

遗传算法和拍卖算法在任务分配中的性能比较

吴俊成¹, 周锐¹, 冉华明¹, 丁全心²

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 针对超视距空战中的目标分配问题, 从攻击的角度建立我方导弹对敌方飞机的攻击优势模型; 从防御的角度建立敌方飞机对我方飞机的威胁模型; 根据飞机的作战能力建立飞机的作战效能模型。根据敌方飞机的种类和作战性能, 运用上述3种模型建立总体的任务分配模型, 根据不同的作战方案分别采用遗传算法和拍卖算法对分配模型进行优化求解。通过比较两种算法的分配结果, 总结出各自的优缺点以及适用范围, 为今后应用提供参考。仿真结果表明: 针对不同的作战方案, 选用合理的优化算法能更好地完成作战任务。

关键词: 超视距空战; 攻击优势; 遗传算法; 拍卖算法; 任务分配

中图分类号: V21 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2016)02-0011-05

Performance Comparison of Genetic Algorithm with Auction Algorithm in Task Allocation

WU Jun-cheng¹, ZHOU Rui¹, RAN Hua-ming¹, DING Quan-xin²

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: To solve target allocation problem in beyond-visual-range air combat, the model of attack dominance of our missile to enemy aircrafts was established from the perspective of attack. The threat model of enemy aircrafts to our aircrafts was established from the perspective of defense, and the air combat effectiveness model was established according to the air combat capability of aircrafts. According to the type and the air combat capability of enemy aircraft, the whole task allocation model was established based on the above three models. Genetic algorithm and auction algorithm was respectively used for optimizing the allocation model according to the different battle plan. The two algorithms' characteristics and scope of application were summed up by comparing the allocation results, which provides a reference for future applications. The simulation results demonstrate that the combat mission is better fulfilled using the rational optimization algorithm according to the different intentions of enemy.

Key words: beyond-visual-range air combat; attack dominance; genetic algorithm; auction algorithm; task allocation

0 引言

随着网络化的推进以及战斗机的发展, 未来空战模式已不是单机对单机的近距格斗, 而是在预警机或

地面站的指挥下, 各战斗机相互协同的超视距空战。国内外针对超视距空战中的任务分配研究较多。文献[1-2]主要介绍了空战中多任务分配的基本理论以及多目标攻击的战术决策问题; 文献[3-4]分别讨论了无人作战飞机的攻击任务分配问题; 文献[5-8]重点研究了多机协同制导的问题。在对任务进行分配时, 遗传算法和拍卖算法应用较多, 本文通过比较两种算法在任务分配时的应用效果, 总结出两种算法的优缺点以及应用范围, 以期以后相关问题的解决提供一定的参考。

收稿日期: 2015-03-24

修回日期: 2015-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61273349, 61175109, 61203223); 航空科学基金(2011ZC13001)

作者简介: 吴俊成(1991—), 男, 河北沧州人, 硕士生, 研究方向为导航制导与控制。

1 态势评估数学模型

1.1 攻击优势模型

根据敌我双方的位置关系,考虑导弹的攻击角度,可以得出导弹攻击的角度优势为

$$f_{\varphi} = \begin{cases} 0 & |\varphi| > \varphi_{Amax} \\ e^{-\frac{|\varphi| - \varphi_{Nmax}}{\varphi_{Amax} - \varphi_{Nmax}}} & \varphi_{Nmax} \leq |\varphi| \leq \varphi_{Amax} \\ 1 & 0^{\circ} \leq |\varphi| \leq \varphi_{Nmax} \end{cases} \quad (1)$$

