

文章编号:1007-2780(2017)03-0206-07

空间遥感光谱仪器光学性能地面检测系统

王 岩*, 杨小虎, 王金玲, 王淑荣

(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: 为了对空间遥感光谱仪器进行光学性能检测, 设计并实现了空间遥感光谱仪器光学性能地面检测系统。该系统包含硬件和控制软件两部分; 硬件分为光源、机械运动子系统、信号采集子系统和计算机, 控制软件在 Windows 环境下使用 Labview 实现。在电机控制中使用细分驱动, 采用包含误差项计算步数的方法减小积累误差, 通过指定波长扫描或连续波长扫描进行扫描机构控制, 并实时显示光谱曲线。自动计算信噪比、使用广义最小二乘法对感兴趣的区域进行高斯拟合, 并自动读取带宽。实验表明, 本系统可以实现空间遥感光谱仪器的全波段、自动化光学性能检测, 波长精度优于 ± 0.05 nm, 重复性优于 0.01 nm, 可在 1 s 内完成信噪比计算, 光谱带宽小于 1 nm, 满足指标要求, 提高工作效率, 为载荷研制奠定了基础。

关键词: 地面检测; 光学性能; 空间遥感; 全波段; 自动化

中图分类号: TP274+.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173203.0206

Ground testing system for detecting optical performance of space remote sensing spectrometer

WANG Yan*, YANG Xiao-hu, WANG Jin-ling, WANG Shu-rong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: For detecting optical performance of space remote sensing spectrometer, the ground testing system is designed and implemented. The system consists of hardware and control software. The hardware consists of light source, mechanical motion subsystem, signal acquisition subsystem and computer. The control software is implemented in the Windows environment with Labview. The subdivision driving and the method of computing the number of steps considering error term are used to reduce the accumulation of errors in motor control. Scanning mechanism is controlled by specified wavelength scan or continuous wavelength scan, and the spectral curve is displayed in real-time. The SNR is calculated automatically, the area of interesting is fitted based on Gaussian fitting with generalized least squares, the bandwidth is read automatically. The experiment results show that the system can achieve detecting optical performance of space remote sensing spectrometer in full wave band

收稿日期: 2016-09-19; 修订日期: 2016-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金(No.41575023, No.41105014)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.41575023, No.41105014)

* 通信联系人, E-mail: wangyanqy@sina.com

automatically. The wavelength accuracy is better than ± 0.05 nm, and the repeatability is better than 0.01 nm, the calculation of SNR is completed within 1 s. The spectral bandwidth is less than 1 nm. The system accomplishes the requirements, increases efficiency and lays the foundation for the development of aerospace load.

Key words: ground testing; optical performance; space remote sensing; full wave band; automation

1 引言

空间遥感探测广泛地应用于民用与军事各个领域^[1],对光谱细分测量可以获取准确的测量数据^[2],为气候预测与气候效应评估、农业、渔业、环境监测、矿产开发、军事侦察等提供科学依据^[3]。

为验证空间遥感光谱仪器设计方案的可行性、保证在轨输出结果符合预期,在其研制过程中需要进行各种地面实验^[4]。为保证地面实验的顺利进行,需要研制相应的地检系统。地检系统不仅可以配合完成地面实验,同时会很大程度提高工作效率,避免人为因素导致的错误^[5-7]。由于每个航天载荷的功能都不相同,所以地检设备必须根据载荷的功能需求进行研制。

为了验证载荷的光学性能,常用的方法都是通过将探测器放在待测平面上,光源照射使探测器产生输出电信号,通过仪表测量输出信号,并经过后期数据处理来检验相关的光学性能指标^[8-10]。如无配套的地检系统,检验操作复杂,采集的数据量庞大,人工处理工作量大,并容易产生人为错误。

