

# 基于粒子群拍卖混合算法的空空导弹制导权移交技术

费爱国, 张陆游, 刘 刚, 王 远  
(中国人民解放军 95899 部队, 北京 100085)

**摘 要:** 为解决超视距协同空战中的空空导弹制导权移交问题, 首先对空空导弹制导权移交问题进行了数学建模, 构建了我机对目标机制导优先权模型以及我机对空空导弹制导优先权模型, 建立了空空导弹制导权移交的任务分配模型; 其次为实现对大规模空空导弹制导权移交问题的快速寻优求解, 提出了一种分布式的粒子群拍卖混合算法, 该算法对粒子群算法进行了改进, 并融合了拍卖算法的优点, 可在较短的时间内获得较为合理的制导权移交方案, 具有较好的动态性、全局寻优性能以及易于计算机编程实现等优点。最后, 通过仿真实验证明了本方法的合理性和有效性。

**关键词:** 制导权移交; 粒子群算法; 拍卖算法

中图分类号: TN95 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2013)03-0340-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.03.007

## The Technique for Air-to-Air Missile Guidance Superiority Handover Based on Particle Swarm Auction Hybrid Algorithm

FEI Ai-guo, ZHANG Lu-you, LIU Gang, WANG Yuan  
(Unit. 95899 of PLA, Beijing 100085, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of Air-to-Air Missile (AAM) guidance power handover during the Beyond-Visual-Range (BVR) cooperative air combat, the mathematic models composed of the AAM guidance power handover mission assignment model and the guidance superiority models for our aircrafts to target or AAM are firstly built. Secondly, a Particle Swarm Auction Hybrid Algorithm (PSAHA) is proposed for the optimization of large scale AAM guidance superiority handover, this algorithm has the both good performances of improved particle swarm algorithm and auction algorithm at the same time, it can get a reasonable guidance superiority handover scheme within short time, and is high dynamics, good global optimization and easy for computer program realization. At last, simulation experiment results show that this method is reasonable and valid.

**Key words:** Guidance superiority handover; Particle swarm algorithm; Auction algorithm

### 0 引 言

空空导弹协同制导是超视距协同空战的关键技术, 当制导飞机受到威胁时, 可以将人在回路制导权移交给其他友机, 受威胁飞机规避, 这样不仅降低我机空战损失, 还保证了空空导弹的制导精度, 提高了

整体作战效能, 对空战战法创新具有重大意义<sup>[1]</sup>。当前国外关于空空导弹协同制导问题的研究报道非常少见, 目前只有美军 AIM-120 空空导弹被报道过具备协同制导能力, 但未见美军在实战中使用过; 国内关于空空导弹协同制导问题的研究还处于概念性研究阶段, 已部分学者提出了空空导弹协同制导的

空战应用模式,但尚未建立较为完整的空空导弹协同制导理论框架,空空导弹制导权移交的技术手段缺乏,还未形成空空导弹协同制导能力<sup>[2]</sup>。

空空导弹协同制导的核心在于求解空空导弹制导权移交问题,它主要解决的是空空导弹的制导权从一个飞机平台向另一个飞机平台切换问题,其实质是一个整数规划问题的优化求解。本文针对当前国内空空导弹制导权移交理论和技术手段的不足,首先对空空导弹制导权移交问题建立了较为完整的数学模型,然后基于改进的粒子群算法和拍卖算法,提出了一种分布式的动态性、实时性和全局寻优性能都较好的粒子群拍卖混合算法,并将其应用于大规模空空导弹制导权移交问题的优化求解,为空空导弹制导权移交提供了一条可行的技术途径。

### 1 空空导弹制导权移交问题的数学模型

#### 1.1 我机的制导优先权模型

在空空导弹制导权移交中,为描述我方各飞机平台对空空导弹的协同制导能力,首先需要对我机的制导优先权进行数学建模。我机的制导优先权包括:我机对目标机(目标机是指需要进行制导权移交的空空导弹正在攻击的敌机)的制导优先权、我机对空空导弹的制导优先权。

