

引用格式: ZHANG Kaisheng, SU Xiuqin, YE Zhilong. Large Relative Aperture Optical System Design for All Day Star Sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11):1111003

张凯胜, 苏秀琴, 叶志龙. 大相对孔径全天时星敏传感器光学系统[J]. 光子学报, 2022, 51(11):1111003

大相对孔径全天时星敏传感器光学系统

张凯胜^{1,2}, 苏秀琴¹, 叶志龙³

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 上海航天控制技术研究所, 上海, 201109)

摘 要:为实现星敏传感器在J波段对3等恒星进行全天时高精度探测,采用被动消热差设计方法,根据光学系统与结构材料的热差性能差异,进行匹配优化实现镜头消热差,设计完成了一种大相对孔径全天时星敏传感器光学系统。针对恒星在该波段下的指标进行分析,确定光学系统焦距为84 mm, F 数为1.4,工作谱段范围为1.1~1.4 μm ,视场角为8.4°。在光学系统设计过程中选取常用光学材料和镜筒材料,通过改变各透镜形状,合理匹配各镜片之间的光焦度,从而实现被动补偿无热化设计。优化设计完成后的光学系统在高低温(-40 °C~+60 °C)及真空条件下,当离焦0.02 mm后,弥散斑尺寸优于30 μm ,色畸变小于0.018 mm。星敏传感器内部采用表面发黑处理,遮光罩采用非等间距布局设计,表面采用一款具有较高太阳吸收率的SB-3A国产消光漆进行涂黑,可以在保证效果的情况下有效减轻重量,遮光罩内档光环采用16°斜角,可以保证较好的杂散光抑制能力。利用Tracepro软件对光机系统的杂散光进行了仿真分析,分析结果表明,视场内由目标产生杂散光是目标强度的 3×10^{-5} ,视场外杂散光强度由 10^{-2} 量级迅速下降,18°以外杂散光强度为视场外强光的 10^{-4} 以下。地面观星试验实现了对3等星全天时探测,验证了该光学系统设计的合理性。

关键词:大相对孔径;全天时;星敏传感器;光学系统;无热化

中图分类号:P173.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225111.1111003

0 引言

天文导航技术具有精度高,自主性强等特点。目前已广泛用于卫星、宇宙飞船等空间航天器的导航系统的误差修正。星敏传感器是一种应用于空间航天器上的姿态测量系统,它根据惯性坐标系中恒星的角位置可测算姿态数据,因此其精度是影响整个系统整体性能的关键因素。所谓的全天时星敏传感器是指具备在白天背景下仍可对星点探测的能力,具有对较强天空背景的抗干扰能力。近年来人们对星体构造发现,众多恒星具有尘埃层包裹,导致可见光透射率低,故人们对2MASS(Two Micron Sky Survey)开展研究^[1],其研究结果对全天时星敏传感器星敏导航积累了理论依据。但是,随着科技的进步,大气层及近地空间内飞机、导弹、船舶等平台对全天候天文导航技术的精度要求越来越高,而解决白天强背景下的恒星探测技术仍是目前研究的热点^[2-4]。星敏传感器所用光学系统的光学参数是其性能优劣的重要影响因素,所以本文主要针对全天时星敏传感器光学系统进行分析设计。

为满足全天时高精度探测需求,星敏传感器镜头必须采用大相对孔径来提高恒星探测能力。任秉文等采用0.4~1.1 μm 波段观测,设计了一款83 mm口径星敏传感器,实现了2.02等星观测^[5]。潘越等同样采用0.4~1.1 μm 波段观测,设计了一款70 mm口径星敏传感器,实现了白天2.5等星观测^[6]。但是,他们均未考虑针对J波段(光谱范围1.1~1.4 μm)的全天时应用效果。另外,星敏传感器大部分应用在极端环境条件下,需考虑到

基金项目:中国科学院战略高新技术创新基金(No. GQRC-19-19)

第一作者:张凯胜(1987—),男,博士研究生,主要研究方向为光学系统设计和杂散光分析。Email: zhangkaisheng.opt.ac.cn

收稿日期:2022-03-30;录用日期:2022-04-29

<http://www.photon.ac.cn>

高低温($-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下成像性能。在不同低真空温度下光学参数(玻璃折射率、曲率半径、镜片面型、中心厚度和空气间隔等)是不同的,此外,像面装调工作是在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行,工作温度改变后的像质会出现恶化现象。对于较大相对孔径,较长焦距的光学镜头而言更为敏感,所以必须对大相对孔径光学系统进行无热化设计^[7]。

本文基于3等星在J波段的全天时探测要求,采用被动消热差设计方法,根据光学系统与结构材料的热差性能差异,进行匹配优化实现镜头消热差,设计完成了一种大相对孔径全天时星敏感器光学系统。该光学系统在高低温($-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下,能够很好地满足设计指标要求,并且具有小型化、结构简单、成本低、空间环境适应性强的特点。最后,该系统进一步完成了样机试制和观星试验,实现了3等星全天时探测能力并验证了该光学系统设计的合理性。

1 主要参数分析

根据天文观测结果可知3等星以上的恒星温度均在太阳温度以上,如2.65等的马尾三星为 $11\ 000\text{ K}$,1.9等的五车三星为 $8\ 800\text{ K}$,2等的勾陈一星为 $200\ 000\text{ K}$ ^[8]。根据普朗克黑体辐射定律

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \{ \exp[hc/k\lambda T] - 1 \}} \quad (1)$$

式中, T 为绝对温度; λ 为波长; h 为普朗克常量; c 为真空中的光速; k 为玻尔兹曼常量。

以3等星最低温 $8\ 000\text{ K}$ 为条件,代入式(1)中,计算其辐射量并对其进行求导分析,其结果如图1所示。

由图1可知, $6\ 000\text{ K}$ 的太阳辐射能量与 $8\ 000\text{ K}$ 的恒星辐射能量在 $1\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 趋于平缓,根据现有红外探测器发展情况和响应波段可知, $1\ \mu\text{m}$ 以上波段有利于全天时恒星探测。根据马萨诸塞大学和IPAC组织的 $2\ \mu\text{m}$ 全天巡航计划2MASS(The Two Micron All-Sky Survey)划分的J,H,K波段探测结果可知,J(中心波长 $1.25\ \mu\text{m}$)的全天时探测信噪比最优,综上所述,所采用光学系统的工作谱段选择为 $1.1\sim 1.4\ \mu\text{m}$ 。

