

·光电系统与设计·

提高光电系统白天探测能力方法

涂遗^{1,2}, 陈金宝¹, 谭碧涛²

(1. 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:针对光电系统工程设计中口径、焦距等参数受限情况下的系统白天探测能力提高方法进行了研究, 提出通过采用光谱滤波、BIN 和相机增益等方法可以提高系统探测能力, 基于信噪比理论, 建立了 3 种模式下的极限探测能力模型. 最后, 利用 MATLAB 软件, 选取适当参数, 对 3 种模式下的探测能力进行了详细的仿真分析. 结果表明: 在天空背景亮度为 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$ 条件下, 口径为 500 mm 光电系统通过综合采用光谱滤波、BIN 和相机增益技术可以使其白天探测能力提高约 2.5 等星.

关键词:光电系统; 滤波; BIN; 探测; 仿真

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)06-0001-04

Method Improving the Day Detecting Ability of the Electro-Optical System

TU Yi^{1,2}, CHEN Jin-bao¹, TAN Bi-tao²

(1. College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The caliber, focus and other parameter sometimes are ascertaining in the engineering designing of the Electro-Optical system. The method improving the day detecting ability of the system was researched under the restricting situation, Spectrum filtering technology, Bin code and CCD gain can improve the detecting ability of the system, and based on the SNR theory, the limit detecting ability model was established under the three technologies. At last, the models were simulated under the MATLAB soft by selecting proper parameters, the simulation results indicate that the 500 mm caliber Electro-Optical system detecting ability can improve 2.5 magnitude via adopting the three technologies when the sky background brightness is $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$.

Key words: electro-optical system; filtering; BIN; detecting; simulation

随着航天技术的发展, 在环绕地球的空间中出现了越来越多的各种用途的人造空间目标, 运动在各种各样的轨道上, 对其中某些空间目标的观测、跟踪、识别是一项必不可少的、非常有意义的工作. 一般来讲, 空间目标本身并不发光, 而是依靠反射太阳光而发光的, 最主要的观测方法是采用光学观测方法. 由于空间目标在光学波段光谱特性与太阳光谱相同, 但能量较天空背景弱的多, 因此白天探测空间

目标的最大困难是强背景辐射, 目标微弱信号完全淹没在天空背景信号中, 如何有效提高目标信号与背景信号的信噪比(SNR), 从而提高系统的探测能力, 是强背景下探测弱目标的关键技术.

多数文献在光电系统对空间目标白天探测能力进行研究时, 从 SNR 出发, 分析了其影响因素, 得出了口径、焦距、大气透过率等影响因素与探测能力的关系, 但是对于光谱滤波、相机 BIN、相机增益 3 种

收稿日期: 2010-11-04

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题(2008AA8060018)

作者简介: 涂遗(1982-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事激光技术研究工作.

技术的影响没有具体分析^[1-4]. 在工程应用中, 由于其他需求, 光电系统的口径、焦距、大气透过率等参数往往已经基本确定, 不能更改. 为此, 针对在受限情况下的光电系统白天探测能力提高技术进行了研究, 提出采取光谱滤波、相机 BIN、相机增益 3 种方法可以提高系统的探测能力, 并建立了 3 种模式下的极限探测能力模型, 结合工程设计应用进行了相关的仿真分析.

1 理论分析

1.1 探测能力提高方法

光电系统的探测能力一般用输出信号的信噪比来评定, 信噪比定义为输出信号大小比上系统探测噪声的均方根值. 考虑目标成像在 CCD 像面 n_{pix} 个像素上, 则系统的信噪比可以表达为^[5]

$$S/N = \frac{St}{\sqrt{(S + Bn_{pix} + I_d n_{pix})t + I_r^2 n_{pix}}} \quad (1)$$

其中, S 为目标单位时间内产生的光电数; B 为背景单位时间内产生的光电数; t 为积分时间; I_d 为暗电流噪声单位时间内产生的光电数; I_r 为读出噪声单位时间内产生的光电数; n_{pix} 为目标成像光斑覆盖像元数.

考虑系统白天探测, 则为背景噪声受限探测, 其 SNR 表达式可近似表达如下

$$S/N = \frac{S\sqrt{t}}{\sqrt{Bn_{pix}}} \quad (2)$$

目标单位时间内光电数 S 表达式为

$$S = \phi_s a q_s \tau f_s G \tau_s = S_0 f_s G \tau_s \quad (3)$$

其中, ϕ_s 为信号光子通量(光子数/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$); a 为系统通光口径面积(m^2); f_s 为对目标信号光谱透过率系数; q_s 为对目标光谱平均量子效率; τ 为光学系统对目标信号的透过率, G 为相机增益; τ_s 为衰减片透过率; S_0 为无光谱滤波下的目标信号光电数.

