

doi: 10.3788/gzxb20164501.0122002

全天时星敏感器光学系统参量选择与光学设计

潘越^{1,2}, 王虎¹, 荆楠^{1,2}, 沈阳^{1,2}, 薛要克¹, 刘杰¹

(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)

摘 要:以 10 km 观测高度探测 4.5 等星为例, 分析星点在 600~1100nm 谱段的辐射特性, 使用 Modtran 软件计算同谱段的天空背景辐射亮度以及大气透过率, 在信噪比阈值为 5 的情况下, 选择一组典型的光学系统参量. 采用一块平面反射镜和石英球面镜系统设计了轻、小型化的光学系统, 该系统在 600~1100 nm 宽光谱范围内全视场光斑形状接近圆形、调制传递函数接近衍射极限, 色差很小, 具有良好的成像质量. 计算了地面环境下星敏感器的昼夜探测信噪比, 以信噪比阈值 5 对星敏感器的探测能力评估, 结果表明在白天地面环境下可以实现 2.5 等 G 型恒星的探测, 在夜间地面环境下可以实现 6 等 G 型恒星的探测.

关键词:光学设计; 星敏感器; 全天时; 光谱滤波; 信噪比; 参量选择

中图分类号 TH74:

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0122002-7

Parameter Selection and Optical Design of All-day Star Sensor

PAN Yue^{1,2}, WANG Hu¹, JING Nan^{1,2}, SHEN Yang^{1,2}, XUE Yao-ke¹, LIU Jie¹

(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)

Abstract: Detecting a 4.5 magnitude star in the observation height of 10 km, the radiance of stars between 600~1100 nm was analyzed, the radiance of sky background and the optical transmission of atmosphere were calculated by using Modtran. When the threshold of SNR is 5, typical parameters are selected. With a plane mirror and a silicon material sphere lens, a lighter miniature optical system was designed. The result shows that the optical system spot shape approaches a circle between 600~1100 nm of full field of view, modulation transfer function approaches perfection and have outstanding image of quality. The Ground-based daytime and nighttime detection SNR of the star tracter is calculated and the detection ability limit is estimated in the threshold 5 of SNR, which is 2.5 stellar magnitude G star in daytime on the ground and 6 at night.

Key words: Geometrical optics; Atmospheric optics; Optical design; Star sensor; All-day; Spectral filtering; SNR; Parameter selection

OCIS Codes: 220.0220; 220.4830; 100.3008; 110.4280

0 引言

星敏感器是通过对恒星定位来获得载体相对于惯性坐标系三轴姿态的测量仪器. 新一代基于 CMOS 有源像素传感器 (Active Pixel Sensor, APS) 的星敏感器, 具有高准确度、低成本、小尺寸、不受外界干扰等优

点, 并且能够解决无先验信息的“太空迷失”问题^[1]. 因此, 星敏感器与惯性导航系统、全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 组合使用, 可以发挥其优点, 解决惯导的漂移和 GPS 自主性差的问题, 对于长航时、长距离飞行器有着重要的意义. 目前, 星敏感器在卫星平台方面得到广泛应用, 而对于大气层内的平台,

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项 (No. 2013YQ310799) 资助

第一作者: 潘越 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间敏感器光学系统设计. Email: panyue@opt.cn

导师 (通讯作者): 王虎 (1975-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为空间敏感器光学技术和光学探测. Email: wanghu@opt.ac.cn

收稿日期: 2015-06-30; 录用日期: 2015-10-13

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

如民航飞机、高空气球、远航船舶等,由于白天天空背景亮度过于强烈,用于卫星平台的星敏感器无法正常工作,这就迫切需要研制出大气层内全天时适用的星敏感器。

全天时星敏感器的主要问题在于白天观星对比度过低,提高对比度最直观的方法是使用光谱滤波装置^[2],600nm 的前截止滤光片可以有效地减弱天空背景亮度,而占导航星 90% 以上的 K、M、G 三种类型恒星亮度减少的较小。另一方面,考虑到星点(点光源)和天空背景(面光源)的光源类型不同^[3],在光学系统设计上,一般采用大孔径以增强星点辐射相对强度,采用长焦距以减弱天空背景辐射相对强度。长焦距将导致白天星敏感器视场比较小,为保证视场内有可识别的星,可以增加转台,如经纬仪结构^[4],来增大可观测的天空区域。在星点目标提取方面,采用离焦的方法让星点光斑覆盖多个像素^[5],可以提高质心算法的准确度。文献[3]分析了星点目标辐射特性,却未能明确视星等和特定谱段辐射特性的关系,未能明确恒星色温对标定参量的影响;文献[5]在计算窗口和光斑形状大小的选取上,未能定量分析噪声对结果的影响;在光学设计和应用上,文献[4]采用的经纬仪结构过于庞大复杂,需要做进一步的改进。

