中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

面向空间目标广域探测的大视场宽光谱光学系统设计

牟帅威 吴洪波 张新 马霖 闫磊 谭双龙

Design of optical system with wide field of view, broad spectral range for space target detection

MU Shuai-wei, WU Hong-bo, ZHANG Xin, MA Lin, YAN Lei, TAN Shuang-long

引用本文:
牟帅威, 吴洪波, 张新, 马霖, 闫磊, 谭双龙. 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, 2025, 18(5): 1174–1184. doi: 10.37188/CO.2024–0198
MU Shuai-wei, WU Hong-bo, ZHANG Xin, MA Lin, YAN Lei, TAN Shuang-long. Design of optical system with wide field of view, broad spectral range for space target detection[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1174-1184. doi: 10.37188/CO.2024-0198

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024–0198

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间目标自适应光学图像椭圆部件检测

Detection of elliptical components in adaptive optical image of space target

中国光学（中英文）. 2022, 15(3): 454 https://doi.org/10.37188/CO.2021–0208

应用于大视场生物成像分析仪的离轴三反显微物镜设计

Objective lens design with off–axis three–mirror system for large field of view biological imaging analyzer

中国光学（中英文）. 2021, 14(5): 1177 https://doi.org/10.37188/CO.2021–0020

空间目标地基观测红外辐射特性研究

Infrared radiation characteristics of space target based on ground–based detector

中国光学（中英文）. 2023, 16(6): 1424 https://doi.org/10.37188/CO.2023–0032

星模拟器光学系统视场拼接方法的研究

A field–of–view splicing method for the optical system of a star simulator

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1468 https://doi.org/10.37188/CO.2020–0221

光学系统降敏设计方法综述

Review of optical systems′ desensitization design methods

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 863 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0096

空间引力波探测望远镜光学系统设计

Optical design of space gravitational wave detection telescope

中国光学（中英文）. 2022, 15(4): 761 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0018

文章编号　2097-1842(2025)05-1174-11

面向空间目标广域探测的大视场宽光谱光学系统设计

牟帅威[1,2], 吴洪波[1], 张　新[1], 马　霖[1], 闫　磊[1], 谭双龙[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: 为了实现空间目标的广域探测, 本文设计并研制了一种宽光谱(400~1 000 nm)、大视场(61°)、小 F 数(1.38)、低畸变的光学系统。该光学系统具备六等星的探测能力, 能够实现对空间目标的广域探测。首先, 建立空间目标探测辐射特性模型与光学系统参数的映射关系, 然后开展相应的光学系统设计理论分析, 采用反摄远式结构作为初始的光学系统设计构型。通过优化设计, 平衡并校正其大视场与宽光谱带来的严重色差, 提高能量集中度的同时兼顾弥散斑圆整度。空间光学仿真及实物探测能力实验验证结果表明, 该光学系统能够满足六等星的空间目标广域探测需求。该光学系统整体设计合理、结构紧凑, 能够满足空间目标广域探测的应用需求。

关　键　词: 空间目标; 广域探测; 光学系统设计; 大视场; 宽光谱
中图分类号: D590.35D510.40　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2024-0198　　**CSTR:** 32171.14.CO.2024-0198

Design of optical system with wide field of view, broad spectral range for space target detection

MU Shuai-wei[1,2], WU Hong-bo[1], ZHANG Xin[1], MA Lin[1], YAN Lei[1], TAN Shuang-long[1*]
(1. *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: 15567408408@126.*com*

Abstract: To achieve wide-area detection of space targets, we design an optical system with a broad spectrum range (400~1 000 nm), a large field of view (61°), a small F-number (1.38), and low distortion. This optical system is capable of detecting space targets with a magnitude of 6, enabling wide-area detection for space targets. Initially, a mapping between the radiation model of space target detection and the optical system parameters is established. The optical design is then theoretically analyzed using a reverse telephoto layout as the initial design configuration. The design is optimized to balance and correct the severe chromatic aberration resulting from the large field of view and wide spectral range, while improving enclosed energy and considering the roundness of scattered spots. Finally, The detection capability is verified through space

收稿日期: 2024-10-24; **修订日期:** 2024-11-19
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62475122)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62475122)

optical simulation experiment and physical experiment. The results show that the optical system meets the wide-area detection requirements for space targets with a magnitude of 6. The overall design of the optical system is reasonable and compact, meeting the requirements of wide-area detection of space targets.

Key words: space target; wide-area detection; optical system design; large field of view; broad spectrum

1　引　言

随着科学技术的发展, 人们对太空的探索愈加频繁, 数以千计的航天设备被发射向太空。其中典型的代表是 SpaceX“星链计划”[1-2]。截止到 2024 年, “星链计划”升空卫星已达 6 500 多颗, 太空资源的争夺大战愈演愈烈, 空间环境日益恶化, 太空呈现愈加拥挤的状况。与此同时, 失效航天器碰撞产生的空间碎片[3] 以及各种类型的空间垃圾越来越多, 其恶化趋势不容小觑。在这种应用背景下, 研究人员开展了相关的应用研究。

空间目标探测手段有很多种, 使用天基光学系统进行空间目标探测是非常高效的探测手段。相比于其他探测手段, 天基光学系统能够直接且有效地对航天设备周围空间进行探测。其在时间上具有实时性, 在空间上具有广泛性, 因而可以对在轨航天设备周围的空间目标进行实时的广域探测。日前, 对于空间目标探测已经成为比较热门的研究领域, 很多科研机构也对空间目标探测光学系统进行了研究, 杨英哲[4]、焦建超[5]、张庚耀[6]、宗云华[7] 等人分别设计了一种视场为 16°、8°、9°和 18°以及工作波段在 450~850 nm、420~700 nm、450~800 nm 和 450~800 nm 的空间目标探测光学系统。这些探测系统探测能力优异, 但视场与工作波段并没有得到扩大, 不能对多空间目标进行广域探测。由于较宽的工作波段必然会带来巨大的色差, 且在进行无热化设计过程中, 宽光谱光学系统对于材料性质引起的热差更加敏感, 造成整体的能量集中度与像质下降。此外, 小 F 数、大视场的光学系统结构较为复杂, 这也会给无热化设计增加难度。因此在保证大视场、小 F 数、低畸变的同时进行光学系统的宽光谱光学系统设计是难以实现的。不同于其他应用背景, 行业内一般用弥散斑圆整度、能量集中度、畸变、色差等评价指标来对空间目标探测光学系统进行整体性能评估。但大视场宽光谱的设计需求与以上评估指标相互矛盾, 这无疑进一步给光学系统的设计增加了难度。

