

# 多 UCAV 协同目标攻击决策

宋磊, 黄长强, 吴文超, 李望西, 轩永波

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** 针对多无人作战飞机(unmanned combat aerial vehicle, UCAV)攻击多目标, 研究了多 UCAV 协同攻击决策问题。建立了目标毁伤模型、UCAV 损耗模型和时间协同模型, 并通过加权求和将三者转化为单一目标函数, 进而转化为单目标问题进行求解。提出了一种离散微粒群优化(discrete particle swarm optimization, DPSO)算法, 在微粒群优化算法框架内重新定义了微粒的位置、速度及相关操作。建立了微粒与实际问题的映射关系, 进而使 DPSO 算法适合于求解多 UCAV 协同目标攻击决策问题。仿真结果表明, DPSO 算法易于实现, 能够较好地解决基于时间协同的多 UCAV 目标攻击决策问题。

**关键词:** 多无人作战飞机; 目标攻击决策; 离散微粒群优化; 时间协同

中图分类号: V 279

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2011.07.22

## Target attack decision-making for cooperating multi-UCAV

SONG Lei, HUANG Chang-qiang, WU Wen-chao, LI Wang-xi, XUAN Yong-bo

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Target attack decision-making for cooperating multiple unmanned combat aerial vehicle (multi-UCAV) is discussed to solve the problem of attacking multi-target. Models of target damage, UCAV attritions and timing cooperation are formulated. And these models are translated into a single target function and then proceed to single-target optimization problem. A new discrete particle swarm optimization (DPSO) algorithm is proposed, and particles' position, speed and relative operations are newly defined within a framework of the particle swarm optimization (PSO) algorithm. A mapping rule is established between particles and the problem so as to make DPSO algorithm suitable for target attack decision-making. The simulation results show that the algorithm is simple and could effectively solve the problem of target attack decision-making for multi-UCAV based on timing cooperation.

**Keywords:** multiple unmanned combat aerial vehicle (multi-UCAV); target attack decision-making; discrete particle swarm optimization (DPSO); timing cooperation

## 0 引言

多无人作战飞机(unmanned combat aerial vehicle, UCAV)协同目标攻击决策研究的是如何将所有想要攻击的目标合理地分配给协同作战的 UCAV, 是 UCAV 任务规划的重要环节<sup>[1]</sup>。多 UCAV 协同目标攻击决策问题不仅要考虑目标的毁伤效果和 UCAV 付出的代价, 而且必须考虑多 UCAV 协调一致共同执行任务的时间协同, 使其攻击效果达到最优或近似最优。在对地攻击中, 多 UCAV 按照一定的时间协同关系, 采用饱和攻击战术可以达到较好的作战效果。因此, 多 UCAV 目标攻击决策结果应保证: 目标毁伤尽可能大; UCAV 损耗尽可能小; 多 UCAV 攻击目标必须按照正确的顺序执行。

多 UCAV 协同目标攻击决策是无人机(unmanned aer-

ial vehicle, UAV)领域研究的热点问题。文献[2-5]研究了多 UAV 的任务分配问题, 易于实现, 但模型过于简单不能较好地描述多 UAV 协同作战的关键指标, 而且算法收敛速度较慢; 文献[6-8]分别采用不同的微粒群算法研究了多 UCAV 的目标分配问题, 文献[9]以耗费比和生存概率为代价函数研究了多 UCAV 的任务分配问题, 模型较为全面, 但没有考虑多 UCAV 的时间协同问题; 文献[10]采用遗传算法研究了多 UAV 同时完成任务的目标分配问题, 但模型不够全面。多 UCAV 协同目标攻击所要解决的协同问题主要是时间协同, 也就是使执行任务的 UCAV 同时或依次到达目标区域实施攻击。本文采用离散微粒群优化(discrete particle swarm optimization, DPSO)算法, 在目标和备选航路已知的情况下, 研究如何分配目标使多 UCAV 达到最优攻击效果。

收稿日期: 2010-04-20; 修回日期: 2011-03-05。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2009AAJ205); 空军工程大学研究生科技创新计划(DX2010108)资助课题

作者简介: 宋磊(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无人机任务规划、机载精确制导武器技术。E-mail: 12345678songlei@163.com

## 1 问题描述

为便于研究,作如下假设:

- (1) 假设目标位置、威胁、UCAV 备选航路均已知。
- (2) 设有  $N_T$  个目标、 $N_U$  架 UCAV, 且有  $N_U > N_T$ 。每

