

一种度量战场电磁环境复杂度的新方法

代强伟, 李修和, 薛磊, 赵顺凯

(电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: **目的** 研究电子目标环境复杂度度量问题。**方法** 选取复杂度评估指标, 然后建立各个评估指标的模型, 最后将层次分析法与灰色理论结合应用于电磁环境复杂度评估。**结果** 复杂度评估指标包括电磁信号类型样式、频率重合度、方向重合度、背景信号强度、电磁信号密度等5个方面。建立了这5个评估指标的模型, 并结合具体电磁环境中装备实例, 运用灰色层次分析法评估得出电磁环境复杂程度为中等复杂。**结论** 算例和分析结论表明灰色层次分析法在评估战场电磁环境复杂度上适用。

关键词: 电磁环境复杂度; 灰色层次分析法; 评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.020

中图分类号: TJ01; X123 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0105-05

A New Method for Measuring the Complexity of the Battlefield Electromagnetic Environment

DAI Qiang-wei, LI Xiu-he, XUE Lei, ZHAO Shun-kai

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

ABSTRACT: **Objective** To study how to measure the complexity of electronic target environment. **Methods** Firstly, the evaluation index of the complexity was selected, then models for each evaluation index was established, and finally the analytic hierarchy process (AHP) and the grey theory were combined for application in evaluation of electromagnetic environment complexity. **Results** The evaluation indexes for complexity included the electromagnetic signal style, the frequency coincidence, the direction coincidence, the background signal strength and the electromagnetic signal density. Then the model of the five evaluation indexes was established. In combination of practical examples of equipment in specific electromagnetic environment, the complexity of electromagnetic environment was evaluated as medium by the method of gray analytic hierarchy process (GAHP). **Conclusion** Calculation and analysis results indicated that the gray analytic hierarchy process was suitable for the evaluation of complexity of battlefield electromagnetic environment.

KEY WORDS: complexity of electromagnetic environment; GAHP; evaluation

收稿日期: 2015-03-30; 修订日期: 2015-04-18

Received: 2015-03-30; Revised: 2015-04-18

基金项目: 装备预研基金重点项目(9140A33020112JB39085)

Fund: Supported by the National Defense Pre-research Key Fund Program(9140A33020112JB39085)

作者简介: 代强伟(1992—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要研究方向为战场电磁环境建模仿真。

Biography: DAI Qiang-wei(1992—), Male, from Maanshan, Anhui, Master graduate student, Research focus: modeling and simulation of battlefield electromagnetic environment.

由于信息技术的飞速发展,在现代战场上,敌我双方使用大量的电子战装备。这些电子战装备体制复杂,种类多,功率大,覆盖频域宽,所包含的电磁活动非常广泛,造成战场空间电磁信号密集,电磁信号环境复杂。战场电磁环境复杂度是度量战场电磁环境复杂特性的重要指标,对研究战场电磁环境分类分级、战场电磁分析及电子装备部署与电磁协同均有着重要的指导作用和参考价值。由此对战场电磁环境复杂度的研究是必要的。

电磁环境复杂度在对象上有所区分,分为电子目标环境的复杂度和干扰环境的复杂度。电子目标环境复杂度是用频装备所处的环境电磁复杂度,这个环境是已有的外部电磁环境,具有客观性。干扰环境复杂度是干扰装备所生成,具有主观性。传统的“四域”方法只考虑了辐射源辐射所构成的环境,并且之前人们所做的研究往往没有对复杂度进行区分,指标模型选取建立不具有针对性。文中将二者区别对待,针对电子目标环境复杂度评估展开研究,建立合理的指标。

灰色层次分析法将层次分析法同灰色理论相结合,将定性分析与定量分析相结合,将专家经验有效化,适合用于分析无法定量解决的问题。文中针对电子目标环境复杂度难以定量评估的问题,提出灰色层次分析法(GAHP)的解决方案,建立层次模型,获取评估矩阵,结合灰色理论评估复杂度。

