doi:10.11887/j.cn.201703024　　http://journal.nudt.edu.cn

改进 IAHP－CIM 模型的雷达组网探测能力评估方法*

崔玉娟,察　豪
(海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉　430033)

摘　要:针对雷达组网探测能力的评估问题,采用鱼骨图法对影响雷达组网探测能力的多种因素进行梳理,得到结构层次清晰的指标评价体系。采用改进的区间层次分析—控制区间和记忆模型对该指标体系进行评估,具体方法是:运用区间层次分析法构造区间判断矩阵;利用蛙跳算法求解区间判断矩阵中满足最小一致性的确定性矩阵;利用控制区间和记忆模型来确定各指标的风险概率,实现指标体系的评估。以具体的案例为对象进行仿真实验,结果表明,所提评估方法有效,评估结论相对客观、可信,对雷达组网探测能力评估具有一定参考价值,从而为雷达组网的优化部署奠定良好基础。

关键词:雷达组网;探测能力;鱼骨图;区间层次分析法;蛙跳算法
中图分类号:TN95　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001－2486(2017)03－158－07

Assessment method for radar network detection capabilities of the improved IAHP-CIM model

CUI Yujuan, *CHA Hao*
(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at evaluating radar network detection capabilities, firstly, a multi-level evaluation index system was established by using the fishbone diagram to analyze various complex factors. Secondly, the IAHP－CIM (interval analytic hierarchy process-controlled intervals and memory) model was proposed to evaluate the index system. Specifically, interval analytic hierarchy process was used to solve the problem of quantified fuzzy index, and the interval judgment matrix was obtained; the Shuffled frog leaping algorithm was applied to optimal interval matrix and the certain number matrix with the minimum consistency ration was obtained; the risk probability of indexes were acquired by the controlled intervals and memory model, and synthetically the index system was evaluated. Finally, simulation results demonstrate the feasibility of the proposed evaluation method, and the relatively objectivity of evaluation conclusion are of great significance to optimize arrangement for radar network.

Key words: radar network; detection capability; fishbone diagram; interval analytic hierarchy process; shuffled frog leaping algorithm

雷达作为防空预警体系的关键装备,在情报信息获取、空中目标引导方面起着至关重要的作用。然而随着科学技术的发展,各种先进武器装备的不断更新,使得雷达所处的战场环境越来越复杂,面临的威胁越来越大,仅仅依靠单部雷达已无法满足现代战争的需求。雷达组网则被认为是应对当前复杂电磁环境的有效手段,可以通过网内不同体制、不同功能、不同频段的多部雷达的相互配合,实现防空预警体系内的情报共享,提高发现目标的精度和速度,增强体系的作战效能。雷达组网探测能力是衡量雷达组网作战效能的重要因素,因此, 采用有效的方法来评估雷达组网的探测能力,对评估雷达组网作战效能有着重要的意义,同时还可以为雷达组网的优化部署提供一个重要的指标参数[1－2]。

评估雷达组网探测能力是一个涉及多因素、多学科的复杂问题。对此,研究人员做了大量的研究工作,基本思想都是以实现特定目标为前提,按照与之相关的原则,构建指标评价体系[3－4],采用合理的方法对该指标体系进行评估。文献[5]从雷达组网防空作战效能的定义出发,运用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)分析各要素,并建立各要素的支配关系,进而构建递阶层次的评估指标体系;文献[6]从雷达组网作战的战术、技术角度分析,并融合雷达专家经验,建立评价指标体系。代表性的评估方法有:李莎澜

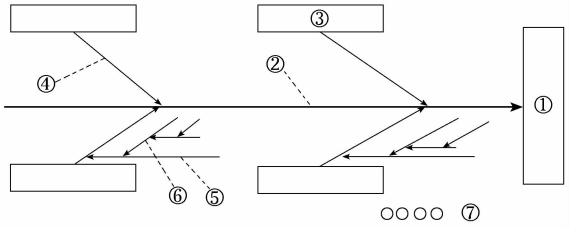
* **收稿日期**:2016－02－03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41405009);国家重点实验室基金资助项目(K201510)
作者简介:崔玉娟(1984—),女,江苏睢宁人,博士研究生,E-mail:xiaoxiao926878@126.com;
察豪(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:310938289@qq.com

