

基于非对称贴近度的预警雷达情报质量评估

刘仁争^{*①②} 田康生^① 彭富强^① 李浩^①

^①(空军预警学院 武汉 430019)

^②(火箭军指挥学院 武汉 430012)

摘要: 针对预警雷达情报质量评估中, 模糊因素影响评估有效性的问题, 该文提出一种基于非对称贴近度的预警雷达情报质量分析评估方法。分析预警雷达情报获取、传输和作战运用环境特点, 从及时性、准确性、完整性、连续性和客观性等6个方面构建其质量评估指标体系, 进而建立因素集、评语集和权重集, 利用非对称贴近度对其进行模糊综合评估。该研究方法和结论可有效分析评判预警雷达情报质量, 也能帮助发现影响情报质量优劣的瓶颈与短板, 还可解决复杂作战环境下预警雷达情报质量评估与分析等问题研究提供一定借鉴。

关键词: 预警雷达; 情报质量; 模糊综合评判; 非对称贴近度

中图分类号: TN956

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0130-06

DOI: 10.11999/JEIT180116

Quality Analysis of Early Warning Radar Intelligence Based on Asymmetrical Proximity

LIU Renzheng^{①②} TIAN Kangsheng^① PENG Fuqiang^① LI Hao^①

^①(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

^②(Rocket Force Command College, Wuhan 430012, China)

Abstract: Considering the limits of fuzzy comprehensive evaluation on quality of early warning radar intelligence in actual training, a method of quality evaluation on radar intelligence based on the theory of asymmetric proximity and multilevel fuzzy comprehensive evaluation is proposed. Through the analysis of the producing, transmission, using environmental factors of early warning radar intelligence, the evaluating metric of quality evaluation on radar intelligence integrated for six classes, that are timely, accuracy, completeness, continuity, objectiveness and so on, and then factor set, weight set, and comment set are established, and the quality of the radar intelligence based on the asymmetric proximity with the fuzzy comprehensive evaluation is carried out. This researching methods and results not only can take comprehensive evaluations of a certain quality of radar intelligence, help for finding out the factors to determine the quality of the radar intelligence, but also can fight for providing certain reference to solve complex environment of radar intelligence of operational effectiveness evaluation problem.

Key words: Early warning radar; Quality of intelligence; Fuzzy comprehensive evaluation; Asymmetrical proximity

1 引言

预警雷达情报是以预警雷达为探测手段获取的目标情报, 包含目标的坐标、数量、属性等信息, 主要用于指挥员和指挥机关及时掌握空天战场态势, 是未来联合作战情报保障的重要组成部分^[1]。为不断提高预警雷达作战效能, 需要及时对其提供的情报质量进行分析评估, 查找制约瓶颈与短板, 以便及时应对^[2]。不少学者对此做了一些探索与研

究, 如预警雷达部署单位, 通常按照任务将各项操作进行分解, 再组织考核组进行百分制或千分制集中评分, 最后按设定权重加权比较各单位情报质量的优劣^[3], 此方法操作简单, 但准确性和可信度受到怀疑; 文献^[4]从时效性、准确性、可用性、全面性、客观性和连续性等方面构建了雷达情报质量评估指标, 并进行建模分析, 结合了定性与定量方法, 但是指标体系仅有一级, 略为简单; 文献^[5]从航迹发现概率、航迹精度、航迹连续率、空情掌握率和虚假点/航迹率等方面构建了预警机雷达情报质量评估指标体系, 并进行了定量描述和建模仿

收稿日期: 2018-01-26; 改回日期: 2018-10-16; 网络出版: 2018-10-22

*通信作者: 刘仁争 35565426@qq.com

真，可定量评价预警机雷达情报质量，但暂不具备影响因素分析功能。国外主要侧重于航迹质量评估和信息融合评估的方法研究与探索，如文献[6]提出了航迹质量评估指标和计算方法，并进行了建模、仿真与分析；文献[7]对雷达情报信息融合的均值法、Bayesian法和D-S证据理论融合算法进行了仿真与对比分析。特别是，上述方法对作战人员、目标环境、雷达装备状态以及综合保障等多种因素，在未来作战中大量存在的模糊性考虑不够，导致评估结果的有效性不高[8]。模糊综合评判的非对称贴近度理论可有效提高评估有效性和可信度[9]，特别对两个模糊集之间通过贴近度进行等级划分效果更好。

