

## 强背景下光电系统空间目标探测能力

张己化,范如玉,赵宁,蔡雷,白鑫

(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

**摘要:** 光电系统可见光探测在空间目标监测中发挥着重要作用,而强背景下空间目标探测一直是限制光电探测设备能力的瓶颈;为了提高光电系统实际探测能力,从系统探测能力表征参数—信噪比入手,分析了系统探测信噪比的理论公式和选择原则;针对强背景对光电系统探测信噪比的影响,分析给出了不同光谱滤波方式对光电系统探测信噪比的影响程度;分析了不同布站方式对系统探测能力的影响,并开展了实际观测测量。理论分析表明,采用合适的光谱滤波技术可有效提高光电系统的探测能力,系统探测信噪比提高 1 倍;通过合理布设光电系统的观测站点,使得光电系统对空间目标的探测能力显著提高,对目标的可探测概率从 51% 提高到 96%,理论分析与实验观测结果基本一致。

**关键词:** 探测能力; 强天空背景; 空间目标; 信噪比

**中图分类号:** TN209;V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0212-05

## Electro-optic system detection ability to space-object in strong background

Zhang Jihua, Fan Ruyi, Zhao Ning, Cai Lei, Bai Xin

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Visible light imaging detection of electro-optic (EO) system plays a key role in space-object detection. How to detect space-object in strong background luminance has always been a choke point in limiting EO system's detection ability. The primary specification for expressing detection ability is signal-to-noise ratio (SNR). Based on analysis of the effect factors, a calculation formula of detection ability and the fundamental of detection probability were derived. The influence of the sky strong background luminance on the detection ability was analyzed, and the SNR of EO system versus spectral filtering mode and different observation stations were given in the paper. The theoretical results show that the detection ability of EO system can be improved, increased by 100 percent, through the propriety spectral filtering technology. The detection probability is increased by 45 percent (from 51 percent to 96 percent) through changing the observation station of EO system. Theoretical results fit with the experimental research.

**Key words:** detection ability; strong background luminance; space-object; SNR

收稿日期: 2013-05-09; 修订日期: 2013-06-14

作者简介: 张己化(1983-), 男, 博士生, 主要从事光电探测技术与仿真分析方面的研究。Email: zhjh822@163.com

导师简介: 范如玉(1943-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事复杂系统科学方面研究。Email: teach08@163.com

## 0 引言

人造空间目标分为空间碎片和在轨航天器。在轨航天器是指空间中正常工作的航天器。空间碎片即轨道碎片,是指空间中除在轨正常运行航天器之外的人造物体。人造物体长期运行于空间轨道,并随着人类航天活动的增多日益增多。随着各国航天事业的发展,对空间目标探测跟踪等监视的需求变得越来越迫切。目前监视的手段多种多样,各种方法都有各自的优缺点<sup>[1-4]</sup>。文中着重探讨基于可见光探测技术的光电系统空间目标探测,即由于星体目标本身不发光,光电设备主要依靠目标的太阳反射光进行探测。而在白天观测遥远微弱空间目标等星体困难的主要原因在于强天空背景造成的低信噪比及低对比度。

文中以人造卫星为代表,针对白天强天空背景特点,结合影响可见光探测系统空间目标探测的影响因素,重点考虑目标运动过程的背景和目標亮度时空变化的过程性特点,分析白天强天空背景条件下对光电系统探测能力的影响,并与实际观测结果进行了比较,分析给出了提高强背景系统探测能力的两种技术途径。

## 1 白天天空背景特性

天空背景光是地球周围的大气对太阳光、地面反射光散射和折射的综合结果,亮度随天顶距、时间以及与太阳的夹角而变化。

大气光学提供的资料表明,晴朗天空的亮度一般变化为 0.2~0.6 sb,亮度随着太阳高角和太阳夹角的不同而变化,太阳高角高、夹角小,天空亮度增加。一般晴天天空的背景光以短波段为主,峰值波长在 450~550 nm 范围。

通常把天空背景亮度表示为星等,同空间目标的视星等相对应,已知两天体星等  $m_1, m_2$  和亮度  $L_1, L_2$ ,根据普森公式可得关系<sup>[2]</sup>:

$$m_2 - m_1 = -2.5 \lg \frac{L_2}{L_1} \quad (1)$$

由天体光度测量结果得知大气层外每平方度  $0^m$  等星的亮度为  $0.84 \times 10^{-6}$  sb,则可换算天空亮度在 0.2~0.6 sb 所对应的星等值。