综上所述, 目前关于兼顾大视场、宽光谱、低畸变的空间目标广域探测光学系统设计方法的研究较少。本文从建立空间目标探测辐射特性模型与光学系统参数的映射关系开始, 对光学系统设计理论进行逐步分析, 开展相应的光学系统设计。然后, 通过空间光学仿真进行了探测能力验证, 并开展了实物探测能力实验验证。

2　空间目标探测光学系统模型构建

2.1　工作波段的选择

对于空间目标探测而言, 光学系统的工作波段极其重要。由于大多数空间目标都能够对太阳光谱中的可见光波段进行反射, 从而能够被光学系统探测到。与其对应的可见光空间目标探测光学系统, 通常分辨率较高、成像信息相对丰富, 探测距离可以很远, 相应的光学系统视场也可以设计到很大。但要避免太阳背景和空间目标出现在地球阴影区。由于红外辐射不受光照条件的影响, 因此, 红外波段对于一些处于昏暗条件的空间目标具有独特的优势, 其对于提升光学系统的探测能力非常有效[8]。

图 1(彩图见期刊电子版)给出了太阳的光谱响应曲线。

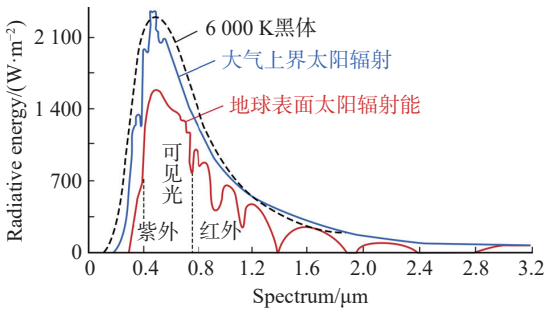


图 1　太阳光谱响应曲线

Fig. 1　Solar spectral response curve

太阳可以等效为 6 000 K 的黑体, 在可见光段以及近红外波段都有良好的响应。为了充分利用

太阳光谱响应，工作波段拟定为 400~900 nm。在可见光波段的基础上添加近红外波段，以扩展光学系统的工作波段，这在一定程度上也拓宽了空间目标的有效反射光谱波段，有效提高了光学系统在地影区的探测能力。与此同时，宽谱段带来的巨大色差以及对环境敏感度的增加也为后续光学系统设计工作增加了难度。

2.2 探测器的选型

对于空间目标探测而言，选择合适的探测器是极其重要的，合适的探测器能够保证光学系统的整体探测能力。本文选用长光辰芯光电技术有限公司的科学级 CMOS 探测器 GSENSE400BSI。该探测器具有良好的散热和抗冲击能力，确保光学系统能够在太空环境中安全稳定的运行。此外，该探测器对可见光以及近红外波段的响应优异，如图 2 所示，其在可见光、近红外及紫外波段都具有较高的量子效率，500~800 nm 波段的量子效率达 0.5 以上。该探测器的面阵规模为 2048×2048，整体靶面大小为 22.5 mm×22.5 mm，单一像元尺寸为 11 μm×11 μm。

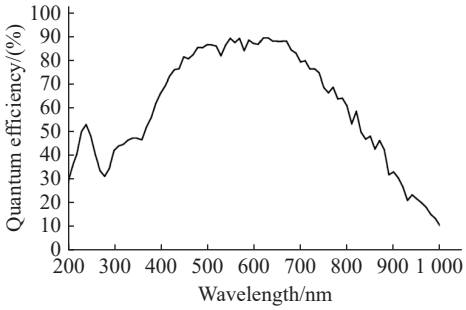


图 2 GSENSE400BSI 探测器光谱响应曲线

Fig. 2 Spectral response curve of the GSENSE400BSI detector

此外，空间目标探测光学系统的设计及评价指标还包括焦距、探测视场、通光口径、探测能力（一般用星等来评估）、光谱范围、畸变、能量集中度以及工作温度范围等。探测口径与光谱范围共同影响该光学系统的探测能力。本着与太阳光谱响应度相匹配的原则，在留有一定光谱余量的同时，最终该光学系统的工作波段选定为 400~1 000 nm。适度地增大工作波段范围，有利于降低光学系统的探测口径，可在保证探测能力的同时最大程度上实现光学系统的轻量化小型化。

2.3 焦距的确定

根据经典光学系统设计理论，对于像方而言，在探测器靶面大小一定时，短焦距对应大视场，长焦距对应小视场。对于空间目标探测，其为大视场，必然对应短焦距，因此，只有提高相对孔径才能保证探测能力。在保证探测能力的同时，提高探测视场范围也是空间光学系统的一个发展趋势。60°视场是一个特殊的视场节点，一般认为 60°到 90°是广角，90°以上是超广角。由于畸变和视场的三次方成正比，视场角越大，畸变越难以矫正。同时，视场的扩大也会带来巨大的色差以及使边缘视场照度下降，导致光学系统整体探测能力与相关像质下降，给光学系统设计带来难度。本着将畸变以及照度控制到合理范围并且兼顾广域探测的原则，选定光学系统全视场为 61°。