本文从理论上分析了星点在 600~1 100 nm 谱段的辐射光子通量和星等、恒星类型的关系,使用 Modtran 软件计算了天空背景在同谱段辐射光子通量与太阳天顶角、观测天顶角、观测方位角的关系;在存在噪声的情况下,分析了星点质心提取准确度与计算窗口、光斑大小的关系,选择了合适的计算窗口以及光斑形状和大小;从信噪比出发,选择了合适的焦距和有效通光孔径;设计了满足参量要求、成像质量良好并且成本低廉的光学系统。

1 天空背景辐射特性分析

天空背景辐射亮度可以通过 Modtran 软件仿真得到,其强度主要与谱段、观测高度 H 、太阳天顶角 μ_1 、观测天顶角 μ_2 、观测方位角 θ 五个因素有关^[6]。根据典型的应用环境,增加光谱滤波片后的谱段为 600~1 100 nm,观测高度为 $H=10$ km,太阳天顶角为 $\mu_1=[30^\circ, 60^\circ]$,观测天顶角为 $\mu_2=[15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ]$,观测方位角为 $\theta=180^\circ$ 。Modtran 仿真结果如图 1。

结果表明,天空背景辐射亮度主要集中在短谱段,峰值在 450~550 nm 之间,使用 600 nm 前截止滤光片可以有效地减少天空背景辐射亮度^[2]。天空背景辐射亮度与太阳天顶角、观测天顶角有关,并且观测天顶角的影响较大,但对辐射亮度结果的影响小于一个数量级。

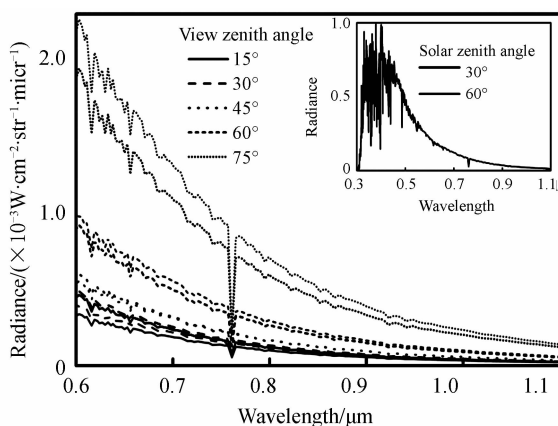


图 1 天空背景辐射亮度分布
Fig. 1 Distribution of sky background radiance

由天空背景辐射亮度分布可以积分得到背景亮度等效光子数,如图 2。

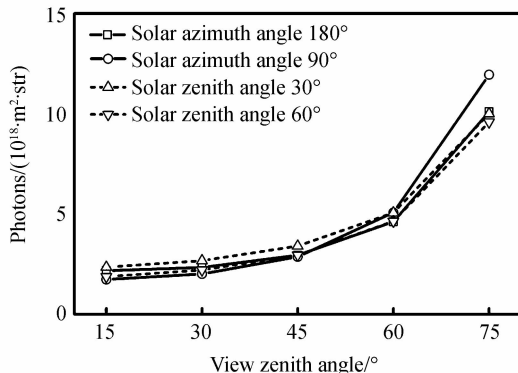


图 2 600~1 100 nm 谱段天空背景辐射光子数
Fig. 2 Photon flux of sky background between 600~1 100 nm

2 星点辐射特性分析

实际观测中,不同星等大小、光谱类型、色温的恒星,辐射光子数差异较大,最终在像面处产生的光电子数也不同。文献[3]将恒星看作黑体辐射来讨论的方法是一种典型的星点信号能量的分析思路,并给出了恒星光谱辐照度 $\Phi(m, \lambda, T)$ 与标定参量 $k(m)$ 的计算方法。但是,参考文献[3]忽略了标定参量 $k(m)$ 本身是与恒星色温有关的,并且恒星的视星等只与可见光谱段内的辐照度相关,用全谱段积分是不准确的。本文在此基础上给出修正后的恒星光谱辐照度计算方法。

恒星的光谱辐照度 $\Phi(m, \lambda, T)$ 取决于星体的星等和色温,即

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

式中, $B(\lambda, T)$ 为普朗克黑体辐射公式; $k(m, T)$ 为标定参量,为黑体光谱辐照度的最大值,只与恒星的视星等和色温有关; m 为恒星星等; 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 为波尔兹曼常量。

不同类型的恒星典型色度^[3] 为 $M=2\ 660\sim$

3 920 K, $K=4\ 160\sim 5\ 240\ K$, 太阳 = 5 900 K. 同一星等不同色温的恒星光谱辐照度曲线如图 3.

