DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2006.01.014
2006年 1月 北京航空航天大学学报 January 2006
第32卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.1

模糊AHP法在雷达组网效能评估中的应用

高 彬 吕善伟

（北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100083）

摘 要：由于雷达系统组网效能评估和优选工作涉及多个指标和大量的模糊属性，导致了决策工作的困难.把拓展的模糊层次分析方法AHP(Analytic Hierarchy Process)引入雷达组网系统效能评估领域，提出了组网雷达作战效能评价指标层次，根据区间数判断矩阵的有关概念，得到了区间数判断矩阵排序权向量或综合评价值的计算方法，利用概率分布法对各最底层元素关于最高层准则的总组合权重进行排序.应用基于区间模糊数判断矩阵的模糊AHP法，建立了模糊评判模型.实例分析结果表明该方法具有实用性，其评估结果可以辅助指挥员提高雷达组网布防决策的准确性和科学性.

关 键 词：雷达系统；评估；层次分析法；区间数判断矩阵

中图分类号：TN 95

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2006)01-0057-04

Fuzzy AHP and its application in effectiveness evaluation for radar netting

Gao Bin Lü Shanwei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Difficulties in evaluating effectiveness and selecting an optimum scheme for radar netting arise as a result of the different goals involved and the large number of attributes considered. Our approach was based upon a fuzzy extension of the AHP (analytic hierarchy process), which was applied to the effectiveness evaluation for radar netting. The evaluation index hierarchy for radar netting's effectiveness evaluation was presented, and some definitions of the interval judgment matrix were introduced. The methods of calculating weight-vector or comprehensive evaluation value of interval judgment matrix were summarized generally. Utilizing the probability distribution method, the ordering of chief combination weights was investigated for the lowest level according to the highest level. Fuzzy AHP was applied based on interval judgment matrix, and the fuzzy judgment model was set up for radar netting's effectiveness evaluation. The practical example shows practicability of the method and the results can help commanders improve accurate and scientific decision in deploying radar netting.

Key words: radar systems; evaluation; analytic hierarchy process; interval judgment matrix

随着电子侦察和干扰技术的发展，军用雷达面临着反辐射导弹、隐身技术、低空与超低空突防及电子干扰等四大威胁，雷达组网是现阶段比较全面提高雷达“四抗”能力的最现实可行的方案.雷达组网的效能准则是指在一定条件下，探测、识别、跟踪、分辨力、参数估计、特征分析、制导精度、航迹分析、误差大小、数据实时处理等系统的综合性能的量度法则.效能评估是一项复杂的系统工程，具有许多不确定性因素，如何正确地评估雷达网的效能，为雷达组网提供辅助决策，一直是人们关注的问题.用于系统效能评估的方法有很多[1,2].文献[3,4]采用层次分析方法AHP(Analytic Hierarchy Process)中的判断矩阵法给出了雷达系统效能和雷达组网效能的量化评判方法.在此方法中，方案的重要性排序通过在单一准则下的两两比较来确定，而两两重要性比较的赋值标度是明晰数，这对更客观地表现人的思维判断以及事物本身的复杂性来说，显然是有缺陷的.有必要研

收稿日期：2004-11-01

作者简介：高 彬(1977－)，男，山东济南人，博士生，gaobin@ee.buaa.edu.cn.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究AHP在模糊环境下的扩展,以便使AHP方法在复杂系统中能更客观、准确地反映所研究的问题.目前,在模糊AHP理论方法和应用方面已取得了不少进展[5,6].许若宁提出了一种改进的梯度特征向量法来确定权向量是可行的[7],但算法复杂,缺乏显性的解析式不易操作.本文从模糊AHP在雷达组网效能评估中的实际应用出发,基于模糊数学中关于区间模糊数[8]的一些结果,提出在区间模糊数框架下的AHP方法,并将其用于雷达组网方案的优选.

