

文章编号: 2095-4980(2023)02-0189-06

## 基于 UTADIS 法的辐射源威胁等级判定

赵 桐, 张海旭, 罗 钉

(中国航空工业集团公司 雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

**摘 要:** 辐射源威胁等级判定是电子对抗领域的重要研究课题, 针对现有的不足, 利用多准则分类的效用加性判别(UTADIS)法, 建立了一种辐射源威胁等级判定方法。结果表明, 利用 UTADIS 法能够准确合理地判定辐射源威胁等级, 能够体现决策者偏好信息, 还能更精确地估计辐射源威胁程度。该方法在性能和实用性方面具有优势, 是一种新的判定途径。

**关键词:** 辐射源威胁等级判定; 多准则分类; 效用加性判别法; 机器学习; 多属性决策

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020608

## Emitter threat level evaluation based on UTADIS

ZHAO Tong, ZHANG Haixu, LUO Ding

(Leihua Electronic Technology Institute, AVIC, Wuxi Jiangsu 214063, China)

**Abstract:** The emitter threat level evaluation is an important topic in electronic countermeasures. To deal with the disadvantages of the current methods for emitter threat level evaluation, the UTADIS method, which is a method of multicriteria classification, is introduced. It is indicated that UTADIS can produce reasonable and accurate evaluations of emitter threat level that reflect the preference of decision makers and can give more information of emitter threat degree. Thus, UTADIS has advantages in performance and applications and is a new way to effectively evaluate the emitter threat level.

**Keywords:** emitter threat level evaluation; Multicriteria Classification; UTADIS; machine learning; multiple attribute decision making

辐射源威胁等级判定是电子对抗领域的重要研究课题之一。在电子对抗中需要识别战场环境中高威胁辐射源, 并根据威胁等级分配干扰资源。目前, 辐射源威胁等级判定分为基于机器学习的方法<sup>[1-3]</sup>和基于多属性决策的方法<sup>[4-8]</sup>。基于机器学习的方法是将每个威胁等级视为一个类, 并利用决策者提供的训练数据训练分类器进行分类。其优点是准确性较高, 受主观因素影响较少。但由于不同威胁等级对应的类实际上形成了一个由决策者偏好信息决定的偏序关系, 而该学习方法在训练分类器时并没有利用这种类之间的偏序关系, 因此未能从根本上解决辐射源威胁等级判定问题。基于多属性决策的方法利用效用函数等工具刻画和提取决策者偏好信息。其优点是考虑了不同威胁等级之间的偏序关系、符合问题背景, 但需要决策者直接提供偏好信息, 主观性较强。因此需进一步研究更为准确、客观、有效的辐射源威胁等级判定方法。

近期, 国外相关学者提出了多准则分类(Multicriteria Classification, MC)理论<sup>[9-10]</sup>。多准则分类是一种结合了多属性决策的分类方法, 旨在解决含有偏好信息的特殊分类问题。多准则分类不需要决策者直接提供偏好信息, 而是通过决策者提供具有偏好信息的训练数据, 从而自动估计决策者的偏好信息, 因此受决策者主观影响少。可以看出, 多准则分类同时具有机器学习和多属性决策方法的优点, 并弥补了 2 种方法的不足, 更符合辐射源威胁等级判定问题背景, 有望成为解决该问题的新途径。

本文考虑将多准则分类的典型方法——效用加性判别(UTADIS)法<sup>[10]</sup>用于辐射源威胁等级判定, 并通过仿真说明其有效性。

## 1 辐射源威胁等级判定问题

辐射源威胁等级判定问题的数学描述为：设有  $M$  种威胁等级，现测得辐射源的特征参数向量为  $\mathbf{X}$ ，要基于  $\mathbf{X}$  判断辐射源属于哪个威胁等级。辐射源威胁等级判定实际上是一个分类问题，可采用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)等传统分类方法求解。但辐射源威胁等级判定具有传统分类问题不具备的 2 个特点：a) 决策者对于不同威胁等级有不同的重视程度，因此可根据决策者偏好确定类之间的偏序关系；b) 每个特征具有偏好信息，能够决定这种类之间的偏序关系，如，载频越大，威胁等级越高。满足这 2 个特点的分类问题被称为多准则分类问题。因此，可将辐射源威胁等级判定视为一个多准则分类问题，并应用多准则分类方法求解。

