

面向卫星互联网平台的星敏感器光学系统设计与验证

杜伟峰 王燕清 吴永康 周星良 高铭

Optical system design and verification of star sensor applying to satellite internet platform

DU Weifeng, WANG Yanqing, WU Yongkang, ZHOU Xingliang, GAO Ming

引用本文:

杜伟峰, 王燕清, 吴永康, 等. 面向卫星互联网平台的星敏感器光学系统设计与验证[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 8–16. DOI: 10.5768/JAO202445.0101002

DU Weifeng, WANG Yanqing, WU Yongkang, et al. Optical system design and verification of star sensor applying to satellite internet platform[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(1): 8–16. DOI: 10.5768/JAO202445.0101002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0101002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小型化宽谱段星敏感器光学系统设计

Optical system of star sensor with miniaturization and wide spectral band

应用光学. 2021, 42(5): 782–789 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501004>

广角红外地球敏感器光学系统设计及畸变校正

Design of optical system of wide angle infrared earth sensor and study on distortion correction

应用光学. 2018, 39(2): 257–261 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0206001>

高灵敏度光纤应变传感器

High sensitive fiber strain sensor

应用光学. 2017, 38(5): 848–851 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0508002>

中波红外光学系统无热化设计和冷反射抑制

Athermalization and suppression of narcissus for medium-wave infrared optical system

应用光学. 2017, 38(3): 352–357 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0301003>

一种星敏感器主点和焦距的加权在轨标定方法

Weighted on-orbit calibration method of principal point and focal length for star sensor

应用光学. 2018, 39(6): 827–831 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601009>

紫外像增强器辐射灵敏度测量系统

Measurement system of radiation sensitivity for UV image intensifier

应用光学. 2020, 41(3): 548–552 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0008-09

面向卫星互联网平台的星敏感器光学系统设计 与验证

杜伟峰, 王燕清, 吴永康, 周星良, 高 铭

(上海航天控制技术研究, 上海 201109)

摘 要: 星敏感器为卫星提供高精度的姿态信息。随着卫星互联网技术在国防和民用领域中不断发展, 要求其搭载的星敏感器向体积小、重量轻、精度高方向发展, 因此需要充分结合应用需求对星敏感器光学系统进行设计。文中基于黑体辐射定律, 建立6.0等星在相同的积分波段内色温与辐照度的关系, 确定系统有效口径; 基于星点高斯模型, 提出通过提升光学系统能量集中度, 实现小口径高灵敏探测; 基于蒙特卡洛分析方法确定星敏感器工作视场; 基于灵敏度确定杂散光抑制技术要求。利用上述论证结果开展光学系统设计, 系统 3×3 像元内能量集中度优于95%, 在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 区间内星点质心偏移不超过 $0.40\text{ }\mu\text{m}$, 在 32° 杂散光抑制角处, 系统消光比为 $3.0\text{E}-8$ 。最后以试验室质心精度标定、外场观星精度与灵敏度测试、杂散光测试验证光学系统设计的合理性。试验结果表明: 星敏感器标定精度为 $1.45''$, 外场观星精度为 $4.2''(3\sigma)$, 极限灵敏度为6.04等星, 杂散光背景灰度均值为36.51。

关键词: 星敏感器; 光学设计; 极限灵敏度; 无热化

中图分类号: TN202; O435

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0101002

Optical system design and verification of star sensor applying to satellite internet platform

DU Weifeng, WANG Yanqing, WU Yongkang, ZHOU Xingliang, GAO Ming

(Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Star sensor provides high-accuracy attitude information to satellite. With the continuous development of satellite internet platform technology in the national defense and civil fields, the star sensor is required to develop towards the small volume, light weight and high precision. Therefore, the optical system of star sensor should be designed in accordance with the application requirements. The relationship between color temperature and irradiance of sixth-magnitude star in the same integral band was established by using blackbody radiation law, thus confirming the effective aperture. Based on the Gaussian model of star point, it was proposed to realize the small aperture and high sensitivity detection by increasing the energy concentration of the optical system. The working field of view of star sensor was determined on the basis of Monte Carlo method. The technology requirements of stray light suppression was confirmed according to sensitivity. The optical system was designed based on the above mentioned verification results. The energy concentration of $3\text{ pixels}\times 3\text{ pixels}$ is better than 95%. In the range of -40°C to 60°C , the centroid shift of star point is less than $0.40\text{ }\mu\text{m}$. At the stray light suppression angle of 32° , the extinction ratio of the system is $3.0\text{E}-8$. In the last part,

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-04-18

基金项目: 国家自然科学基金 (62005158)

作者简介: 杜伟峰 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事星敏感器光学设计、光学检测、光机装调研究。

E-mail: dwfhter@163.com

the rationality of the optical system design was verified through the accuracy calibration of centroid in laboratory, test of accuracy and sensitivity in out-field stargazing, and stray light test. The test results show that the calibration accuracy of the star sensor is $1.45''$, the accuracy of out-field stargazing is $4.2'' (3\sigma)$, the limiting sensitivity is 6.04 magnitude star, and the mean value of the gray level of stray light background is 36.51.