本文根据预警雷达情报质量评估的实际需求与现状，通过建立评价对象因素集、评语集与权重集，应用模糊综合评判的非对称贴近度理论对雷达情报质量的评价结果进行集化，从而有效评判模糊信息条件下的雷达情报质量效益[10]。考虑到雷达情报生产时，人-机-环相互作用，多层次、多耦合、模糊性等因素交替影响，单一层级的模糊综合评判难以获得准确的评判结果，需要对影响因素进行详细、分层、解耦等模糊化分析，进行多级模糊综合评判。

2 预警雷达情报质量评价指标体系

雷达情报的生产流程为：首先是单雷达站进行搜索发现目标、测定录取点迹、生成目标航迹、判定目标属性、上报雷达情报数据。雷达情报处理中心，再对各雷达站上报的情报数据进行时空配准、航迹融合，完成目标识别、威胁估计、情报产品分发以及根据用户反馈调整任务等[11]。可见，对预警雷达情报质量进行综合评价，需要从影响其质量的因素，沿着其生产流程，先建立科学完整的评估指标体系，再选定评估模型进行综合评价[12]。

影响雷达情报质量的因素通常包括装备水平、人员状态、目标特性及环境条件等，构成复杂且相互影响。在实际工作中对雷达情报保障单位的情报质量评价标准，常以定性方法评价各单位雷达情报质量，同时区分搜索发现、报知速度、准确度、报知密度以及错漏压情等，辅以人工统计分析进行综合评价[13]。本文在此基础上，以雷达站规定时间内情报质量为评价对象，结合情报生产流程和雷达装备工作过程，参考文献[3]和文献[4]，按照及时性、准确性、完整性、客观性、连续性以及错漏压情等6个方面，提出雷达情报质量评估指标。其中，及时性包括雷达发现距离、报知速度；准确性包括方位距离、高度和速度误差，以及判断、错漏点率

等；连续性包括目标航迹连续性和雷达情报保障连续性；完整性主要包括目标完整性，即每批情报中掌握目标的完整度，以及航迹完整性，即雷达掌握每个目标的航迹完整情况；完整性主要考察雷达站情报人员在处理每一批情报过程中有无严格按照要求上报实际数据，如要素、来源等；而错漏压情主要统计出现的较大的错、漏、压情等[14]。

3 基于非对称贴近度的预警雷达情报质量模糊综合评判

采用模糊综合评判时，最常用的是最大隶属度原则，它的评判结果与基于对称贴近度分析法结果一致，有时失效。主要原因是它们均只考虑两模糊子集中最贴近的集合，其它则不再考虑，因而有时会导致评估结果失效。此时，可选用非对称贴近度分析法进行评判。步骤如下。

3.1 建立因素集

设 $F = (F_1, F_2, \dots, F_m)$ ，表示待评对象的所有影响因素的集合，称为因素集。各因素之间，相互独立，即 $F_i \cap F_j = \emptyset (i \neq j)$ ；如果1级因素由多项2级影响因素组成，可表示为 $F_i = (F_{i1}, F_{i2}, \dots)$ ($i = 1, 2, \dots, m$)， F_i 为第1层因素集， F_{ij} 为第2层因素集，按照设定，可建立预警雷达情报质量评价的因素集[15]，如表1所示。

3.2 设定评语集

评估预警雷达情报质量等级时，通常采用经验的评价词语进行分级。本文按照其在情报保障中的

表 1 雷达情报质量评价指标体系

影响因素子集	影响因素
及时性 F_1	搜索发现 F_{11}
	报知速度 F_{12}
准确性 F_2	方位距离误差 F_{21}
	高度误差 F_{22}
	速度误差 F_{23}
	判断准确性 F_{24}
	错批率 F_{25}
	混批率 F_{26}
连续性 F_3	报知密度 F_{31}
	航迹漏点率 F_{32}
完整性 F_4	要素完整率 F_{41}
	目标掌握率 F_{42}
客观性 F_5	情报要素客观 F_{51}
	情报来源客观 F_{52}
错漏压情 F_6	错情 F_{61}
	漏情 F_{62}
	压情 F_{63}

作用大小程度,采用经验语气算子设定其评语集,也就是{优秀 v_1 ,良好 v_2 ,合格 v_3 ,不合格 v_4 ,一般事故 v_5 ,严重事故 v_6 },即

