

基于时间约束的多平台协同目标分配方法

张杰勇, 姚佩阳, 王欣, 周翔翔

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 网络化防空体系各作战平台协同目标分配问题是研究网络化防空的一个重要问题。针对未来网络化防空对协同目标分配算法具有很高的实时性要求, 提出了基于时间约束的协同目标分配方法——改进的分布协同拍卖算法, 给出了算法具体设计思路和流程, 并对算法作了仿真实验。仿真的结果和统计数据证明, 算法能够在约束的时间内给出具有很好优化效果的目标分配方案, 并通过与遗传算法的实例比较, 体现了该算法在时间约束条件下的优越性。

关键词: 运筹学; 目标分配决策; 分布协同拍卖; 时间约束

中图分类号: TP 301

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.06.18

Multiple platforms coordinated target assignment method based on time restraint

ZHANG Jie-yong, YAO Pei-yang, WANG Xin, ZHOU Xiang-xiang

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The problem of multiple platforms coordinated target assignment is one of the most important problems in studying the networked air defense. In order to meet the high real-time requirement of the arithmetic of target assignment in the future, a target assignment method based on improved decentralized cooperative auction is presented, then the design and flow of this method are offered. Finally, the simulation of the method is designed. The simulation result and statistical data demonstrate that this method can present the assign scheme with good optimal objective function within the restraint time. Comparing with the genetic algorithms (GA), the results of the simulation prove this method to be superior in the condition of time restraint.

Keywords: operation research; target assignment; decentralized cooperative auction; time constraint

0 引言

防空导弹网络化体系的协同目标分配问题, 是网络化体系中 N 个不同的作战平台要抗击 M 个不同的空中威胁目标, 如何合理地将不同的目标分配给不同的作战平台, 使得预期的攻击效果达到最佳^[1]。协同目标分配问题类似于任务分配问题, 是属于非确定性多项式 (nondeterministic polynomial, NP) 时间问题^[2]。对其求解的方法有蚁群算法^[3-4]、禁忌搜索^[5]、遗传算法 (genetic algorithm, GA)^[6-7]、粒子群优化算法^[8] 以及多种启发式智能混合算法^[9-12] 等, 大的计算代价是 NP 问题的难点和缺点。

由于网络化防空体系中各作战平台的协同是基于双方对抗风险型的动态决策, 各参与协同的作战平台必须在约束的很短时间内, 发现并识别威胁目标, 制定并实施作战方案, 因此体系中协同目标分配算法必须具有很高的实时性要求。“实时”并非越快越好, 而是指在规定的短时间内给出问题的解。如果没有时间约束, 使用算法来寻求目标分

配的最优解没有实际意义。随着未来可能遭受威胁目标规模的增大、参与协同的作战单元的增多, 全局搜索算法的计算代价会呈指数级增长, 这使得全局搜索算法很难在规定的短时间内找到问题的最优解。因此, 全局搜索算法并不适用于未来网络化体系的协同目标分配问题的求解。未来该体系下协同目标分配算法必须满足实时性的要求, 倾向于在规定的“短”时间内得到“好”的或“满意”的解, 而得到的解并不一定是“最优”的解。研究基于时间约束的多作战平台协同目标分配问题具有重要的实际意义。

针对上述问题, 本文提出了满足实时性要求的协同目标分配方法——改进的分布协同拍卖算法。该算法对协同目标分配的求解并不一定是问题的“最优”分配方案, 而是在规定的约束时间内给出“较好”的接近最优的分配方案。

1 问题描述

网络化防空体系的协同目标分配决策能力是该体系的一项重要功能, 也是自动化指挥控制系统中的一项重要辅

助决策,在指挥控制系统中占有重要的地位,是网络化作战指挥决策中的一个核心问题。各作战平台协同目标分配决策的最终目的是使各平台中的武器攻击效能最大,在网络化防空体系中,协同目标分配的策略应遵循尽可能地消灭敌人,保护自己的战术原则。即我方对目标的摧毁概率最大从而使我方的生存概率最大,或者我方被摧毁的概率最小。

在此原则下,求最优化的协同目标分配应该考虑以下几点:

(1) 网络化防空体系中各作战平台中武器的特点。包括各作战平台中武器的类别、型号、数量、位置、对各类威胁目标的毁伤效能以及弹药用量等;