对于空间目标而言，从物方空间来看，由于对物方空间目标建模存在不确定性，因此一般从像方入手，有：

$$f = \frac{L/2}{\tan(\omega/2)} \quad , \tag{1}$$

式中：L为探测器靶面对角线尺寸；ω为光学系统全视场角。

在保留一定余量的前提下，通过公式 (1) 能够计算出光学系统焦距为 27 mm。

2.4 空间目标探测模型构建

2.4.1 探测模型的建立

在研究空间目标探测模型时，设定空间目标进入光学系统的辐照度为E_{m}，并用星等 Mv 来评估光学系统在太空环境下的探测能力。通常而言，0 等星的光照度E_0为2.65×10^{-6} lx[9]。倘若某一空间目标为 m 等星，则相应的目视星等计算公式为：

$$E_m = E_0 \cdot 2.512^{-m} \quad . \tag{2}$$

经过光学系统后，在 CMOS 探测器上接收到的光通量Φ和光照度E_{CMOS}分别为：

$$\Phi = \frac{\pi}{4} D^2 E_{\mathrm{m}} \tau \quad , \tag{3}$$

$$E_{\mathrm{CMOS}} = \frac{\Phi}{\pi d^2/4} \quad , \tag{4}$$

式中：τ为光学系统的透过率；d为像面光斑直径；D 为通光口径。

与此同时，在 CMOS 上接收到的光学系统总光子数可以表示为：

$$N_p = \frac{\Phi T}{E_p} \quad , \tag{5}$$

式中: $E_p=hc/\lambda$; h 为普朗克常量; c 为光速; T 为积分时间;

若 CMOS 或 CCD 的量子效率为η, 则在探测器表面产生的空间目标信号电子数为:

$$N_e = N_p\eta = \frac{\pi D^2 E_{\mathrm{m}} \tau T \lambda \eta}{4\mathrm{hc}} \quad . \tag{6}$$

空间目标一般作为点目标, 其在像面上会覆盖一定的像元数, 而光斑直径达 3 倍像元以内就够保证对暗弱目标的有效探测。与此同时, 对于本文所设计的光学系统, 要保证其在 3 pixel×3 pixel 内(光斑半径在 16.5 μm 内)全视场的能量集中度要达到 80% 以上。若单个像元大小为 a, 那么光斑直径 d 为 $3a$, 则单个像元所接收到的信号电子数为:

$$S = N_e \frac{(a)^2}{\frac{\pi}{4}(3a)^2} = \frac{D^2 E_{\mathrm{m}} \tau T \eta \lambda}{9\mathrm{hc}} \quad . \tag{7}$$

结合信噪比计算公式, SNR=S/N, N 为探测器噪声, 仅需考虑影响较大的暗电流噪声n_{dark}和读出噪声n_{RN}。根据上述公式, 有:

$$D \geqslant \left[\frac{S\,NR^2 + \sqrt{S\,NR^4 + 4S\,NR^2(B + N_{\mathrm{sensor}}^2)}}{2 \cdot E_{\mathrm{CMOS}} \cdot \tau \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot \eta} \right] \quad , \tag{8}$$

式中: B 为太空中的环境噪音, 可以忽略不计; N_{sensor} 为探测器噪声。

对于空间目标探测而言, 信噪比 SNR 大于 5 即可。此时, 就可以有效探测到视场内的空间目标。

2.4.2　光学系统通光口径的确定

根据上述空间模型, 可以求得对应光学系统的通光口径。设定光学系统的透过率τ为 0.8, 量子效率η=50%, 则在六等星的探测能力下, 使积分时间 T 取不同的值, 可以根据上述模型计算出光学系统的通光口径与系统信噪比的关系, 如图 3 (彩图见期刊电子版)所示。

由图 3 可知, 在积分时间不小于 20 ms, 光学系统的通光口径大于 15 mm 时, 信噪比在 5 以上。同时, 为了实现高灵敏度的空间目标探测, 在留有一定余量的同时应尽可能增大通光口径。

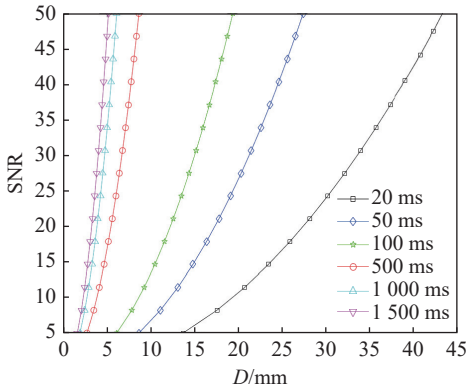


图 3　不同积分时间下光学系统通光口径和信噪比的关系图

Fig. 3　Corresponding relationship between optical system aperture and signal-to-noise ratio under different integration times

经过上述分析, 最终确定的光学系统设计参数如表 1 所示。

表 1　光学系统设计参数

Tab. 1　Design parameters of the optical system

设计参数	参数值
视场/(°)	61
工作波段/nm	400~1 000
焦距/mm	27
F数	1.38
3×3像元能量集中度	>80%
探测器靶面尺寸/mm	22.5×22.5
探测器像元尺寸/μm	11
倍率色差/μm	<8
温度范围/°C	10~30
相对畸变	<4%
边缘视场照度	>40%

3　光学系统选型与原理

3.1　光学系统结构分析

光学系统结构类型分为折射式、反射式、折反式三种。折射式光学系统的 F 数一般可以达到 1.3, 甚至更小, 但是由于受二次光谱的限制, 难以矫正其宽光谱色差, 故光学系统设计难度较大。此外, 折射式光学系统的透镜对温度敏感, 因此无热化矫正困难。然而, 如果需要大视场, 折射式光学系统通常是更优的选择。反射式光学系统不依赖于透镜进行成像, 能够消除色差, 适用于宽

谱段，且易于无热化设计，但不易于实现大视场。折反式光学系统的光谱范围更广，能够获得优异的成像质量，可以实现高分辨率，其缺点与反射式类似[10]。由此可知，每一种结构类型都有其独特的优缺点，分别适用于不同的应用场景与应用需求。表 2 给出了几种光学系统优缺点。

表 2 不同类型光学系统对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of different optical system types

