基于满意决策的多机协同目标分配算法

廖 沫 陈宗基

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 多机协同目标分配问题是无人机 UAV (Uninhabited Aerial Vehicle)研究中一个重要的问题. 考虑 UAV差异、目标差异及战场态势对目标分配的影响,建立了多机协同目标分配问题的数学模型. 提出基于满意决策的目标分配算法,通过搜索个体满意集合获取群体优化的目标分配方案. 对多目标分配问题,将攻击方案作为个体满意集合的元素扩展了基于满意决策的目标分配算法. 为适应更大的问题空间的求解需求,提出递阶分配框架,并将满意决策方法用于递阶分配. 计算结果表明,算法能有效提高搜索效率,并得到很好的优化效果.

关 键 词: 无人机; 目标分配; 满意决策论; 拍卖

中图分类号: TP 301

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)01-0081-05

Coordinated target assignment in multi-UAV based on satisficing decision theory

Liao Mo Chen Zongji

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A key problem addressed in study of uninhabited aerial vehicle (UAV) is to coordinated assign targets in multi-UAVs. The mathematic model for multi-UAV cooperative target assignment problem was built, when assigning targets in multi-UAVs, the model considered about effect of the battle field situation, and differences in different UAVs and targets. A multi-UAV target assignment algorithm based on the satisficing decision theory was presented. Each individual proposed its satificing set, the algorithm searched the global optimal assignment scheme on all individual satisficing sets. To settle the multi-target assignment problem, the algorithm was applied by taking the attack scheme as the element of the individual satisficing set. To expand the problem size, a hierarchical structure was presented by which the algorithm was extended to the hierarchical form. The method evidently can improve the searching efficiency and obtain the optimal results.

Key words: uninhabited aerial vehicle; target assignment; satisficing decision theory; auction

多无人机 UAV (Uninhabited Aerial Vehicle)协同目标分配是将一组不同位置、不同价值、不同威胁程度的目标合理地分配给类型、价值和战斗力都不同的 UAV,以达到整体作战效能最大、代价最小的目的. 多机协同目标分配是组合优化问题,属于非确定性多项式时间 NP (Nondeterministic Polynomial)问题,求解方法有穷举、模拟退火、神经网络和遗传算法[1-2]等,巨大的计算代价是NP问题的难点. 许多实际问题对算法实时性要求很高,对优化效果要求并不苛刻,倾向于在“短”时间内得到“好”的或“满意”的,而不是“最优”的解,多 UAV协同目标分配就是这类问题. 当前对多机协同目标分配问题的研究主要集中于整数规划和遗传算法,这些方法存在一系列问题: ①算法复杂度高、实时性差,很难满足动态环境要求. ②算法大多限制一架 UAV攻击一个目标,而实际战斗往往要求条件放宽到多个目标. ③考虑问题的侧重点不同,算法模型对问题描述不具普遍性,

收稿日期: 2006-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60674103)

作者简介: 廖 沫 (1978-),女,广西柳江人,博士生, liaomo@buaa.edu.cn.

精确度不够.

满意决策论(satisficing decision theory)在控制[3]、多Agent交互[4]以及目标分配[5]等问题都有成功应用.满意决策方法实质上是改进的穷举法,由参与分配的个体提出满意集合,将搜索空间限制在个体满意集合上,裁减掉不可行和效率低的分配策略,有效提高搜索效率,在问题规模不大时不失为一种实用的方法.本文针对对敌防空火力压制SEAD(Suppression of Enemy Air Defense)任务研究多机协同目标分配问题.

1 目标分配问题的数学模型

假设有 N 个UAV, $\{U_1, U_2, \cdots, U_N\}$, M 个目标 $\{T_1, T_2, \cdots, T_M\}$,定义目标分配矩阵 $X^{N\times M}$:

$$x_{ij}=\begin{cases}1 & U_i\text{攻击目标 } T_j\\ 0 & U_i\text{不攻击目标 } T_j\end{cases} \tag{1}$$

约束:

$$\sum_{j=1}^{M}x_{ij}\le \max$$
$$\forall i = 1, 2, \cdots, N \tag{2}$$

其中,max为UAV能够攻击的最大目标数.

