

文章编号 1004-924X(2026)09-1390-10

地基空间目标望远镜全天时探测能力特性模型 设计及实现

高 昕^{1,2*}, 王建立^{4,5}, 李希宇^{1,3}, 姚凯男^{4,5}, 宗永红^{1,2}, 郝三峰^{1,2}, 徐志强^{4,5}

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 太空安全国家级重点实验室, 北京 100094;

3. 天基综合信息系统全国重点实验室, 北京 100094;

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

5. 智能波前传感与控制省重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为提高地基空间目标望远镜的论证及评估效率,推动望远镜数字化建设,基于多帧联合相关叠加处理方法设计了地基空间目标望远镜全天时探测能力特性模型。利用Labview平台开发了具备更加友好直观的人机交互界面的探测能力数字化模型软件系统,以分析大气透过率、天空背景辐射、积分时间及口径等对目标全天时探测能力的影响,并实现了500 mm口径地基全天时探测望远镜探测能力的设计论证。在此基础上,对探测系统选取某白天进行了观测实验,实测结果与理论计算表明,其误差小于 ± 0.3 星等,验证了该模型的正确性。该模型为望远镜高效论证设计提供了理论指导,可有效评估地基望远镜的空间目标探测能力,并为地基望远镜数字化建设奠定了基础。

关键词:光电探测;光学望远镜;全天时;探测能力;多帧叠加;数字模型;近红外

中图分类号:V447.1;TP311.5 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263409.1390

CSTR:32169.14.OPE.20263409.1390

Design and implementation of a model for the characteristics of ground-based space target telescope's all day time detection capability

GAO Xin^{1,2*}, WANG Jianli^{4,5}, LI Xiyu^{1,3}, YAO Kainan^{4,5}, ZONG Yonghong^{1,2},

HAO Sanfeng^{1,2}, XU Zhiqiang^{4,5}

(1. *Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;*

2. *National Key Laboratory of Space Security, Beijing 100094, China;*

3. *National Key Laboratory of Space Integrated Information System, Beijing 100094, China;*

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

5. *Jilin Provincial Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control,
Changchun 130033, China)*

收稿日期:2026-02-08;**修订日期:**2026-03-03.

基金项目:科技应用推进计划项目(No. 145XXX050532000X)

* Corresponding author, E-mail: gaoxin526@sina.com

Abstract: To improve the efficiency of performance analysis and evaluation for ground-based space target telescopes and to advance equipment digitalization, an all-weather detection capability model is developed based on multi-frame joint correlation superposition processing. Key factors influencing all-time detection capability, including atmospheric transmittance, sky background radiation, and integration time, are systematically analyzed. Energy-based mathematical models for detection capability are established for two operational modes: nighttime detection in the visible band and daytime detection in the near-infrared band. A digital software system for detection capability is implemented on the LabVIEW platform, featuring an intuitive and user-friendly human-machine interface. The effectiveness of the proposed model in enhancing evaluation efficiency is verified through a case study of a 500 mm ground-based all-weather telescope. The model provides a practical and efficient tool for telescope design and performance assessment, enabling reliable evaluation of detection capabilities and supporting the digital development of ground-based space target telescopes.

Key words: optoelectric detection; optical telescope; day time; detection capability; frame stacking; digital model; near-infrared

1 引言

地基光学望远镜在空间目标探测领域的作用不可忽视,然而,受白天强光背景影响,现有的地基光学望远镜主要应用于夜间。随着各国对太空的不断开发,利用地基光学望远镜实现对空间目标的全天时探测是目前空间目标探测领域的重点方向。

探测能力是评价地基光学空间目标探测望远镜性能的重要指标之一,它不仅与光学系统和探测器性能有关,还受观测地点、大气传输特性等因素影响^[1-2]。在论证过程中,通常会根据探测能力对光学系统相关参数进行相应的分析及调整,此外,对现有光学空间目标探测望远镜也需根据任务环境快速评估其探测能力,以作为任务执行能力的重要依据。因此,对地基空间目标探测系统白天探测能力计算的研究具有重要的理论和实践意义。随着望远镜数字化^[3]建设的不断推进,对望远镜特性数字模型的深入分析至关重要。探测能力作为地基光学空间目标探测望远镜的一个关键特性,是建立望远镜数字化模型的重要部分,有必要对探测能力这一特性模型进行研究,从而提升望远镜的论证和评估效率,有效支撑光学测量望远镜数字

化建设。

目前,对探测能力的研究主要集中在夜间探测。相比较夜晚探测,白天探测可通过多帧图像叠加的方法提高探测信噪比^[4],因此,白天探测能力还与叠加帧数有关。本文针对地基光学全天时探测需求及数字化建设要求,建立了地基光学望远镜全天时探测能力模型,基于Labview^[5]开发了全天时探测能力模型软件,成功应用到500 mm口径的白天探测望远镜中,实现了不同条件下对典型目标的探测能力计算,并通过对恒星的观测验证了系统的极限探测能力。该模型为地基光学白天探测望远镜的论证及性能评估提供了有效支撑及便捷工具。

