

无人机协同多目标攻击空战决策研究

罗德林¹, 吴顺祥¹, 段海滨², 李茂青¹

(1. 厦门大学 信息科学与技术学院 系统与控制中心, 厦门 361005;

2. 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: 针对超视距空战中多架无人机对空中的多个敌对目标进行协同攻击的决策问题进行了研究。首先, 对空战威胁态势进行了分析, 基于对各攻击目标至少分配一枚导弹的原则, 将协同多目标攻击决策问题转化为导弹目标攻击配对的优化问题并建立其攻击效能评估模型。然后, 提出了一种模拟退火遗传算法用于该决策问题的寻优。最后, 通过所得最佳导弹目标分配个体求得最终协同攻击决策方案。仿真结果表明所提出的算法能有效地求解协同多目标攻击决策问题, 其对最优解的搜索效率明显优于单一的遗传算法。

关键词: 无人机; 多目标攻击; 协同空战; 空战决策; 模拟退火; 遗传算法

中图分类号: V247; E837 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2008) 24-6778-05

Air-Combat Decision-Making for UAVs Cooperatively Attacking Multiple Targets

LUO De-lin¹, WU Shun-xiang¹, DUAN Hai-bin², LI Mao-qing¹

(1.Center for Systems and Control, School of Information Science & Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2.School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering a Beyond Visual Range (BVR) air combat scenario with a group of UAVs versus multiple hostile airborne targets, the decision-making problem for Cooperative Attack on Multiple Targets (CAMT) was investigated. First, the air combat threat situation was analyzed. Based on the principle of each target to be attacked at least being assigned one missile, the decision-making for CAMT was converted into a Missile-Target Assignment (MTA) optimization problem with the establishment of the attack effectiveness evaluation model. Then, a Simulated Annealing Genetic Algorithm (SAGA) was proposed to find out the optimal solution to the MTA problem. Finally, the final decision-making solution to the CAMT was derived from the obtained best missile-target assignment individual. Simulation results show that the proposed method is more effective than Genetic Algorithm (GA) to deal with the decision-making problem for CAMT.

Key words: UAVs; multi-target attack; cooperative air-combat; air-combat decision-making; simulated annealing; genetic algorithm

引言

随着航空军事技术的发展, 无人机将逐步替代有人驾驶飞机, 并可在超视距条件下进行协同空战。在这种空战模式中, 多架无人机之间可以通过数据链实现信息共享、相互协同在视距外对空中的多个分散的目标实施攻击, 有助于扩大作战空域, 提高作战效能。协同多目标攻击决策就是研究如何将所有欲攻击的目标合理地分配给协同作战的各架飞机, 以达到最佳的攻击效能。它已成为具有超视距空战能力的作战飞机火控系统关键技术之一^[1], 为此, 人们一直在不断地研究各种有效的决策方法^[2]。随着微电子与计算机技术的发展, 实现用遗传算法(GA)对空战决策进行优化已成为可能。于是, 人们开始使用 GA 及其组合算法对军事决策问题进行研究^[3,4]。

本文采用模拟退火遗传算法(SAGA)对超视距空战中无

人机的协同多目标攻击决策问题进行研究, 获得了最佳协同攻击决策方案。

1 空战态势分析

设有蓝、红敌对的两方进行对抗, 当蓝方雷达发现某一空域中有 N 架红方飞机来袭, 蓝方派出 M 架具有多目标攻击能力的无人机对其进行协同攻击拦截。为便于研究, 设所有蓝机和红机分别为同一型号飞机, 蓝方的每架无人机可以携带 L 枚中远程空空导弹, 并可同时攻击空中的 L 个目标。记所有蓝机为机群 B , $B = \{B_i, i=1, 2, \dots, M\}$, 其中 B_i 表示第 i 架蓝机, 记所有红机为机群 R , $R = \{R_j, j=1, 2, \dots, N\}$, 其中 R_j 表示第 j 架红机。图 1 表示了 B_i 与 R_j 之间的相对空战态势。

