 进行分析, 如 $X_{ij} = 1$ 且 $j \in \{3i-2, 3i-1, 3i\}$, 则 UAV _{i} 对应目标位置 P_j ; 如 $j \notin \{3i-2, 3i-1, 3i\}$ 则需依据 2) 中相应删除位置进行解算, 然后分配给相应 UAV。

5) 控制中心决策完成, 将决策结果发送至各 UAV, 各 UAV 执行搜索任务。

4 仿真分析

为验证本文所提搜索方法的正确性和优越性, 对比贪婪算法和横队 Z 字形搜索方法进行仿真分析。搜索区域 Q 为 $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$ 的矩形区域, 划分为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格单元, $N_u = 10$ 架 UAV 参与搜索任务, 飞行速度保持 $v = 100 \text{ m/s}$ 不变, 最小转弯半径 $R_t = 1 \text{ km}$, 飞行高度 $H = 1 \text{ km}$, 传感器有效探测距离 $L_s = 3 \text{ km}$, 探测角度为水平 $\pm 20^\circ$, 俯仰 $\pm 10^\circ$ 。在区域内随机设置 25 个目标, 5 个静止目标, 10 个机动目标, 10 个时敏目标。各目标初始情报信息如下: 1) 5 个静止目标随机分布, 位置未知; 2) 机动目标最大运动速度为 $v_t = 25 \text{ m/s}$, 初始位置服从以 (x_i^0, y_i^0) 为中心的二维正态分布, 其中, 3 个机动目标的速度已知, 4 个目标的速度和航向已知, 但

有误差; 3) 10 个时敏目标存在位置与机动目标相同, 出现时间随机, 其中, 5 个目标静止, 5 个目标在出现后开始运动, 速度大小及方向未知。

为了避免这种随机性的影响, 本文进行了 200 次仿真, 每次仿真运行 1500 s, UAV 决策时间间隔 10 s, 通过仿真将本文方法与贪婪算法及横队 Z 字形方法比较, 所得结果如图 4 和图 5 所示。

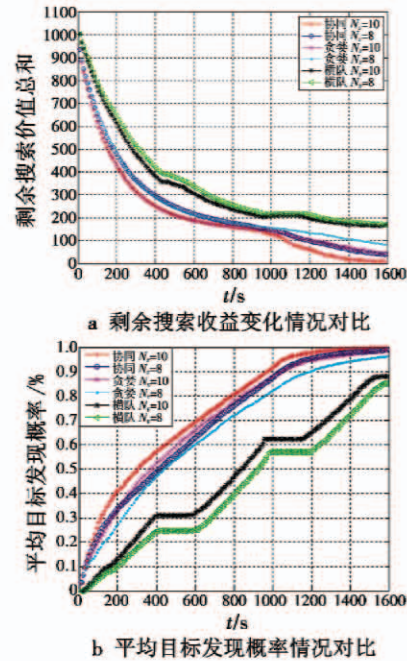
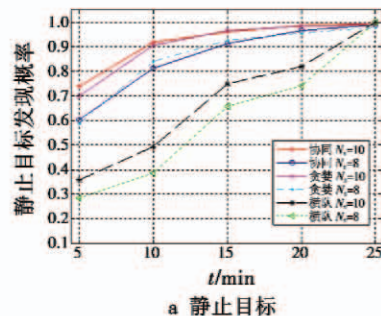


图4 不同搜索方式的对比

Fig.4 Comparison of different search patterns

图 4a 显示依据区域搜索图得到剩余搜索收益变化情况的对比结果, 随着 UAV 数量的减少, 虽然系统搜索效能有所下降, 但本文方法均优于贪婪算法和横队搜索方法。图 4b 所示为平均目标发现概率随搜索时间变化的关系, 横队搜索中之所以有段平坦阶段主要是由 UAV 编队转弯期间搜索区域范围较少所致。基于本文方法和贪婪算法搜索效率明显高于横队搜索方法, 本文方法搜索效果优于贪婪算法, 且随着无人机数量的减少, 搜索性能下降速度明显小于贪婪算法和横队搜索方法。



