

doi: 10.7690/bgzd.2022.04.017

# 一种基于 AHP-可拓云的雷达系统效能评估方法

薛军帅, 张迪, 黄勇, 杨凯栋

(西安电子工程研究所创新中心, 西安 710100)

**摘要:** 针对现有雷达系统效能评估方法系统性的不足, 提出层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-可拓云模型效能评估方法, 完成对单频段、多频段雷达系统不同模式的效能评估和单型雷达的综合评估。评估结果显示效能评估时同模式多频段雷达效能值高于单频段; 综合评估时多频段雷达物理特性指标评估值低于单频段。结果表明: 该方法对系统进行量化评估具有较好的区分性、有效性, 为雷达及其他系统研制提供参考性建议。

**关键词:** 效能评估; 可拓云; 雷达系统; 侦察探测

**中图分类号:** TN955 **文献标志码:** A

## A Radar System Effectiveness Evaluation Method Based on AHP-extension Cloud

Xue Junshuai, Zhang Di, Huang Yong, Yang Kaidong

(Innovation Center, Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Aiming at the deficiency of the existing radar system effectiveness evaluation methods, an effectiveness evaluation method based on AHP-extension cloud model is proposed to complete the effectiveness evaluation of different modes of single-band and multi-band radar systems and the comprehensive evaluation of single-type radar. The evaluation results show that the effectiveness of multi-band radar in the same mode is higher than that of single-band radar, and the physical characteristics of multi-band radar are lower than that of single-band radar in the comprehensive evaluation. The results show that the method has good discrimination and effectiveness for the quantitative evaluation of the system, and provides reference suggestions for the development of radar and other systems.

**Keywords:** effectiveness evaluation; extension cloud; radar system; reconnaissance and detection

### 0 引言

效能评估是系统对作战体系的能力和效能的定量化评价, 其方法一般分为解析法、统计法、仿真法和多指标综合评估法。常用的解析法有指数法、ADC(availability dependability capability)法、SEA(system effectiveness analysis)法、层次分析法(AHP)等<sup>[1-2]</sup>。因系统评估较为复杂、涉及因素较多, 解析法难以进行全面有效的评估。统计法可信度较高, 但需大量的演习、实战, 其成本过高。仿真法建立模型时需大量数据和资料, 其结果需长期数据积累, 可靠性结果检验耗时久<sup>[3]</sup>, 如雷永林等<sup>[4]</sup>提出一种基于“性能-效果-效能”仿真型的作战效能评估框架, 但该方法暂未进入实际应用且仿真评估模型建立要求严格。考虑到系统复杂性和评估结果科学性, 近期研究人员多用多指标综合评估法对系统进行评估, 如采用模糊层次分析法<sup>[5-6]</sup>、改进ADC法<sup>[7-8]</sup>、模糊聚类分析法<sup>[9]</sup>、AHP-云理论评估方法<sup>[10-11]</sup>等综合型效能评估方法, 但该类评估方法

不具备效能评估定性到定量表述的模糊性、随机性, 且评估结果未明确量化。随着人工智能的兴起, 戚宗锋等<sup>[12]</sup>提出一种基于层次分析法和深度置信网络模型的效能评估方法; 李妮等<sup>[13]</sup>提出一种全连接深度神经网络模型体系效能评估方法; 刘春生等<sup>[14]</sup>构建基于动态贝叶斯网络模型的效能评估方法; 李健等<sup>[15]</sup>结合生成对抗网络和神经网络对进行武器系统效能评估, 但其需庞大、可靠的训练样本量; 宋贵宝等<sup>[16]</sup>运用G1序关系法和可拓云模型构建效能评估方法, 但其指标权重确定方法容错率低, 多方案评估结果可区分性差。针对现有评估方法存在的局限性, 笔者梳理系统评估流程, 引入AHP结合可拓云模型对雷达系统进行效能评估和综合评估; 提出了基于AHP-可拓云的复杂系统评估方法, 对其他系统的效能评估具有一定借鉴意义。