1 复杂度评估指标

1.1 复杂度评估指标的选取

时变功率密度谱 $S(r, t, f)$ 是一个相对复杂的数学表达式,它不能简单直观地对电磁环境进行描述。人们为了描述复杂的战场电磁环境,基于时域、频域、空域、能域这“四域”,先后提出时间占有度、频谱占有度、空间覆盖率、平均功率谱密度、电磁设备干扰度、背景信号强度等多种定量指标。电子目标环境复杂度指标的选取,既要考虑电磁信号环境的客观性,也要考虑对电子对抗装备的影响,同时还要考虑指标在实际使用中的可操作性。根据战场上实际电磁环境的辐射源复杂性,信号密集性,背景信号复杂性等实际特性,选取以下指标:电磁信号类型样式、频率重合度、方向重合度、背景信号强度、电磁环境信号密度。

1.2 电子目标电磁环境评估指标模型

1) 电磁信号类型样式。在一定的战场空间里,辐

射源种类数量越多,信号调制方式越繁杂,则对电子对抗装备影响越大,电磁环境越复杂。假设用频设备在正常的情况下可识别的信号样式数量为 K_1 ,最大可识别信号样式数量为 $K_{\max}$, K 表示当前战场空间内信号样式数量,则信号类型样式复杂度可用式(1)表示:

$$K_{\text{mod}} = \begin{cases} 0.1; & \text{只存在常规信号} \\ 0.1 + 0.3K_1/K; & K < K_1 \\ 0.4 + 0.3 \frac{2(K - K_1)}{K_{\max} - K_1}; & K_1 \leq K \leq \frac{K_1 + K_{\max}}{2} \\ 0.7 + 0.3 \frac{K - K_1}{K_{\max} - K_1}; & \frac{K_1 + K_{\max}}{2} \leq K \leq K_{\max} \\ 1; & K \geq K_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

2) 频率重合度。频率重合度反映了电子对抗装备与电磁环境中信号频率的重合程度,也体现出电磁信号环境对装备的影响程度,频率重合度模型为:

$$FR = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta f_r} U(f_{\max} - f_{\min}) \quad (2)$$

式中: $U(X)$ 为阶跃函数; Δf_r , $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 由式(3)—(5)得出:

$$\Delta f_r = f_{r\max} - f_{r\min} \quad (3)$$

$$f_{\max} = \min[f_{r\max}, f_{j\max}] \quad (4)$$

$$f_{\min} = \max[f_{r\min}, f_{j\min}] \quad (5)$$

式中: $f_{r\max}$ 为装备接收机带宽的上限; $f_{r\min}$ 为装备接收机带宽的下限; $f_{j\max}$ 为辐射源信号带宽的上限; $f_{j\min}$ 为辐射源带宽的下限。

3) 方向重合度。方向重合度反映用频装备和电磁信号辐射源的方位关系,方向重合度越高则电磁环境复杂度越高。方向重合度模型为:

$$SR = \frac{G_{\eta}(\theta)}{G_r} \quad (6)$$

式中: G_r 为用频装备接收天线在目标方向上的接收增益; $G_{\eta}(\theta)$ 为用频装备在辐射源信号方向上的增益。

4) 背景信号强度。背景信号指装备在战场空间中所接收到的各种电磁信号电平的平均值,背景信号种类越多,平均电平越高,则环境复杂度越高。背景信号强度模型:

$$K_{En} = \frac{E_n - S_0}{E_n} \quad (7)$$

式中: E_n 为背景信号的平均电平; S_0 为产生干扰的电磁环境信号功率密度谱的最小值,即电磁环境门限。

5) 电磁信号密度。电磁信号密度是指在一定的

战场空间,一定的频段范围内,装备所接收到的电磁信号的数量,可用系数 K_ρ 来反映电磁环境复杂度:

$$K_\rho = \begin{cases} \frac{\rho_1}{\rho}; \rho_1 < \rho \\ 1; \rho > \rho \end{cases} \quad (8)$$

式中: ρ_1 为电磁环境信号密度; ρ 为装备对电磁环境所能承受的信号密度。

2 灰色层次分析法评估复杂度步骤

1) 构造层次结构模型。将战场电磁环境复杂度作为目标层,为实现这个目标提出5个评估指标作为指标层,分别为电磁信号类型样式、频率重合度、方向重合度、背景信号强度、电磁信号密度。

