

# 基于LED的多色温多星等单星模拟器

刘洪兴 任建伟 刘则洵 万志 李葆勇

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 针对星模拟器与星敏感器观星的色温不匹配对星敏感器光信号定标精度产生的影响,设计了一种基于LED的多色温多星等单星模拟器,采用该系统模拟特定色温的星光用于星敏感器光信号定标,大幅降低了色温非匹配带来的定标误差。从理论上分析了色温非匹配影响星敏感器光信号的定标精度的机理;根据设计指标确定了星模拟器的设计方案,主要解决了光源的选型、多色温多星等单星模拟器驱动和控制系统、色温星等匹配算法、多色温多星等单星模拟器软件设计四项关键技术问题;对多色温多星等单星模拟器进行了标定和性能测试:0等星4000K和3等星7000K星光的光谱匹配误差分别为4.87%和7.83%,星等等级分别为0.03和2.93;光源稳定后,多色温多星等单星模拟器的平行光管出口 $\Phi 100$  mm口径内的照度非均匀度为6.5%,均满足设计指标。

**关键词** 测量;星模拟器;色温;星等;发光二极管

中图分类号 O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0212003

## LED-Based Single Star Simulator with Multi-Color-Temperature and Multi-Star-Magnitude Output

Liu Hongxing Ren Jianwei Liu Zexun Wan Zhi Li Baoyong

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** A LED-based single star simulator system with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output is developed to calibrate star sensor's optical signal, and it can significantly diminish the calibration error caused by the non-matching between star simulator's color temperature and star sensor's detecting color temperature. The mechanism of how color temperature's non-matching affects star sensor's optical signal calibration accuracy is analyzed. The design scheme of LED-based single star simulator is determined, which is divided into four key issues, the determination of light source, the design of drive circuit and control system, the design of color temperature and star magnitude matching algorithm, and the design of control software. The LED-based single star simulator is calibrated and tested, the spectral matching errors of starlight with 4000 K color temperature, 0 star magnitude and starlight with 7000 K color temperature, 3 star magnitude are 6.37% and 8.76% respectively, and their star magnitudes are 0.03 and 2.93 respectively. The irradiance non-uniformity in  $\Phi 100$  mm area of LED-based single star simulator is 6.5%. They all meet design requirements.

**Key words** measurement; star simulator; color temperature; star magnitude; light emitting diode

**OCIS codes** 120.0280; 120.3150; 120.4640

## 1 引言

星敏感器主要是利用电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)经光学系统接收恒星发出的光,将数据处理成观测星点观测星图 and 数据库中预存的导航星图进行比较以得到航天器在星空中的位置与姿态<sup>[1-2]</sup>。星敏感器中非常关键的一项技术是对恒星发射光的接收并将接收的能量量化为星等,因此需要对

收稿日期: 2014-08-19; 收到修改稿日期: 2014-09-11

基金项目: 国家863计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 刘洪兴(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事星模拟器以及辐射定标技术应用方面的研究。

E-mail: lhxing\_888@126.com

星敏感器的光信号接收设备进行标定,光信号接收设备的标定可分为在轨标定和地面标定。在轨标定不但费用异常昂贵,而且与地面定标设备相比,在轨定标设备可维护性差。因此,研制高精度、性能优良地面定标设备势在必行,星模拟器应运而生<sup>[3]</sup>。

常规的单星模拟器一般只模拟不同的星等,往往不考虑色温因素,如冯广军等<sup>[4]</sup>以溴钨灯作为发光介质设计了一种高星等标准星光模拟器,该星光模拟器可以实现6~14星等极微弱光的照射,色温为溴钨灯的色温。然而,宇宙中的恒星温度各不相同<sup>[5]</sup>,恒星的辐射光谱分布各不相同,任何接收器(如CCD或CMOS)都有各自的响应区间和响应曲线,这就要求接收器在标定时的标定光源的色温和所探测恒星的色温保持一致,即标定光源的色温与所探测恒星的色温相匹配(也称光谱匹配),否则,这种色温非匹配将会给接收器的标定带来误差。陈风等<sup>[6]</sup>对光谱非匹配对光学遥感器定标带来的误差进行了仿真分析,结果表明,对于窄带宽的分光谱光学遥感器,光谱非匹配对定标精度的影响基本可以忽略,而对于全色光学遥感器,光谱非匹配造成的定标相对误差不可忽略,该结论同样适用于星敏感器的标定过程,即星模拟器与星敏感器观星的色温非匹配会对星敏感器光信号的定标精度产生影响。

