

# 基于熵权的灰色关联辐射源威胁评估

芮鹏程, 王 星, 周东青, 杜文红, 杨远志, 程嗣怡

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 辐射源威胁评估可为后期干扰资源配置及任务分配提供依据,是机载自卫电子对抗的重要研究课题。针对评估指标少、不全面的问题,从影响威胁等级的距离估计指标、分辨力估计指标、概率估计指标和平台指标出发建立辐射源威胁评估体系,通过参数集输入计算出各指标值;然后运用基于熵权的灰色关联方法,通过熵权法对权重客观赋值,结合最优、最劣关联度,得到灰色关联相对贴进度;最后,对贴进度排序,评判威胁等级。仿真表明,定量计算与定性分析结果的一致说明了算法的有效性;与选取的 2 种改进算法进行威胁排序与运算时间的对比,其结果的一致和运算时间上的优势说明了算法的可行性和时效性。

**关键词** 辐射源;威胁评估;熵权;灰色关联;相对贴进度

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.011

**中图分类号** TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)06-0058-06

## A Grey Correlation Method Based on Entropy Weight in Emitter Threat Assessment

GUO Pengcheng, WANG Xing, ZHOU Dongqing, DU Wenhong, YANG Yuanzhi, CHENG Siyi  
(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The emitter and threat level evaluation can provide a basis for configuring jamming resources and mission of assignment, and is a vital research subject of the airborne active self-defense electronic countermeasure. Aimed at the problems that the assessment indexes are few and incomprehensive, this paper establishes an emitter-threat assessment system to the needs of effect on the distance estimation index, resolution estimation index, probability estimation index and platform index. The paper calculates each index through parameter set. Then, the paper uses the grey correlation based on the entropy weight to figure out the optimal correlation degree. Finally, the paper judges the threat level by comprehensive relative closeness coefficient. The simulation example shows that though analyzing the result and comparing the method among other three methods, the merits prove the effectiveness and the feasibility of the method.

**Key words:** emitter; threat assessment; entropy weight; grey correlation; relation closeness coefficient

对辐射源快速并准确地进行威胁评估,形成辐射源威胁评估情报,反映了机载电子对抗系统信息处理能力,是后期进行干扰资源分配以及机载自卫

电子对抗功率管理的基础<sup>[1-2]</sup>。因此,辐射源威胁评估对于提高电磁资源利用率、对目标实施有效干扰有重要意义。

**收稿日期:**2016-05-08

**基金项目:**航空科学基金(20152096019; 20145596025)

**作者简介:**芮鹏程(1993—),男,湖南邵阳人,硕士生,主要从事电子对抗理论与技术研究.E-mail:15229005072@163.com

**引用格式:**芮鹏程,王星,周东青,等.基于熵权的灰色关联辐射源威胁评估[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(6):58-63. GUO Pengcheng, WANG Xing, ZHOU Dongqing, et al. A Grey Correlation Method Based on Entropy Weight in Emitter Threat Assessment [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 58-63.

目前,国内关于辐射源威胁评估的算法有很多,文献[3]将直觉模糊集理论引入到辐射源威胁等级判断中,提出一种改进的加权计分函数方法,但该文仅针对辐射源 4 个信号指标进行评估,不能准确刻画辐射源威胁程度。文献[4]研究了模糊动态贝叶斯网络,能处理具有多个状态的观测值,但牺牲了运算效率,实时性较差。此外用于威胁评估的方法还有粗糙集理论<sup>[5]</sup>、层次分析法<sup>[6]</sup>、神经网络<sup>[7]</sup>等。

在已有的研究基础上,针对辐射源评估指标不全面,评估效率低的问题,提出较为全面的辐射源威胁指标体系,在基于熵权法的灰色关联评估模型下,得出威胁等级排序结果,提高了实时准确进行威胁评估的能力。

