

文章编号: 2095-4980(2022)03-0235-06

基于 AHP-PCA 的雷达导引头抗干扰能力评估方法

邱梦奇, 徐志明, 艾小锋, 赵 锋

(国防科技大学 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 多专家评价是评估雷达系统抗干扰能力的传统有效手段, 但存在不同专家水平高低、偏好不同引起的评价失准问题。该文将层次分析法(AHP)与主成分分析法(PCA)相结合, 提出了保证多专家群体决策一致性的 AHP-PCA 方法。将 AHP-PCA 运用于雷达导引头抗干扰能力评估, 得到不同专家对于同一环境下的导引头系统抗干扰能力评价的综合结果, 并定量描述该综合评价结果的群体决策一致性。结果表明 AHP-PCA 方法可以减少评价失准问题的影响, 降低由于专家偏好不同导致的评价的主观性, 具备工程应用价值。

关键词: 雷达导引头; 性能评估; 群体决策; 层次分析法; 主成分分析法

中图分类号: TN955

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021353

Anti-jamming performance evaluation method for radar seeker based on AHP-PCA

QIU Mengqi, XU Zhiming, AI Xiaofeng, ZHAO Feng

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Multi-expert evaluation, as a traditional and effective method to evaluate the anti-jamming capability of radar systems, has the disadvantages of inaccurate evaluation caused by differences of expert levels and individual preferences. In this paper, by combining Analytic Hierarchy Process(AHP) with Principal Component Analysis(PCA), an AHP-PCA method is proposed to ensure the consistency of multi-expert group decision-making. The comprehensive results about the anti-jamming capability of the seeker system in the same environment are obtained through the application of AHP-PCA to the anti-jamming capability evaluation of radar seekers. Then the consistency of the group decision on the comprehensive evaluation results is described quantitatively. The evidences suggest that the AHP-PCA method can reduce the impact of evaluation inaccuracy and the subjectivity of evaluation caused by different preferences of experts, and that AHP-PCA is of engineering application value.

Keywords: radar seeker; performance evaluation; group decision; Analytic Hierarchy Process; Principal Component Analysis

雷达导引头在工作过程中受到各种形式的干扰, 在目标搜索、截获阶段受到压制式、冲淡式等干扰的影响; 在目标的跟踪阶段, 受到角度诱骗、距离拖引等干扰, 这增大了导引头测量误差, 降低了制导命中率。因此, 雷达导引头的抗干扰能力是精确制导的关键因素, 是导弹武器有效发挥作战效能至关重要的一环, 科学准确地评估雷达导引头系统的抗干扰能力一直是业界关注的焦点。

多专家评价打分法是对雷达系统性能评估的一种重要方法。文献[1]为了消除个体决策的局限性, 引入专家判断力权值确定多专家的综合判断矩阵, 但是该方法仅从专家评价的一致性方面衡量专家的评估水平是不充分的。文献[2-3]分别采用加权几何平均综合排序向量法和“云模型”进行多专家评估结果的群体决策融合处理, 均降低了个体决策的主观因素影响, 增加了评估结果的稳定性。但是不能定量衡量专家组评估结果的一致性, 专家组评估结果过于分散, 难以形成统一决议时的解决方案, 人为因素对评估结果的影响还是不能很好地克服。文献[4]通过将群体决策引入层次分析法确立了各指标权重, 采用云重心法对系统综合效能进行了分析, 建立了

对相控阵雷达系统效能评估的方法,但对于群体决策中专家权重的确定仅依赖于判断矩阵,缺乏一致性检验。

本文使用 AHP 得到单一专家对于多个雷达导引头系统抗干扰能力的评价结果。然后将 AHP 与 PCA 相结合用于多专家群体决策,把主成分分析法中降维的思想引入到多专家评估结果的融合处理过程中,通过主成分贡献率来定量衡量群体决策结果的一致性程度,当群体决策结果一致性程度低于 50% 时,认为群体决策结果不成立,需要进行重新评估。该方法更大程度上避免了人为因素对评估结果的影响,剔除了不满足一致性要求的专家评价结果,发挥了群体决策的优势,进一步提高了雷达导引头性能评估结果的准确性。

