

文章编号: 1004-924X(2016)03-0511-10

## 基于硅基液晶拼接的高对比度动态星模拟器光学系统

孟 遥<sup>1</sup>, 张国玉<sup>1,2\*</sup>, 孙高飞<sup>1,2</sup>, 刘 石<sup>1</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)

**摘要:** 针对基于硅基液晶(LCOS)拼接技术的动态星模拟器对比度低, 无法在星图识别过程中为星敏传感器提供全部有效目标的问题, 提出通过抑制光学系统杂散光来提高LCOS拼接动态星模拟器对比度的方法, 讨论了偏振度对于杂散光的影响, 并推导出入射角与偏振度的函数关系。设计了抑制杂散光的光学系统, 该系统包括利用复合抛物面聚光器(CPC)结合望远系统组成照明光源, 配合多棱镜的1/4波片和视场角不小于11°的准直光学系统。在截止频率为60 lp/mm, 视场角小于±5°的情况下, 该准直系统的调制传递函数(MTF)大于0.7。实验显示: 该高对比度LCOS拼接动态星模拟器的星间角距误差小于18", 相对于传统型的星模拟器杂散光降低了2.38倍, 其在保证精度的条件下, 降低了动态星模拟器的背景噪声, 提高了动态星图的可识别率, 基本可以满足星敏传感器在多星等条件下的对精度和动态特性的需求。

**关键词:** 光学系统设计; 硅基液晶(LCOS)拼接技术; 星模拟器; 杂散光; 偏振度; 星图识别

中图分类号: V448.222; TH703 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20162403.0511

## Optical system of high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing technology

MENG Yao<sup>1</sup>, ZHANG Guo-yu<sup>1,2\*</sup>, SUN Gao-fei<sup>1,2</sup>, LIU Shi<sup>1</sup>

(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)

\* Corresponding author, E-mail: zh\_guoyu@163.com

**Abstract:** The dynamic star simulator based on Liquid Crystal on Silicon LCOS splicing technology has low contrast, and it can not provide all effective targets for the star sensor in star map recognition. Thus a method for improving the contrast of the dynamic star simulator by suppressing stray lights was put forwarded. The influence of the polarization degree on stray light was discussed in detail, and the function of the polarization degree and the angle of incidence was derived. The optical system for stray light suppression was designed, including a lighting source designed by combination of a Compound Parabolic Concentrator(CPC) and a telescopic system, a 1/4 wave plate with combination of multi-prisms, and a collimating system with field angle greater than 11°. The MTF of the collimating system is greater than 0.7 when the edge frequency is 60 lp/mm and the field angle is less than ±5°. The experiments show that the angle distance error between stars of the high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing is less than 18", and its stray light energy is reduced by 2.38 times as compared with those of conventional star simulators. These results indicate that the high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing can not only reduce the background noise of dynamic star simulator effectively, but also can

收稿日期: 2015-10-16; 修订日期: 2015-12-11

基金项目: 国家863高技术研究发展计划资助项目(No.2008AA12A203)

improve the recognition rate of star map. Consequently, it meets the requirements of dynamic star simulator in all magnitude levels for high dynamic characteristics and high precisions.

**Key words:** optical system design; Liquid Crystal on Silicon (LCOS) splicing technology; star simulator; stray light; polarization degree; star map recognition

## 1 引言

星模拟器是一种在地面上模拟星空,以便对星敏感器的星图识别算法进行功能测试的检测设备。伴随着高精度星敏感器的发展,星敏感器检测、标校技术与装置的要求也越来越高,即对星模拟器提出了更高的技术要求,如小型化、动态化及大视场等要求。星模拟器按工作方式不同可分为动态星模拟器和静态星模拟器。其中动态星模拟器为功能检测型星模拟器,其目的是在地面进行星图模拟,主要用于星敏感器的功能测试,通常和被测星敏感器、主计算机组成闭环测试系统,从而实现敏感器观测星空的实时模拟<sup>[1-5]</sup>。

20世纪70年代末,我国开始了星模拟器的研究,现有的动态星模拟器多采用薄膜晶体管液晶显示屏(Thin Film Tube Liquid Crystal Display, TFT-LCD)和数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)组件显示星图。其中TFT-LCD的对比度为600:1、光能利用率低于10%,无法达到多星等的模拟要求,模拟星等多在2~6;而DMD的单个微反射镜尺寸为 $14\ \mu\text{m}\times 14\ \mu\text{m}$ ,相邻微镜间距为 $1\ \mu\text{m}$ ,很难实现星点位置的高精度模拟,相关资料表明DMD的星间角距精度只能达到 $40''$ 。与TFT-LCD和DMD相比,反射式硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCOS)的光能利用率高达55%,单像元尺寸

可以达到 $8\ \mu\text{m}\times 8\ \mu\text{m}$ ,像元间隙仅为 $0.538\ \mu\text{m}$ ,并且对比度高达2000:1,作为星图显示器件具有明显的优势。不过,目前受国内LCOS大显示器件生产技术和价格的限制,采用1片规格一定的显示器件无法达到大视场星模拟器的设计要求,因此人们采用光学拼接技术,以有效扩大像面的尺寸<sup>[6-8]</sup>。然而,在基于LCOS拼接的动态星模拟器的样机测试过程中,实测对比度与其理论值存在较大差距,这是因为像面中存在接近所显示星点亮度的光学噪声,且两片LCOS的对比度存在明显差异。这些问题使星敏感器在星图识别过程中无法识别全部的有效星点,从而降低了动态星模拟器在地面功能测试中的使用价值。本文从LCOS星模拟器产生杂散光的原因出发,设计了一种高对比度LCOS拼接动态星模拟器的光学系统。该系统降低了动态星模拟器的背景噪声,提高了星图识别的准确率,能够满足星敏感器的测试需求。