## 2 UTADIS 法介绍

在 UTADIS 法中，特征被称为准则。UTADIS 利用效用函数衡量决策者对每个类的重视程度，从而刻画类之间的偏序关系。设有  $P$  个感兴趣的准则  $c_1, c_2, \dots, c_p$ ， $x_i$  为准则  $c_i$  的取值，特征参数向量为  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_p]$ ，则效用函数采用线性加权的形式： $V(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^P p_i v_i(x_i)$ ，其中  $p_i$  为非负常数，衡量准则  $c_i$  的重要性， $\sum_{i=1}^P p_i = 1$ ； $v_i(x_i)$  为准则  $c_i$  的边际效用函数，满足  $v_i(\cdot)$  为单调函数，且  $v_i(x_i) = 0$  以及  $v_i(x_i^*) = 1$ ，其中  $x_i$  和  $x_i^*$  分别为准则  $c_i$  中最不被偏好和最被偏好的值。设有  $M$  个预先指定的类  $G_i (i=1, 2, \dots, M)$ 。假设  $i < j$ ，则  $G_i$  比  $G_j$  更被偏好，亦即  $G_1 > G_2 > \dots > G_M$ 。设实数  $u_1 > u_2 > \dots > u_{M-1}$ ，则 UTADIS 法给出分类如下：

$$\begin{cases} V(\mathbf{X}) \geq u_1 \Rightarrow \mathbf{X} \in G_1 \\ u_m \leq V(\mathbf{X}) < u_{m-1} \Rightarrow \mathbf{X} \in G_m (m=2, \dots, M-1) \\ V(\mathbf{X}) < u_{M-1} \Rightarrow \mathbf{X} \in G_M \end{cases} \quad (1)$$

UTADIS 法利用训练数据集  $\{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N\}$  确定效用函数  $V(\mathbf{X})$  和效用门限  $\{u_k, k=1, 2, \dots, M-1\}$ 。对  $j=1, 2, \dots, N$ ，定义：

$$\begin{cases} \sigma_j^+ = \begin{cases} \max\{0, u_k - V(\mathbf{X}_j)\}, & \mathbf{X}_j \in G_k, k \in \{1, 2, \dots, M-1\} \\ 0, & \mathbf{X}_j \in G_M \end{cases} \\ \sigma_j^- = \begin{cases} \max\{0, V(\mathbf{X}_j) - u_{k-1}\}, & \mathbf{X}_j \in G_k, k \in \{2, 3, \dots, M\} \\ 0, & \mathbf{X}_j \in G_1 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\sigma_j^+$  为将  $\mathbf{X}_j$  分到正确的类时， $V(\mathbf{X}_j)$  需要增加的值； $\sigma_j^-$  为将  $\mathbf{X}_j$  分到正确的类时， $V(\mathbf{X}_j)$  需要减小的值。 $\sigma_j^+$  和

$\sigma_j^-$  均可度量将  $\mathbf{X}_j$  分错的程度。选择效用函数  $V(\mathbf{X})$  以及效用门限  $\{u_k, k=1, 2, \dots, M-1\}$ ，使  $\sum_{k=1}^M \left[ \frac{1}{m_k} \sum_{\substack{1 \leq j \leq N \\ \mathbf{X}_j \in G_k}} (\sigma_j^+ + \sigma_j^-) \right]$  达到

最小，其中  $m_k$  为属于类  $G_k$  的  $\mathbf{X}_j$  的个数。由式(2)可知， $\sigma_j^+$  和  $\sigma_j^-$  具有如下性质：

$$V(\mathbf{X}_j) + \sigma_j^+ \geq u_1 (\mathbf{X}_j \in G_1), V(\mathbf{X}_j) - \sigma_j^- < u_{M-1} (\mathbf{X}_j \in G_M), V(\mathbf{X}_j) + \sigma_j^+ \geq u_k, V(\mathbf{X}_j) - \sigma_j^- < u_{k-1} (\mathbf{X}_j \in G_k, k \in \{2, \dots, M-1\}) \quad (3)$$

