

基于遗传算法的光电干扰任务分配模型

杜宇, 焦均均, 孟令杰

国防科技大学电子对抗学院, 合肥 230037

摘要 为评估光电干扰目标的威胁度, 选取了目标的类型、速度、高度、距离、角度和目标的航路捷径等指标, 构建了干扰任务分配模型, 应用遗传算法对分配任务模型进行了求解, 并通过实例验证方法的可行性。

关键词 光电干扰; 任务分配; 遗传算法

现代作战中, 光电威胁目标的种类和数量较多, 而光电干扰装备的作战能力和数量有限, 干扰任务分配难度较大^[1]。如何利用有限的光电干扰装备, 尽可能地实现对方作战对象的有效干扰, 已成为光电作战领域的重要课题。干扰任务分配是否合理成为直接影响光电干扰作战效果的重要因素之一^[2]。因此, 为了使光电干扰效益达到最大, 必须为每种光电干扰装备合理地分配干扰目标。

护目标距离、航路捷径、飞临时间、飞抵方向、飞行速度等。在众多评判因素当中, 既有定量分析, 也有定性描述, 而且相互之间关系复杂, 若要全面合理地考虑每个因素, 给出每个威胁程度与各因素的函数关系非常困难^[5]。根据要地防空作战中敌方光电威胁目标的使用情况, 结合构建指标体系必须遵循完整性、可运算性、无冗余性的基本要求, 选取6个方面的指标来评判光电威胁目标的威胁度, 如图1所示。

1 光电干扰目标威胁度的判断

光电干扰目标的威胁度是指对方光电威胁目标对被保护目标的威胁程度, 对方光电威胁目标能够降低或毁伤我方被保护对象的作战效能, 对其进行针对性有效保护, 能够促进我方作战效能的发挥, 增强战斗力^[3]。但由于干扰装备的有限性以及作战运用的开销问题, 在光电干扰任务分配过程中, 目标威胁度应作为任务分配的重要依据。

1.1 目标威胁度评估指标体系

影响光电威胁目标威胁度的因素很多^[4], 根据实际作战, 评判的因素大致有目标类型、飞行高度、相对保

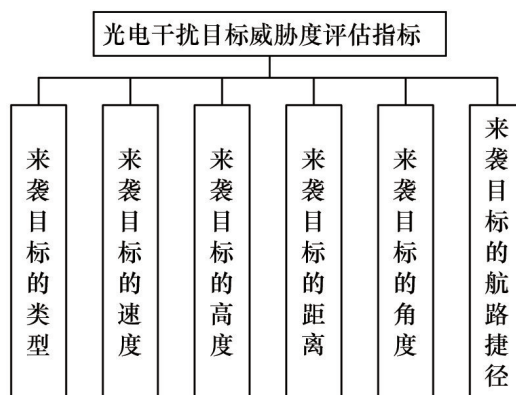


图1 光电干扰目标威胁度评估指标

Fig. 1 Threat assessment indices of photoelectric interference target

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2019-01-31

作者简介: 杜宇, 助理研究员, 研究方向为光电武器作战仿真, 电子信箱: cewc2017@163.com

引用格式: 杜宇, 焦均均, 孟令杰. 基于遗传算法的光电干扰任务分配模型[J]. 科技导报, 2019, 37(4): 76-80; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.04.013

1.2 威胁度评估指标的量化

衡量光电威胁目标威胁度时选取的指标主要有目标的类型、速度、高度、距离、角度和目标的航路捷径,从定性和定量两个角度对这些指标进行量化^[6]。

1.2.1 目标的类型

要地防空作战中,光电威胁目标主要是激光、电视和红外武器制导系统,在保护不同目标时不同类型光电威胁目标的威胁度不同,同时由于光电威胁目标的攻击能力受天气因素的影响比较大,因此,对于目标类型 μ_1 的量化由指挥员综合保护目标的类型、天气情况等因素确定。

