

引用格式: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 J N, WANG R, XIONG Z, et al. Research on cooperative navigation of aircraft swarm with hierarchical structure[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5):6-10.

集群飞行器分层式结构协同导航方法研究

杜君南, 王融, 熊智, 刘建业, 陈明星
(南京航空航天大学自动化学院导航研究中心, 南京 211106)

摘要: 针对飞行器集群系统中存在着定位精度差异较大的飞行器集群飞行情况,以及传统主从式协同导航结构系统存在可靠性低、不能充分利用集群系统协同导航信息的问题,提出了一种分层式结构的集群飞行器协同导航方法。该方法将参与集群的飞行器按照其定位精度高低分层,同层飞行器定位精度相当,一架低精度层飞行器可以同时接受多架高精度层飞行器的协同导航信息,然后建立基于相对距离以及相对角度的协同导航模型,最后通过卡尔曼滤波来修正低精度层飞行器的机载导航信息。仿真结果表明,该结构相对于传统主从式协同导航结构能够有效提高集群飞行系统中低精度层飞行器的定位精度,并可增强集群协同导航系统的可靠性和容错性能。

关键词: 飞行器集群; 协同导航; 分层式结构; 相对距离; 方位角

中图分类号: V249.32 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2021.05.002

Research on Cooperative Navigation of Aircraft Swarm with Hierarchical Structure

DU Junnan, WANG Rong, XIONG Zhi, LIU Jianye, CHEN Mingxing
(Navigation Research Center, College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Aiming at the problems that there is a large difference in the positioning accuracy of the aircrafts in aircraft swarm, and the traditional leader-follower cooperative navigation structure system has low reliability and cannot fully utilize the cooperative navigation information of the swarm system, a hierarchical-structure swarm aircraft cooperative navigation method is proposed. The method stratifies the aircrafts participating in the swarm according to their positioning accuracy, and the positioning accuracy of aircrafts at the same layer is equivalent. An aircraft at low-precision layer can simultaneously receive the cooperative navigation information of multiple aircrafts at high-precision layer. Then, a cooperative navigation model based on relative distance and relative azimuth angle is established. Finally, the Kalman filter is used to correct the airborne navigation information of the low-precision layer aircrafts. The simulation results show that, the structure can effectively improve the positioning accuracy of low-precision layer aircrafts in the swarm flight system and enhance the reliability and fault-tolerant performance of the cooperative navigation system compared with the traditional leader-follower cooperative navigation structure.

Key words: aircraft swarm; cooperative navigation; hierarchical structure; relative distance; azimuth angle

0 引言

近年来,飞行器集群飞行日益受到关注。无论是军

用还是民用领域,单架飞行器的执行能力有限,飞行器集群飞行都具有无可比拟的优势^[1-2]。飞行器集群飞行具有快速、密集等特点,能够扩大战场的搜索范围,提高整体的作战效率,并且具有可执行多重任务、可靠性高、整体效率高等优点,能够完成协同搜索、协同干扰、协同攻击等任务^[3-4]。

协同导航技术是提高集群飞行器整体导航精度的有效手段之一。协同导航技术利用多飞行器间的传感器信息,实现多飞行器间的信息协同。协同导航算法能够充分利用集群飞行系统的冗余信息,通过利用集

收稿日期:2019-11-08

修回日期:2021-04-19

基金项目:国家自然科学基金(61703208,61873125,61673208,61533008,61533009);航空科学基金(2016552043,20165852052);装备预研项目(30102080101);江苏省自然科学基金(BK20170815,BK20170767,BK20181291)

作者简介:杜君南(1996—),男,安徽芜湖人,硕士生,研究方向为集群飞行器协同导航。

通讯作者:王融(1984—),男,rongwang@nuaa.edu.cn。

群系统中高精度飞行器的定位信息来提高低精度飞行器的定位精度^[5-6]。文献[7]提出利用长机和僚机间的相对位置关系建立协同导航模型来修正僚机的导航精度;文献[8]提出了编队飞行中多平台 INS 修正方法来提高算法收敛速度,验证了协同导航的优势。