本文针对空间遥感光谱仪器光学性能检验的实际应用需求,开发了一套地检系统。该系统具有电机控制、指定波长扫描、连续波长扫描、实时显示光谱曲线、自动计算信噪比、高斯曲线拟合和自动带宽读取、数据回放等功能。通过实验表明该系统实现了光谱仪器的多探测器、全波长覆盖的自动化光学性能地面检测,提高了工作效率,为航天载荷的成功研制奠定了基础。

2 检测系统的硬件结构

空间遥感光谱仪器光学性能地面检测系统的结构如图1所示。它主要由光源、机械运动子系统、信号采集子系统以及计算机组成。光源主要

依据指标要求提供相应的光信号。机械运动子系统由电机、运动控制卡、丝杠、导轨等构成,在测量时根据控制软件配置的参数精确定位目标波长。信号采集子系统由探测器和信号采集设备等构成,其功能主要是将光信号转换为电信号,并通过信号采集设备将读出的电信号返回给计算机的控制软件。运动控制卡选用众为兴公司的四轴运动控制卡 ADT-8948A1,电机选用 35 步进电机、导轨为直线导轨、丝杠为滚珠丝杠。为了实现全波长测量,探测器分别选用钢镓砷探测器、电流型光电倍增管、光子计数型光电倍增管,相对应的信号采集设备选用 Stanford 公司的 SR810 锁相放大器^[11]、Tektronix 公司的 Keithley6485^[12]、Stanford 公司的 SR400 光子计数器^[13]。三台设备都是通过 GPIB 线以及 GPIB 接口与计算机相连接,用不同的 GPIB 地址区分。波长扫描机构零点位置通过两对霍尔和磁钢定位,一个用来粗定位,一个用来精定位。

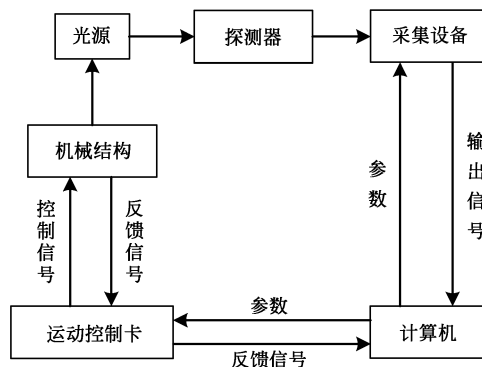


图1 系统结构图

Fig.1 System block diagram

3 检测系统软件结构

3.1 控制软件结构图

地检系统控制软件结构如图2所示。控制软件主要具备参数配置、电机控制、指定波长扫描、连续波长扫描、实时显示光谱曲线、自动计算信噪

比、高斯曲线拟合和自动带宽读取、数据回放等功能。

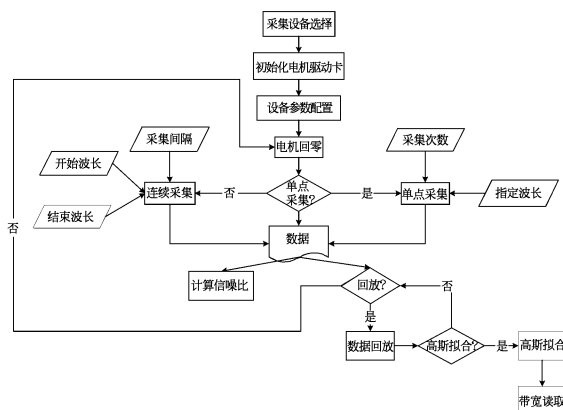


图 2 控制软件结构图

Fig.2 Control software block diagram

3.2 电机控制

本系统通过运动控制卡控制电机，进而驱动波长扫描机构的运行，实现回零、行进至指定波长、连续波长扫描等功能。

以紫外通道为例，其波长扫描机构的步距当量为 0.0 093 456 nm/步，当光谱采样间隔为 0.1 nm 时，运动控制卡输出脉冲为非整数。若采用每个采样间隔行进固定步数的方式，会造成较大积累误差，当误差积累到一定程度后，直接影响测量的准确性。固定步数为 10 步时，10 次采样后积累误差达到 0.06 544 nm，超过采样间隔的 50%；固定步数为 11 步时，10 次采样后积累误差达到 0.028 nm，约为步距的 3 倍。

