0254-6124/2014/34(6)-887–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Liu Shi, Gao Yujun, Xu Ke. Star position correction of dynamic star simulator based on distortion effect (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 887-893, doi:10.11728/cjss2014.06.887

星敏感器光谱探测能力用地面模拟测试系统设计

孙高飞[1,2] 张国玉[1,2] 刘 石[1,2] 高玉军[3] 许 可[4]

1(长春理工大学光电工程学院 长春 130022)

2(吉林省光电测控仪器工程技术研究中心 长春 130022)

3(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

4(西安工业大学光电工程学院 西安 710072)

摘 要 为实现对星敏感器光谱探测能力的测试和标定, 研制了一套可模拟恒星光谱的地面标定系统, 要求其光谱模拟精度优于 10%. 采用光谱分布可控、光强可调的模拟照明系统作为地面标定系统的核心器件来模拟恒星光谱变化, 设计高成像质量准直光学系统使模拟星图成平行光出射, 在光学系统出瞳处产生星图, 完成具有恒星光谱信息的高精度星图模拟. 进而利用 Lighttools 建立标定系统的光谱仿真模型, 仿真结果表明恒星光谱模拟精度优于 10%.

关键词 光谱模拟, 地面标定, 光学系统, 光谱模拟精度

中图分类号 V 524.3

Star Position Correction of Dynamic Star Simulator Based on Distortion Effect

SUN Gaofei[1,2] ZHANG Guoyu[1,2] LIU Shi[1,2] GAO Yujun[3] XU Ke[4]

1(*Photoeletric Engineering College, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022)

2(*Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun* 130022)

3(*Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Education, Changchun* 130033)

4(*School of Photoelectrical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an* 710072)

Abstract In order to realize the testing and calibrating of star sensor spectral detection capability, a set of ground calibration system which can simulate the stellar spectra is developed, and the stellar simulation accuracy is required to be better than 10%. Spectral distribution controllable and light intensity adjustable light simulation system is adopted to be the core device to simulate changes in stellar spectra, collimating optical system with high image quality is designed to make the star map exit parallel light and present the star map at the exit pupil of optical system, then the high accuracy star map simulation with stellar spectra information is completed. Finally, using Lighttools,

2013-12-30 收到原稿, 2014-06-04 收到修定稿

E-mail: sungaofei1985516@163.com

the spectral simulation model of calibration system is established and simulation results show that the stellar spectra simulation accuracy is better than 10%.

Key words Spectral detection, Ground calibration, Optical system, Spectra simulation accuracy

0 引言

星敏感器作为一种高精度空间姿态光学敏感器, 在空间领域得到了广泛应用. 随着空间科学技术的不断发展, 对星敏感器的测量精度提出了越来越高的需求, 同时还要求其具有较强的星光谱探测能力.

星敏感器地面标定系统主要用于对星敏感器进行功能测试和性能检测. 传统的星敏感器地面标定系统主要关注星图模拟精度, 并在一定程度上满足了大视场、高精度、高动态且小型化、轻量化的使用要求 [1]. 但是对于星图点亮方式, 受现有技术手段和工艺限制, 多采用背光板作为光源, 仅实现了相对星等的亮度模拟, 并没有模拟恒星光谱信息, 导致星敏感器在地面标定阶段无法对其恒星光谱探测能力进行高精度标定 [2].

针对上述问题, 本文对具有恒星光谱模拟功能的星敏感器地面标定系统进行了研究. 采用恒星色温曲线模拟技术和星点位置修正技术, 模拟无穷远处若干个具有固定星内夹角的恒星发出的平行光及其光谱型和亮度. 将其作为测试基准, 用来验证星敏感器光谱探测能力, 并对星敏感器进行功能测试和指标检验 [3].

1 标定系统的组成与工作原理

星敏感器光谱探测能力用地面标定系统可以提供恒星色温模拟和精确的星间角距模拟. 在传统星敏感器地面标定系统基础上 [4−5], 建立如图 1 所示的系统总体结构.

