

文章编号: 1002-0640(2011) 12-0060-04

无人机协同空战中的目标威胁评估和目标分配算法*

赵振宇^{1,2}, 卢广山¹

(1. 西北工业大学电子信息学院,西安 710072, 2. 光电控制技术重点实验室,河南 洛阳 471009)

摘要: 为适应变化的战场态势,研究了多无人机协同空战中的目标威胁评估算法和目标分配算法。利用一种新的计算方法对目标威胁矩阵进行确定,从而针对不同的空战态势进行威胁评估,以提高威胁评估的性能。利用所得到的威胁评估结果,采用基于态势的目标分配方法实现目标分配。所研究的目标分配算法不仅考虑敌机对我方威胁,同时还考虑了敌机的作战意图,使得我方能够实时准确的对敌做出目标分配。仿真结果表明所研究的算法能够完成多机空战中的目标威胁评估和目标分配,所研究的算法是有效的。

关键词: 协同空战,威胁评估,目标分配
中图分类号: E844 **文献标识码:** A

Research on Threat Assessment and Target Assignment Algorithm for Multi-UAV Cooperative Air Combat

ZHAO Zhen-yu^{1,2}, LU Guang-shan¹

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China,
2. Science and Technology on Electron-optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China)

Abstract In this paper, the threat assessment algorithm and the target assignment algorithm are investigated for the multi-UAV cooperative air combat by considering the changeable combat situation. The target attribute matrix is firstly computed using a new computation method. The different attribute are used according the different combat attributes to improve the performance of threat assessment. Based on the results of threat assessment, target assignment is achieved based on the target situation. The studied target assignment algorithm not only considers enemy's threat, but also considers the combat purpose. Thus, the developed target assignment algorithm can rightly make target assignment decision. Finally, simulation examples are given to illustrate the effectiveness of the studied threat assessment algorithm and target assignment algorithm. The simulation results show that the studied algorithms can rightly complete the threat assessment and the target assignment.

Key words cooperative air combat, threat assessment, target assignment

引 言

现代战争中,为了有效地发挥无人机的优势,提高无人机的生存能力,国外采用了多机协同作战的方式^[1]。为适应复杂的协同作战环境,无人机机载任务系统的自主水平等级必须较现有产品大幅度提

高。实现协同作战的自主控制,需要首先解决目标威胁实时评估、任务目标分配和攻击排序^[2-5]等无人机自主决策问题。

目标威胁评估问题有关学者已经开展了一定研究,详见文献[6-9],本文在基于攻击区计算的基础上,对目标威胁因子属性矩阵进行确定并进行威胁评估。

多无人机协同攻击在完成目标威胁评估的基础上,进行目标分配。常用的目标分配方法有:自主优先权的分配和协同优先权的分配^[10-12]。前者在不考虑与其他友机进行协同的情况下,根据态势数据和威胁判断独自确定的目标跟踪优先排序,这种分配

收稿日期: 2010-10-12 修回日期: 2010-12-06
* 基金项目: 航空科学基金资助项目 (2010ZC13012)
作者简介: 赵振宇 (1971-),男,吉林榆树人,博士研究生,高工,研究方向: 无人机机载火力控制与指挥系统总体设计。

方式可能导致重复攻击以及信息资源的浪费等;后者考虑到了多机协同问题,计算协同优先权,避免了重复。本文在已有的协同目标分配方法的基础上,在考虑敌机对我方威胁的同时,增加敌机作战意图的判断,使得我方能够实时准确地对敌作出攻击目标分配,同时也能保证我方战机的安全。

1 目标威胁评估模型

针对无人机空战特点,本文以敌机对我机的导弹攻击区估算作为威胁评估的基础,综合双方的速度、距离和角度关系等影响因素,计算进入攻击区时间和处于攻击区内位置,建立评估优势函数

1) 我机进入敌机攻击区的时间估算

如图 1 所示, A_0 、 T_0 分别是目标机(敌机)和本机(我机)的当前位置, A_1 、 T_1 分别是本机进入目标发射区时目标机(敌机)、本机的预测位置; D_h 为双方的距离(空间距离); R 为目标机(敌机)的圆形发射区半径; V_{ah} 、 V_{th} 分别是当前目标机(敌机)、本机的速度矢量;目标机的导弹最大发射距离为 D_{pmax} 。图 1 中, A_1 和 T_1 位置双方 $D_1 = D_{pmax}$; M 为圆形发射区的圆心,也是目标发射的导弹与本机的预测碰撞点。

