

## 光纤耦合技术的星图模拟技术研究

段 洁<sup>1</sup>, 孙向阳<sup>2</sup>, 安志勇<sup>1</sup>

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对深空导航敏感器的地面标定对多星等、高星等的技术要求, 提出一种基于光纤耦合技术的星图模拟新方法, 创新性的运用了 OLED 面光源和光纤耦合机构配合高精靶标的技术来模拟星图。结合所设计星图模拟器指标, 重点对光纤面光源耦合和 OLED 面光源亮度双调制技术进行了深入研究, 分析了光纤面光源的耦合技术的关键条件, 为实现较高的光耦合效率, 选择数值孔径为 0.6 的大芯径聚合物光纤(POF)与自聚焦透镜组成耦合机构, 设计结果表明聚光斑 $\approx 100 \mu\text{m}$ , 纤芯轴向光能量利用率大于 80%; 所研究的面光源双调制技术在星等模拟中的设计结果说明: 该技术可解决单一的电气灰度调制或空间灰度调制无法实现 5~10 等星精确模拟的技术难题。

**关键词:** 星图模拟器; 光耦合; 光纤; 星等

**中图分类号:** TH74    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3592-05

## Star charts simulation based on fiber coupling technology

Duan Jie<sup>1</sup>, Sun Xiangyang<sup>2</sup>, An Zhiyong<sup>1</sup>

- (1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to meet the demands of multi magnitude, high magnitude in calibration on the ground for deep space navigation sensor, a new simulation method using of the OLED and optical fiber coupling mechanism combining with high precision target to simulate the stars innovatively, was given based on optical fiber coupling technique. The light coupling technology using surface light source and fiber and the double modulation technology of OLED were researched deeply after analyzing of designed star charts simulator parameters. To achieve high coupling efficiency, analyzing the key condition of coupling, the coupling mechanism was decided to select the big core diameter POF(NA=0.6) and the self focusing lens. Design result shows that gathering spot diameter  $\approx 100 \mu\text{m}$ , light energy utilization rate of fiber core  $>80\%$ . The design results of magnitude simulation by the double modulation technology of surface light source shows that the technical problem of accurately simulation of 5-10 magnitude can be solved, but this can not realize only using the single electrical gray modulation or spatial gray scale modulation.

**Key words:** star charts simulator; optical coupling; fiber; magnitude

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 吉林省科技发展计划重大专项(20126014)

作者简介: 段洁(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要从事航天器地面模拟技术与光电检测技术方面的研究。Email: dj0321@126.com

通讯作者: 孙向阳(1978-), 男, 讲师, 博士, 主要从事机器视觉标定与光电检测技术方面的研究。Email: sxy0321@126.com

## 0 引言

为确认光学导航敏感器的在轨运行精度,在其装配飞行器之前需进行地面标定,主要任务是完成对包括星间角距精度和星图星等(星点亮度)精度的标定。从相关资料了解到,目前已有的标定方法对星等精度的标定水平相对较低,基本在 5 等星左右,且标定范围窄,无法满足目前国内深空导航敏感器标定所需的高星等标定要求。为此文中通过分析已有标定技术在星等标定中的缺点,给出一种新的高精度星图星等模拟方法,可实现 5~10 等星的精确模拟,并创新性的提出光纤与 OLED 面光源耦合技术与 OLED 面光源亮度的双调制原理<sup>[1-2]</sup>。

## 1 高精度星图模拟器工作原理与设计思想

### 1.1 星图模拟器工作原理

文中所设计的星图模拟器由高精度靶标和星图模拟器照明系统组成,后者包括光耦合机构和 OLED 面光源,如图 1 所示。OLED 面阵光源通过光耦合机构的自聚焦透镜,将亮光耦合到每条光纤,并最终将亮度可调的光纤端面亮斑输出到位于平行光管焦面处的高精度靶标,完成星图模拟。一个星点由一路光耦合完成,所设计星图模拟器光纤耦合机构共有 121 路光耦合,具体结构局部放大后,如图 1(b)所示。