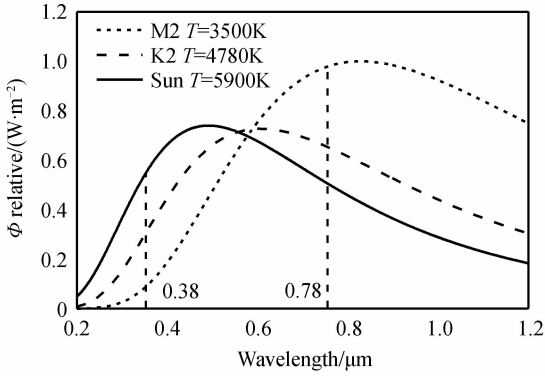


图 3 同一星等不同色温的恒星光谱辐照度曲线
Fig. 3 Distribution of irradiance of same magnitude stars under different temperature

同一视星等的视亮度相同,即恒星在可见光 380~780 nm 波段内的辐照度相同,而相邻星等照度相差 2.512 倍^[7],则 m 等星在可见光范围内的辐照度 $E_{eye}(m)$ 为

$$E_{eye}(m) = \int_{380}^{780} k(m, T) \frac{2hc^2}{\lambda^5 \{ \exp [hc/\lambda kT] - 1 \}} d\lambda \quad (2)$$

$$E_{eye}(m) = E_{eye}(n) (2.512)^{-(m-n)} \quad (3)$$

已知太阳的视星等为 -26.74,在可见光范围内太阳常量为 $E_{eye}(-26.74) = 687\ W/m^2$,带入式(2)、(3)得到标定参量为

$$k(m, T) = \frac{(1.38 \times 10^{-8})(2.512)^{-m}}{\int_{380}^{780} \frac{2hc^2}{\lambda^5 \{ \exp [hc/\lambda kT] - 1 \}} d\lambda} \quad (4)$$

将标定参量 $k(m, T)$ 带入式(1)即可得到视星等为 m 、色温为 T 的恒星全谱段绝对光谱辐照度.

由图 1、3 可以看出,相对于天空背景辐射,星点光谱辐照度峰值位置在 600 nm 以上,使用 600 nm 前截止滤光片对恒星辐射通量影响相对较小^[2].通过积分计算

$$n = \int_{600}^{1100} k(m, T) \frac{B(\lambda, T)}{hc/\lambda} d\lambda \quad (5)$$

得到视星等为 4.5 的恒星在 600~1 100 nm 波段内的辐射光子数,如图 4.

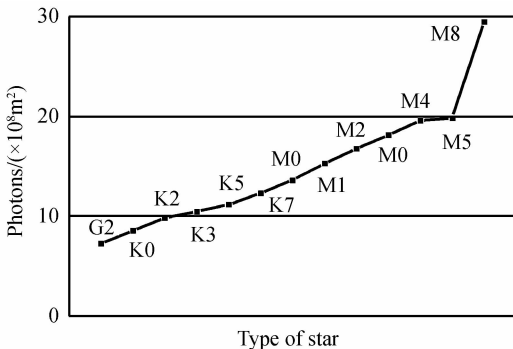


图 4 600~1 100 nm 波段 4.5 等星辐射光子数
Fig. 4 Photon flux of 4.5 magnitude stars between 600~1 100 nm

3 光学系统参量选择

3.1 光斑形状和大小的选择

质心法^[5,8-9]是提高星敏传感器恒星位置提取准确度的一种常用方法,这是一种基于目标灰度分布的算法.假设星像光斑用二维高斯函数表示, I_{ij} 为坐标 (i, j) 的像元采样灰度,则质心测量误差表示为

$$\delta_x = \hat{x} - x_0 = \frac{\sum_{i,j} x_i I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}} - x_0 \quad (6)$$

显然质心测量误差与两个因素有关:一是由于探测器像元对光斑能量分布的采样,导致了点扩散函数变形;二是噪声引起了采样点能量的测量误差.采样引起的误差与星像光斑的能量分布及质心计算的窗口大小有关,噪声引起的误差可以通过在质心法模型中加入探测信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 阈值^[10] SNR=5 的高斯白噪声来分析,即

$$I_{ij} = \text{awgn}(I_{ij}, \text{SNR}=5, \text{sigpower}) \quad (7)$$

当 CMOS APS 的像元填充因子 $\xi=1$ 时, 3×3 , 5×5 , 7×7 窗口下的质心偏差的均方根值 (Root Mean Square, RMS) 与高斯半径的关系如图 5. 其中虚线为无噪声情况下的关系曲线,实线为 SNR=5 时采用一种基于帧累加^[9]的算法以提高质心测量准确度并进行平滑处理后的关系曲线.由图 5 可见,存在噪声时,边缘像素内的噪声对质心测量误差的影响随窗口的增大而增大,因此窗口过大不利于提高质心测量准确度,并且增加计算量,影响系统运算速度.因此,选择窗口 5×5 较为合适.

