

星载光电成像系统探测能力分析与研究

张 颖 牛燕雄 杨 露 牛海莎 许 冰 李继扬 吕建明 李建平 刘雯文 张 超

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 星载光电成像系统可实现远距离空间目标的探测与识别,而探测距离是系统的主要性能参数。以空间目标反射太阳光为基础,建立了系统极限探测距离的数学物理模型,分析了影响探测距离的因素,对极限探测距离与太阳光入射方向、光学系统的有效通光口径、探测器的信噪比阈值以及曝光时间的定量关系进行了数值模拟研究。研究表明:增大光学系统的有效通光口径可实现系统探测能力的显著提升;当信噪比阈值和太阳光入射角同时变化时,降低信噪比阈值可有效提高系统的探测能力,并且此时太阳光入射角的变化对系统极限探测距离的影响较小。

关键词 成像系统;星载光电系统;探测能力;极限探测距离;建模与仿真

中图分类号 O432.2; V474.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0111004

Analysis and Study on Detection Capability of Satellite Photoelectric Imaging System

Zhang Ying Niu Yanxiong Yang Lu Niu Haisha Xu Bing Li Jiyang Lü Jianming
Li Jianping Liu Wenwen Zhang Chao

(Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University,
Beijing 100191, China)

Abstract Satellite photoelectric imaging system can detect and recognize target at long distance. Maximum detection distance is its main property parameter. Based on the sun retro-reflection light of space target, several factors including sun light incidence angle, effective aperture of optics system, detector's signal-to-noise ratio (SNR) threshold and exposure time are analyzed to provide the mathematical model of the maximum detection distance. The results show that the limitation detection distance improves notly when the optics system effective aperture increases; the decrease in SNR threshold can improve the detection capability markedly and sun light incidence angle change has little influence when SNR threshold and sun light incidence angle vary simultaneously.

Key words imaging systems; satellite photoelectric system; detection capability; maximum detection distance; modeling and simulation

OCIS codes 110.2990; 000.2170; 000.4430

1 引 言

随着航天技术的发展与应用,空间目标信息的获取日趋重要,而天基空间目标监视系统是空间探测的重要发展方向。星载光电成像系统是天基空间目标监视系统的重要组成部分,可对重要空间目标进行精确探测和跟踪,并获得目标的尺寸、形状、轨道参数等信息,是空间态势感知的重要手段,因此得

到了广泛关注。

世界各国都十分重视星载光电成像系统的研究与应用。美国早在 1996 年就发射了中段实验卫星 MSX,该卫星搭载了 3 种光学遥感器,覆盖紫外到超长波红外谱段,MSX 卫星于 2008 年 6 月退役,卫星上搭载的可见光传感器 SBU 现已装备部队;2002 年美国部署了“天基空间监视系统”(SBSS)研究计

收稿日期: 2013-07-08; **收到修改稿日期**: 2013-08-31

作者简介: 张 颖(1989—),女,硕士研究生,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: ZYbeijing_2007@126.com

导师简介: 牛燕雄(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: niuyx@buaa.edu.cn

划,以实现空间目标的发现、锁定及跟踪;加拿大、日本、英国也相继在天基空间目标探测方面进行了研究^[1-2]。国内也在开展该方向的研究,蓝朝桢^[3]定量研究了系统参数对系统的极限探测星等的影响,卢栋等^[4]对系统的探测距离进行了仿真研究,孟庆伟等^[5]对可见光相机的探测能力进行了评估。但都未涉及到系统极限探测距离与各影响因素间定量关系的研究。

本文以空间目标可见光反射特性为基础,建立了系统极限探测距离的数学物理模型,数值模拟研究了极限探测距离与影响因素间的定量关系,得到了系统极限探测距离随各影响因素变化的规律,并提出了提高极限探测距离的方法,结果可为星载光电成像系统的设计及系统性能预测提供理论依据。