由此可建立并求解优化问题，获得效用函数及效用门限的估计，解决多准则分类问题。

在应用 UTADIS 法进行辐射源威胁等级判定时，需要根据相关背景，选择合适的效用函数形式，对效用函数合理参数化，并建立可解的优化问题，然后求解。

## 3 UTADIS 法在辐射源威胁等级判定中的应用问题

### 3.1 效用函数参数化

对辐射源威胁程度有重要影响的参数主要包括载频、脉宽、脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)、数据率(单位时间内辐射源的平均回访次数)等。因此，将载频  $c_1$ (GHz)、脉宽  $c_2$ ( $\mu\text{s}$ )、PRF  $c_3$ (kHz)和数据率  $c_4$ ( $\text{s}^{-1}$ ) 作为 UTADIS 法的准则<sup>[8]</sup>。由于任意函数都能用分片线性函数以任意精确度逼近，因此将各准则边际效用函数  $v_i(\cdot) (i=1, 2, \dots, 4)$  建模为分片线性函数。

对于载频准则，由于搜索警戒雷达通常为 S,C 波段，制导雷达通常为 X 波段，因此载频越大，则威胁等级越

高, 载频边际效用函数  $v_1(\cdot)$  应为单调增函数。根据经验, 当载频大于 10 GHz 时载频的变化对威胁等级影响不大, 因此认为载频准则的取值范围为  $[0, x_{1,\max}]$ ,  $x_{1,\max} = 10$ 。载频准则取值  $x_1$  与辐射源载频  $f$  的关系为  $x_1 = \min(f, 10)$ 。

对于脉宽准则, 认为无脉内调制的脉宽为时宽, 有脉内调制的脉宽为瞬时带宽的倒数。对于威胁雷达, 小脉宽具有高距离分辨力, 通常认为有较高的威胁等级, 因此脉宽边际效用函数  $v_2(\cdot)$  应为单调减函数。根据经验, 当脉宽大于 200  $\mu\text{s}$  时, 脉宽的变化对威胁等级影响不大, 因此认为脉宽准则的取值范围为  $[0, x_{2,\max}]$ ,  $x_{2,\max} = 200$ 。脉宽准则取值  $x_2$  与辐射源脉宽  $T$  的关系为  $x_2 = \min(T, 200)$ 。

对于 PRF 准则, 一般认为高 PRF 具有较高威胁等级, 因此 PRF 边际效用函数  $v_3(\cdot)$  应为单调增函数。根据经验, 当 PRF 大于 30 kHz 时, PRF 的变化对威胁等级影响不大, 因此认为 PRF 准则的取值范围为  $[0, x_{3,\max}]$ ,  $x_{3,\max} = 30$ 。PRF 准则取值  $x_3$  与辐射源 PRF 的关系为  $x_3 = \min(\text{PRF}, 30)$ 。

对于数据率准则, 当雷达处于搜索状态时, 数据率较小, 威胁程度较低; 当雷达处于跟踪状态时, 数据率较大, 威胁程度较高。因此数据率越大, 则威胁等级越高, 数据率边际效用函数  $v_4(\cdot)$  应为单调增函数。当数据率大于 5 次/s 时, 数据率的变化对威胁等级影响不大, 因此认为数据率准则的取值范围为  $[0, x_{4,\max}]$ ,  $x_{4,\max} = 5$ 。数据率准则取值  $x_4$  与辐射源数据率  $r$  的关系为  $x_4 = \min(r, 5)$ 。