### 1 效能评估基本步骤

运用多指标综合评估法对系统效能评估, 通常

收稿日期: 2021-01-06; 修回日期: 2022-02-26

作者简介: 薛军帅(1993—), 男, 陕西人, 硕士, 从事基于人工智能的战场电磁感知研究。E-mail: xuejunshuai@foxmail.com。

包括 3 项基本内容：1) 定义系统效能的参数，并选择合理的效能度量指标，即构建指标体系；2) 根据给定的条件，计算效能指标的值，即确定指标权重和指标值；3) 进行多指标效能的综合评价，即利用评估方法由诸效能参数的权重和指标值求出效能综合评价，完成系统效能评估。归纳系统效能评估流程基本步骤如下：

Step 1: 明确任务，明确系统效能评估的目标；

Step 2: 定义系统，对系统进行结构分析、功能分析、工作描述、性能理解；

Step 3: 选择描述系统效能的变量和参数，研究确定系统效能量度指标，下部分详述；

Step 4: 构造系统效能评估模型；

Step 5: 数据准备，包括系统和对象的先验属

性和内在规律性；

Step 6: 设立评估案例，进行效能分析评估实验；

Step 7: 对评估结果进行分析和验证，根据发现的问题进行修改和完善。

## 2 构建指标体系

确立目标函数或指标，构建评价指标体系是效能评估的一项基础工作。指标体系的构建过程则是对系统表象特征的认识不断深化、完善和系统化的过程，故需反复讨论、验证以使其完善。指标体系的构建需遵循完备性、独立性、层次性、可测性、敏感性、一致性、简明性原则，构建雷达系统效能评估指标体系如图 1 所示。

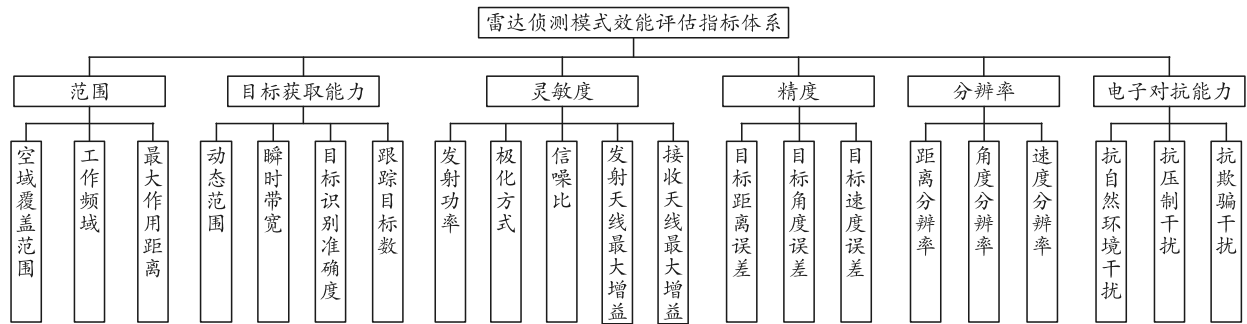


图 1 雷达侦测模式效能评估指标体系层次结构

笔者对单频段和多频段雷达分别分为侦察、探测和侦测(侦察+探测)工作模式进行效能评估，对应不同模式单功能雷达进行综合评估，需注意单频段雷达侦察模式仅作理论研究参考。

## 3 层次分析法

笔者采用 AHP 确定各指标的权重。AHP 是 20 世纪 70 年代中期美国运筹学家匹茨堡大学教授萨蒂所创立。该方法的主要特征是层次明确、结构清晰、计算过程简明。

考虑对事物判断的准确性和分辨力，使用 AHP 时需注意每层所包含因素数应 $\leq 10^{[17]}$ 。运用 AHP 时通常按 9 分制(即 1~9 标度法)对各指标两两对比分别进行打分，但因其确定的结果科学性差；文献 [1] 依据保序性、一致性、均匀性、拟合性和一致性容量共 5 个量度评价对比了 7 种标度法，评比出 2 种指数标度法适用于多准则较高精度问题；经多次对比 2 种指数标度法的计算结果，由专家确定指数标度法  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  的结果更符合实际要求，其标度值与含义见表 1 所示。