式中: φ_{Amax} 为导弹的最大攻击角度; φ_{Nmax} 为不可逃逸的最大攻击角度。

根据敌我双方的距离关系,考虑导弹的攻击距离,可以得出导弹的距离优势为

$$f_s = \begin{cases} 0 & s_T > S_{Amax} \\ e^{-\frac{s_T - S_{Nmax}}{S_{Amax} - S_{Nmax}}} & S_{Nmax} \leq s_T \leq S_{Amax} \\ 1 & S_{Nmin} \leq s_T \leq S_{Nmax} \\ e^{\frac{s_T - S_{Nmin}}{S_{Nmax}}} & 0 \leq s_T \leq S_{Nmin} \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_{Amax} 为我方导弹最大攻击距离; S_{Nmax} 和 S_{Nmin} 分别为导弹攻击不可逃逸区的最大、最小距离。

为了尽可能大地增加导弹的射程,发射导弹时飞机要有足够的速度,故可得到导弹的速度优势^[9]为

$$f_v = \begin{cases} 0.2 & V_b \leq 0.5V_a \\ 1.5 - \frac{V_b}{V_a} & 0.5V_a < V_b < 1.5V_a \\ 1.0 & V_b \geq 1.5V_a \end{cases} \quad (3)$$

式中, V_a 和 V_b 分别代表敌我双方飞机速度。

根据以上分析得到导弹总的攻击优势函数为

$$T_s = k_1(f_{\alpha})^{\gamma_1}(f_s)^{\gamma_2} + k_2 f_v \quad (4)$$

式中: $0 \leq \gamma_1 \leq 1, 0 \leq \gamma_2 \leq 1, \gamma_1 + \gamma_2 = 1; 0 \leq k_1 \leq 1, 0 \leq k_2 \leq 1, k_1 + k_2 = 1$ 。

1.2 敌方飞机威胁模型

在攻击敌机的同时也受到敌机对我方的攻击威胁。从雷达扫描以及导弹攻击角度方面考虑,建立敌方的角度威胁模型^[10]为

$$T_{\alpha} = \begin{cases} 0.3 \left(1 - \frac{|\beta| - \varphi_{Mmax}}{\varphi_{Rmax} - \varphi_{Mmax}} \right) & \varphi_{Mmax} \leq |\beta| \leq \varphi_{Rmax} \\ 0.8 - \frac{|\beta| - \varphi_{Mkmax}}{2(\varphi_{Mmax} - \varphi_{Mkmax})} & \varphi_{Mkmax} \leq |\beta| \leq \varphi_{Mmax} \\ 1 - \frac{|\beta|}{5\varphi_{Mkmax}} & 0^{\circ} \leq |\beta| \leq \varphi_{Mkmax} \\ 0 & |\beta| > \varphi_{Rmax} \end{cases} \quad (5)$$

式中: φ_{Rmax} 为敌方雷达最大搜索角度; φ_{Mmax} 为空空导弹的最大离轴发射角; φ_{Mkmax} 为敌方攻击的圆锥角。

根据敌方飞机的雷达搜索距离以及空空导弹的攻

击距离建立距离威胁模型为

$$T_d = \begin{cases} 0 & d_T > D_{Rmax} \\ 0.5 e^{-\frac{d_T - D_{Mmax}}{D_{Rmax} - D_{Mmax}}} & D_{Mmax} \leq d_T \leq D_{Rmax} \\ 2 - \frac{d_T - D_{Mmax}}{D_{Mkmax} - D_{Mmin}} & D_{Mkmax} \leq d_T \leq D_{Mmax} \\ 1 & D_{Mkmin} \leq d_T \leq D_{Mkmax} \\ 2 \frac{d_T - D_{Mmin}}{D_{Mmax}} & 0 \leq d_T \leq D_{Mkmin} \end{cases} \quad (6)$$

式中: D_{Rmax} 为敌方雷达最远探测距离; D_{Mmax} 为敌方空空导弹的最远攻击距离; D_{Mkmax} 和 D_{Mkmin} 分别为最大、最小不可逃逸区距离。

空战中飞机能量是一个重要的指标,包括动能和势能。飞机的能量可表示为^[11]

$$E = H + \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

敌机的能量威胁模型^[11]为

$$T_E = \begin{cases} 1 & 2E_T \leq E \\ 1 + \frac{0.9(E - 2E_T)}{1.5E} & 0.5E_T \leq E \\ 0.1 & E < 0.5E_T \end{cases} \quad (8)$$