光学系统类型	优点	缺点
反摄远式	1. 易于实现轻量小型化。 2. 系统响应在时间上具有实时性且在空间上具有良好的一致性。	1. 对于大视场、宽光谱的光学系统，色差矫正难度大。 2. 光学系统设计难度大。
同心物镜式	1. 所有表面严格共心，不存在轴外像差，成像质量优异。 2. 适合大视场、宽光谱的光学系统设计。	1. 像面为曲面，解决方法繁琐复杂。
里斯利棱镜扫描式	1. 该系统可以协同控制算法，对视场内的某一空间目标进行动态追踪。 2. 可以实现对视场内的空间目标进行主动规避。	1. 体积较大，存在因棱镜引起的色差与畸变[16]问题。 2. 系统的响应速度有所牺牲。 3. 杂散光问题较为严重。

折射式光学系统中的反摄远式光学系统如图 4 所示。图中：BFL 为后截距，f' 为系统焦距，φ_1、φ_2 分别为前组透镜和后组透镜的光焦度。由于其兼顾广角和长工作距离，更适用于大视场光学系统设计。由图 4 可知，视场角很大的轴外光线，经前组负透镜发散后，相对于后组透镜视场变小，从而达到扩大视场（广角）的目的。在本文的空间目标探测应用背景下，采用反摄远式光学系统作为初始结构，能够兼顾光学系统的视场和体积，能够满足实际应用需求。

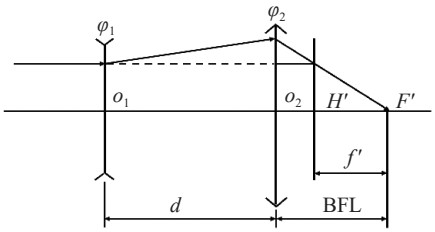


图 4 反摄远式光学系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of reverse telephoto optical system

除上述构型外，也可将上述光学系统与一些现代技术相结合，从而实现扩大视场的目的。倘若将里斯利棱镜与小视场光学系统相结合，通过里斯利棱镜将大视场的主光线进行偏折[11-12]，并且通过两个里斯利棱镜的相对旋转可以实现任意光束偏转角[13-14]，据此，可以进行光轴偏转，实现视场扫描，进而能够扩大视场[15]。

除此以外，同心物镜多尺度成像光学系统也可应用于空间目标探测领域。由于同心物镜光学系统所有表面均严格共心，整个镜头仅需要进行初、高级球差和色差矫正，不存在轴外像差，能够适用于大视场、宽光谱的空间目标探测[16-18]。但由于该类光学系统像面为曲面，目前一般采用微相机阵列[19-20]或者光纤束拼接方案[21-22]解决弯曲像面的问题，如图 5（彩图见期刊电子版）所示。该系统光学设计部分相对简单，但弯曲像面解决方案较为繁琐复杂。

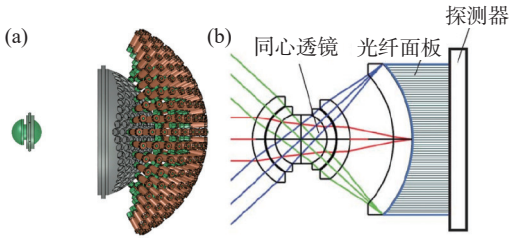


图 5 (a) 文献 [20] 及 (b) 文献 [21] 的弯曲像面解决方案

Fig. 5 Solutions for curved image surface in (a) Ref. [20] and (b) Ref. [21]

3.2 旋转双棱镜扫描式与同心物镜式光学系统设计

本文开展了基于旋转棱镜的扫描式和同心物镜式光学系统设计。选用探测器 GSENSE400-BSI，得到了一个焦距为 61 mm、工作波段在 400~1 000 nm、局部视场为 28°、全视场为 60°、通光口径为 20 mm 的扫描式光学系统，设计结果如图 6 所示。

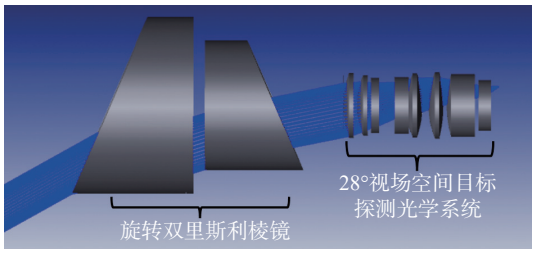


图 6 旋转双里斯利棱镜光学系统

Fig. 6 Rotating double Risley prism optical system

此外，当探测器选用长光辰芯的大靶面探测器 GSENSE1081BSI 时，完成了工作波段为 400~1 000 nm、焦距为 153.9 mm、全视场为 62°、通光口径为 38 mm 的同心物镜光学系统设计，如图 7 所示。

