

文章编号: 2095-4980(2018)06-1008-07

## 警戒雷达干扰环境下效能评估方法

侯德亭<sup>a</sup>, 祝民鹏<sup>a</sup>, 胡涛<sup>b</sup>, 陈丹<sup>b</sup>, 蒋腾<sup>b</sup>

(信息工程大学 a.理学院; b.导航与空天目标工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 考虑干扰的影响, 提出警戒雷达效能评估指标和相应的量化规则, 采用层次分析法和熵权法确定指标的权重, 充分考虑警戒雷达工作过程中不同指标之间的逻辑关系, 改进警戒雷达效能指标单一的聚合方式, 建立效能评估指标体系, 更加准确地反映装备的真实效能; 提出了基于矩阵运算的效能聚合算法, 有效地将处理不确定信息的能力和制约关系指标的效能聚合能力进行兼容; 借助云模型理论, 对评估结果进行可视化处理, 并提出吸引度的概念和最大吸引度的决策原则。采用对警戒雷达在远程支援干扰下的工作效能进行实例分析, 取得较好的结果, 证明了改进方法的可行性。为单部警戒雷达在干扰环境中的效能评估和多部雷达的性能优劣排序提供决策依据。

**关键词:** 效能评估; 云模型; 吸引度; 矩阵运算; 逻辑关系

**中图分类号:** TN974

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201806.1008

## Effectiveness evaluation method for warning radar in jamming environment

HOU Deting<sup>a</sup>, ZHU Minpeng<sup>a</sup>, HU Tao<sup>b</sup>, CHEN Dan<sup>b</sup>, JIANG Teng<sup>b</sup>

(a.College of Arts and Sciences; b.College of Navigation and Aerospace Engineering,  
Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China)

**Abstract:** Considering the influence of interference, the effectiveness evaluation indexes and corresponding quantization rules of warning radar are put forward. The weights of indexes are determined by AHP and entropy weight method. Considering the logical relationship among indexes, the aggregation method is improved, and index system is established to reflect the equipment efficiency more accurately. The algorithm of efficiency aggregation based on matrix operation is proposed, which contains the ability to deal with uncertain information, and the ability to aggregate the efficiency of indexes which restrict each other. The evaluation results are visualized by cloud model theory, and the concept of the attraction degree, and the principle of maximum attraction are put forward. The effectiveness of the warning radar under remote support jamming is analyzed, and good results are obtained. The feasibility of the improved method is proved. It provides decision basis for performance evaluation of single radar in jamming environment and performance ranking of multiple radars.

**Keywords:** efficiency evaluation; cloud model; degree of attraction; matrix operation; logical relation

在现代作战行动中, 为尽可能减少损失, 防区外打击已成为战争初期的主要作战样式。及时发现来袭目标, 尤其是隐身飞行器, 为己方防空系统提供更多反应时间尤为重要, 因此警戒雷达在现代拒止作战中的地位不容忽视。而进攻方为了保证打击效能, 会对敌方雷达尤其是远程警戒雷达进行电磁干扰, 进而削弱敌方雷达的工作效能, 其中远程支援干扰为常见的干扰方式<sup>[1]</sup>。Novillo F等对雷达、干扰机进行了建模, 并依据抗干扰算法进行了仿真, 对雷达在干扰环境中的工作效能进行了分析<sup>[2]</sup>; 沈同云等基于工作参数和干扰参数对雷达的信噪比和信干比进行了详细分析, 并分析了不同电子对抗措施下信干比的改善情况, 建立了基于雷达网络系统的探测概率模型, 分析了雷达采用电子对抗时的抗干扰效果<sup>[3]</sup>; 向龙等建立了雷达网抗干扰能力的动态指标体系, 并利用灰色关联分析对4种组网方案进行了评估和排序<sup>[4]</sup>; 戚宗峰等使用广义粗糙集理论对雷达的抗干扰性能进行了评估<sup>[5]</sup>。总体看来, 目前对于复杂电磁环境下雷达装备的效能评估主要集中在雷达信噪比和抗干扰能力的评估, 评估的标准

收稿日期: 2017-09-10; 修回日期: 2017-09-28

基金项目: CEMEE 国家重点实验室开放课题基金资助项目(CEMEE2016K0302B)

