

电子防空目标威胁等级评估模型研究

刘冰雁, 刘湘伟, 郝成民, 郭建蓬

(电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: 电子防空目标的威胁等级评估是电子对抗领域的一个重要研究课题, 干扰资源的配置以等级评估作为基础。准确、高效地评判出众多来袭目标的威胁程度成为亟待解决的问题。从战术角度分析目标的基本属性, 建立了目标的特征要素, 提出并建立了一种计算电磁特征威胁等级的模型, 最终通过实例证明了该模型的有效性与可行性。

关键词: 电子防空; 电磁信号; 威胁评估; 多属性群组决策

中图分类号: TN97

文献标识码: A

文章编号: CN32-1413(2014)01-0057-05

Research into Threat Grade Evaluation Model of Electronic Air Defense Target

LIU Bing-yan, LIU Xiang-wei, HAO Cheng-min, GUO Jian-peng

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Threat grade evaluation of electronic air defense target is an important investigative problem in electronic countermeasure domain. The jamming resources collocation is based on grade evaluation. How to judge the threat grade of various air attack targets exactly and effectively has become the urgent problem to be solved. This paper analyzes basic attributes of the targets from tactical perspective, sets up the target characteristic element, puts forward and sets up a model to calculate the threat level of electromagnetic characteristics, finally proves the validity and feasibility of the model through practical example.

Key words: electronic air defense; electromagnetic signal; threat evaluation; multi-attribute group decision-making

0 引 言

在未来战场上, 电子对抗在防空斗争中发挥着越来越重大的作用^[1], 正确评估敌方的战斗能力是采取电子对抗行动的前提, 而有效评估来袭目标的威胁能力是对敌方作战能力评估的重要内容。电子防空目标威胁等级评估实际上是指地面防空系统稳定跟踪了若干来袭目标后, 依据侦察得到的数据信息结合作战需求, 对这些空中电子对抗目标进行威胁评估和排序。本文全面分析了来袭目标的构成和能力, 从战术的角度建立了威胁目标特征要素指标, 并建立了电磁特征威胁评估模型, 将多属性群组决策和模糊数学理论相结合, 并引入了电子防空目标威胁评估领域, 最后在一定的战情条件下对该方法进行

行了实例验证。

1 电子防空目标基本属性分析

1.1 电子防空目标构成分析

电子防空目标是电子对抗作战领域的军事目标, 可以理解电子对抗作战所要打击的对象是电子作战目标, 即针对电子作战目标而言所产生的构成分析。有多种划分电子对抗目标的方法, 本文按电磁威胁层次对目标进行了划分, 如图 1 所示。

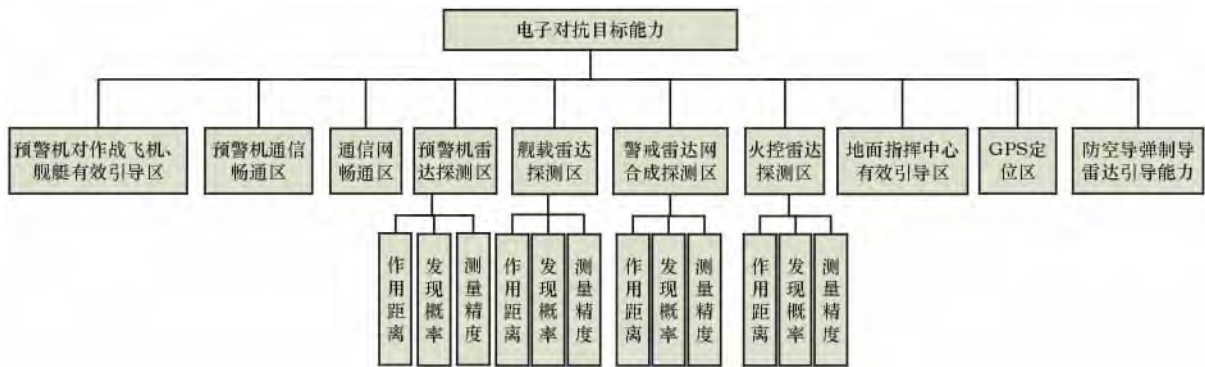
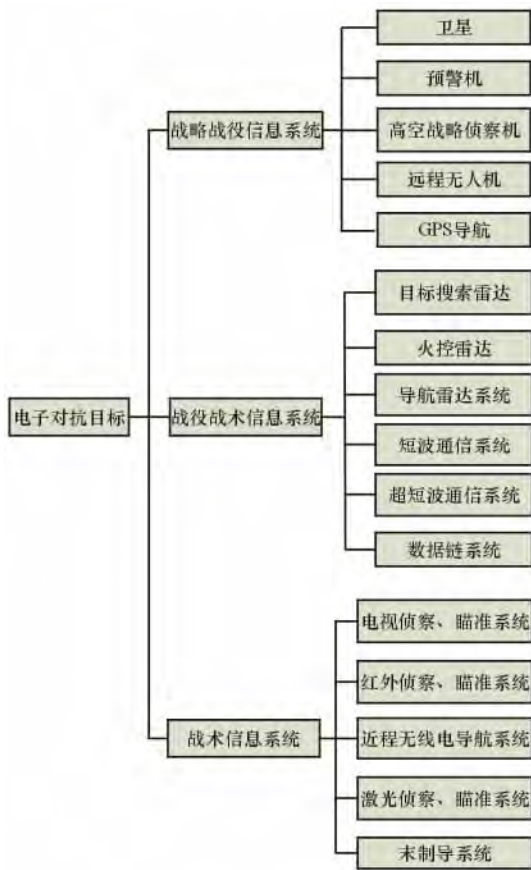
1.2 电子防空目标能力分析

