

文章编号:1674-8190(2018)03-326-08

基于改进灰狼优化算法的电子干扰机空域划设

王晴昊,姚登凯,赵顾颖

(空军工程大学 空管领航学院,西安 710051)

摘要: 在现代化战争中,遂行突防任务的战斗机通常需要与电子干扰机协同配合,来完成特定的任务。为了更高效地利用空域资源,针对突防作战中干扰机的最优空域划设问题,在给出电子干扰下雷达探测范围、航线安全间隔以及有效干扰时间的基础上,建立电子干扰机的最优空域划设模型;在原始灰狼算法中将线性调节参数改为非线性调节参数,同时引入粒子群算法中的记忆功能,改进原始灰狼算法;并采用改进的灰狼优化算法寻找最优的空域基准点,进而确定电子干扰机的最优空域范围。结果表明:对于特定的突防任务,改进的灰狼优化算法比原始灰狼优化算法和粒子群算法更具优越性,能够快速、高效地找到最优的空域基准点;本文所建立的电子干扰机的最优空域划设模型是科学、有效的。

关键词: 电子干扰;空域划设;安全间隔;改进灰狼优化

中图分类号: V271.4⁺91; V355.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.03.004

Improved Grey Wolf Optimization for Electronic Jamming Airspace Layout

Wang Qinghao, Yao Dengkai, Zhao Guhao

(College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aiming at optimal airspace layout of electronic jamming during air fighter's penetration operation, the range of radar detection under electronic jamming, route safety interval, and effective jamming time under electronic interference are described. In order to achieve the safety penetration of the penetration fighters, to ensure the safety of the jammer itself, and to achieve the purpose of efficient use of airspace resources, the optimal airspace layout model of the electronic jamming machine is established, and improved grey wolf optimization(IG-WO) is used to find the optimal airspace reference point. To improve the optimization of the algorithm, the linear adjustment parameter in original grey wolf optimization is changed to a non-linear one, and the memory function swarm optimization is added. The simulation results show that improved grey wolf optimization(IG-WO) is superior to the original grey wolf optimization algorithm and particle swarm optimization, can quickly find the optimal airspace reference point to complete a specific penetration task. It is proved that the model is scientific and effective.

Key words: electronic jamming; airspace layout; route safety interval; improved grey wolf optimization

0 引言

在现代化战争中,敌方的雷达组网已成为遏制我方战机突防的杀手锏。雷达网具有多体制、高精

度和全方位的探测特性,使得隐身性能和机动性能优良的战斗机也难以实现安全突防。在新型作战行动中,为了实现特定作战目的,遂行突防任务的战机通常需要与电子干扰飞机协同配合,即电子干扰机在敌方火力打击之外施放干扰信号,为突防战斗机形成安全区域,避开敌方雷达探测^[1],因此如何合理、高效地划设电子干扰机的空域成为指挥员亟需解决的问题之一。在远距离支援干扰方面,现有的研究主要关注于干扰资源分配的问题^[2-4],对于

收稿日期:2017-12-05; 修回日期:2018-02-28

基金项目:国家空管委科研课题(GKG201410005)

通信作者:王晴昊, wangqinghao2017@sina.com

如何划设电子干扰机空域的相关研究比较少。余立志等^[5]对掩护固定目标时雷达干扰机的配置问题进行了研究;祁伟等^[6]提出了支援干扰飞机阵位选择及航线规划的基本原则;黄颖^[7]从距离、方位和高度 3 个方面对干扰机阵位选择对雷达最大探测距离的影响进行了研究;罗金涛等^[8]提出了电子干扰飞机空域配置的基本要求,但并未结合具体任务进行空域划设;文献[9-12]对协同作战中电子干扰机的布阵问题进行了深入研究,但认为干扰机协同作战的位置固定,没有结合干扰机飞行实际对其进行空域划设。

基于上述研究现状,本文着重研究协同突防过程中干扰机空域的划设问题。以高效、灵活使用空域为目标,介绍协同突防中的相关概念;为掩护战机安全突防,以战机距离雷达威胁中心和突防航线安全间隔为目标函数,建立干扰机空域划设模型,采用改进灰狼优化算法寻找最佳空域基准点。针对灰狼算法容易陷入局部最优的问题,将线性调节参数变为非线性调节参数,并引入粒子群算法中的记忆功能,平衡因采用非线性调节参数而导致的迭代次数变大的问题;之后根据有效干扰时间、干扰机的相关参数以及空域的基准点确定空域的大小;最后,为验证所建模型的有效性和改进灰狼优化算法的优越性,采用实例进行仿真验证。