由于无法整除的原因，误差无法避免，只能尽量减小。本系统在软件实现上采用包含误差项计算步数的方法减小误差，具体为按照公式(1)计算步数，公式(2)计算实际波长。

$$t = \text{int}((\lambda_{\text{预定}} - \lambda_{\text{当前}}) / \lambda_{\text{步距}}), \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{实际}} = \lambda_{\text{当前}} + t \cdot \lambda_{\text{步距}}, \quad (2)$$

其中： t 为步数，即运动控制卡输出的脉冲数， $\lambda_{\text{预定}}$ 为理论预定要走到波长， $\lambda_{\text{当前}}$ 为当前实际波长， $\lambda_{\text{步距}}$ 代表步距， $\text{int}()$ 代表取整函数，四舍五入， $\lambda_{\text{实际}}$ 为波长扫描机构实际要走到波长。

通常采用细分驱动可以提高步进电机的分辨率和精度，减小积累误差。对于步距当量 0.0 093 456 nm/步和采样间隔 0.1 nm，理论上 8 细分采用固定步数 86 步时，10 次采样后积累误

差为 0.004 652 nm；256 细分采用固定步数 2 739 步时，10 次采样后积累误差为 0.0 000 938 125 nm。理论上细分数的增加可以减小积累误差，但在实际应用中发现，步进电机精度的提高不是由细分数决定的，而与电机驱动电路对电流的控制精度和电机本身的最小分辨率角有关，当细分数达到一定程度后，最小细分转角小于电机最小分辨率角时，细分已无助于继续提升精度。

本系统为尽量减小积累误差，在硬件上采用 8 细分驱动，软件实现上按照公式(1)、(2)的方法进行计算。按此策略，当步距当量为 0.0 093 456 nm/步，采样间隔为 0.1 nm 时，10 次采样后积累误差为 0.0 000 208 nm，满足精度不大于 0.05 nm 的要求。

3.3 波长扫描

为保证波长扫描机构定位的准确性，每次指定波长扫描或连续波长扫描开始时都必须进行回零操作。回零操作通过识别运动控制卡的 STOP 信号实现。

指定波长扫描主要是为了实现仪器的定点测量，从而得出其稳定性、信噪比等关键指标。运动控制卡驱动波长扫描机构行进至目标波长，并按照设定的采样次数进行数据采集和实时显示。

本系统采用软件滤波的方式保证在扫描过程中采集数据的准确性，具体采用算数平均值滤波算法。算数平均值滤波原理上是要寻找到一个 Y ，使该值与各采样值 $X(K)$ ($K=1 \sim N$) 之间误差的平方和最小，即：

$$E = \min \left[\sum_{K=1}^N e_k^2 \right] = \min \left[\sum_{K=1}^N (Y - X(K))^2 \right], \quad (3)$$