从图 1 可以看出, 光谱分布可控光强可调模拟照明系统由宽光谱光源灯阵系统、光源色温模拟与控制系统、积分球与光谱辐射计、恒星星等模拟与控制系统以及光源稳定与控制系统等组成, 用于模拟恒星的光谱、色温及星等; 星图显示系统由 6 个刻有不同星图图案的星点板组成, 用于模拟不同星图以及恒星位置; 模拟器控制计算机系统由计算机、显示器、星图模拟器软件、通信接口、运动控制卡及其附件、电缆等组成, 用于实现星点色温模拟、星等辐亮度控制等功能; 宽光谱平行光管由准直系统、镜筒、镜头盖、支架、系统支撑机构等组成, 用于模拟来自无穷远的恒星. 配合高稳定性光学隔振平台和多维光学调整架, 实现地面标定系统各主要组成部分的连接.

由宽光谱光源发出波长覆盖 350~800 nm 的光线, 经电控可变光阑控制光强后, 再由滤光片进行滤波处理, 形成具有一定中心波长和谱带宽度的光. 将光线全部投射至积分球内进行混光, 利用光谱辐射计实时监测混光后的色温曲线, 调节光源亮度以及光阑口径, 直至产生模拟所需的色温曲线. 经过调制的光源照亮位于高成像质量准直光学系统焦面位置的星点板, 星图以平行光的形式出射, 在光学系统的出瞳位置形成一幅模拟星图, 由此实现具有真实星光谱特性且来自于无穷远的恒星模拟 [6−7].

2 高成像质量准直光学系统设计

为保证地面标定系统既能够模拟恒星距离又具有较高的星间角距精度, 利用 Zemax 软件设计了高成像质量准直光学系统 [8−9]. 根据星敏感器的地面标定要求, 高成像质量准直光学系统应为出瞳外置, 并且畸变小于 0.05%, 倍率色差优于 5 μm, MTF 优于 0.5.

2.1 设计结果

设计的高成像质量准直光学系统焦距为 84.94 mm, 视场为 22.4°, 波长范围 500~800 nm, 出瞳

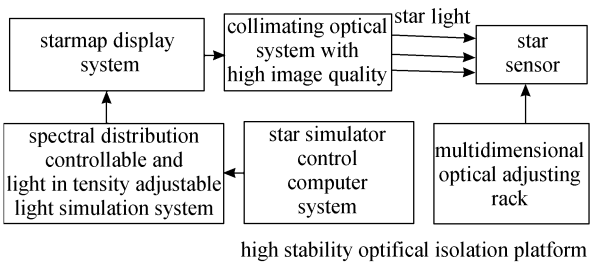


图 1 地面标定系统组成

Fig. 1 Ground calibration system chart

口径为 20 mm, 出瞳距为 70 mm, 后截距为 10.99 mm, 系统总长 143.93 mm, 像高 42.74 mm, 光学系统光路如图 2 所示.

2.2 像质评价

为反映光学系统的成像情况, 分别用场曲和畸变曲线、倍率色差曲线、MTF 曲线以及点列图来评价各个视场的成像质量, 如图 3~6 所示.

