

doi: 10.7690/bgzdh.2025.07.015

基于组合赋权法的光学成像卫星威胁评估

陈超¹, 王暖¹, 何榕¹, 王杰娟¹, 李燎原²

(1. 航天工程大学, 北京 101416; 2. 中国人民解放军 63626 部队, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 针对光学成像卫星在信息化战争中发挥的信息支援能力, 对其产生的威胁进行评估。从光学成像卫星应用效能角度考虑侦察质量、覆盖能力、时效性, 建立由分辨率、水平定位精度、成像区域面积、平均访问时间和平均重访时间构成的威胁评估指标, 考虑到主观赋权法和客观赋权法都存在一定局限性, 以层次分析法与熵值法 2 种典型的主观和客观赋权法为基础, 采用组合赋权法进行威胁评估计算。仿真结果表明: 采用该方法所得到的威胁评估结果具有一定的解释性和合理性, 实现了主观意愿和客观公度的良好结合。

关键词: 组合赋权法; 光学成像卫星; 威胁评价指标

中图分类号: TP79; E917 **文献标志码:** A

Threat Assessment of Optical Imaging Satellite Based on Combination Weighting Method

Chen Chao¹, Wang Nuan¹, He Rong¹, Wang Jiejuan¹, Li Liaoyuan²

(1. University of Space Engineering, Beijing 101416, China;

2. No. 63626 Unite of PLA, Jiuquan 735000, China)

Abstract: Aiming at the information support capability of optical imaging satellite in information warfare, the threat of optical imaging satellite is evaluated. Considering the reconnaissance quality, coverage ability and timeliness from the perspective of optical imaging satellite application efficiency, a threat assessment index composed of resolution, horizontal positioning accuracy, imaging area, average access time and average revisit time is established. Based on the two typical subjective and objective weighting methods of analytic hierarchy process and entropy method, the combined weighting method is used to calculate the threat assessment. The simulation results show that the threat assessment results obtained by this method have certain interpretation and rationality, and the good combination of subjective will and objective commensurability is realized.

Keywords: combination weighting method; optical imaging satellite; threat evaluation index

0 引言

当前战争已经进入信息化形态, 战争纬度转变为海陆空天网电的一体化联合作战。自第一次海湾战争以来, 以美国为代表的军事强国在历次军事行动中无一例外依赖卫星系统提供的太空信息支援。特别是近几年高技术局部战争表明, 掌握太空信息优势, 就能把握战争主动权。作为太空信息支援卫星典型代表, 光学成像卫星在战争筹划和实施过程中都可提供大量的信息情报, 对战争进程和结果能够产生重要影响。对敌方光学成像卫星进行威胁评估, 为设计应对措施降低敌太空信息支援能力, 从而为达到降低敌体系作战效能目的发挥重要意义。

1 研究现状

威胁评估的概念最早在 20 世纪 80 年代由美国

国防部实验室联合领导机构(joint directors of laboratories, JDL)提出, 已经被应用于陆、海、空、火等领域目标分析中^[1-4]。在太空领域, 文献[5]针对美预警卫星威胁度进行评估, 文献[6]重点对通信中继卫星战术层威胁度评价, 也有一些研究是对卫星效能进行评估, 如文献[7-8]分别对海洋监视卫星、导航定位卫星评估。在面向光学成像卫星威胁评估方面, 文献[9-10]从卫星成像品质角度、对比度和卫星姿态等因素, 建立了检测概率解析表达式模型对光学成像卫星威胁程度进行评估。文献[11]考虑太阳高度角、气象对识别目标的影响因子、地面分辨率等因素, 通过建立光学成像侦察卫星识别目标概率的计算模型进行威胁评估。文献[9-11]从光学传感器成像效果角度, 通过建立目标监测概率模型进行评估。目标成像质量只是体现卫星威胁的一方面; 因此, 需要建立涵盖更多因素的光学成像