为了减小色温非匹配对星模拟器光信号定标精度产生的影响,本文设计并研制了基于发光二极管(LED)的多色温多星等单星模拟器。通过调整LED和基底光源的组合即可得到特定色温和星等的星光。在实验室内,采用多色温多星等单星模拟器模拟特定色温和特定星等的单星来标定星敏感器,提高了星敏感器光信号接收设备的定标精度。

## 2 色温不匹配影响星敏感器定标精度的理论分析

星敏感器的光信号定标首先要建立星敏感器输出与星敏感器辐射输入的关系,辐射响应方程为<sup>[7]</sup>

$$O_{DN} = C \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_c(\lambda) \cdot R_{det}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中 $O_{DN}$ 为星敏感器探测器的输出数码值, $C$ 为由星敏感器光学系统、探测器和电子学系统决定的常量, $E_c(\lambda)$ 为星敏感器入瞳处接收的光谱辐照度, $R_{det}(\lambda)$ 为星敏感器探测器光谱响应度, $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 分别为星敏感器探测器光谱波段的下限和上限。

星敏感器进行光信号定标时,星模拟器的输出光照度是已知的,忽略星敏感器的暗信号输出和高次响应系数,定标系数为

$$P_{cal} = \frac{O_0^{DN}}{E_{e0}} = \frac{C \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e0}(\lambda) \cdot R_{det}(\lambda) d\lambda}{A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e0}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

式中 $O_0^{DN}$ 为星敏感器探测器的输出数码值, $E_{e0}$ 为星敏感器的光照度输入, $A$ 为光度量和辐射量转换系数, $V(\lambda)$ 为国际照明委员会(CIE)推荐的平均人眼光谱光视效率。星敏感器在轨运行时,通过目标星点的 $E_{e1}(\lambda)$ 定量反演得到的光照度 $E_{vcal}$ 和星等 $M_{vcal}$ 为

$$E_{vcal} = \frac{O_1^{DN}}{P_{cal}} = \frac{C \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e1}(\lambda) \cdot R_{det}(\lambda) d\lambda}{\left[ \frac{O_0^{DN}}{A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e0}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \right]} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e1}(\lambda) \cdot R_{det}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e0}(\lambda) \cdot R_{det}(\lambda) d\lambda} \cdot A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e0}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

$$M_{vcal} = 2.5 \log_{10}(E_{vcal}) - 5 \log_{10} r + B, \quad (4)$$

式中 $r$ 为天体距离, $B$ 为常数。

目标星点 $E_{e1}(\lambda)$ 的光照度 $E_{vobj}$ 和星等 $M_{vobj}$ 为

$$E_{\text{vobj}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{cal}}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

$$M_{\text{vobj}} = 2.5 \cdot \log_{10}(E_{\text{vobj}}) - 5 \log_{10} r + B. \quad (6)$$

当星模拟器与星敏传感器观测目标星点的色温不匹配时,根据定标系数反演的目标星点的光照度  $E_{\text{vcal}}$  与目标星点的真实光照度  $E_{\text{vobj}}$  存在误差,因此,由  $E_{\text{vcal}}$  以及目标星点的天体距离计算得到的星等  $E_{\text{vcal}}$  与目标星点的真实星等  $E_{\text{vobj}}$  也存在误差,这就是色温非匹配对星敏传感器光信号接收装置定标精度带来的影响,研制多色温多星等单星模拟器可大幅降低该影响。

