

6-14-2018

Optimal Deployment of Distant Support Jamming Formation Based on Directional Crossover Genetic Algorithm

Jinliang Luo

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Jiacai Jin

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Wang Lei

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Ding Feng

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimal Deployment of Distant Support Jamming Formation Based on Directional Crossover Genetic Algorithm

Abstract

Abstract: Optimal deployment of distant support jamming formation is studied for improving penetration capability of air assault group in air offensive operation. *The total detection threats of penetration route are chosen as the performance indicator, and the optimal deployment mode of distant support jamming formation is built. The closed region detection method is used to compute fitness value.* The difficult problem of computing detection coverage of radar net under jamming condition is solved by using traditional geometry analytic method. *A selective directional crossover genetic algorithm is designed to compute the optimal deployment mode.* The simulation results show that the algorithm has stronger global searching capability and faster convergence speed than nonlinear crossover genetic algorithm for which the computation performance is better at present.

Keywords

air offensive operation, distant support jamming, optimal deployment, selective direction crossover, real-coded genetic algorithm

Recommended Citation

Luo Jinliang, Jin Jiakai, Wang Lei, Ding Feng. Optimal Deployment of Distant Support Jamming Formation Based on Directional Crossover Genetic Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2263-2271.

基于择向交叉遗传算法远距支援干扰部署优化

罗金亮, 金家才, 王雷, 丁锋

(电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 为提高空中进攻作战突击编队的突防能力, 进行远距支援干扰部署优化研究。选择空中进攻作战突击航路被敌探测威胁总量为衡量指标, 建立了远距支援干扰部署优化模型; 运用基于图像封闭区域检测的方法进行适应度值计算, 解决了传统几何解析法准确计算干扰条件下雷达网探测覆盖范围难的问题; 设计了一种择向交叉遗传算法以进行部署优化模型解算, 仿真结果显示, 该算法在全局搜索能力及收敛速度方面均优于当前解算性能较好的非线性交叉遗传算法。

关键词: 空中进攻作战; 远距支援干扰; 部署优化; 择向交叉; 实数遗传算法

中图分类号: TN972 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 06-2263-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806033

Optimal Deployment of Distant Support Jamming Formation Based on Directional Crossover Genetic Algorithm

Luo Jinliang, Jin Jiakai, Wang Lei, Ding Feng

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Optimal deployment of distant support jamming formation is studied for improving penetration capability of air assault group in air offensive operation. The total detection threats of penetration route are chosen as the performance indicator, and the optimal deployment mode of distant support jamming formation is built. The closed region detection method is used to compute fitness value. The difficult problem of computing detection coverage of radar net under jamming condition is solved by using traditional geometry analytic method. A selective directional crossover genetic algorithm is designed to compute the optimal deployment mode. The simulation results show that the algorithm has stronger global searching capability and faster convergence speed than nonlinear crossover genetic algorithm for which the computation performance is better at present.

Keywords: air offensive operation; distant support jamming; optimal deployment; selective direction crossover; real-coded genetic algorithm

引言

远距支援干扰作为有效对抗地面防空预警探



收稿日期: 2016-08-09 修回日期: 2016-12-26;
基金项目: 国家社会科学基金(16GJ004-276), 全军军事类研究生资助课题(2015JY251), 安徽省自然科学基金(1308085QF105);

作者简介: 罗金亮(1985-), 男, 江西吉安, 博士, 讲师, 研究方向为电子对抗作战效能评估; 金家才(1965-), 男, 安徽潜山, 硕士, 博导, 教授, 研究方向为电子对抗战术。

测雷达网的重要手段^[1], 其是用于支援空中进攻作战行动的“首波”电子干扰力量, 对其进行合理部署将有助于全面提升空中进攻作战力量的突防能力及任务完成能力。目前, 国内外关于电子对抗支援干扰大都侧重于效果评估、战法运用及资源分配优化等方面^[2-8], 而对于部署优化问题, 即以空中进攻作战任务有效达成为核心, 对远距支援干扰力量任务区分、兵力编组及配置等3大难点进行综合

<http://www.china-simulation.com>

• 2263 •

优化问题的研究,可供参考的文献较少^[9-10],文献[9]针对空袭作战中地面雷达网的威胁,根据地面雷达网的地理位置和工作频段,通过从空域和频域上划分的方法计算了干扰飞机的合理位置;文献[10]提出了安全走廊的概念,以其宽度作为干扰效果的衡量指标,研究了为获得特定宽度安全走廊,对抗敌雷达网我方干扰机的最优布阵模型,并设计了一种基于数学形态学的小生境遗传算法对模型进行求解。通过对上述文献进行分析,不难发现当前在远距支援干扰部署优化研究方面存有如下难点:一是在部署优化模型建立过程中合理选定衡量指标较难。一方面所选定的衡量指标要以支援空中进攻作战任务达成为核心;另一方面所选定的衡量指标要有效体现敌防空预警雷达网的威胁特性,不能以取平均值而淡化了干扰条件下敌防空预警雷达网威胁变化的细微特征,从而影响干扰机部署优化结果。二是对所构部署优化模型进行精确、快速求解难。一方面运用传统的几何解析法难以准确地对干扰条件下敌防空预警雷达网的综合探测威胁范围进行求解;另一方面由于干扰机的部署优化模型为广域多元函数,通常包含配置位置及干扰角度(干扰对象)等多个参量,且每个参量取值范围较广,致使沿用传统的智能算法在最优解的求取上难以得到快速收敛的效果。

