

文章编号 1004-924X(2007)11-1698-06

# 基于数字光处理技术的小型星模拟器设计

巩岩<sup>1</sup>, 胡宜宁<sup>1,2</sup>, 赵阳<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**提出了基于数字光处理(DLP)技术的星模拟器系统的技术方案。根据星模拟器技术指标,确定了总体光学结构;在确定数字微镜元件(DMD)芯片规格的基础上,计算出星模拟器光学系统的焦距、单星张角、相对孔径等光学系统参数;最后,介绍了星图模拟软件的设计方法。计算及模拟结果表明,设计的小型星模拟器实现了星图视场为 $10.5^\circ \times 7.5^\circ$ ,模拟星等为2.0~8.0等星,单星张角优于 $40''$ ;将采样周期控制在毫秒量级,能为星敏感器提供任一时刻、任一惯性坐标系下指向的模拟星图,可满足航天工程中对小型星模拟器的动态性、大视场、宽星等范围、短采样周期等需求。

**关键词:**星模拟器;数字光处理;数字微镜元件;光学设计;显示算法

**中图分类号:**V351.37 **文献标识码:**A

## Design of a mini star simulator based on digital optical processing

GONG Yan<sup>1</sup>, HU Yi-ning<sup>1,2</sup>, ZHAO Yang<sup>1,2</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** The technical scheme of a star simulator based on Digital Light Processing (DLP) technology is proposed in order to meet the demands of a star sensor in spacecraft engineering. The general optical structure is confirmed according to the technical indexes of a star sensor. Then, the optical system parameters of the simulator are calculated by the specification of a Digital Micro-mirror Device (DMD). Finally, a dynamic display algorithm for the star map is introduced. The simulating results indicate that field of view of  $10.5^\circ \times 7.5^\circ$ , star magnitude simulated of 2.0~8.0 and the single-star field angle of less than  $40''$  are obtained, and the sampling period is controlled within several milliseconds. The experimental result can satisfy the system requirements of big field of view, wide magnitude range and short sampling period.

**Key words:** star simulator; Digital Light Processing(DLP); Digital Micro-mirror Device(DMD); optical design; display algorithm

收稿日期:2007-09-06;修订日期:2007-10-24.

基金项目:应用光学国家重点实验室开放基金资助项目(No. O6133FQ062)

## 1 引 言

空间飞行器发展至今,越来越趋向于采用空间光学姿态传感器对飞行器进行实时姿态的捕获与测量。采用星光制导来代替惯导,即采用星图实时校正和稳定飞行器姿态来代替单轴或三轴陀螺稳定平台的星敏感器,飞行器可以根据星敏感器实时提供的飞行位置偏差和姿态偏差,随时启动伺服系统以校正这些偏差。星敏感器是目前空间光学姿态传感器中精度最高的,其重要性促使人们对其开展深入的研究以进一步提高其精度和可靠性。伴随着高精度星敏感器的发展,对于其检测、标校的技术与装置也提出了更高的要求,即对星模拟器提出了更高的技术要求,如小型化、动态化、大视场和更高单星精度要求等<sup>[1]</sup>。

根据显示效果的不同,星模拟器分成静态和动态两种。静态模拟器通常由点光源和一系列滤光片组成,主要用于测试或标定星敏感器对不同大小、星等的恒星的敏感度,不用于星图识别的动态实验。动态星模拟器主要用于对星敏感器及姿态识别系统进行功能测试,通常和被测星敏感器、主计算机组成闭环测试系统,实现传感器观测星空的实时模拟<sup>[2]</sup>。

随着星敏感器的发展,对模拟器星图像的要求越来越高:单星张角小,星间角距精度高,具有较大动态范围和足够高对比度的光学特性,以及较高的星图刷新频率和响应时间,而且重量轻,体积要求小。这些指标对星模拟器提出了较高的要求<sup>[3]</sup>。由于数字光处理(Digital Light processing, DLP)技术本身所具有的高分辨率、高对比度、结构简单、能做到小型化等特点,作为显示系统很适于实现以上对星模拟器的技术要求。所以,本文提出了以 DLP 投影显示系统为核心器件的小型动态星模拟器方案,较好地满足了工程应用对星模拟器的技术要求,并对星模拟器的光学系统与星图动态显示软件系统进行了设计和分析。