基于上述分析, 首先考虑载频、PRF、数据率准则的单调增边际效用函数参数化方法。考虑函数  $\tilde{v}_i(\cdot) = p_i v_i(\cdot)$ , 给定  $x_i = x_i^{(1)} \leq x_i^{(2)} \leq \dots \leq x_i^{(a_i)} = x_i^*$ , 其中  $x_i^{(1)} = 0$ ,  $x_i^{(a_i)} = x_{i,\max}$ 。设  $\tilde{v}_i(x_i^{(h)}) = v_i^{(h)}$ , 其中  $0 = v_i^{(1)} \leq v_i^{(2)} \leq \dots \leq v_i^{(a_i)}$ , 则  $\tilde{v}_i(x_i) = v_i^{(h)} + \frac{x_i - x_i^{(h)}}{x_i^{(h+1)} - x_i^{(h)}}(v_i^{(h+1)} - v_i^{(h)})$ ,  $x_i \in [x_i^{(h)}, x_i^{(h+1)}]$ 。令  $w_{i,h} = v_i^{(h+1)} - v_i^{(h)} (h = 1, 2, \dots, a_i - 1)$ , 则  $w_{i,h} \geq 0$  以及

$$\tilde{v}_i(x_i) = \sum_{l=1}^{h-1} w_{i,l} + \frac{x_i - x_i^{(h)}}{x_i^{(h+1)} - x_i^{(h)}} w_{i,h}, x_i \in [x_i^{(h)}, x_i^{(h+1)}] \tag{4}$$

将  $w_{i,h} (h = 1, 2, \dots, a_i - 1)$  作为边际效用函数  $\tilde{v}_i(x_i)$  的参数。 $x_i^{(h)} (h = 1, 2, \dots, a_i)$  为外部参数预先给定, 根据经验, 对于载频准则, 选择  $a_1 = 4, x_1^{(1)} = 0, x_1^{(2)} = 4, x_1^{(3)} = 8, x_1^{(4)} = 10$ ; 对于 PRF 准则, 选择  $a_3 = 4, x_3^{(1)} = 0, x_3^{(2)} = 1, x_3^{(3)} = 3, x_3^{(4)} = 30$ ; 对于数据率准则, 选择  $a_4 = 4, x_4^{(1)} = 0, x_4^{(2)} = 0.5, x_4^{(3)} = 1, x_4^{(4)} = 5$ 。

借鉴单调增边际效用函数参数化思路, 考虑脉宽准则单调减边际效用函数参数化方法。考虑函数  $\tilde{v}_i (h = 1, 2, \dots, a_i - 1) = p_i v_i(\cdot)$ , 给定  $x_i = x_i^{(1)} \geq x_i^{(2)} \geq \dots \geq x_i^{(a_i)} = x_i^*$ , 其中  $x_i^{(1)} = x_{i,\max}$ ,  $x_i^{(a_i)} = 0$ , 设  $\tilde{v}_i(x_i^{(h)}) = v_i^{(h)}$ , 其中  $0 = v_i^{(1)} \leq v_i^{(2)} \leq \dots \leq v_i^{(a_i)}$ , 则  $\tilde{v}_i(x_i) = v_i^{(h)} + \frac{x_i - x_i^{(h)}}{x_i^{(h+1)} - x_i^{(h)}}(v_i^{(h+1)} - v_i^{(h)})$ ,  $x_i \in [x_i^{(h+1)}, x_i^{(h)}]$ 。令  $w_{i,h} = v_i^{(h+1)} - v_i^{(h)} (h = 1, 2, \dots, a_i - 1)$ , 则  $w_{i,h} \geq 0$  以及

$$\tilde{v}_i(x_i) = \sum_{l=1}^{h-1} w_{i,l} + \frac{x_i - x_i^{(h)}}{x_i^{(h+1)} - x_i^{(h)}} w_{i,h}, x_i \in [x_i^{(h+1)}, x_i^{(h)}] \tag{5}$$

将  $w_{i,h} (h = 1, 2, \dots, a_i - 1)$  作为边际效用函数  $\tilde{v}_i(x_i)$  的参数。 $x_i^{(h)} (h = 1, 2, \dots, a_i)$  为外部参数预先给定, 根据经验, 对于脉宽准则, 选择  $a_2 = 4, x_2^{(4)} = 0, x_2^{(3)} = 0.5, x_2^{(2)} = 10, x_2^{(1)} = 200$ 。

