

大相对孔径宽光谱敏感器光学系统设计

韩龙^{1,2} 付强^{1*} 王超^{1,2} 张雅琳^{1,2} 马万卓^{1,2} 战俊彤^{1,2}

¹长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 星敏感器是一种高精度用于航天姿态测量的仪器,它主要由光学系统、图像传感器电路和控制与数据处理电路三部分构成,其中光学系统是用于成像的核心部分。设计了一个大相对孔径、大视场、宽光谱星敏感器光学系统,采用双高斯对称基本结构改进而成,并借助Zemax软件实现了系统成像质量的优化过程。该系统焦距为60 mm, F 数为1.5,视场角 $2\omega = 20^\circ$,光谱范围0.48~0.68 μm ,筒长比焦距为1.81,结构较紧凑,此系统设计结果可为星敏感器光学系统设计提供参考依据。

关键词 光学设计; 空间激光通信; 星敏感器; 相对孔径; 畸变

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.012202

Design of Optical System of Star Sensor with Wide Spectrum and Lager Relative Aperture

Han Long^{1,2} Fu Qiang¹ Wang Chao^{1,2} Zhang Yalin^{1,2} Ma Wanzhuo^{1,2} Zhan Juntong^{1,2}

¹*Institute of Space Optoelectronic technology, Changchun University of science and technology, Changchun, Jilin 130022, China*

²*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract Star sensor is a kind of instruments which is used in measuring the spacecraft attitude with its high-precision. It mainly consists of three parts: an optical system, an image sensor circuit and the control of data processing circuit, of which the optical system is the core part of in imaging forming system. In this paper, the optical star sensor system of large relative aperture, lager view, broad spectrum is designed. Through the improvements of the basic structure symmetric double Gauss, a kind of optical structures of optimization process with perfect imaging quality is realized on the stage of Zemax software. The system has a compact structure with its properties: 60 mm in focal length, F number of 1.5, field of view of 20° , and the range of working wavelength is 0.48~0.68 μm , and the ratio of length and focal length is 1.81. The structure is compact and it achieves some special requirements aberration. The end result of this system is to provide reference data for star tracker optical system design.

Key words optical design; space laser communication; star sensor; relative aperture; distortion

OCIS codes 220.4830; 080.3620; 120.4820

1 引言

星敏感器是一种用于测量空间恒星或者飞行器姿态的高精密测量设备。它可以将恒星的图像瞬间成像于探测器上,并相应做出精确的姿态调整^[1]。但是目前国内正处于发展阶段,影响的原因也很多,其中光学系统是星敏感器成像重要的部分,它的作用类似于望远物镜,把无穷远处的各恒星在焦平面上成像为各方向均匀的光斑^[2]。本文就此设计了一例大孔径宽光谱敏感器光学系统,同时使其达到轻型化,并保证调制传递函数(MTF)、畸变、能量集中度均已达到要求^[3]。

收稿日期: 2014-07-01; 收到修改稿日期: 2015-07-15; 网络出版日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 韩龙(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学设计及大气传输方面的研究。

E-mail: 1064207031@qq.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,博士,教授,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: hljiang@cust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: strich@sina.com

2 星敏感器光学系统及参数选择

在星敏感器的结构中,光学系统部分属于重要的成像部分,它保证了恒星准确地成像于电荷耦合器件(CCD)上。因此,在校正像差时,对倍率色散、畸变和彗差的要求格外严格,像点中心位置偏移也是考虑的因素,MTF曲线、场曲和弥散圆的范围也必须达到一定的技术指标。所以根据以上的基本像差分析特性,选择双高斯结构作为初始的系统结构,并进一步优化设计。此光学系统的主要参数有焦距、视场角、相对孔径、MTF、光谱范围、像面弥散斑形状及大小等。光学系统对大部分指标都起到至关重要的作用,因此对光学系统必须进行细致研究^[4]。所设计的系统提出的技术指标如下:焦距为60 mm, F 数为1.5,视场角为 20° ,通光口径为40 mm,光谱范围为 $0.48\sim 0.68\ \mu\text{m}$,中心波长为 $0.58\ \mu\text{m}$ 。采用典型的双高斯物镜为对称型结构,同时选择高折射率的玻璃材料,可以更好地降低高级像差,这种结构可有效消减彗差、畸变和垂轴色差这几种垂轴像差^[5],在此基本结构再改进优化得到最终结构。

3 设计结果及像质评价

系统焦距为60 mm, F 数为1.5,全视场 20° ,后截距15.0 mm,系统总长109.34 mm,采用了6组七片双高斯结构,光阑在第3、第4透镜之间,加入一片透镜更好地补偿出瞳距较大所引起的剩余像差。规划后的光路如图1所示。

对于星敏感器光学系统,评价方法有MTF曲线、点列图、能量集中度、畸变、色差特征等,分别选取3个视场角和3个波长,即 0° 、 5° 、 10° 视场,486 nm、587 nm、656 nm波长进行像质评价。

