

文章编号 1004-924X(2018)05-1037-09

高精度亚像素显示技术动态天体模拟器

陈启梦^{1,2*}, 张国玉^{1,2}, 张 健¹, 孟 遥³

- (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. 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要:为了解决常规姿态敏感器非在轨标定设备实测结果与设计精度存在偏差、且缺乏模拟目标天体特征功能的实际问题,本文提出一种利用多棱镜结合的 LCOS 光学拼接方式与亚像素显示技术相结合的高精度动态天体模拟器设计方法,实现对星点位置以及目标天体特征的精确模拟。详细论述了传统 LCOS 拼接形式两片光阀对比度低的原因,提出了基于两片 PBS 和两片半反半透镜的拼接架构改进方案;设计了小畸变、复消色差的高成像质量准直光学系统。重点阐述了亚像素显示技术的思想及方法,利用亚像素技术分别对动态星图和目标天体进行仿真并进行了实验测试。结果表明:模拟器的两片 LCOS 显示对比度相同,动态星图的星间角距误差小于 $\pm 6''$ 、星等模拟范围达到连续 8 个等级、星等模拟精度优于 ± 0.3 mV;可以提供目标天体特征模拟图片。高精度亚像素显示技术动态天体模拟器消除了 LCOS 显示对比度差异,达到了姿态敏感器识别特征点的准确性要求,基本可以满足敏感器非在轨精度标定与功能测试的要求。

关键词:光学系统设计;天体模拟;LCOS 拼接对比度;亚像素显示技术

中图分类号:V249.4;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182605.1037

High-precision dynamic celestial simulator with sub-pixel display technology

CHEN Qi-meng^{1,2*}, ZHANG Guo-yu^{1,2}, ZHANG Jian¹, MENG Yao³

- (1. College of Opto-Electronic Engineering,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement
and Control Instruments, Changchun 130022, China;
3. Chang Guang Satellite Technology CO., LTD, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: qmchen1989@163.com

Abstract: For general attitude sensors, there is a deviation between the actual measurement results and design precision of non-on-orbit calibration equipment. In addition, they lack the simulation function for the target celestial body's characteristics. In this work, we combined a polarization splitting prism and semi-reversing semi-transparent prism to complete liquid crystal on silicon (LCOS) optical splicing manner. With sub-pixel display technology, in which many pixels were used to express one feature point, a high-precision dynamic celestial simulator was designed for solving the

收稿日期:2017-08-28;修订日期:2017-09-26.

基金项目:吉林省科技厅优秀青年人才基金资助项目(No. 20180520197JH)

problems mentioned above. First, the reasons for the low contrast ratio of two light valves in the traditional LCOS splicing manner were described in detail. Then, the improvement plan for the splicing structure was put forward. Subsequently, an apochromatic collimation optical system with small distortion and high imaging quality was designed. Furthermore, ideas and methods of sub-pixel display technology were investigated. Finally, sub-pixel technology to conduct simulate a dynamic star map and target celestial body was employed. The results show that the contrast ratio of the LCOS splicing screen of a dynamic celestial body simulator, which can simulate a target celestial body, is high. Moreover, the angular travel error between two stars in the dynamic star map is less than $\pm 6''$. In addition, the stellar magnitude simulation context reaches eight continuous grades. The stellar magnitude simulation precision is better than ± 0.3 mV. The results meet the precision requirements for feature point recognition of an attitude sensor. The high-precision dynamic celestial simulator may meet the basic requirements for ground precision calibration and functional testing of a sensor.

Key words: optical system design; celestial simulation; contrast of LCOS splicing; sub-pixel display technology

1 引 言

近年来,随着空间定位技术的蓬勃发展与深空导航工作的深入开展,为更好地完成随轨道和姿态输入模拟深空光学图像特性的任务,航天器姿态敏感器功能型标定设备不仅要具有精确模拟目标恒星成像位置的功能,还应该具有准确投射目标天体典型特性的功能。

在功能方面,比较成熟的敏感器功能型标定设备是动态星模拟器,该设备通常仅具备动态星图模拟功能,目前只查阅到韩国在 2010 年研制了一套可以模拟简单图像的动态星模拟器。在精度方面,受显示器件发展水平的制约,动态星图的甚高位置精度模拟很难实现^[1-4]。现有的动态星模拟器根据显示器件不同分为 3 大类:源矩阵液晶光阀(TFT-LCD)动态星模拟器、数字微透镜阵列(DMD)动态星模拟器和反射式硅基液晶(Liquid Crystal on Silica, LCOS)动态星模拟器。对比 3 种显示器件的分辨率、像素间距和像素边长可知,LCOS 型动态星模拟器能够达到的理论模拟精度最高。长春理工研制的基于 LCOS 拼接型动态星模拟器的模拟水平如下:星间角距误差为十几角秒、星等模拟精度为 ± 1 mV、星等模拟范