等[5]应用模糊层次分析法来评估雷达组网作战效能,通过层次分析法来确定评价体系中的各种指标权重,但是对于体系中部分存在灰色性的指标参数的权重确定,该方法就略显不足。针对这些存在灰色性指标参数的权重确定,胡宗辉等[6]则采用灰色层次分析法来解决,通过定位区间灰数求解白化矩阵的方法来构造判断矩阵,并对构造的灰色判断矩阵作合理的变换,使其不需要满足一致性检验的要求,并通过实验验证了该方法的有效性。但是选取灰色判断矩阵的定位系数、确定专家权重系数需要先验性,具有较大的主观性。

对此,本文针对评估雷达组网探测能力的问题,采用鱼骨图法的思想对该问题的影响因素进行梳理,将问题剖析分解反映在鱼骨的构架上,从而建立一个结构清晰、层次关系分明的指标评价体系。

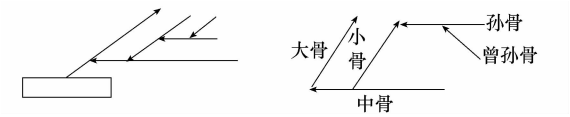
1　雷达组网探测能力评价指标体系的建立

鱼骨图[7]即为鱼的骨架图,鱼骨图法则是通过"诊断"复杂问题,从不同部位进行"号脉",将复杂问题分解为若干子问题,再根据需要继续"号脉"子问题进行细分,如此反复直至达到最终的目的。图 1 是鱼骨图的基本构架,其中图 1(a)是鱼骨图的基本构架,图 1(b)和图 1(c)分别是鱼骨图的局部以及对应的名称,图 1 中标号的含义如下:①特性;②主骨(用粗线和箭头绘制而成);③要因;④大骨(与主骨呈一定角度,比如 60°夹角)⑤中骨(与主骨平行);⑥小骨(与中骨呈一定角度,如 60°夹角);⑦重要因素。



(a) 鱼骨图

(a) Fishbone diagram



(b) 局部图　　(c) 局部图上相应的名称

(b) Topography　　(c) Corresponding name of topography

图 1　鱼骨图的基本构架

Fig. 1　Basic framework of fishbone diagram

雷达组网探测能力按照作战需要具有多样性的特点,如对低空/超低空目标的探测能力、对中高空目标的探测能力、对隐身目标的探测能力等,而这些细分的探测能力又需要多种指标来评估。因此,如何将这些因素按照一定的原则进行分类整理并进行定量处理,是综合评定雷达组网探测能力的关键。

在目的性、独立性、敏感性、有限性和可实施性的原则下,按照鱼骨图的思想,第一步确定要解决的问题——评估雷达组网探测能力。第二步对确定的问题进行"诊断"处理,将其分解成以下几个子问题:中高空目标探测能力、低空/超低空目标探测能力、隐身目标探测能力、复杂环境下目标探测能力。第三步对每个子问题进行"号脉"处理,进行进一步的细分,直至分解成满足要求的指标为止。

在第二步中,对中高空目标探测能力"号脉"时,从雷达探测区域与责任区域之间的关系、雷达之间探测区域的关系角度出发,细化为中高空空域覆盖率、重叠率以及探测增值率,分别反映了雷达组网覆盖空域的连续性、严密性以及超出责任区的探测能力,具体如图 2 所示。

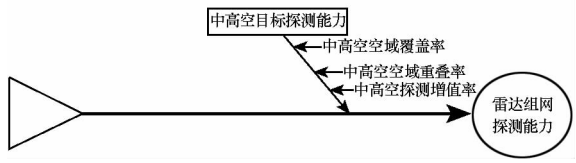


图 2　中高空目标探测能力

Fig. 2　Detection capability for medium-altitude targets

在"号脉"低空/超低空目标探测能力时,除与中高空目标探测能力相同的出发点,提出低空/超低空空域重叠率、覆盖率。还需注意到网内雷达的配置、地面杂波的影响,引入网内雷达的杂波可见度的均值来表示单部雷达低空/超低空探测能力,从而细分为雷达类型因子和单部雷达低空/超低空探测能力,如图 3 所示。



