

机会约束规划在地对空雷达干扰资源优化分配中的应用

陈根忠, 刘湘伟, 沈 阳, 熊 杰

(电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘 要:应用机会约束规划理论,研究了反空袭作战中地对空雷达干扰资源优化分配问题。首先,在给出雷达威胁等级判定模型的基础上,利用干扰压制区建立了地对空雷达干扰效果评定模型。其次,根据所建干扰效果评定模型,综合考虑干扰资源分配过程中存在的不确定因素,建立了双层模糊机会约束混合整数规划模型。最后,利用可能性测度理论,将干扰资源优化分配模型清晰化为双层混合整数规划模型,通过求解混合整数线性规划来获取优化分配模型的最优解。仿真算例表明:所建的干扰资源优化分配模型不仅能够有效处理分配过程中的不确定信息,而且能够在本级干扰效果最大化的同时实现全局最优;模型的求解算法针对性更强,非常适合求解该问题。

关键词:干扰资源分配;双层规划;模糊机会约束规划;混合整数线性规划

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.06.007

中图分类号: TN972.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)06-0033-05

地对空雷达干扰资源是现代空战中不可或缺的一支重要力量,如何合理地分配干扰资源,使得干扰效果最佳,已成为一个十分重要的空战决策问题。地对空雷达干扰资源是指将雷达按一定的原则、因素、约束条件分配到不同的干扰机。该问题属于组合优化中的 NP-hard 问题,可借助运筹学的目标优化理论,将其抽象为寻求系统最优的干扰资源优化分配模型。目前,大量的文献仅对确定条件下的单层优化分配问题的求解算法进行了研究,归纳起来主要有以下几种算法:遗传算法、动态规划算法、蚁群算法、粒子群算法和神经网络等^[1-4],但对不确定条件下的地对空雷达干扰资源优化分配问题的研究还有待加强。本文在用模糊数描述不确定因素的基础上,建立了雷达干扰资源优化分配的双层模糊机会约束混合整数规划模型,以深入研究不确定环境下的优化分配建模理论,并给出相应的求解算法。

1 优化分配模型

所谓优化分配是针对来袭的一批目标,利用地对空雷达干扰设备对其实施干扰,设定一定的分配原则,确定干扰效果的评价指标,使得评价指标达到最大值的分配方案即为最佳的优化分配。优化分配过程涉及对敌雷达辐射源威胁等级的判定、地对空雷达干扰效果的评定等关键问题。

1.1 雷达辐射源威胁等级判定

辐射源威胁等级判定是指侦察机利用侦察到的辐射源参数来判定威胁等级^[5]。结合反空袭作战的特点,辐射源威胁等级主要考虑雷达的用途和被保护目标的距离 2 个因素,其表达式为:

$$u_n = \lambda_1 q_{n1} + \lambda_2 q_{n2} \quad (1)$$

式中: u_n 为雷达 n 的威胁等级; $\lambda_i (i=1,2)$ 为各因子加权系数,满足 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$,具体取值由指挥员决定; q_{n1}

* 收稿日期:2009-11-02

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(20080440223)

作者简介:陈根忠(1982-),男,江苏盐城人,博士,主要从事信息战指挥辅助决策研究;

E-mail: chgz8207110515@163.com

刘湘伟(1962-),男,湖南岳阳人,教授,博士生导师,主要从事电子战建模与仿真、软件工程、军事运筹学研究。

为雷达 n 的用途威胁因子; q_{n2} 为雷达 n 的距离威胁因子。这 2 个因子的详细计算见文献[6]。

1.2 地对空雷达干扰效果评定

反空袭作战中,地对空雷达干扰设备的干扰效果体现在敌机载雷达压制区的大小上,压制区越大,干扰效果越好;反之,干扰效果越差。

干扰机保卫地面固定目标的空间关系见图 1。干扰机配置在目标之外(位于同一水平面),距目标中心的距离为 d ,敌机的飞行高度为 H ,它至目标中心的直线距离和水平距离分别为 R_t 和 D_t ;干扰机至敌雷达的直线距离和水平距离分别为 R_j 和 D_j 。