## 2 工作原理

星模拟器计算机接收仿真主计算机给出的卫星当前姿态和轨道信息,确定光轴指向。然后装

载星表文件,根据星敏感器视场范围确定以光轴为中心的视场内的导航星,并读出每颗导航星的赤经、赤纬及星等数据。最后,对各恒星的赤经、赤纬进行坐标变换,转换为星敏感器的平面坐标,经由星模拟器显示系统,进入准直光学系统,由被测星敏感器接收。系统框图如图 1 所示<sup>[4-6]</sup>。

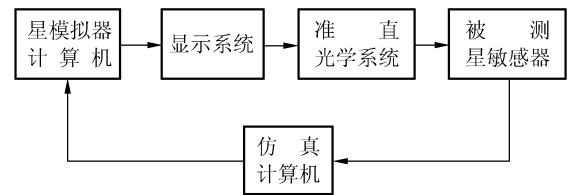


图 1 星模拟器系统框图

Fig. 1 Real-time star field simulator system

在传统的显示方式中,无论是阴极射线管(CRT)、液晶显示器(LCD),还是电致发光(EL)、等离子体显示板(PDP)等,最后的显示输出环节都是以模拟方式进行的。由于在视频显示前都要进行 D/A 转换,从而给系统增加了噪声,降低了信噪比。本文采用了 DLP 技术,做到了全数字化处理,能产生高亮度、高对比度的显示图像。DLP 技术的核心是德州仪器公司生产的数字微镜元件(Digital Micromirror Device, DMD)。以 DMD 为核心,包括 DMD、围绕 DMD 的电子电路和光学引擎等构成 DLP 技术<sup>[7]</sup>。

DMD 是由数以万计的可以移动翻转的微小反射镜构成的光开关阵列,它既是一种微电机系统(MEMS),也是一种反射式空间光调制器(SLM)。DLP 技术的最大特点是它的全数字化特性,即数字电字输入——数字光字输出。所谓“数字电字输入——数字光字输出”就是指 DLP 投影显示系统接收数字视频信号输入,通过 DMD 控制器将代表图像信息的数据存入每个 DMD 微镜下面的 CMOS 单元内,然后根据此数据控制 DMD 微镜的翻转状态,使各微镜分别在“开/关”两种状态间进行高速切换,实现对入射照明光的调制,形成数字光输出,并通过其光学引擎产生最终的视频图像输出。

## 3 光学系统分析及设计

### 3.1 大视场光学口径,出瞳位置的设计

光管出射的平行光的直径的确定应与传感器

光学系统参数统一考虑。

首先,光管的出瞳应与传感器入瞳重合,以保证全模拟视场内各处的星点发出的光对传感器入瞳的总光通量相同,故光管为一个出瞳在外的光学系统。

其次,光管出瞳的大小应与传感器入瞳大小相同。光管出瞳过大,由于传感器入瞳的限制造成光通量的浪费,且使光管结构、重量增大。出瞳过小,则不符合与星模拟器光瞳匹配的原则。

光管的出瞳瞳距需参照传感器的入瞳位置及模拟器可靠近传感器的程度来决定。实际设计值考虑为:出瞳口径  $\Phi 52$  mm,出瞳距离  $> 120$  mm。

### 3.2 显示星图分辨率的确定及 DMD 芯片的选择

显示星图视场:  $10.5^\circ \times 7.5^\circ$ ,单星张角为  $40''$ ,那么:

在  $10.5^\circ$  方向上至少应有的显示像元数:

$$(10.5^\circ \times 3600'') / 40'' = 945$$

在  $7.5^\circ$  方向上至少应有的显示像元数:

$$(7.5^\circ \times 3600'') / 40'' = 675$$

现选用的 DMD 芯片像元数为  $1024 \times 768$ ,达到上述最低像元数的要求<sup>[8]</sup>。

### 3.3 对 DLP 投影系统对比度的要求

选用的 DLP 投影系统对比度达到  $2001:1$ 。

模拟  $2 \sim 8$  等星,对比度需  $2.51^6:1 = 250:1$ 。

由此可见所选用的器件满足要求<sup>[8]</sup>。

### 3.4 主光学系统焦距的确定

根据提供的资料,已知 DMD 芯片上单个像元尺寸为  $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ ,总有效尺寸为  $17.78 \text{ mm} \times 13.34 \text{ mm}$ ,而星模拟器光学系统撇场角应  $< 10.5^\circ \times 7.5^\circ$ ,结合光学系统设计参数考虑,星模拟器光学系统设计视场标为:  $11^\circ \times 8^\circ$ 。