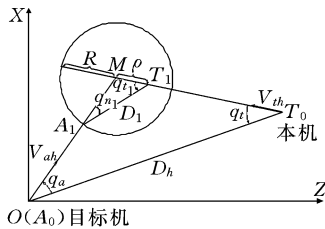


图 1 前置攻击区发射示意图

由图 1,则有:

$$q_1 = \arccos \frac{d_1^2 + D_1^2 - R^2}{2d_1 D_1} \quad (1)$$

将目标机(敌机)和本机的运动轨迹投影到距离线 D_h 上,根据目标机(敌机)当前速度 V_{ah} 到发射点 A_1 的给定速度 V_{ah} 的飞行速度变化,可以计算相应的“飞行时间”:

$$t_1 \approx \frac{D_h - D_{pmax} \cos(q_1 - q_2)}{V_{th} \cos(q_1) + V_{cpp} \cos(q_2)} \quad (2)$$

2) 处于攻击区内位置对攻击区的影响

当处于目标机(敌机)发射区内时,采用本机可能受到目标机的攻击的概率进行估计:认为本机离目标机(敌机)的不可逃逸攻击区越近,则受到攻击的概率越大。参照文献 [13],采用指数形式定义受攻击的概率:

$$P_{ls}(d) = ke^{-c \frac{D_h - D_{min}}{D_{pmax} - D_{min}}} \quad (3)$$

其中 D_{pmax} 是最大发射距离, D_{min} 为不可逃逸区最小

距离, k, c 为待定常数。在不可逃逸区附近,受到的攻击概率是 100%,而在发射区最大区附近,受到攻击的概率为 85%,则取 $k=1, c=0.1625$,则有:

$$P_{ls}(d) = e^{-0.1625 \frac{D_h - D_{min}}{D_{pmax} - D_{min}}} \quad (4)$$

3) 目标威胁评估函数建立

建立目标威胁因子评估模型为:

$$S = \begin{cases} 2 & \text{目标机发射导弹} \\ e^{0.1625 \frac{D_h - D_{min}}{D_{pmax} - D_{min}}} & \text{本机处于目标机导弹攻击区内} \\ \frac{1}{2|t_1|} & t_1 < 0 \\ \frac{1}{2t_1} & t_1 > 0, q_1 < 90^\circ, q_2 < 90^\circ \\ \frac{1}{|t_1|} & t_1 > 0, q_1 < 90^\circ, q_2 \geq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

在计算出各个目标威胁因子后即可得到目标属性矩阵。其中, S_{ij} 为第 j 架敌机对我机 i 的威胁指数, S_{ij} 越大,表示我机 i 对敌机 j 的综合优势越小,敌机 j 对我机 i 的威胁越大,反之亦然,在此基础上可以得到我方 m 架战机对敌机 n 架战机的综合优势评估值矩阵 $S = (S_{ij})_{m \times n}$,从而实现了编队内多机协同空战的目标威胁评估。

2 基于态势的目标分配

为了能够实时准确地对敌作出目标分配,本文研究的目标分配算法不仅需要考虑敌机对我方威胁,同时还需考虑敌机的作战意图。本文以单机对敌的优先权为基础,同一小组中首先选择攻击佯攻倾向较大的敌机作为我方的攻击目标,采用对该目标具有较高优先权且该目标对我方战机防御规避倾向较大的我机作为攻击机。即在满足攻击条件的 n 个目标中计算出攻击性最大的目标,而采取机动的我机对目标具有最大攻击价值。其数学表达式如下:

敌机最大攻击性:

$$\max(d_1 m_k(\text{攻击}) + d_2 m_k(\text{佯攻})), k=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