1.2.2 目标的速度

对于同一类型的来袭目标,飞行速度不同,威胁程度也不同。一般情况下,来袭速度越大,目标的威胁度越大。目标速度的量化模型为

$$\mu_2 = 1 - e^{\alpha v} \quad (1)$$

式中, v 为光电威胁目标的飞行速度,m/s; $\alpha=-0.005$ 。

1.2.3 目标的高度

一般情况下,光电威胁目标的飞行高度越低,其威胁度越大,当目标高度小于1 km时,威胁度最大;当目标高度大于1 km时,威胁程度随着高度的增加而降低。目标高度的量化模型为

$$\mu_3 = \begin{cases} 1, & 0 < h < \beta_2 \\ e^{-k_2(h-\beta_2)^2}, & \beta_2 < h, k_2 > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, h 为光电威胁目标的飞行高度,km; k_2 为衰减参数。

1.2.4 目标的距离

目标距离是指光电威胁目标地面投影与保护目标之间的距离,距离越近,光电威胁目标的威胁度就越大。目标距离的量化模型为

$$\mu_4 = \begin{cases} 1, & d \leq d_1 \\ 1 - 0.2 \frac{d-d_1}{d_2-d_1}, & d_1 < d < d_2 \\ 0.8 \frac{d_3-d}{d_3-d_2}, & d_2 < d < d_3 \\ 0, & d > d_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中, d_1, d_2, d_3 由指挥员根据具体的作战任务确定。

1.2.5 目标的角度

目标的角度是指光电威胁目标飞行方向与目标连线之间的夹角,以保护目标与光电威胁目标的连线为基准,规定顺时针方向目标的角度为正,当目标角度

在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 时,对保护目标构成威胁,目标角度接近时,威胁程度最大;当目标角度超出此范围时,对保护目标没有威胁。目标角度的量化模型为

$$\mu_5 = \begin{cases} e^{-3.5\theta^2}, & |\theta| \leq 90^\circ \\ 0, & |\theta| > 90^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中, θ 为目标角度。

1.2.6 目标的航路捷径

当保护目标在光电威胁目标的威胁范围内时,光电威胁目标的航路捷径越小,威胁度就越大,航路捷径为零时,威胁度最大;若超出光电威胁目标的威胁范围,威胁度可忽略。目标航路捷径的量化模型为

$$\mu_6 = e^{-k_1 p^2} \quad (5)$$

式中, p 为航路捷径,km; k_1 为反映光电威胁目标威胁范围的参数,其具体取值根据光电威胁目标的杀伤范围确定。

1.3 光电干扰目标威胁度计算模型

假设有 m 个光电威胁目标组成目标集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$,影响光电干扰目标威胁度的评价指标集为 $\mu_i (i=1, 2, \dots, 6)$,光电威胁目标 t_i 在评价指标 μ_i 下的指标值为 a_{ij} ,从而构成指标决策矩阵 A 。为了消除不同量纲和量纲单位带来的不可公度性,决策之前应将指标进行无量纲和规范化处理。为此,根据评价指标的类型^[7],按式(6)、式(7)将指标决策矩阵 A 为规范化矩阵 $B = [b_{ij}]_{6 \times m}$

$$b_{ij} = (1/a_{ij}) / \sqrt{\sum_{j=1}^n (1/a_{ij})^2}, \quad i=1, 2, 4 \quad (6)$$

$$b_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum_{j=1}^n (a_{ij})^2}, \quad i=3, 5, 6 \quad (7)$$

对于规范化指标决策矩阵 B ,确定最大威胁度。令 $z_i = \max_j b_{ij}$,则最大威胁度为 $Z_0 = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6)$ 。则第 j 个光电威胁目标在第 i 个指标下对最大威胁度的关联系数为

$$\zeta_{ij} = \frac{\min_j |b_{ij} - z_i| + \rho \max_j |b_{ij} - z_i|}{|b_{ij} - z_i| + \rho \max_j |b_{ij} - z_i|} \quad (8)$$

式中, ρ 为分辨系数,一般取值为0.5。

第 j 个光电威胁目标对理想最大威胁度的关联度为

$$r_j = \sum_{i=1}^6 \zeta_{ij} w_{gi} \quad (9)$$

式中, w_{gi} 为第 i 个指标的权重。

将 r_j 由大到小排序, r_j 取值越大, 光电威胁目标的威胁度越大。

2 光电干扰的任务分配模型

强激光干扰、激光角度欺骗干扰和烟幕弹无源干扰都具有对来袭的光电威胁目标进行干扰的能力。在对光电干扰力量的作战任务进行分配时, 需要指挥员综合运用上述 3 种干扰手段, 充分发挥整体优势, 使总的干扰效益最大。

