

## 空间目标白天光电探测能力分析

卢 栋<sup>1,2</sup>

(1. 中国人民解放军装备指挥技术学院, 北京 101416; 2. 酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 735000)

**摘 要:** 天空背景在白天时的强光给空间目标的光电探测带来了很大的难度, 针对白天探测的特点, 基于极限探测信噪比、对比度及极限探测星等探测能力模型, 说明了光谱滤波方法能有效提高白天探测能力, 对比各种滤波效果, 提出窄带滤波作为最优光谱滤波方法。从光学系统参数角度出发, 通过分析计算得出在一定条件下综合权衡各参数的影响, 减小视场, 提高光学探测口径, 增大焦距, 有利于提高白天光电探测能力, 为光学探测器的设计提供了一定的参考依据。

**关键词:** 白天探测; 光谱滤波; 探测能力; 光学系统参数

**中图分类号:** TN911-34

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-373X(2011)16-0176-03

## Detection Capability of Space Object in Daytime

LU Dong<sup>1,2</sup>

(1. The Academy of Equipment Command &amp; Technology, Beijing 101416, China; 2. The Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 735000, China)

**Abstract:** The characteristics of optical system in the daytime under the strong light condition are introduced. The spectrum filters can enhancement SNR measurement efficiently based on the model of optical detection for contrast, SNR and stellar in the daytime. The narrow-band filtering as superior spectrum filter is proposed by contrasting various of filtering effect. Based on the model of optical detection, the influence of daytime detection from the optical system parameter through saw field, optical caliber, and focal distance is proposed.

**Keywords:** detection of daytime; spectrum filter; detection capability; optical system parameter

## 0 引言

光电探测技术是实现空间目标探测, 进而获得目标信息的主要技术手段, 常用的有可见光相机 CCD 探测和红外探测。空间目标的可见光探测和光度测量一般都在夜晚用目视或照相法进行, 但空间目标的白天探测和红外辐射特性测量却具有较大的难度。因此对全天的观测来说, 其有效观测时间就只能占 40% ~ 50% 或更少。这样大大减小了观测效率及设备使用率。

在白天强背景条件下, 相对于目标信号, 天空背景光太强, 由于太阳照射而造成近地面的湍流, 使得空间目标的像更加弥散, 进一步增加了背景对目标信号的相对强度<sup>[1-3]</sup>。一个亮度为 5.5 星等的空间目标, 由于像的弥散, 观测时, 在 600 nm 波段附近的面强度只有背景的 1/200 左右, 在 450 nm 时只有背景的 1/400 左右。因此采取光谱滤波抑制背景造成的探测器饱和是首先要解决的问题, 在各种滤波器中要选出光谱滤波的最佳滤波器。另外, 分析光学探测设备的性能参数对白天探测能力的影响, 从而选择合理的参数, 对探测能力的提高也有着至关重要的作用。

## 1 白天探测能力模型

光电探测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。假设目标信号所有光电子都汇聚到探测器一个像元上, 则可以推导出用光电子数的表示的探测信噪比表达式。目标信号光电数和背景信号光电子数表达式分别为:

$$N_1 = \varphi_s A \eta_s f_s \tau T \quad (1)$$

$$N_2 = \varphi_n A \eta_n f_n \alpha^2 T \quad (2)$$

式中:  $\varphi_s$ ,  $\varphi_n$  分别表示信号光子通量和背景辐射的光子通量(光子数/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ));  $A$  表示接收器通光口径面积(单位:  $\text{m}^2$ );  $f_s$ ,  $f_n$  表示目标光谱和背景光谱透过率系数;  $\eta_s$ ,  $\eta_n$  表示 CCD 对目标光谱和背景光谱平均量子效率;  $\tau$  为光学系统对目标信号的透过率;  $T$  表示积分时间(单位: s);  $\alpha$  表示 CCD 一个像元对应的空间立体角  $A/F$ ;  $A$  为 CCD 像元直径;  $F$  为系统焦距(球面度单位: 弧秒)<sup>[4-6]</sup>。如果不考虑 CCD 转移噪声和热噪声, 则系统信噪比可以表示为:

$$\text{SNR} = \frac{\varphi_s A \eta_s f_s \tau T}{(\varphi_n A \eta_n f_n \alpha^2 T)^{1/2}} = \frac{\varphi_s A^{1/2} \eta_s f_s \tau^{1/2} T^{1/2}}{(\varphi_n \eta_n f_n \alpha^2)^{1/2}} \quad (3)$$

