

· 雷达系统与技术 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.08.003

# 基于组合赋权的 ELINT 系统效能评估算法

邱日升<sup>1</sup>, 潘继飞<sup>1</sup>, 赵君<sup>1</sup>, 惠小东<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 电子对抗学院, 合肥 230037; 2. 解放军 77626 部队, 拉萨 851400)

**摘要:**针对当前电子情报(ELINT)侦察系统效能评估方法存在的问题和不足,提出了一种基于组合赋权法的 ELINT 系统效能评估算法。该算法首先结合 ELINT 系统工作原理,搭建了其评估指标体系;然后,基于指标的主观特性和客观属性,将 G1 序列主观赋权法和 CRITIC 客观赋权法相结合得到各指标的组合权重;最后,利用加权求和模型得到系统的单项能力值和综合效能值,通过对比分析进行系统的优良排序。理论分析与仿真结果表明:该方法有效结合了定性和定量分析,在 ELINT 系统效能评估中切实可行。

**关键词:**G1 序列法;CRITIC 法;电子情报系统;指标体系;效能评估

中图分类号:TN971

文献标志码:A

文章编号:1004-7859(2020)08-0013-06

**引用格式:**邱日升, 潘继飞, 赵君, 等. 基于组合赋权的 ELINT 系统效能评估算法[J]. 现代雷达, 2020, 42(8): 13-18.

QIU Risheng, PAN Jifei, ZHAO Jun, et al. Efficient evaluation algorithm for ELINT system based on combination weighting[J]. Modern Radar, 2020, 42(8): 13-18.

## Efficient Evaluation Algorithm for ELINT System Based on Combination Weighting

QIU Risheng<sup>1</sup>, PAN Jifei<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>, HUI Xiaodong<sup>2</sup>

(1. Electronic Warfare Academy, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

(2. The Unit 77626 of PLA, Lhasa 851400, China)

**Abstract:** Aiming at the problems and shortcomings of current electronic intelligence (ELINT) reconnaissance system effectiveness evaluation methods, an ELINT system performance evaluation algorithm based on combination weighting method is proposed. The algorithm firstly combines the working principle of ELINT system to build its evaluation index system. Then, based on the subjective and objective attributes of the index, the algorithm combines the G1 sequence subjective weighting method with the CRITIC objective weighting method to obtain the combined weight of each index. Finally, the weighted summation model is used to obtain the individual ability values and comprehensive performance values of each system, and the system is ranked well through comparative analysis. Theoretical analysis and simulation results show that the method effectively combines qualitative and quantitative analysis and is feasible in the performance evaluation of ELINT system.

**Key words:** G1 sequence method; CRITIC method; electronic intelligence system; index system; effectiveness evaluation

## 0 引言

随着信息化战争的不断发展,电磁战场成为现代战争的主战场之一,电子对抗力量在电磁较量中发挥着重要的作用。电子情报(ELINT)侦察系统主要是对空间中的雷达信号进行截获分析,获取雷达的信号参数,为电子对抗提供情报支持。对 ELINT 系统效能进行合理评估,有利于指挥员做出正确的决策和作战部署<sup>[1]</sup>。当前,针对系统效能进行评估的方法有很多,但是针对 ELINT 系统效能进行评估还处于起步阶段,目前常用的方法大都以主观赋权法为主<sup>[2]</sup>。本文通过分析当前主观赋权法、客观赋权法以及组合赋权法的特点,针对性地将 G1 序列主观赋权法和 CRITIC 客

观赋权法相结合对 ELINT 系统效能进行评估。

## 1 基础算法原理

当前,系统效能评估方法从权重的性质上进行分类主要有三大类:一是主观赋权法,主要包括常规的层次分析法<sup>[3]</sup>、专家调查法(德尔菲法)<sup>[4]</sup>、环比评分法和关联矩阵法<sup>[5]</sup>等,权重由专家根据主观判断得出,将定性问题量化,但是主观赋权法带有较强的主观随意性,受评估者的知识结构、工作经验及偏好等影响;二是客观赋权法,主要包括熵值法<sup>[6]</sup>、主成分分析法<sup>[7]</sup>、变异系数法和 CRITIC 法<sup>[8]</sup>等,根据各指标在总体中的变异程度和对其他指标的影响程度来确定权重,但权重受数据影响较大,容易造成最终评价结果与事实不符;三是组合赋权法,常用的方法是将熵值法和层次分析法相结合得到指标的组合权重<sup>[9]</sup>,该方法虽