## 2 动态星模拟器光学系统的组成及工作原理

LCOS拼接动态星模拟器主要由星模拟器头部、控制计算机及六维调整台3部分组成。其中,星模拟器头部主要由准直光学系统、照明光学系统、偏振分光棱镜(Polarized Beam Splitter, PBS)、LCOS、电路驱动板及供电电源组成,如图1所示。

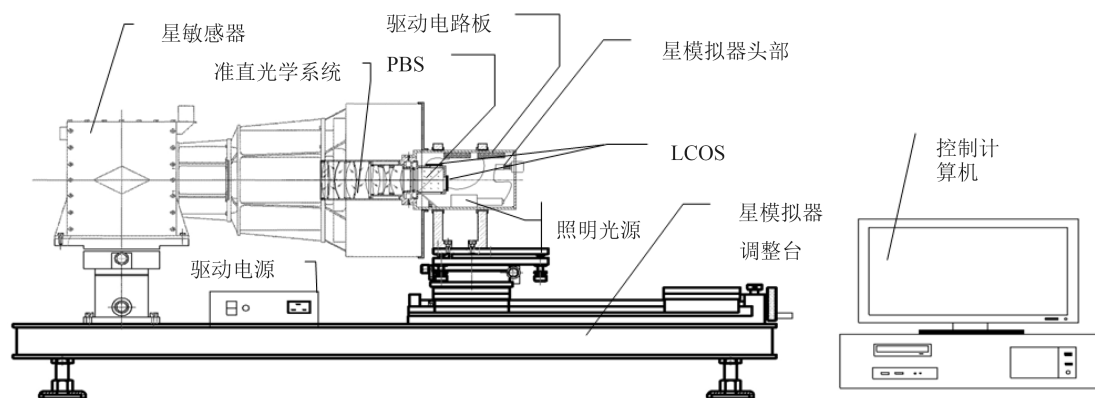


图1 动态星模拟器的总体结构图

Fig. 1 Overall mechanism of dynamic star simulator

LCOS动态星模拟器的工作原理如图2所示。模拟器根据姿态与轨道控制动力学仿真计算机提供的星敏感器工作信息, 寻找到当前姿态下的导航星; 由星模拟器控制计算机将星图信息通过驱动版传递给LCOS显示; 星图经过准直光学系统调制后成平行光出射, 其出瞳与星敏感器的入瞳衔接, 由此完成对无穷远星图的模拟。

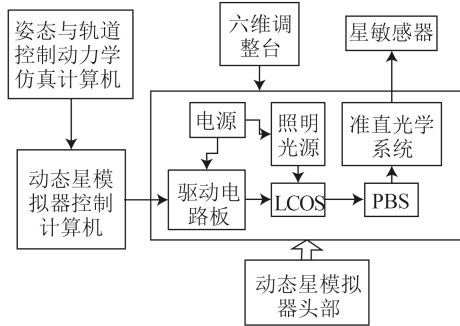


图2 动态星模拟器的工作原理图  
Fig. 2 Working principle of dynamic star simulator

### 3 杂散光分析及抑制方法

#### 3.1 杂散光的形成及抑制

##### 3.1.1 杂散光的主要来源

理想状态下, 一束准直光经过PBS起偏形成偏振度为1的线偏振光(P波及S波), 经LCOS反射调制成线偏振光的光矢量方向有 $\pi$ 的改变, 调制后光线经过PBS会分别透射和反射至镜头内; 未经LCOS调制的线偏振光的矢量方向没有改变, 经PBS反射和透射至入射光方向,如图3(a)所示。在真实状态下, 由于普通的照明光源无法满足准直光的要求, 起偏后照明光的偏振度小于1, 因此光线中同时存在P波及S波。光源发出的光线经LCOS反射后, 将S波调制成P波被反射至镜头内, 未经调制会将P波直接反射至镜头内, 即显示图像背景中存在大量杂散光, 如图3(b)所示。同时, 由于星敏感器一般会设计平板玻璃作为其成像光学系统的保护罩, 因而在与动态星模拟器联调测试时, 星模拟器发出的光会有一部分通过星敏感器的保护

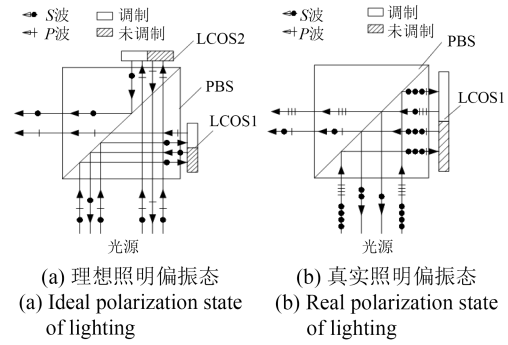


图3 LCOS拼接的动态星模拟器照明原理图  
Fig. 3 Lighting principle of dynamic star simulator based on LCOS splicing technology

罩反射回星模拟器中, 从而形成LCOS二次反射的杂散光。

##### 3.1.2 偏振度与入射角的关系

动态星模拟器内部杂散光的主要来源是LCOS, 影响杂散光能量的主要原因为照明光线的偏振度, 即PBS的起偏性能, 而PBS的起偏性能是由入射角决定的, 针对偏振度与光线入射角进行如下推导:

