

基于熵权灰色关联和 D-S 证据理论的威胁评估*

李特, 冯琦, 张堃

(西北工业大学电子信息学院, 西安 710129)

摘要: 为了更好地处理空中威胁目标的不确定性信息, 提出了基于熵权灰色关联和 D-S 证据理论相结合的威胁评估方法。将熵理论应用于求解各指标权重, 利用灰色关联法确定各指标的不确信度, 进而得到各指标下不同目标的 Mass 函数, 通过 D-S 证据理论对各 Mass 函数进行合成, 根据置信函数大小对目标进行排序。仿真实验证明该方法是合理有效的。

关键词: 威胁评估; 熵权; 灰色关联; D-S 证据理论

中图分类号: V271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)02-0380-003

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.016

Threat assessment based on entropy weight grey incidence and D-S theory of evidence

LI Te, FENG Qi, ZHANG Kun

(College of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: By combining entropy weight grey incidence with D-S theory of evidence, this paper proposed a method of threat assessment to deal with the uncertain information of aerial threat target. It employed the theory of entropy to acquire the weights of different indices. Meanwhile, it determined uncertain degrees corresponding to different indices through the methodology of grey incidence. Subsequently, it obtained the Mass functions of different targets in different indices. It carried out the fusion of different Mass functions on the basis of D-S theory of evidence, sorted the targets according to the belief function value. A numerical example demonstrates that the aforementioned method is reasonable and effective.

Key words: threat assessment; entropy weight; grey incidence; D-S theory of evidence

0 引言

在高技术现代化战争条件下, 由于战场环境越来越复杂, 敌方实施干扰、欺骗等原因, 使传感器获取的信息具有高度不确定性。因此, 如何在有限时间内, 通过高度不确定信息对战场作出迅速、准确的估计, 有重要的理论和军事意义。

目前有很多方法用于空中目标威胁评估, 如多属性决策法、模糊评判法、灰色关联法、证据理论法、TOPSIS 法、专家系统法等。文献[1]提出了基于灰色关联度的威胁评估方法, 但没有降低决策结果的不确定性; 文献[2]提出了基于熵的 TOPSIS 威胁评估方法, 对确定客观权重有一定指导意义; 文献[3]提出了基于专家系统的威胁排序模型; 文献[4]将遗传算法和逻辑推理应用于威胁评估中; 文献[5]提出了基于战术意图识别的威胁评估模型; 文献[6]提出了基于集对分析理论的战场态势分析模型; 文献[7]提出了基于 D-S 证据理论的态势评估方法, 但 Mass 函数是主观设定的, 不具有客观性。

为了客观确定 Mass 函数^[8,9]并降低决策的不确定性, 提出了一种基于熵权灰色关联和证据理论相结合的威胁评估方

法。该方法应用熵理论确定各指标权重, 使决策过程更客观; 运用灰色关联法计算各指标的不确信度, 通过不确信度构建各指标下不同目标的 Mass 函数, 克服了主观设定 Mass 函数的不足; 通过 D-S 证据理论对各 Mass 函数进行合成, 从而得出威胁的排序值, 合成过程降低了决策的不确定性, 使评估结果更加精确。

1 熵权灰色关联法

信息熵赋权法以信息论中对熵的定义为基础, 构造出一种利用指标值来确定指标权重的方法, 具有一定的客观性, 避免了人为设定权重的主观性和盲目性。灰色关联法在处理信息不完备、不全面、不充分上有一定优势。

1.1 指标权重的确定

在复杂的环境中, 影响目标威胁程度的因素很多, 以下选取的空中目标威胁指标是目标航路捷径、目标距离威胁、目标速度威胁和目标高度威胁。实际防空作战过程中, 我方阵地通过雷达探测得到各指标数据信息, 并结合数据库相应目标数据参数, 计算出目标 i 在指标 j 下的隶属度 g_{ij} , 从而构成目标隶

收稿日期: 2012-06-28; **修回日期:** 2012-08-15 **基金项目:** 航空科学基金资助项目(2011553021); 西北工业大学基础研究基金资助项目(JC20110222)

作者简介: 李特(1987-), 男, 辽宁本溪人, 硕士研究生, 主要研究方向为航空火力控制(lt@mail.nwpu.edu.cn); 冯琦(1964-), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 主要研究方向为数据压缩、智能控制; 张堃(1982-), 男, 陕西西安人, 讲师, 博士(后), 主要研究方向为智能决策、智能控制。

属性矩阵 $G = (g_{ij})_{m \times n}$ 。

应用熵理论确定各指标的权重,对有 i 个目标和 j 个指标的评估对象,其赋权方法如下:

将 $G = (g_{ij})_{m \times n}$ 归一化得

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} = (g_{ij} / \sum_{i=1}^m g_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

指标 j 的熵值为

$$E_j = -1 / \ln n \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (2)$$

指标 j 的权重为

$$\omega_j = (1 - E_j) / (n - \sum_{j=1}^n E_j) \quad (3)$$

其中: $0 \leq \omega_j \leq 1$, 且 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。将得到的 $\omega_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 代入到 $(y_{ij})_{m \times n}$ 中, 得加权隶属度矩阵:

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = (\omega_j \cdot y_{ij})_{m \times n} \quad (4)$$

1.2 灰色关联法确定 Mass 函数

在运用 D-S 证据理论进行决策时,需要对各指标下不同目标的信息进行融合。Mass 函数是进行融合的基础,而求解各指标的不确信度是得到 Mass 函数的关键一步。下面应用灰色关联法求解各指标不确信度。

指标 j 下的 q 阶不确信度^[10] 为

$$DOI(I_j) = \frac{1}{m} \left| \sum_{i=1}^m (r_{ij})^q \right|^{1/q} \quad (5)$$

其中:取 $q = 2$, r_{ij} 是 $(x_{ij})_{m \times n}$ 的综合灰色关联系数。运用综合关联法求解关联系数,可避免单独应用最优关联或最劣关联得到的结果产生失真,提高了灰色关联的精确度。 r_{ij} 求法如下,首先确定最优关联系数 r_{ij}^+ 和最劣关联系数 r_{ij}^- 分别为

$$r_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |x_{ij} - X^+| + \xi \max_i \max_j |x_{ij} - X^+|}{|x_{ij} - X^+| + \xi \max_i \max_j |x_{ij} - X^+|} \quad (6)$$

$$r_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |x_{ij} - X^-| + \xi \max_i \max_j |x_{ij} - X^-|}{|x_{ij} - X^-| + \xi \max_i \max_j |x_{ij} - X^-|} \quad (7)$$

其中: $X^+ = \max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} = \{x_1^+, \dots, x_n^+\}$ 是理想最优序列, $X^- = \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij} = \{x_1^-, \dots, x_n^-\}$ 是理想最劣序列,取 $\xi = 0.5$, 则综合灰色关联系数为

$$r_{ij} = \frac{1}{(1 + r_{ij}^+ / r_{ij}^-)^2} \quad (8)$$

将 r_{ij} 代入式(5)中,可得各指标下不确信度 $DOI(I_j)$ 。由式(9)可以确定各指标下不同目标的 Mass 函数:

$$m_j(i) = [1 - DOI(I_j)] y_{ij} \quad (9)$$

其中: $m_j(i)$ 为指标 j 下目标 i 的 Mass 函数,且 $\sum_{i=1}^m m_j(i) < 1$,即存在整体认识的不确定性。把这部分 Mass 函数赋予辨识框架 Θ 本身,表示对所有目标的支持程度,并参与融合计算以减少决策过程中的不确定性。因此,可得到指标 j 下整体不确定性 Mass 函数为

$$m_j(i+1) = 1 - \sum_{i=1}^m m_j(i) \quad (10)$$

2 证据理论对 Mass 函数的合成

D-S 证据理论是一种不确定性推理方法,很好地表示了“不确定性”及“无知”等概念,通过引入置信测度来描述命题

的精确性,还能通过对“无知”赋予支持度,处理由其引起的不确定性。因此,应用证据理论对上面得到的 Mass 函数进行合成,以达到提高决策精度、降低不确定性的目的。

2.1 D-S 证据理论

设 Θ 为一辨识框架,若函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ (2^Θ 为 Θ 的幂集),满足 $m(\emptyset) = 0$ 且 $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$, 则称 m 为 Θ 上的基本概率分配函数(Mass 函数)。对给定的 Mass 函数及任一 $A \in 2^\Theta$, 对应的置信函数为

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (11)$$

$Bel(A)$ 表示支持 A 的总信任的最小值。对定义在同一辨识框架下的两个独立的 Mass 函数 m_1 和 m_2 , 合成公式为

$$(m_1 \oplus m_2)(A) = \frac{1}{1 - K} \sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C) \quad (12)$$

其中: $K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) m_2(C)$, 且 $K \neq 1$ 。

2.2 Mass 函数的合成

下面应用 D-S 证据理论对各指标下不同目标的 Mass 函数进行合成,对多个 Mass 函数合成可表示为

$$(m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n)(A) =$$

$$\frac{1}{1 - K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_n(A_n) \quad (13)$$