## 1 辐射源威胁评估指标体系建立

影响辐射源威胁程度的因素有很多,如辐射源工作状态、平台类型、对我方作战意图等。考虑的因素越多越精确,但会加大评估量和难度,实效性难以保证<sup>[8]</sup>。本文把敌方雷达对我方的探测定位能力作为指标选取的切入点,选取了距离、分辨力、虚警、平台 4 个 1 级评估指标和 9 个 2 级评估指标,在 1.1 节中详细叙述。

### 1.1 距离估计指标

1) 探测距离。雷达方程的简单形式具有指导性,但在实际中需要考虑其他因素。以脉冲雷达的探测距离方程为例:

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t}{B} \cdot \frac{G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_o F_n (S/N)_{\min} L} \right]^{1/4} \quad (1)$$

参数含义见文献[9]。

2) 侦察距离。侦察方程是表征我方侦察设备对雷达的探测能力<sup>[9]</sup>。考虑大气中电磁衰减效应,侦察作用距离表示为:

$$R_r = \left[ \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{r\min}} \gamma \varphi \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: $G_r$  为接收天线增益; $P_{r\min}$  为最小可检测信号; $\gamma$  为极化系数,取  $\gamma = 0.5$ ;  $\varphi$  为馈线的传输系数,通常取  $\varphi \leq 0.5$ 。

### 1.2 分辨力估计指标

1) 测速分辨力。

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2} \Delta f = \frac{\lambda}{2} \frac{P_{RF}}{N} \quad (3)$$

式中: $\lambda$  为波长; $P_{RF}$  为脉冲重复频率。

2) 测距分辨力。距离分辨力由脉冲宽度或波门宽度决定,可表示为:

$$\Delta R = c P_w / 2 \quad (4)$$

式中: $P_w$  为脉宽; $c$  为光速。

### 1.3 概率估计指标

雷达检测时应用奈曼-皮尔逊准则。

1) 虚警概率。虚警概率在中、高重频下可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$P_{fa} = t_{int} / t_{fa} N_{RG} N \quad (5)$$

式中: $t_{fa}$  为雷达虚警时间; $t_{int}$  为信号积累时间; $N_{RG}$  为距离门个数。

虚警概率在低重频下为:

$$P_{fa} = 1 / t_{fa} B \quad (6)$$

2) 检测概率。雷达单次检测概率可表示为:

$$P_d \approx 0.5 \times \operatorname{erfc}(\sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{S_{NR} + 0.5}) \quad (7)$$

式中: $S_{NR}$  表示信噪比。

### 1.4 平台指标

平台指数  $I$  包括平台类型  $s$ , 平台速度  $v$  以及平台高度  $h$ , 可表示为:

$$I = s + \ln(v/10 + 1) + \ln(h/100 + 1) \quad (8)$$

式中的平台类型为战场环境下机载电子对抗系统的作战对象,包括弹载末制导雷达、机载火控雷达、机载预警雷达和远程警戒雷达等<sup>[11]</sup>。

根据雷达对我方飞机威胁程度,将平台类型量化为确定数,即平台威胁等级,见文献[11]。

由于电子对抗系统是非合作式的,许多指标值不能精确获得,但可通过计算得到反映敌方当前状态估计值。为得到指标估计值,从公式看出,计算参数需要直接或间接用到信号参数脉宽、重频等;雷达属性参数发射功率、增益等;平台参数平台速度、高度等。因此将输入的参数分为 3 类:

第 1 类为目标辐射源的信号参数。

将结束到达时间(TOAe)、脉冲个数( $N$ ) 2 个参数在 PDW 传统六大参数上进行扩展,形成扩展脉冲描述字(Extend Pulse Describe Word, EPDW)。某时刻将截获的各个目标辐射源 EPDW 组合成群脉冲描述字向量(Group Pulse Describe Word, GPDW)。EPDW 与 GPDW 可分别表示为:

$$\text{EPDW} = \{ \text{RF}, \text{PRI}, \text{PW}, \text{DOA}, \text{PA}, \text{TOAs}, \text{TOAe}, \text{N} \} \quad (9)$$

$$\text{GPDW} = \{ \text{EPDW}_1, \text{EPDW}_2, \dots, \text{EPDW}_n \} \quad (10)$$