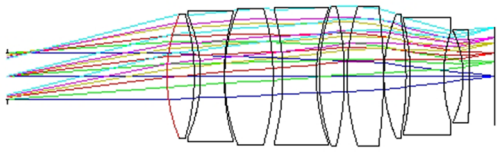


图 2 光学系统光路

Fig. 2 Layout of optical system

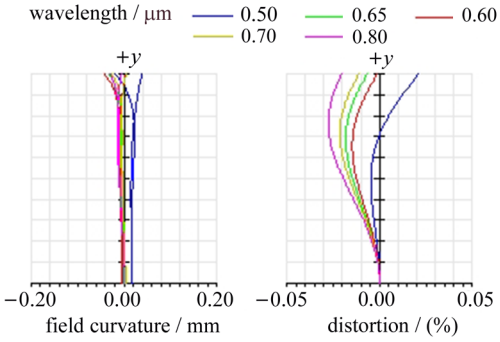


图 3 场曲和畸变曲线

Fig. 3 Field curvature and distortion

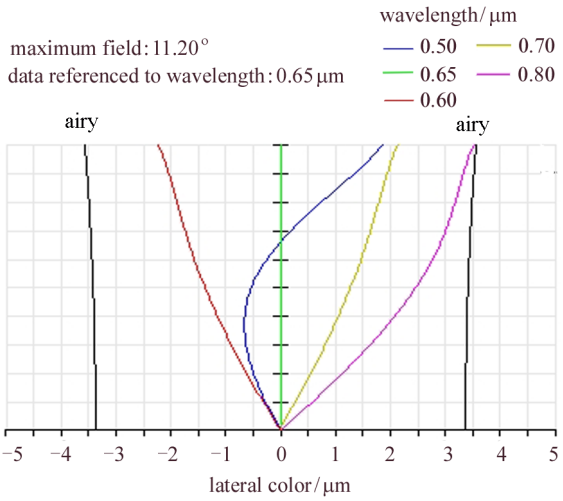


图 4 倍率色差曲线

Fig. 4 Lateral chromatism

3 光谱分布可控光强可调模拟照明系统设计

光谱分布可控光强可调模拟照明系统作为地面标定系统的关键组成部分, 不但要实现 3900 K, 4800 K 和 6500 K 的色温模拟, 而且要满足 −2 mV~+6 mV 的星等模拟.

3.1 宽光谱光源灯阵系统设计

宽光谱光源灯阵系统为光谱分布可控光强可调模拟照明系统提供光源. 该系统由氙灯、卤钨灯、椭球反射镜、电控可变光阑、反射镜及合光棱镜等组成, 如图 7 所示.

由驱动电路电流驱动光源发光, 作为整个星图模拟器系统的总光源. 氙灯的光电参数一致性好, 在寿命期内光谱能量分布也几乎不变, 工作状态受外界条件变化的影响小; 卤钨灯具有较强的发光强度, 光谱范围很宽, 覆盖从远紫外到远红外区域, 具有很好的稳定性和较长的使用寿命, 配以降压条件使用, 其发光强度和工作寿命将得到很大程度提高. 配合采用椭球聚光镜、电控可变光阑、合光棱镜和反射镜, 可保证光束经过会聚和初步混光调节后进入积分球.