据文献[7],建立如图 2 所示的极坐标系。计算压制区时,除了被指派干扰机的主瓣功率,还考虑其它干扰机的旁瓣功率,则干扰机保卫地面目标时的压制区边界满足(2)式。

$$\sum_{i=1}^M \left\{ \frac{P_i G_i(i) \gamma_i(i) L_j(i)}{\Delta f_j(i) (D_t^2 + H^2 + d_i^2 - 2D_t d_i \cos \alpha_i)} \left[\arcsin \frac{r}{D_t} + \arctan \frac{d_i \sin \alpha_i}{D_t - d_i \cos \alpha_i} \right]^{-2} \right\} = \frac{P_i G_i \sigma K_j L_r}{4\pi K \theta_{0.5}^2 \Delta f_r (D_t^2 + H^2)^2} \quad (2)$$

式中: P_i 、 G_i 、 γ_i 、 L_j 和 Δf_j 分别为第 i 部干扰机的功率、天线主瓣增益、极化损失因子、系统损耗和干扰带宽; d_i 、 α_i 分别为第 i 部干扰机距目标中心的距离和第 i 部干扰机与雷达相对目标中心的张角; M 为干扰机总数;其它参数含义详见文献[7]。

式(2)可以直接计算地对空干扰条件下,机载轰瞄、导航和制导雷达的压制区。但是,弹载末制导雷达和地形回避雷达的压制区计算还要考虑其特点,即它们开机工作时的高度非常低,此时的雷达干扰相当于地对地干扰,计算它们的压制区时应该令式(2)中的 H 为 0。

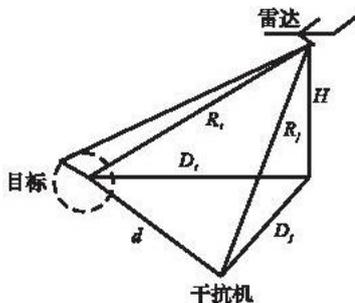


图 1 保卫目标时的空间关系图

Fig. 1 Space chart of safeguarding target

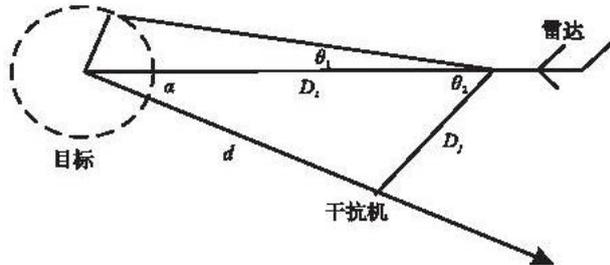


图 2 保卫目标时的地面投影图

Fig. 2 Projective chart of safeguarding target

预警机使用的机载预警雷达一般都是脉冲多普勒(PD)雷达,多部干扰机干扰条件下 PD 雷达作用距离为:

$$D_t = \left[\frac{P_i G_i \sigma}{4\pi \Delta f_r S_{\min}} \sum_{i=1}^M \frac{R_j^2(i) \Delta f_j(i)}{P_j(i) G_j(i) \gamma_j(i)} \right]^{1/4} \quad (3)$$

式中: $R_j(i)$ 为第 i 部干扰机与机载预警雷达的距离; Δf_r 为雷达接收机带宽; S_{\min} 为雷达的最小检测信噪比; P_i 为雷达发射功率; G_i 为雷达天线增益; σ 为目标雷达截面积。

有了上述压制区边界公式,就能求出敌机一定航线(对应某一角度 α) 对应的暴露距离 D_t 。地对空雷达干扰效果为:

$$c = D_{t,\min} / D_{t0} \quad (4)$$

式中: D_{t0} 为雷达在干扰机方向($\alpha = 0$) 上的暴露距离; $D_{t,\min}$ 为战术上要求的最小干扰距离,针对不同的干扰对象, $D_{t,\min}$ 的计算也各不相同^[8]。