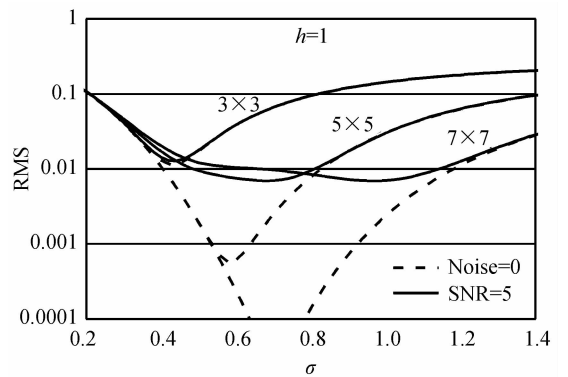


图 5 不同计算窗口下质心偏差与高斯半径的关系
Fig. 5 Relationship between RMS and spot size under different centroiding window sizes

除计算窗口外,质心偏差还与 APS 图像传感器像元填充区域的形状和位置以及像元填充率有关.典型的像元填充区域形状有正方形、矩形和 L 型^[11],为简化计算,仅考虑像元填充区域中心与像元中心重合、形状为正方形的特殊情况.图 6 为窗口 5×5 时,像元填充因子 $\xi=0.3, 0.6, 0.8$ 和 1 时 RMS 与高斯半径的关

系,其中虚线为无噪声情况下的关系曲线,实线为 SNR=5 时的关系曲线。

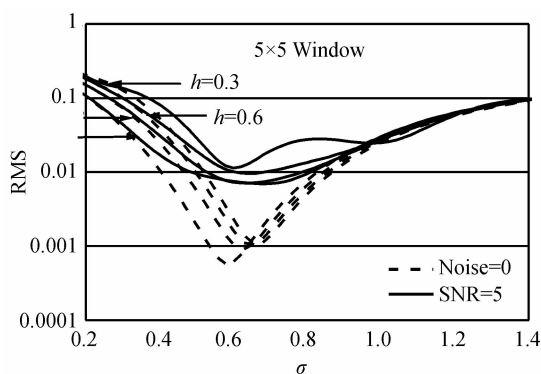


图 6 不同像元填充率下质心偏差与高斯半径的关系
Fig. 6 Relationship between RMS and spot size under different fill factors

由图可见,对于常见的 APS 图像传感器,填充因子约为 0.3,则高斯半径 $\sigma \approx 0.7$ 时得到 RMS 的最小值.对于点扩散函数,在 $x_0 \pm 2\sigma$ 范围内的能量约为总能量的 95%,因此应设置弥散斑半径 $2\sigma \approx 1.4$,取 $2\sigma = 1.5$.即光斑大小应覆盖 3×3 像素,且光斑形状应为圆形,能量分布应接近高斯分布,各视场、各谱段的分布尽可能一致。

3.2 口径、焦距和视场的选择

文献[12]给出了白天星敏传感器信噪比的计算方法为

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{S + N + N_{APS}^2}} \quad (8)$$

$$S = \frac{A\xi t \tau}{n^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(m, \lambda, T) \tau_s(H, \mu_1, \mu_2, \lambda) QE(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

$$N = \frac{\sigma A \xi t \tau}{f^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi(H, \mu_1, \mu_2, \theta, \lambda) QE(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

式中: S 为恒星信号光电子数, N 为天空背景辐射光电子数, N_{APS}^2 为探测器除散粒噪声外的其他所有噪声光电子数平方和, A 为光学系统有效入瞳面积, h 为 APS 像元填充因子, t 为积分时间, n 为星像弥散因子, τ 为光学系统透过率, $QE(\lambda)$ 为 APS 量子效率, τ_s 为大气透过率, σ 为 APS 单个像元面积, f 为光学系统焦距, Φ 为星点辐射光子通量函数, Ψ 为天空背景辐射光子通量函数。

其中大气透过率 τ_s 可以通过 Modtran 软件仿真计算得到,如图 7。

取观测天顶角 $\mu_2 = 60^\circ$,在 $600 \sim 1100\text{nm}$ 谱段内的平均大气透过率为 $\tau_s = 0.9350$ 。

由图 2、4,选取星点辐射光子数较少的 4.5 等 K2 型恒星作为观测目标,选取天空背景辐射光子数较强的 $\mu_1 = 60^\circ, \mu_2 = 60^\circ, \theta = 180^\circ$ 作为观测背景,则星点辐

射光子数和天空背景辐射光子数分别为:

$$\int_{600}^{1100} \Phi(\lambda) d\lambda = 9.8121 \times 10^8 \text{ photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (11)$$

$$\int_{600}^{1100} \Psi(\lambda) d\lambda = 5.0353 \times 10^{18} \text{ photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{s}) \quad (12)$$