2 全天时探测能力特性模型

考虑到空间目标被地基光学望远镜观测计算得到的亮度与姿态、表面材料以及观测角度等特征有关,而同一大小的空间目标被观测计算到的亮度存在差异,因此,通常用极限探测星等来对光学望远镜的探测能力进行评估。

2.1 空间目标辐射特性模型

空间目标探测任务属于点目标探测,在可见光和短波红外波段,地基光学望远镜对空间目标的探测主要依靠目标表面对太阳光的反射,任意

波段范围内的太阳辐射出射度为^[6]:

$$M_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda, \quad (1)$$

其中:第一辐射常数 $c_1 = 3.741832 \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$, 第二辐射常数 $c_2 = 1.438786 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$, 太阳表面温度 $T = 5900 \text{ K}$ 。设 R_t 代表卫星轨道半径, 在轨卫星处的太阳辐照度为:

$$E_s = \frac{M_s A_{\text{sun}}}{4\pi(R_{\text{se}} + R_t)^2} = \frac{M_s R_s^2}{(R_{\text{se}} + R_t)^2}, \quad (2)$$

其中: $R_s = 6.959 \times 10^5 \text{ km}$ 为太阳半径, $R_{\text{se}} = 1.495 \times 10^8 \text{ km}$ 为日地平均距离。

空间目标散射太阳光的强度与太阳-目标-望远镜三者之间的夹角(也称位相角) α_m 、目标表面漫反射率 ρ_0 、空间目标在望远镜方向的投影面积 A_{obj} 有关。当散射以球体散射模型表示时, 望远镜获得的空间目标辐射强度为:

$$I_\phi = E_s \times \rho_0 \times A_{\text{obj}} \times \frac{2}{3\pi^2} \times [(\pi - \alpha_m) \times \cos \alpha_m + \sin \alpha_m]. \quad (3)$$

由此可知, 目标在探测器上的光子通量为:

$$\varphi_s = \frac{I_\phi \times \lambda}{h \times c}, \quad (4)$$

其中: λ 代表光学系统的中心波长, 普朗克常数 $h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}$, c 为光速。

综上, 可推导出探测器单个目标像元单位积分时间内产生的信号电子数:

$$S_M = \frac{\varphi_s \eta \tau_{\text{int}} A_{\text{opt}} \tau_a \tau_o}{K} = \frac{\varphi_s \eta \tau_{\text{int}} \pi D^2 \tau_a \tau_o}{4K}, \quad (5)$$

式中: φ_s 为前面得到的目标光子流量密度, D 为望远镜口径, K 为目标弥散像斑所占像元数, τ_a 为大气平均透过率, τ_o 为光学系统平均透过率, η 为探测器量子效率^[7], t_{int} 为探测器积分时间。

在天文学中, 用星等表示目标的光子流量密度, m_v 星等目标对应的光子流量密度通过如下公式计算:

$$\varphi_s = \varphi_0 \times (2.512)^{-m_v}, \quad (6)$$

其中: φ_0 为 0 等星的光子流量密度。各类恒星 0 等星的光谱光子流量密度计算公式^[8]如下:

$$f(\lambda) = \frac{8.48 \times 10^{34} \times 10^{-0.4mb}}{T^4 \lambda^4 (\exp(1.44 \times 10^8/\lambda T) - 1)}, \quad (7)$$

其中: 波长 λ 的单位为埃, T 为有效温度, mb 为绝对热星等, 取值对应太阳 G2 型光谱类型。

根据上式, 求得 0 等星太阳光谱光子数曲线如图 1 所示。

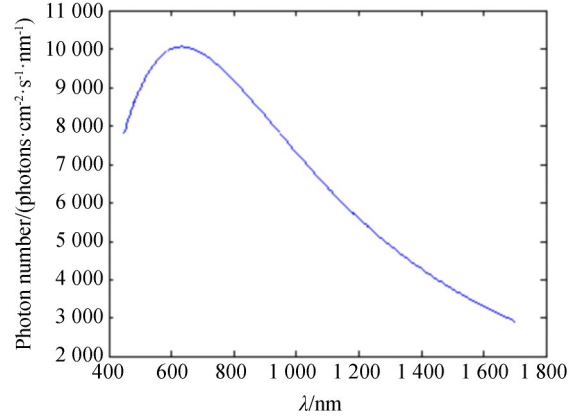


图 1 0 等星太阳光谱光子数

Fig. 1 Photon number of solar spectrum for a 0th magnitude star

2.2 白天天空背景辐射特性模型

白天的天空背景辐射主要源于大气中气体分子和气溶胶对太阳光的瑞利散射与米氏散射, 并叠加了部分地表反射太阳光的贡献。

光学系统探测器上的背景像元在积分时间 t_{int} 内产生的背景信号电子数为:

$$S_B = \varphi_B A_{\text{opt}} \eta \tau_o t_{\text{int}} A_p^2, \quad (8)$$

其中: A_{opt} 为望远镜入瞳面积, A_p 为探测器单像元的瞬时视场。进一步得到:

$$S_B = \frac{\eta \cdot t_{\text{int}} \pi A_d L_B \tau_o}{h\nu 4F^2}, \quad (9)$$