背景单位时间内光电数 B 表达式为

$$B = \phi_b a q_b n_{pix} \tau \alpha^2 f_b G \tau_s = B_0 f_b G \tau_s \quad (4)$$

其中, ϕ_b 为背景光子通量(光子数/ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{弧秒}^2$); a 为系统通光口径面积(m^2); f_b 为对背景光谱透过率系数; q_b 为对目标光谱平均量子效率; τ 为光学系统对目标信号的透过率; α 为 CCD 一个像元对应的空间立体角元(弧秒), G 为相机增益; B_0 为无光谱滤波下的背景信号光电数.

将式(3)、式(4)代入式(2)可得

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{S\sqrt{t}}{\sqrt{Bn_{pix}}} = \frac{\phi_s a q_s \tau f_s G \tau_s \sqrt{t}}{\sqrt{\phi_b a q_b \tau \alpha^2 f_b G \tau_s n_{pix}^2}} = \\ &= \frac{\phi_s a q_s \tau}{\sqrt{\phi_b a q_b \tau n_{pix} \alpha^2}} \cdot \frac{f_s}{\sqrt{f_b}} \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\tau_s} \cdot \sqrt{G} \cdot \frac{1}{\sqrt{n_{pix}}} = \\ &= \frac{S_0}{\sqrt{B_0}} \cdot \frac{f_s}{\sqrt{f_b}} \sqrt{t} \cdot \sqrt{\tau_s} \cdot \sqrt{G} \cdot \frac{1}{\sqrt{n_{pix}}} \end{aligned} \quad (5)$$

在不考虑系统口径、焦距、量子效率、系统透过率等影响因素, 系统的探测能力主要由探测信噪比决定, 信噪比越大, 系统的探测能力越强. 从式(5)可以看出:

- (1) 信噪比与目标信号光谱滤波透过率系数成正比, 与背景光谱滤波透过率系数均方根值成反比;
- (2) 信噪比与积分时间的均方根值成正比;
- (3) 信噪比与衰减片透过率的均方根值成正比;
- (4) 信噪比与相机增益的均方根值成正比;
- (5) 信噪比与相机 BIN 模式成正比, 如采取 2×2 , SNR 提高 2 倍.

因此, 在积分时间和透过率不变的情况下, 通过光谱滤波、BIN 模式和相机增益可以提高系统的探测信噪比, 从而提高系统的探测能力.

1.2 极限探测能力

在光电系统的工程设计研制过程中, 通常需要先根据系统的相关参数对该系统的极限探测能力进行分析. 为此, 针对光谱滤波、BIN 模式和相机增益 3 种模式下的极限探测能力进行了分析.

设最小可探测信噪比阈值为 T_{sn} , 根据式(5)可得

$$S_0 = \sqrt{B_0} \cdot c_s \cdot T_{sn} \quad (6)$$

$$\text{其中, } c_s = \frac{\sqrt{f_b \cdot n_{pix}}}{f_s \cdot \sqrt{t \cdot G \cdot \tau_s}}$$

在工程应用上, 针对已知口径(D)、目标星等(m)、背景亮度(B_b)等参数可以简便计算 S_0 和 B_0 ^[6]

$$S_0 = a \cdot q_s \cdot (\bar{\lambda}/hc) \cdot \tau \cdot 3.9 \times 10^{-9} \cdot 2.512^{-m} \quad (7)$$

其中, $\bar{\lambda}$ 为平均波长; h 为普朗克常数 6.63×10^{-34} ; c 为光速.

$$B_0 = \frac{\pi^2}{16} d^2 q_b (\bar{\lambda}/hc) n_{pix} B_b \cdot (1 - \epsilon^2) (D/f)^2 \cdot \tau \quad (8)$$

其中, D 为系统通光口径; f 为光学系统焦距; ϵ 为

光学系统的遮拦比.