基于此,本文首先分析空中突击编队所面临的防空预警探测威胁特性,提出以突防航路探测威胁覆盖范围为衡量指标,建立远程支援干扰部署优化模型,同时运用基于二值图像的封闭区域检测对目标函数进行计算,并设计了一种基于择向交叉的遗传算法进行模型解算,最后通过实例进行了仿真验证。

1 远距支援干扰部署优化模型

空中进攻作战行动所要突击的目标通常位于敌纵深腹地,因此无论其采取“防区外打击”还是“临空突击”的攻击形式,其所选定的突击航路势必存有部分区域将要暴露在敌防空预警探测威胁

中,这将极大威胁空中进攻作战力量的自身安全及突击任务的顺利完成,因而亟需电子干扰编队参与支援掩护以有效压缩敌防空预警探测范围。远距支援干扰编队作为电子干扰编队的“首发阵容”,对其进行合理部署以使得空中突击编队突击航路所面临的雷达探测威胁最小化,将有效提高空中进攻作战的突防效能。

为制定最优部署方案,首先应对远距支援干扰效能进行建模以便求取干扰条件下组网雷达各成员雷达的探测范围,其次根据组网雷达综合探测范围覆盖及其雷达探测威胁模型建立目标函数以求取远距支援干扰编队最佳部署方案。

1.1 远距支援干扰效能模型

根据雷达方程及雷达干扰方程,可知 n 部远距支援干扰机干扰条件下雷达在方向 θ_r 上的最大探测距离 $R_{\max}(\theta_r)$ 为:

$$R_{\max}(\theta_r) = \sqrt[4]{\frac{P_r G_r^2 \sigma \lambda^2}{\left((4\pi)^3 F_n k T_0 B_n + \sum_{i=1}^n a_i \frac{P_{ji} G_{ji} G_r(\theta_r, \theta_{ji}) \gamma_{ji} B_r 4\pi}{R_{ji}^2 L_{ji} B_{ji}} \right)} \times K_j L} \quad (1)$$

式中: $P_r G_r$ 为雷达信号等效功率; σ 为目标雷达散射面积; λ 为雷达波长; F_n 为噪声系数; k 为波尔茨曼常数; T_0 为雷达接收机工作温度; B_n 、 B_r 分别为噪声信号及雷达接收机带宽; L 为雷达综合损耗因子; K_j 为干扰压制系数; $P_{ji} G_{ji}$ 、 γ_{ji} 、 R_{ji} 、 L_{ji} 、 B_{ji} 分别为第 i 部干扰机干扰等效功率、极化损耗、到雷达的直线距离、综合损耗因子、干扰信号带宽; $G_r(\theta_r, \theta_{ji})$ 为雷达天线在干扰机干扰方向 θ_{ji} 的增益; n 为干扰机数量; a_i 为第 i 部干扰机干扰影响判定值。模型中所有方向角度均采用正北为 0, 顺时针递增方式计算。

$$G_r(\theta_r, \theta_{ji}) = \begin{cases} G_r, & 0 \leq |\theta_r - \theta_{ji}| \leq (\theta_{r0.5} + \theta_{j0.5}) / 2 \\ K \left(\frac{\theta_{r0.5}}{|\theta_r - \theta_{ji}|} \right)^2 G_r, & (\theta_{r0.5} + \theta_{j0.5}) / 2 \leq |\theta_r - \theta_{ji}| \leq 90 \\ K \left(\frac{\theta_{r0.5}}{90} \right)^2 G_r, & 90 \leq |\theta_r - \theta_{ji}| \leq 180 \end{cases} \quad (2)$$

干扰机干扰影响判定值 a_i 主要取决于雷达是否处在第 i 部干扰机当前的干扰波束范围内。其数学模型可表示为:

$$a_i = \begin{cases} 1, & |\phi_{ri} - \theta_{ji}| \leq \theta_{j0.5} / 2 \\ 0, & |\phi_{ri} - \theta_{ji}| > \theta_{j0.5} / 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ϕ_{ri} 为雷达与第 i 部干扰机位置连线的方向角度。

1.2 远距支援干扰优化部署决策模型

如图 1 所示, 在遂行空中进攻作战行动过程中, 空中突击编队通常沿一条或多条突击航路实施突防, 在到达发射阵位后, 发射并控制对地攻击武器对目标实施打击, 而后预设航路返航。由于敌防空体系拥有“多层广域”的预警探测系统, 其将对我空中突击编队带来严峻的雷达探测威胁(图中被蓝色圆圈所覆盖的红色矩形区域便为雷达探测威胁区), 为保证空中突击编队突击任务的顺利完成, 则需要合理部署电子干扰力量, 以使空中突击编队在突防航路上所受雷达探测威胁最小。