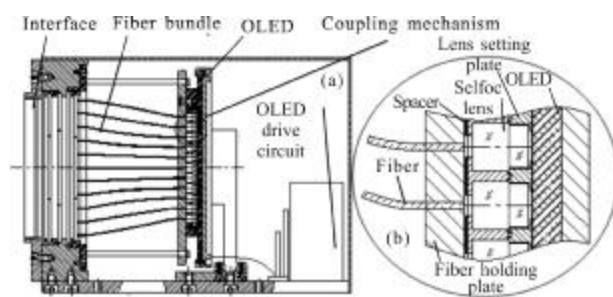


图 1 星图模拟器总体结构

Fig.1 Star charts simulator structure

### 1.2 高精度星图模拟器设计思想

常规的星图模拟方法多以 LED 背光源配套静态星点板或采用液晶光阀控制星点亮度,其基本都无法实现高星等(常高于 8 等星)的精确模拟,于是文中提出以 OLED 面阵光源与光纤耦合机构配合精密靶标模拟星图的新方法。光纤发光端面为圆形且

满足高斯分布,因此采用质心法计算星点位置的精度远高于应用液晶光阀中的像素点模拟的矩形星点;采用 OLED 面光源则是因为其具有单个像素点亮度可控,在较低亮度时具有远高于 LCD 背光板的稳定性;同时 OLED 面阵光源具有比 LCD 更高的对比度<sup>[3-5]</sup>。

## 2 基于光纤耦合技术的星图模拟技术

文中对星图模拟方法的研究是针对标定某深空导航敏感器的技术指标展开的,主要有:星图星点数 $\geq 100$ ,星点尺寸 $\geq 80 \mu\text{m}$ ,星点星等范围 5~10 等,星间角距精度文中不再进行讨论。由给出的系统方案看出,其中核心技术设计到两个方面:光纤与面光源的耦合技术和 OLED 面光源的亮度控制技术。

### 2.1 光纤与面光源耦合技术

耦合机构光纤的选择需考虑两个方面:(1) 高精密切标上所刻模拟星点圆孔的大小以及透镜汇聚光斑大小与光纤纤芯大小的匹配;(2) 耦合透镜汇聚光斑的发散角大小与光纤入射角的匹配。

#### 2.1.1 光纤与光源的选择

##### (1) 光纤的选择

当前已有的光纤中聚合物光纤(POF)在可见光波段透过率高,且可做成大芯径( $\phi=1 \text{ mm}$ ),较大的数值孔径( $\text{NA} \geq 0.5$ )加上其柔软性好的优点,可满足所研究星图模拟的要求<sup>[6]</sup>。根据指标要求选择光纤参数:纤芯直径  $\Phi 100 \mu\text{m}$ ,  $\text{NA}=0.6$  的多模光纤,其孔径角  $2\theta_c \approx 72^\circ$ 。

##### (2) 耦合光源的选择与参数计算

考虑到从耦合机构的机械结构尺寸、模拟星点亮度的对比度大小,同时又因发光二极管的低耦合效率,文中选择了 OLED 面光源与光纤的耦合方式,其中 OLED 面光源参数由模拟星等亮度的对比度、最低发光亮度和星图尺寸确定。实现 5~10 等星模拟,星点亮度的对比度  $M$  必须满足公式(1)的计算结果,即

$$M = \frac{E_5}{E_{12}} = \frac{E_0}{(2.512)^5} / \frac{E_0}{(2.512)^{10}} = (2.512)^5 \approx 100 \quad (1)$$

已知零等星的亮度  $E_0=2.70 \times 10^2 \text{ cd/m}^2$ ,则 5 等星的亮度为:

$$E_5 = E_0 / (2.512)^5 = E_0 / 100 = 2.70 \text{ cd/m}^2 \quad (2)$$

要模拟所需的星等,OLED 光源发射光经光耦

合机构和星模拟器准直光学系统后，到达所标定敏感器入瞳处光的亮度至少要大于公式(2)所求结果，因此需对整个标定系统的光能量进行估算，表 1 给出了星图发光亮度的影响因素和光能量通过效率。

表 1 星图光能量通过率的影响因素

Tab.1 Influence factors of energy through rate

Influencing factor	Light energy through rate
Collimating optical system	$\eta_1 = (\eta_{lens})^m = (95\%)^m$
Fiber intrinsic loss	$\eta_{bent} = 95\%$
	$\eta_{lens\ reflecting} = 95\%$
Self focusing lens	$\eta_{fl} = 80\%$ (in Fig.4)
	$\eta_{lateral\ deviation} = 98\%$
Docking error	$\eta_{vertical\ deviation} = 98\%$
	$\eta_{angular\ deviation} = 98\%$
OLED effective brightness	$\eta_{OLED} = 15\%$

