

基于信息熵和 TOPSIS 法的目标威胁评估及排序

张 涛^{1,2}, 周中良¹, 苟新禹¹, 于 雷¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军 94831 部队, 浙江 衢州 324001)

摘 要: 针对现有空战目标威胁评估方法中存在的不足, 提出了一种基于信息熵和 TOPSIS 法的空战目标威胁评估方法。首先建立了空战目标威胁评估指标, 确定了角度、速度、隐身等威胁因子; 为综合考虑评估中的主客观因素, 采用了组合权重因子确定最终权重; 最后采用 TOPSIS 法作为威胁评估的解算方法, 进行仿真验证, 结果证明了该方法的有效性及其合理性。

关键词: 威胁评估; TOPSIS; 信息熵; 多目标攻击

中图分类号: V271.4 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2012)11-0035-04

Threat Assessment and Sorting of Aerial Targets Based on Information Entropy and TOPSIS Method

ZHANG Tao^{1,2}, ZHOU Zhongliang¹, GOU Xinyu¹, YU Lei¹

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. No. 94831 Unit of PLA, Quzhou 324001, China)

Abstract: A method for threat assessment of aerial targets was proposed based on information entropy and TOPSIS to overcome the shortcomings of the existing assessment methods. A criterion system for threat assessment of aerial targets was founded at first. The threat factors, including angular velocity and stealthy degree, were determined. In order to consider both the subjective factors and objective factors, the combinatorial factor was used for determining the weight of the index. Finally, the TOPSIS was used to calculate the threat assessment. The experiment results demonstrated that this method is feasible and rational.

Key words: threat assessment; TOPSIS; information entropy; multi-target attacking

0 引言

随着航空平台及武器装备的发展, 多目标攻击成为现代作战飞机作战能力的评价标准。而空战目标威胁评估则是多目标攻击的关键技术之一, 是空战战术机动决策的前提和依据^[1-3]。目前常用的方法有参数法和非参数法, 由于非参数法直观、简单、实用, 得到广泛应用。非参数法通过分析敌我态势、平台及武器装备性能、选取威胁评估指标、确定指标权重, 计算威胁评估值并排序, 常用的非参数法有威胁因子法、威胁指数法、多属性决策等^[4-5], TOPSIS 法是一种求解多目标决策分析非常有效的方法, TOPSIS 通过有限个评价对

象与理想化目标的接近程度进行排序, 对现有的对象进行相对优劣的评价。

在通过 TOPSIS 法求解多目标决策问题时, 都要分析考虑各属性指标的权重, 属性指标权重的合理性直接决定了目标威胁评估的准确性。确定属性指标权重的方法有主观法(专家法、AHP 法、二项系数法)和客观法(主成分分析法、熵权法)。主观法体现决策者的主观偏好和经验, 但是缺乏准确性和一致性; 客观法能够充分利用客观信息, 但是缺乏主观性^[1]。本文综合考虑主客观因素, 采用专家打分与信息熵结合的方法确定指标权重。熵是信息论中表示事物出现不确定性的基本概念, 本文基于信息熵和 TOPSIS 法进行空战目标威胁评估。

1 威胁评估指标的建立

1.1 角度威胁因子

角度威胁因子^[3]为

收稿日期: 2011-10-21

修回日期: 2011-11-07

基金项目: 航空科学基金(20095196012); 博士生创新基金(Dx2010106)

作者简介: 张 涛(1982—), 男, 山东新泰人, 博士生, 研究方向为航空武器系统总体、仿真与控制。

$$S_a = \begin{cases} 1 - \frac{|Q_T|}{5 \cdot \alpha_{\max}}, & |Q_T| \leq \alpha_{\max} \\ 0.8 - \frac{|Q_T| - \alpha_{\max}}{2 \cdot (\beta_{\max} - \alpha_{\max})}, & \alpha_{\max} < |Q_T| \leq \sqrt{2}\beta_{\max} \\ 0.3 - \frac{3 \cdot (|Q_T| - \beta_{\max})}{10 \cdot (\pi - \beta_{\max})}, & \beta_{\max} < |Q_T| \leq \pi \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_T 为目标机速度矢量与目标线的夹角; α_{\max} 为空空导弹最大发射角; β_{\max} 为雷达最大探测角; S_a 为角度威胁值, 取值范围(0~1), 取值越大威胁越大。