组编队有  $n_t$  架 UCAV 组成, 攻击第  $t$  个目标,  $\sum_{t=1}^{N_T} n_t = N_U$  且  $n_t \geq 1$ 。每架 UCAV 必须在目标区域会合后进行同时攻击, 或依次到达目标区域实施连续攻击。

(3) 每架 UCAV 的速度 ( $V_{\min} \leq V_u \leq V_{\max}$ ) 是可变的, 通过改变 UCAV 的速度可以调节到达目标区域的时间。

## 2 数学模型的建立

首先, 定义决策变量  $x_{u,t}$  为

$$x_{u,t} = \begin{cases} 1, & \text{第 } u \text{ 架 UCAV 分配给目标 } t \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $u = 1, \dots, N_U$ ;  $t = 1, \dots, N_T$ 。

### 2.1 目标毁伤模型

多UCAV目标攻击决策的结果就是使重要目标分配到多架UCAV。设目标  $t$  的价值为  $V_t$ , 第  $u$  架 UCAV 对第  $t$  个目标进行攻击时的杀伤概率为  $P_{u,t}$ , 分配给目标  $t$  的UCAV 集合为  $G = \{u | u \text{ 是第 } t \text{ 组 UCAV 编队中的一员}\} = \{g_1, g_2, \dots, g_{n_t}\}$ 。多UCAV 作战目的是使目标毁伤最大化, 则目标毁伤模型为

$$\max J_1 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{u=1}^{N_U} V_t \left[ 1 - \prod_{u \in G_t} (1 - P_{u,t}) \right] x_{u,t} \quad (1)$$

### 2.2 UCAV 损耗模型

多UCAV目标攻击既要保证攻击效果最优, 又要保证自身损耗最小。设第  $u$  架 UCAV 攻击目标  $t$  时的生存概率为  $S_{u,t}$ , 则  $1 - S_{u,t}$  表示第  $u$  架 UCAV 攻击目标  $t$  时的损耗, UCAV 损耗模型为

$$\min J_2 = \sum_{u=1}^{N_U} \sum_{t=1}^{N_T} \left[ \prod_{u \in G_t} (1 - S_{u,t}) \right] x_{u,t} \quad (2)$$

### 2.3 时间协同模型

时间协同的目标是使多架 UCAV 同时到达或依次到达目标区域。UCAV 编队对单个目标进行同时攻击, 须考虑同时到达的时间协同; 若要连续性攻击, 则须考虑依次顺序到达的时间协同<sup>[11-12]</sup>。根据 UCAV 的备选航路可以计算 UCAV 到达目标区域的时间, 第  $u$  架 UCAV 到达目标  $t$  的时间  $T_{u,t}$  满足

$$T_{u,t} \in [L_{u,t} / V_{\max}, L_{u,t} / V_{\min}] \quad (3)$$

式中,  $L_{u,t}$  为第  $u$  架 UCAV 攻击第  $t$  个目标的航路长度,  $u \in G_t$ 。

对于 UCAV 编队同时攻击的情况, UCAV 编队到达目标  $t$  的时间  $T_t$  满足

$$T_t \in T_{g_1,t} \cap T_{g_2,t} \cdots \cap T_{g_{n_t},t} \quad (4)$$

$$T_{u,t} = \{T | \min T_{u,t} \leq T \leq \max T_{u,t}\} \quad (5)$$

对于 UCAV 编队连续性攻击的情况, 令  $\Delta_{t-1,n}$  是对同一目标完成第  $n-1$  次和第  $n$  次攻击的时间间隔,  $G_t$  满足

$$\min T_{g_1,t} \leq \min T_{g_2,t} \leq \cdots \leq \min T_{g_{n_t},t} \quad (6)$$

则, UCAV 编队到达目标  $t$  的时间  $T_t$  由式(7)决定

$$T_t \in T'_{g_1,t} \cap T'_{g_2,t} \cdots \cap T'_{g_{n_t},t} \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} T'_{g_1,t} &= \{T | \min T_{g_2,t} - \Delta_{1,2} \leq T \leq \max T_{g_2,t}\} \\ T'_{g_3,t} &= \{T | \min T_{g_3,t} - (\Delta_{1,2} + \Delta_{2,3}) \leq T \leq \max T_{g_3,t}\} \\ &\vdots \\ T'_{g_{n_t},t} &= \{T | \min T_{g_{n_t},t} - (\Delta_{1,2} + \Delta_{2,3} + \cdots + \Delta_{(n_t-1),n_t}) \leq \\ &\quad T \leq \max T_{g_{n_t},t}\} \end{aligned} \quad (8)$$