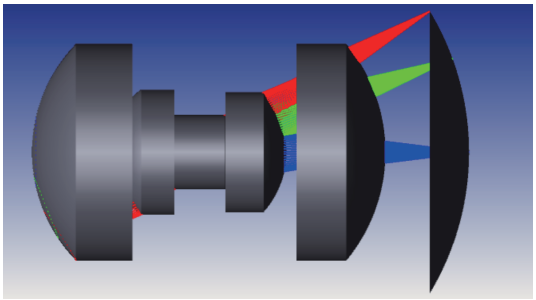


图 7　同心物镜光学系统

Fig. 7　Concentric objective optical system

综上所述, 结合本文空间目标广域探测的应用背景, 经综合考量, 选用反摄远式作为光学系统的初始构型, 并以此开展相关工作。

4　空间目标探测光学系统设计与分析

4.1　大视场宽光谱光学系统设计

光学系统的设计与优化是极为重要的一个环节。该环节通过光学系统设计软件完成, 具体的设计流程如图 8 所示。

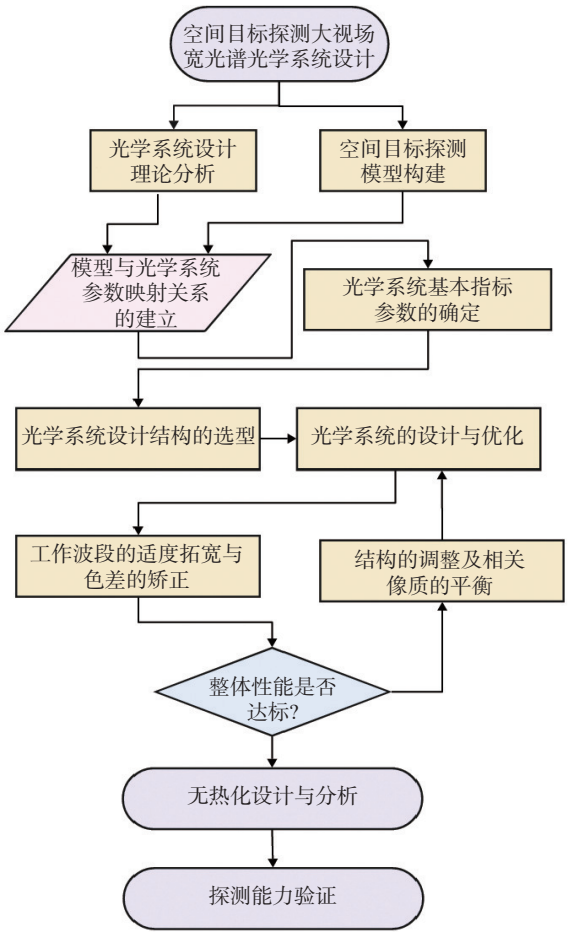


图 8　光学系统设计流程图

Fig. 8　Optical system design flow diagram

将图 9 所示的反摄远式结构作为初始结构, 从 500~800 nm 的可见光工作波段入手开展设计与优化。不断增大工作波段(最终使其增大到 400~1 000 nm), 会发现随着视场的增大, 色差越来越难以矫正。此外, 在二级光谱的限制下, 增加透镜数量已经难以矫正宽光谱引起的严重色差。对于这种情况, 通过适度引入非球面, 合理分配各个组分的光焦度, 并兼顾尺寸与非球面系数绝对值大小, 可保证其可加工性[23]。此外, 由于宽波段对边缘视场的影响最大, 故无法提升其能量集中度, 考虑引入适量渐晕拦截部分边缘光线, 同时需要兼顾照度, 经过相关设计和优化得到光学系统设计结果如图 10 所示。相关设计参数如表 3 所示。此外, 还给出了光学系统点列图(图 11)及光学系统垂轴色差图(图 12, 彩图见期刊电子版)。

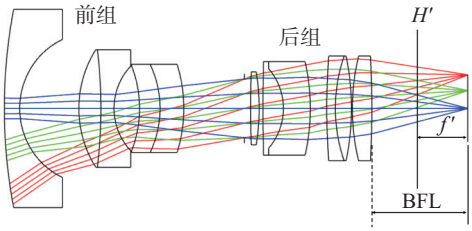


图 9　光学系统初始结构

Fig. 9　Initial structure of optical system

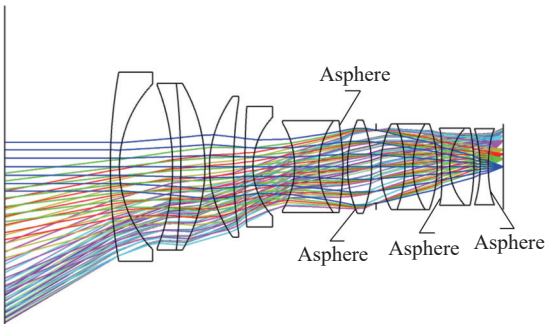


图 10　光学系统最终设计结果图

Fig. 10　Final design results of optical system

表 3　光学系统设计结果

Tab. 3　Design results of the optical system

参数	结果
全视场/(°)	61
工作波段/nm	400~1 000
3×3像元能量集中度	>80%
倍率色差/μm	<8
边缘视场照度	>40%
相对畸变	<4%

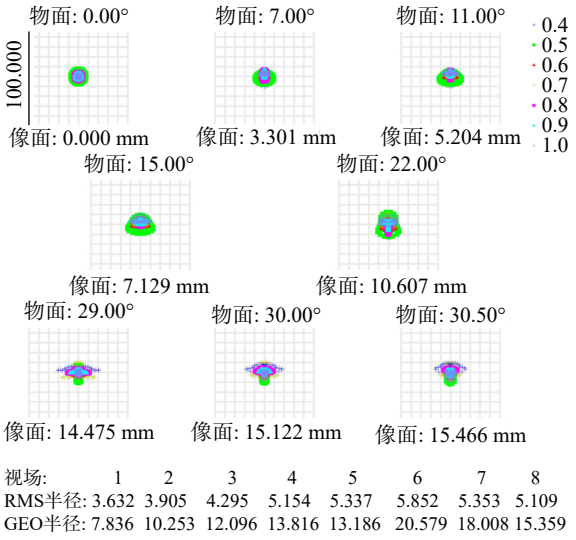


图 11 光学系统标准点列图

Fig. 11 Standard spot diagram of the optical system

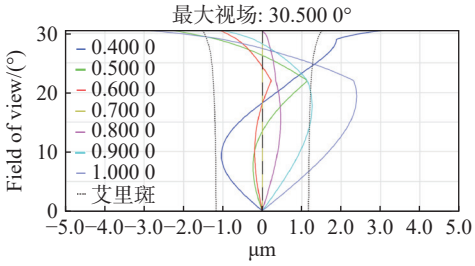


图 12 光学系统垂轴色差图

Fig. 12 Lateral chromatic aberration diagram of the optical system

从表 3 可以看出，该光学系统色差矫正情况良好，弥散斑圆整度合理，能够满足实际工程应用需求。

对于无热化，本文采用被动消热差设计。首先，在常温下尽可能让光学系统的成像质量达到最优。然后，根据光学系统与结构材料的热差性能差异进行匹配优化，实现光学系统被动消热差设计。光机结构采用线胀系数较小的钛合金，负光焦度组采用线胀系数较小的玻璃材料 H-K51 等，正光焦度组采用线胀系数略大的玻璃材料 D-ZPK7 等，以进行消热差匹配优化设计。本文测试了 10°C、20°C 及 30°C 时光学系统能量集中度，如图 13(彩图见期刊电子版)所示。