AHP 根据同级指标间两两对比打分结果构成

评价矩阵，然后计算出各指标相对于上一层目标的计算权重值，利用该方法确定指标权重时，为避免出现逻辑性错误，提高计算权重结果可靠性，需对所构建判断矩阵进行一致性检验。对构建的同级指标进行两两对比，使用指数标度法  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ ，得到判断矩阵  $A = (a_{ij})$  如下：

$$A_{n \times n} = \begin{bmatrix} e^{0/5} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & e^{0/5} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & e^{0/5} \end{bmatrix} \quad (1)$$

表 1 指数标度法

指数标度值	含义
$e^0$	指标 $i$ 与 $j$ 指标同等重要
$e^{2/5}$	指标 $i$ 稍微比指标 $j$ 重要
$e^{4/5}$	指标 $i$ 明显比指标 $j$ 重要
$e^{6/5}$	指标 $i$ 强烈比指标 $j$ 重要
$e^{8/5}$	指标 $i$ 极端比指标 $j$ 重要

注： $e^{K/5}$ ， $K=1, 3, 5, 7$  是上述相邻判断的中间值；若指标  $i$  不如指标  $j$  重要，则取值为  $1/(e^{K/5})$ ， $K$  为 0~8。

其余详细计算步骤见文献 [1] 和 [18]，权重计算采用几何平均法，平均随机一致性指标参考文献

[19]。其中  $n$  为判断矩阵的阶数，当  $n < 3$  时判断矩阵易做到完全一致，故无需计算一致性指标。

确定一级、二级指标相对权重后需计算综合权重，依据 AHP 求得一级指标权重向量为：

$$W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n) \quad (2)$$

式中  $w_i$  为一级指标  $i$  的指标权重。

设对于第  $k$  个一级指标，其下二级指标权重为：

$$W_k = (w_{k_1}, w_{k_2}, w_{k_3}, \dots, w_{k_p}) \quad (3)$$

则一级指标  $i$  下的二级指标  $j$  的综合权重为：

$$w_{i,j} = w_i \cdot w_{ij} \quad (4)$$

本节权重确定流程如图 2 所示。

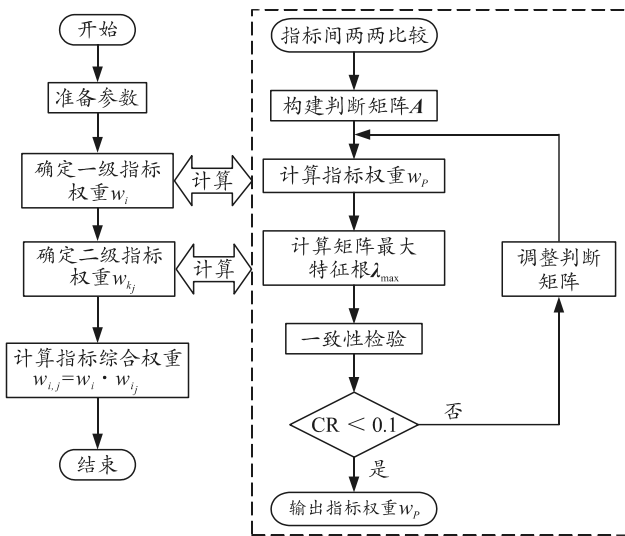


图 2 权重确定流程

注意：设有  $m$  位专家对各指标权重进行计算，若  $m$  位专家所构建判断矩阵均满足一致性检验，则各指标权重为  $m$  位专家所计算权重的均值；若其中  $m_0$  位专家所构建判断矩阵调整后仍未满足一致性检验，则各指标权重为其余专家所计算的权重均值。

## 4 可拓云模型

### 4.1 可拓云理论

可拓学引入物元概念把质与量有机地结合起来，由事物名称、特征、关于该特征的量值组成三元组，记作： $R=(\text{事物}, \text{特征}, \text{量值})$ <sup>[20]</sup>。将事物名称  $N$ 、事物特征  $c$ 、事物特征对应的量值  $v$  统一起来，构成表示事物的基本元<sup>[21]</sup>，记作： $R=(N, c, v)$ 。