为便于天空背景的计算与表述,对于全晴天空,以  $\gamma, \zeta$  和  $\alpha$  表示的天空任意位置点处的天空背景亮度为  $L_{cl}(\gamma_s, \gamma, \zeta)$ ,相应的天空背景亮度表达式如下<sup>[5]</sup>:

$$\frac{L_{cl}(\gamma_s, \gamma, \zeta)}{L_{zcl}(\gamma_s)} = \frac{\phi(\gamma) \cdot f(\zeta)}{\phi\left[\frac{\pi}{2}\right] \cdot f\left[\frac{\pi}{2} - \gamma_s\right]} \quad (2)$$

式中: $\gamma$ 为目标的高度角; $\alpha$ 为目标方位角;下标加  $s$  后均为太阳的高度角和方位角; $\zeta$ 为目标和太阳的夹角,也称为相角; $L_{cl}(\gamma_s, \gamma, \zeta)$ 为所求的位置的天空背景亮度; $L_{zcl}(\gamma_s)$ 为全晴天空天顶亮度,单位为  $cd/cm^2$ 。

结合目标运动过程的时空特性,根据公式(2),图 1 给出了某一时刻全晴天空背景亮度的等亮度曲线,其中亮度最高处为太阳位置。

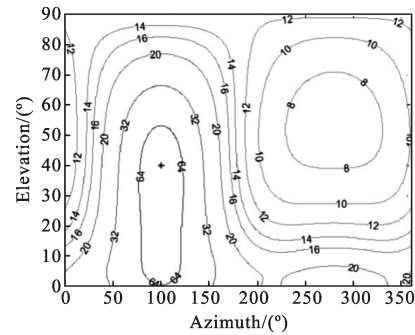


图 1 天空背景亮度曲线

Fig.1 Background luminance versus elevation and azimuth

从图 1 可以看出,天空背景是一个时空变化量,随着时间和空间位置的不同而不同,对于空间目标的不同过境路径,对应天域的背景亮度是不同,而当空间目标过境时段对应天域与太阳夹角较小时,就会出现强天空背景亮度,直接影响光电探测系统观测,甚至出现观测系统探测器饱和现象,图 2 给出了某一次目标过境时的天空背景亮度曲线。

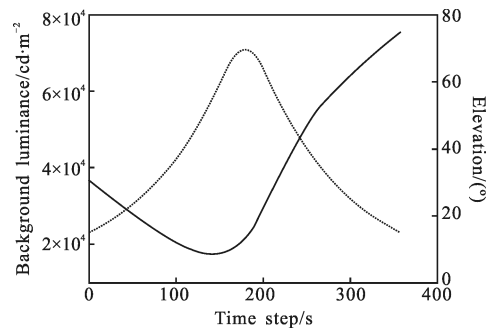


图 2 天空背景亮度随目标运动仰角变化曲线

Fig.2 Background luminance as a function of elevation of space-object

## 2 空间目标特性

人造空间目标本身不发光, 主要依靠反射太阳光, 与太阳光的光谱特性基本一致; 辐射亮度亦来自太阳的辐射, 假定太阳光谱辐照度为  $E(\lambda)$ , 则空间目标  $dS$  面元接收的太阳辐射为<sup>[6]</sup>:

$$dF_1 = \int_{\lambda} E(\lambda) dS \cos \phi d\lambda \quad (3)$$

式中:  $\phi$  为面元法线和太阳入射方向夹角, 设面元漫反射系数为  $\sigma(\lambda)$ , 则面元反射光通量为:

$$dF_2 = \int_{\lambda} \sigma(\lambda) E(\lambda) dS \cos \phi d\lambda \quad (4)$$

把面元看作为全扩展面, 则与法线成  $\theta$  角方向、距离  $R$  处的接收面  $dS'$  上的光通量为:

$$dF = \frac{\cos \theta}{\pi} \int_{\lambda} \sigma(\lambda) E(\lambda) dS \cos \phi d\lambda \cdot dS' \cdot \frac{1}{R^2} \quad (5)$$