假定, 强激光干扰、角度欺骗干扰和烟幕弹干扰的干扰效果矩阵为

$$\begin{aligned} A' &= \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & \cdots & a'_{1n} \\ a'_{21} & a'_{22} & \cdots & a'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{m_1 1} & a'_{m_1 2} & \cdots & a'_{m_1 n} \end{bmatrix} & B' &= \begin{bmatrix} b'_{11} & b'_{12} & \cdots & b'_{1n} \\ b'_{21} & b'_{22} & \cdots & b'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b'_{m_2 1} & b'_{m_2 2} & \cdots & b'_{m_2 n} \end{bmatrix} \\ C' &= \begin{bmatrix} c'_{11} & c'_{12} & \cdots & c'_{1n} \\ c'_{21} & c'_{22} & \cdots & c'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c'_{m_3 1} & c'_{m_3 2} & \cdots & c'_{m_3 n} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

假设现有 m_1 个强激光干扰站、 m_2 个激光角度欺骗干扰站、 m_3 个烟幕弹干扰站、 n 个来袭目标。根据干扰任务分配的基本原则, 结合来袭目标的威胁度和光电干扰站对来袭目标的干扰效果, 建立要地防空光电干扰任务分配模型^[8]

$$f_g = \max \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_1} x_{ij} a'_{ij} r_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_2} y_{kj} b'_{kj} r_j + \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^{m_3} z_{lj} c'_{lj} r_j \right) \quad (11)$$

约束于

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{m_1} x_{ij} \leq m_1 (j=1, 2, \cdots, n), & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 (i=1, 2, \cdots, m_1) \\ \sum_{k=1}^{m_2} y_{kj} \leq m_2 (j=1, 2, \cdots, n), & \sum_{j=1}^n y_{kj} = 1 (k=1, 2, \cdots, m_2) \\ \sum_{l=1}^{m_3} z_{lj} \leq m_3 (j=1, 2, \cdots, n), & \sum_{j=1}^n z_{lj} = 1 (l=1, 2, \cdots, m_3) \\ x_{ij} = 1 \text{ 或 } x_{ij} = 0, & y_{kj} = 1 \text{ 或 } y_{kj} = 0, & z_{lj} = 1 \text{ 或 } z_{lj} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, r_j 为来袭目标 j 的威胁度; a'_{ij} 为强激光干扰站 i 对来袭目标 j 的干扰效果值; x_{ij} 为强激光干扰站 i 是否对来袭目标 j 进行干扰的指示数, $x_{ij}=1$ 为干扰, $x_{ij}=0$ 不干扰; b'_{kj} 为激光角度欺骗干扰站 k 对来袭目标 j 的干扰效果值; y_{kj} 为强激光干扰站 k 是否对来袭目标 j 进行干

扰的指示数, $y_{kj}=1$ 为干扰, $y_{kj}=0$ 为不干扰; c'_{lj} 为烟幕弹干扰站 l 对来袭目标 j 的干扰效果值; z_{lj} 为烟幕弹干扰站 l 是否对来袭目标 j 进行干扰的指示数, $z_{lj}=1$ 干扰, $z_{lj}=0$ 不干扰^[9]。

3 基于遗传算法的模型求解

要地防空作战中, 光电干扰任务分配问题是一个典型的组合优化问题, 其可能的组合方案与待分配的干扰站数目成指数增长。为解决这一问题, 采用遗传算法对光电干扰任务分配模型进行求解, 算法的具体实现步骤如下。

3.1 编码方法

决策变量采用二进制编码方式。虽然染色体的长度会随着干扰站和来袭目标的增多急剧增长, 但计算染色体适应度时可省去解码的麻烦, 而且对于最优染色体, 只需将其转换为 $m \times n$ 的矩阵 (m 为干扰站的个数, n 为来袭目标个数), 矩阵中的元素为 0 或 1 可直观表述分配结果。

3.2 适应度函数

干扰任务的最优分配是未被干扰的目标数最少, 同时干扰站对来袭目标总的干扰效益最大, 所以直接将目标函数作为染色体的适应度函数, 则染色体的适应度为

$$f_g = \max \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_1} x_{ij} a'_{ij} r_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_2} y_{kj} b'_{kj} r_j + \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^{m_3} z_{lj} c'_{lj} r_j \right) \quad (13)$$