式(3) 中信噪比计算是假定目标能量集中到一个像元内的极限探测能力,信噪比越高,系统提取信号能力越强。因此如何提高信噪比是光电探测技术的关键。目标与背景的对比度表示如下:

$$C = N_1 / N_2 = \frac{\varphi_s A \eta_s f_s \tau}{\varphi_n A \eta_n f_n \tau \alpha^2 t} = \frac{\varphi_s \eta_s f_s}{\varphi_n \eta_n f_n \alpha^2} \quad (4)$$

2 光谱滤波原理及最优光谱滤波器选择

光谱滤波是根据目标与背景的光谱辐射差异,采用合适的光谱滤光片,使光学系统透过给定波段的辐射,利用滤光片消除不需要的辐射光谱成份,最大限度地减小光电接收器接收的背景光辐射光子,抑制 CCD 探测器饱和,同时减少衰减目标信号,由此提高探测器对所需目标与背景辐射通量之比,提高目标的对比度和探测信噪比。太阳光相对于天空背景光的归一化光子通量图如图 1 所示。

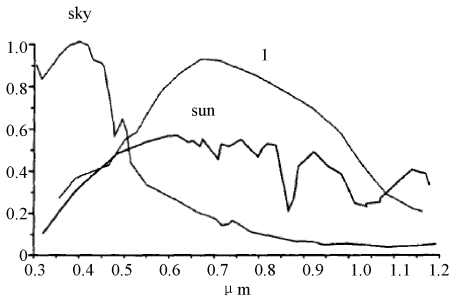


图 1 太阳光相对于天空背景归一化量子图

图中曲线 1 是太阳光相对天空背景光归一化光子通量曲线。可以看出,600~800 nm 是空间目标相对于天空背景最强的波段,因此光谱滤波应选择在 600 nm 以上。CCD 本身也是一个光谱滤波器,而对不同频段的光谱具有不同的量子效率。因此选择光谱滤波时要考虑 CCD 的光谱响应特性。最佳滤波器的选取应在满足系统跟踪精度下的最大积分时间内,保证 CCD 不饱和的前提下,太阳光相对天空背景光归一化光子通量曲线与 CCD 量子效率曲线在各个频段的乘积积分值最大的区间。因此选择 CCD 探测器时,量子效率曲线应尽可能与图 1 的目标与背景的规一化曲线相近,这样光谱滤波对提高目标与背景的对比度贡献最大,效率最高。

图 2 清楚地反映出了加入 0.6 μm, 0.7 μm, 0.8 μm 截止滤光片和 0.68~0.72 μm 窄带滤光片后对天空光和太阳光的光谱滤波效果,对天空光的抑制比太阳光大得多,图中也可看出中性滤波虽然也能抑制背景光,防止 CCD 饱和,但同时也衰减了相同比例的目标能量。

由第 2 节探测能力模型以及极限探测星等式(7) (见下节推导)可计算出光谱滤波对探测对比度、信噪比

以及星等的影响<sup>[7]</sup>,如表 1 所示。

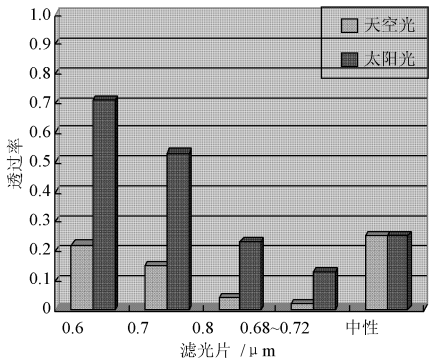


图 2 不同滤波方式太阳光和天空光透过率

表 1 光谱滤波对探测能力的提高

滤光片	0.6 μm	0.7 μm	0.8 μm	0.68~0.72 μm	中性滤光片
对比度	3.2	3.6	5.75	6.2	0
信噪比	1.75	1.9	2.35	2.5	-0.5
星等	0.7	0.8	0.95	1.0	-0.2