1 雷达组网效能评估指标体系

指标体系设计应本着全面、合理和科学的原则:从组网后系统整体协同作战的角度出发,对构成系统的各项指标多方面考虑,以全面反映雷达组网后武器系统的作战效能;考虑雷达组网多方面因素,这里将雷达组网系统评估指标从作战威力范围、指挥控制能力、组网部署综合能力、系统生存能力和作战保障能力5个方面进行评价[4].作战威力范围为组网雷达在作战过程中发现、跟踪和击毁目标的能力,可采用杀伤区、分辨目标概率、目标容量、定位精度等来综合度量;指挥控制能力是综合考察组网后系统收集情报,数据融合处理和及时下达正确命令的综合评定;组网部署综合能力是指各站合理优化部署、机动能力、武器系统的生存能力和"四抗"能力的综合度量;系统生存能力涉及组网系统的隐蔽性能,机动能力和降阶运行能力;作战保障能力指武器系统的可靠性诸如各作战单元的故障率和可维修性,以及通信保障可靠性等.

2 基于区间数的模糊AHP模型

2.1 区间数权向量的确定方法

定义1 记 $a=[a^-,a^+]=\{x\mid 0<a^-\leqslant x\leqslant a^+\}$,称 a 为一正闭区间数[8].关于区间数的运算定义如下:

1) $a+b=[a^-+b^-,a^++b^+]$;

2) $ab=[a^-b^-,a^+b^+]$,特别地 $\lambda a=[\lambda a^-,\lambda a^+]$,$\lambda\in\mathbf{R}$;

3) $a/b=[a^-/b^+,a^+/b^-]$,特别地 $1/b=[1/b^+,1/b^-]$.

记 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$ 为区间数矩阵,$a_{ij}=[a_{ij}^-,a_{ij}^+]$,记 $\boldsymbol{A}^-=(a_{ij}^-)_{n\times n}$,$\boldsymbol{A}^+=(a_{ij}^+)_{n\times n}$.

定义2 记 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$ 为区间数判断矩阵,若对于 $i,j=1,2,\cdots,n$ 均有 $a_{ij}=[a_{ij}^-,a_{ij}^+]$,$a_{ij}=1/a_{ji}$,$a_{ij}a_{jk}=a_{ji}a_{ik}$,则称 $\boldsymbol{A}$ 为一致性区间矩阵.

定理1 若 $\boldsymbol{A}$ 的区间数权向量表示为 $\boldsymbol{w}=[w_1,w_2,\cdots,w_n]^{\mathrm{T}}$,$x^-$,$x^+$ 分别为 $\boldsymbol{A}^-$,$\boldsymbol{A}^+$ 属于其最大特征值具有正分量的归一化特征向量,则 $\boldsymbol{w}=[\alpha x^-,\beta x^+]=[w_1,w_2,\cdots,w_n]^{\mathrm{T}}$ 满足 $a_{ij}=w_i/w_j(\forall i,j\in\mathbf{N})$ 的充要条件[8]是 $\alpha/\beta=\sum_{j=1}^{n}\left(1\Big/\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^+\right)=1\Big/\sum_{j=1}^{n}\left(1\Big/\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^-\right)$.

根据 α/β 的具体表达式,取

$$\left.\begin{aligned}\alpha&=\left[\sum_{j=1}^{n}\left(1\Big/\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^+\right)\right]^{1/2}\\ \beta&=\left[\sum_{j=1}^{n}\left(1\Big/\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^-\right)\right]^{1/2}\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

从而区间数权向量的计算步骤如下:

1) 用特征向量法求 $\boldsymbol{A}^-$,$\boldsymbol{A}^+$ 最大特征值对应的具有正分量的归一化特征向量 x^-,x^+;

2) 由 $\boldsymbol{A}^-=(a_{ij}^-)_{n\times n}$,$\boldsymbol{A}^+=(a_{ij}^+)_{n\times n}$ 按式(1)计算 α 和 β;

3) 计算权重系数向量 $\boldsymbol{w}=[\alpha x^-,\beta x^+,]$.