借鉴武器目标分配参数指标[6],假设 U_i 的价值为 v_i, v_i 与UAV的战斗力、机载设备配置有关.目标 T_j 的价值为 ρ_j,表示目标的战略重要程度. U_i 攻击 T_j 的效率 $p_{i,j}$,表示 U_i 能够摧毁 T_j 的概率. U_i 攻击 T_j 的风险为 $r_{i,j}$,表示 U_i 攻击 T_j 被毁的概率. $P_{t,i,j}$ 为 U_i 到 T_j 的路径威胁代价; $P_{l,i,j}$ 为 U_i 到 T_j 的路径长度代价.其中, v_i 和 ρ_j 根据专家经验针对作战要求给出,具有相对意义; $p_{i,j}$ 和 $r_{i,j}$ 由评估单元给出; $P_{t,i,j}$ 和 $P_{l,i,j}$ 由路径规划器给出.

目标分配问题的目标函数包括以下因素.

1) 攻击效益: $U(X)=\sum_{j=1}^{M}(\rho_j\cdot\pi_j)$,其中 $\pi_j=1-\prod_{i=1}^{N}(1-x_{ij}\cdot p_{i,j})$ 为 T_j 被摧毁的概率函数.

2) 攻击代价: $Y(X)=\sum_{i=1}^{N}(\zeta_i\cdot v_i)$,其中 $\zeta_i=\sum_{j=1}^{M}(D_i(T_j)\cdot x_{ij})$ 为 U_i 的损耗概率, $D_i(T_j)$ 为 U_i 攻击 T_j 的耗损函数, $D_i(T_j)=f(P_{l,i,j}, P_{t,i,j}, r_{i,j})$.

3) 目标函数:

$$J(X)=A\cdot U(X)+B\cdot Y(X) \tag{3}$$

其中, A 和 B 为权系数.

由式(3)得到目标分配问题的最优解为 $X^*=J^{-1}(J_{\max})$.

本文UAV管理决策系统包含评估模块和路径规划器.评估模块计算UAV对各目标的击毁概率、危险概率等参数.路径规划器根据单机的任务及战场态势规划飞行路径并计算路径参数,采用网格 A^* 搜索方法[7],考虑雷达、武器、禁/避飞区、电磁区和恶劣天气区等各种威胁的影响.

2 基于满意决策的目标分配算法

算法原理:由参与分配的UAV提出"满意"的目标集合,在各UAV的满意集合上搜索最好的分配方案."满意"指在表示"接受"和"拒绝"的两个指标中寻找平衡,当"接受"因子影响大于"拒绝"因子时,认为此目标是令人"满意"的.

2.1 单目标分配

单目标分配指每个UAV最多攻击一个目标,即式(2)中 $\sum_{j=1}^{M}x_{ij}\le 1, (\forall i = 1, 2, \cdots, N)$.

2.1.1 个体满意和群体目标

假设 1 U_i 攻击 T_j 的效益:

$$J_{v,i}(T_j)=p_{i,j}\cdot\rho_j$$

U_i 攻击 T_j 的代价:

$$J_{c,i}(T_j)=D_i(T_j)\cdot v_i$$

其中, $D_i(T_j)=\eta_i\cdot C_{t,i}(T_j)+(1-\eta_i)C_{l,i}(T_j)$, $\eta_i\in[0,1]$ 为 U_i 攻击 T_j 的损耗函数, $C_{t,i}(T_j)$ 为 U_i 攻击 T_j 的威胁代价, $C_{l,i}(T_j)$ 为 U_i 攻击 T_j 的路径代价,且 $C_{t,i}(T_j)=\gamma_i\cdot r_{i,j}+(1-\gamma_i)P_{t,i,j}$, $\gamma_i\in[0,1]$.威胁代价包括:目标攻击和飞行过程. $C_{l,i}(T_j)=P_{l,i,j}/P_{l,i,\max}$,其中 $P_{l,i,\max}$ 为 U_i 允许的最大飞行路径.