1 相关概念

1.1 电子干扰下的雷达探测范围

距离支援干扰(SOJ)是指派专用电子干扰飞机提前到达预定空域作跑道形飞行,如果干扰天线在飞机两侧则作横向跑道形飞行,干扰天线在前后则作纵向跑道形飞行,本文选取干扰机作纵向跑道形飞行。在预警机的协同指挥下,积极施放干扰信号,对敌方威胁雷达形成一定的干扰压制区,实现战机的安全突防,因此,要研究干扰机空域划设问题,首先要确定电子干扰下的雷达探测范围。

不考虑目标起伏,忽略多路径影响,假设发射信号与接收信号共天线,单部干扰机压制后的雷达探测范围为^[13]

$$R_i = \left(\frac{K_j P_i G_i \sigma R_j^2 G_i}{4\pi P_j G_j \gamma_j G(\theta)} \right)^{1/4} \quad (1)$$

式中: K_j 为压制系数; P_i 为雷达发射信号功率; G_i 为雷达发射天线功率增益; σ 为雷达目标截面积; R_j 为雷达到干扰机的距离; P_j 为干扰机功率; G_j 为干扰机天线增益; γ_j 为天线的极化损失; $G(\theta)$ 为偏离主瓣最大方向 θ° 的雷达天线增益。

根据经验公式, $G(\theta)$ 为

$$\frac{G(\theta)}{G_i} = \begin{cases} 1 & (0 \leq |\theta| \leq \theta_{0.5}/2) \\ k \left(\frac{\theta_{0.5}}{\theta} \right)^2 & (\theta_{0.5}/2 < |\theta| \leq \pi/2) \\ k \left(\frac{\theta_{0.5}}{\pi/2} \right)^2 & (\pi/2 < |\theta| \leq \pi) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\theta_{0.5}$ 为主瓣宽度; k 为常数,一般为 0.04 ~ 0.10。

由于功率具有可叠加性,多部干扰机压制后的雷达探测范围为

$$R_i = \left(\frac{K_j P_i G_i \sigma}{4\pi \sum_{j=1}^n \frac{P_j G_j \gamma_j}{R_j^2} \frac{G_i(\theta)}{G_i}} \right)^{1/4} \quad (3)$$

现实中雷达的数量总是大于干扰机的数量,故本文选取“一对一”的干扰模式。

1.2 航线安全间隔

在实际飞行过程中,由于受突防战机航迹定位的偏差、飞行员技术误差和风速等影响,飞机通常会偏离基准的突防航迹,需要考虑干扰后雷达的探测范围与突防航线之间的最短距离,即航线的安全间隔,如图 1 所示。航线安全间隔是关系到战斗机能否安全突防的关键,经电子干扰机干扰形成的航线安全间隔不得小于突防战斗机所需的最小航线安全间隔。

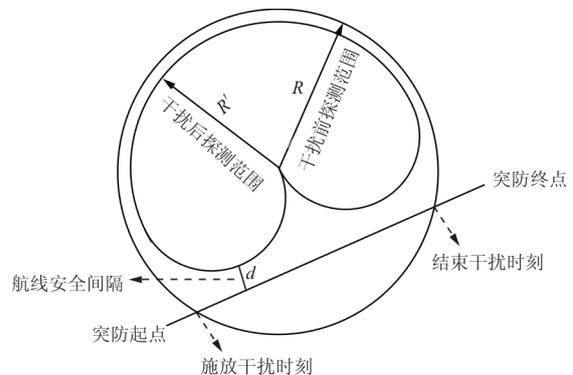


图 1 相关概念示意图

Fig. 1 Sketch figure of related concepts

1.3 有效干扰时间

干扰机担负着掩护、支援战斗机的任务,过早施放干扰有可能暴露我方突防的企图,使得敌方早有准备,而过晚结束干扰则会对干扰机自身的安全构成威胁,即过早施放干扰或者过晚结束干扰,均不能保证任务的顺利完成。因此,干扰机施放干扰和结束干扰的时机,即有效的干扰时间十分关键。同时,由于干扰机的天线安装在飞机的前后,其实际干扰时间为跑道型空域的直线部分,在转弯处对雷达没有干扰作用,故有效干扰时间也是划设空域大小的重要依据。

2 问题描述与建模

2.1 问题描述

在现代化战争中,电子空间已成为敌我双方争夺的第五空间。为了有效增强“四抗”能力,敌方多采用雷达组网技术对我方目标区域实施全区域探测。为了实现成功突防,突防战机通常与一定数量的干扰机协同配合。派出多部干扰机时,如果只依靠指挥员的经验对其进行空域划设很难使干扰机发挥预定的干扰效果,同时由于划设不精细造成空域资源的浪费,可能会阻碍其他战斗任务的完成。

