

星敏感器地面标定设备的设计

孙高飞¹, 张国玉^{1,2}, 高玉军³, 王凌云^{1,2}, 苏 拾^{1,2}, 付 芸^{1,2}, 王向东⁴

- (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 130022;
4. 晋西工业集团有限责任公司, 山西 太原 030027)

摘 要: 为了实现星敏感器的地面标定试验, 设计一套视场大且星间角距模拟精度高的星敏感器地面标定系统, 对标定系统的组成、光学系统设计和模拟仿真精度等进行研究。根据星敏感器的地面标定要求介绍系统组成, 提出实现星间角距模拟精度优于 20" 的方法; 采用新型显示器件 LCOS 作为星图显示器, 通过像面拼接的方法扩大视场, 并据此利用 Zemax 软件设计光学系统。在原有测量方法的基础上, 给出地面标定设备的精度评价方法。并提出一种能够提高星间角距模拟精度的星点修正方法。实验结果表明: 星敏感器地面标定设备的星间角距模拟精度小于 20", 满足对星敏感器进行地面标定试验的要求。

关键词: 星敏感器; 标定; 星模拟器; 仿真精度

中图分类号: V416.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2822-06

Design of star sensor ground calibration equipment

Sun Gaofei¹, Zhang Guoyu^{1,2}, Gao Yujun³, Wang Lingyun^{1,2}, Su Shi^{1,2}, Fu Yun^{1,2}, Wang Xiangdong⁴

- (1. College of Opto-electronic 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;
4. Jinxi Industries Group Co. LTD, Taiyuan 030027, China)

Abstract: In order to realize the ground calibration tests of star sensors, a ground calibration system of large field of view and high angular distance between stars' simulation accuracy was designed, the composition of calibration system, optical system design and simulation precision were studied. According star sensors ground calibration requirements the system components was introduced, a method to realize the angular distance between stars' simulation precision better than that of 20" was put forward. Using the new display LCOS as star chart display, the image plane field by splicing methods was expanded, and Zemax software was used to design the optical system accordingly. On the basis of the original measuring method, the evaluation method of ground calibration equipment precision was given. And a way was proposed to improve the angular distance between stars' simulation accuracy by the method of star correction. The

收稿日期: 2013-02-02; 修订日期: 2013-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(40905011)

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

导师简介: 张国玉(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 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。

Email: zh_guoyu@yahoo.com.cn

experimental results show that the star sensor ground calibration equipment of the angular distance between stars' simulation precision is less than $20''$, meet the star sensor for ground calibration test requirements.

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

0 引言

随着国内航天事业的迅猛发展,星敏传感器以其精确的量测精度,在航天器导航方面,受到越来越多的关注。星敏传感器的功能是观测恒星的角位置,通过卡尔曼滤波的方法确定航天器的位置和速度。而星敏传感器在研制时,不可避免地存在多个误差源,如光学系统误差、机械结构误差、电学线路误差和算法误差等等。那么,在星敏传感器投入使用前,就必须提出一种对其精度进行标定的设备。考虑到航天试验不仅难度大,而且成本太昂贵,因此国内多采用半物理仿真技术进行试验研究。半物理仿真系统主要包括由星敏传感器、星模拟器、轨道发生器和导航计算机等构成。与传统的方法相比,它不仅验证星敏传感器样机的参数和性能,更可以验证先进的滤波算法和天文导航方法等。

星模拟器作为半物理仿真系统的重要组成部分,它也是验证和标定星敏传感器的主要设备。按工作方式的不同分为标定型星模拟器和功能检测型星模拟器^[1]。标定型星模拟器的实质是一个平行光管,在焦面位置放置星点板,经光源照射后,星点板就可以通过平行光管成像到无穷远来模拟星图。这种星模拟器的结构简单,没有实时性要求,但对单星张角、星点位置和星等的模拟精度要求很高。功能检测型星模拟器的主要功能则是可以在地面上进行实时的星图模拟,产生的实时星图与待测星传感器的工作状态相匹配,可以对星传感器的星点提取和星图识别算法进行功能测试。这种星模拟器结构较为复杂,对星图刷新率和模拟星图的星间角距精度要求高。且作为星模拟器显示核心器件的光阀,国内研制水平很低,同时受国外对国内的出口限制,因此制约了功能检测型星模拟器的发展。