2) 确定指标权重标度并获得判断矩阵。为将各指标之间进行量化比较并得到判断矩阵,需引入一种标度,标度有不同的种类,常用的有1—9标度。1代表指标 i 与指标 j 同等重要;3代表指标 i 略微比标 j 重要;5代表指标 i 明显比标 j 重要;7代表指标 i 当然比标 j 重要;9代表指标 i 绝对比标 j 重要。2,4,6,8是中间值,若指标 i 不如 j 重要,则取上述标度的倒数。判断矩阵为:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (9)$$

3) 指标权重计算与一致性检验。指标权重的计算问题可归结为判断矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征向量和最大特征值的计算,得权向量 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 和最大特征值 $\lambda_{\max}$ 。由于不同的人对事物因素两两比较时,不可能做到标准一致,存在误差,为了提高权重评价的可靠性,需要对判断矩阵做一致性检验。一致性检验过程为:

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

式中: n 为矩阵的维数,也是矩阵指标个数; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值。当矩阵维数较大时,一致性指标需要修正:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

式中: RI 为修正因子,维数不同,取值也不同。维数为1~9时对应的 RI 分别为0.00,0.00,0.58,0.90,1.12,1.24,1.32,1.41,1.45。当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵满足一致性,否则要对判断矩阵做适当修正。

4) 确定评估指标矩阵。假设有 n 个专家对 m 个

指标进行评估, d_{ij} 表示第 j 个专家对第 i 个指标的评估值,则可得目标的评估矩阵为(可设定评估值范围1~10):

$$D_{ij} = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{pmatrix} \quad (12)$$

5) 确定评估灰类。确定评估灰类,就是确定战场电磁环境复杂度的灰类评价等级数、灰数和白化权函数。白化权函数通常有以下几类,第一灰类,灰数为 $\oplus \in [d_1, \infty)$,白化权函数为:

$$f_1(d_{ij}) = \begin{cases} \frac{d_{ij}}{d_1}, (d_{ij} \in [0, d_1]) \\ 1, (d_{ij} \in [d_1, \infty]) \\ 0, (d_{ij} \in [-\infty, 0]) \end{cases} \quad (13)$$

第二灰类,灰数为 $\oplus \in [0, d_1, 2d_1)$,白化权函数为:

$$f_2(d_{ij}) = \begin{cases} \frac{d_{ij}}{d_1}, (d_{ij} \in [0, d_1]) \\ 2 - \frac{d_{ij}}{d_1}, (d_{ij} \in [d_1, 2d_1]) \\ 0, (d_{ij} \in [0, 2d_1]) \end{cases} \quad (14)$$

第三灰类,灰数为 $\oplus \in [0, d_1, d_2)$,白化权函数为:

$$f_3(d_{ij}) = \begin{cases} 1, (d_{ij} \in [0, d_1]) \\ \frac{d_2 - d_{ij}}{d_2 - d_1}, (d_{ij} \in [d_1, d_2]) \\ 0, (d_{ij} \in [0, d_2]) \end{cases} \quad (15)$$

6) 计算灰色评估系数。对于评估指标 i ,电磁环境复杂度属于灰类 k 的评估权系数与总评估权系数为:

$$h_{ij} = \sum_{n=1}^n f_k(d_{in}) \quad (16)$$

$$h_i = \sum_{k=1}^4 h_{ik} \quad (\text{复杂度分为4级}) \quad (17)$$

7) 计算灰色评估权向量和权矩阵。根据评估系数 h_{ik} 和 h_i ,计算出评估指标 i 的灰色评估权向量 r_i : $r_i = (h_{i1}/h_i, h_{i2}/h_i, \dots)$,由此可得评估权矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{q1} & \cdots & r_{qk} \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中: q 为指标数目; k 为灰类数。

8) 灰色综合评估。灰色综合评估方法为各级权重与灰色权矩阵的乘积,最后结合灰数将最后结果归一化,确定最终的结论。

3 电子目标电磁环境复杂度评估应用实例分析

环境设定:假定某战场空间中某电子对抗装备用频设备的频段范围是20~60 MHz,即 $\Delta f_r=40$ MHz,最大信号环境适应能力为 10^4 。正常工作情况下可识别3种信号样式,最多可识别6种。该装备部署在某地域时,经侦测得到装备周围空间存在4种样式的信号,信号密度系数为5400,其中频带重合度约为45%,经仪