我机最大攻击价值:

$$\max(\text{Prior}_k + d_3 m_k(\text{防御}) + d_4 m_k(\text{规避})), k=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中, $m_k(\text{攻击})$, $m_k(\text{佯攻})$, $m_k(\text{防御})$, $m_k(\text{规避})$ 为第 k 架蓝机对红机的 4 种态势意图, Prior_k 为红机对第 k 架蓝机的优先权, d_1, d_2, d_3, d_4 分别是目标各种态势意图对我机进行攻击和生存概率大小影响的权重。蓝机的 4 种态势意图中,攻击对红机的威胁最大,佯攻次之,规避较有利于红机对其机动,防御次之,因此取 $d_1=1, d_2=0.8, d_3=0.6, d_4=0.4$ 。具体

计算时,先挑出剩下目标中攻击性最大的,再选择对其具有最大攻击价值的红机对其攻击,循环直到挑满 n 个目标 协同目标分配流程如图 2所示^[14]。

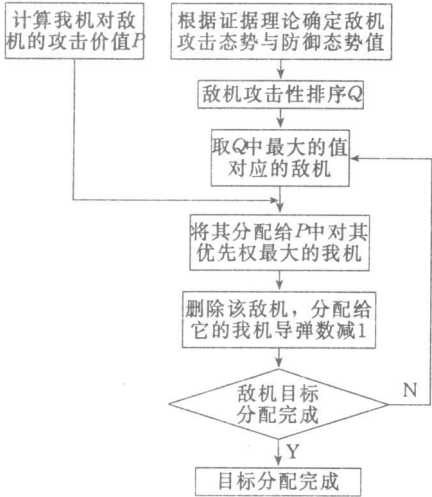


图 2 协同目标分配流程

1)单机对敌机的攻击价值 P ,计算我机群中每架红机(共 m' 架)相对于敌机群中每架蓝机(共 n' 架)的攻击价值:

$$P=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n'} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n'} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m'1} & P_{m'2} & \cdots & P_{m'n'} \end{bmatrix}$$

(8)

其中 $P_{ij} = \text{Priov}_{ij} + d_{3mij}$ (防御) + d_{4mij} (规避)是红机 i 对蓝机 j 的攻击价值;

2)对敌机的攻击性进行综合排序,构成攻击排序阵 Q

$$Q=\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1n'} \\ Q_{21} & Q_{22} & \cdots & Q_{2n'} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_{m'1} & Q_{m'2} & \cdots & Q_{m'n'} \end{bmatrix}$$

(8)

其中 $Q_{ij} = d_{1mij}$ (攻击) + d_{2mij} (佯攻)是红机 i 对蓝机 j 的攻击可能性;

3)确定向量 Q 中最大的元素(攻击性最大)对应的蓝机(设为蓝机 j)为首先攻击目标;

4)在矩阵 P 中的第 j 列查找到最大元素,设为 P_{ij} ;

5)将蓝机 j 分配给红机 i 攻击(以优攻威胁最大的);

6)删除 P 中第 j 列和 Q 中蓝机 j 对应的行(避免重复分配);

7)如果分配给某架红机攻击的蓝机数量等于该机携带的导弹数目,则该架红机退出目标分配,删除矩阵 P 中该架红机对应的行;

8)重复 3)~ 8),直至删除矩阵 Q 中所有行,目标分配结束。

3 算例仿真

1)目标威胁评估算例

假设:① 敌机导弹从当前到发射点之间的平均速度 V_{cpp} 为 400 m/s;② $q \approx 0^\circ$ 时, $D_{pmax} = 100\ 000$ m, $D_{min} = 52\ 000$ m;③ $q \approx 90^\circ$ 时 $D_{pmax} = 60\ 000$ m, $D_{min} = 40\ 000$ m 分别计算迎头($q \approx 0^\circ$)、侧向($q \approx 90^\circ$)空战态势下我方 1架战机(本机/我机)VS 3架敌机的情况,我机分别处于敌机导弹攻击区的不同位置(我机处于 3 6号敌机导弹攻击区内),计算结果如表 1所示

