

# 光学成像侦察卫星威胁评估方法\*

张翼,梁彦刚,陈磊,唐国金

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:** 未来作战中地面部队将面临越来越多来自空间的威胁,其中最突出的是侦察卫星威胁。以光学成像侦察卫星为例,进行了卫星威胁评估方法研究。首先探讨了卫星图像品质评价方法和影响因素,建立了侦察卫星对地面目标的检测概率模型,并引入光照、气象、对比度影响因子对检测概率进行修正。在此基础上考虑军事任务需求建立了针对目标尺寸已知情况下的威胁度计算模型,进一步按照目标大小划分威胁等级,给出了卫星威胁等级评价方法,所得到的威胁等级指标可为军事行动提供参考。最后给出了光学侦察卫星威胁评估应用实例。

**关键词:** 光学成像侦察卫星;威胁等级;威胁评估;目标检测概率;图像品质

**中图分类号:** V474.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)05-0032-04

## The threat assessment method of optics imaging reconnaissance satellite

ZHANG Yi, LIANG Yangang, CHEN Lei, TANG Guojin

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The ground forces have to face more and more threat from the space in future operations. The primary threat is coming from reconnaissance satellites. The threat assessment method of optics imaging reconnaissance satellite was studied. The methods to evaluate image quality of remote sensing satellites and the influence factors of image quality were discussed. The ground target discrimination probability model of optics image reconnaissance satellites was formulated, and amended by influence coefficients of illumination, weather and contrast. Taking into account military task, the expressions of threat degree were formulated when target size was given. The threat degree was then divided into several rankings according to the target size to support the military operations decision, and the evaluation method of threat ranking of optics image reconnaissance satellites was presented. Finally, the method was applied to threat evaluation of an optics image reconnaissance satellite, and the result was given.

**Key words:** optics imaging reconnaissance satellite; threat ranking; threat assessment; target discrimination probability; image quality

从20世纪90年代开始,空间卫星系统从战略、战役和战术三个层次全面介入联合作战。陆海空传统作战将向陆、海、空、天和电磁空间发展,地面陆海空部队必然受到来自空间的威胁,未来战争指挥员必须关注防天作战。空间卫星系统对地面部队的威胁可分为侦察、导航、通信等威胁,每种威胁所影响的对象、工作原理均存在差异,需要分别研究,本文以光学成像侦察卫星为例对威胁评估方法进行探讨。

光学成像侦察卫星信息获取的效果受到时间、空间、轨道特性、载荷能力、气象、光照等因素的影响,因此侦察卫星威胁判断不单纯是经过作战区域上空的问题,还需要综合考虑影响其侦察效果的其他多种因素。这些因素信息量大,要使联合作战指挥员了解应对卫星威胁,需要将这些信息进行精简综合,形成便于使用的信息。为此本文提出威胁等级的概念,以便在充分掌握卫星

情报和战场环境的基础上,对卫星威胁进行准确评估,这样指挥员可以根据各过顶卫星的威胁等级,采取相应的规避措施。光学侦察卫星对地侦察效果集中体现为卫星的成像品质,本文首先对遥感图像品质评价方法进行综述,然后基于面向任务的表征方法建立光学侦察卫星威胁评估模型,给出卫星威胁度和威胁等级的计算方法。

### 1 光学侦察卫星图像品质评价方法

成像侦察卫星通过生成遥感图像实现对地面目标的监视与侦察,因而侦察效果体现为图像品质的好坏。表征遥感图像品质的方法主要包括面向任务的表征、基于成像系统性能的表征和基于图像统计特性的表征等<sup>[1]</sup>。面向任务的图像品质表征直接反映了遥感图像的应用价值,美国的国家图像解译度评价标准(National Imagery Interpretability Rating Scales, NIIRS)是这种方法

\* 收稿日期:2012-01-25

作者简介:张翼(1975—),男,云南盐津人,讲师,在职博士生,E-mail:zhangyi@263.net

的典型代表<sup>[2-6]</sup>。此外,如目标发现、识别和确认概率也属于面向任务的图像品质表征<sup>[5]</sup>。基于成像系统性能的图像品质表征是应用成像系统的性能间接表征图像品质的方法,一般包括图像辐射品质(如动态范围、信噪比 SNR 等)、几何品质(如几何畸变、几何相关性、谱段配准精度等)和分辨率等。基于图像统计特性的图像品质表征是应用二维图像矩阵各元素的数字量值作统计运算得出的统计量表征图像品质的方法,这些统计量主要有列信噪比、广义噪声、灰度均值、灰度方差、信息熵、对比度、图像品质度量(Image Quality Measure, IQM)等。就侦察卫星威胁评估而言,主要关心其应用价值,因此本文主要讨论面向任务的图像品质表征方法。

