

# 超视距多目标攻击排序问题的蚁群算法

黄树彩, 李为民

(空军工程大学导弹学院, 三原 713800)

**摘要:** 针对现代超视距空战的指挥决策问题, 提出一种基于蚁群算法思想的超视距多目标攻击的优化排序方法。该方法利用蚁群算法的并行计算和全局快速搜索能力, 使超视距多目标攻击排序算法能够在限定时间内获得满意解, 并给出应用该方法的具体实现步骤。仿真实验说明了该算法的有效性, 特别当问题规模较大时, 该算法具有较快的收敛速度和较高的精度。

**关键词:** 多目标攻击; 排序问题; 蚁群算法

## Ant Colony Algorithm for Solving Scheduling Problem in Multi-targets Attacking

HUANG Shu-cai, LI Wei-min

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800)

**【Abstract】** Aiming at the command and decision-making problem in Beyond Visual Range Air Combat (BVRAC), an optimal scheduling method of multi-targets BVR attacking based on ant colony algorithm is put forward. By applying the good parallel computing and fast global searching capabilities of ant colony algorithm, it makes the constructed scheduling method of multi-targets BVR attacking, which can obtain satisfaction solution to the problem in real time. The implement process is given. Simulation result shows that the method is effective, especially for large scale scheduling problem, and has faster constringency rate and higher precision.

**【Key words】** multi-targets attacking; scheduling problem; ant colony algorithm

### 1 概述

在军事作战方面, 对攻击区内的多个目标进行超视距攻击排序和制导武器的火力分配, 是超视距多目标火控计算的关键环节。文献[1]给出了一种用于近距空战的优势函数选取方法。文献[2]介绍了多机空战模拟的一种数值方法, 并根据“进入角”指向误差来确定攻击优势, 但该方法仍适用于近距空战。文献[3]利用匈牙利算法解决目标分配问题。文献[4]通过构造综合优势矩阵, 将非平衡指派问题转化为平衡指派问题, 并建立了多目标攻击排序的 0-1 规划模型。

蚁群算法是近几年发展起来的仿生算法, 它吸收了蚂蚁的行为特性, 通过内在的搜索机制, 在解决离散组合优化问题方面有着良好的性能<sup>[5]</sup>。蚁群算法具有并行搜索能力, 可以方便处理约束条件以及充分利用问题启发式信息的优点, 使得它在多目标空战决策中将具有良好的应用前景。

### 2 多目标攻击排序问题建模

多目标攻击排序的目的在于: 根据我方攻击机的数量和相对综合优势, 对攻击区内的多个敌方目标进行合理的分配, 以使得我方的总体空战优势最大。

#### 2.1 目标函数

假定空战中我方有  $m$  架攻击机和敌方  $n$  个目标。我方每架攻击机可同时攻击敌方最多  $k_i (i=1, 2, \dots, m)$  个目标, 并且一个敌方目标只能由我方一架飞机去攻击。令  $T_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$  表示第  $i$  架歼击机攻击第  $j$  个目标的综合优势指数值, 设  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ ,  $U_i (i=1, 2, \dots, m)$  表示我方第  $i$  架攻击机的攻击目标集合。则优化排序问题的目标函数设计如式(1)表示, 通过式(1)对目标攻击排序组合求得总体空战优势, 并从中选取最大的作为优化结果。 $|U_i| = k_i$  保证了一架攻击机攻击的目

标数不会超出其最大攻击容量;  $|U| = n$ ,  $U_i \cap U_j = \phi$  保证了  
一个目标必须被攻击并且不会重复攻击。

$$\begin{aligned} \max Z &= \sum_{U_i \in U} \sum_{j \in U_i} T_{ij} \\ \text{s.t.} &\begin{cases} |U_i| = k_i & i=1, 2, \dots, m \\ |U| = n \\ U_i \cap U_j = \phi & i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $|U|$  表示集合  $U$  中元素的个数。