对照射面积分, 得到目标光谱特性对应的照度为<sup>[7]</sup>:

$$E_i = \frac{\sigma E_0}{\pi R^2} \int_S \cos \theta \cos \phi dS \quad (6)$$

式中:  $E_0$  为太阳到达地面的照度。

空间目标形状通常由平面、球面、柱面和锥面等构成, 所以目标地面照度可近似表示成:

$$E_m = \sum_i E_i \quad (7)$$

天文学上, 同样习惯于用视星等来表示天体的亮度。视星等是以人眼对天体进行标定的, 即辐照度相差 100 倍两个星体的亮度相差 5 星等; 一般认为太阳亮度为已知光源中最亮的, 在不考虑大气影响时, 将太阳星等定为  $-26.74$ 。那么可以得到地球上观测的空间目标视星等  $M_m$  为:

$$M_m = -26.74 - 2.5 \lg \left( \frac{E_m}{E_0} \right) \quad (8)$$

## 3 探测能力分析

探测能力一般用信噪比来评定, 定义为输出信号与探测噪声均方根值的比值<sup>[2]</sup>:

$$SNR = I_S / (\bar{I}_N^2)^{1/2} \quad (9)$$

式中:  $I_S$  为单像元信号电流;  $(\bar{I}_N^2)^{1/2}$  为单像元噪声电

流的均方根值。

假设目标信号集中在探测器单像元上, 则可以推导出用光子数表示的探测信噪比表达式。目标信号的光电子数为<sup>[2]</sup>:

$$S = \phi_S \cdot A_o \cdot f_S \cdot q_S \cdot \tau_o \cdot T \quad (10)$$

CCD 探测器接收到的背景信号对应的光电子数为:

$$B = \phi_b \cdot A_o \cdot f_b \cdot q_b \cdot \tau_o \cdot T \cdot \alpha^2 \quad (11)$$

背景信号产生的噪声  $S_b$  为:

$$S_b = (\phi_b \cdot A_o \cdot f_b \cdot q_b \cdot \tau_o \cdot T \cdot \alpha^2)^{1/2} \quad (12)$$

其中:  $\phi_S$  为单位像素上的信号光子流;  $\phi_b$  为背景光子流;  $q_S$  为探测器对信号的平均量子效率;  $q_b$  为探测器对天空背景光的平均量子效率;  $A_o$  为望远镜接收面积;  $T$  为积分时间;  $\alpha^2$  为单位像素角面积;  $f_S$  为系统对目标信号的滤光系数;  $f_b$  为系统对背景信号的滤光系数。

单像元上的信号光子流、背景光子流的大小<sup>[7]</sup>可表示为  $\phi_S = 5.0 \times 10^{10-m/2.5}$  (photos/m<sup>2</sup>s),  $\phi_b = 5.0 \times 10^{10}/2.5^m$  (photos/[m<sup>2</sup>s(")<sup>2</sup>])。则信噪比可表示为<sup>[2]</sup>:

$$SNR = \frac{\phi_S \cdot A_o \cdot f_S \cdot q_S \cdot \tau_o \cdot T \cdot (\alpha^2 / \theta^2)}{(\phi_b \cdot A_o \cdot f_b \cdot q_b \cdot \tau_o \cdot T \cdot \alpha^2)^{1/2}} \quad (13)$$

式中:  $\theta^2$  为像点对应的靶面角面积。

为保证光电系统在一定虚警率的条件下具有较高的瞬时探测概率, 探测信噪比需满足一定条件, 瞬时探测概率的定义为:

$$P_d(SNR) = \frac{1}{\sqrt{2} \pi} \int_{SNR-TNR}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (14)$$

式中:  $TNR$  表示探测虚警率。图 3 给出了在系统探测虚警率为  $10^{-6} \sim 10^{-1}$  变化时, 对应于不同信噪比的条件下系统探测概率曲线图。

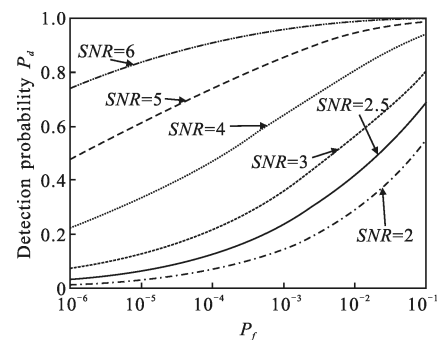


图 3 不同信噪比条件下的探测概率随虚警率变化曲线

Fig.3 Detection probability versus  $P_f$  of six SNR

一般要求系统探测虚警率小于  $10^{-4}$ 、对空间目标的瞬时探测概率大于 95%,根据图 3 可清晰得到,光电系统探测信噪比 SNR 指标要大于 6。

### 4 理论计算

观测系统主要参数:口径 600 mm,折反式光学系统,系统透过率 0.8,系统焦距 2500 mm;探测器像元数  $512 \times 512$ ,像元尺寸  $16 \mu\text{m}$ ,饱和电流数为 220 Ke。