1.2 速度威胁因子

速度威胁因子为

$$S_v = \frac{1}{2} + \frac{V_T - V_I}{2(\max(V_{\max I}, V_{\max T}) - \min(V_{\min I}, V_{\min T}))} \quad (2)$$

式中: V_T 为目标机速度; V_I 为载机速度; $V_{\max I}$, $V_{\max T}$, $V_{\min I}$, $V_{\min T}$ 分别为载机和目标机的最大、最小飞行速度; S_v 为速度威胁值, 取值范围(0~1), 取值越大威胁就越大。

1.3 隐身威胁因子

由于飞机的雷达反射面积 RCS 与飞机暴露方向有关, 因此在隐身威胁因子中考虑引入角度威胁因子。一般隐身战斗机的 RCS 在机头方向较小, 而在侧面方向较大, 因此假设角度越大, RCS 越大。

$$S_y = S_a \cdot \begin{cases} e^{-\left(\frac{A_I - A_T - A_0}{\sigma_{A_0}}\right)^2}, & A_I - A_T \leq A_0 \\ 1, & A_I - A_T > A_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_T 为目标机的雷达反射面积; A_I 为我机的雷达反射面积; A_0 为门限 RCS 值; $\sigma_{A_0} = 1.2A_0$; S_y 为隐身威胁值, 取值范围(0~1), 取值越大威胁越大。

1.4 距离威胁因子

距离威胁因子的主要决定因素是载机与目标机距离及载机所携带导弹的射程, 距离威胁因子^[6]如下。

1) 目标机性能优于载机时。

$$S_r = \begin{cases} 0.5, & D < R_I, D > R_{RT}, \\ & R_T < D < R_{RI} \\ 0.5 + 0.2 \frac{D - R_I}{R_T - R_I}, & R_I < D < R_T \\ 0.5 + 0.1 \frac{D - R_{RI}}{R_{RT} - R_{RI}}, & R_{RI} < D < R_{RT} \end{cases} \quad (4)$$

2) 载机性能优于目标机时。

$$S_r = \begin{cases} 0.5, & D < R_T, D > R_{RI}, \\ & R_I < D < R_{RT} \\ 0.5 - 0.2 \frac{D - R_T}{R_I - R_T}, & R_T < D < R_I \\ 0.5 - 0.1 \frac{D - R_{RT}}{R_{RI} - R_{RT}}, & R_{RT} < D < R_{RI} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_T 为目标机的机载空空导弹的射程; R_I 为载机

的机载空空导弹的射程; R_{RT} 为目标机雷达最大作用距离; R_{RI} 为载机雷达最大作用距离; D 为两机距离; S_r 为距离威胁值, 取值范围(0~1), 取值越大威胁越大。

1.5 高度威胁因子

高度威胁因子^[7]为

$$S_h = \begin{cases} e^{-\left(\frac{H - H_0}{\sigma_{H_0}}\right)^2}, & H \leq H_0 \\ 1, & H > H_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: H 为目标机与载机的相对高度差, 目标在上为正; H_0 为门限高度差, 其值随空战形式的不同而变化, 可由决策者根据经验设定; $\sigma_{H_0} = 1.2H_0$; S_h 为高度威胁值, 取值范围(0~1), 取值越大威胁越大。

1.6 目标空战能力因子

战斗机的空战能力通常由静态空战效能指数评估计算, 具体包括: 机动性、武器杀伤力、探测目标能力、操纵效能、生存力、航程和电子对抗能力。综合这些因素, 建立空战能力指数^[8]

$$C = [\ln B + \ln(\sum C_1 + 1) + \ln(\sum C_2)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (7)$$

式中: B 为机动性参数; C_1 为武器杀伤力参数; C_2 为探测能力参数; ε_1 为操纵效能系数; ε_2 为生存力系数; ε_3 为航程系数; ε_4 为电子对抗系数。