多是仅限于对目标的发现距离，未充分考虑其他指标以及指标间的关系。本文建立了警戒雷达完整的评估指标体系和量化规则，利用“矩阵运算聚合、云模型显示”的方法，在保留处理不确定信息能力的前提下，将相互合作关系指标效能聚合与相互制约关系指标效能聚合兼容到一起。基于此，对远程支援干扰下警戒雷达的工作效能进行评估。

## 1 确定效能评估模型

### 1.1 评估指标的选取

警戒雷达主要用于对来袭目标的早期预警，其主要功能可分为探测能力 $U_1$ 、定位能力 $U_2$ 以及保障性能 $U_3$ 。每一类能力由具体的战术指标组成，从而构成支援干扰下警戒雷达效能评估指标体系，其体系结构如图1所示。指标体系中 $\oplus$ 表示指标之间具有合作关系， $\otimes$ 表示指标之间具有制约关系。

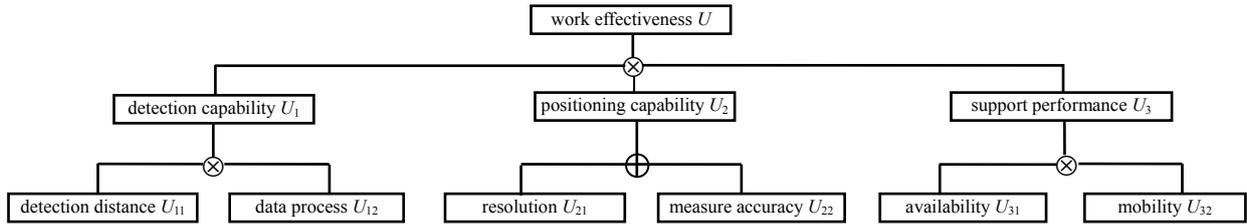


Fig.1 Evaluation index system  
图 1 评估指标体系

### 1.2 评估指标的量化

#### 1.2.1 探测能力

雷达的探测能力是指雷达能够以一定的检测概率 $P_d$ 和虚警概率 $P_f$ 对一定的雷达反射截面积 $\sigma$ 探测到目标的距离。同时，雷达如果具有较高的数据收集速率，则可以尽可能多地发现来袭目标。因此警戒雷达的探测能力使用探测距离公式和数据率2个指标进行表征，2个指标分别用雷达探测距离公式和公式 $P=(\theta_\beta\theta_e F_r)/(\Omega N)$ 来进行量化，其中 $\theta_\beta, \theta_e$ 为波束分辨单元， $F_r$ 为雷达重复频率， $\Omega$ 为雷达探测空域， $N$ 为检测目标所需回波脉冲积累数量<sup>[6]</sup>。

#### 1.2.2 定位能力

雷达的定位能力可分为探测分辨力和对目标参数测量精确度2个指标。径向分辨力用最小分辨距离 $\Delta R=0.5c\tau$ 来表示，角向分辨力用雷达天线的半波宽度来表示。雷达对目标参数测量精确度是指雷达测量目标坐标参数的误差，测量精确度与信噪比的二次方根成反比。

#### 1.2.3 保障性能

雷达的保障性能反映了在要求的外部资源得到保证的情况下，雷达处于可执行规定功能的状态<sup>[7]</sup>。雷达的保障性能由可用性和机动性2个指标构成。可用性用平均故障间隔时间 $MTBF$ 和故障平均修复时间 $MTTR$ 来表征，用公式 $D_{31}=100 \times \exp(-MTTR/MTBF)$ 来量化<sup>[8-10]</sup>。机动性能主要取决于雷达装载系数，其定义如表1所示。

表 1 雷达装载系数

Table1 Radar loading coefficients

loading type	fixed type	semi fixed	movable type	transportable
whitening value	10	30	50	80

### 1.3 评估指标权重的确定

#### 1.3.1 第一层指标的权重

由于第一层指标是警戒雷达单项工作效能的概括，本身不包含明显的量化信息，因此权重的确定采用层次分析法，得到3个一级指标的权重向量为 $w=[0.539\ 6, 0.297\ 0, 0.163\ 4]$ 。探测效能在整个系统中所占的比重较大，与警戒雷达长于探测、疏于定位的实际情况吻合。