定义 1 接受函数:

$$\mu_{A,i}(T_j)=\frac{J_{v,i}(T_j)-J_{v,i,\min}}{J_{v,i,\max}-J_{v,i,\min}}$$

其中, $J_{v,i,\min}$ 为 U_i 所有可选择目标的最低效益; $J_{v,i,\max}$ 为 U_i 所有可选择目标的最高效益.

定义 2 拒绝函数:

$$\mu_{R,i}(T_j)=\frac{J_{c,i}(T_j)-J_{c,i,\min}}{J_{c,i,\max}-J_{c,i,\min}}$$

其中, $J_{c,i,\min}$ 为 U_i 所有可选择目标的最小代价; $J_{c,i,\max}$ 为 U_i 所有可选择目标的最大代价.

$\mu_A\in[0,1]$, UAV对效益大的目标接受程度大,效益小的目标接受程度小. $\mu_R\in[0,1]$, UAV对攻击代价大的目标拒绝程度大,对攻击代价小的目标拒绝程度小. UAV倾向于接受攻击效益大的目标,拒绝攻击代价大的目标,满意集合应在效益和代价之间寻找平衡.

定义 3 满意集合:

$$S_{v,i}=$$

$$\left\{ T_j \left| \begin{array}{l} T_j \in F_i \\ \mu_{A,i}(T_j) \geq b_i \cdot \mu_{R,i}(T_j) \end{array} \right. \quad \forall j = 1, 2, \cdots, N \right\}$$

其中, b_i 为选择因子, b_i 取值应适当,太大会使满意集合过小或为空集; 太小则不能有效缩小搜索空间. F_i 为 U_i 的可行集合,"可行"意味着燃油足够、武器配置及自身能力允许等.

从不同个体的满意集合中组合出群体的分配方式,根据式(3)寻求全局最优解.

2.1.2　算法流程

算法包括初始化计算、满意集合计算和搜索过程(见图 1). $\mathrm{card}(S_{v,i})$ 为满意集合 $S_{v,i}$ 的基数,算法搜索次数为 $\prod_{i=1}^{N} \mathrm{card}(S_{v,i})$,而 N 架 UAV 攻击 M 个目标的穷举次数为 M^N. 由于 $\mathrm{card}(S_{v,i}) < M$, $\prod_{i=1}^{N} \mathrm{card}(S_{v,i}) \ll M^N$,搜索空间缩小了.

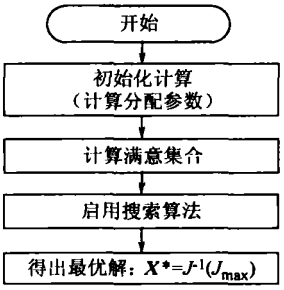


图 1　目标分配算法流程

2.2　多目标分配

多目标分配允许一架 UAV 攻击多个目标,即式(2)中 max > 1,将满意决策方法推广到多目标分配情况. 进行多目标分配时, UAV 单机提出的满意集合是攻击方案集合而不是目标集合,攻击方案定义为目标的有序集,表示 UAV 按顺序攻击目标. 令攻击方案 $A_l = \{T_{j1}, T_{j2}, \cdots, T_{j\max}\}$, A_l 是有序集,下标"l"为方案序号.