围是 6 个连续等级^[5-8]。然而,这种基于 LCOS 拼接型动态星模拟器的关键技术指标仍难以满足高精度姿态敏感器的标定精度要求,比如几角秒级的星间角距误差、优于 ± 0.5 mV 的星等模拟精度和不少于 8 个连续等级的变化星等。限制动态星模拟器精度提高的一个主要原因是:忽略了 LCOS 拼接架构两片 LCOS 的对比度不一致以及显示器件像元间距对星点显示灰度和显示位置的影响,因此即使光学系统的设计结果在理论上完全满足技术指标要求,实验测试结果也与理论精度存在差距。

本文针对某高精度航天器姿态敏感器精度测试和功能检验的问题,在常规 LCOS 拼接型动态星模拟器的基础上,设计了高精度亚像素显示技术动态天体模拟器。针对动态星图模拟的精度指标,即星间角距误差优于 $10''$ 、星等模拟误差优于 ± 0.5 mV,模拟 $-1\sim 7$ mV 连续 8 个星等以及生成目标天体仿真图像两个设计目标,改进了 LCOS 光学拼接架构并设计了准直光学系统,重点阐述了亚像素图像显示技术,并通过测试实验验证了所设计的天体模拟器精度优于传统的标定设备,能够满足对高精度姿态敏感器的相关参数评估及功能验证的需求。

2 工作原理

高精度动态天体模拟器可以验证敏感器的星点提取精度、动态星图识别性能和目标天体特性捕捉的功能,从而实现姿态敏感器的非在轨检测。模拟器主要由光学系统、多维调整机构以及显示控制系统组成,其工作原理如图 1 所示。多维调整机构定位模拟器光学系统,使其光轴与敏感器的光轴一致且出瞳与敏感器的入瞳重合;姿态与轨道控制动力学仿真计算机通过接口电路向模拟器显示控制系统提供敏感器在惯性坐标系下的实时工作信息,显示控制系统对信号进行处理生成显示命令,传递给模拟器光学系统;模拟器光学系统以光信号形式直接向敏感器光学系统投射准直光束,由此模拟深空中来自无穷远的动态星图或者目标天体。

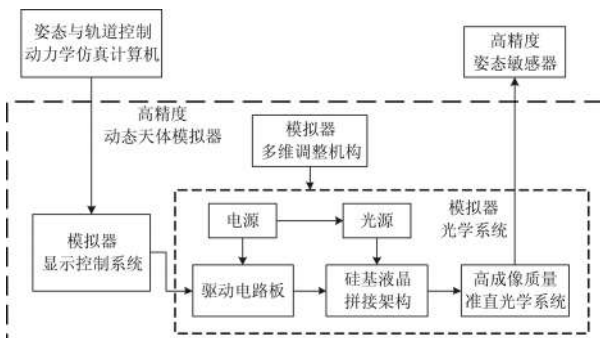


图 1 天体模拟器的工作原理图

Fig. 1 Working principle of celestial simulator

模拟器光学系统包括硅基液晶拼接显示架构、高成像质量准直光学系统和光源三个重要部分。其中,硅基液晶拼接显示架构用于显示图像,安装在准直光学系统的焦平面处,光源照射硅基液晶,硅基液晶上参与当前图像显示的像素亮,其它像素不亮。动态星图上的星点位置以及目标天体的几何轮廓通过亮像素位置控制,星等和天体轮廓内的照度特性用灰度表征。辐照度模拟以 3 种方式实现:即调节光源亮度、多像素作为一个特征点、改变硅基液晶上亮像素的灰度值。针对星等模拟精度优于 ± 0.5 mV 以及 $-1\sim 7$ mV 连续 8 个星等的变化要求,建立的星等显示方案如表 1 所示。

表 1 动态天体模拟器星等模拟显示方案

Tab. 1 Display program of different magnitudes for celestial simulator

星等范围/mV	显示方案
-1~2	3×3 像素阵列显示一颗星点、控制光源在该组别的基准亮度、设定 LCOS 灰度
3~5	2×2 像素阵列显示一颗星点、控制光源在该组别的基准亮度、设定 LCOS 灰度
6~7	1 个像素显示一颗星点、控制光源在该组别的基准亮度、设定 LCOS 灰度