光谱滤波技术对空间目标光电探测系统白天探测能力有明显的提高。可以将目标的光学对比度提高约 3~6 倍,将目标的信噪比提高约 1.75~2.5 倍,在光电探测系统的参数一定的情况下可以将系统的极限探测星等提高 0.7~1.0 个目视星等。从表 1 中可看出使用窄带滤光片可以更有效地衰减背景光,提高信噪比的能力更强,因此窄带滤光片是最有效的光谱滤波方法。

3 光学参数对探测能力的影响

3.1 视场对探测能力的影响

星光可认为是平行光,它的信号强度与探测器视场无关,而背景光与系统的立体角(与视场有关)成正比。减小视场可以减小背景辐射,增大对比度和信噪比。但是不断减小视场致使目标的靶面尺寸到一个 CCD 像素大小时,再继续减小视场会引起星光的能量在多个 CCD 像元间分配,单个像元的对比度和信噪比将不再随视场的减小而增加。所以,理论上当目标视角等于单位像素张角时,探测信噪比达到极限值。但是当目标像所占像素刚好为 1 个像素,像的抖动、漂移将引起检测上的困难。文献[8]中对视场与探测能力的关系做出了详细分析,结果表明:探测器系统视场的选取应保证目标像所占像素个数不小于 2×2,同时视场的选取还应令 CCD 接近饱和并保证 CCD 不饱和,在这种情况下可以确定系统的探测极限。

根据上述分析,恒星目标应成像在 4 个像素上。设 M 星等的光子流为 φ<sub>M</sub>,目标信号分到了 4 个像素,每个像素的信号光子流为总光子流的 1/4。在极限探测的

情况下, 对式(3)信噪比的表达式进行修正<sup>[9]</sup>得到:

$$\text{SNR}' = \frac{\varphi_M A^{1/2} \eta_s \tau^{1/2} T^{1/2}}{4(\varphi_n \eta_n f_n)^{1/2}} \quad (5)$$

满足信噪比大于 6 条件下的最小目标辐射光通量  $\varphi_M$ , 反映了光电设备的极限探测能力。由上式可得出:

$$\varphi_M = \frac{4\text{SNR}(\varphi_n \eta_n f_n)^{1/2}}{A^{1/2} \eta_s \tau^{1/2} T^{1/2}} \quad (6)$$

探测器的极限探测能力也可以用极限探测星等来表示, 计算极限探测星等如下:

$$m = 2.5\log(\varphi_0 / \varphi_M) \quad (7)$$

式中:  $\varphi_0 = 5 \times 10^{10}$  photons( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) 为 0 星等的平均辐射光通量。

3.2 光学口径对探测能力的影响

由信噪比的公式可以看出, 信噪比是与探测器口径的平方成正比例的。口径的选择要与探测的技术要求和探测器的灵敏度相匹配, 一般来讲, 口径越大, 能够探测的极限星等越高。由于白天探测空间目标是一项复杂技术, 影响目标探测的因素很多, 但可以根据目标探测信噪比公式, 探测极限星公式来计算出口径对探测能力的影响。

在相对口径不变的情况下, 计算不同口径的光学系统探测星等能力<sup>[7]</sup>如表 2 所示。选取 CCD 像元为 16  $\mu\text{m}$ , 量子效率为 0.3, 相对口径为 2, 则 1 m 口径对应的像元分辨角为 1.4'', 在此分辨力下 CCD 不饱和的极限积分时间为 20 ms。

表 2 不同光学口径下白天探测极限

信噪比	星等			条件 / sb
	350 mm	650 mm	1 m	
K=10	5.8	7.1	8.0	$\varphi=0.2$
K=6	6.4	8.0	8.6	$\varphi=0.6$
K=10	7.2	7.8	7.0	$\varphi=0.2$
K=6	7.8	8.2	7.6	$\varphi=0.2$

表中:  $\varphi = 0.2\text{sb} = 1.26 \times 10^9$  photons( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ );  $\varphi = 0.6\text{sb} = 3.15 \times 10^9$  photons( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