通过所选择的波长范围,本文选取HgCdTe探测器,其像元数为 640×512 ,尺寸为 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$,量子效率可达0.7,针对3等星亮度的恒星探测进行信噪比分析,以确定光学镜头参数。

J波段零等星辐射强度为 $3.287\times 10^{-13}\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$,3等星辐射强度可根据0等星关系获取,辐照度为

$$\int_{1.1}^{1.4} E(T, \lambda) d\lambda = 7.825 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2} \quad (2)$$

其能量经过光学系统到达探测器处,并经探测器响应转化为信号的强度为

$$S = \frac{\pi D^2}{4n} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(H, u_1, u_2, \lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot E(T, \lambda) \cdot t \cdot QE(\lambda) / E_{\text{PH}}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

天空背景辐射照度为

$$\int_{1.1}^{1.4} E(H, T, \lambda) d\lambda = 2.33 \times 10^{10} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2} \quad (4)$$

根据光学镜头及探测器参数可计算其信号强度为

$$B = \frac{\pi D^2 \sigma^2}{4f^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(H, u_1, u_2, \lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot E(H, T, \lambda) \cdot t \cdot QE(\lambda) / E_{\text{PH}}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

式中, D 为光学系统入瞳口径; n 为星点弥散像元个数; τ 为在某轨道高度,某太阳高度角,某观测角度和某波段条件下的大气透过率; $\tau(\lambda)$ 为光学系统透过率; $E(T, \lambda)$ 为光谱辐射强度; t 为积分时间; $QE(\lambda)$ 为探测器量子效率; $E_{\text{PH}}(\lambda)$ 为光谱为 λ 的单光子能量; $E(H, T, \lambda)$ 为天空背景辐射强度。

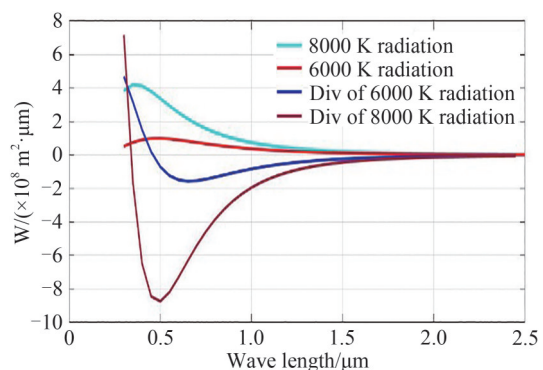


图1 不同温度辐射和其导数曲线

Fig. 1 Radiation at different temperatures and its derivative curves

为估算出信号强度,需考虑外场探测的实际参数,选择太阳高度角为 10° ,海拔高度为1 km,乡村环境中的能见度为23 km,探测器量子效率和积分时间分别为70%和10 ms。

星敏感器的探测灵敏度模型可以通过计算星光信号的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR),从而建立与被探测星等的关系,其信噪比计算公式为

$$\text{SNR} = \frac{S}{\sqrt{S + B + N_{\text{noise}}^2}} \quad (6)$$

式中, S 为探测星光电子数, B 为背景光电子数, N 为探测器噪声。

将式(3)和式(5)计算所得结果带入式(6)可得到信噪比大小。当信噪比为5时,本文所述星敏感器光学设计指标如表1所示^[9]。

表1 光学设计指标
Table 1 Optical parameters

| Optical parameter | Value |
|-----------------------|--|
| Focal length | 84 mm |
| Field of view | $\geq 8^\circ$ |
| Relative aperture | 1/1.4 |
| Spectral range | 1.1~1.4 μm |
| System transmittance | 80% |
| Energy concentration | 30 μm uniform concentration of more than 85% energy |
| Primary wavelength | 1.25 μm |
| Operating temperature | -40~+60 $^\circ\text{C}$ |

根据工程需要,本设计不仅考虑上述因素,还需适应星敏感器工作温度、畸变以及公差需求。

2 光学系统设计及优化

考虑到星敏感器光学系统具有相对孔径大、焦距长的等特点,其结构类似于摄远系统,同时,星敏感器光学系统对畸变要求比较严格,光学系统的畸变会影响星点提取的准确性,因此选择无畸变摄远物镜作为光学系统的初始结构。

为了实现全天时星敏感器的环境适应性,本文采用光学被动式消热差设计方法,根据光机结构尺寸和光机材料随温度变化的特性差异,对光焦度和空气间隔进行合理分配,以满足系统在宽工作温度范围内光学性能良好的要求。

光学系统有 j 个薄透镜组成,若采用光学被动式无热化设计,应满足^[10]

$$\varphi = \frac{1}{f} = \frac{1}{h_1} \sum_{j=1}^k h_j \varphi_j \quad (7)$$

$$v = \frac{1}{h_1^2 \varphi} \sum_{j=1}^k h_j^2 v_j \varphi_j = 0 \quad (8)$$

$$\frac{1}{h_1^2 \varphi} \sum_{j=1}^k h_j^2 \alpha_j \varphi_j = -\alpha \quad (9)$$

式中, h_j 为近轴边缘光线在第 j 个透镜上的入射高度, v 为玻璃材料色散系数, α_j 为第 j 个透镜热膨胀系数, α 为镜筒结构件的热膨胀系数。

通过对初始结构进行优化和像差平衡,设计完成的光学系统如图2所示,光学镜头结构图如图3所示。光学系统由7片透镜组成,采用HLAF3、HZF52A和HFK61三种常见的玻璃材料,且都是环境适应性比较优异的常用玻璃,材料属性如表2所示。透镜的前后表面均可镀1.1 μm ~1.4 μm 波段的增透膜,使透镜前后表面的透过率均达到99%以上,设计完成的光学系统的透过率可达 $0.99^{14} = 0.86$ 以上。表3为该系统设计结果与指标要求对比结果。