图 3　低空/超低空目标探测能力

Fig. 3　Detection capability for low altitude/extreme low altitude targets

对隐身目标探测能力进行"号脉"时,从雷达组网的定义出发,网内的雷达是不同体制、不同频段、不同程式、不同极化方式的,从上述方面提取

出空域、频域和极化域等反隐身能力指标;同时,通过通信手段将雷达链接成网,需要考虑信息融合的作用以及整个网内雷达反隐身能力的均值,分别提取出信息融合反隐身能力和单部雷达反隐身能力等指标,见图 4。

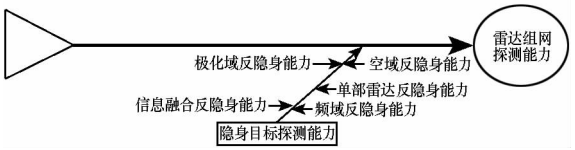


图 4 隐身目标探测能力

Fig. 4 Detection capability for stealth targets

在“号脉”复杂环境下目标探测能力时,复杂环境包括大气、地形、干扰等影响因素,这时需要考虑网内的单部雷达抗复杂环境能力。同时网内雷达的多样性造就了空域、频域上的重叠,极化类型、信号类型的多样性,从而可以相应地提出指标:空域重叠率、频域重叠率、极化类型因子、信号类型因子,如图 5 所示。

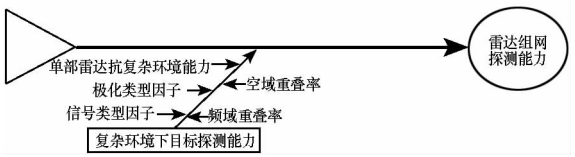


图 5 复杂环境下目标探测能力

Fig. 5 Detection capability for targets in complex environments

通过上述分析,可建立雷达组网探测能力影响因素的鱼骨图,如图 6 所示。

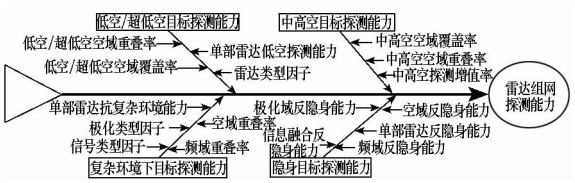


图 6 雷达组网探测能力影响因素的鱼骨图

Fig. 6 Fishbone diagram of influencing factors of radar network detection capabilities

2 雷达组网探测能力评价方法

针对上节建立的雷达组网探测能力的指标评估体系,采用改进的 IAHP – CIM 模型对该指标体系进行评估,其中针对指标体系中的部分指标难量化,容易产生判断不一致、可信度低等问题,将区间数引入到 AHP 中,用区间数来表示指标的权重;但是区间数给出的是模糊指导,并非确定的、具体的,所以利用 SFLA 寻优,得到满足条件的指标的权重点值;最后建立起雷达组网探测能力与风险之间的映射关系,通过计算风险评估得到组网探测能力的评估结果。图 7 为建立 IAHP – CIM 模型的分析过程。

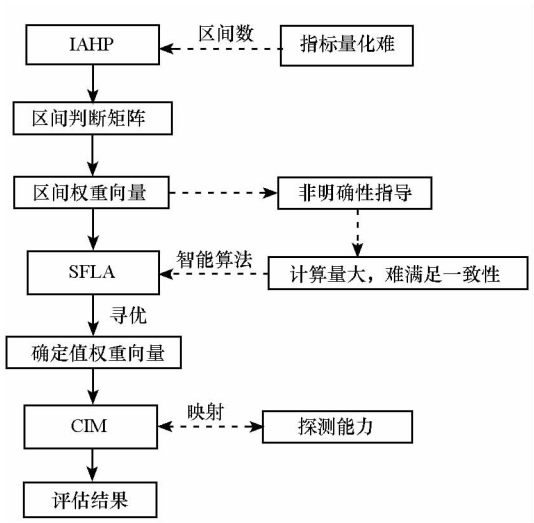


图 7 IAHP – CIM 的分析过程

Fig. 7 Analysis process of IAHP – CIM

2.1 区间层次分析法

IAHP 可看成是 AHP 的变形,主要区别是 IAHP 中涉及的判断矩阵以及其最大特征值对应的特征向量都是区间数,而 AHP 中涉及上述内容的数据都是一个确定的数值。因此 IAHP 的本质就是一个融合了区间数[8]的 AHP。