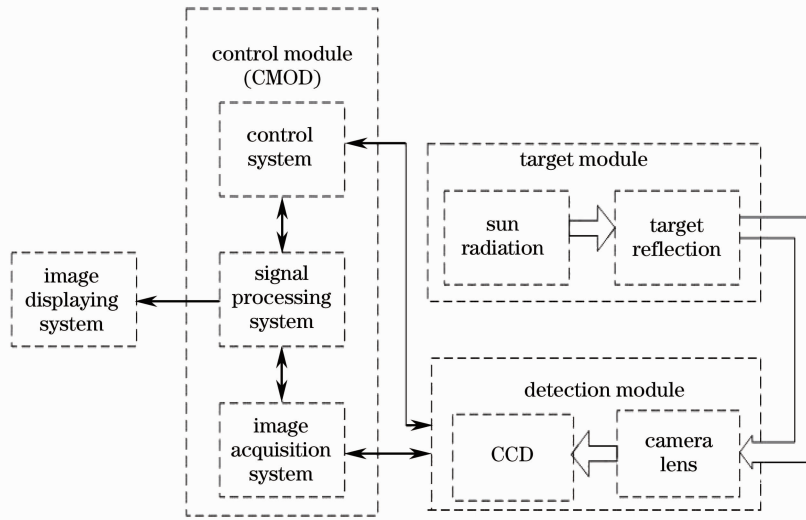


图1 星载光电成像系统原理图

Fig. 1 Schematic of satellite photoelectric imaging system

2.1 太阳辐照特性建模

CCD探测器接收的光能量来自目标反射的太阳光,也就是说,系统能量来源是太阳可见光谱段的辐射。一般认为太阳是绝对温度为5900 K的黑体,由普朗克黑体辐射公式,在一定光谱范围内的辐出度可用公式表示为

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \right], \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, k 为玻尔兹曼常数, T 为太阳的黑体温度, λ 为波长。

太阳对目标的单色辐照度 $E(\lambda)$ 为

$$E(\lambda) = \frac{M(\lambda) \cdot A}{4\pi R^2}, \quad (2)$$

式中 A 为太阳表面积, R 为日地平均距离。

在可见光 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波段,太阳对空间目标

2 星载光电成像系统组成

星载光电成像系统由光电成像系统和图像采集处理系统组成,其工作原理如图1所示。太阳辐射能量在空间分布,使空间目标的部分或全部区域被照亮。由于目标表面粗糙度、介电常数以及包覆材料的不同,不同的目标表面表现出不同的反射特性,反射回波携带着各自目标的光度信息在空间传输一段距离后进入探测系统,当电荷耦合器件(CCD)探测器的焦平面接收到反射回波后,把他转换为携带图像信息的电信号,然后图像采集与处理单元对电信号进行采集,并通过一定的图像处理算法对图像进行处理,进而实现目标的探测与识别。

的辐照度为

$$M_1 = \int_{0.4}^{0.7} E(\lambda) d\lambda = 550 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (3)$$

2.2 极限探测距离计算

从太阳的辐射特性出发,结合能量的传播特性建立系统极限探测距离的数学物理模型,该流程如图2所示。

2.2.1 回波信号计算

如图3所示,入射到空间目标表面的太阳光,经目标反射后,在距离目标 L 处的辐照度为

$$E_1 = \frac{\rho M_1 S_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{L^2}, \quad (4)$$