3.3 选择

这里采用最佳保留方法。首先按轮盘赌选择方法执行遗传算法的选择操作, 然后将当前群体中适应度最高的个体完整地复制到下一代群体中, 以保证遗传终止时得到的最后结果一定是历代中出现过的最高适应度的个体。

3.4 交叉

交叉操作是遗传算法中最主要的遗传操作。通过交叉操作可以得到新一代个体, 新个体组合了父辈个体的特性。将群体内的各个个体随机搭配成对, 每一个个体以交叉概率交换它们之间的部分染色体^[10]。鉴于任务分配的编码设计, 采用均匀交叉的策略。

3.5 变异

变异操作可采用基本位变异、均匀变异、边界变异和非均匀变异算子。非均匀变异算子计算公式如下:

$$x'_i = \begin{cases} x_i + \Delta(t, b_i - x_i), & r = 0 \\ x_i - \Delta(t, x_i - a_i), & r = 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中, x_i 为个体 x 中的一个变异点, 该处的基因值取值范围为 $[a_i, b_i]$; r 为随机数; $\Delta(t, y)$ 表示 $[0, y]$ 范围内符合非均匀分布的一个随机数, 这里采用的 $\Delta(t, y) = y r_1 (1 - t/T)^b$ 。其中, r_1 为 $[0, 1]$ 内的随机数; t 为当前进化代数, T 为最大进化代数; b 为一个给定的参数, 取 $b=3$; 最后, 对新个体 x'_i 实施取整操作。

3.6 算法终止条件

考虑到实际作战时, 要求能够在有限时间内完成光电干扰任务分配, 这里采用“指定遗传进化代数”作为算法终止条件。

4 实例分析

假定我方现有 2 个强激光干扰站(用 J_{q1} 、 J_{q2} 表示), 3 个激光角度欺骗干扰站(用 J_{p1} 、 J_{p2} 、 J_{p3} 表示), 3 个烟幕弹干扰站(用 J_{y1} 、 J_{y2} 、 J_{y3} 表示), 敌方来袭目标有 2 枚激光制导导弹(用 R_{jg1} 、 R_{jg2} 表示), 1 枚电视制导导弹(用 R_{ds} 表示), 1 枚红外制导导弹(用 R_{hw} 表示), 现需要对敌机的机载雷达进行干扰的任务分配。根据第 1 节分析, 计算可知敌方来袭目标的威胁度, 来袭目标 R_{jg1} 、 R_{jg2} 、 R_{ds} 、 R_{hw} 的威胁度分别为 0.6、0.7、0.8 和 0.5。

依据光电干扰站和来袭目标的位置和性能参数, 计算知光电干扰站对不同来袭目标的干扰效果如表 1 所示。

表 1 不同干扰装备对不同来袭目标的干扰效果
Table 1 Effect of different interference equipment on different incoming targets

袭击目标	J_{q1}	J_{q2}	J_{p1}	J_{p2}	J_{p3}	J_{y1}	J_{y2}	J_{y3}
R_{jg1}	0.5	0.8	0.5	0.5	0.7	0.5	0.8	0.5
R_{jg2}	0.5	0.7	0.3	0.5	0.9	0.4	0.8	0.5
R_{ds}	0.7	0.5	0	0	0	0.7	0.8	0.7
R_{hw}	0.6	0.7	0	0	0	0.8	0.5	0.5

依据敌方来袭目标威胁度和光电干扰站对不同来袭目标的干扰效果, 对要地防空作战光电干扰任务分配问题进行求解。设定初始个体数为 40, 最大遗传代数为 200, 作为算法终止条件。

经过 200 次遗传迭代后, 光电干扰任务分配方案如表 2 所示。

表 2 光电干扰站干扰任务分配方案
Table 2 Task assignment scheme of photoelectric interference station

来袭目标	威胁度	分配方案
R_{jg1}	0.6	$J_{q2}J_{p2}$
R_{jg2}	0.7	$J_{p3}J_{y3}$
R_{ds}	0.8	$J_{q1}J_{y2}$
R_{hw}	0.5	J_{y1}