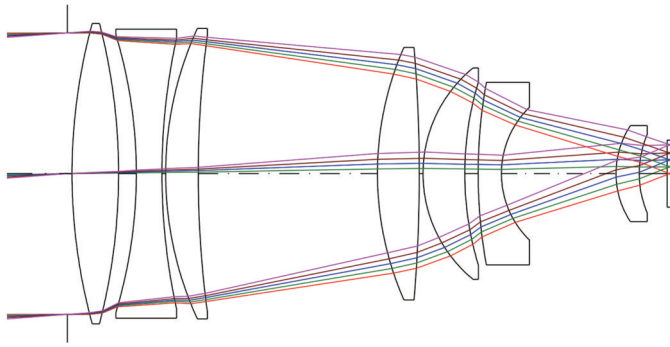


图2 光学镜头设计结果
Fig. 2 Optical lens design results

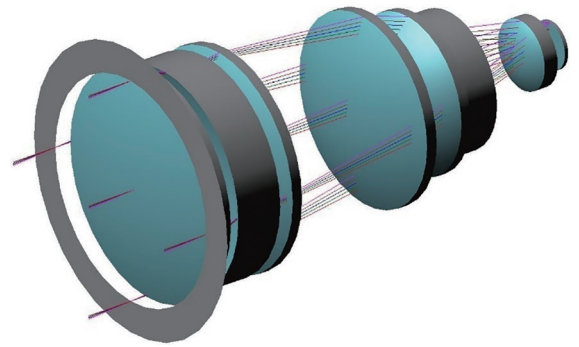


图3 光学镜头结构图
Fig. 3 Optical lens structure diagram

表2 光学材料属性

Table 2 Optical material properties

| Material name | Thermal expansion coefficient/ $(\times 10^{-7} \cdot \text{K}^{-1})$ | Temperature coefficient of refractive/ $(\times 10^{-6} \cdot \text{C}^{-1})$ |
|---------------|---|---|
| HIAF3 | 80 | 3.2 |
| HZF52A | 84 | 5.0 |
| HFK61 | 167 | 6.5 |

表3 光学设计结果与分析指标对比

Table 3 Comparison of optical design results and analysis parameters

| Optical parameter | Indicator requirements | Value |
|-----------------------|--|--|
| Focal length | 84 mm | 84 mm |
| Field of view | $\geq 8^\circ$ | 8.4° |
| Relative aperture | 1/1.4 | 1/1.4 |
| Spectral range | $1.1 \sim 1.4 \mu\text{m}$ | $1.1 \sim 1.4 \mu\text{m}$ |
| System transmittance | $\geq 80\%$ | $\geq 86\%$ |
| Energy concentration | $30 \mu\text{m}$ uniform concentration of more than 85% energy | $30 \mu\text{m}$ uniform concentration of more than 95% energy |
| Primary wavelength | $1.25 \mu\text{m}$ | $1.25 \mu\text{m}$ |
| Operating temperature | $-40 \sim +60^\circ\text{C}$ | $-40 \sim +60^\circ\text{C}$ |

3 像质评价

光学传递函数是全面评价光学系统设计性能的重要手段,其图像探测器所能分辨的最高空间频率可由(10)式给出^[11]。

$$f = \frac{1}{2d} \quad (10)$$

式中, f 为空间频率, d 为探测器单个像元尺寸。本文所选择的探测器的单个像元尺寸为 $15 \mu\text{m}$,因此根据(10)式确定器空间频率约为 30 lp/mm 。非离焦条件下,不同气压和温度下的光学系统调制传递函数如图4所示,从图4(a)、图4(b)和图4(c)对比可知,该光学系统在温度 $-40^\circ \sim +60^\circ$ 及真空常压下均具有良好的环境适应性。

所设计光学系统的色畸变曲线如图5所示,从图中可以看出该光学系统所有畸变均小于 0.018 mm 。

由于星敏感器是在离焦状态下使用,因此为了得到更好的中心提取效果,要求弥散斑均匀。图6(a)、(b)和(c)分别是 20°C 、 -40°C 和 60°C 时,离焦量为 0.02 mm 的点列图弥散斑仿真结果,图7(a)、(b)和(c)分