Key words: star sensor; optical design; limiting sensitivity; athermalization

引言

卫星互联网是一种向地面和空中终端提供宽带互联网接入等通信服务的新型网络, 具有覆盖广、容量大、成本低、不受地域地形影响等特点。卫星互联网与地面通信系统正在不断融合创新, 逐步构建覆盖空、天、地、海一体化的网络体系^[1-4]。星敏感器是以恒星为参照系, 通过探测天球上不同位置的恒星进行姿态解算, 为卫星提供准确的空间姿态。随着卫星互联网技术的发展, 对星敏感器数量的需求急剧增加, 相比传统军用、资源勘探卫星平台, 卫星互联网需要星敏感器满足轻小型、高精度、低成本、批量化、生产周期短等技术要求。

公开资料显示, 国外研究星敏感器的厂家主要有法国 SODERN 公司、德国 JENA 公司。SODERN 公司研制的 AURIGA-SA 星敏感器主要指标为: 测量精度 $9'' (3\sigma)$ 、杂散光抑制角为 35° 、光学头部质量 205 g、尺寸为 $66 \text{ mm} \times 56 \text{ mm} \times 94 \text{ mm}$ 。JENA 公司研制的 ASTOR-CL 星敏感器主要指标为: 测量精度 $6'' (3\sigma)$ 、杂散光抑制角为 32° 、光学头部质量 280 g、尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 104 \text{ mm}$ 。国内天银星际研制的 PST3S-H4 星敏感器主要指标为: 测量精度优于 $5'' (3\sigma)$ 、杂散光抑制角 35° 、尺寸为 $33 \text{ mm} \times 51.7 \text{ mm} \times 96 \text{ mm}$, 质量为 85 g, 极限灵敏度为 5.8 等星。

星敏感器的主要指标为测量精度、灵敏度、数据更新率、包络尺寸、重量和可靠性。根据应用需求不同, 指标优先级存在差异, 例如, 应用于国防重点关注可靠性、测量精度, 应用于卫星互联网重点关注体积、重量、精度。如何优化上述三项指标是卫星互联网星敏感器设计的关键, 首先解决的问题是如何在体积小、重量轻的约束条件下提取暗弱恒星目标, 其次是解决精度提升问题。因此, 若想达到该类型星敏感器设计的目的, 需要对光学链路进行充分研究论证, 从光学机理层面解决探测恒星问题。

本文首先讨论技术指标论证, 主要包括探测器选型、镜头指标论证、杂散光抑制; 其次, 依据论证结论开展光学系统设计, 包括像质优化、抗辐射设

计、无热化设计; 最后, 以试验室质心精度标定、外场观星精度测试、杂散光测试等方式验证光学系统指标论证的合理性。

1 光学系统技术指标论证与分解

1.1 探测器选型

针对卫星互联网平台的星敏感器, 在探测器选型时需要遵守以下原则: 1) 探测器尺寸不宜过大。当星敏感器工作视场确定后, 光学系统的焦距随探测器尺寸增大而变长, 影响光机系统轴向尺寸。2) 量子效率高, 综合噪声低。当系统信噪比以及光学高斯半径确定后, 量子效率越高, 并且综合噪声越低, 光学系统的有效口径越小, 则有利于轻量化设计。3) 单像素不易过小。像素越小, 光学系统的弥散斑设计难度越大, 所需要的优化变量越多, 不利于实现轻小型和低成本控制。

文中选择的某探测器部分参数为: 峰值量子效率不小于 70 %, 综合噪声不高于 150 e^- , 单像素尺寸为 $5.30 \mu\text{m}$, 像元数为 $1280 \text{ 像素} \times 1024 \text{ 像素}$ 。

1.2 通光口径论证

任意等星辐照度可按照下式进行推算:

$$m_2 - m_1 = -2.512 \lg \frac{E_2}{E_1} \quad (1)$$

式中: m_1 为 -26.74 , 对应辐照度 E_1 为 1367 W/m^2 ; m_2 为极限星等; E_2 为极限星等辐照度。该公式反映的是全谱段辐照度, 由于星敏感器光学系统对恒星辐射波段进行了选择性筛选, 因此需要对该公式进行修改, 推导过程见公式 (2)~公式 (4)。

根据普朗克黑体辐射理论, 某一波长的辐射出射度为

$$M_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \quad (2)$$

式中: λ 为波长; T 为温度; $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, 为第一辐射常数; $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$, 为第二辐射常数。对任意波段内进行积分, 得出该波段内的辐射出射度, 当积分区间为无穷大时, 则得到全谱段辐射出射度。任意波段内的辐射出射度除以全波段辐射出射度, 得到任意波段所占的比例,

如下式所示:

$$g = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_0(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} M_0(\lambda, T) d\lambda} \quad (3)$$

式中: λ_1 为起始波长; λ_2 为终止波长; g 为在 T 温度下, 任意波段占总辐射的比值。指定等星在任意波段内的辐射功率密度为

$$E'_2 = E_2 \cdot g \quad (4)$$

6.0 等星在地球表面辐照度为 $1.3\text{E-}10\text{W/m}^2$, 当波长积分区间为 $480\text{ nm} \sim 850\text{ nm}$, 色温区间约为 $3\,000\text{ K} \sim 10\,000\text{ K}$ 时, 辐照度约为 $2.1\text{E-}11\text{W/m}^2$ 至 $5.2\text{E-}11\text{W/m}^2$, 如图 1 所示。