其中: $K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_n(A_n)$, $A \subseteq \Theta$; m_1, m_2, \dots, m_n 为辨识框架 Θ 上的 Mass 函数。

2.3 算法流程

综上所述,可得到基于熵权灰色关联和 D-S 证据理论的空中心目标威胁评估方法步骤如下:

- a) 应用熵理论计算各指标权重 $\omega_j (j = 1, 2, \dots, n)$, 进而得到加权隶属度矩阵 $(x_{ij})_{m \times n}$;
- b) 求解加权隶属度矩阵 $(x_{ij})_{m \times n}$ 的综合灰色关联系数 r_{ij} , 进而由式(5)得到指标 j 下的不确信度 $DOI(I_j)$;
- c) 由式(9)计算 Mass 函数 $m_j(i)$, 式(10)计算整体的不确定性 Mass 函数 $m_j(i+1)$;
- d) 运用 D-S 证据理论对各 Mass 函数进行合成处理;
- e) 根据合成后置信函数大小确定各目标的威胁排序结果。

3 算例分析

为了便于比较,以文献[1]的算例进行分析,设来袭目标集为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{10}\}$, 由隶属函数计算可得目标隶属度矩阵:

$$G = \begin{bmatrix} 0.798 & 0.883 & 0.883 & 0.961 \\ 0.973 & 0.594 & 1.000 & 0.368 \\ 1.000 & 0.937 & 0.726 & 1.000 \\ 0.753 & 0.270 & 0.487 & 0.852 \\ 0.876 & 0.006 & 0.135 & 0.298 \\ 0.918 & 0.390 & 0.607 & 0.698 \\ 0.593 & 0.631 & 0.198 & 0.809 \\ 0.777 & 0.278 & 0.325 & 0.527 \\ 0.950 & 0.703 & 0.110 & 1.000 \\ 0.970 & 0.835 & 1.000 & 0.056 \end{bmatrix}$$

各指标权重为

$$w = (0.2894, 0.2350, 0.2283, 0.2473)$$

加权标准化矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 0.0268 & 0.0376 & 0.0368 & 0.0362 \\ 0.0327 & 0.0253 & 0.0417 & 0.0138 \\ 0.0336 & 0.0398 & 0.0303 & 0.0376 \\ 0.0253 & 0.0115 & 0.0203 & 0.0321 \\ 0.0295 & 0.0003 & 0.0056 & 0.0112 \\ 0.0309 & 0.0166 & 0.0253 & 0.0263 \\ 0.0199 & 0.0268 & 0.0083 & 0.0305 \\ 0.0261 & 0.0118 & 0.0136 & 0.0198 \\ 0.0319 & 0.0299 & 0.0046 & 0.0376 \\ 0.0326 & 0.0355 & 0.0417 & 0.0021 \end{bmatrix}$$

理想最优序列为

$$X^+ = (0.0336, 0.0398, 0.0417, 0.0376)$$

理想最劣序列为

$$X^- = (0.0199, 0.0003, 0.0046, 0.0021)$$

最大差与最小差分别为

$$\begin{aligned} \max_i \max_j |x_{ij} - X^+| &= 0.0395, \quad \min_i \min_j |x_{ij} - X^+| = 0 \\ \max_i \max_j |x_{ij} - X^-| &= 0.0395, \quad \min_i \min_j |x_{ij} - X^-| = 0 \end{aligned}$$

灰色综合关联系数矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.2485 & 0.0775 & 0.1032 & 0.0797 \\ 0.1506 & 0.1884 & 0.0666 & 0.3364 \\ 0.1379 & 0.0626 & 0.1654 & 0.0695 \\ 0.2776 & 0.3701 & 0.2883 & 0.1136 \\ 0.2016 & 0.5621 & 0.5309 & 0.3782 \\ 0.1789 & 0.2957 & 0.2225 & 0.1715 \\ 0.3944 & 0.1715 & 0.4821 & 0.1285 \\ 0.2617 & 0.3650 & 0.3909 & 0.2502 \\ 0.1618 & 0.1409 & 0.5507 & 0.0695 \\ 0.1519 & 0.0926 & 0.0666 & 0.5426 \end{bmatrix}$$

各指标不确定度为

$$\begin{aligned} DOI(I_1) &= 0.0726, \quad DOI(I_2) = 0.0881 \\ DOI(I_3) &= 0.1072, \quad DOI(I_4) = 0.0830 \end{aligned}$$