3 光学系统设计

3.1 LCOS 光学拼接架构设计

传统的 LCOS 光学拼接方法是用一块介质膜偏振分光棱镜 (Polarization Beam Splitter, PBS) 作为架构的拼接元件^[9-11],拼接原理如图 2 所示,PBS 为两片 LCOS 提供了一对等光程的共轭面,并且 PBS 透射 P-线偏振光、反射 S-线偏振光的特性正好符合 LCOS 被 S-线偏振光调制的工作特点。光源发出寻常光束,透射过 PBS 的 P-线偏振光先经过 $\lambda/2$ 波片使位相延迟 π ,形成 S-线偏振光调制透射光路中的 LCOS,经 PBS 反射的 S-线偏振光直接调制反射光路中的 LCOS。反射光路中放置一片透过率与 $\lambda/2$ 波片相等的光学平板,用于抵消透射光路中波片对能量的衰减。

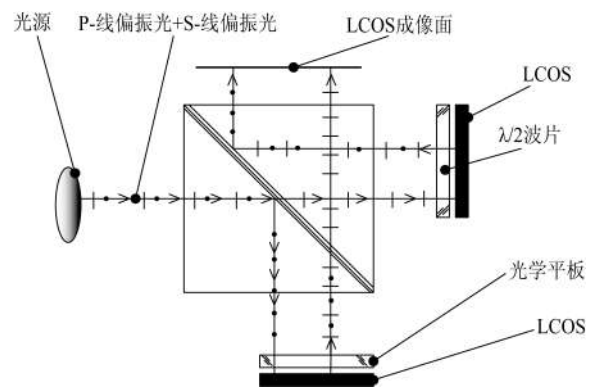


图 2 传统的 LCOS 光学拼接方法

Fig. 2 Principle of traditional LCOS splicing

然而,在传统型 LCOS 拼接动态星模拟器的测试过程中,敏感器 CMOS 相机采集的测试图像如图 3 所示。两片 LCOS 的对比度差异极大,导致敏感器在进行星图识别时会错误地提取信息,大大降低了模拟器的使用价值。

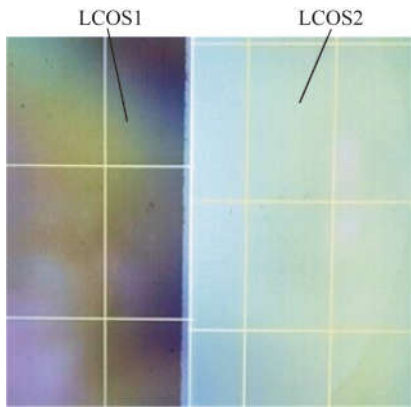


图 3 传统型 LCOS 拼接模拟器的采集图像

Fig. 3 Test images of traditional dynamic simulator based on LCOS splicing

经过研究,用菲涅耳公式可以解释对比度差的原因:对于 PBS 来说,当入射角为临界角时,反射光中只有 S 线偏振光;而透射光不管入射角是否为临界角,始终不是完全 P 线偏振光。因此即使光源以临界角照射 LCOS 拼接架构,投射光路和反射光路中光线的偏振度和能量都不相等,导致两片 LCOS 的对比度不同。为了解决上述问题,改进的 LCOS 拼接架构采用两块半反半透棱镜和两块 PBS 作为拼接元件,利用多棱镜结合的方法有效降低了两片 LCOS 的显示对比度偏差,改进的架构如图 4 所示。这种方法可以同时满足入射角以接近临界角的状态入射和利用反射光调制 LCOS 的工作要求,使透射光路和反射光路中的工作光线完全一致,保证两片 LCOS 接收到的能量及显示对比度相同。

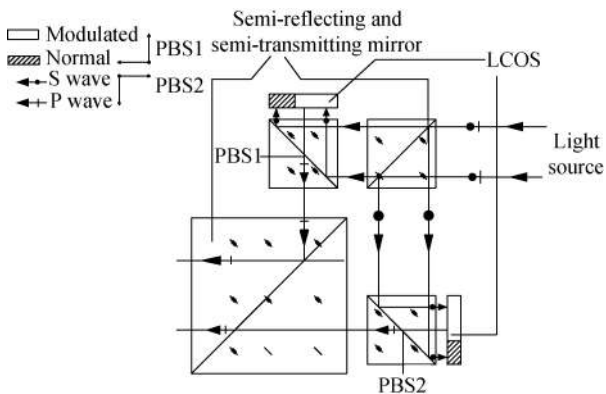


图 4 改进的 LCOS 拼接架构

Fig. 4 Principle of improved LCOS splicing

3.2 准直光学系统设计结果

为了使动态天体模拟器的模拟精度达到技术要求,准直光学系统必需畸变小和复消色差。根据传感器对测试设备的显示视场不小于 $\Phi 11^\circ$ 、出瞳距离 150 mm、以及优于 $7''$ 的模拟精度等要求,结合 LCOS 拼接像面 $15.36 \text{ mm} \times 15.36 \text{ mm}$ 的实际显示尺寸,确定模拟器准直光学系统的焦距为 137 mm,光谱波段为 $500 \sim 800 \mu\text{m}$,中心波长选定为 $650 \mu\text{m}$ 。