文中设计功能检测型星模拟器,星图显示部分采用了 LCOS 器件,并对其提出拼接使用的新方法,按星传感器的要求,在视场范围内形成成像在无穷远的高精度模拟星图。并且对星点位置提出一种实

时修正的方法,以保证星图模拟精度的要求。

1 星模拟器的组成和工作原理

功能检测型星模拟器^[2]作为星敏传感器的地面标定设备,是为了能更好地模拟出星敏传感器在轨工作的实际状态。它主要由准直物镜组件、LCOS 组件、光源(背光板)、电源和安装支架、接口及驱动电路、星模拟器控制计算机系统等组成,其总体结构如图 1 所示。

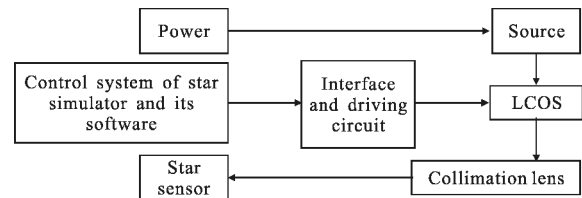


图 1 功能检测型星模拟器总体结构图

Fig.1 Schematic layout of star simulator

由星模拟器根据姿轨控制仿真动力学计算机提供星敏传感器坐标轴在惯性坐标系下的指向,由星表数据生成当前时刻星敏传感器所能观测到的星图数据,再通过接口及驱动电路在 LCOS 显示器件上产生星图。经过准直光学系统汇聚后形成平行光,由此完成对来自无穷远天空的星图模拟。

2 光学系统设计

2.1 光学系统的特点

为了使星模拟器的所有星图信息都能传递给星敏传感器,应保证星敏传感器和星模拟器的光轴一致,并且星模拟器的出瞳应该与星传感器的入瞳重合,符合光瞳衔接原则。另外,由于系统中存在偏振光学元件,必然带来偏振像差。为了减小偏振像差,选用远心系统,使各视场的主光线都平行于光轴,平均偏振像差对每个视场都是等同的。同时控制入射在偏振元件上的光线角度,以控制偏振度保证各视场的偏振度最小,并且色彩和能量的均匀性良好,即使星模拟器沿轴向窜动也不会影响测量精度。最后,星模拟器作为高精度星敏传感器的标定设备,光学系统要把保证星像点具有较高的位置精度作为设计重点。

2.2 LCOS 器件的选定

采用 LCOS 微显示器投影技术^[3],它结合了半导体集成电路的 CMOS 工艺技术和主动矩阵液晶技术,在显示分辨率方面具有突出的优势,比传统的液晶光阀具有更高的对比度,且其像素尺寸小,可以做到高精度的星点定位。同时提出 LCOS 的拼接技术来扩大视场,克服了国外对我国的出口限制,为提高模拟器的模拟精度开创了新途径。

考虑到 LCOS 器件^[4]的照明特点,在光学系统中必须留有放置偏振分光棱镜(PBS)的空间。同时,PBS 的选用^[5-6]也决定了光学系统的相对孔径。通过前期调研得知,目前由 3M 公司制造的 PBS 采用新型的多层薄膜技术,最大可承担的相对孔径为 1/2。若光学系统要求视场为 $10.2^\circ \times 10.2^\circ$,物镜口径为 30 mm,则焦距最小可做到 60 mm,即:

$$f = \frac{\sqrt{2} a}{2 \tan \frac{\theta}{2}} = \frac{\sqrt{2} a}{2 \tan \frac{14.425}{2}} = 60 \text{ mm} \quad (1)$$

式中: a 为 LCOS 的短边,经计算得 a 最小值为 10.74 mm。目前可购买的 LCOS 器件单片无法满足尺寸要求,由此提出对其进行拼接^[7]使用,拼接原理如图 2 所示。

