

中图分类号: TN974

文献标志码: A

文章编号: 1674-2230(2021)04-0087-05

基于层次分析法的陆基预警雷达固有威胁评估

苏冠霞, 马华强, 李 祥, 吴永生

(电子信息控制重点实验室, 成都 610036)

摘要: 在电子对抗作战过程中对敌方雷达进行威胁评估是电子对抗指挥决策的前提条件之一。由于敌方雷达种类以及威胁影响因素繁多, 选取陆基预警雷达为研究对象, 依据敌方雷达固有技战术参数进行威胁评估, 分析并建立陆基预警雷达固有威胁评估指标体系, 基于层次分析法(AHP)实现对陆基预警雷达的固有威胁评估。仿真结果表明该评估方法可对陆基预警雷达固有威胁进行有效量化评估。

关键词: 电子对抗; 陆基预警雷达; 威胁评估; 层次分析法

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2230.2021.04.018

Inherent Threat Assessment for Land-Based Early Warning Radar Based on AHP

SU Guanxia, MA Huaqiang, LI Xiang, WU Yongsheng

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

Abstract: It is one of the prerequisites for command and decision-making of electronic countermeasures to evaluate the threat of enemy radar in the process of electronic countermeasures. Due to the variety of enemy radars and threat factors, land-based early warning radar is selected as the research object, and threat assessment is based on inherent technical and tactical parameters of enemy radar. An inherent threat assessment index system is analyzed and established for land-based early warning radar, through analytic hierarchy process to realize the inherent threat assessment of land-based early warning radar, the simulation results show that the inherent threat of land-based early warning radar could be quantified with the evaluation method effectively.

Key words: electronic countermeasure; land-based early warning radar; threat assessment; Analytic Hierarchy Process(AHP)

1 引言

在信息对抗过程中, 雷达对于夺取和保持信息优势具有至关重要的作用。传统的通过指挥员人工选择关键雷达目标的方法, 效率低, 且缺少理论依据, 全凭指挥员的经验。为了实现敌雷达有效的打击, 需要寻求量化的雷达威胁评估方法, 常用的有层次分析法^[1]、相对 Vague 集理论^[2]、TOPSIS 算法^[3]、模糊逻辑以及贝叶斯网络理论^[4]

等。层次分析法是由美国运筹学家托马斯·塞蒂(T.L.Saty)教授于 20 世纪 70 年代提出的, 随后层次分析法的理论得到不断深入和发展, 同时层次分析法在实际决策问题的许多领域也得到了广泛应用。该方法是一种普遍实用的定性定量相结合的多准则决策(评价)方法。相对 Vague 集理论、TOPSIS 算法、模糊逻辑以及贝叶斯网络理论等方法在决策领域中的应用, 层次分析法以其系统、灵

收稿日期: 2020-11-04; 修回日期: 2020-11-23

作者简介: 苏冠霞(1980—), 女, 硕士, 高级工程师; 马华强(1985—), 男, 硕士, 高级工程师; 李祥(1985—), 男, 硕士, 高级工程师; 吴永生(1990—), 男, 硕士, 工程师。

活、简便以及定性定量相结合等特点,更适用于属性因子数量不多、能够快速形成决策判断的威胁评估过程。因此,本文采用层次分析法对陆基预警雷达固有威胁进行分析评估,为电子对抗目标提取或火力打击提供决策依据。

2 固有威胁评估指标体系

固有威胁评价问题属于多属性决策问题范畴,建立评价指标体系应遵循指标宜少不宜多、独立性、指标具有代表性、差异性与可行性的原则,基于陆基预警雷达的技战术参数,本方法从空域覆盖、空域重叠覆盖、频率覆盖、反隐身和技术体制五个方面设置陆基预警雷达固有威胁指标,分别从中高空目标探测能力、低空/超低空目标探测能力和隐身目标探测能力出发,构建陆基预警雷达威胁评估指标,如图1所示。

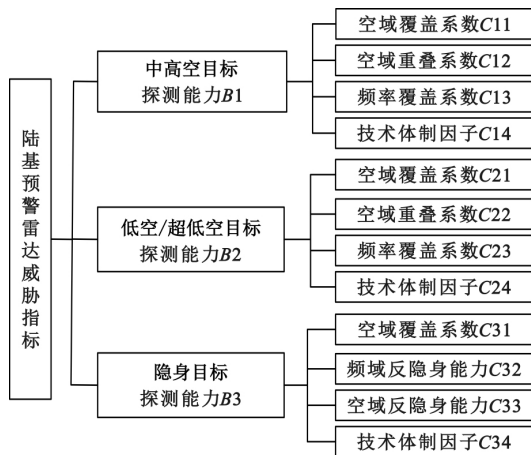


图1 陆基预警雷达威胁评估指标构成图

3 固有威胁评估指标计算模型

3.1 空域覆盖指标计算模型

假定敌雷达组网中任意雷达的在指定高度层的探测能力面积为 A_i ,整个敌雷达组网中所有雷达联合探测能力包络所组成的面积为 A ,则雷达 i 的中高空空域覆盖系数为式(1):