### 3 多色温多星等单星模拟器系统设计

#### 3.1 多色温多星等单星模拟器工作原理

多色温多星等单星模拟器主要由色温星等模拟系统、监视系统、控制系统以及准直与标定系统组成。色温星等模拟系统主要由积分球、LED模块、卤钨灯基底光源、带升色温滤光片的卤钨灯基底光源、电动可调光阑、中性滤光片轮组成;监视系统主要由光纤光谱仪以及视觉函数响应探测器组成;控制系统主要由主控计算机和控制器组成,准直与标定系统主要由传导光纤、星点板、平行光管、标准白板以及光谱辐射计组成,如图1所示。其工作原理如下:积分球作为匀光器,其球壁上安装了LED模块、卤钨灯基底光源以及带升色温滤光片的卤钨灯基底光源,LED模块上安装了不同峰值波长和光谱分布的LED。通过调整LED以及基底光源进入积分球的功率即可改变积分球的输出色温与能量等级,其中LED进入积分球的功率可通过改变LED的驱动电流和点亮组合来控制;基底光源进入积分球的功率可通过改变电动可调光阑的开口大小和中性衰减片的切换来控制;积分球输出的光可通过传导光纤到达平行光管的焦面经过星点板由平行光管准直,平行光管发出的准直光可由光纤光谱仪和视觉响应函数探测器监视色温和星等;主控计算机可以根据光纤光谱仪和视觉响应函数探测器的反馈对不同种类LED和基底光源进入积分球的功率进行调整直至得到满意的色温和星等;光纤光谱仪和视觉函数响应探测器由光谱辐射计和标准白板来标定;控制器负责电动可调光阑、中性滤光片轮、LED模块、光纤光谱仪以及视觉函数响应探测器的控制。表1给出了多色温多星等单星模拟器系统的设计指标。

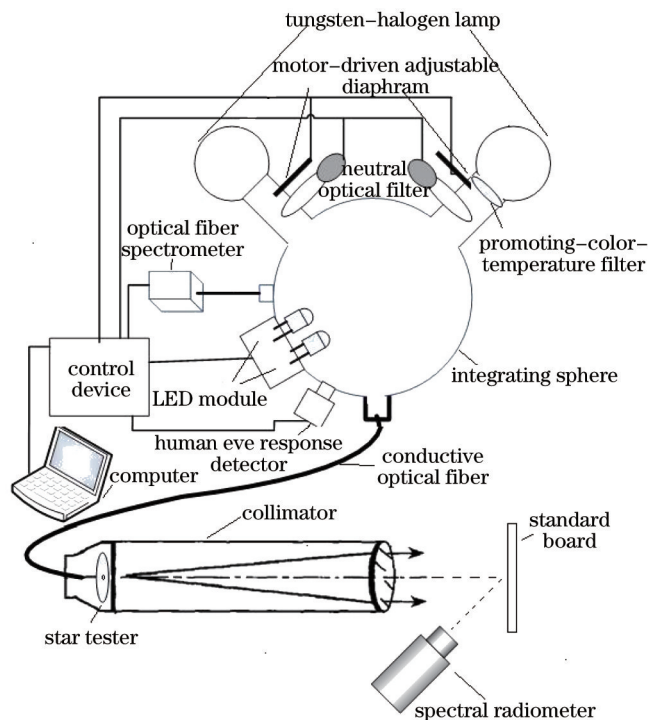


图1 多色温多星等单星模拟器原理图

Fig.1 Simplified schematic of single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output

表 1 多色温多星等单星模拟器系统的设计指标

Table 1 Design constants of single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output

Parameter	Value
Spectral range /nm	400~900
Collimating light's diameter /mm	100
Star magnitude range /M	-1~+8
Color temperature range /K	3000~9000
Spectral non-matching errors /%	10
Star magnitude simulation errors /M	≤0.2
Collimating light's irradiance non-uniformity /%	<10

### 3.2 光源选择

多色温多星等单星模拟器采用基底光源和LED的多光源组合方案,LED具有体积小、寿命长、发光效率高、发光强度稳定以及不同峰值波长的产品丰富等优点<sup>[8-10]</sup>,丰富的单色LED将会很好地解决多色温多星等单星模拟器的色温匹配、光谱匹配问题。选择合适的基底光源既可以减少LED的使用数量,还可以提高光谱匹配精度。

基底光源的选择原则是:稳定性好、400~900 nm波段光谱分布连续平滑、尺寸小、对环境要求比较低、性价比高。综合考虑以上因素后,确定了溴钨灯和“溴钨灯+升色温滤光片”两种基底光源,卤钨灯的色温为3000 K左右,升色温滤光片可将卤钨灯的色温提高到6000 K左右。升色温滤光片的光谱透过率实测曲线如图2所示。