为此,本文针对集群系统的部分飞行器导航精度存在差异,提出了一种基于分层式结构的集群飞行器协同导航方法。该方法通过飞行器配置的导航设备精度,将整个集群系统飞行器划分为高精度层和低精度层,其中,高精度层飞行器向低精度层飞行器输出导航信息,低精度层飞行器通过机载雷达和机载激光传感器测量多架高精度层飞行器的相对距离和相对角度信息来建立协同导航模型,最后通过滤波方法来提高低精度飞行器机载导航精度。

1 集群飞行系统分层式协同导航结构

多飞行器协同导航结构一般分为主从式和平行式^[9]。一般来说,主从式结构相对简单,只需要一架高精度飞行器作为主机,从机通过传感器获取主机的协同导航信息来提高自身导航精度,但是当主机发生故障时,整个协同导航系统就无法使用,所以系统可靠性较低。平行式结构一般适用于集群系统飞行器定位精度差异不大的情况,该结构可以增强系统可靠性,但要求集群飞行系统中每架飞行器都配备高精度的导航设备,在实际情况下难以满足。综合上述结构的优缺点,本文设计了分层式协同导航结构,该结构将所有参与集群飞行的飞行器根据机载导航设备定位的精度分为高精度层和低精度层。低精度层飞行器利用机载雷达和激光传感器通过无线电方式获取高精度层所有飞行器的协同导航信息,其中包括相对距离信息和角度信息,并根据获取的相对信息来建立基于距离和角度的协同导航模型,以此提高其自身的定位精度。图1所示为集群飞行系统分层式协同导航结构。

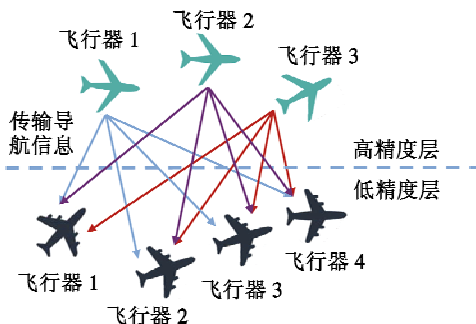


图1 分层式协同导航结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of hierarchical cooperative navigation structure

当高精度层某架飞行器发生故障时,同一层的其

他飞行器可以正常工作,对整个集群协同导航系统的影响不大,因此分层式结构具有较高的可靠性和鲁棒性。低精度层飞行器可以同时接受多架高精度层飞行器的协同导航信息,因此对低精度层飞行器的位置精度改善效果更好。

2 分层式结构协同导航模型

协同导航模型以低精度层飞行器的 INS 输出来建立状态方程,通过机载雷达和机载激光传感器测量多架高精度层飞行器的相对距离、相对角度协同导航信息来建立量测模型,并利用卡尔曼滤波器对低精度层飞行器机载导航位置误差进行修正。

2.1 低精度层飞行器状态模型

本文以低精度层飞行器*j*的惯导信息为基础建立18维的状态方程,即^[10]

$$\dot{X}_j(t) = F_j(t)X_j(t) + G_j(t)W_j(t) \quad (1)$$

式中: F_j 为状态系数矩阵; G_j 为误差系数矩阵; W_j 为白噪声随机误差矢量; X_j 为状态矢量,即

$$X_j = [\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U, \delta v_x, \delta v_y, \delta v_z, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \varepsilon_{bx}, \varepsilon_{by}, \varepsilon_{bz}, \varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}, \Delta_x, \Delta_y, \Delta_z] \quad (2)$$

式中: $\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U, \delta v_x, \delta v_y, \delta v_z$ 分别为惯性平台误差角和速度误差在地理系东北天方向分量; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 分别为经度、纬度、高度误差; $\varepsilon_{bx}, \varepsilon_{by}, \varepsilon_{bz}, \varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}$ 为陀螺仪误差; $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ 为加速度计噪声误差。

2.2 分层式结构协同导航观测模型

低精度层飞行器通过获取所有高精度层飞行器的协同导航信息来建立量测模型。因为协同导航信息主要是相对距离和方位角,所以观测模型建立在地球坐标系下。首先,低精度层飞行器*j*的机载传感器获取和高精度层飞行器*i*的相对距离 d_{ji} 、相对视线仰角 a_{ji} 、相对方位角 b_{ji} 分别为

$$\begin{cases} d_{ji} = d_{ji}^t + \delta d_{ji} \\ a_{ji} = a_{ji}^t + \delta a_{ji} \\ b_{ji} = b_{ji}^t + \delta b_{ji} \end{cases} \quad (3)$$