在敌我双方态势下,考虑干扰机和攻击机的协同时机,根据敌方雷达分布情况和干扰机性能,在我方预警机的指挥控制区域内寻找空域的基准点并结合干扰机的相关参数合理划设空域,其目的是以时间协同为依据,综合考虑干扰机的性能和安全性,为特定的突防航线形成航线安全间隔,使战机能够按照预定突防航线安全穿越威胁地带。

2.2 模型建立

基于2.1节中的问题描述,考虑敌雷达网分布(如图2所示),突防战机要想按预定航线进行突防,被探测到和击毁的概率是很大的。为此,要在我方预警机的指挥控制范围之内,合理布设干扰机并为其划设飞行空域,在保证干扰机的位置始终处于各部雷达探测范围之外的前提下,使突防战斗机相对于每部威胁雷达的航线安全间隔大于所需的最小航线安全间隔,并且航线间隔越大表示我方战

斗机成功突防的几率越大。空域划设的关键在于空域基准点的选择,本文选取干扰机施放干扰时刻所处的位置作为空域基准点,只要干扰机在该处能够满足上述要求,则在有效干扰时间内的任何位置都能满足要求。

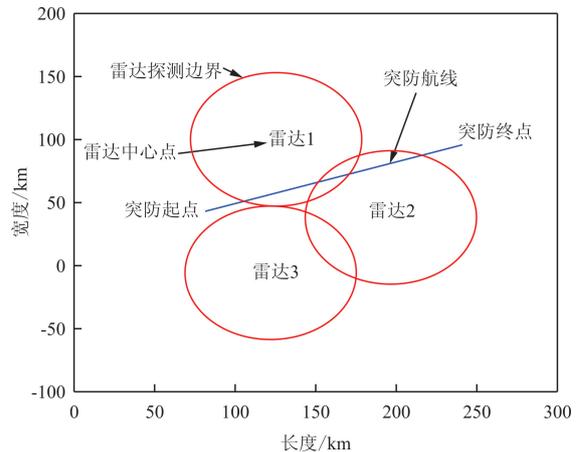


图2 雷达分布图

Fig. 2 Radar distribution

根据上述理论,干扰机空域基准点模型建立如下:

$$\max F = \lambda_1 \sum_{i=1}^n d_i + \lambda_2 \left(\sum_{j=1}^m \sqrt{(x_{j0} - x_0)^2 + (y_{j0} - y_0)^2} \right) \quad (4)$$

模型应满足的约束条件有:

(1) 干扰机自身安全约束:即干扰机所在的空域必须在各个雷达的探测范围之外。

$$(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 > R_i^2 \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

(2) 指挥控制区域约束:即干扰机的空域必须在我方预警机指挥控制区域之内。

$$\begin{cases} x_j \in [x_{\min}, x_{\max}] \\ y_j \in [y_{\min}, y_{\max}] \end{cases} \quad (6)$$

(3) 突防战机安全约束:即干扰后形成的航线安全间隔必须满足我方战机所需的最小航线安全间隔。

$$d_i \geq d_{\min} \quad (7)$$

式中: d_i 为压制干扰后突防航线与第*i*个威胁雷达航线安全间隔; λ_1 为航线安全间隔的权重, λ_2 为干扰机与雷达组网中心点的权重,并且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$;

x_{j0}, y_{j0} 为第 j 个干扰机空域基准点的横纵坐标;
 x_j, y_j 为第 j 个干扰机空域横纵坐标; x_i, y_i 为第 i
 个雷达的中心横纵坐标; $[x_{\min}, x_{\max}], [y_{\min}, y_{\max}]$
 为我方预警机的指挥控制范围; x_0, y_0 为雷达网中
 心的横纵坐标, $x_0 = \sum_{i=1}^n x_i, y_0 = \sum_{i=1}^n y_i$ 。

在确定了空域基准点的位置之后,可按以下三
 个公式计算干扰机空域的实际大小。

$$R = \frac{v^2}{(g \times \tan \gamma)} \quad (8)$$

$$L = vgt + 2R \quad (9)$$

$$D = 2R \quad (10)$$

式中: R 为转弯半径; v 为干扰机的速度; g 为重力
 加速度; γ 为转弯坡度; L 为空域长度; t 为有效干
 扰时间; D 为空域宽度。

3 改进灰狼优化算法

灰狼优化算法(Grey Wolf Optimization,简称
 GWO)是 Seyedali Mirjalili 等^[14]于 2014 年提出并
 应用的。该算法模拟了灰狼的领导层次和狩猎机
 制,具有原理简单、运算速度快、稳定性好、调整参
 数少、收敛性好、复杂度低等优点,已被广泛应用于
 各个领域^[15-17],但是容易陷入局部最优^[18]。因此,
 本文通过采用非线性调节参数改善其全局搜索性
 能,同时引入记忆功能来平衡因采用非线性调节参
 数而导致的寻优速度变慢的情况。

