

红外 K 波段白天探测能力分析验证

黄智国^{1,2}, 王建立¹, 王昊京¹, 李宏壮¹, 殷丽梅¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对空间目标白天探测的关键技术, 包括大气透过率分析、天空背景辐射分布、探测能力计算等进行了研究。在此基础上选取 K 波段光谱在 1.23 m 口径地基光电望远镜上进行白天观测实验, 对关键技术进行验证。实验数据表明, 经过优化设计此系统在 30° 俯仰角时白天极限探测 10.38 等星, 较未优化前白天探测能力提高 24.9%, 为中高轨卫星的全天时观测提供重要依据。

关键词: 白天探测; 光谱滤波; K 波段; 探测能力

中图分类号: P412.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0804001

Analysis and verification of infrared K band daytime detection ability

Huang Zhiguo^{1,2}, Wang Jianli¹, Wang Haojing¹, Li Hongzhuang¹, Yin Limei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The key technology of space target detection was studied during daytime, including analysis of atmospheric transmittance, sky background radiation measurement, detection ability calculation. Infrared K band spectrum was applied to the 1.23 m large aperture telescope to verify the key theories. Experiment shows that after optimization the limit detection of infrared optoelectronic system is 10.38 magnitude at 30° pitching angle and the detection ability increases 24.9% than before optimization. This research has a positive significance for mid-high orbit satellite detection throughout the day.

Key words: daytime detection; spectral filter; K band; detection ability

收稿日期: 2018-03-10; 修订日期: 2018-04-20

基金项目: 国家 863 计划(2016AAXX1009)

作者简介: 黄智国(1991-), 男, 博士生, 主要从事红外探测与红外辐射测量方面的研究。Email: huangzhiguochina@foxmail.com

导师简介: 王建立(1971-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。Email: wangjianli@ciomp.ac.cn

0 引言

20 世纪 80 年代, 使用红外技术探测不同天体红外辐射成为天文学家获取天体物理性质的重要手段^[1]。由于天光背景等因素, 空间目标探测通常只在夜晚进行, 所以开展白天探测可大大提高望远镜观测效率。美国使用 1.6 m 口径、探测波段 0.9~1.8 μm 望远镜, 白天探测能力达到 9 等星; 俄罗斯使用 AZT-14 系列光学望远镜白天空间目标探测能力达到 10 等星^[2]。国内白天探测始于 20 世纪 90 年代, 中国科学院光电技术研究所使用 2801CB 型 CCD 与 1.2 m 望远镜探测到 4~4.6 等星^[3]; 李超宏等^[4]使用云南天文自适应光学系统在白天对 5 等星目标进行准确探测; 王伟国等^[2]采用光谱滤波方法使 650 mm 口径望远镜白天极限探测能力达到 7 等星。

由于国内红外探测器研制技术的限制, 目前大部分空间目标探测系统为可见光波段。然而红外波段白天探测具有独特的优势, 首先红外波段大气透射率比可见光波段高约 20%~30%^[5], 其次太阳光谱辐射功率随着波长的增长而减弱, 天空背景在红外波段较暗。国内研究者对红外波段探测进行了大量仿真分析, 张路青^[5]指出短波红外波段可有效解决测星灵敏度与动态范围之间的矛盾; 韩艳丽^[6]分析了短波红外波段相较于可见光波段大气层内白天观星的优势; 续敏等^[7-10]对地基观测系统光谱滤波、光学消杂光等技术进行了研究。

以上研究大部分停留在实验室仿真阶段。文中对空间目标 K 波段白天探测关键技术进行了分析与实验验证, 并设计 F 数为 4 的红外探测系统, 对接在 1.23 m 地基望远镜平台进行探测实验, 通过对恒星的观测验证实验系统的极限探测能力。