3.2 光源色温模拟与控制系统设计

光源色温模拟与控制系统通过调节宽光谱光源灯阵发出光线的光谱分布和光强分布, 来实现对光源的色温模拟. 其中对于光源的光谱分布调节是通过

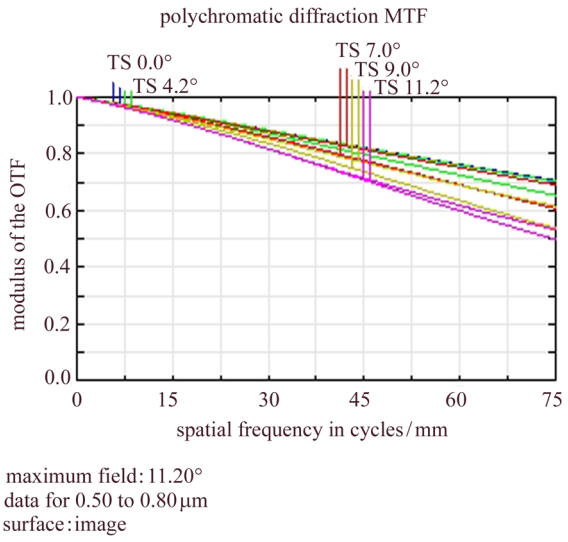


图 5 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curve

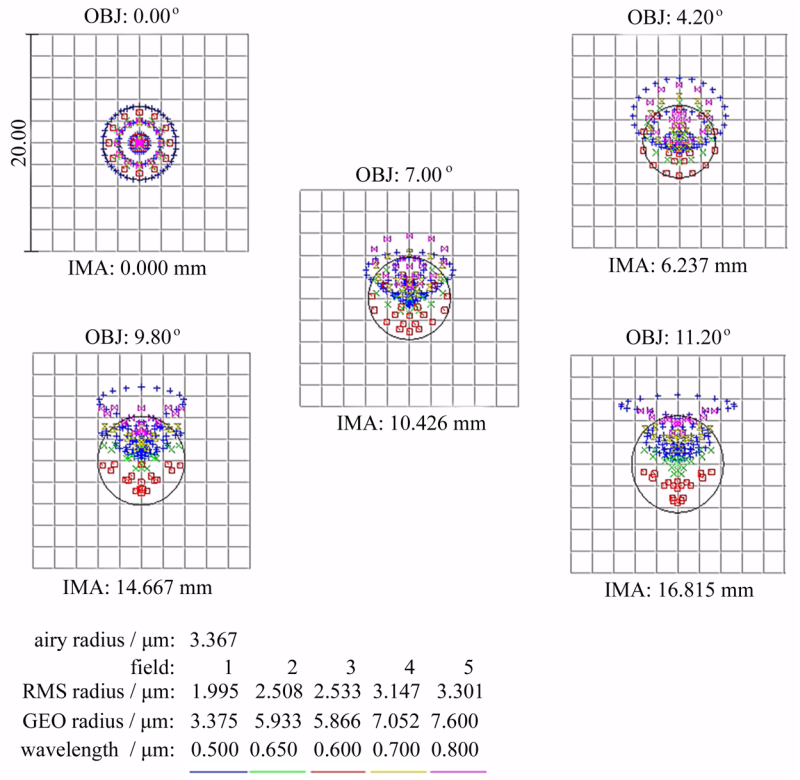


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

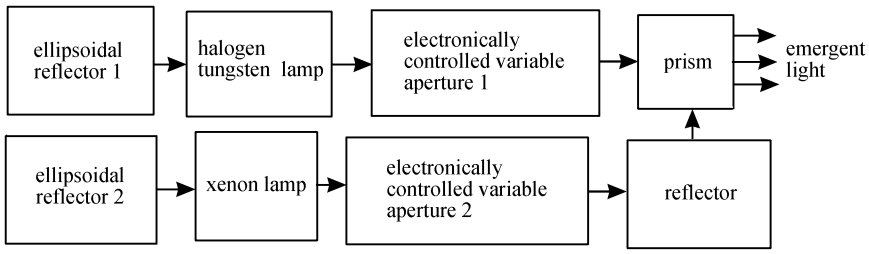


图 7 宽光谱光源灯阵系统组成

Fig. 7 Structure diagram of wide spectrum light source array system

设计在一定波长范围内具有特定透过率的滤光片来实现的.

根据普朗克公式可以计算出任意温度 T 时的普朗克光谱分布曲线, 一定波长及温度下的黑体辐射度

$$M_0 = \frac{C_1}{\lambda^5}\frac{1}{\mathrm{e}^{C_2/\lambda T}-1}. \tag{1}$$

式中, λ 为波长, T 为温度, C_1 为第一辐射常数, C_2 为第二辐射常数.

根据普朗克公式可以得到不同温度下黑体辐射在色坐标 (1960UCS) 中的色度 $(u_{\mathrm{T}},v_{\mathrm{T}})$ 随温度 T 的变化轨迹; 根据光谱谱线计算光源在色坐标 (1960UCS) 中的色度 $(u_{\mathrm{s}}, v_{\mathrm{s}})$; 根据相关色温 CCT 的定义, 采用逐次逼近方法, 寻找在黑体辐射轨迹中与光源色度坐标最近的点, 该点的黑体辐射温度即为光源的相关色温 CCT, 该点与光源色坐标之间的距离为 D_{uv}. 以温度 3900 K 时为例, 分别计算 5 nm 带宽下, 不同波长在增幅分别为 1%, 2%, 5% 和 10% 时对色度坐标和色温的影响, 如图 8 和图 9 所示.