1) MTF曲线评价

MTF曲线直接反应了不同空间频率、不同对比度的传递能力,明显的看出各曲线与衍射极限的接近程度,曲线越高,其成像的质量就越好^[6]。如图2所示,系统MTF曲线在奈奎斯特频率为50 lp/mm时0视场和0.5视场均在0.7以上,全视场较低,但也达到0.6以上,符合星敏感器的设计指标。

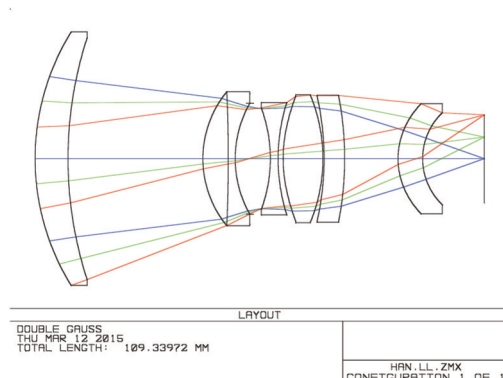


图1 星敏感器光学系统

Fig.1 Optical system of the star sensor

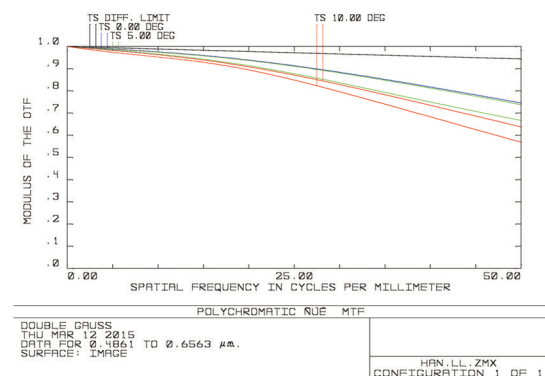


图2 MTF曲线图

Fig.2 Curves of MTF

2) 点列图评价

每条光线代表入射到入瞳小面元上的能量,所以点列图也反映物点所成像的能量分布^[7]。从图3和表1

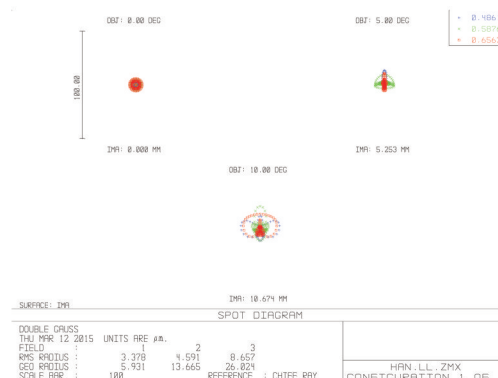


图3 点列图

Fig.3 Spot diagram

看,此光学系统每个视场的弥散斑都较为集中,具有一定的弥散性而且对称性较好,弥散斑基本呈圆形分布,达到技术指标的要求。

表1 点列图几何半径和RMS半径

Table 1 Geometric radius of spot radius and RMS radius

Parameter	Value		
Field of view /($^{\circ}$)	0	5	10
RMS Radius / μm	3.378	4.591	8.657
Radius / μm	5.931	13.665	26.024

3) 能量集中度曲线

能量集中度曲线是描述斑能量分布的情况,从光斑大小看,一般在小于 $30\ \mu\text{m}$ 的半径范围内集中80%以上能量为宜。能量集中度如图4曲线所示,横坐标表示离点列图质心的距离,单位为 μm ,纵坐标表示横坐标数值确定的半径内能量所占的比例,可见能量分布接近高斯正态分布^[8-10]。在直径为 $30\ \mu\text{m}$ 区域内,上述视场的能量集中度均超过90%,达到了星敏感器的要求,为制造公差留有一定的余量。

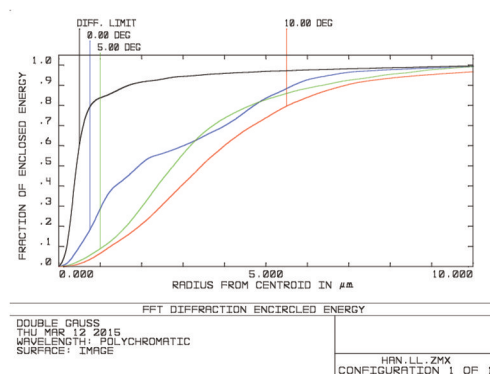


图4 能量集中度曲线

Fig.4 Encircled energy curves

4) 畸变及垂轴色差

畸变对像的形状会产生一定的失真。星敏感器允许畸变在一定的范围内存在。畸变过大,可以通过数字处理校正,但增加软件处理时间,降低数字更新速率,因此理想来说,光学系统的畸变越小越好。设计要求畸变不大于1%,可以满足要求^[11-12]。垂轴色差即倍率色差,可以直观反映出各种波长光斑的偏离程度,本设计小于 $5\ \mu\text{m}$,符合星敏感器的设计要求,如图5,6所示,图5为系统垂轴色差曲线,横坐标为垂轴色差,纵坐标代表视场。