#### 1.3.2 第二层指标权重

第二层指标的提取基于警戒雷达的具体性能参数，有实测量化数据可以参考，因此采用熵权法确定权重。设某一个数据样本矩阵为 $A=[a_{ij}]_{m \times n}$ ，其中 $n$ 为指标数目， $m$ 为每一个指标采集的数据个数， $a_{jmax}$ 是 $m$ 个数据中的最大值， $a_{jmin}$ 是最小值。对于正向指标使用 $b_{ij}=a_{ij}/a_{jmax}$ 进行无量纲化，反向指标使用 $b_{ij}=a_{jmin}/a_{ij}$ 进行无量纲化。将无量纲化之后的数据样本矩阵每一列都进行归一化，可以得到样本矩阵 $B=[b_{ij}]_{m \times n}$ 。则第 $j$ 个指标的熵为：

$$e_j = -[\ln(m)]^{-1} \times \sum_{i=1}^m [b_{ij} \ln(b_{ij})] \tag{1}$$

基于指标的熵值，可以计算出相应指标所占的权重：

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (2)$$

以探测能力  $U_1$  为例，基于已出现警戒雷达典型参数，选取评估样本矩阵为：

$$A = \begin{bmatrix} 416 & 330 & 322 \\ 255 & 128 & 130 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

第 1 列为探测距离  $U_{11}$ ，第 2 列为最大跟踪目标个数。可计算探测能力  $U_1$  下属指标权重为  $w_1 = [0.560 \ 3, 0.439 \ 7]$ 。同理可求得指标  $U_2$  下属指标权重为  $w_2 = [0.642 \ 0, 0.358 \ 0]$ ， $U_3$  下属指标权重为  $w_3 = [0.827 \ 6, 0.172 \ 4]$ 。

#### 1.4 效能聚合方法

在确定评估指标体系和指标权重的基础上，需要对评估样本进行收集。评估数据样本可以由对某指标进行实验或计算机仿真，再进行无量纲化处理得到。对于某一准则  $U_i (1 \leq i \leq p)$  下的一个指标  $U_{ij} (1 \leq j \leq n)$  可以得出由  $m$  个数据组成的样本。在获取样本数据的过程中，由于诸多评估者的经历和认知的差异，导致对标准的确定会略有不同。同时评估对象在不同的工作环境中，其工作效能会出现一定的涨落特性，这一涨落特性就包含在诸多的样本数据中。

在传统的层次分析法<sup>[11]</sup>分析过程中，会对这  $m$  个数据求均值，得到指标的评估值，这样评估过程虽然简便但丢失了指标效能的不确定性信息。而灰色分析<sup>[12-13]</sup>等方法虽能在一定程度上处理不确定信息，但不能处理制约关系指标的效能聚合问题。针对以上两类方法不能同时兼容“制约关系指标效能聚合”和“不确定信息处理”的问题，本文提出基于矩阵运算的效能聚合算法。以指标 I 和指标 II 的效能聚合计算为例，效能聚合过程为：

1) 指标 I 样本值组成向量  $\alpha = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n)$ ，指标 II 样本值组成向量  $\beta = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n)$ ；

2) 对向量  $\alpha$  和向量  $\beta$  进行处理，得到新的向量  $X = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)$  和向量  $Y = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n)$ ，若指标 I 和指标 II 是制约关系，则  $x_i = a_i^{w_I}, y_i = b_i^{w_{II}}$ ，若是合作关系，则  $x_i = w_I \times a_i, y_i = w_{II} \times b_i$ ；其中  $w_I$  和  $w_{II}$  分别为指标 I 和指标 II 的权重；

3) 进行效能聚合计算。

若指标 I 和指标 II 是制约关系，则 2 个指标聚合之后的效能值为： $\gamma = [X^T \times \mathbf{ones}(1, n)] * [\mathbf{ones}(n, 1) \times Y]$ ；

若指标 I 和指标 II 是合作关系，则 2 个指标聚合之后的效能值为： $\gamma = [X^T \times \mathbf{ones}(1, n)] + [\mathbf{ones}(n, 1) \times Y]$ ；

其中  $\mathbf{ones}(1, n)$  为 1 行  $n$  列向量，元素均为 1； $\mathbf{ones}(n, 1)$  为  $n$  行 1 列向量，元素均为 1；“ $\times$ ”表示 2 个向量依据向量乘法法则进行运算；“ $*$ ”表示 2 个矩阵的 Hadmard 积；