由一元函数求极限原理得：

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N X(K). \quad (4)$$

连续波长扫描可以给出仪器对光源完整的光谱响应曲线，从而求出仪器的带宽、光谱范围以及光谱响应度等诸多参数。连续波长扫描具体过程如算法 1 所示。

算法 1. 连续波长扫描

输入：开始波长 λ_1 ，结束波长 λ_2 ，采集间隔 $\Delta\lambda$ ；
输出：采集到的数据 a_i 。

1. 波长扫描机构回零操作, $i=0$;
2. 按公式(1)计算从零点位置到波长 λ_1 所需步数;
3. 按公式(2)计算实际走到的波长位置 $\lambda_{\text{实}}$;
4. while ($|\lambda_2 - \lambda_{\text{实}}| > \lambda_{\text{步距}}$) do
5. 控制波长机构从当前位置行进至 $\lambda_{\text{实}}$ 处;
6. 采集数据 a_i , 并实时显示;
7. $i++$;
8. 计算预定波长 $\lambda_{\text{预}} = \lambda_1 + i * \Delta\lambda$;
9. 按公式(1)计算行进至下一波长的步数;
10. 按公式(2)计算实际走到的波长位置 $\lambda_{\text{实}}$;
11. end while;
12. 控制波长扫描机构由当前位置行进至 $\lambda_{\text{实}}$ 位置;
13. 采集数据 a_i , 并实时显示;
14. 本地保存采集到的数据;

3.4 信噪比计算

光谱性能满足指标要求之后,信噪比成为评价仪器性能的关键指标。仪器的信噪比越高,探测数据越可信。为了方便测试,在实际测试过程中,按照公式(5)计算信噪比。

$$\text{SNR}_r = \frac{\bar{S} - S_B}{S_{\text{noise}}}, \quad (5)$$

其中: $\bar{S}$ 为信号 S 的平均值,如公式(6)所示, S_B 为背景信号, S_{noise} 为均方根噪声,如公式(7)所示。

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i, \quad (6)$$

$$S_{\text{noise}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}. \quad (7)$$

系统自动计算信噪比的功能通过读入保存在本地的数据文件,首先按照公式(6)计算信号平均值,再按照公式(7)计算均方根噪声,最后按照公式(5)计算信噪比。

3.5 高斯曲线拟合及带宽读取

光谱分辨率,即带宽,也是光学检验的重要指标。光谱分辨率是仪器对理论单色光的展宽程度。本系统具备自动高斯曲线拟合和读取带宽的功能,操作简单,提高了效率。本系统采用广义最小二乘法,使数据拟合为形式由公式(8)描述的高斯曲线。

$$f = a \cdot \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] + c, \quad (8)$$

其中: x 是输入序列, a 是幅值, μ 是中心, σ 是标准差, c 是偏移量。

按照公式(8)得到的高斯曲线,其带宽可按公式(9)计算。

$$\text{FWHM} = \sqrt{8\ln 2} \sigma. \quad (9)$$

为了更精确的拟合曲线的带宽,系统允许在显示界面上进行区域选择,并只对所选择的区域进行高斯曲线拟合和带宽读取。

3.6 数据回放

本地存储的数据文件以采集时间和设备命名,数据回放功能通过选取本地数据文件,生成光谱曲线。可以同时选择多个文件进行回放,通过实时比较直接给出测量的重复性。此外还增加了清除屏幕功能,方便下一次测量显示。

4 实验结果与分析

空间遥感光谱仪器光学性能地面检测系统是在 Windows 系统下使用 Labview2012 软件实现的,以可见通道为例,分析本系统检测结果。

4.1 光谱性能

光谱性能测试的前提首先是确定仪器扫描机构步数与实际波长的一一对应关系。基于此关系,对汞灯光谱进行连续波长扫描检测,控制软件界面如图3所示,测量结果如图4所示。

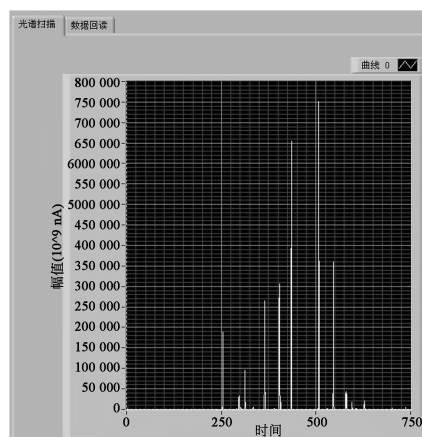


图3 连续波长扫描操作界面

Fig. 3 Operating interface of continuous wavelength scanning

由图3可见汞灯在紫外可见波段的几条强特征谱线均能实测,其中507.304 nm谱线实为253.652 nm的二级谱。对图3中谱线进行多次精细测量,可给出仪器对汞灯的波长重复性如