收稿日期: 2024-09-11; 修回日期: 2024-10-26

第一作者: 陈超(1986—), 男, 黑龙江人, 博士。

卫星威胁评估指标进行评估。

评估指标权重计算方面,确定指标权重的具体方法有很多种,主要有主观赋权法、客观赋权法等^[12]。主观赋权法是根据评价者主观价值判断来确定各指标权值的一种方法,该类方法的典型方法包括层次分析法、专家调查法、直接打分法、对比排序法、环比评分法等。客观赋权法是依据实际数据,通过各指标值显示的客观信息确定权重的一种方法,该类方法的典型方法包括熵值法、主成分分析法、离差法、变异系数法、CRITIC 法等^[13]。主观赋权法和客观赋权法各自均有优缺点。主观赋权法能较好地体现评价者的主观偏好,但由于过多倚重评价者的经验和专业知识,而不同评价者的主观价值判断标准不尽相同,因而构建的权数缺乏稳定性;客观赋权法主要通过成熟的数学理论和方法,利用客观数据提供的信息进行评价,受主观因素影响较小,但该类方法确定的权值会受到客观数据随机性的影响,导致不同的样本数据得出不同的权值,忽视了其真实状况。为兼顾评价者对指标的偏好,同时又力争减少权重确定的主观随意性,使评价结果更加真实合理。笔者采用能够综合主观和客观赋权法的组合赋权法进行权重计算,具体为:1) 分别采用主观赋权法中的层次分析法和客观赋权法的熵值法计算光学成像卫星威胁度指标权重;2) 将两者权重进行加权得到最终权重,融合后的权重既能考虑到评价者的经验知识和态度,又可有效利用实际数据,以此权重对光学成像卫星的威胁度进行评估。

2 光学成像卫星威胁度评价指标体系构建

光学成像卫星的威胁主要反映在其应用效能上,主要体现在侦察质量、覆盖能力和时效性 3 方面。侦察质量表现为分辨率、水平定位精度和平均访问时间,分辨率、水平定位精度是卫星传感器的固有参数,而平均访问时间越长卫星对于目标的侦察效果越好。覆盖能力可以用成像区域面积体现,成像区域面积与卫星的轨道、传感器的视场角、侧摆角等相关,反映了卫星对于目标侦察的覆盖面积。时效性可用重访时间来体现,平均重访时间指卫星对于目标未被访问时间之间的间隔平均值,平均重访时间越小,卫星对于目标的访问频率越高。由此构建侦察卫星评价指标体系如图 1 所示。

3 组合赋权法

组合赋权法计算流程如图 2 所示,组合赋权法

利用熵值法和层次分析法计算得到的指标权重确定最终的权重。

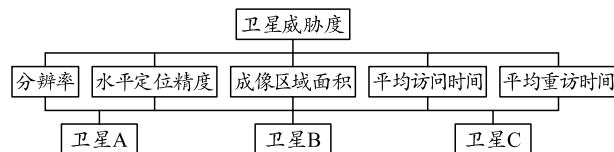
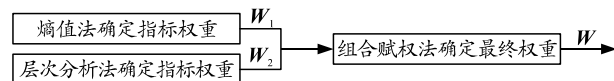


图 1 光学成像卫星威胁评价指标



3.1 熵值法

熵值法以信息论中熵的概念为基础,是通过计算各指标的熵值来确定指标权重的赋权方法。熵在信息论中可用于衡量系统无序的程度,可度量数据所提供的有效信息,熵值越小,代表一个指标在评估中提供的信息量越大,则该指标对评估的贡献也就越大,赋予该指标的权重也就会越大。使用熵值法确定权重主要有 3 个步骤。

1) 标准化处理。由于每个指标的量纲、数量级等可能存在很大差异,因此首先需对初始采集数据进行标准化处理。设有 m 个方案、 n 个指标,表示第 i 个方案第 j 个指标的数据,对于正向指标,采用式(1)进行标准化处理:

$$h_{ij} = a_{ij} / \max \{a_{ij}\}。 \quad (1)$$

2) 信息熵的计算。根据熵的定义,第 j 个指标的信息熵 e_j 为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n \frac{h_{ij}}{h_j} \ln \frac{h_{ij}}{h_j}。 \quad (2)$$

3) 熵权的计算:

$$g_j = 1 - e_j, \quad j=1, \dots, n; \quad w_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j, \quad j=1, \dots, n。 \quad (3)$$

式中 w_j 为熵权。

3.2 层次分析法

层次分析法是通过分析与决策有关的因素,将其拆解成目标、准则、方案等多个层次,在此基础上进行分析的方法。该方法将评价者主观判断进行了整理和综合,权值体现评价者对各指标的主观价值判断大小,其特点是可以利用较少的信息将定性决策转化为定量决策,从而在缺乏大量必要的数据情况下能够对系统进行评价,提高评价的有效性、可靠性和可行性。层次分析法一般由构造判断矩阵、层次单排序、一致性检验、层次总排序等步骤构成。

1) 构造判断矩阵。

判断矩阵表示针对上一层元素，本层次有关元素之间相对重要性的情况，由于各因素在评价者评判标准中的比重不同，通常应用 Saaty 提出的 1-9 标度方法，通过指标之间两两比较来构造判断矩阵，如式(4)所示：

$$A=\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}。$$

(4)