4) 将  $n$  行  $n$  列的矩阵  $\gamma$  展开成 1 行  $n \times n$  列的向量  $Z = (z_1 \ z_2 \ \dots \ z_{n \times n})$ ，即为指标 I 和指标 II 聚合之后的效能值。

从计算过程看，2 个指标聚合后的效能值既保留样本值中的不确定信息，又能兼容“制约指标效能聚合”的能力。需要注意的是，聚合指标的数量可以是 2 个也可以是多个，在多个指标的聚合过程中要保证指标之间两两关系的统一性。

## 2 评估等级

本文提出的矩阵运算法有兼容性高的优势，但在评估过程中数据量会迅速增大。把这些数据完全呈现出来并不现实，因此本文通过云模型实现数据的可视化。云模型<sup>[14-17]</sup>是 20 世纪 90 年代初李德毅院士在传统模糊数学和概率统计的基础上提出的定性定量互换模型，主要反映人类对客观世界中事物的认知或人类知识中概念的随机性(取值的涨落特性)和模糊性(取值边界的涨落特性)。因此本文基于云模型理论建立了评语等级和对评估结果的评定规则。

### 2.1 云模型数字特征

云模型是通过期望值  $E_x$  (expected value)、熵  $E_n$  (entropy) 和超熵  $H_c$  (hyper entropy) 3 个数字特征来描述的一个概念。期望值  $E_x$  是定性概念量化之后的中心值，是云模型图像中所有云滴位置坐标的期望值；熵  $E_n$  是对定性概念随机性和模糊性的度量，表征了云滴的分布范围；超熵  $H_c$  是熵的不确定性度量，表征云层的厚度和概念模糊性的涨落特性，超熵越大，则云层越厚；概念模糊性的涨落特性越大，概念的含义越丰富，越容易被接受<sup>[17]</sup>。正态云模型(2,0.2,0.01)的图像及其数字特征如图 2 所示。除了正态云模型之外，还有其他的衍生云模型，如梯形云、三角云、 $\Gamma$  云等完整形态云模型和各自的半升云和半降云。

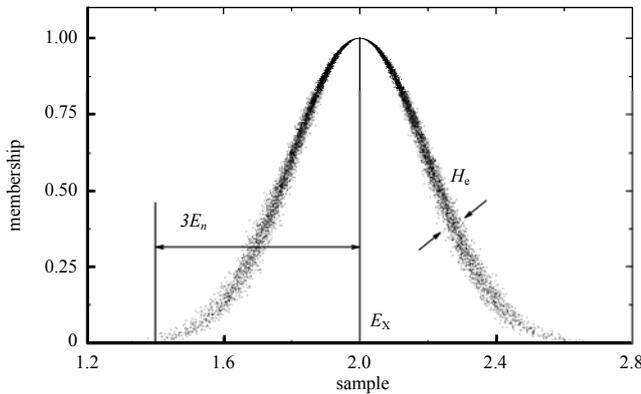


Fig.2 Cloud model and its numerical characteristics  
图 2 云模型及数字特征

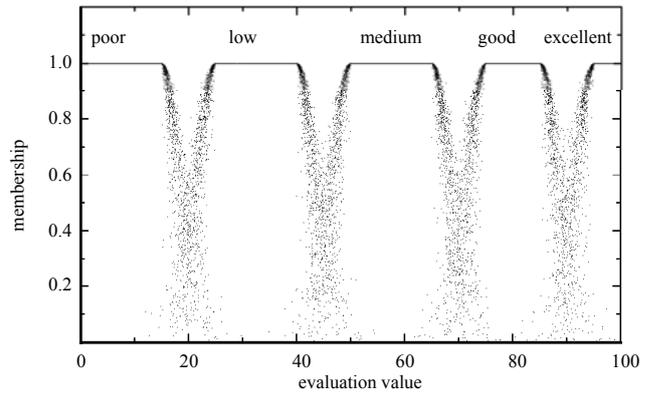


Fig.3 Evaluation level cloud model  
图 3 评估等级基云

2.2 评估等级基云

正态云模型虽然有广泛的适应性<sup>[18]</sup>，但由于某一评估等级的划分应当具有一定的区间特性，而正态云模型的单一中心值与此特性不兼容，因此本文基于梯形云模型设定评估等级基云，并将某一基云记为 $(E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}, E_{x2}, E_{n2}, H_{e2})$ ，参数 $E_{x1}, E_{n1}$ 和 $H_{e1}$ 为上升半云的数字特征， $E_{x2}, E_{n2}$ 和 $H_{e2}$ 为下降半云的数字特征。通过对评估对象的具体分析，设定 5 个评估等级基云，分别为：优、良、中、下、差。图 3 是评估等级基云图示，其评估值的取值范围是 $[0, 100]$ 。评估等级基云所对应的数字特征如表 2 所示。