由于大气湍流的影响,通常目标成像都不在单个像素之内,对目标成像光斑覆盖像元数进行计算,长期曝光点光源图像的角半径为

$$\theta_{1/2} = \sqrt{(1.22\lambda/D)^2 + (1.22\lambda/r_0)^2 + \sigma_{\text{tilt}}^2} \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{tilt}}^2 = 0.184(D/r_0)^{5/3}(\lambda/D)^2 \quad (10)$$

式中, σ_{tilt}^2 为湍流引起的倾斜方差; D 为系统的口径; r_0 为大气相干长度. 则可求得目标成像光斑覆盖像元数 n_{pix} 为

$$n_{\text{pix}} \approx \left(\frac{2\theta_{1/2}}{\alpha}\right)^2 \quad (11)$$

最终得到基于光谱滤波、BIN 模式和相机增益 3 种模式下的系统极限探测星等为

$$m \approx -21.03 - 2.5 \lg \left[\frac{hc}{S_0 \eta \lambda t_0 \tau_0} \sqrt{B_0 \cdot cs \cdot T_{sn}} \right] \quad (12)$$

2 仿真分析

根据式(5)和式(12),利用 MATLAB 软件进行了 3 种模式下的极限探测能力模型的编程实现,以光电望远镜为例,选取了适当的典型参数,对系统在光谱滤波、相机 BIN 和相机增益 3 种模式下的极限探测能力进行了仿真分析.

2.1 参数设置

(1) 光电系统参数

设光电望远镜系统通光口径为 0.5 m, 光学透过率大于 0.8, CCD 平均量子效率大于 80%, 通光谱为 380~900 nm, 具有 600~900 nm(0.6 um 截止)、700~900 nm(0.7 um 截止)、800~900 nm(0.8 um 截止)滤波波段.

(2) 光谱滤波参数

太阳的色温近似为 5 900 K, 非自发光空间目标光来自太阳, 其光谱特性与太阳辐射的光谱特性近似, 目标和背景光谱的光照特性见图 1, 不同滤光片的光谱透过率见表 1^[7].

(3) 相机增益

相机增益 G 的取值与相机的满井电荷数有关, 采取增益使增益后的光子数不能大于满井电荷数, 设满井电荷数为 N_0 , 则最大 G 的表达式可近似为

$$G = \frac{N_0}{N_s + N_b} = \frac{N_0 n_{\text{pix}}}{St + Bt} \quad (13)$$

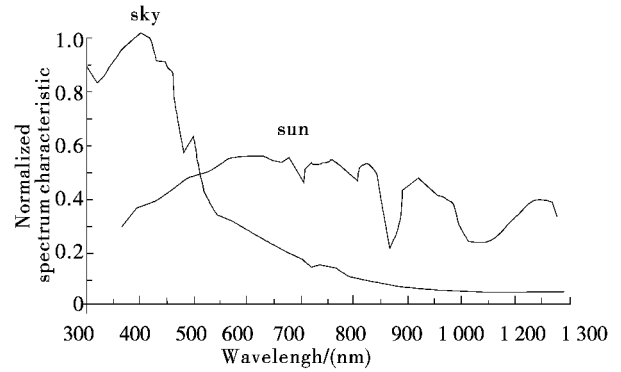


图 1 目标和背景光谱特性

表 1 不同的滤波方式时大气光和星光的透过率

滤光片	0.6 um 截止	0.7 um 截止	0.8 um 截止
背景 f_b	0.22	0.15	0.04
目标 f_s	0.71	0.53	0.23

从表达式可以看出, 当背景和信号光子数达到相机的满井电荷数时, 相机的增益将无效, 也就是说存在一个临界背景阈值.

(4) BIN

电视相机采用 2×2 BIN 模式, 改变了目标像所占像元数(BIN 模式表示像元合并, 该模式下单个像元为原始状态下的 4 个, 即 n_{pix} 减小 4 倍.) 根据式(2)可以知道 SNR 变为原来的 2 倍.

2.2 仿真分析

系统的探测概率 P_d 可用下式表示^[8]

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{(TNR-SNR)}^{\infty} \exp(-u^2/2) du \quad (14)$$

其中, TNR 为阈值信噪比; SNR 为探测信噪比. 虚警概率和阈值信噪比 TNR 之间的关系为

$$\frac{1}{p_f} = \sqrt{3} \exp(TNR^2/2) \quad (15)$$

系统的探测概率、信噪比和虚警率之间的关系曲线如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 当 SNR 取 6 时, 系统的探测概率高, 且虚警率低, 为此工程应用上通常考虑 SNR 取 6. 结合相关参数, 根据式(12)对系统探测能力进行了仿真, 不同积分时间、不同天空背景下分析结果见图 3; 针对工程设计中特定天空背景的比对分析结果见表 2.