雷达组网探测能力的评价体系中的指标带有模糊性和不确定性,多数指标是定性指标,比如反隐身能力,其评价结果可能就是“优”“良”“中”“差”等。如果用 AHP 中确定数值很难描述,但是 IAHP 就能很好地采用区间数来解决,从而提高了算法的客观性和实用性。

虽然 IAHP 法得到的结果数据也为区间数,增强了指标评价的客观性,降低了主观意向对指标评价的影响,但是对于明确性的指导意义不大,所以该方法更多地被用于多目标决策与排序,而非评价目标。对于该问题,不少学者通过区间数特征根法求得区间权重,再取区间两端点值的平均数作为点值权重,得到确定性权重,从而有效地解决上述问题,但此时得到的权重值并不一定是满足一致性条件下的最优解。

2.2 SFLA 确权算法

针对 IAHP 法中通过区间数特征根法求区间权重,然后取均值得到的确定性权重不能保证是满足一致性最优解的问题,因此引入 SFLA[9]寻优:首先,将最小的一致性比例作为优化约束条件;其次,对区间判断矩阵进行 SFLA 寻优,得到满足最小一致性条件的确定数判断矩阵;最后,采

用和积法求出该确定数判断矩阵的点值权重向量。通过该方法不仅可以得到最优的确定性权重,还可以较好地解决一致性问题,同时寻优的结果也可以直接评估雷达组网探测能力评价指标体系。

介绍上述提及一致性比例的定义和相关的结论,以方便理解 SFLA 算法的应用。

定义 1　$C.R.(\boldsymbol{A})=\dfrac{\lambda_{\max}(\boldsymbol{A})-n}{(n-1)R.I}$

式中,$C.R.(\boldsymbol{A})$ 表示矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的一致性比例,$\lambda_{\max}(\boldsymbol{A})$ 表示矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的主特征值,$R.I$ 表示随机一致性指标,n 表示矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的行数或者列数。

定义 2　若 $C.R.(\boldsymbol{A})\leqslant 0.1$ 时,则称矩阵 $\boldsymbol{A}$ 具有满意的一致性。

结论:如果区间数判断矩阵合理地限定,则具有最小一致性比例的判断矩阵是存在并且是唯一的[10]。

上述结论指出了利用 SFLA 寻优确定权重是有意义的。

SFLA 确权依据为:一般判断效果越好要求其一致性程度越高,从而要求决策者的逻辑判断一致性程度越好,一致性比例数值越小。当某矩阵满足定义 2 时,其求出的权重才可以作为评价指标的权重,矩阵的一致性比例数值越小,其计算出来的评价结论的可靠性就越高。

SFLA 确权思路为:区间数判断矩阵按均匀分布概率随机生成 N 个确定数判断矩阵 $\boldsymbol{A}^k=(\boldsymbol{a}_{ij})^k_{n\times n}$,$k=1,2,\cdots,N$,满足 $\boldsymbol{a}_{ij}\in[\boldsymbol{a}_{ij}^-,\boldsymbol{a}_{ij}^+]$,$\boldsymbol{a}_{ji}=1/\boldsymbol{a}_{ij}$,$\boldsymbol{a}_{ii}=1$。记 $C.R.(\boldsymbol{A}^g)=\min\limits_{k=1,\cdots,N}\{C.R.(\boldsymbol{A}^k)\}$,建立权重数学模型,即:

$$\begin{cases}\min\limits_{k=1,\cdots,N}\{C.R.(\boldsymbol{A}^k)\}\\ \text{s.t. }\boldsymbol{A}^k=(\boldsymbol{a}_{ij})^k_{m\times n}\\ \boldsymbol{a}^k_{ij}\in\overline{\boldsymbol{a}_{ij}}\\ \boldsymbol{A}^k\boldsymbol{\omega}^k=\lambda_{\max}(\boldsymbol{A}^k)\boldsymbol{\omega}^k\\ C.R.(\boldsymbol{A}^k)\leqslant 0.1\end{cases}\tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{\omega}^k$ 为矩阵 $\boldsymbol{A}^k$ 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量。

为了在 SFLA 中应用方便,引入一个较大常数 G,使得 $G-C.R.(\boldsymbol{A}^k)>0$,这时目标函数从 $\min\limits_{k=1,\cdots,N}\{C.R.(\boldsymbol{A}^k)\}$ 转化为 $\max\limits_{k=1,\cdots,N}\{G-C.R.(\boldsymbol{A}^k)\}$。