a 静止目标

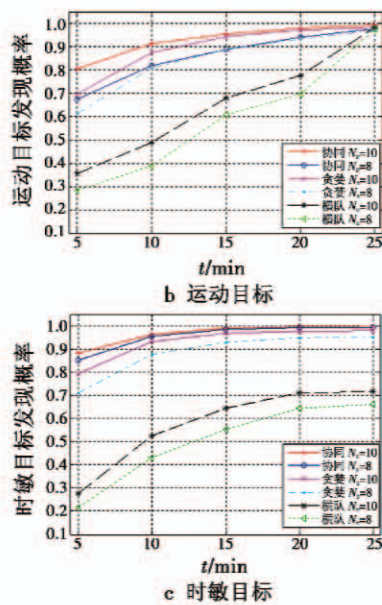


图5 不同时间窗口下目标发现概率情况对比

Fig. 5 Comparison of different search results for various targets

图5所示为3种不同类型目标发现个数随搜索时间变化情况,其中,图5c中时敏目标的统计时间为时敏目标出现到其被发现之间的搜索时间,当UAV搜索到时敏目标所在位置时,如果时敏目标尚未出现,则认为UAV不能发现该目标。针对不同类型的目标,不论从发现目标概率上还是从搜索效率方面,本文搜索方法均优于贪婪算法和横队搜索方法。尤其针对时敏目标,UAV数量减少对本文方法的搜索性能影响明显小于贪婪和横队搜索方法。

5 结论及展望

本文针对多UAV协同搜索过程中可能面对的多类型目标,采用目标概率相关的搜索图方法,在集散式控制框架下,通过预测控制及匈牙利算法进行多UAV的协同搜索决策。所用方法在提高搜索效率的同时,还可有效避免多UAV间可能发生碰撞的问题。通过与贪婪算法及传统横队Z字形搜索方法进行仿真对比分析,显示了所提方法的有效性和优越性。下一步的工作将考虑存在禁飞区、通信延迟等复杂情况对系统决策的影响。

参考文献

[1] Department of Defense. Unmanned systems roadmap 2007-2032[R]. Washington DC: Createspace Independent Publishing Platform, 2015.
 [2] 于驷男,周锐,夏洁,等.多无人机协同搜索区域分割与覆盖[J].北京航空航天大学学报,2015,41(1):167-

173. (YU S N, ZHOU R, XIA J, et al. Decomposition and coverage of multi-UAV cooperative search area[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1):167-173.)
 [3] 轩永波,黄长强,吴文超,等.多无人机协同搜索随机目标决策[J].控制与决策,2013,28(5):711-715. (XUAN Y B, HUANG C Q, WU W C, et al. Cooperative search strategies of multi-UAV for random targets[J]. Control and Decision, 2013, 28(5):711-715.)
 [4] 严明强,刘博.基于模糊C均值聚类的多无人机协同搜索策略[J].战术导弹技术,2013(1):55-63. (YAN M Q, LIU B. Multiple UAVs cooperative search strategy based on fuzzy C-mean cluster[J]. Tactical Missile Technology, 2013(1):55-63.)
 [5] YANG Y L, POLYCARPOU M M, MINAI A A. Multi-UAV cooperative search using an opportunistic learning method[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2007, 129(5):716-728.
 [6] LUM C W. Coordinated searching and target identification using teams of autonomous agents[D]. Washington DC: University of Washington, 2009.
 [7] YANG Y L. Cooperative search by uninhabited air vehicles in dynamic environment[D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2005.
 [8] 彭辉.分布式多无人机协同区域搜索中的关键问题研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009. (PENG H. Research on distributed cooperative area searching of multiple unmanned aerial vehicles[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.)
 [9] 祁晓明,魏瑞轩,沈东,等.基于运动目标预测的多无人机分布式协同搜索[J].系统工程与电子技术,2014,36(12):2417-2425. (QI X M, WEI R X, SHEN D, et al. Distributed cooperative search methods of multi-UAV based on prediction of moving targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(12):2417-2425.)
 [10] 沈东,魏瑞轩,祁晓明,等.基于MTPM和DPM的多无人机协同广域目标搜索滚动时域决策[J].自动化学报,2014,40(7):1391-1403. (SHEN D, WEI R X, QI X M, et al. Receding horizon decision method based on MTPM and DPM for multi-UAV cooperative large area target search[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(7):1391-1403.)
 [11] 祁晓明,魏瑞轩,沈东,等.面向目标不确定的多无人机鲁棒协同搜索[J].系统工程与电子技术,2013,35(11):2303-2308. (QI X M, WEI R X, SHEN D, et al. Multi-UAV robust cooperative search against uncertain targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(11):2303-2308.)