5 结论

构建了光电干扰目标威胁度判断模型以及任务分配模型, 并采用遗传算法的理论对任务分配问题进行了求解, 最后通过实例, 根据对方来袭目标的威胁度, 对己方任务装备进行了分配以争取最大的干扰效果, 验证了模型和求解方法的可行性, 对光电干扰任务分配问题的求解有一定的启示。

参考文献 (References)

- [1] 徐大伟. 水面舰艇光电干扰系统建模与仿真[J]. 光电技术应用, 2014, 29(6): 68-72.
Xu Dawei. Simulation of electro-optical jamming system on surface ship[J]. Electro-optic Technology Application, 2014, 29(6): 68-72.
- [2] 车进喜, 李钟敏, 高博, 等. 联合作战中光电对抗系统作战效能评估[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(5): 52-55.
Che Jinxi, Li Zhongmin, Gao Bo, et al. Combat efficiency evaluation for electro-optical countermeasure systems in joint operations[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(5): 52-55.
- [3] 田宏. 光电对抗作战应用及其装备系统[J]. 光电技术应用, 2005, 20(1): 1-5.
Tian Hong. Operational application of electro-optical (EO) countermeasures and equipments[J]. Electro-optic Technology Application, 2005, 20(1): 1-5.
- [4] 高卫. 激光致盲干扰效果评估方法研究[J]. 光学技术, 2006, 32(3): 149-152.
Gao Wei. Study on evaluation of high energy laser blinding jamming effectiveness[J]. Optical Technique, 2006, 32(3): 149-152.
- [5] 彭杰, 王振华. 空袭目标威胁排序模型研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(9): 35-37.
Peng Jie, Wang Zhenhua. Research on threat sort order model

- of air-raid targets[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(9): 35-37.
- [6] 骆文辉, 刘少伟, 杨建军. 基于灰色区间关联决策的目标威胁评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2008, 9(3): 37-41.
Luo Wenhui, Liu Shaowei, Yang Jianjun. Threat evaluation technology based on grey interval-number for grey decision-making[J]. Journal of Airforce Engineering University (Natural Science Edition), 2008, 9(3): 37-41.
- [7] 张元瀚, 李相民, 代进进. 基于灰色区间关联决策的海上编队反导威胁评估[J]. 火力指挥与控制, 2011, 36 (5): 95-98.
Zhang Yuanhan, Li Xiangmin, Dai Jinjin. Antimissile threat evaluation of naval formation based on grey interval-number relationship decision-making[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36 (5): 95-98.
- [8] 黄仁全, 李为民, 周晓光. 基于灰色关联分析的防空导弹系统效能评估模型[J]. 兵工自动化, 2009, 28(6): 94-96.
Huang Renquan, Li Weimin, Zhou Xiaoguang. Efficiency evaluation model for air-defense missile system based on grey correlation analysis[J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28 (6): 94-96.
- [9] 胥杰, 赵尚弘, 吴继礼, 等. 激光干扰光电探测器综合模糊评估方法[J]. 光电工程, 2007, 34(6): 30-34.
Xu Jie, Zhao Shanghong, Wu Jili, et al. Integrated fuzzy evaluation method of photoelectric jamming to detector[J]. Opto-electronic Engineering, 2007, 34(6): 30-34.
- [10] 白军, 刘新学, 郭峰, 等. 基于遗传算法的导弹编队攻击任务优化分配策略基于遗传算法的导弹编队攻击任务优化分配策略[J]. 四川兵工学报, 2006, 32(10): 51-53.
Bai Jun, Liu Xinxue, Guo Feng, et al. Strategy of task optimization allocation for missile group-attack based on genetic algorithm[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2006, 32(10): 51-53.

Assignment distribution model for electro-optic jamming assignment based on genetic algorithms

DU Yu, JIAO Junjun, MENG Lingjie

College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China

Abstract This paper evaluates the threat degree of photoelectric interference targets by selecting the style, the speed, the altitude, the distance, the angle, the route of the target as the evaluation indices, and constructing an interference task allocation model. The genetic algorithm is used to implement the model and the feasibility of the method is verified by an example.

Keywords electro-optic jamming; assignment distribution; genetic algorithms ●



(责任编辑 刘志远)