将式(4)和式(5)写成统一的形式, 可得  $V(\mathbf{X}_j) = \sum_{i=1}^P \left( \sum_{l=1}^{r_j-1} w_{i,l} + \frac{x_{ji} - x_i^{(r_j)}}{x_i^{(r_j+1)} - x_i^{(r_j)}} w_{i,r_j} \right)$ , 其中  $r_{ji}$  为  $\mathbf{X}_j$  的第  $i$  个准则值  $x_{ji}$ , 所属区间为  $[\min(x_i^{(r_j)}, x_i^{(r_j+1)}), \max(x_i^{(r_j)}, x_i^{(r_j+1)})]$ 。效用函数  $V(\cdot)$  的参数  $w_{i,h} (h = 1, 2, \dots, a_i - 1; i = 1, 2, \dots, P)$ ,  $x_i^{(h)} (h = 1, 2, \dots, a_i; i = 1, 2, \dots, P)$  为外部参数预先给定。

### 3.2 建立可解的优化问题

由上一节可知, 效用函数  $V(\cdot)$  的参数  $w_{i,h}$  满足  $\sum_{i=1}^P \sum_{l=1}^{a_i-1} w_{i,l} = 1$  以及  $w_{i,h} \geq 0$ 。因此, 结合约束式(3), 可建立如下优化问题:

$$\begin{cases}
 \min \sum_{k=1}^M \left[ \frac{1}{m_k} \sum_{\substack{1 \leq j \leq N \\ X_j \in G_k}} (\sigma_j^+ + \sigma_j^-) \right] \\
 s.t. \sum_{i=1}^P \left( \sum_{l=1}^{r_{j_i}-1} w_{i,l} + \frac{x_{j_i} - x_i^{(r_{j_i})}}{x_i^{(r_{j_i}+1)} - x_i^{(r_{j_i})}} w_{i,r_{j_i}} \right) + \sigma_j^+ - u_1 \geq \delta_1 (X_j \in G_1), \sum_{i=1}^P \left( \sum_{l=1}^{r_{j_i}-1} w_{i,l} + \frac{x_{j_i} - x_i^{(r_{j_i})}}{x_i^{(r_{j_i}+1)} - x_i^{(r_{j_i})}} w_{i,r_{j_i}} \right) - \sigma_j^- - u_{M-1} < -\delta_2 (X_j \in G_M) \\
 \sum_{i=1}^P \left( \sum_{l=1}^{r_{j_i}-1} w_{i,l} + \frac{x_{j_i} - x_i^{(r_{j_i})}}{x_i^{(r_{j_i}+1)} - x_i^{(r_{j_i})}} w_{i,r_{j_i}} \right) + \sigma_j^+ - u_k \geq \delta_1, \sum_{i=1}^P \left( \sum_{l=1}^{r_{j_i}-1} w_{i,l} + \frac{x_{j_i} - x_i^{(r_{j_i})}}{x_i^{(r_{j_i}+1)} - x_i^{(r_{j_i})}} w_{i,r_{j_i}} \right) - \sigma_j^- - u_{k-1} < -\delta_2 (X_j \in G_k, k \in \{2, \dots, M-1\}) \\
 \sigma_j^+ \geq 0, \sigma_j^- \geq 0 (j=1, 2, \dots, N), u_k - u_{k+1} \geq s (k=1, 2, \dots, M-2), \sum_{i=1}^P \sum_{l=1}^{a_i-1} w_{i,l} = 1, w_{ih} \geq 0 (h=1, 2, \dots, a_i-1, i=1, 2, \dots, P)
 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $w_{i,h}, \sigma_j^+, \sigma_j^-, u_k$  为优化变量； $\delta_1, \delta_2, s, a_i (i=1, 2, \dots, P), x_i^{(h)}$  为模型外部参数； $a_i$  为正整数； $\delta_1 > 0, \delta_2 > 0, s > 0, s > \delta_1 + \delta_2, \delta_1 + \delta_2 + (M-2)s < 1$ ， $\delta_1$  和  $\delta_2$  通常为充分小的正数。