##### 1.1.1 我机对目标机的制导优先权

在多机协同空战中,决定我机对目标机优先权的因素主要包括:(1)空战态势优势;(2)空战效能优势;(3)空战事件优势。我机对目标机的制导优先权计算可参考文献<sup>[3]</sup>的空战威胁计算模型,只要将敌我双方参数互换,即可得到我机对目标机的制导优先权  $g_{ij}$ 。

##### 1.1.2 我机对空空导弹的制导优先权

我机对空空导弹的制导优先权包括:角度优势和距离优势。

图1给出了空空导弹与我机相对态势图。在图1中,  $d_{ij}$  为第  $i$  架我机与第  $j$  枚导弹的目标线,  $\theta_{ij}$  为第  $i$  架我机速度  $V_{ri}$  方向偏离目标线  $d_{ij}$  的角度;  $\sigma_{ij}$  为第  $j$  枚导弹速度  $V_{Mj}$  方向偏离目标线  $d_{ij}$  延长线的角度。规定上述两个角度以相对目标线右偏为正,左偏为负,则有

$$0 \leq |\theta_{ij}| \leq 180^\circ \quad 0 \leq |\sigma_{ij}| \leq 180^\circ$$

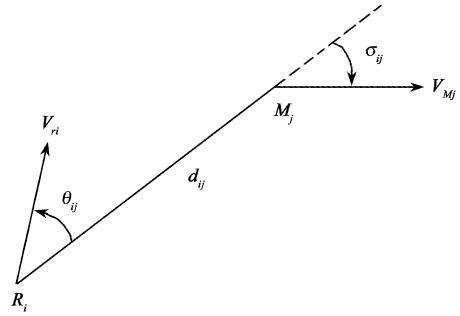


图1 空空导弹与我机相对态势图

Fig. 1 Situation of my aircraft to AAM

##### (1) 角度优势

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 - \left( \frac{|\theta_{ij}|}{2\delta_m} + \frac{|\sigma_{ij}|}{2\phi_m} \right) & 0 < |\theta_{ij}| \leq \delta_m, 0 < |\sigma_{ij}| \leq \phi_m \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\alpha_{ij}$  为角度优势,  $\phi_m$  为空空导弹尾部天线有效工作锥角,  $\delta_m$  为我机雷达最大搜索锥角。

##### (2) 距离优势

距离优势与我机雷达的导弹制导距离有关。设第  $i$  架我机雷达对导弹的最大制导距离为  $r_m$ , 距离优势  $\rho_{ij}$  为

$$\rho_{ij} = \begin{cases} 0 & d_{ij} > r_m \\ e^{-3d_{ij}/r_m} & d_{ij} \leq r_m \end{cases} \quad (2)$$

##### (3) 我机对空空导弹的制导优先权模型

如果角度优势和距离优势中有一项为零, 则我机对导弹制导优势为零, 因此第  $i$  架我机对第  $j$  枚空空导弹的制导优势  $q_{ij}$  定义为二者乘积

$$q_{ij} = e_1 \alpha_{ij}^{e_1} \cdot e_2 \rho_{ij}^{e_2} \quad (3)$$

式中,  $e_1, e_2$  为分别角度优势、距离优势的权系数, 且  $e_1 + e_2 = 1 (0 \leq e_1, e_2 \leq 1)$ 。  $e_1$  和  $e_2$  可由专家经验值给出。

##### 1.1.3 我机的制导优先权值

在计算得到我机对目标机和我机对空空导弹的制导优先权后, 将两者相乘即可得第  $i$  架我机的制导优先权

$$G_{ij} = g_{ij}^{u_1} \cdot q_{ij}^{u_2} \quad (4)$$

式中,  $G_{ij}$  表示第  $i$  架我机的制导优先权,  $u_1, u_2$  分别为第  $i$  架我机对目标机和空空导弹的制导优先权系数, 且  $u_1 + u_2 = 1 (0 \leq u_1, u_2 \leq 1)$ 。  $u_1$  和  $u_2$  可由专