然综合考虑了指标的主客观因素,但是运算过程复杂,只关注指标之间的相关性。本文主要是综合三类赋权法的特点,选用基于 G1 序列法和 CRITIC 赋权法的组合赋权法对 ELINT 系统效能进行评估。G1 序列主观赋权法通过标度扩展,简化了层次分析法的一致性运算过程。CRITIC 客观赋权法既能反映各个指标的变异程度,又能体现指标之间相互影响的程度,是当前几种客观赋权法中考虑比较全面的一种方法<sup>[10]</sup>。为解决决策者主观偏好过强、实测数据使用不合理等问题,文中还利用最小二乘法对新提出的主客观权重进行融合。这一综合算法运算过程简单,指标属性考虑全面,有助于实现对 ELINT 系统效能的评估。本算法涉及的算法原理主要包括 G1 序列主观赋权法、CRITIC 客观赋权法、最小二乘法组合赋权、归一化处理以及加权求和算法模型。

### 1.1 G1 序列法

G1 序列法是一种对层次分析法进行改进的主观赋权法,通过标度扩展法构造判断矩阵,无需再进行复杂的一致性检验。其基本原理如下:首先,根据专家经验和用户需求对需要评估的  $n$  个指标  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  进行降序排列,假设为  $x_1 > x_2 > \dots > x_n$ ;然后,将  $x_j$  与  $x_{j+1}$  重要程度进行比较,得到标度值  $t_j$ 。标度的定义如表 1 所示<sup>[11]</sup>。

表 1 标度值含义

标度值	含义
1	两个指标同等重要
1.2	一个指标比另一个指标稍微重要
1.4	一个指标比另一个指标强烈重要
1.6	一个指标比另一个指标明显重要
1.8	一个指标比另一个指标绝对重要
1.1, 1.3, 1.5, 1.7	重要程度介于各等级之间

通过各指标相互比较,得到由标度值构成的判断矩阵  $R=[r_{kj}]$ ,判断矩阵  $R$  满足如下性质:

(1)  $r_{kj}$  为第  $k$  个指标和第  $j$  个指标相比得到的对应标度值,其中  $k, j=1, 2, \dots, n$ ;

(2)  $r_{kj}=1/r_{jk}$ ;

(3)  $r_{jj}=1$ ;

(4)  $r_{kj}=r_{kt} \cdot r_{tj}$ , 其中  $k=1, 2, \dots, n$ 。

$R =$

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1 t_2 & \cdots & t_1 t_2 \cdots t_{n-1} \\ 1/t_1 & 1 & t_2 & \cdots & t_2 t_3 \cdots t_{n-1} \\ 1/t_1 t_2 & 1/t_2 & 1 & \cdots & t_3 t_4 \cdots t_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/t_1 t_2 \cdots t_{n-1} & 1/t_2 t_3 \cdots t_{n-1} & 1/t_3 t_4 \cdots t_{n-1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由此可知,判断矩阵  $R$  是满足一致性的,不用再进行一致性检验就可以得到合理的主观权重,各指标的主观权重为

$$\alpha_j = \frac{\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n r_{ij}}}{\sum_{j=1}^n \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n r_{ij}}} \quad (2)$$

### 1.2 CRITIC 赋权法

CRITIC 法是一种基于指标数据的客观赋权法。主要以数据的对比强度和冲突性为基础。其中,对比强度采用标准差的形式来体现,表示同一个指标各个评价方案取值的差异程度,标准差越大各方案之间取值差距越大,提供信息量越多,所占权重也应该越大;评价指标的冲突性以指标之间的相关系数体现,如果两个指标成较强的正相关,则说明指标之间的冲突性较弱,提供的信息量较少,所占的权重也较小<sup>[12]</sup>。因此,基于以上观点,对于一评价体系而言,设其共有  $n$  个指标,  $m$  个待测方案。可以构造基于两种特性的指标信息量,设  $C_j$  表示第  $j$  个评价指标所包含的信息量,则  $C_j$  可以表示为

$$C_j = \sigma_j \cdot \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中:  $\sigma_j$  为第  $j$  个评价指标标准差,其计算方法为