1 白天探测关键技术

1.1 大气透射率

目标辐射通过大气层时, 大气对其产生散射和吸收作用导致目标的辐射度减弱。空气中水蒸气和二氧化碳是吸收目标辐射能量的主要成分, 同时悬浮的颗粒会对目标的辐射能量产生反射作用。由于大气中烟尘、薄雾等悬浮颗粒的物理属性, 可见光

波段经过大气层发生 Mie 散射后与红外波段相比透过率下降程度较高^[6]。

红外辐射光谱区间为 0.65~100 μm, 光谱进一步划分为近红外、短波、中波、长波、甚长波等多种区间, 具体波段划分如表 1 所示。

表 1 红外光谱波段划分

Tab.1 Division of infrared spectral bands

Spectrum	Wavelength/μm	Astronomical bands
Near infrared	0.65-1.0	R, I
Near infrared	1.1-1.4	J
Short infrared	1.5-1.8	H
Short infrared	2.0-2.4	K
Mid infrared	3.0-4.0	L
Mid infrared	4.6-5.0	M
Long infrared	7.5-14.5	N
Long infrared	17-25	Q
Far infrared	28-40	Z

使用 MODTRAN 软件分别计算在海拔 247 m, 1~15 μm 波段内夏季中纬度模型望远镜在不同观测俯仰角下的大气透过率, 结果如图 1 所示, 其中 2~2.5、3.2~3.8 μm 大气窗口大气透过率均强于可见光波段, 且这两个大气窗口目标与大气对比度及热辐射度依次增强^[11-12]。对于空间目标而言, 大部分人造空间目标温度分布在 200~350 K 之间, 在红外波段其自身辐射能量占有很大的比例。太阳能帆板的硅化太阳能包元在可见光波段反射率为 0.1, 而在短波 K 波段的反射率达到 0.2^[9,13], 因此利用 K 波段对目标进行观测, 探测能力接近可见光的两倍。表 2 为 MODTRAN 软件计算在中纬度夏季标准大气, 乡村型气溶胶模式, 能见度为 23 km, K 波段在不同俯仰角时大气的平均透过率。

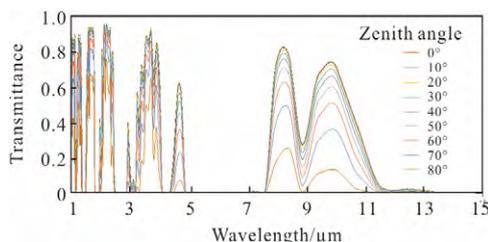


图 1 海拔 247 m 时波长与透射率关系

Fig.1 Relationship between wavelength and transmittance at altitude of 247 m

表 2 K 波段不同俯仰角下的大气透过率

Tab.2 Atmospheric transmittance at different pitching angles in K band

Pitch angle/(°)	Average transmittance
90	0.829
80	0.827
70	0.821
60	0.812
50	0.796
40	0.772
30	0.734
20	0.667
10	0.521
0	0.426

1.2 天空背景辐射

光学系统探测能力大小主要由目标信噪比来衡量,信噪比定义如下^[14]:

$$SNR = \frac{N_{star}}{N_{noise}} \quad (1)$$

式中: N_{star} 为恒星信号电子数; N_{noise} 为背景噪声电子数。

由于被观测目标只占据几个像元,而天空红外辐射覆盖探测器全部像元导致背景图像掺杂大量噪声,因此,抑制背景辐射减少背景噪声可有效提高目标信噪比。

图 2 为使用 MODTRAN 软件计算望远镜在不同俯仰角时天空背景辐射照度分布图。可以看出,随着俯仰角增加,天空背景辐射随之减小,其原因是俯仰角越大天空背景温度越低。由公式(1)可知,天空红外辐射亮度与温度成正比,因此随着俯仰角