2.3　CIM 模型

CIM 模型是 Chapman 和 Cooper 研究概率分布有效叠加的基础上提出的。它可简单直观地展现风险因素的量化过程,也可对风险指标的综合叠加的叠加误差有效控制[11-12],该模型包括两种响应模型——串联、并联响应模型。这里仅介绍并联响应模型,如图 8 所示。对于具有多指标影响因子的活动,将计算出第一、第二指标的概率组合的结果与第三个指标做概率组合运算,依次类推,直至最后一个指标。上述过程的概率组合表达式为:

$$\begin{aligned}P(X_a=x_a)=&\sum_{i=1}^{m}P(X_1=x_a,X_2=x_i)+\\&\sum_{i=1}^{m}P(X_1=x_{i-1},X_2=x_a)\\&(a=1,2,\cdots,m)\end{aligned}\tag{2}$$

式中:X_1,X_2 为 2 个风险因素;x_a 为概率区间的组中值;m 为分组数。

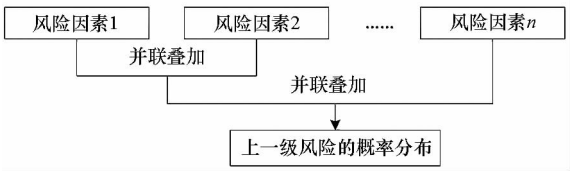


图 8　并联响应模型

Fig. 8　Parallel response model

该模型中的各个变量是相互独立的,变量之间的相关性通过主观概率数值体现,故不再考虑计算方面。对雷达组网探测能力的评估可以看成是对雷达组网投入使用风险的评估,若探测能力强,则其对应的投入的风险小。因此,可以用 CIM 模型来评估雷达组网探测能力。

2.4　雷达组网探测能力评价步骤

针对图 6 中采用鱼骨图法建立的雷达组网探测能力指标评估体系,采用改进的IAHP – CIM模型进行评估,其流程如图 9 所示。具体方法如下:

步骤 1:确定“要因”指标层的区间判断矩阵,并运用 SFLA 求出一致性比例最小的确定数判断矩阵。由 1 ~9 标度法给出评判指标的区间数,从而建立区间数判断矩阵。设某层次有 n 个指标,则该层的区间数判断矩阵表示为:

$$\overline{\boldsymbol{A}}=\begin{bmatrix}\overline{a_{11}}&\cdots&\overline{a_{1j}}&\cdots&\overline{a_{1n}}\\ \vdots&&\vdots&&\vdots\\ \overline{a_{i1}}&\cdots&\overline{a_{ij}}&\cdots&\overline{a_{in}}\\ \vdots&&\vdots&&\vdots\\ \overline{a_{n1}}&\cdots&\overline{a_{nj}}&\cdots&\overline{a_{nn}}\end{bmatrix}$$

利用 SFLA 对 $\overline{\boldsymbol{A}}$ 寻优,即寻找具有最小一致性比例的确定数矩阵 $\boldsymbol{A}^g$。假设在 D 维解空间中,第 i 个青蛙的位置代表第 i 个可行解,表示为 $P_i=$

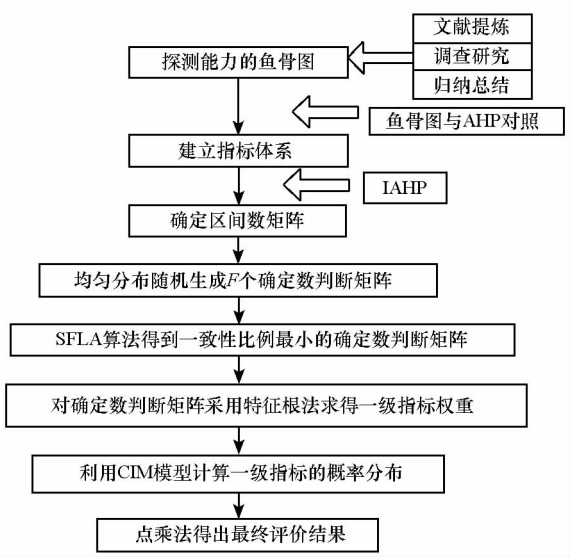


图9 指标体系评价流程

Fig. 9 Flow chart of index evaluation system

$(p_{i1}, p_{i2}, \cdots, p_{iD})$。整个蛙群中位置最好的青蛙记为 P_g,将青蛙等分成若干组,记 P_b 和 P_w 分别为每次进化时组内位置最好的青蛙和位置最差的青蛙,则每次进化时,仅仅对最差的青蛙个体 P_w 实施更新策略,更新方式为:

$$\begin{cases} D_i = \alpha \cdot (P_b - P_w), \ (|D_{\min}| \leqslant |D_i| \leqslant |D_{\max}|) \\ P_w^{\text{new}} = P_w + D_i \end{cases} \tag{3}$$