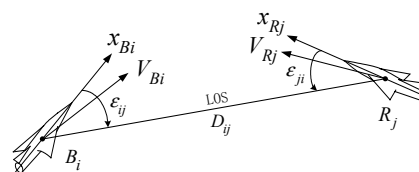
图1 蓝机 B_i 与红机 R_j 的相对态势

图 1 中, LOS 为视线, 即 B_i 到 R_j 的连线; D_{ij} 为 B_i 与 R_j 的相对距离; x_{B_i} 与 V_{B_i} 分别为 B_i 的机体轴线和速度; ϵ_{ij} 为

收稿日期: 2007-08-27

修回日期: 2007-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(60604009); 航空科学基金(2006ZC51039); 厦门大学 985 二期信息创新平台项目。

作者简介: 罗德林(1968-), 男, 江西吉安人, 博士, 副教授, 研究方向为制导与控制、计算智能等; 吴顺祥(1967-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 研究方向为数据挖掘、灰色系统等; 段海滨(1976-), 男, 山东广饶人, 博士, 副教授, 研究方向为无人机控制与决策、计算智能等; 李茂青(1953-), 男, 福建福安人, 教授, 博导, 研究方向为多智能体协同、优化决策等。

R_j 相对 B_i 的离轴角; x_{R_j} , V_{R_j} 和 ϵ_{ji} 用类似方法定义。

空战中,一方对另一方总体态势威胁可表示为各状态参量威胁因子的组合函数^[5-7],蓝机 B_i 对红机 R_j 的攻击总体威胁可表示为

$$th_{ij} = w_1 th_{ij}^{D_j} th_{ij}^{\epsilon_{ji}} + w_2 th_{ij}^{V_{R_j}} \quad (1)$$

式中, w_1 、 w_2 为加权系数,且满足 $w_1 + w_2 = 1$ 。

$th_{ij}^{D_j}$ 为距离威胁因子

$$th_{ij}^{D_j} = \begin{cases} 1 & D_j \leq D_M \\ 1 - \frac{D_j - D_M}{D_R - D_M} & D_M < D_j \leq D_R \\ 0 & D_j > D_R \end{cases} \quad (2)$$

其中, D_M 为 B_i 的导弹有效射程,在此距离范围内导弹能以一定概率击中目标; D_R 为 B_i 雷达最大跟踪距离。

$th_{ij}^{\epsilon_{ji}}$ 为角度威胁因子

$$th_{ij}^{\epsilon_{ji}} = e^{-\lambda_1 (\pi \epsilon_{ji} / 180)^2} \quad (3)$$

其中, $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$ 为形状调整参数,离轴角越大,对目标的角度威胁因子越小。

$th_{ij}^{V_{R_j}}$ 为速度威胁因子

$$th_{ij}^{V_{R_j}} = \begin{cases} 1 & V_{R_j} < 0.5V_{B_i} \\ 1.5 - V_{R_j} / V_{B_i} & 0.5V_{B_i} \leq V_{R_j} \leq 1.4V_{B_i} \\ 0.1 & V_{R_j} > 1.4V_{B_i} \end{cases} \quad (4)$$

由式(2~4)看出, $th_{ij}^{D_j} \in [0,1]$, $th_{ij}^{\epsilon_{ji}} \in (0,1]$ 及 $th_{ij}^{V_{R_j}} \in [0.1,1]$, 故有 $th_{ij} \in [0,1]$ 。因此, B_i 对 R_j 的威胁可以看成 B_i 发射一枚导弹对 R_j 的摧毁概率。