对于轰瞄和导航雷达, $D_{t,\min}$ 指飞机的投弹距离,分为水平轰炸和俯冲轰炸 2 种。

水平轰炸时,可用式(5)来计算 $D_{t,\min}$:

$$D_{t,\min} = v_h \left[\sqrt{2H/g} + t \right] \quad (5)$$

式中: H 为敌机飞行高度; g 为重力加速度; v_h 为敌机水平飞行速度; t 为飞机投弹前的瞄准准备时间。

俯冲轰炸时,可用式(6)来计算 $D_{t,\min}$:

$$D_{t,\min} = v_d \cos \theta T + \bar{v}_t t \quad (6)$$

式中时间 T 由下式确定:

$$H = v_d \sin \theta T + 1/2 g T^2 \quad (7)$$

式中: v_d 为敌机俯冲飞行速度; θ 为飞机俯冲方向延长线与地面的夹角; \bar{v}_t 为飞机瞄准准备时间内的平均速度。

对于机载导弹制导雷达, $D_{t,\min}$ 的计算分为发射后不管和发射后继续跟踪 2 种。

导弹处于“发射后不管”状态,可用式(8)来计算 $D_{t,\min}$:

$$D_{t,\min} = R_{m,\min} + \bar{v}_t t \quad (8)$$

式中: $R_{m,\min}$ 为导弹的最小发射距离; \bar{v}_t 为敌机的平均飞行速度; t 为飞机发射导弹前的准备时间。

导弹处于“发射后继续跟踪”状态,可用式(9)来计算 $D_{t,\min}$:

$$D_{t,\min} = R_{m,\min} - (R_{m,\min} - R_{ts}) \bar{v}_t / \bar{v}_m \quad (9)$$

式中: R_{ts} 为导弹末制导系统开始工作的距离; \bar{v}_m 为导弹的平均飞行速度。

对于地形回避雷达和末制导雷达, $D_{t,\min}$ 指它们开始工作时距被保卫目标的距离。

对于机载预警雷达, $D_{t,\min}$ 指它在无干扰条件下的最大作用距离,计算公式见文献[7]。

综合考虑雷达的威胁等级和干扰机的干扰效果,评价指标可以表示为:

$$Q_{mn} = u_n c_{mn} \quad (10)$$

式中: c_{mn} 为第 m 台干扰机对第 n 部雷达实施干扰的效果。

1.3 地对空雷达干扰资源优化分配模型

雷达干扰资源优化分配中的不确定因素用模糊数描述为: $\tilde{m}_i = (m_i^1, m_i^2, m_i^3, m_i^4)$ 表示第 i 部干扰机最多可干扰目标数量的梯形模糊数; $\tilde{c}_{ij} = (c_{ij}^1, c_{ij}^2, c_{ij}^3, c_{ij}^4)$ 表示第 i 部干扰机对第 j 部雷达的实际干扰效果的梯形模糊数,可由专家根据 1.2 节中干扰效果的判定结果来给出。假设共有 m 部干扰机, n 部雷达; x_{ij} 为电子战指挥中心的分配方案; β_i 为第 i 部干扰机的置信水平; \bar{f} 为各部干扰机的平均干扰效果; pos 表示模糊条件下的可能性。则根据雷达干扰的过程,可给出优化分配的双层模糊机会约束混合整数规划模型^[9]:

$$\begin{aligned} & \max_{x_{ij}} m\bar{f} \\ & \text{s. t. } \text{pos}\left\{ \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \tilde{m}_i \right\} \geq \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

x_{ij} 为 0 或 1, 且 \bar{f} 为下层问题的解:

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{f}} \bar{f} \\ & \text{s. t. } \text{pos}\left\{ \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} x_{ij} \geq \bar{f} \right\} \geq \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \bar{f} \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式中,第 1 层的目标函数表示使雷达干扰资源的整体干扰效果最大;第 2 层的目标函数表示使各干扰机平均干扰效果最大;第 1 层的第 1 个约束条件表示分配给第 i 部干扰机干扰的雷达数量不超过最多可干扰的雷达数量,并且可能性不低于置信水平 α_i ;第 1 层的第 2 个约束条件表示每部雷达最多分配一部干扰机进行干扰; $x_{ij} = 1$ 时,表示第 i 部干扰机对第 j 部雷达进行干扰; $x_{ij} = 0$ 时,表示第 i 部干扰机不对第 j 部雷达进行干扰。

