

多无人机分布式协同动态目标分配方法

陈洁钰¹, 姚佩阳¹, 唐剑¹, 贾方超²

(1.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077;2.空军大连士官学校,辽宁大连,116600)

摘要 在以“网络为中心”的作战模式下,以电子干扰无人机和UCAV编队协同作战为研究对象。针对多无人机协同作战的动态目标分配问题,建立基于导弹攻击区分析的威胁估计模型,综合考虑电子干扰效果建立目标分配模型,提出一种基于分布式拍卖机制的目标分配算法。针对不同的作战想定进行仿真计算,结果表明:算法能在规定的时间约束内给出接近理想化效果的目标分配方案,且所提算法与现有几种算法相比在可靠性、实时性上都有明显提高。

关键词 多无人机;电子干扰;目标分配;分布式拍卖

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.06.003

中图分类号 TP301;V249.122 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)06-0011-06

Multi-UAV Decentralized Cooperative Dynamic Target Assignment Method

CHEN Jie-yu¹, YAO Pei-yang¹, TANG Jian¹, JIA Fang-chao²

(1. Information and Navigation College, Air force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Dalian Sergeant School of Air Force Communication, Dalian 116600, Liaoning China)

Abstract: A networked multiple unmanned aerial vehicles cooperative operation system architecture is proposed under the condition of the "network-centric" warfare model, and taking electronic jamming unmanned aerial vehicle and unmanned combat aerial vehicle (UCAV) mixed formation cooperative operation as an object of study. Aimed at the problem of dynamic target assignment in multiple unmanned aerial vehicle cooperative air combat, a new threat assessment model is established based on the missile launching envelope analysis, and in consideration of the effect of electronic jamming, a target assignment model is established, and a new target assignment method is presented based on decentralized auction facility. The simulation results based on different combat scenarios indicate that the algorithm is adapted to the system's characteristics of distributed computation, presents the allocation scheme close to the ideal optimal effect within the restraint time, and is superior to the conventional methods in reliability and real-time effect.

Key words: multiple unmanned aerial vehicle; electronic jamming; target assignment; decentralized auction

现代战争形态的变革和网络化作战体系的出现,使得目标分配方法的研究重点正逐渐从集中式

静态分配向分布式动态分配转移^[1]。分布式目标分配方法受到了众多研究者的关注。

收稿日期:2014-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273048)

作者简介:陈洁钰(1989-),女,陕西铜川人,硕士生,主要从事多无人机协同作战指挥决策与控制,战场态势评估等研究。

E-mail:cjy0706@163.com

引用格式: 陈洁钰,姚佩阳,唐剑,等.多无人机分布式协同动态目标分配方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(6):11-16. CHEN Jieyu, YAO Peiyang, TANG Jian, et al. Multi-UAV decentralized cooperative dynamic target assignment method[J]. Journal of air force engineering university, natural science edition, 2014, 15(6): 11-16.

1 电子干扰下的空战威胁估计

电子干扰 UAV 和 UCAV 协同作战过程中,当我 UCAV 进入敌机载雷达探测范围内,敌开启雷达搜索跟踪目标,此时电子干扰 UAV 配合 UCAV 对敌雷达实施干扰,改变敌机载雷达在各个方向的探测距离,从而影响敌机对我机的威胁度。下面具体分析电子干扰环境下的威胁估计问题。

基于对空空导弹攻击区^[2]的分析,综合考虑空战双方瞬时态势构造威胁估计模型。空战双方态势关系见图 1,其中: D_{ji} 为双机目标线; h_{ji} 为敌我战机的垂直高度差; v_i 为我机速度矢量; v_j 为敌机速度矢量; φ 为我机 U_i 的方位角; θ 为敌机 T_j 的方位角; q 为我机 T_j 的进入角。上述角度的方向一致规定为相对目标线右偏为正,左偏为负,则有 $0 \leq |\varphi| \leq \pi$, $0 \leq |\theta| \leq \pi$ 。

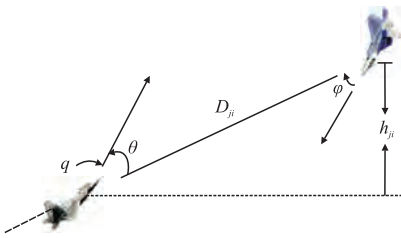


图 1 空战双方态势关系

Fig.1 The situation relation of air combat

参考文献[3]态势威胁函数可表示为:

$$T_{ji}^S = \omega_1 T_{ji}^a + \omega_2 T_{ji}^D + \omega_3 T_{ji}^v + \omega_4 T_{ji}^h \quad (1)$$

