

## 高精度背景可控星图模拟器设计

孙高飞<sup>1,2</sup>, 张国玉<sup>1,2</sup>, 刘石<sup>1,2</sup>, 王琪<sup>1,2</sup>, 高玉军<sup>3</sup>, 王凌云<sup>1,2</sup>, 王浩君<sup>1,2</sup>

1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了实现星敏感器的地面标定和精度测试, 研制一套具有可变星图背景的高精度星图模拟器, 要求该系统的单星位置精度优于 $10''$ 。采用高精度静态目标标准源作为星图模拟器的核心器件, 配合一种亮度可控照明系统, 实现星点和背景的同时模拟, 并设计准直光学系统, 使模拟星图与背景成平行光出射, 在星敏感器出瞳处产生星图, 完成背景可控、星点位置精度高的星图模拟。最后, 提出提高星点位置模拟精度的方法, 并利用经纬仪实测星点位置精度, 配合照度计测试背景亮度。从实验结果可知, 该模拟器的星图模拟精度优于 $10''$ , 背景亮度可实现 $2^6$ 倍调整, 可用于高精度星敏感器的地面标定和精度测试。

**关键词:** 星敏感器; 标定; 星模拟器; 精度

**中图分类号:** V416.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2195-05

## Design of high-precision variable star chart background star map simulator

Sun Gaofei<sup>1,2</sup>, Zhang Guoyu<sup>1,2</sup>, Liu Shi<sup>1,2</sup>, Wang Qi<sup>1,2</sup>, Gao Yujun<sup>3</sup>, Wang Lingyun<sup>1,2</sup>, Wang Haojun<sup>1,2</sup>

1. Institute of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to meet the star sensor ground calibration and testing, a set of high-precision variable star chart background star map simulator was designed, the precision angular distance between the star of this system was required better than  $10''$ . Static targets with high precision was made as the standard source core device of star map simulator, matching with a brightness controlled lighting system to fulfill star point and background simulation in the same time, designing collimating optical system that males parallel light outgoing analog star chart and background, a star map was displayed at the pupil of star sensor, to achieve background controllable and high accuracy star chart position simulation. Finally, a method to improve the accuracy of the simulation star point was brought out, star point position accuracy

收稿日期: 2014-11-09; 修订日期: 2014-12-12

作者简介: 孙高飞(1985-), 女, 讲师, 博士, 主要从事航天地面标定及仿真试验方面的研究。Email: sungaofei1985516@163.com

was measured by using theodolite matching with the brightness tested of the background by light meter test. The experiments results show that, the star map simulation accuracy of the simulator is better than  $10''$ , can achieve the background brightness adjustment  $2^6$  times, and be used for high-precision star sensor ground calibration and accuracy testing.

**Key words:** star sensor; calibration; star simulator; precision

## 0 引言

星传感器作为一种具有高测量精度的空间姿态光学传感器,已经在航空航天领域得到了越来越广泛的应用。伴随我国航天技术的迅猛发展,对星传感器的测量对象与测量精度都提出了更多要求。不但要求星传感器能够测试单星位置,更要求其具有恒星背景光的辨识能力。

为了适应星传感器的测试要求,星模拟器作为其地面标定与测试设备,就应该具有星图模拟功能和背景光模拟功能。传统的星模拟器,一般只关注星图模拟精度,并在一定程度上实现了大视场、高精度、高动态,且小型化、轻量化的使用要求<sup>[1]</sup>。但在星图背景模拟方面,尤其是静态星图模拟器,由于技术手段的限制,几乎只用不透光薄膜作为背景,模拟黑色天空,没有模拟可变背景光,也就导致星传感器在地面标定阶段,并没有接受背景光与星点同时存在的条件下,识别星图的测试<sup>[2-5]</sup>。

针对上述问题,文中对具有背景光模拟功能的高精度星图模拟器进行研究。采用高精度静态目标标准源作为星图模拟器的核心器件,配合一种亮度可控照明系统,实现星点和背景的同时模拟,并设计准直光学系统,使模拟星图与背景成平行光出射,在星传感器出瞳处产生星图,完成背景可控、星点位置精度高的星图模拟。将其作为测试基准,对星传感器进行地面功能测试和指标检验。