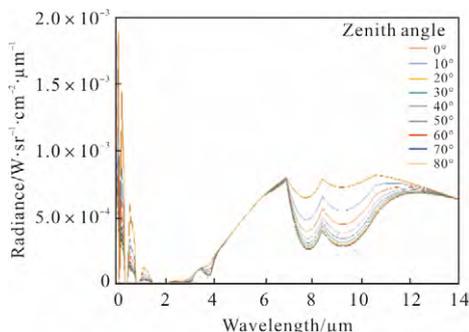


图 2 望远镜观测俯仰角与天空辐射照度

Fig.2 Telescope observing pitching angle and sky radiation intensity of illumination

增大,天空背景辐射逐渐减弱。

对 MODTRAN 计算数据进行统计,不同波长相对于波长 0.8 μm 时天空背景辐射关系曲线如图 3 所示,可以看出相同环境下可见光波段天空辐射明显高于红外波段。红外 K 波段天空背景辐射较可见光波段低两个数量级,天空背景辐射随波长增长而减弱,天空背景辐射在 2.5 μm 达到最低值^[15],K 波段白天天空辐射只有 H 波段和 I 波段的 1/3 和 1/18^[5],K 波段处于 0.3~2.5 μm 大气窗口天空背景辐射最小区间。

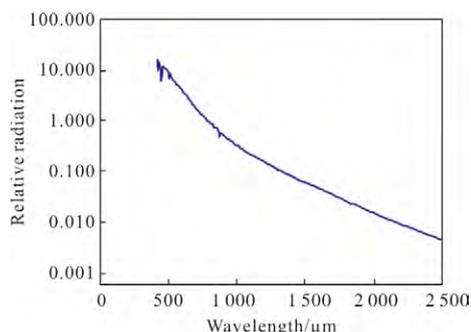


图 3 不同波长相对于 800 nm 的天空背景相对辐射

Fig.3 Sky background relative radiation of different wavelength to 800 nm band

在望远镜和太阳水平夹角大于 45°,太阳高角分别为 45°和太阳接近落山 0°时,望远镜在不同俯仰角下的大气辐亮度如表 3 所示。

表 3 K 波段不同俯仰角下的大气辐射亮度

Tab.3 Atmospheric radiation at different pitching angles in K band

Pitch angle/(°)	Solar high angle	
	45°	0°
90	8.01×10^{-5}	3.61×10^{-5}
80	8.12×10^{-5}	3.5×10^{-5}
70	8.51×10^{-5}	4.11×10^{-5}
60	8.5×10^{-5}	4.24×10^{-5}
50	9.53×10^{-5}	4.92×10^{-5}
40	10.2×10^{-5}	6.01×10^{-5}
30	11.2×10^{-5}	7.96×10^{-5}
20	13.9×10^{-5}	12.3×10^{-5}
10	19.1×10^{-5}	18.6×10^{-5}
0	22.5×10^{-5}	19.7×10^{-5}

综合大气透过率和天空背景辐射影响,使用滤光片截取 K 波段在较低俯仰角下进行探测可有效

提高探测效率。

1.3 探测能力计算

目标成像于多个像元,探测器探测能力受到大气透过率及遮光比等多种因素影响^[16],取单个像元进行分析,光子探测器的电流光谱响应率为:

$$R(\lambda)=\frac{q\lambda}{hc}\eta(\lambda) \quad (2)$$

式中: q 为电子电荷; h 为普朗克常数; c 为光速; λ 为波长; η 为探测器量子效率。

对于背景像元,在积分时间 t_{int} 内产生的信号电子数 S_B 等于:

$$S_B = \frac{\eta t_{int}}{h\nu} \frac{\pi A_d L_B \tau_a \tau_o (1-\varepsilon^2)}{4F^2} \quad (3)$$

式中: L_B 为背景辐射亮度; A_d 为探测器单个像元面积; F 为光学系统相对孔径的倒数; τ_a 为大气平均透过率; τ_o 为光学系统平均透过率; ε 为主镜遮拦比。