此方法无须进行一致性检验,因为当 $\boldsymbol{A}$ 为一致性区间数判断矩阵时显然成立;当 $\boldsymbol{A}$ 不一致时,将 $\boldsymbol{w}$ 作归一化处理即可.

2.2 层次的组合区间权及排序算法

在递阶层次中,区间数不仅用于最底层方案相对于中间层子准则重要性的两两比较判断,也用于子准则相对于最高层准则重要性的两两比较判断,此时判断的不确定在整个递阶层次中表现出来,设第 k 层有元素 n_k 个,该层各元素对于上面第 l 层各准则区间数排序权数为 $w_{il}(i=1,2,\cdots,n_k)$,根据 l 层关于最高层的总权重组合 g_1^{k-1},$g_2^{k-1},\cdots,g_{n_k-1}^{k-1}$,第 k 层上元素总组合权重可由下式得出:

$$g_i^k=\sum_{j=1}^{n_k-1}g_j^{k-1}w_{ij}\quad i=1,2,\cdots,n_k\tag{2}$$

由于区间数是特殊的梯形模糊数,故可用模糊排序法中概率的均匀分布情形,对各最底层元素关于最高层准则的总组合权重进行排序,得到区间数 $g_i=[g_i^-,g_i^+]$ 的排序指数为

$$\left.\begin{aligned}m(g_i)&=(g_i^-+g_i^+)/2\\ \sigma(g_i)&=(g_i^+-g_i^-)/(2/\sqrt{3})\end{aligned}\quad i=1,2,\cdots,n_m\right\}\tag{3}$$

其中 n_m 为该层元素个数.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　应用示例

依据上文所建立的雷达组网效能评估指标体系,结合某要地防空体系雷达组网配置方案的优选工作给予示例(见图 1),假设有多部雷达可供组网使用,分别选用 10 部拟定 3 种组网方案:

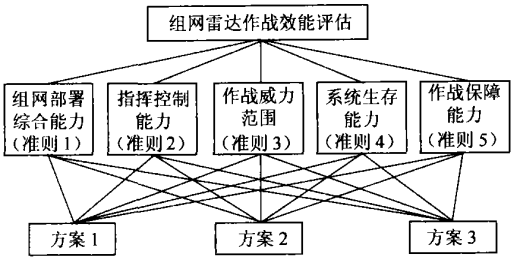


图 1　组网雷达作战效能评价指标层次结构

方案 1　雷达体制数为 5,工作频段数为 10,采用圆弧形配置,雷达网重叠系数为 2,效能费用比略高,极化类型数为 4,调制方式数量为 7;

方案 2　雷达体制数为 4,工作频段数为 9,采用三角形配置,雷达网重叠系数为 3,效能费用比较高,极化类型数为 5,调制方式数量为 8;

方案 3　雷达体制数为 5,工作频段数为 11,采用正方形配置,雷达网重叠系数为 3,效能费用比适中,极化类型数为 3,调制方式数量为 8.

应用基于正闭区间判断矩阵的模糊 AHP 方法,根据图 1 所示雷达组网效能评估的递阶层次结构,专家对 3 种方案的模糊评价见表 1. 由专家根据准则层的 5 个评价指标对于决策目标层的重要性程度两两比较得到表 2 所示的 U-Rule 层区间数判断矩阵,考虑 3 种雷达组网方案的优选问题. 在各项准则指标下对 3 种方案进行两两比较构造相应的区间数判断矩阵,用区间数特征向量法求得对应准则层下各方案的权重向量,评判过程如表 3～表 8 所示.