实验选用的 CMOS APS 图像传感器的主要参量如表 1。

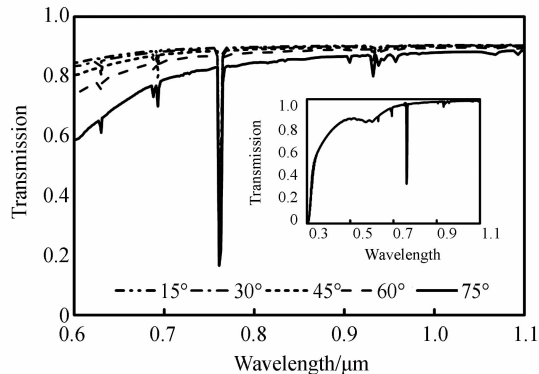


图 7 不同观测天顶角的大气透过率
Fig. 7 Distribution of atmosphere spectral transmission

表 1 CMOS APS 图像传感器的主要参量
Table 1 Parameters of the CMOS APS

Parameter	Value
Resolution	1024 × 1024
Pixel pitch	15 μm
Fill factor (h)	0.25
Quantum Efficiency (QE)	0.3

将表 1 参量带入信噪比计算公式,选定积分时间 $t = 0.02 \text{ s}$,得到信噪比与有效通光口径和焦距的关系如图 8。

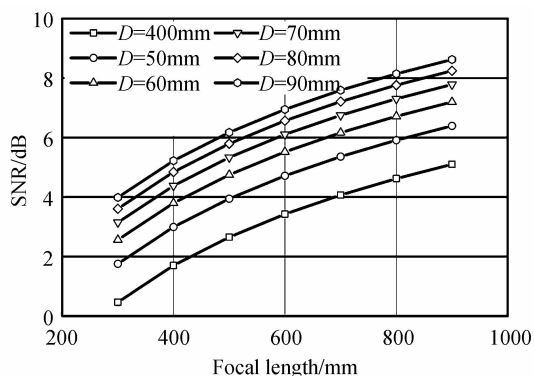


图 8 信噪比与有效通光口径和焦距的关系
Fig. 8 Relationship between SNR and focal length under different effective apertures

目标可以被识别的信噪比阈值是 $SNR = 5$,因此选择焦距与通光孔径的值为: $f = 600 \text{ mm}, D = 70 \text{ mm}$.通过 APS 传感器尺寸计算得到视场为: $2\omega = 2.0741^\circ$.取整视场为 2° 并修正焦距,最终设计参量为: $2\omega = 2^\circ, f = 623 \text{ mm}, D = 70 \text{ mm}$ 。

4 光学系统设计

4.1 光学系统结构与优化

全天时星敏传感器光学设计参量与指标如表 2。由参量可以看出,该系统为大 F 数,大口径,小视场的系统,若采用折射式光学系统结构,系统体积和重量将大大增加,不利于轻小型化的要求,并且轴外视场像差矫正困难。根据已有的设计经验,本光学系统采用卡塞格林反射镜加校准透镜的折反射式结构,并且采用一块平面反射镜来增大可观测的天空区域,光学系统结构如图 9。

表 2 全天时星敏传感器光学设计参量与指标
Table 2 Parameters and performance index of star sensor optical system

Parameter	Value
Focal length/mm	623
Effective aperture/mm	70
Field of view/(°)	2×2
Wavelength range/nm	600~1 100
Spot Diameter/ μm	45

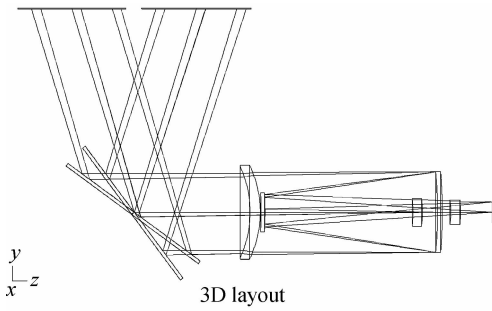


图 9 光学系统结构图

Fig. 9 The structure of optical system

光学系统中的卡塞格林结构是有遮拦的,而星敏传感器的信噪比对实际入瞳面积十分敏感,故而需要重新确定系统入瞳口径。次镜口径一般不超过主镜的一半,原设计参量中口径 $D=70\text{ mm}$,则由

$$\frac{\pi}{4}D^2 = \frac{\pi}{4}D_2^2 - \frac{\pi}{4}\left(\frac{1}{2}D_2\right)^2 \quad (13)$$

得到新的口径设计参量 $D_2 = 80.829\ 0\text{ mm}$,取 $D_2 = 80\text{ mm}$ 。

另一方面,光学系统的视场比较小,无法保证视场内可以有可以识别的星,参考文献[4]使用了一种经纬仪结构来增加星敏传感器可观测的天空范围,但存在机械结构过于庞大复杂的问题。本光学系统增加了一块平面反射镜来增大可观测的天空范围,具有结构简单,体积小重量轻等优点。平面反射镜相对于光轴的可调节角度设置为 $30^\circ\sim 60^\circ$ 。