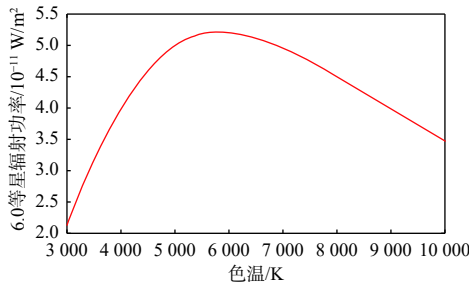


图 1 6.0 MV 在不同色温下辐射功率密度

Fig. 1 Radiation power density of 6.0 MV under different colour temperatures

通光口径尺寸是星敏感器光学镜头的核心指标, 它决定星敏感器的探测能力。目标辐照度经过光学系统汇聚, 并由探测器转换成电子的物理过程可表示为

$$S = t \times q \times \tau \times E'_2 \times \pi \times \lambda / (hc) \times D^2 / 4 \quad (5)$$

式中: τ 为光学系统透过率; E'_2 为探测能量, 为使得 6.0 等星在 $3\,000\text{ K} \sim 10\,000\text{ K}$ 全部可以探测到, 取图 1 中 $3\,000\text{ K}$ 对应的能量密度 $2.1\text{E-}11\text{W/m}^2$; D 为光学系统通光口径; t 为积分时间, 一般情况下 $\leq 100\text{ ms}$; λ 为参考波长, 此处为 650 nm ; h 为普朗克常数; c 为光速; q 为量子响应效率; S 为信号电子。

星光在探测器处汇聚成弥散斑, 在通常情况下可按高斯光斑模型进行分析^[5-9]。假设光斑质心位于像素中心, 星点单个像素信号电子数以及高斯半径求解公式为

$$\begin{cases} I = \iint \frac{1}{2\pi \sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left[-\frac{(x)^2 - (y)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right] dx dy \\ k = \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \frac{1}{2\pi \sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left[-\frac{(x)^2 - (y)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right] dx dy \\ S_e = k \cdot S \end{cases} \quad (6)$$

式中: S_e 为单个像素信号电子数目; I 为在积分区域内光斑能量比例; σ_{PSF} 为高斯半径; k 为能量集中度。根据光斑大小, 求出 I 所对应的高斯光斑半径。对中心像元积分, 求解中心像元所占能量比例, 即单个像元的能量集中度。根据像元能量集中度, 求解单个像元星点电子数。

面向卫星互联网平台的星敏感器需要优先解决体积小、重量轻的技术问题。不同的高斯半径对应的能量集中度如图 2 所示。从图 2 可以看出, 对应的高斯半径分别为 0.5 pixels 、 0.6 pixels 、 0.7 pixels , 在理想情况下, 星点中心像素能量集中度分别为 46.6% 、 35.4% 、 27.5% , 因此除了提升探测器灵敏度外, 还可以通过减少星点高斯半径提升中心星点信噪比。一般情况下, 光斑成像中心在像素位置上是随机的, 这种随机性会使得中心像点能量集中度随中心像素距离发生变化, 影响恒星探测灵敏度, 所以在镜头指标分配时要考虑这种随机性引入的偏差。当高斯半径为 0.5 pixels 时, 中心星点能量集中度随像素偏离, 如表 1 所示。

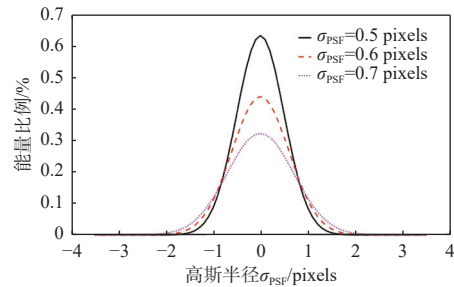


图 2 不同高斯半径对应的能量集中度

Fig. 2 Energy concentration corresponding to different Gaussian radius

表 1 光斑中心到像素中心不同距离时的能量集中度

Table 1 Energy concentration at different distances from center of optical spot to that of pixel

(x_c, y_c)	(0,0)	(0.1,0.1)	(0.2,0.2)	(0.3,0.3)	(0.4,0.4)	(0.5,0.5)
$k/\%$	46.6	45.3	41.6	36.1	29.5	22.7

像素电子信号与噪声之间的关系为

$$\begin{cases} S_{\text{NR}} = S/N \\ N = \sqrt{S + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_r^2 + \sigma_{\text{non}}^2 + \sigma_{\text{fpn}}^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_{NR} 为极限等星探测信噪比, 一般要求 $S_{\text{NR}} \geq 5$; S_e 为参与计算的电子数; N 为探测器总噪声; σ_{dark} 为暗电流噪声; σ_r 为读出噪声; σ_{non} 为非均匀性噪声的均方值; σ_{fpn} 为固定模式噪声的均方值。将

选定的探测器参数带入公式 (7), 绘制出仿真图, 如图 3 所示。综合考虑设计裕度、体积、重量 3 个因素, 最终将 D 确定为 16 mm。

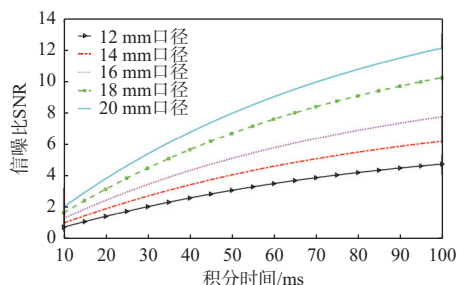


图 3 不同通光口径下信噪比随积分时间的变化

Fig. 3 Changes of S_{NR} with integration time under different apertures

1.3 工作视场论证

根据极限等星、色温、探测器噪声计算出光学系统的灵敏度, 并以该灵敏度作为设计阈值, 求解其他色温的恒星可探测极限等星。依据各个色温的恒星星等信息, 采用蒙特卡洛方法预估某一视场下定姿星数量的概率, 以此确定工作视场^[10]。经星库仿真迭代, 当工作半视场为 9° 时, 视场内至少可探测 6 颗定姿星, 如图 4 所示, 可满足星敏感器正常工作。