表 1 某一小组中红蓝双方的态势

态势 编号	$q_a(^{\circ})$	$q(^{\circ})$	D_h (km)	V_h (km/s)	V_{sh} (km/s)
红 1 VS 蓝 2	33.124 1	- 46.875 9	58.689 9	362.000 0	372.000 0
红 1 VS 蓝 3	41.956 3	- 105.043 7	62.728 7	362.000 0	328.000 0
红 1 VS 蓝 5	48.483 5	- 94.516 5	67.492 4	362.000 0	365.000 0
红 1 VS 蓝 7	47.606 3	- 102.393 7	51.238 5	362.000 0	310.000 0
红 1 VS 蓝 8	48.880 2	- 36.119 8	52.605 1	362.000 0	330.000 0
红 1 VS 蓝 12	54.038 9	- 15.961 1	49.642 4	362.000 0	385.000 0
红 4 VS 蓝 2	9.145 8	- 50.854 2	55.245 0	380.000 0	372.000 0
红 4 VS 蓝 3	18.793 9	- 108.206 1	58.694 1	380.000 0	328.000 0
红 4 VS 蓝 5	25.986 8	- 97.013 2	63.087 0	380.000 0	365.000 0
红 4 VS 蓝 7	24.163 8	- 105.836 2	46.900 4	380.000 0	310.000 0
红 4 VS 蓝 8	25.648 3	- 39.351 7	48.197 6	380.000 0	330.000 0
红 4 VS 蓝 12	31.104 7	- 18.895 3	44.991 1	380.000 0	385.000 0

根据以上计算结果,可得空战态势矩阵: $S=[0.1, 0.88, 1.0, 0.005, 0.01, 0.91]$

可见优势值排序为: $S_4 > S_5 > S_1 > S_2 > S_6 > S_3$, 其结果与文献 [8] 的排序思路一致,但数值大小与其不尽相同,体现了当前态势对威胁评估结果的影响

2) 目标威胁评估算例

为了验证本文所研究的目标分配算法,假设交战双方的机群中飞机的数量分别是红方 4 架,蓝方 12 架。首先进行机群分组,分组完成之后,交战双方各分为两个小组,在小组内部进行空战,假设某一小组中红蓝双方的态势如表 1 所示。

基于证据理论的方法,得到敌机小组对我机小组态势的基本概率赋值如表 2 所示

表 2 敌机小组对我机小组态势基本概率赋值

态势 编号	攻击 A_1	防御 A_2	佯攻 A_3	规避 A_4	不确定 θ
蓝 2VS 红 1	0.317 3	0.212 3	0.188 8	0.236 5	0.045 1
蓝 3VS 红 1	0.346 3	0.220 7	0.201 3	0.201 3	0.030 4
蓝 5VS 红 1	0.256 3	0.211 3	0.186 7	0.291 8	0.053 9
蓝 7VS 红 1	0.304 7	0.227 8	0.199 7	0.209 5	0.058 3
蓝 8VS 红 1	0.283 6	0.232 8	0.188 8	0.279 4	0.015 4
蓝 12VS 红 1	0.283 1	0.222 1	0.192 8	0.248 3	0.053 6
蓝 2VS 红 4	0.223 4	0.195 2	0.178 4	0.350 3	0.052 8
蓝 3VS 红 4	0.306 5	0.246 7	0.200 2	0.220 8	0.025 7
蓝 5VS 红 4	0.281 4	0.251 5	0.196 0	0.233 7	0.037 3
蓝 7VS 红 4	0.291 2	0.233 9	0.197 3	0.235 4	0.042 1
蓝 8VS 红 4	0.246 6	0.214 1	0.186 0	0.309 4	0.043 9
蓝 12VS 红 4	0.253 0	0.207 3	0.185 8	0.301 0	0.052 8