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \mu_j)^2} \quad (4)$$

$$\mu_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (5)$$

$r_{ij}$  为指标  $t$  和指标  $j$  之间的相关系数,其计算方法为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{it} - \mu_t)(x_{ij} - \mu_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{it} - \mu_t)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \mu_j)^2}} \quad (6)$$

对于 CRITIC 法而言,  $C_j$  越大,则第  $j$  个指标包含的信息量越大,其相对重要性也越大,所以第  $j$  个指标的客观权重为

$$\beta_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

CRITIC 法不仅考虑了指标变异程度对权重的影响,还考虑了各指标之间的冲突性,是一种比熵权法和标准离差法更好的客观赋权法,其得到的权重更加符合数据的客观实际。

### 1.3 最小二乘法求组合权重

由上可知,主观赋权法体现的是指标的价值量,客观赋权法体现的是指标的信息量。将主观赋权法和客观赋权法相结合,可以在一定程度上克服单一赋权法的不足,实现主客观权重的统一以及信息量和价值量的统一。常见的权重融合方法有加法组合赋权法、乘法组合赋权法和极差组合赋权法等<sup>[13]</sup>。本文综合以上方法优劣,选择基于最小二乘法原理的组合赋权法。

由式(2)可以得到指标的主观权重为

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T \quad (8)$$

由式(7)可以得到指标的客观权重为

$$\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]^T \quad (9)$$

拟得到的最优组合指标权重为

$$\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T \quad (10)$$

当对  $m$  项方案,每项方案下有  $n$  个指标的系统进行评价时,其数据矩阵为  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。对于评价对象的所有指标而言,最优权重下各指标的评价值与主客观赋权法下的评价值偏差应当越小越好。因此,建立最小二乘法优化组合评价模型

$$\begin{cases} \min F(\omega) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{[(\alpha_j - \omega_j)x_{ij}]^2 + [(\beta_j - \omega_j)x_{ij}]^2\} \\ \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

利用拉格朗日乘数法求得最优解,构造函数  $L(\omega, \lambda)$

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{[(\alpha_j - \omega_j)x_{ij}]^2 + [(\beta_j - \omega_j)x_{ij}]^2\} + 2\lambda \left( \sum_{j=1}^n \omega_j - 1 \right) \quad (12)$$

由极值存在条件可知

$$\frac{\partial L}{\partial \omega_j} = - \sum_{i=1}^m 2(\alpha_j + \beta_j - 2\omega_j)x_{ij}^2 + 2\lambda = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 2 \left( \sum_{j=1}^n \omega_j - 1 \right) = 0 \quad (14)$$

可以化简得到

$$\begin{bmatrix} B & e \\ e^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} B &= \text{diag} \left[ \sum_{i=1}^m x_{i1}^2, \sum_{i=1}^m x_{i2}^2, \dots, \sum_{i=1}^m x_{in}^2 \right] \\ e &= [1, 1, \dots, 1]^T \\ \omega &= [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n] \\ C &= \left[ \sum_{i=1}^m \frac{1}{2}(\alpha_1 + \beta_1)x_{i1}^2, \sum_{i=1}^m \frac{1}{2}(\alpha_2 + \beta_2)x_{i2}^2, \dots, \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^m \frac{1}{2}(\alpha_n + \beta_n)x_{in}^2 \right]^T \end{aligned}$$

对式(15)求解,得

$$\omega = B^{-1} \left[ C + \frac{1 - e^T B^{-1} C}{e^T B^{-1} e} e \right] \quad (16)$$