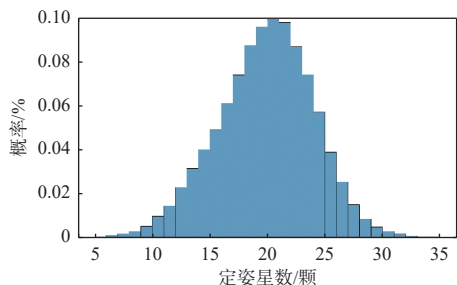


图 4 视场内定姿星数量与概率

Fig. 4 Number and probability of fixed-pose stars in field of view

1.4 杂散光抑制消光比论证

上述 1.2 节指出, 满足本系统工作波段的 6.0 等星在 3 000 K 色温时辐射功率为 $2.1\text{E-}11\text{ W/m}^2$, 经过光学系统后汇聚在像面处中心点能量约为 $3.1\text{E-}5\text{ W/m}^2$ 。为保障系统消光性能, 同时受尺寸和重量的约束, 要求当太阳光以 32° 入射星敏感器时, 最终在探测器像面的辐照度平均值不大于 $3.1\text{E-}5\text{ W/m}^2$, 即消光比为 $5.0\text{E-}8$ 。

综上所述, 星敏感器光学系统参数指标如表 2 所示。

表 2 光学系统设计参数指标

Table 2 Requirements of optical system design parameters

名称	技术指标
通光口径/mm	16
半视场/ $^\circ$	9
F 数	1.34
$15.90\text{ }\mu\text{m}$ 内能量集中度/%	99.5
倍率色差/ μm	$\leq \pm 2.00$
畸变/ μm	$\leq \pm 2.00$
$-40\text{ }^\circ\text{C} \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内弥散斑变化/ μm	$\leq \pm 1.00$
透过率/%	≥ 87
工作波段/nm	480 ~ 850
32° 杂散光抑制角	$\leq 5.0\text{E-}8$

2 光学系统设计

2.1 光路设计

星敏感器光学镜头属于大像差系统, 相比其他类型的光学系统, 在设计优化过程中更注重弥散斑形状、能量集中度、质心畸变、倍率色差 4 个指标。

为达到系统轻小型设计目标, 将光阑设置在第一透镜之前, 光路如图 5 所示。系统由 7 个透镜和 1 个探测器光学窗口组成, 镜片材料分别为石英、ZF6、HZPK5, 为进一步增强抗辐射性能, 提高在轨工作寿命, ZF6 可等效替换为 ZF506。光学窗口对前面光路像差补偿外, 同时又起到防尘作用。第五面产生系统最大的负球差和正彗差, 第六面产生系统最大的正球差和负彗差, 两个表面的球差和彗差得到了补偿。光学系统总长为 52 mm, 后工作距离为 2.5 mm。

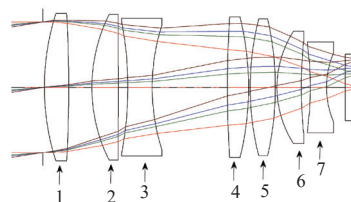


图 5 光路图

Fig. 5 Optical path diagram

像质分析结果如图 6 所示。此时工作温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, $480\text{ nm} \sim 850\text{ nm}$ 波长权重设置一致, 常压状态。全视场弥散斑 RMS 最大直径为 $7.96\text{ }\mu\text{m}$, 各个视场最大弥散斑偏差小于 $2.50\text{ }\mu\text{m}$, 最大质心畸变

为 $1.20\ \mu\text{m}$, 在 $15.90\ \mu\text{m}$ 处能量集中度为 99.5%, 最大倍率色差小于 $2.00\ \mu\text{m}$ 。