其中: L_B 为天空背景和系统杂散光的辐射亮度, F 为光学系统相对孔径的倒数。

考虑地基空间目标望远镜全天时探测时, 噪声主要由光子噪声和探测器噪声组成, 光子噪声包括目标光子噪声和背景光子噪声; 探测器噪声主要包括热生暗电流噪声、固定模式噪声、多频噪声及量化噪声, 对极限探测能力同样有很大影响^[9]。

由于空间目标距离较远, 可视为点目标, 但由于大气抖动、光学系统弥散与跟踪抖动等因素影响, 点目标成像一般均会占据多个像元 (2×2 个像元以上)。空间目标探测通常都以满足一定信噪比为前提。因到达探测器的光子速率的随机波动遵循泊松分布, 因此, 目标信号成像在探

测器的 K 个像元上,基于电子数的信噪比计算公式如下^[10]:

$$SNR = \frac{S_M}{\sqrt{S_M + S_B + \sigma_R^2 + t_{int} \cdot D_e}}, \quad (10)$$

$$m_v = 2.5 \times \lg \frac{\varphi_0 \times \eta \times t_{int} \times A_{opt} \times \tau_a \times \tau_o}{SNR \times K \times \left(0.5 + \sqrt{S_B + \sigma_R^2 + t_{int} \times D_e + 0.25}\right)}. \quad (11)$$

通过式(11)可知,白天探测的关键点在于减少白天天空背景噪声和探测器噪声的影响,提高地基光电探测系统的目标信噪比。

2.3 多帧联合叠加处理

为实现对小尺寸暗弱空间目标的探测,夜间一般采用长曝光的方法增加信噪比,但是白天受强背景噪声及探测器满阱的共同限制,单帧曝光

其中: σ_R 为探测器读出噪声电子数^[11], D_e 为探测器暗电流。

综合式(1)~式(10),可得系统的探测能力为:

时间仅为微秒(μs)或毫秒(ms)量级。为提高目标探测信噪比,本文基于多次短曝光图像,采用多帧图像联合相关探测方法进行处理。 N 幅信噪比为 R 的图像经联合相关处理后,信噪比提升为:

$$SNR_{total} = R \times \sqrt{N}. \quad (12)$$

因此,对于采用多帧联合相关处理算法的白天探测系统,公式(11)中探测能力应为:

$$m_v = 2.5 \times \lg \frac{\varphi_0 \times \eta \times t_{int} \times A_{opt} \times \tau_a \times \tau_o}{SNR_{total} \times K \times \left(0.5 + \sqrt{S_B + \sigma_R^2 + t_{int} \times D_e + 0.25}\right)}. \quad (13)$$

3 软件实现与应用

基于 Labview 编写全天时探测能力模型软件,人机交互界面如图2所示。软件主要由探测模块、报警模块、初始化设置模块及结果输出模块等4部分组成,能够根据任务的环境参数、待观测目标参数及光学测量设备参数高效实现探测能力的评估。

软件根据地基空间目标探测望远镜工作波

段,分为可见光波段(夜间探测)和近红外波段(白天探测)两个探测模式。不同模式输出不同的探测结果。

本软件对两种探测模式增加了相应的报警设置。当设置的积分时间产生的背景信号超过探测器满阱电子的70%时,系统的报警指示灯就会点亮,满阱电子比例可以在软件前面板进行修改。

初始化设定模块在图3前面板的上侧,包括探测器、光学系统以及大气条件等。其中,大气透过率、背景亮度等大气参数主要通过 MODTRAN 软件计算得到,系统自动调用 MODTRAN 软件的输出结果;光学系统主要包括系统口径、透过率值等;探测器主要包括探测器的像元尺寸、光电转换效率和积分时间等。

根据信号处理模块中系统的信噪比限定、叠加帧数(白天探测模式下)等计算不同探测模式下的极限探测星等。

4 白天探测能力分析

在地基500 mm口径空间目标白天探测系统论证中,利用开发的软件分析光学探测系统各性能参数对白天探测能力的影响,从而优化参数,这对探测能力提高起至关重要的作用。



图2 全天时探测能力计算软件界面

Fig. 2 Software interface for all-time detection capability calculation

4.1 探测波段

由式(4)和式(9)可知,目标及背景亮度与波段有关。空间目标地基全天时探测的主要难点在于白天天空背景辐射及杂散光引入的背景散粒噪声过于强烈^[12],因此,选取合适的波段以降低天空背景辐射是首要环节。

