

## 不确定信息下基于拍卖算法的多无人机同时到达攻击多目标

赵明明, 李彬, 王敏立  
(中国航空工业集团公司洪都试飞站, 南昌 330001)

**摘要:** 针对不确定信息下的多无人机同时到达攻击多目标的控制策略问题, 将拍卖算法和区间一致性算法相结合, 提出了不确定信息下的多无人机同时到达的控制方法。首先通过拍卖算法, 给出了多无人机对多目标的任务分配方法; 然后定义了区间一致性算法, 提出了不确定信息下的多无人机同时到达的控制方法, 实现了多无人机到达多目标的时间上趋于一致; 最后进行仿真, 验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 无人机; 多目标攻击; 不确定信息; 拍卖算法; 任务分配

**中图分类号:** V279; TP279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0089-05

## Auction Algorithm Based Multi-UAV Arriving Simultaneously to Attack Multiple Targets with Uncertain Information

ZHAO Ming-ming, LI Bin, WANG Min-li  
(Hongdu Fight Test Station, AVIC, Nanchang 330001, China)

**Abstract:** The control strategy of multi-UAV arriving simultaneously to attack multiple targets under uncertain environment was studied. By using auction algorithm together with interval consensus algorithm, a control algorithm of multi-UAV simultaneous arrival under uncertain environment was proposed. At first, a task assignment method for multi-UAV to multi-target was presented through auction algorithm. After that, interval consensus algorithm was defined, and control method for multi-UAV simultaneous arrival under uncertain environment was presented, achieving the object of multi-UAV arriving at multi-target simultaneously in an interval value. Simulation was made, and the results demonstrate the feasibility and effectiveness of the method.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; multi-target attacking; uncertain information; auction algorithm; task assignment

### 0 引言

近年来,多智能体系统一致性问题已成为一个研究热点。目前,国内外学者应用一致性问题研究已取得一些研究成果,文献[1]设计了一种在 $N$ 维空间情况下用于多智能体群集的时间连续模型,研究了一致性模型的稳定性能;文献[2]研究了有向网络的加权一致性和多智能体时滞网络的加权平均一致性问题,但其仅讨论了一阶系统;文献[3]针对多智能体网络结构系统问题提出了多智能体网络系统一致收敛准则;文献[4]研究了二阶线性多智能体网络的平均一致问题,分别给出了二阶多智能体网络的 $P$ 平均一致问题和 $PV$ 平均一致问题的定义,并提出了一种解

决协议;文献[5]针对带时滞一致性算法、一致性估计、异质网络中的一致性算法和一致性滤波算法在复杂网络中的应用等问题进行了研究;文献[6]分析了拓扑结构为固定和动态变化两种情况下的网络一致性问题,提出了网络有延时和无延时情况下的两个不同控制策略;文献[7]建立了多机协同目标分配问题的数学模型,提出了基于多智能体分布协同拍卖的动态目标分配算法,仿真结果表明,该算法能够在规定时间或资源约束下得到满足一定优化需求的目标分配方案。

综上所述,虽然国内外学者已经对多智能体系统的协调控制与决策问题进行了许多研究,但在多无人机的实战环境中,由于机载传感器的精度限制、战场的动态变化和各种干扰的影响,获得的常常是不一致的感知信息,这些信息可在数学上表述为不确定信息<sup>[8]</sup>,针对这些不确定信息的作战问题尚未解决。故本文针对不确定信息下的多无人机同时攻击多个目标的问题进行研

究,先运用拍卖算法对多架无人机进行分组,给出多无人机到达多目标的任务分配方法,然后采用不确定信息下的一致性算法,使得多无人机到达多目标的时间趋于一致,以实现多无人机同时攻击多目标的目的。

## 1 无人机和任务分配模型

### 1.1 无人机的质点运动模型

将无人机看作二维平面内运动的质点,其简化运动模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \varphi_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \varphi_i \\ \dot{\varphi}_i = \omega_i \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $x_i, y_i$ 为第*i*架无人机在平面中的位置坐标; $v_i, \varphi_i$ 和 $\omega_i$ 分别为第*i*架无人机的飞行速度、航向角和航向角速度。在实际飞行中,无人机飞行速度、加速度和航向角限制为

$$\begin{cases} 0 < v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max} \\ a_{\min} \leq a_i \leq a_{\max} \\ |\varphi_i| \leq \varphi_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