4 总结

为测试动相对定位条件下的系统或者算法定位精度的问题,本文在传统相对定位精度检测方法分析的基础上,着重从基线长度、实时性等条件入手,研究了动定位条件下的精度检测方法。为验证各种方法的可靠性和有效性,分别提出试验方案并进行试验测试,结合试验结果分析可得,提出的基线长度已知情况下的事后精度测试法、动态瞬间历元检测法都能够可靠有效地反映系统定位的精度以及性能指标等。为此,在实际动定位精度测试过程中,往往需要综合考虑动静情况,是否基线已知,所用系统等多种条件,并合理选择上述精度测试方法。

参考文献

[1] 葛茂荣,谢宝童. 动态对动态 GPS 实时差分定位[J]. 工程勘察,1998(4):57-59. (GE M R, XIE B T. Real-time relative positioning for two moving GPS receivers [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1998(4):57-59.)

[2] 刘立龙. 动态对动态 GPS 高精度定位理论及其应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2005. (LIU L L. The research on the precise KINRTK theory and its applications [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.)

[3] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2008. (LIU J Y. The method and principle of GPS [M]. 2nd ed. Beijing: The Science Press, 2008.)

[4] 张豪,杨春燕,张磊,等. 一种快速确定 GPS 整周模糊度的方法. [J]. 火力与指挥控制,2014,39(10):27-29.

(ZHANG H, YANG C Y, ZHANG L, et al. A resolution method of GPS integer ambiguity rapid determination[J]. Fire Control and Command Control, 2014, 39(10):27-29.)

[5] 唐卫明. 大范围长距离 GNSS 网络 RTK 技术研究及软件实现[D]. 武汉:武汉大学,2006. (TANG W M. Research on techniques of largearea and long range GNSS network RTK and developing network RTK software [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006.)

[6] 孙红星. 差分 GPS/INS 组合定位定姿及其在 MMS 中的应用 [D]. 武汉:武汉大学,2004. (SUN H X. DGPS/INS intergrated position and attitude determination and its application in MMS [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.)

[7] 耿延睿,张伟伟,崔中兴. 基于 SINS 辅助的 GPS 完善性监测方法 [J]. 北京航空航天大学学报,2001,27(2):164-166. (GENG Y R, ZHANG W W, CUI Z X. A monitoring method of GPS integrity based on SINS assistance [J]. The Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(2):164-166)

[8] ELMOWAFY A. Performance analysis of the RTK technique in an urban environment [J]. Critical Care Medicine, 2000, 31(45):1399-1404.

[9] FENG Y M, WANG J L. GPS RTK performance characteristics and analysis [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2008, 7(1):1-8.

[10] GAO Y, WOJCIECHOWSKI A. High precision kinematic positioning using single dual frequency GPS receiver [J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 34:1-5.

(上接第 32 页)

[12] HU J W, XIE L H, XU J, et al. Multi-agent cooperative target search [J]. Sensors, 2014, 14:9408-9428.

[13] NIGAM N, BIENIAWSKI S, KROO I, et al. Control of multiple UAVs for persistent surveillance: algorithm and flight test results [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5):1236-1251.

[14] 轩永波,黄长强,吴文超,等. 运动目标的多无人机编队覆盖搜索决策 [J]. 系统工程与电子技术,2013,35(3):539-544. (XUAN Y B, HUANG C Q, WU W C, et al. Coverage search strategies for moving targets using multiple unmanned aerial vehicle teams [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3):539-544.)