$$C11_i = \frac{A_i}{A} \quad (1)$$

如果指定责任区 A_0 ,则雷达 i 的中高空空域覆盖系数为式(2):

$$C11_i = \frac{A_i \cap A_0}{A_0} \quad (2)$$

低空/超低空空域覆盖系数、隐身目标空域覆盖系数计算与类似。

3.2 空域重叠覆盖指标计算模型

假定敌雷达组网中任意雷达 i 的在指定高度层与系统内其它雷达的探测能力重叠区面积为 A_{io} ,整个敌雷达组网中所有雷达联合探测能力包络所组成的面积为 A ,则雷达的空域重叠系数为式(3):

$$C12_i = \frac{A_{io}}{A} \quad (3)$$

如果指定责任区 A_0 ,则雷达 i 的空域重叠系数为式(4):

$$C12_i = \frac{A_{io} \cap A_0}{A_0} \quad (4)$$

低空/超低空空域重叠系数 $C22_i$ 计算与 $C12_i$ 类似。

3.3 频域覆盖指标计算模型

假定敌雷达组网中任意雷达 i 的工作频段为 Δf_i ,整个敌雷达组网中所有雷达工作频段为 Δf ,则雷达 i 的频率覆盖系数为式(5):

$$C13_i = \frac{\Delta f_i}{\Delta f} \quad (5)$$

如果指定责任频段为 Δf_0 ,则雷达 i 的空域重叠系数为式(6):

$$C13_i = \frac{\Delta f_i \cap \Delta f_0}{\Delta f_0} \quad (6)$$

频率覆盖系数 $C23_i$ 计算与 $C13_i$ 类似。

3.4 技术体制指标计算模型

技术体制因子可以量化表示为式(7):

$$C14 = \begin{cases} 1, & \text{相控阵} \\ 0.8, & \text{动目标显示、脉冲压缩、脉冲多普勒} \\ 0.6, & \text{频率捷变、频率分集、连续波} \\ 0.4, & \text{频扫、相扫、频相扫、圆锥扫描} \\ 0.2, & \text{简单脉冲、噪声等} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

技术体制因子 $C24$ 、 $C34$ 取值规则与 $C14$ 一致。

3.5 反隐身指标计算模型

频域反隐身能力可以量化表示为式(8):

$$C32 = \begin{cases} 1, & \text{米波雷达} \\ 0.5, & \text{天波超视距雷达} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

空域反隐身能力可以量化表示为式(9):

$$C33 = \begin{cases} 1, & \text{无源雷达} \\ 0.7, & \text{空基雷达} \\ 0.3, & \text{多基雷达} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

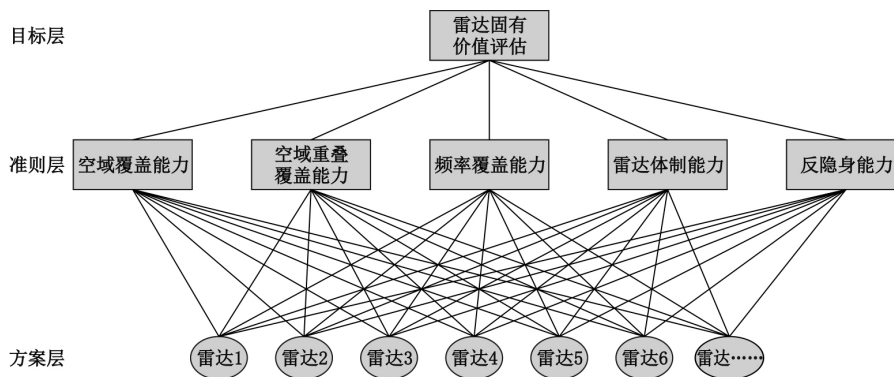


图2 固有威胁层次分析结构

4.2 构建专家判断矩阵

假设某一层有 n 个因素 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。要求比较该层的每一个因素对比上一层的某个因素的影响程度,确定在该层中相对于某一准则所占的比重。假设上一层有 m 个因素,该层有 n 个因素,那么对于该层则需求构建 m 个 $n \times n$ 的专家判断矩阵,专家判断矩阵构造因素重要程度见表1。