#### 4.1 天空背景亮度对探测能力的影响

根据信噪比公式,在目标视星等不变的情况下,可得到不同天空背景亮度条件下的光电系统探测信噪比值(见图 4)。

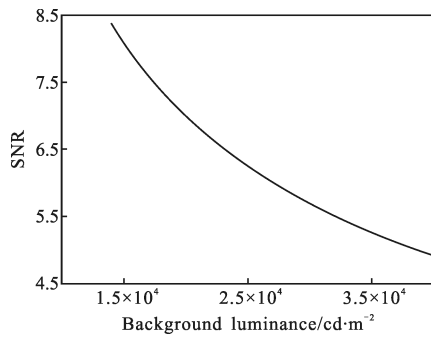


图 4 目标亮度为 6.5 星等时,信噪比随背景变化曲线  
Fig.4 SNR versus background luminance when star magnitude is 6.5

从图 4 可见,在光电系统其它参数保持不变时,系统探测信噪比随背景亮度增大呈指数下降,背景亮度大于  $2.5 \times 10^4 \text{ cd/m}^2$  时,信噪比低于 6,低于稳定探测信噪比要求,即在强天空背景亮度条件下很难实现对空间目标的稳定探测跟踪。

#### 4.2 光谱滤波技术对探测能力的影响

在系统参数确定的条件下,系统探测能力受不同的滤波方式对背景信号的滤光系数  $f_b$  和目标信号的滤光系数  $f_s$  影响,依据太阳光相对于天空背景光的归一化光子通量曲线<sup>[8]</sup>,表 1 给出了不同截止波

表 1 不同截止波长对背景和目标的滤光系数

Tab.1 Transmittance of space-object and background luminance versus cut-off wavelength

| Cut-off wavelength/ $\mu\text{m}$ | 0.6  | 0.7  | 0.8  | Neutrality |
|-----------------------------------|------|------|------|------------|
| $f_b$                             | 0.22 | 0.15 | 0.04 | 0.5        |
| $f_s$                             | 0.71 | 0.53 | 0.23 | 0.5        |

长的滤波方式和中性滤光片对天空背景和目标的光谱透过率。

以中性滤光片为对比分析基础,利用推导的信噪比公式(13),表 2 给出了天空背景和目標亮度不变情况下,0.6  $\mu\text{m}$ 、0.7  $\mu\text{m}$ 、0.8  $\mu\text{m}$  波长截止等 3 种光谱滤波方式相比中性滤光方式时对光电系统探测信噪比的提高程度。

表 2 不同截止波长时对系统探测信噪比的影响

Tab.2 SNR versus cut-off wavelength

| Cut-off wavelength/ $\mu\text{m}$ | 0.6  | 0.7  | 0.8  |
|-----------------------------------|------|------|------|
| Improving ratio of SNR            | 2.14 | 1.94 | 1.63 |

从表 2 可以看出,采用光谱滤波技术对提高光电系统的探测能力是有效的,与参考文献[8-9]结论一致,可以提高系统探测信噪比约 2 倍左右;但不同地区由于背景光谱特性不同,相同滤波方式对探测能力的贡献是不同的。因此,在光电系统参数一定时,需要分析当地天空背景亮度光谱分布特性,选择合适的光谱滤光方式。

#### 4.3 不同布站方式下的探测跟踪能力

根据特定空间目标的特性分析,包括目标运动特性、几何形状和物理特性,对空间目标运动过程中的视亮度进行了计算,并结合太阳-光电系统-空间目标的相对空间关系,给出了光电系统在不同位置布站时目标一次过境时段星等随时间的变化曲线,如图 5、图 6 所示;表 3 给出了不同站点位置对同一空间目标的探测概率。

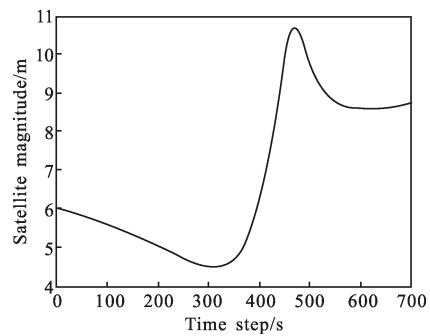


图 5 光电系统与太阳相对空间目标异侧时亮度变化曲线  
Fig.5 Satellite magnitude as a function of simulation time of the EO system and the sun at reverse position