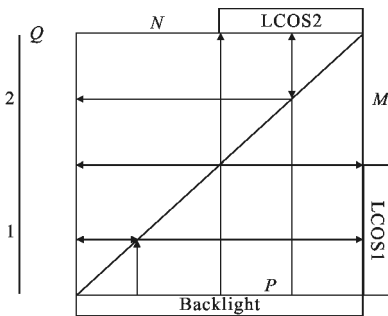


图 2 LCOS 器件的拼接原理图

Fig.2 Principle diagram of splicing for LCOS

将背光板、PBS、LCOS1 和 LCOS2 如图放置。根据 PBS 透射 P 偏振光并反射 S 偏振光的性能特点,背光板发出的光经过 PBS 后,S 偏振光被反射以点亮 LCOS1,P 偏振光被透射以点亮 LCOS2。被点亮的两块 LCOS 再经过 PBS 在 Q 面成像,其中 LCOS1 经过 PBS 后 P 偏振光被透射,在 Q 面形成像 1;而 LCOS2 经过 PBS 后 S 偏振光被反射,在 Q 面形成像 2。最后通过对两块 LCOS 位置的精准调节,完成其在 Q 面的像拼接。拼接后的技术参数如表 1 所示。

表 1 LCOS 器件的技术参数表

Tab.1 Technology parameter table of LCOS

Item	Value
Resolution	1 920×1 920
Contrast	2 000:1
Aperture ratio	90%
Pixel size/ μm	8.1
Size/ mm^2	15.552×15.552
Response time/ms	<11

2.3 准直物镜焦距的设计

根据星图视场要求和所选用的 LCOS 器件的有效尺寸来确定光学系统的焦距 f' 。已知 LCOS 单个像元尺寸为 $8.1 \mu\text{m}$,工作尺寸为 $15.552 \text{ mm} \times 15.552 \text{ mm}$,其最大线对尺寸 L 通过公式(2)计算为:

$$L = \sqrt{15.552^2 + 15.552^2} = 21.994 \text{ mm} \quad (2)$$

星敏感器视场为 $10^\circ \times 10^\circ$,要求星模拟器能模拟星图的视场范围为 $10.2^\circ \times 10.2^\circ$,可通过公式(3)计算出准直光学系统焦距 f' 为:

$$f' = \frac{L}{2 \tan \left(\frac{\theta}{2} \right)} = \frac{21.994 \text{ mm}}{2 \tan \left(\frac{10.2}{2} \right)} \approx 86.898 \text{ mm} \quad (3)$$

根据 $f' = 86.898 \text{ mm}$ 可获得的有效模拟视场优于 $10^\circ \times 10^\circ$,考虑到像差的影响,实际设计焦距为 $f_{\text{设计}} = 86.86 \text{ mm}$ 的平行光管。

2.4 光学系统设计结果

考虑到 LCOS 器件需要偏振光点亮的特性,故在光学系统应留有放置 PBS 的位置。最终设计了一个焦距 $f' = 86.86 \text{ mm}$,入瞳直径 $D = 30 \text{ mm}$,相对孔径 $D/f = 1//2.8$,视场角 14.431° ,工作光谱范围为 470~760 nm 的光学系统,采用的 LCOS 显示器件的像元尺寸为 $8.1 \mu\text{m} \times 8.1 \mu\text{m}$,光学系统的尼奎斯特频率 $f_N = 61.73 \text{ lp/mm}$ 。如图 3 所示为光学系统图。

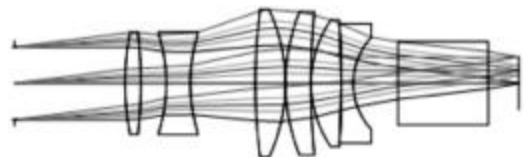


图 3 光学系统二维结构图

Fig.3 Layout of optical system

由于星模拟器的光学系统属于非成像系统,在像质评价方面主要考察出瞳处光线的准直度。同时,

因为将星间角距作为评价星模拟器精度的指标,则星点的位置精度就相当关键,故像质评价中应重点考虑质心偏移和畸变造成的影响。下面分别给出的是光学系统的点列图,畸变曲线,能量集中度曲线,球差及色差曲线和调制函数曲线。