R_j 对 B_i 的威胁 th_{ji} 可用类似方法确定,且有 $th_{ji} \in [0,1]$ 。

2 协同多目标攻击问题建模

协同多目标攻击决策的目的是将 N 架红机分配给 M 架蓝机进行攻击以实现最佳的协同攻击效能。本文对某种决策的攻击效能用在该决策下机群 B 对机群 R 进行协同攻击后,机群 R 对机群 B 的预期总剩余威胁来衡量。显然,对于机群 B ,机群 R 的预期总期望剩余威胁越小,该决策越好。

为便于分析,考虑一般情况,对协同攻击进行如下假设:

- (1) 对所欲攻击的目标至少分配一枚导弹攻击;
- (2) 对认为威胁较大的目标分配两枚导弹进行攻击。

根据前面所述,机群 B 的导弹总数量 $Z = M \cdot L$; 需攻击的目标数量 $T = N$, 且应满足拦截条件 $Z \geq T$ 。设定当 R_j 对 B_i 的威胁满足 $th_{ji} \geq th_{threshold}$ 时,分配两枚导弹对 R_j 进行加倍攻击。用 T_{ab} 表示须进行加倍攻击的目标数量,用 W 表示用于攻击目标的导弹数量,则有 $W = T + T_{ab}$, 且满足 $T \leq W \leq Z$ 。若分配导弹 $k(k=1,2,\dots,W)$ 攻击目标 R_j , 则 R_j 生存概率为 $(1 - th_{kj})$ 。在协同攻击后, R_j 对 B_i 的预期剩余威胁为 $th_{ji} \cdot \prod_{k=1}^W (1 - th_{kj})^{X_{kj}}$ 。为此,空战决策问题首先要寻找最优的导弹目标分配方案使如下机群 R 的总预期剩余威胁

评估函数值最小

$$E(\pi) = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^M \left[th_{ji} \cdot \left(\prod_{k=1}^W (1 - th_{kj})^{X_{kj}} \right) \right] \quad (5)$$

其中, π 表示蓝方对红方目标的导弹目标攻击配对决策方案。 X_{kj} 为布尔值, $X_{kj} = 1$ 表示蓝方导弹 k 攻击红方目标 R_j , $X_{kj} = 0$ 表示不攻击,且有满足如下约束条件

$$\sum_{j=1}^T X_{kj} = 1, \quad k = 1, 2, \dots, W \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^W X_{kj} = \begin{cases} 2 & \text{对任意 } i, \text{ 若 } th_{ji} \geq th_{threshold}, j = 1, 2, \dots, T \\ 1 & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

在获得了最优导弹目标攻击分配方案 π_{gb} 后,依据导弹与所属载机之间的编码对应关系,可确定与 π_{gb} 对应的协同攻击决策方案。由于不考虑同一载机上的各枚导弹之间的差别,因此,所获得的 π_{gb} 是不唯一的,但依据它们所确定的协同攻击决策方案是唯一的。

3 协同攻击决的 SAGA 算法实现

这里将导弹目标攻击配对决策问题视为最佳决策寻优问题,采用模拟退火遗传算法来实现最佳决策的求解。

3.1 模拟退火遗传算法

模拟退火遗传算法是将模拟退火算法和遗传算法结合而构成的一种组合优化算法,它利用模拟退火算法易于跳出局部最优的特点来增强遗传算法的局部搜索能力,从而提高遗传算法的效率^[8,9]。本文采用的组合结构以遗传算法为主体流程,首先父代种群通过遗传算法的选择、交叉及变异操作后产生一个新种群,然后用模拟退火算法对这个新种群中各个体进行模拟退火操作,以期对新种群进一步优化。将经过模拟退火后获得的种群与父代种群混合,再产生出新一代种群,这个进化过程反复进行,直到满足终止条件为止。其流程为:

```

{ t ← 0;
  初始化种群 P(t) = {π₁, π₂, …, πₙ};
  对 P(t) 进行评估 E(P(t));
  While (不符合终止条件) do
    计算 P(t) 适应度 fit(P(t))
    个体选择 P¹(t) ← Selection(P(t))
    个体交叉 P²(t) ← Crossover(P¹(t));
    个体变异 P³(t) ← Mutation(P²(t));
    计算 P³(t) 的最佳个体评估值 F⁴(t);
    个体模拟退火算法:
      P⁴(t) = Simulated Annealing(P³(t));
    计算 P⁴(t) 的评估值 E(P⁴(t));
    生成新一代种群:
      P(t) = Re production[P(t) ∪ P⁴(t)];
    t ← t + 1;