家经验值给出。

### 1.2 空空导弹制导权移交的任务分配模型

假设空中有  $N$  枚空空导弹需要进行制导权移交,有  $M$  架我机可参与空空导弹制导权移交,我机的制导优先权为  $G_{ij}$ ,第  $i$  架我机对第  $j$  枚导弹的制导能力为  $c_{ij}$ , $c_{ij}$  只取 0 或 1,当  $c_{ij}$  为 0,表示第  $i$  架我机不具备制导第  $j$  枚导弹的能力,当  $c_{ij}$  为 1,表示第  $i$  架我机可以对第  $j$  枚导弹进行制导。其中  $i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$ 。

引入如下导弹制导权移交的决策矩阵,即

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $x_{ij}$  表示我方第  $i$  架飞机是否参与对第  $j$  枚导弹制导权移交的任务分配。

空空导弹制导权移交的任务分配模型可描述为:寻找问题的一组解  $\mathbf{X}$ ,目标函数满足制导优势的期望值最大,目标函数与约束条件的表达如下:

目标函数:

$$F(\mathbf{X}) = \text{Max} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M G_{ij}(1 - (1 - c_{ij})^{x_{ij}}) \quad (6)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} \leq L_j, i = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} \leq 1, j = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$\Delta(A, j) \leq \Delta_i, i = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

其中,约束条件式(7)表示第  $i$  架我机最多制导  $L_j$  枚导弹;约束条件式(8)表示一枚导弹最多由一架我机制导交接;约束条件式(9)表示对于分配给第  $i$  架我机的目标机  $A$  和导弹  $j$  必须同时处于第  $i$  架我机雷达照射区  $\Delta_i$  内;约束条件式(10)表示第  $i$  架我机是否执行对第  $j$  枚导弹的制导交接任务,1 为是,0 为否。此优化问题是一个整数规划问题。

## 2 基于粒子群拍卖混合算法的制导权移交方法

粒子群算法是一种结构简单、收敛速度较快的优化算法,但存在“早熟”现象,容易陷入局部最优,

且粒子群算法是一种集中式优化算法,其灵活性和动态性较差,实际上分布式优化算法更适合于复杂多变的空战环境。拍卖算法是一种分布式优化算法,当优化规模较大时,其通信量较大,优化搜索效率和实时性不高。本文针对以上两种算法存在的问题进行了相关改进,并提出了一种分布式的动态性、实时性和全局寻优性能都较好的粒子群拍卖混合算法,用于优化求解较大规模的空空导弹制导权移交问题。

### 2.1 粒子群算法

粒子群算法<sup>[4]</sup>是由 Kenney 和 Eberhart 于 1995 年提出的,该算法一般采用实数编码,同遗传算法相比,由于没有选择、交叉与变异等操作,所以算法结构相对简单,且具有收敛速度较快的特点。粒子群算法是基于适应度值进行寻优的,粒子群的个体(这里称作粒子)代表问题的一个可能解,每个粒子具有位置和速度两个特征,粒子位置坐标对应的目标函数值即可作为该粒子的适应度,算法通过粒子适应度来衡量粒子的优劣。

假设在  $D$  维搜索空间中,有  $t$  个粒子组成一群体,第  $i$  个粒子在  $D$  维空间中的位置表示为  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$ ,第  $i$  个粒子经历过的最好位置(等同于有最好的适应度)记为  $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ ,每个粒子的飞行速度为  $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。在整个群体中,所有粒子经历过的最好位置为  $\mathbf{p}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ ,每一代粒子根据下面公式更新自己的速度和位置

$$v_{id} = wv_{id} + c_1r_1(p_{id} - x_{id}) + c_2r_2(p_{gd} - x_{id}) \quad (11)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (12)$$