假设 2　U_i 选择 A_l 的效益:

$$J_{v,i}(A_l) = \sum_{k=1}^{\mathrm{card}(A_l)} p_{i,jk} \cdot \rho_{jk}$$

U_i 选择 A_l 的代价:

$$J_{c,i}(A_l) = D_i(A_l) \cdot v_i$$

其中, $D_i(A_l) = \eta_i \cdot C_{t,i}(A_l) + (1 - \eta_i) C_{l,i}(A_l)$, $\eta_i \in [0, 1]$,为 U_i 选择 A_l 的损耗函数. $C_{t,i}(A_l) = \gamma_i \left[1 - \prod_{k=1}^{\mathrm{card}(A_l)} (1 - r_{i,jk}) \right] + (1 - \gamma_i) \cdot P_{t,i}(A_l)$, $\gamma_i \in [0, 1]$,为 U_i 选择 A_l 的威胁代价, $P_{t,i}(A_l)$ 为 U_i 选择 A_l 的路径威胁代价. $C_{l,i}(A_l) = P_{l,i}(A_l) / P_{l,i,\max}$ 为 U_i 选择 A_l 的路径代价, $P_{l,i,\max}$ 为 U_i 的容许路径, $P_{l,i}(A_l)$ 为 U_i 选择 A_l 的路径长度.

定义 4　接受函数:

$$\mu_{A,i}(A_l) = \frac{J_{v,i}(A_l) - J_{v,i,\min}}{J_{v,i,\max} - J_{v,i,\min}}$$

其中, $J_{v,i,\min}$ 为 U_i 所有可选方案中最低的效益; $J_{v,i,\max}$ 为 U_i 所有可选方案中最高的效益.

定义 5　拒绝函数:

$$\mu_{R,i}(A_l) = \frac{J_{c,i}(A_l) - J_{c,i,\min}}{J_{c,i,\max} - J_{c,i,\min}}$$

其中, $J_{c,i,\min}$ 为 U_i 所有可选择方案中最小的代价; $J_{c,i,\max}$ 为所有可选择方案中最大的代价.

$\mu_A, \mu_R \in [0, 1]$, UAV 倾向于接受攻击效益大的而拒绝攻击代价大的方案.

定义 6　满意集合:

$$S_{v,i} = \left\{ A_l \left| \begin{array}{l} A_l \in F_i \\ \mu_{A,i}(A_l) \geq b_i \cdot \mu_{R,i}(A_l) \end{array} \right. \quad \forall l = 1, 2, \cdots, L \right\}$$

其中, F_i 为可行集合,即 U_i 允许的所有攻击方案集合. 从各个体满意集合中组合出群体分配矩阵,按式(3)寻优,得最优解 $[X^*, A_i^*] = J^{-1}(J_{\max})$.

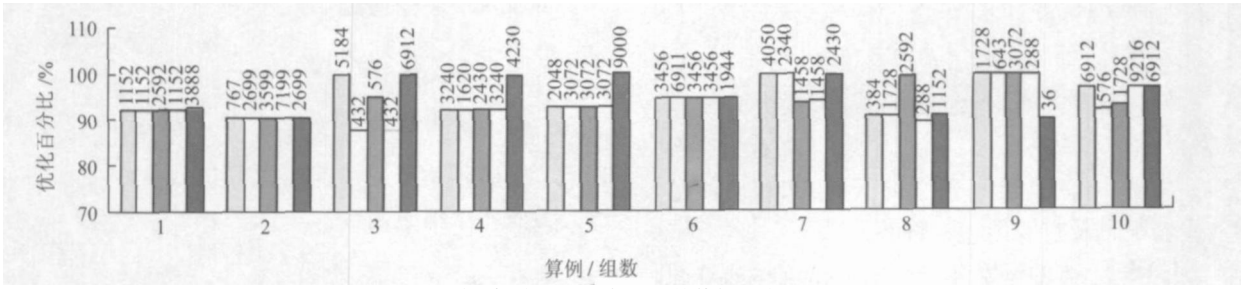
2.3　仿真分析

对 7×6(7架 UAV 攻击 6个目标, max = 1)和 4×4(4架 UAV 攻击 4个目标, max = 2)两种情况进行验证,各选取 10组不同算例,每组算例用 5个不同的 b_i 进行计算. 目标函数和理想目标函数的优化比值(%)见图 2,相应的搜索次数标于柱形顶端,算法的统计数据如表 1所示,可见算法能以小的搜索次数得到比较好的优化效果.