(2) 威胁目标的特点。主要有目标的类型、数量、运动特征、价值、威胁程度、易损性以及目标的集合特征等;

(3) 最优准则。对威胁目标的毁伤程度最大,所用的武器平台数目和弹药的消耗最小等。

考虑网络化防空体系中的 N 个作战平台 ($Pla_i (i=1, 2, \dots, N)$) 参与对 M 个威胁目标 ($Tar_j (j=1, 2, \dots, M)$) 的协同目标分配问题。其中作战平台 Pla_i 中武器性能相同,武器数量为 $Q_i (i=1, 2, \dots, N)$,作战平台 Pla_i 中 Q_i 个武器标号分别为 $Num_k (k=1, 2, \dots, Q_i)$,平台发射单发武器代价为 $S_i (i=1, 2, \dots, N)$ 。

各作战平台协同时,通过 C^3I 系统,得到以下信息:

(1) 目标 T_j 威胁度为 $W_j (j=1, 2, \dots, M)$ 。目标的威胁度与该目标的攻击意图和地面可能被攻击的目标的价值有关^[13];

(2) 作战平台 i 对目标 j 的单发毁伤概率为 $P_{i,j}$ 。 $P_{i,j}$ 由各作战平台综合考虑平台中武器使用的技术性能指标、威胁目标运动位置等参数后确定^[13-14]。

W 和 P 两个参数都随时间的变化而变化,具有实时性特征,需要 C^3I 系统实时收集。本文是在约束的时间内考虑协同目标分配问题,算法所耗时间很短,因此本文假设在这段约束的时间内,由 C^3I 系统收集的目标威胁度 W 和作战平台对目标单发毁伤概率 P 保持不变,两个参数在约束时间内都为定值,这也是设计本文模型的适用条件和假设基础。

定义 1 目标的分配矩阵为 $\mathbf{X} = [x_{i,j}]_{N \times M}, x_{i,j}$ 表示作战平台 Pla_i 用来抗击威胁目标 Tar_j 的武器数量。

协同目标分配问题的目标函数包含以下因素:

(1) 分配方案的目标毁伤效益

$$B(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^M W_j \cdot \left[1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{i,j})^{x_{i,j}} \right] \quad (1)$$

(2) 分配方案的攻击代价

$$C(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N \left[S_i \cdot \sum_{j=1}^M (x_{i,j}) \right] \quad (2)$$

(3) 目标函数

$$F(\mathbf{X}) = \alpha \cdot B(\mathbf{X}) - (1 - \alpha) \cdot C(\mathbf{X}) \quad (3)$$

式中, $\alpha \in (0, 1)$ 是权值系数。

在网络化防空体系中,协同目标分配的策略遵循尽可能

能地保护自己的战术原则,因此分配方案的目标毁伤效益的权重系数比攻击代价的权重系数大得多,即 α 接近于 1。由于各作战平台的攻击代价对目标函数值影响较小,本文不妨令 $\alpha=1$ 。

这样,以 $\mathbf{X}_{N \times M}$ 为决策变量的极大化毁伤目标总效益的武器目标分配 (weapon target assignment, WTA) 问题可以用数学模型 M 来描述,模型 M 的目标函数为

$$\max F(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^M W_j \cdot \left[1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{i,j})^{x_{i,j}} \right] \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^M x_{i,j} \leq Q_i \quad (5)$$

$$x_{i,j} \geq 0 \text{ 且为整数} \quad (6)$$

在模型 M 中,目标函数(4)表示极大化毁伤目标的总效益;式(5)表示各作战平台抗击威胁目标的武器数量要满足的约束条件;式(6)表示决策变量的约束条件。

2 改进的分布协同拍卖算法求解

本文设计的基于时间约束多平台协同目标分配的算法过程类似于分布协同拍卖机制^[15]的过程,其基本原理为:按照一定的规则生成竞拍顺序,各作战平台按顺序竞拍到各自要抗击的目标,一轮完成后得出目标分配方案,若时间允许,则按照规则生成新的竞拍顺序进行新一轮竞拍,得出新的目标分配方案;若新的分配方案优于旧分配方案则取代之,重复多轮竞拍,直到时间超出限制,最后得出当前最好的分配方案。