根据 EPDW 计算得指标中物理量,见表 1。

表 1 物理量计算表

Tab.1 Physical quantity calculation chart				
物理量	带宽	累计时间	距离门	波长
计算式	1/PW	TOAe-TOAs	PRI/PW	c/RF

第 2 类为辐射源自身特征属性。

在 ESM 辐射源特征数据库<sup>[12]</sup>中有关于辐射源的属性参数,可为指标估计提供依据。选用体现辐

射源主要特征属性的发射功率,天线增益,噪声系数,损耗,灵敏度,虚警时间作为辐射源属性参数。

第3类为辐射源平台的相关信息参数。

通过数据链可为飞机提供平台的信息参数,包括平台的类型和平台的状态。其中平台类型见文献[11];平台状态信息包括平台的高度、速度。

将3类参数形成威胁评估参数集(Threat Assessment Parameter Set, TAPS),作为后期评估指标体系的输入参数,可表示为:

$$\text{TAPS} = \{\mathbf{G}, \mathbf{C}, \mathbf{P}\} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{G}$ 为群脉冲描述字向量; $\mathbf{C}$ 为特征属性向量; $\mathbf{P}$ 为平台参数向量。

## 2 建立基于熵权的灰关联威胁评估模型

建立辐射源威胁评估模型的顺序为:首先规范化各类指标值,通过熵权法,确定客观权重 $\mathbf{W}$ ;通过灰色关联分析,选取理想最优、理想最劣序列,计算各指标与理想序列的接近度,得到系数矩阵 $\mathbf{R}$ ,利用公式 $\mathbf{E} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{W}$ 得到最优、最劣关联度,将两者关联度综合成灰色关联相对贴程度,最后根据贴程度结果进行排序,依次得到辐射源威胁程度。

### 2.1 指标值规范化

指标值的规范化是威胁评估的前提。多指标属性类型一般分为效益型与成本型,在文中效益型指标指的是指标值越大,威胁程度越大,如探测距离、检测概率;成本型指标指的是指标值越小,威胁程度越大,如侦察距离、虚警概率、测速精度、测距精度。本文数据处理采用效果测度变换法对指标序列的原始数据量纲规范化处理。

1) 效益型指标:

$$\tilde{v}_{i,j} = \frac{v_{i,j}}{\max_i v_{i,j}} \quad (12)$$

2) 成本型指标:

$$\tilde{v}_{i,j} = \frac{\min_i v_{i,j}}{v_{i,j}} \quad (13)$$

### 2.2 熵权法确定指标权重

设由原始数据矩阵进行指标规范化后得到的矩阵为 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ ,  $x_{ij}$ 为第 $i$ 个目标的第 $j$ 个规范化的值。

熵是信息论中测量系统无序程度的度量<sup>[13]</sup>,将信息论中熵的理论运用到对权重的客观赋值上,各指标的熵为:

$$H_j = - \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} \ln x_{ij})}{\ln m} \quad (14)$$

各指标的权重:

$$W_j = \frac{-(1 - H_j)}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)} \quad (15)$$

式中:  $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ 。

### 2.3 基于灰色关联法威胁等级评判

灰色关联度分析<sup>[14]</sup>是一种多因素统计分析方法,它是各因素的样本数据为依据,用灰色关联度来描述因素间相关性的强弱。计算步骤如下:

**Step1** 选择理想最优、劣序列。在规范化矩阵 $\mathbf{X}$ 中,取每个规范化指标值的最大值 $\max(x_j)$ (即每一列的最大值)组成理想最优序列 $\mathbf{X}_{0\max}$ ,则 $\mathbf{X}_{0\max} = (x_{01\max}, x_{02\max}, \dots, x_{0j\max}, \dots, x_{0n\max})$ ;同理可得理想最劣序列 $\mathbf{X}_{0\min} = (x_{01\min}, x_{02\min}, \dots, x_{0j\min}, \dots, x_{0n\min})$ 。

**Step2** 计算最优、劣关联系数。用 $\xi_{ij\max}$ 表示最优关联系数。则:

$$\xi_{ij\max} = \frac{\max(\Delta) + \rho \min(\Delta)}{\Delta_{ij} + \rho \min(\Delta)}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

式中:  $\Delta_{ij} = |x_{0j\max} - x_{ij}|$ ,  $\max(\Delta) = \max |x_{0j\max} - x_{ij}|$ ,  $\min(\Delta) = \min |x_{0j\max} - x_{ij}|$ 。

同理求出最劣关联系数 $\xi_{ij\min}$ 。 $\rho$ 为分辨系数,一般 $\rho = 0.5$ 。

**Step3** 计算最优、劣关联度。第 $i$ 个评估目标与理想最优序列的关联度为:

$$e_{i\max} = \sum_j (W_j \xi_{ij\max}) \quad (17)$$

第 $i$ 个评估目标与理想最劣序列的关联度为:

$$e_{i\min} = \sum_j (W_j \xi_{ij\min}) \quad (18)$$

**Step4** 将理想最优关联度和理想最劣关联度结合起来,形成灰色关联相对贴程度。定义灰色关联相对贴程度为<sup>[15]</sup>:

$$E_{ij} = \frac{e_{ij\max}}{e_{ij\max} + e_{ij\min}} \quad (19)$$

**Step5** 对 $E_{ij}$ 排序,得出目标辐射源对我方的威胁程度。

## 3 辐射源威胁评估流程

结合评估体系与评估模型,辐射源威胁评估流程为:首先对天线接收到的辐射源信号和通过数据链传输的信息进行处理;选择3类参数形成TAPS;然后将参数集输入到辐射源威胁评估体系中,计算出体系中各指标值;将指标值运用到基于熵权的灰

色关联评估模型中,得到灰色关联贴近度,即威胁评估值;最后依据威胁评估值进行威胁等级判定。

RCS 约为 4.3 m<sup>2</sup>,最小可检测信号  $P_{r, \min}$  为 -50 dBW。

### 4 仿真实例

机载 ESM 对敌方区域进行侦察,截获目标辐射源信号,并结合数据链的信息形成参数集,见表 2、表 3。

假设某次演习对抗中,我方侦测到某一区域中有 5 个目标辐射源,记为  $T_1, T_2, \dots, T_5$ 。已知我方飞机 ESM 天线增益为 38 dB,接收机损耗 6 dB,

将参数集代入评估指标公式,计算得到各指标值表 4。

表 2 辐射源脉冲描述字参数

Tab.2 Emitter pulse describe wordparamters

辐射源	RF/MHz	PRI/us	PW/us	AOA/(°)	PA/dB	TOAs/us	TOAe/us	N
$T_1$	9 800	3.3	1.3	140.6	15	66 4361.3	66 8751.1	300
$T_2$	9 800	11.4	0.31	2	12	2 240.30	3 497.50	128
$T_3$	8 900	3.1	1.1	30	6	4 510.00	6 097.20	512
$T_4$	13 000	3	0.5	45	5	6 810.00	8 146.00	512
$T_5$	1 500	100	1.1	15	11	4 670.00	11 070.00	64