由图 4 可知,在全视场中能量中心与主光线位置偏差最大值为 $0.2 \mu\text{m}$,根据系统的实际焦距 86.86 mm 可得,该视场下的能量中心与主光线的位置偏差所产生的角度误差为 $0.48''$ 。由图 5 可知,全视场的最大畸变值小于 0.05% ,可保证星点定位精度。由图 6 可知,在直径 $8.1 \mu\text{m}$ (LCOS 的像元尺寸)的区域内,能量集中度均优于 95% ,可认为光学系统的能量集中度满足设计及使用要求。由图 7 可知,系统在 $0.707 \mu\text{m}$ 带校正了主光线球差,以及波长为 $0.47 \mu\text{m}$ 和 $0.76 \mu\text{m}$ 的两色光的位置色差,但系统仍存在二级光谱^[8]。将系统的二级光谱与焦深进行对比后发现,焦深以中心波长计算为 $14.44 \mu\text{m}$,而二级光谱小于 $10 \mu\text{m}$,在焦深范围之内,所以满足使用要求。由图 8 可知,所有视场在 62 lp/mm 时,MTF 值均优于 0.7 。由此可判定,系统的成像质量良好。

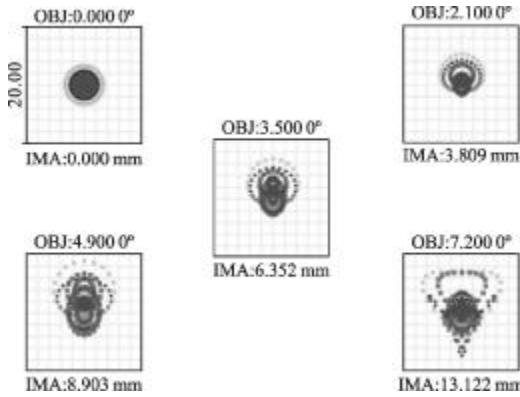


图 4 点列图

Fig.4 Spot diagram

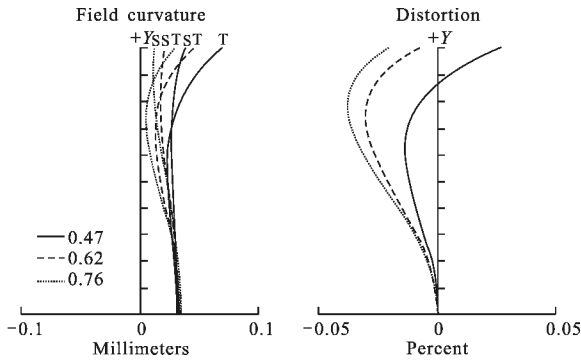


图 5 场曲/畸变曲线

Fig.5 Field curvature and distortion

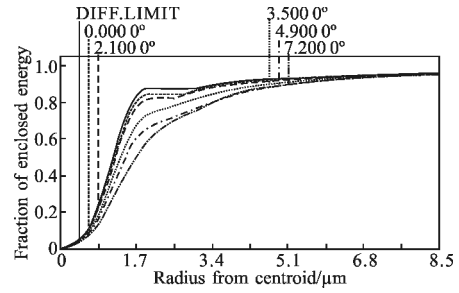


图 6 几何能量集中度曲线

Fig.6 Geometric energy concentration curve

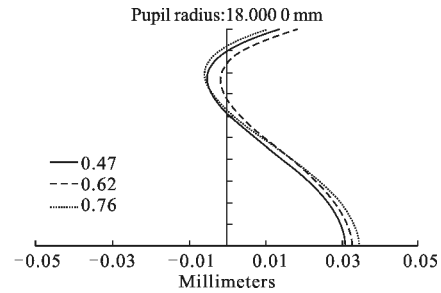


图 7 球差和位置色差曲线

Fig.7 Spherical aberration and chromatic aberration curve

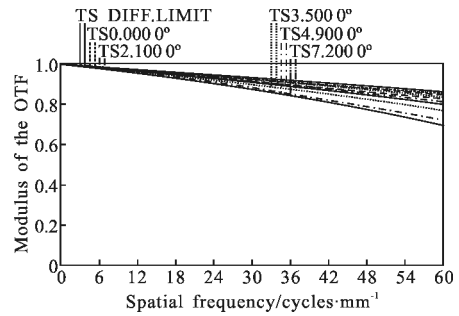


图 8 调制传递函数曲线

Fig.8 MTF curves

3 星点位置修正方法及结果分析

由于星模拟器的仿真精度以星间角距指标衡量,而星间角距值取决于星点位置,所以应对显示的星点位置进行测量,并且计算是否符合星间角距的理论值。若被测星点位置经计算不符合理论星间角距时,应考虑造成这种后果的多个误差原因,如 LCOS 器件自身的加工精度限制,星模拟器光学系统及机械结构的加工与装配误差等。综合考虑各种误差因素后,提出一种针对以 LCOS 作为显示器件的星模拟器星点修正方法^[9-10]。

首先建立星间角距的测量模型,如图 9 所示,表示任意两点在空间的关系。图中 α 表示被测点的方

位角, β 表示被测点的俯仰角, 那么则可得到任意点星间角距和其各自俯仰角和方位角符合如公式(4)的关系, 并且最终计算得到星间角距测量值。