设计的准直光学系统光路图如图 5 所示,系统的有效视场为 $\Phi 13^\circ$,总长为 315 mm,后截距为 24.5 mm。

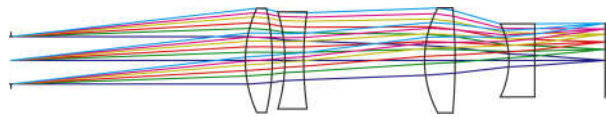
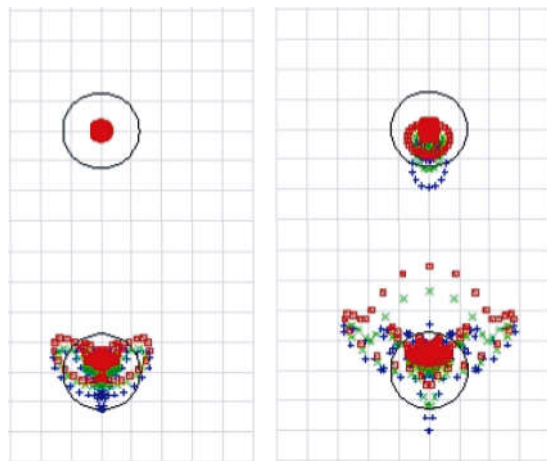


图 5 设计的准直光学系统光路图

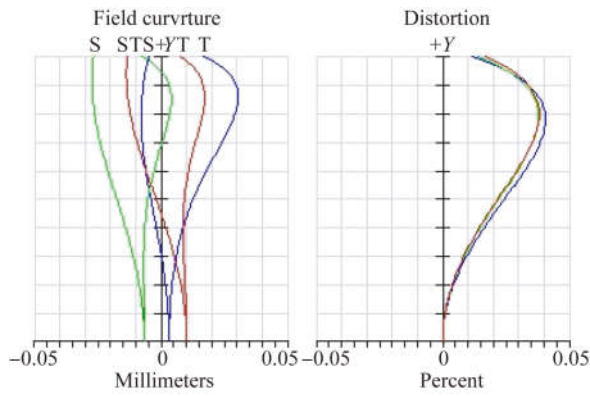
Fig. 5 Layout of collimating optical system

根据影响模拟星点位置、天体几何轮廓的主要因素,评价准直光学系统的设计结果。由图 6(a)可知,系统均方根半径小于 $3 \mu\text{m}$,能量比较集中,且直径小于 LCOS 单像素边长 $8 \mu\text{m}$ (对角线为 $11.3 \mu\text{m}$)。图 6(b)为系统的场曲和畸变,全视场相对畸变不超过 0.05% ,即单像素显示特征点的最大位移不超 0.5 pixel 。图 6(c)表示系统的垂轴色差,在最大视场是最大且不超过艾里斑,利于姿态传感器采集特征点。图 6(d)是系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线,当截止频率 $\nu = 60 \text{ lp/mm}$ 时, $\text{MTF} > 0.7$,符合系统成像质量的整体评价要求。