式中 S_1 为空间目标的有效反射面积, θ_1 为太阳光入射方向与目标表面法线方向的夹角, θ_2 为探测器和目标的连线与空间目标法线方向的夹角, ρ 为目标

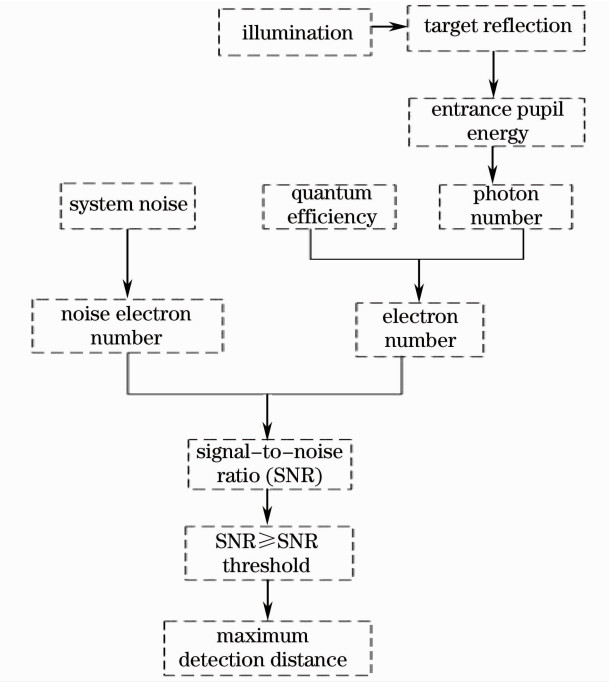


图 2 极限探测距离建模流程图

Fig. 2 Maximum detection distance model flowchart

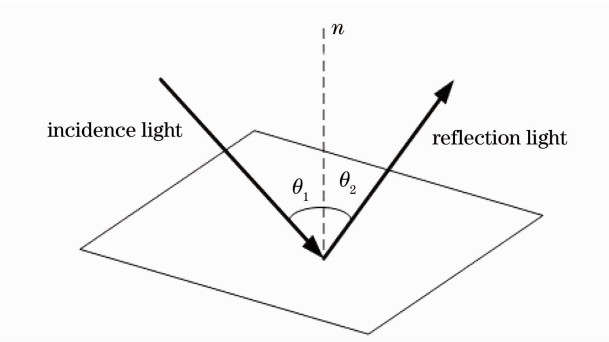


图 3 目标反射特性示意图

Fig. 3 Target reflection characteristics

表面的平均反射率, L 为目标与探测系统的距离。

则空间目标反射的光信号经过入瞳处的光能量为^[4]

$$\phi = SE_1 \tau_0 = \frac{S_0 M_1 S_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \tau_0}{L^2}, \quad (5)$$

式中 S 为光学系统的入瞳面积, $S = \pi(D/2)^2$, D 是光学系统的有效通光口径; τ_0 为光学系统的光谱透射率。

探测器的每个像元响应的光电子数为

$$N_s = \frac{\eta \tau_0 \phi}{(hc/\bar{\lambda})n}, \quad (6)$$

式中 $\bar{\lambda}$ 为波长的平均值, t_0 为曝光时间, η 为平均量子效率, n 为目标光斑在探测器上所占地元数, ϵ 为像元填充因子。

2.2.2 系统噪声计算

探测器在对空间目标探测时,噪声来源有:探测

背景噪声、光子噪声、探测器噪声、驱动电路、温度环境等固有噪声和引入噪声等。本文只考虑主要噪声,即光子噪声、探测器暗电流噪声和探测背景噪声^[4-7]。

探测背景噪声由光子到达速率的随机波动引起,以星空背景和地球临界背景等杂散光产生的光电子数为主,计算公式为

$$n_b = \sqrt{N_b}, \quad (7)$$

式中 N_b 为背景噪声产生的光电子数。

目标辐射光子噪声,又称散粒噪声,由目标入射光子流的随机波动产生,属于白噪声,计算公式为

$$n_s = \sqrt{N_s}, \quad (8)$$

式中 N_s 为目标辐射产生的光电子数。

暗电流噪声主要是由电荷载流子热运动导致的随机振动引起的。该噪声是一种白噪声,服从泊松分布,其等值电子数等于暗电流产生的电子数的平方根:

$$n_d = \sqrt{N_d}, \quad (9)$$

式中 N_d 为暗电流产生的光电子数。

以上提及的空间目标成像系统中的各种噪声是相互独立的,因此,系统总噪声的方差是所有噪声贡献的方差的总和,其计算公式为

$$N_n = \sqrt{n_b^2 + n_s^2 + n_d^2} = \sqrt{N_b + N_s + N_d}. \quad (10)$$

2.2.3 极限探测距离计算

信噪比(SNR)是衡量系统探测能力的指标,一般以电子数为单位定义信噪比,系统的信噪比为

$$SNR = \frac{N_e}{N_{\text{noise}}} = \frac{N_s}{\sqrt{N_b + N_s + N_d}}, \quad (11)$$