无人机的飞行控制系统具有自动驾驶仪的速度保持功能,可以跟踪给定的速度指令,自动驾驶仪的速度保持用一阶动态模型近似描述。由于机载传感器的精度限制和各种干扰的影响,本文速度指令和速度以区间形式给出,则不确定信息下的速度保持一阶动态模型近似描述为

$$\begin{aligned} [\dot{v}_i^-, \dot{v}_i^+] &= \alpha_{v,i} ([v_i^{c-}, v_i^{c+}] - [v_i^-, v_i^+]) = \\ &\alpha_{v,i} ([v_i^{c-} - v_i^-, v_i^{c+} - v_i^+]) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $[v_i^{c-}, v_i^{c+}]$ 为第*i*架无人机的速度区间指令; $\alpha_{v,i}$ 为正常数。

### 1.2 基于拍卖算法的多目标攻击分配模型

设有*n*架无人机和*m*个目标,目标分配矩阵定义为 $\mathbf{X} = [x_{ij}]_{n \times m}$ ,目标分配变量定义为

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{无人机 } i \text{ 攻击目标 } j, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ 0 & \text{无人机 } i \text{ 不攻击目标 } j, \quad j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (4)$$

设 $l(x_{ij}) = [l^-(x_{ij}), l^+(x_{ij})]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。其中, $l^-(x_{ij})$ 和 $l^+(x_{ij})$ 分别表示无人机*i*到达目标*j*距离的上下界。则目标函数定义为

$$[L^-, L^+] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [l^-(x_{ij}), l^+(x_{ij})] \quad (5)$$

最优目标分配结果定义为

$$[X^{*-}, X^{*+}] = \arg \min [L^-, L^+] \quad (6)$$

无人机实时进行路径规划,并近似计算出到达目标的剩余距离 $l(x_{ij})$ ,所有的无人机到目标的距离和为*L*,求其最小值。

拍卖算法<sup>[9-11]</sup>是由美国的 Dimitri 根据拍卖的思想提出的,主要用于解决资源分配问题。本文中以无人飞机为竞拍者,以目标为竞拍对象,以路径长度为目标函数,如式(5)所示,由于距离数值为一个区间数值,因此需要用拍卖算法分别计算区间值的上下界,来确定目标的分配结果。具体拍卖过程步骤如下:

- 1) 初始化参数,给出多个目标和每架无人机所在初始位置坐标,根据路径规划模块规划的路径,计算不同无人机到达不同目标点的距离,设定循环次数;
- 2) 随机生成*N*个无人机的竞拍序列;
- 3) 竞拍开始,当前竞拍的无人机根据目标函数判断最优的目标分配的无人机数是否已满,若是,则从其余的目标中选择,否则选此目标作为要攻击的目标;
- 4) 更新各目标所分配的无人机个数,若所有的 UAV 都完成竞拍,则执行下一步骤,否则,转向步骤3);
- 5) 拍卖结束,计算当前生成的分配方案目标函数,并与上次形成的方案进行比较,若优于上次,则存储当前的方案,否则保留上次的方案;
- 6) 若循环结束则执行下一步骤,否则,转向步骤2);
- 7) 最后给出最优分配方案和目标函数。