式中,  $d = 1, 2, \dots, D, i = 1, 2, \dots, t, w$  为惯性权重,一般在  $0.1 \sim 0.9$  之间取值,  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子,  $r_1$  和  $r_2$  是  $[0, 1]$  之间的随机数。公式有三部分组成,第一部分是粒子先前的速度,说明了粒子目前的状态;第二部分是认知部分(Cognition Modal),是从当前点指向此粒子自身最好点的一个矢量,表示粒子的动作来源于自身经验的部分;第三部分为社会部分(Social Modal),是一个从当前点指向种群最好点的一个矢量,反映了粒子间的协作和知识的共享。三个部分共同决定了粒子的空间搜索能力。第一部分起到了平衡全局和局部搜索的能力。第二部分使粒

子有了足够强的全局搜索能力,避免陷入局部最优解。第三部分体现了粒子间的信息共享。算法在这三部分共同作用下才能有效获得全局最优解。更新过程中,粒子每一维的位置、速度都被限制在允许范围之内。如果  $v_{ij}$  太大,粒子可能飞过全局最优解的位置;如果太小,可能降低粒子的全局搜索能力。

### 2.2 拍卖算法

拍卖算法是一种分布式的资源分配方法,其本质是一种搜索树算法<sup>[5]</sup>。在拍卖算法中有两类智能体:拍卖智能体和竞拍智能体。拍卖智能体代理任务进行拍卖,竞拍智能体则根据自身状态和任务的状况投标。通过拍卖,拍卖智能体通过价格最高的原则确定所有参加竞拍的优胜者,它们将共同协作完成任务  $T$ ,从而实现了智能体与任务之间的映射,即完成多个智能体之间的任务分配。拍卖算法的任务分配模型描述如下<sup>[6-7]</sup>:

$$\text{Auction} = \langle T, A, B, U, C, J \rangle$$

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  为需完成的任务集合;

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  为代理任务进行拍卖的拍卖智能体集合;

$B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$  为参与竞拍的竞拍智能体集合;

$U = \{U_{B_1}^{T_1}, \dots, U_{B_1}^{T_m}, \dots, U_{B_i}^{T_j}, \dots, U_{B_n}^{T_m}\}$  为智能体完成任务可获得的效益集合,  $U_{B_i}^{T_j}$  表示智能体  $B_i$  完成任务  $T_j$  需获得的效益;

$C = \{C_{B_1}^{T_1}, \dots, C_{B_1}^{T_m}, \dots, C_{B_i}^{T_j}, \dots, C_{B_n}^{T_m}\}$  为智能体完成任务的代价集合,  $C_{B_i}^{T_j}$  表示智能体  $B_i$  完成任务  $T_j$  需付出的代价;

$J = \{J_{B_1}^{T_1}, \dots, J_{B_1}^{T_m}, \dots, J_{B_i}^{T_j}, \dots, J_{B_n}^{T_m}\}$  为竞拍智能体的投标价格集合,  $J_{B_i}^{T_j}$  表示智能体  $B_i$  竞拍任务  $T_j$  的投标价格;

$i \in (0, n], j \in (0, m],$  且  $m, n$  为正整数。

### 2.3 粒子群拍卖混合算法

#### 2.3.1 适应度函数

根据拍卖算法,空空导弹制导权移交过程中有两类智能体:拍卖智能体和竞拍智能体。拍卖智能体是指发出制导权移交请求的我方战机,竞拍智能体是指参与制导权移交的我方其它战机。竞拍智能体负责投标价格计算,拍卖智能体负责对竞拍智能体提交的投标价格进行收集,并基于价格机制确定

优胜者(即获得空空导弹制导权移交方案)。本文通过引入拍卖算法,可以使空空导弹制导权移交的价格计算在我方各战机上分布式进行,从而减轻拍卖智能体的计算负担,提高算法的灵活性。