式中 N_e 为在一定时间内接收到的信号电子数, N_{noise} 为同一时间内接收到的总噪声电子数。

为使探测器能从噪声信号中提取出目标信号,在对空间目标进行成像探测时系统的信噪比必须大于等于由探测概率和虚警概率所确定的信噪比阈值 T_{sn} , 即

$$\frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_d + N_b}} \geq T_{sn}, \quad (12)$$

经过整理得

$$N_s \geq \frac{T_{sn}^2 + \sqrt{T_{sn}^4 + 4(N_b + N_d)T_{sn}^2}}{2}. \quad (13)$$

由(6)式可得目标在探测器焦平面上单个像元得到的电子数 N_s , 代入到(13)式整理得到入瞳处的光能量 ϕ 的表达式如下:

$$\phi \geq \frac{n(hc/\lambda)(T_{sn}^2 + \sqrt{T_{sn}^4 + 4(N_b + N_d)T_{sn}^2})}{2\eta t_0} \quad (14)$$

将(5)式代入(14)式得到系统极限探测距离与系统各参数间的关系式为

$$L \leq \sqrt{\frac{\pi D^2 S_1 \eta t_0 \tau_0 \rho M_1 \lambda \cos \theta_1 \cos \theta_2}{2hc n [T_{sn}^2 + \sqrt{T_{sn}^4 + 4(N_d + N_b)T_{sn}^2]}} \quad (15)$$

3 系统探测能力分析

分析(15)式可知,系统的极限探测距离受太阳光入射方向,光学系统的有效通光口径、透射率、曝光时间以及探测器的信噪比阈值、平均量子效率、暗电流噪声、背景噪声等参数的影响。下面利用(15)式重点对太阳光入射方向、光学系统的有效通光口径、曝光时间、探测器的信噪比阈值进行数值模拟研究。

不考虑相机视场角,设定典型参数如下^[7-9]:目标表面的平均反射率 $\rho=0.3$,空间小目标的有效尺寸为 $80\text{ cm} \times 80\text{ cm}$,有效反射面积为 0.64 m^2 ,并且太阳光线入射到目标表面并经目标反射时, $\theta_1=\theta_2$,光学系统的有效通光口径 $D=0.15\text{ m}$,光学透射率 $\tau_0=30\%$,曝光时间 $t_0=0.1\text{ s}$,平均量子效率 $\eta=0.6$,像元填充因子 $\epsilon=0.4$,平均波长 $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$,暗电流产生的光电子数 $N_d=18\text{ s}^{-1}$,背景噪声产生的光电子数为 200 s^{-1} ,信噪比阈值 $T_{sn}=3$,根据Johnson准则,当目标在探测器上成像两个像元时,系统能够探测目标,因此目标光斑在探测器上所占像素数 $n=2$ 。

3.1 有效通光口径对系统探测能力的影响

通常光学系统的有效通光口径越大,系统的集光能力也就越强,系统的灵敏度越高^[10],从这个层面分析口径越大越好,但是实际口径增大时,探测器饱和等会导致对比度的损失^[10-11],因此有效通光口径需合理选择。根据(15)式,可得到不同光线入射角条件下,极限探测距离 L 与光学系统有效通光口径 D 的关系如图4所示。

由图4可知,当入射角一定时,随着 D 的增大, L 呈线性增长。当入射角为 0° ,即光线垂直入射到物体表面时, D 每增加 10 mm , L 增加 1252.8 km 。当 D 一定时, L 与入射角 θ 呈负相关。当 D 较小时,随着 θ 的减小, L 的变化不明显。但当 D 大于 0.15 m 后,随着入射角的增大,系统的极限探测距