式中:$D_i (i = 1, 2, \cdots, P)$ 为青蛙个体的更新步长;$D_{\min}$ 为最小更新步长;$D_{\max}$ 为最大更新步长;α 为均匀分布在[0,1]之间的随机数。

如果更新后的 P_w^{new} 的值优于 P_w,则用 P_w^{new} 替代 P_w,否则执行如下更新策略,即:

$$\begin{cases} D_i = \alpha \cdot (P_g - P_w), \ (|D_{\min}| \leqslant |D_i| \leqslant |D_{\max}|) \\ P_w^{\text{new}} = P_w + D_i \end{cases} \tag{4}$$

如果 P_w^{new} 的值仍然没有改进,则随机生成一只青蛙 P_r 来代替 P_w。

有几点需要说明:①"位置最好"中的位置是指青蛙的适应度,即青蛙的相应的适应度函数 $\max\{G - C.R.(\boldsymbol{A}^k), k = 1, 2, \cdots, N\}$ 值;②经历更新策略得到的 P_w^{new} 的某个分量超过区域范围,则以靠近其的上限值或下限值代替这个分量,以保证解的有效性。

步骤2:利用特征根法计算 $\boldsymbol{A}^g$ 最大特征值对应的特征向量,即"要因"指标的权重。

步骤3:计算图6中的"要因"指标层各指标的概率分布。首先建立雷达组网探测能力与风险之间的映射关系,接着给出"中骨"指标层中的各指标的风险概率分布,最后对"中骨"指标层各指标利用式(2)并联叠加计算,最终得出"要因"中各指标的最终概率分布。

步骤4:利用步骤2和步骤3的结果求得雷达组网探测能力的评价结果。

3 实例验证

在四川盆地东部,长江北岸,地形复杂,现拟部署10部雷达构成组网,且满足以下条件:雷达体制数为5,工作频段数为10,极化类型数为4,调制方式数量为7,采用圆弧形配置,雷达组网重叠系数为2。上述雷达组网效费比略高。首先如图6所示的指标体系,根据1~9标度法给出"要因"中各指标相互间的重要程度,表示为如下的区间数判断矩阵:

$$\overline{\boldsymbol{A}} = \begin{bmatrix} [1,1] & [2,5] & [2,4] & [1,3] \\ [1/5,1/2] & [1,1] & [1,3] & [1,2] \\ [1/4,1/2] & [1/3,1] & [1,1] & [1/2,1] \\ [1/3,1] & [1/2,1] & [1,2] & [1,1] \end{bmatrix}$$

其次,利用SFLA对 $\overline{\boldsymbol{A}}$ 进行寻优。利用MATLAB编程SFLA,其参数设置如下:群内青蛙为50个,分成5组,每组10个青蛙,组内进化次数为10,最大迭代次数为50,$D_{\max} = 0.25$。最终得到寻优结果 $\boldsymbol{A}^g$ 为:

$$\boldsymbol{A}^g = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

接着,根据定义1计算出 $C.R.(\boldsymbol{A}^g) = 0.0137$ 小于0.1,满足定义2,一致性检验通过。再计算矩阵 $\boldsymbol{A}^g$ 的最大特征值对应的特征向量,即得到"要因"指标层中各指标的权重向量为:

$$\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}} = (0.4583, 0.2836, 0.1439, 0.1142)$$

然后,建立雷达组网探测能力与风险之间的映射关系。建立雷达组网探测能力评价集 $V = \{90 \sim 100, 80 \sim 89, 70 \sim 79, 60 \sim 69, 60\text{分以下}\}$,其相应的风险评价集为 $V' = \{$风险低,风险较低,风险适中,风险较高,风险高$\}$。根据鱼骨图分析每个指标,结合专家投票指导意见,得到它们的概率分布,如表1所示。根据式(2)对"中骨"指标层中指标并联叠加计算,最终得到"要因"指标层中指标在评价集的概率分布。这里只给出 B_1 的概率分布计算过程,如表2所示。其他指标类似求出,结果如表3所示。