1 基于 AHP 的抗干扰能力评估模型

基于 AHP 的评估方法通过两两比较建立每位专家对于同一环境下不同雷达导引头系统抗干扰能力的判断矩阵。层次分析法中构造判断矩阵的方法是一致矩阵法,即不把所有因素放在一起比较,而是两两相互比较,对比时采用相对尺度,以尽可能减少性质不同的因素相互比较的困难,以提高准确度,其基本步骤如下^[5]:

1) 因素分层:将决策目标、决策准则和决策对象按照它们之间的相互关系分为最高层、中间层和最低层。决策对象为 m 个待测评系统,表示为 $P = \{p_1, p_1, \dots, p_m\}$ 。

2) 构造判断矩阵:对从属于上一层各因素的底层因素,构造成对比较阵。用 a_{ij} 表示第 i 型雷达导引头系统相对于第 j 型雷达导引头系统在同一环境下的抗干扰能力, a_{ij} 根据层次分析 1~9 标度法进行取值,如表 1 所示,得到判断矩阵如式(1)所示:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3) 确定评价系数:对于每一个成对比较阵,计算最大特征值及对应特征向量,利用一致性比率做一致性检验。若检验通过,将该特征向量归一化后作为评价系数;若不通过,需重新构造成对比较阵。

对于判断矩阵, A 中的元素 a_{ij} 应满足式(2)中的关系。

$$\begin{cases} a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} (i, j = 1, 2, \dots, m) \\ a_{ij} > 0, a_{ii} = 1 (i = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (2)$$

当涉及的因素较多,构成的两两比较对较为繁杂时,专家的比较判断结果可能出现如下两种矛盾的情况^[1]:

1) a_1 比 a_2 好, a_2 比 a_3 好,但是 a_3 却比 a_1 好;

2) $a_{ik} \neq a_{ij} \cdot a_{jk}$ 。

此时,会对判断结果造成影响,因此,检验判断矩阵 A 是否满足一致性是 AHP 的一个关键环节。衡量一个 m 阶判断矩阵不一致程度的指标为随机一致性比率 CR(Consistency Ratio)。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中: $CI = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1)$, λ_{\max} 是判断矩阵 A 的最大特征值; RI 为平均随机一致性指标,可通过查表得到。

当 $CR < 0.10$ 时,便认为判断矩阵具有可以接受的一致性;当 $CR \geq 0.10$ 时,就需要调整和修正判断矩阵,使其满足 $CR < 0.10$,从而具有满意的一致性。

一个 m 阶的判断矩阵需要进行 $m(m-1)/2$ 次两两比较判断才能将判断矩阵填满,因此,若比较判断的次数少于 $m(m-1)/2$,则说明判断矩阵中某些元素是空缺的,此时将得到的判断矩阵称为残缺判断矩阵^[6]。文献[7]给出了残缺判断矩阵一致性检验方法。

当判断矩阵 A 通过一致性检验后,对矩阵 A 进行特征值分解,将最大特征值对应的特征向量作为同一环境下不同雷达导引头系统抗干扰能力的评价系数,数值越大代表雷达导引头对干扰的抵抗能力越强。将判断矩阵 A 中得到第 i 位专家对 m 个不同雷达导引头系统抗干扰能力的评价系数,表示如下:

$$C_i = [c_1^i, c_2^i, c_3^i, \dots, c_m^i] \quad (4)$$

表 1 层次分析 1~9 标度法

Table1 Scaling method of AHP

scale	definition
1	equal importance
3	moderate importance
5	strong importance
7	very strong importance
9	absolute importance
2, 4, 6, 8	intermediate values
lack of evaluation	0
reciprocals of above	$a_{ji} = 1/a_{ij}$