### 1.4 归一化处理

在系统效能评估过程中,定量指标的量纲一般不同,不同量纲的运算势必会增加运算难度,而且会影响结果物理意义的分析和说明。为了便于综合评价,通常对指标值进行归一化处理,将指标实际值转化为度量值,常用的归一化处理方法有极值变换法和线性尺度变换法。

本文主要是采用线性尺度变换法进行归一化处理,它避免了极差法出现指标数据为零的问题。原理是利用待测样本值除以待测序列的极值,由于同一个因素的量级差别不大,所以通过除以极值可以将待测数据值整理到(0,1)这个量级附近。其转化函数为以下两种形式。

(1)成本型指标

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (17)$$

(2)效益型指标

$$r_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (18)$$

式中: $x_{ij}$  表示第  $i$  个方案第  $j$  个指标的数据值。

## 2 ELINT 系统效能评估模型

ELINT 系统效能是评估复杂系统的一类具体应用。本文主要基于加权求和算法建立 ELINT 系统效能评估模型。首先,结合 ELINT 系统工作原理将系统效能拆分成不同的能力,搭建其评估指标体系,综合各待测系统指标值进行归一化处理<sup>[14]</sup>;然后,采用组合赋权法得到各指标的权重;最后,利用加权求和模型得到各系统效能值。其评估流程如图 1 所示。

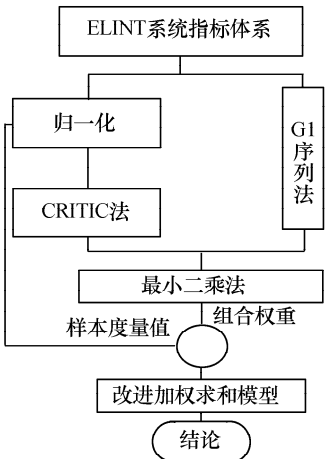


图1 ELINT系统效能评估模型

2.1 ELINT 系统评估指标体系

ELINT 系统的评价指标较多而且内在关联复杂,不易统一量化处理。本文主要结合 ELINT 系统工作原理,将 ELINT 系统效能表征为信号截获能力、参数测量能力和信号处理能力<sup>[15]</sup>。信号截获能力主要是指 ELINT 系统截获到空间中电磁信号的能力,主要由灵敏度、方位覆盖范围、频率搜索范围、截获概率和截获时间构成;参数测量能力主要是对截获信号进行脉冲描述字的测量,主要由角度测量精度、频率测量精度、脉宽测量精度以及重频测量精度构成;信号处理能力主要是对信号进行识别和分析,主要由信号密度、分选能力和识别能力构成<sup>[16]</sup>。指标体系如图 2 所示。

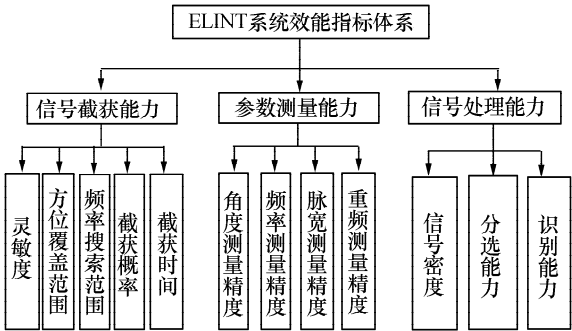


图2 ELINT系统效能评估指标体系

2.2 指标数据预处理

对于 ELINT 系统而言,其效能值由多个指标共同决定。在对系统进行效能评估时,需要对数据进行预处理,将不同量纲的数据归一化处理后进行计算。本文采用线性尺度变换法对数据进行预处理。对于 ELINT 系统而言,除截获时间为效益型指标,其余指标均为成本型指标。各待测系统指标极值构成的指标参考集为  $\bar{X} = [\begin{smallmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_{i12} \end{smallmatrix}]$ ,构成的待测系统指标样本集为  $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{i12}]$ 。