Notice: m is lens number

表中  $\eta_{OLED}$  考虑面光源的发散角，OLED 玻璃折射率与有机发光材料不匹配等因素后，平行光占 OLED 整体发光能量的比例。结合 5 等星的亮度值就可推导出所需面光源的最低亮度参数，而 OLED 背光源有效尺寸由耦合透镜组的确定。

2.1.2 透镜选择与设计

光源与光纤的间接耦合多采用透镜耦合，传统透镜在聚焦机构中的结构尺寸较大，聚焦光斑较大，无法实现端面聚焦，而自聚焦透镜在聚焦时克服了这些缺点，因此其常用于光束聚焦系统中，由球差理论可得自聚焦透镜聚焦点光斑的尺寸，由公式(3)给出：

$$R = \frac{\pi}{2} \frac{1}{N_0^2} f(NA) \tag{3}$$

式中：R 为焦点处光斑的半径；NA 为数值孔径；f 为焦距； $N_0$  为轴上的折射率，得到 R 值后，与透镜匹配的光纤纤芯的大小就可确定<sup>[7]</sup>。

参考光耦合机构的参数，对自聚焦透镜进行了设计，其结果如图 2 所示。

图 3、图 4 分别给出了汇聚光斑的大小，约为 100  $\mu\text{m}$ ，纤芯轴向光线能量在 100  $\mu\text{m}$  内可达 80% 以上，该数值将在后期 OLED 控制系统设计中，为建立星等与光源亮度关系的控制曲线提供参考。