表 1　二级指标的概率分布表

Tab. 1　Probability distribution of the second-class index

指标	探测等级				
	90 ~ 100	80 ~ 89	70 ~ 79	60 ~ 69	0 ~ 59
C_{11}	5/20	7/20	6/20	2/20	0/20
C_{12}	9/20	7/20	4/20	0/20	0/20
C_{13}	3/20	11/20	6/20	0/20	0/20
C_{21}	0/20	2/20	9/20	6/20	3/20
C_{22}	2/20	5/20	8/20	4/20	1/20
C_{23}	0/20	3/20	9/20	5/20	3/20
C_{24}	0/20	3/20	8/20	5/20	4/20
C_{31}	5/20	6/20	7/20	2/20	0/20
C_{32}	8/20	7/20	4/20	1/20	0/20
C_{33}	5/20	6/20	8/20	1/20	0/20
C_{34}	2/20	5/20	9/20	4/20	0/20
C_{35}	3/20	6/20	8/20	3/20	0/20
C_{41}	2/20	5/20	7/20	5/20	1/20
C_{42}	4/20	5/20	6/20	4/20	1/20
C_{43}	2/20	3/20	5/20	7/20	3/20
C_{44}	0/20	2/20	7/20	9/20	2/20
C_{45}	1/20	5/20	7/20	6/20	1/20

根据表 3 的结果,记

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0.016\,9 & 0.319\,1 & 0.564\,0 & 0.100\,0 & 0.000\,0\\ 0.000\,0 & 0.000\,8 & 0.147\,7 & 0.434\,9 & 0.416\,6\\ 0.000\,4 & 0.035\,4 & 0.516\,6 & 0.447\,6 & 0.000\,0\\ 0.000\,0 & 0.001\,2 & 0.075\,6 & 0.579\,1 & 0.344\,1\end{bmatrix}$$

最后,将求出来“要因”指标的权重与其对应的概率分布乘积作和,得到雷达组网探测能力对应的评价等级的概率分布 P 为:

$$P=\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{B}$$

$$=(0.007\,8,0.151\,7,0.383\,3,0.299\,7,0.157\,4)$$

上述计算结果表明,组雷达组网的中高空目标探测能力较强(比重为 0.458 3),抗复杂环境能力较弱(比重为 0.114 2)。而最终的评价结果概率分布显示该雷达组网的探测能力等级为[70,80)的可能性最大,概率为 38.33%。可根据探测任务和目的来决定雷达组网是否可以投入使用,若不满足使用条件,可适当调整网内资源(如选择抗隐身能力强的雷达)。因此,所提模型不仅能具体分析出每一个子问题,综合给出组网探测能力等级分布概率,而且还对网内资源的配置和调整给出指导。

表 2　B_1 的概率分布计算过程

Tab. 2　Computational process of probability distribution of B_1

探测等级	C_{11} 与 C_{12} 组合概率分布	最终概率分布
90 ~ 100	(5/20) × (9/20) = 9/80	(9/80) × (3/20) = 0.016 9
80 ~ 89	(7/20) × (9/20 + 7/20) + (7/20) × (5/20) = 0.367 5	0.367 5 × (11/20 + 3/20) + (11/20) × (9/80) = 0.319 1
70 ~ 79	(6/20) × (9/20 + 7/20 + 4/20) + (4/20) × (7/20 + 5/20) = 0.42	(6/20) × (9/80 + 0.367 5) + 0.42 = 0.564 0
60 ~ 69	(2/20) × 1 = 0.100 0	0.1
0 ~ 59	0	0

表 3　一级指标的概率分布表

Tab. 3　Probability distribution of the first-class index

指标	探测等级				
	90 ~ 100	80 ~ 89	70 ~ 79	60 ~ 69	0 ~ 59
B_1	0.016 9	0.319 1	0.564 0	0.100 0	0.000 0
B_2	0.000 0	0.000 8	0.147 7	0.434 9	0.416 6
B_3	0.000 4	0.035 4	0.516 6	0.447 6	0.000 0
B_4	0.000 0	0.001 2	0.075 6	0.579 1	0.344 1