## 2 不确定信息下的攻击多目标模型求解

### 2.1 图论与矩阵论基础

对于一个由多个智能体组成的结构体,用图论中的有向图来描述它们之间的通信关系是简单、有效的。

用 $G = (V, E)$ 来表示一个由多无人机组成的拓扑图,其中, $V$ 表示无人机编号的集合, $E \in V^2$ 表示有通信连接的无人机对的集合。若无人机*i*和无人机*j*之间有通信,则在拓扑图中表示两个节点有连边,即 $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$ 。如果智能体*i*可以接收到智能体*j*的信息,则智能体*j*是智能体*i*的邻居( $a_{ij} \neq 0$ ),智能体*i*的邻居集 $N_i$ 定义为 $N_i = \{j \in V: a_{ij} \neq 0\}$ 。若在在有向图中,则有箭头从*i*指向*j*,或由*j*指向*i*。若在无向图中,则无人机*i*与无人机*j*之间只有直线连接,即它们之间的连边没有方向, $(v_i, v_j) \in E \Leftrightarrow (v_j, v_i) \in E$ 。

由图论所得出的多无人机之间的通信关系,可引出矩阵论里面的几个相关矩阵<sup>[5]</sup>。

- 1) 邻接矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$ 。

对于由*n*个智能体组成的拓扑结构,其下标集为 $I = \{1, 2, \dots, n\}$ ,邻接矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$ 中的元素 $a_{ij}$ 定义为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & (v_j, v_i) \in E \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

- 2) 拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L} = [l_{ij}]_{n \times n}$ 。

其中的元素  $l_{ij}$  取值为

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} & i = j \\ -a_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

### 2.2 多智能体一致性算法理论

在一个由  $n$  个智能体组成的系统中,其通信关系用  $G = (V, E)$  来描述,其中每个节点代表一个智能体,且每个节点满足方程

$$\dot{\xi}_i = u_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

若所有的智能体最终的状态趋于相等,即当  $t \rightarrow \infty$  时,有  $\|\xi_i - \xi_j\| \rightarrow 0, i \neq j$  成立,则称该系统的状态趋于一致<sup>[6,12-14]</sup>。文献[5]给出了连续一致性算法模型为

$$u_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\xi_j(t) - \xi_i(t)) \quad (10)$$

式中: $a_{ij}$ 表示邻接矩阵中的元素; $N_i$ 表示智能体  $i$  的邻居集,定义为  $N_i = \{j \in V: a_{ij} \neq 0\}$ 。

当信息为不确定区间信息时,式(9)则转化为

$$[\dot{\xi}_i^-, \dot{\xi}_i^+] = [u_i^-, u_i^+] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

于是可得区间一致性算法为

$$[u_i^-, u_i^+] = \sum_{j \in N_i} a_{ij} ([\xi_j^- - \xi_i^-, \xi_j^+ - \xi_i^+]) \quad (12)$$

### 2.3 多无人机编队拓扑控制模型

考虑6架无人机攻击2个目标,每3架无人机攻击1个目标,则编队拓扑结构如图1所示。

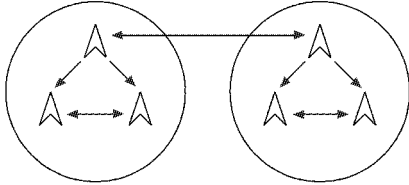


图1 多无人机编队拓扑结构图

Fig.1 Multi-UAV formation topology structure

编队间的通信是由两个编队的长机来完成的,则上述多无人机编队能否到达一致可由定理1判定。

**定理1**<sup>[6]</sup> 固定通信拓扑情况下,若编队1和编队2内部的通信拓扑结构均存在有向生成树,且编队1和编队2之间的通信由两个编队的领导节点完成,则编队1和编队2内部以及编队之间可实现全局渐近收敛或一致性可达。

对于存在拓扑结构变换的情况,如编队1中的成员由于任务的变更成为了编队2中的成员,此时设网络的动态拓扑图为  $G_i$ ,网络拓扑集为  $\Gamma = \{G_1, G_2, \dots, G_m\}$ ,则网络拓扑切换时系统是否到达可由定理2判定。