式中, E 和 E_T 分别为敌、我飞机的能量。

根据以上分析得到敌方总的威胁模型为

$$T_T = k_1 T_E + k_2 T_d + k_3 T_{\alpha} \quad (9)$$

式中: $0 \leq k_i \leq 1, \sum k_i = 1, i = 1, 2, 3$ 。

1.3 效能优势函数

评价战斗机空战效能指数的函数^[12]为

$$C = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln(\sum A_2)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (10)$$

式中: B 为战斗机的机动性; A_1 和 A_2 分别为战斗机的火力参数以及探测能力参数; ε_1 为飞机的操纵性能参数; ε_2 为飞机的生存能力系数; ε_3 和 ε_4 分别为航程系数和电子对抗能力系数^[12]。

构建空战效能优势函数^[9]为

$$T_C = \begin{cases} 0 & C_F/C_T < 0.3 \\ 0.25 & 0.3 \leq C_F/C_T < 1 \\ 0.5 & C_F/C_T = 1 \\ 0.75 & 1 < C_F/C_T \leq 1.5 \\ 1 & C_F/C_T \geq 1.5 \end{cases} \quad (11)$$

式中, C_T 和 C_F 分别为敌、我飞机空战能力指数。

1.4 综合态势评估

空战类型多种多样,因此在战斗中面对的敌机也不可能只有一种,不同的机群类型直接决定了敌我双方的相对态势。例如我方战斗机面对敌方侦察机时具有绝对优势,可不用考虑敌方威胁。

因此,在进行态势评估时主要从3方面进行考虑。

1) 当我方战斗机面对敌方非战斗机时具有绝对优势,态势评估的数学模型为

$$T = T_s = k_1 (f_\alpha)^{\gamma_1} (f_s)^{\gamma_2} + k_2 f_v \quad (12)$$

2) 我方非战斗机面对敌方战斗机时,具有绝对劣势,即

$$T = T_T = k_1 T_E + k_2 T_d + k_3 T_\alpha \quad (13)$$

3) 当我方战斗机面对敌方战斗机时,要充分考虑双方的空战能力以及态势的优劣,即

$$T = k_1 \hat{T}_T + k_2 T_S + k_3 T_E \quad (14)$$

式中: $0 \leq k_i \leq 1, \sum k_i = 1, i = 1, 2, 3; \hat{T}_T$ 为敌方所有战斗机对我方战斗机威胁的平均值。

2 空战任务分配

2.1 目标分配合理度的度量函数

在进行目标分配时,除了要保证整体优势值最大之外,还要考虑目标分配的合理性,不能将过多任务集中在一架攻击机上,即目标分配要均匀^[13]

$$x = \sum_{i=1}^n |p_i - m/n| \quad (15)$$

式中: x 为分配的均匀程度; n 和 m 分别为我机数量和敌机数量; p_i 为我方第 i 架飞机分配的目标数目。则当 $x = 0$ 时,分配最为均匀,当把所有目标都集中在一架攻击机上时,分配最不均匀,此时 $x = \frac{2m(n-1)}{n}$,据此构建分配均匀函数为

$$h(x) = \frac{n(z-1)}{2m(n-1)}x + 1 \quad (16)$$

式中, z 为分配最不均匀时 $h(x)$ 的函数值,可根据经验值设定,分配均匀时, $h(x)$ 的函数值为 1。

2.2 目标分配模型

根据以上分析得出机群整体相对态势模型,同时满足一定的限制条件^[13],即

$$J = \max \left\{ h \left(\sum_{i=1}^n \left| p_i - \frac{m}{n} \right| \right) \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} X_{ij} \right\} \quad (17)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m X_{ij} \leq T_{i\max}, i = 1, \dots, n; \sum_{i=1}^n X_{ij} \leq N_{j\max}, j = 1, \dots, m; X_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j$$