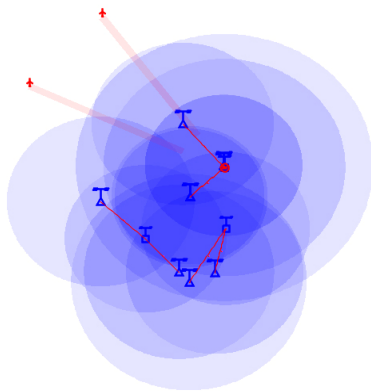


图 1 空中突击编队突击航路图
Fig. 1 Air assault formation assault route figure

空中突击编队在突防航路上所受到的雷达探测威胁 F' 为:

$$F' = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Area_i \quad (4)$$

式中: n 为突防航路数量; λ_i 为第 i 条突防航路权重; $Area_i$ 为第 i 条突防航路被敌预警雷达网探测覆

盖面积。

因此, 远距支援干扰编队优化部署决策的目标函数应为:

$$\min F' = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Area_i \quad (5)$$

即:

$$\max F = -\min F' = -\sum_{i=1}^n \lambda_i \times Area_i \quad (6)$$

由于在实际作战过程中, 远程支援干扰编队并不能进行随意部署, 其通常需要以联合作战指挥员指定部署空域为基础(如图 2 所示), 再由编队指挥员进行优化部署, 因此, 远距支援干扰编队优化部署时应遵守一定约束条件。

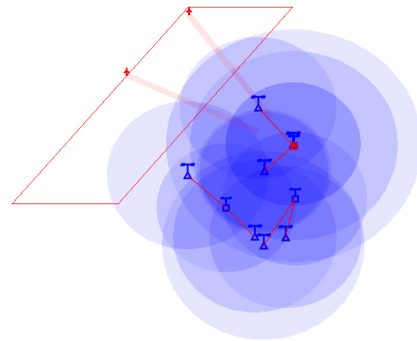


图 2 指定部署区域示意图
Fig. 2 Fixed deployment area figure

综上所述, 其优化部署决策模型应为:

$$\begin{aligned} \max F &= -\sum_{i=1}^n \lambda_i \times Area_i \\ s.t. & \begin{cases} (x_j - x_{ri})^2 + (y_j - y_{ri})^2 \geq R_s^2, i \in (1, 2, \dots, m) \\ a_1 x_j + b_1 - y_j \geq 0, a_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, b_1 = y_1 - a_1 x_1 \\ a_2 x_j + b_2 - y_j \geq 0, a_2 = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}, b_2 = y_2 - a_2 x_2 \\ a_3 x_j + b_3 - y_j \leq 0, a_3 = \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3}, b_3 = y_3 - a_3 x_3 \\ a_4 x_j + b_4 - y_j \leq 0, a_4 = \frac{y_1 - y_4}{x_1 - x_4}, b_4 = y_4 - a_4 x_4 \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

式中: (x_j, y_j) 为干扰机的部署位置; (x_{ri}, y_{ri}) 为第 i 部雷达的部署位置; (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) 为可部署区域的 4 个顶点。

2 基于择向交叉的遗传算法设计

根据上节所构建的远距支援干扰部署优化模型,可知其是一类多变量非线性复合寻优问题,根据文献[12-17]可知运用实数编码遗传算法可有效对此类问题进行优化计算,但由于传统遗传算法在交叉操作时易产生无效交叉,即交叉后所形成的个体适应度值小于原个体适应度值,因此为保证算法的快速收敛性,本文将采用择向交叉实数遗传算法对部署优化模型进行解算。下面重点基于二值图像封闭区域检测的适应度值计算及基于择向交叉的实数遗传算法进行分析。

2.1 基于图像检测的适应度值计算

适应度函数取式(7)中的目标函数,即 $fitness=F$, 具体计算过程为:

步骤 1 对干扰机部署方案进行解码,获取各干扰机的配置位置及干扰方向;

步骤 2 依据式(1)绘制干扰条件下各预警雷达探测范围图;

步骤 3 将各预警雷达探测范围图进行“或”运算,得到预警雷达网探测范围图,如图3所示。

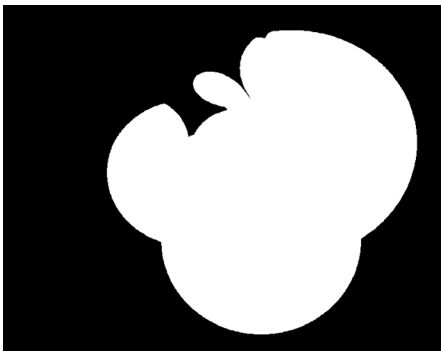


图3 预警雷达网探测范围图

Fig. 3 Early warning radar network detection range figure

步骤 4 根据空中突击编队所设定突击方向、突击方式及编队规模,绘制突击航路图;