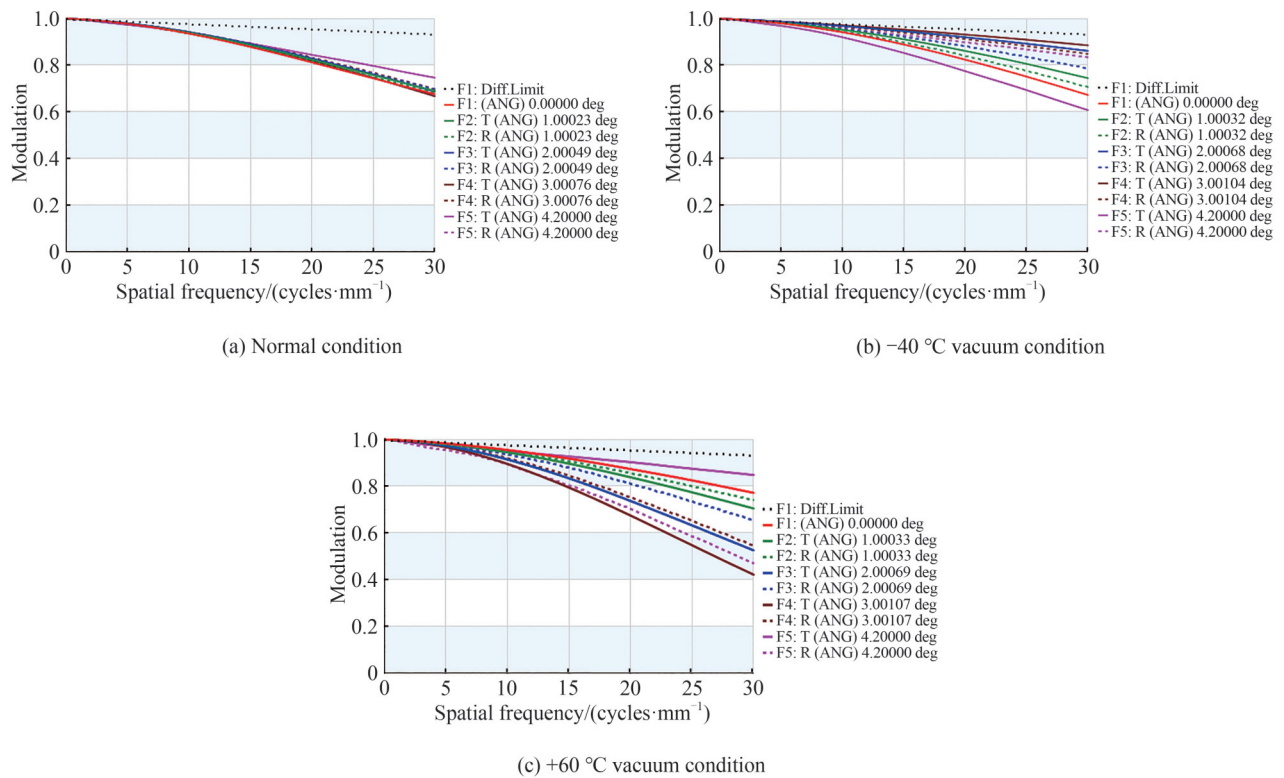


图 4 不同气压和温度条件下光学系统调制传递函数
Fig. 4 MTF of optical system at different pressure and temperature

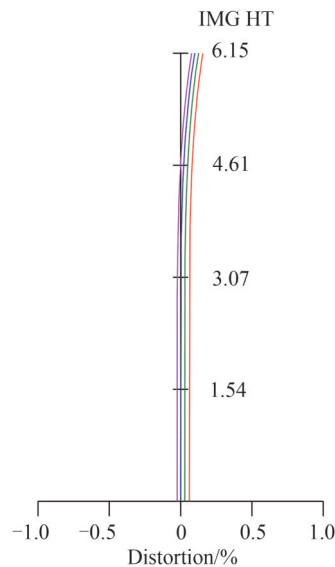


图 5 光学系统色畸变曲线
Fig. 5 Cromatic distortion curve of optical system

别是 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,光学系统离焦后的包圈能量结果,从各图中可以看出不同视场角的弥散斑分布均匀,均优于 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。

光学系统设计和成型后,其性能与加工和装调的精度也息息相关,所以要结合装调和加工水平确定合理公差。图 8 是根据加工和装调公差得到的该光学系统公差曲线,可以看出该光学系统非离焦时 90% 概率 $\text{MTF} \geq 0.4 @ 30\text{ lp/mm}$,在现有装调水平下具有可装调性。