通过以上流程，在评价雷达导引头抗干扰能力时，定性的专家语言术语就转化为式(4)中定量表征的具体数值。

2 基于PCA的群体决策模型

使用基于AHP的干扰效果评估模型得到了每位专家对于不同雷达导引头系统抗干扰效果的评价系数，而在面临多专家决策时，可使用PCA将多种评价结果进行融合^[8]。假设专家的人数为 S ，将每位专家对于 m 个雷达导引头系统抗干扰能力的评价系数进行语言术语量化后，可以得到群体决策的评价矩阵 $Q(S \times m)$ 为：

$$Q = \begin{bmatrix} c_1^1 & c_2^1 & \dots & c_m^1 \\ c_1^2 & c_2^2 & \dots & c_m^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1^S & c_2^S & \dots & c_m^S \end{bmatrix} \quad (5)$$

将群体决策一致性评价结果的处理过程模型化为 $S \times m$ 矩阵 Q 到 $1 \times m$ 维向量 \tilde{C} 的数据降维过程。

如图1所示，PCA可最大程度地保证矩阵 Q 的数据信息，剔除掉那些与“主流意见”相悖的评价，蕴含了一种“少数服从多数”的群体决策数据融合准则。

上述群体决策一致性评价结果的计算过程可以表示为：

$$[\tilde{C}, R] = PCA(Q) \quad (6)$$

式中 R 为 Q 的特征协方差矩阵最大特征值与总特征值之和的比值，即主成分贡献率。通过主成分贡献率来定量衡量群体决策结果的一致性程度。

当 $R > 50\%$ 时，说明群体决策结果满足“少数服从多数”的决策原则，群体决策结果可以接受；当 $R \leq 50\%$ 时，群体决策结果一致性较差，需要进行重新评估或更换专家组成员。在更大程度上避免了人为因素对评估结果的影响，进一步提高了评估结果的准确性。

综上，本文提出的AHP-PCA算法的工作流程如图2所示。

3 实例应用分析

选取7位专家对同一环境作用下5个不同雷达导引头系统的抗干扰能力评价结果，使用AHP-PCA算法对雷达导引头系统的抗干扰能力进行排序。

7位专家通过对雷达导引头系统受干扰前后，自卫距离、干扰作用因子、有效跟踪概率、距离/速度/角度跟踪误差及导引头固有抗干扰能力这5种指标的变化对雷达导引头的抗干扰能力进行评价^[9]，判断同一环境下5部不同雷达导引头系统的抗干扰能力，使用 P_i 表示第 i 个系统的抗干扰能力，给出的判断矩阵如图3所示。

对表中得到的7个判断矩阵进行一致性检验，得到CR指标计算结果如表2所示。

从表2可以看出，除了第3位专家，其余6位专家的判断矩阵均满足一致性。对第3位专家的判断矩阵 A_3 进行分析发现，该专家对雷达导引头系统的判断结果存在明显矛盾的地方：

1) P_2 比 P_1 稍微强($a_{21} > a_{11}$)， P_1 比 P_3 明显强($a_{11} > a_{31}$)，但 P_3 却比 P_2 明显强($a_{31} > a_{21}$)。