依据拍卖算法的效益定义,第  $i$  架我机参与第  $j$  枚空空导弹制导权移交的效益为

$$U_{ij} = c_{ij} \cdot e^{C_{ij}} \quad (13)$$

式中,  $c_{ij}$  表示第  $i$  架我机对第  $j$  枚导弹的制导能力,  $C_{ij}$  表示第  $i$  架我机制导优先权。

因为敌我双方的攻击是相互,我机接管友机空空导弹制导时,也存在被敌机攻击的风险,第  $i$  架我机参与第  $j$  枚空空导弹制导权移交的代价定义为

$$C_{ij} = T_{ji} \cdot m_j \quad (14)$$

式中,  $T_{ji}$  为敌机对第  $i$  架我机的空战威胁,可参考文献[3]的空战威胁模型计算获得,  $m_j$  为敌机导弹的单发杀伤概率。

依据拍卖算法的价格定义,第  $i$  架我机参与对第  $j$  枚空空导弹制导权移交价格为

$$J_{ij} = k_1 \cdot U_{ij} - k_2 \cdot C_{ij} \quad (15)$$

式中,  $k_1$  为效益系数,  $k_2$  为代价系数,  $k_1, k_2$  用于调整效益与代价在价格计算中的比例,且  $k_1 + k_2 = 1 (0 \leq k_1, k_2 \leq 1)$ ,  $k_1, k_2$  可由专家经验值给出。

当空空导弹制导权移交优化规模较大时,拍卖算法所需通信量较大,实时性较低,可对我机参与空空导弹制导权移交设置如下约束条件:(1) 导弹拟攻击的敌机必须在参与制导权移交的我机攻击目标集  $\Omega$  之内;(2) 空空导弹、我机必须位于彼此的雷达照射区内;(3) 跟踪敌机与制导导弹的数目不多于我机最多能同时跟踪制导的数目。当我机不满足参与空空导弹制导权移交的约束条件时,该机放弃对该导弹制导权移交的竞标,这样可以降低算法的通信量,提高整个算法的实时性和灵活性。

我方各战机计算获得制导权移交的投标价格后,可通过数据链传送至拍卖智能体,拍卖智能体对价格进行收集并基于价格机制确定优胜者。该优胜者确定问题本质上属于组合优化问题,当优化规模较大时,拍卖算法的优化搜索效率较低。为此,本文通过引入粒子群算法以提高算法的全局搜索效率。定义粒子的适应度函数值为

$$f_{obj} = \sum_{j=1}^N (1 - (1 - J_{ij})^{x_{ij}}) \quad (16)$$

式中,  $f_{obj}$  表示第  $i$  个粒子的适应度函数值,  $x_{ij}$  表示我方第  $i$  架飞机是否参与第  $j$  枚导弹制导权移交的任务分配,  $N$  为需要制导权移交的导弹总数。

### 2.3.2 粒子编码策略

编码是代表解空间中所有可行解的一种形式, 粒子编码策略对算法的全局搜索效率有很大影响。本文对粒子采用十进制顺序编码策略: 粒子的位置和速度向量维数为  $D \times t$ , 维数  $D$  等于需要制导权移交的导弹数  $N$ ,  $t$  为粒子群的粒子数, 粒子的位置和速度都用十进制整数表示, 维数  $D$  按需要制导权交接的空空导弹序号进行顺序编码, 而第  $i$  个粒子的位置表示一个空空导弹制导权移交方案。例如在空战中有 4 枚导弹需要制导权移交, 则  $D = 4$ ; 如果第  $i$  个粒子的位置为  $x_i = (2, 4, 5, 1)$ , 则空空导弹制导权移交方案表示第一枚导弹的制导权移交给我方第二架飞机, 第二枚导弹的制导权移交给我方第四架飞机, 第三枚导弹的制导权移交给我方第五架飞机, 第四枚导弹的制导权移交给我方第一架飞机。