本文利用大气辐射传输计算软件 MODTRAN 对大气光谱透过率及天空背景辐射特性进行仿真分析,MODTRAN 是由美国空军研究实验室及光谱科技公司基于 FORTRAN 语言开发的大气辐射传输模型,具有较高的光谱分辨率和计算速度,在国际上应用广泛。PcModWin 是

基于 MODTRAN 和 LOWTRAN 两种模型开发的商业软件,能够计算涵盖紫外、红外、可见光光谱范围内的大气透过率,在云、雾等复杂大气环境下仿真模拟得到的大气透过率与实际吻合程度较高,并且考虑大气中分子与气溶胶的散射和吸收、大气背景辐射等因素,具有较高的准确性^[13],据此选定适用于空间目标地基全天时探测的工作波段。

以某布设在西南位置的白天探测望远镜为例,仿真波段区间设置为 $0.4\sim 2.3\ \mu\text{m}$,计算在 45° 观测仰角下的大气光谱透过率,结果如图 3 所示。

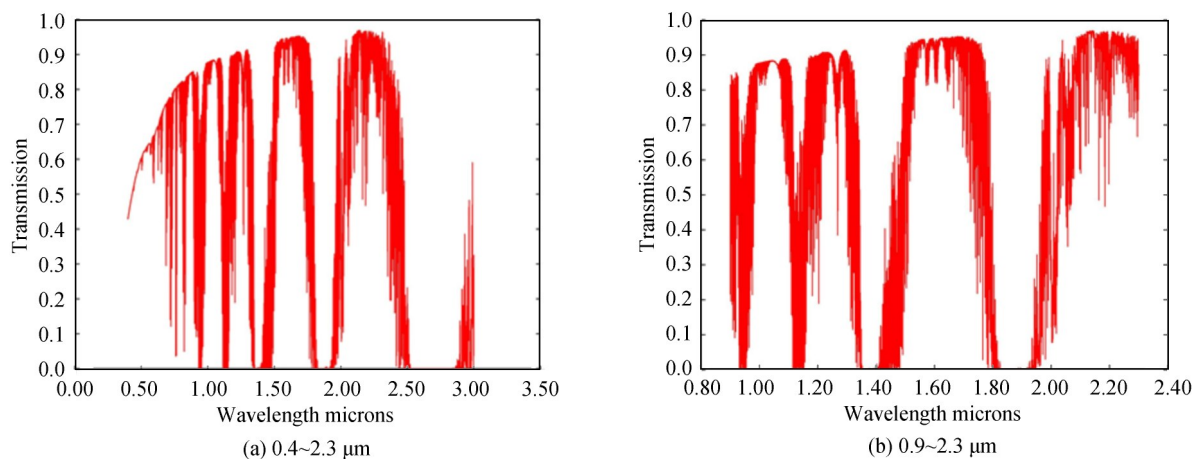


图3 大气光谱透过率

Fig. 3 Atmospheric spectral transmittance

由图 3 可知,受大气中多种气体分子(水汽、二氧化碳、臭氧等)的量子化吸收特性影响,可见光和短波红外波段的大气光谱透过率呈振荡变化趋势,且短波红外波段透过率明显高于可见光波段。大气光谱透过率在 $0.9\sim 2.3\ \mu\text{m}$ 时,短波红外范围内存在 $1.0\sim 1.1\ \mu\text{m}$, $1.2\sim 1.3\ \mu\text{m}$ (J 波段)、 $1.5\sim 1.7\ \mu\text{m}$ (H 波段)、 $2.0\sim 2.3\ \mu\text{m}$ (K 波段)共 4 个明显的峰值,因此,短波红外的 J, H, K 波段构成了非常理想的空间目标地基探测大气窗口。

在考虑大气透过率窗口的基础上,地基空间目标探测更要考虑强天空背景辐射噪声的影响。设定中纬度夏季正午时刻,太阳高度角为 40° ,望远镜观测方向与太阳方向的夹角为 120° , $0.4\sim$

$2.3\ \mu\text{m}$ 天空背景光谱辐射特性如图 4 所示。

由图 4 可知,因白天天空背景辐射的主要来源是太阳光,天空背景辐射强度随波长的变化趋势与太阳辐射谱一致,从 $400\ \text{nm}$ 开始,辐射强度随波长增大而迅速减小,如短波红外波段的天空背景辐射强度比可见光波段平均要低两个数量级。因此,相比较可见光波段,短波红外波段具有更多的大气窗口、更高的大气窗口透过率和更低的天空背景辐射强度。研究表明,空间目标表面某些材料的漫反射率在短波红外波段比可见光波段更高^[14],从而空间目标的探测信噪比及对比度更高,其观测到的目标数量相比可见光波段更多。上述分析表明,短波红外波段透过率高但背景辐射小,比可见光更适合作为空间目标地基