各指标下不同目标 Mass 函数矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} 0.0893 & 0.1526 & 0.1525 & 0.1401 \\ 0.1088 & 0.1027 & 0.1727 & 0.0536 \\ 0.1119 & 0.1619 & 0.1254 & 0.1457 \\ 0.0843 & 0.0467 & 0.0841 & 0.1242 \\ 0.0980 & 0.0011 & 0.0233 & 0.0435 \\ 0.1027 & 0.0674 & 0.1048 & 0.1018 \\ 0.0664 & 0.1090 & 0.0342 & 0.1180 \\ 0.0870 & 0.0480 & 0.0561 & 0.0768 \\ 0.1063 & 0.1215 & 0.0190 & 0.1457 \\ 0.1085 & 0.1443 & 0.1727 & 0.0081 \end{bmatrix}$$

整体不确定性 Mass 函数为

$$\begin{aligned} m_1(11) &= 0.0369, \quad m_2(11) = 0.0449 \\ m_3(11) &= 0.0551, \quad m_4(11) = 0.0424 \end{aligned}$$

令辨识框架为 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_{10}\}$, 取 $2^\Theta = \{\{A_1\}, \{A_2\}, \dots, \{A_1, A_2, \dots, A_{10}\}\}$, 由 D-S 证据理论合成 Θ 内各子集置信函数得

$$\begin{aligned} Bel(A_1) &= (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_1) = 0.2396 \\ Bel(A_2) &= (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_2) = 0.1188 \\ Bel(A_3) &= (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_3) = 0.2652 \end{aligned}$$

$$Bel(A_4) = (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_4) = 0.0645$$

$$Bel(A_5) = (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_5) = 0.0096$$

$$Bel(A_6) = (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_6) = 0.0912$$

$$Bel(A_7) = (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_7) = 0.0569$$

$$Bel(A_8) = (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_8) = 0.0379$$

$$Bel(A_9) = (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_9) = 0.0837$$

$$Bel(A_{10}) = (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_{10}) = 0.0796$$

$$Bel(A_1, A_2, \dots, A_{10}) = (m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4)(A_1, A_2, \dots, A_{10}) = 9.6861 \times 10^{-4}$$

由置信函数的大小可得目标威胁排序为: $A_3 > A_1 > A_2 > A_6 > A_9 > A_{10} > A_4 > A_7 > A_8 > A_5$ 。与文献[1]中结果比较可以看出,整体不确定性函数 $Bel(A_1, A_2, \dots, A_{10})$ 在融合过程中不断减小,由最初均值 4.48% 减少到 0.097%。这说明灰色关联和证据理论结合后的决策方法有效处理了多源不确定信息,降低了不确定性,合成后结果提高了信息可信度,同时运用熵理论确定指标权重使决策过程更加客观。

4 结束语

现有威胁评估方法在确定 Mass 函数上有一定的主观性,为了客观确定 Mass 函数并降低决策不确定性,将灰色关联与 D-S 证据理论相结合,提出了一种基于熵权灰色关联与 D-S 证据理论的威胁评估方法。采用灰色关联法确定各指标下不确定度,进而得到各指标下不同方案的 Mass 函数,通过 D-S 证据理论对各 Mass 函数进行合成。仿真结果表明所提方法是有效、可行的,可以充分利用各指标的信息,显著降低了决策过程中多源信息的不确定性,通过合成处理使结果更精确、合理。下一步工作对战场信息不完备条件下的威胁评估进行研究,将本文所提方法进行完善并扩充,拓宽其应用范围。

参考文献:

- [1] 张肃. 基于灰色关联度分析的目标威胁程度评估[J]. 制导与引信, 2005, 26(3): 19-24.
- [2] 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.
- [3] 赵威, 周德云. 专家系统在空战多目标攻击排序中的应用[J]. 电光与控制, 2008, 15(2): 23-26.
- [4] GONSALVES P, CUNNINGHAM R, TON N, et al. Intelligent threat assessment processor (ITAP) using genetic algorithms and fuzzy logic [C]//Proc of the 3rd International Conference on Information Fusion. 2000: 18-24.
- [5] ROBERT S. A generic model of tactical plan recognition for threat assessment [C]//Proc of SPIE Defense and Security Symposium. 2005: 105-116.
- [6] 张琳, 陈绍顺. 基于集对分析的战场态势分析模型[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005, 27(5): 55-59.
- [7] 王琳, 寇英信. D-S 证据理论在空战态势评估方面的应用[J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 155-157.
- [8] 刘付显, 邢清华. 基于 D-S 融合证据的决策新方法[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(7): 125-131.
- [9] 李伟生, 王宝树. 基于模糊逻辑和 D-S 证据理论的一种态势估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10): 1278-1280.
- [10] WANG Ying-ming, YANG Jian-bo. The evidential reasoning approach for multiple attribute decision analysis using interval belief degrees [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175(1): 35-66.