式(6)为线性优化问题，因此可采用单纯形法等数值方法求解最优解，获得效用函数  $V(\cdot)$  的参数  $w_{i,h}$  以及效用门限  $\{u_k\}$  的最优估计，解决辐射源威胁等级判定问题。

在求解优化问题式(6)时，基于主观能够容易判断辐射源是属于高威胁还是低威胁，因此可先认为只有 2 个威胁等级，即  $M=2$ ，并认为类  $G_1$  代表高威胁， $G_2$  代表低威胁。在求得效用函数  $V(\cdot)$  后，可根据实际需求对效用函数取值区间进一步划分，产生更多的威胁等级。在工程应用中，求解优化问题获得效用函数参数及效用门限最优估计的过程可离线进行，当在线进行辐射源威胁等级判定时，只需根据辐射源特征参数计算其效用函数，并将效用函数与效用门限比较，就可获得其威胁等级。此方法易工程实现，能够满足实时性要求。

### 4 性能分析

#### 4.1 计算举例

基于已知典型辐射源数据产生辐射源数据集，并将该数据集作为 UTADIS 的训练数据集。取  $\delta_1 = \delta_2 = 0.01$ ，求解线性优化问题式(6)，得到各准则的边际效用函数参数及权重如表 1 所示，效用门限  $u_1 = 0.6754$ 。假设作战飞机遭遇了 4 个威胁辐射源，表 2<sup>[8]</sup>给出了这些辐射源的特征参数取值、效用函数估计和威胁等级估计。下面分析结果的合理性。辐射源 2,4 的数据率均不小于 1 次/s，属于跟踪状态；而辐射源 1,3 的数据率均不大于 0.5 次/s，属于搜索状态，因此辐射源 2,4 的效用函数估计值较大，威胁等级高。此外，辐射源 4 的载频和 PRF 均大于辐射源 2，因此辐射源 4 的效用函数估计值大于辐射源 2。可以看出，利用 UTADIS 法能够较合理地给出辐射源威胁等级。

#### 4.2 外部参数对性能的影响

表 1 相关参数求解结果

Table1 Results of relevant parameters

	$w_{i,h}(h=1)$	$w_{i,h}(h=2)$	$w_{i,h}(h=3)$	$P_i$
$i=1$	0.335 7	0.337 7	0.326 6	0.116 8
$i=2$	0.379 4	0.398 7	0.221 9	0.118 0
$i=3$	0.279 7	0.317 6	0.402 7	0.132 7
$i=4$	0.132 5	0.783 1	0.084 4	0.632 6

表 2 辐射源特征参数信息及威胁等级判定

Table2 Emitters information and threat level evaluation

emitters	$f/\text{GHz}$	pulse width/ $\mu\text{s}$	PRF/kHz	data rate/( $\text{s}^{-1}$ )	utility function value	evaluation
1	10.0	0.500	3.6	0.25	0.330 9	$G_2$
2	5.5	0.250	4.0	1.00	0.819 3	$G_1$
3	9.5	0.300	3.0	0.50	0.372 6	$G_2$
4	9.8	0.284	11.0	5.00	0.943 7	$G_1$

由线性优化问题式(6)可以看出，利用 UTADIS 法进行辐射源威胁等级判定的性能主要与外部参数  $x_i^{(h)} (h=1, 2, \dots, a_i, i=1, 2, \dots, 4)$  有关。下面通过仿真说明外部参数  $x_i^{(h)}$  的选择对性能的影响。作为对照，采用均匀划分方法确定外部参数  $x_i^{(h)}$ 。图 1 分别给出采用经验法和均匀划分法时，辐射源的效用函数估计、效用门限以及辐射源实际威胁等级。威胁等级取值为 1，表示高威胁；取值为 0，表示低威胁。如果估计的效用函数越接近实际威胁等

