

基于改进模糊综合法的雷达抗干扰效能评估

周 纭 加¹, 赵 民², 付 继 伟¹

(1 北京宇航系统工程研究所 北京 100076;

2 中国运载火箭技术研究院 北京 100076)

摘要: 现代战场上的电磁环境日趋复杂, 雷达的抗干扰能力已经成为衡量整个雷达系统乃至电子对抗装备性能优劣的重要指标之一。针对模糊综合评估法在雷达抗干扰效能评估中对各指标隶属度不敏感的问题, 受“木桶效应”启发, 基于对效能评估指标体系中各指标隶属度值的奖励与惩罚机制, 构造了局部状态变权函数对常权向量进行变权。在此基础上, 提出了一种改进的模糊综合评估方法。最后, 将该评估方法应用于雷达抗干扰效能的评估实例中, 结果表明, 使用该模型可以获得更加客观合理的评估结果。

关键词: 改进模糊综合法; 雷达; 抗干扰性能; 效能评估

中图分类号: TN974 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)01-0120-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220328002

引用格式: 周纭加, 赵民, 付继伟. 基于改进模糊综合法的雷达抗干扰效能评估[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 120-125.

Evaluation of radar anti-jamming efficiency based on improved fuzzy comprehensive method

ZHOU Yunjia¹, ZHAO Min², FU Jiwei¹

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The electromagnetic environment on the modern battlefield is becoming more and more complex, and the anti-jamming capability of radar has become one of the important indicators to measure the performance of the entire radar system and even the electronic countermeasure equipment. Aiming at the problem that the fuzzy comprehensive evaluation method is not sensitive to the membership degree of each index in the evaluation of radar anti-jamming effectiveness, inspired by the "Cannikin Law", based on the reward and punishment mechanism for the membership degree value of each index in the effectiveness evaluation index system, this paper constructs a local state variable weight function performs variable weight on the constant weight vector. On this basis, an improved fuzzy comprehensive evaluation method is proposed. Finally, the evaluation method is applied to the evaluation example of radar anti-jamming performance. The results show that more objective and reasonable evaluation results can be obtained by using this model.

Keywords: Improved fuzzy comprehensive method; Radar; Anti-jamming performance; Effectiveness evaluation

Citation: ZHOU Yunjia, ZHAO Min, FU Jiwei. Evaluation of radar anti-jamming efficiency based on improved fuzzy comprehensive method [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 120-125.

引 言

现代战场上, 雷达干扰与抗干扰技术就像冷兵器时代的矛与盾: 没有干扰不了的雷达, 也没有抗不了的雷达干扰。雷达干扰与抗干扰技术就像一对互相博弈的矛盾体, 促进着雷达电子设备

向着更高水平发展。在复杂的电磁战场上, 雷达系统在工作时经常面临着形式多样、来源未知而又动态变化着的干扰信号, 这对现代雷达系统的可靠性与高精度探测提出了巨大的挑战, 雷达的抗干扰能力已经成为衡量现代雷达系统性能优劣的一项重要指标^[1,2]。为准确有效对雷达系统的抗

干扰能力进行度量,就必须找到一种客观科学的雷达抗干扰效能评估方法,以效能评估为参考,继而寻求雷达抗干扰能力的薄弱环节,推动雷达系统的抗干扰能力不断提升。

目前,国内外雷达研究学者在雷达系统的抗干扰效能评估方面做了不少值得借鉴的工作。早期的雷达抗干扰效能往往采用单一因子来表征,如美国 Johnston 于 1974 年所提出的单部雷达系统的抗干扰改善因子^[3] (ECCM Improvement Factor, EIF) 与我国谢维信教授于 1986 年提出的有效抗干扰改善因子^[4] (Effective EIF, EEIF), 但 EIF 与 EEIF 都只能反映雷达系统抗干扰的改善程度,无法作为雷达抗干扰效能的评定标准。平殿发等^[5]使用了美国工业界武器系统效能咨询委员会 (WSEIAC) 所提出的系统效能评估的 ADC 模型,通过解析公式表述各指标与系统效能之间的关系,然后通过带入数值求解系统效能,但其仅关注系统的可用度、可信性与固有能,体现不出系统各指标之间的联系;模糊综合法主要运用模糊变换原理和最大隶属度原则,将模糊理论应用到效能评估领域中,考虑了模糊因素的影响,因此被很多学者运用于雷达系统的抗干扰效能评估^[6-8];近些年来,随着人工神经网络与数据挖掘等技术的发展,雷达专家也开始将这些新兴理论作为研究雷达系统抗干扰效能评估的重点研究方向,如张建军等^[9]采用了基于神经网络的雷达抗干扰效能评估方法,在选取雷达抗干扰效能的评估指标的基础上采取 3 层 BP 网络为多指标综合评价的网络模型,评估过程能够实现定性定量的有效结合,但训练过程中需要较多的学习样本。