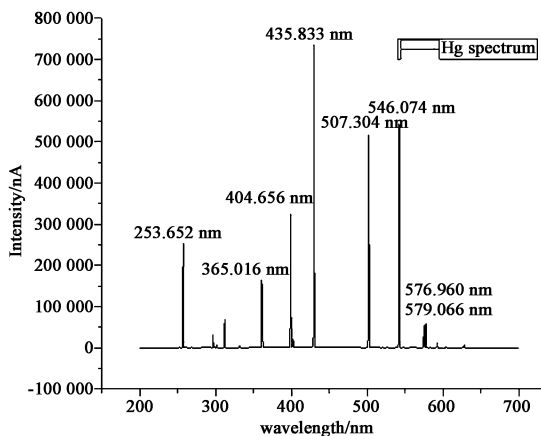


图 4 汞灯光谱实测图
Fig.4 Diagram of Mercury spectrum

表 1 所示。

表 1 汞灯波长精度及重复性
Tab.1 Wavelength accuracy and repeatability of Mercury

汞灯谱线	253.652	365.016	546.074
1	253.642 8	364.979 5	546.097 4
2	253.636 9	364.972 8	546.094 7
3	253.627 2	364.978 7	546.092 1
4	253.643 5	364.990 0	546.101 4
5	253.643 6	364.975 4	546.099 3
6	253.631 8	364.982 0	546.103 3
AVE	253.637 6	364.979 8	546.098 0
STD	0.006 9	0.006 0	0.004 2
$\Delta\lambda$	-0.014 4	-0.036 2	0.024 0

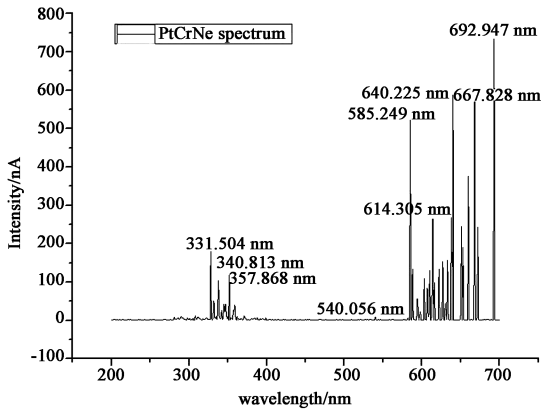


图 5 铂铬氖灯光谱实测图
Fig.5 Diagram of PtCrNe lamp spectrum

为进一步验证本系统的准确性,对铂铬氖灯光谱进行了连续波长测量,测量结果如图 5 所示。

从图 5 中可见其强特征谱线均能实测。对图 5 中谱线进行多次精细测量,可给出仪器对铂铬氖灯的波长重复性如表 2 所示。

表 2 铂铬氖灯波长精度及重复性
Tab. 2 Wavelength accuracy and repeatability of PtCrNe Lamp

铂铬氖灯谱线	331.504	585.249	692.947
1	331.4865	585.2781	692.9489
2	331.4901	585.2852	692.9687
3	331.4958	585.2784	692.9854
4	331.4859	585.2775	692.9549
5	331.4921	585.2748	692.9781
6	331.4892	585.2865	692.9589
AVE	331.4899	585.2801	692.9658
STD	0.0037	0.0047	0.0141
$\Delta\lambda$	-0.0141	0.0311	0.0188

利用不同线谱的汞灯及铂铬氖灯对仪器的波长机构进行实测,结果表明仪器能够准确的测量不同光源的光谱,验证了仪器的准确性,同时满足波长精度优于 $\pm 0.05\text{ nm}$,重复性优于 0.01 nm 的指标要求。