```

End }

个体模拟退火算法过程: Simulated Annealing

{ λ ← 1;

定义初始温度 $T = \ln(F^{min} + 1)$ 及系数 $\gamma \in (0, 1)$;

While (模拟退火过程未冻结) do

```

σ ← 0 (σ 为产生的新解个数);
φ ← 0 (φ 为接受的新解个数);
While (未达到平衡状态) do
    从当前解个体 π 产生一个新的解个体 π';
    计算 ΔF = E(π') - E(π);
    计算 p = exp(-ΔF / T);
    If P ≥ random[0,1] then
        接受新解: π = π'; φ ← φ + 1;
    End
    σ ← σ + 1;
End
计算以上过程最大评估值 Fmax 与最小评估值 Fmin;
Tmax = T · γ; λ = λ + 1;
End }
    
```

3.2 实现方法

1) 个体编码方法

每一个体表示一种导弹目标攻击配对决策方案 π , 表现型表示为 $\pi = (w_1, w_2, \dots, w_k, \dots, w_W)$, 其长度为 $T + T_{db}$, 设定其含意为:

(1) 前 T 个元素表示的导弹分别用于攻击红方的 $1 \sim T$ 个目标。例如: 当 $k \leq T$ 时, 其第 k 个元素 $\pi(k=j) = w_k$ 表示分配导弹 w_k 攻击第 j 个目标。

(2) 后 T_{db} 个元素表示的导弹用于对其中 T_{db} 个威胁较大的目标进行加倍攻击。

$w_k \in \{1, 2, \dots, m_{il}, \dots, Z\}$, $k \in [1, W]$, m_{il} 为蓝方 M 架飞机中的第 i 架所携带的第 $l(l=1, 2, \dots, L)$ 枚导弹在蓝方总导弹数量 Z 中的编号。 m_{il} 的编号计算方式为

$$m_{il} = (i-1) \cdot L + l, \quad l \leq L \quad (8)$$

个体染色体采用整数编码方式, 与表现型一致。在 $T_{db} > 0$ 的情况下, 编码时将须加倍攻击的 T_{db} 个目标视为增加的须攻击的新目标, 并从序号 $T+1$ 开始对这 T_{db} 个目标进行编号。经编码后的染色体, 其每一基因位序号对应于相同编号的目标, 而该基因位上的基因对应于分配攻击该目标的导弹, 且有 $j=k$ 。染色体编码用图 2 表示如下:

$$\pi = \begin{matrix} \boxed{w_1} & \boxed{w_2} & \dots & \boxed{w_k} & \dots & \boxed{w_T} & \boxed{w_{T+1}} & \dots & \boxed{w_W} \\ T = & 1 & 2 & \dots & j & \dots & T & (T+1) & \dots & (T+T_{db}) \end{matrix}$$