经过偏振分光棱镜反射和透射的光束的偏振度可表示为:

$$P_R = \frac{I_S R_{S1} + I_S T_{S1} R_{S2} - (I_P R_{P1} + I_P T_{P1} R_{P2})}{I_S R_{S1} + I_S T_{S1} R_{S2} + I_P R_{P1} + I_P T_{P1} R_{P2}}, \quad (1)$$

$$P_T = \frac{I_S T_{S1} T_{S2} + I_P T_{P1} T_{P2}}{I_S T_{S1} T_{S2} - I_P T_{P1} T_{P2}}, \quad (2)$$

式中:  $I_P$ ,  $I_S$ 分别为P波与S波的入射光能量,  $I_P = I_S = \frac{1}{2} I$ ;  $R_P$ ,  $R_S$ ,  $T_P$ ,  $T_S$ 分别为P波、S波的反射率和P波、S波的透射率。其中:

$$R_P = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)}, R_S = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)},$$

$$T_P = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \frac{4 \sin^2 \theta_2 \cos^2 \theta_1}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2)},$$

$$T_S = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \frac{4 \sin^2 \theta_2 \cos^2 \theta_1}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)},$$

式中 $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 分别为入射角和折射角。

经化简可得偏振度与入射角的函数关系为:

$$P_R = \frac{n_2 \sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2) [\cos^2(\theta_1 - \theta_2) - \cos^2(\theta_1 + \theta_2)] + 4n_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin^2 \theta_1 [\cos^4(\theta_1 - \theta_2) - \cos^2(\theta_1 + \theta_2)]}{n_2 \sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2) [\cos^2(\theta_1 - \theta_2) + \cos^2(\theta_1 + \theta_2)] + 4n_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin^2 \theta_1 [\cos^4(\theta_1 - \theta_2) + \cos^2(\theta_1 + \theta_2)]}, \quad (3)$$

$$P_T = \frac{1 - \cos^4(\theta_1 - \theta_2)}{1 + \cos^4(\theta_1 - \theta_2)}, \quad (4)$$

式中： $P_R$ 为反射光的偏振度， $P_T$ 为透射光的偏振度。根据斯涅尔定律可得 $n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$ ，其中PBS膜系的折射率分别为 $n_2=2.3$ ， $n_1=1.25$ ，最终得到 $P_R$ 与 $P_T$ 关于入射角的函数关系如图4所示。

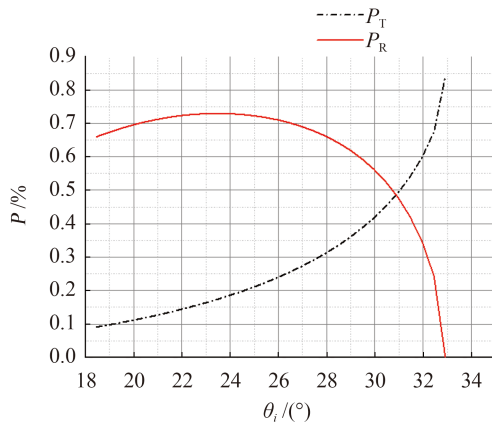


图 4  $P_R$ 与 $P_T$ 的函数图像

Fig. 4 Polarization curves of transmission and reflection

利用最小二乘法拟合得到：

$$P_T = 0.00378\theta_1^2 - 0.15448\theta_1 + 1.69451, \quad (5)$$

$$P_R = -0.00622\theta_1^2 + 0.29242\theta_1 - 2.66988. \quad (6)$$

分析图4的函数图像可知：入射角在较小的范围内才能保证较高的偏振度；LCOS拼接系统照明的透射光与反射光的偏振度在某一角度相同，但它们随入射角的变化趋势相反，这将导致两片LCOS显示的对比度存在较大差异。

### 3.2 杂散光的抑制方法

针对偏振度对杂散光的影响，这里采用一种抑制杂散光的光学结构配合小视场角的准直光源来改善杂散光。

#### 3.2.1 照明光源光学系统设计思路

采用小视场角的准直光源照明可以使LCOS的照明光线有较强的偏振度，进而减少由光源带来的杂散光。但目前大部分小视场角的准直光源都为激光光源，无法满足动态星模拟器宽光谱的要求。白光光源虽然可以满足光谱要求，不过准直角一般比较大，即使经过二次配光也无法满足使用要求。因此需要设计一种以白光LED为光源的小视场角照明系统。此外，为了减少星敏感器识别

过程中的噪点，设计时需要保证光源在有效的照明范围内具有较高的均匀度。

根据要求，照明系统的设计思路是：以LED为光源，复合抛物面聚光器(Compound Parabolic Concentrator, CPC)对其进行二次配光<sup>[9]</sup>，缩小LED的发光角度，再配合望远系统对其角度进行缩放；然后根据激光扩束原理，扩大其发光面积，使其辐照面大于LCOS的有效显示面积 $15.6 \text{ mm} \times 15.6 \text{ mm}$ ，并且在望远系统中加入复眼透镜，以保证照明的均匀性，最终达到理想的照明效果。

#### 3.2.2 准直光学系统的设计思路

准直光学结构主要以一种改进型的拼接结构配合1/4波片抑制杂散光。改进型的拼接结构采用多棱镜组合结构，将原来的一块PBS拆分为两块PBS与一块半反半透棱镜的组合，这样可以保证两片LCOS起偏的一致性，使两片LCOS对比度较为接近。由图4可知，在高偏振度的状态下反射光的入射角范围比透射光大，因此LCOS采用反射光照明方式。为了保证星敏感器的反射光不会返回星模拟器的像面，因此在星模拟器的出瞳位置增加一块半1/4波片，从而使光反射回星模拟器时的振动方向有 $\pi$ 的改变<sup>[10]</sup>，这样星模拟器中的杂散光会被PBS反射出去，从而无法到达LCOS。高对比度光学结构示意图如图5所示，LCOS在新结构下的工作原理如图6所示。其中P，S代表P波与S波，正、负代表正向与负向，两个PBS的正向在图5中已标出，为箭头所指方向。虽然PBS<sub>1</sub>与PBS<sub>2</sub>的方向不同，但两片LCOS的工作原理相同，不同之处仅为坐标系下的方向定义不同。