## 1 模拟器的组成与工作原理

高精度背景可控星图模拟器可以为星传感器提供单星位置模拟精度优于  $10''$  的星图图像,同时,星图背景可以根据使用要求,实现  $2^6$  倍调整。在原有星图模拟器的基础上<sup>[6-8]</sup>,建立如图 1 所示的高精度背景可控星图模拟器的总体结构图。

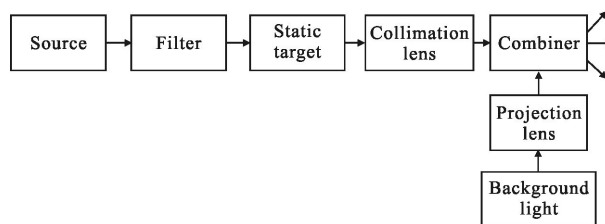


图 1 高精度背景可控星图模拟器总体结构图

Fig.1 Schematic layout of high-precision variable star chart background star map simulator

光源组件发出宽光谱光线,经过滤光片后,形成满足光谱范围要求的光线,照亮位于准直光学系统焦面位置的静态目标标准源。静态目标标准源根据光学系统的像差和机械系统的加工与安装误差,用点蚀的方法,以单星位置值为依据,实现星点的高精度刻划。经过准直光学系统,以平行光的形式将模拟星图投射出去。另一方面,背景光光源组件位于投影光学系统的焦面位置,经过投影光学系统后,投射出与静态目标标准源尺寸大小相同的背景光。经过合束器后,将静态目标与背景光叠加,实现高精度背景可控星图的模拟。

## 2 模拟器设计

为了保证高精度背景可控星图模拟器既能模拟恒星距离,又能实现星图背景光的  $2^6$  倍调整,且具有优于  $10''$  的单星位置模拟精度,利用 Zemax 软件设计高成像质量准直光学系统,使用高精度经纬仪测量各点位置,建立测量模型,通过反复计算得到星点模拟位置。优化设计控制器,控制背景光光源亮度实现  $2^6$  倍调整。

### 2.1 光学系统设计

设计的准直光学系统焦距为 624 mm,视场  $3.1^\circ$ ,波长范围 500~800 nm,出瞳口径为 85 mm,出瞳距为 25 mm,系统总长 700 mm,像高 32 mm,光学

系统光路图如图 2 所示。



图 2 光学系统光路

Fig.2 Layout of optical system

图 3 给出了光学系统畸变曲线图,中心波长为 650 nm。对于模拟器来说,畸变对单星位置模拟精度影响最大,故此系统优化设计畸变优于 0.002%,有利于提高模拟器精度;图 4 给出了倍率色差曲线,从曲线中可以看出,不同波长带来的位置偏差小于 1.1 μm;图 5 给出了系统的点列图,图中各视场处的圆表示艾里斑的大小,像面上所有视场的点列图基本都落在艾里斑内,表明具有接近于衍射理论极限的光学特性;图 6 表示光学系统 MTF,从曲线中可以看出,系统成像良好,可以满足高精度星图模拟器设计要求。