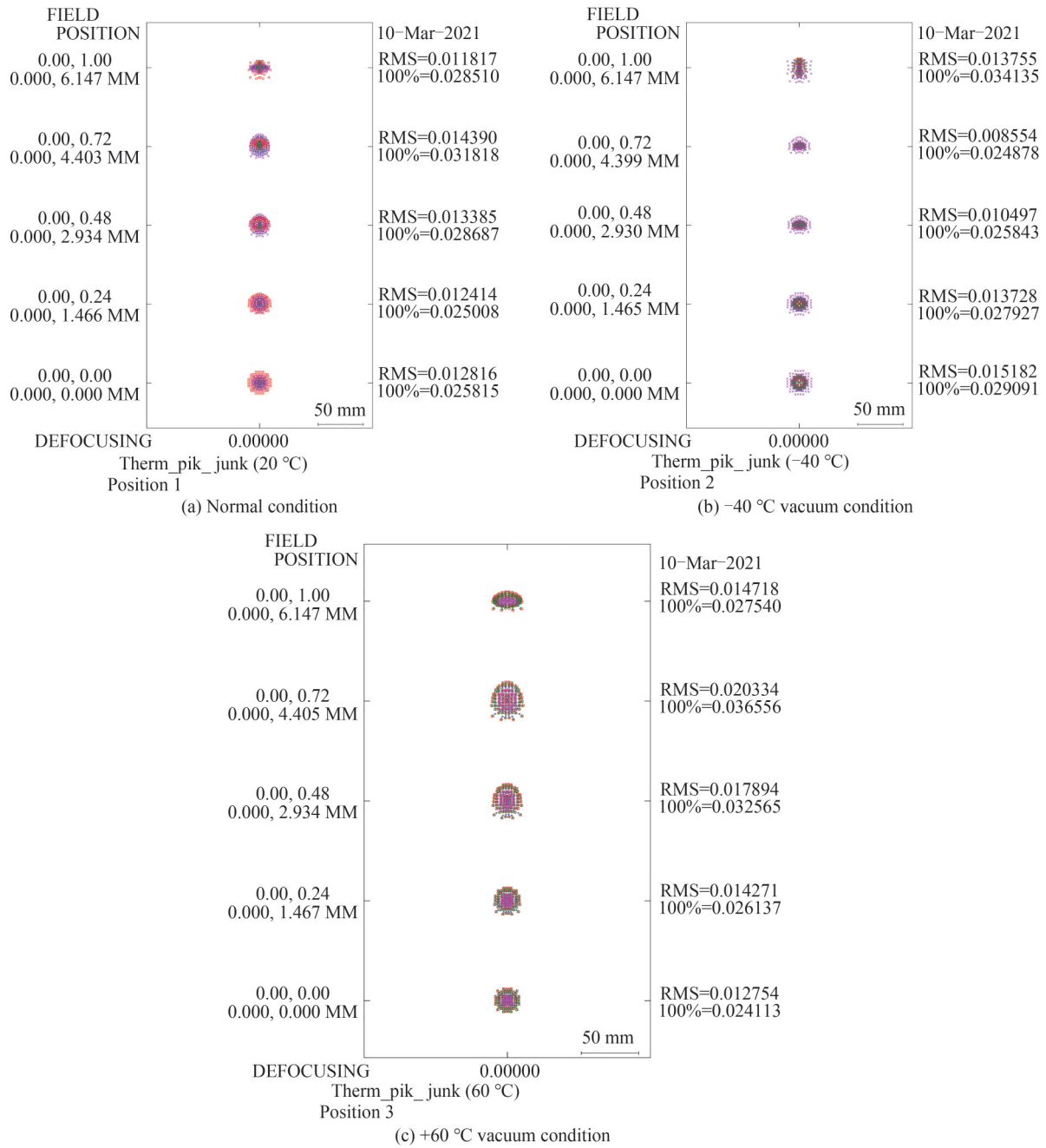


图 6 离焦情况下不同温度时光学系统弥散斑

Fig. 6 Dispersion spot of optical system at different temperature under defocusing condition.

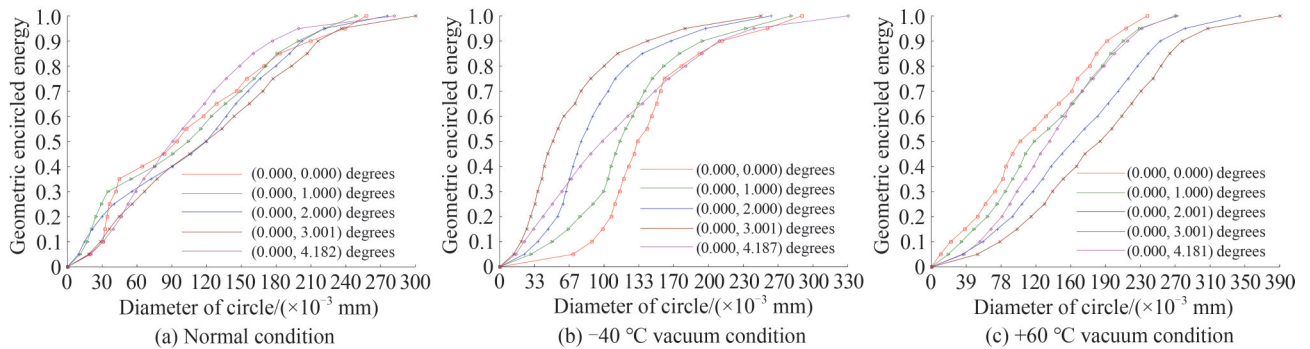


图 7 离焦情况下不同温度时光学系统包圈能量

Fig. 7 Envelope energy of optical system at different temperature under defocusing condition

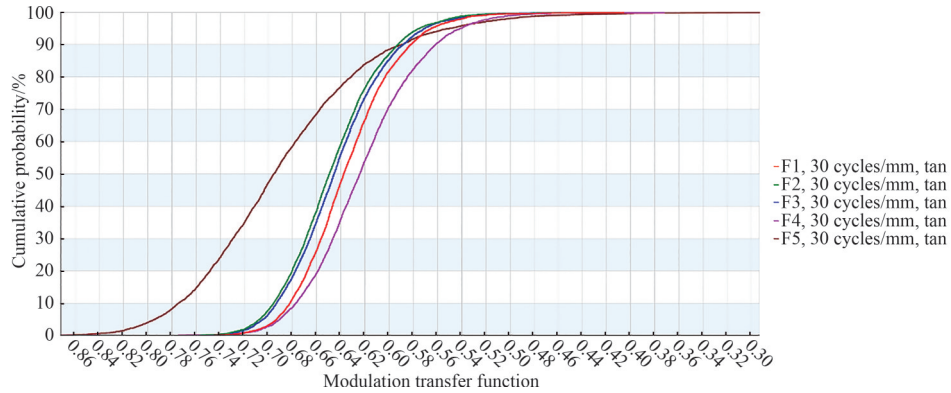


图 8 光学系统公差曲线
Fig. 8 tolerance curve of optical system

4 杂散光抑制能力评估

为了达到全天时恒星探测能力,杂散光抑制能力需要进行评估,通过优化设计保证系统的信噪比。星敏传感器内部采用表面发黑处理,遮光罩上采用一款具有较高太阳吸收率的SB-3A国产消光漆进行涂黑,该表面处理方式对近红外光线抑制有着近乎相同的效果。遮光罩设计采用非等间距布局,可以在保证效果的情况下有效减轻重量,遮光罩内档光环采用16°斜角,可以保证较好的杂散光抑制能力。根据光学设计结果和结构设计采用杂散光分析软件进行光路系统杂散光抑制水平评估,完成建模后效果如图9所示。