对雷达的抗干扰效能进行评估是一个复杂的系统性问题。模糊综合法可以解决评估过程中的各种不确定因素,但却忽略了某项评估指标表现过差对系统总体效能值所产生的巨大影响。受“木桶效应”启发,本文针对传统的模糊综合评估法提出了一种变权的改进方案。首先给出了雷达抗干扰性能评估的三级评估模型及各指标隶属度的计算方法,在此基础上对各指标的隶属度采取相应的激励或惩罚措施(即通过构造变权函数来对各指标的权重进行变换),然后再用模糊综合评估的方法进行雷达抗干扰效能的评估。评估实例表明,相比较于传统的模糊综合评估法,本文提出的改进模糊综合法可以充分考虑到评估指标体系中隶属度

过低的值,从而获得更加客观合理的评估结果。

1 模糊综合评估模型

在进行武器装备论证时,常常会有一些指标难以用定量的方法来描述,而只能用模糊的、非定量的、难以精确描述的语言来评价。模糊综合评估法是模糊数学在工程评判上的应用,其目的就是对于一些难以量化的因素采用模糊隶属函数进行表达和处理,评价的一般步骤如下^[10]:

① 确定评判对象的因素论域 u

$$u=(u_1, u_2, \dots, u_m)$$

因素集中的每一个元素都对应评估过程中的一个“着眼点”,在雷达抗干扰效能评估中,因素集就是评估的指标体系。

② 确定评语等级论域 v

$$v=(v_1, v_2, \dots, v_n)$$

该论域的确定使得模糊综合评判法的结果为一向量,被评价的对象对应各评语等级的隶属程度的信息通过这个模糊向量表达出来,体现了评价的模糊特性。

③ 进行单因素评判,建立模糊关系矩阵 R

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

R 中元素 r_{ij} 满足 $0 \leq r_{ij} \leq 1$, 表示 u 中因素 u_i 对应 v 中等级 v_j 的隶属关系, R 中第 i 行表示对被评价对象中第 i 个因素 u_i 的单因素评判,它是模糊综合评判的基础。

④ 确定评判因素的权向量 a

$$a=(a_1, a_2, \dots, a_m), \quad \sum_{i=1}^m a_i=1$$

a_i 表明了 u 中第 i 个因素对总效能贡献的重要程度,也即评估指标中各指标相对于其上层指标的权重, a 中各元素可以用层次分析法、专家调查法等方法来确定。

⑤ 合成模糊评判结果 b

选择合适的模糊算子“ \circ ”,根据综合评判模型 $b=a \circ R$ 得出总的效能评估结果,然后根据最大隶属度原则确定被评判对象所对应的评判等级。

2 改进的变权模糊评估模型

在效能评估领域往往存在所谓的“木桶效

应”:系统总体效能的高低不仅取决于各项指标的综合评估值的高低,还取决于其中单项指标的高低,某一项指标达不到最低要求将使整个系统的作战效能大打折扣,就像一个木桶的容量取决于最短的桶板一样。传统的模糊综合评估法体现不出这种思想,因此可以考虑带有激励与惩罚机制的变权模糊综合评估法来对雷达的抗干扰效能进行评估。所谓“激励”与“惩罚”是针对指标的隶属度而言的,简而言之,就是通过构造合适的变权函数,达到“赏优罚劣”的目的,从而获得更加客观的效能评估值。

根据变权理论,指标的变权向量 w 等于指标的常权向量 a 与局部状态变量 S 的 Hadamard 乘积^[11]:

$$w(g_i) = \frac{a_i S(g_i)}{\sum_{j=1}^m a_j S(g_j)} \quad (1)$$

为此需选择能体现激励与惩罚的局部状态变权函数 $S(g)$, 该函数应满足以下要求:

① 应突出变权综合法的特点:在评估中只要有一个指标值过低,哪怕该指标的常权很小,那么该指标值也将使系统的总效能产生较为明显的降低,反之亦然。

② 考虑到现实的武器系统,单一指标的隶属度非常低会使其总效能大打折扣,但某项指标非常高则一般不能使武器系统总体的效能大幅提升,因此该函数惩罚的幅度应比激励的幅度大。

③ 相对而言,武器装备的作战效能取决于权值较大的指标,因此对于常权大的指标,其惩罚与激励的灵敏度和幅度要相应地增大;对常权小的指标,惩罚与激励的灵敏度和幅度要相应地减小。