2.1 改进的拍卖机制的设计

本文设计的算法参考了文献^[16]中算法的设计思路,针对本文所研究的问题进行了算法的改进。文献^[16]中,在竞拍前各 Agent (文献^[16]指的是无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV)) 根据待攻击的目标构造所有可能的攻击方案,在竞拍过程中,各 Agent 根据贪婪法则,从构造好的方案列表中选择最好的攻击方案。而在网络化防空体系中,如果将各作战平台看成单个 Agent,那么随着各 Agent 载弹量的增加和可能面临的威胁目标数量的增多,各 Agent 构造所有攻击方案的数量会呈现指数级增长,各 Agent 构造攻击方案所耗时间也会大量增加。网络化防空体系对协同目标分配具有很强的实时性要求,因此该算法并不能直接用于解决本文研究的问题。

因此,本文对机制进行了改进,将各作战平台中的每个武器看成单个 Agent,在竞拍前各 Agent 根据待攻击的目标构造所有可能的攻击方案,竞拍序列产生后,在竞拍过程中,轮到某一作战单元进行拍卖时,该作战单元中的各 Agent 依次根据贪婪法则,从各自构造好的方案列表中选择最好的攻击方案,所以轮到拍卖的作战单元 Pla_i 时,参加拍卖次数为 Q_i 。由于作战平台中各 Agent 之间具有相互独立性,一个平台各 Agent 依次构造所有可能的攻击方案 (数量为 $(M+1) \cdot Q_i$) 比一个平台中所有 Agent 一起构造

所有可能的攻击方案(数量为 $(M+1)^Q$)更为简单,所以该算法很大程度上减少单个作战平台构造所有可能的攻击方案的数量,从而缩短了算法所需的时间。

2.2 平台组的竞拍序列生成规则

在一般的分布协同拍卖机制中,都是随机生成竞拍序列。考虑本文研究所问题的特殊性,尤其在武器序列数量较大而时间较短的情况下,随机产生作战平台竞拍顺序可能导致可行解的不合理,所以在对该军事问题规则分析的基础上,对平台组生成竞拍序列的规则加以约束。

定义 2 平台优先级:在某种态势下,各平台都有各自的优先级,用来表示选择某平台进行攻击的优先程度,平台优先级高,表示该平台的攻击效果好。

在综合考虑平台对目标的单发命中率和平台载弹量的基础上,提出平台优先级 $Pr_i (i=1,2,\dots,N)$ 的计算公式,作为竞拍序列生成规则的基础。

$$Pr_i = \beta_1 \cdot \sum_{j=1}^M W_j \cdot P_{i,j} + \beta_2 \cdot Q_i \quad (7)$$

式中, β_1 和 β_2 为权值系数。式(7)综合考虑了平台对目标的单发命中率、目标的威胁度以及平台载弹量对该平台优先级的影响,这符合所研究问题的实际情况。

基于平台优先级的竞拍序列生成规则的具体步骤如下:

步骤 1 初始化竞拍序列 $\text{rank}[N], l=1$;

步骤 2 对优先级 Pr_i 进行归一化处理,得到选择概率 Pb_i , 即

$$Pb_i = Pr_i / \sum_{k=1}^N Pr_k, i=1,2,\dots,N \quad (8)$$

步骤 3 计算每个平台的累积概率 Pb'_i , 即

$$Pb'_i = \sum_{k=1}^i Pb_k \quad (9)$$

步骤 4 生成一个 $[0,1]$ 间随机数 r 。如果 $r \leq Pb'_1$, 则选择平台 Pla_1 ; 否则,选择第 i 个平台 $Pla_i (2 \leq i \leq N)$, 使得 $Pb'_{i-1} \leq r \leq Pb'_i$ 。令被选择的平台为 $Pla_m, \text{rank}(l) = Pla_m, l=l+1$;

步骤 5 更新被选择平台 Pla_m 的优先级 Pr_m , 使 $Pr_m=0$;

步骤 6 假如 $l < N+1$, 返回步骤 2;

步骤 7 生成一组作战平台的竞拍序列 $\text{rank}[N]$ 。

2.3 单个 Agent 所有攻击方案的竞拍原则

武器的攻击方案定义为该武器可能攻击的目标。由于一个武器只能攻击一个目标,所以每个武器的所有攻击方案都相同。例如,待攻击的 M 个目标为 $\{Tar_1, Tar_2, \dots, Tar_M\}$, 则单个武器可构造的所有攻击方案序列 A 为

$$A = [A_i]_{1 \times (M+1)} = [\emptyset, Tar_1, Tar_2, \dots, Tar_M] \quad (10)$$