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_6\} \quad (1)$$

3.3 构造隶属度矩阵

预警雷达情报质量评估的隶属度,表示的是各个因素对最终评估结论的支持度,取值区间为(0,1)的实数,表达式为

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1c} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mc} \end{bmatrix} = (t_{ij})_{m \times c} \quad (2)$$

式中, t_{ij} 表示因素 i 隶属 j 级评语的程度。

3.4 权重计算

本文采用的是1~9标度法,每个因素的权重由预警雷达情报保障领域的专家,以投票的方式确定评价指标的权重集,相对比较的描述见表2。

表2 1~9标度法评价标准

标度	相对比较
1	因素A, B同等重要
2	1, 3标度之间的状态
3	A因素比B因素重要一点
4	3, 5标度之间的状态
5	A因素比B因素重要较多
6	5, 7标度之间的状态
7	A因素比B因素重要很多
8	7, 9标度之间的状态
9	A因素比B因素绝对重要

权重的计算步骤为:邀请 t 位专家投票,各位专家分别对 n 个因素的重要度进行两两比较,便可得到专家 k 的单位判断矩阵:

$$M^{(k)} = \left(M_{ij}^{(k)} \right)_{n \times n} \quad (3)$$

其中, $M_{ij}^{(k)} = 1 / M_{ji}^{(k)}$ 。

按照每个专家在该领域的影响力不同,对每一位专家的单位判断矩阵赋以相应的权数 r_k (当专家层次相同或相近时,权数取1),便可得到权重的综合判断矩阵^[16]:

$$M = (M_{ij})_{n \times n} \quad (4)$$

其中, $M_{ij} = \left(r_k \cdot M_{ij}^{(k)} \right) / \sum_{k=1}^t r_k$ 。

矩阵的各列进行归一化处理后,便得到归一化的综合判断矩阵:

$$Q = (q_{ij})_{n \times n} \quad (5)$$

其中, $q_{ij} = M_{ij} / \sum_{k=1}^n M_{kj}$ 。

式(5)中每一行表示该因素集相对于其他因素集的归一化重要程度,对其取和即为该因素集的重要程度。

$$a = (a_i)_n \quad (6)$$

其中, $a_i = \sum_{j=1}^n q_{ij}$ 。

进一步归一化后,便可得权重向量:

$$W = (\omega_i)_n \quad (7)$$

其中, $\omega_i = a_i / \sum_{k=1}^n a_k$ 。

3.5 基于非对称贴近度的模糊综合评判

(1)评语集:基于评价信息的局限性,本文采用加权平均算子对评语集的评价信息进行综合处理,有

$$B = W \bullet T = (b_j), j = 1, 2, \dots, c \quad (8)$$

式中, $b_j = \sum_{i=1}^m \omega_i u_{ij}$, $j = 1, 2, \dots, c$ 。 u_{ij} 为一级指标 F_i 隶属 j 级评语的隶属度。

(2)基于非对称贴近度的评价结果集化:贴近度是对2个模糊子集接近程度的一种度量,分为对称贴近度和非对称贴近度^[17]。在进行等级评判时,非对称贴近度相对于对称贴近度更加准确有效。

定义 非对称贴近度^[18]:

$$N(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \mu_A^{\frac{1}{p}}(v_k) - \mu_B^{\frac{1}{p}}(v_k) \right|^k \quad (9)$$

其中, μ_A, μ_B 分别为模糊子集 A, B 的隶属度, v_k 为对应的 k 级评语, p 为调节因子,主要用于调节评判结果集化的程度,取值越大集化越强,本文取 $p = 1$,以便于评判结果向更好的方向集化。若 $b_i = \max_{1 \leq j \leq c} (b_j)$,则称 $D_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0) = (d_1, \dots, d_{i-1}, 1, d_{i+1}, \dots, d_c)$ (即1是分量 i)是 v_k 的特征模糊子集^[19]。

应用非对称贴近度对评价结果进行等级评判的步骤为:

第1步 评语集 B 标准化处理:将 $b_i, i \in i_c = \{1, 2, \dots, c\}$ 转移至最后一位 c ;对于任意的 $i_1, i_2 \in i_c$,当 $|i_1 - i| > |i_2 - i|$ 时, b_{i_1} 转移至 b_{i_2} 的前一位;当 $|i_1 - i| = |i_2 - i|$ 且 $i_1 > i_2$ 时, b_{i_1} 转移至 b_{i_2} 的前一位,有

$$\begin{aligned} B^{(i)} &= (b_1^i, b_2^i, \dots, b_c^i) \\ &= (\dots, b_{i+2}, b_{i-2}, b_{i+1}, b_{i-1}, b_i) \end{aligned} \quad (10)$$