从图 8 和图 9 可以看出, 最终的影响效果是带宽和幅值的总体线性累加, 而不同波长处的影响是具

有非线性权重的. 因此可以得到不同波长下的权重系数 (见图 10).

从图 10 可以看出, 不同色温下的权重曲线不同, 有三处峰值, 即二个正峰和一个负峰, 对应于配色函数 ($x_{\rm bar}$, $y_{\rm bar}$, $z_{\rm bar}$). 也就是说色温越低时, $y_{\rm bar}$ 越起主要作用, 第二个正向峰值位置也就越接近 $y_{\rm bar}$ 的峰值位置; 色温越高时 $z_{\rm bar}$ 越起主要作用, 第一个正向峰值位置也就越接近 $z_{\rm bar}$ 的峰值位置. 这是 Planck 轨迹上的点在色度坐标中移动时在马蹄形三个维度投影分量变化所致. 进而得到配色函数如图 11 所示.

将原始灯的谱线减去理想 Planck 曲线再除以对应的 Planck 曲线, 有

$$R = [360\,\text{nm}\ 830\,\text{nm}L(\lambda) - P(\lambda), T]/P(\lambda, T) \cdot c(\lambda, T). \tag{2}$$

即可获得灯谱在对应不同波长下与理想普朗克曲线变化的百分数; 之后得到的数据乘以对应的权重系数, 再对所有波长下的值求和.

式 (2) 中, $L(\lambda)$ 为灯谱线, $P(\lambda, T)$ 表示温度为 T 时, 根据 Planck 公式计算的理想黑体辐射曲线, $c(\lambda, T)$ 表示温度为 T 时的色温影响权重系数. 使得 R 达到最小, 即是灯的谱线控制最优结果. 根据最优结果设计滤光片, 可实现光谱色温模拟.

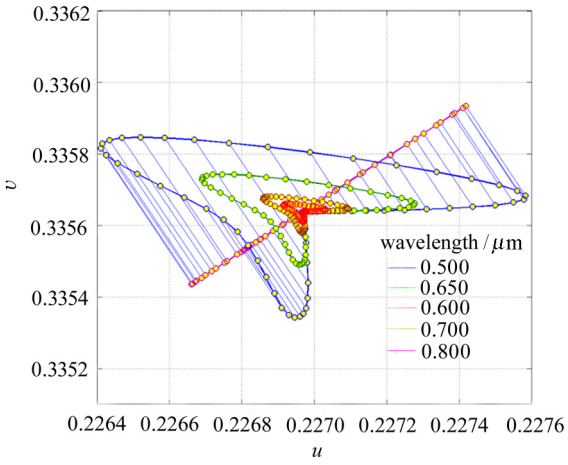


图 8 不同波长增幅在色度坐标中的影响

Fig. 8 Effect of different wavelengths of the increase in the chromaticity coordinates