表1 重要程度对照表

序号	重要程度	含义
1	1	第 i 个因素与第 j 个因素的影响相同
2	3	第 i 个因素比第 j 个因素的影响稍强
3	5	第 i 个因素比第 j 个因素的影响强
4	7	第 i 个因素比第 j 个因素的影响明显强
5	9	第 i 个因素比第 j 个因素的影响绝对强
6	2、4、6、8	第 i 个因素比第 j 个因素的影响介于上述尺度间

矩阵构造完成后需对专家判断矩阵进行一致性检验,求取专家判断矩阵最大特征值 λ_{\max} 及特征值对应特征向量 \vec{w} ,则专家判断矩阵的一致性比率表示为:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n-1)} \quad (10)$$

其中 RI 为平均一致性数组,取值见式(11)。

$$\{0.0, 0.58, 0.9, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49, 1.51\} \quad (11)$$

4 基于层次分析法的固有威胁评估

4.1 构建层次结构模型

将敌雷达组网中雷达固有威胁层次分析结构分为目标层、方案层和准则层,如图4所示。

当 $CR < 0.1$ 时认为专家判断矩阵满足一致性要求。

4.3 构建目标属性矩阵

根据式(1~9),计算每个雷达的上述五个属性进行计算,将计算结论构造为目标属性矩阵,支撑层次分析计算。

4.4 构造属性因子矩阵

属性因子矩阵的维度为 $n \times 1$,其中 n 为构造目标属性矩阵选取的属性因子个数,且需满足式(12):

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_n = 1 \quad (12)$$

其中 $\omega_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为第 i 个属性因子的权重。

4.5 固有威胁计算

对敌雷达组网中的每一个雷达都进行上述5个属性量化值的计算,可得到一个 $n \times 5$ 的目标属性矩阵,结合专家判断矩阵、属性因子矩阵,即可计算出目标固有威胁。

首先将专家判断矩阵(A)进行列处理并归一化后与属性因子矩阵(B)线性加权,计算出 $n \times 1$ 的行权重矩阵(C),可表示为式(13)。

$$A_{i1} = \frac{\prod_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \right)} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (13)$$

$$C_{i1} = A_{i1} + (1-\lambda) B_{i1} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (14)$$

式(13)中 A_{i1} 表示专家判断矩阵处理后矩阵

A 中的第 i 个元素, 式(14)中 C_{ij} 表示行权重矩阵中的第 i 个元素, B_{ij} 表示属性因子矩阵的第 i 个元素。

将目标属性矩阵(D)与行权重矩阵相乘, 即可求得威胁因子矩阵(E), 可表示为式(15):

$$E = D * C \quad (15)$$

其中 E 为 $n \times 1$ 的矩阵, n 与分析目标数量相等, 矩阵中每一个数值为对应目标的固有威胁值。

5 仿真分析

5.1 仿真场景设置

仿真场景采用某岸基预警探测雷达网为分析对象, 包含陆基预警雷达站 15 个, 我方被探测平台高度为 2000 m, RCS 为 5.0, 雷达站基本信息见表 2, 雷达参数信息见表 3。

表 2 敌雷达仿真场景

序号	雷达编号	雷达型号	雷达位置
1	1001	A	108.94/11.65
2	1002	A	106.47/22.27
3	1003	B	105.80/21.00
4	1004	B	108.24/16.13
5	1005	C	106.21/20.77
6	1006	E	108.50/15.53
7	1007	D	105.79/19.77
8	1008	B	109.32/13.05
9	1009	C	108.70/11.17
10	1010	B	109.17/12.21
11	1011	E	108.42/15.55
12	1012	C	104.14/22.37
13	1013	B	106.50/21.08
14	1014	E	106.60/20.82
15	1015	A	107.72/20.13

表 3 雷达参数表

雷达型号	技术体制	频域反隐身	空域反隐身
A	频率捷变	其他	多基雷达
B	动目标显示	其他	多基雷达
C	简单脉冲	天波超视距	多基雷达
D	其他	米波雷达	其他
E	相控阵	其他	其他

5.2 专家判断矩阵设置

专家判断矩阵如表 4 所示。

表 4 专家判断矩阵

目标属性	空域覆盖	重叠覆盖	频域覆盖	技术体制	反隐身
空域覆盖	1	2	3	4	7
重叠覆盖	0.5	1	2	3	5
频域覆盖	0.33	0.5	1	2	3
技术体制	0.25	0.33	0.5	1	2
反隐身	0.14	0.20	0.33	0.5	1

5.3 目标属性矩阵计算

对上述每个雷达的目标属性进行计算, 得到目标属性矩阵为式(16):

$$\begin{pmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.8 & 0.3 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.8 & 0.3 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.3 \\ 0.1 & 0.1 & 0.6 & 1.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0.6 & 0.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.3 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0.6 & 0.0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.6 & 1.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.3 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0.6 & 0.0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.6 & 1.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.8 & 0.3 \end{pmatrix} \quad (16)$$