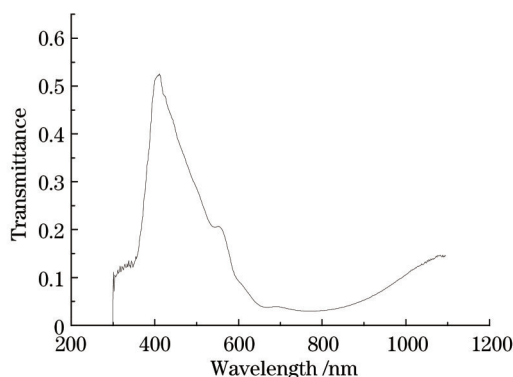


图 2 升色温滤光片光谱透射率曲线

Fig.2 Transmittance of promoting-color-temperature filter

多色温多星等单星模拟器对LED的选择也提出了严格的要求:单色LED的种类应尽量多<sup>[10]</sup>,LED的寿命应尽量长,同一种类的LED需要保持良好的光谱一致性。在经过调研、采购、老化筛选试验后选择了26种LED用于多色温多星等单星模拟器,包括23种单色LED和3种白光LED。23种单色LED的峰值波长分别为:400,410,420,455,470,475,515,545,585,605,625,637,670,680,700,720,760,770,810,830,850,870,900 nm;3种白光LED的色温分别为3000 K,4000 K和6000 K。根据各种LED的实测光谱功率以及星模拟器的星等范围进行分析和仿真计算,LED的总数为729。

### 3.3 多色温多星等单星模拟器驱动和控制系统

实验表明,单色LED驱动电流的变化会引起LED峰值波长的漂移、LED光谱半峰全宽(FWHM)和相对光谱分布的变化。其中,常用的小功率单色LED分别被5 mA和30 mA的驱动电流点亮时,峰值波长漂移会达到纳米量级,这对光谱半峰全宽为20 nm左右的单色LED的光谱分布影响相当大。在色温匹配算法中需要固定的光谱分布作为基光谱,采用变电流驱动LED会降低色温匹配算法的光谱匹配效率,为此提出采用恒定电流(一般选用额定电流)驱动LED,筛选出额定电流驱动下光谱功率分布一致的LED用于多色温多星等单星模拟器,通过调整LED的点亮组合来改变输出光谱分布,这样不仅提高了色温匹配算法的效率,而且LED采用额定电流驱动方案还会有利于提高LED的使用寿命。LED点亮组合采用240路继电器输出控制器

进行控制,控制方案示意图如图3所示。控制原理为:电脑通过串口来控制240路继电器输出控制器,每路继电器输出可以控制一个LED通道驱动电流的开与关,通过控制240路继电器输出控制器的开关组合即可实现电脑对各型号LED的控制。

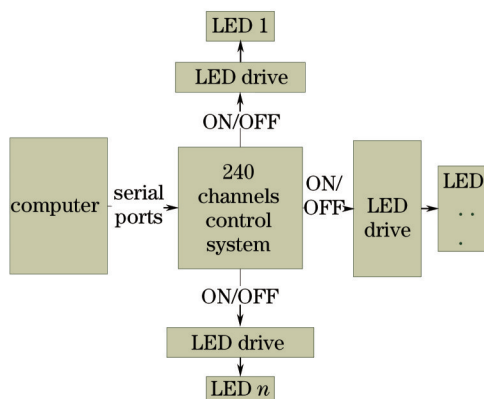


图3 LED控制方案示意图

Fig.3 Schematic drawing of LED control project

基底光源和积分球之间安装电动可调光阑和中性滤光片轮。中性滤光片轮包括全通、全闭合、80%透射率、60%透射率、40%透射率、20%透射率、10%透射率以及5%透射率8个档位,通过调整光阑的开口大小以及中性滤光片的档位即可改变基底光源进入积分球的辐射通量,光阑的开口大小以及滤光片轮的档位可由主控计算机通过串口来控制。

### 3.4 色温星等匹配算法

对于特定色温特定星等的光谱分布  $S_i(\lambda)$ ,通过改变LED的点亮组合和基底光源的入射通量使得叠加光谱逐步逼近  $S_i(\lambda)$

$$k_i \cdot S_{LED_i}(\lambda) + j_1 \cdot S_{B1}(\lambda) + j_2 \cdot S_{B2}(\lambda) \xrightarrow{\text{approach}} S_T(\lambda), \quad (7)$$