**定理2**<sup>[6]</sup> 由多智能体组成的网络拓扑结构为  $G_i$ ,其中  $G_i \in \Gamma$ ,假设  $\Gamma$  中的每个拓扑图都为平衡有向图且为强连通图,则对任意初始状态,系统最终渐近收

敛到平均一致。

### 2.4 多无人机同时到达控制策略求解

由于各个智能体通过局部信息传递,使它们最终的状态收敛到一致,令  $[L_i^-, L_i^+]$  为第  $i$  架无人机在  $t$  时刻到达目标的剩余路径长度区间值,其中,  $L_i^-$  表示到达目标的最小距离长度,  $L_i^+$  表示到达目标的最大距离长度,  $[L_i^-, L_i^+]$  是  $t$  的函数。对  $[L_i^-, L_i^+]$  关于  $t$  求导可得:  $[\dot{L}_i^-, \dot{L}_i^+] = -[v_i^-, v_i^+]$ , 第  $i$  架无人机能实时估算出  $t$  时刻它的期望到达时刻为

$$[\zeta_i^-, \zeta_i^+] = t + [\tau_i^-, \tau_i^+] = t + \left[ \frac{L_i^-}{v_i^-}, \frac{L_i^+}{v_i^+} \right] \quad (13)$$

式中,  $[\tau_i^-, \tau_i^+]$  为第  $i$  架无人机在  $t$  时刻的期望到达时间。对式(13)关于  $t$  求导,并与式(3)结合,得到

$$[v_i^{e-}, v_i^{e+}] = [v_i^-, v_i^+] - \left[ \frac{u_i^- \cdot v_i^-}{\alpha \cdot \tau_i^-}, \frac{u_i^+ \cdot v_i^+}{\alpha \cdot \tau_i^+} \right] \quad (14)$$

联立式(12)和式(14)可得,区间信息条件下的多无人机同时到达的控制策略为

$$\begin{cases} [v_i^{e-}, v_i^{e+}] = [v_i^-, v_i^+] - \left[ \frac{u_i^- \cdot v_i^-}{\alpha \cdot \tau_i^-}, \frac{u_i^+ \cdot v_i^+}{\alpha \cdot \tau_i^+} \right] \\ [u_i^-, u_i^+] = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} ([\xi_j^- - \zeta_j^-, \xi_j^+ - \zeta_j^+]) \end{cases} \quad (15)$$

### 3 算例仿真分析

假定由5架无人机攻击2个目标,所有无人机型号相同,其特征参数最小飞行速度  $v_{\min}$  为 98 m/s,最大飞行速度  $v_{\max}$  为 240 m/s,最小加速度  $a_{\min}$  为  $-7.8 \text{ m/s}^2$ ,最大加速度  $a_{\max}$  为  $8.2 \text{ m/s}^2$ 。各架无人机的初始状态取值见表1,其中,初始路径长度1代表各架无人机到目标1之间的距离区间值,初始路径长度2代表各架无人机到目标2之间的距离区间值。每个目标至少分配2架无人机,则有3架无人机攻击其中一个目标,另外2架无人机攻击另一个目标。无人机编队的拓扑结构如图2所示。

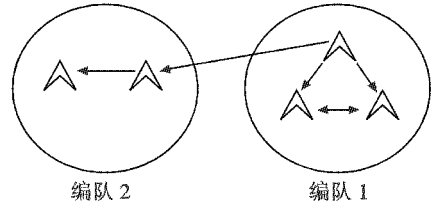


图2 编队内和编队间的通信拓扑结构

Fig.2 Inner and outer formation communication topology

从图2可以看出,编队1中的第一架为编队1的领机,同时也是两个编队的领机。经过拍卖算法将5架无人机分成两个编队,编队内的无人机通过一致性,使它们的状态达到一致,即期望到达时间相同。同时,编队间的联系由两个编队的领队完成,无人机编队结

构最终可以实现多无人机同时到达不同的目标进行攻击,图3为其态势示意图。

表1 各架无人机的初始参数

Table 1 Each UAV's initial state parameters

无人机	初始速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	距目标1 初始距离/km	距目标2 初始距离/km
UAV1	245	[40.5,46.6]	[29.8,32.5]
UAV2	152	[33.8,37.8]	[52.5,56.3]
UAV3	190	[32.3,35.8]	[34.6,37.5]
UAV4	210	[35.2,37.5]	[46.4,48.1]
UAV5	235	[29.8,30.6]	[43.8,51.5]