式中 $a_{ij}=a_i/a_j$, a_i, a_j 为指标 i 和 j 的重要性，含义如表 1 所示。

表 1 层次分析法两两比较标度

标度	定义
1	2 个指标相比同样重要
3	2 个指标相比前者比后者稍重要
5	2 个指标相比前者比后者明显重要
7	2 个指标相比前者比后者强烈重要
9	2 个指标相比前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若指标 i 与指标 j 的重要性之比为那么指标 j 与指标 i 重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

2) 层次单排序。

层次单排序就是通过求解判断矩阵的最大特征值对应的特征向量，该特征向量即为各指标的权值。如式(5)所示：

$$AW=\lambda_{\max}W。$$

(5)

式中：A 为判断矩阵； $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征值；W 为对应的特征向量。

3) 一致性检验。

矩阵构造完成后需对专家判断矩阵进行一致性检验，计算一致性比率 CR 为：

$$CR=CI/RI=(\lambda_{\max}-n)/RI(n-1)。$$

(6)

式中 RI 为平均随机一致性指标，由表 2 确定。

表 2 层次分析法两两比较标度

n	1	2	3	4	5	6
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24

当 $CR<0.1$ 时认为判断矩阵满足一致性要求，否则应对判断矩阵进行调整。

4) 层次总排序。

层次总排序就是计算最底层的备选方案对系统目标重要程度的排序，计算过程从高层到低层逐层进行。

3.3 权重组合计算

组合赋权的实质是通过一定的算式，将多种方

法赋权的结果综合在一起，以得到一个更为客观合理的权重值。笔者采用线性加权法，即选用一种主观赋权法和一种客观赋权法进行线性融合。如式(7)所示，得到的指标组合权重 W，即可作为目标各个指标的组合同权重。

$$W=\alpha W_1+\beta W_2。$$

(7)

式中：W₁ 为主观赋权法确定的指标权重；W₂ 为客观赋权法确定指标权重；α 为主观权重影响因子；β 为客观赋权影响因子，且满足 α+β=1。专家的战场经验越丰富，则 α 越大；战场信息的完整度与可信度越大，则 β 越大。线性加权法不仅考虑了主观因素，而且引入了客观因素，能够比较全面客观地反映各项指标实际相对重要程度。

4 光学成像卫星威胁评估实例

以某地区 (34.17°E, 116.34°N, 10.00 m) 面积为 0.2 km² 的设施 S 为例，分析 A、B、C 3 颗光学成像卫星的威胁情况如表 3 所示。

表 3 光学成像卫星威胁评估

卫星	地面分辨率/ %	水平定位精度/ %	成像区域面积/ km ²	轨道情况 (太阳同步)		
				近地点/ km	远地点/ km	倾角/ (°)
A	0.40	4.8	6 300	670	678	98.3
B	0.45	4.6	6 500	750	780	98.2
C	0.38	3.5	5 300	600	615	97.8

上表 3 取威胁预报时间段为 19 Aug 2022 12: 00: 00 Gregorian LCL 到 31 Aug 2022 12: 00: 00 Gregorian LCL。利用 STK 软件构建仿真场景如图 3 所示。

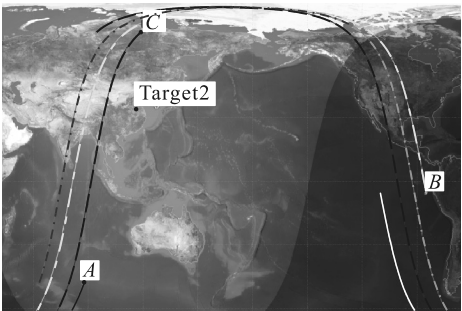


图 3 STK 仿真场景

利用卫星轨道情况，通过 STK 软件对过境情况分析计算，可得到 3 颗卫星对设施 S 的平均访问时间和平均重访时间，数据如表 4 所示。

表 4 卫星数据

方案	分辨率/%	水平定位精度/%	成像区域面积/km ²	平均访问时间/s	平均重访时间/s
A	0.40	4.8	6 300	639.9	31 790.1
B	0.45	4.6	6 500	687.2	29 816.0
C	0.38	3.5	5 300	599.7	31 802.0

1) 层次分析法计算权重。

通过指标两两比较, 构建判断矩阵:

$$A' = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 3.00 & 0.20 & 0.20 \\ 1.00 & 1.00 & 3.00 & 0.50 & 0.50 \\ 1/3 & 1/3 & 1.00 & 0.25 & 0.20 \\ 5.00 & 3.00 & 2.00 & 1.00 & 1.00 \\ 5.00 & 2.00 & 5.00 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (8)$$