正态云模型有效集成客观事物概念的随机性、模糊性 2 种不确定性，构成定性与定量间映射的模型。其数字特征用期望  $E_x$ 、熵  $E_n$ 、超熵  $H_e$  这 3 个参数来表示<sup>[22-24]</sup>：

期望  $E_x$ ——是论域空间的分布中心，代表各分

类等级概念量化最典型样本点；

熵  $E_n$ ——是对定性概念不确定性的描述，反映指标分类等级概念的模糊性；

超熵  $H_e$ ——是对熵不确定性的量度，表示等级值概念值的随机性，揭示了评估中各指标随机性与模糊性间的关联性。

可拓学中物元的概念较贴切地描述客观事物变化的过程，但其事物特征值通常视作定值，未充分考虑事物模糊性和随机性。而正态云模型集成了事物概念的模糊性和随机性，可弥补可拓学理论的不足。可拓学理论结合正态云模型具有客观事物描述准确性和事物概念双重不确定性的优势。因此，将物元  $R=(N, c, v)$  中的量值  $v$  用正态云模型  $(E_x, E_n, H_e)$  代替，则可拓云模型表示为：

$$R_{\text{cloud}} = \begin{bmatrix} N, & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ & C_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (E_{xn}, E_{nm}, H_{en}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 4.2 可拓云模型计算步骤

#### 1) 确定指标等级界限云模型。

将效能评估指标等级划分为 5 个等级，确定各指标的等级界限值  $[C_{\min}, C_{\max}]$ ；考虑指标等级界限随机性和模糊性，通过转化关系式将等级界限值转化为各指标等级界限云模型， $C_{\max}$  为界线上界， $C_{\min}$  为界线下界。

$$\left. \begin{aligned} E_x &= (C_{\max} + C_{\min})/2 \\ E_n &= (C_{\max} - C_{\min})/6 \\ H_e &= s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： $s$  通常为小于 1 的常数，可根据相应指标等级界限不确定性和实际情况调整<sup>[25-26]</sup>。

通过上述步骤可得评估指标正态云模型，即效能评估指标等级界限云模型。笔者给出接收天线最大增益指标评估云图，如图 3 所示。

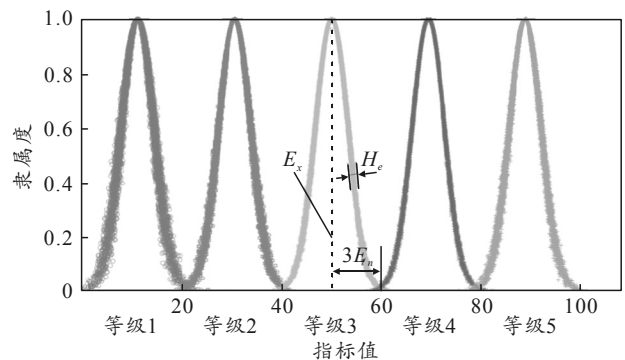


图 3 接收天线最大增益指标评估云图

2) 确定可拓云模型关联度。

根据效能评估特点, 先将各项指标值  $x$  视为一个云滴, 生成期望为  $E_n$ 、标准差  $H_e$  的正态分布随机数  $E'_n$ , 则指标值  $x$  的云关联度  $k$  的计算式为:

$$k = \exp\left(-\frac{(x - E'_n)^2}{2(E'_n)^2}\right) \quad (7)$$

式中  $E'_n$  为满足期望  $E_n$  标准差  $H_e$  的正态随机数。

由云关联度  $k$  得到综合评判矩阵  $\mathbf{K}^{\text{cloud}}$ , 即

$$\mathbf{K}^{\text{cloud}} = \begin{bmatrix} k_{11}^{\text{cloud}} & k_{12}^{\text{cloud}} & k_{13}^{\text{cloud}} & k_{14}^{\text{cloud}} & k_{15}^{\text{cloud}} \\ k_{21}^{\text{cloud}} & k_{22}^{\text{cloud}} & k_{23}^{\text{cloud}} & k_{24}^{\text{cloud}} & k_{25}^{\text{cloud}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1}^{\text{cloud}} & k_{n2}^{\text{cloud}} & k_{n3}^{\text{cloud}} & k_{n4}^{\text{cloud}} & k_{n5}^{\text{cloud}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $k_{ij}^{\text{cloud}}$  为指标  $i$  和等级  $j$  标准正态云间的云关联度;  $j$  为评判等级;  $n$  为评估指标个数。