级，则效用函数的估计就越好。由图 1 可看出，采用均匀划分法对性能的影响不大。因此，可认为外部参数  $x_i^{(h)}$  对结果影响较小。

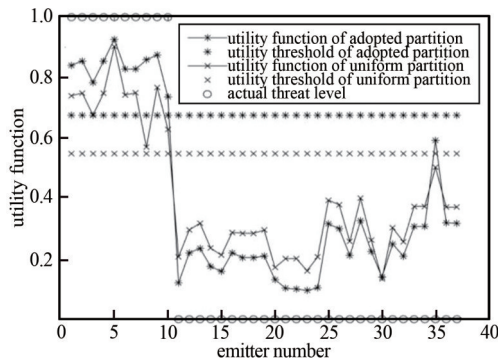


Fig.1 Effects of external parameters  
图 1 外部变量的影响

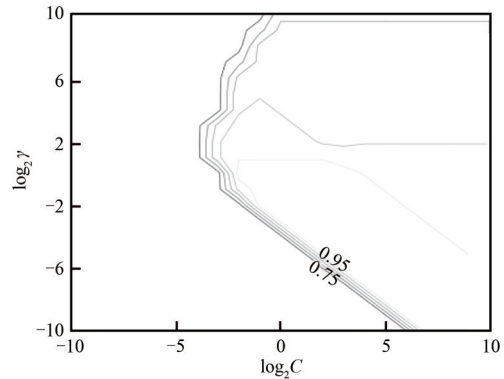


Fig.2 Contour map for correct prediction rate of threat levels using cross-validation  
图 2 交叉验证威胁等级判定正确率等高线图

### 4.3 性能比较

将 UTADIS 法与传统机器学习方法进行性能比较。选择 SVM 作为对比，是因为考虑到只有 2 个类的分类问题以及 SVM 与模板匹配，适用于电子对抗应用背景。SVM 的核函数采用高斯核  $K(x,y)=\exp(-\gamma\|x-y\|_2^2)$ ，利用交叉验证留一法获得 SVM 的正则化参数  $C$  以及高斯核参数  $\gamma$  的最优组合为  $C=0.25,\gamma=1$ ，图 2 为交叉验证详细结果。图 3 为 UTADIS 和 SVM 的仿真结果，其中 UTADIS 给出了各辐射源的效用函数估计和效用门限估计，SVM 给出了各辐射源威胁等级预测。对于 2 种方法，每次去掉辐射源数据集的一个辐射源形成的训练数据集，然后判定被去掉的那个辐射源的威胁等级。可以看出，2 种方法均有较高正确率。对于 UTADIS 法，分类错误的辐射源 10 的效用函数与效用门限接近，因此尽管分类错误，仍能得到较准确的效用函数估计。对于 SVM，分类错误的辐射源 8 的效用函数估计接近于 1，因此 SVM 分类结果与效用函数估计结果不一致，表明 SVM 分类没有体现决策者偏好信息。因此 UTADIS 更具有优势。还可看出，UTADIS 法通过给出效用函数估计，能够提供更精细的威胁程度刻画，更益于后续应用。

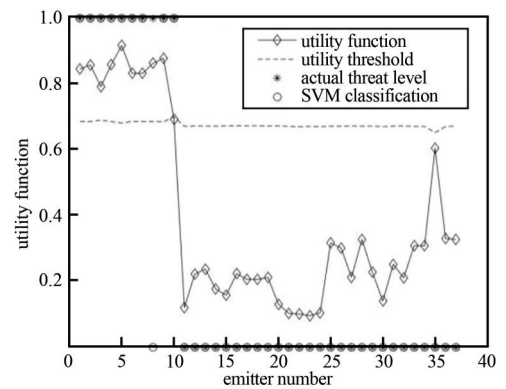


Fig.3 Comparison of UTADIS and SVM  
图 3 UTADIS 与 SVM 方法对比

### 5 结论

本文将多准则分类方法 UTADIS 法应用于辐射源威胁等级判定。仿真表明，UTADIS 法不仅能够较准确地给出辐射源威胁等级判定结果，还能够给出准确的效用函数估计，可提供更精确的辐射源威胁程度评估，相比其他方法在性能和实用性方面具有优势。利用 UTADIS 可实现自适应、自学习的辐射源威胁等级判定，适合未来智能认知电子对抗发展趋势，是辐射源威胁等级判定的一种有效新途径。

#### 参考文献：

[ 1 ] 井胜勇. 一种基于改进支持向量机的目标威胁估计方法[J]. 舰船电子工程, 2018,38(1):29-32,76. (JING Shengyong. A target threat assessment approach based on improved support vector machine[J]. Ship Electronic Engineering, 2018,38(1):29-32,76.) doi:10.3969/j.issn.1672-9730.2018.01.008.