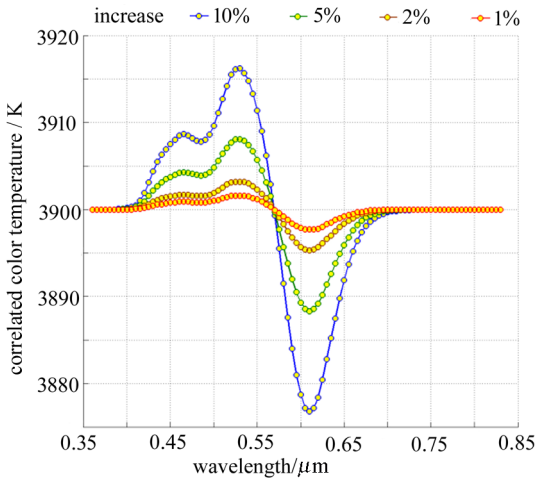


图 9 不同波长增幅对色温的影响权重

Fig. 9 Different wavelength increase effect on color weight

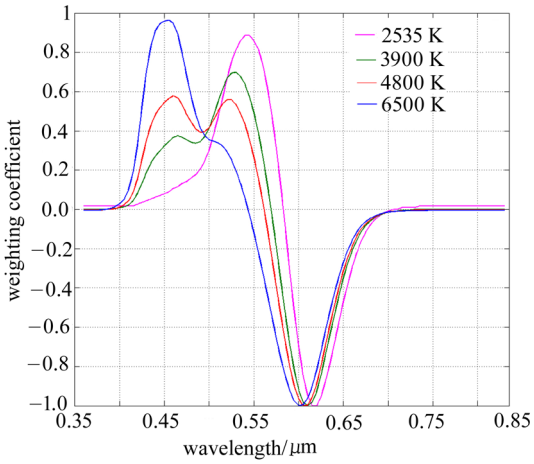


图 10 权重曲线

Fig. 10 Weight curve

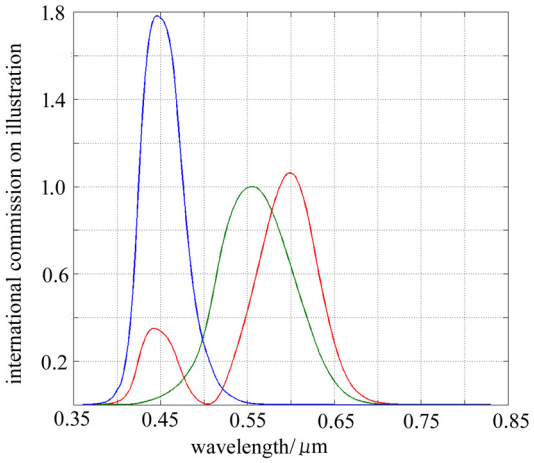


图 11 配色函数曲线

Fig. 11 Color matching function curve

4 星图显示系统设计

星敏感器地面标定系统不但要模拟恒星光谱及色温, 同时还要精确模拟恒星的星间角距. 对于本系统而言, 星间角距的模拟精度受星图显示系统的设计精度影响 [10].

根据地面标定系统使用要求, 提出一种能够显著提高星间角距模拟精度的星图修正方法 [11−12].

首先, 已知任意两个星点的角位置分别为 (α_1, β_1) 和 (α_2, β_2), 则其星间角距

$$\gamma = \arccos[\sin\beta_1\sin\beta_2\cos(\alpha_1-\alpha_2)+\cos\beta_1\cos\beta_2]. \tag{3}$$

然后, 根据星表中给出任意星点 i 的角位置 (α_i, β_i) 和任意两个星点的星间角距 γ, 由下式可以计算出星点 i 的角位置在星图显示系统中的线位置:

$$x_i = f'\tan\alpha_i, \quad y_i = f'\frac{\tan\beta_i}{\cos\alpha_i}. \tag{4}$$

式中, f' 为地面标定系统的焦距. 最后, 通过数据回归分析, 并用 Matlab 对地面标定系统的焦距进行统计计算, 星间角距的实际值

$$\gamma_i = \arccos\left\{\left(\tan^2\alpha_1+\tan^2\alpha_2+\frac{\tan^2\beta_1}{\cos^2\alpha_1}+\frac{\tan^2\beta_2}{\cos^2\alpha_2}+\tan\alpha_1\tan\alpha_2+\frac{\tan\beta_1\tan\beta_2}{\cos\alpha_1\tan\alpha_2}+1\right)\Big/\left[\left(\tan^2\alpha_2+\frac{\tan^2\beta_2}{\tan\alpha_2}+1\right)\left(\tan^2\alpha_1+\frac{\tan^2\beta_1}{\cos^2\alpha_1}+1\right)\right]^{1/2}\right\}. \tag{5}$$

根据式 (4) 和式 (5), 反复计算并比较星间角距的理论值 γ 与实际值 γ_i, 不断修正式 (4) 中应代入的焦距值, 直到星间角距的模拟精度优于 16″, 即认为星间角距的模拟精度符合地面标定系统的要求, 可以按照计算结果刻划星图中的每个星点.