表 2 评估等级基云的数字特征  
Table2 Characteristics of evaluation level cloud model

evaluation levels	excellent	good	medium	low	poor
numerical characteristics	(95,3.3,1,100,0,0)	(75,3.3,1,85,3.3,1)	(50,3.3,1,65,3.3,1)	(25,3.3,1,40,3.3,1)	(0,0,0,15,3.3,1)

2.3 确定评估等级

确定评估对象的工作效能处于哪一个评估等级需要先抽象出评估对象工作效能的属性评价云。与评估等级的区间特性不同，评估对象的工作效能虽然有一定的不确定性，但其最大概率取值通常都是单一值，不具备明显的区间特性，因此对于评估对象工作效能的属性评价云适用用正态云模型表示。基于评估对象工作效能的评估数据抽象出属性评价云的数字特征，需要特定的逆向云发生器算法<sup>[19]</sup>。逆向云发生器算法有 2 种：利用隶属度信息<sup>[20]</sup>和无需隶属度信息<sup>[21]</sup>。由于本文获得的评估数据只包含取值信息，不包含隶属度信息，因此采用无需隶属度信息的逆向云发生器算法，其计算过程为：

- 1) 依据得到的评估数据 $x_i$ ，获取样本均值 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ，一阶样本中心距 $J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}|$ ；
- 2) 期望值： $E_x = \bar{X}$ ，熵： $E_n = \sqrt{\pi/2} \times J$ ；
- 3) 计算样本方差： $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$ ；
- 4) 若 $S^2 - E_n^2 \geq 0$ ，则转到步骤 6)；
- 5) 若 $S^2 - E_n^2 < 0$ ，则删除当前样本中距离期望 $E_x$ 最近的 1% 样本点，并转到步骤 3)；
- 6) 超熵 $H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2}$ 。

由以上几个步骤即可得到评估数据所对应的云模型数字特征。

2.3.1 确定评估等级的原则

在得到对象工作效能的属性评价云之后，需要确定其处于何种状态，当前常用的有最大隶属度原则和最大相似度原则 2 种方法。其中，最大隶属度原则是依据属性评价云的期望值 $E_x$ 在各个评估等级基云的隶属度的大小，来确定评估对象的工作效能处于何种状态。最大隶属度原则决策过程较为简单，但在评估等级基云的 $3E_n$ 宽度不相同，且属性评价云的期望值 $E_x$ 落在 2 个评估等级基云交界附近的情况下，采用这种决策原则容易得出错误的判别结果。

最大相似度原则也存在一定的缺陷。陈昊等对相似度的定义为：设有某一评估等级基云 $T_j(E_{xj}, E_{nj}, H_{ej})$ 和属性

评价云  $T(E_x, E_n, H_e)$ 。基于属性评价云  $T$  的参数生成评估值  $x_i, i=1,2,\dots,N$ , 并计算每一个评估值在评估等级基云  $T_j$  中的隶属度  $y_i$ , 则  $d_i=\text{sum}(y_i)/N$  为属性评价云  $T$  与评估等级基云  $T_j$  的相似度<sup>[21]</sup>。从定义来看, 相似度的计算结果存在一定的偏差, 如 2 个数字特征相同的正态云, 按照定义计算得到的相似度显然并不等于或接近 1; 而且此定义仅适用于相同形式的云之间的相互度量, 对于不同形式(如正态云模型和梯形云模型)云之间的相互度量并不适用。

2.3.2 最大吸引度原则

针对以上 2 种原则的缺陷, 本文提出最大吸引度的决策原则, 并定义了某一评估等级基云对属性评价云的吸引度, 相应的计算过程如下:

- 1) 依据属性评价云  $T$  的参数生成以  $E_n$  为期望,  $H_e$  为方差的正态随机数:  $E_n'=\text{Normrad}(E_n,H_e)$ ;
- 2) 在云  $T$  中生成以  $E_x$  为期望值,  $E_n'$  为方差的一个正态随机数:  $x_i=\text{Normrad}(E_x,E_n')$ ;
- 3) 计算正态随机数  $x_i$  在评估等级基云  $T_j$  中的吸引度  $\eta_i$ , 具体步骤为:
  - (a) 若  $E_{xj1}<x_i<E_{xj2}$ , 则吸引度  $\eta_i=1$ ;
  - (b) 若  $x_i<E_{xj1}$ (或  $x_i>E_{xj2}$ ), 则依据评估等级基云  $T_j$  的参数生成以  $E_{nj1}(E_{nj2})$  为期望值,  $H_{ej1}(H_{ej2})$  为方差的一个正态随机数:  $E_{Nj}=\text{Normrad}(E_{nj1},H_{ej1})$ ;
  - (c) 计算并比较 2 个结果:  $\eta_{T_j}=\exp\left[-(x_i-E_{xj1})^2/2E_{Nj}^2\right], \eta_T=\exp\left[-(x_i-E_x)^2/2E_n'^2\right]$ ;
  - (d) 取  $\eta_i=\min\{1,\eta_{T_j}/\eta_T\}$ ;
- 4) 重复操作 1)~3), 直至产生  $N$  个  $\eta_i$ , 并计算吸引度  $\delta_i=\text{sum}(\eta_i)/N$ 。

从吸引度的计算过程可以知道, 如果评估等级基云和属性评价云都退化成隶属度曲线, 则吸引度是 2 条曲线相交部分的面积占属性评价云面积的百分比。很明显, 属性评价云  $T$  的云滴落在评估等级基云  $T_j$  内越多, 评估等级基云对属性评价云的吸引度越高。吸引度的概念对相同形式和不同形式云之间的相互度量都适合, 而且决策过程比最大隶属度原则更有说服力。值得注意的是, 吸引度是一个不互易的概念, A 对 B 的吸引度并不一定等于 B 对 A 的吸引度。在得到所有评估等级基云对属性评价云的包含度之后, 依据最大包含度原则, 确定评估对象的工作效能等级。

3 算例验证与分析

以某中远程警戒雷达为例, 其主要技术参数有  $MTBF=50\text{ h}, MTTR=5\text{ h}, P_t=20\text{ kW}, L=12.4\text{ dB}, G=24\text{ dB}$  等<sup>[22]</sup>。干扰机与雷达天线距离  $R_j=300\text{ km}, P_j=1\text{ kW}, G_j=20\text{ dB}, L_j=10\text{ dB}$  等<sup>[7]</sup>。在  $P_d=80\%, P_f=10^{-6}$  条件下, 根据雷达距离公式可以得出, 对于  $\sigma=1\text{ m}^2$  的目标, 雷达的发现距离为 278 km。当存在远程支援干扰时, 假设检测概率  $P_d<10\%$  为有效干扰, 雷达对相同目标

的发现距离为 72 km。因此, 警戒雷达在远程支援干扰下的探测效能指标评估值  $D_{11}=0.2590$ 。根据其他指标的量化规则, 可以得到相应指标评估参考值。表 3 为根据参考值获得的 10 组指标评估值数据。

表 3 指标评估值数据  
Table3 Indexes sample values

index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{11}$	25	30	27	32	36	28	20	40	30	36
$U_{12}$	84	58	77	84	73	91	76	76	77	73
$U_{21}$	77	73	72	76	74	66	75	77	69	67
$U_{22}$	63	73	73	70	70	76	68	73	69	65
$U_{31}$	84	89	90	79	88	89	87	90	87	91
$U_{32}$	52	64	49	53	55	46	60	55	59	52

根据本文建立的效能聚合算法对指标原始的评估值进行处理, 可以得到探测能力  $U_1$ 、定位能力  $U_2$  以及保障性能  $U_3$  三个准则的特征参数:  $(45.45, 5.25, 0.55), (71.67, 2.95, 0.67)$  和  $(80.33, 2.76, 0.88)$ , 对应的属性评价云如图 4 所示。再由准则层属性评价云和相应准则权重以及三者的逻辑关系, 可以得到评估对象整体效能的特征参数  $(57.00, 3.67, 1.36)$ 。结合 5 个评估等级基云的特征参数, 可以得到每个基云对目标属性评价云的吸引度为  $(0.004, 0.024, 0.997, 0.026, 0.005)$ 。依据最大吸引度原则, 在存在远程支援干扰的条件下, 警戒雷达的工作效能处在“中”的状态。对评估对象整体效能的评估结果进行可视化处理, 如图 5 所示。