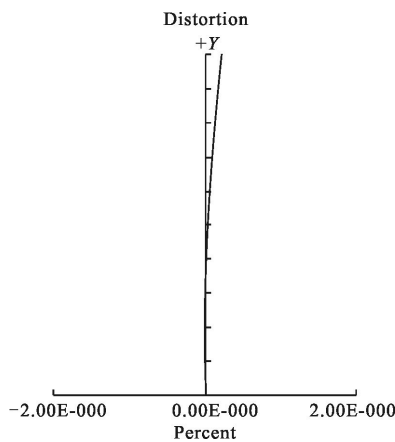


图 3 畸变曲线

Fig.3 Distortion curve

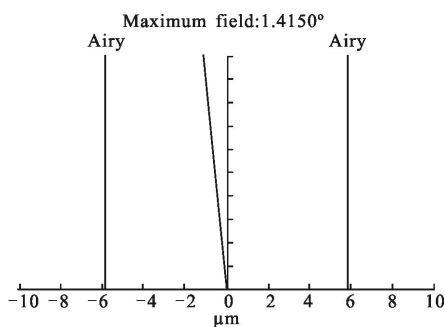


图 4 倍率色差曲线

Fig.4 Lateral chromatism

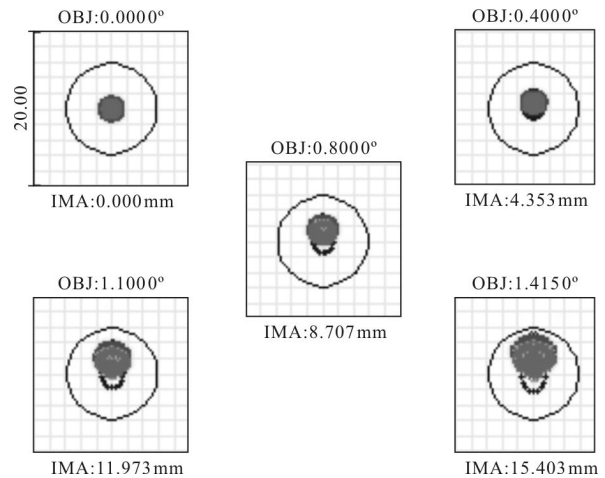


图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

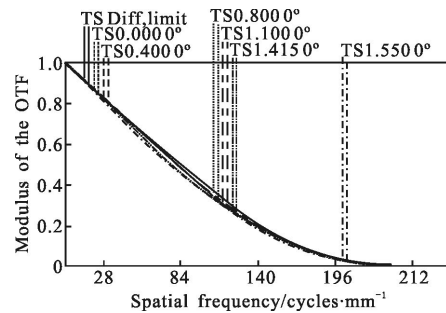


图 6 MTF 曲线

Fig.6 MTF curves

## 2.2 静态目标标准源设计

单星位置误差作为高精度背景可控星图模拟器的主要技术指标,其大小取决于静态目标标准源的设计精度。

静态目标标准源的关键组成部分是星点分划板。星点分划板上刻有多个圆形微孔,每个微孔的位置根据其要模拟的星点自身具有的方位角和高低角计算得出<sup>[9-10]</sup>。为了得到精度优于 10" 的单星位置误差,采用经纬仪实测各点角位置,进而建立测量模型的方式,计算得到各星点的线位置。测量模型建立如下:

$$\begin{cases}
 X_i = \frac{f_0 \tan(\alpha_i - \alpha_0) \sqrt{\tan^2 \phi_i + \frac{\tan^2 \phi_i}{\cos^2 \phi_i}}}{\sqrt{\tan^2(\alpha_i - \alpha_0) + \frac{\tan^2(\beta_i - \beta_0)}{\cos^2(\alpha_i - \alpha_0)}}} \\
 Y_i = \frac{f_0 \tan(\beta_i - \beta_0) \sqrt{\tan^2 \phi_i + \frac{\tan^2 \phi_i}{\cos^2 \phi_i}}}{\cos(\alpha_i - \alpha_0) \sqrt{\tan^2(\alpha_i - \alpha_0) + \frac{\tan^2(\beta_i - \beta_0)}{\cos^2(\alpha_i - \alpha_0)}}}
 \end{cases}$$

式中： $(\alpha_0, \beta_0)$  为经纬仪测试中心星点的方位角和俯仰角； $(\alpha_i, \beta_i)$  为经纬仪测试其他星点的方位角和俯仰角； $(\phi_i, \varphi_i)$  为已知星点在天空中的方位角和高低角； $f_0$  为光学系统设计焦距值。