电子防空中, 电子对抗目标的作战能力是需要重点关注的对象, 对其能力分析的结论可以为判定敌方目标威胁等级和确定我方电子对抗作战力量部署提供参考。将这些电子防空目标能力归结为雷达

收稿日期: 2013-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, 项目编号: KY09016; 军队 863 科研项目

能力、通信系统能力、卫星能力,如图 2 所示。



(3) 电磁信号特征 C_3

空间有源目标向战场空间发送的电磁信号无论是形式上还是内容上都存在不同,从而可以将电磁信号特征作为电子对抗目标评估威胁等级的重要指标。电磁信号特征按频率可划分为雷达信号、通信信号和光电信号。

(4) 辐射散射特征 C_4

2 电子防空目标威胁评估

在电子防空,基于对空间战场威胁的理解和认识,本文构建了一个电子防空目标特征评估模型判定电子对抗目标的威胁程度。

2.1 电子防空威胁目标特征指标

对于电子防空威胁特征指标的提取,必须在经过融合和变换后得到的信息数据中,从战术的角度选出最能反映电子对抗目标本质的指标。通过分析研究电子防空的作战任务及原则,选择出以下要素作为电子防空威胁目标的特征指标,如图 3 所示。

2.2 特征指标分析

(1) 运动特征 C_1

将战场各类电子对抗目标(如预警机和机载雷达等)的动态特征称为运动特征,其主要包括在某时刻的高度、速度和距离及目标姿态的各种数据。这些数据主要通过目标搜索、捕获及跟踪测量设备来获取,指标的确定可参考文献[2]。

(2) 形体特征 C_2

形体特征是电子防空目标的外观特征,主要指威胁目标的几何形状、尺寸大小、质量及材料。其分析可参照文献[3]。通过形体特征的获取,能够大概评判出敌方威胁目标的装备类型,对电子对抗行动具有非常重要的意义。

威胁目标红外光的散射特征与辐射、可见光的散射特征与辐射以及雷达散射特征构成了辐射散射特征的三大类,各威胁目标的散射特征具有较大差异。

其目标辐射散射的特征参数可以通过分析其辐射散射特征获取,其特征参数指标的获取可参考文献[3]。在这三大类中,目标温度及温度的变化情况

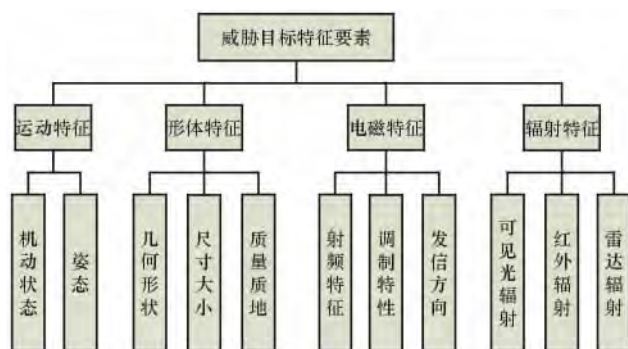


图 3 电子防空威胁目标特征指标

(尾焰)是由目标的红外辐射散射特性确认的;目标的亮度信息及成像信息通过可见光散射辐射特征获取;目标的材料和成像信息由雷达散射特征得到。

2.3 电磁特征威胁评估模型

在一般的评估中,要想得出客观、准确的结果就必须慎重地选择评估指标,指标太少无法达到精确度,考虑因素过多则会加大评估工作量和难度,难以保证评估结果的时效性。因此,雷达和通信信号威胁评估指标必须要在全面分析电磁信号威胁影响的前提下科学选取,最终的评估指标如图 4 和图 5 所示。

