

# 非自发光空间目标的可见光探测技术研究

陈荣利<sup>1,3</sup> 韩乐<sup>2</sup> 车驰骋<sup>1,3</sup> 马臻<sup>1,3</sup> 樊学武<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 建立了空间非自发光目标的数学模型,应用经典光学理论研究了目标亮度与目标尺寸、表面特性、观测角、观测距离之间的关系;并推导了探测能力与光学系统参数及曝光时间之间的关系;试验结果验证了模型和计算公式的正确性,可为空间目标探测光学系统的设计提供了设计参考。

**关键词** 空间目标;探测;可见光;星等

**中图分类号** V556.5 **文献标识码** A

## 0 引言

在空间目标中,有约 7% 是人造卫星,其余主要是碎片或残骸. 这些目标的存在,严重威胁空间飞行器的飞行安全,对于新卫星的发射也存在潜在的威胁. 有必要深入研究这些目标的运行轨道特性,以便于采取相应的措施. 美国和俄罗斯都已建立了庞大的地基对空间目标的光电探测系统<sup>[1]</sup>. 目前探测手段有多种,各种方法都有各自的优缺点,本文着重于探讨可见光探测技术. 这些目标本身不发光,依靠太阳的反射光进行探测. 目标能否被探测到,主要取决于目标本身的亮度、探测器性能及曝光时间<sup>[2,3]</sup>. CCD 器件在性能上由于照相底片,尤其是灵敏度,可实时探测及处理,国外已将 CCD 用于卫星观测<sup>[7]</sup>. 本文以人造卫星为代表,深入研究了影响空间目标可见光 CCD 光电探测的各种因素,并给出了试验结果.

## 1 空间目标的数学模型及亮度分析

目前在轨工作的卫星约 796 颗,其中军用卫星 340 颗,包括各种侦察卫星、预警卫星、导航定位卫星、通信卫星和军事气象卫星等. 被探测目标一般距离很远,为典型的点状目标探测. 卫星表面形状复杂,大致可分为长方体、圆柱体和球体三大类. 假定卫星表面为漫反射体,且服从朗伯定律.

目标被太阳光照射,表面的辐亮度按下式计算

$$L_p(\lambda, \theta) = \frac{E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta \rho}{\pi} \quad (1)$$

式中  $L_p(\lambda, \theta)$  为目标表面相应波长的辐亮度值,单位:  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m}$ ;  $E_{\text{sun}}(\lambda)$  为对应波长处的标准太阳辐照度;  $\theta$  为成像时太阳相对目标卫星表面

的入射角;  $\rho$  为被测卫星表面的反射率系数,  $\rho = 0.2 \sim 0.4$ .

从目标到达探测器入瞳处的辐射通量为

$$\phi = \int_{A_{\text{目标}}} \int_{A_{\text{探测}}} L_p(\lambda, \theta) \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{R^2} dA_{\text{目标}} dA_{\text{探测}} \quad (2)$$

探测器入瞳处的辐照度为

$$H = \frac{\phi}{A_{\text{探测}}} = \frac{L_p(\lambda, \theta) \cos \theta_1 \cos \theta_2 A_{\text{目标}}}{R^2} \quad (3)$$

式中  $\theta_1$  为目标表面的法线方向与两表面连线的交角;  $\theta_2$  为探测器入瞳表面的法线方向与目标表面连线的交角,取  $0^\circ$ ;  $R$  为探测器到目标的距离;  $A_{\text{目标}}$  为目标卫星表面有效投影面积;  $A_{\text{探测}}$  为探测卫星入口面积.

对球体目标应用式(1)、(2)和(3),得到球体表面光谱辐照度

$$I = \frac{E_{\text{sun}} \sigma r^2}{\pi} \frac{\pi}{4} [\sin \sigma + (\pi - \sigma) \cos \sigma] \quad (4)$$

目标对相机入瞳处的照度为

$$E_m = \frac{I}{R^2} \quad (5)$$

将式(4)代入(5),并利用普森公式将照度转化为星等数来描述,整理得

$$m = 1.3 - 2.51g\rho + 51gR_i - 51gD - 2.51g \cdot [\sin \sigma + (\pi - \sigma) \cos \sigma] \quad (6)$$

式中  $m$  为目标的星等数,表明了目标得亮度特性,  $R_i$  以 100 km 为单位,  $D = 2r$  为球体直径( $m$ ),  $\sigma$  位相角.

同样可以得出长方体模型和圆柱体模型下目标的星等数计算公式,三者具有相同的形式,其差别在于常数项. 计算还表明对于单位棱长的立方体和内切于该立方体的圆柱体和球体来说,在其他条件相同的情况下,球体目标要稍暗于前两者因此在实际中,多以球体为例进行探测能力分析. 图 1 为直径 1 m 的球体亮度(星等数)与距离和位相角的关系曲线.