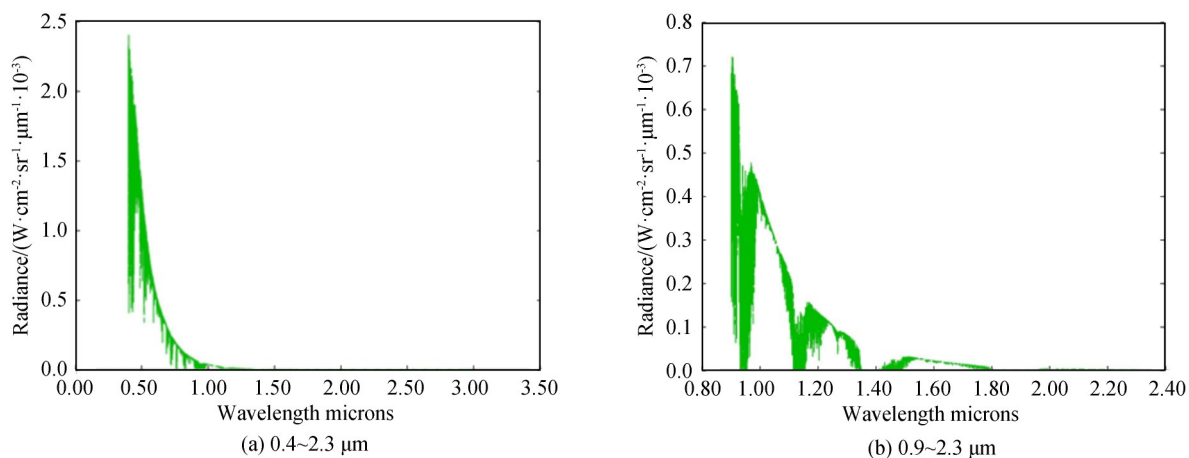


图4 天空背景光谱辐射亮度

Fig. 4 Spectral radiance of sky background

全天时探测的波段^[15],因此,初步选定短波红外的J,H,K波段作为空间目标地基全天时探测的最优波段,可有效提升空间目标白天探测的对比度及信噪比。

统计MODTRAN仿真数据发现,K波段的天天空背景辐射只有H波段的1/3,但当工作波长大于2 μm时,望远镜光机结构的热辐射噪声会影响其对星系和恒星探测的灵敏度^[16],同时结合目前短波红外探测器的发展水平,选择0.9~1.7 μm波段作为后续500 mm地基全天时空间目标的探测波段。该波段内大气透过率及天空背景辐射特性如图5和图6所示。由图可知,在0.9~1.7 μm波段具有较高的大气透过率及相对较低的天空背景辐射,该波段可作为后续空间目标的地基光学系统探测工作波段。

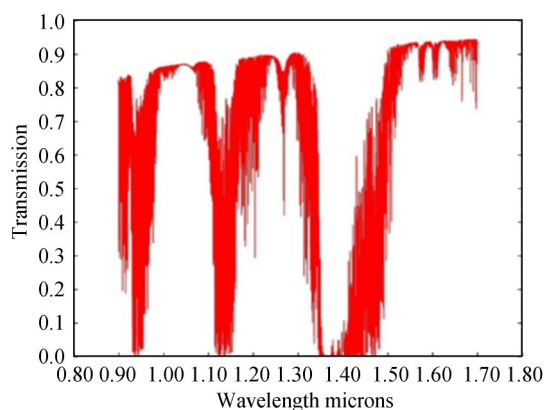


图5 大气透过率

Fig. 5 Atmospheric transmittance

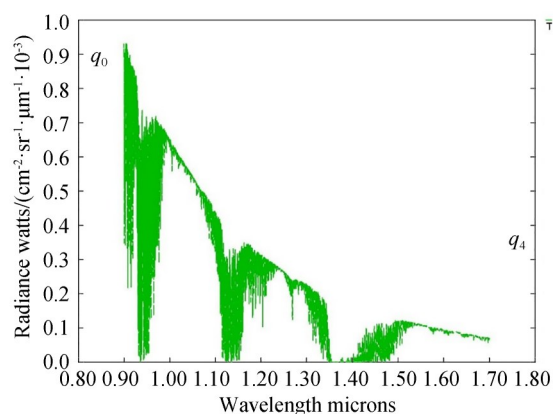


图6 天空背景辐射

Fig. 6 Sky background radiation

4.2 曝光时间

由背景电子数及信号电子数与探测器的曝光时间呈正比。为更好地分析探测器曝光时间与系统探测能力的关系,本文基于前期的研究工作,以地基500 mm口径空间目标白天探测系统为例,仿真参数如表1所示。