[ 2 ] 卫翔,范学满. 基于半监督学习的舰艇目标威胁判断研究[J]. 系统仿真技术, 2020,16(1):12-16. (WEI Xiang,FAN Xueman. Research on the target threat evaluation of warships based on semi-supervised learning[J]. System Simulation Technology, 2020, 16(1):12-16.) doi:10.16812/j.cnki.cn31-1945.2020.01.003.

- [3] 张永利,潘哲,刘楠楠. 基于离散 Hopfield 神经网络的辐射源目标威胁估计[J]. 指挥信息系统与技术, 2020,11(2):39-43,48. (ZHANG Yongli,PAN Zhe,LIU Nannan. Threat assessment for radiation source target based on discrete Hopfield neural network[J]. Command Information System and Technology, 2020,11(2):39-43,48.) doi:10.15908/j.cnki.cist.2020.02.007.
- [4] 林江川,闫二艳,钟龙权. 模糊决策评估分析高功率微波威胁等级[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):253-258. (LIN Jiangchuan,YAN Eryan,ZHONG Longquan. Application of fuzzy decision in the HPM threat level assessment analysis[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):253-258.) doi:10.11805/TKYDA201602.0253.
- [5] 高进涛,刘广建,瞿卫忠. 一种基于多属性决策的辐射源威胁等级评判方法[J]. 舰船电子对抗, 2019,42(1):49-51. (GAO Jintao,LIU Guangjian,QU Weizhong. A judgement method of radiation source threat grade based on multi-property decision[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019,42(1):49-51.) doi:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2019.01.012.
- [6] 侯思尧,李永光,陈思静,等. 利用主客观集成赋权法的多目标威胁评估[J]. 电讯技术, 2019,59(8):956-961. (HOU Siyao,LI Yongguang,CHEN Sijing,et al. Multi-target threat assessment using subjective and objective integrated weighting method[J]. Telecommunication Engineering, 2019,59(8):956-961.) doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2019.08.016.
- [7] 孙中杰,王聪,刘正成. 基于多参数联合模糊处理的雷达辐射源威胁等级判定[J]. 舰船电子对抗, 2020,43(1):101-104,112. (SUN Zhongjie,WANG Cong,LIU Zhengcheng. Threat level judgment of radar radiation source based on multi-parameter combined fuzzy processing[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2020,43(1):101-104,112.) doi:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2020.01.019.
- [8] 马珂,毕大平,胡立群,等. 基于 FAHP-GRA 的告警目标威胁等级判定[J]. 电子信息对抗技术, 2020,35(4):73-77. (MA Ke,BI Daping,HU Liqun,et al. Threat level determination of warning target based on FAHP-GRA[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2020,35(4):73-77.) doi:10.3969/j.issn.1674-2230.2020.04.016.
- [9] DOUMPOS M,ZOPOUNIDIS C. Preference disaggregation and statistical learning for multicriteria decision support:a review[J]. European Journal of Operational Research, 2011,209(3):203-214. doi:10.1016/j.ejor.2010.05.029.
- [10] DOUMPOS M,ZOPOUNIDIS C. Multicriteria decision aid classification methods[M]. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers, 2002.

#### 作者简介:

赵桐(1990-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电子侦察、机器学习. email: zhaotong0622@sina.com.

罗钉(1966-),男,博士,研究员,主要研究方向为雷达、电子侦察、干扰.

张海旭(1992-),男,硕士,工程师,主要研究方向为电子侦察、干扰.