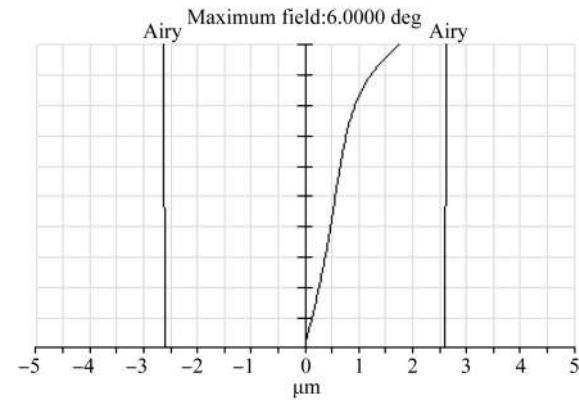
(a)点列图

(a)Spot diagram



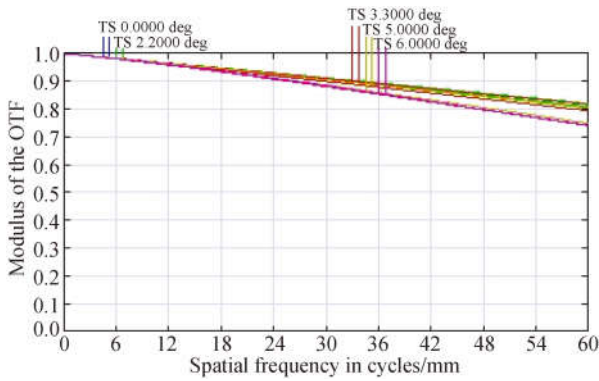
(b)场曲和畸变

(b)Field curvature and distortion



(c)垂轴色差

(c)Lateral color aberration



(d)调制传递函数

(d)MTF

图 6 准直光学系统的像差曲线

Fig. 6 Aberrations of collimating optical system

4 亚像素显示技术

4.1 亚像素显示方法

对于动态天体模拟器的显示图像,无论是动态星图还是天体几何轮廓,姿态敏感器都提取星点或者轮廓上特征点的能量中心作为理论位置进

行解算和处理,由于 LCOS 存在像素间隔,通过准直光学系统的出射光线的能量中心偏离理想位置,使敏感器的地面标定精度无法达到设计值。因此,考虑用 4 个以上像素阵列的能量中心位置代替一个亮点即亚像素显示技术,来补偿并提高模拟器的实际模拟精度指标。

星点亚像素显示技术利用能量中心位置反推亮像素及其周围显示区域各像素的灰度值,通过控制这些像素来表示 LCOS 上要显示的像素阵列能量中心,从而将星点位置以及天体几何轮廓的模拟精度提高到像素的十分位。

为了达到姿态敏感器对天体模拟器 0.1 pixel 的精度需求,用来模拟星点或天体几何轮廓上特征点的光斑亮度分布函数选用高斯分布,即:

$$p = A \exp\left\{-\frac{r^2}{b}\right\}, \quad (1)$$

式中: $r^2 = (x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2$; (x_0, y_0) 为星点或天体几何轮廓上特征点的理论坐标位置; (x_p, y_p) 为星点或天体几何轮廓上特征点在 LCOS 上显示的像素数坐标; A 用来描述高斯分布的离散程度。

对高斯分布函数两边取对数,可以得到:

$$\ln p = \ln A + \left[-\frac{1}{B}\right] r^2. \quad (2)$$

令 $y = \ln p$, $x = r^2$, $a = -\frac{1}{B}$, $b = \ln A$, 将式(2)表达为线性函数 $y = ax + b$ 的形式。取 LCOS 显示区域内的所有像素点,利用最小二乘法进行拟合,可以计算出拟合系数 a, b 的表达式为:

$$\begin{cases} a = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ b = \frac{n\sum x_i^2 y_i - \sum x_i \sum y_i x_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \end{cases}, \quad (3)$$

其中 $i=1, 2, 3, \dots, n$, 代表 LCOS 上的像素序号。当用像素阵列显示星图上星点或天体几何轮廓上特征点时,能量中心的位置根据角距关系和显示星图上星点或天体几何轮廓上特征点的像素阵列像素数计算得出。通过求解方程组(3),得到用像素阵列表达的星图上星点或天体几何轮廓上特征点在 LCOS 光阀上的显示要求。

4.2 亚像素显示技术模拟结果

4.2.1 星点显示模拟

由于用单像素显示 6~7 mV, 因此,为了满

足表 1 中星等模拟的显示方案要求,在实际操作中,扩大星点显示像素阵列来完成亚像素技术。模拟 $-1\sim 2\text{ mV}$ 要用 3×3 个像素阵列,情况最复杂,故以模拟一个 2 mV 星点为例进行说明。

将像素阵列从 3×3 扩大到 6×6 显示一个 2 mV 的星点,按照位置模拟要求,该星点的能量中心在横、纵方向上分别移动 0.3 和 0.5 pixel ,图 7 所示为运用亚像素显示技术得到的模拟效果图。被模拟星点能量中心坐标的偏移量如下:横向坐标移动了 $0.300\ 012\text{ pixel}$ 、纵向坐标移动了 $0.501\ 005\text{ pixel}$,保留小数点后一位有效数字,偏差即为 0.1 pixel ,说明对一个 2 mV 星点的位置模拟满足精度要求。