蓝机小组(蓝机 2 3 5 7 8 12)对红机小组(红机 1 4)的 4 种态势(攻击、防御、佯攻、规避)情况如图 3 所示。

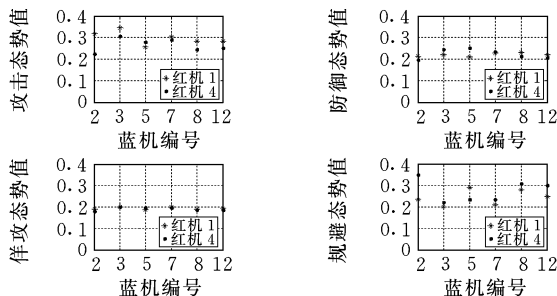


图 3 蓝机小组对红机小组态势图

敌机小组对我机小组的总体态势图中,由攻击态势部分可见敌机 3 和 2 对我机 1 的威胁最大,且总体上敌机 3 是最具威胁力的。

按照本文给出的协同目标分配方法,同一小组

内红方的攻击任务分配结果如表 3 所示。

表 3 小组内攻击任务分配结果

结果 编号	蓝机 2	蓝机 3	蓝机 5	蓝机 7	蓝机 8	蓝机 12
红机 1		①			③	②
红机 4	②	①		③		

首先确定蓝机 3 为攻击目标,采用对其具有最大攻击价值的红机 4 对其攻击,所以红机 4 首攻蓝机 3,然后攻蓝机 2,最后攻击蓝机 7

红机 1 首攻蓝机 5,其次攻蓝机 12,最后攻击蓝机 8;我机攻击的次序以及攻击敌机的次序体现了最大杀伤敌人和最好保护我方的原则。同时,由于交战双方的态势随着时间不断变化,所以一段时间之后,需要重新评估双方的态势以及分组决策、任务分配,方法和以上的过程类似,这里就不再重述和进行仿真计算

4 结束语

本文研究了能适应变化的战场态势多无人机协同空战目标威胁评估和目标分配算法。所研究的目标威胁评估算法在综合考虑了敌我双方态势及空战能力对比的基础上,更加准确、全面、客观地反映了当前态势下目标威胁的真实情况。在得到威胁评估结果的基础上,考虑到敌机对我方威胁和敌机的作战意图,采用基于态势的目标分配方法实现了目标分配。仿真实验结果表明本文所研究的方法能够较好地解决空战威胁评估和目标分配问题,有较好的优越性和应用前景。

参考文献:

- [1] 沈娟,王蒙.美国的多无人机自主协同作战项目[J].飞航导弹,2008,37(8): 39-42.
- [2] Shima T, Schumacher C. Assignment of Cooperating UAVs to Simultaneous Task using Genetic Algorithms [C]//AIAA Guidance, Navigation and control Conference and Exhibit, 2005. USA: AIAA, 2005.
- [3] 刘跃峰,张安.有人机/无人机编队协同任务分配方法[J].系统工程与电子技术,2010,32(3): 584-588.
- [4] 彭辉,沈林成,朱华勇.基于分布式模型预测控制的多 UAV 协同区域搜索[J].航空学报,2010(3): 594-600.
- [5] 郭文强,高晓光,任佳,等.基于图模型自主优化的多无人机多目标攻击[J].系统工程与电子技术,2010,32(3): 574-578.

(下转第 71 页)

总的基线长度; λ 为入射波波长; T 为来波方向(来波与天线法线的夹角),对于采用两个垂直线阵的二维干涉仪而言,可选择两者较小的作为测向系统的 CRAMER-RAO 下限。由式(18)可以看出,对于测量得到的来波方向,可通过估计接收信号的莱斯因子 K ,对测向结果的质量进行判断,推断测向结果的可信度,通过多次测量,选择可信度最高的作为最终测量结果。

可采用 1, 2 阶矩信息的查表法对莱斯因子 K 进行实时估计,在获得更好估计结果的同时,又能满足实时的要求。根据莱斯分布任意阶距表达式^[13]:

$$r_n = E[r^n] = (2e)^{n/2} \exp(-K) \Gamma(1+n/2) {}_1F_1(1+n/2; 1; K) \quad (19)$$

其中: $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; ${}_1F_1(\cdot)$ 为合流超几何函数。利用 1, 2 阶矩信息可得:

$$\frac{r_2}{r_1^2} = \frac{\pi e^{-K}}{4(K+1)} \left[(K+1)I_0\left(\frac{K}{2}\right) + KI_1\left(\frac{K}{2}\right) \right]^2 \quad (20)$$

其中: $I_0(\cdot)$ 和 $I_1(\cdot)$ 分别为零阶和一阶修正贝塞尔函数。由式(20)直接求解 K 比较困难,可以采用查找表的方法求解 K 值,即先将一定范围的 K 值通过式(20)计算出 r_1, r_2 的值,然后与测量得到的 r_1, r_2 进行比较,把最相近的查找项对应的 K 值做为估计结果。