### 2.3.3 算法更新策略

应用粒子群算法优化求解空空导弹制导权移交问题, 主要存在以下两个问题: 一是粒子群算法在粒子的位置、速度更新时, 会产生小数, 这不符合空空导弹制导权移交的应用要求; 二是粒子群算法在快速收敛的同时, 会出现“早熟”现象, 容易陷入局部最优解。本文针对以上问题, 对算法提出以下两点改进: 首先在算法的位置和速度更新时, 都采用“取整”处理, 使粒子值在合理取值范围内; 其次针对粒子群算法“早熟”现象, 借鉴文献[8]中的早熟判断机制和自适应变异策略, 当算法陷入局部最优时, 通过增加一个随机扰动, 使算法跳出局部最优, 以提高算法的全局收敛性能<sup>[9]</sup>。

### 2.3.4 空空导弹制导权移交方法的实现步骤

综上所述, 基于粒子群拍卖混合算法的空空导弹制导权移交方法的具体实现步骤如下:

**步骤 1.** 根据空空导弹制导权移交的任务分工, 设定拍卖智能体和竞拍智能体, 计算我机的制导优先权和敌机对我机的空战威胁值;

**步骤 2.** 初始化粒子的位置和速度, 对粒子采取十进制顺序编码。初始化算法的其它参数, 如粒子群的规模、惯性权重, 学习因子, 迭代次数;

**步骤 3.** 竞拍智能体根据式(15)计算我机参与制导权移交的价格, 拍卖智能体根据式(16)计算粒子的适应度值, 将粒子  $p_i$  设置为当前最优位置,  $p_g$  设置为初始群体中最佳粒子的位置;

**步骤 4.** 对所有粒子, 算法执行如下更新操作:

① 根据式(11)、(12)更新粒子的位置与速度;

② 计算每个粒子适应度值, 如果第  $i$  个粒子适应度值优于  $p_i$  的适应度值, 则对  $p_i$  更新;

③ 如果粒子适应度值优于  $p_g$  的适应度值, 则对  $p_g$  更新;

**步骤 5.** 若粒子陷入“早熟”, 则根据文献[8]计算变异概率  $p_m$ , 并对  $p_g$  执行自适应变异操作;

**步骤 6.** 判断算法终止条件(终止条件为预先设定的迭代次数或达到理想适应值)是否满足, 如果满足, 执行步骤 7; 否则, 转向步骤 4;

**步骤 7.** 输出最佳粒子的位置  $p_g$ , 得到空空导弹制导权移交方案, 算法运行结束。

## 3 计算机仿真与分析

### 试验 1. 算法全局寻优性能仿真分析

针对空空导弹制导权移交问题, 本实验通过研究实数遗传算法(RGA)<sup>[10]</sup>、粒子群算法(PSA)和本文提出的粒子群拍卖混合算法(PSAHA)种群的最大适应度值与迭代次数的变化规律, 来对比分析优化算法的全局寻优性能。实验参数如下: 空中有 4 枚空空导弹需要进行制导权移交, 参与制导权移交的我方飞机数为 30 架, 三种优化算法的种群规模都为 60, 其中, RGA 算法的交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.1, PSA 算法与 PSAHA 算法的惯性权重  $w = 0.8$ , 学习因子为 2, 迭代次数对应的每个最大适应度值是通过 50 次 Monte-Carlo 统计实验得出。仿真结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, PSAHA 算法、PSA 算法和 RGA 算法的收敛代数分别为 10, 22, 40, 即 PSA 算法的收敛速度优于 RGA 算法, 而 PSAHA 算法的收敛速度是三种算法中最快的。这是因为 PSA 算法无需进行交叉、变异、选择等操作, 所以 PSA 算法相比于 RGA 算法简单、高效, 而 PSAHA 算法在 PSA 算法的基础上, 进一步增加了十进制顺序编码和自适应变异策略, 因此本文提出的 PSAHA 算法具有更