4.2 信噪比

在标准灯作为信号源条件下,利用系统控制波长扫描机构走到指定波长,采集 100 次信号及暗背景信号,界面如图 6 所示。

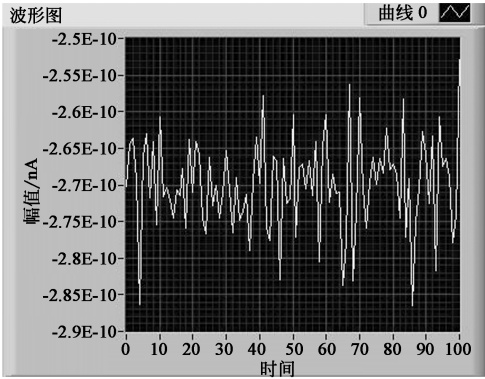


图 6 指定波长扫描操作界面
Fig.6 Operating interface of specified wavelength scanning

由3.4节分别给出各波长处的信噪比情况,如表3所示。

表3 仪器地面标准灯下信噪比

Tab.3 SNR of instrument with standard light on the ground

波长(nm)	理论 SNR	实测 SNR	实测/理论
250	13.2	10.33	0.78
280	141	130.2	0.92
300	195	193.68	0.99
400	589	597.57	1.01
500	664	712.41	1.07
600	1016	1081.3	1.06
700	690	644.64	0.93
800	129	120.45	0.93

如采用人工方式计算,不仅耗费大量的时间,并容易产生人为错误。本系统可以在1 s时间内自动计算得出信噪比,提高了工作效率。

由表3可知实测与理论信噪比不一致,在可见谱仪光谱范围两端,实测信噪比小于理论计算信噪比,而在光谱范围中段,实测信噪比略大于理论计算结果。事实上,可见谱仪在光谱范围两端受制于光栅效率及探测器灵敏度的双重影响,响应较弱,导致其理论信噪比不高,因而实测中其受到杂光、噪声等干扰的影响也大,进而影响信噪比。相反,光谱范围中段信号强,实测受到的干扰相对小,此外,仪器存在色差影响,像面沿光轴方向不重合,实际的装调与理论存在一定差异是正常的。

4.3 高斯拟合带宽

利用控制软件将4.1节中测试的汞灯各精细光谱读入,软件自动拟合并给出谱线的光谱带宽,操作界面如图7所示。

通过系统对各个标准波段进行自动高斯曲线拟合和带宽读取,结果如表4所示。

表4 光谱带宽

Tab.4 Spectral bandwidth

标准波长/nm	带宽/nm
253.652	0.81

续 表

标准波长/nm	带宽/nm
365.016	1.03
404.783	0.91
435.833	0.93
507.304	0.94
546.074	0.95
576.960	0.78
579.066	0.78

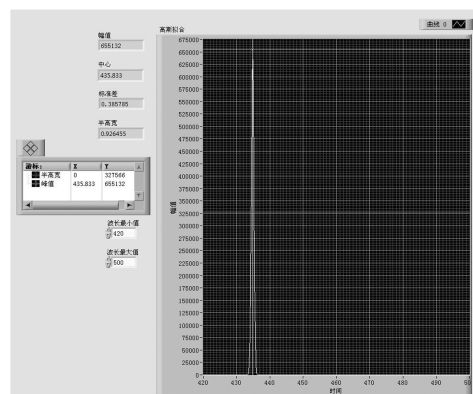


图7 高斯拟合操作界面

Fig.7 Operating interface of Gauss fitting

由表4可知,除365.016 nm受半峰影响外,仪器光谱带宽均小于1 nm,满足任务书1 nm的指标要求。

5 结 论

本文根据空间遥感光谱仪器载荷研制的实际需求,设计并实现了一套光学性能地面检测系统。该系统具有电机控制、指定波长扫描、连续波长扫描、实时显示光谱曲线、自动计算信噪比、高斯曲线拟合和自动带宽读取、数据回放等功能。通过实验表明该系统实现了空间遥感光谱仪器全波长覆盖的自动化光学性能地面检测,波长精度优于 ± 0.05 nm,重复性优于0.01 nm,光谱带宽小于1 nm,满足指标要求,并可在1 s内自动计算信噪比,提高了工作效率,为载荷研制奠定了基础。