式中: d_{ji}^t 为飞行器间真实距离; δd_{ji} 为传感器测量距离误差; a_{ji}^t, b_{ji}^t 分别为相对视线仰角和相对方位角的真实角度; $\delta a_{ji}, \delta b_{ji}$ 分别为相对视线仰角和相对方位角的测量误差。将距离 d_{ji} 沿地球坐标系下的*x*轴、*y*轴、*z*轴方向进行分解,如图2所示。

相对距离分解公式为

$$\begin{cases} d_{jix} = d_{ji} \cos a_{ji} \cos b_{ji} \\ d_{jiy} = d_{ji} \cos a_{ji} \sin b_{ji} \\ d_{jiz} = d_{ji} \sin a_{ji} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $d_{jix}, d_{jiy}, d_{jiz}$ 分别为相对距离在地球坐标系*x*轴、*y*

轴、 z 轴方向上的分解。将式(3)代入式(4)中,并在此基础上进行化简,其中忽略高阶小量, $\delta d_{ji} \delta a_{ji} \approx 0$, $\delta a_{ji} \cdot \delta b_{ji} \approx 0$, $\delta d_{ji} \delta a_{ji} \approx 0$,可得

$$\begin{cases} d_{jix} = d_{jix}^t - M_{jix} \\ d_{jyy} = d_{jyy}^t - M_{jyy} \\ d_{jiz} = d_{jiz}^t - M_{jiz} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $d_{jix}^t, d_{jyy}^t, d_{jiz}^t$ 分别为两机的真实距离在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上的分解; $M_{jix}, M_{jyy}, M_{jiz}$ 分别为传感器测量相对距离在对应坐标轴方向上的误差,即

$$\begin{cases} M_{jix} = \delta a_{ji} d_{ji} \sin a_{ji} \cos b_{ji} + \\ \delta b_{ji} d_{ji} \cos a_{ji} \sin b_{ji} - \delta d_{ji} \cos a_{ji} \cos b_{ji} \\ M_{jyy} = \delta a_{ji} d_{ji} \sin a_{ji} \sin b_{ji} - \\ \delta b_{ji} d_{ji} \cos a_{ji} \cos b_{ji} - \delta d_{ji} \cos a_{ji} \sin b_{ji} \\ M_{jiz} = -\delta a_{ji} d_{ji} \cos a_{ji} - d_{ji} \sin a_{ji} \end{cases} \quad (6)$$

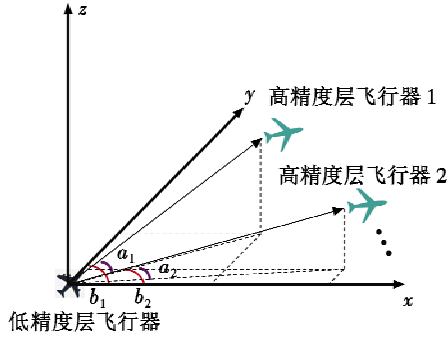


图2 低精度层飞行器和高精度层飞行器相对位置关系

Fig.2 Relative positional relationship between low-precision layer aircrafts and high-precision layer aircrafts

2.3 分层式结构协同导航量测方程

低精度层飞行器 j 机载惯导输出的经度、纬度和高度位置转化为地球坐标系的坐标为 (x_j, y_j, z_j) ,高精度层飞行器 i 在地球坐标系下的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,分别计算两机在地球坐标系下 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上的距离 $d_{jix}, d_{jyy}, d_{jiz}$,即

$$\begin{cases} d_{jix} = x_j - x_i = x^t + \delta x - x_i \\ d_{jyy} = y_j - y_i = y^t + \delta y - y_i \\ d_{jiz} = z_j - z_i = z^t + \delta z - z_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: (x^t, y^t, z^t) 为低精度层飞行器位置真实值; $(\delta x, \delta y, \delta z)$ 为低精度层飞行器机载惯导位置误差值,量测值即惯导计算距离减去机载雷达测量相对距离得到,根据式(6)和式(7)可得

$$\begin{cases} Z_{jix} = d_{jix} - d_{jix}^t = \delta x + M_{jix} \\ Z_{jyy} = d_{jyy} - d_{jyy}^t = \delta y + M_{jyy} \\ Z_{jiz} = d_{jiz} - d_{jiz}^t = \delta z + M_{jiz} \end{cases} \quad (8)$$