取边  $17.78 \text{ mm}$  为  $17.8 \text{ mm}$ ,对应  $11^\circ$  视场,有

$$17.8 / f' = \tan 11^\circ$$

解得  $f' = 91.6 \text{ mm}$ 。

焦距的选取同时也要满足对角线视场的要求,因此,亦须满足下式:

$$P / f' = \tan \omega .$$

其中  $P$  为  $10.5^\circ \times 7.5^\circ$  视场所对应的 DMD

芯片对角线长度,这里  $P$  值等于  $22.2 \text{ mm}$ 。 $\omega$  为全视场的大小,值为  $13^\circ$ 。则焦距  $f'$  应为  $96.2 \text{ mm}$ 。综合以上分析,可将系统的焦距取为  $96.2 \text{ mm}$ 。

### 3.5 最小单星张角的确定

使用单个像元作为一个星点时,单星张角为

$$\alpha = \arctan \frac{0.016 \text{ mm}}{96.2 \text{ mm}} = 34.3''$$

可见,该设计满足星模拟器单星张角优于  $40''$  的技术要求。

### 3.6 主光学系统的相对孔径

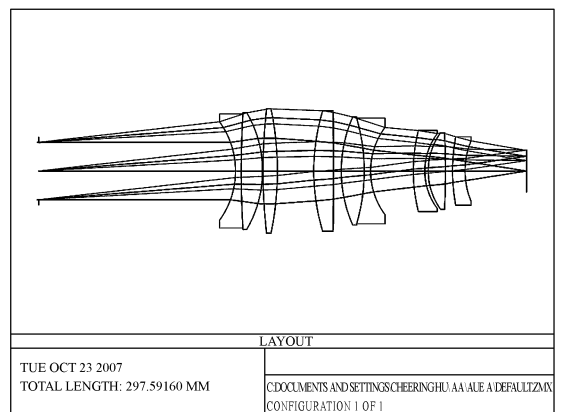
以上根据结构、单星张角及有效视场的要求,确定了入射光瞳直径和系统的焦距值。因此可得到光学系统所应具有相对孔径  $D/f'$  为:

$$D/f' = 52/96.2 \approx 1/1.85$$

### 3.7 光学系统建模及优化

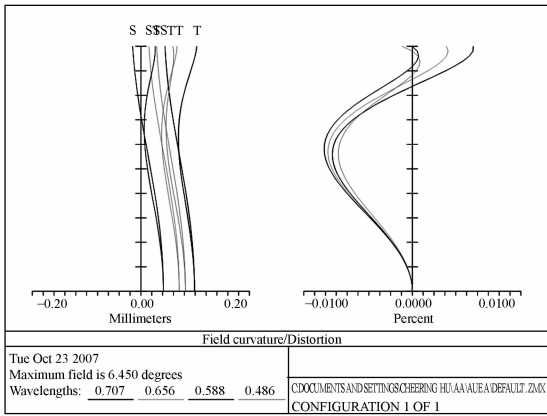
为保证星场内所有星象位置准确,能量场恒定,要求光学系统具有小畸变,平像场,复消色差的成像质量,加之较大的视场,这使设计有很大的难度。本文按全视场内任一星点经光学系统后的平行光平行度误差  $\leq 10''$ ,波段为:  $0.48 \sim 0.71 \mu\text{m}$ ,中心波长  $\lambda_0 = 0.58 \mu\text{m}$ ,并经 F 线、D 线、e 线、R 线四条谱线修正像差进行设计,以确保满足  $\Delta\omega \leq 10''$  的要求。