3.1 基本 GWO 算法

在灰狼优化算法中,以解决问题的优劣程度来
 模拟划分灰狼的社会等级,最佳方案视为 α 狼,第
 二和第三最佳解决方案分别命名为 β 狼和 δ 狼,其
 他的候选解决方案均被假定为 ω 狼。在 α 狼的带
 领下,搜寻猎物并逐渐接近,待确定猎物具体位置
 后,形成包围圈并逐渐缩小范围,最后实施攻击。

在狩猎过程中,狼群按照下列公式更新位置:

$$\mathbf{X}_i(t+1) = \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{A} \cdot |\mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{X}_i(t)| \quad (11)$$

$$\mathbf{A} = 2\mathbf{a} \cdot \mathbf{r}_1 - \mathbf{a} \quad (12)$$

$$\mathbf{C} = 2\mathbf{r}_2 \quad (13)$$

$$\mathbf{a} = 2 - t/t_{\max} \quad (14)$$

式中: t 为当前迭代次数; \mathbf{A}, \mathbf{C} 为协同系数向量; \mathbf{X}_p

为猎物的位置向量; \mathbf{X}_i 为灰狼的位置矢量; \mathbf{a} 为调
 节参数; \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 为随机的 $[0,1]$ 中的向量。

在算法运行的过程中,由于猎物的位置不可知
 (即最优解),根据灰狼的社会等级,认为灰狼 $\alpha, \beta,$
 δ 更接近猎物位置,灰狼群体可依据 α, β, δ 的位置
 进行更新:

$$\mathbf{X}_1(t+1) = \mathbf{X}_\alpha(t) - \mathbf{A}_\alpha \cdot |\mathbf{C}_\alpha \cdot \mathbf{X}_\alpha(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (15)$$

$$\mathbf{X}_2(t+1) = \mathbf{X}_\beta(t) - \mathbf{A}_\beta \cdot |\mathbf{C}_\beta \cdot \mathbf{X}_\beta(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (16)$$

$$\mathbf{X}_3(t+1) = \mathbf{X}_\delta(t) - \mathbf{A}_\delta \cdot |\mathbf{C}_\delta \cdot \mathbf{X}_\delta(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (17)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \frac{\mathbf{X}_1(t+1) + \mathbf{X}_2(t+1) + \mathbf{X}_3(t+1)}{3} \quad (18)$$

3.2 改进策略

调节参数 \mathbf{a} 对于整个算法的运行至关重要。
 当 \mathbf{a} 较大时,算法搜索步长大,全局搜索能力强;当
 \mathbf{a} 较小时,算法收敛性好。由于 \mathbf{a} 在迭代过程中从
 2 线性减少到 0,这种控制方式在算法运行迭代的
 后期会使 \mathbf{a} 非常小,从而导致算法可能会陷入局部
 最优,故需要引进非线性调节参数。

$$\mathbf{a} = 2(1 - t/t_{\max})^2 \quad (19)$$

同时考虑到引进非线性调节参数会降低寻优
 速度,采用粒子群算法中的记忆功能,增强寻优速
 度,则:

$$\mathbf{X}(t+1) = \frac{\mathbf{X}_1(t+1) + \mathbf{X}_2(t+1) + \mathbf{X}_3(t+1)}{3} + \quad (20)$$

$$c_1 \cdot \mathbf{r}_3 \cdot [\mathbf{X}_{\text{best}}(t) - \mathbf{X}(t)]$$

式中: \mathbf{r}_3 为 $[0,1]$ 中的随机数; c_1 为调节系数; \mathbf{X}_{best}
 (t) 为灰狼历史上经过的最佳位置点。

3.3 改进 GWO 算法步骤

根据本文所寻找的空域基准点,改进 GWO 算
 法的步骤如下:

Step1 确定初始空域基准点个数、最大迭代
 次数、维数、上界和下界、调节参数,并进行参数初
 始化,令 $t=1$;

Step2 随机选取初始空域基准点,计算每个
 空域基准点的航线安全间隔;

Step3 判别种群是否满足 2.2 节中的三个约

束,如果不满足则令其适应度为负无穷,返回 step2;如果满足则根据式(4),计算出每个种群的适应度值,记录适应度排列前三的最优适应度值及其对应的空域基准点,即 (α, β, δ) ;

Step4 令 $t=t+1$;

Step5 按照式(19)、式(12)~式(13)更新 \mathbf{a} 、 \mathbf{A} 、 \mathbf{C} ;

Step6 按照式(15)~(17),更新 α, β, δ 的位置;

Step7 按照式(20)更新空域基准点的位置;