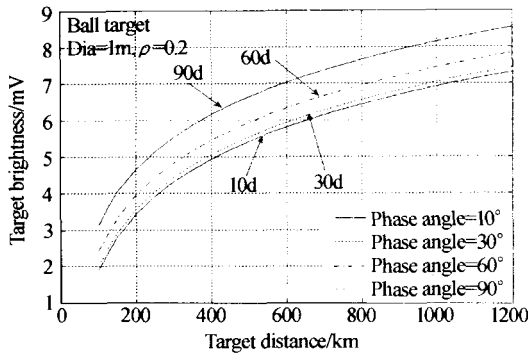


图 1 目标亮度与距离的关系曲线  
Fig. 1 Target magnitude curves with distance

## 2 仪器探测能力分析

在点目标探测情况下,目标细节已不可分辨,但从能量角度分析,只要信号足够强就能探测到目标,即要求信噪比达到探测阈值<sup>[3]</sup>.

点目标照度公式表明,像面照度仅与光学系统口径有关,而与焦距无关<sup>[4]</sup>. 投射到相机入瞳处的光能经过光学系统传输后落在 CCD 探测器的靶面上,根据能量守恒定律可得到

$$E_{\text{总}} = E_m \cdot A \cdot \tau \cdot t \cdot \Delta\lambda \quad (7)$$

式中  $E_m$  为目标在入瞳处的照度,  $E_{\text{总}}$  为探测器上产生的目标辐射总能量,  $\tau$  为透过率,  $\Delta\lambda$  为谱段宽度 (0.1 nm),  $t$  为积分时间 (s),  $A$  为入瞳面积 ( $\text{cm}^2$ ).

为了与第一节用星等数表示目标在相机入瞳处的照度的方法一致,对式 (7) 应用普森公式,得到 CCD 上产生的信号电子数与目标星等数、光学系统有效口径、积分时间、谱段宽度、透过率的关系

$$\lg n_e = -0.4m + \lg A + \lg \Delta\lambda + \lg t + \lg \xi + 2.9 \quad (8)$$

式中  $n_e$  为信号电子数,  $\xi$  为光学系统透过率与 CCD 量子效率的积.

为了提高点目标定位的内插准确度和探测可靠性,光学系统采用像方远心光路,且弥散斑尺寸

为  $2 \times 2$  像元 (80% 能量集中度)<sup>[5,6]</sup>.

根据公式可计算出 CCD 上产生的信噪比

$$\frac{S}{N} = \frac{n_e}{\sqrt{n_e + n_{Dt} + n_m^2}} \quad (9)$$

式中  $n_D$  为 CCD 探测器暗电流噪声,  $n_m$  为 CCD 探测器量子噪声.

信噪比的选择对于探测率有很大的影响. 为了保证系统有的探测率大于 99% 和虚警率小于 0.01, 则信噪比应大于 5<sup>[2,3,9]</sup>, 当然随着检测方法的改进, 可以降低对图像的信噪比要求和平稳性要求<sup>[6]</sup>.

式 (8)、(9) 表明了仪器探测能力与光学系统有效口径、探测器参数及积分时间之间的关系. 图 2 是对于目标亮度 7.5 等星的条件, 系统信噪比与光学系统口径及信噪比的关系曲线.

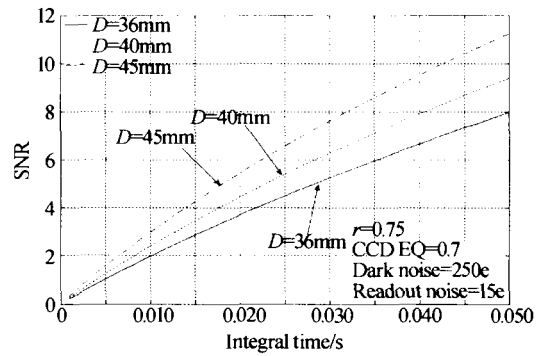


图 2 不同口径下系统积分时间与信噪比的关系  
Fig. 2 SNR curve with integral time on different apertures

## 3 试验验证

紫金山天文台对目标亮度特性模型和公式进行了试验验证, 计算和实测的结果基本吻合, 表明了模型的合理性和计算公式的正确性. 表 1 列出了部分试验结果. 试验结果还表明, 这些模型和算法对空间残片等的分析也是可用的.