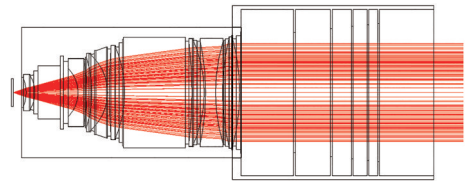
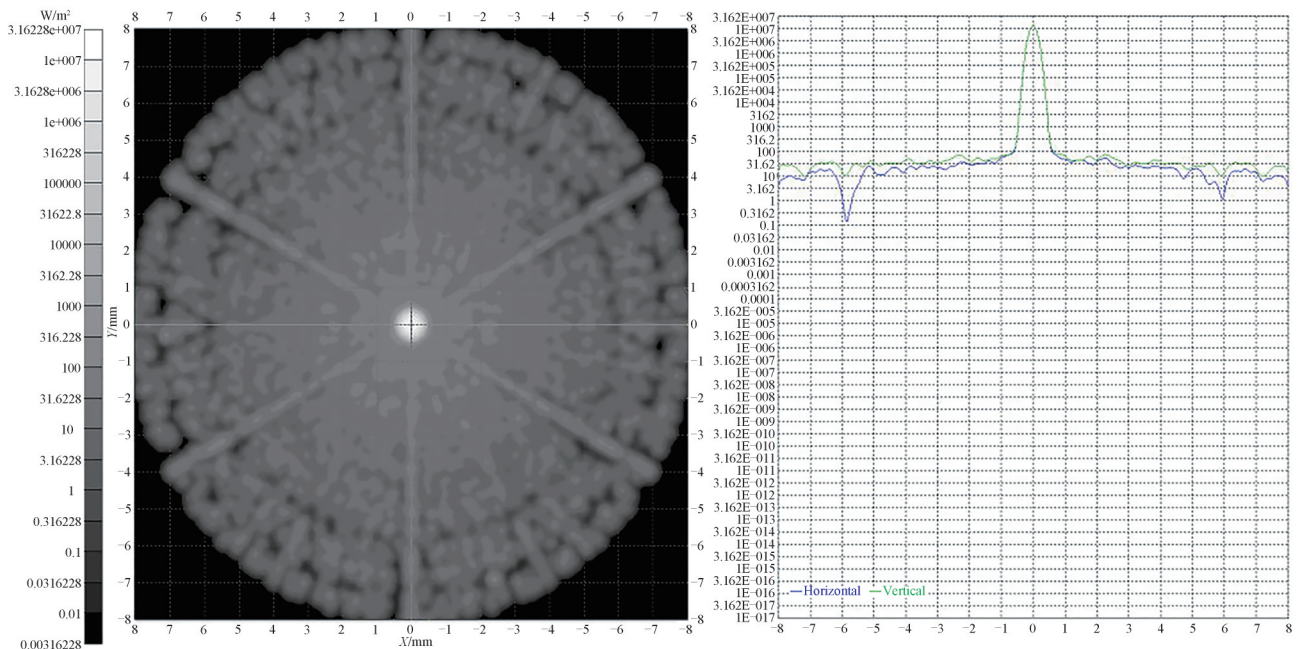


图 9 光学系统建模
Fig. 9 Optical system modeling

通过分析可知,如图10和图11所示视场内由目标产生杂散光是目标强度的 3×10^{-5} ,视场外杂散光强度由 10^{-2} 量级迅速下降,视场外杂散光如图11所示,18°以外杂散光强度为视场外强光的 10^{-4} 以下。



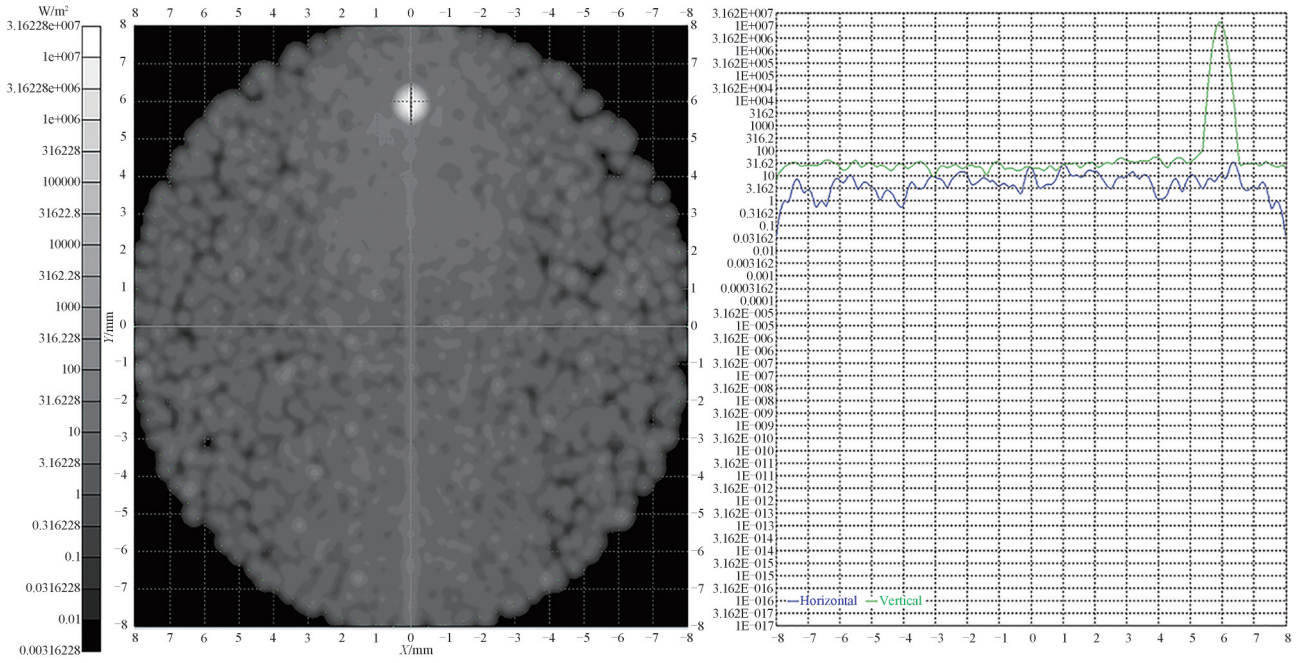


图 10 视场内杂散光分析结果

Fig. 10 Stray light analysis results in the field of view

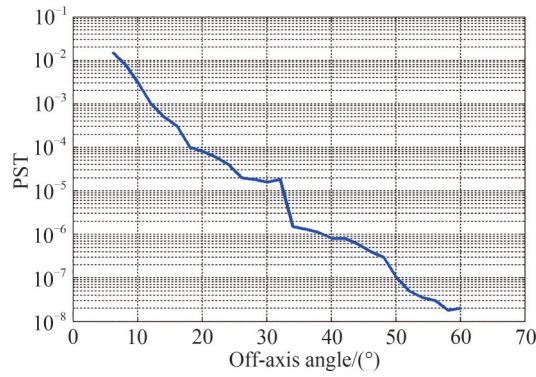


图 11 视场外 PST 分析结果

Fig. 11 Out-of-field PST analysis results

5 试验验证

根据全天时光学系统设计要求,完成了原理样机的加工与装调,并完成了其在地面的实际外场观星试验。图 12 为原理样机在白天(下午 3 时,顺光)时拍摄的恒星照片,图 12 右侧给出了所探测到的恒星的放大图。图 13 为原理样机在白天(下午 3 时,逆光,太阳矢量与光学系统夹角 30°)时拍摄的恒星照片,