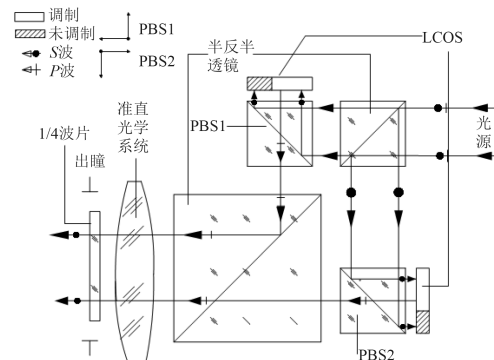


图 5 高对比度光学结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of high contrast optical system

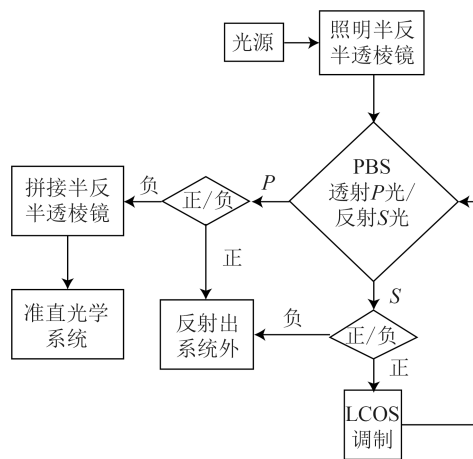


图6 新结构下LCOS的工作原理图

Fig. 6 Working principle of LCOS with proposed optical system

## 4 光学系统设计

### 4.1 准直光学系统设计

准直光学系统的主要技术指标如表1所示。星等模拟时的相邻星等相差2.512倍, 模拟-1~7等星所需的显示器件对比度为 $2.512^8:1=1\ 885:1$ , 而LCOS的对比度大于2 000:1, 能满足星等显示的要求。

### 4.2 成像光学系统设计

#### 4.2.1 光学系统设计

光学系统的焦距由LCOS的有效显示区域尺寸 $h \times h$ 与视场 $2\omega$ 决定, 其中 $h' = \frac{1920 \times 0.008}{2} = 7.68\text{ mm}$ ,  $2\omega = 11^\circ$ , 可以得到系统焦距 $f = \frac{h'}{\tan \omega} = 79.76\text{ mm}$ 。LCOS的有效尺寸为确定值, 在实际设计中焦距应小于设计值才能获得大于所需视场角的光学系

表1 动态星模拟器的主要技术参数

Tab. 1 Main performance of dynamic star simulator

序号	参数	指标
1	视场	$\phi 11^\circ$
2	出瞳直径	$\geq 22\text{ mm}$
3	出瞳距	$\geq 35\text{ mm}$
4	光谱波段	500~800 nm
5	光学传递函数设计值	MTF $\geq 0.6$ , $\nu=60\text{ lp/mm}$
6	相对畸变	$\leq 0.05\%$
7	星间角距误差	$\leq  18'' $
8	星等要求	-1~7

统, 并保证有效显示范围内的像质在实际装调过程中可以达到或者接近设计值, 经优化后光学系统的视场为 $2\omega'=12^\circ$ 。

星模拟器为了与星敏感的入瞳相衔接, 采用出瞳外置的方法, 因而星模拟器的光学系统为目镜系统。由于该系统有严格的位置精度要求, 需重点考虑畸变影响, 这里选用埃尔弗目镜的改进型作为初始结构, 它具有低场曲、低畸变、出瞳距离长的特点。在这种结构后增加一片正透镜以保证系统的对称性, 降低垂轴像差, 并且可以分担一部分的高级球差。优化后的结构如图7所示。

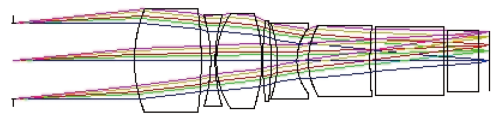


图7 星模拟器的光学系统结构图

Fig. 7 Layout of optimized optical system of star simulator

#### 4.2.2 光学系统像质评价

由于动态星模拟器是以所显示的星图作为星敏感器的靶面目标, 所以主要从成像质量及成像位置对星模拟器进行像质评价。如图8(a)所示, 光学系统的均方根半径小于 $3\ \mu\text{m}$ , 能量比较集中, 且直径小于LCOS的单像元尺寸 $8\ \mu\text{m}$ 。如图8(b)所示, 系统在最大视场 $6^\circ$ 的垂轴色差小于艾里斑, 由此可以判断其成像质量利于星敏感器采集星点。如图8(c)所示, 系统畸变小于 $0.05\%$ , 即对于全视场为 $1\ 920 \times 1\ 920$ 个像素的LCOS, 其单像素的最大位移不超过 $1/2\text{ pixel}$ 。如图8(d)所示, 光学系统的截止频率 $\nu=60\text{ lp/mm}$ 时, MTF $\geq 0.7$ , 满足设计要求。