表 1 紫金山天文台部分试验结果

国家	卫星	大小/m	轨道	星等	说明
美国	KH-11	15 * 3	半长轴: 6963km 偏心率: 0.041564	5	计算和实测
美国	LACROSSE	18 * 4.5	轨道高度为 670~703 km	2	计算和实测
美国	IRIDIUM	4 * 1.8	780 km	4.5-5	计算和实测

为了验证仪器的探测能力, 国家天文台兴隆站用口径 40 mm 的 PI CCD 相机进行了两次试验. 第一次使用像元尺寸  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$  的 CCD 探测器, 当时天空有薄雾, 月光也较亮, 曝光 100 ms, 在信噪比为 8 的情况下探测到 8 等星; 第二次使用像元尺寸  $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ , 像元数为  $1\text{K} \times 1\text{K}$  的探测器, 当时的月光很小且无灯光污染, 天光很暗, 曝光 40 ms, 在信噪比为 5.8 的情况下探测到 8 等星. 两次试验

结果都表明计算结果与试验结果基本吻合, 证明系统探测能力与光学系统口径及积分时间的关系的表达式可以用来指导系统设计.

## 4 结论

试验证明了空间非自发光目标亮度计算的理论与计算模型的正确性, 以及光学系统参数与系统探测能力之间的关系的正确性. 推导的公式可以

为空间目标探测系统提供设计参考。

需要说明的是:由于模型的表面光学特性假设与实际情况可能存在差异,另外,卫星、空间碎片或残骸的形状与实际模型有差别,因此计算的结果难免存在误差,其精度与模型的近似程度有关。按目前的经验估计,误差在0.5个星等左右。

在此对紫金山天文台吴连大研究员和国家天文台兴隆站的裘予雷研究员的大力配合表示衷心的感谢。

#### 参考文献

- 1 李东源. 国外地基对空间目标光电探测系统浅析. 光电对抗与无源干扰, 2003, (1): 9~11  
Li D Y. *Electro-optic Warfare & radar Passive Countermeasures*, 2003, (1): 9~11
- 2 袁家虎, 高晓东. CCD光电系统噪声受限的探测能力分析. 数据采集与处理, 1998, 13(Z): 79~82  
Yuan J H, Gao X D. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 1998, 13(Z): 79~82
- 3 袁家虎, 张建荣. 导航星敏器探测灵敏度研究. 光电工程, 1999, 26(6): 1~6  
Yuan J H, Zhang J R, et al. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, 26(6): 1~6
- 4 丁旭明, 张禹康, 於崇真. J-196 光电经纬仪大孔径高分辨率光学系统研究. 光子学报, 2002, 31(Z2): 381~384  
Ding X M, Zhang Y K, Yu C Z. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(Z2): 381~384
- 5 卢欣. CCD星敏器光学系统设计. 中国空间科学技术, 1994, 4: 49~53  
Lu X. *Chinese Space Science and Technology* 1994, 4: 49~53
- 6 邢强林, 黄惠明, 熊红生. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究. 光子学报, 2004, 33(7): 893~896  
Xing Q L, Huang H M, Xiong R S. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 893~896
- 7 Mayer G J, MacDonald M J, Pong N S, et al. A CCD photometer camera for satellite observation, AD-A 137~214
- 8 过润秋, 李大鹏, 林晓春. 红外点目标检测的小波变换方法研究. 光子学报, 2004, 33(4): 464~468  
Guo R Q, Li D P, Lin X C. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(4): 464~468
- 9 Star A T, Msx J R. Design parameters driven by targets and backgrounds. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 1996, 17(1): 11~18

## Research on Un-illuminant Space Target Visual Detection Technique

Chen Rongli<sup>1,3</sup>, Han Le<sup>2</sup>, Che Chicheng<sup>1,3</sup>, Ma Zhen<sup>1,3</sup>, Fan Xuewu<sup>1</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710068)

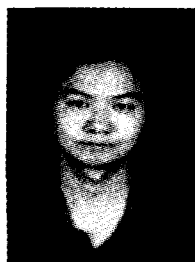
(2 Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094)

(3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Received date: 2005-01-31

**Abstract** In space targets, about 7% of them are manmade satellites; others are space relics or debris. Only rely on sun shining can these targets be detected because all of them do not illuminant themselves. They are so far from the sensor that can be considered as point targets. Mathematics model of un-illuminant space target is set up. Based on classical optical theory the relationships between brightness and dimension and surface characteristic and view angle and distance are analyzed; and the relationships between detection ability of optical sensor and parameters of optics and exposal time are demonstrated based on energy conservation law. In the end the correctness of the model and formula are proved by test, so it can provide reference to optical system design used in space un-illuminant targets detection.

**Keywords** Space target; Detection; Visible light; Magnitude



**Chen Rongli** was born in 1973, in Shaanxi Province, China. He received the Master's degree in 1999 from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. He now is working as a Ph. D. candidate at Space Optics Lab. His major is space optical remote. He has been a vice professor since 2004.