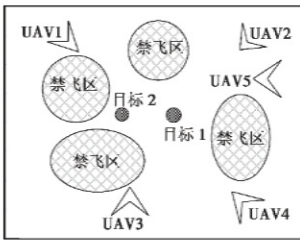


图3 多无人机同时到达攻击多目标示意图

Fig.3 Multiple UAVs arrive simultaneously to attack multiple targets

由定理1可以证明,图2所示的无人机编队结构最终可以实现多无人机同时到达不同的目标。

根据本文的协同控制方法,在无人机的起始位置运用拍卖算法分别对区间信息值的上下界进行任务分配,满足目标函数的要求,即总的路径代价最小,其中图4和图5中,剩余路径长度用  $l$  表示,飞行速度用  $v$  表示,期望到达时间用  $\tau$  表示,图4的路径长度为各无人机所选路径长度区间值的上界值,图5的路径长度为各无人机所选路径长度区间值的下界值。可以看出,在30s左右期望到达时间收敛为相同的值,即期望到达时间达到一致,最终到达目标点的最短时间约为190s。图6中,期望达到时间同样在30s左右收敛为相同的值,但由于路径长度为所选路径长度区间值的上界值,所以最终到达目标点的时间有所延长,最长时间为210s,即在路径长度为区间值时,到达时间也为区间值。分别对区间信息值的上下界进行任务分配,求得的任务分配结果为 UAV1、UAV3 和 UAV5 攻击目标1, UAV2 和 UAV4 攻击目标2,此时满足目标函数的要求,即总的路径代价最小,分别为160.2 km和171 km,此时 UAV1 的路径长度为[33.8 km,37.8 km], UAV2 的路径长度为[29.8 km,32.5 km], UAV3 的路径长度为[35.2 km,37.5 km], UAV4 的路径长度为[34.6 km,37.5 km], UAV5 的路径长度为[29.8 km,30.6 km]。然后,5架无人机按照图2所示的拓扑结构进行通信,最终实现同时到达攻击多目标任务。

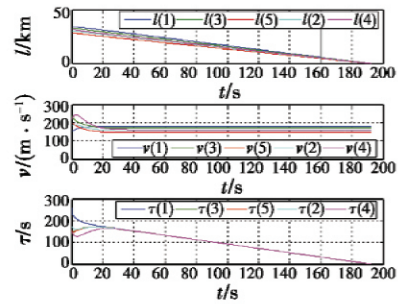


图4 多无人机信息区间上界协同控制

Fig.4 Coordinated control to multi-UAV on upper bounds of the information interval

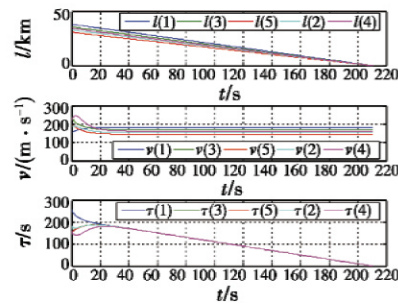


图5 多无人机信息区间下界协同控制

Fig.5 Coordinated control to multi-UAV on lower bounds of the information interval

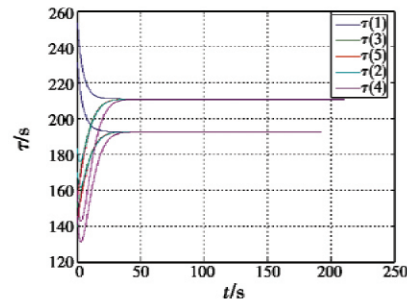


图6 多无人机同时到达多目标的期望到达时间区间

Fig.6 Expected arrival time interval for multiple UAVs arriving simultaneously

### 4 结束语

本文针对不确定信息下多无人机同时到达攻击多个目标问题进行了研究,首先运用拍卖算法对多架无人机进行多目标攻击任务分配,然后运用区间一致性算法使得多无人机在一定时间范围内同时到达多个目标,最后在算例中进行仿真。从仿真结果来看,该方法能够实现多无人机同时攻击多个目标任务分配,为多无人机对地作战提供一种有效的方法。

### 参考文献

[1] GAZI V, PASSINO K M. Stability analysis of swarms[J]. Automatic Control, 2003, 48(3):692-697.