视场和 F 数决定了光学设计的难度,本光学系统视场比较小, F 数较大,设计出满足参量指标的光学系统并不困难。而对于一个优质的光学系统,应当有更

廉的成本,更高的透光度,更强的耐腐蚀、耐辐照特性,良好的温度特性,以及宽光谱工作范围等。因此,优化过程中,反射镜选择了球面镜以节约成本,玻璃材料选择了光学性能优秀并且成本低廉的石英玻璃。

4.2 像质评价

星敏传感器光学系统的主要评价参量是弥散斑形状和大小,要求形状为圆形,能量为高斯分布,光斑大小覆盖 3×3 个像素($45\mu\text{m}$)。焦点位置全视场点列图与能量集中度如图 10、11。全视场下,光斑形状均接近圆形,能量分布类似于高斯分布,光斑大小 $15.280\sim 16.395\ \mu\text{m}$,大小均匀,并且 90% 的能量集中在约 $15\ \mu\text{m}$ 内,具有很高的能量集中度。

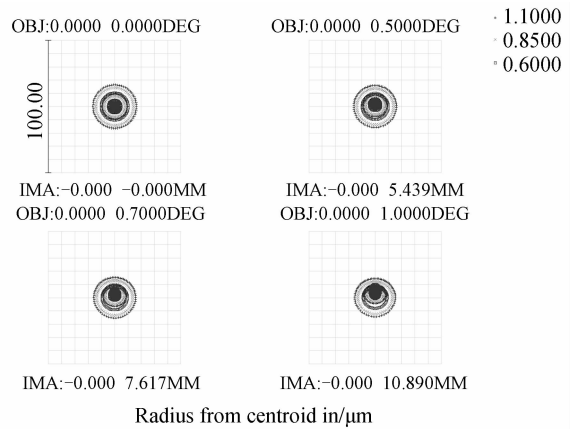


图 10 焦点位置点列图

Fig. 10 Spot diagram at focal position

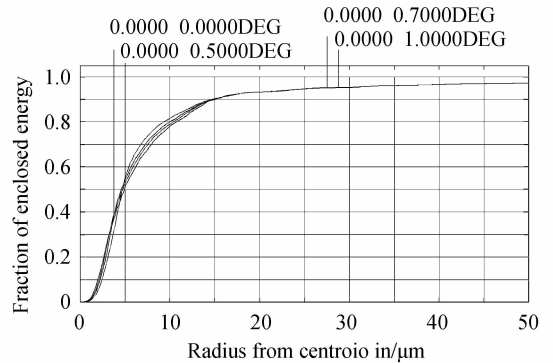


图 11 焦点位置能量集中度

Fig. 11 Geometric encircled energy at focal position

然而,在焦点位置成像质量未能满足光斑大小覆盖 3×3 个像素的要求,需要进行离焦处理。通过观察光斑离焦图,离焦 $-100\ \mu\text{m}$ 是比较合适的,离焦后的点列图与能量集中度如图 12、13。全视场光斑形状仍然为圆形,能量为高斯分布,光斑大小 $21.026\sim 22.358\ \mu\text{m}$,满足覆盖 3×3 个像素的像质要求,并且 90% 的能量集中在约 $20\ \mu\text{m}$ 内,能量集中度很高。

图 14 为离焦后的系统传递函数图,全视场内接近衍射极限;图 15 为系统色差图,在 $600\sim 1\ 100\text{ nm}$ 的宽光谱段范围内,色差小于 $0.8\mu\text{m}$,表明该光学系统有较好

的成像质量.

5 探测能力分析

依照本文参量和结构生产加工了全天时星敏感器原理样机,并进行验证性实验.但在 10 km 高度的机载实验成本比较高,因此,在地面环境下,分析了该星敏感器的昼夜探测能力,为验证性实验提供理论数据参考.

5.1 白昼探测能力分析

由 Modtran 软件计算得到观测高度 $H=0.5$ km, 太阳天顶角 $\mu_1=60^\circ$, 观测天顶角 $\mu_2=60^\circ$, 观测方位角 $\theta=180^\circ$ 时,在 600~1 100 nm 谱段平均大气透过率 $\tau_s=0.5798$, 天空背景辐射光子数为

$$\int_{600}^{1100} \Psi(\lambda) d\lambda = 3.5146 \times 10^{19} \text{ photon}/(\text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{s}) \quad (14)$$

将上述结果带入式(8)计算得到探测信噪比与恒星星等、色温的关系如图 16. 结果表明,在白昼地面环境下在,可以实现对 2.5 等星的探测.