3) 确定评判分数。

由指标综合权重向量  $\mathbf{W}$  与综合评判矩阵  $\mathbf{K}^{\text{cloud}}$  相乘得综合评判向量:

$$\mathbf{B}_l = \mathbf{W} \cdot \mathbf{K}^{\text{cloud}} \quad (9)$$

利用加权平均法得出综合评判分数:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^5 b_i f_i}{\sum_{i=1}^5 b_i} \quad (10)$$

式中:  $b_i$  为向量  $\mathbf{B}_l$  对应分量;  $f_i$  为等级  $i$  对应分值。

4) 置信度计算。

为确定评估结果受随机因素的影响程度, 需进行多次计算, 引入置信度因子  $\theta$ , 定义为:

$$\theta = E_{rm} / E_{rx} \quad (11)$$

当  $\theta$  越小, 表示评判结果的分散度越小结果越

收敛置信度越高, 反之则置信度越低; 模糊等级特征期望值  $E_{rx}$ 、模糊等级特征熵值  $E_{rm}$  分别为:

$$\left. \begin{aligned} E_{rx} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^h r_i(x) \\ E_{rm} &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i(x) - E_{rx})^2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中:  $h$  为运行的次数, 笔者取 500 次;  $r_i(x)$  为第  $i$  次运算得出的综合评判分数。

## 5 案例评估

### 5.1 效能评估

笔者选取雷达系统的侦察、探测和侦测工作模式, 分别对单频段 ( $X$  频段) 和多频段 ( $X$ 、 $Ku$  和  $Ka$  频段) 雷达效能评估, 对评估结果效能值进行分析。首先根据构建的指标体系, 按 AHP 分别求层次体系中的指标权重; 然后结合指标权重和可拓云评估模型完成系统不同模式的效能评估; 最后分析讨论不同雷达各模式评估结果。

依据 AHP 计算雷达系统一级指标判断矩阵和指标权重, 得一致性指标  $CR=0.0076 < 0.1$ , 故该判断矩阵满足一致性要求; 以此类推, 分别计算二级指标判断矩阵和指标权重  $w_{ij}$ 、最大特征根  $\lambda_{\max}$  和一致性指标  $CR$ , 结合式(4)可得指标综合权重。

笔者依据统计分析将指标的评估分值范围转为百分制, 其部分指标等级界限值如表 2 所示, 运用式(6)计算该部分指标等级云模型如表 3 所示。

表 2 雷达系统指标等级界限

指标	分值范围	一级	二级	三级	四级	五级
空域覆盖范围	[0, 100]	[0, 55)	[55, 65)	[65, 75)	[75, 85)	[85, 100]
目标识别准确度	[0, 100]	[0, 40)	[40, 60)	[60, 75)	[75, 90)	[90, 100]
接收天线最大增益	[0, 100]	[0, 20)	[20, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]
目标距离误差	[0, 100]	[0, 40)	[40, 60)	[60, 75)	[75, 90)	[90, 100]
距离分辨率	[0, 100]	[0, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 90)	[90, 100]
抗自然环境干扰	[0, 100]	[0, 20)	[20, 40)	[40, 80)	[80, 90)	[90, 100]