利用式(17)和式(18)得到各待测系统样本度量值为

$$\bar{X}_i = [\bar{x}_{i1}, \bar{x}_{i2}, \cdots, \bar{x}_{in}] \tag{19}$$

2.3 加权求和评估模型

在对系统效能进行评估时,当得到指标的权重后,往往利用加权求和模型综合指标数据得到系统效能<sup>[17]</sup>

$$E_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot \omega_j \tag{20}$$

3 实例仿真与结果分析

现已知五型 ELINT 系统  $A_0, A_1, A_2, A_3$  和  $A_4$ ,其各项指标样本值如表 2 所示<sup>[18]</sup>。现对这五型 ELINT 系统进行效能评估。

表2 待测系统样本指标值

	样本值				
	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
X1 灵敏度/dBm	67	56	70	100	80
X2 方位覆盖范围/(°)	360	360	360	360	360
X3 频率搜索范围/GHz	18	8	12	10	18
X4 截获概率/%	0.60	0.50	0.40	0.70	0.90
X5 截获时间/s	0.40	0.20	0.30	0.60	0.20
X6 角度测量精度/(°)	4.75	4.10	5.15	5.25	4.15
X7 频率测量精度/MHz	4.50	4.05	4.85	4.75	4.05
X8 脉宽测量精度/ $\mu s$	1.20	0.80	1.30	1.41	1.02
X9 重频测量精度/ $\mu s$	0.28	0.18	0.30	0.40	0.10
X10 信号密度/( $10^6 \cdot s^{-1}$ )	2.00	3.00	4.50	1.00	5.00
X11 分选能力/%	0.85	0.65	0.70	0.72	0.80
X12 识别能力/%	0.93	0.90	0.85	0.88	0.90

3.1 算法实现

结合本算法原理,首先结合样本指标值利用式(17)和式(18)对待测系统进行归一化处理;然后,利用各权重计算方法求得各指标权重,如表 3 所示。

表3 指标权重表

	主观赋权	客观赋权	组合赋权
X1 灵敏度	0.16	0.07	0.12
X2 方位覆盖范围	0.10	0	0.05
X3 频率搜索范围	0.07	0.11	0.09
X4 截获概率	0.04	0.10	0.07
X5 截获时间	0.03	0.19	0.11
X6 角度测量精度	0.13	0.05	0.09
X7 频率测量精度	0.09	0.04	0.06
X8 脉宽测量精度	0.08	0.07	0.07
X9 重频测量精度	0.05	0.14	0.09
X10 信号密度	0.11	0.19	0.15
X11 分选能力	0.08	0.04	0.06
X12 识别能力	0.05	0.02	0.03

利用式(20)计算得到各系统的效能值。在实际应用中,有时仅仅依靠综合效能值无法对系统进行全面的评价,还需要得到各待测系统的单项能力值。对于该例而言,各待测系统的单项能力值和综合效能值

如表 4 所示,其各项效能对比如图 3 所示。

表 4 系统效能值

	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
信号截获能力	0.73	0.70	0.68	0.70	0.95
信号测量能力	0.84	0.65	0.90	0.98	0.62
信号处理能力	0.64	0.69	0.88	0.47	0.98
综合效能	0.74	0.68	0.80	0.74	0.85

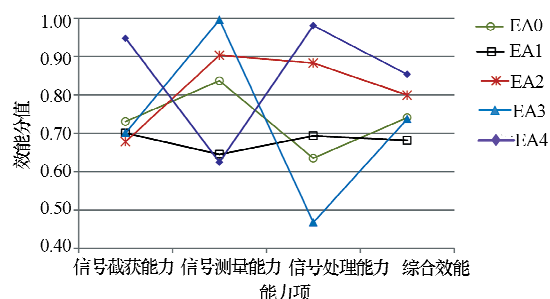


图 3 效能对比折线图

### 3.2 结果分析

对 ELINT 系统进行效能评估,不管采用什么方法,特征权重的选择对评估结果都有着至关重要的影响。本文采用的组合赋权法不仅结合了待测系统原理特征,还可以根据指标的数据信息实时更新修正特征权重,相比主观赋权法和单纯的客观赋权法更加符合实际。通过表 3 可知,方位覆盖范围指标如果单独利用客观赋权法得到的权值为 0,与实际情况相违背;重频测量精度指标单纯地利用主观赋权法得到的权值,不利于各系统的对比分析。因此,利用该组合赋权法得到的权值更加合理。