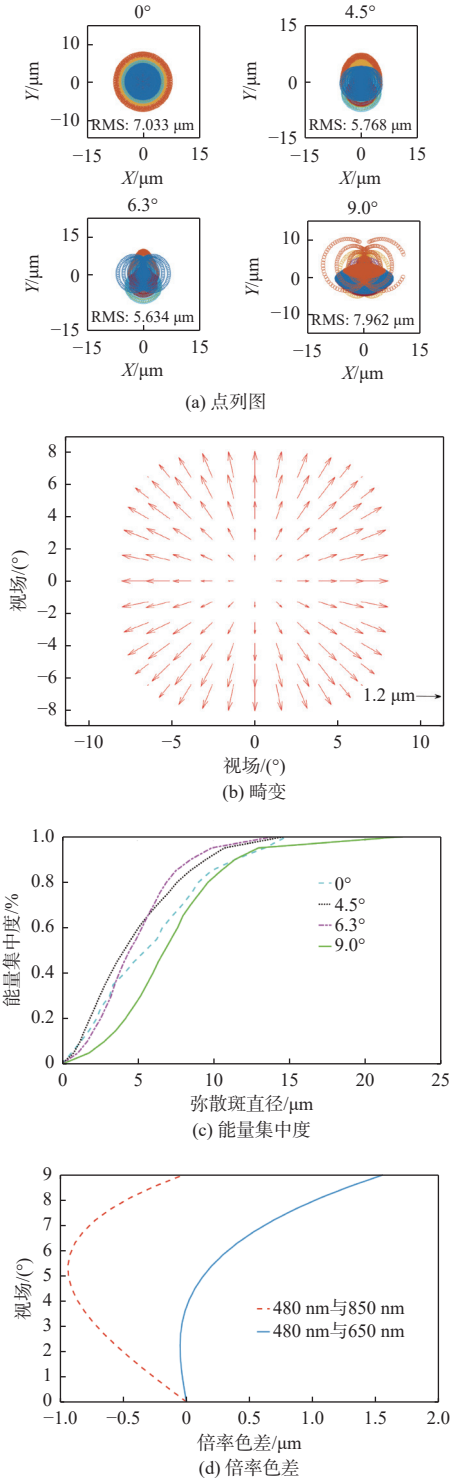


图6 像质分析

Fig. 6 Analysis of image quality

2.2 无热化设计

星敏感器在轨工作温度范围为 $-40\ ^\circ\text{C} \sim 60\ ^\circ\text{C}$, 在 $100\ ^\circ\text{C}$ 温差范围内, 为保障星点质心提取、灵敏

度、弥散斑形状不发生明显变化, 需要对光学系统进行无热化设计^[11-13]。当工作环境温度发生变化时, 光学系统的焦距、焦面位置、系统像差也会发生改变, 这种由温度变化导致的差异称为光学系统的热差。假设光学系统由 k 个镜片构成, 总光焦度为 φ , 则按薄透镜成像理论, 光焦度与热差系数 T 、色差系数 C 有如下关系:

$$\begin{cases} \varphi = \sum_{i=1}^k h_i \varphi_i \\ C = \sum_{i=1}^k h_i^2 C_i \varphi_i / \varphi \\ T = \sum_{i=1}^k h_i^2 T_i \varphi_i / \varphi \end{cases} \quad (8)$$

式中: h_i 为第 i 个透镜上近轴光线的归一化入射高度; φ_i 为各个透镜光焦度; C_i 为各个透镜色差系数; T_i 为各个透镜热差系数。一方面, 光学系统的色差仅与光学材料的属性有关, 与机械材料的属性无关, 为达到消色差的目的, 公式 (8) 中 C 色差系数应该被去掉, 即 C 为 0; 另一方面, 光学系统的热差包含了光学和机械热差, 为满足消热差条件, 使得 (8) 式中的 $T = -T_m$ 。光学系统满足以下条件, 才可以实现被动消热差, 即:

$$\begin{cases} \varphi = \sum_{i=1}^k h_i \varphi_i \\ \sum_{i=1}^k h_i^2 C_i \varphi_i / \varphi = 0 \\ \sum_{i=1}^k h_i^2 T_i \varphi_i / \varphi = \alpha_m L \end{cases} \quad (9)$$

式中: α_m 为镜头结构材料热膨胀系数; L 为镜筒的总长度。为了消除热差, 需要充分考虑镜片与机械材料属性, 以达到在工作温度范围内使镜头光学性能稳定的目的。考虑到低成本、轻量化等因素, 镜头结构选择铝合金材料, 在 $20\ ^\circ\text{C}$ 的热膨胀系数约为 $23.21\text{E-}6/\text{K}$ 。

文中设计的光学系统采用 4 片 HZPK5 材料, 用来补偿石英和铝合金材料带来的影响。在 $-40\ ^\circ\text{C} \sim 60\ ^\circ\text{C}$ 区间内, 焦面变化如图 7(a) 所示, 约为 $0.10\ \mu\text{m}/^\circ\text{C}$; 焦距变化如图 7(b) 所示, 约为 $0.66\ \mu\text{m}/^\circ\text{C}$; 各个视场弥散斑直径变化如图 7(c) 所示, 轴上视场弥散斑变化量最大, 约为 $1.50\ \mu\text{m}$; 质心偏移在 9° 视场变化最大, 约为 $0.40\ \mu\text{m}$, 如图 7(c) 所示。镜头总长度为 $35\ \text{mm}$, 含结构质量为 $25\ \text{g}$ 。