从图 4 可以看出, 存在远程支援干扰的情况下, 警戒雷达的探测性能和定位能力受到了影响, 导致雷达的工作效能偏低, 这与实际应用中干扰信号导致接收机信噪比不理想进而使探测距离和定位精确度都受到影响是一致的; 同时, 干扰的存在恶化了电子器件的工作环境, 降低了器件可靠性, 从而降低了系统的保障性能。评估的结果与实际情况契合, 同时利用“矩阵运算聚合、云模型显示”的方法兼容了“处理不确定信息能力”和“相互制约关系指标效能聚合”两项能力, 并基于此进行评估, 是定量评估远程支援干扰下警戒雷达的工作效能的可供选择的一种有效方式。

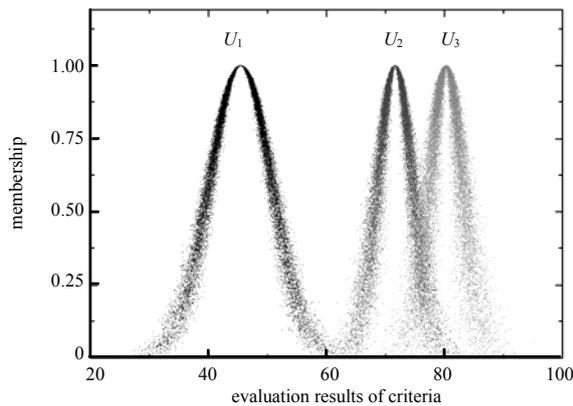


Fig.4 Evaluation results of criteria  
图 4 准则层评估结果

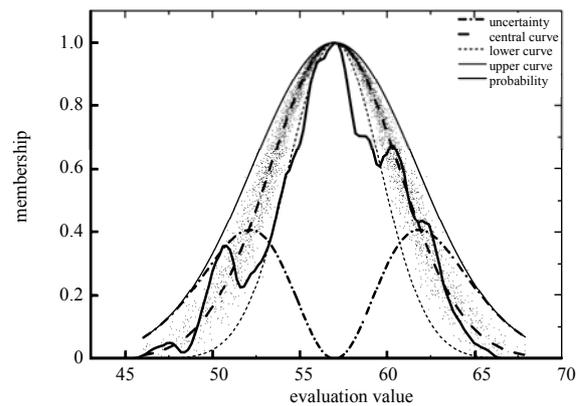


Fig.5 Evaluation results of object  
图 5 评估对象的工作效能

#### 4 结论

基于警戒雷达战术指标存在的显著层次结构,构建了警戒雷达工作效能递阶层次模型并选取了相应的量化规则;在不同工作环境中,雷达指标效能以及整体效能存在涨落,因此借助云模型理论处理了涨落现象所带来的不确定性;最后结合具体实例对远程支援干扰下警戒雷达的工作效能进行评估,取得了较好的结果。在评估过程中,首次提出了吸引度概念和基于矩阵运算的效能聚合算法。采用梯形云模型划分评估等级,比采用单中间值的正态云模型划分评语等级更加符合实际情况。借助云模型的相关理论,对评估结果进行了可视化处理,弥补了矩阵运算数据量骤增的问题,实现了定性与定量之间的有效转换,得到的评价结果更符合人们对定性语言的认知数值。