表 3 雷达系统指标等级云模型

指标	一级	二级	三级	四级	五级
空域覆盖范围	(27.5, 9.17, 0.2)	(60, 1.67, 0.2)	(70, 1.67, 0.2)	(80, 1.67, 0.2)	(92.5, 2.5, 0.1)
目标识别准确度	(20, 6.67, 0.2)	(50, 3.33, 0.2)	(67.5, 2.5, 0.3)	(82.5, 2.5, 0.3)	(95, 1.67, 0.02)
接收天线最大增益	(10, 3.33, 0.3)	(30, 3.33, 0.2)	(50, 3.33, 0.1)	(70, 3.33, 0.1)	(90, 3.33, 0.2)
目标距离误差	(20, 6.67, 0.2)	(50, 3.33, 0.2)	(67.5, 2.5, 0.1)	(82.5, 2.5, 0.1)	(95, 1.67, 0.15)
距离分辨率	(20, 6.67, 0.5)	(50, 3.33, 0.3)	(70, 3.33, 0.2)	(85, 1.67, 0.05)	(95, 1.67, 0.1)
抗自然环境干扰	(10, 3.33, 0.3)	(30, 3.33, 0.2)	(60, 6.67, 0.2)	(85, 1.67, 0.1)	(95, 1.67, 0.2)

专家依据百分制确定某型雷达系统不同模式的指标值, 依据为: 1) 不同模式的指标性能最优点设为参考值(100), 该指标其余模式指标值依据参考值

和指标界限评定; 2) 某些模式的部分指标值(如侦察模式下的指标发射功率等)为缺失值, 为避免缺失项对评估结果的影响, 对其采用等效值的方式。

应用 Matlab 软件仿真计算，联合式(7)、(9)和(10)得单频段雷达系统侦察模式效能值  $r=56.41$ ；根据式(11)、(12)得置信度因子  $\theta=0.0227$ ，各等级对应  $f_i$  的取值为 38, 57, 73.5, 87, 100。同理得其余

效能值和置信度因子，仿真结果如表 4 所示，各模式的置信度因子  $\theta$  均小于 0.05，表明评估结果可信度较高<sup>[27]</sup>。各模式一级指标效能值结算结果如图 4 所示，不同模式效能值如图 5 所示。

表 4 效能评估结果

参数	单频段雷达			多频段雷达		
	侦察模式	探测模式	侦测模式	侦察模式	探测模式	侦测模式
综合效能值	56.410 0	69.520	76.650 0	82.630 0	92.690 0	99.310 0
置信度因子 $\theta$	0.022 7	0.013	0.014 1	0.008 6	0.019 7	0.001 9

观察图 4 可知，单频段雷达在范围、目标获取能力、灵敏度、精度、分辨率一级指标效能值均明显低于多频段雷达同模式下同指标的效能值；单频段雷达侦察模式的灵敏度、精度、分辨率 3 项指标效能值均明显低于其余 5 种情况同指标效能值；多频段雷达探测模式和侦测模式下范围效能值明显高

于其余 4 种情况的范围效能值；多频段雷达探测模式和侦测模式的精度、分辨率、电子对抗能力效能值均明显高于其余 4 种情况下同指标的效能值。观察图 5 可知，对于同型雷达，侦察模式、探测模式和侦测模式效能值依次递增；在同模式条件下，单频段雷达效能值低于多频段雷达效能值。