Step8 判断是否达到最大迭代次数,若是,则算法结束,输出最优结果,否则返回 Step4。

改进 GWO 算法的具体流程如图 3 所示。

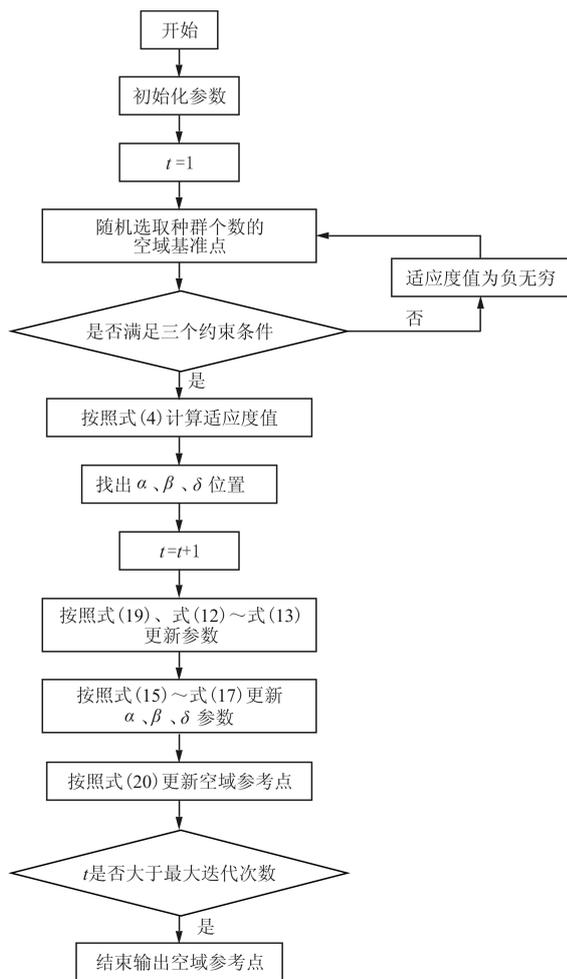


图 3 改进 GWO 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of improved GWO

4 仿真实例分析

假设威胁 1、2、3 的坐标分别为(120, 120)、

(200, 50)、(115, 0);雷达的威胁参数和干扰机的参数均取自文献[19]: $P_i=4\ 500\ \text{kW}$, $G_i=40\ \text{dB}$, $\theta_{0.5}=4^\circ$, $P_j=200\ \text{kW}$, $G_j=20\ \text{dB}$, $r_j=0.5$, $K_j=0.5$, $V=500\ \text{km/h}$, $\gamma=20^\circ$;突防战机的飞行速度为 900 km/h。为了减少计算量,认为敌方各部雷达参数一致且与我方使用干扰机的型号相同。

初始态势分析:雷达未受干扰的探测范围如图 4 所示,突防战机预设的航线、威胁雷达的位置及探测范围、预警机指挥控制区域(范围为 $250\ \text{km} \times 250\ \text{km}$)也均在图 4 中标明。如果不采取干扰措施,突防战机被探测并被击毁的概率非常大。

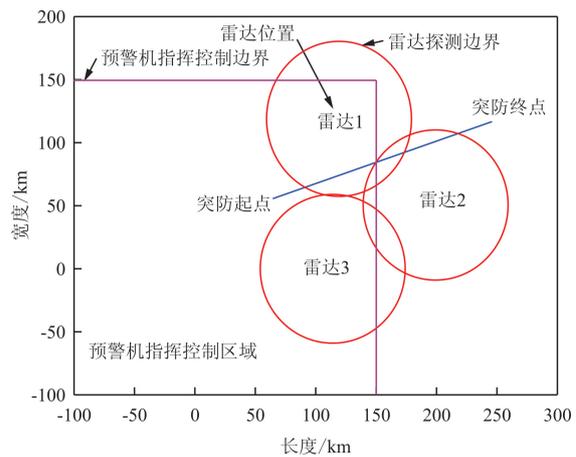


图 4 初始态势图

Fig. 4 Initial situation

根据上述理论以及战场态势,为了获取至少 10 km 的突防航线安全宽度,我方采用两架干扰机对其进行“一对一”干扰。利用改进 GWO 算法寻找最优的空域基准点。

仿真 1 改进 GWO 算法的初始参数设置如下:Dim=4,初始种群个数 SearchAgents_no=50,最大迭代次数 Max_iter=100, $\lambda_1=0.9$, $\lambda_2=0.1$,上下界分别为 -100 和 150。与基本 GWO 算法和粒子群算法(PSO)(即基本 GWO 所需设定的基本参数与改进 GWO 算法相同,PSO 的参数为 $V_{\max}=6$, $\text{Max_iter}=100$, $\text{SearchAgents_no}=50$, $W_{\min}=0.2$, $W_{\max}=0.9$, $c_1=2$, $c_2=2$)^[14]进行对比。仿真采用 Matlab 语言进行编程,运行 60 次,统计历次的寻优数据,得到迭代与适应度之间的关系,如图 5 所示,三个测试函数的平均值、标准差,如表 1 所示,并记录最好的寻优数据,得到的结果如图 6 和表 2 所示。