根据载机与目标机双方的空战能力指数, 构造载机相对于目标机的能力优势

$$S_c = \frac{C_i}{\max C} \quad (8)$$

式中: C_i 为目标机的空战能力指数; S_c 取值范围(0~1), 取值越大威胁越大。

2 威胁评估指标权重的确定

2.1 主观权重的确定

根据专家对威胁评估的分析及其经验和偏好, 综合考虑交战双方的角度、速度、隐身、距离、高度及作战能力等因素, 确定主观权重 W_s 的表达式为

$$W_s = [W_{s1}, W_{s2}, W_{s3}, W_{s4}, W_{s5}, W_{s6}] \quad (9)$$

式中, W_{s1} 、 W_{s2} 、 W_{s3} 、 W_{s4} 、 W_{s5} 、 W_{s6} 分别为专家给角度、速度、隐身、距离、高度威胁、空战能力因子确定的权重,

$$\sum_{i=1}^6 W_{si} = 1。$$

2.2 客观权重的确定

信息熵是系统无序程度的度量, 某个属性指标的信息熵越小, 说明指标值的变异程度越大, 信息量越大, 在评价中权重也越大^[4]。

假设有 m 个空战目标, n 个威胁属性指标, 首先根据威胁评估指标构造决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$, 其中 a_{ij} 为第 i 个目标在第 j 个威胁指标下的属性值。

对决策矩阵 A 进行归一化处理得到 $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{m \times n}$, 其中

$$\tilde{a}_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij} \quad (10)$$

则第 j 个威胁评估指标对应的信息熵为

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \tilde{a}_{ij} \ln \tilde{a}_{ij} \quad (11)$$

由此可得第 j 个威胁评估指标的客观权重^[9]为

$$W_{oj} = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n (1 - E_j) \quad (12)$$

则基于信息熵的目标属性客观权重为

$$W_o = [W_{o1}, W_{o2}, W_{o3}, W_{o4}, W_{o5}, W_{o6}] \quad (13)$$

式中, W_{o1} 、 W_{o2} 、 W_{o3} 、 W_{o4} 、 W_{o5} 、 W_{o6} 分别为计算得到的角度、速度、隐身、距离、高度威胁、空战能力因子客观权重

$$\sum_{i=1}^6 W_{oi} = 1.$$

2.3 组合指标权重的确定

为综合考虑主观及客观因素, 本文通过主客观权重组合计算得到最终的组合权重为

$$W = \alpha W_s + (1 - \alpha) W_o \quad (14)$$

式中, α 为主客观权重之间的权衡组合因子, 取值范围 $(0 \sim 1)$ 。

3 运用 TOPSIS 法进行威胁评估

在得到目标属性组合权重 W 之后, 应用 TOPSIS 法进行威胁评估。首先选定理想解和负理想解, 然后寻找与理想解接近与负理想解远的解, 根据到理想解和负理想解距离计算目标威胁度, 完成目标排序及威胁评估^[9], 具体步骤如下:

- 1) 构造目标决策矩阵 \tilde{A} ;
- 2) 根据式 (14) 确定各威胁评估指标权重 W ;

- 3) 确定加权决策矩阵 $\bar{A} = (\bar{a}_{ij})_{m \times n}$, 其中

$$\bar{a}_{ij} = \tilde{a}_{ij} W_j \quad (15)$$

- 4) 确定理想解 V^+ 和负理想解 V^-

$$\begin{cases} \bar{a}_j^+ = \max_{1 \leq i \leq n} (\bar{a}_{ij}) \\ \bar{a}_j^- = \min_{1 \leq i \leq n} (\bar{a}_{ij}) \end{cases} \quad (16)$$

- 5) 计算每个目标到理想解和负理想解的距离 d_i^+ 、 d_i^- ^[10]

$$\begin{cases} d_i^+ = \sum_{j=1}^m \|\bar{a}_{ij} - \bar{a}_j^+\| \\ d_i^- = \sum_{j=1}^m \|\bar{a}_{ij} - \bar{a}_j^-\| \end{cases} \quad (17)$$