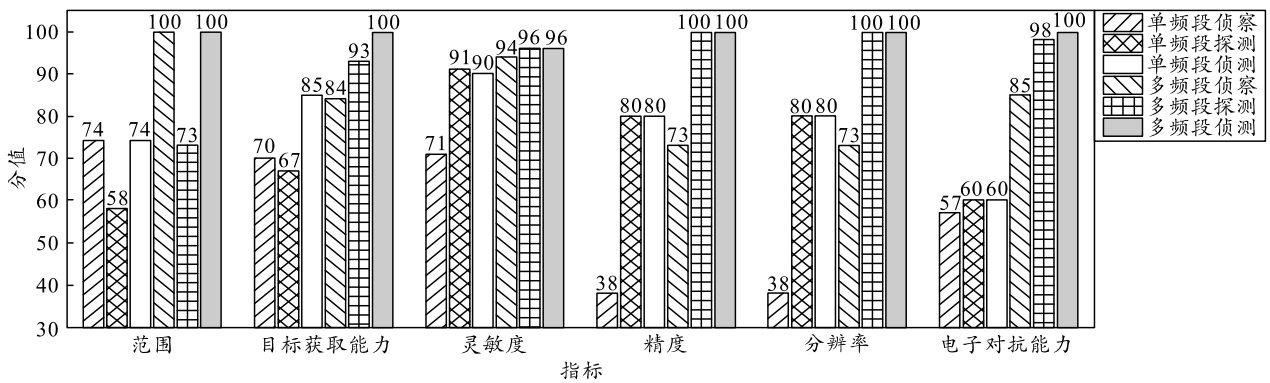


图 4 各一级指标效能值

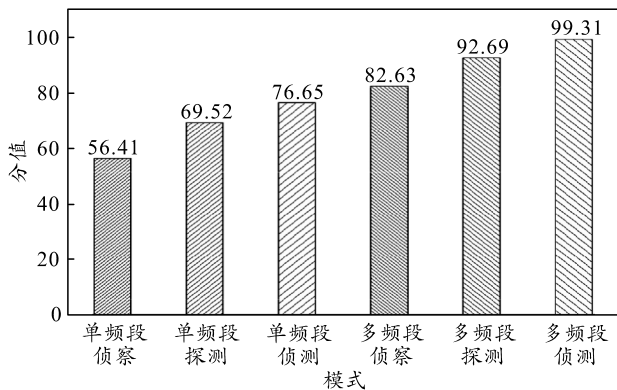


图 5 不同模式的效能值

分析可知：1) 多频段雷达工作频域明显宽于单频段雷达，不易受如扫描式、瞄准式等压制干扰的影响，对敌方欺骗干扰有更好的辨别能力，可在更宽的频域范围获取敌方信息；2) Ku 和 Ka 频段较 X

频段的探测精度更高，故多频段雷达的分辨率和精度更高；3) 多频段雷达可切换不同频段对同目标侦察探测，综合处理所接收的信号，可识别在单一频段可能被忽略的目标信息。

### 5.2 综合评估

考虑雷达系统在研制初期需立项评估，笔者基于效能评估引入成本、体积、重量和功耗等物理特性，新增物理特性一级指标以完成雷达系统的综合评估，对系统的立项研制提供参考性建议。依据专家评分确定物理特性指标权重及指标值，计算同前文。可得其综合评估值见表 5，可知各型雷达的置信度因子  $\theta$  均小于 0.05，表明评估结果可信度较高。可绘制出各模式一级指标评估值如图 6 所示，不同模式综合评估值如图 7 所示。

表 5 综合评估结果

参数	单频段雷达			多频段雷达		
	侦察功能	探测功能	侦测功能	侦察功能	探测功能	侦测功能
综合评估值	60.170 0	69.550 0	70.680 0	84.260 0	81.100 0	78.380 0
置信度因子 $\theta$	0.027 0	0.014 4	0.012 5	0.006 8	0.015 5	0.024 9