红外探测器工作时,由于探测的高星等恒星信号较微弱,红外焦平面发热易产生热噪声对恒星信噪比影响较大,Nyquist^[17]噪声功率表达式为:

$$v_n = (4kT_d R_d \Delta f)^{1/2} \quad (4)$$

式中: k 为玻耳兹曼常量; T_d 为探测器绝对温度; R_d 为探测器电阻; Δf 为电子学带宽。

由暗电流产生的散粒噪声为探测器的基础噪声,散粒噪声是由正反双向独立电流产生的规律噪声^[18],总噪声功率可定义为:

$$i_n^2 = 2qe \frac{qV}{kT} \Delta f + 2qI_o \quad (5)$$

因此由探测器产生的主要噪声可表示为:

$$N_e = v_n + i_n^2 \quad (6)$$

对于目标像元,在积分时间 t_{int} 内产生的信号



图 5 $F=4$ 透射系统

Fig.5 Transmission system of $F=4$

在望远镜第一像面处安装视场光阑抑制杂光。成像系统各机械件采取完全封闭方式固定在调节板之上,最大程度减少实验环境热辐射及杂光影

电子数 S_M 等于:

$$S_M = \frac{\varphi_s \eta t_{int} \pi D^2 \tau_a \tau_o (1-\varepsilon^2)}{4K} \quad (7)$$

式中: D 为望远镜主镜直径; K 为观测目标所占像元个数。

在积分时间 t_{int} 内,系统的信噪比表示为:

$$SNR = \frac{S_M}{\sqrt{S_M + S_B + \sigma_R^2 + t_{int} D_e}} \quad (8)$$

式中: σ_R 为探测器读出噪声电子数; D_e 为探测器噪声电子数。

2 白天探测系统设计与实验

2.1 系统设计

在上述白天空间目标探测关键技术分析基础上,基于现有 1.23 m 地基望远镜设计了短波红外探测系统。采用配备斯特林制冷器的 HgCdTe 短波红外探测器,探测器像元尺寸 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,分辨率为 $320(H) \times 256(W)$ 。

光学系统结构如图 4 所示。采用折反射二次成像方式,通过透射镜组与主反射系统对接。透射镜组包括准直镜组和成像镜组,准直镜组由两片透镜组成,成像镜组由四片透镜组成,在准直镜组后面的平行光路中安装 K 波段滤光片。如图 5 所示。透射镜组材料选择融石英、氟化钙和硒化锌。

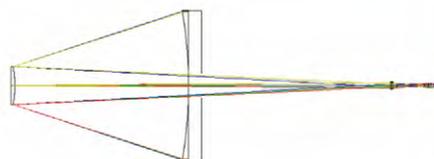


图 4 光学系统整体结构

Fig.4 Optical system structure

响。设计尺寸为 $480 \text{ mm} \times 340 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$ 红外成像系统,系统 F 数为 4,探测器采用中国科学院上海技术物理研究所研制的 CM/ST320 型号制冷型

红外探测器。将成像系统装置在口径 1.23 m 望远镜平台轴头位置,通过望远镜三镜引导光路与红外探测器对接,如图 6 所示。

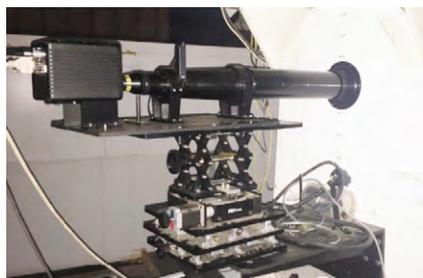


图 6 短波红外成像系统

Fig.6 Short-wave infrared imaging system

2.2 观测实验

首先对系统探测能力进行计算分析,系统探测能力计算参数如表 4 所示,太阳高角分别取 0°和 45°,望远镜观测仰角以 10°为梯度,观测方向与太阳夹角大于 45°,在目标探测信噪比应大于 5 时望