图 2(a)、(b)、(c)、(d) 为满足要求的远心准直物镜光学结构图、场曲和畸变曲线、点列图和横向色差曲线。



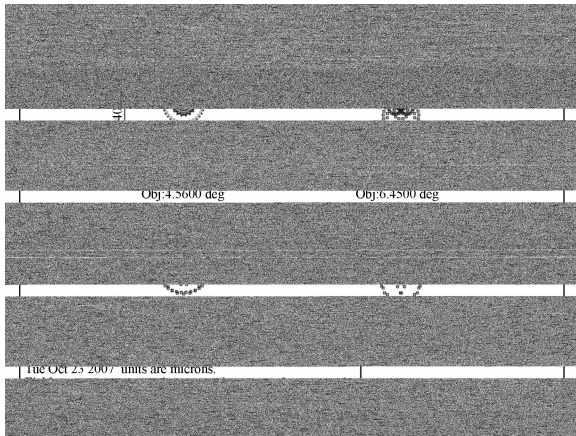
(a) 准直物镜光学结构图

(a) Optical structure graph of collimating lens



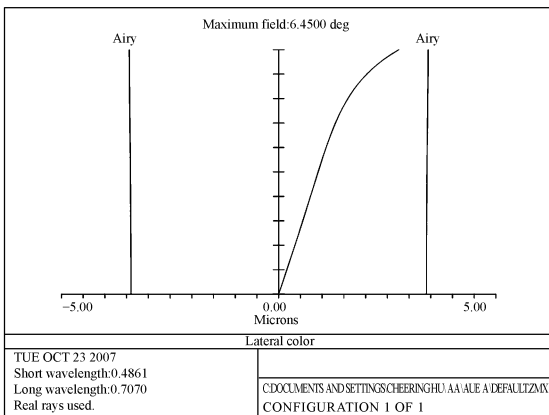
(b) 场曲和畸变曲线

(b) Curves of field curvature and distortion



(c) 光学系统点列图

(c) Spot diagram of optical system



(d) 横向色差曲线

(d) Curve of lateral color

图 2 光学系统

Fig. 2 Optical system

### 4 动态星图实现

#### 4.1 坐标系统的变换

各个星表中,恒星的方位在天球惯性坐标系中表达,而星敏感器要求星模拟器中实现的恒星位置在接收 CCD 平面上表示。这就涉及到了不同坐标系统之间的变换。

对于多数实用型地球观测卫星来说,由于分辨率等因素,少有轨道高于地球同步轨道的,不妨取卫星星下点高度为  $H_{\text{satellite}} = 30\,000\text{ km}$ 。除太阳外,距地球最近的一颗恒星(比邻星)距太阳为  $3.9 \times 10^{13}\text{ km}$ ,地球与太阳的平均距离为  $1.5 \times 10^8\text{ km}$ 。

取最近的  $D_{\text{Star-Earth}} \approx 3.9 \times 10^{13}\text{ km}$

取  $D_{\text{Satellite-Earth}} = R_{\text{Earth}} + H_{\text{Satellite}} = 6\,400\text{ km} + 30\,000\text{ km} = 36\,400\text{ km}$

星间角距偏差

$$\alpha \approx \frac{D_{\text{Star-Earth}}}{D_{\text{Star-Satellite}}} = \frac{D_{\text{Satellite-Earth}}}{D_{\text{Star-Sun}}} = \frac{36\,400}{365 \times 24 \times 3\,600 \times 300\,000 \times 4.2} \times \frac{180^\circ}{\pi} \approx 0.000\,188\,9''$$

一般星模拟器的设计要求星对角距误差在  $50''$  以内。因此,无须顾及坐标中心点由地球中心平移到卫星 CCD 平面所带来的误差,只需考虑旋转变换<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 星空的分区

读入 FK5 星表数据后,根据操作人员设置的光轴的赤经、赤纬,即可直接查找出视场内的星。若采用简单的直接搜索的方法,光轴每变化一次,就需要把星表内所有星全部检索一遍,以查找出视场内的星。但该方法在进行动态显示的时候,会浪费大量的时间。因此,本文采取对星空进行分区的方法,在有限的几个分区内查找视场内的星,以达到快速检索的目的<sup>[8]</sup>。

已知星图视场为  $10.5^\circ \times 7.5^\circ$ ,并考虑旋转角,故取视场的对角线为  $13^\circ$ 。由于姿态误差偏移,本文以  $15^\circ \times 15^\circ$  为考虑范围。经分析,将星表划分成  $7.5^\circ \times 7.5^\circ$  的子区是合适的。