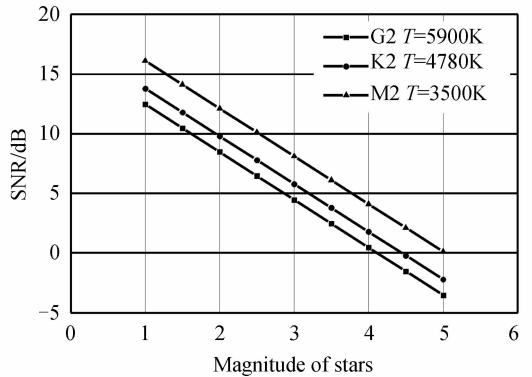


图 16 白天地面环境探测信噪比与恒星星等、色温的关系
Fig. 16 Relationship between SNR and magnitude of stars under different temperature at daytime

5.2 夜间探测能力分析

夜间没有强烈的天空背景辐射,主要噪声来自目标辐射光子的散粒噪声,探测器的暗电流噪声、FPN

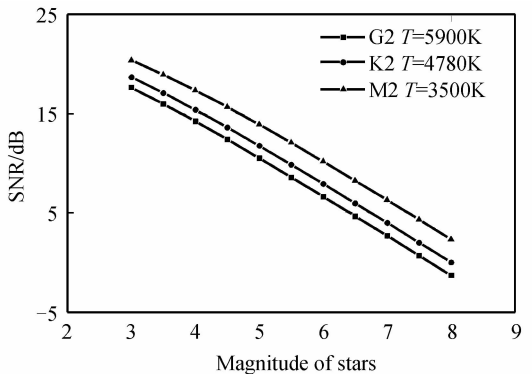


图 17 夜间地面环境探测信噪比与恒星星等、色温的关系
Fig. 17 Relationship between SNR and magnitude of stars under different temperature at night

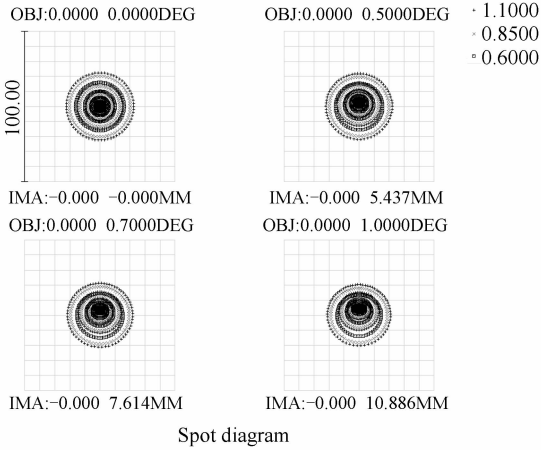


图 12 离焦-100 μm 位置点列图
Fig. 12 Spot diagram at position of -100 μm defocusing

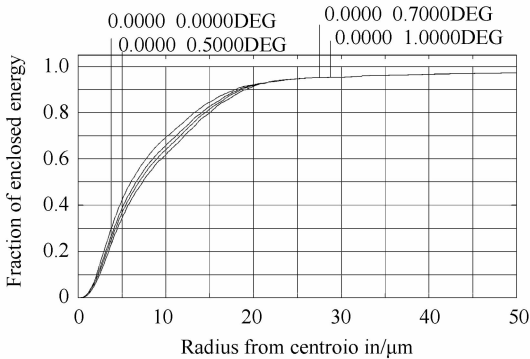


图 13 离焦-100 μm 位置能量集中度
Fig. 13 Geometric encircled energy at position of -100 μm defocusing