好的收敛速度和全局寻优能力。

试验2. 空空导弹制导权移交实例分析

实验参数如下:设红方有6架飞机组成我方空中编队,分别用 $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 表示,其中红机 $r_6$ 正制导两枚导弹 $M_1, M_2$ 攻击蓝机 $b_1, b_2$ ,红机 $r_6$ 在受到敌来袭导弹告警后,请求空空导弹制导权移交。算法中学习因子、权系数等相关参数由专家经验给出。表1为各参战飞机态势参数(速度方向是指速度矢量与X轴正向的夹角,逆时针为正)。表2为仿真实验获得的空空导弹制导权移交方案。

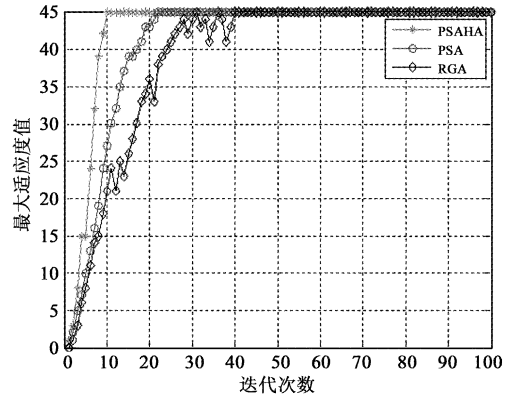


图2 收敛性能比较图

Fig.2 Comparison of algorithm convergence capability

表1 各参战飞机态势参数

Table 1 Situation parameters of each aircraft in the air combat

飞机及导弹编号	横坐标/km	纵坐标/km	速度方向/(°)	速度大小/(m/s)	导弹射程/km		导弹不可逃逸距离/km		雷达探测距离/km
					最大	最小	最大	最小	
$r_1$	-160	-50	17.35	360	200	10	140	20	230
$r_2$	-160	-120	36.87	380	200	10	140	20	230
$r_3$	-120	-160	53.13	390	200	10	140	20	230
$r_4$	0	-160	90	400	200	10	140	20	230
$r_5$	-280	-280	45	400	200	10	140	20	230
$r_6$	-160	0	0	420	200	10	140	20	230
$b_1$	0	0	180	400	220	10	160	20	250
$b_2$	-20	-10	180	400	220	10	160	20	250
$M_1$	-120	0	0	1000					
$M_2$	-80	0	0	1000					

表2 空空导弹制导权移交方案

Table 2 Scheme of air-to-air missile guidance power handover

导弹编号	我机编号	投标价格
$M_1$	$r_3$	0.1030
$M_2$	$r_4$	0.2057

从表2可以看出,本文提出的PSAHA算法同时考虑了制导优势和付出代价,最终选择了位于敌机的侧翼我机 $r_3, r_4$ 作为空空导弹 $M_1, M_2$ 的协同制导平台,可保证我机对导弹有较大制导优势的同时有较小空战损失,该方案选择较为合理。另外,本文提出的PSAHA算法融合了分布式拍卖算法优点,使空空导弹制导权移交具有较好的灵活性,红机可以根据自身资源决定是否参与制导权移交和竞拍价格计算,如在当前时刻,红机 $r_5$ 不满足参与空空导弹制导权移交的约束条件,则红机 $r_5$ 不参与对 $M_1, M_2$ 导

弹制导权移交,这样有效降低了整个算法的计算量和通信量,提高了算法的实时性和自主性。在本实验中,PSAHA算法完成 $M_1, M_2$ 空空导弹制导权移交问题的寻优求解只需花费2ms。