### 4.3 照明光学系统设计

#### 4.3.1 照明光学系统分析

在实际使用中对动态星模拟器具有小型化要求, 因此照明光源的整体长度需控制在250 mm以内。

根据边缘光线原理, 复合抛物物反光器的形状完全取决于焦平面半径 $a$ 和最大出射半角 $\theta$ 。CPC长度可表示为:

$$L = \frac{a(1 + \sin \theta) \cos \theta}{\sin^2 \theta}, \quad (7)$$

出光孔半径为:

$$d = \frac{a}{\sin \theta}. \quad (8)$$

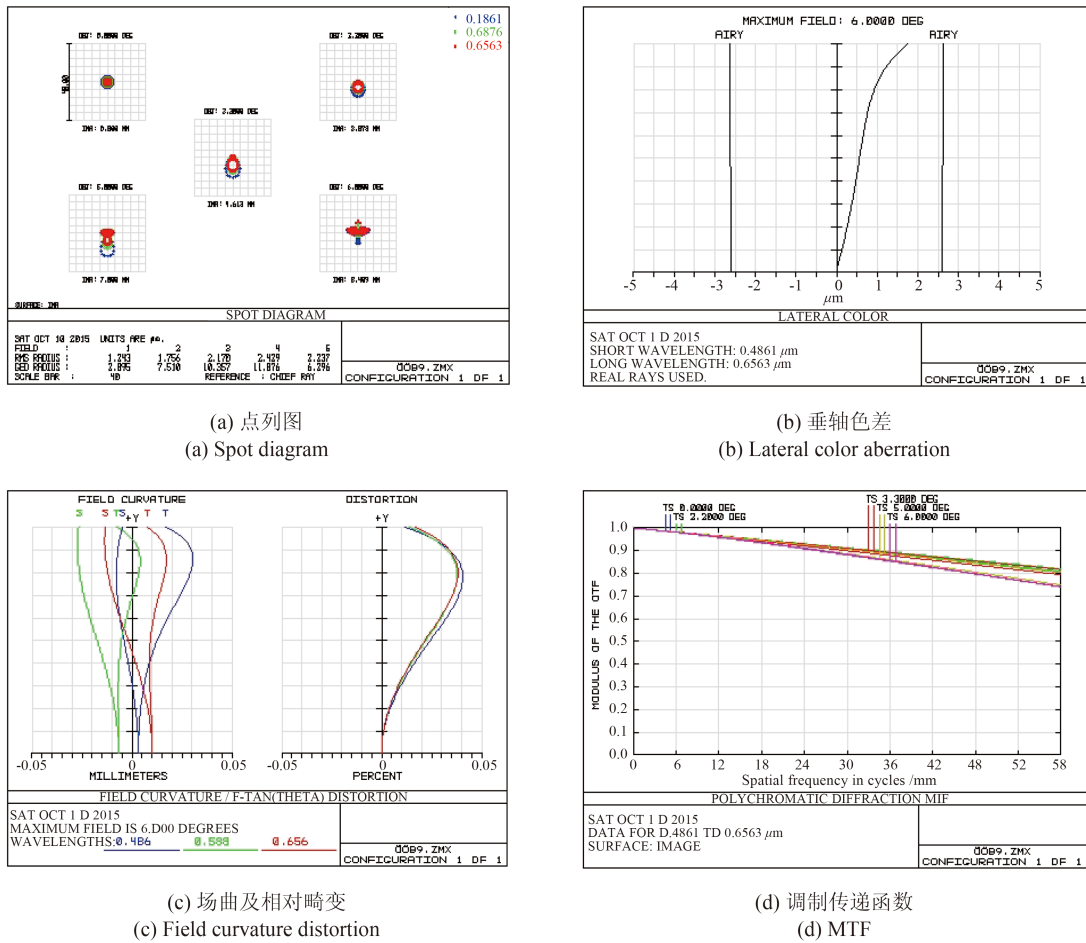


图 8 星模拟器光学系统的像差图  
Fig. 8 Aberrations of optical system of simulator

$L/a$ 关于 $\theta$ 的函数关系如图9所示<sup>[11]</sup>。由图9可以看出， $\theta$ 为 $0^\circ\sim 15^\circ$ 时， $L/a$ 的变化幅度较大；而根据3.1.2的结论可以推导出照明光源的视场角越小，杂散光越少。综合以上因素考虑出射光线的发散角

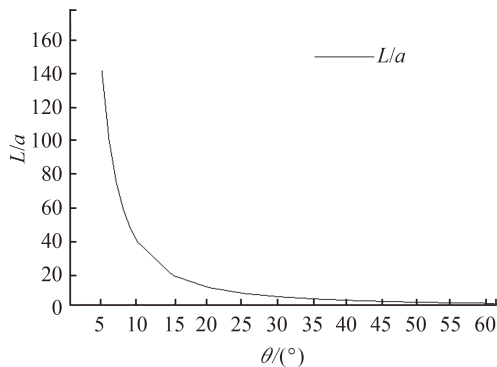


图 9  $L/a$ 与 $\theta$ 的函数关系  
Fig. 9  $L/a$  as a function of  $\theta$

度为 $\pm 15^\circ$ 。焦平面半径由LED光源的发光面尺寸决定，所选用的LED光源为CREE的XP-G，其发光面半径为1.53 mm，发散角为 $\pm 60^\circ$ 。