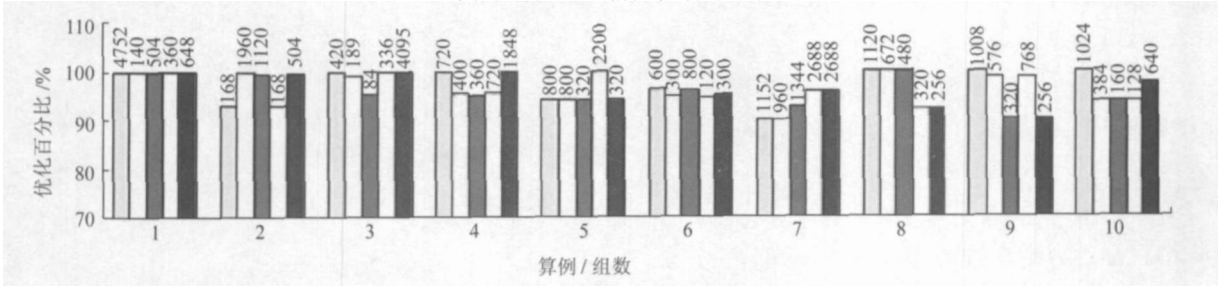
算法的运算时间包括初始化时间和分配时间. 用主频 2.4 G的计算机,初始化参数串行计算,以上 7×6单目标分配最大分配时间为 0.317 s,平均分配时间为 0.12 s,最大初始化时间为 4.483 s; 4×4多目标分配最大分配时间为 0.12 s,平均分配时间为 0.03 s,最大初始化时间 4.495 s 分配速度非常快,而初始化时间由于涉及的路径规划算法[7]相对较大,实际应用时可采用多计算机并行计算,单机的初始化参数由单机管理决策计算机计算.

表 1　目标分配算法的性能指标列表

性能参数		分配形式	
		7×6(max = 1)	4×4(max = 2)
搜索次数	平均	2875	861
	最大	9216	4753
	最小	36	85
	遍历	279936	65536
优化/%	平均	94.1	96.5
	最大	100	100
	最小	87.9	89.9



a 单目标分配 7 ×6情况下的优化百分比



b 多目标分配 (*max* = 2) 4 ×4情况下的优化百分比

图 2 单目标和多目标分配算法性能图

3 目标分配算法的递阶形式

满意决策方法通过缩小个体搜索空间来减小集体搜索空间,在问题规模不大时确实能有效提高搜索效率,减小计算时间. 对于大问题空间,如UAV数或目标数上百甚至上千时,算法复杂度相当大,无法满足实时性要求. 递阶分解是求解大型复杂问题的有效技术,它将大型复杂的问题分解为多个小型简单的问题,在不同的递阶层次求解. 本文提出目标分配的递阶结构,解决大问题空间的目标分配问题. 考虑到递阶分解势必影响优化效果,借鉴了多 Agent拍卖技术,在递阶分配过程完成之后激发拍卖,提高潜在的优化效果.

当 UAV或目标数很大时,将 UAV分为不同的小组 /编队,目标划分为不同的目标簇. 图 3为目标分配的递阶结构,编队目标分配器将全局目标分配给各 UAV编队; UAV目标分配器存在于每个小组 /编队中,将编队目标在编队内分解并分配至单机;单机目标最后下发至 UAV的目标管理器.

递阶分配过程: ①一次分配根据一定原则 (如按地域划分)将所有目标分为一系列目标簇,将这些目标簇分配给各编队 (编队内调用目标分配算法,给出编队选择目标簇的价值和代价等参数). ②一次分配完成后,启动编队间拍卖过程.