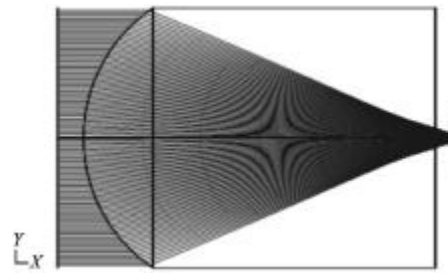


图 2 自聚焦透镜光路

Fig.2 Optical path of self focusing lens

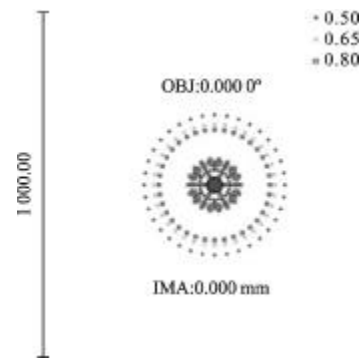


图 3 透镜直端面光斑

Fig.3 Lens face spot

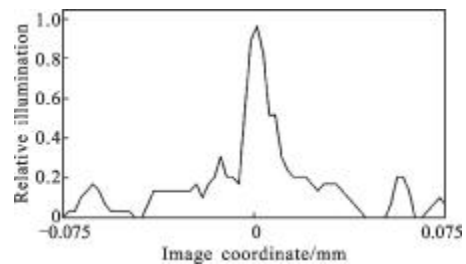


图 4 光斑能量曲线

Fig.4 Spot energy curve

2.2 OLED 面光源亮度的双调制技术

面光源常用亮度调制方法有电气灰度调制、空间灰度调制。由 OLED 元件的发光特性可知，控制电流与发光亮度存在一定线性关系，如图 5 所示，那么采

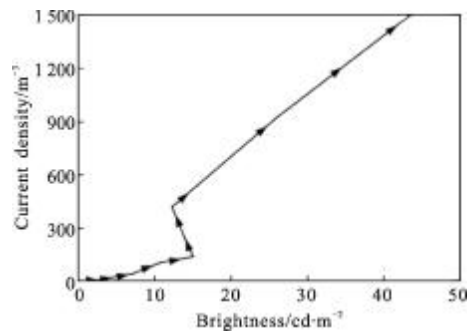


图 5 OLED 显示亮度与电流密度的关系图

Fig.5 Diagrams of OLED brightness and current density

用电气灰度调制时,可通过建立电流与亮度的控制模型,控制驱动 D/A 的输出电流得到预期亮度<sup>[8-9]</sup>。

空间灰度调制则是通过控制像素的导通数目比例实现不同亮度操作,实际应用时用多个像素构成更大像素块,原理如图 6 所示<sup>[10]</sup>。

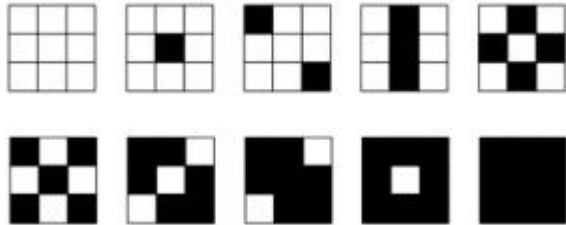


图 6 空间灰度调制原理

Fig.6 Spatial gray scale modulation principle

针对所研制目标标准星等指标分析结果,选择 OLED 显示屏,有效屏幕尺寸 4.3 in(1 in=2.54 cm),最高稳定发光亮度可达 2 000 cd/m<sup>2</sup>,600 pixel×800 pixel。现设定 OLED 的发光亮度 2 000 cd/m<sup>2</sup>为模拟 5 等星时的对应亮度。采用单一电气灰度调制方式时,根据每两级星等亮度有 2.512 倍的关系,则驱动电流与发光亮度在满足线性关系时所得结果如表 2 所示。

表 2 模拟星等与亮度对应表

Tab.2 Magnitude and intensity simulation

Magnitude	Design formulas	Brightness/cd·m <sup>-2</sup>
5	$L_{V5}$	2 000
6	$L_{V5}/2.512$	796.178
7	$L_{V5}/(2.512)^2$	316.959
8	$L_{V5}/(2.512)^3$	126.174
9	$L_{V5}/(2.512)^4$	50.070
10	$L_{V5}/(2.512)^5$	19.932

结合图 5 与表 2 计算结果可以看出,采用单一的电气调制 OLED 发光亮度时,在亮度<200 cd/m<sup>2</sup>左右,包含 8 等星以下的星等将不能精确控制。

采用空间灰度调制时,将 OLED 面光源划分为 121 份单独圆形光斑,圆形光斑内的黑色区域像素点为熄灭状态,形成正方形发光斑,如图 7 所示,正方形有效发光区域为圆形内接正方形。有效发光面为 4.3 in,为 600 pixel×800 pixel,则像素点大小为 0.10 mm×0.10 mm。由图示几何关系可知,L=3.54 mm。

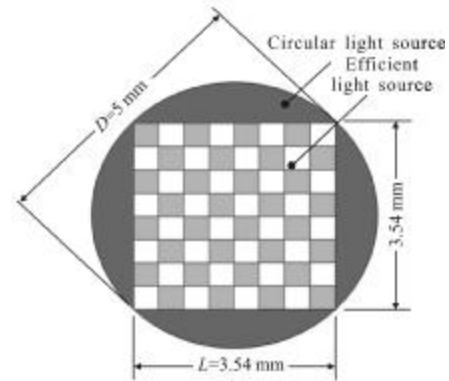


图 7 有效发光面灰度控制结构

Fig.7 Gray control structure of luminous surface

图中,L 为有效发光面边长,D 为 OLED 面被划分的 121 路耦合光源圆斑直径,则有效发光面的像素数:

$$N=n_{\text{列}} \times n_{\text{行}}=(L/0.10) \times (L/0.10)=35 \times 35=1\ 225$$

式中:N 分别为有效发光面内的像素数;n<sub>列</sub>有效发光面列像素数;n<sub>行</sub>有效发光面行像素数。设定有效发光面内所有像素点亮时为对应 5 等星,则星等对应发光像素点数由表 3 给出。

表 3 模拟星等与发光像素数对应表

Tab.3 Magnitude and emitting pixel number

Magnitude	Design formulas	Pixel number
5	$n_{V5}$	1 225
6	$n_{V5}/2.512$	490
7	$n_{V5}/(2.512)^2$	196
8	$n_{V5}/(2.512)^3$	78
9	$n_{V5}/(2.512)^4$	31
10	$n_{V5}/(2.512)^5$	12