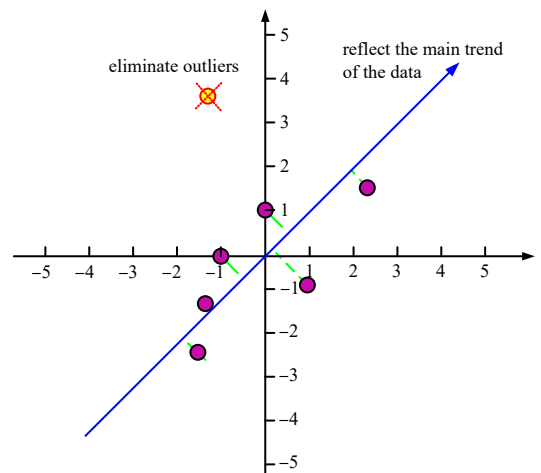


Fig.1 Schematic diagram of data compression principle
图1 数据压缩原理示意图

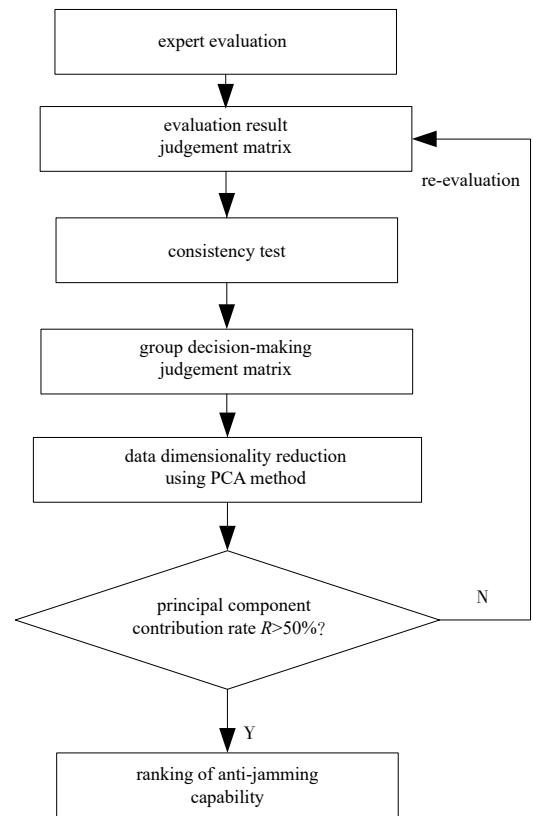


Fig.2 Flow of AHP-PCA algorithm
图2 AHP-PCA算法流程图

1	4	1/5	1	5	1	1	1/5	1/3	5
1/4	1	1/6	1/3	5	1	1	1/5	1/3	5
5	6	1	6	9	5	5	1	3	9
1	3	1/6	1	7	3	3	1/3	1	7
1/5	1/5	1/9	1/7	1	1/5	1/5	1/9	1/7	1
A_1					A_2				
1	1/3	5	1/7	5	1	7	1	4	1
3	1	1/5	1/3	1	1/7	1	1/5	1/3	1/7
1/5	5	1	3	1/9	1	5	1	5	3
7	3	1/3	1	1/7	1/4	3	1/5	1	1/3
1/5	1	9	7	1	1	7	1/3	3	1
A_3					A_4				
1	3	0	5	0	1	5	1/3	4	1
1/3	1	0	3	7	1/5	1	1/8	1	0
0	0	1	5	7	3	8	1	8	0
1/5	1/3	1/5	1	0	1/4	1	1/8	1	1/5
0	1/7	1/7	0	1	1	0	0	5	1
A_5					A_6				
1	4	1/5	3	4	\				
1/4	1	1/9	1/3	1					
5	9	1	7	5					
1/3	3	1/7	1	3					
1/4	1	1/5	1/3	1					
A_7									

Fig.3 The judgment matrix of 7 experts on the radar anti-interference ability

图3 7位专家对系统抗干扰能力的判断矩阵

表2 判断矩阵的一致性指标CR

Table2 The consistency index CR of the judgment matrix

expert	1	2	3	4	5	6	7
CR	0.095	0.043	1.25	0.05	0.021	0.011	0.070

2) P_2 比 P_1 稍微强 ($a_{21} > a_{11}$), P_1 比 P_5 明显强 ($a_{11} > a_{51}$), 但 P_2 却和 P_5 差不多。