对于地基光学望远镜而言,信噪比 ≥ 5 是进行空间目标正常分析处理的合适范围^[17]。因此在计算探测能力时,为保证目标信号有效,设 SNR_{total} 取5,目标占4个像素时的星等为极限星等。由式(13)计算探测星等随积分时间变化的曲线,如图7所示。显而易见,系统探测能力随积分时间的增加而增强。

然而,由式(8)和式(9)可知,增加积分时间会使背景像元电子数增多,但受限于探测器的有

表 1 仿真计算参数

Tab. 1 Simulation calculation parameters

参数	取值
K	4
τ_a	0.5
L_B	2.5
$\lambda_0/\mu\text{m}$	1.3
τ_o	0.5
D/mm	500
F	4
$Pitch/\mu\text{m}$	15
η	0.7

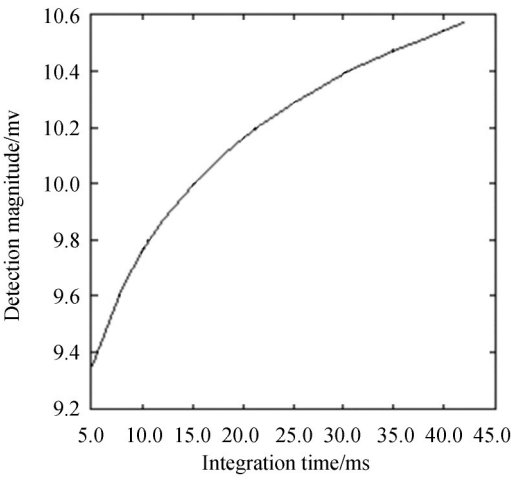


图 7 探测星等与积分时间的关系

Fig. 7 Relationship between detection magnitude and integration time

限满阱,过多的背景电子数会导致探测器饱和。因此,单帧图像的曝光时长不能无限制增加,合理选择单帧曝光时间 t_{int} 是能否探测到目标的重要因素,一般选择背景信号不超过满阱电子数的70%^[18-19]。本软件还可以辅助操作人员在目标观测前计算出单帧最大曝光时间。

4.3 口径

由于影响空间目标白天探测的因素很多,因此根据本文建立的全天时探测能力特性模型,研究望远镜口径对探测能力的影响。由式(10)可以看出,信噪比与光学系统的口径成正比。

以4.2节中的参数为计算参数, SNR_{total} 取5,积分时间取20 ms,系统 F 数取4保持不变,4个像素的目标对应星等为极限星等。通过式(13)

计算可得不同口径望远镜的探测星等见表2。

表 2 探测能力计算结果

Tab. 2 Results of detection capability calculations

光学口径/mm	探测能力/ m_v
400	9.79
500	10.20
700	11.00
800	11.29
1 000	11.78

由图8可知,光学系统探测能力随口径的增加而增强,且要想提高一个星等的探测能力,望远镜口径需增加1.6倍。

据此分析结果,在确定地基光学系统选型及参数时,根据系统对目标探测能力和跟踪频率的要求,在满足目标稳定提取的前提下,能够估算出光学系统的通光口径。此外,口径的选择还应同时满足方案的探测成像要求。

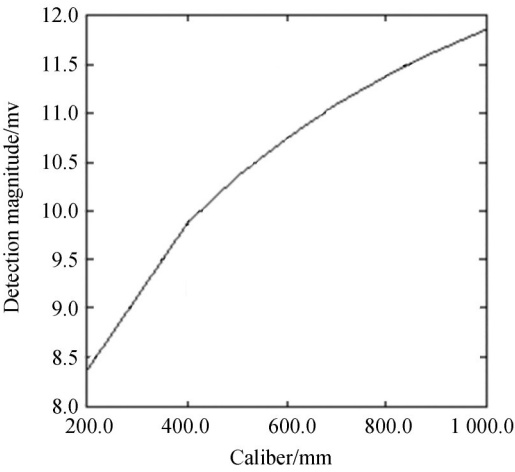


图 8 探测星等与口径的关系

Fig. 8 Relationship between detection magnitude and aperture size

4.4 观测仰角

首先,利用全天时探测能力模型软件对系统的探测能力进行计算,以长春为观测地点,观测时间取6月份某天上午10:00,观测方向与太阳夹角大于45°条件下, SNR_{total} 取5,积分时间取20 ms,在不同观测仰角情况下,5帧联合相关算法处理,系统探测能力如表3所示。

表 3 不同观测仰角下的探测能力

Tab. 3 Detection capability at different elevation angles

观测仰角/(°)	探测极限/ m_v
80	10. 985 4
70	10. 957 7
60	10. 906 2
50	10. 825 2
40	10. 703 5
30	10. 520 6
20	10. 224 8
10	9. 627 73