根据计算结果可以得出以下规律: 系统探测星等与通光口径平方成正比, 要提高一个星等能力, 口径要增 1.6 倍; 提取信噪比从 10 提高到 6, 可增加 0.6 个星等; 背景增加一个星等亮度, 探测能力下降 0.6 个星等。据此分析结果, 结合系统探测能力要求, 由满足一定信噪比下的最小目标辐射光通量中  $\varphi_s$  能够估算出所需通光口径。

3.3 焦距对探测性能的影响

从信噪比的计算公式(3)可以看出, 光学系统的口径越大, 焦距越长, 探测器的积分时间越长, 系统信噪比越高, 也就是探测能力越强。在只考虑对比度的情况

下, 由对比度公式(4)可以看出, 目标与背景的对比度, 仅与光学系统的焦距有关, 而与光学系统的口径、探测器的积分时间、光学系统的透过率无关。图 3 给出满足调制对比度大于 0.03 要求时系统的探测能力与焦距的关系<sup>[10]</sup>。很显然焦距越长, 探测能力越高, 10 m 焦距的系统探测能力比 1 m 焦距系统的高出约 5 个星等。可以看出增长光学系统的焦距能够有效的提高光电系统在白天的探测能力, 但如果焦距过长, 势必造成设备的观测视场变小, 给设备的捕获和跟踪带来困难; 另外, 当光学焦距增长时容易造成探测器靶面上能量的分散, 为实现成像在一定的像元之内, 必须提高设备的跟踪稳定性。并保证天空具有较好的视宁度。在设计的时候要综合考虑这些因素。

表 3 不同系统焦距()下探测星等值

系统焦距 / mm	2 000	4 000	6 000	8 000
探测星等	1.58	3.05	3.91	4.23

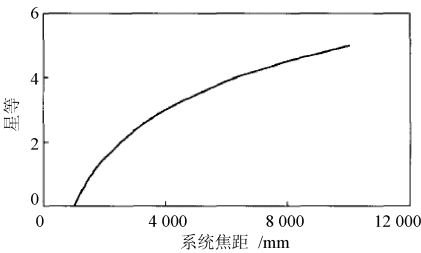


图 3 探测能力与焦距的关系

4 结 语

白天强背景光条件下, 采用光谱滤波的办法可以有效抑制背景光, 而保留大部分目标能量。通过不同波段的滤波效果得知采用窄带滤波的方法可以达到更好的效果。除了光谱滤波的方法外, 探测器的参数对白天探测能力也有比较重要的影响。通过分析计算得出在一定条件下减小视场、增加光学口径和焦距能提高探测能力, 通过调节参数提高探测能力必须要权衡各参数之间的相互影响, 以达到最优的效果, 这些都可为探测系统的设计提供一定参考。

参 考 文 献

[ 1 ] 姚连兴, 仇维礼. 目标和环境的光学特性[ M] . 北京: 宇航出版社, 1995.

[ 2 ] 王永仲. 现代军用光学技术[ M] . 北京: 科学出版社, 2003.

[ 3 ] 安毓英, 曾晓东. 光电探测原理[ M] . 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.

(下转第 182 页)

另外,本文器件发光峰在 550 nm, 相对其他文献的研究结果有所红移<sup>[6-8]</sup>, 同时光谱的半高宽也变窄 10 nm<sup>[7]</sup>, 这可能也是因为器件结构不同, 光学微腔对发光波长调制的结果<sup>[13]</sup>。

#### 4 结 语

本文系统考察了 DMQA 掺杂浓度对器件光电性能的影响。结果显示, DMQA 掺杂浓度由 0.28 wt% 上升到 4.5 wt% 时, 表现为器件电流略有下降, 说明 DMQA 对载流子传输起到阻挡或者陷阱作用; 器件发光效率明显下降, 说明 DMQA 的浓度淬灭效应相对 QA 虽然有所改善, 但依然存在。而且, 器件发光光谱中 570~610 nm 区间存在肩峰, 其强度随着 DMQA 浓度增加逐步增大, 据此推断该肩峰来自于 DMQA 激基缔合物发射。