#### 2.2 空战综合优势指数

将我方第  $i (i=1, 2, \dots, m)$  架攻击机对敌方第  $j (j=1, 2, \dots, n)$  架目标机的超视距空战综合优势指数表示为

$$T_{ij} = \bar{\alpha}_1 T_{ij}^1 + \bar{\alpha}_2 T_{ij}^2 \quad (2)$$

其中,  $T_{ij}^1$  为空战效能优势指数;  $T_{ij}^2$  为空战态势优势指数;  $0 < \bar{\alpha}_k < 1 (k=1, 2)$  为权重, 且  $\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2 = 1$ 。考虑到超视距空战的特点, 这里取  $\bar{\alpha}_1 = 0.4$ ,  $\bar{\alpha}_2 = 0.6$ ;  $T_{ij}^1$  体现了我方相对于敌方目标的机动性、火力和探测能力, 另外, 采用操纵效能、生存力、航程和电子对抗能力修正计算结果。空战效能用公式表示为<sup>[6]</sup>

$$C = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln(\sum A_2)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (3)$$

其中,  $B$  为机动性参数;  $A_1$  为火力衡量参数;  $A_2$  为探测能力衡量参数;  $\varepsilon_1$  为飞行员操纵效能系数;  $\varepsilon_2$  为生存力系数;  $\varepsilon_3$  为航程系数;  $\varepsilon_4$  为电子对抗能力系数。 $C$  的值可根据飞机型号

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目

**作者简介:** 黄树彩(1967-), 男, 教授、博士, 主研方向: 智能控制与决策; 李为民, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2007-07-30 **E-mail:** hsc67118@yahoo.com.cn

通过查表得出。为便于数据分析，通过各种典型战机效能指数比较，将空战效能优势指数  $T_{ij}^1$  归纳为

$$T_{ij}^1 = \begin{cases} 1 & C_i/C_j \leq 1.5 \\ 0.75 & 1.5 > C_i/C_j > 1 \\ 0.5 & C_i/C_j = 1 \\ 0.25 & 1 > C_i/C_j > 0.3 \\ 0 & C_i/C_j < 0.3 \end{cases} \quad (4)$$

例如，设我方为某型歼击机，其超视距空战能力与幻影 2000-5 相当，则  $C_i=17.9$ ，若敌方目标机分别为敌机  $a(C_j=19.8)$ 、幻影 2000-5( $C_j=17.9$ )、敌机  $c(C_j=16.8)$ 、敌机  $d(C_j=13.5)$ 、敌机  $e(C_j=8.2)$ ，则我方相对敌方的空战效能优势指数分别为：0.25, 0.50, 0.75, 0.75, 1.00。

空战态势优势指数  $T_{ij}^2$  表示为

$$T_{ij}^2 = \beta_1 T_{ij}^{\alpha} + \beta_2 T_{ij}^r + \beta_3 T_{ij}^v \quad (5)$$

其中， $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  分别为我方相对敌方的角度优势、距离优势和速度优势的权系数，且  $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$ 。考虑到超视距空战条件下，随着“发射后不管”全向攻击中远程导弹的出现，角度优势与“近距离格斗”相比不明显，并且角度与距离优势的相关性减弱，因此，采取 3 种优势的加权求和，且  $\beta_1 = 0.2$ ， $\beta_2 = \beta_3 = 0.4$ 。角度优势取为

$$T_{ij}^{\alpha} = \frac{(\alpha_j - \alpha_i)}{180^\circ} \quad (6)$$

其中， $\alpha_i, \alpha_j$  分别为我方第  $i$  架攻击机的速度矢量  $v_i$  与目视线的夹角、敌方第  $j$  架目标机的速度矢量  $v_j$  与目视线的夹角， $0^\circ \leq \alpha_i, \alpha_j \leq 180^\circ$ ， $-1 \leq T_{ij}^{\alpha} \leq 1$ 。距离优势取为

$$T_{ij}^r = \begin{cases} 1.00 & r_{\min} \leq r_{ij} \leq r_{\max} \\ 0.01(R_{\max} - r_{ij}) & r_{ij} > r_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中， $r_{\min}$  和  $r_{\max}$  为我方导弹攻击区的近边界和远边界； $r_{ij}$  为我方第  $i$  架歼击机与敌方第  $j$  架目标机之间的距离； $R_{\max}$  为我方雷达截获区的远边界。若以某型歼击机为我方攻击机，假设搜索距离为  $R_{\max} = 150$  km，当  $r_{\min} \leq r_{ij} \leq r_{\max}$  时导弹可发射，有  $T_{ij}^r = 1$ ；当  $r_{ij} > r_{\max}$  时， $T_{ij}^r$  逐渐减少到 150 km 时， $T_{ij}^r = 0$ 。