式中: T_{ij} 为我方第 i 架飞机对敌方第 j 架飞机的优势值; X_{ij} 为我机 i 与目标 j 间的分配关系, $X_{ij} = 0$ 表示我机 i 不将 j 选为攻击目标, $X_{ij} = 1$ 表示我机 i 将 j 选为攻击目标; $T_{i\max}$ 表示第 i 架我机最多可以攻击多少个目标; $N_{j\max}$ 表示第 j 个目标最多允许被几架我机攻击。

2.3 目标分配算法设计

根据敌方飞机的数量、种类以及作战能力判断敌方的作战意图,根据不同的作战意图制定相适应的作战方案。以我方飞机是战斗机为例,主要从夺取制空权、截

击敌机入侵和打击敌方重点目标 3 方面进行考虑。

无论是夺取制空权还是截击敌机入侵,此类空战目的都是最大限度地杀伤敌方飞机,因此在进行目标分配时要从全局的角度进行分析,分配完后要保证全局整体优势最大。而在打击敌方重点目标时,空战目的是最大可能地击落敌方的重点目标(比如预警机),因此在进行目标分配时,只要保证局部对重点目标的优势最大即可。

根据以上任务分配的特点,本文分别采用遗传算法和拍卖算法进行目标分配^[14-15]。

2.3.1 遗传算法目标分配

遗传算法的本质是并行性,在进行优化求解时从全局的角度进行搜索,针对的是一个种群的所有点,而不是单点搜索。

在进行遗传算法设计时,最关键的两点是编码方式的选择和适应函数的设计。适应函数如式(17)所示,编码方式采用二进制编码,如图 1 所示。图中显示我方有 n 架战斗机, m 架敌机,此时编码为 $n \times m$ 的一维数组。元素 1 表示将该目标分配给该战机,0 则表示不分配。

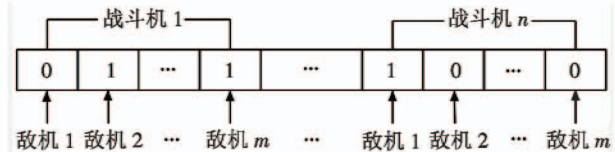


图 1 编码示意图

Fig. 1 Coding schematic

2.3.2 拍卖算法目标分配

拍卖算法本质上是一种搜索树算法,包括拍卖智能体和竞拍智能体,其基本思想是: m 个物品由 n 个买家竞拍,假设第 i 个物品价值为 S_i ,买家 j 要购买的话要付出的代价为 T_j ,那么获得的利润为 $P_j = S_i - T_j$,对所有的买家来说,当整体利润最大时拍卖即可停止。其基本流程如图 2 所示^[16]。

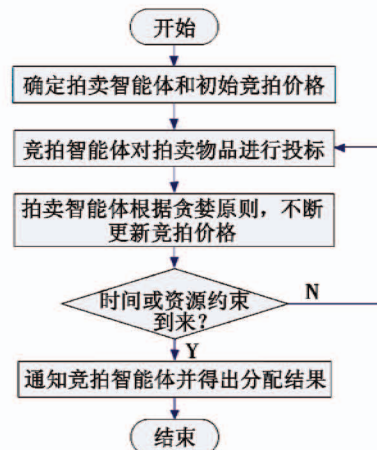


图 2 拍卖算法流程图

Fig. 2 Flow chart of auction algorithm

根据本文的特点,物品的价格为我方飞机对敌方飞机的优势值,付出的代价为我方飞机受到的威胁值。为了保证对敌方重点目标的局部优势值最大,引入目标重要程度这一因子,对重要的目标优先进行竞拍,选取所有竞拍智能体中优势值最大的,保证对重点目标的绝对优势。

3 仿真结果与分析

仿真假设我方有4架战斗机,敌方8架,并设定敌方1,2号目标为我方重点攻击的目标,初始参数如表1、表2所示。

表1 敌方飞机参数

Table 1 Parameters of enemy aircrafts

编号	初始位置/km			初始速度/(m·s ⁻¹)		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
1	9	60	0	0	-50	2
2	14	70	2	0	-55	-2
3	17	65	1	1	-55	2
4	20	70	2	-2	-54	0
5	23	70	2	1	-57	1
6	26	60	1	-1	-59	3
7	35	65	2	-15	-59	-6
8	40	68	2	-11	-50	1