## 2 光学侦察卫星威胁评估模型

成像侦察卫星的威胁程度可以用卫星获取目标信息的能力即遥感图像的品质来表示。在美国国家图像解译度评价标准 NIIRS 基础上,可以采用通用像质方程(General Image Quality Equation, GIQE)对侦察卫星系统的能力进行预测,即利用卫星系统的物理参数来预测该系统提供图像的 NIIRS 等级。该方程基于大量实际图像开发,综合考虑了卫星遥感系统各个环节的影响,但需要知道遥感系统的分辨率、调制传递函数(MTF)和信噪比 SNR 等物理参数,同时对一些极端成像条件(如气象、光照)等的影响考虑不足。另一种面向任务的图像品质表征是采用成像系统对目标的检测概率来表示,检测的概念包括发现、识别和辨认三种不同能力等级。其中发现主要是指判断背景中是否有目标;识别是指检测到目标存在后,进一步判断目标是什么,如目标是飞机、坦克等;辨认指能确定目标具体的型号,如某型坦克。检测概率表示方法既可以考虑探测系统特性和目标特性,同时能够引入气象和光照条件的影响,目前用得较多的是 Johnson 准则<sup>[5]</sup>。

### 2.1 侦察卫星对目标的检测概率计算

20 世纪 50 年代,Johnson 根据大量的实验得到目标检测概率模型,经过补充修正后的模型如下:如果要得到 50% 的检测概率,需要包含在目标特征尺寸内的线对数目  $N_{50}$  为 1;如果已知包含在目标特征尺寸内的线对数目  $N$ ,则可通过目标传递概率函数 TTPF 计算得到成像系统对目标的检测(发现、识别、辨认)概率。

$$P_N = \text{TTPF} = \frac{(N/N_{50})^{2.7+0.7(N/N_{50})}}{1 + (N/N_{50})^{2.7+0.7(N/N_{50})}} \quad (1)$$

式中  $P_N$  为检测概率, $N_{50}$  为检测概率为 50% 时的跨越目标的线对数目。Johnson 通过试验确定了执行不同级别检测任务所需要的目标跨越线对数目,发现、识别和辨认任务的目标检测判据如表 1 所示,该判据所对应的检测概率为 50%,从而通过查表可确定  $N_{50}$ 。其中一维的描述对应跨越目标最小尺寸的线对数,二维的要求对应跨越目标的特征尺寸的线对数,二维判据较一维判据更为常用。

表 1 目标检测判据

任务	跨越最小尺寸的	跨越特征尺寸的
	一维线对数	二维线对数
发现	1.0	0.75
识别	4.0	3.0
辨认	6.4	6.0

对于二维目标,特征尺寸为目标宽度与高度乘积的平方根,可通过式(2)计算得到。对于目标形状不规则的情况,可将目标考虑为一个轮廓,用轮廓面积的平方根作为特征尺寸更为准确。

$$d_c = \sqrt{W_T H_T} \quad (2)$$

侦察卫星对目标的检测概率可通过式(1)计算得到, $P_N$  和跨越目标特征尺寸的线对数  $N$  密切相关, $N$  体现了卫星实际可分辨能力,由于分辨率是卫星探测能力的直观体现,线对数  $N$  可通过地面采样距离 GSD 计算得到<sup>[5]</sup>。

$$N = \frac{d_c}{2\text{GSD}} \quad (3)$$

GSD 是探测器单元或像元大小在地面的投影,代表卫星的地面分辨率,对于常用的扫描型遥感器,GSD 可通过下式计算<sup>[7]</sup>。

$$\text{GSD} = \frac{p/f}{\cos\theta} R \quad (4)$$

式中, $p$  是像元间隔, $f$  是焦距长度, $R$  是卫星和目标斜距, $\theta$  为侧视角。 $p$  和  $f$  是卫星遥感器固有特性, $R$  和  $\theta$  可通过卫星与地面目标的位置关系实时解算。这样,就可以获得不同时刻侦察卫星对不同尺寸地面目标可能的检测概率  $P_N$ 。

上述计算过程中只考虑了目标尺寸和卫星地面分辨率以及时空关系的影响,卫星的成像质量还受到成像条件的影响,因此引入光照、气象、对比度影响因子对检测概率  $P_N$  进行修正<sup>[8]</sup>。

$$P'_N = f_a f_m f_c P_N \quad (5)$$

式中, $f_a$  为光照影响因子,和 CCD 相机曝光量有关; $f_m$  为气象影响因子,由探测时刻的云量等级决定; $f_c$  为对比度影响因子,由景物和背景的反射特性决定。