$$\cos \gamma = \frac{f}{\sqrt{\left(\frac{f \tan \beta}{\cos \alpha}\right)^2 + (f \cos \alpha)^2}} \quad (4)$$

式中: γ 为任意点星间角距; f 表示测试点到被测板中心的距离, 即焦距值。

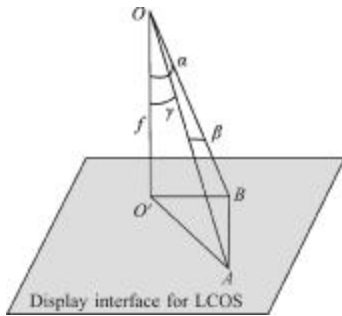


图 9 星间角距的测量模型示意图

Fig.9 Schematic diagram of angular distance between stars

然后将星间角距的测量值与星间角距的理论值

$$\cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} = \frac{(x_b - x_0)^2 + (y_b - y_0)^2 + f^2 + (x_a - x_0)^2 + (y_a - y_0)^2 + f^2 - (x_a - x_b)^2 - (y_a - y_b)^2}{2 \sqrt{(x_b - x_0)^2 + (y_b - y_0)^2 + f^2} * \sqrt{(x_a - x_0)^2 + (y_a - y_0)^2 + f^2}} \quad (6)$$

从公式(4)、(5)、(6)中可以看出, 星间角距值的大小跟 f 值密切相关。那么在星点修正时, 应重点考虑如何利用 f 在 LCOS 显示屏上不同位置的微小变化来重新计算各点坐标值, 直至各点的星间角距值满足模拟精度。

在修正前, 通过 LabView 软件控制 LCOS 有规律的显示多个星点。首先测量任意两点的星间角距并计算其与理论星间角距的误差值; 然后观察误差值在整幅星图中的分布规律, 对星间角距按分区的方法进行修正, 根据公式(7)得到 f 在不同区域的实际值, 再根据公式(8)重新计算各点在 LCOS 上对应像素位置的线性值; 最后, 复测各点并利用公式(4)计算星间角距值是否满足模拟精度。

$$f_{\text{实}} = \frac{f_{\text{理}} \gamma_{\text{理}}}{\gamma_{\text{实}}} \quad (7)$$

式中: $f_{\text{实}}$ 为对应区域实际 f 值; $f_{\text{理}}$ 为系统理论 f 值; $\gamma_{\text{理}}$ 为星间角距理论值; $\gamma_{\text{实}}$ 为星间角距实际值。

$$x_{\text{实}} = \frac{f_{\text{实}} \gamma_{\text{理}} \cos \theta}{f_{\text{理}}} \quad y_{\text{实}} = \frac{f_{\text{实}} \gamma_{\text{理}} \sin \theta}{f_{\text{理}}} \quad (8)$$