可以看出,通过控制发光像素数,在不用采用像素块分割技术的条件下,可完成所有星等的模拟,但较少发光像素点数目使误差平均效应弱化,不均匀性突出,控制精度较低。

为解决上述高星等模拟分析中的问题,文中提出了基于电气灰度调制和空间灰度调制的双调制原理,即同一星图中,5、6、7 等星采用电气灰度调制方式,8、9、10 等星的采用空间灰度调制方式。通过计算机单独控制每路耦合系统中对应的 OLED 面积的电流值,实现每路光纤对应的靶标星点亮度等级

变化;将每路对应的 OLED 发光面整体亮度值控制在 7 等星后,保持不变,通过计算机控制已设定好的像素点坐标值,完成靶标上光纤输出光束的亮度等级控制,每级亮度由高精度亮度色度计进行数据采集。

### 3 星等精度检测方法与测试结果

#### 3.1 检测方法

装配星图模拟器与准直光学系统,在所标定深空导航敏感器入瞳处进行星点亮度测试,由于存在光学系统像差,星图星点间存在亮度差,差值超过星等精度要求时,就需通过亮度叠加进行修正。利用光学敏感器 CCD 拍摄模拟星光,测试的亮度等级与标准星图比对后就能确定星模拟器星等显示精度。

#### 3.2 检测结果

为避免存在背景光干扰,进行暗室单星测试。图 8 给出了最终整机(配置有衰减片)星图 7 等星的 121 个星点实测亮度以及修正值曲线。

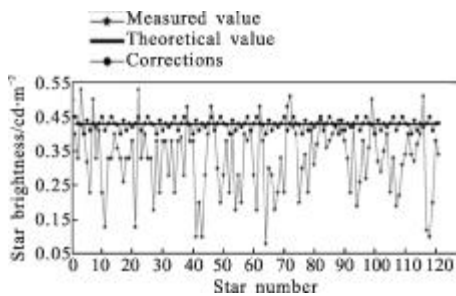


图 8 星等测试与修正结果

Fig.8 Magnitude of test and correction

### 4 结论

针对提出的可实现 5~10 等星精确控制的星图模拟方法,结合设计的高精度高星等星图模拟器的技术参数,对光纤面光源耦合技术以及 OLED 面光源亮度双调制原理进行了深入研究,并对光耦合机构和 OLED 面光源参数进行了详细设计和选择。最终的理论分析和实际测试均,采用所提技术可使面光源光斑汇聚达到  $100\ \mu\text{m}$ ,自聚焦透镜与光纤的轴

向能量集中度 $>80\%$ ,保证了光耦合机构具有较高的耦合效率,且在双调制技术支持下,星图模拟器能够保证 5~10 等星的精确模拟。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Hongpo, Huang Li. Research of a point target simulator [J]. Optical Instruments, 2008, 30(6): 74-76. (in Chinese)
- [2] Liu Yaping, Li Juan, Zhang Hong. Design and calibration of star simulator[J]. Infrared and Laser Engineering, 1995, 16(4): 24-28. (in Chinese)
- [3] Zhao Chenguang, Tan Jiubin, Liu Jian, et al. Star simulator for testing celestial navigation equipment[J]. Opt Precision Eng, 2010, 18(6): 1326-1332. (in Chinese)
- [4] Wang Xueqin, Zhang Chunxi, Jin Jing, et al. Radiation-induced attenuation effect on special optical fibers applied in space [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2516-2520. (in Chinese)
- [5] Liu Shi, Zhang Guoyu, Sun Gaofei, et al. Design of dynamic star simulator based on LCOS optical splicing technology [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 200-206. (in Chinese)
- [6] Li Yan, Mu Yu, Liu Zhiyin. Research of non-diffraction beams in fiber coupling [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2512-2515. (in Chinese)
- [7] Chen Yuan, Zhang Wenming. Tunable color temperature light source for star simulator [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 27(8): 50-53. (in Chinese)
- [8] Hu Yi, Gong Yan. Preliminary research on color simulation of stars in a star simulator[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(8): 65-73. (in Chinese)
- [9] Li Zhiqian, Li Sha, Hao Rui. Hybrid dual-cladding photonic crystal fiber with high birefringence [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 1044-1049. (in Chinese)
- [10] Yang Chun, Xia Zhichao. Propagation constant solution for large core and high numerical aperture step-index multimode optical fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 957-960. (in Chinese)