表 1　雷达组网配置方案的模糊评价

配置方案	准则 1	准则 2	准则 3	准则 4	准则 5
方案 1	比方案 2 稍强; 比方案 3 明显强	比方案 2 弱; 比方案 3 明显弱	比方案 2 稍大; 比方案 3 明显大	比方案 2 稍弱; 比方案 3 明显强	比方案 2 弱; 比方案 3 明显弱
方案 2	比方案 1 稍弱; 比方案 3 强	比方案 1 稍强; 比方案 3 明显弱	比方案 1 稍小; 比方案 3 稍大	比方案 1 稍强; 比方案 3 强烈强	比方案 1 强; 比方案 3 稍弱
方案 3	比方案 1 明显弱; 比方案 2 弱	比方案 1 强; 比方案 2 明显强	比方案 1 明显小; 比方案 2 稍小	比方案 1 明显弱; 比方案 2 强烈弱	比方案 1 明显强; 比方案 2 稍强

表 2　目标层-准则层区间数判断矩阵

目标层	准则 1	准则 2	准则 3	准则 4	准则 5
准则 1	[1,1]	[1/3,1/2]	[1/2,1]	[1,2]	[2,3]
准则 2	[2,3]	[1,1]	[2,3]	[4,6]	[6,8]
准则 3	[1,2]	[1/3,1/2]	[1,1]	[2,3]	[4,6]
准则 4	[1/2,1]	[1/6,1/4]	[1/3,1/2]	[1,1]	[1,2]
准则 5	[1/3,1/2]	[1/8,1/6]	[1/6,1/4]	[1/2,1]	[1,1]

表 3　目标层-准则层判断结果及计算值
(α=0.9208, β=1.0755)

目标层	x^-	x^+	g_j^2
准则 1	0.1515	0.1626	[0.1395,0.1749]
准则 2	0.4674	0.4421	[0.4304,0.4654]
准则 3	0.2295	0.2349	[0.2114,0.2527]
准则 4	0.0912	0.0995	[0.0840,0.1070]
准则 5	0.0605	0.0608	[0.0557,0.0654]

表 4　组网部署综合能力准则下 3 种组网系统方案的比较结果(α=0.9460, β=1.0456)

准则 1	方案 1	方案 2	方案 3	x^-	x^+	w_{i1}
方案 1	[1,1]	[2,3]	[5,7]	0.6070	0.6049	[0.5742,0.6325]
方案 2	[1/3,1/2]	[1,1]	[4,6]	0.3114	0.3148	[0.2946,0.3292]
方案 3	[1/7,1/5]	[1/6,1/4]	[1,1]	0.0816	0.0802	[0.0772,0.0839]

利用式(2)求得 3 个组网系统方案关于最高层的总组合权重为

$$g_1^3 = [0.2850, 0.3785]$$
$$g_2^3 = [0.2068, 0.2891]$$
$$g_3^3 = [0.3334, 0.4385]$$

利用式(3)可得到:

方案 1 的排序指数为

$$m(g_1^3) = 0.3318 \qquad \sigma(g_1^3) = 0.0270$$

方案 2 的排序指数为

$$m(g_2^3) = 0.2480 \qquad \sigma(g_2^3) = 0.0238$$

方案 3 的排序指数为

$$m(g_3^3) = 0.3860 \qquad \sigma(g_3^3) = 0.0303$$

得到 3 种方案的排序:方案 3>方案 1>方案 2,所以方案 3 相对最优,方案 1 稍次之. 从而,指挥员可选择方案 3 为主方案,方案 1 作为备用方案.

表 5　指挥控制能力准则下 3 种组网系统方案的比较结果(α=0.9525, β=1.0317)

准则 2	方案 1	方案 2	方案 3	x^-	x^+	w_{i2}
方案 1	[1,1]	[1/3,1/2]	[1/6,1/4]	0.1015	0.1039	[0.0967,0.1071]
方案 2	[2,3]	[1,1]	[1/7,1/5]	0.1740	0.1764	[0.1658,0.1820]
方案 3	[4,6]	[5,7]	[1,1]	0.7245	0.7197	[0.6901,0.7425]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表6 作战威力范围准则下3种组网系统方案的比较结果($\alpha=0.9617, \beta=1.0362$)