式中  $S_{LED_i}(\lambda)$  为单只第  $i$  种LED在平行光管出口处光谱照度分布;  $k_i$  为第  $i$  种LED的点亮个数;  $S_{B1}(\lambda)$  和  $S_{B2}(\lambda)$  分别为可调光阑完全打开以及中性滤光片为全通状态时卤钨灯基底光源和卤钨灯加升色温滤光片在平行光管出口处的光谱照度分布;  $j_1$  和  $j_2$  分别为卤钨灯基底光源和卤钨灯加升色温滤光片基底光源的入射系数,与光阑开口大小以及中性滤光片的档位有关。

通过调研智能优化算法,尝试引进遗传算法作为色温星等匹配算法。遗传算法是以达尔文的适者生存和优胜劣汰的生物进化论为基础,模拟生物界的遗传和进化过程而建立的一种优化算法<sup>[11]</sup>。遗传算法基本思想是将“父代”建模好的LED组合作为个体进入下一代;下一代中的个体通过交叉和变异等遗传操作,产生新的个体,即“后代”;若干代后建模效果好的“后代”代替原来的个体,最终算法收敛于最好的个体,即LED最优组合解。遗传算法思想简单,易理解,但是如果把解区间定义为正整数区间,在整个正整数区间寻找最优整数解,遗传算法的效率将大大降低,此外,在正整数解区间,遗传算法还有可能陷入局部收敛。为此,对遗传算法进行了改进。改进后遗传算法分为两步:

- 1) 采用最小二乘法求解LED色温星等匹配的非负最小二乘解,根据非负最小二乘解确定LED的取值区间;
- 2) 在确定的LED的整数解区间内,利用遗传算法求得最优整数LED组合,大大提高了色温星等匹配效率。

### 3.5 多色温多星等单星模拟器软件设计

多色温多星等单星模拟器的软件设计包括初始化设置、光源控制以及实时监视三个部分,其中初始化设置主要包含了串口选择、光谱仪积分时间设置、色温设定以及星等设定等功能;光源控制包括LED的控制以及基底光源的控制;实时监视主要包括光谱的实时监视以及星等的实时监视。图4为多色温多星等单星模拟器控制软件界面,图中显示的是0等星色温为4000K时的效果。

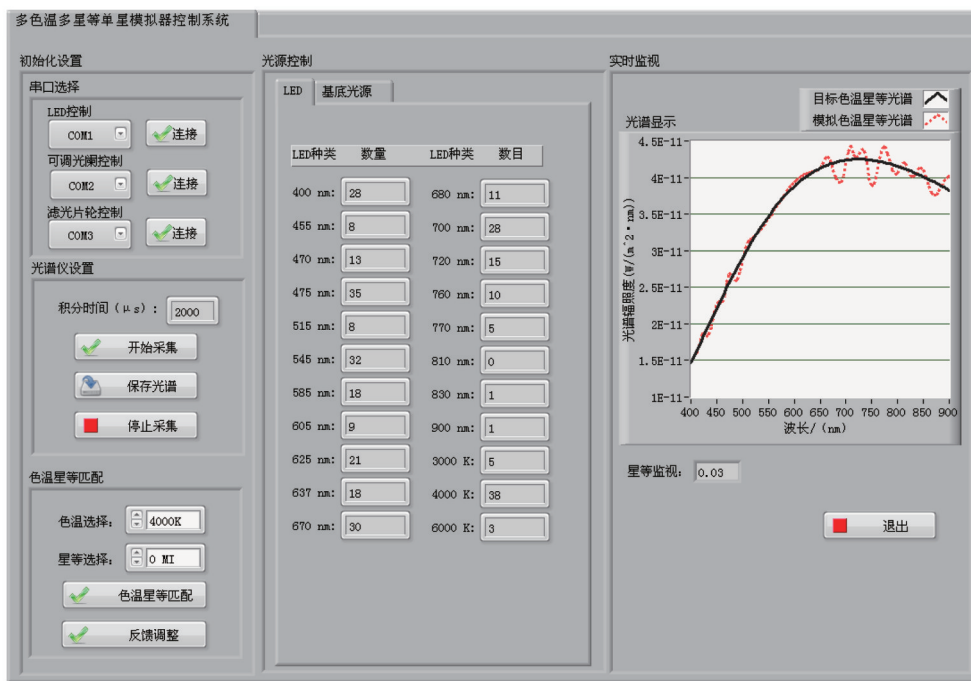


图 4 多色温多星等单星模拟器的控制软件

Fig.4 Control software of single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output