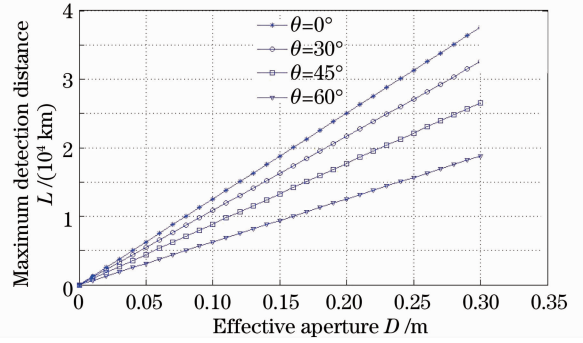


图4 极限探测距离与有效通光口径的关系

Fig. 4 Relationship between limitation detection distance and effective aperture

离显著减小。 $D=0.2\text{ m}$,入射角为 60° 时, L 为 12528 km ,入射角为 0° 时, L 为 25055 km 。因此,增大光学系统的有效通光口径,可以有效提高系统的极限探测能力,但易受太阳光入射方向的影响,造成系统探测的不稳定。

3.2 曝光时间对系统探测能力的影响

曝光是使照相机或感光纸在一定条件下感光的过程。为定量研究系统极限探测距离随曝光时间的变化,对不同曝光时间下系统的极限探测距离进行了仿真研究。

仿真结果如图5所示,在入射角一定时,系统的极限探测距离 L 总体上随曝光时间 t_0 逐渐增大,当曝光时间小于 0.5 s 时, L 增长显著,此阶段可以通过改变曝光时间显著提升系统的探测能力。当 t_0 继续增大时,探测距离增幅减小,最终曲线趋于平缓。曝光时间确定后,光线入射角的不同也会对 L 产生影响。当 t_0 较小时,入射角的变化对 L 影响不显著,随着 t_0 的增大不同入射角对应的 L 差距显著,说明此时太阳光入射角对系统探测能力产生显著影

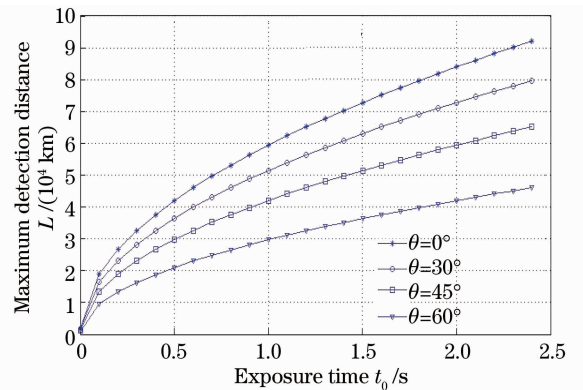


图5 极限探测距离与曝光时间的关系

Fig. 5 Relationship between limitation detection distance and exposure time

响,因此在一定范围内可以通过延长曝光时间来提升系统的探测能力。

3.3 CCD 信噪比阈值对系统探测能力的影响

对于系统而言,仪器的信噪比越高,系统的探测能力越强,而信噪比阈值是 CCD 探测器实现信号探测的重要指标。为定量分析 CCD 探测器的信噪比阈值对探测距离的影响,通过改变(15)式中 T_{sn} 的值进行仿真研究^[12]。

在不同光线入射角条件下,系统极限探测距离 L 随信噪比阈值 T_{sn} 变化的曲线如图 6 所示。图 6 表明,在入射角 θ 一定时,随着 T_{sn} 的增大, L 逐渐减小。当 T_{sn} 介于 0.5~3 之间变化时,极限探测距离急剧减小, T_{sn} 为 0.5 时 L 值为 48016 km,而当 T_{sn} 取值为 1 时, L 为 33666 km。随着信噪比阈值的继续增大,探测距离减小的速度减慢,最终的变化趋势趋于平缓,此时信噪比阈值不是影响探测距离的关键因素。