准则3	方案1	方案2	方案3	x^-	x^+	w_{i3}
方案1	[1,1]	[3,4]	[5,7]	0.6813	0.6740	[0.6552,0.6985]
方案2	[1/4,1/3]	[1,1]	[2,3]	0.2184	0.2230	[0.2101,0.2311]
方案3	[1/7,1/5]	[1/3,1/2]	[1,1]	0.1002	0.1030	[0.0964,0.1067]

表7 系统生存能力准则下3种组网系统方案的比较结果($\alpha=0.9516, \beta=1.0428$)

准则4	方案1	方案2	方案3	x^-	x^+	w_{i4}
方案1	[1,1]	[1/3,1/2]	[5,7]	0.3101	0.3126	[0.2951,0.3259]
方案2	[2,3]	[1,1]	[7,9]	0.6242	0.6245	[0.5940,0.6512]
方案3	[1/7,1/5]	[1/9,1/7]	[1,1]	0.0657	0.0630	[0.0625,0.0657]

表8 作战保障能力准则下3种组网系统方案的比较结果($\alpha=0.9219, \beta=1.0670$)

准则5	方案1	方案2	方案3	x^-	x^+	w_{i4}
方案1	[1,1]	[1/4,1/3]	[1/6,1/4]	0.1056	0.0956	[0.0974,0.1020]
方案2	[3,4]	[1,1]	[1/4,1/2]	0.2864	0.2693	[0.2640,0.2873]
方案3	[4,6]	[2,4]	[1,1]	0.6080	0.6351	[0.5605,0.6777]

4 结束语

本文应用基于区间数判断矩阵的模糊AHP法来解决雷达组网效能的评估优选工作,较好地克服了由于人们的主观判断、选择、偏好程度对决策结果带来的影响,使得单一准则下各方案的优劣程度或递阶层次结构中各阶子准则的权重确定简便易行,并维护了判断矩阵客观上的良好性质,由于其理论上的合理性,该方法的决策结果更贴近客观实际.限于篇幅和分析问题方便起见,本文对雷达组网系统的效能评估准则层次定为二级,亦可扩展准则层次体系,由于组网系统效能评估工作涉及因素众多,其效能评定结构体系如何确定更为合理,有待于进一步探讨.

参考文献(References)

[1] 徐瑞恩.武器装备效能模型和方法概论[J].装备指挥技术学院学报,2002,13(1):1~5
Xu Ruien. A reviews:methods for operations moe of the weapon system[J]. Journal of Institute of Command Technology of Equipment, 2002,13(1):1~5(in Chinese)

[2] Cheng Ching-Hsue. Evaluating weapon systems using ranking fuzzy numbers[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999,107(1):25~35

[3] 张丽艳,郑晋军. 一种雷达系统效能的评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 1997(4): 41~44
Zhang Liyan, Zheng Jinjun. A model of evaluation for effectiveness of radar system[J]. Systems Engineering and Electronics, 1997(4): 41~44(in Chinese)

[4] 朱丽莉,王朝墀. 组网雷达作战效能模糊综合评定模型[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(12): 1463~1520
Zhu Lili, Wang Zhaochi. Fuzzy combined evaluation model for the fighting efficiency of radar netting[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(12): 1463~1520(in Chinese)

[5] Xu Ruoning, Zhai Xiaoyan. Fuzzy least-squares priority method in the analytic hierarchy process[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000,112(3):395~404

[6] Leung L C, Cao D. On consistency and ranking of alternatives in fuzzy AHP[J]. European Journal of Operational Research, 2000,124(1): 102~113

[7] 魏世孝,周献中.多属性决策理论方法及其在C^3I系统中的应用[M].北京:国防工业出版社,2001
Wei Shixiao, Zhou Xianzhong. Multiple attribute decision making theory and its application in C^3I system[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2001(in Chinese)

[8] 魏毅强,刘进生,王绪柱. 不确定AHP中判断矩阵的一致性概念及权重[J]. 系统工程理论与实践, 1994(4):16~22
Wei Yiqiang, Liu Jinsheng, Wang Xuzhu. Concept of consistence and weights of the judgement matrix in the uncertain type of AHP[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1994(4):16~22(in Chinese)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net