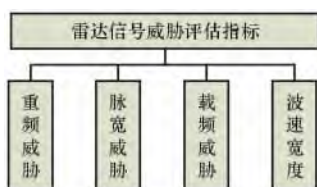


图 4 雷达信号威胁评估指标

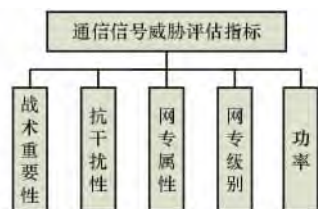


图 5 通信信号威胁评估指标

2.3.1 雷达信号威胁评估模型

(1) 重频威胁

当对抗的雷达平台对我方实施攻击时重频会出现波动,且重频越高威胁程度也越高。重频威胁因子的计算模型为:

$$\mu_1(f_1) = \begin{cases} 1 - e^{-(x_1-0.1)^2}, & x_1 > 0.1 \\ 0, & 0 < x_1 \leq 0.1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1 为当前被评估雷达的脉冲重复频率。

(2) 脉宽威胁

对抗目标雷达脉宽越窄,雷达的距离分辨力就越好,即能分辨出同一方向上距离很近的 2 个目标。因此,当雷达的其它工作参数相仿时,脉冲宽度越小,距离分辨力越高,雷达的威胁程度越大。脉宽威胁因子的计算模型为:

$$\mu_1(f_2) = \frac{x_{2\max} - x_2}{x_{2\max} - x_{2\min}} \quad (2)$$

式中: $x_{2\max}$ 和 $x_{2\min}$ 为待评估雷达脉冲宽度的最大值和最小值; x_2 为当前评估雷达的脉冲宽度值。

(3) 载频威胁

根据目标载频高低可以概略评估目标雷达方位分辨力。因此,当敌方雷达的其它参数相仿时,对我方的威胁程度就由工作频率决定,频率越高,威胁越大。载频威胁因子的计算模型为:

$$\mu_1(f_3) = \frac{x_3 - x_{3\min}}{x_{3\max} - x_{3\min}} \quad (3)$$

式中: $x_{3\max}$ 为所有待评估雷达中工作频率的最大值; $x_{3\min}$ 为所有待评估雷达中工作频率的最小值; x_3 为当前评估雷达的工作频率值。

(4) 波束宽度

目标雷达天线的波束宽度与雷达的角度分辨力密切相关。当雷达的其它参数相近时,天线波束宽度越小,雷达的角度分辨力越高,雷达的威胁程度越大。波束宽度的计算模型为:

$$\mu_1(f_4) = \frac{x_{4\max} - x_4}{x_{4\max} - x_{4\min}} \quad (4)$$

式中: $x_{4\max}$ 为所有待评估雷达中波束宽度的最大值; $x_{4\min}$ 为所有待评估雷达中波束宽度的最小值; x_4 为当前评估雷达的波束宽度值。

2.3.2 通信信号威胁评估模型

(1) 战术重要性

它是依据目标通信链路的战术重要性所确定的威胁指数,主要考虑 3 种情况^[4]:

(a) 属于本次对抗目标,符合作战任务,目标确定在干扰的区域内,此时隶属度函数取值为 a_1 ;

(b) 不属于本次对抗目标,但在干扰区域内的对抗目标,此时隶属度函数取值为 a_2 ;

(c) 不属于本次电子对抗行动也不在干扰区域内的目标,此时隶属度函数取值为 a_3 。

将威胁因子的评估模型记为:

$$\mu_2(f_1) = a_i \quad (5)$$

式中: $i=0,1,2,3; 0 \leq a_3 < a_2 < a_1 \leq 1$ 。

(2) 抗干扰性

它是依据威胁目标的抗干扰措施所选取的威胁指数。通信的抗干扰措施在技术上主要包括自适应通信信道、自适应天线阵、扩展频谱通信、保密通信、碎发通信、开发使用新的通信频段、开发使用新的通信信道、提高接收端信号强度。其威胁因子的评估模型为:

$$\mu_2(f_2) = \begin{cases} n/8, n < 8 \\ 1, n \geq 8 \end{cases} \quad (6)$$

式中: n 为被干扰目标所采取的抗干扰措施的种类。

(3) 网专属性

威胁指标是依据通信网的性质所选取的。构造威胁目标的网专属性集合为: $S_{WS} = \{S_{WS1}, \dots, S_{WS5}\} = \{\text{指挥通信, 后方通信, 协同通信, 报知通信, 警报通信}\}$ 。将评估元素 $S_{WSi} (i=1, \dots, 5)$ 重要程度的语言信息 s_{ik} 转变为区间模糊数形式^[5]:

$$\begin{cases} \hat{r}_{ik}^{WS} = (r_{ik}^1, r_{ik}^2, r_{ik}^3) = \left(\max \left\{ k - \frac{1}{F_{WS}}, 0 \right\}, \frac{k}{F_{WS}}, \min \left\{ k + \frac{1}{F_{WS}}, 1 \right\} \right) \\ \tilde{d}_{ik}^{WS} = [d_{ik}^{WSL}, d_{ik}^{WSU}] = \left[\left(\frac{r_{ik}^1 + r_{ik}^2}{2}, \frac{r_{ik}^2 + r_{ik}^3}{2} \right) \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_{WS} 表示网专属性威胁语言评价集规模, 一般为偶数; k 为语言集 S 中的第 $k (k=0, 1, 2, \dots, F)$ 个语言评价信息; \tilde{d}_{ik}^{WS} 表示三角模糊数转化为区间数的形式。

威胁目标的网专属性 f_3 与集合 S_{WS} 的关联程度表达式如下:

$$W(f_3 \cap S_{WSi}) = \begin{cases} 0, f_3 \cap S_{WSi} = \Phi \\ 1, f_3 \cap S_{WSi} \neq \Phi \end{cases} \quad (8)$$

因此, 威胁目标的网专属性威胁因子的评估模型为:

$$\mu_2(f_3) = [W(f_3 \cap S_{WS1}), \dots, W(f_3 \cap S_{WS5})] \times [\tilde{d}_{1k}^{WS}, \dots, \tilde{d}_{5k}^{WS}]^T \quad (9)$$

(4) 网专级别

威胁指数依据网专的级别确定, 通常级别越高对我方的威胁程度越大。可以将网专的级别分为: $B_{WJ} = \{B_{WJ1}, \dots, B_{WJ6}\} = \{\text{军以上, 军, 师, 旅, 营, 营以下}\}$ 。将评价元素 $B_{WJi} (i=1, \dots, 6)$ 重要程度的语言信息 s_{ik} 转变为模糊区间数形式^[5]:

$$\begin{cases} \hat{r}_{ik}^{WJ} = (r_{ik}^1, r_{ik}^2, r_{ik}^3) = \left(\max \left\{ k - \frac{1}{F_{WJ}}, 0 \right\}, \frac{k}{F_{WJ}}, \min \left\{ k + \frac{1}{F_{WJ}}, 1 \right\} \right) \\ \tilde{d}_{ik}^{WJ} = [d_{ik}^{WJL}, d_{ik}^{WJU}] = \left[\left(\frac{r_{ik}^1 + r_{ik}^2}{2}, \frac{r_{ik}^2 + r_{ik}^3}{2} \right) \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中: F_{WJ} 表示网专级别威胁语言评价集规模, 一般为偶数; 其余参数同上。

威胁目标的网专级别 f_4 与集合 B_{WJ} 的关联程度表达式如下:

$$J(f_4 \cap B_{WJi}) = \begin{cases} 0, f_4 \cap B_{WJi} = \Phi \\ 1, f_4 \cap B_{WJi} \neq \Phi \end{cases} \quad (11)$$

于是, 网专级别威胁因子的评估模型为:

$$\mu_2(f_4) = [J(f_4 \cap B_{WJ1}), \dots, J(f_4 \cap B_{WJ6})] \times [\tilde{d}_{1k}^{WJ}, \dots, \tilde{d}_{6k}^{WJ}]^T \quad (12)$$

(5) 功率

威胁指标主要依据发射机、接收机的距离和干扰机、接收机之间的距离, 以及发射机的功率所确立。功率威胁因子的评估模型为:

$$\mu_2(f_5) = \begin{cases} p_i / p_{\max}, p_i < p_{\max} \\ 1, p_i \geq p_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: p_i 为所需的干扰功率; p_{\max} 为干扰设备所能干扰的最大干扰功率的临界值。

2.4 电子防空目标威胁评估模型

多属性群决策采用定性与定量相结合, 并加上人的偏好信息对目标进行评估, 是一种求解多目标决策非常有效的方法。本文在全面研究电子防空目标属性、建立威胁评估指标的基础上, 将模糊数学理论和多属性群决策相结合引入至电子防空目标威胁评估领域。