由于焦平面半径 $a=1.53$  mm，根据式(8)计算得到出光孔半径 $d=5.9$  mm，出光孔径为11.8 mm，与CPC衔接的望远系统目镜孔径 $D=12$  mm $>11.8$  mm。望远系统的有效照明面积应大于16 mm $\times$ 16 mm，考虑到最终装配误差及照明边缘光线的不均匀性，物镜的孔径直径不应小于30 mm，因此望远系统的角放大倍率确定为3 $\times$ 。望远系统中目镜的光学参数为： $F/\#=2.5$ ， $D=12$  mm， $\omega=15^\circ$ ；物镜的光学参数为： $f=90$  mm， $\omega=5^\circ$ ， $F/\#=2.5$ 。在实际焦平面处放置两片多通道复眼透镜以实现匀光效果<sup>[12]</sup>。最终设计的光学系统视场角为 $\pm 5^\circ$ 。

4.3.2 照明光学系统模拟

将光学组件输入Tracepro进行建模，结果如图

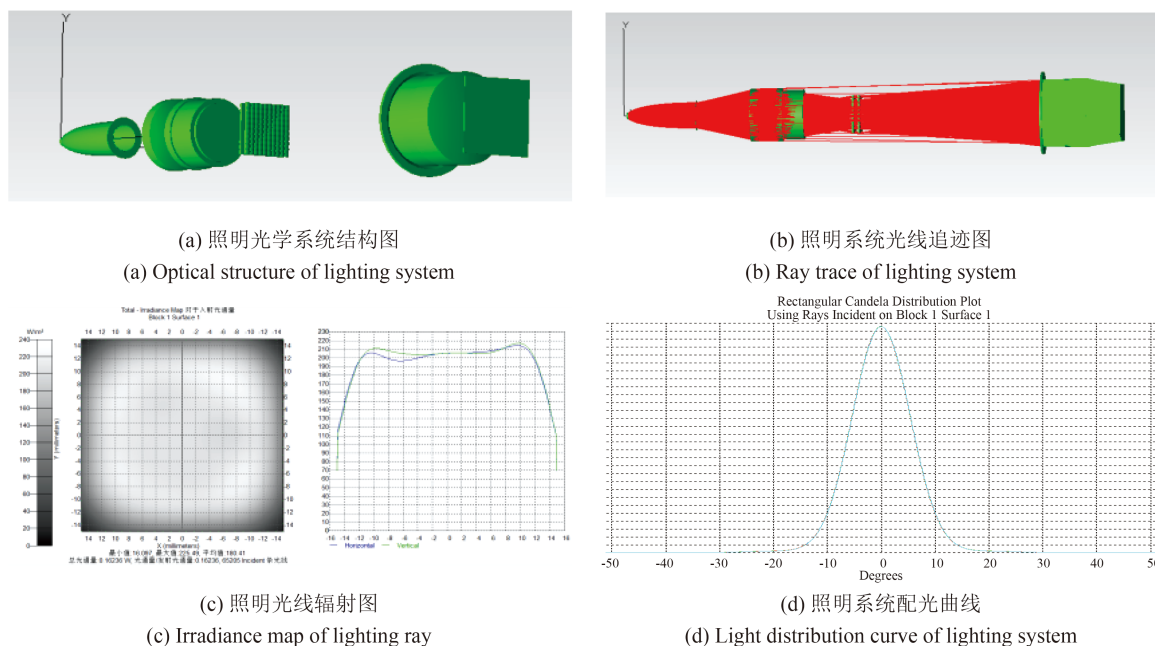


图 10 照明光学系统模拟图

Fig. 10 Simulation of lighting optical system

10(a)所示, 系统长度为220 mm。用200 000条光线进行光线追迹, 如图10(b)所示。出射光线的辐射度如图10(c)所示, 可以得到在18 mm×18 mm的范围内光强的不均匀度为:  $\frac{I_{max}-I_{min}}{I_{max}+I_{min}}=7.3\%$ , 其中  $I_{max}$  为最大光强,  $I_{min}$  为最小光强。照明系统的配光曲线如图10(d)所示, 光源的发散角可以达到 $\pm 5^\circ$ 。

## 5 实验验证

### 5.1 星间角距测试结果

将动态星模拟器的像面划分为等距的10×10网格, 使用精度为0.5"的Leica 6100A经纬仪测试网格交点, 共121点。将10次星间测试结果剔除误差后

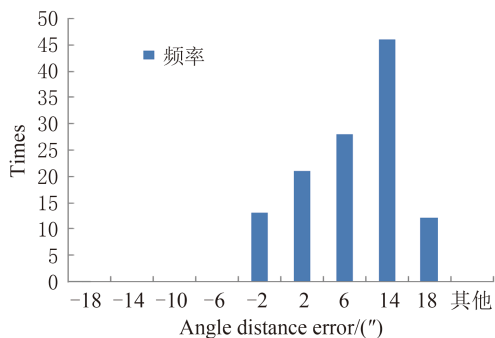


图 11 星间角距误差直方图

Fig. 11 Histogram of angle distance error between stars

均值, 用直方图表示, 如图11所示。测试的最大误差为16.71", 小于设计所要求的18"。

### 5.2 消杂散光测试及光源偏振度验证

#### 5.2.1 消杂散光测试结果

图12(a)为传统型动态星模拟器测试图像的采集图, 图12(b)为高对比度动态星模拟器测试图像的采集图, 图像中“十”字亮线为测试图样, 可视星点的集合。通过这种测试图样可以同时观察两片LCOS的对比度、照明均匀度及杂散光的控制情况。使用Matlab对两种形式星模拟器的采集图进行灰度分析, 结果如图13所示。分析图像可以得到传