式中: $\sum_{i=1}^4 \omega_i = 1$, $\omega_i (i=1 \cdots 4)$ 表示敌机对我机的角度、距离、速度、高度威胁的权重系数; T_{ji}^a , T_{ji}^D , T_{ji}^v , T_{ji}^h , 分别表示角度、距离、速度、高度威胁函数。

将模型中的敌我参数互换,即可得我机对敌机的空战态势优势 S_{ij} 。

当对雷达实施有源压制性干扰时,雷达接收机将收到我机的回波信号 P_{rs} 和干扰机辐射的干扰信号 P_{rj} 。此时,雷达接收机前端的信干比为:

$$SN = P_{rs} / P_{rj} = \sigma P_i G_i^2 R_j^2 L_1 B_j 4\pi \gamma_j P_j G_j G_i R_i^4 L B_r \quad (2)$$

式中: P_i 为雷达发射平均功率; G_i 为雷达天线在我机方向的发射和接收增益; σ 为我机有效反射截面积; R_i 为我机与目标雷达之间距离; L 为雷达综合损耗因子; B_r 为雷达接收带宽; P_j 为干扰机发射功率; G_j 为干扰机天线在雷达方向增益; G_i 为雷达天线在干扰机方向增益; R_j 为雷达与干扰机之间的距离; L_1 为干扰信号的传输损耗; γ_j 为干扰信号对雷

达天线的极化系数; B_j 为干扰机噪声带宽。

当对雷达实施干扰时,用压制性系数 K_j 衡量干扰效果,当 $P_{rj} / P_{rs} = K_j$ 时,得到干扰机对目标雷达的最小有效干扰距离为:

$$R_0 = \left(\frac{\sigma K_j}{4\pi} \frac{P_i G_i^2}{P_j G_j G_i} \frac{B_j}{B_r} R_j^2 \right)^{1/4} \quad (3)$$

敌方机载雷达在受到电子干扰时,敌机载雷达在各个方向上的探测距离将有所减小。因此引入距离影响因子(Distance Impact Factor, DIF)衡量电子干扰对目标威胁度的影响,描述如下:

$$\eta = (R_0 - D_{MAmin}) / (D_{MAmax} - D_{MAmin}) \quad (4)$$

由于空空导弹攻击区^[2]多项式拟合模型为:

$$D_{MAmax} = \sum_{r=1}^n a_r f_r(v_j, h_j, v_i, h_i, \theta) \quad (5)$$

$$D_{MAmin} = \sum_{r=1}^n b_r g_r(v_j, h_j, v_i, h_i, \theta) \quad (6)$$

式中 $f_r(\cdot)$ 、 $g_r(\cdot)$ 为非线性函数。

由于敌我机速度、高度、角度因素影响了空空导弹攻击区范围,从而影响了距离威胁函数。因此,角度、速度、高度威胁指数和以导弹攻击区划分的距离威胁指数是耦合的。故 DIF 能够直接影响态势威胁指数。此时,若我方电子干扰无人机 $D_k (k=1, 2, \dots, z)$ 对敌 UCAV T_j 的机载雷达实施干扰,则目标态势威胁降低为:

$$T_{ji}^S = \begin{cases} \eta_{kj} T_{ji}^S & , D_{MAmin} \leq D_{ji} \leq R_0 \\ 0 & , R_0 \leq D_{ji} \leq D_{MAmax} \end{cases} \quad (7)$$

综上所述,通过电子干扰,敌机雷达对我机的探测能力会削弱,从而有效地降低了目标威胁度。

2 多 UCAV 协同动态目标分配与建模

假设我方编队由 M 架 UCAV ($U_i (i=1, 2, \dots, M)$) 和 K 架电子干扰无人机 ($D_k (k=1, 2, \dots, K)$) 组成,敌方为具有 N 架 UCAV ($T_j (j=1, 2, \dots, N)$) 的编队。我方 U_i 具有多目标攻击能力且挂载同型导弹,可挂载导弹总数为 ($L_i (i=1, 2, \dots, M)$), 导弹单发毁伤概率为 p_{ij} , 对敌 T_j 的态势优势为 S_{ij} , 电子干扰前后敌第 j 架 UCAV 对我第 i 架 UCAV 的态势威胁分别为 T_{ji}^S 、 $T_{ji}^{S'}$ 。