因此, 第3位专家判断矩阵的一致性指标CR大于1, 不满足一致性的原则。

对每位专家评价系数向量进行极值归一化^[10](最大值对应1, 最小值对应0)后, 按行排列得到矩阵 Q 。

$$Q = \begin{bmatrix} 0.2511 & 0.0867 & 1 & 0.2390 & 0 \\ 0.1605 & 0.1605 & 1 & 0.4578 & 0 \\ 0.6421 & 0 & 0.1111 & 0.5423 & 1 \\ 0.7418 & 0 & 1 & 0.1217 & 0.5511 \\ 1 & 0.3829 & 0.5491 & 0.0863 & 0 \\ 0.3745 & 0 & 1 & 0.0028 & 0.4213 \\ 0.2885 & 0 & 1 & 0.1139 & 0.0183 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据式(6)得到群体一致性评价结果向量 \tilde{C} 为式(8), 主成分贡献率 $R=70%$, 大于50%, 群体决策结果有效。

$$\tilde{C} = [0.3019 \quad 0 \quad 1 \quad 0.1182 \quad 0.0226] \quad (8)$$

根据 \tilde{C} 可得在同一环境作用下, 5种雷达导引头系统抗干扰能力依次是: 系统3>系统1>系统4>系统5>系统2。

为比较 AHP-PCA 方法的有效性，选用多专家评价的 AHP 方法进行算法对比^[4]，该方法通过引入专家判断力权值来量化不同专家的判断准确性，得到群体一致性评价结果向量 \tilde{D} 为式(9)：

$$\tilde{D} = [0.6142 \quad 0.0783 \quad 1 \quad 0 \quad 0.2352] \tag{9}$$

根据 \tilde{D} 可得在同一环境作用下，5 种雷达导引头系统抗干扰能力依次是：系统 3>系统 1>系统 5>系统 2>系统 4。

为比较评价结果的合理性，利用每个专家的评价结果与群体一致性评价结果的相关度来定量衡量个体和群体决策的一致度。一致度计算公式如式(10)所示：

$$\begin{cases} Cor(C) = Q \cdot \tilde{C}^T \\ Cor(D) = Q \cdot \tilde{D}^T \end{cases} \tag{10}$$

根据上式得到两种方法中每个专家决策与群体决策评价结果的一致度，如图 4 所示。

对于专家 3 评价结果的一致度，AHP-PCA 方法比文献 [4] 方法得到的值更低，即 AHP-PCA 方法能更有效地将与群体决策一致度较差的专家评价剔除，得到的群体决策结果受到个体评价结果的影响更小，评价结果更合理。

4 结论

本文针对多专家评价存在水平高低、偏好不同引起的评价失准问题，借鉴 AHP 的定性数据处理方法，构建了语言术语的量化模型，采用 1~9 标度法对语言数据进行了量化描述，并衡量了专家语言评价信息的一致性。针对多专家的群体决策问题，提出了利用主成分分析法将多名专家的评价信息进行压缩，生成最终的评价结论，最大程度保留了多名专家的评价信息，同时又能剔除那些与“主流意见”相悖的无效评价，蕴含了一种“少数服从多数”的群体决策数据融合规则，从而提高了基于群体决策的雷达导引头抗干扰能力评价的有效性，为雷达导引头合理选择抗干扰方式提供了参考依据。此外，AHP-PCA 算法还可以进一步推广到其他基于多专家决策的问题中，如人才选拔、方案评估等。

参考文献：

[1] 刘飞强,蔡文豪. 多专家评价的 AHP 方法及其工程应用[J]. 广东土木与建筑, 2019,26(3):69-71. (LIU Feiqiang,CAI Wenhao. AHP method for multi-expert evaluation and its engineering application[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26(3):69-71.)

[2] 郭万海,张淑芳,闫国玉,等. 高频地波雷达作战效能评估方法研究[J]. 现代防御技术, 2008,36(2):133-137. (GUO Wanhai, ZHANG Shufang, YAN Guoyu, et al. Research on the evaluation method of high frequency ground wave radar combat effectiveness[J]. Modern Defence Technology, 2008,36(2):133-137.)