从图 13 可以看出，该光学系统的相对畸变小于 4%，相对照度在 40% 以上，全视场能量集中度在 3×3 像元内(光斑半径在 16.5 μm 内)均大于 80%。在 10~30°C 工作温度区间内系统表现良好，能够满足空间目标广域探测的工程应用需求。

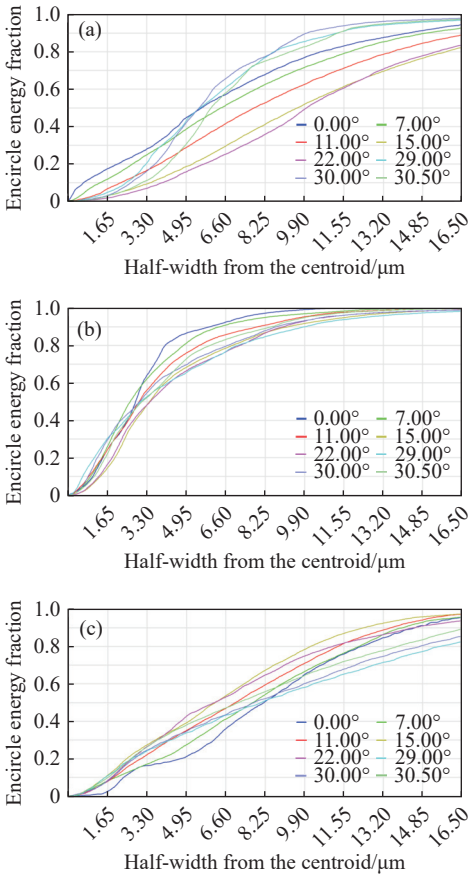


图 13 (a) 10°C, (b) 20°C, (c) 30°C 光学系统能量集中度

Fig. 13 Enclosed energy of optical system at (a) 10°C, (b) 20°C, (c) 30°C

光学系统的相对照度结果如图 14 所示。

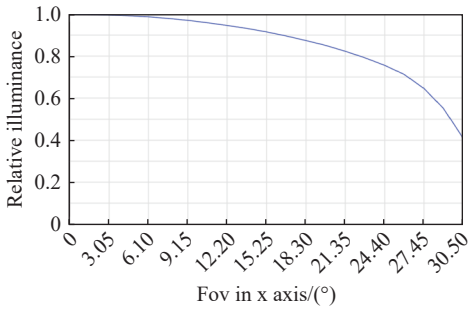


图 14 光学系统相对照度图

Fig. 14 Relative illuminance diagram of the optical system

4.2 光学系统灵敏度分析

以 20°C 时的光学系统为基准，分别研究该光学系统在 10°C、15°C、25°C、30°C 时焦距以及质心受温度影响的漂移量，具体分析结果如表 4~表 5 所示。

由上述灵敏度分析结果可知，焦距与质心位置最大变化分别为 3.5 μm/°C 与 1.07 μm/°C，符合工程需求。

表 4　不同温度下的系统焦距及其相对变化值

Tab. 4　System focal length and its relative variation at different temperatures

温度/ °C	10	15	20	25	30
焦距/mm	26.966	26.983	27	27.017	27.035
变化/μm	−34	−17	0	17	35

表 5　不同温度下，质心相对变化值 (单位：μm)

Tab. 5　Relative change in centroid at different temperatures

温度/°C	归一化视场/W				
	0	0.3	0.5	0.7	1
10	0	−0.341	−0.581	−0.851	−10.553
15	0	−0.171	−0.292	−0.427	−5.300
20	0	0	0	0	0
25	0	0.173	0.294	0.430	5.347
30	0	0.347	0.591	0.865	10.742

4.3　光学系统公差分析

在现有光学加工制造水平下, 对该光学系统进行公差分析, 最终分析结果如表 6~表 7 所示。

表 6　公差分配表

Tab. 6　Tolerance allocation table

光圈	厚度/mm	镜面偏心/(°)	镜面倾斜/(°)	折射率	元件偏心/(°)	元件倾斜/(°)
2	0.03	0.01	0.013	0.001	0.01	0.013

表 7　公差分析结果

Tab. 7　Tolerance analysis results

公差分析结果统计	标准点列图(RMS)/μm	3×3像元能量集中度
90%	优于12.13	大于81%
80%	优于10.93	大于87%
50%	优于8.801	大于91%
20%	优于7.18	大于94%
10%	优于6.50	大于97%

由表 7 可知, 在满足上述公差分配的情况下, 3×3 像元内全视场能量集中度在 80% 的情况下大于 87%, 能够满足空间目标广域探测需求。

5　光学系统探测能力验证

5.1　空间光学探测能力仿真验证

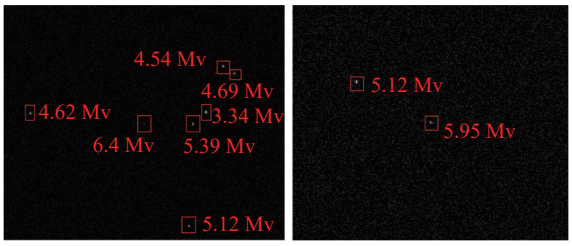
已知在大气层外可观测波段内太阳的辐照度 E_{sun} 为 573×10^{-4} W·cm^{-2}, 则根据目视星等计算公式, 可以将空间目标的辐照度转换为对应的等效星等, 有:

$$m = 2.5\lg(E_{sun}/E) + m_{sun} \quad , \tag{9}$$

式中: m_{sun} 为太阳的等效星等, 即为−26.7, E 为传感器处的辐照度[24]。

在完成空间目标探测光学系统的设计后, 通过空间光学仿真对光学系统的基本探测能力进行实验验证。设定一个 1 m×1 m×1 m 的立方体目标, 各个表面的反射率取 0.25, 探测器的积分时间设定为 30 ms, 并设定相应的光学系统参数。

根据上述参数进行场景建模, 对不同的空间目标进行探测, 视场中心即为设定的被探测目标, 中心外为太空中的一些恒星, 分别在白昼和黑夜对这些目标进行探测, 并对不同距离空间目标的探测结果进行统计。利用上述公式计算得到的探测结果如图 15 所示。表 8 给出了某一特定空间目标不同距离处探测器响应度。可见, 本文所设计的大视场、宽光谱空间目标探测光学系统的探测能力优于六等星, 验证了本设计的正确性。