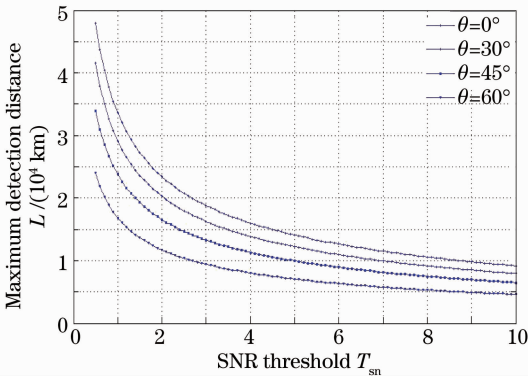


图 6 极限探测距离与信噪比阈值的关系

Fig. 6 Relationship between limitation detection distance and SNR threshold

当信噪比阈值一定时,极限探测距离 L 与入射角 θ 之间呈负相关。进行参数选择时,信噪比阈值一般都在 3 以上,此时虽然 θ 对 L 有一定影响,但作用不明显。因此,减小信噪比阈值可以显著改善系统的探测能力,且在一定范围内变化时受太阳光入射角的影响较小。

3.4 系统探测能力评估

进行系统设计及参数选择时,需要考虑的因素是多方面的,因此对信噪比阈值与入射角、曝光时间以及有效通光口径与入射角同时变化时对系统探测能力的影响规律进行了分析,结果如图 7~9 所示。为实现特定距离目标的探测,参照图 5~9 的结果进行参数的匹配选择,寻找最优解,进而实现系统优化设计。

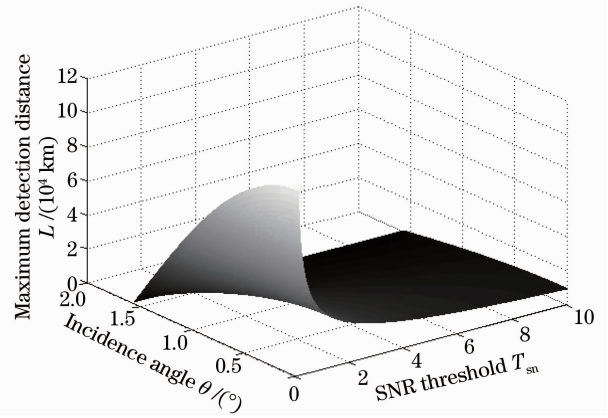


图 7 信噪比阈值与入射角

Fig. 7 SNR threshold and incidence angle

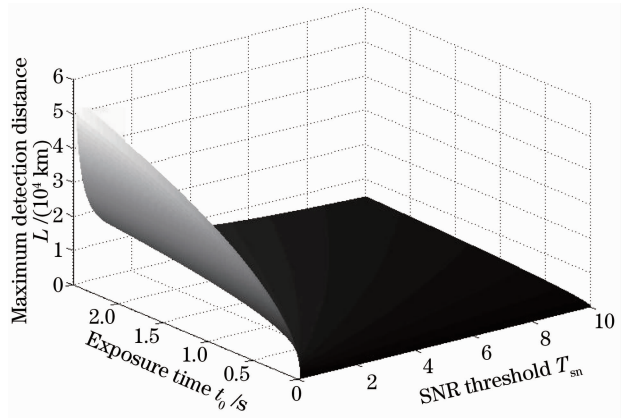


图 8 信噪比阈值与曝光时间

Fig. 8 SNR threshold and exposure time

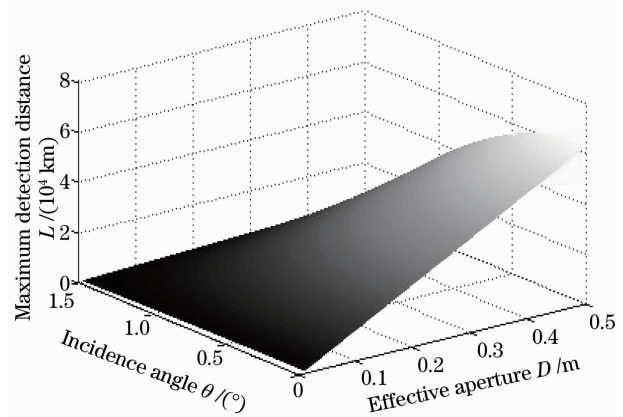


图 9 有效通光口径与入射角

Fig. 9 Effective aperture and incidence angle

4 结 论

以极限探测距离为指标对系统探测能力进行了研究,建立了系统极限探测距离的数学物理模型,定量分析了太阳光入射方向、光学系统的有效通光口径、CCD 探测器信噪比阈值以及曝光时间对系统探