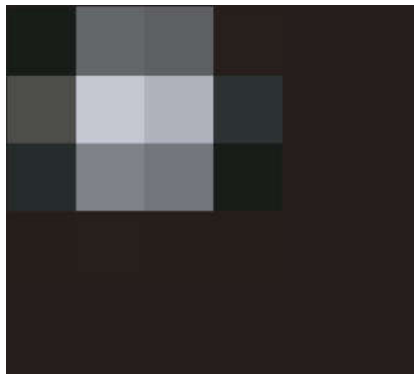
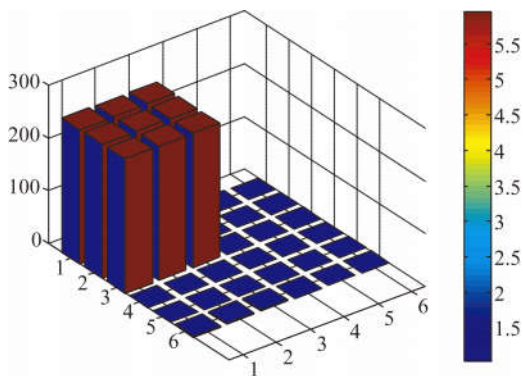


图 7 某 2 mV 星点模拟效果图

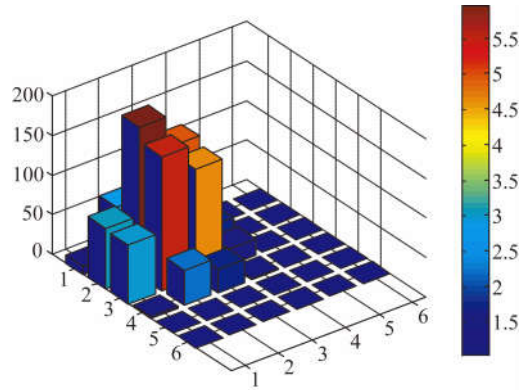
Fig.7 Simulation result of a 2 mV star point

还可以从星点能量分布角度验证星点亚像素显示技术的可行性。图 8 所示为运用亚像素显示技术前、后星点的三维能量图。采用星点亚像素显示技术后,被模拟星点的实际能量分布得到改善,进一步提高了所设计天体模拟器的位置精度。



(a)采用亚像素技术前星点的能量分布

(a)Before using sub-pixel display technology



(b)采用亚像素技术后星点的能量分布

(b)After using sub-pixel display technology

图 8 运用亚像素显示技术前、后星点的能量分布图

Fig.8 Energy distribution of a star point before and after using sub-pixel display technology

4.2.2 目标天体显示模拟

以一个目标天体为例,运用亚像素显示技术对它进行仿真显示。需要特别注意的是在 LCOS 拼接屏上显示时,图形下半部分是经过棱镜后的反射像,输出时要对下半部分图像进行镜像处理。LCOS 光学拼接时有 240 个背景灰度为 0 的遮挡像素,所以下半部图片显示时还要向下位移 240 个像素,最终模拟的目标天体经过准直光学系统得到的实际投射图像如图 9 所示。

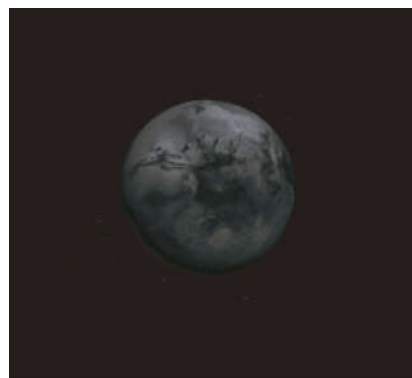


图 9 目标天体模拟效果图

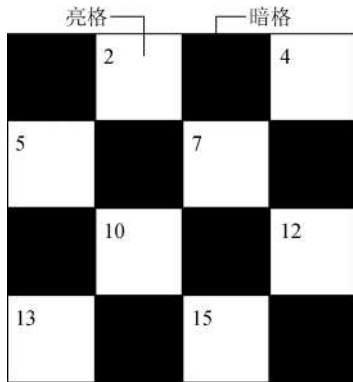
Fig.9 Simulation result of target celestial body

5 验证实验及结果

为了验证改进的 LCOS 拼接架构对对比度的改善以及亚像素显示技术对星点位置模拟精度的补偿与提高,分别对动态天体模拟器进行了对比度和精度测试实验。

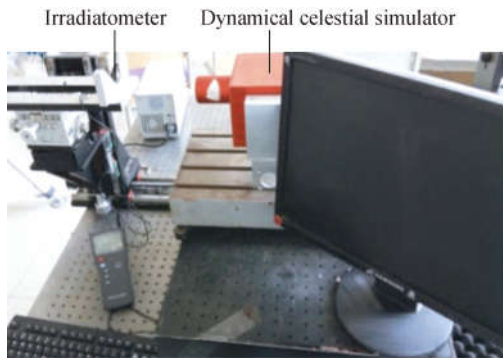
5.1 对比度测试及结果

这里通过测量两片光阀的辐照度判定 LCOS 拼接显示的对比度,测试方法如下:在图像显示区生成亮暗相间的格子,如图 10(a)所示,用辐照计测量模拟器出瞳位置两片 LCOS 上亮格子和暗格子的辐照度,测试过程如图 10(b)所示。