表2 我方飞机参数

Table 2 Parameters of our aircrafts

编号	初始位置/km			初始速度/(m·s ⁻¹)		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
1	13	5	20	-20	80	0
2	20	7	19	30	80	1
3	28	11	30	-18	87	1
4	40	7	33	-5	100	2

首先利用遗传算法进行目标分配,设置种群大小为380,进化代数为250。分配结果如表3所示,其中1代表将目标分配给我方飞机,0代表不分配。

表3 遗传算法任务分配矩阵

Table 3 Task assignment matrix of genetic algorithm

我方飞机 编号	敌方飞机编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	0	0	1	0
4	0	0	0	0	1	0	0	1

攻击态势如图3所示,可以看出每架飞机都分配了两个目标,即每架飞机的攻击任务都相同。优势直方图如图4所示,显示了我方飞机对敌方飞机的优势,按照此种分配方式整体的优势值为1.8666,但把敌方1,2号重点目标分配给了1,2号战斗机,对重点目标的优势值不是最大,仿真用时8.98050s。

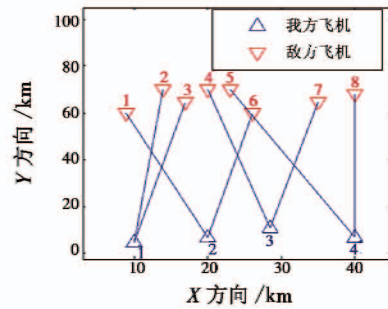


图3 遗传算法攻击任务分配结果

Fig. 3 Attacking task allocation results of genetic algorithm

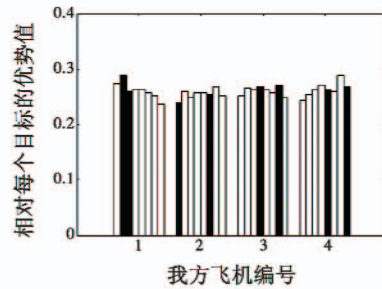


图4 遗传算法优势直方图

Fig. 4 Histogram of genetic algorithm superiority

种群进化曲线如图5所示,可以看出最大优势值很快收敛,得到一个相对合理的分配方案,平均优势值不断增加,说明整个种群的质量不断提高。

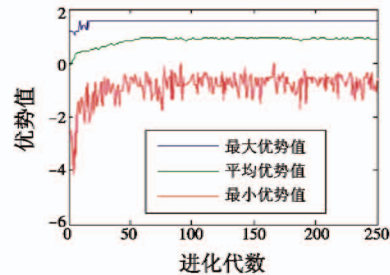


图5 种群进化曲线

Fig. 5 Evolution curves

采用拍卖算法进行分配,分配结果如表4所示。攻击态势图和优势直方图分别如图6、图7所示。按照此种分配方案整体优势值为1.8217,仿真用时为0.059928s。但敌方1,2号重点目标分配给了我方对其优势值最大的1号战斗机,实现了对敌方重点目标的打击。

表4 拍卖算法任务分配矩阵

Table 4 Task assignment matrix of auction algorithm

我方飞机 编号	敌方飞机编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	1
3	0	0	0	0	1	1	0	0
4	0	0	1	1	0	0	0	0