由此,建立目标分配决策矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1N} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{M1} & r_{M2} & \cdots & r_{MN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

r_{ij} 表示我方第 i 架 UCAV 用于攻击敌第 j 架 UCAV 的导弹数量。

这样,多目标分配问题可以抽象为如下形式:

$$\max F(R) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij} [1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_{ij})^{r_{ij}}]$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^M r_{ij} \leq M_{\max}, \sum_{j=1}^N r_{ij} \leq L_i, r_{ij} \in Z, r_{ij} \geq 0 \quad (9)$$

式中的 3 个约束条件分别表示:第 j 架敌机最多只能被我方 M_{\max} 枚导弹攻击;第 i 架我机可使用的导弹数为 L_i ;我方第 i 架飞机用于打击第 j 架敌机的导弹数是大于等于 0 的整数。

目标分配矩阵 $R_{M \times N}$ 的构造需要使作战整体收益在一定的约束条件下达到最大,因此,目标分配模型的目标函数包含以下因素:

1) 目标分配的收益。

$$U(R) = \sum_{j=1}^N \alpha (\sum_{i=1}^M S_{ij} + V_j) [1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_{ij})^{r_{ij}}] \quad (10)$$

式中: V_j 为敌机的价值,表示目标的战术重要程度; α 为收益系数, $0 < \alpha < 1$ 。

2) 目标分配的攻击代价。

$$C(R) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \beta T_{ji}^S \gamma_{ji} r_{ij} \quad (11)$$

式中: β 为代价系数, $0 < \beta < 1$; γ_{ji} 为第 j 架敌机导弹的单发毁伤概率。

3) 目标函数。

$$F(R) = U(R) - C(R) \quad (12)$$

由式(12)得目标分配问题的最优解为:

$$R^* = F^{-1}(F_{\max}) \quad (13)$$

3 分布式拍卖机制 MUCDTA 方法

3.1 分布式拍卖机制设计

对一般分布式拍卖机制^[4]进行改进,设计分布式逐层拍卖算法(Decentralized Layered Auction Algorithm, DLAA),将我编队中参与攻击的各UCAV分为一层称为主层,将各UCAV携带导弹划分为一层,称为子层。竞拍前,主层各UCAV生成整体竞拍顺序,轮到主层某一UCAV竞拍,将其对应子层的各导弹看作单独的Agent,建立竞拍队列,各Agent依次根据自身能力及获取的信息竞拍构造好的所有可能的目标攻击方案,每个Agent选择对于自己“最优”的方案。直至主层所有UCAV得到分配方案则完成一轮竞拍。

3.2 DLAA 流程

该算法的具体流程见图 2。

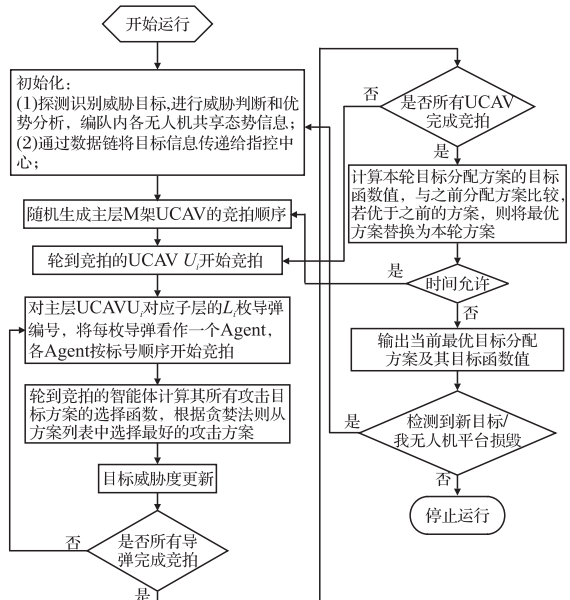


图 2 DLAA 流程

Fig.2 The flow of DLAA

3.3 单个 Agent 攻击方案竞拍原则

待攻击的 N 个目标为 $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$,由于一枚导弹只能攻击一个目标,所以导弹攻击目标的方案序列 Q_i 都可表示为:

$$Q_i = \{[\emptyset], [T_1], [T_2], \dots, [T_N]\} \quad (14)$$

若 UCAV U_i 携带的标号为 MI_k ($k=1, 2, \dots, L_i$) 的导弹竞拍选择的攻击目标为 T_x ,则定义以下参数:

1) U_i 选择攻击方案 Q_i 的效益:

$$U_i(Q_i) = \alpha (S_{ix} + V_x) p_{ix} \quad (15)$$

2) U_i 选择攻击方案 Q_i 的代价:

$$C_i(Q_i) = \beta T_{xi}^S \gamma_{xi} \quad (16)$$

3) U_i 选择攻击方案 Q_i 的选择函数为:

$$H_{i,l} = \alpha (S_{ix} + V_x) p_{ix} - \beta T_{xi}^S \gamma_{xi} \quad (17)$$

4) 选择攻击目标获得收益最大的攻击方案,即

$$Q_k^i = H^{-1}(\max(H_i^l)) \quad (18)$$

3.4 目标价值更新策略

拍卖过程中,各UCAV挂载导弹都竞拍到自己的攻击方案后,分配给该导弹的目标价值将降低,而后竞拍的导弹对所有目标的当前价值进行更新:

$$V_j^*(\text{new}) = (1 - p_{ij}) V_j^*(\text{old}) \quad (19)$$

进而计算各攻击方案的收益,避免了多枚导弹同时攻击同一目标,利于获得更高的全局作战效能。

3.5 分配方案的目标函数

每一轮竞拍结束后,将所有的攻击方案组合成该轮的目标分配矩阵 $R_{M \times N}$ 并代入式(12)计算得到分配方案的全局目标函数值。

4 仿真分析

以超视距下的电子干扰无人机和UCAV混合编队协同空战为背景,设我方无人机编队由2架电子干扰无人机、4架具有多目标攻击能力的同型UCAV组成,机载雷达最大探测距离为140 km,每架UCAV挂载同型2枚同型中远程空空导弹,可同时攻击敌方2个目标,导弹最大射程为100 km,我机速度均为360 m/s。敌方编队由4架同型UCAV组成,每架敌机最多被我方2枚导弹攻击。双方态势数据见表1。

表1 敌我空战态势

Tab.1 The situation in air combat

编号	参数				
	$\varphi/(\circ)$	$q/(\circ)$	D_{ji}/km	$v_j/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	h_{ji}/km
我1VS敌1	33	-46	58	372	0
我1VS敌2	42	-105	62	328	-1
我1VS敌3	58	-95	67	320	-3
我1VS敌4	26	-97	82	310	-0.5
我2VS敌1	24	-104	77	372	-1.2
我2VS敌2	31	-19	45	328	-2.5
我2VS敌3	65	-16	65	320	-4
我2VS敌4	9	-50	75	310	-0.6
我3VS敌1	84	-28	68	372	-1.5
我3VS敌2	60	-150	80	328	1
我3VS敌3	50	-125	70	320	0.5
我3VS敌4	43	-116	95	310	2
我4VS敌1	12	80	50	372	-0.8
我4VS敌2	36	-45	67	328	-3.5
我4VS敌3	45	-87	53	320	-2.6
我4VS敌4	79	-36	82	310	-4.5

4.1 电子干扰下的目标威胁估计实验仿真

设敌机雷达最大探测距离 $D_{R_{\max}} = 120 \text{ km}$; 雷达最大搜索方位角 $\varphi_{R_{\max}} = 85^\circ$ 。导弹最大最小攻击距离 $D_{MA_{\max}} = 80 \text{ km}$, $D_{MA_{\min}} = 40 \text{ km}$; 最大最小不可逃逸区距离 $D_{ME_{\max}} = 60 \text{ km}$, $D_{ME_{\min}} = 40 \text{ km}$; 最大离轴发射角 $\varphi_{MA_{\max}} = 55^\circ$; 不可逃逸区圆锥角 $\varphi_{ME_{\max}} = 30^\circ$; 取 $\omega_1 = \omega_2 = 0.3$, $\omega_3 = \omega_4 = 0.2$; 电子干扰机主要参数为: $P_j = 2 \times 10^3 \text{ W}$, $G_j = 20 \text{ dB}$, $G_i = 60 \text{ dB}$, $B_j = 1.6 \times 10^6 \text{ Hz}$, $L_1 = 4$, $\gamma_j = 0.5$ 。我机机载雷达主要参数为: $\sigma = 5 \text{ m}^2$, $P_r = 5 \times 10^5 \text{ W}$, $G_r = 40 \text{ dB}$, $L = 2$, $B_r = 8 \times 10^5 \text{ Hz}$, $K_j = 10$, $\lambda = 0.056 \text{ m}$, $R_{j1} = 100 \text{ km}$, $R_{j2} = 90 \text{ km}$ 。