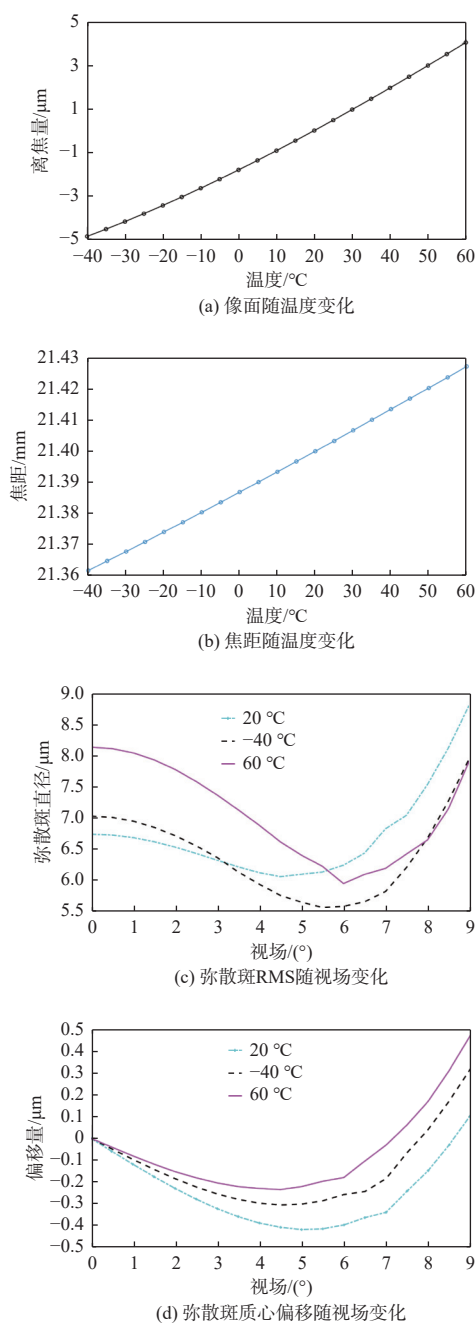


图7 焦距和像面位置随温度的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of focal length and defocusing distance with temperatures

2.3 杂散光抑制设计

文献 [14] 指出, 遮光罩的尺寸与杂散光抑制消光比、光学镜头参数有关。考虑到遮光罩相对镜头的装配, 在遮光罩安装面采用定位销孔方式提升罩体与镜头安装的偏心。遮光罩挡光环采用作图法设计, 其原理如图 8(a) 所示。图 8(a) 中 O_1O_2 为光轴, C_1C_2 为遮光罩出瞳, AC_2 与 O_1O_2 夹角为 32° , 为避免 C_1C_2 倒角处散射, 将该处的倒角朝向镜头方向。为进一步提升系统消光性能, 在挡光环刃

口处采用精密加工方式使刃口厚度低于 $20.00\ \mu\text{m}$ 。对遮光罩腔体采用化学砂面处理工艺, 增加表面粗糙度。采用国产黑漆 SCB-1 工艺技术, 增加遮光罩内表面吸收, 其吸收率在可见光处为 98.3% 以上, 如图 8(b) 所示。将遮光罩与镜头模型导入光学仿真软件进行杂散光光束追迹, 并绘制系统消光比曲线, 如图 8(c) 所示。当太阳光与星敏感器光轴成 32° 夹角入射时, 杂散光抑制消光比为 $3.0\text{E}-8$, 满足技术要求 $5.0\text{E}-8$ 。最终遮光罩杂散光抑制有效长度为 $40.00\ \text{mm}$, 最大直径为 $51.00\ \text{mm}$, 结构采用镁合金, 质量为 $30\ \text{g}$ 。

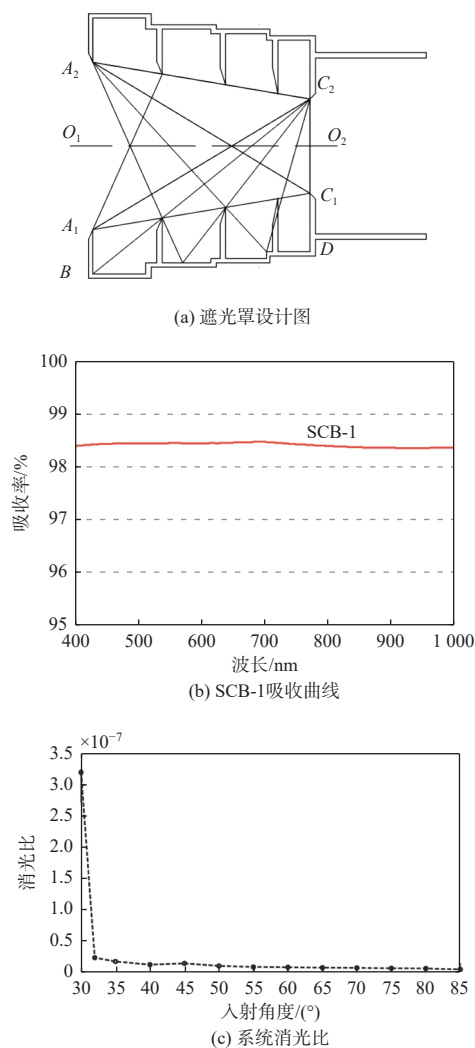


图8 遮光罩设计

Fig. 8 Design of light cover

3 试验验证和讨论

3.1 像面调试与标定

对光学镜头进行像面后工作距调试, 所用标

定设备为单星模拟器和三轴转台,如图9(a)所示。图9(a)中三轴转台定位精度为 $0.5''$,单星模拟器星点张角优于 $1.0''$ 。镜头成像光斑如图9(b)所示。从图9(b)可以看出,星点对称,大部分光斑能量集中在 3×3 像元内。标定精度如图9(c)所示。图9(c)中剩余残差为 $0.15\text{ }\mu\text{m}$,标定精度为 $1.45''$ 。