从图 3 分析结果可以看出, 系统的探测能力随着积分时间的增加而增强, 随着天空背景亮度的增强而减弱. 从表 2 的结果可以看出, 在天空背景为

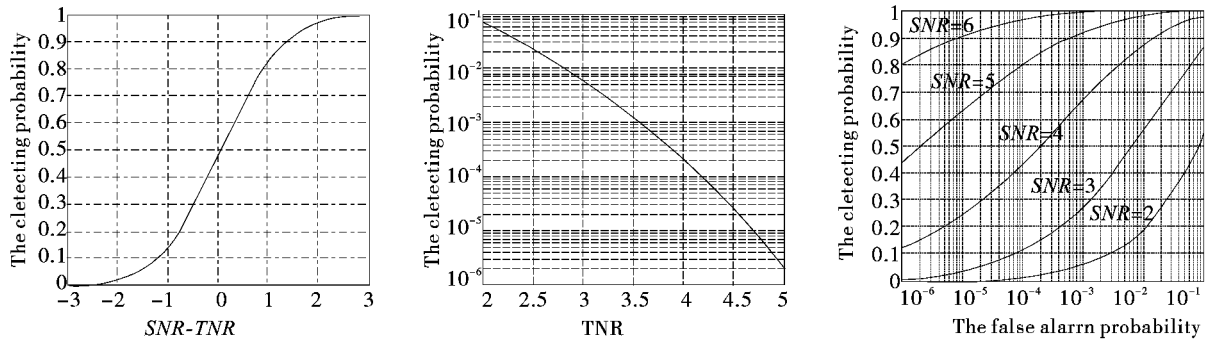


图 2 探测概率、信噪比和虚警率之间的关系曲线

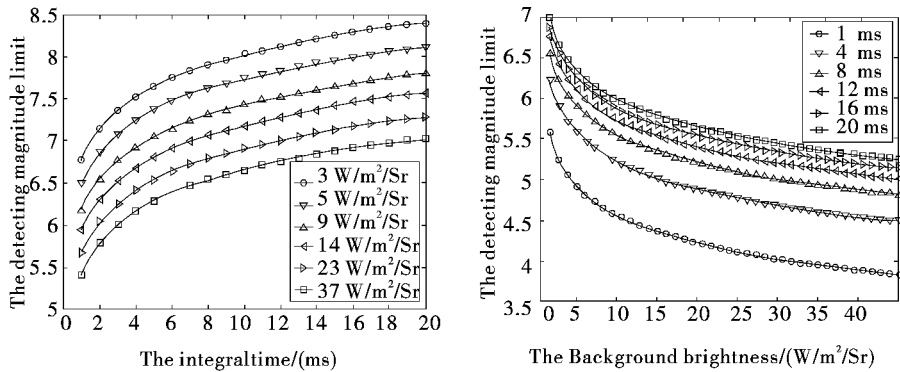


图 3 不同积分时间、天空背景下的探测能力

表 2 特定天空背景下的极限探测能力

天空背景亮度/($W \cdot m^{-2} Sr^{-1}$)	159	63	25	10	4	1.6	0.6
恒星星等(理论计算)	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
初始	4.14	4.64	5.14	5.64	6.10	6.64	7.19
0.6 μm 截止	4.33	4.83	5.33	5.83	6.29	6.83	7.38
极限探测能力	4.52	5.02	5.52	6.02	6.48	7.02	7.57
(SNR = 6)	4.63	5.13	5.63	6.13	6.59	7.13	7.68
BIN(0.6 μm)	5.77	6.27	6.77	7.27	7.73	8.27	8.84
BIN 后增益(0.6 μm)	5.84	6.34	7.19	8.19	9.11	10.22	11.30

10 $W \cdot m^{-2} Sr^{-1}$ 条件下,采用光谱滤波技术(0.6 μm 以下截止),光电系统的探测能力得到约 0.5 等星提高;采用相机 BIN 模式,探测能力得到 1.1 等星的提高;采用相机增益模式,探测能力再次得到 0.9 等星的提高;即综合采用光谱滤波、相机 BIN 和相机增益 3 种技术,光电系统的探测能力得到 2.5 等星的提高。

3 结 论

文中针对光电系统白天探测技术进行了研究,从探测基本原理出发,给出了光电系统探测模型;从探测模型分析得出;白天对空间目标进行观测时,采用光谱滤波、相机 BIN、相机增益 3 种技术可以提高

光电系统的探测能力,提出了基于该 3 种模式下的极限探测能力模型.同时,利用该模型进行了仿真分析.仿真结果表明,综合采用 3 种技术,相比与原始状态,光电系统的白天探测能力得到了很大的提高.在实际工程应用中,为提高系统的探测能力,建议光电系统采用 600~900 nm、700~900 nm、800~900 nm 滤波波段,在图像处理软件中增加相机增益功能和 BIN 模式功能.该模型可应用于光电系统的设计以及应用分析。

参考文献

[1] Rork E W, Lin S S, Yakutjs A J Ground-based electro-optical detection of artificial satellites in daylight from reflected sunlight[J]. 1982, AD-A 117 413.