对于连续性攻击, 还需满足式(9)给出的条件限制

$$\begin{aligned} T_t + \Delta_{1,2} &\in T_{2,t} \\ T_t + \Delta_{1,2} + \Delta_{2,3} &\in T_{3,t} \\ &\vdots \\ T_t + \Delta_{1,2} + \Delta_{2,3} + \cdots + \Delta_{(n_t-1),n_t} &\in T_{n_t,t} \end{aligned} \quad (9)$$

UCAV 编队对目标进行攻击不仅要保证时间协同, 而且要保证损耗时间尽可能小, 则多UCAV目标攻击的时间协同模型为

$$\min J_3 = \sum_{u=1}^{N_U} \sum_{t=1}^{N_T} T_t x_{u,t} \quad (10)$$

式中,  $T_t$  为对第  $t$  个目标完成攻击所需要的时间。对于同时攻击的情况,  $T_t$  仅表示完成攻击所需要的时间; 对于连续性攻击的情况,  $T_t$  表示对第  $t$  个目标完成最后一次所需要的时间。

### 2.4 多目标处理

多UCAV协同目标攻击决策是一种复杂的多目标优化和决策问题。将多目标函数整合为单一目标函数, 是处理多目标优化问题最简单的策略<sup>[13-14]</sup>。对于上述目标函数, 采用加权线性累加整合为单一目标函数  $f$ , 表示为

$$\min f = -a_1 J'_1 + a_2 J'_2 + a_3 J'_3 \quad (11)$$

式中,  $J'_1, J'_2, J'_3$  分别是  $J_1, J_2, J_3$  量纲转换后的目标函数;

$a_i$  为第  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 个目标函数的权值,  $\sum_{i=1}^3 a_i = 1$ 。显然, 在算法的优化过程中, 每一组权向量将决定目标空间中的一个搜索方向。为了获得尽可能多的非劣解, 权值按如下方式确定

$$a_i = rand_i \setminus \sum_{i=1}^3 rand_i \quad (12)$$

式中,  $rand_i$  为 0~1 之间均匀分布的随机数。种群中的每一个微粒均由式(12)确定一组权值。

## 3 DPSO 算法

标准微粒群优化(particle swarm optimization, PSO)算法是面向连续优化问题的, 为了使其适用于解决多UCAV协同目标攻击决策问题, 本文通过对 PSO 算法进行处理, 提出了一种有效的 DPSO 算法。首先, 设计粒子编码方式, 用于实现从微粒的位置矢量向目标分配的转换, 进而使 PSO 算法适合于求解多UCAV目标攻击决策问题; 其次, 在 PSO 优化框架内重新定义微粒的位置、速度及相关的操作, 以保证算法具有较好的优化性能。

### 3.1 编码方式

寻找合适的表示方法使微粒与可行解对应是求解问题的关键。本文研究的重点是  $N_U$  架 UCAV 的目标攻击决策, 因此, 构建  $d(d=N_U)$  维搜索空间对应  $N_U$  架 UCAV 的目标分配问题, 每个微粒的位置矢量  $X_i$  表示所攻击目标的序号。例如, 5 架 UCAV 攻击 3 个目标, 微粒位置矢量  $X_i$  的编码如表 1 所示。其中 UCAV 1 和 UCAV 2 协同攻击目标 1, UCAV 3 攻击目标 2, UCAV 4 和 UCAV 5 协同攻击目标 3。

表 1 微粒位置矢量的编码方式

UCAV no.	UCAV1	UCAV2	UCAV3	UCAV4	UCAV5
$X_i$	1	1	2	3	3

### 3.2 DPSO 算法的操作

DPSO 的位置、速度及其相关操作定义如下<sup>[15-16]</sup>：

(1) 微粒的位置和速度。DPSO 算法的初始种群是在解空间中随机产生的。微粒的位置矢量  $X=(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_d)$ , 速度矢量  $V=(v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_d)$ , 其中  $x_i \in (1, 2, \dots, N_T)$ ,  $v_i \in (0, 1, \dots, N_T)$ ,  $d=N_U$ 。