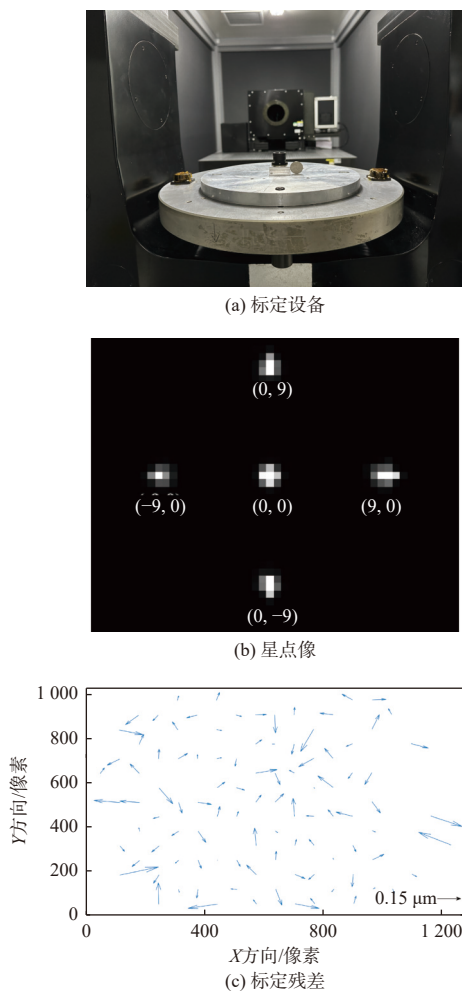


图9 像面调试及标定

Fig. 9 Image surface debugging and calibration

3.2 外场观星测试

星敏感器在试验室标定后,需要进行外场观星测试,验证系统灵敏度以及测试精度。外场观星测试如图10(a)所示。极限等星图如图10(b)所示,图中恒星ID为45033,6.04等星,星点最高灰度为55,背景均值为12.36,标准差为12.85,信噪比为3.3。星敏感器测量精度数据如图10(c)所示,测量精度为 $4.2''(3\sigma)$ 。

3.3 杂散光测试

星敏感器在轨工作容易受到以太阳为主要来

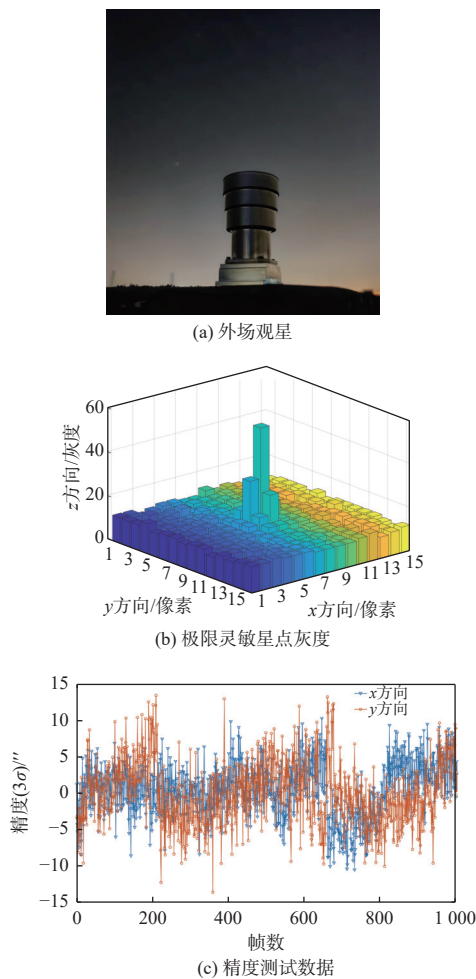


图10 外场观星测试

Fig. 10 Out-field stargazing test

源的杂散光干扰,使得探测器像面信噪比下降,星点提取无效,因此,需要在地面实验室验证星敏感器杂散光抑制性能。杂散光测试现场如图11(a)所示。测试环境为1万级洁净光学暗室,星敏感器安装在多维控制转台上,太阳模拟器以一个太阳常数输出光束照射在遮光罩上^[15-16],此时太阳光与星敏感器光轴夹角为 32° 。探测器像面灰度如图11(b)所示,灰度直方图如图11(c)所示。图11(b)中像面边缘处灰度为255,平均值为36.51,标准差为37.34,像面平均灰度值低于6.04等星灰度。



(a) 杂散光测试现场

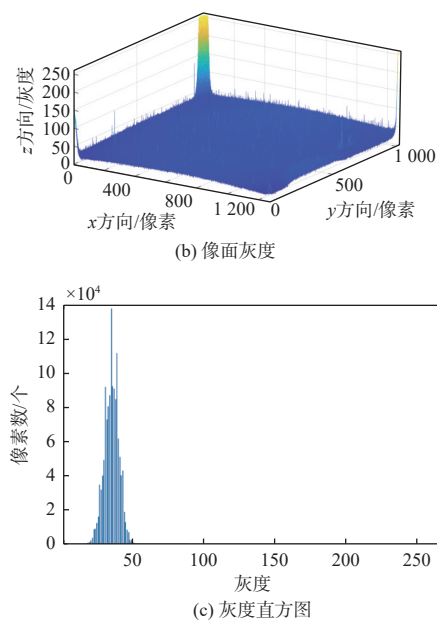


图 11 杂散光测试

Fig. 11 Stray light test

4 结论

本文基于卫星互联网平台, 根据为其配套的星敏感器的特点, 论证并设计了一款轻小型高性能光学镜头。该镜头在全视场内弥散斑偏差小于 $2.50\ \mu\text{m}$, 质心畸变小于 $1.20\ \mu\text{m}$, 3×3 像元能量集中度为 99.5%, 色差小于 $2.00\ \mu\text{m}$, 在 $-40\ ^\circ\text{C}\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 质心最大偏移为 $0.40\ \mu\text{m}$, 焦距变化量约为 $0.66\ \mu\text{m}/^\circ\text{C}$, 并具备耐辐射性能。本文以像面调试与标定、外场观星、杂散光测试等方式验证所设计的光学系统可实现 6.04 等星探测, 星敏感器测量精度优于 $4.2''$, 在 32° 太阳光抑制角处杂散光平均背景灰度为 36.51。本文提及的光机系统设计方案可以对其其他光电敏感器设计提供一定参考。