表 3 目标辐射源特征属性及平台参数

Tab.3 Target emitter characteristic attribute and platformparamter

辐射源	$P_t$ /kW	$G_t$ /dB	$F_n$ /dB	$L$ /dB	$(S/N)_{\min}$ /dB	$t_{fa}$ /s	$h$ /m	$v/(m \cdot s^{-1})$	$s$
$T_1$	10	40	4	6	15	87	5 500	289	4(机载火控雷达)
$T_2$	12	40	4	6	15	87	5 400	310	4(机载火控雷达)
$T_3$	81	53	2	4	10	102	6 000	220	3(机载预警雷达)
$T_4$	43	50	3	5	12	74	0	0	4(地面制导雷达)
$T_5$	75	51	3	5	14	79	0	0	1(远程警戒雷达)

表 4 辐射源指标列表

Tab.4 Emitter index list

辐射源	$R_{\max}$ /km	$R_r$ /km	$P_{fa}(10^{-9})$	$P_d$	$\Delta R$ /m	$\Delta V$	$I$
$T_1$	38.25	153.62	19.78	0.76	195	15.15	11.42
$T_2$	27.99	166.59	3.07	0.97	46.5	10.28	11.47
$T_3$	486.05	2 588.58	10.78	0.98	165	10.62	10.25
$T_4$	157.55	551.51	5.88	0.98	75	7.52	4
$T_5$	651.17	3 262.36	13.92	0.89	165	15.63	1

依据多指标属性类型,将辐射源威胁指标的效益型与成本型数据进行规范化,得表 5。

表 5 规范化指标列表

Tab.5 Normalized index list

辐射源	$R_{\max}$ /km	$R_r$ /km	$P_{fa}(10^{-9})$	$P_d$	$\Delta R$ /m	$\Delta V$	$C$
$T_1$	0.059	1	0.155	0.776	0.238	0.496	0.996
$T_2$	0.043	0.922	1	0.990	1	0.732	1
$T_3$	0.746	0.059	0.285	1	0.277	0.708	0.894
$T_4$	0.400	0.279	0.522	1	0.620	1	0.349
$T_5$	1	0.047	0.221	0.908	0.282	0.481	0.087

根据式(14)、(15)计算得到各指标权重,组成权重  $\mathbf{W}=(0.225 4, 0.221 0, 0.195 1, 0.003 9, 0.146 3, 0.032 6, 0.175 8)$ 。

$= (0.043, 0.047, 0.155, 0.776, 0.238, 0.481, 0.087)$ 。

从表 6 的各个规范化指标中选取理想最优序列和理想最劣序列,即  $\mathbf{X}_{0\max}=(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1), \mathbf{X}_{0\min}$

由式(17)、(18)、(19)计算各指标最优、劣关联度和灰色关联相对贴近度,对每个关联度进行威胁排序,具体情况见表 6。

表6 基于关联度威胁等级排序

Tab.6 Threat level ranking based on correlation degree

辐射源	最优关联度	最优威胁排序	最劣关联度	最劣威胁排序	相对贴近度	相对威胁排序
$T_1$	0.640 3	2	0.700 3	4	0.477 6	2
$T_2$	0.767 8	1	0.540 9	1	0.586 7	1
$T_3$	0.513 5	4	0.696 8	3	0.424 3	4
$T_4$	0.464 3	5	0.608 3	2	0.432 9	3
$T_5$	0.535 5	3	0.791 0	5	0.403 7	5

由表6可知,若仅采用最优关联度或最劣关联度判定威胁等级,得到的排序结果是不一致的。通过兼顾最优、劣关联度,形成灰色关联相对贴近度,最终得到目标辐射源的威胁排序: $T_2 > T_1 > T_4 > T_3 > T_5$ 。