(2) 位置和速度的加法操作。在更新微粒的位置时, 按式(13)进行, 这种更新操作称为位置与速度的加法操作, 记作  $X_2=X_1+V$ ,  $X_2$  为新位置,  $X_1$  为旧位置。例如, 6 架 UCAV 攻击 3 个目标, 当前位置矢量为  $X_1=(1, 3, 1, 2, 2, 3)$ , 速度矢量为  $V=(0, 1, 2, 0, 3, 0)$ , 由于第 1, 4, 6 维速度为 0, 于是相应维的位置保持不变, 而第 2, 3, 5 维速度不为 0, 于是相应维的位置和速度进行交换, 因此新位置  $X_2=(1, 1, 2, 2, 3, 3)$ 。

$$x_{2,i} = \begin{cases} x_{1,i}, & v_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_U \\ v_i, & v_i \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

(3) 位置间的减法操作。两个位置相减的结果是速度, 记作  $V=X_2-X_1$ 。为了把  $V$  作用于  $X_1$  得到  $X_2$ ,  $V$  按式(14)确定。需要说明的是, 这种位置间的减法操作通常不是位置与速度加法操作的逆运算。

$$v_i = \begin{cases} 0, & x_{1,i} = x_{2,i}, \quad i = 1, 2, \dots, N_U \\ x_{2,i} - x_{1,i}, & x_{1,i} \neq x_{2,i} \end{cases} \quad (14)$$

(4) 速度的数乘操作。速度的数乘表示为  $V_2=c \cdot V_1$ , 其中  $c$  为 0~1 之间的常数。操作方式按式(15)执行,  $rand$  为 0~1 均匀分布的随机数。

$$v_{2,i} = \begin{cases} v_{1,i}, & rand \geq c, \quad i = 1, 2, \dots, N_U \\ 0, & rand < c \end{cases} \quad (15)$$

(5) 速度的加法操作。两个速度相加将得到一个新速度, 表示为  $V=V_2+V_1$ , 其中新速度按式(16)确定, 即

$$v_i = \begin{cases} v_{1,i}, & v_{1,i} \neq 0, \quad v_{2,i} = 0 \\ v_{1,i}, & v_{1,i} \neq 0, \quad v_{2,i} \neq 0, \quad rand < 0.5 \\ v_{2,i}, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

$i = 1, 2, \dots, N_U$

(6) 微粒的位置和速度更新公式。通过对微粒位置、速度及其操作的特殊定义, 沿用标准 PSO 更新公式的形式, 给出 DPSO 算法微粒速度和位置的更新公式

$$\begin{aligned} V_i(k+1) &= c_1 \cdot (X_{ipbest}(k) - X_i(k)) + \\ &\quad c_2 \cdot (X_{gbest}(k) - X_i(k)) \\ X_i(k+1) &= X_i(k) + V_i(k+1) \end{aligned} \quad (17)$$

式中,  $X_{ipbest}(k)$  为微粒当前搜索到的最佳位置;  $X_{gbest}(k)$  为群体当前搜索到的最佳位置。显然, 微粒的更新公式中用到了位置与速度的加法操作、位置间的减法操作、速度的数乘操作和速度间的加法操作。在多 UCAV 协同目标攻击决策中, 这些特殊的操作能够保证微粒位置的可行性。

### 3.3 DPSO 算法流程

通过上述环节的设计, 求解多 UCAV 目标攻击决策的 DPSO 算法的具体步骤如下。

步骤 1 初始化  $c_1, c_2$ , 随机产生  $a_1, a_2, a_3$ 。

步骤 2 初始化微粒的位置矢量  $X_i(0)=(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d})$ , 每一维随机取  $1 \sim N_T$  之间的整数; 初始化微粒的速度矢量  $V_i(0)=(v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d})$ , 每一维随机取  $0 \sim N_T$  之间的整数。其中,  $d=N_U, i=1, 2, \dots, m$ 。

步骤 3 令  $X_{ipbest}(0)=X_i(0)$ ; 评价各微粒的适应度值, 根据  $f(0)=\min\{f_1(0), f_2(0), \dots, f_m(0)\}$  确定群体最佳位置  $X_{gbest}(0)$ 。

步骤 4 重复执行下列步骤, 直到群体最佳位置的适应度值满足要求:

(1) 令  $k=k+1$ , 采用式(17)更新  $V_i(k)$  和  $X_i(k)$ ;