采用同样的方法,对 D_i 进行标准化处理,有 $D_c = (d_1^c, d_2^c, \dots, d_{n-1}^c, d_n^c)$ 。

第2步 非对称贴近度 $N(B, D_i)$ 的计算:

$$N(B, D_i) = N(B^{(i)}, D_c), i \in i_c \quad (11)$$

$$N(B^{(i)}, D_c) = 1 - \frac{1}{c} \sum_{r=1}^c |(b_r^i)^p - (d_r^c)^p|^r \quad (12)$$

其中, $N(B, D_i)$ 为模糊综合评判集 B 与评语 v_i 的贴近度, $B^{(i)}, D_c$ 为标准化处理后的 B, D_i 。

第3步 评判结果决策: 选取非对称贴近度值最大值 $N(B, D_k) = \max_{1 \leq i \leq c} N(B, D_i)$ 对应的评价值为决策结果 v_k , 评估流程如图1所示。

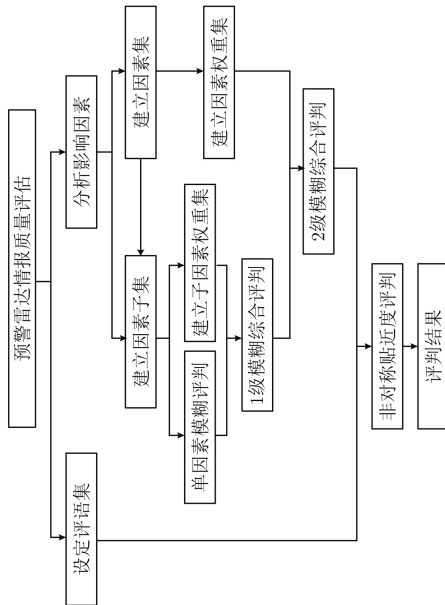


图1 预警雷达情报质量模糊综合评判流程图

4 实例分析

以某预警雷达站情报质量综合评估为例, 评判组由部队长、雷达技师、情报参谋等代表及情报分析专业人员组成。为保证研究的可靠性和可信性, 本文设定共邀请30人组成评判组。评判组按照统一的评判标准结合自己的判断, 对规定时间内雷达站情报质量进行评价, 并给出自己的结果。结果统计如表3所示。

(1) 根据评价结果构造模糊评判矩阵: 采用平均加权的方式计算各影响因素对各级评语的隶属度。可构造出模糊评判矩阵如下:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.33 & 0.27 & 0.10 & 0.00 & 0.00 \\ 0.36 & 0.27 & 0.30 & 0.07 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.30 & 0.23 & 0.10 & 0.13 & 0.00 \\ 0.36 & 0.27 & 0.30 & 0.07 & 0.00 & 0.00 \\ 0.23 & 0.37 & 0.30 & 0.07 & 0.03 & 0.00 \\ 0.17 & 0.40 & 0.37 & 0.06 & 0.00 & 0.00 \\ 0.33 & 0.33 & 0.34 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.37 & 0.30 & 0.27 & 0.06 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 0.23 & 0.30 & 0.37 & 0.07 & 0.03 & 0.00 \\ 0.23 & 0.37 & 0.37 & 0.03 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

表3 影响因素评价结果统计表

	优秀	良好	合格	不合格	一般事故	严重事故
F_{11}	9	10	8	3	0	0
F_{12}	11	8	9	2	0	0
F_{21}	12	9	7	1	1	0
F_{22}	11	8	9	2	0	0
F_{23}	7	11	9	2	1	0
F_{24}	5	12	11	2	0	0
F_{25}	10	10	10	0	0	0
F_{26}	11	9	8	2	0	0
F_{31}	7	9	11	2	1	0
F_{32}	7	11	11	1	0	0
F_{41}	9	9	11	1	0	0
F_{42}	6	11	10	2	1	0
F_{51}	12	9	9	0	0	0
F_{52}	7	10	10	2	1	0
F_{61}	9	9	11	1	0	0
F_{62}	9	10	11	0	0	0
F_{63}	9	10	10	1	0	0

$$T_4 = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.30 & 0.37 & 0.03 & 0.00 & 0.00 \\ 0.20 & 0.37 & 0.33 & 0.07 & 0.03 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$T_5 = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.30 & 0.30 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.23 & 0.33 & 0.33 & 0.07 & 0.04 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$T_6 = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.30 & 0.37 & 0.03 & 0.00 & 0.00 \\ 0.30 & 0.33 & 0.37 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.30 & 0.34 & 0.33 & 0.03 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