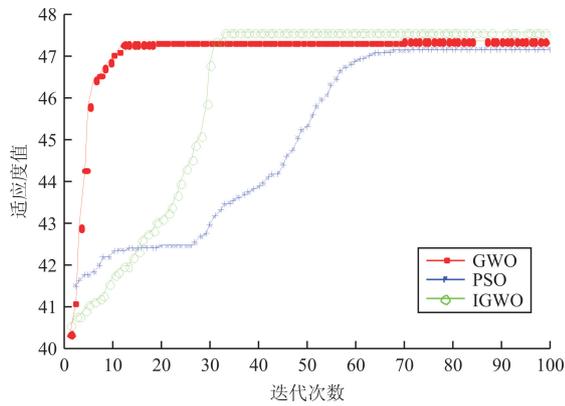


图 5 IGWO 和 GWO、PSO 对比图

Fig. 5 Comparison chart of IGWO, GWO and PSO

表 1 三种算法所得适应度的平均值和标准差表

Table 1 Average value and standard deviation of fitness value of three algorithm

算 法	平均值	标准差
GWO	47.31	1.67×10^{-22}
PSO	47.17	2.34×10^{-18}
IGWO	47.55	3.42×10^{-25}

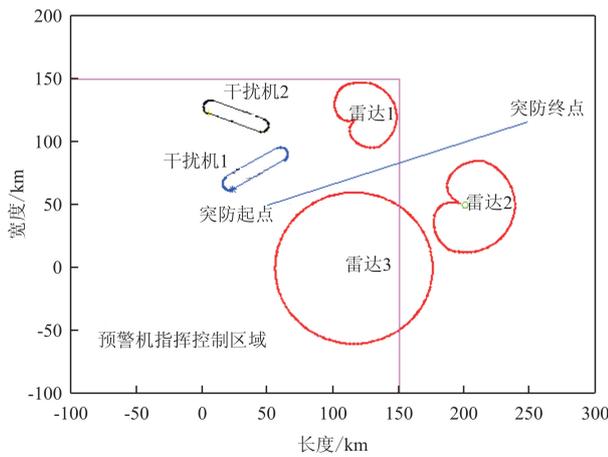


图 6 仿真 1 干扰后态势图

Fig. 6 Situation after jamming of simulation 1

表 2 仿真 1 所得数据

Table 2 Data of simulation 1

干扰机编号	对应威胁雷达	基准点	空域长度/km	空域宽度/km	d_1/km	d_2/km	d_3/km
1	雷达 1 (23.28,62.53)	(-34.03,0)	56	11	17.38	16.05	11.15
2	雷达 2 (3.98,122.50)	(-60.32,115.47)	52	11	17.38	16.05	11.15

从图 5 可以看出:改进灰狼优化算法(IGWO)比原始灰狼优化算法(GWO)的寻优效果好,能够

找到更佳的空域参考点,收敛速度也较快;IGWO 无论在寻优效果和收敛速度上均优于粒子群算法(PSO)。

从表 1 可以看出:在进行的 60 次重复寻优中,IGWO 算法寻优所得适应度值的平均值大于 GWO 和 PSO 的平均值,表明 IGWO 算法在寻找最佳空域点的能力强,效果好;IGWO 算法 60 次寻优所得适应度值的标准差均小于 GWO 和 PSO 的标准差,即其一直在最优的空域基准点附近寻找,表明 IGWO 算法具有更高的稳定性。

从图 6 可以看出:为了达成特定作战目的,使突防战斗机能够按预定航线飞行,我方干扰机应当按照表 2 给定的基准点和空域参数飞行。根据给定的方案,可以保证突防战斗机与各部雷达的航线安全间隔均满足所需最小的航线安全间隔,并且所划设的空域大小比以往电子战空域(100~150) km×(80~100) km 的范围要小得多。在保证干扰效果的同时,极大地缩小了空域范围,达到了高效、灵活使用空域资源的目的。

仿真 2 $\lambda_1 = 0.2, \lambda_2 = 0.8$,其余参数不变,仿真采用 Matlab 语言进行编程,所得结果如图 7 和表 3 所示。