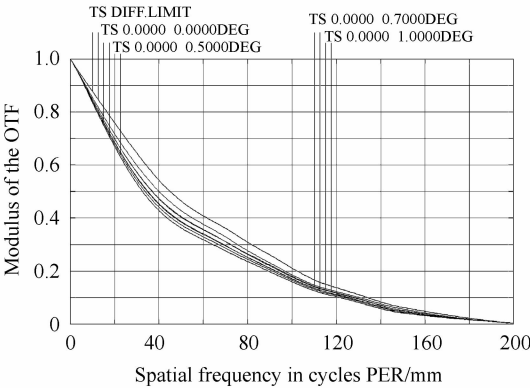


图 14 离焦-100 μm 位置系统传递函数
Fig. 14 MTF at position of -100 μm defocusing

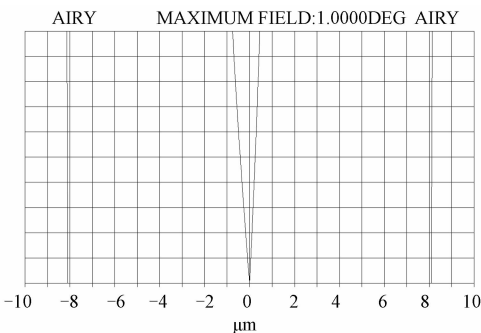


图 15 离焦-100 μm 位置系统色差
Fig. 15 Lateral color at position of -100 μm defocusing

噪声、非均匀性噪声、KTC 噪声、量化噪声以及读出电路的放大噪声等^[6],参考文献[5]给出了上述噪声平方和的典型值为

$$N_{\text{APS}}^2 = 1.3212 \times 10^4 \text{ electrons}^2 \quad (15)$$

另一方面,夜间较暗的天空背景不易导致探测器饱和,可以适当延长积分时间以提高信噪比,取 $t = 200 \text{ ms}$. 相关参量带入式(8),得到夜间探测信噪比与星等、色温的关系如图 17. 结果表明,在夜间地面环境下,可以实现对 6 等星的探测.

6 结论

本文以实现星敏传感器在 10 km 高度对 4.5 等星的全天时观测为目的,计算了恒星目标辐射和天空背景的辐射等效光子数,由信噪比出发选择了全天时星敏传感器光学系统合适的光斑形状与大小、焦距、视场及口径,并以相应参量设计了光学系统. 该光学系统为全球面的光学系统,并且只用了一种石英玻璃材料,成本低廉;使用了平面反射镜代替经纬仪来增大可观测的天空区域,具有结构简单、尺寸小的优点. 成像质量上,全视场弥散斑形状近似高斯型,大小均匀,传递函数接近衍射极限,在 600~1 100 nm 宽光谱范围内色差很小,光学系统成像质量良好.

参考文献

- [1] LIU Lei, ZHANG Lu, ZHENG Xin, *et al.* Current situation and development trends of star sensor technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S): 529-533. 刘磊, 张路, 郑辛, 等. 星敏传感器技术研究现状及发展趋势 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(S): 529-533.
- [2] XU Wei-an. Application of spectral filter device in measuring stellar in daytime [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, **4**(4): 84-88. 徐维安. 光谱滤波装置在白天测星中的应用 [J]. *光学精密工程*, 1996, **4**(4): 84-88.
- [3] CHEN Xiu-hong, WEI He-li, YU Kai, *et al.* Analysis of the contrast of star to sky background during daytime for star sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2008, **3**(1): 28-35. 陈秀红, 魏合理, 余凯, 等. 星敏传感器白天观星的对比度分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(1): 28-35.

- [4] ZHONG Xing, JIA Ji-qiang, JIN Guang, *et al.* Detecting performance and overall design of airborne daytime star sensor for navigation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(12): 2900-2906. 钟兴, 贾继强, 金光, 等. 机载导航白天星敏传感器的探测性能及总体设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(12): 2900-2906.
- [5] DONG Ying, XING Fei, YOU Zheng. Determination of the optical system parameters for a CMOS APS based star sensor [J]. *Journal of Astronautics*, 2004, **25**(6): 663-668. 董瑛, 邢飞, 尤政. 基于 CMOSAPS 的星敏传感器光学系统参量确定 [J]. *宇航学报*, 2004, **25**(6): 663-668.
- [6] FAN Qiao-yun, LI Xiao-juan. Selection of optical-system parameters for an all-day used star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 254-260. 樊巧云, 李小娟. 全天时星敏传感器光学系统设计参量选择 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 254-260.
- [7] HU Qi-xiang. Detection of celestial objects by CCD camera in the daytime and related experiments [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **22**(6): 1-10. 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.
- [8] HANCOCK B, STIRBL R, CUNNINGHAM T, *et al.* CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker/imager position accuracy [C]. Symposium on Integrated Optics. International Society for Optics and Photonics, 2001: 43-53.
- [9] HU Xiao-dong, HU Qiang, LEI Xing, *et al.* Method of star centroid extraction used in daytime star sensors [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, **22**(4): 481-485. 胡晓东, 胡强, 雷兴, 等. 一种用于白天星敏传感器的星点质心提取方法 [J]. *中国惯性技术学报*, 2014, **22**(4): 481-485.
- [10] Electro-optics handbook [M]. Radio Corporation of America, 1974: 86-89.
- [11] WANG Hong-tao, LUO Chang-zhou, WANG Yu, *et al.* An improved centroid algorithm for star point [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(7): 55-59. 王洪涛, 罗长洲, 王渝, 等. 一种改进的星点质心算法 [J]. *光电工程*, 2009, **36**(7): 55-59.
- [12] REN Bing-wen, Jin Guang, Wang Tian-cong, *et al.* Parameter design and test of airborne all-day star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(4): 1003-1010. 任秉文, 金光, 王天聪, 等. 机载全天时星敏传感器参量设计及实验 [J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(4): 1003-1010.
- [13] JU G. Autonomous star sensing, pattern identification, and attitude determination for spacecraft: an analytical and experimental study [M]. 2001.