(2) 随机产生  $a_1, a_2, a_3$ , 计算各微粒的适应度值  $f_1(k), f_2(k), \dots, f_m(k)$ ;

(3) 更新各微粒的  $X_{ipbest}(k)$  以及群体的  $X_{gbest}(k)$ 。

步骤 5 输出与群体最佳位置对应的目标攻击决策结果。

## 4 仿真分析

本文对 6 架 UCAV 攻击 3 个目标的情况进行仿真。目标价值和 UCAV 对目标的杀伤概率如表 2 所示。假设 6 架 UCAV 从不同的地点起飞, 飞行速度为 20 m/s~35 m/s, 每组 UCAV 编队对所分配的目标进行同时攻击, 任务条件包括 3 个目标和 32 个已知位置的威胁点, 采用 Voronoi 图生成的备选航路如图 1 所示<sup>[17]</sup>。

表 2 目标价值和 UCAV 对目标的杀伤概率

UCAV no.	UCAV1	UCAV2	UCAV3	UCAV4	UCAV5	UCAV6
Target1	0.3	0.9	0.3	0.7	0.4	0.6
Target2	0.7	0.2	0.8	0.3	0.9	0.2
Target3	0.7	0.4	0.5	0.3	0.2	0.7

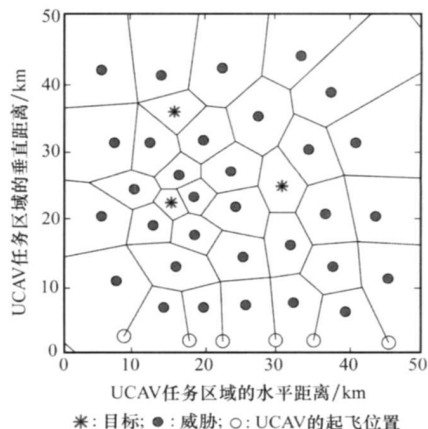
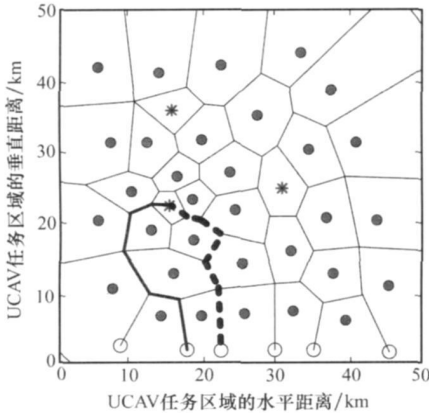


图 1 Voronoi 图生成的备选航路

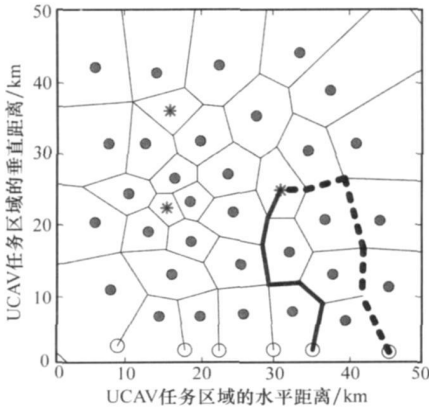
多UCAV协同目标攻击决策的最优解如表3所示。根据图1的备选航路,6架UCAV目标攻击的最优决策结果如图2所示。图3是UCAV编队的时间协同仿真图。从图3可以看出,在UCAV飞行速度范围内,每组UCAV编队是同时达到目标区域的。

表3 目标分配的最优解

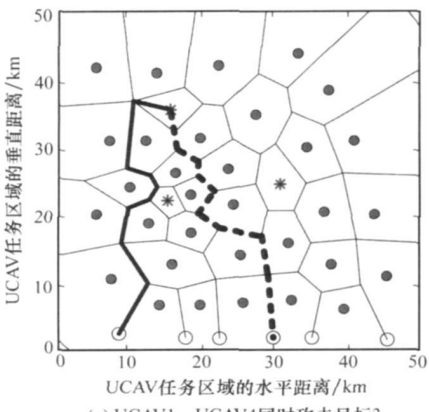
UCAV no.	UCAV1	UCAV2	UCAV3	UCAV4	UCAV5	UCAV6
Target no.	3	1	1	3	2	2