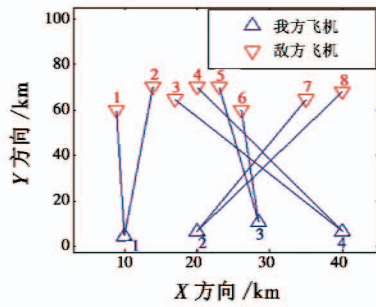


图6 拍卖算法攻击任务分配结果

Fig. 6 Attacking task allocation results of auction algorithm

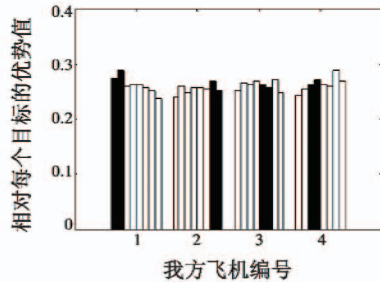


图7 拍卖算法优势直方图

Fig. 7 Histogram of auction algorithm superiority

通过比较两种仿真结果可以发现,从全局最优方面进行考虑,采用遗传算法进行分配得到的分配结果整体优势大于拍卖算法,但针对敌方重点目标时,从局部进行考虑拍卖算法具有更好的效果,而且从仿真时间上来看拍卖算法效率更高。

4 结束语

本文根据敌我之间的相互态势,建立了我方的优势模型、敌方的威胁模型以及效能优势函数。并根据不同作战飞机选取相应的优势模型建立目标分配模型,根据任务的需要选用合适的优化算法进行任务分配。最后通过仿真得出遗传算法和拍卖算法在进行任务分配时的优劣,得出其适用范围,为以后的应用提供参考。

参考文献

[1] 蓝伟华. 多目标攻击的基本概念及关键技术[J]. 电光与控制, 2000, 7(4): 19-22. (LAN W H. The primary concept and key technology of air-to-air multi-target attack [J]. Electronics Optics & Control, 2000, 7(4): 19-22.)

[2] 蓝伟华, 赵春玲. 空对空多机协同攻击多个目标的战术决策研究[J]. 火力与指挥控制, 1999, 24(1): 30-33. (LAN W H, ZHAO C L. Attacking strategy study on multi-fighters attacking cooperatively on multi-target in air-to-air combat [J]. Fire Control & Command Control, 1999, 24(1): 30-33.)

[3] GODBOLE D N. Control and coordination in uninhabited combat air vehicles [C]//Proceedings of the American

Control Conference, San Diego, California, 1999: 1487-1490.

[4] CHANDLER P R, RASMUSSEN S R. Multiple task assignment for a UAV team [C]//AIAA-2002-4587: 758-765.

[5] SHAFERMAN V, SHIMA T. Cooperative multiple model adaptive guidance for an aircraft defending missile [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(6): 1801-1813.

[6] RATNOO A, SHIMA T. Formation-flying guidance for cooperative radar deception [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(6): 1730-1739.

[7] STORMS P P A, GRANT T J. Agent coordination mechanisms for multi-national network enabled capabilities [C]//Proceedings of the 11th ICCRTS on Coalition Command and Control in the Networked Era. Cambridge, UK: CCRP, 2006: 1-20.

[8] 余亮, 邢昌凤, 王航宇, 等. 编队协同防空作战中制导交接问题分析与建模 [J]. 舰船电子工程, 2008, 28(4): 47-49. (YU L, XING C F, WANG H Y, et al. Analysis and modeling for guidance handover in cooperative air defense of ship formation [J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(4): 47-49.)

[9] 肖冰松, 方洋旺, 胡诗国, 等. 多机空战协同制导决策方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 610-612. (XIAO B S, FANG Y W, HU S G, et al. Decision methods for cooperative guidance in multi-aircraft air warfare [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(3): 610-612.)

[10] 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): 2570-2573. (GAO Y, XIANG J W. New threat assessment non-parameter model in beyond-visual-range air combat [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(9): 2570-2573.)

[11] 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): 2163-2166. (XIAO B S, FANG Y W, HU S G, et al. New threat assessment method in beyond-the-horizon range air combat [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2163-2166.)

[12] 朱宝珊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估 [M]. 2版. 北京: 航空工业出版社, 2006. (ZHU B L, ZHU R C, XIONG X F. Fighter plane effectiveness assessment [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006.)