在得到系统的权值后,利用加权求和模型分别求得系统的各项效能值和综合效能值。由表 4 和图 3 可知,五个待测系统效能对比结果为

$$A_4 > A_2 > A_0 = A_3 > A_1$$

因此,就五个待测系统而言, $A_4$  系统效能最优, $A_1$  系统最差, $A_0$  和  $A_3$  系统综合效能值一样。在实际应用中,可以根据运用需求,结合各系统的单项能力值选择合适的系统。就  $A_0$  和  $A_3$  而言,虽然二者综合效能值评分结果一样,但是除信号测量能力  $A_3$  系统明显优于  $A_0$  系统,其他两项效能  $A_0$  系统均比  $A_3$  系统要好。因此,就该两项系统而言如果需求方对信号测量能力有较大需求,则可以优先选择  $A_3$ ,否则应当选择  $A_0$  系统。

### 4 结束语

ELINT 系统效能的量化评估是 ELINT 系统论证设计、定型验收及后期应用必不可少的一个环节。本文主要结合 ELINT 系统工作原理,构建了其指标体

系,利用 G1 序列主观赋权法和 CRITIC 客观赋权法相结合的组合赋权法得各指标的权重,利用加权求和模型分别求出系统的单项能力值和综合效能值。该算法综合了主观特性和客观属性,能较好地实现对 ELINT 系统效能的评估,而且进行了单项能力和综合效能对比,更加有利于帮助决策者对系统效能进行全面的了解,具有较强的可操作性和推广价值。

### 参考文献

- [1] 贺平. 雷达对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2016.  
HE Ping. Theory of radar countermeasure [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [2] 胡建旺, 李月武, 吉兵. 雷达情报质量评价指标体系研究[J]. 现代雷达, 2019, 41(9): 26-30.  
HU Jianwang, LI Yuewu, JI Bing. Research on evaluation index system of radar intelligence quality [J]. Modern Radar, 2019, 41(9): 26-30.
- [3] SAHA S, GAYEN A, POURGHASEMI H R, et al. Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(23): 1-18.
- [4] REES D. Exploring stability and change in transport systems: combining Delphi and system dynamics approaches [J]. Transportation, 2017, 44(4): 789-805.
- [5] 瞿英, 范默苒, 邵冬, 等. 基于灰色综合评价的毕业要求达成度评价与解析[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(11): 255-257.  
QU Ying, FAN Moran, SHAO Dong, et al. Evaluation and analysis of graduation requirement achievement based on grey comprehensive evaluation [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(11): 255-257.
- [6] LI H Y. Study on coloring method of airport flight-gate allocation problem [J]. Journal of Mathematics in Industry, 2019, 9(1): 1-16.
- [7] KOUSUKE Y, HIROYUKI N, TOMOHIRO Y, et al. Identifying differences between a straight face and a posed smile using the homologous modeling technique and the principal component analysis [J]. The Journal of Craniofacial Surgery, 2019, 30(8): 2378-2380.
- [8] HERZALLAH R. Adaptive CRITIC methods for stochastic systems with input-dependent noise [J]. Automatica, 2007, 43(8): 1355-1362.
- [9] 张磊, 曹跃云, 李彬, 等. 基于组合赋权法的舰船动力系统使用效能评估研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(2): 68-72.  
ZHANG Lei, CAO Yueyun, LI Bin, et al. Evaluation of the effectiveness of warship power system based on combined weighting method [J]. Ship Science and Technology, 2018,