图 2 染色体编码示意图

显然, 染色体上不同基因位上的基因不同, 即一枚导弹只能攻击一个目标, 基因种类数量等于导弹数量 Z 。

2) 适应度函数

由于根据式(5)计算出的个体 π 的评估值越小, 个体 π 的适应度越高。因此, 设计评价个体 π 的适应度函数为

$$fit(\pi) = 1 / [E(\pi) + \varepsilon_0] \quad (9)$$

式中, ε_0 为大于零的微小常数。

3) 遗传算子

(1) 选择算子

个体选择 (Selection) 与其适应度有关, 采用轮盘赌选择法, 使各个体被选择的概率与其适应度大小成正比。

(2) 交叉算子

个体交叉 (Crossover) 采用单点交叉方式^[10], 要求交叉后产生的新染色体的不同基因位上的基因不同。若按普通交叉运算, 即第一(二)父染色体包含交叉点前的基因串与第二(一)父染色体交叉点后的基因串组成的子染色体会产生不同基因位出现相同基因的情况。因此, 设计交叉组合方式为: 设随机产生的交叉点位值为 c , 第一(二)父染色体包含交叉点前的基因串在产生的子染色体一(二)中的位置和次序保持不变, 子染色体一(二)的剩余部分基因串确定方法为: ①将父染色体二(一)交叉点前、后两部分基因串进行整体交换; ②除去子染色体一(二)已继承的基因, 构成一个相对次序不变的基因串; ③取其前 $T-c$ 位基因串作为剩余部分基因串。

举例如下, 设 $M=2$, $L=4$, $T=6$, 则导弹数 $Z=8$ 。要求选择 $W=6$ 枚导弹对 6 个目标进行协同攻击, 设有两种攻击方案的父染色体为 A、B, 经过交叉操作后的得到子染色体 A', B'。交叉过程表示为

$$\begin{matrix} A: 2 & 4 & 1 & 6 & 8 & 3 \\ B: 5 & 7 & 6 & 3 & 2 & 1 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} A': 2 & 4 & 1 & 3 & 5 & 7 \\ B': 5 & 7 & 6 & 8 & 3 & 2 \end{matrix}$$

交叉点位置 $c=3$, A' 的 1~3 位基因串继承 A 染色体的 1~3 位基因, A' 剩余部分 4~6 位基因串的方法是将 B 交叉点位置前后部分交换, 得到 "321576", 再除去 A' 已继承的 2、4 与 1 基因剩余基因串为 "3576", 再取其前 3 位为 "357"。因此, 得到交叉后的 A', 用同样的方法可获得 B'。

(3) 变异算子

个体变异 (Mutation) 方式是, 当确定某个变异基因位后, 以随机的方式在该体染色体所未包含的基因类型集合中随机的选择一个基因替代该位基因。例如, 对上述个体 A' 进行变异操作生成的新个体用 A'' 表示, 其过程为: 设确定变异位置为第 4 位基因, 相对 A' 未包含的基因集合为 {6, 8}, 对此集合中基因进行随机选择, 若选择结果为元素 '8', 则 A''(4)=8, A'' 其它位上基因保持 A' 中相应位上的基因, 变异过程表示为

$$A': 241\boxed{3}57 \rightarrow A'': 241\boxed{8}57$$

若染色体未包含的基因集合为空, 则采用随机交换染色体上两位基因的方法产生变异个体^[11]。

4) 新一代种群的生成

新一代种群的生成 (Reproduction) 是将父代种群与模拟退火后获得的新个体进行合并, 并依据评估值按非递减顺序进行排序, 从前往后提取与父代种群规模相同数量的个体生成新一代种群。

5) 模拟退火算法中新个体的产生方法

新个体的产生方法是在当前解个体染色体上随机产生两个基因位, 将包含两基因位之间的基因串的顺序倒置。例如, 当前解个体 A'' 产生新解个体 A''' 的过程为: 设产生的两个随机数是 2, 4, 即 A''' 的 2~4 位基因是将 A'' 上的 2~4 位基因串 "418" 倒置为 "814", A''' 上的其它位基因同 A''。

其过程表示为

$$A'' : 2[418]57 \rightarrow A''' : 2[814]57$$

6) 模拟退火算法中判定条件的确定^[4]

(1) 平衡状态的判定条件:

$$\sigma \geq 1.5Z \text{ 或 } \phi \geq Z \quad (10)$$

(2) 模拟退火冻结判定条件为:

$$(F_{\max} - F_{\min}) / F_{\max} \leq \varepsilon \text{ 或 } T_{\lambda} \leq \varepsilon_1 \quad (11)$$