(a)对比度测试网格

(a) Test grid of contrast



(b)对比度测试过程

(b) Test process of contrast

图 10 对比度测试网格及测试过程

Fig. 10 Test grid and test process of contrast

表 2 改进的 LCOS 拼接架构对比度测试结果

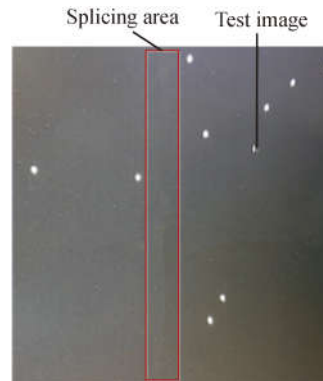
Tab. 2 Test results of contrast of improved LCOS splicing structure (mW · cm⁻²)

序号	反射光路 LCOS		透射光路 LCOS	
	亮格	暗格	亮格	暗格
1	3.492	0.701	3.479	0.673
2	3.246	0.599	3.246	0.593
3	3.227	0.617	3.237	0.622
4	3.309	0.655	3.293	0.667
5	3.335	0.683	3.321	0.691
均值	3.322	0.651	3.316	0.649

对反射、透射两路光束重复测试 5 组辐照度并求取平均值,测试数据如表 2 所示。用两路光的暗格辐照度平均值除以亮格辐照度平均值,结果表明两片 LCOS 的暗、亮格辐照度比值均为 0.196,对比度一致,对敏感器识别特征点不会造成影响。

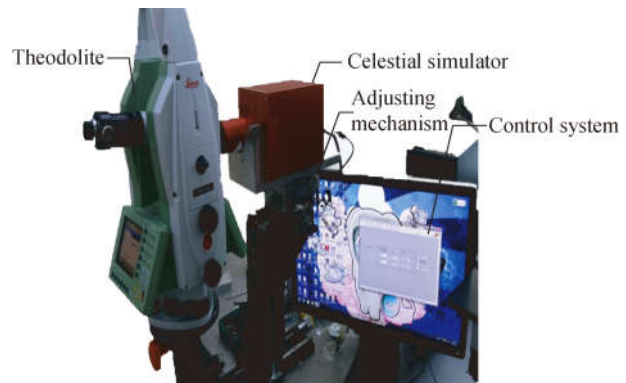
5.2 精度测试及结果

实验室环境下,对模拟器的精度测试是在 LCOS 显示屏上生成一幅动态星图,如图 11(a)所示;用经纬仪读取特征点的角度并计算星间角距误差,用微光照度计测量特征点的照度再判断星等等级,测试过程如图 11(b)所示。



(a)精度测试星图

(a) Star map for accuracy test



(b)精度测试过程

(b) Process for accuracy test

图 11 精度测试星图及测试过程

Fig. 11 Star map and process of accuracy test

模拟器的星间角距测试结果如图 12 所示,所有星点间的角距误差不大于±6"。星等测试数据和误差如表 3 所示,星等模拟精度全部优于±0.3 mV,满足设计指标要求。

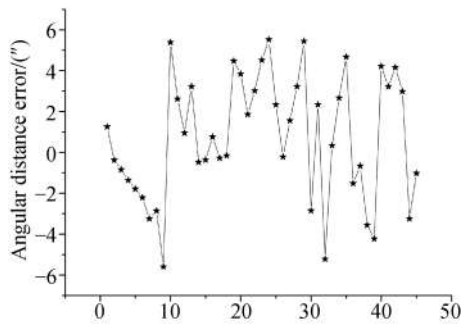


图 12 星间角距误差测试结果

Fig. 12 Test result of angular distance error between stars

表 3 星等测试结果及模拟精度

Tab. 3 Test results and accuracy of magnitudes

星等等级	实测	理论	星等测试精度/mV
	照度值/lx	照度值/lx	
-1	0.000 613 00	0.000 667 00	0.2
3	0.000 016 90	0.000 016 70	-0.1
2	0.000 043 20	0.000 042 10	-0.1
7	0.000 000 29	0.000 000 42	0.3
3	0.000 015 10	0.000 016 70	0.1
5	0.000 002 73	0.000 002 65	-0.1
1	0.000 113 00	0.000 106 00	-0.2
6	0.000 000 77	0.000 001 06	0.3
4	0.000 006 07	0.000 006 67	0.2
0	0.000 241 00	0.000 265 00	0.1
1	0.000 089 00	0.000 106 00	0.2