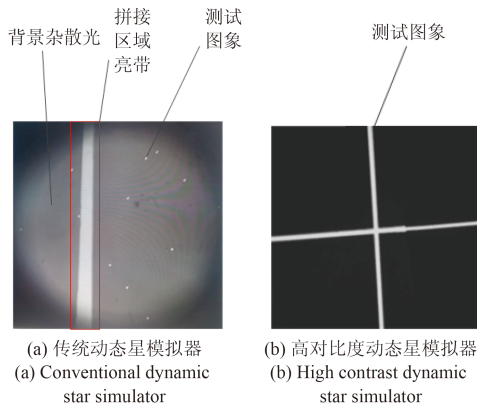


图 12 动态星模拟器测试采集图

Fig. 12 Text images of dynamic star simulator

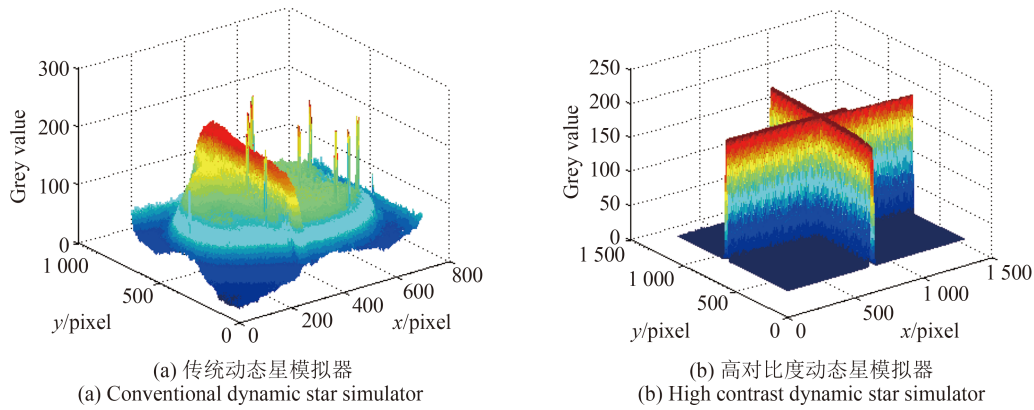


图 13 图像灰度值三维图

Fig. 13 Three-dimensional diagrams of grey level

统型动态星模拟器背景有大量杂散光，且在拼接区域背景光能量叠加形成高亮度带状光学噪声，虽然在星图识别过程中星模拟器可以滤掉该噪声，但落入亮带内部的星点将无法识别。而高对比度动态星模拟器的图像显示背景的杂散光得到了有效抑制，实现了高对比度的要求。

对传统的LCOS动态星模拟器及高对比度动态星模拟器显示图像的杂散光进行测试。分别测量星模拟器显示全黑图像及全白图像的辐照度，将整幅图分成4个区域，测量不同区域角度下的辐照度，结果如图14所示。具体操作为：将辐照计固定于六维台上，将其位置调整至星模拟器的出瞳附近，测量星模拟器的出射光辐照度，如图15所示。

对两种形式下的星模拟器分别进行10次测量并取平均值，结果如表2所示。

高对比度动态星模拟器与传统动态星模拟器相比，其杂散光能量降低的倍数为： $\frac{3.517}{3.366} \times \frac{1.85}{0.811} = 2.38$ 。

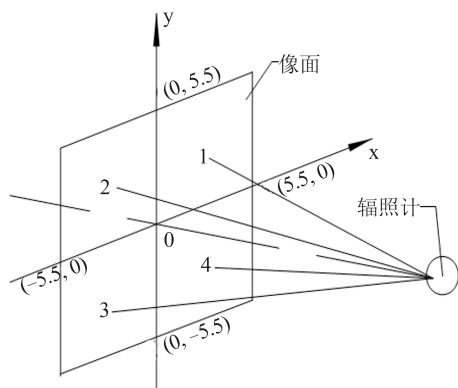


图 14 动态星模拟器辐照度测试

Fig. 14 Irradiance test of dynamic star simulator

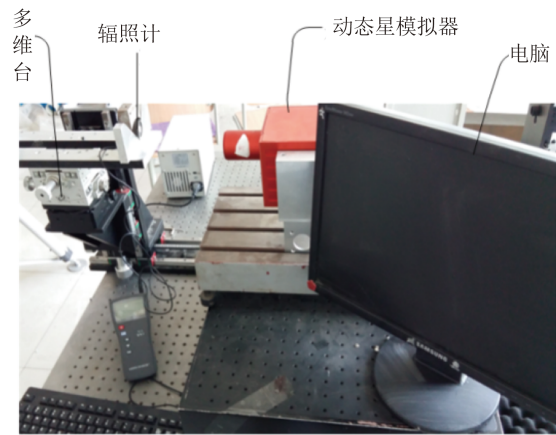


图 15 动态星模拟器杂散光测试示意图

Fig. 15 Stray light test of dynamic star simulator

表 2 光源改进前后星模拟器纯黑图像及纯白图像的辐照度

Tab. 2 Irradiances of white and black images before and after improvement of light source (mW/cm<sup>2</sup>)

测试不同 角度区域	传统型LCOS 动态星模拟器		高对比度LCOS 动态星模拟器	
	白	黑	白	黑
1	3.282	1.737	3.479	0.783
2	3.263	1.734	3.485	0.792
3	3.492	1.961	3.560	0.832
4	3.427	1.969	3.543	0.835
均方根	3.366	1.850	3.517	0.811

5.2.2 星模拟器偏振度验证结果

根据3.2.2节可知星模拟器以反射起偏的光线对

LCOS进行照明,通过式(6)可以得到当照明光源的发散角不大于 $\pm 5^\circ$ 时,对LCOS照明的反射光偏振度为:  $0.35 < P_R < 0.7$ 。由此计算星模拟器反射光照明的出射光线的理论偏振度为:

$$P_{ES} = \frac{IP_{S1} + I(1-P_{S1})P_{T2}}{I} = \frac{0.35 + 0.66 - 0.35 \times 0.66}{1} = 0.779.$$