[13] 高文正, 丁全心. 多机协同攻击中的目标分配研究 [J]. 电光与控制, 2003, 10(4): 10-14. (GAO W Z, DING Q X. Target allocation in multi-fighter cooperative attacking [J]. Electronics Optics & Control, 2003, 10(4): 10-14.)

- 信号生成[J]. 现代电子技术, 2014, 37(21): 45-48. (ZHANG J, HE Q, HAN Z Z. Generation of signal transmitted by a radar based on SystemVue[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(21): 45-48.)
- [2] 郭冠斌, 方青. 雷达组网技术的现状与发展[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(4): 193-197. (GUO G B, FANG Q. Current status and development of radar netting technique[J]. Radar Science and Technology, 2005, 3(4): 193-197.)
- [3] 吕艳梅, 王洪锋, 孙江生. 一种多传感器数据融合仿真平台设计[J]. 电光与控制, 2004, 11(1): 22-24. (LYU Y M, WANG H F, SUN J S. The design of multisensor data fusion simulation platform[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(1): 22-24.)
- [4] 齐崇英, 王艺, 韩颖. 数据融合仿真系统通用架构及关键技术研究[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(2): 705-710. (QI C Y, WANG Y, HAN Y. Research on common framework and key technology of data fusion simulation system[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(2): 705-710.)
- [5] LIU H X, PAN Q, LIANG Y. Comments on "A multipath data association tracker for over-the-horizon radar" [J]. IEEE Transactions on AES, 2005, 41(3): 1147-1150.
- [6] THOMAS H, CHRISTOPH L, REKINHARD G. Multi-sensor data fusion in automotive applications[C]//The 3rd International Conference on Sensing Technology, 2008: 206-211.
- [7] 程文清. 基于 SystemVue 的无线通信原理仿真实验教学研究[J]. 中国现代教育装备, 2012(13): 50-54. (CHENG W Q. A study on simulation teaching of wireless communication theory based on SystemVue [J]. China Modern Education Equipment, 2012(13): 50-54.)
- [8] 何友, 王国宏, 关欣, 等. 信息融合理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. (HE Y, WANG G H, GUAN X, et al. Information fusion theory with applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.)
- [9] 王建斌, 陈瑞源. 防空 C³I 多传感器数据融合仿真系统设计[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(5): 65-69. (WANG J B, CHEN R Y. Design for air defense C³I multisensor data fusion simulation system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(5): 65-69.)
- [10] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2012. (HE Y, XIU J J, ZHANG J W, et al. Radar data processing with applications[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.)
- [11] 林森, 高明明. SystemVue 环境下 M-Link 的应用[J]. 中国科技信息, 2008(23): 91-93. (LIN S, GAO M M. SystemVue environment under the application of M-Link [J]. China Science and Technology Information, 2008(23): 91-93.)
- [12] 罗浩. 组网火控雷达融合控制中心仿真系统的研究与设计[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2014. (LUO H. Study on data fusion and control center simulation system of fire control radar network[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2014.)
- [13] 熊久良, 徐宏, 韩壮志, 等. 一种基于跟踪精度控制的组网火控雷达抗 ARM 方法[J]. 电讯技术, 2011, 51(4): 21-25. (XIONG J L, XU H, HAN Z Z, et al. A method for fire-control radar network against ARM based on tracking accuracy control[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(4): 21-25.)
- [14] SHIMA T, RASMUSSEN S J, SPARKS A G, et al. Multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(11): 3252-3269.
- [15] 柳鹏, 高杰, 刘扬. 基于拍卖算法的目标分配问题优化[J]. 兵工自动化, 2008, 27(9): 22-24. (LIU P, GAO J, LIU Y. Target distribution optimization based on auction algorithm[J]. Ordnance Industry Automation, 2008, 27(9): 22-24.)
- [16] 费爱国, 张陆游, 丁前军. 基于拍卖算法的多机协同火力分配[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1829-1833. (FEI A G, ZHANG L Y, DING Q J. Multi-aircraft cooperative fire assignment based on auction algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(9): 1829-1833.)

(上接第 15 页)