5 实 验

本文依托某 500 mm 口径同步轨道空间碎片全天时探测系统开展观测实验,望远镜的主要技术指标如表 4 所示。

表 4 探测能力计算参数

Tab. 4 Parameters for detection capability calculations

参 数	值
工作波长/ μm	0. 9~1. 7
口径/mm	500
F 数	4
探测器量子效率	0. 7
探测器像元尺寸/ μm	15
读出噪声	100e^-
满阱电子数	$1. 3\text{Me}^-$
光学系统透过率	0. 5
暗电流/ $(\text{pixel}\cdot\text{s}^{-1})$	$1\,276\text{e}^-$

如图 9 所示,利用 500 mm 白天探测系统,在海拔 200 m、经度 $123^{\circ}24'9''$ 、纬度 $43^{\circ}50'46''$ 的东北地区,白天上午 10:40 开展外场观测实验,相机积分时间取 40 ms。首先使用空旷无云处的天空背景进行单点非均匀性校正,随后对不同俯仰角下的恒星进行观测实验以验证探测能力。

图 10 和图 11 分别为对 7 星等~8 星等不同恒星的观测效果。图 10(b)和图 11(b)中的白点为探测到的恒星,考虑到本系统中的数据输出频率等相关因素,本次采用 10 帧图像联合相关处理。

在太阳高度角为 $66^{\circ}41'$,望远镜俯仰角为



图 9 白天探测系统

Fig. 9 Daytime detection system

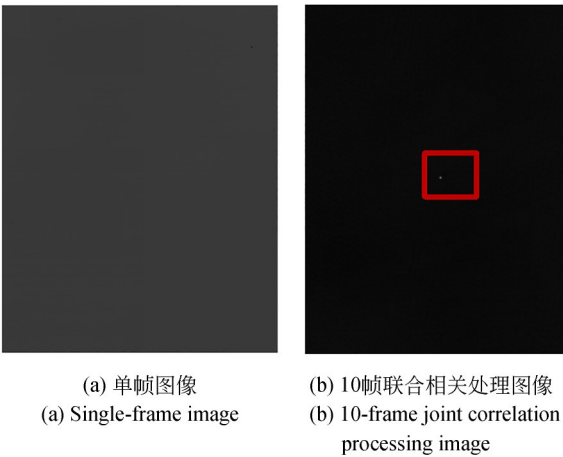


图 10 恒星编号 13017 的观测效果

Fig. 10 Observation results of star number 13017

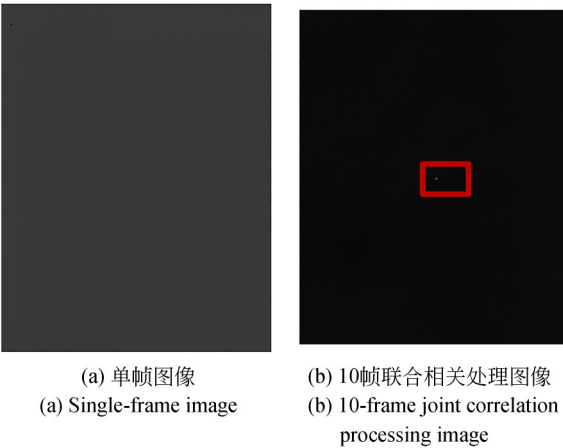


图 11 恒星编号 11406 观测效果

Fig. 11 Observation results of star number 13017

52°17'时,采用10帧联合相关算法可以实现对7.51星等的恒星探测(恒星编号为13017)(见图10)。对比处理前后两幅图像可知,此观测条件下,依靠单帧图像无法实现对7星等以上的恒星探测,其单帧理论信噪比仅为3.3,10帧图像经联合相关算法处理后理论信噪比为10.5,实测信噪比为11.6,探测星等实测与理论计算误差为0.11星等。

在太阳高度角为65°33',望远镜俯仰角为65°18'时,可以实现对8星等的恒星探测(恒星编号为11406),如图11所示。此观测条件下,单帧理论信噪比为2.6,10帧图像经联合相关算法处理后理论信噪比为8.23,实测信噪比为8.5,探测星等实测与理论计算误差为0.27星等。

6 结 论

针对地基光学探测望远镜白天强背景下探测能力受限且评估效率较低的问题,本文采用多帧联合相关处理搭建了基于目标能量的全天时探测能力特性模型,基于Labview平台设计了全天时探测能力模型软件。利用该模型软件,

对大气透过率、天空背景辐射、观测波段及望远镜口径对探测能力的影响分别进行了分析,明确0.9~1.7 μm 为白天最优探测波段,并实现了某500 mm地基空间目标望远镜白天探测的能力设计及评估,在此基础上,通过外场试验进行了该模型的验证,与理论计算误差小于 ± 0.3 星等。该模型大大提高了论证效率,为后续地基空间目标全天时望远镜论证及有效评估提供了有效支撑,并为后续光学测量望远镜数字化建设奠定了基础。

作者贡献声明:

高昕:地基空间目标望远镜全天时探测体制的提出,论文构思与撰写;

王建立:望远镜全天时探测实现具体方法的总体设计;