测能力的影响。由此得出,通过增大光学系统的有效通光口径和降低探测器的信噪比阈值的方法可实现系统探测能力的显著提升。但光学口径增大到某一值后,太阳光入射角对系统的探测能力的影响显著提升,此时可通过改进信噪比阈值的方法实现探测能力提升,并且降低太阳光入射方向的影响。仿真结果和数据可以为光学器件的选择以及系统性能评估提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 Cui Xiaoxiao. Space based space surveillance system outline of the U. S. [J]. *International Space*, 2010, (7): 38-43.
崔潇潇. 美国天基空间目标监视系统概况 [J]. *国际太空*, 2011, (7): 38-43.
- 2 Wang Jiejuan, Yu Xiaohong. The current development and characteristics analysis of foreign space based space surveillance [J]. *J Academy of Equipment Command & Technology*, 2006, 17(4): 33-37.
王杰娟, 于小红. 国外天基空间目标监视研究现状与特点分析 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2006, 17(4): 33-37.
- 3 Lan Chaozhen. Modeling and Detecting Capability Analysis of Space-Based Space Object Optical Observation System [D]. PLA Information Engineering University, 2009.
蓝朝桢. 空间目标天基光学观测系统建模与探测能力分析 [D]. 解放军信息工程大学, 2009.
- 4 Lu Dong, Zhang Zhanyue, Hao Dagong, *et al.*. Simulation and analysis of detection ability for space-based optical camera [J]. *OME Information*, 2011, 28(10): 30-43.
卢 栋, 张占月, 郝大功, 等. 天基可见光相机探测距离仿真分析 [J]. *光机电信息*, 2011, 28(10): 30-43.
- 5 Meng Qingwei, Zhang Wei, Long Funian. Analysis on detection ability of space-based space target visible camera [J]. *Infrared*

- and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2079-2084.
孟庆伟, 张 伟, 龙夫年. 天基空间目标可见光相机探测能力分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2079-2084.
- 6 Liu Yunmeng, Chai Jinguang, Wang Xuhui, *et al.*. Visible characteristics and calculation of detection distance for space target [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(1): 23-26.
刘云猛, 柴金广, 王旭辉, 等. 空间目标可见光特性与探测距离估计 [J]. *红外技术*, 2009, 31(1): 23-26.
- 7 Zhang Keke, Fu Danying, Zhou Feng. The study on detection ability calculation method of space object visible camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(4): 22-26.
张科科, 傅丹赢, 周 峰. 空间目标可见光相机探测能力理论计算方法研究 [J]. *航天返回与遥感*, 2006, 27(4): 22-26.
- 8 Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on with cosine scattering distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 593-598.
汪洪源, 张 伟, 王治乐. 基于高次余弦散射分布白空间卫星可见光特性 [J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 593-598.
- 9 J S Darryl, A G Stephen, K W Deboran. Photometric measurements of deep space satellites [C]. *SPIE*, 2000, 4091: 164-182.
- 10 Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based photoelectric system detection ability on space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1178-1182.
张己化, 姚东升, 谈 斌. 地基光电系统空间目标探测因素影响分析 [J]. *光学学报*, 2008, 28(6): 1178-1182.
- 11 Li Bincheng. Optical characteristic analysis of space target [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1989, (2): 21-26.
李斌成. 空间目标光学特性分析 [J]. *光电工程*, 1989, (2): 21-26.
- 12 Pan Haibin, Song Guanghua, Xie Lihua. Research on detection sensitivity of space-based visible sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2935-2940.
潘海斌, 宋广华, 解利军. 天基可见光相机探测灵敏度研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2935-2940.

栏目编辑: 李志兰