序号为 Num_k^i 的武器选择攻击方案 $A_{i,t}$ 产生的毁伤效益为

$$V(A_{i,t}) = \begin{cases} 0, & t = 1 \\ W_{t-1} \cdot P_{i,t-1}, & 2 \leq t \leq M+1 \end{cases} \quad (11)$$

攻击方案竞拍原则:序号为 Num_k^i 的武器选择毁伤效益最大的攻击方案。计算式为

$$A_k^i(\text{selected}) = V^{-1}(\max(V(A_i))) \quad (12)$$

2.4 目标的威胁度更新法则

在拍卖过程中,各作战平台中的武器竞拍到自己的攻击方案后,分配给该武器的目标威胁度将会降低,而后竞拍的武器对所有目标的当前威胁度进行更新,并根据更新的威胁度重新计算其所有攻击方案的毁伤效益。根据更新后方案的毁伤效益来竞拍攻击方案,这样避免了多个武器过于集中的攻击相同目标。

武器选择某一攻击方案 $A_{i,t}$ 后,攻击方案对应的目标的威胁度会更新,更新法则为

$$W_j(\text{new}) = (1 - P_{i,j}) \cdot W_j(\text{old}) \quad (13)$$

轮到下一个武器进行竞拍时,该武器按新的目标威胁度计算各攻击方案的毁伤价值,使整个竞拍过程更为合理。

2.5 分配方案的目标函数

每一轮拍卖结束后,每个作战单元的各武器都竞拍到自己的攻击方案 $A_k^i(\text{selected})$, 将所有的 $A_k^i(\text{selected})$ 进行组合形成该轮的目标分配矩阵 $X_{N \times M}$, 代入式(4)得出目标函数值。

2.6 改进的分布协同拍卖算法流程

算法具体的步骤如下:

步骤 1 初始化:

(1) 探测并识别威胁目标,并计算每个目标的威胁度;

(2) 确定整个网络化防空体系中参与协同抗击目标

的作战平台;

(3) 构造参与协同的各作战平台中的每个武器的攻击方案列表;

(4) 读入参与协同的作战平台 i 中的武器对目标 j 的单发毁伤概率为 $P_{i,j}$ 。

步骤 2 按照规则产生一组作战平台的竞拍序列;

步骤 3 轮到竞拍的作战平台 Pla_i 开始竞拍;

步骤 4 作战平台 Pla_i 中的 Q_i 个武器,根据武器标号 $Num_k^i (k=1,2,\dots,Q_i)$ 的先后顺序开始竞拍;

步骤 5 轮到竞拍的武器根据贪婪法则,从该武器构造好的攻击方案列表中选择最好的攻击方案,并更新目标威胁度;

步骤 6 返回步骤 4,直到作战平台 Pla_i 中所有的武器竞拍结束;

步骤 7 返回步骤 3,直到所有的作战平台竞拍结束;

步骤 8 一轮拍卖结束,计算拍卖生成目标分配方案的目标函数,与之前的最优方案比较,若优于之前的作战方案,则将最优方案替换为本轮的目标分配方案;

步骤 9 若约束时间允许,返回步骤 2;