5 地面标定系统的光谱仿真结果

5.1 系统仿真模型

利用 Lighttools 软件, 建立标定系统的光谱仿真模型, 主要包括宽光谱光源、滤光片、积分球、星点板和电控可变光阑. 其中宽光谱光源发出的光经过滤光片调制后形成所需的光谱分布曲线, 再由电控可变光阑对其能量进行标定实现不同的星等模拟, 经过积分球进行匀光后, 点亮星点板. 图 12 所示为仿真模型的三维结构, 图 13 为仿真效果图.

5.2 光谱曲线的仿真结果与分析

在仿真模型中分别设置宽光谱光源的光谱曲线、滤光片透过率、 积分球参数和星点板尺寸等, 得到 3900 K 下光谱分布的仿真结果, 如图 14 所示.

将仿真结果用 Matlab 软件进行插值处理, 得到连续的模拟光谱曲线. 基于光谱分布曲线的相似性构建如下精度评价指标计算公式:

$$\Delta = (S_1 - S_2)/S_1.$$

式中, Δ 为仿真结果的模拟精度, S_1 为黑体的光谱分布曲线面积, S_2 为仿真结果的光谱分布曲线面积. 计

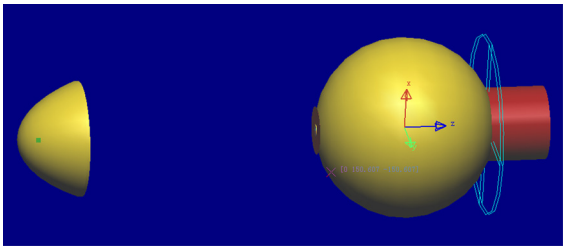


图 12 三维仿真结构

Fig. 12 Three dimensional simulation diagram

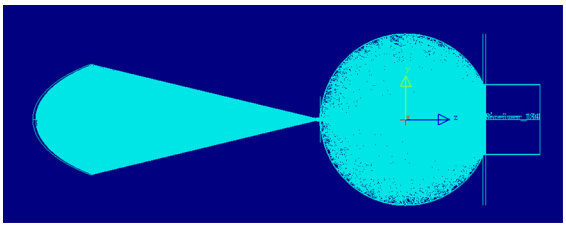


图 13 总体仿真效果

Fig. 13 Overall simulation effect diagram

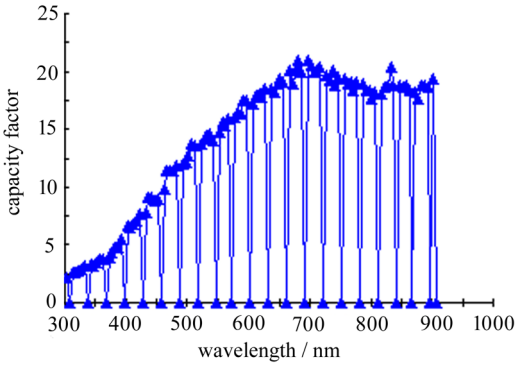


图 14 光谱分布的仿真结果

Fig. 14 Simulation results of the spectral distribution

表 1　三种色温下的光谱模拟精度

Table 1　Simulation accuracy for three spectral color

color temperatue/K	S_1	S_2	$\Delta/(\%)$
3900	411.91	428.51	4.03
4800	433.72	452.03	4.23
6500	404.21	424.06	4.91

算结果列于表 1. 同理也可通过仿真计算得到 4800 K 和 6500 K 时光谱分布曲线的模拟精度.