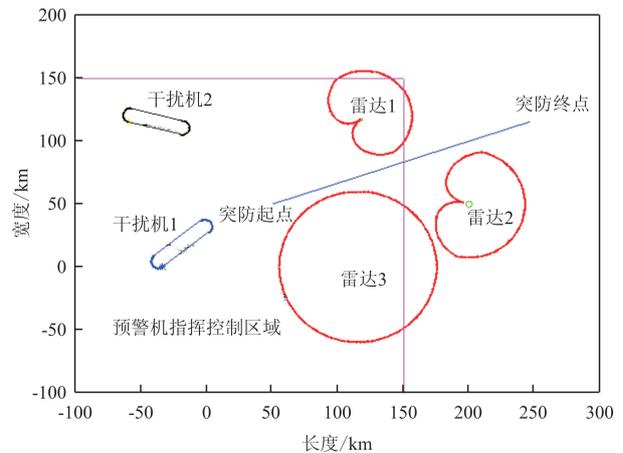


图 7 仿真 2 干扰后态势图

Fig. 7 Situation after jamming of simulation 2

表 3 仿真 2 所得数据

Table 3 Data of simulation 2

干扰机编号	对应威胁雷达	基准点	空域长度/km	空域宽度/km	d_1/km	d_2/km	d_3/km
1	雷达 1 (-34.03,0)	(-34.03,0)	56	11	10.08	10.38	11.15
2	雷达 2 (-60.32,115.47)	(-60.32,115.47)	52	11	10.08	10.38	11.15

从图7可以看出:与图6相比,干扰机离雷达组网中心的距离更大,但安全间隔较小,这正是决策者侧重于考虑干扰机安全的体现。

按照表3中的数据对干扰机进行空域划设,能够在保证满足突防战斗机所需最小安全间隔的前提下,更充分地考虑干扰机的安全。

5 结 论

(1) 本文立足作战实际,充分考虑决策者的侧重点,建立最优空域模型,采用改进的灰狼优化算法,分析并解决了电子干扰机的空域划设问题。在保证干扰的前提下,能够达到高效使用空域资源,提升突防战斗机与电子干扰机之间的协同配合,对于成功完成突防任务具有十分重要的意义。

(2) 使用改进的灰狼优化算法,对最优空域基准点进行求解,可以快速得到决策者所需的最优空域,保证了所划设的空域是科学有效的。

参考文献

- [1] 华锋. 空中进攻作战中电子对抗航空兵作战运用[M]. 北京: 蓝天出版社, 2014.
Hua Feng. Operational application of electronic confrontation aviation in air attack operations[M]. Beijing: Lantian Press, 2014. (in Chinese)
- [2] Deligiannis A, Rossetti G, Panoui A, et al. Power allocation game between a radar network and multiple jammers [C]. Radar Conference, Guangzhou, China, 2016: 1-5.
- [3] Park K H, Wang T, Alouini M S. On the jamming power allocation for secure amplify-and-forward relaying via cooperation jamming[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 1741-1750.
- [4] Zhai X F, Zhang Y. IIGA based algorithm for cooperative jamming resource allocation[C] // Proceedings of the Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics, 2009: 368-371.
- [5] 余立志, 张新如, 李传杰. 掩护固定目标时雷达干扰机配置问题研究[J]. 电子信息对抗技术, 2013, 28(6): 68-73.
Yu Lizhi, Zhang Xinru, Li Chuanjie. Disposition of jammer for protecting fixed targets [J]. Electronic Information Countermeasure Technology, 2013, 28(6): 68-73. (in Chinese)
- [6] 祁伟, 李侠. 空袭远距离支援干扰机阵位选择及航线规划[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(4), 12-17.
Qi Wei, Li Xia. Position selection and route planning of jamming aircraft in stand-off jamming for airstrike[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2016, 30(4), 12-17. (in Chinese)
- [7] 黄颖. 远距离支援干扰机阵位设计方法研究[J]. 船舶电子对抗, 2015, 38(2): 4-6.
Huang Ying. Research into the configuration design method of distant support jamming aircraft[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2015, 38(2): 4-6. (in Chinese)
- [8] 罗金涛, 金嘉旺, 刘晓东. 航母编队在对岸进攻中电子干扰飞机空域配置方法[J]. 船舶电子工程, 2015, 35(1): 43-46.
Luo Jintao, Jin Jiawang, Liu Xiaodong. Disposition method of electronic jamming airplane in the ground attack of the carrier formation[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(1): 43-46. (in Chinese)
- [9] 陈中起, 于雷, 周中良, 等. 突击作战中干扰机编队协同决策研究[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(2): 307-312.
Chen Zhongqi, Yu Lei, Zhou Zhongliang, et al. Cooperative decision making of jammer formation in air fighter's penetration attack[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(2): 307-312. (in Chinese)
- [10] 张欢, 杨任农, 吴军, 等. 多机协同电子战规划压制干扰布阵研究[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(3): 542-548.
Zhang Huan, Yang Rennong, Wu Jun, et al. Research on multi-aircraft cooperative suppressing jamming embattling in electronic warfare planning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(3): 542-548. (in Chinese)
- [11] 陈中起, 于雷, 鲁艺, 等. 对抗雷达网最优电子战布阵研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(1): 89-94.
Chen Zhongqi, Yu Lei, Lu Yi, et al. Research on optimized electronic warfare embattling countermining radar net[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(1): 89-94. (in Chinese)
- [12] Ou Jianjun, Zhang An, Chen Zhongqi. Cooperative path planning of jammer formation in penetration attack[J] Electronic Engineering and Information Science, 2014, 981: 735-742.
- [13] 徐飞. 飞机突防中干扰效果指标及干扰管理的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Xu Fei. Research on jamming effect indicators and disruption management in aircraft penetrating process [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] Seyedali Mirjalili, Seyed Mohammad Mirjalili, Andrew Lewis. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(7): 46-61.
- [15] Mirjalili S. How effective is the grey wolf optimizer in training multilayer perceptions[J]. Applied Intelligence, 2015, 42(4): 608-619.
- [16] Ei-Gaafary A A M, Mohamed Y S, Hemeida A M, et al. Grey wolf optimization for multi input multi output system [J]. Universal Journal of Communications and Networks, 2015, 3(1): 1-6.
- [17] 姚鹏, 王红伦. 基于改进流体扰动算法与灰狼算法与灰狼优化的无人机三维航路规划[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 701-708.