步骤 10 给出该算法最优的目标分配方案及其目标函数。

该算法具体流程图如图 1 所示。

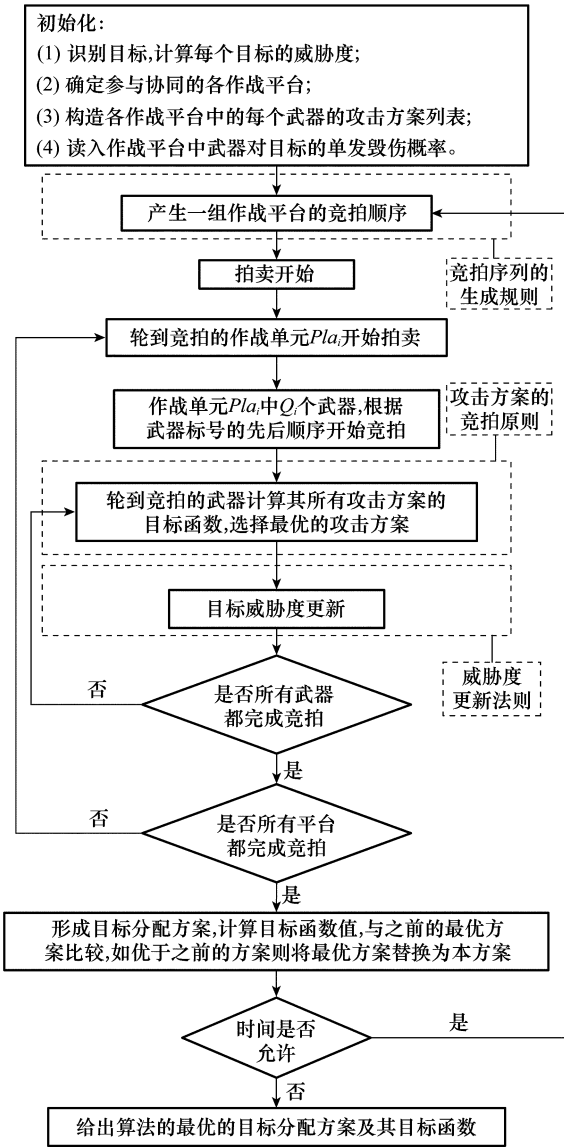


图 1 改进的分布协同拍卖算法流程图

3 仿真分析和比较

本文算法用 Matlab 语言编程实现,并在 Inter(R) Pentium(R) 4 CPU 3.00 GHz 计算机上进行了大量的仿真实验。下文给出算例仿真结果,实验中取 $\beta_1 = 3, \beta_2 = 1$ 。

3.1 可靠性分析

选择两种情况对分配算法的可靠性进行仿真和验证。

在前面假设的条件下,目标威胁度 \mathbf{W} 和平台对目标的单发毁伤概率 \mathbf{P} 都为定值。

情况 1 作战平台数量 $N=4$,各作战平台装载的武器数量 $\mathbf{Q}=[Q_i]_{1 \times N}=[4,4,2,5]$;目标数量 $M=5$,目标的威胁度 $\mathbf{W}=[W_j]_{1 \times M}=[0.2,0.35,0.15,0.05,0.25]$ 。

作战平台中的武器对目标的单发毁伤概率为

$$\mathbf{P} = [P_{i,j}]_{N \times M} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.7 & 0.0 & 0.6 & 0.5 \\ 0.7 & 0.0 & 0.8 & 0.5 & 0.0 \\ 0.9 & 0.6 & 0.3 & 0.7 & 0.8 \\ 0.0 & 0.8 & 0.7 & 0.5 & 0.0 \end{bmatrix}$$

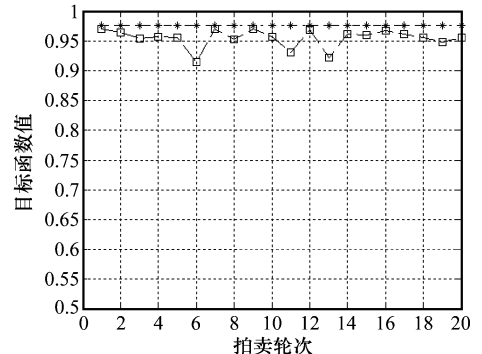
情况 2 作战平台数量 $N=6$,各作战平台装载的武器数量 $\mathbf{Q}=[Q_i]_{1 \times N}=[2,2,1,2,1,1]$;目标数量 $M=7$,目标的威胁度 $\mathbf{W}=[W_j]_{1 \times M}=[0.1,0.25,0.15,0.05,0.2,0.1,0.1,0.05]$ 。

作战平台中的武器对目标的单发毁伤概率为

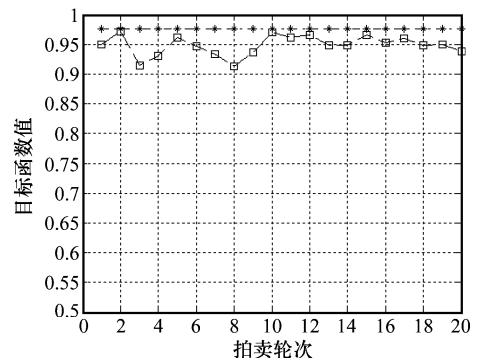
$$\mathbf{P} = [P_{i,j}]_{N \times M} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.7 & 0.0 & 0.6 & 0.8 & 0.0 & 0.8 \\ 0.1 & 0.0 & 0.8 & 0.5 & 0.0 & 0.9 & 0.7 \\ 0.2 & 0.9 & 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0.7 & 0.6 \\ 0.2 & 0.8 & 0.3 & 0.0 & 0.6 & 0.3 & 0.2 \\ 0.0 & 0.3 & 0.9 & 0.7 & 0.9 & 0.2 & 0.0 \\ 0.7 & 0.3 & 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.9 & 0.1 \end{bmatrix}$$