假设已通过建立求解干扰资源分配模型完成以实现最大干扰效能为准则的干扰资源分配^[4], 分配结果为干扰机1干扰敌机2, 干扰机2干扰敌机1。表1中各态势数据代入相关公式计算得干扰前后敌UCAV对我UCAV的威胁度, 见表2。

表2 电子干扰前后威胁度变化情况

Tab.2 Changes of threat degrees before and after electronic jamming

编号	威胁度	
	干扰前威胁度	干扰后威胁度
我1VS敌1	0.710 9	0.428 5
敌1VS我2	0.544 4	0.328 1
敌1VS我3	0.345 7	0.208 4
敌1VS我4	0.735 0	0.000 0
敌2VS我1	0.579 1	0.000 0
敌2VS我2	0.621 1	0.450 6
敌2VS我3	0.329 5	0.239 1
敌2VS我4	0.671 2	0.000 0
敌3VS我1	0.493 7	不变
敌3VS我2	0.529 3	不变
敌3VS我3	0.430 7	不变
敌3VS我4	0.637 1	不变
敌4VS我1	0.483 2	不变
敌4VS我2	0.644 6	不变
敌4VS我3	0.430 2	不变
敌4VS我4	0.417 5	不变

由表2仿真计算结果可以看出, 实施电子干扰后, 敌我各UCAV之间的距离处于有效干扰范围内时, 目标对我UCAV(如敌1对我1、2、3, 敌2对我2、3)的威胁程度显著降低, 从而导致威胁排序结果和目标分配结果发生变化, 这与空战态势的直观分析结果一致, 证明了威胁估计方法的有效性。

4.2 动态目标分配方法仿真分析

在上述条件下假设4种想定情况:

情况1: 我方4架UCAV协同攻击敌4架UCAV, 不实施电子干扰;

情况2: 我方4架UCAV协同攻击敌4架, 同时2架电子干扰无人机配合实施电子干扰;

情况3: 在情况2的基础上, 已发射导弹攻击目标 T_1 , 但又检测到2个新目标 T_5, T_6 ;

情况4: 情况3基础上, 我方UCAV U_2 损毁。

我方各UCAV携带导弹对目标单发毁伤概率:

$$P = \begin{bmatrix} 0.65 & 0.77 & 0.82 & 0.21 & 0.31 & 0.69 \\ 0.80 & 0.18 & 0.79 & 0.76 & 0.44 & 0.75 \\ 0.84 & 0.24 & 0.92 & 0.11 & 0.63 & 0.29 \\ 0.54 & 0.81 & 0.61 & 0.22 & 0.53 & 0.77 \end{bmatrix}$$

敌方毁伤概率:

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0.70 & 0.04 & 0.42 & 0.37 \\ 0.64 & 0.20 & 0.01 & 0.41 \\ 0.60 & 0.40 & 0.12 & 0.50 \\ 0.00 & 0.06 & 0.00 & 0.00 \\ 0.34 & 0.46 & 0.00 & 0.00 \\ 0.56 & 0.28 & 0.33 & 0.51 \end{bmatrix}$$

敌机价值:

$$V = [0.3, 0.21, 0.11, 0.18, 0.20, 0.14]$$

新检测到目标 T_5, T_6 的敌机空战态势见表 3。

表 3 新检测目标与我机空战态势

Tab.3 The combat situation of new goals and our aircrafts

编号	参数				
	$\varphi /(^{\circ})$	$q /(^{\circ})$	D_{ji} / km	$v_j / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	h_{ji} / km
我 1VS 敌 1	68	-76	50	360	5
我 1VS 敌 6	29	-25	63	300	-0.8
我 2VS 敌 5	38	-135	57	360	-2.5
我 2VS 敌 6	66	-97	72	300	-0.4
我 3VS 敌 5	74	-74	88	360	1.6
我 3VS 敌 6	51	-90	42	300	-2.8
我 4VS 敌 5	15	-60	85	360	0
我 4VS 敌 6	27	-30	69	300	-6.4