(2) 因素集中各因素对雷达情报质量的影响程度不同, 为获取各因素、因素子集之间的权重, 通过1~9标度法问卷调查部队长、设计总师、雷达系统专家等3类人员, 以确定各影响因素之间的权重值。由于调研对象均为该领域专业人士, 其认知判断均十分重要, 故取各调研对象的权数相同。

分析因素集 $F = (F_1, F_2, \dots, F_6)$ 中各因素子集之间的重要度调研数据, 得到专家系统的综合判断矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} 1.0 & 1.5 & 0.8 & 0.7 & 3.0 & 2.5 \\ \frac{1}{1.5} & 1.0 & 0.6 & 0.5 & 2.1 & 1.8 \\ \frac{1}{0.8} & \frac{1}{0.6} & 1.0 & 0.9 & 3.6 & 3.1 \\ \frac{1}{0.7} & \frac{1}{0.5} & \frac{1}{0.9} & 1.0 & 4.2 & 3.7 \\ \frac{1}{3.0} & \frac{1}{2.1} & \frac{1}{3.5} & \frac{1}{4.1} & 1.0 & 0.8 \\ \frac{1}{2.5} & \frac{1}{1.8} & \frac{1}{3.6} & \frac{1}{3.8} & \frac{1}{0.8} & 1.0 \end{bmatrix}$$

根据3.4节评价指标间权重的构建方法,通过MATLAB软件编程,得到因素集各因子集间的权重集为

$$\mathbf{W} = [0.20 \quad 0.14 \quad 0.24 \quad 0.27 \quad 0.07 \quad 0.08]$$

同理,可计算及时性、准确性、连续性等各自的因子集的权重集。其中, $\mathbf{W}_1 = [0.44 \quad 0.56]$ 。

限于篇幅原因,其他因子集的权重集等计算不予赘述。

(3)对比分析:采用加权平均算子,可得到各因素集的模糊综合评判向量:

$$\mathbf{B} = [0.2736 \quad 0.3285 \quad 0.3339 \quad 0.0578 \quad 0.0137 \quad 0]$$

(a)最大隶属度评估: $\mathbf{B}_{\max} = \mathbf{B}_{(3)} = 0.3339$,可判断该雷达站情报质量评估水平为“合格”。

(b)欧氏贴近度评估:采用欧氏贴近度评估方法,即

$$N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_1) = 1 - \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (B_i - D_{1i})^2} = 0.6463$$

同理:

$$N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_2) = 0.6732, \quad N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_3) = 0.6760$$

$$N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_4) = 0.5561, \quad N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_5) = 0.5399$$

$$N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_6) = 0.5349$$

则

$$\max_{1 \leq i \leq 6} N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_i) = N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_3)$$

判断结果为“合格”,与最大隶属度方法结果一致。

(c)非对称贴近度评估:先根据式(10)对 $\mathbf{B}$ 进行标准化:

$$\mathbf{B}^{(1)} = [0 \quad 0.0137 \quad 0.0578 \quad 0.3339 \quad 0.3285 \quad 0.2763]$$

$$\mathbf{B}^{(2)} = [0 \quad 0.0137 \quad 0.0578 \quad 0.3339 \quad 0.2736 \quad 0.3285]$$

$$\mathbf{B}^{(3)} = [0 \quad 0.0137 \quad 0.2736 \quad 0.0578 \quad 0.3285 \quad 0.3339]$$

$$\mathbf{B}^{(4)} = [0.2736 \quad 0 \quad 0.3285 \quad 0.0137 \quad 0.3339 \quad 0.0578]$$

$$\mathbf{B}^{(5)} = [0.2736 \quad 0.3285 \quad 0.3339 \quad 0 \quad 0.0578 \quad 0.0137]$$

$$\mathbf{B}^{(6)} = [0.2763 \quad 0.3285 \quad 0.3339 \quad 0.0578 \quad 0.0137 \quad 0]$$