### 2.2 侦察卫星威胁等级划分

根据以上目标检测概率计算模型,当已知卫星侦察载荷的性能指标参数、气象与光照条件,给定地面目标位置及尺寸大小和威胁分析时间段,通过卫星轨道预报可得到卫星过境时的各种时空参数,然后可计算得到侦察卫星对该地面目标的探测情况。

根据卫星对目标的检测概率可以对卫星的威胁进行定量计算,由于卫星的目标检测能力分为发现、识别和分辨等不同等级,进行卫星威胁分析时具体依据何种能力等级和军事任务需求有关,因此侦察卫星对地面系统的威胁程度可用下式表示。

$$T = \omega_d P'_{N-d} + \omega_r P'_{N-r} + \omega_i P'_{N-i} \quad (6)$$

式中,  $T$  表示卫星威胁度;  $P'_{N-d}$ ,  $P'_{N-r}$ ,  $P'_{N-i}$  分别为对目标的发现、识别、辨认概率,由侦察卫星对目标的检测概率计算模型得到;  $\omega_d, \omega_r, \omega_i$  为三种能力对应的权重,由军事任务确定,权重体现了军事行动中侦察目标的防护等级需求。

检测概率计算中需要知道目标大小,因此卫星威胁度与侦察目标大小密切相关,可用于已知具体目标的情况下进行威胁分析。当具体目标情况不清楚,要对卫星过境时的威胁情况进行预报时,采用威胁度指标则无法有效实现。此时可借鉴 NIIRS 像质等级概念采用卫星威胁等级进行威胁预报。

这里按照典型目标特征尺寸大小划分威胁等级,认为当卫星星座以 50% 概率检测到目标(威胁度达到 50%)时,即对军事行动构成威胁。表 2

给出了五个等级情况下的一种威胁等级的划分方法,各等级能力逐级递进,如,当卫星能有效检测特征尺寸 100m 及其以上目标时,认为其威胁等级为 1 级,能有效检测特征尺寸 50m 及其以上目标时,认为其威胁等级为 2 级,以此类推。

表 2 威胁等级划分  
Tab. 2 Threat ranking

威胁等级	威胁描述
0 级	卫星无法获取地面目标信息或完成目标检测任务
1 级	有效检测大型目标(特征尺寸 100m 以上)
2 级	有效检测中大型目标(特征尺寸 50m 以上)
3 级	有效检测中型目标(特征尺寸 10m 以上)
4 级	有效检测小型目标(特征尺寸 5m 以上)
5 级	有效检测极小型目标(特征尺寸 1m 以上)

### 3 侦察卫星威胁评估实例

下面以  $T$  地区(120°E, 40°N, 0.00m)为例,分析某光学侦察卫星在一天内的威胁情况,设该卫星探测器像元尺寸 12 $\mu$ m, 焦距 10m, 初始历元参数为:历元时刻 1 Aug 2010 00:00:00UTCG, 半长轴 6959.64km, 偏心率 0.0143, 轨道倾角 97.2°, 升交点赤经 319°, 近地点幅角 30°, 真近点角 40°。取威胁预报时间段为 1 Aug 2010 00:00:00UTCG 到 2 Aug 2010 00:00:00UTCG。经过分析计算,可得到该卫星对  $T$  地区的过境情况预报数据如表 3 所示。

表 3 卫星过境情况预报

Tab. 3 Prediction of satellite passing time

序号	起始时间(UTCG)	终止时间(UTCG)	持续时间(s)
1	1 Aug 2010 03:27:00.433	1 Aug 2010 03:36:25.652	565.208
2	1 Aug 2010 05:01:03.303	1 Aug 2010 05:14:02.135	778.832
3	1 Aug 2010 06:37:49.222	1 Aug 2010 06:46:19.106	509.884
4	1 Aug 2010 14:18:46.410	1 Aug 2010 14:23:26.024	279.614
5	1 Aug 2010 15:49:55.426	1 Aug 2010 16:01:07.909	672.482
6	1 Aug 2010 17:27:05.086	1 Aug 2010 17:35:21.847	496.761

可知,该卫星在一天中共有六次过境,其中前三次在  $T$  地区当地时间的白天过境,后三次在晚间过境。对于光学成像侦察卫星而言,只有白天可对地侦察,晚间不构成威胁。下面采用以上基于检测概率的威胁评估模型计算卫星威胁情况。

考虑气象和对比度为理想情况,取  $f_m = 1, f_c = 1$ , 计算得到不同检测任务下卫星对  $T$  地区的威

胁等级变化曲线如图 1 所示,当  $\omega_d = 1, \omega_r = 0, \omega_i = 0$  时对应发现任务,当  $\omega_d = 0, \omega_r = 1, \omega_i = 0$  时对应识别任务,当  $\omega_d = 0, \omega_r = 0, \omega_i = 1$  时对应辨认任务。