第 1 步, 建立决策矩阵。设侦察发现 n 个威胁目标, 记为 $T_i (i=1, 2, \dots, n)$, 为评估这些目标的威胁等级, 建立了决策矩阵 $D = [x_{ij}]_{n \times 4}$, $x_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, 4)$ 是目标 T_i 关于特征要素 C_j 的属性值, $C_j (j=1, 2, 3, 4)$ 是 2.2 节中建立的威胁目标特征要素。

第 2 步, 构造加权标准化矩阵 $v = [v_{ij}]_{n \times 4}$ 。其中, $v_{ij} = \omega_j \cdot x_{ij}$ 。

第 3 步, 计算最大威胁解与最小威胁解。顾名思义, 最大威胁解是每个目标属性都取该属性下各目标中威胁值最大的解; 最小威胁解则是威胁值最小的解:

$$V^+ = \{\max_{1 \leq i \leq m} v_{ij}\} = \{v_1^+, v_2^+, v_3^+, v_4^+\} \quad (14)$$

$$V^- = \{\min_{1 \leq i \leq m} v_{ij}\} = \{v_1^-, v_2^-, v_3^-, v_4^-\} \quad (15)$$

第 4 步,确定各目标方案到最大威胁解的距离 S_i^+ 和最小威胁解的距离 S_i^- :

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

第 5 步,计算各目标解对 V^+ 的相对贴近度 C_i :

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}, i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

由上式可得,相对贴近度 C_i 的大小反映了各威胁目标解靠近最大威胁解、同时远离最小威胁解的程度。当目标解与最大威胁解的距离 $S_i^+ = 0$, 同时与最小威胁解的距离 $S_i^- = 1$ 时,则相对贴近度最大。

第 6 步,按 C_i 由大到小的顺序排列目标的优先顺序,即为电子对抗目标威胁等级由大到小的排序结果。

3 计算举例

某电子防空中,根据侦察得到对我要地构成威胁的 4 个来袭目标,其特征要素如表 1 所示。

表 1 威胁指数值

目标	C_1	C_2	C_3 (雷达)	C_4
T_1	1.000	0.750	0.825	1.000
T_2	0.600	0.500	0.525	0.500
T_3	0.100	0.125	0.240	0.100
T_4	0.100	0.875	0.525	0.700

参考文献[6]18.2.2 节确定权重的方法,得到威胁评估属性的权向量 $\omega = \{0.35, 0.30, 0.20, 0.15\}$ 。按照 2.3 节中论述的评估基本步骤,得到表 2、表 3 和表 4。

表 2 规范决策矩阵

目标	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}
T_1	0.400	0.112	0.124	0.100
T_2	0.240	0.075	0.079	0.050
T_3	0.040	0.018	0.036	0.010
T_4	0.040	0.131	0.079	0.070

表 3 理想解和负理想解数值

威胁指数	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}
V^+	0.400	0.131	0.124	0.100
V^-	0.040	0.018	0.036	0.010

最后根据步骤 6,可以得到最终的雷达目标威胁等级排序为: $T_1 > T_2 > T_4 > T_3$ 。

表 4 每个方案的 S_i^+ 、 S_i^- 和 C_i 数值表

目标	S_i^+	S_i^-	C_i
T_1	0.019 0	0.410 7	0.955 7
T_2	0.218 3	0.216 0	0.497 3
T_3	0.413 2	0.008 0	0.018 9
T_4	0.376 4	0.137 0	0.266 8

4 结束语

伴随着新型航空武器的不断问世,通信、雷达等电子设备在现代电子防空中起着越来越至关重要的作用。面对众多的来袭目标,快速、高效、可靠地判断它们的威胁等级对实施电子对抗辅助决策显得尤为重要。

本文对来袭目标进行了构成及能力分析,在此基础上依据战术需求提出了来袭目标特征要素指标,并对其中电磁特征建立了威胁评估模型。引入模糊数学将复杂问题简化为数学问题,基于多属性群决策给出目标威胁评估方法。计算举例表明,该方法简单易行,评价结论客观公正。

参考文献

- [1] 王汝群. 防空作战革命——电子防空 [M]. 北京: 解放军出版社, 2009.
- [2] 姚成才, 苏同领. 基于模糊多属性群决策的雷达辐射源威胁评估方法[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(4): 34-38.
- [3] 刘进军. 空间战场威胁评估方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [4] 岑新龙, 王少建. 通信干扰目标威胁评估模型研究[J]. 舰船电子工程, 2010(8): 78-80.
- [5] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华法学出版社, 2004.
- [6] 徐南荣, 仲伟俊. 现代决策理论与方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 2001.