根据以上所提到的三个要求,建立映射 $S(g)$ 的公式:

$$S(g) = \begin{cases} b^{\frac{1}{m\omega} + d} & g \in [0, a) \\ \left| \frac{b(b-g)}{b-a} \right|^{\frac{1}{m\omega}} & g \in [a, b) \\ d & g \in [b, c) \\ \left| e \cdot \frac{b(g-c)}{1-c} \right|^{\frac{1}{m\omega}} + d & g \in [c, 1] \end{cases} \quad (2)$$

式中, a, b, c, d, e 为 $[0, 1]$ 内的参数,称 a 为否定水平, b 为及格水平, c 为激励水平, d 为调整水平, m 为指标的个数, e 为 $\omega = 1/m$ 时激励与惩罚的幅度之比。对于 $S(g)$, 给定某一具体指标的隶属度 g_i , 对

其采取的激励或惩罚措施如表 1。

表 1 针对不同隶属度区间所采取的措施
Table 1 Measures taken for different interval membership degrees

隶属度区间	采取措施
$[0, a)$	采取最大惩罚程度
$[a, b)$	惩罚程度随 g_i 的增大而减小
$[b, c)$	既不惩罚也不激励
$[c, 1]$	激励程度随着 g_i 的增大而增大

对于调整水平 d 而言, d 越小,总的惩罚与激励的程度就越大; d 越大,总的惩罚与激励的程度就越小。确定变权映射函数后,可根据式 (1) 计算变权向量,于是变权模糊综合评估值为:

$$l = w(G) \times (G)^T \quad (3)$$

式中, $w(G)$ 表示变权向量; G 表示指标隶属度值矩阵; l 表示变权模糊综合评估结果。随后将评语集 v 量化为评估集 $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, 计算:

$$c_i = \frac{1 - |l - d_i|}{\sum_{i=1}^n (1 - |l - d_i|)} \quad (4)$$

得到 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ 作为 l 对各评判等级的隶属度,根据最大隶属度原则,以对评判等级隶属度最大的评语作为雷达抗干扰效能的定性评估结果。

3 雷达抗干扰效能评估指标体系

评估雷达对抗系统的抗干扰性能,首先应当构建影响雷达总体抗干扰性能的指标体系。现代战场上雷达对抗系统面临的主要干扰类型按干扰信号的作用性质来分主要有压制性干扰与欺骗性干扰两类,两种干扰方式采取的是截然不同的干扰机理,因此需要针对两种干扰样式选取不同的评判指标。现代雷达系统能够探测空间目标的形状、速度、距离、方位和俯仰并可对移动目标进行有效的跟踪,因此本文构建如图 1 所示的雷达综合抗干扰效能的三级评估模型。该三级评估模型考虑了雷达在探测与跟踪目标时的主要测量参数,物理意义明确,数据易于获取,较好涵盖了雷达系统的不同作战剖面与使用场景。

根据图 1 所建立的雷达抗干扰效能评估指标体系,赋予各指标规范一致的代号:雷达的综合抗干扰性能 $A = \{A1, A2\} = \{\text{抗压制性干扰效能}, \text{抗欺}$