6　结论

从星敏感器地面标定设备的光谱探测能力要求出发, 设计了星间角距模拟精度优于 16″, 光谱模拟精度优于 10% 的地面标定设备. 介绍了地面标定设备的组成和工作原理, 研究了高成像质量准直光学系统的设计方法. 使用 Zemax 软件设计光学系统, 利用光谱分布可控光强可调模拟照明系统实现了星等可变、星间角距精度高、星光谱模拟精度高的星图模拟; 利用 Lighttools 软件, 建立标定系统的光谱仿真模型. 从仿真结果可以看出, 三种色温条件下的光谱模拟精度均优于 5%. 由此建立一套可用于星敏感器光谱探测能力的地面标定系统, 为星敏感器的研制提供了一个有效测试工具.

参考文献

[1] Tu Shancheng. Attitude Dynamics and Control of Satellite(3) [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 2003: 122-183. In Chinese (屠善澄. 卫星姿态动力学与控制 (3) [M]. 北京: 宇航出版社, 2003: 122-183)

[2] Li Jie. Study the Key Technology of APS Star Tracker [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2005. In Chinese (李杰. APS 星敏感器关键技术的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005)

[3] Liu Yiwu, Chen Yiqing. Star-sensor measurement model and its application to the spacecraft attitude determination system [J]. *J. Astron.*, 2003, **24**(2): 162-167. In Chinese (刘一武, 陈义庆. 星敏感器测量模型及其在卫星姿态确定系统中的应用 [J]. 宇航学报, 2003, **24**(2): 162-167)

[4] Zhao Chenguang, Tan Jiubin, Liu Jian, *et al.* Star simulator for testing celestial navigation equipment [J]. *Opt. Prec. Eng.*, 2010, **18**(6): 1326-1332. In Chinese (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)

[5] Li Chenyan, Li Huaifeng, Sun Caihong. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor [J]. *Opt. Prec. Eng.*, 2006, **14**(4): 558-563. In Chinese (李春艳, 李怀锋, 孙才红. 高精度星敏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)

[6] Hu Yi, Gong Yan. Preliminary Research on Color Simulation of Stars in a Star Simulator [J]. *Opto-Elec. Eng.*, 2010, **37**(8): 65-73. In Chinese (胡宜, 巩岩. 星模拟器星光颜色模拟的初步研究 [J]. 光电工程, 2010, **37**(8): 65-73)

[7] Liu Yaping, Li Juan, Zhang Hong. Design and calibration of star simulator [J]. *Infrar. Laser Eng.*, 1995, **16**(4): 24-28. In Chinese (刘亚平, 李娟, 张宏. 星模拟器的设计与标定 [J]. 红外与激光工程, 2006, **10**(35): 24-28)

[8] Li Zhilai, Xu Donglin, Zhang Xuejun. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. *Opt. Prec. Eng.,* 2008, **16**(12): 2548-2490. In Chinese (李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计 [J]. 光学精密工程, 2008, **16**(12): 2485-2490)

[9] Miao Jianyu, Zhang Liping, Wu Qingwen, *et al.* Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. *Opt. Prec. Eng.*, 2008, **16**(9): 1648-1653. In Chinese (苗健宇, 张立平, 吴清文, 等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配 [J]. 光学精密工程, 2008,**16**(9): 1648-1653)

[10] Li Xuekui, Tan Hanshu, Li Jie. New calibration method of principal distance of star sensors through diagonal distance [J]. *Semicond. Optoelec.*, 2009: 30(5): 755-759. In Chinese (李学夔, 谭海曙, 李杰. 利用星角距对星敏感器主距进行标定的新方法 [J]. 半导体光电, 2009: **30**(5): 755-759)

[11] Zhang Hui, Tian Hong, Yuan Jiahu. Parameter calibration and error compensation of star sensor [J]. *Opto-Elec. Eng.*, 2005, **32**(9): 1-4. In Chinese (张辉, 田宏, 袁家虎. 星敏感器参数标定及误差补偿 [J]. 光电工程, 2005, **32**(9): 1-4)

[12] Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Calibration method of star sensor [J]. *Acta Opt. Sin.*, 2010, **30**(5): 1343-1348. In Chinese (钟红军, 杨孟飞, 卢欣. 星敏感器标定方法研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1343-1348)