参考文献:

- [1] 赵飞飞, 胡树楷, 杨涛, 等. 低轨卫星互联网发展概述及建议[J]. 通讯世界, 2022, 29(1): 16-18.
ZHAO Feifei, HU Shukai, YANG Tao, et al. Development and prospect of LEO satellite internet[J]. Telecom World, 2022, 29(1): 16-18.
- [2] 刘旭光, 钱志升, 周继航, 等. "星链"卫星系统及国内卫星互联网星座发展思考[J]. 通信技术, 2022, 55(2): 197-204.
LIU Xuguang, QIAN Zhisheng, ZHOU Jihang, et al. Thinking on the development of "starlink" satellite sys-

tem and domestic satellite internet constellation[J]. Communications Technology, 2022, 55(2): 197-204.

- [3] 闫钊, 马芳, 郭银辉, 等. 全球卫星互联网应用服务及我国的发展策略[J]. 卫星应用, 2022(1): 26-33.
YAN Zhao, MA Fang, GUO Yin-hui, et al. Global satellite internet application services and China's development strategy[J]. 2022(1): 26-33.
- [4] 梁斌, 朱海龙, 张涛, 等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 16-29.
LIANG Bin, ZHU Hailong, ZHANG Tao, et al. Research status and development tendency of star tracker technique[J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 16-29.
- [5] 王海涌, 周文睿, 林浩宇, 等. 静态像点高斯灰度扩散模型参数估计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 275-280.
WANG Haiyong, ZHOU Wenrui, LIN Haoyu, et al. Parameter estimation of Gaussian gray diffusion model of static image spot[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 275-280.
- [6] 王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
WANG Haiyong, FEI Zhenghong, WANG Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1672-1677.
- [7] 王海涌, 王腾飞, 朱宏玉, 等. 星敏感器离焦像点半径最优值的确定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 154-158.
WANG Haiyong, WANG Tengfei, ZHU Hongyu, et al. Method for determining optimal radius value of defocused image spot of star sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 154-158.
- [8] 贾辉, 杨建坤, 李修建, 等. 星敏感器高精度星点提取系统误差分析及补偿方法研究[J]. 中国科学:技术科学, 2011, 41(1): 69-76.
JIA Hui, YANG Jiankun, LI Xiujian, et al. Systematic error analysis and compensation for high accuracy star centroid estimation of star tracker[J]. Sci. China Tech. Sci., 2011, 41(1): 69-76.
- [9] 练达, 周琦, 余路伟, 等. 高动态条件下星点像斑建模与补偿[J]. 飞控与探测, 2020, 3(3): 86-94.
LIAN Da, ZHOU Qi, YU Luwei, et al. Modeling and compensation of star spot in high dynamic condition[J]. Flight Control & Detection, 2020, 3(3): 86-94.
- [10] 王海涌, 徐皓. 一种星敏感器导航星筛选算法[J]. 激光

- 与光电子学进展, 2021, 58(1): 335-341.
- WANG Haiyong, XU Hao. Algorithm for screening navigation stars on star sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 335-341.
- [11] 张凯胜, 苏秀琴, 叶志龙. 大相对孔径全天时星敏感器光学系统[J]. *光子学报*, 2022, 51(11): 282-292.
- ZHANG Kaisheng, SU Xiuqin, YE Zhilong. Large relative aperture optical system design for all day star sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(11): 282-292.
- [12] 常虹. 透射式红外系统热光学稳定性关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- CHANG Hong. Research on key techniques of thermo-optical stability for refractive infrared system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [13] 朱杨, 张帆, 宋莹, 等. 用于高精度卫星姿态测量的大相对孔径高杂光抑制比星敏感器光学设计[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(11): 1-9.
- ZHU Yang, ZHANG Fan, SONG Ying, et al. Optical design of large relative aperture and high stray light suppression ratio star sensor for high precision satellite attitude measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(11): 1-9.
- [14] 杜伟峰, 王燕清, 郑循江, 等. 星敏感器杂散光抑制设计与验证[J]. *光学学报*, 2023, 43(6): 307-316.
- DU Weifeng, WANG Yanqing, ZHENG Xunjiang, et al. Design and verification of straylight suppression for star sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 307-316.
- [15] 伍雁雄, 王丽萍. 小型化宽波段星敏感器光学系统设计[J]. *应用光学*, 2021, 42(5): 782-789.
- WU Yanxiong, WANG Liping. Optical system of star sensor with miniaturization and wide spectral band[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(5): 782-789.
- [16] 汪洪源, 郑循江, 颜志强. 星敏感器遮光罩消光比定量测试及数据处理方法[J]. *飞控与探测*, 2020, 3(5): 1-8.
- WANG Hongyuan, ZHENG Xunjiang, YAN Zhiqiang. Quantitative testing and data processing for the extinction ratio of the star sensor hood[J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(5): 1-8.