采用本文算法进行目标分配,在时间约束的条件下进行 20 轮拍卖,得到情况 1、2 下的整体目标函数变化曲线见图 3,目标分配结果见表 4,统计结果见表 5。

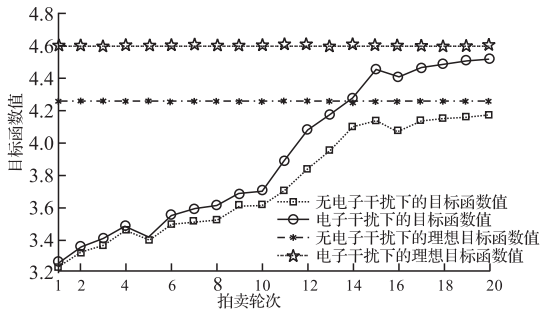


图 3 目标函数变化曲线

Fig.3 The curves of the objective function in situation 1 and 2

1)由表 4 及图 3 可得:我电子干扰无人机对敌UCAV 实施干扰后(情况 2),目标威胁度受到电子干扰效果的抑制,使得目标分配结果发生变化,最优分配方案整体收益值与无干扰时(情况 1)的相比明显增大,从而提高了整体作战效能;同时,拍卖次数的增多有利于提高分配方案的目标函数值;

2)由表 4 数据可得:发现新目标(情况 3)或我UCAV 损毁(情况 4)时,提出的目标分配方法能根据战场环境的动态变化实时调整目标分配方案;

3)由表 5 数据及图 3 曲线发现:4 种情况下的多目标分配函数值结果较接近理想解,可靠性较高。

表 4 4 种不同情况经过 20 轮拍卖的分配结果

Tab.4 The assessment results through 20 auction of four different situations

	我机	导弹	方案	H	F
情况 1	U_1	MI_1^1	T_2	0.401 0	4.168 8
		MI_2^1	T_3	0.350 7	
	U_2	MI_1^2	T_4	0.137 7	
		MI_2^2	T_4	0.130 7	
	U_3	MI_1^3	T_4	0.524 2	
		MI_2^3	T_1	0.496 4	
	U_4	MI_1^4	T_2	0.352 8	
		MI_2^4	T_1	0.225 8	
情况 2	U_1	MI_1^1	T_4	0.475 1	4.516 9
		MI_2^1	T_2	0.375 5	
	U_2	MI_1^2	T_1	0.535 8	
		MI_2^2	T_4	0.498 7	
	U_3	MI_1^3	T_1	0.173 5	
		MI_2^3	T_3	0.134 9	
	U_4	MI_1^4	T_2	0.280 2	
		MI_2^4	T_3	0.243 4	
情况 3	U_1	MI_1^1	T_4	0.475 1	3.844 0
		MI_2^1	T_6	0.354 3	
	U_2	MI_1^2	T_5	0.176 5	
		MI_2^2	T_4	0.137 7	
	U_3	MI_1^3	T_2	0.343 6	
		MI_2^3	T_3	0.496 4	
	U_4	MI_1^4	T_6	0.215 8	
		MI_2^4	T_2	0.349 3	
情况 4	U_1	MI_1^1	T_3	0.409 9	2.322 2
		MI_2^1	T_4	0.119 6	
	U_2	MI_1^2	—	—	
		MI_2^2	—	—	
	U_3	MI_1^3	T_4	0.350 2	
		MI_2^3	T_5	0.276 5	
	U_4	MI_1^4	T_2	0.518 1	
		MI_2^4	T_6	0.415 8	

表 5 算法有效性分析结果统计数据

Tab.5 The statistical data of the effectiveness of the algorithm

性能参数	情况 1	情况 2
	无干扰下(4×4)	电子干扰下(4×4)
理想目标函数值	4.247 4	4.602 0
目标函数值	4.168 8	4.516 9
优化百分比	98.15%	98.15%
性能参数	情况 3	情况 4
	新增目标(4×5)	我机损毁(3×5)
理想目标函数值	3.928 9	2.374 7
目标函数值	3.844 0	2.322 2
优化百分比	97.84%	97.79%