器检测背景信号强度为 $2.8 P_{\min}$,用频装备天线与辐射源信号方向重合度为0.5。由上述条件可得电磁环境复杂度指标值:

$$K_{\text{mod}} = 0.6 \tag{19}$$

$$FR=0.45 \tag{20}$$

$$SR=0.5 \tag{21}$$

$$K_p = \rho_1 / \rho = 0.54 \tag{22}$$

$$K_{En} = \frac{2.8P_{\min} - P_{\min}}{2.8P_{\min}} = 0.64 \tag{23}$$

各项指标的比较和判断矩阵的获得见表1。

表1 指标的比较

Table 1 Comparison of indexes

	电磁信号类型样式	频率重合度	方向重合度	背景信号强度	电磁信号密度
电磁信号类型样式	1	1/3	1/3	1/7	1/5
频率重合度	3	1	1	1/5	1/3
方向重合度	3	1	1	1/5	1/3
背景信号强度	7	5	5	1	3
电磁信号密度	5	3	3	1/3	1

表1中数值为纵向指标与横向指标重要程度比较的比值,方法见第2节步骤2。

判断矩阵A为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 1/7 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 7 & 5 & 5 & 1 & 3 \\ 5 & 3 & 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \tag{24}$$

利用方根法计算得出指标权向量 $\omega = [0.2403 \ 0.2127 \ 0.2127 \ 0.1575 \ 0.1830]^T$,并利用MATLAB计算出最大特征值 $\lambda_{\max}=5.1269$ 。代入式(10),(11)得一致性检验CI为0.0317,CR为0.0238。

选取4位专家对复杂度指标进行评分:

$$D = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 3 & 2 \\ 5 & 5 & 4 & 4 \\ 5 & 4 & 5 & 4 \\ 9 & 8 & 8 & 8 \\ 7 & 6 & 7 & 6 \end{bmatrix} \tag{25}$$

将电磁环境复杂度分为重度、中度、轻度、简单4个等级,分别用9,7,5,3来表示,灰色评估系数矩阵为:

$$H = \begin{bmatrix} 10/9 & 10/7 & 2 & 4 \\ 2 & 18/7 & 18/5 & 1 \\ 2 & 18/7 & 18/5 & 1 \\ 33/9 & 23/7 & 7/5 & 0 \\ 20/9 & 26/7 & 5/2 & 0 \end{bmatrix} \tag{26}$$

再计算出评估矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 0.13 & 0.17 & 0.23 & 0.47 \\ 0.22 & 0.28 & 0.39 & 0.11 \\ 0.22 & 0.28 & 0.39 & 0.11 \\ 0.44 & 0.39 & 0.17 & 0 \\ 0.26 & 0.44 & 0.30 & 0 \end{bmatrix} \tag{27}$$

综合评估结果为:

$$P = \omega^T \cdot R = [0.24 \ 0.30 \ 0.30 \ 0.16] \tag{28}$$

故战场区域电磁环境复杂度评估为:

$$P' = P \cdot [9 \ 7 \ 5 \ 3]^T = 6.2822 \tag{31}$$

该结果介于5和7之间,所以电磁环境复杂度属于中度复杂。

4 结语

文中将灰色理论同层次分析法相结合,建立评估模型,着力解决电子目标电磁环境复杂度评估这一难以定量分析的问题,模型将专家经验有效化,实现了主观与客观的统一。该方法同样存在不足,如何确保准确度是一个难以把握的问题,指标的提出和细化以及选取都将是下一步亟待研究的问题。

参考文献:

[1] 李修和. 战场电磁环境建模与仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2014.