[3] 赵智剑,余科,马跃华,等. 基于 AHP-云模型的雷达抗干扰性能评估[J]. 空天防御, 2020,3(1):65-72. (ZHAO Zhijian,YU Ke, MA Yuehua,et al. Radar anti-jamming performance evaluation based on AHP-cloud model[J]. Air and Space Defense, 2020, 3(1):65-72.)

[4] 周怀军,侯银涛,刘强. 一种相控阵雷达系统效能评估方法[J]. 空间电子技术, 2010,7(1):66-69,85. (ZHOU Huaijun,HOU Yintao,LIU Qiang. A phased-array radar system effectiveness evaluation method[J]. Space Electronic Technology, 2010,7(1): 66-69,85.)

[5] 汤广富,安红,焦志. 基于层次分析法的协同干扰效能评估[J]. 电子信息对抗技术, 2016,31(4):58-62,78. (TANG Guangfu,AN Hong, JIAO Zhi. Collaborative jamming effectiveness assessment based on hierarchical analysis method[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2016,31(4):58-62,78.)

[6] 陈丽芳,张春英,许广利. 层次分析法中残缺矩阵排序的模糊方法[J]. 河北理工学院学报, 2006,28(2):63-65,86. (CHEN Lifang, ZHANG Chunying, XU Guangli. A fuzzy method for ranking residual matrices in hierarchical analysis[J]. Journal of

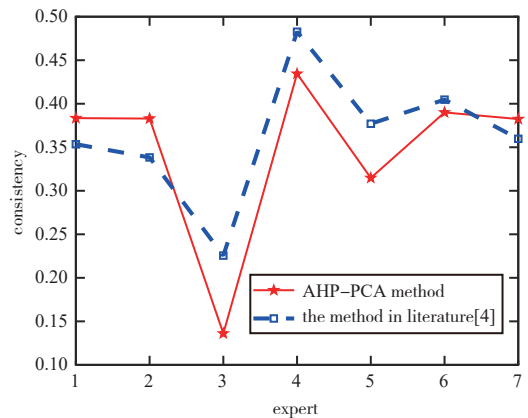


Fig.4 Consistency of individual and group decision-making evaluation results
图4 个体和群体决策评价结果的一致度

- Hebei Institute of Technology, 2006,28(2):63-65,86.)
- [7] 阮民荣. 层次分析法中残缺判断矩阵的一致性比例检验法[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2004,19(2):139-141. (RUAN Minrong. Consistency proportional test for residual judgment matrix in hierarchical analysis[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities(Natural Science Edition), 2004,19(2):139-141.)
- [8] 周立锋. 基于主成分分析的测量雷达效能评估方法[J]. 现代雷达, 2019,41(2):7-9,25. (ZHOU Lifeng. Effectiveness assessment method of measurement radar effectiveness based on principal component analysis[J]. Modern Radar, 2019,41(2):7-9,25.)
- [9] 杨远志,王星,陈游,等. 主动雷达导引头干扰效能评估指标体系的构建与约简[J]. 现代雷达, 2016,38(8):7-12. (YANG Yuanzhi, WANG Xing, CHEN You, et al. The construction and approximate simplification of active radar seeker interference effectiveness assessment index system[J]. Modern Radar, 2016,38(8):7-12.)
- [10] 郭亚军,易平涛. 线性无量纲化方法的性质分析[J]. 统计研究, 2008(2):93-100. (GUO Yajun, YI Pingtao. Property analysis of linear dimensionless methods[J]. Statistical Research, 2008(2):93-100.)

作者简介:

邱梦奇(1995-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电子信息系统仿真建模评估. email: mengqiq21@163.com.

艾小锋(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为双/多基地雷达、雷达电子战建模与仿真.

徐志明(1995-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为双基地雷达目标特性与特征提取.

赵 锋(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电子信息系统仿真建模评估.