时间约束条件下,规定算法的最大拍卖轮次为 $T_{max}=20$ 。

图 2(a)、图 2(b)分别示出了情况 1、情况 2 的仿真实验中每轮拍卖的目标函数值的变化。



(a) 情况1



(b) 情况2

—□—: 每轮目标函数值的变化; *—: 最优值

图 2 每轮拍卖的目标函数值的变化

表 1 为两种情况分别用该算法运行 30 次的统计结果,其中优化百分比为该算法的平均目标函数值与理想目标函数值的比值。

表 1 算法的可靠性分析结果统计数据表

性能参数	分配情况	
	情况 1	情况 2
拍卖轮次	20	20
实验次数	30	30
平均目标函数值	0.956 2	0.958 7
理想目标函数值	0.983 0	0.985 1
优化百分比/(%)	97.27	97.32

从图 2 和表 1 可以得出,该算法对情况 1 和情况 2 所得到的分配方案都具有很好的优化效果,是接近理想解的“满意”解,能够满足目标分配算法的可靠性要求。

3.2 实时性分析

3.2.1 初始化时间比较

这里的初始化时间主要指各 Agent 构造所有攻击方案所耗的时间。假设作战平台和目标的数量为 40×40 和 60×60 ,各作战平台的载弹量都为 $n(n=1,2,3)$ 。使用本算法与文献[16]中的分布协同拍卖算法进行初始化时间(指单个作战平台的初始化时间)的比较,实验次数为 30 次,平均结果如表 2 所示。

表 2 两种算法初始化时间的比较

$N \times M$	n	算法	初始化时间/ms
40×40	1	协同拍卖	0.156
		改进协同拍卖	0.156
	2	协同拍卖	6.382
		改进协同拍卖	0.308
	3	协同拍卖	262.3
		改进协同拍卖	0.466
60×60	1	协同拍卖	0.312
		改进协同拍卖	0.312
	2	协同拍卖	19.044
		改进协同拍卖	0.619
	3	协同拍卖	1 161.0
		改进协同拍卖	0.936

从表 2 可以得出,随着平台载弹量的增加和目标数量的增多,文献[16]中算法的初始化所耗的时间呈指数级增长,而本文的改进的协同拍卖算法初始化所耗时间则呈缓慢增长,能够满足算法的实时性要求。

3.2.2 时间约束条件下本算法与遗传算法的性能比较

假设作战平台和目标的数量为 40×40 ,各作战平台的载弹量为 1,设置时间约束分别为 0.1 s、0.3 s、0.5 s、0.7 s、0.9 s、1.1 s。使用本算法和文献[6]中设计的遗传算法进行性能比较,分别进行 30 次实验,平均结果如表 3 所示。

图 3 为时间约束条件下,两种算法的平均目标函数值的变化比较。

表 3 时间约束条件下算法的性能比较

算法	时间约束/s	拍卖/迭代次数	目标函数值
改进协同拍卖	0.1	15	0.893 4
	0.3	43	0.928 9
	0.5	70	0.941 1
	0.7	102	0.941 1
	0.9	135	0.941 1
	1.1	163	0.941 1
遗传算法	0.1	5	0.625 5
	0.3	16	0.734 4
	0.5	24	0.772 3
	0.7	33	0.866 4
	0.9	42	0.883 3
	1.1	53	0.897 1

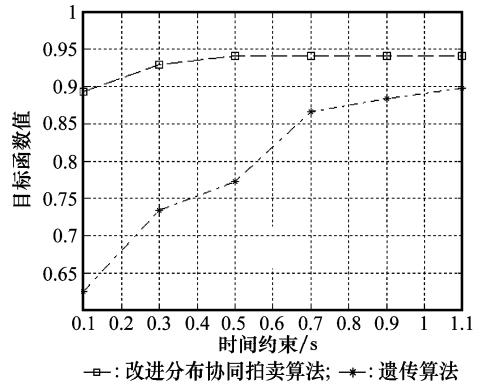


图 3 平均目标函数值的变化

从表 3 和图 3 可以得出:

- (1) 在约束时间内(小的时间限制),改进分布协同拍卖算法得出的分配方案要优于遗传算法得出的结果;
- (2) 改进分布协同拍卖算法收敛速度很快,能够很快搜索到本算法所能达到的优化解(本实验在 0.5 s 时就能够达到本算法的优化解)。

4 结束语

网络化防空体系中各作战平台之间协同目标分配问题具有重要的理论研究和军事应用意义,一直以来都在吸引人们不断地深入探索。本文从研究问题的实际意义出发,在指出未来网络化防空体系对目标协同分配实时性要求很高的基础上,提出了一种改进的分布协同拍卖算法解决思路,并通过仿真实验对算法的执行效果和统计特征都进行了分析和比较。分析和比较的结果证明:本算法在约束时间内(小的时间限制)能够得到接近理想最优值的优化解,适合于未来网络化防空对可靠性和实时性的要求,从而为有效解决复杂的网络化防空体系协同目标分配问题探索了一条解决思路。

参考文献:

- [1] Cai H P, Liu J X, Chen Y W, et al. Survey of the research on dynamic weapon-target assignment problem[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2006, 17(3): 559 - 565.
- [2] Lloyd S P, Witsenhausen H S. Weapons allocation is NP-complete[C]//*Proc. of the IEEE Summer Simulation Conference*, 1986: 1054 - 1058.
- [3] Wang Y X, Qian L J, Guo Z, et al. Weapon target assignment problem satisfying expected damage probabilities based on ant colony algorithm[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(5): 939 - 944.
- [4] 黄树采, 李为民. 目标分配问题的蚁群算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 79 - 80. (Huang S C, Li W M. Research of ant colony algorithm for solving target assignment problem[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(1): 79 - 80.)
- [5] Xin B, Chen J, Zhang J, et al. Efficient decision makings for dynamic weapon-target assignment by virtual permutation and tabu search heuristics[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2010, 23(3): 561 - 572.
- [6] 王玮, 程树昌, 张玉芝. 基于遗传算法的一类武器目标分配方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1708 - 1711. (Wang W, Cheng S C, Zhang Y Z. Research on approach for a type of weapon target assignment problem solving by genetic algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(9): 1708 - 1711.)
- [7] 刘梅, 赵刚, 权太范. 新型遗传算法在防空指挥系统目标分配中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(3): 456 - 460. (Liu M, Zhao G, Quan T F. New-type genetic algorithm for weapon-target assignment of the antiaircraft command system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(3): 456 - 460.)
- [8] 王小艺, 刘载文, 侯朝桢, 等. 防空武器多目标优化分配建模与决策[J]. 兵工学报, 2007, 28(2): 228 - 231. (Wang X Y, Liu Z W, Hou C Z, et al. Modeling and decision making of multi-target optimization assignment for aerial defense weapon[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(2): 228 - 231.)
- [9] Lee M Z. Constrained weapon-target assignment: enhanced very large scale neighborhood search algorithm[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2010, 40(1): 198 - 204.
- [10] Lee Z J, Su S F, Lee C Y. Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2003, 33(1): 113 - 121.
- [11] 余家祥, 王绍华, 程文鑫. 基于改进局部搜索遗传算法的目标分配决策[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(6): 1114 - 1117. (Yu J X, Wang S H, Cheng W X. Target allocation decision making based on improved genetic algorithms with local search[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(6): 1114 - 1117.)
- [12] Lee Z J, Lee C Y, Su S F. An immunity-based ant colony optimization algorithms for solving weapon-target assignment problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2002, 2(1): 39 - 47.
- [13] Beaumont P, Chaib-draa B. Multiagent coordination techniques for complex environment: the case of a fleet of combat ships[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2007, 37(3): 373 - 385.
- [14] Brown C, Fagan P, Hepplewhite A, et al. Real-time decision support for the anti-air warfare commander[C]//*Proc. of the 6th International Command and Control Research and Technology Symposium*, 2001: 1 - 29.
- [15] Palmer D, Kirschenbaum M, Murton J, et al. Decentralized cooperative auction for multiple agent task allocation using synchronized random number generators[C]//*Proc. of the IEEE /RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003: 1963 - 1968.
- [16] 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 - 183. (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 - 183.)