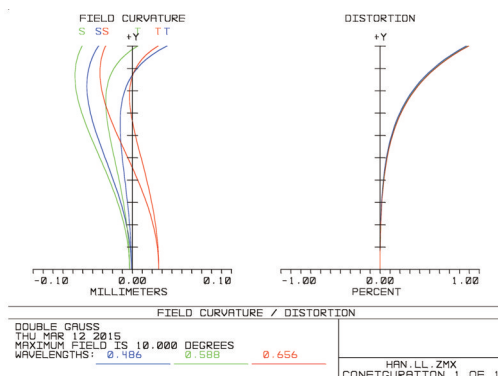


图5 畸变曲线

Fig.5 Distortion curves

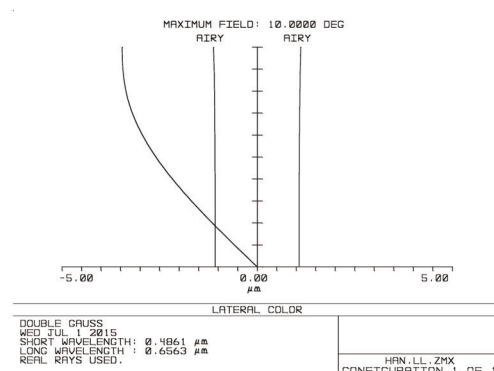


图6 垂轴色差曲线

Fig.6 Lateral aberration curves

4 结 论

根据实际的工作需要,为使星敏感器测量更加精准,设计了一种星敏感器光学系统,该系统具有大相对

孔径、宽光谱、较小的垂轴色差、成像质量较高、能量集中度比较高等优点^[13]。系统结构简单,容易加工,具有实际的应用价值,长度约为 109 mm,后截距大于 10 mm,完全符合简单、轻型化的设计标准。

参考文献

- 1 Li Xuekui, Hao Zhihang, Li Jie, *et al.*. The research on the method of the star's position determination of the star sensor [J]. *Chinese J Electron Devices*, 2004, 27(4): 571-574.
李学夔,郝志航,李杰,等.星敏感器的星点定位方法研究[J].*电子器件*, 2004, 27(4): 571-574.
- 2 He Lingna, Cui Weixin, Pei Yuntian. Design and optimization of the optical system of the star sensor based on CMOS APS[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(11): 24-29.
何丽娜,崔维鑫,裴云天.基于 CMOS APS 的星传感器光学系统结构与优化[J].*光电工程*, 2007, 34(11): 24-29.
- 3 Liu Lei, Zhang Lu, Zheng Xin. Current situation and development trends of star sensor technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(z2): 529-533.
刘垒,张璐,郑辛.星传感器技术研究现状及发展趋势[J].*红外与激光工程*, 2007, 36(z2): 529-533.
- 4 Hao Shengguo, Hao Zhihang. Star image simulation software of star-tracker[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(3): 208-212.
郝胜国,郝志航.星传感器星像模拟软件的研究[J].*光学精密工程*, 2000, 8(3): 208-212.
- 5 Yan Peipei, Fan Xuewu. Design of optical system of very high precision star sensor with small F-number[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 092202.
闫佩佩,樊学武.大相对孔径甚高精度星传感器光学系统设计[J].*激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 092202.
- 6 Yang Haoming, Wang Lingjie, Wen Zhicheng. Design of the star sensor with large aperture and large view[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(2): 153-154.
杨皓明,王灵杰,翁志成.大孔径大视场轻小型星传感器光学系统[J].*光学精密工程*, 2007, 15(2): 153-154.
- 7 Wang Zhijiang. *Optical Technique Handbook*[M]. Beijing: China Machine Press, 1987.
王之江.光学技术手册[M].北京:机械工业出版社,1987.
- 8 Li Shixian. *Optical Design Handbook*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.
李士贤.光学设计手册[M].北京:北京理工大学出版社,1996.
- 9 Chen Qimeng, Zhang Guoyu. Optical system design of high-precision static star simulator with large field of view[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 052202.
陈启梦,张国玉.大视场高精度静态星模拟器的光学系统设计[J].*激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 052202.
- 10 Carl Christian Liebe. Accuracy performance of star trackers-atutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2002, 38(2): 587-589.
- 11 Lu Bo, Liu Weiqi, Zhang Daliang, *et al.*. Optical system design of large entrance pupil catadioptric star sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0716002.
吕博,刘伟奇,张大亮,等.折反射式大入瞳星传感器光学系统设计[J].*中国激光*, 2014, 41(7): 0716002.
- 12 Chen Qimeng, Zhang Guoyu, Sun Xiangyang, *et al.*. Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0716003.
陈启梦,张国玉,孙向阳,等.高精度 LCOS 动态星模拟器的光学系统设计[J].*中国激光*, 2014, 41(7): 0716003.
- 13 Gao Duorui, Zhong LiuJun, Zhao Zhao, *et al.*. Zoom optical system design based on Matlab[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0416002.
高铎瑞,钟刘军,赵昭,等.基于 Matlab 的变焦光学系统设计[J].*中国激光*, 2014, 41(4): 0416002.

栏目编辑:韩峰