求得该判断矩阵最大特征值为 5.276 6, 对应的归一化特征向量为:

$$W_1 = [0.108\ 5, 0.147\ 4, 0.059\ 9, 0.339, 0.345\ 1] \quad (9)$$

表 2 中 $RI=1.12$, 利用式(6)可得 $CR=0.061\ 8 < 0.1$, 故判断矩阵具有一致性。由于只考虑指标层相对于目标的权重, 因此无需再进行层次总排序。

2) 熵值法计算权重。

利用式(1)对表中数据进行标准化处理后, 得到数据矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} 0.889\ 0 & 1.000\ 0 & 0.969\ 2 & 0.931\ 2 & 0.999\ 6 \\ 1.000\ 0 & 0.958\ 3 & 1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0.937\ 6 \\ 0.844\ 4 & 0.729\ 2 & 0.815\ 4 & 0.872\ 6 & 1.000\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

利用式(2)可得信息熵为:

$$e_j = [0.997\ 7, 0.991\ 7, 0.996\ 5, 0.998\ 6, 0.999\ 6] \quad (11)$$

3) 计算组合权重。

取 $\alpha=0.5$, $\beta=0.5$, 利用式(7), 计算组合权重 W , 可得:

$$W = [0.127\ 0, 0.333\ 8, 0.140\ 0, 0.213\ 7, 0.185\ 5] \quad (12)$$

得到最终指标权重后, 可用式(13)^[14]计算 3 个卫星威胁度。

$$PW = [0.348\ 3, 0.351\ 2, 0.300\ 5] \quad (13)$$

由计算结果可知, 3 颗卫星威胁度的排序为卫星 $B >$ 卫星 $A >$ 卫星 C 。由表 4 数据可以看出: 卫星 B 的平均访问时间最长和平均重访时间最短, 在成像质量和实效性方面更有优势导致威胁程度更高。组合赋权法计算的权重处于层次分析法和熵值法所得权重之间, 调整和均衡了主观和客观的作用和影响, 克服了单一权重的片面性, 使评价结果更合理, 比较符合实际情况。

5 结束语

光学成像卫星在现代战争中能够提供大量的情报数据, 有必要对其威胁度进行评估。通过分析光

学成像卫星应用效能, 选择了侦察质量、覆盖能力、时效性等因素, 建立了由分辨率、水平定位精度、成像区域面积、平均访问时间和平均重访时间构成的威胁评估指标。考虑到主观赋权法和客观赋权法都存在一定局限性, 以层次分析法与熵值法 2 种典型的主观和客观赋权法为基础, 进行了组合赋权, 实现了主观意愿和客观公度良好结合。仿真结果显示, 采用该方法所得到的威胁评估结果具有较好的解释性和合理性。

参考文献:

- [1] 张晓南, 王德泉, 杨俊峰. 坦克战场目标威胁评估方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2015, 6(1): 45-48.
- [2] 朱传伟, 金钊, 斗计华. 基于理想点法的海战场目标威胁评估研究[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(3): 22-24, 46.
- [3] 郭辉, 徐浩军, 刘凌. 基于回归型支持向量机的空战目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(1): 123-126.
- [4] 全杰. 弹道导弹目标威胁评估模型和算法[J]. 现代防御技术, 2014, 42(4): 24-30, 79.
- [5] 张安理, 李智, 丰华. 美国预警卫星威胁评估问题研究[J]. 航天电子对抗, 2016, 32(2): 25-28.
- [6] 杨庆, 吉雯龙. 军事卫星威胁评价分析[J]. 装备学院学报, 2014, 25(5): 74-77.
- [7] 沈如松, 张育林. 海洋监视卫星作战效能分析[J]. 系统仿真学报, 2006(3): 531-534.
- [8] 赵宏, 常显奇. 导航定位卫星作战信息支援效能评估方法研究[J]. 指挥技术学院学报, 2001(5): 26-28.
- [9] 张翼, 梁彦刚, 陈磊. 光学成像侦察卫星威胁评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(5): 32-35.
- [10] 何武灿, 廖守亿, 苏德伦. 光学成像侦察卫星威胁特性分析与仿真研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(6): 21-26.
- [11] 刘承承, 李少凯, 张中华. 光学侦察卫星对迷彩伪装目标的威胁评估研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(11): 162-165, 175.
- [12] 郭晓晶, 何倩, 张冬梅. 综合运用主客观方法确定科技评价指标权重[J]. 科技管理研究, 2012, 32(20): 64-67, 71.
- [13] 宋冬梅, 刘春晓, 沈晨, 等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1-9.
- [14] 余滨, 张耀鸿, 余博超. 军事运筹方法与应用[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 2017: 187.