根据计算模型反复测量计算经纬仪实测的各点角位置，及其计算经过光学系统，受到像差影响后的各点线位置，由此实现高精度静态目标标准的设计。

### 2.3 背景亮度模拟设计

设计背景光源的电路图，通过电流控制实现  $2^6$  倍亮度调整。图 7 所示为光源电路板设计图。

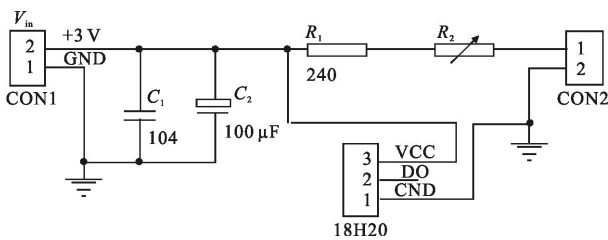


图 7 光源电路板设计图

Fig.7 Layout of power circuit board

在电路中， $C_1$  用来对电源滤波； $C_2$  用来对电源稳压，通过可调电位器  $R_2$  对回路中的电流大小进行调节。输出电流可以通过如下公式计算：

$$I_{out} = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$$

式中： $V_{in}$  为开关电源输入电压； $I_{out}$  为光源所需的可调电流大小。

## 3 星图模拟精度与星图背景测试

高精度背景可控星图模拟器的关键指标有两个：一是星图模拟精度，用单星位置误差值来衡量；二是星图背景调节范围，用最低亮度和最高亮度来衡量。

### 3.1 星图模拟精度

利用莱卡 TM5100A 型经纬仪，配合多维调整台，读取任意两个星点的方位角和俯仰角，通过公式(1)计算单星位置值  $\gamma$ ，与理论单星位置值对比，得到星图模拟精度。

$$\gamma = \arccos[\sin\beta_1 \sin\beta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \cos\beta_1 \cos\beta_2] \quad (1)$$

式中： $(\alpha_1, \beta_1)$  表示任意星点 1 的方位角和俯仰角； $(\alpha_2, \beta_2)$  表示任意星点 2 的方位角和俯仰角。