2 模型求解算法

根据 Zadeh 的可能性理论,可将上述雷达干扰资源优化分配的双层模糊机会约束混合整数规划模型清晰化为双层混合整数规划模型^[10]:

$$\begin{aligned} & \max_{x_{ij}} m\bar{f} \\ & \text{s. t. } \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq m_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (13)$$

x_{ij} 为 0 或 1, 且 \bar{f} 为下层问题的解:

$$\begin{aligned} & \max_f \bar{f} \\ & \text{s. t. } (1 - \beta_i) \sum_{j=1}^n c_{ij}^1 x_{ij} + \beta_i \sum_{j=1}^n c_{ij}^2 x_{ij} \geq \bar{f}, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \bar{f} \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $m_i = \sup\{M_i \mid M_i = \mu^{-1}(\alpha_i)\}$, μ 是 $\tilde{m}_i = (m_i^1, m_i^2, m_i^3, m_i^4)$ 的隶属函数, μ^{-1} 是 μ 的反函数。

当上层给定某个允许决策 x_{ij} , 模型(13)的下层最佳就是解式(14)的线性规划问题, 其对偶规划为:

$$\begin{aligned} & \min_{u_i} \sum_{i=1}^m u_i \left[(1 - \beta_i) \sum_{j=1}^n c_{ij}^1 x_{ij} + \beta_i \sum_{j=1}^n c_{ij}^2 x_{ij} \right] \\ & \text{s. t. } \sum_{i=1}^m u_i \geq 1 \\ & u_i \geq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

记 $U = \left\{ \sum_{i=1}^m u_i \geq 1, u_i \geq 0 \right\}$, U^E 为 U 中所有基可行解组成的集合。利用单纯形法求出 U 中的有限个基可行解 $\{U^1, U^2, \dots, U^l\}$ 。然后将模型等价转化为分别求解以下 l 个混合整数线性规划问题^[11]:

$$\begin{aligned} & \max_{x_{ij}, \bar{f}} m\bar{f} \\ & \text{s. t. } \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq m_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \bar{f} - \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^m u_i \left((1 - \beta_i) c_{ij}^1 x_{ij} + \beta_i c_{ij}^2 x_{ij} \right) \right] = 0, \quad t = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (16)$$

式中: x_{ij} 为 0 或 1; $\bar{f} \geq 0$ 。

3 仿真算例

现有 3 部干扰机和 3 部雷达, 每部干扰机最多可干扰雷达数量的梯形模糊数分别为 $(0, 1, 3, 4)$, $(0, 1, 2, 3)$, $(0, 2, 4, 6)$ 。 σ 为 50 000 m^2 , 等效半径为 126.6 m。干扰装备和雷达的性能参数见表 1-2。并且给定 $\alpha_1 = 0.92, \alpha_2 = 0.95, \alpha_3 = 0.9; \beta_1 = 0.85, \beta_2 = 0.9, \beta_3 = 0.88$ 。

表 1 干扰装备性能参数

干扰机	$P_j(i)/\text{kW}$	$G_j(i)/\text{dB}$	f/GHz	$\gamma_j(i)$
干扰机 1	1	30	8-16	0.5
干扰机 2	1	30	8-16	0.5
干扰机 3	10	30	2-4	0.5

表 2 雷达性能参数

Tab. 2 Parameter of radar capability

雷达	P_r/kW	G_r/dB	$\theta_{0.5}/(^{\circ})$	f/GHz	用途
雷达 1	8	35	4	9.23-9.43	轰瞄
雷达 2	11	35	2.5	9.00-10.00	制导
雷达 3	1 000	40	6.6	2.80-3.25	预警

按照上述条件进行求解, 可得到最优结果: $x_{11} = 1, x_{22} = 1, x_{33} = 1$, 其余为 0, $\bar{f} = 0.676$ 。即干扰机 1 干扰雷达 1、干扰机 2 干扰雷达 2、干扰机 3 干扰雷达 3 时, 总的干扰效果最佳。