#### 参 考 文 献

- [1] TANG C W, VANSLYKE S A, CHEN C H. Electroluminescence of doped organic thin films [J]. J. Appl. Phys., 1989, 65: 3610-3616.
- [2] SUN Y, GIEBINK N C, KANNO H, et al. Management of singlet and triplet excitons for efficient white organic light-emitting devices [J]. Nature, 2006, 440: 908-912.
- [3] REINEKE S, LINDNER F, SCHWARTZ G, et al. White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency [J]. Nature, 2009, 459(7244): 234-238.
- [4] TAKEO W, YOSHINOBU Y, JUN F, et al. Stability characteristics of quinacridone and coumarin molecules as guest dopants in the organic LEDs [J]. Sys. Met., 1997, 91: 15-19.
- [5] SHI J M, TANG C W. Doped electroluminescent devices with improved stability [J]. Appl. Phys. Lett., 1997, 70: 1665.
- [6] SU W M, LI W L, HONG Z R, et al. Improved electroluminescent efficiency of organic light emitting devices by co-doping N, N'-Dimethyl-quinacridone and Coumarin6 in tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 87: 213501.
- [7] LI J Z, YAHIRO M, ISHIDA K, et al. Influence of doping location and width of dimethylquinacridone on the performance of organic light emitting devices [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2005, 38: 392.
- [8] 陈金鑫, 黄孝文. OLED 有机电激发光材料与元件 [M]. 台北: 五南图书出版公司, 2005.
- [9] WANG L D, GAO Y D, WEI P, et al. P-113: Novel structure organic light-emitting diodes with high performance [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2004, 35 (1), 703-705.
- [10] 吴有智, 孙润光, 郑新友. 掺杂型有机电致发光器件中载流子的俘获机制 [J]. 半导体光电, 2003, 24(5): 304-307, 356.
- [11] 邹永德, 黄新邦, 林位株. 八羟基喹啉铝高分子薄膜的荧光特性 [J]. 物理化学学报, 1999, 15(4): 375-380.
- [12] KUNDU S, FUJIHARA K, OKADA T, et al. Excitation migration from photoexcited tris(8-hydroxyquinolino) aluminium to quinacridone in codeposited thin films [J]. Japan. J. Appl. Phys., 2000, 39, 5297-5300.
- [13] LIU T H, SHEN W J, YEN C K, et al. Doped blue emitters of 9, 10-di(2-naphthyl) anthracene in organic electroluminescent devices [J]. Synthetic Metals, 2003, 137, 1033-1034.

作者简介: 连加荣 男, 1980 年出生, 博士, 讲师。主要从事有机光电子材料与器件物理方面的研究工作。

(上接第 178 页)

- [4] 王磊, 张涛. 空间目标和背景的辐照特性仿真技术研究 [J]. 科学技术与工程, 2010(15): 3610-3614.
- [5] 彭华峰, 陈鲸, 张彬. 空间目标在天基光电望远镜中的光度特征研究 [J]. 光电工程, 2006, 33(12): 6-14.
- [6] 曾德贤, 杜小平. 空间目标在天基光学探测中的特性分析与仿真 [J]. 空间科学学报, 2008, 28(6): 560-566.
- [7] 王国伟. 空间目标白天光电探测技术研究 [D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [8] 万敏, 苏毅. 提高白天观测星体信噪比的方法研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003(12): 1151-1153.
- [9] 魏合理, 陈秀红. 白天 CCD 观星可探测极限星等值分析 [J]. 强激光与粒子束, 2007(2): 187-192.
- [10] 王建军. 白天强天空背景条件下空间目标探测能力分析 [J]. 飞行器测控学报, 2007(12): 45-49.
- [11] 郭渭荣, 栗苹, 陈慧敏, 等. 不同角度下散射太阳光对光电探测器的干扰 [J]. 控制与探测学报, 2009(1): 41-45.
- [12] 罗来邦, 王述琪, 张力, 等. 热电制冷中波红外探测器在末敏弹上的应用 [J]. 控制与探测学报, 2010(1): 35-38.

作者简介: 卢 栋 男, 1984 年出生, 陕西渭南人, 硕士研究生, 助理工程师。研究方向为航天器仿真建模与评估。