膜层镀制结束后,将样件取出,采用丙酮将高温胶溶解,去掉聚四氟乙烯挡片,并对表面残留物清洗干净.

3 膜层质量分析讨论

平面反射镜面光学薄膜制备后,依据规范,从技术指标和环境适应性两方面对膜层的质量进行分析评价工作.

3.1 薄膜技术指标检测

利用激光辐射器和激光能量计等器件对介质膜层抗激光损伤特性进行检测,介质膜层经受光斑直径不大于 10 mm、能量不小于 300 mJ、10 Hz 频率的激光辐射 3 min 后,膜层无损伤、脱膜等现象,光谱特性无明显变化.膜层的光谱测试曲线分别见图 1 和图 2,介质高反膜层在 1.064 μm 波长处的反射率达到 95%,金属铝反射膜层在 3~5 μm 波段内的平均反射率超过 95%.

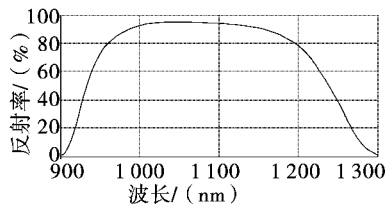


图 1 介质高反膜层反射光谱测试曲线

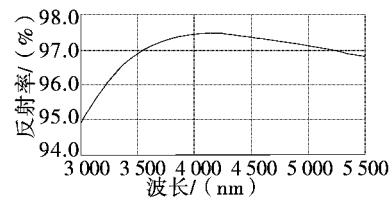


图 2 金属铝反膜层反射光谱测试曲线

3.2 薄膜环境适应性检测

对膜层进行了温度、湿热、清擦性、耐溶性和水溶性环境适应性的检测,膜层经过环境适应性检测后,膜层质量能够满足试验通过的判定条件,说明反射镜膜层通过了环境适应性检测,具有较优异的耐受环境的性能.

4 结 论

介绍了反射镜膜层的设计、制备和检测的相关工作.利用电子束加热蒸发的方法制备了镜面中心区域的介质 $\text{ZrO}_2 - \text{SiO}_2$ 高反射膜层和外围区域的金属铝反射膜层,最后对膜层质量进行了检测.检测结果表明:介质高反射膜层与金属铝反射膜层的技术指标和环境适应性能均满足要求,具有优质的质量.

参考文献

- [1] 赵印中,许旻,李林,等.磁控溅射法制备高反射铝膜[J].真空与低温,2008,14(3):164-166.
- [2] 唐晋发,顾培夫,刘旭,等.现代光学薄膜技术[M].杭州:浙江大学出版社,2006.
- [3] 桑利军,付亚波,张跃飞,等.有机玻璃基材表面电子束蒸镀铬-铝-二氧化硅薄膜及其性能研究[J].真空,2008,45(5):46-48.
- [4] 李刚,高劲松,孙连春.氧碘激光腔内 45°入射高反射镜的膜系设计[J].强激光与粒子束,2003,15(9):859-862.
- [5] 卜轶坤,赵丽,郑权,等.高损伤阈值激光反射镜的设计方法[J].红外与激光工程,2006,35(2):183-215.
- [6] 吕立冬,李欣南.用于大尺寸镜面镀膜的热蒸发沉积系统的研究[J].真空,2008,45(2):57-59.

(上接第 4 页)

- [2] 李旭东,冯爱国,周新妮,等.外场用红外目标模拟器辐射特性测量研究[J].应用光学,2010,31(2):256-260.
- [3] 谭碧涛,景春元,王宝国,等.光谱滤波技术对星等测量精度影响[J].强激光与粒子束,2009,21(2):187-191.
- [4] 魏合理,陈秀红,余凯,等.白天 CCD 观星可探测极限星等值分析[J].强激光与粒子束,2007,19(2):187-

191.

- [5] Pierre Y Bely. The Design and Construction of Large Optical Telescopes[M]. Springer-Verlag. New York. 2003. 25-28.
- [6] 谭碧涛,景春元,张新,等.光电系统对空间目标成像仿真技术研究[J].计算机仿真,2009(6):240-243.
- [7] 王伟国.空间目标白天光电探测技术研究[D].长春光学精密机械与物理研究所,2005.22-23
- [8] 祁蒙.红外搜索跟踪系统的探测概率研究[J].激光与红外,2004.34(4):269-271.