(a) 黑夜空间目标探测仿真
(a) Night space target detection at night

(b) 白昼空间目标探测仿真
(b) Space target detection in dag

图 15　空间目标探测能力等效仿真验证结果

Fig. 15　Equivalent simulation verification results of space target detection capability

表 8　某一特定空间目标不同距离处探测器响应度

Tab. 8　Detector's responsiveness at different distances for a specific spatial target

序号	空间目标与探测器距离/km	传感器处辐照度 (W·m^{-2})	等效等星 (Mv)
1	596	3.392816e-11	6.40
2	486	4.996750e-11	5.95
3	376	8.164583e-11	5.42
4	265	1.603319e-11	4.68
5	89	1.395472e-9	2.33
6	44	5.523866e-9	0.84
7	22	2.192820e-8	−0.66

5.2 实际探测能力验证

在完成上述空间光学仿真探测能力实验验证后，对 4.1 所设计的光学系统（如图 16 所示）进行实物探测能力实验验证。

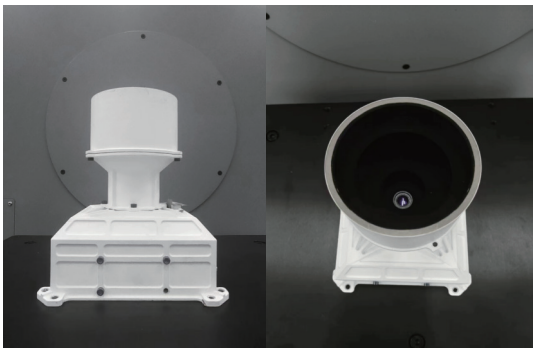


图 16 光学系统实物图

Fig. 16 Physical image of optical system

由于空间目标探测光学系统的探测能力主要受通光口径、积分时间以及探测器参数的影响。在探测器选定为 GSENSE400BSI 的情况下，在实验室内，利用星光模拟器以及平行光管，开展光学系统的实物探测能力验证实验，如图 17 所示。探测器积分时间设定为 30~100 ms，利用图像处理软件对所得图像的灰度值进行处理，从而得出信噪比数值。实验结果表明，积分时间设定在 30~100 ms 时，六等星的空间目标整体信噪比在 6 以上，表明能够对空间目标进行有效探测。

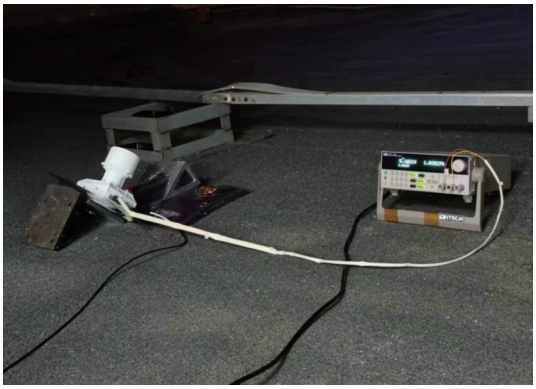


图 17 外场实验场景图

Fig. 17 Scene image of outdoor experiment

最后，在外场对本文大视场宽光谱空间目标探测光学系统开展了夜间探测能力实验验证。空间目标探测结果如图 18 所示。实验结果表明：在大气湍流效应、地气光以及云层影响下，对于六等星的空间目标，探测器的积分时间达 40 ms 以上，SNR 能够达到 6 以上。HIP7499 的探测效果如图 19 所示。探测能力验证结果如表 9 所示。实验证明该光学系统能够对六等星的空间目标进行有效探测，即该光学系统具备六等星的探测能力。

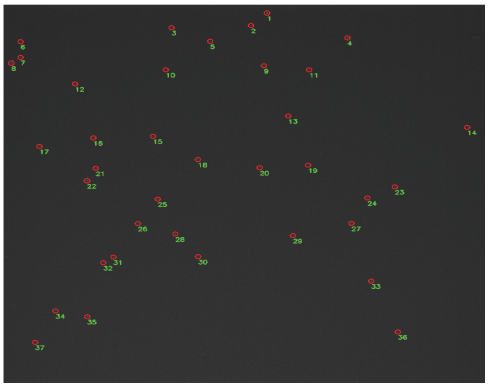


图 18 已识别空间目标探测结果

Fig. 18 Identified space target detection results

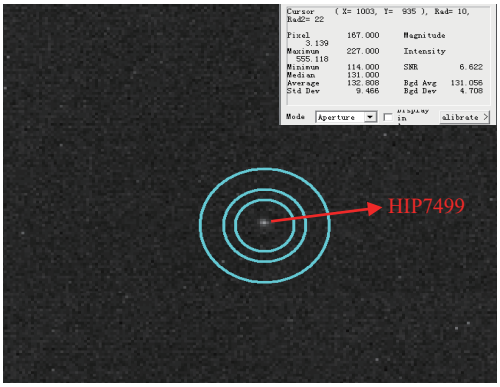


图 19 HIP7499 探测效果图

Fig. 19 HIP7499 detection result

表 9 探测能力实验验证结果

Tab. 9 Experimental verification results of detection capability

恒星星号	HIP3747	HIP7804	HIP5066	HIP7499
对应等星/Mv	3	3.9	4.9	6
对应光谱类型	A	F	G	K
探测器积分时间/ms	20	20	30	40

6 结 论

本文以空间目标广域探测为应用背景，从空间目标辐射特性模型入手，探讨了大视场、宽光谱空间目标探测光学系统的设计方法，开展了相应的空间目标探测光学系统设计，综合考虑大视

场与宽谱段、小 F 数、低畸变要求，开展了空间光学仿真和实物探测能力实验。验证了该光学系统具备大视场宽谱段高灵敏度探测能力。本文设计实现了一种能够对空间目标进行广域探测的大视场、宽光谱的光学系统，该系统具备六等星的广域探测能力，能够对空间目标进行有效探测。该光学系统结构合理、紧凑，能够满足实际工程应用需求，具有广泛的借鉴意义。

参考文献:

[1] 刘科, 何磊. “星链”潜在军事应用能力分析研究[J]. 战术导弹技术, 2024(3): 148-153.
LIU K, HE L. Analysis and research on the potential military application capability of Starlink[J]. *Tactical Missile Technology*, 2024(3): 148-153. (in Chinese).