将理论偏振度和实验测试数据计算得到的偏振度绘制成图16。

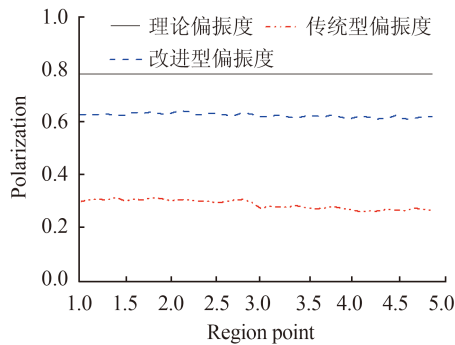


图 16 偏振度对比

Fig. 16 Contrast of polarization degrees

由图可知,改进后动态星模拟器依然未达到理论的偏振度,其主要原因是由于照明光源无法达到理想状态;不过相对于传统型星模拟器偏振度已经大幅提高,从而有效抑制了杂散光。

### 5.3 星点亮度测试

高对比度星模拟器主要可以实现在各级星等下

的星图模拟,使用KLL-04型微光照度计测试所模拟星等,可以探测到 $10^{-8}$  lx,满足1~7等星的测试要求。测试结果与理论照度如图17所示。

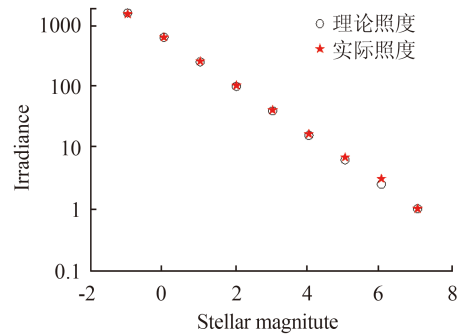


图 17 实际星等与理论星等对比图

Fig. 17 Comparison between actual and theoretical magnitudes

通过图17可以看到,高对比度星模拟器基本达到了星等要求。

## 6 结 论

本文分析了LCOS动态星模拟器杂散光形成的主要因素,通过控制杂散光的方法提高了系统对比度。相比于传统型LCOS动态星模拟器,高对比度LCOS动态星模拟器在保证原有精度的条件下,降低了动态星模拟器的背景噪声,极大提高了动态星图的可识别率及识别速度,可以更好地满足在各级星等下星图模拟的高动态、高精度要求。

### 参考文献:

- [1] 张文明,林玲,郝永杰,等.小型星模拟器中星图动态显示系统的设计[J].光电工程,2000,27(5):11-14.  
ZHANG W M, LIN L, HAO Y J, et al.. Design of a dynamic display system for star map in small-sized star simulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, 27(5): 11-14. (in Chinese)
- [2] 刘金国,李杰,郝志航. APS星敏传感器探测灵敏度研究[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)
- [3] 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,2003,42(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*, 2003, 42(11): 2996-3001. (in Chinese)

- [4] 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.

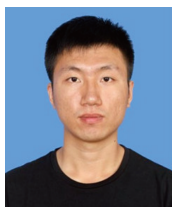
WANG L Y, WANG B, ZHANG G Y, et al.. Study on high precise and high dynamic star simulator[J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2015, 35(3): 356-361. (in Chinese)

- [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] 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): 1730-1734.  
SUN G F, ZHANG G Y, JIANG H L, *et al.*. Design of very high accuracy star simulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1730-1734. (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, 41(4): 0716003-1-7  
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(4): 0716003-1-7. (in Chinese)
- [8] 郑茹, 张国玉, 高越, 等. 基于LCOS拼接技术的动态星模拟器光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2144-2150.  
ZHENG R, ZHANG G Y, GAO Y, *et al.*. Optical system design of dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(9): 2144-2150. (in Chinese)
- [9] 汪宇青, 李湘宁, 黄慧, 等. 一种基于复合抛物面聚光器的面向大尺寸LED的反射器设计方法[J]. 光学技术, 2014, 40(5): 450-453.  
WANG Y Q, LI X N, HUANG H, *et al.*. Reflector design method based on compound parabolic concentrator (CPC) for big size LED[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(5): 450-453. (in Chinese)
- [10] 杨加强, 程德文, 王庆丰, 等. 新型大视场消杂光眼底相机光学系统的设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122002-1-7  
YANG J Q, CHENG D W, WANG Q M, *et al.*. Design of a novel wide view-field angle anti-stray-light fundus camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1122002-1-7. (in Chinese)
- [11] 白莹, 林文硕, 谢国庆. 基于复合抛物面集光器的LED教室灯具的配光设计[J]. 应用光学, 2014, 35(3): 395-399.  
BAI Y, LIN W SH, XIE G Q. Light distribution design of LED lamps in classroom based on compound parabolic collector[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 395-399. (in Chinese)
- [12] 赵斌, 张国玉, 陈启梦, 等. 硅基液晶投影系统的LED光源照明系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 072201-1-7.  
ZHAO B, ZHANG G Y, CHEN Q M, *et al.*. Design of illuminating system for liquid crystal on silicon projection system on LED light source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 072201-1-7. (in Chinese)

#### 作者简介:



孟遥(1987-), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事航天器地面模拟测试与标定技术的研究。E-mail: 505418584@qq.com

#### 导师简介:



张国玉(1962-), 男, 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: zh\_guoyu@163.com