静态目标标准源设计 15 个星点，图 8 给出一组

经过实测计算后的单星位置精度；图 9 给出一组最低亮度下，经过实测计算后的单星位置精度；图 10 给出一组最高亮度下，经过实测计算后的单星位置精度。

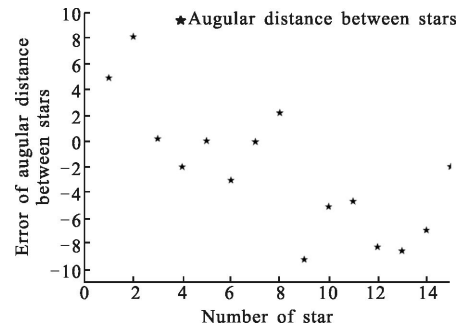


图 8 各点相对中心点的单星位置精度

Fig.8 Testing angular accuracy

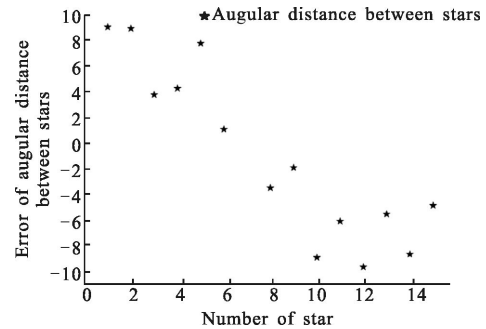


图 9 最低亮度下各点相对中心点的单星位置精度

Fig.9 Testing angular accuracy under the lowest brightness

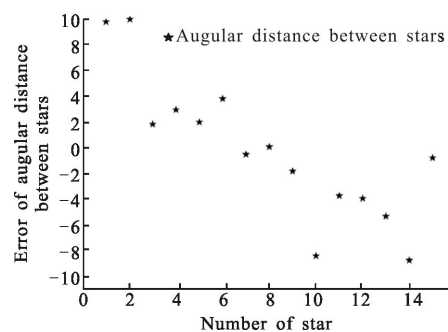


图 10 最高亮度下各点相对中心点的单星位置精度

Fig.10 Testing angular accuracy under the highest brightness

测试结果表明，各点相对中心点的单星位置精度满足单星位置误差  $\leq 10''$  的设计要求。

### 3.2 星图背景亮度测试

利用 KLL-04 型弱光照度计，对星图背景亮度进行测试，其工作范围为  $9.9999 \times 10^{-1} \sim 9.9999 \times 10^{-8} \text{ Lx}$ ，满足所模拟的背景亮度调整范围。实测星图背景最亮值为  $1.53 \times 10^{-4} \text{ Lx}$ ，亮度最暗值为  $4.34 \times 10^{-7} \text{ Lx}$ ，其

结果表明:所设计模拟器可满足背景亮度 $2^6$ 倍模拟。

## 4 结 论

设计出由高精度准直光学系统、静态目标标准源和背景亮度可调式光源组成的高精度背景可控星图模拟器,与传统静态星模拟器相比,增加了星图背景变换功能,所设计的模拟器具有光学系统畸变小、成像质量高的特点。根据星传感器地面测试要求,分别对光学系统、静态目标标准源和背景光源进行了详细设计。经实际测试,所设计的模拟器可达到单星位置精度 $\leq 10''$ ,背景亮度实现 $2^6$ 倍变化的要求,满足了高精度星传感器的标定要求。

## 参考文献:

- [1] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Zheng Ru, et al. Star sensor calibration research and development [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(4): 8–14. (in Chinese)  
孙高飞, 张国玉, 郑茹, 等. 星传感器标定方法的研究现状与发展趋势[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 8–14.
- [2] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Jiang Huilin, et al. Design of very high accuracy star simulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1730–1735. (in Chinese)  
孙高飞, 张国玉, 姜会林, 等. 甚高精度星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1730–1735.
- [3] Herbert De Smetsb, Dieter Cuypersb, André Van calstera, et al. Design, fabrication and evaluation of a high-performance XGA VAN-LCOS microdisplay[J]. *Displays*, 2002, 23: 89–98.
- [4] Wang Chen, Wang Hongqiang, Chen Minghua, et al. Effect of image processor's noise on magnitude sensitivity of star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 858–862. (in Chinese)  
王辰, 王宏强, 陈明华, 等. 成像器噪声对星传感器星等灵敏度的影响[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 858–862.
- [5] Deng Yunlong, Deng Huaqiu, Xu Xiao. Study of broadband and wide-angle polarizing beam splitter design [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(12): 971–973. (in Chinese)  
邓云龙, 邓华秋, 徐晓. 宽角度宽波长偏振分光膜系的设计研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(12): 971–973.
- [6] Yang Zhen, Li Guangyun, He Lei. Measurement methods and precision analysis of optical collimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 282–286. (in Chinese)  
杨振, 李广云, 贺磊. 光学准直测量方法与精度分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 282–286.
- [7] Li Haichao, Hao Shengyong, Zhu Qi. Fast seamless mosaic algorithm for multiple remote sensing images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1381–1386. (in Chinese)  
李海超, 郝胜勇, 朱琦. 多片遥感图像的快速无缝拼接方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1381–1386.
- [8] Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Fan Qiaoyun, et al. Ground function test method of star sensor using simulated sky image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1087–1091. (in Chinese)  
魏新国, 张广军, 樊巧云, 等. 利用仿真星图的星传感器地面功能测试方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1087–1091.
- [9] Wang Yu, Zhang Guoyu, Gao Yujun, et al. Star position correction of dynamic star simulator based on TFT-LCD[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 247–251. (in Chinese)  
王侯, 张国玉, 高玉军, 等. 基于TFT-LCD的动态星模拟器星点位置修正方法[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 247–251.
- [10] Li Xuekui, Tan Haishu, Li Jie. New calibration method of principle distance of star sensors through diagonal distance[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(5): 755–759. (in Chinese)  
李学夔, 谭海曙, 李杰. 利用星角距对星传感器主距进行标定的新方法[J]. 半导体光电, 2009, 30(5): 755–759.