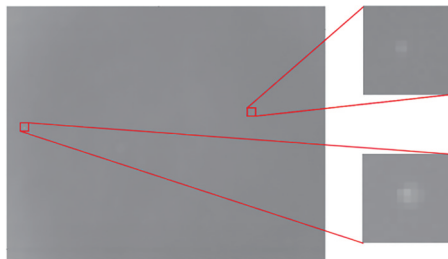


图 12 恒星照片(下午 3 点,顺光)

Fig. 12 Fixed star (3:00 PM, along the direction of light)

图14为原理样机在白天(下午3时,逆光,太阳矢量与光学系统夹角 30°)时拍摄的恒星星点能量三维图。图15为原理样机在白天(下午4时,逆光,太阳矢量与光学系统夹角 10°)时拍摄的恒星照片,图16为原理样机在白天(下午4时,逆光,太阳矢量与光学系统夹角 10°)时拍摄的恒星星点能量三维图。从原理样机拍摄的恒星照片及能量三维图可以直观看出来3等恒星目标信号强度远大于背景强度。该结果经过后续图像处理,能得到更为清晰的观星效果,从而进一步实现对恒星位置信息等有关参数的处理。通过原理样机实际地面的观星试验验证,本文所设计的光学系统能满足J波段对3等恒星进行全天时高精度探测的要求。

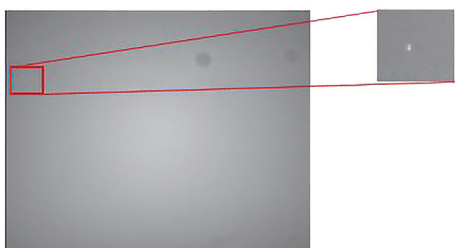


图13 恒星照片(下午3点,逆光,太阳角 30°)
Fig. 13 Fixed star (3:00 PM, against the light, 30° solar angle)

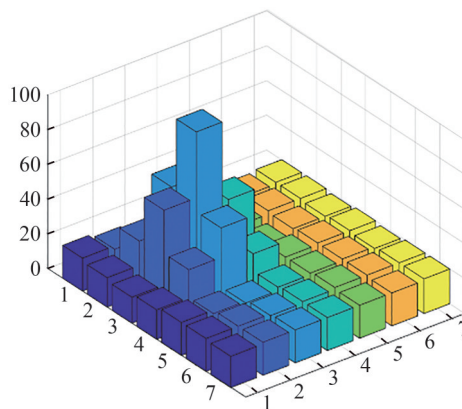


图14 恒星星点能量三维图(下午3点,逆光,太阳角 30°)
Fig. 14 3D energy map of stars (3:00 PM, against the light, 30° solar angle)

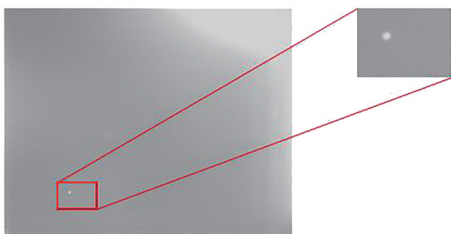


图15 恒星照片(下午4点,逆光,太阳角 10°)
Fig. 15 fixed star (4:00 PM, against the light, 10° solar angle)

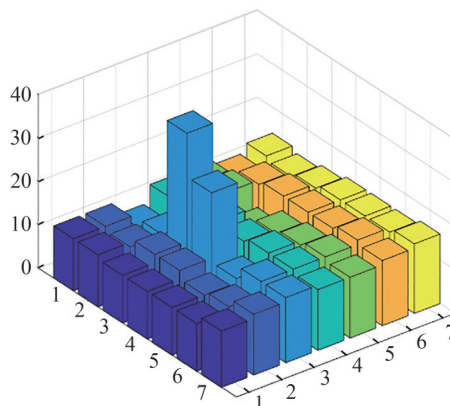


图16 恒星星点能量三维图(下午4点,逆光,太阳角 10°)
Fig. 16 3D energy map of stars (4:00 PM, against the light, 10° solar angle)

6 结论

针对星敏感器在J波段对3等恒星进行全天时高精度探测需求,设计了一种大相对孔径全天时星敏感器光学系统。该系统由7片透镜组成,其焦距为84 mm, F 数为1.4,工作谱段范围为 $1.1\sim 1.4\ \mu\text{m}$,视场角为 8.4° 。采用无畸变望远物镜作为初始结构,选择常用的玻璃材料,通过改变各透镜形状,合理匹配各镜片之间的光焦度,实现被动补偿无热化设计。优化设计完成的光学系统在高低温($-40\ ^\circ\text{C}\sim +60\ ^\circ\text{C}$)条件下,离焦后弥散斑小于 3×3 像元时,其光斑均匀, $30\ \mu\text{m}$ 均匀集中95%以上能量,色畸变均小于 $0.018\ \text{mm}$,成像质量良好。通过原理样机实际地面观星试验,该光学系统能满足J波段对3等恒星进行全天时高精度探测的要求。为进一步对全天时星敏感器及其高低温极端环境下的设计研究提供了理论和实践基础。

参考文献

- [1] GAO Jianyun, CHEN Li, WANG Jiayi, et al. An overview of the scientific and achievements of 2MASS[J]. Progress in