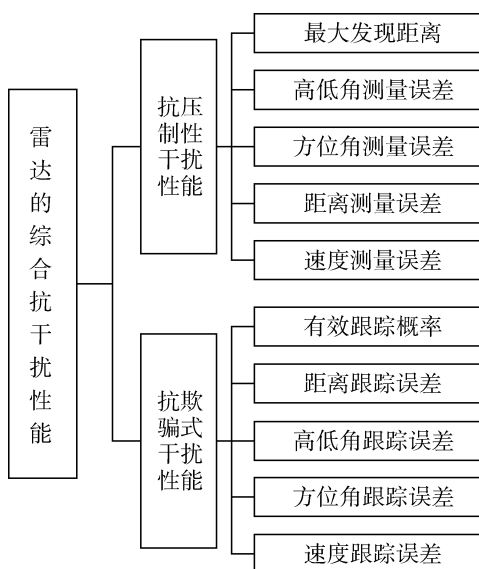


图 1 雷达抗干扰效能评估指标体系

Fig. 1 Radar anti-jamming efficiency evaluation index system

骗性干扰效能}, 依此类推其他指标集合。同时给出各三级指标隶属度的计算方式, 如表 2 所示。

表 2 各指标隶属度计算方法

Table 2 Calculation method of membership degree of each index

一级指标	二级指标	三级指标	隶属函数
综合抗干扰性能 A	抗压制性干扰效能 A1	最大发现距离 A11	记受干扰前后雷达的最大发现距离分别为 R_0 和 R , 选择 $E_R = R/R_0$ 为最大发现距离的隶属函数
		高低角测量误差 A12	记受干扰前后各参数测量误差分别为 σ_0 和 σ , 选择 $E = \sigma_0/\sigma$ 为各参数的隶属函数
		方位角测量误差 A13	
		距离测量误差 A14	
		速度测量误差 A15	
	抗欺骗性干扰效能 A2	有效跟踪概率 A21	记受干扰前后雷达的有效跟踪概率分别为 P_0 和 P , 选择 $E_p = P/P_0$ 为有效跟踪概率的隶属函数
		距离跟踪误差 A22	各参数跟踪误差隶属函数定义方法同抗压制性干扰的测量误差
		高低角跟踪误差 A23	
		方位角跟踪误差 A24	
		速度跟踪误差 A25	

下面以雷达系统的“最大发现距离”为例, 阐述表 3 中各指标权重与隶属度值的确定方法。设无干扰条件下某型雷达的最大发现距离为 R_0 , 干扰下该雷达的最大发现距离变为 R 。 R_0 为雷达系统的性能参数, 可以用雷达方程计算或通过试验确定, 无干扰条件下雷达的作用距离方程为:

$$R_0 = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{t\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

式中, P_t 为雷达发射功率; G 为雷达天线的增益; λ 为发射波长; σ 为目标的散射截面积; $S_{t\min}$ 为雷达最小可检测信号功率。 R 可通过雷达干扰试验得到, 则可选取 $E_R = R/R_0$ 作为最大发现距离的隶属函数, E_R 在 0~1 之间取值, 其值越大, 表示干扰信号

4 雷达抗干扰效能的变权模糊综合评估

应用前文所建立的模糊综合评估方法, 对雷达抗干扰性能进行评估, 评估流程如下:

① 建立雷达抗干扰效能评估的指标体系, 本文采取如图 1 所示的三级评估模型;

② 根据建立的指标体系, 选择合适的惩罚与激励水平, 确定式 (2) 中各参数的值;

③ 确定评语集。根据评估需要与人的主观感受, 建立五层评语集 $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$, 对应好、较好、一般、较差、差, 量化为评估集 $\mathbf{d} = (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5) = (1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2)$;

④ 应用层次分析法与德尔菲法相结合的方式, 获取各下层指标相对于上层指标的权重;

⑤ 根据式 (3) 对雷达的综合抗干扰性能进行变权模糊综合评估。

表 3 雷达抗干扰效能评估数据
Table 3 Radar anti-jamming effectiveness evaluation data

一级评估指标	二级评估指标(权重)	三级评估指标	权重 a_i	指标隶属度 g_i	映射变量 $S(g_i)$	变权 $w(g_i)$
雷达综合抗干扰性能 A	抗压制性干扰效能 A1(0.52)	最大发现距离 A11	0.157	0.844	0.200	0.121
		高低角测量误差 A12	0.088	0.950	0.433	0.146
		方位角测量误差 A13	0.110	0.850	0.200	0.085
		距离测量误差 A14	0.110	0.773	0.200	0.085
		速度测量误差 A15	0.055	0.337	0.612	0.130
	抗欺骗性干扰效能 A2(0.48)	有效跟踪概率 A21	0.127	0.723	0.200	0.098
		距离跟踪误差 A22	0.061	0.950	0.322	0.075
		高低角跟踪误差 A23	0.114	0.749	0.200	0.088
		方位角跟踪误差 A24	0.114	0.712	0.200	0.088
		速度跟踪误差 A25	0.064	0.275	0.347	0.086
模糊综合评估值					0.747	
变权模糊综合评估值					0.666	

对雷达探测距离的影响越小。最大发现距离在雷达抗干扰效能指标中所占的权重则可以通过层次分析法或专家调查法来确定。另外在本次试验中, 试验的实施方认为当雷达的最大探测距离在受干扰后损失六成以上时, 则该雷达在本次干扰试验中的抗干扰能力很差; 损失一成以下时则认为该雷达在此次干扰试验中表现出很强的抗干扰能力; 同时根据现实情况将惩罚的幅度定为激励幅度的 1.25 倍。根据以上描述, 结合表 1 所列出的各参数含义, 取 $a=0.4$, $b=0.7$, $c=0.9$, $d=0.2$, $e=0.8$, 代入式 (2) 得映射函数 $S(g)$ 的表达式, 同时计算出表 3 中各指标隶属度的映射变量与变权变量。

由表 3 可分析得出以下结论:

① 本次试验中的雷达在抗敌方干扰机干扰时, “最大发现距离”、“高低角测量误差”、“方位角测量误差”、“跟踪距离误差”具有较强的抗干扰特性, 在受干扰前后指标的变化量不大。而“速度测量误差”、“速度跟踪误差”两项指标在受敌方干扰机干扰后性能大幅下降, 这说明该雷达在提升对探测目标的速度测量与跟踪上还具有可优化的空间, 可着手从提高雷达系统的测速精度与目标速度跟踪能力的方向来提高该雷达的抗干扰性能;

② 该雷达的大部分指标隶属度值较高, 模糊综合评估值也达到了 0.747, 抗干扰能力属于“较好”的范畴, 但由于指标 A15 和 A25 的隶属度太

低, 变权模糊综合评估值下降到 0.666, 达到了变权模糊评估中惩罚的目的。可以看出, 即使 A15 与 A25 的权重均未达到 0.1, 但也造成了总评估值的明显下降, 体现出了变权模糊评估的优势: 相对于传统的模糊综合评估法, 该方法可以有效地考虑到指标体系中一些隶属度较低的指标, 并通过权重变换导致了最终效能评估值的降低;

③ 根据式 (4) 计算得到该雷达系统抗干扰性能的定性评估结果:

$c=(0.178, 0.232, 0.250, 0.197, 0.143)$, 由最大隶属度原则, 该雷达的抗干扰性能介于“较好”与“一般”之间。

5 结束语

雷达对抗系统是一个巨大复杂的系统, 现代战场上雷达面临的干扰问题越来越严峻, 对复杂电磁环境下雷达系统的抗干扰效能进行评估是当前研究的热点问题之一。本文提出了一种基于激励与惩罚机制的变权模糊综合评估模型, 并将该模型应用于某次雷达抗干扰效能评估实例中, 得出的结论达到了预期的效果, 从而验证了所提方法的有效性, 并可为类似领域的评估问题提供借鉴方案。

参考文献

[1] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出

- 版社, 2012.
- [2] 王博阳, 甘荣兵, 张京瑞. 电子对抗作战效能评估技术综述[J]. 电子信息对抗技术, 2017, 32(4): 54-60.
WANG Boyang, GAN Rongbing, ZHANG Jingrui. Overview of electronic countermeasure operational effectiveness evaluation[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2017, 32(4): 54-60.
- [3] JOHNSTONS L. ECCM improvement factors(EIF) [J]. Electronic Warfare Magazine, 1974, (3): 41-45.
- [4] 谢维信, 保铮. 电子系统抗干扰性能测度的研究[J]. 航天电子对抗, 1986, (S1): 95-101.
- [5] 平殿发, 刘志远, 张伟. 基于ADC模型的机载电子对抗系统效能评估[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(1): 61-64.
PING Dianfa, LIU Zhiyuan, ZHANG Wei. Effectiveness evaluation of airborne ECM system based on the ADC model. Aerospace Electronic Warfare[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2013, 29(1): 61-64.
- [6] 张军涛, 李尚生, 王旭坤. 基于灰色关联-模糊综合评判的雷达抗干扰性能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(6): 1557-1563.
ZHANG Juntao, LI Shangsheng, WANG Xukun. Method of radar anti-jamming performance evaluation based on grey correlation-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(6): 1557-1563.
- [7] 雷腾, 胡国平, 金耀东. 基于多级模糊综合评判的雷达抗干扰性能评估[J]. 现代防御技术, 2009, 37(1): 128-132.
LEI Teng, HU Guoping, JIN Yaodong. Evaluation method of antijamming performance for radar based on the multi-level fuzzy comprehensive evaluation[J]. Modern Defense Technology, 2009, 37(1): 128-132.
- [8] 高晓滨, 郝重阳. 电子战系统效能的模糊评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2005, (1): 69-72.
GAO Xiaobin, HAO Chongyang. Fuzzy evaluation method of the electronic warfare system effectiveness[J]. Fire Control and Command Control, 2005, (1): 69-72.
- [9] 张建军, 曲宏宇, 赵栋华. 基于神经网络的雷达抗干扰效能评估方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(1): 28-32.
ZHANG Jianjun, QU Hongyu, ZHAO Donghua. Evaluation method for performance of radar ECCM based on neural network[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015, 30(1): 28-32.
- [10] 陈磊, 姚伟召, 郭全魁, 等. 效能评估理论、方法及应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2016.
- [11] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.

[作者简介]

周纭加 1998年生, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器电气系统总体设计。

赵民 1965年生, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。

付继伟 1978年生, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。

(本文编辑: 潘三英)