由表 4 可以得出本次仿真选取的专家判断矩阵为式(17):

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 7 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

该判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.0342$, 对应特征向量为 $[0.1322, 0.2659, 0.1547, 0.0942, 0.0529]$, 求解结果见式(18~19):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5.0342 - 5}{5 - 1} = 0.00855 \quad (18)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.00855}{1.12} = 0.0076 < 0.1 \quad (19)$$

由式(19)可知,该判断矩阵满足一致性要求。

求解出的雷达固有威胁结论见表5。可以看出,雷达固有威胁综合空域覆盖、重叠覆盖、频域覆盖、技术体制和反隐身能力,评估结论可量化,与预期结果一致,该技术已在项目中得到验证。

表5 雷达固有威胁结论表

序号	雷达编号	雷达型号	固有威胁
1	1001	A	0.276109
2	1002	A	0.276109
3	1003	B	0.293115
4	1004	B	0.293115
5	1005	C	0.192496
6	1006	E	0.274858
7	1007	D	0.175954
8	1008	B	0.293115
9	1009	C	0.192496
10	1010	B	0.293115
11	1011	E	0.274858
12	1012	C	0.192496
13	1013	B	0.293115
14	1014	E	0.274858
15	1015	A	0.276109

(上接第86页)

机航线类型确定以后,每一个飞行周期内能够提供的安全窗口数量是确定的,但是可以通过改变航线参数调整安全窗口的长度;3)多架干扰飞机协同执行压制干扰任务,能够增加安全窗口的数量,干扰飞机之间的间隔对安全窗口和最小压制距离均有影响。在实际执行任务过程中,需要综合考虑干扰机、雷达、突击飞机、挂载武器等性能指标,结合执行任务类型制定干扰飞机航线。

参考文献:

- [1] 段垣丽,王春阳,朱正友.外军电子干扰装备及战法研究[J].飞航导弹,2011(5):39-41.
- [2] 平殿发,张伟,张轹.远距离干扰模式下电子战飞机有效配置区域的确定[J].火力与指挥控制,2014,39(7):144-151.
- [3] 包磊,王春阳,李洪兵,等.远距离支援干扰下双隐身飞机自卫相参干扰对单脉冲雷达影响[J].系统

6 结束语

本文提出一种基于层次分析法的陆基预警雷达固有威胁评估方法,基于目标技战术参数对目标固有威胁度进行分析,辅助指挥员对关键目标进行提取,为指挥员进行目标对抗提供决策支撑。该方法适用于电子对抗日常作战筹划分析,辅助指挥员快速确定作战目标,下定作战决心。

参考文献:

- [1] 孙宏才,田平.网络层次分析法(ANP)与科学决策[C]//决策科学理论与方法.中国系统工程学会决策科学专业委员会第四届学术年会论文集,2001,C934:3-8.
- [2] 李文鹏,刘广建,梁良.基于Vague集的雷达对抗目标威胁评估方法[J].电子信息靶场,2017,27(1):7-11.
- [3] 陈田,刘正彬.信息不完全条件下基于改进TOPSIS法的目标威胁评估方法[J].电子信息对抗技术,2019,34(6):65-69.
- [4] 史小斌,顾红,苏卫民,等.地面侦察雷达目标威胁度评估方法研究[J].兵工学报,2015,36(6):1128-1135.
- [5] 肖峻,王成山,罗凤章.区间层次分析法的权重求解方法初探[J].系统工程与电子技术,2004,26(11):1597-1600.
- [6] 工程与电子技术,2019,41(9):1973-1983.
- [4] 贺卫东,王建涛,栗苹,等.针对警戒雷达的机载远距离支援干扰动态压制区域研究[J].测试技术学报,2011,25(6):489-493.
- [5] 杨刚,郭建蓬,赵俊阳.多干扰机间夹角对雷达暴露区的影响[J].指挥控制与仿真,2017,39(4):35-38.
- [6] 顾小港,李仙茂,甘厚吉,等.电子战飞机海上作战航路计算方法研究[J].舰船电子工程,2020,40(3):18-21.
- [7] 刁华伟,党立坤,张建科.电子战飞机远距离支援干扰有效区分析与仿真[J].舰船电子工程,2010,30(6):99-101.
- [8] 向崇文,姜青山,何玉松,等.电子战飞机远距离支援干扰阵位配置建模与仿真[J].火力与指挥控制,2017,42(4):53-57.
- [9] 张玉琳,蒋里强,王纯,等.有源压制干扰压制区计算数学模型[J].舰船电子工程,2014,34(11):83-85.
- [10] 王国玉,汪连栋.雷达电子战系统数学仿真与评估[M].北京:国防工业出版社,2004.