- LI Xiu-he. Battlefield Electromagnetic Environment Modeling and Simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [2] 邵涛,胡以华,石亮,等. 战场电磁环境复杂度定量评估方法研讨[J]. 电光与控制, 2010, 17(1): 81—84.
- SHAO Tao, HU Yi-hua, SHI Liang, et al. The Battlefield Electromagnetic Environment Complexity Quantitative Evaluation Method For Discussion[J]. Lighting and Control, 2010, 17(1): 81—84.
- [3] 支朋飞,高颖,葛飞. 战场电磁环境复杂度定量评估算法研究[J]. 微机处理, 2014, 3(6): 40—44.
- ZHI Peng-fei, GAO Ying, GE Fei. The Battled Electromagnetic Environment Complexity Quantitative Assessment Algorithms[J]. Microcomputer Processing, 2014, 3(6): 40—44.
- [4] 姬东朝,宋笔锋,喻天翔. 基于模糊层次分析法的决策方法及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(11): 38—41.
- JI Dong-zhao, SONG Bi-feng, YU Tian-xiang, et al. Based on the Fuzzy Decision Method and The Applications of the Analytic Hierarchy Process(ahp)[J]. Fire and Command Control, 2007, 32(11): 38—41.
- [5] 崔积丰. 试验电磁环境复杂等级量化方法研究[J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(1): 32—35.
- CUI Ji-feng. Quantitative Method Reasearch Test Complex Electromagnetic Environment Level[J]. Ship Electronic Countermeasures, 2014, 37(1): 32—35.
- [6] 董尤心. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- DONG You-xin. The Effectiveness Evaluation Method Research[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [7] 轩永波,黄长强,王勇,等. 基于灰色层次分析法的空间武器作战效能评估[J]. 空军工程大学学报, 2011, 12(2): 32—37.
- XUAN Yong-bo, HUANG Chang-qiang, WANG Yong, et al. Effectiveness Evaluation of Space Weapon System Based on Gray Hierarchy Method[J]. Journal of the Air force Engineering University, 2011, 12(2): 32—37.
- [8] 徐金华,刘光斌. 基于灰色层次分析法的战场电磁环境效应评估[J]. 电光与控制, 2010, 17(4): 14—21.
- XU Jin-hua, LIU Guang-bin. Evaluation of Battlefield Electromagnetic Environment Effect Based on Grey Analytical Hierarchy Process[J]. Lighting and Control, 2010, 17(4): 14—21.
- [9] 李文臣,张政超,陆静,等. 电磁环境复杂度等级评估模型[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(4): 427—431.
- LI Wen-chen, ZHANG Zheng-chao, LU Jing, et al. Evaluation Model of Electromagnetic Environment Complexity Classification[J]. Journal of China Institute of Electronics, 2012, 7(4): 427—431.
- [10] 陈行勇,张殿宗,钱祖平,等. 战场电磁环境复杂性定量分析研究综述[J]. 电子对抗信息技术, 2010, 25(4): 44—50.
- CHEN Hang-yong, ZHANG Dian-zong, QIAN Zu-ping, et al. Review on Battlefield Electromagnetic Environment Quantitative Analysis[J]. Electronic Countermeasures of Information Technology, 2010, 25(4): 44—50.
- [11] 陈行勇,张殿宗,王伟,等. 面向对象的战场电磁环境复杂度评估[J]. 电子对抗信息技术, 2010, 25(2): 74—78.
- CHEN Hang-yong, ZHANG Dian-zong, WANG Yi, et al. Object-Oriented Battlefield Electromagnetic Environment Complexity Evaluation[J]. Electronic Countermeasures of Information Technology, 2010, 25(2): 74—78.
- [12] 连世伟,李修和,沈阳,等. 基于GM(1,1)模型的电磁环境复杂度预测方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(11): 33—36.
- LIAN Shi-wei, LI Xiu-he, SHEN Yang, et al. Study on Complexity Prediction of Electromagnetic Environment Based on GM(1,1)[J]. Fire and Command Control, 2012, 37(11): 33—36.
- [13] 王伦文,孙伟,潘高峰,等. 一种电磁环境复杂度快速评估方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2943—2947.
- WANG Lun-wen, SUN Wei, PAN Gao-feng, et al. An Evaluating Quickly Method for Electromagnetic Environment Complexity[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2943—2947.
- [14] 顾友林,张志,王伟,等. 电磁环境复杂度评估算法研究与仿真实现[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(2): 394—397.
- GU You-lin, ZHANG Zhi, WANG Wei, et al. Research and Simulation Implementation of Electromagnetic Environment Complex Evaluation Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(2): 394—397.
- [15] 章季阳,王伦文. 一种改进的电磁环境复杂度定量评估方法[J]. 微波学报, 2010, 27(6): 38—41.
- ZHANG Ji-yang, WANG Lun-wen. An Improved Method of the Quantificational Evaluation on the Complexity of Electromagnetic Environment[J]. Journal of Microwaves, 2010, 27(6): 38—41.