步骤 5 将突击航路图与预警雷达网探测范围图进行“与”运算,得到突击航路被预警雷达网探测覆盖区域图,如图4所示。

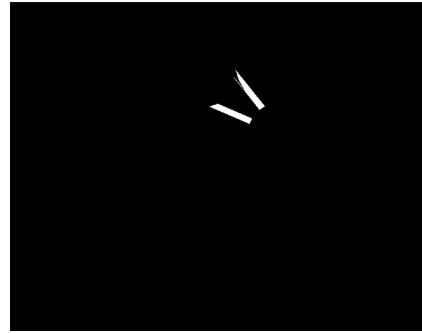


图4 突击航路探测覆盖图

Fig. 4 Assault route coverage area figure

步骤 6 对突击航路预警雷达网探测覆盖区域二值图进行“封闭区域检测”,并计算各封闭区域的面积,而后乘以航路权重并进行求和计算,得出适应度值。

2.2 基于择向交叉的实数遗传算法设计

2.2.1 编码方式

由于在进行优化部署时需要多部干扰机同时进行优化解算,且每部干扰机存在配置位置及干扰角度等多个参数,所以采取多参数级联实数编码的方式。干扰机配置位置采取屏幕坐标表示,干扰角度以正北为0、顺时针递增,以度为单位表示,具体编码方式如图5所示。

	干扰机1			干扰机2			干扰机n			
表现型	x_1	y_1	θ_1	x_2	y_2	θ_2	x_n	y_n	θ_n
基因型	230	450	145	260	550	113	245	573	132

图5 多参数级联实数编码方式

Fig. 5 Multi parameter concatenated real coded mode

2.2.2 实数编码遗传算法相关算子

(1) 选择算子

采取适应度值比例选择方法进行种群选择,即通过计算种群内各个个体的适应度值 F_i 及群体适应度总和 $F_{sum} = \sum_{i=1}^n F_i$, 可得到当前种群各个个体被选择的概率:

$$p_i = \frac{F_i}{F_{sum}} \quad (8)$$

通过按所求得各个体选择概率 p_i , 对当前种群按 p_i 进行选择, 从而得到下一代种群 $S(i+1)$ 。

(2) 交叉算子

对种群进行交叉计算的目的, 是使两个个体在交叉后, 父代种群的优秀基因能有效传递到下一代, 从而使得交叉子代可以大概率地朝着最优解的方向进化。但传统线性交叉算子的实质是在父代个体隐含的解空间中随机取值, 因而不能保证交叉操作后的子代个体优于父代个体, 从而呈现出盲目搜索的特点。为改变这一现状, 文献[16]提出了一种非线性交叉的交叉算子, 其核心思想是使得交叉操作后, 交叉子代一个落于进行交叉的两父代之间, 另一个落于靠近较好的父代的一侧。但非线性交叉算子在面对单调及单峰函数都能较好的交叉结果, 但对于多峰函数却容易出现无效交叉的情况。下面针对各类函数的有效交叉子代取值规律进行分析。

对于单调函数, 如图 6 所示。从图中不难发现对于单调函数, 无论是单调递增还是单调递减, 其交叉子代落在父代的两侧, 则有利于快速寻找最优解, 交叉子代具体的取值位置可根据 x'_{1t} 、 x'_{2t} 对应的适应度值的大小来判断, 若 $F(x'_{1t})$ 为最大值, 则交叉子代落在 x_1 的左侧将有利于快速寻找最优解; 若 $F(x'_{2t})$ 为最大值, 则交叉子代落在 x_2 的右侧将有利于快速寻找最优解。

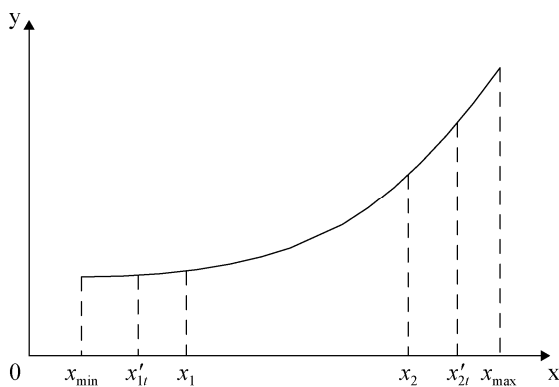


图 6 单调函数交叉特性图

Fig. 6 Cross characteristic graph of monotone function

对于单峰函数, 如图 7 所示, 分别在父代的一侧及之间取值, 分别为 x'_{1t} 、 x'_{2t} 、 x'_{12t} , 而后比较

上述 3 个值所对应的适应度值并取出最大值, 若 $F(x'_{1t})$ 为最大值, 则交叉子代落在 x_1 的左侧将有利于快速寻找最优解; 若 $F(x'_{2t})$ 为最大值, 则交叉子代落在 x_2 的右侧将有利于快速寻找最优解; 若 $F(x'_{12t})$ 为最大值, 则交叉子代落在 x_1 与 x_2 之间将有利于快速寻找最优解。