为验证 DLAA 算法的求解效率,对本文算法进行 30 次实验,在相同的时间约束条件下,与一般分

布式拍卖算法(DA)^[5]、遗传蚁群算法(GAAC-CA)^[6]、模拟退火遗传算法(SAGA)^[7]3种算法相应的性能进行对比。情况1下的实验结果见表6。

表6 情况1在时间约束下的算法性能比较

Tab.6 The performance comparisons with time constraint

算法	时间约束/s	最优拍卖/迭代次数	最优方案目标函数值
DLAA	0.03	9	3.604 0
	0.04	18	4.145 0
	0.05	25	4.168 8
	0.06	32	4.168 8
	0.07	43	4.168 8
DA	0.03	4	3.250 3
	0.04	6	3.368 9
	0.05	9	3.420 7
	0.06	13	3.825 3
	0.07	20	4.0947
GAACA	0.03	3	3.348 1
	0.04	8	3.395 3
	0.05	10	3.512 9
	0.06	16	3.677 4
	0.07	21	3.866 2
SAGA	0.03	4	3.479 8
	0.04	10	3.544 9
	0.05	16	3.781 3
	0.06	21	3.902 3
	0.07	28	4.099 8

由表6可以看出,在无电子干扰的 4×4 多UCAV协同空战环境下,本文提出的目标分配算法的目标函数值较其他算法高,且在0.05 s就得到了“最优”解4.168 8,求解效率较高。

综上所述:本文提出的DLAA算法能够有效快速地解决MUCDTA问题,能够在规定的较“短”时间内得到“较好”的或“满意”的目标分配方案,实时性、灵活性较高,可靠性较大。

5 结语

本文重点对时间约束下的多无人机分布式协同目标分配问题进行了研究,建立目标分配模型,设计相应的分配方法,并通过目标价值更新策略提高了算法的准确性,在一定时间约束下实现了目标分配。通过仿真证明该方法可有效应对新目标或我机损毁等突发事件,比较适用于复杂多变的空战环境。

参考文献(References):

[1] 郭辉,徐浩军,刘殿玉,等.基于自适应混合粒子群算法的协同

多目标攻击空战决策[J].空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(2):16-20.

GUO Hui, XU Haojun, LIU Dianyu, et al. Air combat decision-making for cooperative multiple target attack based on adaptive hybrid particle swarm algorithm [J]. Journal of air force engineering university; natural science edition, 2010, 11 (2): 16-20. (in Chinese)

[2] 杜昌平,周德云,江爱伟.一种空空导弹可攻击区快速算法[J].西北工业大学学报,2006,24(6):682-685.

DU Changping, ZHOU Deyun, JIANG Aiwei. Stupid algorithm about air to air missile launching envelope [J]. Journal of northwestern polytechnical university, 2006, 24(6): 682-685. (in Chinese)

[3] 高永,向锦武.一种新的超视距空战威胁估计非参量法模型[J].系统仿真学院,2006,18(9):270-2572.

GAO Yong, XIANG Jinwu. New therat assessment hon-parameter nodel in beyond-visual-range air combat [J]. Journal of system simulation, 2006, 18(9): 270-2572. (in Chinese)

[4] 姚佩阳,万路军,周翔翔,等.基于CNDLS的空中多编组时限约束任务分配方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(5):21-26.

YAO Peiyang, WAN Lujun, ZHOU Xiangxiang, et al. Time constraint task allocation methods in multiple aerial group based on circulative nested-dynamic list scheduling [J]. Journal of air force engineering university; natural science edition, 2013, 14(5): 21-26. (in Chinese)

[5] 费爱国,张陆游,丁前军.基于拍卖算法的多机协同火力分配[J].系统工程与电子技术,2012,34(9):1829-1833.

FEI Aiguo, ZHANG Luyou, DING Qianjun. Multi-aircraft cooperative fire assignment based on auction algorithm [J]. Systems engineering and electronics, 2012, 34(9): 1829-1833. (in Chinese)

[6] 王芳,姜长生.多机协同多目标攻击的遗传蚁群算法研究[J].电光与控制,2008,15(10):26-32.

WANG Fang, JIANG Changsheng. On genetic algorithm and ant colony algorithm for multi-target attacking in multi-aircraft cooperative combat [J]. Electronics optics & control, 2008, 15 (10): 26-32. (in Chinese)

[7] 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 Delin, WU Shunxiang, DUAN Haibin, et al. Air-combat decision-making for UAVs cooperatively attacking multiple targets [J]. Journal of system simulation, 2008, 20(24): 6778-6782. (in Chinese)

(编辑:徐敏)