由于建立的状态方程中位置误差是经度、纬度和

高度误差,需要将其转化为地球坐标系的 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上的误差,转化公式为

$$\begin{cases} \delta x = -(R_N + h) \sin \lambda \cos L \delta \lambda - \\ (R_N + h) \sin L \cos \lambda \delta L + \cos L \cos \lambda \delta h \\ \delta y = -(R_N + h) \sin L \sin \lambda \delta L + \\ (R_N + h) \cos \lambda \cos L \delta \lambda + \cos L \sin \lambda \delta h \\ \delta z = \delta h \sin L + [R_N(1-f)^2 + h] \cos L \delta L \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ, L, h 分别为低精度层飞行器的经度、纬度和高度数据; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 为式(1)中建立的状态方程的位置误差变量; R_N, f 分别为地球卯酉圈曲率半径和地球扁率。根据式(9)可知

$$Z_{ji} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{jix} \\ M_{jyy} \\ M_{jiz} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta \lambda \\ \delta h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{jix} \\ M_{jyy} \\ M_{jiz} \end{bmatrix} \quad (10)$$

矩阵 T 为将式(9)中位置误差转换关系转化为矩阵表示形式,若高精度层飞行器数量为 n ,根据卡尔曼滤波原理建立量测方程为

$$Z_j = \begin{bmatrix} Z_{j1} \\ \vdots \\ Z_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{j1} \\ \vdots \\ H_{jn} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} V_{j1} \\ \vdots \\ V_{jn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Z_{ji} = \begin{bmatrix} x_{ji} - x_i - d_{ji} \cos a_{ji} \cos b_{ji} \\ y_{ji} - y_i - d_{ji} \cos a_{ji} \sin b_{ji} \\ z_{ji} - z_i - d_{ji} \sin a_{ji} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$H_{ji} = [\mathbf{0}_{3 \times 6} \quad T \quad \mathbf{0}_{3 \times 9}] \quad (13)$$

$$V_{ji} = [M_{jix} \quad M_{jyy} \quad M_{jiz}]^T \quad (14)$$

式中, $i=0, \dots, n$,代表不同高精度层飞行器。根据式(3)和式(4)中的噪声特性和相关性条件,计算出卡尔曼滤波的量测噪声的协方差矩阵为

$$R_{ji} = \begin{bmatrix} \text{var}(M_{jix}) & \text{cov}(M_{jix}, M_{jyy}) & \text{cov}(M_{jix}, M_{jiz}) \\ \text{cov}(M_{jyy}, M_{jix}) & \text{var}(M_{jyy}) & \text{cov}(M_{jyy}, M_{jiz}) \\ \text{cov}(M_{jiz}, M_{jix}) & \text{cov}(M_{jiz}, M_{jyy}) & \text{var}(M_{jiz}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

最后根据建立的协同导航状态方程和量测方程,利用卡尔曼滤波估算低精度层飞行器的INS误差,进而修正低精度层飞行器的导航精度。

3 仿真结果与分析

为了验证本文所提算法的有效性,对算法进行仿真。设定高精度层飞行器数量为3,同时输出导航信息给低精度层飞行器,高精度层飞行器导航精度较高,低精度层飞行器导航精度较低。表1为飞行器的机载传感器误差参数。

表1 飞行器传感器误差参数

Table 1 Error parameters of aircraft sensor

误差参数	数值
加速度一阶马尔可夫过程相关时间/s	3600
陀螺仪一阶马尔可夫过程相关时间/s	1800
陀螺仪随机常数误差/($^{\circ} \cdot h^{-1}$)	0.1
加速度计零偏 g 数	1×10^{-4}
雷达测距传感器均方根误差/m	1
激光测量相对测角误差/ $^{\circ}$	0.001
高精度层飞行器位置精度/m	5