李希宇:全天时探测能力计算推导与影响因素分析;

姚凯男:全天时探测能力影响因素分析;

宗永红:全天时探测能力软件编写;

郝三峰、徐志强:实验数据整理与分析。

参考文献:

- [1] NYQUIST H. Thermal agitation of electric charge in conductors[J]. *Physical Review*, 1928, 32(1): 110-113.
- [2] 陈秀红,魏合理,徐青山. 红外大气透过率的计算模式[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 811-816.
CHEN X H, WEI H L, XU Q SH. Infrared atmospheric transmittance calculation model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 811-816. (in Chinese)
- [3] 赵民,周凡利,陈立平,等. 发展数字化工程,实现航天装备数字化[J]. *导弹与航天运载技术*, 2021(6): 106-113.
ZHAO M, ZHOU F L, CHEN L P, *et al.* Digitalization of spacecraft by digitization engineering[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2021(6): 106-113. (in Chinese)
- [4] 宋力夺,姚凯男,徐志强,等. 全天时中高轨目标探测系统恒星移除[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(23): 3436-3445.
SONG L D, YAO K N, XU ZH Q, *et al.* Stars removal of all day time mid-high orbit target detection system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(23): 3436-3445. (in Chinese)
- [5] KRING J. *LabView for Everyone* [M]. Prentice Hall, 2006.
- [6] 张科科,傅丹鹰,周峰,等. 空间目标可见光相机探测能力理论计算方法研究[J]. *航天返回与遥感*, 2006, 27(4): 22-26.
ZHANG K K, FU D Y, ZHOU F, *et al.* The study on detect ability calculation method of space object visible camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(4): 22-26. (in Chinese)
- [7] SHAHEEN S E, BRABEC C J, SARICIFTCI N S, *et al.* 2.5% efficient organic plastic solar cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(6): 841-843.
- [8] ZOMBECK M V. *Handbook of Space Astronomy and Astrophysics* [M]. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [9] WILKINS A N, MCELWAIN M W, NORTON T J, *et al.* Characterization of a photon counting EMCCD for space-based high contrast imaging spectroscopy of extrasolar planets[EB/OL]. 2014: arX-

- iv: 1407.0701. <https://arxiv.org/abs/1407.0701>
- [10] WANG D J, XU Y S, YAO Y, *et al.* Effects of electron multiplication on the CCD SNR in remote sensing application [J]. *Optik*, 2013, 124 (21): 4832-4835.
- [11] 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.
WEI H L, CHEN X H, YU K, *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)
- [12] 陈宏毅. 空间目标地基全天时多维度探测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
CHEN H Y. *Research on Multi-Dimensional Detection Technology of Space Target Foundation All-Day Period*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [13] 王婉婷, 王书晓, 王立雄. 基于 MODTRAN 模型的路灯透雾性研究[J]. *照明工程学报*, 2018, 29(2): 95-99.
WANG W T, WANG SH X, WANG L X. Study on the streetlight transmissivity in fog based on MODTRAN model [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2018, 29(2): 95-99. (in Chinese)
- [14] 韩艳丽, 郭晓军, 姜树理. 短波红外全天时自主天文导航技术展望[J]. *海军航空工程学院学报*, 2013, 28(3): 324-329.
HAN Y L, GUO X J, LOU SH L. Prospect of the self-determination celestial navigation technology with daytime SWIR[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2013, 28(3): 324-329. (in Chinese)
- [15] DRIGGERS R G, HODGKIN V, VOLLMER-HAUSEN R. What good is SWIR? Passive day comparison of VIS, NIR, and SWIR[J]. *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIV*, 2013, 8706: 87060L.
- [16] 王铎, 韩艳丽, 孙腾飞. 三视场白天测星研究[J]. *光电技术应用*, 2014, 29(5): 26-30.
WANG D, HAN Y L, SUN T F. Research on three-FOV star detection during daytime[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(5): 26-30. (in Chinese)
- [17] 牟帅威, 吴洪波, 张新, 等. 面向空间目标广域探测的大视场宽光谱光学系统设计[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(5): 1174-1184.
MU SH W, WU H B, ZHANG X, *et al.* Design of optical system with wide field of view, broad spectral range for space target detection[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1174-1184. (in Chinese)
- [18] 黄智国, 王建立, 王昊京, 等. 红外 K 波段白天探测能力分析验证[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 166-172.
HUANG ZH G, WANG J L, WANG H J, *et al.* Analysis and verification of infrared K band daytime detection ability[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 166-172. (in Chinese)
- [19] 黄智国. 空间目标地基红外探测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
HUANG ZH G. *Research on Space Target of Ground-Based Infrared Detection Technology* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)

作者简介:



高 昕(1973—),男,天津人,博士,研究员,1998年于西北工业大学获得硕士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学探测与成像等技术的研究。E-mail:gaoxin526@sina.com