- 6) 计算每个目标与理想解的贴近度 c_i , 并根据贴近度完成目标威胁排序, 贴近度越大威胁越大。

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (18)$$

4 仿真分析

仿真条件: 假设我方 1 架具有多目标攻击能力的战斗机与目标方 4 架两种机型 (F-15E、F/A-18C) 目标机相遇, 且目标都在我方的雷达探测范围之内, 我方速度为 300 m/s, 速度范围为 200 ~ 400 m/s, 雷达反射面积为 6 m², 导弹最大射程为 50 km, 雷达最大探测距离为 130 km; 目标方两种机型的空战能力指数^[8]分别为 19.8、14.8, 雷达最大发现距离分别为 140 km、120 km, 雷达反射面积分别为 12.7 m²、7 m², 雷达最大搜索方位角分别为 130°、120°, 导弹最大射程分别为 70 km、26 km, 导弹最大发射角分别为 70°、40°, 门限高度值为 2 km, 初始权重为 (0.2 0.1 0.15 0.25 0.1 0.2), $A_0 = 8 \text{ m}^2$, 主客观权重因子 $\alpha = 0.3$, 其他参数如表 1 所示。

表 1 空战态势表

Table 1 Air combat situation values

序号	机型	$Q_T / (^\circ)$	$V_T / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	D / km	H / m
1	F-15E	40	300	65	2000
2	F-15E	50	320	80	500
3	F-18C	-60	310	70	1000
4	F-18C	70	330	120	0

根据式 (1) ~ 式 (8) 可得到目标决策矩阵 A , 见表 2。

表 2 目标威胁因子值

Table 2 Threat factor values of targets

序号	S_a	S_v	S_y	S_r	S_h	S_c
1	0.822	0.500	0.375	0.650	1.000	1.000
2	0.633	0.550	0.375	0.500	0.677	1.000
3	0.300	0.525	0.563	0.500	0.841	0.747
4	0.275	0.575	0.563	0.450	0.499	0.747

归一化处理后可得规范化目标决策矩阵为

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0.405 & 0.233 & 0.200 & 0.310 & 0.332 & 0.286 \\ 0.312 & 0.256 & 0.200 & 0.238 & 0.224 & 0.286 \\ 0.148 & 0.244 & 0.300 & 0.238 & 0.279 & 0.214 \\ 0.135 & 0.267 & 0.300 & 0.214 & 0.166 & 0.214 \end{bmatrix} \quad (19)$$

根据式 (14) 可得各威胁评估指标权重为

$$W = [0.32 \quad 0.07 \quad 0.14 \quad 0.19 \quad 0.12 \quad 0.16] \quad (20)$$

应用 TOPSIS 法计算目标威胁度, 由式 (16) ~ 式 (18) 可得 $c = [0.944 \quad 0.574 \quad 0.192 \quad 0.056]$, 得到威胁排序为: 目标 1 > 目标 2 > 目标 3 > 目标 4。

从仿真结果可以看出, 基于信息熵和 TOPSIS 法的空战目标威胁评估方法可以有效对目标机进行威胁评估及排序。该方法可以综合考虑主客观因素, 有助于提高计算精度及其合理性。

5 结论

本文对空战目标威胁评估进行了研究, 为综合考虑

主客观因素,利用信息熵的思想,将客观因素与主观因素组合权衡,确定了组合权重,最后利用 TOPSIS 法对目标威胁进行计算,该方法可以准确、全面、客观地反映目标威胁。通过仿真结果可以看出,该方法有效解决了空战目标威胁评估问题,具有较好的实用性及应用前景。