仿真时间设置为 3600 s,图 3 所示为仿真设置 3 架高精度层飞行器和 4 架低精度层飞行器集群飞行航迹。

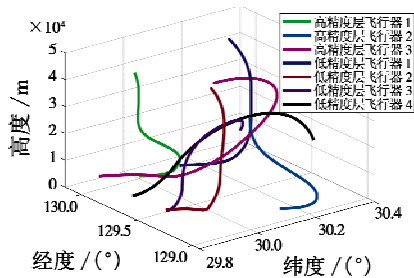


图3 飞行器集群飞行航迹

Fig.3 Aircraft swarm flight path

本文分别使用传统的主从式结构协同导航算法和本文提出的分层式结构协同导航算法对低精度层飞行器进行修正。传统的主从式结构协同导航算法以上述仿真设置的高精度层飞行器 1 为主机。在分层式结构中,低精度层飞行器同时以上述仿真设置的 3 架高精度层飞行器的协同导航信息来修正低精度层飞行器的导航精度。

本文采用蒙特卡罗方法分析低精度层飞行器位置误差曲线。仿真次数为 100。图 4 所示为未采用协同导航结构、采用分层式结构的协同导航算法改进后与传统的主从式算法改进后的低精度层飞行器位置误差曲线对比情况。为了更加清晰地表示不同结构下的位置误差曲线,本文将经度、纬度和高度三维误差转化为一维的位置误差来表示。

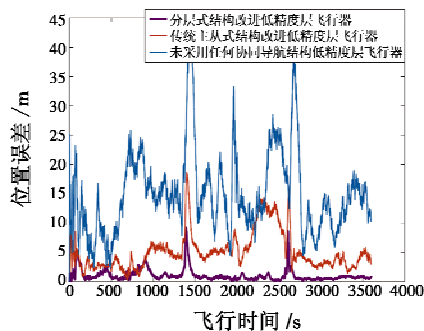


图4 分层式结构和传统主从式算法结构位置误差对比

Fig.4 Comparison of position errors between hierarchical structure and traditional leader-follower algorithm

由图 4 可知,未采用协同导航算法的低精度层飞行器位置精度较低、误差较大,无法满足集群飞行系统长时间对导航精度的要求。采用本文所提出的分层式结构的集群飞行器协同导航方法后,低精度层飞行器的位置精度大大改善;分层式结构的协同导航方法相比于传统的主从式结构的协同导航方法,因同时可以接收到多架高精度层飞行器的协同导航信息,接收的量测信息更多,对低精度层飞行器的位置精度改善效果更好。图 5 所示为采用不同结构的协同导航方法改进的低精度层飞行器位置误差计算值结果,也验证了该结论。本文对分层式结构中影响低精度层飞行器位置精度改善效果的传感器误差因素进行了仿真分析。

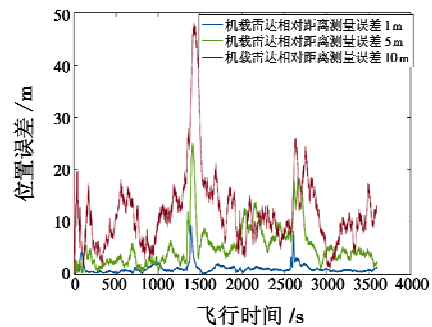


图5 测距传感器误差对低精度层飞行器位置误差影响曲线
Fig.5 Influence of ranging sensor error on position error of low-precision layer aircraft

图 6 所示为测角传感器误差对低精度层飞行器位置误差影响曲线。

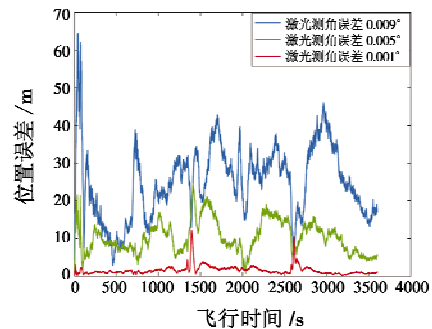


图6 测角传感器误差对低精度层飞行器位置误差影响曲线
Fig.6 Influence of angle-measurement sensor error on position error of low-precision layer aircraft