4 结论

空空导弹制导权移交是实现空空导弹协同制导的关键技术,该技术可催生空空导弹我(它)机发射它(我)机制导的新作战模式,能有效降低我机空战损失,提高整体空战效能。本文为解决大规模的空空导弹制导权移交问题,提出了一种基于粒子群拍卖混合算法的空空导弹制导权移交方法,该方法既可应用于优化求解飞机编队的空空导弹制导权移交问题,又可将算法固化在空中预警机等指挥控制平台上,实现对整个空中作战机群空空导弹制导权移交问题的优化求解,为网络化协同空战提供了理论

支撑,具有较好理论价值和军事应用前景。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 刁兴华,方洋旺,王鹏,等. 对地攻击协同制导决策方法[J]. 电光与控制,2011,18(3):52-53. [ Diao Xing-hua, Fang Yang-wang, Wang Peng, et al. Cooperative guidance decision-making in air-to-ground attacking [ J ]. Electronics Optics & Control, 2011,18(3):52-53. ]
- [ 2 ] 高坚,佟明安. 双机编队协同制导的火控机理[J]. 火力与指挥控制,2009,34(12):38-40. [ Gao Jian, Tong Ming-an. Fire control principle on cooperative guidance with two-fighters team [ J ]. Fire Control & Command Control,2009,34(12):38-40. ]
- [ 3 ] 肖冰松,方洋旺,胡诗国,等. 一种新的超视距空战威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(9):2163-2165. [ Xiao Bing-song, Fang Yang-wang, Hu Shi-guo, et al. New threat assessment method in beyond-the-horizon range air combat [ J ]. Systems Engineering and Electronics, 2009,31(9):2163-2165. ]
- [ 4 ] Kenney J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[ C ]. Proc. of IEEE Conference on Neural Networks, Perth, Australia, April 17-22,1995.
- [ 5 ] Sujit P B, Beard R. Multiple MAV task allocation using distributed auctions[ C ]. AIAA Guidance, Navigation, Control Conference and Exhibit, South Carolina, USA, August 10-12, 2007.
- [ 6 ] 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):184-185. [ Yu Wen-tao, Peng Jun, Wu Min, et al. A MAS task allocation algorithm based on auction [ J ]. Computer Simulation, 2008, 25(12):184-185. ]
- [ 7 ] 刘波,张选平,王瑞,等. 基于组合拍卖的协同多目标攻击空战决策算法[J]. 航空学报,2010,31(7):1433-1435. [ Liu Bo, Zhang Xuan-ping, Wang Rui, et al. Air combat decision making for coordinated multiple target attack using combinatorial auction [ J ]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(7):1433-1435. ]
- [ 8 ] 张陆游,张永顺,杨云. 基于混沌自适应变异粒子群优化的解相干算法[J]. 电子与信息学报,2009,31(8):1826-1828. [ Zhang Lu-you, Zhang Yong-shun, Yang Yun. A de-correlation algorithm based on chaos adaptive mutation PSO optimization [ J ]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009,31(8):1826-1828. ]
- [ 9 ] 黄海滨,马广富,庄宇飞,等. 深空环境下卫星编队飞行队形重构实时重规划[J]. 宇航学报,2012,33(3):325-327. [ Huang Hai-bin, Ma Guang-fu, Zhuang Yu-fei, et al. Real-time re-planning for satellite formation reconfiguration in deep space [ J ]. Journal of Astronautics, 2012,33(3):325-327. ]
- [ 10 ] 程红斌,张凤鸣,张晓丰. 多机协同空战目标分配算法研究[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术,2005,27(3):23-24. [ Cheng Hong-bin, Zhang Feng-ming, Zhang Xiao-feng. Coordinated target assignment for multi-aircraft [ J ]. Information Command Control System & Simulation Technology, 2005, 27(3):23-24. ]

作者简介:

费爱国(1955-),男,博士,高级工程师,博士生导师,主要研究方向为计算机应用技术,指挥信息系统。

通信地址:北京市 2857 信箱(100085)

电话:(010)66919315

E-mail:feiaiguo@263.net

(编辑:张宇平)