表 4 系统探测能力计算参数

Tab.4 Calculation parameters of system detection ability

Parameter	Value
Wavelength	2 000~2 400 nm
Photon flux density	5.963×10^9 photons/($m^2 \cdot s$)
Background radiation	1.13×10^{-1} W/($m^2 \cdot sr$)
Mirror diameter	1.2 m
System focal length	4.8 m
Atmospheric transmittance	0.715
Optical transmittance system	0.6
Pixel area	9×10^{-10} m^2

望远镜的极限探测能力如表 5 所示^[19]。在大气平均透射率为 0.873,天空背景辐射为 1.13×10^{-1} W/($m^2 \cdot sr$) 时,探测星等与积分时间的关系曲线如图 7 所示,通过计算曲线可知,系统探测能力随积分时间增加而增强。由公式(4)可知积分时间的增加会使背景像元电子数增多,过多背景像元电子数会导致相机饱和,因此合理选择积分时间是能否探测到目标的重要因素。

表 5 理论极限探测星等

Tab.5 Theoretical limit detection magnitude

Pitch angle of telescope/(°)	Pitch angle of sun	
	45°	0°
90	10.2	11.4
80	10.18	11.38
70	10.16	11.35
60	10.13	11.3
50	10.1	11.21
40	9.93	11.07
30	9.88	10.82
20	9.65	10.75
10	9.15	10.64

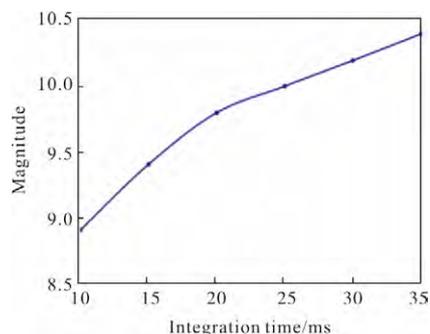


图 7 探测星等与积分时间关系曲线

Fig.7 Curve of detection star magnitude and integral time

在东经 125.3°、北纬 43.8°东北地区 8 月 20 日白天时段开展外场观测实验(见图 8),短波红外成像系统工作时气压为 9.79×10^4 Pa,风向 338°,风速 0.7 m/s,相对湿度 88%。首先使用空旷无云处的天空背景进行非均匀性校正,通过 2MASS 星表选取恒星,对不同俯仰角下的恒星进行观测。通过观测点位置及海拔高度计算观测时段的太阳高角。

实验采用全波段 0.8~2.5 μm 观测时,相机积分时间最高为 9 ms,在望远镜俯仰角为 $38^\circ 18' 23.6''$ 时,最高可观测 8.31 星等(HD 53872)(见图 9)。随着积分时间进一步增加,由于天空背景的影响,相机出现饱和。而在系统中加入 2.0~2.4 μm K 波段滤光片后,对天空背景辐射进行了有效抑制。加入 K 波段滤光片后观测恒星数据如表 3 所示,相机积分时间最高可增至 33 ms,在望远镜 30° 俯仰角时,最高观测星等可达 10.38 等,较未加入 K 波段滤光

片探测能力提高 24.9%, 与理论计算误差为 4.2%。



图 8 短波红外白天探测外场实验

Fig.8 Short wave infrared detection field experiments during daytime



图 9 HD 53872 观测图像

Fig.9 Observation star image of HD 53872

3 结 论

文中对白天探测中的关键技术进行了详细研究。对大气透过率、天空背景辐射及观测波段最优选取等进行了分析, 对白天空间目标探测中的关键技术进行了理论计算。并在此基础上, 基于 1.23 m 望远镜构建了短波红外探测系统, 通过实验进行了理论值的验证。在白天太阳高角 5° 、望远镜俯仰角 30° 时使用 K 波段滤光片白天探测星等达到 10.38。下一步继续优化提高系统探测能力, 为开展中高轨卫星的全天时观测奠定基础。

参考文献:

[1] Yin Limei, Liu Yingqi, Li Hongwen. Cold optics technology to achieve high-accuracy infrared detection [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 535-540. (in Chinese)
殷丽梅, 刘莹奇, 李洪文. 实现高精度红外探测的冷光学技术[J]. *红外技术*, 2013, 35(9): 535-540.