[2] 张煌, 杜雁芸. “星链”军事化发展及其对全球战略稳定性的影响[J]. 国际安全研究, 2023, 41(5): 29-53,157-158.
ZHANG H, DU Y Y. Militarization of Starlink and its impact on global strategic stability[J]. *Journal of International Security Studies*, 2023, 41(5): 29-53,157-158. (in Chinese).

[3] 黎璐玫, 刘伟骏, 俞越. 空间碎片现状与挑战[J]. 中国无线电, 2023(8): 33-36.
LI L M, LIU W J, YU Y. Current situation and challenges of space debris[J]. *China Radio*, 2023(8): 33-36. (in Chinese).

[4] YANG Y ZH, LI Y J, WANG J, *et al*.. Design of detection optical system with large relative aperture[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12315: 1231515.

[5] JIAO J C, WANG C, YU Y, *et al*.. Lightweight visible light camera technology for weak space target detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12317: 123170I.

[6] ZHANG G Y, FAN X W, MA Z X, *et al*.. Optical design of space debris detection system with wide field of view[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11570: 1157004.

[7] ZONG Y H, ZHUANG X X, ZHANG T CH, *et al*.. Design of a wide field camera for detecting dim targets[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12065: 1206542.

[8] 闫昊昱, 王虎, 薛要克, 等. 大视场红外星敏感器折反式光学系统设计[J]. 飞控与探测, 2022, 5(5): 12-18.
YAN H Y, WANG H, XUE Y K, *et al*.. Design of a catadioptric system for infrared star sensor with wide field of view[J]. *Flight Control & Detection*, 2022, 5(5): 12-18. (in Chinese).

[9] 陈醒. 天基空间目标探测系统的光学设计与杂散光研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
CHEN X. *Optical system design and stray light research of a space-based detection camera*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese).

[10] 宋菲君, 陈笑, 刘畅. 近代光学系统设计概论[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
SONG F J, CHEN X, LIU CH. *Introduction to Modern Optical System Design*[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese).

[11] LU Y F, ZHOU Y, HEI M, *et al*.. Theoretical and experimental determination of steering mechanism for Risley prism systems[J]. *Applied Optics*, 2013, 57(7): 1389-1398.

[12] CURATU E O, CHEVRETTE P C, ST-GERMAIN D. Rotating-prism scanning system to equip an NFOV camera lens[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3779: 154-164.

[13] 贵超. 旋转双棱镜超分辨率宽视场成像技术研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
GUI CH. *Rotating biprism super-resolution wide field of view imaging technology research*[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023. (in Chinese).

[14] 杨柠宇. 消色差旋转双光楔系统光学设计与研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
YANG N Y. *Optical design and study of achromatic rotating dual-wedge prism system*[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023. (in Chinese).

[15] 周远, 鲁亚飞, 黑沫, 等. 旋转双棱镜光束指向解析解[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1373-1379.
ZHOU Y, LU Y F, HEI M, *et al*.. Analytic solution of optical beam steering based on rotational double prisms[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1373-1379. (in Chinese).

[16] 周远, 范世珣, 刘光灿, 等. 旋转双棱镜引起的成像畸变及其校正[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0911003.
ZHOU Y, FAN SH X, LIU G C, *et al*.. Image distortions caused by rotational double prisms and their correction[J].

Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0911003. (in Chinese).

[17] 曾晨欣, 李加慧, 谭奋利, 等. 超轻小宽视场高分辨无人机机载相机光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 0522004.

ZENG CH X, LI J H, TAN F L, *et al*.. Optical design of an airborne light weight camera with wide field of view and high resolution[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 0522004. (in Chinese).

[18] 顾志远, 颜昌翔, 张军强, 等. 基于同心物镜结构的超大视场高分辨率空间目标监视望远镜[C]. 第二届空间目标与碎片监测、清理技术及应用学术研讨会论文集, 中国工程院信息与电子工程学部, 国家自然科学基金委员会, 中国光学工程学会, 2015.

GU ZH Y, YAN CH X, ZHANG J Q, *et al*.. Space surveillance telescope with large field of view and high resolution based on monocentric lens[C]. *Proceedings of the 2nd Academic Symposium on Space Target and Debris Monitoring, Cleaning Technology and Application. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences*, 2015. (in Chinese).

[19] SON H S, MARKS D L, HAHN J, *et al*.. Design of a spherical focal surface using close-packed relay optics[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16132-16138.

[20] SON H S, MARKS D L, HAHN J, *et al*.. Design of a spherical focal surface using close-packed relay optics: erratum[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27284-27285.

[21] 李闻先. 基于光纤传像元件的空间目标探测系统成像技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.

LI W X. *Research on imaging technology of space target detection system based on relay image transmission of fiber optic transmission components*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese).

[22] 黄亚伟. 球面光纤束的传像性能研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.

HUANG Y W. *Research on image transmission performance of spherical fiber bundle*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese).

[23] 谢丹丹. 天基可见光探测系统指标的优化[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2023.

XIE D D. *Optimization of the indicators of the space-based visible light detection system*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese).

[24] 朱琳, 吴双, 佟岐, 等. 面向空间探测与识别的目标光学特性分析[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(3): 13-16.

ZHU L, WU SH, TONG Q, *et al*.. Analysis of target optical characteristics for space detection and recognition[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2022, 38(3): 13-16. (in Chinese).

作者简介：

谭双龙(1989—), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 2014 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2024 年于中国科学院大学获得博士学位。主要从事金属基光机一体化设计与仿真拓扑优化集成设计方法研究。E-mail: 15567408408@126.com