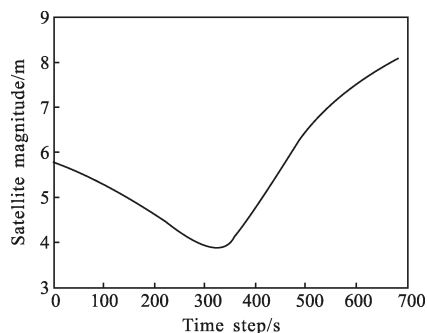


图 6 光电系统与太阳相对空间目标同测时亮度变化曲线

Fig.6 Satellite magnitude as a function of simulation time of the EO system and the sun at sameness position

表 3 不同布站位置下光电系统探测跟踪概率

Tab.3 Detection probability of EO system for different postion

| Max elevation /( $^{\circ}$ ) | Azimuth/( $^{\circ}$ ) | Special filtering bound /nm | Detection probability |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 67.16                         | 100.94                 | 800-900                     | 0.51                  |
| 88.15                         | 102.25                 | 800-900                     | 0.88                  |
| 80.89                         | 282.92                 | 800-900                     | 0.96                  |

由于空间目标和背景亮度是时空变化的过程量,目标主要依靠反射太阳光,根据目标亮度和天空背景计算模型可知,布站位置直接影响着空间目标亮度和背景亮度值,光电系统与太阳相对空间目标同侧时(图 6)的亮度普遍高于异侧时(图 5)的亮度。表 3 给出了相同光谱滤波方式下,随着布站位置的移动,光电系统对同一空间目标的探测跟踪概率,可以看出随着布站位置向同侧移动,对空间目标的探测跟踪概率逐渐增大,由 51%的探测跟踪概率提高到 96%。利用光电系统开展了多站点对相似过境特性的同一空间目标的多次探测跟踪实验,统计结果表明站点 1 的实际可探测跟踪到目标的概率约 45%,站点 2 约 79%,站点 3 约 91%。虽然实际跟踪过程目标过境特性存在一定变化,但从统计结果看,理论分析结果与实际观测结果基本一致,可见在光电系统参数固定条件下,优化布站方式能有效提高光电系统对空间目标的探测跟踪能力。

## 5 结论

文中通过对空间目标特性、天空背景特性分析

的基础上,给出了空间目标和天空背景亮度的时空变化曲线;结合光电系统探测能力的理论公式,分析了光谱滤波技术对系统探测能力的影响,对探测跟踪的过程进行了仿真分析;同时分析给出了不同站点条件下的系统可探测跟踪概率。理论分析和实际系统观测结果表明,采用合适的光谱滤波技术和优化布站,特别是在强天空背景条件下的暗弱目标观测时,可提高光电系统的实际探测能力。

## 参考文献:

- [1] Ming Ming, Yang Fei, Zhao Jinyun, et al. Catadioptric optical system with large aperture, wide field of view and broad waveband[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 149-154. (in Chinese)
- [2] Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1178-1182. (in Chinese)
- [3] Meng Qingyu, Zhang Wei. Long funian analysis on detection ability of space-based space target visible camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 149-154. (in Chinese)
- [4] Mu Da, Li Quanyong, Dong Jianing. Analysis on ground-based infrared detection system detecting the infrared magnitude of space targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1609-1613. (in Chinese)
- [5] Zhang Shaogang. Spatial distribution of daylight-sky luminance distribution of reference sky [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 1998, 4(8): 63-79. (in Chinese)
- [6] Shen Feng, Jiang Wenhan. Evaluation of ground spectrum characteristics and star magnitude of spatial object [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1996(4): 13-17. (in Chinese)
- [7] Li Bincheng. Optical characteristic analysis of space target[J]. *Opto-electronic Engineering*, 1989(2): 21-26. (in Chinese)
- [8] Wang Weiguo. Research of space object detecting under bright background [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, CAS, 2005. (in Chinese)
- [9] Wan Min, Su Yi, Yang Rui, et al. Improvement of signal to noise ratio in astronomical objects detection in daytime[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(12): 1151-1154. (in Chinese)