由图 5、图 6 可以看出,雷达测距传感器和激光测角传感器误差对低精度层飞行器定位精度改善效果影响较大,并且通过不同距离和角度误差系数下低精度层飞行器位置误差变化剧烈程度对比来看,激光测角传感器误差对位置精度影响更大。为了保证分层式协同导航结构的有效性,实际使用中应确保测距、测角传感器维持较高精度水平。

同时,本文对分层式结构中协同导航系统可靠性和容错性能的影响进行了仿真分析。设定飞行时间在

1500 ~ 2500 s 时单架高精度层飞行器发生故障, 观察低精度层飞行器的位置精度改善情况, 如图 7 所示。

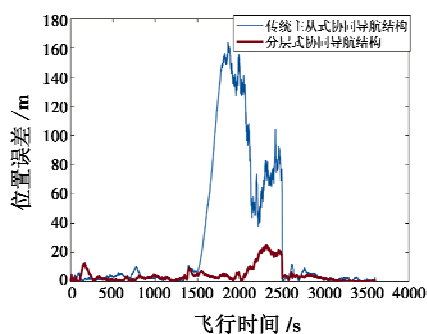


图 7 高精度层飞行器故障后低精度层飞行器位置误差变化曲线

Fig. 7 Low-precision layer aircraft position error after high-precision layer aircraft is failed

由图 7 可知, 传统主从式协同导航结构因只依靠单一的高精度层飞行器的协同导航信息, 当高精度层飞行器发生故障后, 低精度层飞行器位置误差会迅速增大, 无法适应集群飞行要求。本文提出的分层式协同导航结构, 单架低精度层飞行器可同时接收多架高精度层飞行器的协同导航信息, 即使单架飞行器发生故障, 低精度层飞行器可以依靠其余高精度层飞行器的协同导航信息来维持导航精度, 因此分层式结构提升了系统的可靠性和容错性能。

4 结论

本文针对集群飞行系统中飞行器定位精度存在差异的情况, 以及传统主从式协同导航结构系统可靠性低、不能充分利用系统协同信息的问题, 提出了一种分层式结构的集群飞行器协同导航方法。通过将集群飞行器按照定位精度进行高、低分层, 高精度层向低精度层飞行器传递导航信息, 从而建立低精度层飞行器基于相对距离和角度的协同导航模型, 最后利用滤波器来修正低精度层飞行器的定位精度。仿真结果表明, 分层式结构的协同导航算法能够有效提高低精度层飞行器的定位精度, 相比传统的主从式协同导航结构算

法, 分层式结构能够在飞行器故障时使集群系统定位精度仍处于较高水平, 提高了系统的可靠性和容错性能, 并且对低精度层飞行器的位置精度改善效果更好, 同时, 本文也对影响低精度层飞行器精度改善效果的因素进行了仿真分析。

参考文献

- [1] 杨中英, 王毓龙, 赖传龙. 无人机蜂群作战发展现状及趋势研究[J]. 飞航导弹, 2019(5): 34-38.
- [2] 许晓伟, 赖际舟, 吕品, 等. 多无人机协同导航技术研究现状及进展[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4): 1-9.
- [3] HUANG X L, YU T, BAN X J, et al. MAV formation flight visual relative navigation system simulation platform design[C]//The Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 2011: 934-938.
- [4] CUI T S, ZHANG Q Z, ZHANG Y L. A new method of cooperative localization for a long range flight formation [C]//The First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 2011: 933-936.
- [5] 刘晓洋, 李瑞涛, 徐胜红. 基于测距/测速信息的无人机协同导航算法研究[J]. 战术导弹技术, 2019(2): 73-77, 112.
- [6] 张共愿, 程咏梅, 程承, 等. 基于相对导航的多平台 INS 误差联合修正方法[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 271-280.
- [7] WANG Y D, YANG S S, HU H F, et al. Relative navigation algorithm based on robust filter for UAV formation flight[C]//International Conference on Control Engineering and Communication Technology, 2012: 249-252.
- [8] 冯鹏, 熊凌. 基于分层式结构的多 AUV 协同导航方法及仿真[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(2): 27-31.
- [9] 袁杰波, 杨峰, 张共愿, 等. 无人机编队飞行导航方法及其仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(11): 64-67.
- [10] 刘建业, 曾庆化, 赵伟, 等. 导航系统理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 334-343.