其中, ε , ε_1 为大于零的常数。

7) 模拟退火遗传算法的终止条件

当进化代数大于给定的代数后, 算法停止。求出最后一代种群中适应度最大的个体作为蓝方攻击红方目标的导弹目标攻击配对决策的最优解。

8) 确定多机协同攻击最优决策

根据 7) 中获得的导弹目标攻击配对决策的最优解, 可通过关系式(8)确定与各目标攻击配对的导弹所属的蓝方飞机架次。从而确定蓝方对红方机群目标的最优协同攻击决策。

4 仿真分析

4.1 空战局势

设蓝方地面雷达或空中预警机发现红方 14 架飞机向来袭, 蓝方出动 4 架具有多目标攻击能力的无人机对其进行拦截, 每架蓝机载 4 枚中远程空空导弹。红机以双机一字和机翼形为基本单元组成机群编队^[3], 相邻两红机左右间距 10km, 前后间距 10km; 蓝机以双机一字形为基本单元组成飞行编队以增强攻击力, 通过信息共享识别敌我和获知目标信息, 相邻两蓝机左右间距 40km, 前后间距 10km。设某时刻空战态势如图 3 所示, 蓝、红机群均在同一高度飞行, 红方所有目标均在蓝方机群的联合攻击范围内, 各蓝、红机编号如图 3 中所示。蓝方机群首先对红方所有目标发动协同攻击。

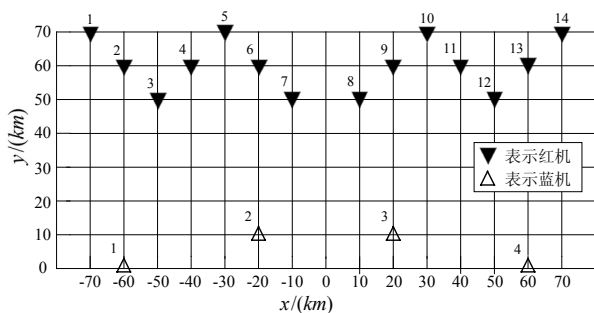


图 3 蓝红双方机群空战态势图

4.2 决策仿真

设红机机群速度 $V_R = 300m/s$, 蓝机机群速度 $V_B = 350m/s$, 蓝机雷达最大探测距离 $D_R = 120km$, 导弹有效射程 $D_M = 70km$, D_R 、 D_M 均为红机对应参数的 1.5 倍。蓝机与红机的角度威胁曲线如图 4 所示。

蓝方机群的总导弹量为 16 枚, 蓝机 1、2、3、4 携带的导弹编号分别为第 1~4、5~8、9~12、13~16 枚。采用

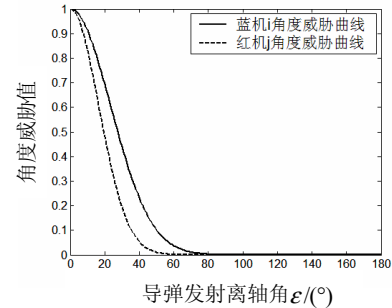


图 4 角度威胁曲线

本文的 SAGA 与 GA 分别进行决策优化, 基本参数为: 种群规模 50, 交叉概率 0.8, 变异概率 0.05, 进化 100 代终止, 每种算法分别仿真运算 10 次。算法采用 Matlab6.5 编程并在一台 PC/P4 3.4GHz 机上运行, 仿真分以下两种情况进行:

仿真 1: 不设定门限 $th_{threshold}$ 值, 每一目标视为同等重要并各分配一枚导弹攻击。两种算法的最佳进化过程如图 5 中的仿真 1 曲线所示。

从图 5 看出, SAGA 与 GA 分别进化 12 和 72 代收敛到全局最优值 1.516。图 6(a)表示了按所求得的最优个体 π_{gb} 确定蓝方对红方的协同攻击决策过程, 决策结果为: 蓝机 1 攻击 1、2、3、4 号目标; 蓝机 2 攻击 5、6、7 号目标; 蓝机 3 攻击 8、9、10 号目标; 蓝机 4 攻击 11、12、13、14 号目标。