再根据式(11)、式(12),通过Matlab编程计算可知非对称贴近度为

$$N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_1) = N(\mathbf{B}^{(1)}, \mathbf{D}_1) = 0.9727$$

同理:

$$N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_2) = 0.9823, \quad N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_3) = 0.9814$$

$$N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_4) = 0.8312, \quad N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_5) = 0.7768$$

$$N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_6) = 0.7636$$

显然:

$$\max_{1 \leq i \leq 6} N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_i) = N(\mathbf{B}, \mathbf{D}_2)$$

可见,根据非对称贴近度值判断,该雷达站情报质量评估水平为“良好”。综合分析表3数据,可看出评定该雷达站情报质量水平为良好更为合理。

(4)结果分析:上述评估结果可以看出,(a)采用综合模糊评估方法进行预警雷达情报质量评估时,当模糊综合评判向量 $\mathbf{B}$ 中最大值明显大于次大值时,可采用最大隶属度或欧氏贴近度评估方法进行评估,两者评估结果一致;(b)当最大值与次大值较接近时,最大隶属度或欧氏贴近度评估方法将出现有效性问题,采用非对称贴近度方法可进一步集化评估结果,得出更可信的评估结果。

5 结论

本文根据预警雷达情报质量评估的主要影响因素、雷达部队情报质量评估实践和雷达情报生产过程与特征,构建了预警雷达情报质量评估指标体系,并结合多级模糊综合评判方法,通过分析影响雷达情报质量的决定因素集,建立了及时性、准确性、连续性、完整性、客观性等6大类因素集,以及各因素之间、因素集之间的权重集。在此基础上,应用最大隶属度、欧氏贴近度和非对称贴近度方法对某雷达情报质量进行了对比分析。对比结果表明,采用非对称贴近度方法的分析评估可信性更好,同时该研究方法和结论可根据条件推广,有助于发现影响雷达情报质量的短板,也为解决复杂战场环境下雷达情报质量分析评估问题提供一定借鉴。

参考文献

- [1] 马建朝. 雷达数据处理[M]. 武汉: 空军预警学院, 2012: 2-11. MA Jianchao. Radar Data Processing[M]. Wuhan: Air Force Early Warning Academy, 2012: 2-11.
- [2] 巴宏欣, 华锋, 杨颜靖. 雷达情报组网系统作战效能评估[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(2): 20-27. doi: 10.15908/j.cnki.cist.2016.02.004. BA Hongxin, HUA Feng, and YANG Yanjing. Operational efficiency assessment for radar intelligence netting system[J]. Command Information System and Technology, 2016, 7(2): 20-27. doi: 10.15908/j.cnki.cist.2016.02.004.
- [3] 刘江波. 雷达装备在复杂电磁环境下适应性试验研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(3): 74-77. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2017.03.019. LIU Jiangbo. Radar equipment adaptability test under complex electromagnetic environment[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(3): 74-77. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2017.03.019.
- [4] 杨兆民, 彭思勇, 尹康银, 等. 雷达情报质量评价方法研究[J]. 空军雷达学院学报, 2011(1): 31-33. doi: 10.3969/j.issn.1673-