#### 参考文献:

- [ 1 ] BLANDING W R,KOCH W,NICHEL U. Adaptive phased-array tracking in ECM using negative information[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2009,45(1):152-166.
- [ 2 ] NOVILLO F,ROMERO-ARGUELLO J,GUERRERO E,et al. Performance evaluation of radar systems in noise jamming environments[C]// 2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting. Guayaquil,Ecuador:IEEE, 2016.
- [ 3 ] SHEN Tongyun,DING Jianjiang,DING Yuan,et al. A method of detection performance modeling in jamming condition based on radar network system[C]// IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu,China:IEEE, 2012:1366-1369.
- [ 4 ] XIANG Long,DING Jianjiang,LYU Jinjian. Research on dynamic evaluation of anti-complex blanketing jamming capability of netted radar system[C]// International Conference on Industrial and Information Systems. Dalian,China:IEEE, 2010:265-268.
- [ 5 ] QI Zongfeng,HAN Shan,LI Jianxun. Applications of generalized rough set theory in evaluation index system of radar anti-jamming performance[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Science), 2016,21(2):151-158.
- [ 6 ] 王鹤磊. 一种雷达系统效能的综合评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2001,23(3):40-42. (WANG Helei. The comprehensive evaluation model of radar system effectiveness[J]. Systems Engineering & Electronics, 2001,23(3):40-42.)
- [ 7 ] 蔡金煌,王晓薇,叶博. 远程支援干扰下搜索雷达探测效能评估[J]. 科学技术与工程, 2012,12(21):5163-5167. (CAI Jinhuang,WANG Xiaowei,YE Bo. Detection effectiveness evaluation of search radar under standoff jamming[J]. Science Technology and Engineering, 2012,12(21):5163-5167.)
- [ 8 ] GUO Bo,CHEN Jinping. Analysis of MTBF/MTTR for logistics service system[C]// International Conference on Transportation Engineering. Chengdu,China:[s.n.], 2013:2868-2875.
- [ 9 ] HUGHES L. The effects of event occurrence and duration on resilience and adaptation in energy systems[J]. Energy, 2015, 84(1):443-454.
- [ 10 ] WIBOONRAT M. Energy sustainability and management of data center[C]// 2016 World Congress on Sustainable Technologies. London,UK:IEEE, 2017.
- [ 11 ] WU Jun,TIAN Xiaogang,TANG Ya,et al. Application of analytic hierarchy process-grey target theory systematic model in comprehensive evaluation of water environmental quality[J]. Water Environment Research, 2010,82(7):633-41.
- [ 12 ] CHENG Szupin,WANG Ruyih. Analyzing hazard potential of typhoon damage by applying grey analytic hierarchy process[J]. Natural Hazards, 2004,33(1):77-103.

- [13] 唐鑫,杨建军,严聪,等. HPM武器电子毁伤效能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016,38(10):2317-2323. (TANG Xin,YANG Jianjun,YAN Cong,et al. Effectiveness evaluation method for HPM weapon's electronic damage[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(10):2317-2323.)
- [14] 李德毅,杜鹁. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (LI Deyi,DU Wu. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2005.)
- [15] LI Deyi,HAN Jiawei,SHI Xuemei,et al. Knowledge representation and discovery based on linguistic atoms[J]. Knowledge Based Systems, 1998,10(7):431-440.
- [16] LI Deyi,CHEUNG D W,SHI Xuemei,et al. Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1998,35(3):99-123.
- [17] LI Deyi,LIU Changyu,GAN Wenyan. A new cognitive model:cloud model[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2010,24(3):357-375.
- [18] WANG Guoyin,XU Changlin,LI Deyi. Generic normal cloud model[J]. Information Sciences, 2014(280):1-15.
- [19] 陈燕平,李敏,刘恒. 基于云模型移动对象行为识别算法评价[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):721-725. (CHEN Yanping,LI Min,LIU Heng. Moving object behavior recognition algorithm evaluation based on cloud model[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):721-725.)
- [20] LI Deyi,DI Kaichang,LI Deren,et al. Mining association rules with linguistic cloud models[J]. Journal of Software, 2000, 11(2):143-158.
- [21] 陈昊,李兵,刘常昱,等. 一种无确定度的逆向云算法[J]. 小型微型计算机系统, 2015,36(3):544-549. (CHEN Hao,LI Bing,LIU Changyu,et al. An algorithm of backward cloud without certainty degree[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015,36(3):544-549.)
- [22] 中航雷达与电子设备研究院. 雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (China Aviation Radar and Electronic Equipment Research Institute. Radar system[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2005.)

#### 作者简介:



侯德亭(1963-), 男, 河南省洛阳市人, 教授, 主要研究方向为微波技术、光电对抗技术. email:houdeting@tom.com.

祝民鹏(1992-), 男, 石家庄市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达对抗复杂电磁环境与效能评估.

胡 涛(1976-), 男, 安徽省铜陵市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为高功率微波技术.

陈 丹(1992-), 女, 河南省信阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为故障诊断.

蒋 腾(1994-), 女, 河南省永城市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理.