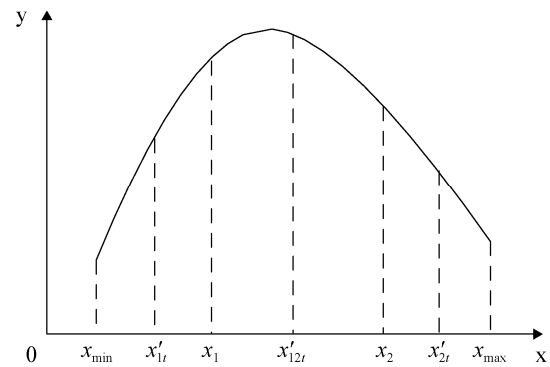


图 7 单峰函数交叉特性图

Fig. 7 Cross characteristic graph of unimodal function

对于多峰函数, 如图 8 所示, 在进化初期, 种群可依据单峰函数的交叉特性进行交叉操作, 则使得种群逐步聚集在某几个适应度值较高的“山峰”, 在进化后期, 则聚集在几个“山峰”处的种群, 此时可依据单峰函数或单调函数的交叉特性进行交叉操作, 便可快速寻找最优解。

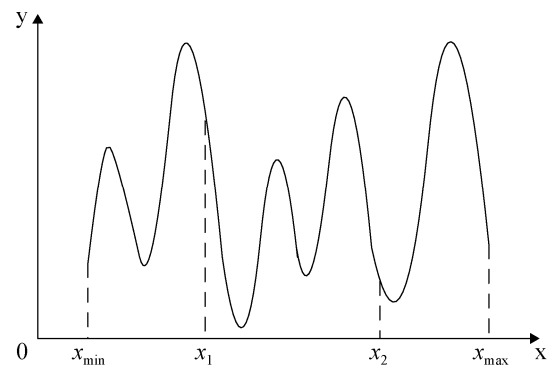


图 8 多峰函数交叉特性图

Fig. 8 Cross characteristic graph of multimodal function

通过上述分析, 不难发现通过“择向交叉”操作, 将有利于快速寻找最优解, 即在实际遂行交叉操作前, 可通过“预交叉点”的适应度值的大小选定交叉方向, 使得交叉子代向最优解快速聚集。

“择向交叉”算子的具体算法为：

步骤 1 以交叉概率 p_c 在父代种群中选择两个个体，分别为 x_1 、 x_2 ；

步骤 2 分别在 x_1 、 x_2 的两侧取值，分别记为 x'_{1t_1} 、 x'_{1t_2} 、 x'_{2t_1} 、 x'_{2t_2} ，其值分别取为：

$$\begin{cases} x'_{1t_1} = x_1 + \text{rand}(1) \times (x_{\min} - x_1) \\ x'_{1t_2} = x_1 + \text{rand}(1) \times (x_2 - x_1) \\ x'_{2t_1} = x_2 + \text{rand}(1) \times (x_{\max} - x_2) \\ x'_{2t_2} = x_2 + \text{rand}(1) \times (x_1 - x_2) \end{cases} \quad (9)$$

式中： x_{\min} 、 x_{\max} 分别为种群可取的最小值及最大值， $\text{rand}(1)$ 为(0,1]的随机数。

步骤 3 将 x'_{1t_1} 、 x'_{1t_2} 、 x'_{2t_1} 、 x'_{2t_2} 代入目标函数，分别计算其所对应的适应度值，并对其进行排序，取最大的两个作为交叉后的子代个体。

(3) 变异算子

假设变异概率为 p_m ，同交叉算子类似可按整个基因段、某个干扰机基因或某个基因等 3 种模式以变异概率 p_m 进行基因选择，变异前的基因为 x_1 ，变异后的基因为 x'_1 。