比较, 若不理论值, 则需要修正相应星点在 LCOS 上的点亮位置, 建立像素点位置修正模型如图 10 所示。

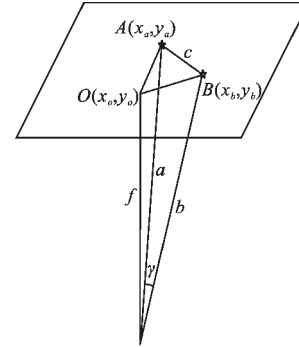


图 10 星间角距的修正模拟示意图

Fig.10 Diagram of angular distance between stars for correction simulation

其中任意两点 (x_a, y_a) 和 (x_b, y_b) 表示对应点亮像素位置的线性值, 由公式(5)计算可得, (x_0, y_0) 为原点 0 的坐标, 利用公式(6)可计算出实际的星间角距。

$$x = f \tan \alpha \quad y = \frac{f \tan \beta}{\cos \alpha} \quad (5)$$

式中: $\gamma_{\text{理}}$ 为矢径的理论值; θ 为方向角。

下面给出某组修正曲线和修正结果。经过对大量星点的测量后, 利用公式(4)计算得到实际星间角距值, 与理论值比较得到星间角距的误差值, 观察其分布特点后采用按半径 R 画圆分区的方法, 对 f 值进行曲线拟合并重新计算各点对应的坐标位置。其中, 半径 $0 < R < 16$ 。根据 f 值在不同半径下的取值, 得到修正方程如公式(9)所示, 方程的拟合曲线如图 11 所示。

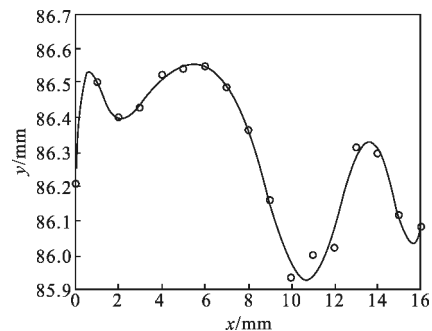


图 11 焦距的修正系数拟合曲线图

Fig.11 Coefficient fitting curve of focal length

$$y = -3.5405e-008x^{10} + 2.9962e-006x^9 + \\ -0.00010758x^8 + 0.0021427x^7 - 0.026x^6 + \\ 0.19892x^5 - 0.95803x^4 + 2.7877x^3 - 4.4136x^2 + \\ 3.0233x + 240.21 \quad (9)$$

将上述修正方程写入 LabView 后, 点亮修正后的星点, 计算星间角距, 实验数据如表 2 所示。

表 2 修正后的星间角距误差

Tab.2 Error of angular distance between stars after correction

Star point	Theory of angular distance between stars/(°)	Angular distance between stars before correction / (°)	Error value / (")	Angular distance between stars after correction / (°)	Error value / (")
1	2.548 6	2.541 1	27.141 0	2.553 5	-17.497 0
2	2.059 9	2.053 9	21.408 4	2.063 8	-14.148 0
3	2.905 6	2.897 2	30.144 6	2.911 1	-19.939 3
4	1.104 1	1.101 5	9.274 0	1.106 2	-7.587 9
5	0.631 8	0.63	6.607 2	0.633	-4.342 8
6	0.710 1	0.708 1	7.375 4	0.711 5	-4.880 9
7	1.288 4	1.281 2	25.931 2	1.290 9	-8.853 8
8	0	0	0	0	0
9	1.431 9	1.421 8	36.415 6	1.434 6	-9.839 1
10	1.555 1	1.545 6	34.147 7	1.558 1	-10.684 9

结果表明, 实际星间角距与理论星间角距的偏差得到了良好的改善, 星图仿真精度可以达到技术指标要求。由此可见, 上述修正方法可以提高星点位置的仿真精度。

4 结 论

文中根据星敏器地面标定设备的要求, 提出了高精度星模拟器的设计方案, 并介绍了系统组成和工作原理。然后研究了光学系统的设计以及提高仿真精度的方法。最后, 给出了星点位置的修正方法。实验结果表明: 星模拟器的星间角距模拟仿真精度小于 20", 基本满足对星敏器进行地面标定的要求。

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. 星敏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. 成像器噪声对星敏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. 利用仿真星图的星敏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. 利用星角距对星敏器主距进行标定的新方法[J]. 半导体光电, 2009, 30(5): 755-759.