4　结论

评估雷达组网探测能力是雷达组网优化部署的前提,而评估探测能力的关键在于探测能力指标体系合理有效的建立和评估方法的选用。本文采用鱼骨图法构建一套合理的雷达组网探测能力指标评估体系,并采用 IAHP – CIM 模型对该结构体系进行有效的评估,较好地解决了指标体系中一些定性指标的评估问题,评估结果客观、真实可信,对雷达组网探测能力的评估以及雷达的优化部署具有一定的参考价值。

参考文献(References)

[1]　崔玉娟, 察豪, 田斌. 改进的混合蛙跳算法在雷达网部署中的应用[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(1): 108 – 112.
CUI Yujuan, CHA Hao, TIAN Bin. Improved shuffled frog leaping algorithm for radar network deployment[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2015, 27(1): 108 – 112. (in Chinese)

[2]　Cui Y J, Cha H, Tian B. Cultural shuffled frog leaping algorithm and its applications for radar network[J]. Applied

Mechanics & Materials, 2014, 624: 516 – 519.

[3] 朱丽莉, 王朝墀. 基于模糊层次分析法的雷达组网作战效能评估[J]. 战术导弹技术, 2003(2): 61 – 65.
ZHU Lili, WANG Zhaochi. Evaluation model of fighting effectiveness of radar netting based on FAHP[J]. Tactical Missile Technology, 2003(2): 61 – 65. (in Chinese)

[4] 周琳, 徐进, 马艳琴, 等. 雷达组网探测系统综合效能评估方法研究[J]. 电子工程师, 2007, 33(9): 10 – 13.
ZHOU Lin, XU Jin, MA Yanqin, et al. Research on evaluation method of radar-netted detection system's integrated effectiveness[J]. Electronic Engineer, 2007, 33(9): 10 – 13. (in Chinese)

[5] 李莎澜, 刘清国, 魏文斌, 等. 应用模糊层次分析法评估雷达组网作战效能[J]. 湖北工业大学学报, 2010, 22(1): 91 – 93.
LI Shalan, LIU Qingguo, WEI Wenbin, et al. Application of FAHP in the evaluation model of fighting effectiveness of radar netting[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2010, 22(1): 91 – 93. (in Chinese)

[6] 胡宗辉, 钱建刚, 李月岗, 等. 基于改进的GAHP确定雷达组网作战效能的指标权重[J]. 兵工自动化, 2009, 28(4): 26 – 28.
HU Zonghui, QIAN Jiangang, LI Yuegang, et al. Index weight determination of operational effectiveness in radar netting based on improved GAHP[J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(4): 26 – 28. (in Chinese)

[7] 朱天宇, 孙明. 基于鱼骨图及主成分分析社区公共安全承载力与规划管理对策[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 215 – 219.
ZHU Tianyu, SUN Ming. Capacity and planning management measure of community public safety based on fishbone diagram and principal component analysis[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 215 – 219. (in Chinese)

[8] 肖峻, 王成山, 罗凤章. 区间层次分析法的权重求解方法初探[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(11): 1597 – 1600.
XIAO Jun, WANG Chengshan, LUO Fengzhang. Exploration on the methods of weight calculation in the interval-based AHP[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(11): 1597 – 1600. (in Chinese)

[9] Cui Y J, Cha H, Shen H. Shuffled frog leaping applied to optimal deployment of radar network[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 624: 512 – 515.

[10] Finan J, Hurley W. Analytic hierarchy process: does adjusting a pairwise comparison matrix to improve the consistency ratio help?[J]. Computers & Operations Research, 1997, 24(8): 749 – 755.

[11] 陈阳. 高速公路BOT融资项目全过程风险CIM模型评价研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
CHEN Yang. The highway BOT financing project risk assessment based on CIM model[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[12] 高祺勋, 权聪娜, 李博, 等. 灰色模糊CIM模型的电力项目融资风险评判构架[J]. 工业工程, 2010, 13(4): 96 – 99.
GAO Qixun, QUAN Congna, LI Bo, et al. Financing risk assessment of power plant construction by using grey fuzzy CIM model[J]. Industrial Engineering, 2010, 13(4): 96 – 99. (in Chinese)