从卫星威胁等级变化曲线可以看出,卫星在过境的前三个时段会对地面军事行动构成威胁,其中第一个时段和第三个时段由于卫星与  $T$  地

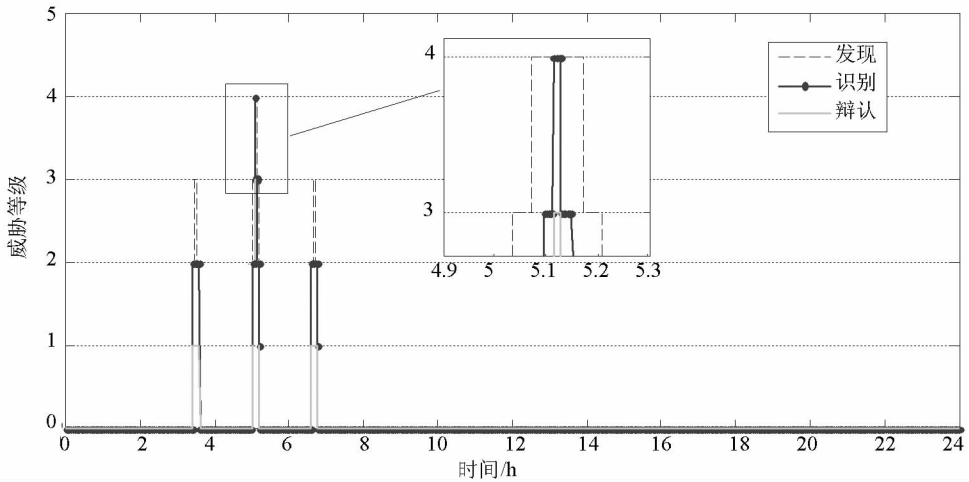


图1 卫星威胁等级随时间变化曲线

Fig. 1 Threat ranking curve of the satellite

区距离远,侧视角大,因此威胁等级比第二个时段要低。而随着检测任务级别的提升,卫星的威胁等级有所降低,当只考虑对目标辨认能力时,卫星在第一个时段和第三个时段威胁等级降为1级,威胁程度较低。

#### 4 结束语

卫星图像品质决定了成像侦察卫星的侦察效能,从而也决定了侦察卫星对我军事设施和军事活动的威胁程度。本文基于遥感系统目标检测概率模型建立了光学侦察卫星威胁评估模型,给出了考虑光照、气象和对比度影响因子的检测概率计算方法,并通过引入不同级别检测任务的权重系数建立了针对特定侦察目标的威胁度计算模型,针对目标较多、特性各异的情况进一步提出采用威胁等级进行卫星威胁描述,建立了卫星威胁等级分析及预报模型。威胁度和威胁等级的提出有助于战场指挥员从繁杂的战场情报信息中准确、快速地进行光学侦察卫星的威胁判断,从而采取相应的规避措施。

#### 参考文献 (References)

- [1] 陈世平. 景物和成像条件对遥感图像品质的影响[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(1): 1-10.  
CHEN Shipin. The effects on remote sensing image quality from

- scenes and imaging conditions [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] Leachtenauer J C, Driggers R G. Surveillance and reconnaissance imaging systems. modeling and performance prediction [M]. Boston, London: Artech house publishers, 2001.
- [3] Leachtenauer J C, Malila W, Irvine J M, et al. General image-quality equation; GIQE [J]. Applied Optics, 1997, 36(32): 8322-8328.
- [4] Irvine J M. National imagery interpretability rating scales (NIIRS): Overview and Methodology [C]//Proceedings of SPIE, 1997, 3128: 93-103.
- [5] Griggers R G, Kelley M, Cox P. National imagery interpretation rating system (NIIRS) and the probabilities of detection, recognition, and identification [C]//Proceedings of SPIE, 1997, 2743: 349-361.
- [6] 时红伟, 陈世平. 一种面向用户任务需求的遥感图像质量标准 - NIIRS [J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(3): 30-35.  
SHI Hongwei, CHEN Shipin. A remote sensing image quality standard orienting to user's mission requirements - NIIRS [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2003, 24(3): 30-35. (in Chinese)
- [7] 张占睦, 芮杰. 遥感技术基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
ZHANG Zhanmu, RUI Jie. Fundamentals of remote sensing technology [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [8] 沈如松, 宋贵宝, 吕卫民, 等. 成像侦察卫星识别目标能力分析 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(增刊2): 34-37.  
SHEN Rusong, SONG Guibao, LV Weimin, et al. Capabilities of identifying targets of imaging reconnaissance satellites [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(Suppl. 2): 34-37. (in Chinese)