图 3 目标分配的递阶优化算法层次框架

3.1 一次分配

将目标集合 $\{T_1, T_2, \cdots, T_M\}$按一定原则划分为一系列目标簇 $\{A_1, A_2, \cdots, A_S\}$,满足:

$$\begin{cases} A_1 \cup A_2 \cup \cdots \cup A_S = \{T_1, T_2, \cdots, T_M\} \\ A_{s_1} \cap A_{s_2} = \Phi \qquad \forall s_1 \neq s_2;\ s_1, s_2 = 1, 2, \cdots, S \end{cases}$$

将 UAV集合 $\{U_1, U_2, \cdots, U_N\}$划分为不同编队 $\{F_1, F_2, \cdots, F_k\}$, F_k 中成员为 $\{U_{i_1}, U_{i_2}, \cdots, U_{i_{\max}}\}$,满足:

$$\begin{cases} F_1 \cup F_2 \cup \cdots \cup F_K = \{U_1, U_2, \cdots, U_N\} \\ F_{k_1} \cap F_{k_2} = \Phi \qquad \forall k_1 \neq k_2;\ k_1, k_2 = 1, 2, \cdots, K \end{cases}$$

定义"编队-目标簇"分配矩阵:

$$G^{K\times S} = \begin{cases} g_{ks} = 1 & F_k \text{攻击} A_s \\ g_{ks} = 0 & F_k \text{不攻击} A_s \end{cases}$$

约束:

$$\sum_{s=1}^{S} g_{ks} \leq 1 \qquad \forall k = 1, 2, \cdots, K$$

编队提出满意的目标簇集合,如 F_k 利用"UAV-目标分配器"对 A_s 进行"UAV-目标"分配,得出 F_k 选择 A_s 的目标函数 $J_{k,s,\max}$和编队内分配矩阵 $X^*_{k,s}$,定义 F_k 的满意集合 $S_{v,k} = \{A_s \mid J_{k,s,\max} > 0\}$.

将 $X^*_{k,s}$ 按式 (1)进行扩展,得到扩展矩阵 $\overline{X}^*_{k,s} \in X^{\mathrm{card}(F_k)\cdot M}$,可以组合出全局目标分配矩阵:

$$X = [\overline{X}^{*\,T}_{1,s_1} \quad \overline{X}^{*\,T}_{1,s_2} \quad \cdots \quad \overline{X}^{*\,T}_{K,s_K}]^T$$

根据式 (3)对目标分配问题进行寻优计算,得出一次分配的解 $[X^*, G^*] = J^{-1}(J_{\max})$.

3.2 编队间拍卖

递阶分解大大减小了计算的复杂度,但势必

影响算法的优化程度,在一次分配后激发拍卖,进一步提高算法的优化效果. 每个编队为一个 Agent,主持拍卖的 Agent给出竞拍物品,各编队给出竞价,开价最高的 Agent有可能获得物品,而是否拍到物品要判断交易后的全局目标函数,只有全局目标函数增加的交易才能真正达成,交易后的分配方案替代交易前的方案.

竞拍物品:竞拍物品为要攻击的目标,一次分配完成后,各编队将负责区域中没有指派 UAV的目标用于竞拍,竞价最高的编队将获得此目标.

竞拍价格:各编队对于竞拍目标给出竞价,"竞价"值为得到竞拍目标后编队内目标分配的目标函数与未得到竞拍目标时的目标函数之差.

本文的拍卖交易可描述为一个四元组:

$A = \{$竞拍目标,竞拍者,竞拍价格,收益$\}$

其中,拍卖的竞拍者为各编队,收益为交易后的全局效益增值,只有竞拍价格最大且收益大于0的交易才能达成.

3.3　算例分析

图 4为 12架 UAV攻击 8个目标初始条件示意图,其中有 A, B型机各 6架. 为简单起见,规定每个 UAV最多攻击一个目标,UAV分为 3个编队,$F_1: U_1 \sim U_4$, $F_2: U_5 \sim U_8$, $F_3: U_9 \sim U_{12}$,每个编队配置 A, B型机各 2架,F_1 和 F_2 从基地 1起飞,F_3 从基地 2起飞. 划分了 3个子区域,形成目标簇:$A_1: T_1 \sim T_3$, $A_2: T_4 \sim T_5$, $A_3: T_6 \sim T_8$.