(a) UCAV2、UCAV3同时攻击目标1



(b) UCAV5、UCAV6同时攻击目标2



(c) UCAV1、UCAV4同时攻击目标3

※: 目标; ●: 威胁; ○: UCAV的起飞位置

图2 目标分配的最优结果

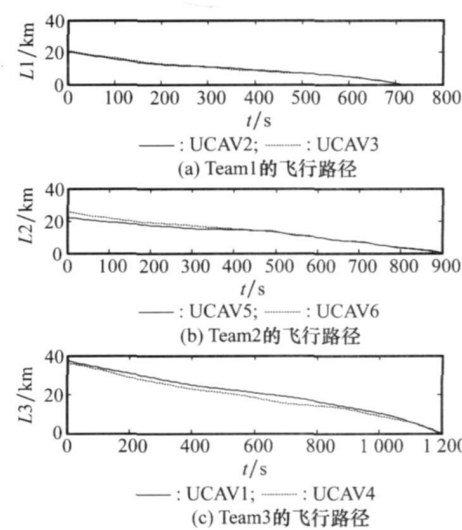


图3 编队飞行路径

5 结 论

本文针对多UCAV协同目标攻击的特点,综合目标毁伤、UCAV损耗和时间协同3项指标,建立了多UCAV协同目标攻击决策问题的数学模型。在标准PSO算法的基础上,提出了一种改进型的DPSO算法用于解决多UCAV协同攻击的目标分配问题。根据所设计的算法,多UCAV可以在规避威胁的情况下,选择合适的航路实现对目标的同时或连续攻击。仿真结果表明,本文设计的DPSO算法可以较好地解决基于时间协同的多UCAV协同目标攻击决策问题。同时,该算法也可以用于求解多目标、多约束的组合优化问题以及群体任务分配问题。

参考文献:

[1] 罗德林, 吴顺祥, 段海滨, 等. 无人机协同多目标攻击空战决策研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(24): 6778-6782. (Luo D L, Wu S X, Duan H B, et al. Air-combat decision-making for UAVs cooperatively attacking multiple targets[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(24): 6778-6782.)

[2] Darrah M A, Niland W M, Stolarik B M. UAV cooperative task assignment for a SEAD mission using genetic algorithms[C] // *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2006: 6456-6461.

[3] Darrah M A, Niland W M, Stolarik B M. Multiple UAV dynamic task allocation using mixed integer linear programming in SEAD mission[C] // *Proc. of the AIAA Infotech Conference*, 2005: 7164-7169.

[4] Sujit P B, Sinha A, Ghose D. Multiple UAV task allocation using negotiation[C] // *Proc. of the 5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2006: 303-309.

[5] Nygard K E, Chandler P R, Pachter M. Dynamic network optimization models for air vehicle resource allocation[C] // *Proc. of the American Control Conference*, 2001: 1853-1858.

[6] 叶文, 朱爱红, 潘长鹏, 等. 多UCAV协同目标分配算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 104-108. (Ye W, Zhu A H, Pan C P, et al. Cooperative target allocation algorithm for multiple UCAVs[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(1): 104-108.)

- Pan C P, et al. Cooperation mission assignment algorithm for multi-UCAV[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(1): 104-108.)
- [7] Curz J B, Jr C, Chen G. Particle swarm optimization for resource allocation in UAV cooperative control[C] // *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2004, 16-19.
- [8] 霍霄华, 陈岩, 朱华勇, 等. 多UCAV 协同控制中的任务分配模型及算法[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(3): 83-88. (Huo X H, Chen Y, Zhu H Y, et al. Study on task allocation model and algorithm for multi-UCAV cooperative control[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(3): 83-88.)
- [9] Serdar E, Mahmut K, Gary G. Advanced task assignment for unmanned combat aerial vehicles targeting cost efficiency and survivability[C] // *Proc. of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2008, 873-896.
- [10] Shima T, Schumacher C. Assignment of cooperating UAVs to simultaneous tasks using genetic algorithms[C] // *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2005, 5829-5836.
- [11] Eun Y, Bang H. Cooperative task assignment/path planning of multiple unmanned aerial vehicles using genetic algorithms[J]. *Journal of Aircraft*, 2009, 46(1): 338-343.
- [12] Eun Y, Bang H. Cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles using the potential field theory[J]. *Journal of Aircraft*, 2006, 43(6): 1805-1813.
- [13] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Particle swarm optimization method in multi-objective problems[C] // *Proc. of the ACM Symposium on Applied Computing*, 2002, 603-607.
- [14] Pulido G T, Coello C A C. Using clustering techniques to improve the performance of a multi-objective particle swarm optimizer[C] // *Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2004, 225-237.
- [15] 王凌, 刘波. 微粒群优化与调度算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 120-135. (Wang L, Liu B. *Particle swarm optimization and scheduling algorithm* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 120-135.)
- [16] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 16-25. (Ji Z, Liao H L, Wu Q H. *Particleswarm optimization algorithm and its application* [M]. Beijing: Science Press, 2009: 16-25.)
- [17] Wein R, Berg J P, Halperin D. The visibility-voronoi complex and its applications[C] // *Proc. of the European Workshop on Computational Geometry*, 2007, 66-87.