速度优势取为

$$T_{ij}^v = \begin{cases} 1.0 & v_i > 1.5v_j \\ -0.5 + \frac{v_i}{v_j} & 0.6v_j \leq v_i \leq 1.5v_j \\ 0.1 & v_i < 0.6v_j \end{cases} \quad (8)$$

### 3 蚁群算法设计

文献[5]提出蚁群算法求解 TSP 等问题，取得了较好的效果。应用蚁群算法求解多目标攻击排序问题，根据排序问题的特点，对蚁群算法进行如下改进<sup>[7]</sup>：(1)攻击机对目标的综合攻击优势指数值看作蚂蚁的行进距离。(2)解集被分解成与攻击机数目相等的子集。(3)蚂蚁路径选择规则分为目标到攻击机节点的路径选择规则和节点到目标节点的路径选择规则。目标到攻击机节点的路径选择与节点间的距离、集合  $U_i$  中的节点个数有关，目标到目标的路径选择将执行随机选择策略。(4)信息素强度采用全局最优值更新和局部更新相结合的更新规则。

### 3.1 路径选择规则

处在目标节点  $r$  的第  $k$  只蚂蚁将依据式(9)选择所要转移的攻击机节点：

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in j_k} (\tau_{ru} \cdot \eta_{ru}^\beta) & \text{if } q \leq q_0 \\ S & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

其中， $q \in [0,1]$  均匀分布的随机数； $q_0$  是一个参数 ( $0 < q_0 < 1$ )，它是实现变异的参数，变异运算的目的是为了避免运算陷入局部最优的陷阱； $j_k$  是可选择的攻击机节点的集合，即满足式(1)中约束条件的节点的集合； $\tau_{ru}$  表示节点  $r$  和  $u$  之间的信息素强度； $\eta_{ru}$  是蚂蚁搜索时的启发式信息值，目标分配时，令  $\eta_{ru} = c_{ru}$ ； $\beta$  是启发式信息值的相对重要性； $S$  是根据式(10)计算出的转移可能性选择的变量。

$$p_{rs}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{rs} \cdot \eta_{rs}^\beta}{\sum_{u \in j_k} \tau_{ru} \cdot \eta_{ru}^\beta} & \text{if } s \in j_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知，蚂蚁在选择路径时尽可能选择综合攻击优势高而且信息素强度大的方向。

蚂蚁完成一个目标节点向攻击机节点的转移后，将从未分配的目标节点中随机选取一个节点，按照上式实现新的目标节点到攻击机节点的转移。

### 3.2 信息素强度更新规则

当所有蚂蚁完成一次搜索后，信息素强度全局更新规则可用式(11)表示：

$$\tau_{rs} \leftarrow (1 - \alpha) \tau_{rs} + \Delta \tau_{rs} \quad (11)$$

$$\Delta \tau_{rs} = \begin{cases} \frac{1}{Q} & \text{如果是路径}(r,u)\text{在当前已求出的最优路径上} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

其中， $\alpha$  为路径上的信息素挥发系数； $Q$  为比例系数； $L$  为已求出的最大优势值。通过算式可以看出，只有构成全局最优路径的边可以增加信息素水平，其他边的信息素强度则由于挥发作用逐渐降低，因此搜索的目的性大大增强。

局部更新规则在所有蚂蚁完成每一次转移后执行。

$$\tau_{rs} \leftarrow (1 - \rho) \tau_{rs} + \rho \cdot \Delta \tau_{rs} \quad (13)$$