一次分配后得到目标簇分配矩阵:

$$G^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

即 F_1, F_2, F_3 分别攻击子区域 1, 2, 3.

分配方案:U_1 和 U_2 攻击 T_1, U_3 和 U_4 攻击 T_3, U_7 和 U_8 攻击 T_4, U_6 攻击 T_5, U_9 和 U_{10}攻击 T_6, U_{11}和 U_{12}攻击 T_7, T_2 和 T_8 没指派 UAV.

$$J_{\max} = 33.9260$$

一次分配后,T_2 和 T_8 没有指派 UAV,激发编队间拍卖. 拍卖后分配结果:U_1 和 U_2 攻击 T_1, U_{12} 攻击 T_2, U_3 攻击 T_3, U_7 和 U_8 攻击 T_4, U_6 攻击 T_5, U_9 和 U_{10}攻击 T_6, U_{11}攻击 T_7, U_4 攻击 T_8.

$$J_{\max} = 39.7860$$

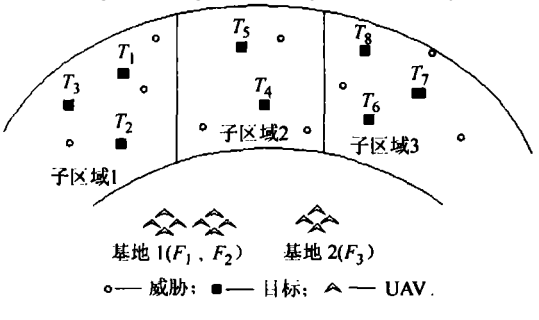


图 4　算法实例示意图

12 ×8的情形的遍历搜索次数为 2.8243×10^{11},即便用满意决策的方法,搜索次数也是天文数字. 递阶分配使大规模的目标分配问题的求解可行,并通过拍卖进一步提高了优化效果. 对适度的问题直接使用满意决策的方法,对大规模的问题则利用递阶分配,本文算法可将分配时间控制在比较小的范围内(如小于 5 s),对求解许多实际的多机目标分配问题更具现实意义.

4　结　论

本文建立了多 UAV目标分配问题的数学模型. 提出了基于满意决策的协同目标分配算法,给出算法的单/多目标分配形式和目标分配的递阶形式. 仿真结果证明,分配算法能有效提高搜索效率,得到接近最优的目标函数值. 递阶的优化结构和方法很好地解决了大问题空间探索的难题,并通过编队间拍卖,进一步提高优化效果. 本文对目标分配问题的研究更符合实际战场的需求.

参考文献 (References)

[1] Lee Z J, Su S F, Lee C Y. Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics(Part B), 2003, 33(1): 113 - 121

[2] 余舟毅, 陈宗基, 周锐. 基于遗传算法的动态资源调度问题研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 1308 - 1311
Yu Zhouyi, Chen Zongji, Zhou Rui. On dynamic resource scheduling based on genetic algorithm[J]. Control and Decision, 2004, 19(11): 1308 - 1311(in Chinese)

[3] Goodrich M A, Stirling W C, Frost R L. A theory of satisficing decisions and control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics(Part A), 1998, 28(11): 763 - 779

[4] Goodrich M A, Stirling W C. Satisficing games[J]. Information Sciences, 1999, 114: 255 - 280

[5] Bead R W, Timothy W M, Goodrich M A, et al. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(6): 911 - 922

[6] Abrahams P, Balart R, Bymes J S, et al. Maap: the military aircraft allocation planner[C]//Evolutionary Computation Proceedings of the IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage: IEEE Press, 1998: 336 - 341

[7] 夏洁,高金源. 满足战场需求的实时飞行路径规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(2): 95 - 99
Xia Jie, Gao Jinyuan. Real-time flight path planning for combat mission[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(2): 95 - 99(in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)