赤经变化范围是  $0 \sim 360^\circ$ ,划分为 48 个区,编号为  $0 \sim 48$ ;赤纬变化在  $-90^\circ \sim +90^\circ$ ,划分为 24 个区,编号为  $0 \sim 24$ 。这样,一共有  $48 \times 24 =$

1 152个子区。文中为了表示方便,以 X 代表赤经方向区号,Y 代表赤纬方向区号。

导航星分区查找的步骤如下:

首先,计算光轴落入的子区号。

列出该子区周围的  $3 \times 3$  个子区。视场内的导航星必落在这 9 个子区内。

在这 9 个子区内,查找视场内的导航星,避免了在全天球 1 152 个子区内查找,理论运算量是未采取分区算法的  $9/1\ 152=1/128$ ,保证了星模拟器具有较短的星图采样周期。

设 9 个子区内所有导航星的赤经为  $\alpha_s$ 、赤纬为  $\delta_s$ ,光轴赤经为  $\alpha_0$ 、赤纬为  $\delta_0$ 。提取导航星公式为:

$$\begin{aligned} |\alpha_s - \alpha_0| &\leq 12^\circ \\ |\delta_s - \delta_0| &\leq 12^\circ \end{aligned}$$

### 4.3 静态星图模拟

在坐标系的设定上,以光轴为中心点,显示窗口即视场,  $10.5^\circ \times 7.5^\circ$ 。随后,根据视场内导航星的坐标与卫星旋转角,计算出导航星在星敏感器坐标系下的坐标值,再投影显示到屏幕上。

除了坐标外,还要模拟出星的星等,这就需要星等转换为灰度。最简单的方法是采用线性变换,公式为<sup>[9]</sup>

$$U_l = U_{\max} - 10(m_l - m_{\min})$$

式中,  $U_{\max}$  为预设最大灰度值,  $m_{\min}$  为星模拟器所能显示的最小星等。  $U_l$ 、  $m_l$  分别为当前星的显示灰度值与星等。

### 4.4 动态星图模拟

卫星在空间运行时,星敏感器接收到的星图是不断变化的,这就是需要进行星模拟器动态显示设计的原因。假设卫星飞行周期为 1 周/h,即  $0.1^\circ/\text{s}$ ,倾角  $\theta$  为  $60^\circ$ ,与赤道交汇点处赤经  $0^\circ$ 。在 1 h 内,赤经  $0^\circ \rightarrow 360^\circ \rightarrow 0^\circ$ ,赤纬  $0^\circ \rightarrow 60^\circ \rightarrow 0^\circ$

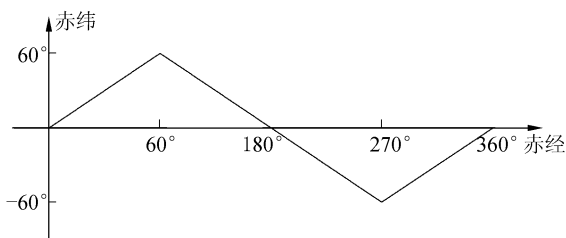


图 3 赤经、赤纬变化关系图

Fig. 3 Relationship between right ascension and declination

$\rightarrow -60^\circ \rightarrow 0^\circ \rightarrow$ 。变化关系如图 3 所示<sup>[10-11]</sup>。

### 4.5 模拟星图

利用提供的星表数据,根据上述算法,就可以利用编程软件开发出小型星模拟器的动态显示程序。本文采用 Visual Basic 6.0 开发程序,整个软件在 Windows XP 中文版环境下运行良好,满足了星敏感器的研制要求。图 4 为动态星图模拟显示软件。模拟软件中能清楚看到北斗七星(大熊座七星)的位置,因此可证明,软件的设计思路是正确的。图中的七颗较大恒星即大熊座七星。