## 4 多色温多星等单星模拟器的标定与性能测试

### 4.1 多色温多星等单星模拟器的标定

多色温多星等单星模拟器选用光纤光谱仪和视觉函数响应探测器用于平行光管出口处的光谱分布和星等等级的监视,在多色温多星等的单星模拟器使用之前需要对光纤光谱仪和视觉函数响应探测器进行标定。由于多色温多星等单星模拟器工作时的输出辐射照度属于微光范畴,因此,光纤光谱仪和视觉函数响应探测器的标定在高辐射照度等级下进行。标定时,光纤光谱仪和视觉函数响应探测器前段分别安装中性衰减片(如0.01%透射率)以保证两者不饱和。多色温多星等单星模拟器标定现场如图5所示,标定中所用的光谱辐射计为SVC公司的GER1500光谱辐射计,标准白板为Spectralon标准反射白板,该光谱辐射计和标准白板由中国计量科学研究院标定。具体的标定步骤如下:

1) 选择合适的中性滤光片并安装至光纤光谱仪和视觉函数响应探测器前端,并设定光纤光谱仪的积分时间,确保标定过程中光纤光谱仪不饱和。

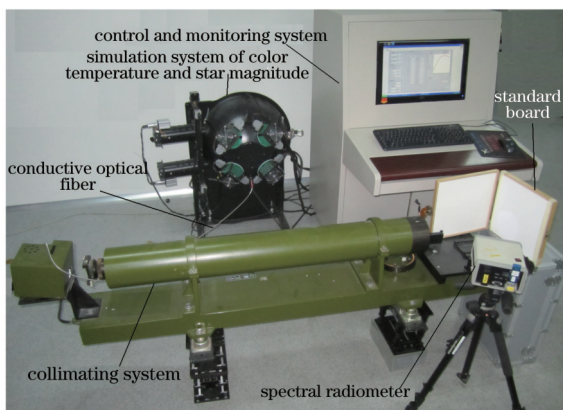


图 5 多色温多星等单星模拟器的标定现场

Fig.5 Calibrating scene of single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output

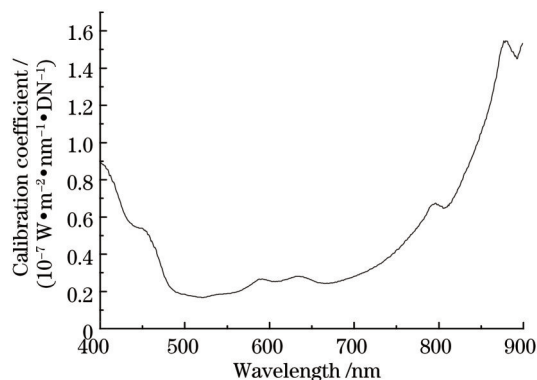


图 6 光纤光谱仪的校正系数

Fig.6 Calibration coefficient of fiber spectrometer

2)调整基底光源提供多个高辐射照度等级,用GER1500测得每个辐照度等级下平行光管开口处的光谱辐照度,同时记录光纤光谱仪的光谱数据以及视觉函数响应探测器的输出。

3)对GER1500以及光纤光谱仪在400~900 nm波段进行插值,波长间隔为1 nm,在各个波长点,以光纤光谱仪光谱数据作为输入,GER1500得到的光谱辐射照度作为输出,进行多点线性拟合,去除中性滤光片的光谱透射率系数,得到光纤光谱仪的校正系数。图6给出了光纤光谱仪的光谱校正系数曲线。

4)计算得到各辐射照度等级下平行光管出口处的光照度,以视觉函数响应探测器数据作为输入,GER1500计算得到的光照度作为输出,进行多点线性拟合,去除中性滤光片的透射率系数,即可得到视觉函数探测器的校准系数 $1.05 \times 10^{-10}$  (lx/DN)。