- Astronomy, 2004, 22(4): 275-282.
高建云, 陈力, 王家骥, 等. 2MASS 的科学意义和成果概览[J]. 天文学进展, 2004, 22(4): 275-282.
- [2] LI Baohua, LIU Guoliang, LIU Rui, et al. Key techniques of star sensors for celestial navigation[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1615-1620.
李葆华, 刘国良, 刘睿, 等. 天文导航中的星敏传感器技术[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1615-1620.
- [3] YUAN Li, WANG Miaomiao, WU Yanpeng, et al. Evelopment of space starlight measurement technology [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2020, 41(8): 1-12.
袁利, 王苗苗, 武延鹏, 等. 空间星光测量技术研究发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(8): 1-12.
- [4] HE Ju. Survey of overseas celestial navigation technology development[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(5): 91-96.
何炬. 国外天文导航技术发展综述[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(5): 91-96.
- [5] REN Bingwen, JIN Guang, WANG Tiancong, et al. Parameter design and test of airborne all-day star sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013(4): 165-172.
任秉文, 金光, 王天聪, 等. 机载全天时星敏传感器参数设计及实验[J]. 红外与激光工程, 2013(4): 165-172.
- [6] PAN Yue, WANG Hu, JIN Nan, et al. Parameter selection and optical design of all-day star sensor[J]. Acta Photonica Sinica. 2016, 45(1): 0122002.
潘越, 王虎, 荆楠, 等. 全天时星敏传感器光学系统参量选择与光学设计[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 0122002.
- [7] JIN He, ZHAI Zhengyi, DU Weifeng, et al. Method for experimental analysis of thermostability of star sensors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 52(4): 204-209.
金荷, 翟正一, 杜伟峰, 等. 星敏传感器热稳定性的试验分析方法[J]. 中国激光, 2020, 52(4): 204-209.
- [8] XZ A, JIE S A, ZHENG W B, et al. Star map simulation and platform influence of airborne star sensor based on J-band data of 2MASS catalog - ScienceDirect[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 111:103541.
- [9] ZHAO CHAO. Optical system design of star sensor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
赵超. 星敏传感器光学系统设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016.
- [10] WANG Zheng, WANG Zheng. Passive athermalization design of dual field infrared optical system[J]. Laser and Infrared, 2014, 44(9): 1030-1034.
王铮, 王政. 双视场红外光学系统被动无热化设计[J]. 激光与红外, 2014, 44(9): 1030-1034.
- [11] ZHAO Yang. New type reflective optical system design for a star sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
赵阳. 新型反射式星敏传感器光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

Large Relative Aperture Optical System Design for All Day Star Sensor

ZHANG Kaisheng^{1,2}, SU Xiuqin¹, YE Zhilong³

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Shanghai Aerospace Control Technology Research Institute, Shanghai 201109, China.*)

Abstract: Star sensor is a high-precision space attitude measurement instrument with high precision, good autonomy and independent existence of other systems. It takes the starry sky as the working background and stars as the benchmark to obtain the attitude information of the spacecraft by detecting stars in different positions in space. Therefore, its accuracy is the key factor affecting the overall performance of the whole system. The all day star sensor is a star sensor that can still detect stars under the strong background in the daytime and has the anti-interference ability to the strong sky background. As the most important part of the optical system, its imaging quality is very important to improve the star detection ability of the star sensor. However, with the development of aerospace technology, space science has higher and higher requirements for the attitude accuracy of spacecraft. Therefore, in order to meet the needs of all-time high-precision detection, the lens of the star sensor optical system must adopt a large relative aperture to improve the star detection ability. In order to realize the all-time high-precision detection of class 3 stars by star sensor in J-band, this paper adopts the method of passive thermal difference design, carries out matching optimization according to the thermal difference performance difference between the optical system and structural materials, and then realizes lens thermal difference elimination. An all-time star

sensor optical system with a large relative aperture is designed and completed. Firstly, the irradiance and signal-to-noise ratio of class 3 stars in the J-band are analyzed to determine the main parameters of the optical system, in which the focal length is 84 mm, the F number is 1.4, and the working spectrum range is $1.1 \sim 1.4 \mu\text{m}$. The field angle is 8.4° . Secondly, considering that the optical system of the star sensor has the characteristics of a large relative aperture, long focal length and the influence of optical system distortion on the accuracy of star point extraction, the distortion free telephoto objective is selected as the initial structure of the optical system for optimization. In the process of optical system design, common optical materials and lens barrel materials are selected. By changing the shape and thickness of each lens, the focal power and air gap between each lens are reasonably matched, so as to realize the passive compensation non-heating design. After the optimized design, the dispersion spot size of the optical system is better than 30 when the defocus is 0.02 mm under the conditions of high and low temperature ($-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$) and vacuum μm . The color distortion is less than 0.018 mm, and the design results meet the design requirements. The inner surface of the star sensor is blackened, the light shield is designed with non-equidistant layout, and the surface is blackened with an SB-3A domestic extinction paint with high solar absorption, which can effectively reduce the weight under the condition of ensuring the effect. The inner baffle ring of the light shield adopts a 16° oblique angle, which can ensure good stray light suppression ability. The stray light of the optical mechanical system is simulated and analyzed by using TracePro software. The analysis results show that the stray light generated by the target in the field of view is 3×10^{-5} of the intensity of the target, the stray light intensity outside the field of view decreases rapidly from the order of 10^{-2} , and the stray light intensity outside 18° is less than 10^{-4} of the strong light outside the field of view. Finally, the actual ground star observation test is carried out on the principle prototype. Through the star photos and three-dimensional energy diagram taken by the principle prototype, it can be seen intuitively that the signal intensity of the class 3 star target is much greater than the background intensity. After subsequent image processing, a clearer star observation effect can be obtained. Through theoretical analysis and design and practical observation experiments, it is verified that the optical system designed in this paper can meet the requirements of all-time high-precision detection of class 3 stars in J-band, which also shows the rationality of the design of the optical system.

Key words: Large relative aperture; All day; Star sensor; Optical system; Athermalization