参 考 文 献

- [1] 耿涛,张安,郝兴国.基于组合赋权 TOPSIS 法的空战多目标威胁评估[J].火力与指挥控制,2011,36(3):16-19.
- [2] 谷向东,童中翔,柴世杰,等.基于 IAHP 和离差最大化 TOPSIS 法目标威胁评估[J].空军工程大学学报,2011,12(2):27-31.
- [3] 肖冰松,方洋旺,胡诗国,等.一种新的超视距空战威胁评估方法[J].系统工程与电子技术,2009,31(9):2162-2166.
- [4] 童奇,童中翔,谷向东,等.基于信息熵的空战目标威胁评估[J].数学的实践与认识,2011,41(6):145-149.
- [5] 郭辉,徐浩军,周莉.基于区间数 TOPSIS 法的空袭目标威胁评估[J].空军工程大学学报,2011,12(1):40-45.
- [6] 刘正敏,姜长生,陈志伟.多机协同空战中的威胁排序[J].电光与控制,2011,18(2):30-33.
- [7] 郭昊,周德云,张堃.无人作战飞机空战自主机动决策研究[J].电光与控制,2010,18(8):28-32.
- [8] 朱宝鑫,朱荣昌,熊笑非.作战飞机效能评估[M].北京:航空工业出版社,2006.
- [9] 邵正途,朱和平,彭飞,等.基于熵和 TFN-AHP 的 TOPSIS 法 TBM 目标威胁度评估[J].军械工程学院学报,2010,22(2):56-60.
- [10] 彭方明,邢清华,王三涛.基于 Vague 集 TOPSIS 法的空中目标威胁评估[J].电光与控制,2010,17(10):23-27.

(上接第 34 页)

RS-SVM 的特征向量,使用径向基核函数,径向基核函数的参数取为 0.5。经过 1000 次 Monte Carlo 实验,4 种调制方式在 5 dB、10 dB、15 dB、20 dB 的信噪比的平均识别率如表 2 所示。

表 2 基于 RS-SVM 对信号在不同信噪比下的平均识别率

Table 2 Average recognition rate based on

RS-SVM under different SNR

%

信号调制 方式	信噪比/dB			
	5	10	15	20
LFM	100	100	100	100
NLFM	100	99	100	100
BPSK	100	100	100	100
QPSK	100	100	100	100

由表 2 可以看出在整个 SNR 变化范围内信号识别率都比较高,表明特征向量 V 的有效性,同时表明本文所提出的方法具有可行性。

4 结 论

本文对雷达信号脉内调制方式的识别是在全脉冲识别后,对雷达信号更精确的辨识,这在复杂电磁环境下和脉冲压缩技术广泛应用的今天具有重要意义,也是当前研究的热点。本文从直观的谱形图中提取了反映其轮廓、复杂度及分布特性的相像系数与分形维数,利用它们良好的聚类性初选信号调制方式,而后使用基于 RS-SVM 分类器识别,提高识别的准确率,本方法适用于在复杂的雷达信号环境下识别雷达辐射源调制方式。通过仿真试验证明该方法的有效性,具有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 孙霞,吴自勤,黄昀.分形原理及应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2003.
- [2] 刘丹.实用分形图形学[M].大连:大连海事大学出版社,2000.
- [3] 曾文曲.分形理论与分形计算机模拟[M].修订版.沈阳:东北大学出版社,2001.
- [4] 张葛祥,胡来招,金炜东.雷达辐射源信号脉内特征分析[J].红外与毫米波学报,2004,23(6):477-480.
- [5] 叶菲,罗景青,海磊.基于分形维数的雷达信号脉内调制方式识别[J].计算机工程与应用,2008,44(15):155-157.
- [6] 郝研,王太勇,万剑,等.分形盒维数抗噪研究及其在故障诊断中的应用[J].仪器仪表学报,2011,32(3):540-545.
- [7] 张葛祥.雷达辐射源信号智能识别方法研究[D].成都:西南交通大学,2005.
- [8] 张葛祥,金炜东,胡来招.基于粗集理论的雷达辐射源信号识别[J].西安交通大学学报,2005,39(8):871-875.
- [9] 张葛祥,荣海娜,金炜东.支持向量机在雷达辐射源信号识别中的应用[J].西南交通大学学报,2006,41(1):25-30.
- [10] 郭双冰.基于小波和分形理论的调制信号特征提取方法研究[J].信号处理,2005,21(3):316-318.
- [11] 吕铁军,郭双冰,肖先赐.调制信号的分形特征研究[J].中国科学: E 辑,2001,31(6):508-513.
- [12] ZHANG G P. Neural networks for classification: A survey[J]. IEEE Trans System, Man, and Cybernetics-Part C: Application and Reviews, 2000, 30(4):451-462.