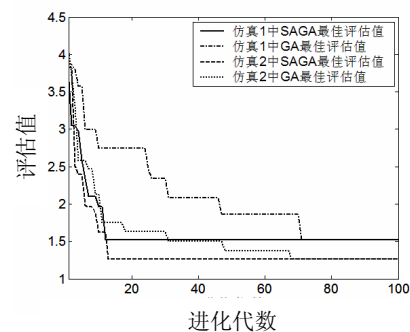


图 5 优化过程评估值曲线

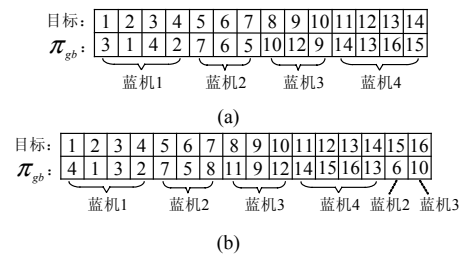


图 6 协同攻击决策的确定

仿真 2: 设定门限值 $th_{threshold} = 0.7$ 。经计算, 红机 7 对蓝机 2、红机 8 对蓝机 3 的威胁值均为 0.719, 大于设定门限值, 故决定对红机 7 和红机 8 各分配 2 枚导弹攻击。两种算法的最佳进化过程如图 5 中的仿真 2 曲线所示。图 6(b)表示了按所求得的最优个体 π_{gb} 确定蓝方对红方的协同攻击决策过程, 决策结果为: 蓝机 1 攻击 1、2、3、4 号目标;

蓝机 2 攻击 5、6、7 号目标，并用 2 枚导弹攻击 7 号目标；
蓝机 3 攻击 8、9、10 号目标，并用 2 枚导弹攻击 8 号目标；
蓝机 4 攻击 11、12、13、14 号目标。

实验中，两种算法的性能比较见表 1。

表 1 SAGA 算法与 GA 算法仿真结果比较

| 项 目 | 仿真 1 | | 仿真 2 | |
|-----------|------|------|------|------|
| | SAGA | GA | SAGA | GA |
| 收敛次数 | 10 | 7 | 10 | 5 |
| 平均收敛时间(s) | 1.69 | 3.25 | 1.72 | 3.31 |

由表 1 可知，SAGA 算法比 GA 算法能更快地搜索到最优攻击决策方案，且平均节省时间约 50%。由图 5 的进化过程曲线看出，GA 算法在迭代过程的初期收敛速度较快，但后期较为缓慢，容易陷入局部最优，而 SAGA 算法在整个运算过程中能以很快的速度收敛到全局最优解。这说明本文所提出的 SAGA 算法能有效地提高 GA 算法对全局最优解的寻优效率。

5 结论

针对超视距空战中的无人机协同多目标攻击决策问题进行了研究。首先对空战威胁态势进行了分析，将协同多目标攻击决策问题转化为导弹目标分配的优化问题并建立了该问题的攻击效能评估模型。接着提出了用模拟退火遗传算法进行导弹目标攻击分配方案的寻优，对算法中的非常规编码、变异以及模拟退火平衡条件和冻结条件进行了设计。最后，依据所求得的最优导弹目标攻击分配方案导出相应的最佳协同多目标攻击决策解，仿真实验取得了较好的效果。

本文研究的前提为对欲协同攻击的每一目标至少分配一枚导弹，而对其中威胁值大于设定门限的目标分配两枚导弹攻击。根据本文方法容易进行如下方向扩展：

- (1) 对某些目标要求分配更多枚导弹攻击；
- (2) 对目标的威胁等级进行多级划分，对不同等级的目标分配数量不等的导弹实施协同攻击。

参考文献：

[1] 李林森, 于海勋, 韩志刚, 等. 论协同空战及其关键技术[J]. 电光

(上接第 6777 页)