其中， $\rho$  为区间(0,1)上的参数； $\Delta \tau_{rs} = \tau_0$ ， $\tau_0$  为信息素强度的初始值。局部更新的目的是适当降低蚂蚁所经过的边的信息素强度，从而避免搜索过度集中而导致的搜索停滞。

### 3.3 算法步骤

算法计算的复杂度为  $O(m \cdot n \cdot y \cdot nc)$ ，其中， $nc$  为算法迭代次数，算法步骤如下：

```

procedure 排序问题的蚁群算法
设置参数，初始化信息素强度；
while(不满足中止条件时)
y 只蚂蚁随机地放在 y 个不同的目标节点上；
for 蚁群中的每只蚂蚁：
for 每个解构造步(直到构造出完整解)：
蚂蚁按信息素及启发式信息的指引构造一步问题的解；
从剩下的目标节点中随机地选择下一个目标节点；
进行信息素局部的更新；
end
end
根据已获得的最优解进行全局信息素更新；
end

```

### 4 仿真及结果分析

假定我方有 5 架具有多目标攻击能力的同型歼击机，每

架可分别挂载两种类型的中远距雷达制导弹共 6 枚，并可同时攻击 4 个目标。抗击目标有 16 批，且目标均在我机的火控雷达跟踪范围内。我机相对于目标的空战综合优势如表 1、表 2 所示。

表 1 我机相对于目标的空战综合优势 $T_{ij}$ 值 1

$T_{ij}$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$
$w_1$	0.750	0.689	0.689	0.645	0.643	0.651	0.786	0.603
$w_2$	0.655	0.603	0.747	0.956	0.645	0.675	0.654	0.684
$w_3$	0.636	0.654	0.758	0.662	0.605	0.723	0.761	0.746
$w_4$	0.675	0.693	0.561	0.756	0.693	0.658	0.673	0.575
$w_5$	0.682	0.875	0.693	0.691	0.753	0.673	0.645	0.615

表 2 我机相对于目标的空战综合优势 $T_{ij}$ 值 2

$T_{ij}$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	$t_{15}$	$t_{16}$
$w_1$	0.678	0.763	0.784	0.942	0.678	0.672	0.626	0.678
$w_2$	0.748	0.882	0.690	0.605	0.659	0.624	0.715	0.653
$w_3$	0.653	0.635	0.643	0.764	0.840	0.699	0.698	0.786
$w_4$	0.697	0.691	0.786	0.673	0.607	0.623	0.621	0.643
$w_5$	0.784	0.627	0.706	0.628	0.695	0.612	0.645	0.842

经反复参数设置试验，目标排序蚁群算法参数设置为：

$\beta=1.5, \alpha=0.1, \rho=0.1, q_0=0.9, Q=n, y=10, \tau_0=\max T_{ij}$ ，编程

计算得到目标分配结果为： $U_1=\{t_1, t_7, t_{12}\}$ ， $U_2=\{t_3, t_4, t_{10}, t_{15}\}$ ，

$U_3=\{t_6, t_8, t_{13}, t_{14}\}$ ， $U_4=\{t_{11}\}$ ， $U_5=\{t_2, t_5, t_9, t_{16}\}$ 。

蚂蚁最佳进化曲线如图 1 所示。

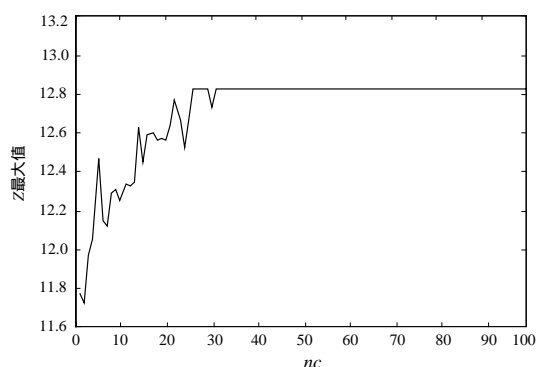


图 1 蚂蚁最佳进化曲线

(上接第 154 页)