(上接第 1547 页)

## 参考文献:

- [1] 邓有训, 余志惠. 电子对抗力量实施协同作战问题之探讨[J]. 空军雷达学院学报, 2010, 24(2): 129-133. (Deng Y X, Yu Z H. Discussions about employing ECM force to implement coordinated operation[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2010, 24(2): 129-133.)
- [2] 李波, 高晓光. 编队空战中协同电子干扰的功率分配[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7): 1298-1300. (Li B, Gao X G. Algorithm of power allocation for cooperative electronic jamming in air combat of formation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(7): 1298-1300.)
- [3] Tekin E, Yener A. The general gaussian multiple-access and two-way wiretap channels: achievable rates and cooperative jamming[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2008, 54(6): 2735-2751.
- [4] Pham K D. Cooperative decision problems with confrontation of jamming and estimation: multi-resolution strategies for performance robustness[C] // *Proc. of the 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2008, 982-989.
- [5] Feng W J, Jiang W H, Wang R R. Joint resource allocation in cluster-based cognitive radio networks[C] // *Proc. of the International Conference on Communications and Mobile Computing*, 2010, 179-182.
- [6] 李德银, 刘昊. 噪声干扰 Link216 数据链的干扰功率分配方法[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(3): 7-9. (Li D Y, Liu H. Jamming power assignment method for suppressing Link216 data link with noise jamming[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2009, 25(3): 7-9.)
- [7] 徐振海, 王雪松, 肖顺平, 等. 雷达组网对抗中遮盖干扰功率优化分配[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(6): 655-657. (Xu Z H, Wang X S, Xiao S P, et al. Optimum allocation of barrage jamming power in netted radar countermeasure[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(6): 655-657.)
- [8] 张肃. 基于双层模糊规划的电子干扰资源优化分配算法[J]. 电子对抗, 2008, 4: 6-9. (Zhang S. Electronic jamming resource optimization assignment algorithm based on the bilevel fuzzy programming[J]. *Electronic Warfare*, 2008, 4: 6-9.)
- [9] Fehlmann T M. New Lanchester theory for requirements prioritization[C] // *Proc. of the International Workshop on Software Product Management*, 2008, 35-40.
- [10] Xiong C Q, Ma L L, Wu M H. A Lanchester equation and its solution considering the factor of terrain[C] // *Proc. of the International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2010, 134-137.
- [11] Chen X Y, Jing Y W, Li C J. Effectiveness evaluation of warfare command systems with dissymmetrical warfare information[C] // *Proc. of the American Control Conference*, 2010, 5556-5560.
- [12] Wu S H, Yang J J. Optimal military strength allocation for campaign between single-kind arms and multikind arms[C] // *Proc. of the 16th International Conference on Management Science and Engineering*, 2009, 303-308.
- [13] Sheeba P S, Ghose D. Optimal resource partitioning in conflicts based on Lanchester ( $n, 1$ ) attrition model[C] // *Proc. of the American Control Conference*, 2006, 638-643.
- [14] Sheeba P S, Ghose D. Optimal resource allocation in conflicts with the Lanchester linear law ( $2, 1$ ) model[C] // *Proc. of the American Control Conference*, 2008, 1806-1811.
- [15] Jiang N, Chen X Y, Hou C M. Warfare command and decision making analysis of information support based on lanchester equation[C] // *Proc. of the Chinese Control and Decision Conference*, 2010, 1351-1353.
- [16] 凌云翔, 马满好, 袁卫卫, 等. 作战模型与模拟[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 2006. (Lin Y X, Ma M H, Yuan W W, et al. *Operational model and simulation* [M]. Changsha: National Defence Science and Technology University Press, 2006.)