6 结 论

要有效地降低干涉仪测向误差,应主要考虑如下:①降低系统内部噪声,来提高系统输入信噪比;②计算获得倾角校正数据库,通过测定机身倾斜角对基线位置变化引起的测向误差进行校正;③减少多径效应的影响,降低多径反射波的幅度并尽量缩短接收机采样处理时间,合理选择测向结果并限定测向来波范围。

参考文献:

- [1] 郭细平.一种 JTIDS 信号测向新方法 [J].通信对抗, 2008(2): 19-21.
- [2] 季晓光,高晓光.一种机载无源定位方法-干涉仪定位 [J].火力与指挥控制, 2008, 30(11): 158-161.
- [3] 苗留成,胡海滨,冯志远.基于移动平台的辐射源干涉测向精度分析 [J].电子测量技术, 2009, 32(6): 151-154.
- [4] 张文旭,司锡才,蒋伊琳.相位干涉仪测向系统相位误差研究 [J].系统工程与电子技术, 2006, 28(11): 1631-1632.
- [5] 耿春萍,曾茂生,张 治.飞行倾斜角对时差测向精度的影响 [J].飞行器测控学报, 2006, 25(5): 37-40.
- [6] Xi W, Yu B Z, Wang S S. Theoretical Analysis of Direct-finding Targets with Rolling-airframe Passive Radar by Phase Interference Technique [J]. IEEE, 2006, 0-7803-9582-4.
- [7] 谢 飞,张忠臣,张 鹏,等.多径效应对测向误差的影响 [J].电子测量技术, 2010, 33(1): 29-31.
- [8] 王永州,蔡臻祥. Rice 信道下的测向误差分析 [J].舰船电子对抗, 2007, 27(1): 139-140.
- [9] Gan L, Li M, Gu J F, et al. Improvement of 2-D Direction Finding Algorithm of Coherent Signals Based on Two L-shape Arrays [J]. IEEE 978-1-4244-4888-3, 2009 423-426.
- [10] Schmieder L, Mellon D, Saquib M. Signal Direction Finding for Low Complexity Radar [J]. IEEE 9781-4244-2971-4, 2009 8-12.
- [11] 向淑兰,张杰儒.干涉仪对两点源信号测向的分析 [J].火力与指挥控制, 2005, 30(5): 65-67.
- [12] 张君毅.莱斯因子估计在测向误差分析中的应用 [J].无线电工程, 2005, 35(5): 33-35.
- [13] 王 联,王 萍,熊骇韬.莱斯衰落信道的值估计与测量 [J].数据采集与处理, 2009, 24(1): 110-112.
- [10] 田 涛,王月星,周德云.基于多目标攻击目标选择与战术决策研究 [J].弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 374-376.
- [11] 浦 鹏,张金春,孙玺菁.多机协同多目标分配战术决策研究 [J].战术导弹技术, 2007, 28(2): 57-61.
- [12] 高文正,丁全心.多机协同攻击中的多目标分配算法 [J].电光与控制, 2003, 10(4): 10-18.
- [13] 高 永,向锦武.一种新的超视距空战威胁估计非参量法模型 [J].系统仿真学报, 2006, 18(9): 2570-2572.
- [14] 杭文庆.多源信息环境下基于证据理论的多机协同多目标攻击决策研究 [D].南京:南京航空航天大学, 2010.

(上接第 63 页)

- [6] 姚 磊,王红明,郑 锋,等.空中目标威胁估计的模糊聚类方法研究 [J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 51(6): 1159-1166.
- [7] 逯宏亮,欧建军.协同空战中目标的威胁判定方法 [J].电光与控制, 2005, 12(6): 8-11.
- [8] 姜长生,丁全心,王建刚,等.多机协同空战中的威胁评估与目标分配 [J].火力与指挥控制, 2008, 33(11): 8-12.
- [9] 张 堃,周德云.基于熵的 TO PSIS 法空战多目标威胁评估 [J].系统工程与电子技术, 2007, 29(9): 1493-1495.