根据表中原始数据,辐射源 $T_2$ 采用机载火控雷达,脉冲重复频率高且脉宽小,其信号特征有助于进行精确测距、测速,有可能工作在跟踪模式,并且该目标速度快,距离我方较近,因此可以判断其威胁最大。同理辐射源 $T_1$ 状态与 $T_2$ 类似,但距离精度和速度精度上劣于 $T_2$ ,威胁程度仅次于 $T_2$ 。辐射源 $T_4$ 虽然离我方飞机较远,但其脉冲重复频率高,脉宽小,有助于制导雷达进行精确测量完成制导解算。若辐射源 $T_4$ 与 $T_3$ 同时探测到我方飞机的情况下,如果构成打击条件, $T_4$ 对我方飞机威胁度高于 $T_3$ 。根据辐射源 $T_5$ 参数特征,可判断 $T_5$ 处于测量精度较粗的搜索状态,威胁等级最低。上述定性分析的情况与基于算法计算的威胁等级结果一致,说明该算法在辐射源威胁评估上具有有效性。

为验证算法的可行性,依旧使用本文仿真的数据,将本文基于熵权灰色关联算法与传统的灰色关联算法、文献[16]变权灰色关联算法以及文献[17]基于熵的TOPSIS算法进行威胁排序结果对比。对于传统的灰色关联算法排序为: $T_2 > T_4 > T_1 > T_3 > T_5$ ;对于其余3种算法的排序为: $T_2 > T_1 > T_4 > T_3 > T_5$ 。可以看出,使用传统灰色关联得到最后的评判结果并不理想,辐射源 $T_1$ 和 $T_4$ 在顺序上有一定的差别,而本文算法与文献[16]、[17]的算法都能得到一致的排序结果。因此,本文的基于熵权灰色关联算法在辐射源威胁评估上具有可行性。

为体现算法的时效性,依旧将本文算法与文献[16]、[17]的算法各进行200次实验,分别计算得到平均运行时间:0.089 3 ms,0.135 5 ms,0.096 0 ms。可以看出,本文算法在运行时间上少于其他两种算法,虽然每运行一次的平均时间差距不大,但在实际的战场环境中,数据量以指数级速度增长的情况下,

当运行次数大大增加时,基于熵权的灰色关联算法的优势将体现出来。

## 5 结语

1)本文通过分析影响辐射源威胁程度的因素,将辐射源距离、分辨力、概率估计指标和平台指标引入评估中,建立威胁评估指标体系,从不同方面体现辐射源威胁程度。

2)运用熵权法计算权重,保证了各个指标权重分配得当,具备理论支撑。通过改进的灰色关联算法,从最优、最劣两个角度出发,可以更好地反映数据之间的关联度,最后集成灰色关联相对贴近度,作为辐射源威胁排序的依据。仿真实例中,通过定量计算与定性分析以及算法的对比,可体现本文算法的有效性与可行性。

3)通过算法的实验运行时间对比,说明基于熵权的灰色关联算法具有可观的实时性,有利于提升战机的态势感知能力。

本文研究表明,熵权法与灰色关联两者结合能有效地对辐射源进行威胁评估,从而为后续的干扰资源分配提供支撑。

## 参考文献(References):

- [1] 张多林,潘泉,张洪才.基于理想点贴近度的辐射源威胁综合评价建模与仿真验证[J].系统仿真学报,2008,20(14):3896-3898.  
ZHANG Duolin, PAN Quan, ZHANG Hongcai. Modeling and Simulation on Radiator Threatening Evaluation Based on Degrees Keeping Close to Ideal Point[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(14):3896-3898. (in Chinese)
- [2] 王鑫,吴华,赵玉,等.电子战目标威胁评估的折衷排序方法[J].电光与控制,2013,20(8):14-17.  
WANG Xin, WU Hua, ZHAO Yu. A Compromise Sorting Method for Electronic Warfare Target Threat Assessment[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(8): 14-17. (in Chinese)
- [3] 张肃.基于直觉模糊集的辐射源威胁评估方法[J].电子信息对抗技术,2008,23(5):51-54.  
ZHANG Su. A New Method for the Emitter Threat-Evaluating Based on the Intuitionistic Fuzzy Set[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008, 23(5): 51-54. (in Chinese)
- [4] MOHSEN Naderpour, LU Jie, ZHANG Guangquan. A Fuzzy Dynamic Bayesian Network-based Situation Assessment Approach[C]//Proceeding of 2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, NY:

- IEEE, 2013: 1-8.
- [5] LU Yanli, WANG Yanan, LEI Yingjie, et al. Air Targets Threat Assessment Based on Fuzzy Rough Reasoning[C]//Proceeding of 27th Chinese Control and Decision Conference, NY: IEEE, 2015: 885-890.
- [6] YUE Jiao, ZHANG Ke. Vulnerability Threat Assessment Based on AHP And Fuzzy Comprehensive Evaluation[C]//Proceeding of 7th International Symposium on Computational Intelligence and Design, NY: IEEE, 2014: 513-516.
- [7] 陈洁钰, 姚佩阳, 王勃, 等. 基于结构熵和 IGSO-BP 算法的动态威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 1076-1083.
- CHEN Jieyu, YAO Peiyang, WANG Bo, et al. Dynamic Threat Assessment Based on Structure Entropy and IGSO-BP Algorithm, 2015, 37(5): 1076-1083. (in Chinese)
- [8] 姚成才, 苏同领. 基于模糊多属性群组决策的雷达辐射源威胁评估方法[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(4): 34-38.
- YAO Chengcai, SU Tongling. Evaluation Method of Radar Emitter Threat Based on Fuzzy MAGDM[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(4): 34-38. (in Chinese)
- [9] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- WANG Xing. Aviation Electronic Countermeasure Principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press; 2008. (in Chinese)
- [10] GEORGE W Stimson. 机载雷达导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 299-303.
- GEORGE W Stimson. Introduction to Airborne Radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005: 299-303. (in Chinese)
- [11] 宋海方, 吴华, 程嗣怡, 等. 多波束干扰系统干扰资源综合管理算法[J]. 兵工学报, 2013, 34(3): 332-338.
- SONG Haifang, WU Hua, CHENG Siyi, et al. Integrated Management Algorithm of Jamming Resources in Multi-beam Jamming Systems[J]. ACTA Armamentari, 2013, 34(3): 332-338. (in Chinese)
- [12] 王睿甲, 王星, 程嗣怡, 等. 基于脉冲样本图的机载 RWR/ESM 辐射源威胁评估[J]. 电光与控制, 2015, 22(5): 19-24.
- WANG Ruijia, WANG Xing, CHENG Siyi, et al. Airborne RWR/ESM Threat Assessment of Radiation Source Based on Pulse Sequence Pattern[J]. Electronic Optics & Control, 2015, 22(5): 19-24. (in Chinese)
- [13] FENG Liying, XUE Qing, LIU Minxia. Threat Evaluation Model of Targets Based on Information Entropy and Fuzzy Optimization Theory[C]//Proceeding of the 2011 IEEE Industrial Engineering and Engineering Management, NY: IEEE, 2011: 1789-1793.
- [14] 罗毅, 利显龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 77-81.
- LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive Decision-Making of Transmission Network Planning Based on Entropy Weight and Grey Relational Analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81. (in Chinese)
- [15] GU Hui, SONG Bifeng. Study on Effectiveness Evaluation of Weapon Systems Based on Grey Relational Analysis and TOPSIS [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(1): 106-111.
- [16] 夏春林, 周德云, 冯琦. 基于变权灰色关联法的目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(4): 54-57.
- XIA Chunlin, ZHOU Deyun, FENG Qi. Target Threat Assessment Based on the Method of Variable Weight Grey Incidence[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(4): 54-57. (in Chinese)
- [17] 张堃, 周德云. 基于熵的 TOPSIS 法空战多目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9): 1493-1495.
- ZHANG Kun, ZHOU Deyun. TOPSIS Method Based on Entropy in Evaluating The Air Multi-target Threat [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(9): 1493-1495. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)