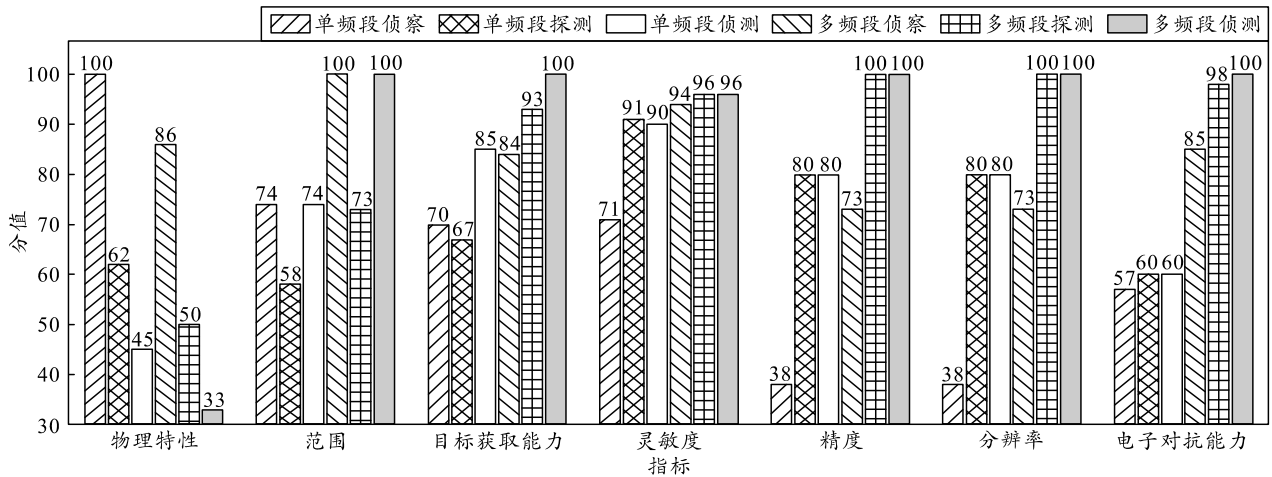


图 6 各一级指标评估值

观察图 6 可知，对于同功能雷达，单频段的物理特性评估值高于多频段的物理特性评估值；单频段和多频段的侦察、探测、侦测功能型雷达的物理特性评估值依次递减。分析可知，多频段雷达相较于单频段雷达结构复杂，元器件需一定集成度，工作时需频段切换，故其体积大、成本高、功耗高；同频段的侦察、探测、侦测型雷达功耗依次递增，设计生产结构复杂度和元器件综合性要求逐高，故成本、体积、重量逐增。

达不同模式的效能评估和综合评估。评估结果表明多频段雷达兼具多模式的作战效能更高，多频段侦察雷达的综合值最高。

该评估模型为系统效能评估提供了一种完整、全面的评估方法，评估模型算法简单、便于编程、适应性强，其结果对雷达系统的立项设计具有一定参考价值。同时该评估模型具有较好的泛化性，对其他系统的评估有一定借鉴意义，评估结果对其设计研制具有一定参考价值。

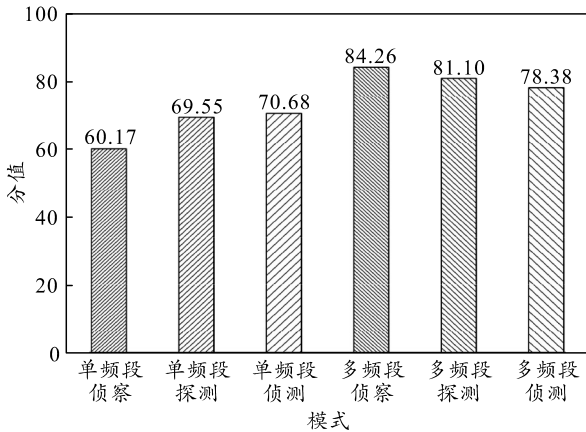


图 7 不同模式的评估值

观察图 7 可知，多频段侦察雷达的综合值最高。与效能值对比，X 频段侦测功能、多频段探测和侦测功能的综合值有一定程度下降；单频段和多频段侦察功能的综合值有一定上升。

### 6 结束语

笔者系统地阐述构建指标体系的原则及流程，将 AHP 与指数标度法结合，使确定的指标权重更符合实际情况，为实现系统有效准确的评估奠定基础。运用可拓云方法兼顾评估指标值的随机性和模糊性，实现评估结果的量化，完成单频段和多频段雷

### 参考文献：

- [1] 张杰, 唐宏, 苏凯. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 12-42.
- [2] 关成启. 某型导弹武器系统效能评估及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [3] 袁宏皓, 袁成. 体系效能评估技术发展综述[J]. 飞航导弹, 2019(5): 63-67.
- [4] 雷永林, 朱智, 甘斌, 等. 基于仿真的复杂武器系统作战效能评估框架研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(9): 1654-1663.
- [5] 杨远志, 王星, 程嗣怡, 等. 基于模糊层次分析法的雷达导引头干扰效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(10): 10-14, 20.
- [6] 王帅杰, 何俊, 王斌, 等. 基于改进模糊层次分析法的相控阵雷达效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(2): 90-93.
- [7] 盖美庆, 闫世强, 马梁, 等. 基于改进 ADC 模型的反导预警雷达作战效能评估[J]. 现代雷达, 2020, 42(3): 20-24.
- [8] 董家隆, 李桂祥, 陈辉. 基于改进 ADC 模型的天波雷达作战效能评估[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(2): 126-130.