- 8691.2011.01.009.
- YANG Zhaomin, PENG Siyong, YIN Kangyin, *et al.* Study of assessment scheme for radar intelligence[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2011(1): 31–33. doi: 10.3969/j.issn.1673-8691.2011.01.009.
- [5] 王怀军, 薛银地, 郭建明. 预警机雷达情报质量评估指标研究[J]. *雷达科学与技术*, 2013, 11(6): 569–573. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2013.06.001.
- WANG Huaijun, XUE Yindi, and GUO Jianming. Research on evaluation parameters of airborne early warning radar intelligence quality[J]. *Radar Science and Technology*, 2013, 11(6): 569–573. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2013.06.001.
- [6] DIETRICH N. Performance metrics for correlation and tracking algorithms[D]. [Ph.D. dissertation], Naval Postgraduate School Monterey, California, 2001.
- [7] NASERI A and AZMOON O. Evaluation of data fusion in radars network and determination of optimum algorithm[J]. *International Journal of UbiComp*, 2011, 4(2): 51–67.
- [8] 李琼彪, 冯小龙, 李学海. 基于多级模糊综合评判法的指挥模拟训练效果评估[J]. *指挥控制与仿真*, 2016, 38(5): 79–81. doi: 10.3969/j.issn.1673-3819.2016.05.017.
- LI Qiongbiao, FENG Xiaolong, and LI Xuehai. Effect evaluation based on multilevel fuzzy comprehensive evaluation method about command simulation training[J]. *Command Control & Simulation*, 2016, 38(5): 79–81. doi: 10.3969/j.issn.1673-3819.2016.05.017.
- [9] 谢锐, 万显荣, 方高, 等. 外辐射源雷达网络定位性能评估与实验验证[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(3): 753–757. doi: 10.11999/JEIT150733.
- XIE Rui, WAN Xianrong, FANG Gao, *et al.* Positioning performance evaluation for passive radar network and experimental verification[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 753–757. doi: 10.11999/JEIT150733.
- [10] ZHU Runkai, LIANG Qianchao, and ZHAN Haiyang. Analysis of aero-engine performance and selection based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 174(2): 1202–1207.
- [11] 赵丹玲, 谭跃进, 李际超, 等. 基于作战环的武器装备体系贡献度评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(10): 2239–2247. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.13.
- ZHAO Danling, TAN Yuejin, LI Jichao, *et al.* Armament system of systems contribution evaluation based on operation loop[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(10): 2239–2247. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.13.
- [12] 吴志建, 方胜良, 吴付祥. 雷达对目标探测航迹质量建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(1): 186–190.
- WU Zhijian, FANG Shengliang, and WU Fuxiang. Research on track quality modeling and simulation of target detection by radar[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(1): 186–190.
- [13] 张发明, 刘志平. 组合评价方法研究综述[J]. *系统工程学报*, 2017, 32(4): 557–569. doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.04.012.
- ZHANG Faming and LIU Zhiping. Combined evaluation methods: A literature review[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(4): 557–569. doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.04.012.
- [14] 戚宗锋, 韩山, 李建勋. 基于粗糙集的雷达抗干扰性能评估指标体系研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(2): 335–342. doi: 10.16182/j.cnki.joss.2016.02.011.
- QI Zongfeng, HAN Shan, and LI Jianxun. Research on radar anti-jamming performance evaluation index system based on rough set theory[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(2): 335–342. doi: 10.16182/j.cnki.joss.2016.02.011.
- [15] 卢雷, 史颖超, 尹振兴. 雷达装备保障系统效能综合评估[J]. *雷达科学与技术*, 2017, 15(3): 276–280. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2017.03.010.
- LU Lei, SHI Yingchao, and YIN Zhenxin. Efficiency evaluation of radar equipment support system[J]. *Radar Science and Technology*, 2017, 15(3): 276–280. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2017.03.010.
- [16] 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. doi: 10.3969/j.issn.1002-0640.2015.02.023.
- WANG Shuaijie, HE Jun, WANG Bin, *et al.* An effectiveness evaluation research of phased array radar based on improved fuzzy AHP[J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(2): 90–93. doi: 10.3969/j.issn.1002-0640.2015.02.023.
- [17] 李莹芳. 贴近度理论及其在模糊推理中的应用[D]. [博士学位论文], 西南交通大学, 2015.
- LI Yingfang. Similarity measure on fuzzy reasoning[D]. [Ph.D. dissertation], Southwest Jiaotong University, 2015.
- [18] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2004, 39(2): 25–29. doi: 10.3969/j.issn.1671-9352.2004.02.006.
- ZHANG Xiaoping. The definition of product about fuzzy comprehensive evaluation methods based on closeness[J]. *Journal of Shandong University*, 2004, 39(2): 25–29. doi: 10.3969/j.issn.1671-9352.2004.02.006.
- [19] 刘彦, 裴晓羽, 吕中杰, 等. 基于层次分析-模糊综合评价法的相控阵雷达毁伤评估[J]. *北京理工大学学报*, 2016(10): 996–1000. doi: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.10.002.
- LIU Yan, PEI Xiaoyu, LÜ Zhongjie, *et al.* Damage assessment of phased array antenna based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive assessment[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016(10): 996–1000. doi: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.10.002.
- 刘仁争: 男, 1980年生, 博士生, 讲师, 研究方向为雷达资源管理、雷达情报分析。
- 田康生: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达资源管理、数据融合。
- 彭富强: 男, 1982年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为雷达情报处理、雷达组网。
- 李 浩: 男, 1982年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为雷达情报分析、数据融合。