- 40(2): 68-72.
- [10] 王 昆, 宋海洲. 三种客观权重赋权法的比较分析[J]. 技术经济与管理研究, 2003, 1(6): 48-49.  
WANG Kun, SONG Haizhou. A comparative analysis of three objective weighting methods[J]. Technical Economics and Management Research, 2003, 1(6): 48-49.
- [11] 王文华, 黄仁乐, 邹保平, 等. 基于序关系分析法的配电网风险评估方法[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(8): 1516-1521.  
WANG Wenhua, HUANG Renle, ZOU Baoping, et al. A risk assessment method for distribution networks based on ordered relationship analysis[J]. Computer and Digital Engineering, 2018, 46(8): 1516-1521.
- [12] MIAO C, TENG J K, WANG J, et al. Population vulnerability assessment of geological disasters in China using CRITIC-GRA methods [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(11): 1-12.
- [13] TAKEISHI Y, TAKEUCHI J. An improved analysis of least squares superposition codes with Bernoulli dictionary [J]. Japanese Journal of Statistics and Data Science, 2019, 2(2): 591-613.
- [14] 孟令杰, 张顺健, 樊 松. 基于突变理论的雷达对抗装备效能评估[J]. 现代雷达, 2018, 40(3): 77-79.  
MENG Lingjie, ZHANG Shunjian, FAN Song. Evaluation of the effectiveness of radar countermeasure equipment based on catastrophe theory[J]. Modern Radar, 2018, 40(3): 77-79.
- [15] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- ZHAO Guoqing. The principle of radar countermeasures [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012.
- [16] 戎 华, 陈 求, 杨 熙. 基于多侦察资源的电子侦察作战效能评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(1): 84-87.  
RONG Hua, CHEN Qiu, YANG Xi. Evaluation model of electronic reconnaissance combat effectiveness based on multiple reconnaissance resources [J]. Fire Control and Command Control, 2017, 42(1): 84-87.
- [17] JIA S H. A penalty function method for solving ill-posed bi-level programming problem via weighted summation [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2013, 26(6): 1019-1027.
- [18] 吕 可, 郑 威, 赵严冰. 雷达对抗侦察装备作战能力的 ANP 幂指数评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(12): 59-63.  
LÜ Ke, ZHENG Wei, ZHAO Yanbing. ANP power index evaluation method for operational capability of radar countermeasure reconnaissance equipment[J]. Fire Control and Command Control, 2016, 41(12): 59-63.
- 作者简介:**  
邱日升 男, 1994 年生, 硕士研究生, 研究方向为雷达对抗情报侦察系统效能评估;  
潘继飞 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 研究方向为雷达对抗;  
赵 君 女, 1994 年生, 硕士研究生, 研究方向为装备保障;  
惠小东 男, 1983 年生, 大学本科, 助理工程师, 研究方向为装备运用。
- 
- (上接第 12 页)
- ZHANG Wandong, LI Qingzhong, LI Ming, et al. Sea surface target detection for RD images of HFSWR based on optimized error self-adjustment extreme learning machine[J]. Acta Automatica Sinica. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2109.TP.20190104.1506.015.html>.
- [15] LIU Y, GE Y X, WANG F P, et al. A rotation invariant HOG descriptor for tire pattern image classification[C]// Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Brighton: IEEE Press, 2019: 2412-2416.
- [16] GUO Z, ZHANG L, ZHANG D. A completed modeling of local binary pattern operator for texture classification[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(6): 1657-1663.
- [17] LIU Z, QIU C J, SONG Y Q, et al. Texture feature extraction from thyroid MR imaging using high-order derived mean CLBP[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2019, 34(1): 35-46.
- [18] HAFED Z M, LEVINE M D. Face recognition using the discrete cosine transform[J]. International Journal of Computer Vision, 2001, 43(3): 167-188.
- [19] VELLAIKAL A, KUO C C J. Joint spatial-spectral indexing for image retrieval[C]// Proceedings of International Conference on Image Processing. Lausanne: IEEE Press, 1996: 867-870.
- [20] ZHANG W, LI Q, WU Q M, et al. A novel ship target detection algorithm based on error self-adjustment extreme learning machine and cascade classifier [J]. Cognitive Computation, 2018, 11(1): 110-124.
- [21] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and applications [J]. Neurocomputing, 2006, 70(1): 489-501.
- 作者简介:**  
李庆忠 男, 1963 年生, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为图像处理、信号处理与模式识别;  
韩 怡 女, 1995 年生, 硕士研究生, 研究方向为智能信息处理与模式识别。