- [2] 俞辉, 蹇继贵, 王永骥. 多智能体有向网络的加权平均一致性[J]. 微计算机信息, 2007, 23(5): 239-241. (YU H, JIAN J G, WANG Y J. Weighted average-consensus for directed networks of multi-agent[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(5): 239-241.)
- [3] 谭拂晓, 关新平, 刘德荣. 非平衡拓扑结构的多智能体网络系统一致性协议[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10): 1087-1092. (TAN F X, GUAN X P, LIU D R. Consensus protocol in networked multi-agent systems with non-balanced topology[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(10): 1087-1092.)
- [4] 吕红庆, 贾英民. 二阶线性多智能体网络平均一致性问题研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(8): 1130-1137. (LÜ H Q, JIA Y M. Research on multi-agent network of second-order[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(8): 1130-1137.)
- [5] 杨文. 多智能体系统一致性问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (YANG W. Consensus problem in multi-agent systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.)
- [6] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [7] 陈侠, 赵明明, 徐光延. 基于模糊动态博弈的多无人机空战策略研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(6): 19-23. (CHEN X, ZHAO M M, XU G Y. Fuzzy dynamic game based operation strategy for multiple UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(6): 19-23.)
- [8] 廖沫, 陈宗基. 基于多 Agent 分布协同拍卖的动态目标分配算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 180-196. (LIAO M, CHEN Z J. Dynamic target assignment method based on multi-agent decentralized cooperative auction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2): 180-196.)
- [9] BERTSEKAS D P. The auction algorithm: A distributed relaxation method for the assignment problem[J]. Annals of Operations Research, 1988, 14(1): 105-123.
- [10] 于文涛, 彭军, 吴敏, 等. 基于拍卖的多智能体任务分配算法[J]. 计算机仿真, 2008, 25(12): 184-188. (YU W T, PENG J, WU M, et al. A MAS task allocation algorithm based on auction[J]. Computer Simulation, 2008, 25(12): 184-188.)
- [11] MOORE K L, LUCARELLI D. Decentralized adaptive scheduling using consensus variables [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2006, 17(10): 921-940.
- [12] REN W. Multi-vehicle consensus with a time-varying reference state [J]. System & Control Letters, 2007(1): 474-483.
- [13] WHEELER M, SCHRICK B, WHITACRE W, et al. Cooperative tracking of moving targets by a team of autonomous UAVs [C]//The 25th Digital Avionics Systems Conference, IEEE, 2006: 1-9.
- [14] 周锐, 吴雯漫, 罗广文. 自主无人机的分散化协同控制[J]. 航空学报, 2008, 29(s1): 26-32. (ZHOU R, WU W M, LUO G W. Decentralized coordination control of multiple autonomous UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(s1): 26-32.)

(上接第79页)

#### 4 结束语

本文将联合概率数据关联算法应用到光电探测设备地杂波的滤除问题上。仿真结果表明, 该算法能有效剔除检测时由闪烁杂波产生的虚警, 提高了产品检测性能, 具有良好的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 赵强, 刘隆和. 红外成像制导及其目标背景特性分析[J]. 航天电子对抗, 2006, 22(1): 27-29. (ZHAO Q, LIU L H. IR imaging guidance and analysis of targets background characteristic[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2006, 22(1): 27-29.)
- [2] 何友, 修建娟, 关欣, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013. (HE Y, XIU J J, GUAN X, et al. Radar data processing with applications[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.)
- [3] 曾斯. 多机动目标跟踪中数据关联算法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011. (ZENG S. Research on data association algorithm of multiple maneuvering target tracking [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [4] 张成宝. 密集目标环境下的数据关联算法研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2013. (ZHANG C B. Research on data association algorithm in dense clutter environment [D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2013.)
- [5] 冯洋. 多目标跟踪的数据关联算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. (FENG Y. Research on data association algorithm of multiple target tracking[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.)