实现了矩形结构阵列的不对称副瓣波束以及菱形结构阵列的平面相位分布，并给出了仿真结果。

作为一种新技术，耦合振荡器阵列在拥有众多的优点的同时，也存在着自身的缺点，如相位误差随着阵列规模的扩大存在着积累效应，阵元或耦合网络的失效对整个阵列的影响等等。这些问题都需要进行进一步的深入研究，才能将其向工程化、实用化推进。

参考文献：

[1] Kai Chang, Robert A York, Peter S Hall, Tatsuo Itoh. Active Integrated

与控制, 2000, 8(1): 29-34. (Li Lin-sen, Yu Hai-xun, Han Zhi-gang, et al. The Discussion of Cooperative Air Combat and Its Key Technology [J]. Electronics Optics & Control, 2000, 8(1): 29-34.)

[2] 罗德林, 吴文海, 沈春林. 空战多目标攻击决策综述 [J]. 电光与控制, 2005, 12(4): 4-8. (Luo De-lin, Wu Wen-hai, Shen Chun-lin. A Survey on Decision-Making for Multi-Target Attacking in Air Combat [J]. Electronics Optics & Control, 2005, 12(4): 4-8.)

[3] Mulgund S, Harper K, Krishnakumar K, et al. Air combat tactics optimization using stochastic genetic algorithms [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Diego, 1998. San Diego, USA, 1998, 4: 3136-3141.

[4] 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: Cybernetics (S1083-4419), 2003, 33(1): 113-121.

[5] Huynh H T, Costes P, Aumasson C. Numerical optimization of air combat maneuvers [C]// Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Monterey, California, 1987, AIAA-87-2392. USA: AIAA, 1987.

[6] Austin F, Carbone G, Falco M, et al. Game theory for automated maneuvering during air-to-air combat [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics (S0731-5090), 1990, 13(6): 1143-1147.

[7] 谢希权, 李伟仁. 单机多目标攻击逻辑的对策型决策[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(7): 28-31. (Xie Xi-quan, Li Wei-ren. Game Form Decision for Air Combat Logic of Multi-Target Attack System [J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(7): 28-31.)

[8] 刘生礼, 唐敏, 董金祥. 遗传模拟退火算法在约束求解中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(8): 937-945. (Liu Sheng-li, Tang Min, Dong Jin-xiang. Geometric Constraint Satisfaction Using Genetic Simulated Annealing Algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(8): 937-945.)

[9] Lin F T, Kao C Y, Hsu C C. Applying the genetic approach to simulated NP-hard problems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (S0018-9472), 1993, 23(6): 1752-1767.

[10] Starkweather T, McDaniel S, Mathias K, et al. A comparison of genetic sequencing operators [C]// Proceedings of the 4th international conference on genetic algorithms. Morgan Kaufmann, USA, 1991: 69-76.

[11] Merz P, Freisleben B. Fitness landscape analysis and memetic algorithms for the quadratic assignment problem [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation (S1089-778X), 2000, 4(4): 337-352.

Antennas [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech (S0018-9480), 2002, 50(3): 937-943.

[2] Brian K Meadows, Ted H Heath, Joseph D Neeff. Nonlinear Antenna Technology [J]. Proc. IEEE (S0018-9219), 2002, 90(5): 882-896.

[3] Ted Heath, Kurt Wiesenfeld Robert A York. Manipulated Synchronization: Beam Steering in Phased Arrays [J]. Int. J. Bifurc. Chaos (S0218-1274), 2000, 10(11): 2619-2627.

[4] 李建新. 阵列部分单元相位加权波瓣综合[J]. 电波科学学报, 2001, 16(4): 433-43.

[5] 黄乘明, 王海霞. 非线性微分代数方程的一种离散波形松弛算法 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 1000-1002.