#### 4.2 多色温多星等单星模拟器性能评价

各型号LED的数量与基底光源的选择保证了多色温多星等单星模拟器的色温和星等范围要求。采用该单星模拟器分别匹配了0等星4000 K和3等星7000 K的星光,光谱匹配误差分别为4.87%和7.83%,星等等级分别为0.03和2.93。待光源稳定后,测得多色温多星等单星模拟器的平行光管出口 $\Phi 100$  mm口径内的照度非均匀度为6.5%,满足多色温多星等单星模拟器的光谱匹配误差、星等模拟误差以及准直光均匀性的设计指标。

## 5 结 论

介绍了一套多色温多星等单星模拟器系统,多色温多星等单星模拟器以积分球作为理想的匀光器,实现了基底光源和LED的充分混光,基底光源和LED保证了多色温多星等单星模拟器的光谱可调谐能力,基底光源还可以在多色温多星等单星模拟器标定时提供高辐射照度等级。多色温多星等单星模拟器的光谱匹配度与LED的种类数目息息相关,增加LED的种类数目还可以减小多色温多星等单星模拟器的光谱匹配误差。

多色温多星等单星模拟器大大减小了色温非匹配对星敏感器光信号标定精度带来的影响,除此之外,多色温多星等单星模拟器还可以用来模拟太阳光谱以及典型地物光谱等,在遥感领域具有重大的科研价值。

### 参 考 文 献

- 1 Li Jing, Yang Baoxi, Hu Zhonghua, *et al.*. Development and performance testing of optical system for star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522005.  
李 璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏感器光学系统的研制与性能测试 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522005.
- 2 Yan Peipei, Fan Xuewu. Design of optical system of very high precision star sensor with small F-number [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 092202.  
闫佩佩, 樊学武. 大相对孔径甚高精度星敏感器光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 092202.
- 3 Chen Qimeng, Zhang Guoyu, Sun Xiangyang, *et al.*. Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0716003.  
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(7): 0716003.
- 4 Feng Guangjun, Ma Zhen, Li Yingcai. Design and performance analysis of standard starlight simulator [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1): 39-42.  
冯广军, 马 臻, 李英才. 一种高星等标准星光模拟器的设计与性能分析 [J]. *应用光学*, 2010, 31(1): 39-42.
- 5 Hu Yining. Study on Mini-Dynamic Star Simulator Technologies [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010, 2-3.  
胡宜宁. 小型动态星模拟器技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010: 2~3.
- 6 Chen Feng, Zheng Xiaobing. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(3): 415-419.  
陈 风, 郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(3): 415-419.
- 7 Wan Zhi, Li Baoyong, Li Xiansheng, *et al.*. Influence of integrating sphere source's distribution temperature on broadband optical

- remote sensor's absolute radiometric calibration and correcting methods [J]. Chinese J Luminescence, 2012, 33(8): 863-868.
- 万志, 李葆勇, 李宪圣, 等. 积分球光源分布温度对宽波段光学传感器绝对辐射定标的影响及其校正 [J]. 发光学报, 2012, 33(8): 863-868.
- 8 Wang Lidong, Mao Zhenhua, Ni Wei. Photoelectric parameter measurement system based on Cortex-M3 for LEDs [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 856-862.
- 汪黎栋, 茅振华, 倪魏. 基于Cortex-M3的快速发光二极管光电参数测量系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 856-862.
- 9 Zhao Ziquan, Wang Ruiguang, Zheng Xifeng, *et al.*. Measurement of chroma of LED displays with color CCD camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 575-582.
- 赵梓权, 王瑞光, 郑喜凤, 等. 用彩色 CCD 相机测量发光二极管显示屏的色度 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 575-582.
- 10 Zhu Jiyi, Ren Jianwei, Li Baoyong, *et al.*. Synthesis of spectral distribution for LED-based source with tunable spectra [J]. Chinese J Luminescence, 2010, 31(6): 882-887.
- 朱继亦, 任建伟, 李葆勇, 等. 基于LED的光谱可调光源的光谱分布合成 [J]. 发光学报, 2010, 31(6): 882-887.
- 11 Wang Dingwei, Wang Junwei, Wang Hongfeng, *et al.*. Intelligent Optimization Methods [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化算法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

栏目编辑: 韩峰