参考文献:

- [1] 孟遥, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于硅基液晶拼接的高对比度动态星模拟器光学系统 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(3):511-520.
MENG Y, ZHANG G Y, SUN G F, et al.. Optical system of high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3):511-520. (in Chinese)
- [2] 张晓娟, 张国玉, 孙高飞, 等. 大视场 LCOS 拼接星模拟器标定方法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11):2996-3001.
ZHANG X J, ZHANG G Y, SUN G F, et al.. Calibration of star simulator based on LCOS splicing technology with wide-field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11):2996-3001. (in Chinese)
- [3] 王凌云, 王博, 张国玉, 等. 高精度高动态星模拟器研究 [J]. 空间科学学报, 2015, 35(3):356-361.
WANG L Y, WANG B, ZHANG G Y, et al.. Study on high precise and high dynamic star simulator [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2015, 35(3):356-361. (in Chinese)
- [4] 刘金国, 李杰, 郝志航. APS 星敏器探测灵敏度研究 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(4):553-557.
LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection sensitivity of APS star tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):553-557. (in Chinese)
- [5] 巩岩, 胡宜宁, 赵阳. 基于数字光处理技术的小型星模拟器设计 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(11):1698-1703.
GONG Y, HU Y N, ZHAO Y. Design of a mini star simulator based on digital optical processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1698-1703. (in Chinese)
- [6] 陈赞, 郑循江, 刘宗明, 等. 星敏器遮光罩出口杂光的辐照度测试 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(6):1464-1471.
CHEN Y, ZHENG X J, LIU Z M, et al.. Testing of stray light irradiance at exit of lens hood for star sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6):1464-1471. (in Chinese)
- [7] 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,

6 结论

本文针对高精度姿态传感器地面测试系统精度模拟水平高、图像模拟内容多元化的实际应用需求, 设计了高精度动态天体模拟器。分析了常规 LCOS 拼接架构对比度较低的主要原因, 拆分拼接元件改进架构结构, 有效降低了 LCOS 拼接显示的对对比度偏差, 提高了传感器识别所模拟特征点的准确性; 设计了高成像质量的准直光学系统, 从理论上保证模拟器的核心技术参数符合指标要求。针对显示器件像素离散造成测试结果偏离设计值的实际问题, 采用亚像素显示技术使特征点以能量中心出射, 补偿了显示器件对实际模拟精度的影响。最后通过实验验证了设计的可行性, 实验结果表明: 两片 LCOS 的显示对比度很小, 精度测试结果接近设计理论值, 星间角距误差小于 $\pm 6''$ 、星等模拟精度优于 $\pm 0.3 \text{ mV}$, 且模拟器具备模拟目标天体的功能, 可以完成传感器非在轨检测任务。

- 41(7):0716003.
CHEN Q M, ZHANG G Y, SUN X Y, *et al.*. Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7):0716003. (in Chinese)
- [8] 孙向阳, 张国玉, 王大轶, 等. 大尺寸高精度星模拟器光机结构设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(9):2121-2126.
SUN X Y, ZHANG G Y, WANG D Y, *et al.*. Opto-mechanical structure design of large-scale and high precision star simulator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(9):2121-2126. (in Chinese)
- [9] 赵晨光, 谭久彬, 刘俭, 等. 用于天文导航设备检测的星模拟装置 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6):1326-1332.
ZHAO CH G, TAN J B, LIU J, *et al.*. Star simulator for testing celestial navigation equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1326-1332. (in Chinese)
- [10] 孟遥, 张国玉, 刘石, 等. 基于 LCOS 拼接的高精度高动态星模拟器设计 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2016, 46(2):621-626.
MENG Y, ZHANG G Y, LIU SH, *et al.*. Design of high-precision and high-dynamics star simulators based on LCOS splicing [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2016, 46(2):621-626. (in Chinese)
- [11] 李葆华, 刘国良, 刘睿, 等. 天文导航中的星敏感器技术 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7) 1615-1620.
LI B H, LIU G L, LIU R, *et al.*. Key techniques of star sensors for celestial navigation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7) 1615-1620. (in Chinese)

作者简介:



陈启梦(1989—),女,吉林长春人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事航天器地面标定与检测方面的研究。E-mail: qmchen1989@163.com



张国玉(1962—),男,吉林松原人,博士,教授,博士生导师,现为吉林省光电测控仪器工程技术研究中心主任,航天地面模拟试验与测试技术研究所所长,主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究。E-mail: zhguoyu@163.com