4 结束语

本文综合考虑了地对空雷达干扰资源分配过程中的不确定因素, 运用不确定规划理论, 建立了雷达干扰资源优化分配的双层模糊机会约束混合整数规划模型。在求解算法上, 通过将双层模糊机会约束混合整数规划模型清晰化, 然后求解有限个混合整数规划问题, 来获取最优解。算例表明了方法的有效性。

参考文献:

- [1] Lee Z J, Su S F, Lee C Y. Efficiently Solving General Weapon – target Assignment Problem by Genetic Algorithms with Greedy Eugenics[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics(Part B), 2003, 33(1):113 – 121.
- [2] Keniti Gono, Takakazu Kurokawa. Neural Network Approach to the ECM Problem[J]. Systems and Computers in Japan, 2001, 32(1):11 – 15.
- [3] Schumacher C, Chandler P R, Rasmussen S J. Task Allocation for Wide Area Search Munitions via Network Flow Optimization [C]//AIAA – GNC. Montreal: AIAA Press, 2001: 1 – 8.
- [4] Luo Delin, Yang Zhong, Duan Haibin, et al. Heuristic Particle Swarm Optimization Algorithm for Air Combat Decision – making on CMTA[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 23(1):20 – 26.
- [5] 林象平. 雷达对抗原理[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1985.
LIN Xiangping. Principle of Radar Countermeasure[M]. Xi'an: Northwest Telecommunication Engineering Institute Press, 1985. (in Chinese)
- [6] 沈阳, 陈永光, 李修和, 等. 基于0 – 1规划的雷达干扰资源优化分配研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(5):528 – 532.
SHEN Yang, CHEN Yongguang, LI Xiuhé, et al. Research on Optimal Distribution of Radar Jamming Resource Based on Zero – one Programming[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(5):528 – 532. (in Chinese)
- [7] 邵国培, 曹志耀, 何俊, 等. 电子对抗作战效能分析[M]. 北京:解放军出版社, 1997.
SHAO Guopei, CAO Zhiyao, HE Jun, et al. The Analysis of Campaign Efficiency on ECM[M]. Beijing: People's Liberation Army Press, 1997. (in Chinese)
- [8] 付永成. 地对空雷达干扰战术[M]. 北京:解放军出版社, 1999.
FU Yongcheng. The Tactics of Ground – to – Air Radar Jam[M]. Beijing: People's Liberation Army Press, 1999. (in Chinese)
- [9] 刘宝碇, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
LIU Baoding, ZHAO Ruiqing, WANG Gang. Uncertain Programming with Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [10] Liu B. Dependent Chance Programming; A Class of Stochastic Optimization[J]. Computers and Mathematics with Application, 1997, 199(1):293 – 311.
- [11] 赵茂先, 高自友. 一种混合整数双层线性规划的全局最优化方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(7):113 – 116.
ZHAO Maoxian, GAO Ziyou. A Global Convergent Algorithm for Solving the Mixed Integer Bilevel Linear Programming Problem[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2005, 25(7):113 – 116. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Application of Chance Constrained Programming in Optimal Distribution of Ground – to – Air Radar Jamming Resource

CHEN Gen – zhong, LIU Xiang – wei, SHEN Yang, XIONG Jie
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Using fuzzy chance constrained programming, the paper does some research on the problem of optimal distribution of ground – to – air radar jamming resource under air – defense background. Firstly, based on the model of radar menace grade assessment, using jamming oppressive area, the model of radar jamming effect evaluation is built. Secondly, considering uncertain factors existent in the process of distribution, the bilevel fuzzy chance constrained mixed integer programming for jamming resource optimization assignment is presented. Finally, the bilevel mixed integer programming is obtained by the theory of possibility estimation. Then the optimal solution can be obtained by using the algorithm of mixed integer linear programming. The example indicates that the application of the optimal distribution model can not only deal with uncertain information but also achieve overall optimization when all comes to all. The algorithm of the model is of more pertinence.

Key words: jamming resource assignment; bilevel programming; fuzzy chance constrained programming; mixed integer liner programming