$$x'_1 = x_{\min} + \text{rand}(1) \times (x_{\max} - x_{\min}) \quad (10)$$

2.2.3 遗传算法计算流程

遗传算法具体计算流程如图 9 所示，图中 N_{\max} 为最大进化代数， M 为种群个体数， n 为当前种群代数。

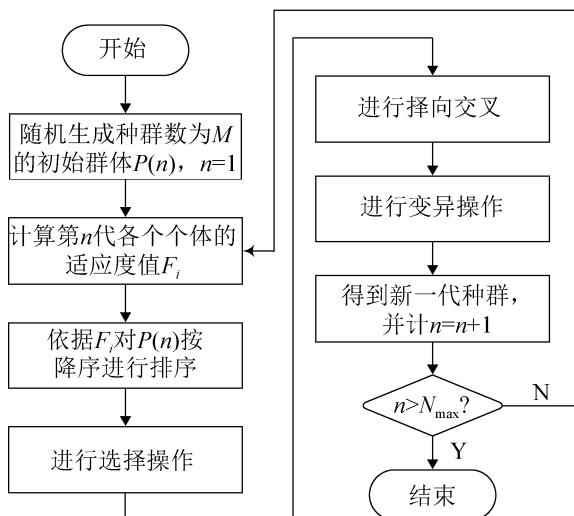


图 9 遗传算法流程图

Fig. 9 Flow chart of genetic algorithm

3 仿真分析

为对文中所构的优化部署模型及算法进行仿真验证，对战场环境作如下设定：敌防空预警探测系统共分 3 个管报中心(各管报中心部署 1 部远程预警雷达)，各管报中心均下辖 2 个管报站(各管报站部署 1 部预警雷达)，管报中心负责对所属预警雷达进行空情融合；我空中突击编队分两批分别从 2 个方向出发，采取突防高度 2 km、宽度 20 km，径向目标实施突防；远程支援干扰编队下属若干架远距支援干扰飞机，其部署区域限定在[点 1(19.133 1, 120.251 8)、点 2(13.462 3, 115.124 8)、点 3(13.462 3, 118.215 8)、点 4(19.133 1, 123.291 4)]所围成的区域内，敌预警雷达和我远距支援干扰机具体性能参数分别如表 1~2 所示，初始态势如图 2 所示。

表 1 预警雷达性能参数表

雷达类型	P_r /kW	G_r dB	B_r /MHz	λ /m	L	F_n	T_0 /K	B_n /kHz	$\theta_{r0.5}$ /°
远程预警雷达	39	30	2	0.23	15	3.5	340	0.2	2
预警雷达	30	30	2	0.09	12	2.5	340	0.2	3

表 2 远距支援干扰机性能参数

干扰机类型	P_j /kW	G_j /dB	B_j /MHz	L_j	$\theta_{j0.5}$ °
远程支援干扰机	30	27	2	20	105

设定 $\sigma=5 \text{ m}^2$ ，干扰机高度 2 km，干扰机数量 $n=3$ ，两条突击航路分别为主攻及佯攻方向，即 $\lambda_1=0.2$ ， $\lambda_2=0.8$ ，各雷达的有效压制系数 $K_j=5$ ；初始种群为 10，进化代数为 100，交叉概率 p_c 为 0.8，变异概率 p_m 为 0.008。

下面分别运用本文所提出的择向交叉遗传算法及文献[14]所提出的非线性交叉遗传算法进行部署优化仿真计算，仿真结果如图 10 所示。根据图 10 可知，当初始种群数量为 10 时，本文所提出的择向交叉遗传算法在收敛速度及对最优解的搜

索上均优于非线性交叉遗传算法, 择向交叉遗传算法进化至第 10 代时, 其适应度值已达到 -400 以上, 基本步入准最优解的范畴, 而非线性交叉遗传算法需进化至第 30 代方达到这一程度; 从最终适应度值来看, 同等条件下择向交叉最优值为 -329.1, 非线性交叉最优值为 -357.4。

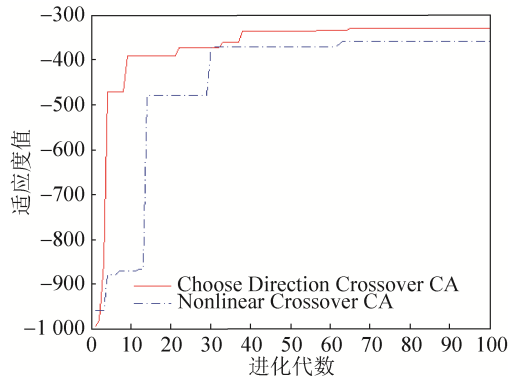


图 10 初始种群为 10 时仿真结果对比图

Fig. 10 Comparison graph of simulation results when Initial population is 10

为进一步验证择向交叉遗传算法的有效性, 下面分别设定初始种群数为 30、60 进行部署优化仿真计算, 仿真结果分别如图 11~12 所示。

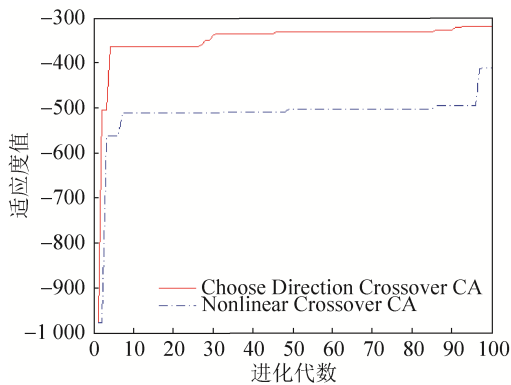


图 11 初始种群为 30 时仿真结果对比图

Fig. 11 Comparison graph of simulation results when Initial population is 30

从图 11~12 中可以看出, 本文所提出的择向交叉遗传算法在同等条件下, 所寻找到的最优解均优于非线性交叉遗传算法; 在收敛速度方面, 图 11 与图 12 似乎“不太一致”, 图 11 中择向交叉遗传算法在收敛速度方面显然优于非线性交叉遗传算法, 但图 12 却并非如此, 其原因在于远程支援干