[2] Wang Weiguo. Research of space object detecting under bright background [D]. Changchun: Changchun Institute of

Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)

王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.

[3] Zhu Qixiang. Detection of celestial objects by CCD camera in the daytime and related experiments [J]. *Opto-electronic Engineering*, 1995, 22(6): 1-10. (in Chinese)
朱耆祥. 白天用 CCD 摄像机对天体目标的探测及实验[J]. *光电工程*, 1995, 22(6): 1-10.

[4] Li Chaohong, Xian Hao, Jiang Wenhan, et al. Analysis of wavefront measuring method for daytime adaptive optics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(7): 4289-4296. (in Chinese)
李超宏, 鲜浩, 姜文汉, 等. 用于白天自适应光学的波前探测方法分析[J]. *物理学报*, 2007, 56(7): 4289-4296.

[5] Zhang Luqing. Research on SWIR star detection technology in daytime [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(4): 61-64. (in Chinese)
张路青. 短波红外白天测星技术研究 [J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(4): 61-64.

[6] Wei Heli, Dai Congming. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric transfer correction system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 884-890. (in Chinese)
魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气传输修正系统[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 884-890.

[7] Xu Min, Wang Jianli, Chen Tao. Study on application of short wave infrared to detecting satellites in the daytime [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(2): 277-280. (in Chinese)
续敏, 王建立, 陈涛. 短波红外用于白天卫星探测的研究 [J]. *光学技术*, 2008, 34(2): 277-280.

[8] 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)
张己化, 姚东升, 谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, 28(6): 1178-1182.

[9] Lu Dong. Detection capability of space object in daytime [J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, 34(16): 176-178. (in Chinese)
卢栋. 空间目标白天光电探测能力分析 [J]. *现代电子技术*, 2011, 34(16): 176-178.

[10] Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6):

- 1547–1557. (in Chinese)
- 刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1547–1557.
- [11] Hanson C M. Infrared detector arrays: US, US 4792681 A [P]. 1988.
- [12] Fan Wei, Wang Yi, Rao Ruizhong. Wavelength band selection method for target detection based on character of atmosphere radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 177–182. (in Chinese)
- 范伟, 王毅, 饶瑞中. 根据大气辐射特征进行目标探测的波段选择[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 177–182.
- [13] Feng Xiaoyong, Zhao Zhonghua, Liu Xinming. Video image processing of real-time star detection in daylight [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 622–628. (in Chinese)
- 冯小勇, 赵忠华, 刘新明. 日间恒星实时探测的视频图像处理[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 622–628.
- [14] Wang Haojing, Wu Liang, Wang Jianli, et al. Low SNR star detection by shift-and-add method in daytime [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 405–414. (in Chinese)
- 王昊京, 吴量, 王建立, 等. 移位相加法日间探测低信噪比恒星[J]. 中国光学, 2016, 9(4): 405–414.
- [15] Jim K, Gibson B, Pier E. Daytime sky brightness modeling of haleakala along the GEO belt[C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2011: E63.
- [16] 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)
- 牟达, 李全勇, 董家宁. 地基红外系统探测空间目标红外星等分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1609–1613.
- [17] Nyquist H. Thermal agitation of electric charge in conductors [J]. *Phys Rev*, 1928, 32(1): 110–113.
- [18] Van der Ziel A. Fluctuation and Holes in Semiconductors[M]. London: Butterworths Sci Pub, 1959.
- [19] Wei Heli, Chen Xiuhong, Yu Kai, et al. Analysis of the detectable stellar magnitude limit using CCD camera in daytime sky background [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 187–192. (in Chinese)
- 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): 187–192.