表 4 平均提取成功率

秘密信息长度	直接相减	FASTICA
100	0.663	0.781
2 000	0.687	0.803
5 000	0.702	0.836

从表 4 中可以看出，本文提出的 ICA 方法的性能远远好于直接相减，算法能取得 80% 左右的提取成功率，并且随着嵌入信息的增加，性能也在提高。

和 Chandramouli 的实验结果比较，对 DCT 域隐写算法，秘密信息长度分别为 100, 2 000 和 5 000 时的提取成功率分别为 95%, 95% 和 96%。对比表 2 的结果，本文方法的性能与之相比还有一定的差距。原因就在于 Chandramouli 使用了 2 幅仅仅嵌入强度不一样的隐写图像，而本文只使用了 1 幅，这更贴合实际环境。在具体应用中，如果能满足 Chandramouli 模型的要求，就可以采用其方法来提取。如果只能得到 1 幅隐写图像，那么采用本文的方法，能提取出 80% 左右的秘密信息，对于判断隐写内容、发现隐写者的真实意图仍然具有重要的意义。所以，本文方法的性能是可以接受的。

## 5 结束语

本文对 Chandramouli 提出的主动隐写分析模型进行了改

根据航空作战指挥原则和作战经验，容易验证排序结果实际上是最优解，并且由迭代过程可知，经过约 32 次迭代计算后，可以获得排序问题的满意解。在保证我方总体优势的前提下，对于我方优势大的目标，可以采用优先攻击的原则，我机  $w_1$  对敌机的攻击顺序为： $t_{12}, t_7, t_1$ ； $w_2$  对敌机的攻击顺序为： $t_4, t_{10}, t_3, t_{15}$ ； $w_3$  对敌机的攻击顺序为： $t_{13}, t_8, t_6, t_{14}$ ； $w_4$  攻击敌机  $t_{11}$ ； $w_5$  对敌机的攻击顺序为： $t_2, t_{16}, t_9, t_5$ 。

## 5 结束语

蚂蚁算法是一种并行的算法，搜索过程彼此独立，通过信息素进行简单的通信。并行计算可以显著减少计算时间，同时蚂蚁算法又是一种正反馈算法，使搜索很快收敛。现代空战超视距多目标攻击排序的仿真实例充分说明了蚁群算法的有效性。

## 参考文献

- [1] Austin F, Lewis M. Automated Maneuvering Decision for Air-to-Air Combat[EB/OL]. (2004-03-02). <http://www.go.com/>.
- [2] Hague D S. Multiple-tactical Aircraft Combat Performance Evaluation System[EB/OL]. (2005-06-02). <http://www.go.com/>.
- [3] Coleman N, Papanagopoulos G. Advanced Mine-to-target Assignment Algorithms and Simulation[EB/OL]. (2002-08-01). <http://www.go.com/>.
- [4] 高 坚, 佟明安. 超视距多目标攻击排序及火力分配建模与解算[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(3): 9-15.
- [5] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41.
- [6] 朱宝裘, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [7] 黄树彩, 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): 79-81.

进，只使用一幅隐写图像就可以提取 80% 左右的秘密信息。其中的 MAP 估计器虽然是在 DCT 域进行操作，但提出的方案对其他隐写域是等效的。由于 MAP 估计器和 ICA 算法都是基于估计理论，因此采用更复杂的图像模型和更好的估计技术是提高性能的有效途径，这是下一步研究的重点内容。

## 参考文献

- [1] 宋 华, 尤新刚, 戴一奇. 基于 SVM 的 JPEG 图像隐密分析研究[J]. 计算机工程, 2006, 32(10): 6-8.
- [2] Avcibas I, Memon N, Sankur B. Steganalysis Using Image Quality Metrics[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(2): 221-229.
- [3] Trivedi S, Chandramouli R. Active Steganalysis of Sequential Steganography[C]//Proc. of SPIE Conference. California, USA: [s. n.], 2003: 123-130.
- [4] Chandramouli R. A Mathematical Framework for Active Steganalysis[J]. Multimedia Systems, 2003, 9(3): 303-311.
- [5] Hyvrinen A. Fast and Robust Fixed-point Algorithms for Independent Component Analysis[J]. IEEE Transactions. on Neural Network, 1999, 10(3): 626-634.