参 考 文 献:

- [1] 胡君,王栋,孙天宇.现代航天光学成像遥感器的应用与发展[J].中国光学与应用光学,2010,3(6):519-533.
HU J, WANG D, SUN T Y. The application and development of recent space optical imaging remote sensors [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(6): 519-533. (in Chinese)
- [2] 刘恩超,李新,张艳娜,等.高精度太阳辐照度仪的光谱扫描测量[J].光谱学与光谱分析,2014,34(3):609-613.
LIU E C, LI X, ZHANG Y N, et al. Spectral scanning measurement of high-precision solar irradiance-meter [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 609-613. (in Chinese)
- [3] 王淑荣,李福田,宋克非,等.地外太阳紫外光谱测量[J].光学精密工程,2010,18(6):1271-1277.
WANG S R, LI F T, SONG K F, et al. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1271-1277. (in Chinese)
- [4] 王帅,高明辉,王文华.空间载荷地面检测设备的安全性设计研究[J].宇航计测技术,2012,32(1):56-60.
WANG S, GAO M H, WANG W H. The design of test equipment on-ground to assure manipulation security of payload [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2012, 32(1): 56-60. (in Chinese)
- [5] 张敏,金龙旭,李国宁,等.基于TDICCD空间相机图像模拟源系统设计[J].液晶与显示,2016,31(2):208-214.
ZHANG M, JIN L X, LI G N, et al. Design of image simulation system of TDICCD space camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 208-214. (in Chinese)
- [6] 胡君,王栋.空间相机地面实时动态集成测试技术[J].光学精密工程,2011,19(9):2177-2185.
HU J, WANG D. Real-time dynamic integration detection technology of space camera on the ground [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2177-2185. (in Chinese)
- [7] 宋江涛,沈湘衡.大型地面目标红外辐射亮度外场模拟系统[J].光学精密工程,2010,18(5):1035-1042.
SONG J T, SHEN X H. Outdoor simulation system of infrared radiance of large ground targets [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1035-1042. (in Chinese)
- [8] 王加朋,王淑荣,徐领娣,等.紫外辐射计的波长定标及不确定度分析[J].光电工程,2008,35(6):42-47.
WANG J P, WANG S R, XU L D, et al. Wavelength calibration for ultraviolet spectroradiometer and analysis of its uncertainty [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(6): 42-47. (in Chinese)
- [9] 薛庆生,王淑荣,李福田.紫外光电探测器高精度线性测量装置[J].仪表技术与传感器,2007(9):59-60,63.
XU Q S, WANG S R, LI F T. High precision linearity measurement instrument for ultraviolet photodetectors [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009(9): 59-60, 63. (in Chinese)
- [10] 沙定国,林家明,张旭升,等.光学测试技术[M].2版.北京:北京理工大学出版社,2010.
SHA D G, LIN J P, ZHANG X S, et al. *Optical Testing Technology* [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [11] Stanford Research Systems, Inc. Lock IN Amplifier-SR830 and SR810 [EB/OL]. [2016-09-01]. <http://www.thinksrs.com/products/SR810830.html>.
- [12] Tektronix, Inc. 6485 [EB/OL]. [2016-08-01]. <http://cn.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/6485.pdf>.
- [12] Stanford Research Systems, Inc. Photon Counter-SR400 [EB/OL]. [2016-09-01]. <http://www.thinksrs.com/products/SR400.html>.

作者简介:王岩(1986—),男,黑龙江宾县人,研究实习员,主要从事地面检测系统电子学方面的研究。E-mail: wangyanqy@sina.com