扰部署优化模型可能为“多峰函数”, 在初始种群数较大时, 非线性交叉遗传算法则快速的聚集到某一“局部最优解”, 而根据 2.2.2 节可知择向交叉遗传算法在应对“多峰函数”进行交叉操作时通常需分两步操作以实现“对最优解”的有效搜索, 由此, 可以得出择向交叉遗传算法较非线性交叉遗传算法更易跳出“局部最优解”, 同时图 12 中的择向交叉遗传算法在进化到第 17 代时基本步入准最优解的范畴, 可见其显然具备较好的收敛效果。

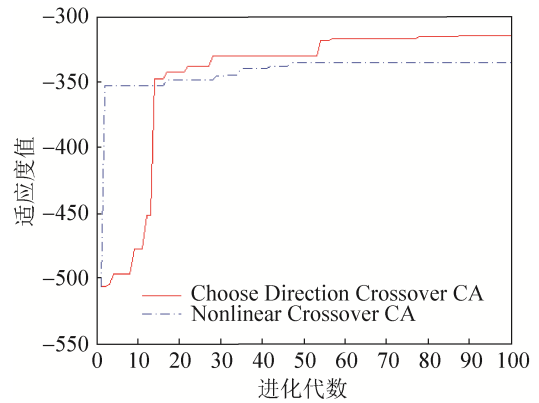


图 12 初始种群为 60 时仿真结果对比图

Fig. 12 Comparison graph of simulation results when Initial population is 60

为进一步挖掘远程支援干扰部署优化相关的启示性方式、方法, 同时也通过实际部署经验及基本认知的角度反过来验证远程支援干扰部署优化模型及算法的正确性及可行性。现取 3 次仿真计算中的最优解, 即初始种群数为 60 的遗传计算结果在仿真平台上进行部署显示, 其适应度值为 -314, 最优部署方案如图 13 所示。

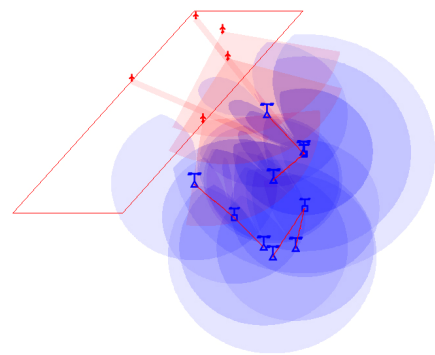


图 13 最优部署方案图

Fig. 13 Optimal deployment plan figure

从图 13 中可以看出, 被选定为主攻方向的突击航路上部署的干扰机数量及干扰能量覆盖要多于佯攻方向, 这一结果有效地体现了在作战过程中对主、佯攻航路的处置差异, 与作战实际相符; 在佯攻方向所部署 1 部干扰机基本处在该航路方向上可部署区域的最前沿, 这完全符合干扰条件下雷达最大探测距离与雷达与干扰机之间的距离开方成反比, 即 $R_{\max} \propto 1/\sqrt{R_j}$; 在主攻方向所部署的 2 部干扰机并未处于其航路方向的最前沿, 原因在于其需要权衡干扰距离减小所能带来的能量优势同时也带来干扰波束的覆盖劣势。

4 结论

为解决空中进攻作战中空中突击编队的突防安全问题, 本文从定量分析角度出发建立了远程支援干扰部署优化模型, 并设计了择向交叉遗传算法以解决模型解算问题, 研究结果可为空中进攻作战行动及部队训练提供相关数值参考及分析方法借鉴, 具有一定的作战实用意义。其中得到的主要结论有:

(1) 运用“基于图像封闭区域检测”的方法, 可有效避开对干扰条件下防空预警雷达网的探测覆盖区域的复杂几何建模, 从而实现对目标函数快速、准确地计算;

(2) 择向交叉遗传算法在远程支援干扰部署优化模型解算中, 其在收敛速度、局部最优解的跳出及全局最优解的获取等方面效果显著;

(3) 根据仿真结果, 在远程支援干扰部署方面, 可得到以下几点启示: ①主攻方向兵力应优于佯攻方向; ②为保证所对应航路的干扰效果, 干扰机应尽量靠前配置; ③在整体部署中, 应综合权衡干扰能量及干扰波束覆盖来实际确定干扰机的配置位置。

由于本文的研究重心是设计一种准确、快速、有效的模型解算算法上, 因此在建模过程中, 对运动目标的雷达反射截面积以及地形遮蔽对雷达探测效能影响方面作了简化处理; 同时在实例分析过

程中, 对地面防空预警雷达网中的雷达参数设置上, 将其工作频率均设置在同一频段, 从而使得仿真结果与实装测试结果可能存在一定出入。对上述简化部分有要求的研究人员可加入相关因子进行模型重构, 同时可继续沿用本文所提算法进行模型解算。

参考文献:

- [1] 王国良, 申绪润, 汪连栋, 等. 基于秩 K 融合规则的组网雷达系统干扰效果评估[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7678-7680.
WANG G L, SHEN X J, WANG L D, et al. Effect Evaluation for Noise Blanket Jamming Against Netted Radars Based on Rank-K Information Fusion Rules[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(23): 7678-7680.
- [2] 张养瑞, 高梅国, 罗皓月, 等. 基于检测概率的雷达网协同干扰效果评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1778-1786.
ZHANG Y R, GAO M G, LUO H Y, et al. Evaluation method of cooperative jamming effect of radar net based on detection probability[J]. Systems Engineering and Electronics. 2015, 37(8): 1778-1786.
- [3] 申绪润, 王国玉, 汪连栋, 等. 电子干扰飞机对抗警戒雷达组网系统的效果评估[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(4): 997-1001.
SHEN X J, WANG G Y, WANG L D, et al. Effect Evaluation for Electronic Jamming Aircraft Against Netted Surveillance Radars[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(4): 997-1001.
- [4] 罗金亮, 金家才, 魏巍. 对敌防空系统实施体系压制作战电子对抗战法探析[J]. 空军军事学术, 2016, 2(2): 51-53.
LUO J L, JIN J C, Wei W. Research on Electronic Warfare Method of Suppression Combat Against Enemy air defense systems[J]. Military Academics of Air Force, 2016, 2(2): 51-53.
- [5] 何凡, 祁世民, 谢贵武, 等. 改进蚁群算法求解多目标雷达干扰资源优化分配[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(6): 111-114.
HE F, QI S M, XIE G W, et al. Improved Ant Colony Algorithm to Solve Multi-objective Optimization of Radar Interference Resource Distribution[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(6): 111-114.
- [6] 付昭旺, 于雷, 寇英信, 等. 混合编队协同空战电子支援干扰功率分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(6): 1171-1175.

- FU Z W, YU L, KOU Y X, et al. Electronic jamming power assignment method in cooperative air combat of mixed formation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(6): 1171-1175.
- [7] TENG P, LV H G, HUANG J. Improved particle swarm optimization algorithm and its application in coordinated air combat missile target assignment[C]// Proc of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008: 2833-2836.
- [8] YU L L, CAI Z X. Multi-robot mission assignment based in current learning discrete particle swarm optimization algorithm[J]. *Application Research of Computers* (S1001-3695), 2009, 26(5): 1691-1694.
- [9] 张顺健. 干扰飞机空中部署的辅助决策研究[J]. *军事运筹与系统工程*, 2006, 20(1): 47-49.
- ZHANG S J. Research on Aided Decision of Jamming Aircraft Deployment[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2006, 20(1): 47-49.
- [10] 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 Z Q, YU L, LU Y, et al. Research on Optimized Electronic Warfare Embattling Countermining Radar Net[J]. *ACTA ARMAMENTARII*, 2012, 33(1): 89-94.
- [11] 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 Z Q, YU L, ZHOU Z L, et al. Cooperative decision making of jammer formation in air fighters penetration attack[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(2): 307-312.
- [12] 刘畅, 刘湘伟, 郭建蓬, 等. 伴随掩护进攻分队时雷达干扰机队形研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2013, 35(2): 25-29.
- LIU C, LIU X W, GUO J P, et al. The Optimal Formation of Radar Jamming Equipment in Accompanying Assaulting Cavalry[J]. *Command Control & Simulation*, 2013, 35(2): 25-29.
- [13] 倪天权, 王建东, 刘以安. 随队式干扰对抗组网雷达的目标航路规划研究[J]. *兵工学报*. 2010, 31(12): 1599-1603.
- NI T Q, WANG J D, LIU Y A. Research on Target Route Planning of Confrontation of ESJ to Radar Network[J]. *ACTA ARMAMENTARII*. 2010, 31(12): 1599-1603.
- [14] 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 Z Q, YU L, ZHOU Z L, et al. Cooperative decision making of jammer formation in air fighter's penetration attack[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(2): 307-312.
- [15] 王中杰, 李侠, 周启明, 等. 基于多约束条件遗传算法的雷达网优化部署[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(2): 265-268.
- WANG Z J, LI X, ZHOU Q M, et al. Optimal deployment of radar network based on multi-constrained GA[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(2): 265-268.
- [16] 薛羽, 庄毅, 朱浩, 等. 求解协同干扰问题的高效免疫遗传算法[J]. *电子科技大学学报* 2013, 42(3): 453-458.
- XUE Y, ZHUANG Y, ZHU H, et al. Efficiently Immune Genetic Algorithm for Solving Cooperative Jamming Problem[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42 (3): 453-458.
- [17] 董颖, 刘欢杰, 许宝栋, 等. 一种基于实数编码的改进遗传算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(4): 219-221.
- DONG Y, LIU H J, XU B D, et al. A Modified Genetic Algorithm Based on Real-Coding[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, 26(4): 219-221.
- [18] Baskar S, Subbaraj P, Rao M V C. Hybrid real coded genetic algorithm solution to economic dispatch problem[J]. *Computers and Electrical Engineering* (S0045-7906), 2003, 29: 407-419.