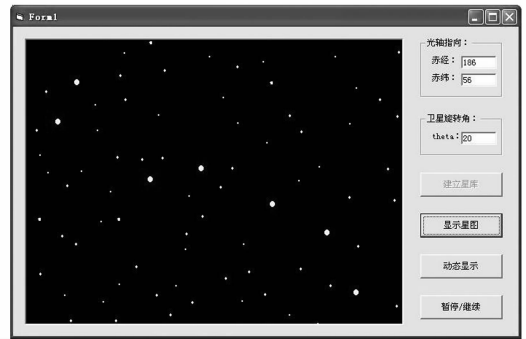


图 4 动态星图显示软件

Fig. 4 Dynamic display software for star map

## 5 结 论

本文以小型化、动态显示的工程需要为出发点,根据 DLP 显示技术的优点,选择了 DLP 显示系统作为星模拟器系统的核心。根据所选 DMD 芯片的型号规格,对星模拟器光学系统的孔径、焦距等参数进行了计算和分析,设计了满足要求的星模拟器准直光学系统,给出了星模拟器光学系统结构与像差曲线图。提出了一种在计算机上实现动态星图模拟的算法,并根据星模拟器研制任务要求,在 Visual Basic 6.0 平台上实现了动态星图算法的计算机编程。计算及软件模拟结果显示,基于 DLP 的动态星模拟器可以模拟视场为  $10.5^\circ \times 7.5^\circ$ ;星等为 2.0~8.0 等星的星空;模拟器单星张角优于  $40''$ ;采样周期可控制在毫秒量级。本文所述的星模拟器具有大视场、宽星等范围、短采样周期等优点。

## 参考文献:

- [1] 刘全国,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, L J, H ZH H. Study on detection sensitivity of APS star tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 553-557. (in Chinese)
- [2] 王兆魁,张育林. 面向空间目标监视的星图模拟器设计与实现[J]. 系统仿真学报,2006,18(5): 1195-1211.  
WANG ZH K, ZHANG Y L. Design and implementation of star pattern simulator for use of space surveillance[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(5): 1195-1211. (in Chinese)
- [3] 李春艳,李怀锋,孙才红. 高精度星敏传感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学精密工程,2006,14(4): 558-563.  
LI CH Y, LI H F, SUN C H. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 558-563. (in Chinese)
- [4] 段晓东. 全天球实时星光模拟器的设计与标定[J]. 控制工程,1997,2:23-33.  
DUAN X D. Design of real-time star simulator in whole celestial sphere[J]. *Controlling Engineering*, 1997, 2: 23-33. (in Chinese)
- [5] 许世文,龙夫年,付苓,等. 实时星场模拟器中的坐标变换[J]. 哈尔滨工业大学学报,1998,30(5): 118-120.  
XU SH W, LONG F N, FU L, *et al.*. Coordinate transformation in real-time star field simulator[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1998, 30(5): 118-120. (in Chinese)
- [6] 刘朝山,刘光斌. 星光制导中的凸多边形星图识别算法[J]. 光学精密工程,2005,13(1):88-94.  
LIU CH SH, LIU G B. Convex polygon star pattern identification algorithm for celestial guidance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 88-94. (in Chinese)
- [7] DANA D, WALTER D, JOHN S. Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications[J]. *SPIE*, 2003, 4985(1): 14-25.
- [8] 王南华,张陶,赵旭行. 小型动态星模拟器设计[J]. 航天控制,1996,4:13-20.  
WANG N H, ZHANG T, ZHAO X X. Design of small dynamic star simulator[J]. *Spaceflight Control*, 1996, 4: 13-20. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 巩岩. 利用恒星标校卫星激光测距经纬仪指向精度[J]. 光学精密工程,2000,8(3):258-260.  
GONG Y. Calibration the pointing precision of satellite laser ranging theodolite by observing stars[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 258-260. (in Chinese)
- [11] 唐建国,袁家虎,吴钦章. 液晶光阀星图模拟设计与实现[J]. 光电工程,1999,26(增):75-78.  
TANG J G, YUAN J H, WU Q ZH. Design and implementation of star pattern simulation with liquid crystal light valve[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, 26(Supp.): 75-78. (in Chinese)

作者简介:巩 岩(1968—),男,博士,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员。主要研究方向为虚拟显示技术,光学系统设计和短波段光学技术。E-mail: gongy@sklao. ac. cn

胡宜宁(1982—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生。主要研究方向为虚拟显示技术。E-mail: cheering82@163. com

赵 阳(1982—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生。主要研究方向为光学系统设计。E-mail: juvenus-xx@126. com