Yao Peng, Wang Honglun. Three-dimensional path planning for UAV based on improved interfered fluid dynamical system and grey wolf optimizer[J]. Control and Decision, 2016, 31(4): 701-708. (in Chinese)

[18] Muangkote N, Sunat K, Chiewchanwattan S. An improved grey wolf optimizer for training q-Gaussian radial basis functional-link nets[C]// Proceedings of the 2014 International Computer Science and Engineering Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 209-214.

[19] 贺静波, 席泽敏. 一种快速绘制干扰区域的算法[J]. 现代雷达, 2005, 27(3): 15-17.
He Jingbo, Xi Zemin. An algorithm for quickly drawing jamming range[J]. Modern Radar, 2005, 27(3): 15-17. (in

Chinese)

作者简介:

王晴昊(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:空域运行与流量管理。

姚登凯(1965—),男,硕士,教授。主要研究方向:空域运行与流量管理。

赵顾颢(1986—),男,博士,讲师。主要研究方向:空域运行与流量管理,光通信技术与量子密钥等。

(编辑:马文静)



中国第一架水陆两栖轻型运动飞机 M2“风翎号”在上海成功首飞

中国第一架水陆两栖轻型运动飞机 M2“风翎号”于 2018 年 7 月 4 日在上海临港滴水湖成功首飞。M2 飞机由上海奥科赛飞机有限公司于 2009 年开始研制,严格按照现代飞机设计流程和适航审定程序开展设计,执行标准为 ASTM F2245-14《轻型运动飞机性能与设计规范》,接受中国民航华东管理局的适航审定。经过概念设计、比例模型验证、详细设计、部件静力试验和机上地面试验等,首次以水上滑行的方式完成首飞任务,目前已进入试飞验证阶段。

M2 水陆两栖轻型运动飞机采用新型气动布局,机头水滴形全景座舱,双座并排操纵布置,驾驶舱航电系统 GARMIN G3,10 寸触摸屏显示仪;中机身布置单发 ROTAX 912 IS 电喷高级发动机和螺旋桨;机翼采用层流翼型上单翼布置,无后掠直机翼,机翼前缘防抖振失速设计、可调后缘襟翼。采用 T 型尾翼,升降舵和副翼设计配重块。机身下部设计为船底带中央浮筒和左右浮筒结构。

M2 飞机气动布局经过计算流体力学 CFD 评估和 1/4 比例验证机验证,气动性能优异,低空飞行性能良好。飞机载荷设计为垂向 4g 过载,航向 9g 过载。飞机机翼、机身、垂直尾翼、水平尾翼、浮筒、方向舵、升降舵、副翼、襟翼、配平调整片全部采用高级碳纤维复合材料结构,具有强度大、刚度大、重量轻、可靠性高、抗疲劳特性好的显著特点,并且机体结构维护和维修成本低、可达性好。

M2 水陆两栖轻型运动飞机可在水面、陆地、草地、雪地起降,可广泛应用于飞行教练、体育运动、娱乐飞行、农林植保、邮政快递、航空旅游、物探遥感、国土测绘、救护支援、影视拍摄、飞行广告、巡逻飞行、海关缉私、海事、渔业等 3 500 米以下作业用途。

M2 水陆两栖轻型运动飞机具有我国自主知识产权,目前已经申请专利 30 多项。先后获得上海国际工业博览会优秀工业设计奖、中国航空航天创新创业一等奖等多个重大奖项和荣誉。